



ความเหมาะสมของวิธีการตรวจจัดการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระแบบโลคอลสำหรับ อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อในหลายหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว

Suitability of Local Islanding Detection Methods for Grid-Connected Inverter in Multi-Distributed Generation

มานพ ยิ่งรัมย์^{1*}

¹ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ

167 ถนนชัยภูมิ-ตาดโตน อำเภอเมือง จังหวัดชัยภูมิ 36000

Manop Yingram^{1*}

¹Department of Science and Technology, Faculty of Arts and Science, Rajabhat Chaiyaphum University

167 Chaiyaphum-Tadton Road, Muang, Chaiyaphum, Thailand, 36000

*ผู้รับผิดชอบบทความ: manopyin@hotmail.com เบอร์โทรศัพท์ 08-5134-6476

Received: 9 October 2022, Revised: 4 November 2022, Accepted: 28 November 2022

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอความเหมาะสมของเทคนิคการตรวจจัดการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระแบบโลคอลสำหรับอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อในหลายหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว เพื่อเป็นแนวทางในการใช้ประโยชน์เทคนิคแบบโลคอลสำหรับต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระซึ่งเกิดจากการติดตั้งหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ในบทความนี้ใช้หน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวจำนวน 5 ตัว ทำให้ได้ 15 รูปแบบ จากผลการจำลองการทำงานพบว่าหากหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวมีจำนวนเพิ่มขึ้นจนกระทั่งปริมาณกำลังไฟฟ้าของหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวเท่ากันหรือใกล้เคียงกับกำลังไฟฟ้าของโหลดทั้งระบบ ถ้าอินเวอร์เตอร์ของหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวทั้ง 5 ตัวใช้เทคนิคแบบพาสซีฟจะไม่สามารถตรวจจับได้ ถ้าใช้เทคนิคแบบแอคทีฟทั้งหมดจะสามารถตรวจจับได้ภายในเวลา 0.24 วินาที ถ้าใช้เทคนิคแบบไฮบริดทั้งหมดจะสามารถตรวจจับได้ภายในเวลา 0.282 วินาที และถ้าผสมเทคนิคแบบพาสซีฟ แบบแอคทีฟ และแบบไฮบริดจะสามารถตรวจจับได้ภายในเวลา 0.315 วินาที

คำสำคัญ การตรวจจัดการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ หน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว เชื่อมต่อกริด

Abstract

The research paper presents a suitability of local islanding detection methods for grid-connected inverter in multi-distributed generation, and possible usage of local techniques for an anti-islanding condition, which is caused by the ever-increasing installation of distributed generation. The paper uses 5 distributed generations, resulting in 15 forms. According to the simulation results, it was found that if the distributed generation is increasing until the power of the distributed generation equal or close to the power of the whole load, and if the inverter of all 5 distributed generations used a passive technique, they cannot be detected. If they used an active technique, they can be detected in 0.24 seconds. If they used a hybrid technique, they can be detected in 0.282 seconds. If they mixed passive, active and hybrid techniques, they can be detected in 0.315 seconds.

Keywords: Islanding Detection, Distributed Generation, Grid-Connected



1. บทนำ

การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนหรือพลังงานทดแทนนับเป็นแนวโน้มที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจาก เชื้อเพลิงที่ใช้ผลิตไฟฟ้าส่วนมากได้มาจากเชื้อเพลิงฟอสซิลซึ่งจะต้องหมดไป ความต้องการลดผลกระทบจากภาวะโลกร้อนเนื่องจากก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการผลิตไฟฟ้าด้วยเชื้อเพลิงฟอสซิล รวมทั้งแนวโน้มใน ความนิยม ไมโครกริด และสมาร์ตกริด ที่เพิ่มมากขึ้น [1-2] ทั้งหมดนี้ล้วนมีความสัมพันธ์กับ หน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Distributed Generation, DG) หน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่เพิ่มขึ้นช่วยสร้างเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้า แต่ก็สร้างปัญหาให้กับระบบไฟฟ้าเช่นกัน หนึ่งในปัญหาที่เกิดขึ้นนั้นคือ สภาวะการแยกตัวอิสระ สภาวะนี้ควรหลีกเลี่ยงรายละเอียดและเทคนิคต่าง ๆ มีอยู่ในหัวข้อที่ 2

โดยทั่วไปเทคนิคการตรวจจับสภาวะการแยกตัวอิสระหรือสภาวะการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ เพื่อต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระ (Anti-Islanding Condition) สามารถแบ่งได้หลัก ๆ คือ 1. เทคนิคแบบรีโมท เทคนิคแบบรีโมทใช้การตรวจจับผ่านระบบสื่อสาร ซึ่งเทคนิคในกลุ่มนี้มีประสิทธิภาพสูงมากและไม่มี พื้นที่ไร้การตรวจจับ (Non-Detection Zone) แต่จุดด้อยคือมีราคาแพงมากจึงไม่เหมาะที่จะใช้กับหน่วยผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก (หน่วยผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก คือ ≤ 10 kW) 2. เทคนิคแบบโลคอล เป็นเทคนิคที่นิยมนำมาใช้กับหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวขนาดเล็กเพราะราคาไม่แพง [3-9]

การเพิ่มมากขึ้นของหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว โดยเฉพาะขนาดเล็กที่ติดตั้งตามบ้านเรือน หรือโรงงาน เช่น การติดตั้งการผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์บนหลังคา Solar PV Rooftop ภายในระบบจะประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์ โดยที่อินเวอร์เตอร์ที่ติดตั้งตามบ้านเรือนหรือโรงงานเหล่านี้จะใช้เทคนิคในกลุ่มโลคอล การใช้เทคนิคแบบโลคอลนี้เมื่อมีหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวจำนวนมากอาจทำให้ไม่สามารถตรวจจับสภาวะการแยกตัวอิสระได้ เนื่องจากแม้โครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าแล้ว แต่ถ้าหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวจำนวนมากยังทำงานและมีปริมาณมากพอที่จะจ่ายภาระไฟฟ้าเป็นไปได้อินเวอร์เตอร์จะไม่สามารถตรวจจับได้ว่าสภาวะการแยกตัว

อิสระได้เกิดขึ้นแล้วเพราะผลจากการที่ระดับของแรงดันหรือความถี่ไม่เกินขอบเขตหรืออาจเกิดจากการรบกวนระหว่างสัญญาณของอินเวอร์เตอร์แต่ละตัวที่ฉีดเข้ามาในระบบเพื่อตรวจสอบสภาวะที่เกิดขึ้นทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่าอินเวอร์เตอร์แต่ละตัวนั้นใช้เทคนิคใดในการตรวจจับสภาวะการแยกตัวอิสระ [10-11] ดังนั้นการค้นคว้าความเหมาะสมของเทคนิคแบบโลคอลสำหรับอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อในหลายหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว นับเป็นเรื่องที่น่าสนใจในการทำวิจัย บทความนี้นำเสนอผลจากการวิจัยในประเด็นดังกล่าวโดยเป็นการสร้างแบบจำลองในรูปแบบอินเวอร์เตอร์หลายตัว บน Matlab/Simulink ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยวิเคราะห์แล้วเห็นว่าควรเลือกใช้ 5 ตัว โดยเลือกเทคนิคที่มีแนวโน้มที่จะใช้งานในอินเวอร์เตอร์เพื่อตรวจจับสภาวะการแยกตัวอิสระจากทั้ง 3 กลุ่มของแบบโลคอลดังนี้ เทคนิคแรงดันเกิน/แรงดันต่ำจากกลุ่มพาสซีฟ เทคนิคเปลี่ยนแรงดันแบบชานเดียวจากกลุ่มแอกทีฟ และเทคนิคแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำจากกลุ่มไฮบริด การจำลองการทำงานเป็นการสลับสับเปลี่ยนแต่ละเทคนิคภายในอินเวอร์เตอร์ทั้ง 5 ตัว ผลการจำลองการทำงานจะแสดงให้เห็นถึงผลการตรวจจับสภาวะการแยกตัวอิสระจากจำนวนการใช้แต่ละเทคนิคภายในอินเวอร์เตอร์ทั้ง 5 ตัว รายละเอียดต่าง ๆ ของบทความมีดังต่อไปนี้

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 เทคนิคการตรวจจับการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ

เทคนิคการตรวจจับการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ (Islanding Detection Techniques) เพื่อตรวจจับสภาวะการแยกตัวอิสระ และต่อต้านการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระไม่ให้เกิดขึ้นนั้นมีอยู่หลากหลายเทคนิค โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 เทคนิคหลัก คือ เทคนิคการตรวจจับการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระแบบโลคอล (Local Islanding Detection Techniques) และ เทคนิคการตรวจจับการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระแบบรีโมท (Remote Islanding Detection Techniques) โดยเทคนิคแบบโลคอลนี้สามารถแบ่งได้อีก 3 แบบ คือ เทคนิคแบบพาสซีฟเป็นการตรวจวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไป อาทิ แรงดัน ความถี่ ผลรวมฮาร์โมนิกส์ อื่น ๆ ข้อดีคือเทคนิคนี้จะไม่มีการฉีดสัญญาณเข้าไปรบกวนระบบแต่ข้อเสียคือมี พื้นที่ไร้



การตรวจจับกว้าง เทคนิคแบบแอดทีฟเป็นการฉีดสัญญาณเข้าไปสู่ระบบในจังหวะที่เกิดความสงสัยว่าเกิดสภาวะการแยกตัวอิสระแล้วหรือไม่โดยเทคนิคนี้มีพื้นที่ไร้การตรวจจับเล็กกว่าแบบพาสซีฟ แต่มีข้อเสียคือมีสัญญาณเข้าไปรบกวนคุณภาพไฟฟ้าของระบบ และเทคนิคสุดท้ายคือ เทคนิคแบบไฮบริดเป็นการนำคุณลักษณะของทั้ง แบบพาสซีฟ และแบบแอดทีฟ มารวมกัน [3-8]

สภาวะการแยกตัวอิสระ (Islanding Condition) เป็นสภาวะที่เกิดขึ้นเมื่อ โครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลัง หยุดการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบเพื่อจ่ายภาระไฟฟ้า แต่หน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว ยังคงจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับภาระไฟฟ้าอยู่ สภาวะการแยกตัวอิสระนี้อาจเกิดได้จากหลายสาเหตุ การเกิดสภาวะการแยกตัวอิสระนี้ควรจะหลีกเลี่ยง เพราะ เมื่อเกิดขึ้นแล้ว จะทำให้ แรงดันและความถี่ ณ จุดที่เกิดการแยกตัวออกไปนั้นเปลี่ยนแปลงซึ่งเป็นไปได้ที่ขนาดของแรงดันและความถี่ที่เกิดขึ้นจะไม่อยู่ในขอบเขตที่ยอมรับของอุปกรณ์เป็นผลให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์นั้น ๆ อาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ของการไฟฟ้า อาจสร้างอันตรายให้เกิดขึ้นกับผู้ปฏิบัติงาน ณ สายส่งที่สัมพันธ์กับการเกิดสภาวะการแยกตัวอิสระเพราะในสายส่งยังมีไฟฟ้าที่ส่งมาจากหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว แต่มีการสันนิษฐานว่าไม่มีไฟฟ้าในสายส่งนั้นแล้ว เมื่อมีการกลับเข้ามาเชื่อมต่อในโครงข่ายระบบไฟฟ้าอีกครั้งหลังจากที่แยกออกไปก่อนหน้าอาจจะส่งผลให้เกิดการ รีทริป (Re-Tripping) หรือ เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ต่าง ๆ เพราะ เกิดความต่างเฟส การแก้ปัญหาสภาวะการแยกตัวอิสระมีมาตรฐานหลัก ๆ ที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วย IEEE Std. 929, IEEE Std. 1547, The International Standard IEC 62116, UL 1741, Japanese Standard (JET Std. 2002), และ Korean Standard (Korean PV 501, 2008) โดยทั่วไปทุกมาตรฐานมีบทสรุปที่สำคัญตรงกันหรือไปทำนองเดียวกันว่าระบบเชื่อมต่อของหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว จะต้องตรวจจับและหยุดการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่โครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลังภายในสองวินาทีนับตั้งแต่สภาวะการแยกตัวอิสระเริ่มเกิดขึ้น รายละเอียดของเทคนิคการตรวจจับการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระทั้งหมดได้กล่าวถึงแล้วในรายงานการวิจัย และบทความต่าง ๆ [3-9] ในบทความนี้จะให้รายละเอียดเบื้องต้น

เฉพาะเทคนิคแบบโลคอลที่เลือกจากทั้ง 3 กลุ่ม คือ พาสซีฟ แอดทีฟ และไฮบริด ดังนี้

2.1.1 เทคนิคแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ และ ความถี่เกิน/ความถี่ต่ำ (Over/Under-Voltage (OUV) and Over/Under-Frequency (OUF) Technique)

เป็นเทคนิคจากกลุ่มพาสซีฟเป็นการวัดแรงดันหรือวัดความถี่ ณ จุด Point of Common Coupling (PCC) ซึ่งสามารถใช้รีเลย์ตรวจจับ ณ จุด PCC เพื่อต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระ โดยทำการตั้งค่ารีเลย์ให้ตรวจจับ แรงดัน/ความถี่ เกิน หรือแรงดัน/ความถี่ ต่ำกว่าที่กำหนดไว้ตามมาตรฐาน

2.1.2 เทคนิคเปลี่ยนแรงดันแบบซานเดีย (Sandia Voltage Shift (SVS) Technique)

เป็นเทคนิคจากกลุ่มแอดทีฟ เทคนิคนี้ใช้การควบคุมแบบกระตุ้นย้อนกลับในการป้องกันการแยกตัวอิสระ เทคนิคเปลี่ยนแรงดันแบบซานเดีย จะทำการเปลี่ยนขนาดกระแสในฟังก์ชันของขนาดแรงดัน เมื่อสภาวะการแยกตัวอิสระเกิดขึ้น การเปลี่ยนขนาดกระแสจะขึ้นกับการเปลี่ยนขนาดแรงดันโดยทำการเปลี่ยนแรงดันอินเวอร์เตอร์ให้มีขนาดมากกว่า Over Voltage Relay (OVR) หรือน้อยกว่า Under Voltage Relay (UVR) ซึ่งเมื่อหากสภาวะที่เกิดขึ้นเป็นสภาวะการแยกตัวอิสระ OVR หรือ UVR จะทำงานเป็นผลให้อินเวอร์เตอร์หลุดออกจากโครงข่ายระบบไฟฟ้า

2.1.3 เทคนิคแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ

(Over/Undervoltage and Undervoltage Shift Technique)

เป็นเทคนิคจากกลุ่มไฮบริด เทคนิคนี้จะวัดแรงดันทุกครั้งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแล้วใช้การตรวจจับแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ โดยใช้มาตรฐานสากล IEC 62116 แรงดันเกินคือมากกว่า 115% และแรงดันต่ำน้อยกว่า 85% ในการตรวจสอบซึ่งเป็นลักษณะของเทคนิคในกลุ่มแบบพาสซีฟ โดยหากยังไม่เป็นสภาวะการแยกตัวอิสระ DG จะยังไม่หยุดทำงาน จะทำการตรวจสอบอีกครั้งว่าเป็นสภาวะการแยกตัวอิสระหรือไม่โดยการเปลี่ยนแรงดันต่ำ 84% 3 รูปคลื่น เข้าสู่ระบบเพื่อทำการตรวจสอบอีกครั้ง

2.2 แบบจำลองอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสเชื่อมต่อโครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลัง

แบบจำลองอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส สำหรับเชื่อมต่อโครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลังมีลักษณะเช่นเดียวกับรูปที่ 2 เพียงแต่ปราศจาก



บล็อกต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระ รายละเอียดต่าง ๆ ของการสร้างแบบจำลองได้แสดงไว้แล้วในรายงานวิจัย [9] รวมทั้งมีการจำลองการทำงานเพื่อเปรียบเทียบกับอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส สำหรับเชื่อมต่อโครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในทางปฏิบัติในหัวข้อ 2.3 โดยทำการจำลองการทำงานทั้งหมด 8 กรณี เริ่มจาก สภาวะมีการเกิดการแยกตัวอิสระ $\Delta P/P = -40\%$ จนถึง $\Delta P/P = 40\%$ จะทำการสร้างสภาวะการแยกตัวอิสระโดยทำการปลด Grid ออกไป ณ เวลา 0.2 วินาที ในบทความนี้นำเสนอเฉพาะค่าที่ได้รับจากผลการจำลองการทำงานดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการจำลองการทำงานบน Matlab/Simulink

$\Delta P/P$ (%)	On Grid			Off Grid
	V_{PCC} (V)	$V_{PCC} * 115\%$	$V_{PCC} * 85\%$	V_{PCC} (V)
-40	220	253	187	293
-30	220	253	187	281
-20	220	253	187	212
-10	220	253	187	206
0	220	253	187	200
10	220	253	187	196
20	220	253	187	191
30	220	253	187	189
40	220	253	187	174

2.3 ผลการจำลองการทำงาน เปรียบเทียบกับ ผลการทดลองของอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสในทางปฏิบัติ

ในส่วนนี้จะแสดงให้เห็นว่าภายหลังจากการเกิดสภาวะการแยกตัวอิสระเกิดขึ้น แบบจำลองที่สร้างขึ้นมีผลการจำลองการทำงานที่สอดคล้องกับผลการทดลองของอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสในทางปฏิบัติ ในตารางที่ 3 เป็นข้อมูลที่ได้จากการทดลองในอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส ขนาด 1 kW ในการทดลองในห้องปฏิบัติการวิจัยและพัฒนาอิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยนำเสนอเฉพาะค่าที่ได้รับไม่รวมรูปที่บันทึกได้จากออสซิลโลสโคป [9]

เมื่อพิจารณาตารางที่ 3 ในหลักที่ 4 คือ $\Delta P/P(\%)$ การเปลี่ยนแปลงของหลักนี้จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันภายหลังจากการเกิดสภาวะการแยกตัวอิสระในหลักที่ 8 คือ V_{PCC} ณ ช่วง Off Grid ซึ่งทั้งสองหลักแปรผกผันกัน เมื่อพิจารณาผลการจำลองการทำงานในตารางที่ 2 และผลการทดลองในห้องปฏิบัติการในตารางที่ 2 จะพบว่ามีความสอดคล้องกัน

ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกำลังไฟฟ้าจริง

P_{load} (kW)	P (kW)	ΔP (kW)	$\Delta P/P$ (%)	On Grid			Off Grid
				V_{PCC} (V)	$V_{PCC} * 15\%$	$V_{PCC} * 85\%$	V_{PCC} (V)
0.6	1	-0.4	-40	226.3	260.2	192.4	253.2
0.77	1	-0.3	-30	233.4	268.4	198.4	249.3
0.8	1	-0.2	-20	231.6	266.3	196.9	240.5
0.9	1	-0.1	-10	229.8	264.3	195.3	191.0
1	1	0	0	229.8	264.3	195.3	175.0
1.1	1	0.1	10	226.3	260.2	192.4	159.1
1.2	1	0.2	20	229.8	264.3	195.3	148.5

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

เมื่อทำการสร้างบล็อกต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระของทั้ง 3 เทคนิค จะทำให้ได้บล็อกต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระ ดังในรูปที่ 1 ส่วนในรูปที่ 2 แสดงการใช้บล็อกต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระภายในแบบจำลองอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส จำนวน 1 ตัว โดยผลการจำลองการทำงาน รายละเอียดภายในแต่ละบล็อก และรายละเอียดต่าง ๆ ของแต่ละเทคนิคได้รับการตีพิมพ์มาแล้ว [4],[5],[7]



(ก) เทคนิคแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ



(ข) เทคนิคเปลี่ยนแรงดัน



(ค) เทคนิคแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ

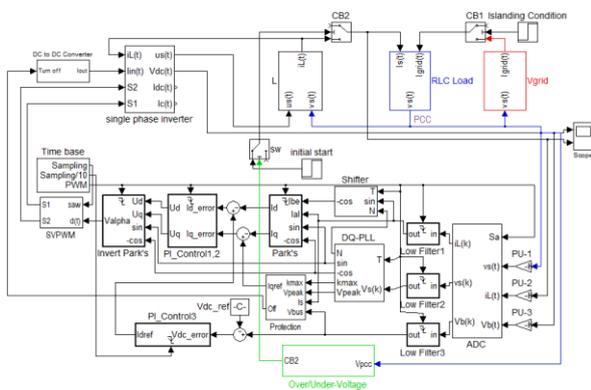
รูปที่ 1 บล็อกต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระ

เมื่อนำแบบจำลองอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส ในรูปที่ 2 จำนวน 5 ตัวมารวมกันจ่ายโหลดแบบเชื่อมต่อโครงข่ายระบบไฟฟ้าจะทำให้ได้ดังรูปที่ 3

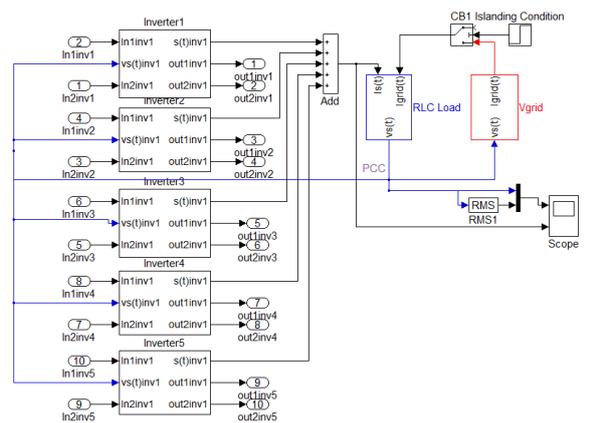
เมื่อพิจารณาการจำลองการทำงานของทั้ง 3 เทคนิคภายในอินเวอร์เตอร์ทั้ง 5 ตัวพบว่าสามารถจำลองการทำงานได้ 15 รูปแบบ โดยการจำลองการทำงานของทั้ง 15 รูปแบบจะกระทำภายใต้เงื่อนไขเดียวกันคือ เมื่อเกิดสภาวะการแยกตัวอิสระที่ปริมาณกำลังไฟฟ้าของโหลดเท่ากับกำลังไฟฟ้าของหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว นั่นคือจุดที่ $\Delta P/P = 0\%$ ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ตรวจจับและต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระที่ยากที่สุด จากนั้นจะนำเสนอผลการจำลองการทำงานใน



แต่ละเทคนิคพร้อมอภิปรายผล และนำเสนอรูปภาพเฉพาะ การจำลองการทำงานในรูปแบบที่ 1 รูปแบบที่ 4 รูปแบบที่ 6 และรูปแบบที่ 10 เพราะเป็นภาพผลการจำลองการทำงานที่ น่าสนใจ โดยรายละเอียดผลการจำลองการทำงานทั้งหมด สามารถหาเพิ่มเติมได้จากรายงานการวิจัยเรื่อง “การค้นคว้า ความเหมาะสมของวิธีการตรวจจับการเกิดการจ่ายไฟแบบ แยกตัวอิสระแบบโลคอลสำหรับอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อใน หลายหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว” ที่กำลังจัดพิมพ์ เผยแพร่ในโอกาสต่อไป การจำลองการทำงานจะสร้างสภาวะ การแยกตัวอิสระให้เกิดขึ้นที่เวลา 0.2 วินาที



รูปที่ 2 แบบจำลองอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส โดยใช้บล็อกเทคนิค แบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ

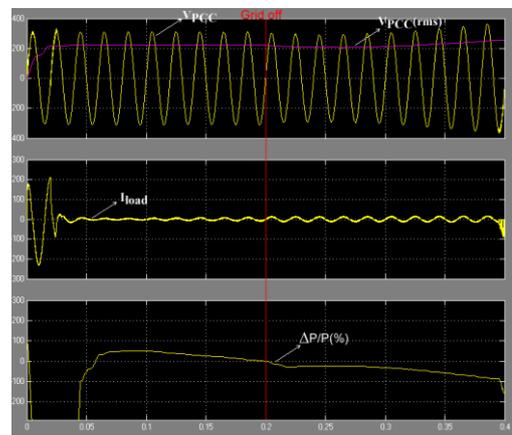


รูปที่ 3 แบบจำลองอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส 5 ตัว ร่วมกันจ่าย โหลดแบบเชื่อมต่อโครงข่ายระบบไฟฟ้า

3.1 เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ 5 ตัว

จากผลการจำลองการทำงานสร้างสภาวะการแยกตัว อิสระที่เวลา 0.2 วินาที จะเห็นได้จากรูปที่ 4 และ 5 ว่าไม่ สามารถตรวจจับสภาวะการแยกตัวอิสระได้ เนื่องจากแรงดัน

ภายหลังจากสภาวะการแยกตัวอิสระอยู่นอกขอบเขต ที่เทคนิคนี้สามารถตรวจจับได้ ในบทความนี้ใช้มาตรฐาน IEC 62116 ดังนั้นเทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำนี้จะตรวจจับ สภาวะการแยกตัวอิสระได้เมื่อแรงดันมากกว่า 253 V ($V > 115%$ ถ้ากำหนดแรงดันก่อนการเกิดสภาวะการแยกตัวอิสระ ให้คงที่เท่ากับ 220 V จะได้ $220 \times 115\% = 253$ V) หรือ แรงดันน้อยกว่า 187 V ($V < 85%$ จะได้ $220 \times 85\% = 187$ V) โดยภาพจาก Scope ใน Inverter ตัวที่ 1 ถึงตัวที่ 5 มี ลักษณะเช่นเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 4 ภาพจาก Scope หลัก รูปแบบที่ 1



รูปที่ 5 ภาพจาก Scope ใน Inverter 1-5 รูปแบบที่ 1

3.2 เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ 4 ตัว เทคนิคแบบ เปลี่ยนแรงดัน 1 ตัว

รูปแบบที่ 2 ใช้เวลาตรวจจับและต่อต้านสภาวะการ แยกตัวอิสระได้ภายในเวลา 0.264 วินาที ภายในบล็อก



Inverter แต่ละตัวหยุดภายในเวลาเดียวกัน โดย Inverter ตัวที่ 1-4 จะมีลักษณะรูปคลื่นที่เกิดขึ้นเหมือนกัน ส่วน Inverter ตัวที่ 5 มีลักษณะของรูปคลื่นกระแส I_{load} แตกต่างออกไป เนื่องจากผลของเทคนิคแบบเปลี่ยนแรงดัน

3.3 เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ 3 ตัว เทคนิคแบบเปลี่ยนแรงดัน 1 ตัว เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ 1 ตัว

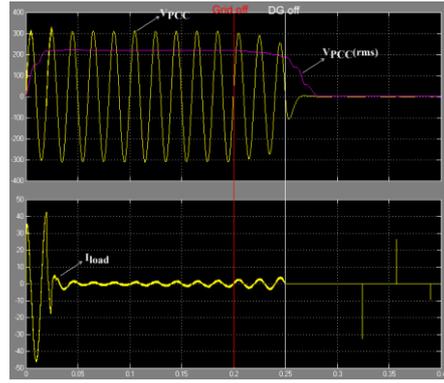
รูปแบบที่ 3 ใช้เวลา 0.264 วินาที ภายในบล็อก Inverter แต่ละตัวหยุดภายในเวลาเดียวกัน โดย Inverter ตัวที่ 1-3 มีลักษณะรูปคลื่นที่เกิดขึ้นเหมือนกัน ส่วน Inverter ตัวที่ 4 มีลักษณะของรูปคลื่นกระแส I_{load} แตกต่างออกไป เนื่องจากผลของเทคนิคแบบเปลี่ยนแรงดันส่วน Inverter ตัวที่ 5 มีลักษณะคล้ายคลึงกับภาพ Inverter ตัวที่ 1-3 เพียงแต่ขนาดกระแส I_{load} ในช่วงรูปคลื่น สุดท้ายก่อนที่ DG_{off} จะมีขนาดกระแสที่น้อยกว่าเล็กน้อย เนื่องจากผลของเทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ โดยที่ทั้งหมดหยุดที่เวลาเดียวกัน

3.4 เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ 2 ตัว เทคนิคแบบเปลี่ยนแรงดัน 2 ตัว เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ 1 ตัว

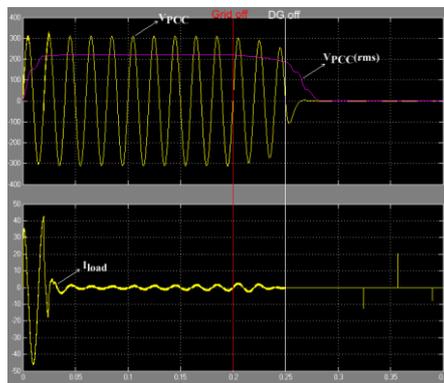
รูปแบบที่ 4 ใช้เวลา 0.25 วินาที ภายในบล็อก Inverter แต่ละตัวหยุดภายในเวลาเดียวกัน โดย Inverter ตัวที่ 1-2 มีลักษณะรูปคลื่นที่เกิดขึ้นเหมือนกับรูปที่ 6 ส่วน Inverter ตัวที่ 3-4 แสดงดังรูปที่ 7 ส่วนในรูปที่ 8 เป็นภาพจาก Scope ของ Inverter ตัวที่ 5 โดยใช้เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ แต่เมื่อสังเกตจะเหมือนกับรูปที่ 6

3.5 เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ 1 ตัว เทคนิคแบบเปลี่ยนแรงดัน 2 ตัว เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ 2 ตัว

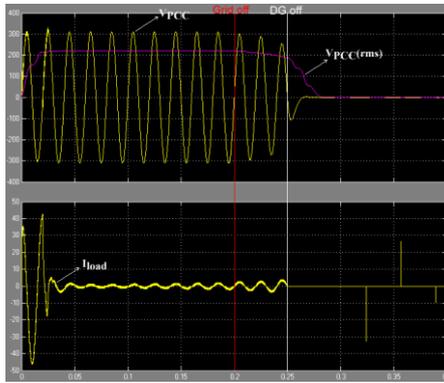
รูปแบบที่ 5 ใช้เวลา 0.25 วินาที ภายในบล็อก Inverter แต่ละตัวหยุดภายในเวลาเดียวกัน โดย Inverter ตัวที่ 1 ใช้เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ และ Inverter ตัวที่ 4-5 มีลักษณะรูปคลื่นที่เกิดขึ้นเหมือนกัน ซึ่งจะแตกต่างจาก Inverter ตัวที่ 2-3 ที่ใช้เทคนิคแบบเปลี่ยนแรงดัน



รูปที่ 6 ภาพจาก Scope ใน Inverter 1-2 รูปแบบที่ 4



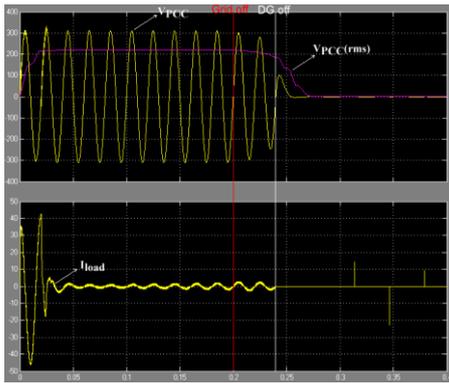
รูปที่ 7 ภาพจาก Scope ใน Inverter 3-4 รูปแบบที่ 4



รูปที่ 8 ภาพจาก Scope ใน Inverter 5 รูปแบบที่ 4

3.6 เทคนิคแบบเปลี่ยนแรงดัน 5 ตัว

รูปแบบที่ 6 ใช้เวลา 0.24 วินาที ภายในบล็อก Inverter แต่ละตัวหยุดภายในเวลาเดียวกัน โดย Inverter ตัวที่ 1-5 มีลักษณะเดียวกับรูปที่ 9



รูปที่ 9 ภาพจาก Scope ใน Inverter 1-5 รูปแบบที่ 6



รูปที่ 10 ภาพจาก Scope ใน Inverter 1-5 รูปแบบที่ 10

3.7 เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ 1 ตัว เทคนิคแบบเปลี่ยนแรงดัน 4 ตัว

รูปแบบที่ 7 ใช้เวลา 0.243 วินาที ภายในบล็อก Inverter แต่ละตัวหยุดภายในเวลาเดียวกัน โดย Inverter ตัวที่ 2-5 มีลักษณะรูปคลื่นที่เกิดขึ้นเหมือนกัน ซึ่งจะแตกต่างจาก Inverter ตัวที่ 1 ที่ใช้เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ

3.8 เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ 1 ตัว เทคนิคแบบเปลี่ยนแรงดัน 3 ตัว เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ 1 ตัว

รูปแบบที่ 8 ใช้เวลา 0.245 วินาที ภายในบล็อก Inverter แต่ละตัวหยุดภายในเวลาเดียวกัน โดย Inverter ตัวที่ 1 และ ตัวที่ 5 มีลักษณะรูปคลื่นที่เกิดขึ้นเหมือนกัน ซึ่งจะแตกต่างจาก Inverter ตัวที่ 2-4 ที่ใช้เทคนิคแบบเปลี่ยนแรงดัน

3.9 เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ 2 ตัว เทคนิคแบบเปลี่ยนแรงดัน 1 ตัว เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ 2 ตัว

รูปแบบที่ 9 ใช้เวลา 0.264 วินาที ภายในบล็อก Inverter แต่ละตัวหยุดภายในเวลาเดียวกัน โดย Inverter ตัวที่ 1-2 และ ตัวที่ 4-5 มีลักษณะรูปคลื่นที่เกิดขึ้นเหมือนกัน ซึ่งจะแตกต่างจาก Inverter ตัวที่ 3 ที่ใช้เทคนิคแบบเปลี่ยนแรงดัน

3.10 เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ 5 ตัว

รูปแบบที่ 10 ใช้เวลา 0.282 วินาที ภายในบล็อก Inverter แต่ละตัวหยุดภายในเวลาเดียวกัน โดย Inverter ตัวที่ 1-5 มีลักษณะเดียวกับรูปที่ 10

3.11 เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ 1 ตัว เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ 4 ตัว

รูปแบบที่ 11 ใช้เวลา 0.284 วินาที ภายในบล็อก Inverter แต่ละตัวหยุดภายในเวลาเดียวกัน โดย Inverter ตัวที่ 2-5 มีลักษณะรูปคลื่นที่เกิดขึ้นเหมือนกัน ซึ่งจะแตกต่างจาก Inverter ตัวที่ 1 ที่ใช้เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ

3.12 เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ 1 ตัว เทคนิคแบบเปลี่ยนแรงดัน 1 ตัว เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ 3 ตัว

รูปแบบที่ 12 ใช้เวลา 0.264 วินาที ภายในบล็อก Inverter แต่ละตัวหยุดภายในเวลาเดียวกัน โดย Inverter ตัวที่ 1 และ ตัวที่ 3-5 มีลักษณะรูปคลื่นที่เกิดขึ้นเหมือนกัน เพียงแต่ขนาดกระแส I_{load} ในช่วงรูปคลื่นสุดท้ายก่อนที่ DG_{off} ของ Inverter ตัวที่ 3-5 จะมีขนาดกระแสที่น้อยกว่าเล็กน้อย เนื่องจากผลของเทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ ซึ่งจะแตกต่างจาก Inverter ตัวที่ 2 ที่ใช้เทคนิคแบบเปลี่ยนแรงดัน

3.13 เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ 4 ตัว เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ 1 ตัว

รูปแบบที่ 13 ใช้เวลา 0.315 วินาที ภายในบล็อก Inverter แต่ละตัวหยุดภายในเวลาเดียวกัน โดย Inverter ตัวที่ 1-4 มีรูปคลื่นลักษณะเดียวกับ ส่วน Inverter ตัวที่ 5 จะแตกต่างออกไปเนื่องจากผลของเทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ



3.14 เทคนิคแบบเปลี่ยนแรงดัน 4 ตัว เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ 1 ตัว

รูปแบบที่ 14 ใช้เวลา 0.243 วินาที ภายในบล็อก Inverter แต่ละตัวหยุดภายในเวลาเดียวกัน โดย Inverter ตัวที่ 1-4 มีรูปคลื่นลักษณะเดียวกับ ส่วน Inverter ตัวที่ 5 จะแตกต่างออกไปเนื่องจากผลของเทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ

3.15 เทคนิคแบบเปลี่ยนแรงดัน 1 ตัว เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ 4 ตัว

รูปแบบที่ 15 ใช้เวลา 0.264 วินาที ภายในบล็อก Inverter แต่ละตัวหยุดภายในเวลาเดียวกัน โดย Inverter ตัวที่ 2-5 มีรูปคลื่นลักษณะเดียวกับ ส่วน Inverter ตัวที่ 1 จะแตกต่างออกไปเนื่องจากผลของเทคนิคแบบเปลี่ยนแรงดัน

4. บทสรุป

เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำเป็นเทคนิคแบบพาสซีฟ เมื่อปริมาณของกำลังไฟฟ้าของหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวเท่ากันหรือใกล้เคียงกับกำลังไฟฟ้าของโหลดทั้งระบบจะทำให้ไม่สามารถตรวจจับสถานะการแยกตัวอิสระได้ ดังจะเห็นได้จากรูปแบบที่ 1 เนื่องจากแรงดันภายหลังจากสถานะการแยกตัวอิสระอยู่นอกขอบเขตที่เทคนิคนี้สามารถตรวจจับได้ บทความนี้ใช้มาตรฐาน IEC 62116 ดังนั้นเทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ จะตรวจจับได้เมื่อแรงดันมากกว่า 253 V หรือ แรงดันน้อยกว่า 187 V

จากผลการจำลองรูปแบบที่ 2 ถึง รูปแบบที่ 15 พบว่า สามารถตรวจจับการแยกตัวอิสระได้ทั้งหมดโดยใช้เวลาแตกต่างกันเล็กน้อย โดยถ้าใช้เทคนิคแบบแอคทีฟทั้งหมดจะใช้เวลา 0.24 วินาที และถ้าใช้เทคนิคแบบไฮบริดทั้งหมดจะใช้เวลา 0.282 วินาที และถ้าผสมผสานเทคนิคแบบพาสซีฟแบบแอคทีฟ และแบบไฮบริดเข้าด้วยกันจะใช้เวลา 0.315 วินาที แต่ทั้งหมดยังอยู่ในเงื่อนไขของมาตรฐานที่กำหนดว่า ต้องตรวจจับและหยุดการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่โครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลังภายในสองวินาที นับตั้งแต่เมื่อสถานะการแยกตัวอิสระเริ่มเกิดขึ้น ดังนั้นจึงควรใช้เทคนิคที่แตกต่างกันไปในอินเวอร์เตอร์แต่ละตัว หรือ ใช้เทคนิคแบบไฮบริดในอินเวอร์เตอร์ทั้งหมดเพื่อลดผลกระทบจากการฉีดยุติ

เข้าไปตรวจสอบสถานะที่เกิดขึ้นในทุก ๆ ครั้งที่ต้องการตรวจสอบสถานะที่เกิดขึ้นหากใช้เทคนิคแบบแอคทีฟ

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทุนอุดหนุนการวิจัย จาก กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (กสว.) : งบประมาณด้านวิจัยและนวัตกรรม ประเภท Fundamental Fund ประจำปีงบประมาณ 2565

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Sawin JL, Rutovitz J, Sverrisson F, et al. A comprehensive annual overview of the state of renewable energy. Advancing the global renewable energy transition-Highlights of the REN21 Renewables 2018 Global Status Report in perspective. Available from: <https://www.ren21.net/gsr-2018/> [Accessed 8th July 2022].
- [2] Energy Policy and Planning Office. The plan to drive Thailand's smart grid operations in the short term (B.E.2560-2564). Ministry of Energy. Available from: https://www.eppo.go.th/images/Power/pdf/smart_grid_actionplan.pdf [Accessed 8th July 2022].
- [3] Y Ingram M. Passive islanding detection techniques of anti-islanding for grid-connected distributed generation. Ladkrabang Engineering Journal. 2013;30(3):19-24.Thai.
- [4] Y Ingram M. Over/under-voltage islanding detection technique of anti-islanding for grid-connected distributed generation on matlab/simulink. Ladkrabang Engineering Journal. 2015;32(1):67-72.Thai.
- [5] Y Ingram M, Premrudeepreechacharn S. Over/undervoltage and undervoltage Shift of hybrid islanding detection method of distributed generation. The Scientific World Journal. 2015.
- [6] Y Ingram M. Active islanding detection techniques of anti-islanding for grid-connected distributed generation: part 1. Ladkrabang Engineering Journal. 2016;33(2):1-7.Thai.



- [7] Y Ingram M, Soonrad D. Active islanding detection techniques of anti-islanding for grid-connected distributed generation (part 2). *RMUTI Journal Science and Technology*. 2017;10(1):11-21.Thai.
- [8] Y Ingram M. Remote islanding detection techniques of anti-islanding for grid-connected distributed generation. *RMUTI Journal Science and Technology*. 2020;13(2):1-17.Thai.
- [9] Y Ingram M. Development of anti-islanding hybrid detection technique in grid-connected distributed generation. PhD thesis. Chiang Mai University; 2014.
- [10] Chen X, Li Y, Crossley P. A novel hybrid islanding detection method for grid-connected microgrids with multiple inverter-based distributed generators based on adaptive reactive power disturbance and passive criteria. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2018 Dec 14;34(9):9342-56.
- [11] Ke J, Zhengxuan Z, Qijuan Z, Zhe Y, Tianshu B. Islanding detection method of multi-port photovoltaic DC micro grid based on harmonic impedance measurement. *IET Renewable Power Generation*. 2019 Oct;13(14):2604-11.