

การวิเคราะห์เสถียรภาพวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเมื่อต่อกับวงจรกรองสัญญาณรบกวน แม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์

Stability Analysis of a Power-switching Converter with an EMI Filter for PV Systems

สันติชัย บุญเรือง¹ วุฒิพล ธาราธิระเศรษฐ์^{2*}

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ถ.รังสิต-นครนายก อ.องครักษ์ จ.นครนายก 26120

²รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ อดิศร

ถ.รังสิต-นครนายก อ.องครักษ์ จ.นครนายก 26120

Santichai Boonruang¹ Vuttipon Tarateeraseth^{2*}

¹Student, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University

Rangsit - Nakhon Nayok Rd., Ongkharak, Nakhonnayok, 26120

²Associate/Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering

Srinakharinwirot University, Rangsit - Nakhon Nayok Rd., Ongkharak, Nakhonnayok, 26120

Corresponding author: Email: santichai3546@gmail.com, vuttipon@g.swu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเมื่อต่อกับวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ หลักการของการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการเปรียบเทียบขนาดอิมพีแดนซ์จะถูกนำมาใช้เพื่อการศึกษาว่า ขนาดอินพุตอิมพีแดนซ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าต้องมากกว่าขนาดเอาต์พุตอิมพีแดนซ์วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเท่าไรที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพ โดยทำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ในวงจรกรองเพื่อให้ขนาดเอาต์พุตอิมพีแดนซ์เกิดการเปลี่ยนแปลง นอกจากนั้นเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของวิธีดังกล่าว แผนภาพโบเด แผนภาพไนควิสต์ แผนภาพโพล-ซีโร่ และการหารากจากสมการคุณลักษณะของระบบจากโพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบปิด ได้ถูกนำมาใช้วิเคราะห์เสถียรภาพโดยนำผลที่ได้มาทำการเปรียบเทียบผลการจำลอง จากผลการจำลองพบว่าขนาดที่แตกต่างกันจากการเปรียบเทียบขนาดอิมพีแดนซ์ที่น้อยที่สุดที่ยังคงทำให้ระบบนั้นมีเสถียรภาพคือ 10 dB โดยที่มีขนาดแตกต่างกันเพียงแค่ช่วงหนึ่งของย่านความถี่ทั้งหมดเท่านั้น

คำสำคัญ: วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ระบบผลิตไฟฟ้าชนิดเชื่อมต่อกริด วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า
เสถียรภาพ

ABSTRACT

This paper presents the stability analysis of a power-switching converter with an EMI filter for PV systems. Impedance comparison technique, typically used by EMI filter designers, is investigated. The accuracy of this technique is compared to other techniques i.e. Bode plot, Nyquist plot, Pole-

Zero plot, and closed-loop poles. From the simulated results, it can be concluded that the impedance comparison technique is valid, and the overall system is stable if the input impedance of a power-switching converter is at least 10 dB higher than the output impedance of an EMI filter only at some certain frequency.

Keyword: EMI filters, grid-connected systems, power-switching converters, stability.

1. บทนำ

ในปัจจุบันการใช้พลังงานทดแทนเพื่อที่จะนำมาใช้ในการผลิตไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง การใช้เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) ถือว่าเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ยินยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย ในการผลิตไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีจะต้องสามารถผลิตไฟฟ้าได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยระบบต้องมีความเสถียร (ในที่นี้คือแรงดันเอาต์พุตที่ได้จะต้องมีค่าคงที่) และเมื่อเชื่อมต่อเข้ากับระบบแล้วจะต้องไม่มีการรบกวนจากสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในวงจร [1]

ในงานวิจัย [2] ได้ทำการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI filter) โดยใช้วงจรกรอง LCL สำหรับกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากอินเวอร์เตอร์ โดยวงจรกรอง LCL จะถูกเชื่อมต่อระหว่างอินเวอร์เตอร์กับกริดของการไฟฟ้า ซึ่งการเชื่อมต่อวงจรกรองจะแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบคือ 1) การเชื่อมต่อวงจรกรองแบบวาย 2) การเชื่อมต่อวงจรกรองแบบเดลตา จากผลการทดลองพบว่าการใช้วงจรกรอง LCL สามารถลดสัญญาณรบกวนได้ตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ (IEEE-519 และ IEEE-1547) แต่ไม่สามารถระบุได้ว่าเมื่อใส่วงจรกรอง LCL เข้าไปแล้วจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบหรือไม่

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบเซลล์แสงอาทิตย์สามารถทำได้หลากหลายวิธี [3]-[5] ในงานวิจัย [3]-[5] ได้ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบเมื่อทำการใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโดยวิเคราะห์จากแผนภาพโบเด (Bode-plot) และวิธี

เรอท์เฮอรวิท (Routh-Hurwitz criterion) ซึ่งได้มาจากฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเมื่อทำการใส่วงจรกรอง แต่ไม่ได้คำนึงถึงเงื่อนไขในการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ระบบมีผลตอบสนองที่ดีซึ่งเป็นการบ่งบอกได้ว่าระบบนั้นเป็นระบบที่มีเสถียรภาพมาก

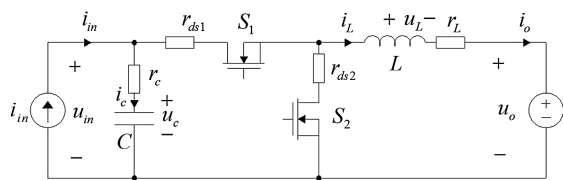
โดยทั่วไปในทางปฏิบัติจะนิยมใช้วิธีการเปรียบเทียบขนาดอิมพีแดนซ์ (Impedance comparison) มาใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพเนื่องจากในการหาค่าอิมพีแดนซ์สามารถหาได้จากการจำลองหรือจากการวัดได้จริง โดยที่ไม่มีความยุ่งยากซับซ้อนเหมือนวิธีอื่น แต่จากนิยาม [6], [7] $|Z_o(s)| \ll |Z_{in}(s)|$ ของการเปรียบเทียบขนาดอิมพีแดนซ์ที่ไม่สามารถระบุได้ชัดเจนว่า ขนาดอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าต้องมากกว่าขนาดเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเท่าไรนั้นที่ยังทำให้ระบบมีเสถียรภาพ ดังนั้น จุดประสงค์ของบทความนี้จึงได้ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการเปรียบเทียบขนาดอิมพีแดนซ์เพื่อศึกษาว่าความแตกต่างของขนาดอิมพีแดนซ์เล็กน้อยเพียงใดที่ยังคงทำให้ระบบมีเสถียรภาพ โดยทำการปรับเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าและค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าในวงจรกรองเพื่อให้ขนาดเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงและเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของวิธีการเปรียบเทียบขนาดอิมพีแดนซ์ วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพจาก แผนภาพโบเด (Bode plot) แผนภาพไนควิสต์ (Nyquist plot) แผนภาพโพล-ซีโร่ (Pole-Zero plot) และการหารากจากสมการคุณลักษณะของระบบจากโพลของฟังก์ชันถ่ายโอน

วงรอบปิด (Closed-loop-poles) ถูกนำมาใช้ในการเปรียบเทียบผลการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB

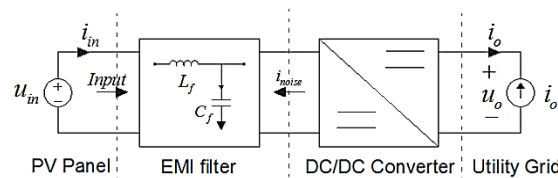
2. ทฤษฎีการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเมื่อต่อกับวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

2.1. การสร้างแบบจำลองของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบแหล่งจ่ายกระแส

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบแหล่งจ่ายกระแส (current-fed DC-DC converter) เหมาะที่จะนำมาใช้กับระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ [4], [5] จากรูปที่ 1 แสดงถึงวงจรทบทระดับแรงดันไฟฟ้าแบบแหล่งจ่ายกระแส (current-fed boost converter) ที่ใช้เพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์และรูปแบบการติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI filter) เพื่อลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยที่ส่วนอินพุตเชื่อมต่อกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 วงจรทบทระดับแรงดันไฟฟ้าแบบแหล่งจ่ายกระแส



รูปที่ 2 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่ต่อกับกริดของการไฟฟ้า

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจะดำเนินการโดยการหาฟังก์ชันถ่ายโอนและการสร้างแบบจำลอง เนื่องจากบทความนี้ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจร

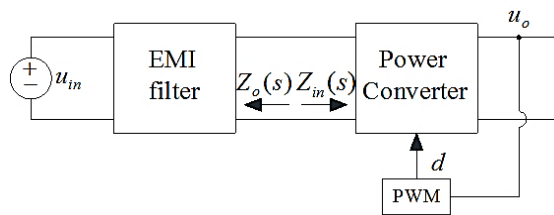
กรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบแหล่งจ่ายกระแสของระบบผลิตพลังงานด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ จึงทำให้ต้องพิจารณาเงื่อนไขสถานะการทำงานของวงจรสวิตช์ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า ซึ่งก็คือสถานะ on-time และสถานะ off-time ดังนั้นเทคนิคค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะ (State-Space Averaging ; SSA) จึงถูกนำมาใช้เพื่อช่วยในการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ และเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพนั้น ฟังก์ชันถ่ายโอนดังกล่าวนี้จะถูกจัดให้อยู่ในรูปแบบของ H พารามิเตอร์ (Hybrid Parameters) โดยที่แบบจำลองโครงข่าย 2 ทาง (two-port model) จะถูกนำมาใช้เพื่ออธิบายถึงความสัมพันธ์ทางด้านอินพุตและเอาต์พุต โดยที่อยู่ในรูปแบบของ H พารามิเตอร์เช่นเดียวกัน ผลกระทบจากแหล่งกำเนิดและโหลดจะถูกนำมาพิจารณา ดังนั้นในการคำนวณหาฟังก์ชันถ่ายโอนจึงจะพิจารณาในผลกระทบดังกล่าวนี้ด้วย

2.2. เสถียรภาพของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบแหล่งจ่ายกระแส

โดยทั่วไปวิธีที่นำมาวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าสามารถสรุปได้ดังนี้ [6]-[8]

2.2.1. ทฤษฎีอิมพีแดนซ์

โดยทั่วไปการหาเสถียรภาพของระบบสามารถหาได้จากการเปรียบเทียบขนาดอิมพีแดนซ์ โดยถ้าระบบเป็นระบบที่มีเสถียรนั้น ขนาดอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า $Z_{in}(s)$ ต้องมากกว่าขนาดเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า $Z_o(s)$ [6], [7] โดยขนาดอิมพีแดนซ์ถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 $Z_o(s)$ ขนาดเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า และ $Z_{in}(s)$ ขนาดอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า

จากทฤษฎี $|Z_o(s)| \ll |Z_{in}(s)|$ ที่นิยมนำกันมาใช้ อย่างแพร่หลายดังที่กล่าวมาในข้างต้นนั้น พบว่ายังไม่มีข้อกำหนดที่แน่ชัดว่าขนาดของอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าควรมีขนาดที่มากกว่าขนาดเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเท่าใดจึงจะทำให้ระบบมีเสถียรภาพและควรจะต้องมีขนาดที่มากกว่าตลอดย่านความถี่ที่พิจารณาหรือไม่ ดังนั้นจุดประสงค์หลักของบทความฉบับนี้จึงได้ทำการตอบปัญหาดังกล่าว

2.2.2. แผนภาพโบเด

เกณฑ์การวิเคราะห์เสถียรภาพของโบเดนั้นจะพิจารณาจากฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิด โดยมีหลักการพื้นฐานคือ 1) สำหรับระบบ minimum phase ที่มีเสถียรภาพนั้น ส่วนเผื่ออัตราขยาย (gain margin) และส่วนเผื่อเฟส (phase margin) จะต้องมีค่าเป็นบวก 2) ถ้าระบบนั้นมีเพียงส่วนเผื่ออัตราขยายหรือส่วนเผื่อเฟสอย่างใดอย่างหนึ่งเป็นไปตามเกณฑ์จะถือว่ายังไม่สามารถสรุปได้ว่าระบบนั้นมีเสถียรภาพหรือไม่ 3) สำหรับระบบ non minimum phase จะไม่สามารถใช้เกณฑ์เสถียรภาพของโบเดวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้ [8]

2.2.3. แผนภาพไนควิสต์

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยวิธีแผนภาพไนควิสต์นั้น จะพิจารณาจากฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบเปิด โดยเกณฑ์การวิเคราะห์เสถียรภาพจะพิจารณาว่า ถ้ากราฟที่ได้นั้นมีเส้นกราฟวนตัดกันที่จุด -1 ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา แสดงว่าระบบที่พิจารณานั้นเป็นระบบที่ไม่มีเสถียรภาพ

2.2.4. แผนภาพโพล-ซีโร่

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยวิธีแผนภาพโพล-ซีโร่นั้นจะพิจารณาจากฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบเปิด โดยเกณฑ์การวิเคราะห์เสถียรภาพจะพิจารณาว่า ถ้ามีโพลอยู่ทางฝั่งขวาของระนาบแสดงว่าระบบที่พิจารณานั้นไม่มีเสถียรภาพ

2.2.5. การหารากจากสมการคุณลักษณะของระบบจากโพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบปิด

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยวิธีการหารากจากสมการคุณลักษณะของระบบจากโพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบปิดนั้น ถ้าไม่มีโพลอยู่ทางฝั่งขวาของระนาบแสดงว่าระบบนั้นมีเสถียรภาพ

3. ขั้นตอนการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงการสร้างแบบจำลองในแต่ละส่วนที่ทำการศึกษาและหาฟังก์ชันถ่ายโอนเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ โดยจะทำการสร้าง 1) แบบจำลองของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบแหล่งจ่ายกระแส 2) แบบจำลองของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า และ 3) แบบจำลองของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า โดยมีกระบวนการทั้งหมดเป็นดังนี้

3.1. แบบจำลองของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบจ่ายกระแส

จากรูปที่ 1 แสดงถึงวงจรสมมูลของวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบแหล่งจ่ายกระแส (current-fed boost converter) โดยพิจารณาถึงค่าพารามิเตอร์แฝงของตัว

เก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ และพารามิเตอร์แฝงของอุปกรณ์ สวิตซ์

จากรูปที่ 1 สมการค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะ (State-Space Averaging) ที่พิจารณาถึงช่วงเวลา on-time และ off-time ของวงจรที่อยู่ในรูปแบบของสมการเมทริกซ์เป็นดังนี้

$$\begin{bmatrix} \frac{d\hat{i}_L}{dt} \\ \frac{d\hat{u}_C}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L} & \frac{D}{L} \\ -\frac{D}{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_L \\ \hat{u}_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{Dr_C}{L} & -\frac{1}{L} & \frac{R_2}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 & -\frac{I_L}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_{in} \\ \hat{u}_o \\ \hat{d} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{u}_{in} \\ \hat{i}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1+r_C C \frac{d}{dt} \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_L \\ \hat{u}_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_{in} \\ \hat{u}_o \\ \hat{d} \end{bmatrix} \quad (2)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} R_1 &= r_L + D(r_C + r_{ds1}) + D'r_{ds2} \\ R_2 &= U_C - (D'r_C + r_{ds1} - r_{ds2})I_L \\ D' &= (1-D) \end{aligned}$$

จากสมการที่ (1) และ (2) สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบเปิดได้จากสมการ $C(sI - A)^{-1}B + D$ หรือการใช้ Symbolic toolbox ของโปรแกรม MATLAB ซึ่งสามารถจัดให้อยู่ในรูปแบบของไฮบริดพารามิเตอร์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} Z_{in-con} & T_{oi-con} & G_{ci-con} \\ G_{io-con} & -Y_{o-con} & G_{co-con} \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & -h_{22} & h_{23} \end{bmatrix}}{\Delta} \quad (3)$$

ในที่นี้ฟังก์ชันถ่ายโอนอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าวงรอบปิด (Z_{in-c}) ที่นำมาใช้เปรียบเทียบกับอิมพีแดนซ์เพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพคือ

$$Z_{in-c} = \frac{Z_{in-con}}{1 + L_{in-con}} \quad (4)$$

จากสมการที่ (4) L_{in-con} คืออัตราขยายวงรอบเปิด และ Z_{in-con} คือฟังก์ชันถ่ายโอนอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าวงรอบเปิดซึ่งแสดงในสมการที่ (5) และ (6) ตามลำดับ

$$L_{in-con} = G_{cc} G_a H_v G_{ci-con} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} Z_{in-con} &= \frac{(1+sr_C C) \left(-\frac{Dr_C}{LC} + \frac{s}{C} \right)}{s^2 + s \left(\frac{(r_C + r_{ds1}) + D'r_{ds2}}{L} \right) + \frac{D^2}{LC}} \\ &+ \frac{(1+sr_C C) \left(\frac{r_L + D(r_C + r_{ds1}) + D'r_{ds2}}{LC} \right)}{s^2 + s \left(\frac{(r_C + r_{ds1}) + D'r_{ds2}}{L} \right) + \frac{D^2}{LC}} \quad (6) \end{aligned}$$

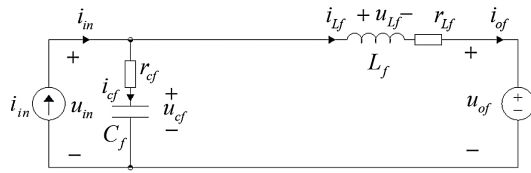
จากสมการที่ (5) G_{cc} คือฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม G_a คือตัวปรับขยาย H_v คือแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ตรวจจับได้ สำหรับค่าฟังก์ชันถ่ายโอน control-to-input ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า (G_{ci-con}) แสดงตามสมการที่ (7)

$$\begin{aligned} G_{ci-con} &= \frac{(1+sr_C C) \left(s \frac{I_L}{C} \right)}{s^2 + s \left(\frac{(r_C + r_{ds1}) + D'r_{ds2}}{L} \right) + \frac{D^2}{LC}} \\ &+ \frac{(1+sr_C C) \left(\frac{(D^2 r_C + r_{ds2} + r_L) I_L + D U_C}{LC} \right)}{s^2 + s \left(\frac{(r_C + r_{ds1}) + D'r_{ds2}}{L} \right) + \frac{D^2}{LC}} \quad (7) \end{aligned}$$

3.2 แบบจำลองวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

รูปที่ 4 แสดงถึงวงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยพิจารณาถึงค่าพารามิเตอร์แฝงของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ

ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2561



รูปที่ 4 วงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

จากรูปที่ 4 สมการค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในรูปแบบของสมการเมทริกซ์คือ

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{L_f}}{dt} \\ \frac{du_{C_f}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{(r_{C_f} + r_{L_f})}{L_f} & \frac{1}{L_f} \\ -\frac{1}{C_f} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L_f} \\ u_{C_f} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{r_{C_f}}{L_f} & -\frac{1}{L_f} \\ \frac{1}{C_f} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{in} \\ u_{of} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{u}_{in} \\ \dot{i}_{of} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 + r_{C_f} C_f \frac{d}{dt} \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L_f} \\ u_{C_f} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{in} \\ u_{of} \end{bmatrix} \quad (9)$$

จากสมการที่ (8) และ (9) สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบเปิด ที่อยู่ในรูปแบบของไฮบริดพารามิเตอร์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \hat{u}_{in} \\ \hat{i}_{of} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{in-f} & T_{oi-f} \\ G_{io-f} & -Y_{o-f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_{in} \\ \hat{u}_{of} \end{bmatrix} \quad (10)$$

ในที่นี้ฟังก์ชันถ่ายโอนเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อพิจารณาผลกระทบจากแหล่งจ่าย (Z_{o-f-s}) ที่นำมาใช้เปรียบเทียบกับขนาดอิมพีแดนซ์ถูกแสดงไว้ดังนี้

$$Z_{o-f-s} = \frac{(1 + Z_{in-f} Y_s)}{(1 + Y_s Z_{in-f_{oc}}) Y_{o-f}} \quad (11)$$

โดย $Z_{in-f_{oc}}$ คืออินพุตอิมพีแดนซ์ช่วงจรเปิด Y_s คือแอดมิตแตนซ์ของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งถูกแสดงไว้ดังนี้

$$Z_{in-f_{oc}} = Z_{in-f} + \frac{G_{io-f} T_{oi-f}}{Y_{o-f}} \quad (12)$$

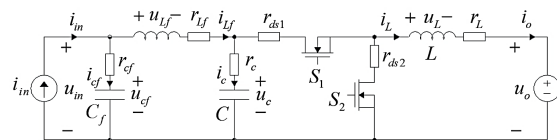
สำหรับค่าฟังก์ชันถ่ายโอนเอาต์พุตแอดมิตแตนซ์ (Y_{o-f}) และฟังก์ชันถ่ายโอนอินพุตอิมพีแดนซ์ (Z_{in-f}) ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ถูกแสดงไว้ดังสมการที่ (13) และ (14) ตามลำดับ

$$Y_{o-f} = \frac{s C_f}{(C_f L_f) s^2 (C_f r_{L_f} + C_f r_{C_f}) s + 1} \quad (13)$$

$$Z_{in-f} = \frac{(C_f L_f r_{C_f}) s^2 + (L_f + C_f r_{L_f} r_{C_f}) s + r_{L_f}}{(C_f L_f) s^2 (C_f r_{L_f} + C_f r_{C_f}) s + 1} \quad (14)$$

3.3. แบบจำลองวงจรทระดับแรงดันที่เชื่อมต่อกับวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

รูปที่ 5 แสดงถึงวงจรสมมูลของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบแหล่งจ่ายกระแส (Current-fed converter) ที่เชื่อมต่อกับวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยพิจารณาถึงค่าพารามิเตอร์แฝงของตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ และพารามิเตอร์แฝงของอุปกรณ์สวิตซ์



รูปที่ 5 วงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าต่อกับวงจรทระดับแรงดัน

จากรูปที่ 5 สมการค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะที่พิจารณาถึงช่วงเวลา on-time และ off-time ของวงจรที่อยู่ในรูปแบบของสมการเมทริกซ์ ถูกแสดงไว้ในสมการที่ (15) และ (16) ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \frac{d\hat{u}_{cf}}{dt} \\ \frac{d\hat{u}_c}{dt} \\ \frac{d\hat{i}_{lf}}{dt} \\ \frac{d\hat{i}_l}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{C_f} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C} & \frac{D'}{C} \\ \frac{1}{L_f} & -\frac{1}{L_f} & -\left(\frac{r_{cf}+r_{lf}+r_c}{L_f}\right) & \frac{D'r_c}{L_f} \\ 0 & \frac{D'}{L} & \frac{D'r_c}{L} & -\left(\frac{r_L+Dr_{ds1}+D'(r_c+r_{ds2})}{L}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{u}_{cf} \\ \hat{u}_c \\ \hat{i}_{lf} \\ \hat{i}_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_f} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{I_L}{C} \\ \frac{r_{cf}}{L_f} & 0 & -\frac{r_c I_L}{L_f} \\ 0 & -\frac{1}{L} \left(\frac{r_c+r_{ds2}-r_{ds1}}{L}\right) I_L & -\frac{U_c}{L} - \frac{r_c I_{lf}}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_{in} \\ \hat{u}_o \\ \hat{d} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{u}_{in} \\ \hat{i}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1+sr_{cf}C_f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{u}_{cf} \\ \hat{u}_c \\ \hat{i}_{lf} \\ \hat{i}_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_{in} \\ \hat{u}_o \\ \hat{d} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$G_{co-o} = \frac{(I_L(D'+C_f D' L_f s^2 + C_f D' r_{cf} s + C_f D' r_{lf} s)) - ((U_c + I_{lf} r_c - I_L(r_c - r_{ds1} + r_{ds2})) (Cs + Cs + CC_f L_f s^3 + CC_f r_c s^2 + CC_f r_{cf} s^2 + CC_f r_{lf} s^2)) - (C_f I_L r_c s (D' + CD' r_c s))}{(D'^2 + Cr_{ds1} s + C_f r_{ds1} s + CLs^2 + C_f Ls^2 - C_f D'^2 r_{cf} s + C_f D'^2 r_{lf} s + C_f D'^2 L_f s^2 + CD' r_c s + CD' r_{ds1} s + CD' r_{ds2} s + C_f D' r_c s + C_f D' r_{ds1} s + C_f D' r_{ds2} s - CC_f D'^2 r_c^2 s^2 + CC_f L_f s^4 + CC_f L r_c s^3 + CC_f L r_{cf} s^3 + CC_f L r_{lf} s^3 + CC_f L_f r_L s^3 + CC_f r_c r_L s^2 + CC_f r_{cf} r_L s^2 + CC_f r_{lf} r_L s^2 + CC_f D' r_c^2 s^2 + CC_f D' L_f r_c s^3 + CC_f D L_f r_{ds1} s^3 + CC_f D' L_f r_{ds2} s^3 + CC_f D' r_{cf} s^2 + CC_f D' r_c r_{lf} s^2 + CC_f D r_c r_{ds1} s^2 + CC_f D' r_c r_{ds2} s^2 + CC_f D r_{cf} r_{ds1} s^2 + CC_f D' r_{cf} r_{ds2} s^2 + CC_f D r_{lf} r_{ds1} s^2 + CC_f D' r_{lf} r_{ds2} s^2) / (CC_f L L_f)} \quad (17)$$

จากสมการที่ (15) และ (16) สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบเปิด ที่อยู่ในรูปแบบของไฮบริดพารามิเตอร์ ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} Z_{in-o} & T_{oi-o} & G_{ci-o} \\ G_{io-o} & -Y_{o-o} & G_{co-o} \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & -h_{22} & h_{23} \end{bmatrix}}{\Delta} \quad (18)$$

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพนั้น จะพิจารณาจากอัตราขยายวงรอบเปิดของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบแหล่งจ่ายกระแสที่เชื่อมต่อกับวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งถูกแสดงไว้ดังนี้

$$L_{in_o} = G_{cc} G_a H_v G_{co-o} \quad (19)$$

โดยที่ G_{co-o} คือฟังก์ชันถ่ายโอน control-to-output ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบแหล่งจ่ายกระแสที่เชื่อมต่อกับวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ดังแสดงไว้ในสมการที่ (17)

ในบทความนี้จะทำการศึกษาความแตกต่างของขนาดอิมพีแดนซ์เพื่อที่จะแสดงให้เห็นว่าความแตกต่างของขนาดอิมพีแดนซ์มากหรือน้อยเท่าไรนั้นที่ยังคงทำให้ระบบมีเสถียรภาพ โดยทำการเปรียบเทียบขนาดอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่อยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบเปิด (Z_{in_c}) ที่ได้จากหัวข้อ 3.1 กับขนาดเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ($Z_{o_f_s}$) ที่ได้จากหัวข้อ 3.2 การปรับเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าและค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจะเป็นการทำให้ขนาดเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลง วิธีการ

ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2561

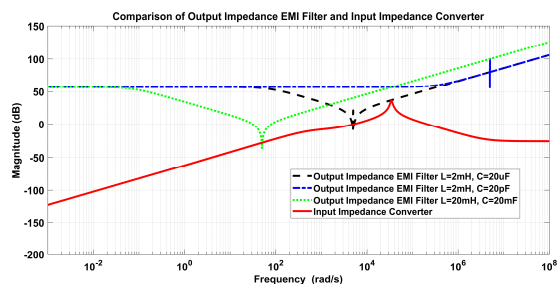
วิเคราะห์เสถียรภาพเพื่อนำมาใช้เปรียบเทียบผลการจำลองจาก แผนภาพโบเด แผนภาพไนควิสต์ แผนภาพโพล-ซีโร และการหาค่าจากสมการคุณลักษณะของระบบ จาก โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบปิดจะพิจารณาจาก อัตราขยายวงรอบเปิดของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบ แหล่งจ่ายกระแสที่เชื่อมต่อกับวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (L_{in_o}) ที่ได้จากหัวข้อ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการจำลองถูกแสดงไว้ในตารางที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

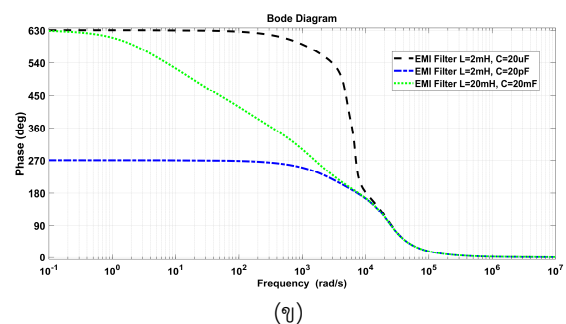
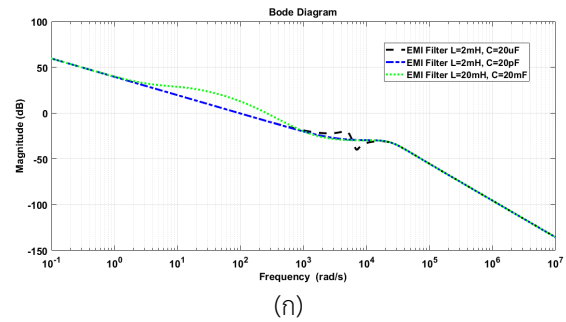
U_o	6 V	C	20 μ F
I_{in}	0.93 A	r_c	10 m Ω
D	0.53	r_L	500 m Ω
f_s	400 kHz	r_{ds1}	15 $\mu\Omega$
T_s	$1 / f_s$	r_{ds2}	15 $\mu\Omega$
L_f	20×10^{-18} - 20mH	C_f	20×10^{-18} - 20mF
I_o	1.93 A	U_{in}	15 V
r_{cf}	100 m Ω	U_{cf}	15.93 V
r_{Lf}	500 m Ω	U_c	15.47 V
L	20 μ H	R_{s-MPP}	10.4 Ω

3.4 ผลการจำลองและวิเคราะห์ผลการจำลอง

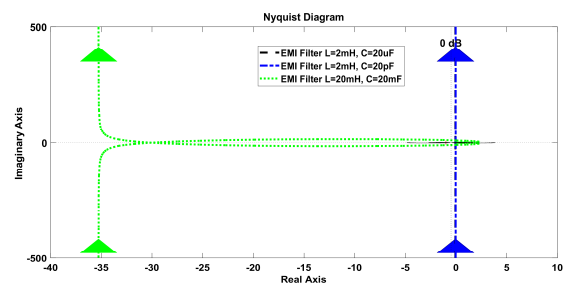
ผลการจำลองเมื่อทำการวิเคราะห์เสถียรภาพจากแบบจำลองในหัวข้อ 3.1-3.3 แสดงดังในรูปที่ 6-8



รูปที่ 6 ผลการจำลองเปรียบเทียบขนาดอิมพีแดนซ์ในกรณีต่างๆ



รูปที่ 7 ผลการจำลองที่ได้จากแผนภาพโบเดในกรณีต่างๆ (ก) การเปรียบเทียบขนาด (ข) การเปรียบเทียบมุมเฟส



รูปที่ 8 ผลการจำลองที่ได้จากแผนภาพไนควิสต์ในกรณีต่างๆ

ผลการจำลองที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีต่างๆนั้น สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ตามตารางที่ 2 ได้ดังนี้

ตารางที่ 2 สรุปผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในกรณีต่างๆ

กรณี	ค่า L_f, C_f ใน EMI Filter	โพลเด	ไนควิสต์	ค่าแชนจ์ไฟล	รากโพลวงรอบปิด	ค่าอิมพีแดนซ์
1	$L_f = 2 \text{ mH}$ $C_f = 20 \text{ } \mu\text{F}$	✓	✓	✓	✓	✓
2	$L_f = 2 \text{ mH}$ $C_f = 20 \text{ pF}$	✓	✓	✗	✗	✗
3	$L_f = 20 \text{ mH}$ $C_f = 20 \text{ mF}$	✗	✗	✓	✗	✗

(หมายเหตุ ✓ มีเสถียรภาพ ✗ ไม่มีเสถียรภาพ)

จากรูปที่ 6-8 และตารางที่ 2 แสดงถึงตัวอย่างการจำลองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า L_f, C_f โดยกรณี 1) นั้นเป็นการแสดงผลการจำลองที่แสดงให้เห็นถึงขนาดอิมพีแดนซ์ที่แตกต่างกันน้อยที่สุดที่ทำให้ระบบยังคงมีเสถียรภาพ กรณีที่ 2) เป็นการแสดงผลการจำลองเพื่อให้เห็นว่าถ้าขนาดอินพุตอิมพีแดนซ์น้อยกว่าขนาดเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ทุกย่านความถี่ ระบบที่พิจารณานั้นจะไม่มีเสถียรภาพ และกรณีที่ 3) เป็นการแสดงผลการจำลองเพื่อให้เห็นว่าถ้าขนาดอินพุตอิมพีแดนซ์มากกว่าขนาดเอาต์พุตอิมพีแดนซ์แต่ต่างกันน้อยกว่า 10 dB วิธีการเปรียบเทียบขนาดอิมพีแดนซ์จะไม่สามารถนำมาใช้ได้ ในกรณีนี้ ผลการจำลองทั้ง 3 กรณีสามารถอธิบายได้ดังนี้

กรณีที่ 1). เมื่อทำการเลือกใช้ค่าความจุไฟฟ้า $C_f = 20 \text{ } \mu\text{F}$ และค่าความเหนี่ยวนำ $L_f = 2 \text{ mH}$ จากผลการจำลองในรูปที่ 6 พบว่าขนาดอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในเส้นสีแดงมีค่ามากกว่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในเส้นประสีดำน้อยกว่า 10 dB ณ ความถี่ประมาณ 494 MHz โดยมากกว่าเพียงแค่ช่วงหนึ่งของย่านความถี่ทั้งหมดซึ่งเป็นขนาดที่แตกต่างกันน้อยที่สุดจากการจำลองทั้งหมดที่ได้ทำการศึกษาและยังคง

ทำให้ระบบมีเสถียรภาพ ส่วนในรูปที่ 7 และ 8 เป็นการแสดงผลการจำลองที่ได้จากแผนภาพโพลเด และไนควิสต์ตามลำดับซึ่งแทนผลการจำลองด้วยเส้นประสีดำน้อยกว่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในเส้นสีแดงทุกย่านความถี่ ซึ่งการพิจารณานี้จะเป็นระบบที่ไม่มีเสถียรภาพ โดยผลการวิเคราะห์ถูกแสดงไว้ดังตารางที่ 2 ซึ่งอธิบายได้ว่าเมื่อวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยวิธีต่างๆที่ใช้ในตารางนั้น ผลการจำลองที่ได้ให้ผลที่สอดคล้องกันคือแสดงผลว่าระบบที่ได้ทำการวิเคราะห์นั้นไม่เสถียรภาพ ดังนั้นสำหรับกรณีนี้ทำให้สรุปได้ว่าระบบที่พิจารณานั้นไม่มีเสถียรภาพ

กรณีที่ 2) เมื่อทำการเลือกใช้ค่าความจุไฟฟ้า $C_f = 20 \text{ pF}$ และค่าความเหนี่ยวนำ $L_f = 2 \text{ mH}$ จากผลการจำลองในรูปที่ 6 พบว่าขนาดอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในเส้นสีแดงมีค่าน้อยกว่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในเส้นประสีดำน้อยกว่า 10 dB ซึ่งการพิจารณานี้จะเป็นระบบที่ไม่มีเสถียรภาพ ส่วนในรูปที่ 7 และ 8 เป็นการแสดงผลการจำลองที่ได้จากแผนภาพโพลเด และไนควิสต์ตามลำดับซึ่งแทนผลการจำลองด้วยเส้นประสีดำน้อยกว่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในเส้นสีแดงทุกย่านความถี่ ซึ่งการพิจารณานี้จะเป็นระบบที่ไม่มีเสถียรภาพ โดยผลการวิเคราะห์ถูกแสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งอธิบายได้ว่า เมื่อวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยวิธีต่างๆที่ใช้ในตารางนั้น ผลการจำลองที่ได้ให้ผลที่ไม่สอดคล้องกันโดยวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยแผนภาพโพลเด-ไนควิสต์ การหารากจากสมการคุณลักษณะของระบบจากโพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบปิด และการเปรียบเทียบขนาดอิมพีแดนซ์แสดงผลว่าระบบไม่มีเสถียรภาพ แต่วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วย แผนภาพโพลเด และแผนภาพไนควิสต์แสดงผลว่าระบบมีเสถียรภาพ ซึ่งความไม่สอดคล้องกันของผลการทดลองที่ได้นั้นสามารถอธิบายได้ว่าถ้าระบบเป็นแบบ Non-minimum phase ซึ่งเป็นระบบที่ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดมีโพลหรือซีโรอยู่ทางระนาบขวา การใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพ

ด้วยแผนภาพโบเดจะไม่สามารถนำมาใช้วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้ ส่วนในกรณีของแผนภาพไนควิสต์นั้น ผลการจำลองจะนำมาใช้ได้ก็ต่อเมื่อ ผลที่ได้จากจำลองแสดงออกมาว่าไม่มีเสถียรภาพ ซึ่งทำให้สรุปได้ว่าระบบที่พิจารณานั้นไม่มีเสถียรภาพ แต่ถ้าผลการจำลองแสดงออกมาว่ามีเสถียรภาพ จะไม่สามารถสรุปได้ทันทีว่าระบบที่พิจารณานั้นมีเสถียรภาพซึ่งจะต้องพิจารณาผลจากแผนภาพโพล-ซีโรเข้ามาประกอบด้วย โดยถ้าผลการจำลองจากแผนภาพไนควิสต์และแผนภาพโพล-ซีโรแสดงผลออกมาว่ามีเสถียรภาพ จะทำให้สามารถสรุปได้ว่าระบบที่พิจารณานั้นมีเสถียรภาพ [8] หรืออาจจะพิจารณาจากวิธีการหารากจากสมการคุณลักษณะของระบบจากโพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบปิดได้เช่นกัน ดังนั้นสำหรับกรณีนี้ทำให้สรุปได้ว่าระบบที่พิจารณาอยู่นั้นไม่มีเสถียรภาพเนื่องจากผลที่ได้จากวิธีการหารากจากสมการคุณลักษณะของระบบจากโพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบปิดแสดงผลว่าระบบไม่มีเสถียรภาพ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าวิธีการเปรียบเทียบขนาดอิมพีแดนซ์ยังสามารถนำมาใช้วิเคราะห์เสถียรภาพในกรณีนี้ได้

กรณีที่ 3) เมื่อทำการเลือกใช้ค่าความจุไฟฟ้า $C_f = 20 \text{ mF}$ และค่าความเหนี่ยวนำ $L_f = 20 \text{ mH}$ จากผลการจำลองในรูปที่ 6 ซึ่งพบว่าขนาดอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในเส้นสีแดงมีค่ามากกว่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในเส้นจุดสีเขียวอยู่ที่ 8 dB ณ ความถี่ประมาณ 50 Hz ซึ่งมีขนาดมากกว่าแค่ช่วงหนึ่งของย่านความถี่ทั้งหมด ซึ่งตามทฤษฎีอิมพีแดนซ์จะถือว่าระบบมีเสถียรภาพ อย่างไรก็ตามเนื่องจากผลที่ได้จากการหารากจากสมการคุณลักษณะของระบบจากโพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบปิดแสดงผลออกมาว่าระบบไม่มีเสถียรภาพ ดังนั้นขนาดอิมพีแดนซ์ที่แตกต่างกันนี้จึงไม่เพียงพอที่จะทำให้ระบบมีเสถียรภาพ ส่วนในรูปที่ 7 และ 8 เป็นการแสดงผลการทดลองที่ได้จากแผนภาพโบเด และไนควิสต์ตามลำดับซึ่งแทนผลการจำลองด้วยเส้นจุดสีเขียว โดยผลการวิเคราะห์ถูกแสดงไว้ดังตารางที่ 2 ซึ่งอธิบายได้ว่าเมื่อ

วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยวิธีต่างๆที่ใช้ในตารางนั้นผลการจำลองที่ได้ ให้ผลที่สอดคล้องกันคือแสดงผลว่าระบบที่ได้ทำการวิเคราะห์นั้นไม่มีเสถียรภาพ แต่มีเพียงวิธีการวิเคราะห์จากแผนภาพโพล-ซีโรที่แสดงผลว่าระบบมีเสถียรภาพ ซึ่งสามารถอธิบายเหตุผลเช่นเดียวกันกับกรณีที่ 2) ดังนั้นสำหรับกรณีนี้ทำให้สรุปได้ว่าระบบที่พิจารณาอยู่นั้นไม่มีเสถียรภาพเนื่องจากผลที่ได้จากวิธีการหารากจากสมการคุณลักษณะของระบบจากโพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบปิดแสดงผลว่าระบบไม่มีเสถียรภาพ ซึ่งในกรณีนี้ใช้เพื่อพิสูจน์ว่าถ้าขนาดอิมพีแดนซ์ต่างกันน้อยกว่า 10 dB วิธีการเปรียบเทียบขนาดอิมพีแดนซ์จะไม่สามารถนำมาใช้วิเคราะห์เสถียรภาพในกรณีนี้ได้

4. สรุปผลการทดลอง

ในบทความนี้ได้ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าในระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้วิธีการเปรียบเทียบขนาดอิมพีแดนซ์จากนิยาม $|Z_o(s)| \ll |Z_m(s)|$ ที่ไม่สามารถระบุได้ชัดเจนว่าขนาดอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าต้องมากกว่าขนาดเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเท่าไรที่ยังคงทำให้ระบบมีเสถียรภาพ

จากผลการจำลองพบว่าความแตกต่างของขนาดอิมพีแดนซ์ที่น้อยที่สุดที่ยังคงทำให้ระบบมีเสถียรภาพคือ 10 dB ซึ่งมีขนาดมากกว่าเพียงแค่ช่วงหนึ่งของย่านความถี่ทั้งหมด โดยเมื่อวิเคราะห์ผลการจำลองที่ได้ทำการศึกษาทั้งหมดนั้น พบว่าผลการจำลองที่ได้จากการเปรียบเทียบขนาดอิมพีแดนซ์สามารถนำมาใช้วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้เนื่องจากให้ผลสอดคล้องกับการหารากจากสมการคุณลักษณะของระบบจากโพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบปิด ซึ่งเป็นวิธีที่ถูกต้องและแม่นยำที่สุดในการวิเคราะห์เสถียรภาพ จากผลการจำลองที่ได้ทำการศึกษาทั้งหมดนั้นทำให้สามารถสรุปได้ว่าถ้าขนาด

อินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ามีค่ามากกว่าขนาดเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเกิน 10 dB ขึ้นไปเพียงแค่ช่วงหนึ่งของย่านความถี่ทั้งหมดหรือมากกว่าเป็นช่วงๆ นั้น ระบบที่พิจารณาอยู่นั้นจะเป็นระบบที่มีเสถียรภาพ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ สัญญาเลขที่ 379/2559 ซึ่งในที่นี้ผู้เขียนต้องขอขอบคุณสำหรับความช่วยเหลือจาก น.ส. รักษิณา ชณะฤกษ์ และ น.ส. อรอนงค์ พรวงค์เลิศ ที่ช่วยทำให้งานวิจัยนี้ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Md. H. Shahriar, Md. J. Sadiq and Md. F. Uddin, "Stability analysis of grid connected PV array under maximum power point tracking." in 2016 9th International Conference on Electrical and Computer Engineerin., Dhaka., 2016, pp. 499-502.
- [2] A. Reznik, M. G. Simões, A. Al-Durra and .S. M. Mueen, "LCL Filter Design and Performance Analysis for Grid-Interconnected Systems," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 50, pp.1225-1232, Mar. 2014.
- [3] J. Zhang, W. Chen, B. Zhang, X. Song and H. Huang, "Optimal design of EMI filters for PV system based on parasitic parameter and stability analysis," in 2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia., Seoul., 2015, pp. 2744-2751.
- [4] R. A. Shaheen, "Stability analysis of a current sourced converter when an EMI filter is added at the input for PV

applications," M.S. thesis, Dept. Radio Frequency Electronics., Tampere Univ. of Tech., Tampere, Finland, 2011.

- [5] T. Suntio, *Dynamic Profile of Switched-Mode Converter*, Wein-heim: WILEY-VCH, 2009.
- [6] W. E. Robert, M. Dragan, *Fundamentals of Power Electronics*, United States of America: Kluwer, 2011.
- [7] M. J. Nave, *Power Line Filter Design for Switched Mode Power Supplies*, Gainesville: Mark Nave Consultants, 2010.
- [8] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, New Jersey: Tom Robbins, 1997.