

การควบคุมพลังงานแสงอาทิตย์
ที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าด้วยตัวควบคุมพีชซี-พีไอ



นางสาวปทุมพร วงศ์ใหญ่

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2566

THE SOLAR ENERGY CONTROL OF
GRID CONNECTED PV SYSTEMS USING FUZZY – PI CONTROLLER

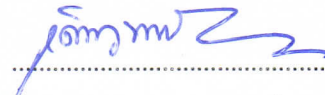


A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2023

การควบคุมพลังงานแสงอาทิตย์
ที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าด้วยตัวควบคุมพีซี-พีไอ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.เดชา พวงดาวเรือง)

ประธานกรรมการ



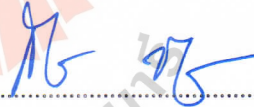
(รศ. ดร.กองพัน อารีรักษ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



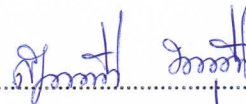
(รศ. ดร.กิตติ อรรถกิจมงคล)

กรรมการ



(รศ. ดร.กิริติ ชัยะกุลศิรี)

กรรมการ



(ผศ. ดร.สุदारตน์ ขวัญอ่อน)

กรรมการ



(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐยางกูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ปทุมพร วงศ์ใหญ่ : การควบคุมพลังงานแสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าด้วยตัวควบคุมฟuzzy-พีไอ (THE SOLAR ENERGY CONTROL OF GRID CONNECTED PV SYSTEMS USING FUZZY – PI CONTROLLER)

อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.ก้องพันธ์ อารีรักษ์, 204 หน้า

คำสำคัญ : พลังงานแสงอาทิตย์/ระบบจำหน่ายไฟฟ้า/ตัวควบคุมพีไอ/ตัวควบคุมฟuzzy

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทดแทนประเภทหมุนเวียน เป็นพลังงานหมุนเวียนที่สะอาดปราศจากมลพิษ และเป็นพลังงานทดแทนที่มีศักยภาพสูง ในปัจจุบันมีการใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ด้วยอุปกรณ์แปลงผันกำลังงานที่สามารถทำงานร่วมกับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าได้ จึงทำให้การใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าแบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายเป็นที่นิยมมากขึ้น ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอการควบคุมพลังงานแสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ ซึ่งเป็นวงจรแปลงผันพลังงานที่ถูกออกแบบโดย F.Z.Peng ในปี ค.ศ. 2003 ที่มีความสามารถในการจ่ายกระแสได้อย่างต่อเนื่อง ในขณะที่วงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบดั้งเดิมไม่สามารถจ่ายกระแสได้อย่างต่อเนื่อง วงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์สามารถใช้งานได้กับแรงดันอินพุตค่าต่ำ และสามารถจ่ายค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตได้เหมือนกับอินเวอร์เตอร์ชนิดอื่น ๆ ดังนั้นอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์จึงเหมาะสมสำหรับระบบพลังงานแสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า สำหรับการออกแบบตัวควบคุมของวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์จะใช้ตัวควบคุมพีไอแบบดั้งเดิม เปรียบเทียบกับตัวควบคุมฟuzzyที่นำเสนอ จากผลการจำลองสถานการณ์โดยใช้โปรแกรม Simulink ใน MATLAB และการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปแสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมฟuzzyที่ได้นำเสนอสามารถควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ทั้งในโหมดอิสระและโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายได้ และมีสมรรถนะที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอ อีกทั้งยังได้นำเสนอการสร้างชุดทดสอบในห้องปฏิบัติการสำหรับการควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์โหมดอิสระด้วยตัวควบคุมฟuzzy-พีไอ เพื่อยืนยันประสิทธิผลของวิธีการควบคุมที่นำเสนอ

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2566

ลายมือชื่อนักศึกษา.....ปทุมพร

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

PATUMPORN WONGYAI : THE SOLAR ENERGY CONTROL OF GRID CONNECTED PV SYSTEMS USING FUZZY – PI CONTROLLER. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. KONGPAN AREERAK, Ph.D. 204 PP.

Keyword: Solarcell, Distributed Generation, PI controller, Fuzzy controller

Solar energy is a renewable energy source. It is clean, pollution-free and high potential renewable energy. Currently, solar energy has been used for power generation by distributed electricity generation system. Therefore, solar energy which is used to generate electricity connected with converter to distribution system becomes more popular. This thesis presents the solar PV rooftop control for distributed generation by using impedance inverter. Type of the impedance is the quasi-Z-source inverter (qZSI). The qZSI was designed by F. Z. Peng in 2003 in which this inverter provides a continuous constant dc current from the source while the conventional ZSI draws a discontinuous current. It can be used to perform the lower input voltage requirement and it can supply the output voltage as similar as other inverters. Thus, the qZSI is suitable for the grid connected PV systems. The controllers designed for qZSI by conventional PI are compared with the proposed fuzzy controller. According to Simulink/MATLAB simulation and hardware in the loop results, the proposed fuzzy controller can efficiently regulate the quasi-Z-Source Inverter in both stand-alone and grid-connected modes compared with the conventional PI control. Finally, the hardware implementation of the quasi-Z-source inverter on stand-alone mode using fuzzy – PI controller is also presented to confirm the effectiveness of the proposed method.

School of Electrical Engineering
Academic Year 2023

Student's Signature.....ปทุมพร.....
Advisor's Signature.....Prof......

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บุคคล และกลุ่มบุคคลต่างๆ ที่ให้ความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งทางด้านวิชาการ ด้านการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ และการเขียนรูปเล่มวิทยานิพนธ์ ดังต่อไปนี้

รองศาสตราจารย์.ดร.กองพัน อารีรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้คำปรึกษาในเรื่องการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์และเรื่องการทำเนิชีวิต รวมถึงให้กำลังใจแก่ผู้ทำวิจัยมาโดยตลอด

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่มอบคำแนะนำ และความรู้ทางวิชาการตั้งแต่เข้ามาหาวิทยาลัยจนถึงปัจจุบันมาเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ ดร.ศศิยา อุดมสุข ดร.พลสิทธิ์ ศานติประพันธ์ ดร.จักรกริช ภัคดีโต ดร.ชาคริตปานแป้น นายเกื้อกุล กองกาญจนะ และนายรัฐพล โพธิ์สังข์ ที่ให้ความรู้และคำแนะนำเกี่ยวกับการใช้โปรแกรมต่างๆ และคำแนะนำในการสร้างฮาร์ดแวร์ เพื่อดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์มาเป็นอย่างดี

บุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณคุณอนุสรรา ประกอบ เลขานุการประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ช่วยอำนวยความสะดวกด้านเอกสารต่างๆ ที่ต้องใช้ในระหว่างการศึกษา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ครู อาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้ ตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน และที่สำคัญอย่างยิ่ง ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และสมาชิกในครอบครัวทุกท่านที่อบรมเลี้ยงดูให้ความรัก ให้กำลังใจ ตลอดจนให้การส่งเสริมทางการศึกษาเป็นอย่างดีมาโดยตลอด

ปทุมพร วงศ์ใหญ่

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.6 การจัดรูปแบบรายงานวิจัยวิทยานิพนธ์.....	5
2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 บทนำ.....	7
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ แบบต่อกับระบบจำหน่าย.....	7
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย.....	11
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย.....	14
2.5 สรุป.....	17
3 โครงสร้างของระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย	19
3.1 บทนำ.....	19
3.2 พลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา.....	19
3.2.1 ข้อดีของพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา.....	20

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.2	ข้อกำหนดในการติดตั้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา	20
3.2.3	ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.....	21
3.3	การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย	25
3.4	วงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ที่สามารถเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า.....	27
3.4.1	อินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย	27
3.4.2	ชนิดของอินเวอร์เตอร์ขึ้นเดียว.....	28
3.5	สรุป.....	32
4	อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์	33
4.1	บทนำ	33
4.2	อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์.....	33
4.3	โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์.....	35
4.3.1	แบบจำลองในสถานะอยู่ตัว	38
4.3.2	แบบจำลองพลวัต	40
4.4	การควบคุมสัญญาณการสวิตช์อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์.....	43
4.4.1	การควบคุมบูสต์แบบง่าย.....	44
4.4.2	การควบคุมบูสต์แบบค่าสูง	44
4.4.3	การควบคุมบูสต์แบบค่าคงที่สูง.....	45
4.5	เทคนิคการควบคุมสัญญาณการสวิตช์ด้วยการควบคุมบูสต์แบบง่าย	48
4.6	สรุป.....	49
5	วงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย	50
5.1	บทนำ	50
5.2	โครงสร้างอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย.....	50
5.2.1	การควบคุมอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์โหมดอิสระ	53
5.2.2	การควบคุมอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์โหมด เชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย.....	54
5.3	การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีโลกลัสของรากล	56

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3.1 ความรู้พื้นฐานวิถีโลกัสของราก	56
5.3.2 การออกแบบตัวควบคุมพีไอในโหมดอิสระ	58
5.3.3 การออกแบบตัวควบคุมในโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย	67
5.4 การจำลองสถานการณ์ของระบบที่พิจารณา	74
5.5 สรุป	79
6 การควบคุมแบบฟuzzyสำหรับวงจรมอเตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์	81
6.1 บทนำ	81
6.2 ทฤษฎีของฟuzzy	81
6.2.1 ฟuzzyเซต	81
6.2.2 การดำเนินการทางฟuzzyเซต	83
6.3 ฟังก์ชันสมาชิก	86
6.3.1 รูปร่างของฟังก์ชันสมาชิก	86
6.3.2 การออกแบบตัวควบคุมฟuzzyสำหรับวงจรมอเตอร์ แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์	89
6.4 ตัวแปรทางภาษาและค่าเชิงภาษา	91
6.4.1 การออกแบบตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษาของตัวควบคุมฟuzzy สำหรับวงจรมอเตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ โหมดอิสระ	91
6.4.2 การออกแบบตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษาของตัวควบคุมฟuzzy สำหรับวงจรมอเตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ โหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย	94
6.5 กฎของฟuzzy	96
6.5.1 การออกแบบกฎฟuzzyสำหรับระบบควบคุมวงจรมอเตอร์ แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ โหมดอิสระ	97
6.5.2 การออกแบบกฎฟuzzyสำหรับระบบควบคุมวงจรมอเตอร์ แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ โหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย	101
6.6 การอนุมานฟuzzyแบบ Takagi-Sugeno	105

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.7 การจำลองสถานการณ์ตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมพีซีซี ที่ได้จากการออกแบบ	111
6.8 สรุป.....	117
7 เทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปและการสร้างชุดทดสอบ	
วงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์	119
7.1 บทนำ.....	119
7.2 การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป	119
7.2.1 อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์โหมดอิสระ.....	121
7.2.2 อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์โหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย.....	125
7.3 การจำลองสถานการณ์สำหรับอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์โหมดอิสระด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปโดยอาศัยบอร์ด eZdspTM F28335 สำหรับระบบที่มีการปรับลดพิกัด	129
7.4 การสร้างชุดทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	134
7.5 ผลการทดสอบชุดทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์โหมดอิสระ.....	146
7.6 สรุป.....	153
8 สรุปและข้อเสนอแนะ	154
8.1 สรุป.....	154
8.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต.....	156
เอกสารอ้างอิง	157
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา.....	160
ภาคผนวก ข. ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังสำหรับการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ใน Simulink บนโปรแกรม MATLAB ของระบบที่พิจารณา	179
ภาคผนวก ค. การตามรอยจุดกำลังงานสูงสุดด้วยอัลกอริทึมเพิ่มค่าความนำ.....	185

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ง. กราฟคุณลักษณะของกระแสและแรงดัน และกราฟคุณลักษณะ ของกำลังไฟฟ้าและแรงดัน ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในชุดทดสอบ.....	187
ภาคผนวก จ. รายละเอียดการโปรแกรมตัวควบคุมพีไอสำหรับชุดทดสอบ วงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์โหมคอิสระ.....	190
ประวัติผู้เขียน	204



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย 8
2.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย 11
2.3	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย 14
3.1	การควบคุมตัวประกอบไฟฟ้ากำลังของระบบผลิตไฟฟ้าแบ่งตามระดับแรงดัน ณ จุด ต่อเชื่อมกับระบบของ กฟภ..... 22
3.2	ระยะเวลาที่ระบบผลิตไฟฟ้าสามารถทนต่อสภาวะแรงดันตกชั่วขณะได้ 23
3.3	ระยะเวลาปลดวงจรเมื่อแรงดันไม่อยู่ในช่วงแรงดันพิกัด 24
3.4	ตารางเปรียบเทียบข้อดี – ข้อเสียของอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันแหล่งจ่ายกระแส และแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ 30
4.1	ตารางแสดงค่าวัฏจักรหน้าที่ อัตราขยายแรงดัน อัตราขยายของอินเวอร์เตอร์ และความเครียดของสวิตช์ ของการสัญญาณการสวิตช์แบบต่าง ๆ..... 46
5.1	ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่พิจารณา..... 60
5.2	แผนภาพโลกัศของตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุในโหมดอิสระ 61
5.3	แผนภาพโลกัศของรากตัวควบคุมด้านกระแสสลับในโหมดอิสระ 65
5.4	แผนภาพโลกัศของรากตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าอินพุตในโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย 69
5.5	แผนภาพโลกัศของรากตัวควบคุมด้านกระแสสลับ ในโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย 72
5.6	ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอของระบบที่พิจารณา..... 74
6.1	ตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษาของตัวควบคุมพีซีสำหรับระบบควบคุมด้านกระแสตรงของวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์โหมดอิสระ 92
6.2	ตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษาของตัวควบคุมพีซีสำหรับระบบควบคุมด้านกระแสตรงของวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์โหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย 95
6.3	ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพของตัวควบคุมพีซีสำหรับระบบควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ โหมดอิสระ 100

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
6.4	ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพของตัวควบคุมพีซีสำหรับระบบควบคุมวงจรรีเลย์อินเวอร์เตอร์.....105
7.1	ค่าพารามิเตอร์ของระบบการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป130
7.2	ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอสำหรับการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป..131
7.3	ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพของตัวควบคุมพีซีสำหรับระบบควบคุมวงจรรีเลย์อินเวอร์เตอร์ แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ โหมคิสระ..... 131
7.4	พิกัดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการสร้างชุดทดสอบ.....137



สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	โครงสร้างการควบคุมอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ที่พิจารณาในงานวิจัย	3
2.1	แผนภาพผลการปรัทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอินเวอร์เตอร์ ชนิดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย	18
3.1	แผนภาพระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย	20
3.2	กราฟแสดงความสามารถในการทนต่อสภาวะแรงดันตกชั่วขณะ	23
3.3	การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย	26
3.4	การแยกชนิดของอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย	29
4.1	วงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์	34
4.2	สภาวะโหมดการทำงานของอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์	34
4.3	แผนผังการปรัทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงและพัฒนา วงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์	35
4.4	โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์	36
4.5	สภาวะโหมดการทำงานของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์	36
4.6	กราฟการไหลของสัญญาณอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์	41
4.7	แผนผังแสดงแบบจำลองพลวัตของระบบ	42
4.8	สัญญาณการสวิตช์สำหรับอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์	43
4.9	สัญญาณการควบคุมบูสต์แบบง่าย	44
4.10	สัญญาณการควบคุมบูสต์แบบค่าสูง	45
4.11	สัญญาณการควบคุมบูสต์แบบค่าคงที่สูง	45
4.12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูเลตและค่าวัฏจักรหน้าที่	46
4.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูเลตและอัตราขยาย	47
4.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายและความเครียดของสวิตช์	47
4.15	สัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์ทำงานร่วมกับสัญญาณลอจิกเกต	48
4.16	สัญญาณการสวิตช์ด้วยการควบคุมบูสต์แบบง่าย	49
5.1	อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย	51

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.2	โหมดการควบคุมวงจรถ่ายอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ 52
5.3	การควบคุมอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์โหมดอิสระ 53
5.4	แผนภาพตัวควบคุมด้านกระแสตรงในโหมดอิสระ 54
5.5	แผนภาพตัวควบคุมด้านกระแสสลับในโหมดอิสระ 54
5.6	การควบคุมอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ โหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย 55
5.7	แผนภาพตัวควบคุมด้านกระแสตรงในโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย 55
5.8	แผนภาพตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าอ้างอิงในแกนดี 55
5.9	แผนภาพตัวควบคุมด้านกระแสสลับในโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย 56
5.10	แผนภาพระบบควบคุมวงปิด 57
5.11	แผนภาพการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ 58
5.12	ผลตอบสนองต่ออินพุตแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของ ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ 62
5.13	แผนภาพตัวควบคุมกระแสของตัวเก็บประจุ 62
5.14	แผนภาพตัวควบคุมลูปแรงดัน 63
5.15	ผลตอบสนองต่ออินพุตแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของตัวควบคุมกระแสของตัวเก็บประจุ 66
5.16	ผลตอบสนองต่ออินพุตแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของตัวควบคุมแรงดันเอาต์พุต 66
5.17	แผนภาพตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าอินพุต 67
5.18	ผลตอบสนองต่ออินพุตแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าอินพุต 69
5.19	ผลตอบสนองต่ออินพุตแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของตัวควบคุมแรงดันของตัวเก็บประจุ 73
5.20	ผลตอบสนองต่ออินพุตแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้า 73
5.21	ผลการจำลองสถานการณ์จากโปรแกรม Simulink ร่วมกับชุดบล็อกไฟฟ้า ของวงจรถ่ายอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ในโหมดอิสระ 76
5.22	ผลการจำลองสถานการณ์จากโปรแกรม Simulink ร่วมกับชุดบล็อกไฟฟ้า ของวงจรถ่ายอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ในโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย 77

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.23	ผลการจำลองสถานการณ์เมื่ออินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอดไรต์เปลี่ยนโหมดการทำงานโหมดอิสระเป็นโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย ที่เวลา 0.3 วินาที..... 78
6.1	ฟังก์ชันลักษณะเฉพาะของเซตชัดเจน..... 82
6.2	ฟังก์ชันสมาชิกของฟัซซีเซต รูปสามเหลี่ยม..... 83
6.3	ส่วนเติมเต็มของฟัซซีเซต A 84
6.4	การยูเนียนของฟัซซีเซต A และ B 84
6.5	การอินเตอร์เซกชันของฟัซซีเซต A และ B 85
6.6	ฟังก์ชันสมาชิกรูปสามเหลี่ยม..... 87
6.7	ฟังก์ชันสมาชิกรูปสี่เหลี่ยมคางหมู..... 88
6.8	ฟังก์ชันสมาชิกรูปเกาส์เซียน..... 88
6.9	ฟังก์ชันสมาชิกรูปประฆังคว่ำ..... 89
6.10	แผนผังวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอดไรต์ที่ใช้ตัวควบคุมฟัซซี..... 90
6.11	ฟังก์ชันสมาชิกภาพอินพุตรูปสามเหลี่ยม..... 90
6.12	ฟังก์ชันสมาชิกภาพเอาต์พุตรูปแท่งตรงโทน..... 90
6.13	ระบบควบคุมด้านกระแสตรงของวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอดไรต์โหมดอิสระที่ใช้ตัวควบคุมฟัซซี..... 92
6.14	ฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error กรณี 3 ค่าเชิงภาษา..... 93
6.15	ฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error rate กรณี 3 ค่าเชิงภาษา..... 93
6.16	ฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต shoot-through duty กรณี 3 ค่าเชิงภาษา..... 94
6.17	ระบบควบคุมด้านกระแสตรงของวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอดไรต์โหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายที่ใช้ตัวควบคุมฟัซซี..... 95
6.18	กฎฟัซซีสำหรับระบบควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอดไรต์โหมดอิสระ ในรูปแบบ FAM..... 98
6.19	ข้อมูลแรงดันของตัวเก็บประจุ เมื่อความเข้มแสงมีค่าลดลง..... 99
6.20	กฎฟัซซีสำหรับระบบควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอดไรต์โหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย ในรูปแบบ FAM..... 103

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.21	ข้อมูลแรงดันอินพุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อความเข้มแสงมีค่าลดลง104
6.22	ข้อมูลแรงดันอินพุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อความเข้มแสงมีค่าเพิ่มขึ้น.....104
6.23	หลักการอนุมาณฟัชซี106
6.24	การอนุมาณแบบ Takagi-Sugeno (โหมตอิสระ).....108
6.25	ค่าเอาต์พุตชัดเจนที่ได้จากการทำดีฟัซซีแบบ WA (โหมตอิสระ).....109
6.26	การอนุมาณแบบ Takagi-Sugeno (โหมตเชื่อมต่อบรรบบจำหน่าย).....110
6.27	ค่าเอาต์พุตชัดเจนที่ได้จากการทำดีฟัซซีแบบ WA (โหมตเชื่อมต่อบรรบบจำหน่าย).....111
6.28	ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ แบบควอไซต์ในโหมตอิสระ ด้วยตัวควบคุมพีไอเปรียบเทียบกับตัวควบคุมฟัชซี112
6.29	ผลการตอบสนองค่าแรงดันตัวเก็บประจุ เมื่อเปลี่ยนแปลง ความเข้มแสงจาก 1000 W/m ² เป็น 600W/m ² ที่เวลา 0.3 วินาที113
6.30	ผลการตอบสนองค่าแรงดันตัวเก็บประจุ เมื่อเปลี่ยนแปลง ความเข้มแสงจาก 600 W/m ² เป็น 800W/m ² ที่เวลา 0.5 วินาที.....114
6.31	ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่าย อิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ในโหมตเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย ด้วยตัวควบคุมพีไอเปรียบเทียบกับตัวควบคุมฟัชซี.....115
6.32	ค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....116
6.33	ค่ากระแสเอาต์พุตที่จ่ายเข้าสู่ระบบจำหน่าย ที่ความเข้มแสง 1000 W/m ²117
7.1	การเชื่อมต่ออุปกรณ์สำหรับเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป.....120
7.2	การเชื่อมต่อฮาร์ดแวร์ในลูประหว่างคอมพิวเตอร์โปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp™ F28335121
7.3	การจำลองสถานการณ์สำหรับอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ แบบควอไซต์โหมตอิสระด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป.....122
7.4	ผลการจำลองสถานการณ์อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ แบบควอไซต์โหมตอิสระด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป123
7.5	ผลการตอบสนองค่าแรงดันตัวเก็บประจุ เมื่อเปลี่ยนแปลง ความเข้มแสงจาก 1000 W/m ² เป็น 600W/m ² ที่เวลา 0.3 วินาที124

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.6 ผลการตอบสนองค่าแรงดันตัวเก็บประจุ เมื่อเปลี่ยนแปลง ความเข้มแสงจาก 600 W/m ² เป็น 800W/m ² ที่เวลา 0.5 วินาที.....	125
7.7 การจำลองสถานการณ์สำหรับอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ แบบควอไซด์โหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบ.....	126
7.8 ผลการจำลองสถานการณ์อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ แบบควอไซด์โหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบ.....	127
7.9 ผลค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับ การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบ	128
7.10 ผลการจำลองสถานการณ์อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ โหมดอิสระด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบสำหรับระบบที่มีการปรับลดพิกัด.....	132
7.11 ผลการตอบสนองค่าแรงดันตัวเก็บประจุ เมื่อเปลี่ยนแปลง ความเข้มแสงจาก 1000 W/m ² เป็น 600W/m ² ที่เวลา 0.2 วินาที	133
7.12 ผลการตอบสนองค่าแรงดันตัวเก็บประจุ เมื่อเปลี่ยนแปลง ความเข้มแสงจาก 600 W/m ² เป็น 800W/m ² ที่เวลา 0.3 วินาที.....	134
7.13 โครงสร้างชุดทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ แบบควอไซด์โหมดอิสระในห้องปฏิบัติการ.....	135
7.14 ชุดต้นแบบวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ แบบควอไซด์โหมดอิสระในห้องปฏิบัติการ.....	136
7.15 โครงสร้างการเชื่อมต่อของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	137
7.16 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในชุดทดสอบจริง.....	137
7.17 หม้อแปลงสามเฟสแบบปรับค่าได้.....	138
7.18 วงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์.....	138
7.19 ไดโอด 2 ขา เบอร์ 1822AE.....	139
7.20 มอดูลไอจีบีที3 เฟส IPM6MBP50RA120-55	139
7.21 โครงสร้างสถาปัตยกรรมบอร์ด eZdsp™ F28335	140
7.22 แผนภาพการโปรแกรมสำหรับระบบควบคุมของควบคุมของ วงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์โหมดอิสระ	141

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.23	วงจรถวายสัญญาณฝั่งกระแสลับ143
7.24	หม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับตรวจวัดแรงดัน V_{ab} และ V_{bc}143
7.25	วงจรถวายสัญญาณ144
7.26	วงจรถวายวัดค่ากระแสไฟฟ้า144
7.27	วงจรถวายวัดแรงดันไฟฟ้า145
7.28	วงจรถวาย or gate145
7.29	วงจรถวายสำหรับอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์146
7.30	โหลดตัวต้านทาน146
7.31	เครื่องมือวัดความเข้มแสง (lux meter).....147
7.32	รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ ที่ความเข้มแสง 1000 W/m ²148
7.33	รูปสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ ที่ความเข้มแสง 1000 W/m ²148
7.34	รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ ที่ความเข้มแสง 600 W/m ²148
7.35	รูปสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ ที่ความเข้มแสง 600 W/m ²149
7.36	รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ ที่ความเข้มแสง 800 W/m ²150
7.37	รูปสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ ที่ความเข้มแสง 800 W/m ²150
7.38	รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง.....151
7.39	รูปสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง.....151
7.40	รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ ควบคุมด้วยตัวควบคุมพีซี.....152
7.41	รูปสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ การทดสอบกรณีที่ 3.....152
ข.1	บล็อกไฟฟ้กำลังสำหรับการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ใน Simulink บนโปรแกรม MATLAB ของวงจรถวายอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์.....180
ข.2	แผนภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ใน Simulink181
ข.3	แผนภาพแสดงการควบคุมวงจรถวายอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ แบบควอไซต์โหมดอิสระ182
ข.4	แผนภาพแสดงการควบคุมวงจรถวายอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ โหมดเชื่อมต่อบนระบบจำหน่าย183

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
ข.5	แผนภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ในSimulink.....	184
ข.6	Rule view ในโปรแกรม MATLAB.....	184
ค.1	แผนผังการตามรอยจุดกำลังสูงสุดของอัลกอริทึมเพิ่มค่าความนำ.....	186
ง.1	กราฟคุณลักษณะของกระแสและแรงดัน และกราฟคุณลักษณะของกำลังไฟฟ้า และแรงดันที่ความเข้มแสง 1000W/m ²	188
ง.2	กราฟคุณลักษณะของกระแสและแรงดัน และกราฟคุณลักษณะของกำลังไฟฟ้า และแรงดันที่ความเข้มแสง 700W/m ²	189



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันพลังงานทดแทนที่เป็นพลังงานหมุนเวียน (Renewable energy) ซึ่งเป็นพลังงานที่ได้จากแหล่งพลังงานที่เกิดขึ้นต่อเนื่องซ้ำ ๆ ไม่มีหมด ส่วนใหญ่มักมีแหล่งกำเนิดมาจากธรรมชาติซึ่งได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานชีวมวล พลังงานน้ำ พลังงานความร้อนใต้พิภพ และ พลังงานชีวมวล พลังงานหมุนเวียนเหล่านี้ถือเป็นแหล่งพลังงานสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยมาก จึงได้มีการศึกษาและพัฒนาพลังงานทดแทน ไม่ว่าจะเป็นการศึกษาค้นคว้า ทดสอบ และสาธิต ตลอดจนส่งเสริมและเผยแพร่ เพื่อให้มีการผลิตและการใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย มีประสิทธิภาพ และมีความเหมาะสมทั้งทางด้านเทคนิค เศรษฐกิจ และสังคม

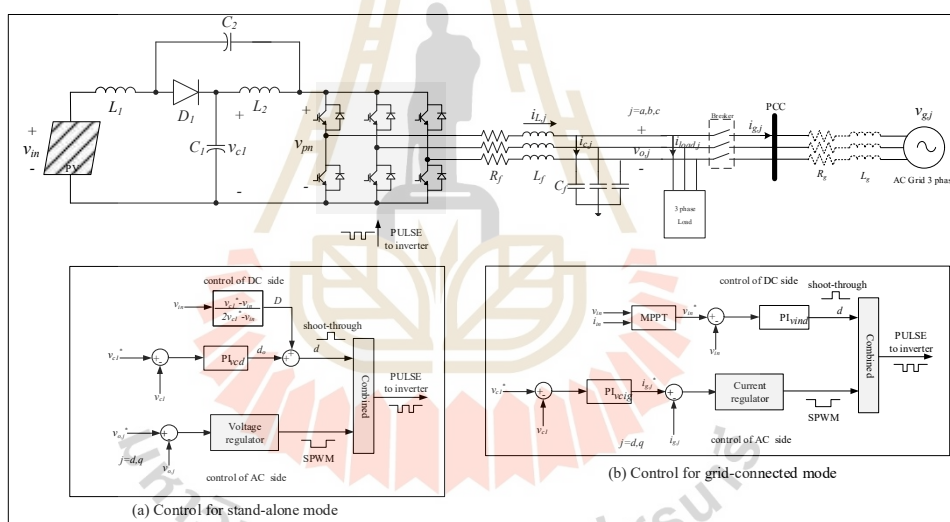
พลังงานแสงอาทิตย์เป็นอีกหนึ่งในพลังงานทดแทนประเภทหมุนเวียนที่ใช้แล้วเกิดขึ้นใหม่ได้ตามธรรมชาติ เป็นพลังงานที่สะอาด ปราศจากมลพิษ และเป็นพลังงานทดแทนที่มีศักยภาพสูง ซึ่งการใช้พลังงานแสงอาทิตย์สามารถจำแนกออกเป็น 2 รูปแบบคือ การใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า และ การใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตความร้อน สำหรับการนำพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า มีทั้งระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (Stand alone) แบบต่อกับระบบจำหน่าย (Grid connected) และแบบผสมผสาน (PV Hybrid system) สำหรับการนำพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าแบบเดิมนิยมทำแบบอิสระหรือไม่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย แต่ในปัจจุบันมีการศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์แปลงกระแสที่สามารถทำงานร่วมกับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าได้ จึงทำให้การใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าแบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายเป็นที่นิยมมากขึ้น และการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดต่อเชื่อมระบบจำหน่ายที่นิยมทำคือการขนานไฟที่ผลิตได้จากพลังงานแสงอาทิตย์ลงไปในบ้านเพื่อลดค่าไฟ และการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อขายไฟให้การไฟฟ้า เช่น โซลาร์รูฟท็อป (Solar PV Rooftop) และโซลาร์ฟาร์ม (Solar Farm) เป็นต้น ซึ่งการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาเป็นอีกหนึ่งในพลังงานทดแทนที่มีประโยชน์ คู่คุณค่าและนำลงทุน สำหรับโรงงาน อาคารธุรกิจ หรือแม้กระทั่งบ้านพักอาศัย เนื่องจากเป็นการใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่แล้วนั่นคือแสงอาทิตย์ มาผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้าไว้ใช้เองในบ้าน อาคาร หรือหากผลิตได้มากเกินความต้องการก็สามารถจำหน่ายคืนให้การไฟฟ้าได้ จึงเป็นอีกช่องทางหนึ่งในการสร้างรายได้ อีกทั้งยังเป็นการสร้างความมั่นคงด้านพลังงานของประเทศ และช่วยลดภาวะโลกร้อนได้อีกด้วย ดังนั้น งานวิจัยวิทยานิพนธ์จะมุ่งเน้นวิจัย

เกี่ยวกับพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาสำหรับบ้านพักอาศัย โดยทำการศึกษาและพัฒนาการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังงานที่สามารถทำงานร่วมกับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าหรืออินเวอร์เตอร์ที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ทั้งในสภาวะแบบอิสระและสภาวะแบบเชื่อมต่อกับระบบ

จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่า อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายที่แหล่งจ่ายของวงจรเป็นพลังงานแสงอาทิตย์ติดตั้งบนหลังคาพิกัดกำลังไฟฟ้าไม่เกิน 10 กิโลวัตต์ มีหลากหลายชนิดไม่ว่าจะเป็นอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน แหล่งจ่ายกระแส และแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ ซึ่งจากการเปรียบเทียบเปรียบเทียบข้อดี และข้อเสียของอินเวอร์เตอร์แต่ละชนิด พบว่า อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ ไม่ต้องต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรมและขนานจำนวนหลาย ๆ แผง กระแสและแรงดันมีค่าไม่สูงมาก อิมพีแดนซ์ในวงจรไม่จำเป็นต้องมีขนาดใหญ่มาก ผู้วิจัยจึงเลือกศึกษาอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ ซึ่งเป็นวงจรแปลงผันพลังงานที่ถูกออกแบบโดย F.Z.Peng ในปี ค.ศ. 2003 มีความสามารถในการขยายและลดทอนแรงดันจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้โดยอาศัยการทำงานของอิมพีแดนซ์ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และไดโอด โดยแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอดไรต์ถูกพัฒนามาจากโครงสร้างพื้นฐานของวงจรพื้นฐาน โดยปรับเปลี่ยนตำแหน่งของอิมพีแดนซ์ในวงจร เพื่อลดจำนวนและขนาดพิกัดของอิมพีแดนซ์ในวงจร เพิ่มอัตราขยายของวงจร เพิ่มประสิทธิภาพและการปรับปรุงการควบคุม อีกทั้งทำให้กระแสไฟฟ้าในวงจรอินเวอร์เตอร์มีความต่อเนื่อง โดยมีสภาวะโหมดการทำงาน 2 สภาวะ ได้แก่ shoot-through states เกิดขึ้นเมื่อสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์อยู่ในสภาวะลัดวงจร และ non shoot-through states เป็นการทำงานในสภาวะปกติโดยวงจรจะจ่ายกระแสไปยังอินเวอร์เตอร์ โดยจากการทำงานของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอดไรต์ทั้งสองสภาวะการทำงาน ทำให้อินเวอร์เตอร์ชนิดนี้สามารถจ่ายกระแสได้อย่างต่อเนื่อง สำหรับการควบคุมการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอดไรต์ จะอาศัยแบบจำลองพลวัตของอินเวอร์เตอร์เพื่อใช้ในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ซึ่งมีหลายเทคนิคในการออกแบบตัวควบคุมไม่ว่าจะเป็นตัวชดเชยเฟสล้ำหน้า-ล้ำหลัง (phase lead-lag compensator) แผนภาพโบเด (bode plot) วิธีโลกัสกราก (root-locus methods) (Y. Li et al., 2013) และการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง (W. Mo, P. C. Loh, and F. Blaabjerg., 2011) ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้เทคนิคการออกแบบตัวควบคุมสำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอดไรต์ที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายด้วยวิธีโลกัสกราก เนื่องจากสามารถดูผลการตอบสนองของระบบเชิงเวลาได้ ไม่ว่าจะเป็นผลการตอบสนองชั่วขณะ ความผิดพลาดในสภาวะคงที่และเวลาในการเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว โดยโหมดไม่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายหรือโหมดอิสระของค่าแรงดันของตัวเก็บประจุจะถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมด้านกระแสตรงใช้ตัวควบคุมพีไอ ส่วนตัวควบคุมด้านกระแสสลับจะควบคุมค่าแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ โดยใช้ตัวควบคุมพีไอบนแกนดีคิว ส่วนโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ถูกควบคุมด้วยตัวควบคุม

ฟิวส์ในตัวควบคุมด้านกระแสตรง ส่วนการควบคุมด้านกระแสสลับจะเป็นการควบคุมกระแสไฟฟ้าอ้างอิง โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันของตัวเก็บประจุ และกระแสไฟฟ้ากริด สามารถแสดงโครงสร้างการควบคุมอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ได้ดังรูปที่ 1.1

สำหรับการออกแบบตัวควบคุมฟิซซี ถูกนำมาใช้ออกแบบตัวควบคุมสำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ ในโหมดการเชื่อมต่อโหมตอิสระและโหมตเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายในการควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์ด้านกระแสตรงทั้งสองโหมตการเชื่อมต่อ โดยการออกแบบตัวควบคุมฟิซซี ค่าตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพของระบบได้มาจากการลองผิดลองถูก และความอาศัยสัมพันธ์ของฟังก์ชันสมาชิกภาพอินพุต และฟังก์ชันสมาชิกภาพเอาต์พุต เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการควบคุมของวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ ทั้งในโหมตอิสระและโหมตเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย และได้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าตัวควบคุมฟิโอยู่งั้นในด้านของสภาวะชั่วคราว และสภาวะอยู่ตัวในทุกสภาวะความเข้มแสง



รูปที่ 1.1 โครงสร้างการควบคุมอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ที่พิจารณาในงานวิจัย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาค้นคว้าองค์ความรู้เกี่ยวกับระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

1.2.2 เพื่อศึกษาองค์ความรู้เกี่ยวกับการควบคุมและการออกแบบตัวควบคุมของแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์

1.2.3 เพื่อคิดค้นองค์ความรู้ และพัฒนาเกี่ยวกับการควบคุมพลังงานแสงอาทิตย์ติดตั้งบนหลังคาที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าด้วยวิธีตรรกศาสตร์คลุมเครือ

1.2.4 เพื่อสร้างโปรแกรมจำลองสถานการณ์วงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์โดยใช้เทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป

1.2.5 เพื่อสร้างโปรแกรมจำลองสถานการณ์ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายโดยใช้เทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป

1.2.6 เพื่อสร้างต้นแบบระบบฮาร์ดแวร์วงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ สำหรับยืนยันความถูกต้องขององค์ความรู้ต่าง ๆ ที่ได้นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 ระบบที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์เป็นระบบที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าสามเฟส

1.3.2 วงจรอินเวอร์เตอร์ที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดไม่มีหม้อแปลง

1.3.3 การจำลองสถานการณ์ระบบการควบคุมพลังงานแสงอาทิตย์ติดตั้งบนหลังคาที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ จะพิจารณาการควบคุมทั้งในโหมดอิสระและโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

1.3.4 โหลดกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์เป็นโหลดความต้านทานสามเฟสแบบอุดมคติ

1.3.5 การจำลองสถานการณ์ใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ Simulink บนโปรแกรม MATLAB

1.3.6 การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ใช้วิธีการแบบดั้งเดิมที่อาศัยพื้นฐานความรู้จากทฤษฎีระบบควบคุม

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 งานวิจัยวิทยานิพนธ์จะพิจารณาการควบคุมพลังงานแสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าสามเฟส

1.4.2 ระบบที่ศึกษาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์กับชุดทดสอบที่จะสร้างขึ้นมีค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าและค่าพารามิเตอร์ที่ต่างกัน

1.4.3 ชุดทดสอบแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ที่จะสร้างขึ้นจะพิจารณาการควบคุมเฉพาะโหมดอิสระเท่านั้น

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ได้องค์ความรู้ด้านการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย
- 1.5.2 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับชนิดของอินเวอร์เตอร์สำหรับการเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า
- 1.5.3 ได้โปรแกรมสำหรับการจำลองสถานการณ์ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายบนโปรแกรม Simulink
- 1.5.4 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการออกแบบตัวควบคุมพีไอ สำหรับวงจรแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์
- 1.5.5 ได้องค์ความรู้ใหม่ในการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีตรรกศาสตร์คลุมเครือ สำหรับวงจรแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์
- 1.5.6 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการควบคุมพลังงานแสงอาทิตย์ติดตั้งบนหลังคาที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า
- 1.5.7 ได้ต้นแบบวงจรแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ สำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ
- 1.5.8 ได้บทความวิจัยเผยแพร่ในระดับชาติ และระดับนานาชาติ

1.6 การจัดรูปเล่มรายงาน

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ประกอบไปด้วย 8 บท แต่ละบทมีรายละเอียดที่นำเสนอต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตการวิจัย รวมถึงประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงปรีทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพลังงานแสงอาทิตย์ติดตั้งบนหลังคาที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า

บทที่ 3 นำเสนอโครงสร้างของระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย และข้อกำหนดในการติดตั้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา รวมไปถึงการเลือกชนิดของอินเวอร์เตอร์ที่เหมาะสมกับเซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้งบนหลังคา

บทที่ 4 นำเสนอโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ การปรับปรุงและพัฒนาวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ การพิจารณาสถานะโหมดการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และวิธีการควบคุมสัญญาณการสวิตช์อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์

บทที่ 5 นำเสนอโครงสร้างการควบคุมอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย รวมไปถึงการออกแบบตัวควบคุมของอินเวอร์เตอร์โหมตอิสระและโหมตเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย และการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ที่พึ่งพาโปรแกรม Simulink ร่วมกับโปรแกรม MATLAB ผ่านชุดบล็อก SimPowerSystems

บทที่ 6 นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีซี-พีไอสำหรับอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ นอกจากนี้ยังมีการนำเสนอการจำลองสถานการณ์ของระบบที่พิจารณาเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมพีไอกับตัวควบคุมพีซี-พีไอ ทั้งในโหมตอิสระและโหมตเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย ด้วยโปรแกรม Simulink ร่วมกับโปรแกรม MATLAB ผ่านชุดบล็อก SimPowerSystems

บทที่ 7 นำเสนอการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ ที่ใช้โปรแกรม Simulink/MATLAB ร่วมกับบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 Experiment Kit เปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมพีไอและตัวควบคุมพีซี-พีไอ และการสร้างชุดทดสอบแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ในโหมตอิสระ ในห้องปฏิบัติการ และผลการทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องขององค์ความรู้ต่าง ๆ ที่ได้นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

บทที่ 8 บทสรุปและข้อเสนอแนะ กล่าวถึงผลสรุปและจุดเด่นของการทำวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ พร้อมทั้งนำเสนอปัญหาและข้อเสนอแนะ เพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับพัฒนางานวิจัยในอนาคต

ภาคผนวกในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มี 4 ส่วน คือ ภาคผนวก ก. แสดงนำเสนอบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการทำวิจัยวิทยานิพนธ์ ภาคผนวก ข. แสดงรายละเอียดชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังสำหรับการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ใน Simulink บนโปรแกรม MATLAB ของระบบที่พิจารณา ภาคผนวก ค. การตามรอยจุดกำลังงานสูงสุดด้วยอัลกอริทึมเพิ่มค่าความนำ ภาคผนวก ง. แสดงกราฟคุณลักษณะของกระแส กำลังไฟฟ้าและแรงดัน ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในชุดทดสอบ และภาคผนวก จ. แสดงรายละเอียดของโปรแกรมการควบคุมของชุดทดสอบแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ในโหมตอิสระบนบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335

บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เกี่ยวกับพลังงานแสงอาทิตย์ติดตั้งบนหลังคาที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าซึ่งจากการศึกษาข้อมูลงานวิจัยดังกล่าว พบว่า ในอดีตที่ผ่านมาผู้ทำการวิจัยคิดค้นและพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน ดังนั้นในบทนี้ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ประกอบด้วยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ ผลการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมในประเด็นข้างต้นได้ถูกนำเสนอไว้ในหัวข้อ 2.2 ถึง 2.4 ตามลำดับ รายละเอียดการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วย ปีที่ตีพิมพ์ คณะผู้วิจัย และสาระสำคัญที่ได้รับจากงานวิจัย นอกจากนี้ ได้นำเสนอภาพรวมปรัทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทั้งหมดตามที่ผู้วิจัยได้ศึกษา

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย

การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย (PV Grid connected system) เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ถูกออกแบบสำหรับผลิตไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเข้าสู่ระบบสายส่งไฟฟ้าโดยตรง ใช้ผลิตไฟฟ้าในเขตเมืองหรือพื้นที่ที่มีระบบจำหน่ายไฟฟ้าเข้าถึง ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่าย ส่วนใหญ่ระบบจะประกอบไปด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ วงจรรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง วงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เป็นระบบที่ในปัจจุบันและในอนาคตมีแนวโน้มที่จะได้รับการพัฒนาและถูกนำมาใช้งาน ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงศึกษาค้นคว้างานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย ซึ่งสามารถแสดงเป็นปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังตารางที่ 2.1 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2006	J. M. Chang, W. N. Chang and S. J.Chang	นำเสนอเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย โดยใช้อินเวอร์เตอร์แบบสามเฟส-สามขาที่เชื่อมต่อกับวงจรรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าและแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียระหว่างวงจรกระแสสลับและวงจรเรียงกระแส นอกจากนี้ยังทำให้การควบคุมวงจรกระแสตรงเพื่อติดตามจุดกำลังไฟสูงสุดสามารถควบคุมได้อย่างอิสระและง่ายกว่า จากผลการนำเสนอ สามารถดึงกำลังไฟสูงสุด ลดแรงดันกระแสเฟืองของวงจร และลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของวงจร
2009	Yilmaz Sozer and David Torrey	นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอินเวอร์เตอร์สามเฟสชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย การออกแบบตัวควบคุม การซิงโครไนซ์แรงดันกริดเพื่อเชื่อมต่อ การดึงกำลังงานสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์และวิธีการควบคุมสวิตช์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม และนำเสนอการควบคุมในโหมดแยกอิสระ และโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย
2009	G. Brando, A. Dannier and R. Rizzo	นำเสนอระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย โดยใช้หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละตัวจะเชื่อมกับวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสจำนวนสองชุด ส่งกำลังไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าความถี่สูงที่มีการเชื่อมต่อกับวงจรเรียงกระแสแบบสามเฟสที่เชื่อมต่อกันแบบ H-bridge โดยที่จะได้แรงดันเอาต์พุตที่มีแรงดันสูง และเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย
2009	Yangjun Lu, Kai Sun, Hongfei Wu and Yan Xing	นำเสนอระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายแบบที่เชื่อมต่อกับแบบไฮบริด โดยแต่ละอินเวอร์เตอร์มีการติดตามจุดพลังงานสูงสุด และการควบคุมการแบ่งปันแรงดันไฟฟ้าแบบอิสระด้วยการมอดูเลตความกว้างพัลส์หลายโมดูลและการเลื่อนเฟส อีกทั้งยังมีการควบคุมแรงดันในบัสไฟฟ้าแรงสูง แบบสองทิศทางเพื่อรักษาสมดุลพลังงานและแรงดันไฟฟ้าที่เอาต์พุต

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2012	Saritha Balathandayuthapani, Chris S. Edrington, Shawn D. Henry and Jianwu Cao	นำเสนอระบบไฟฟ้าโซลาร์เซลล์แบบมัลติสตริงที่วงจรรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมต่อกับอินเวอร์เตอร์แบบศูนย์กลาง โดยที่แยกการควบคุมบูสต์คอนเวอร์เตอร์แต่ละตัวพร้อมกับควบคุมจุดกำลังสูงสุดเซลล์แสงอาทิตย์ สำหรับอินเวอร์เตอร์แบบศูนย์กลางควบคุมโดยป้อนค่ากระแสและแรงดันอินพุตอ้างอิง รวมถึงค่าแรงดันกริดเพื่อซิงโครไนซ์และควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์
2014	Baburaj Karanayil, Vassilios G. Agelidis, and Josep Pou.	นำเสนอระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย โดยการปรับปรุงตัวเก็บประจุแบบฟิล์มอิเล็กทรอนิกส์แบบเดิมด้วยฟิล์มโพลีโพรพิลีนเคลือบโลหะ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ อายุการใช้งานของอินเวอร์เตอร์ แต่การปรับปรุงตัวเก็บประจุจะส่งผลให้ความจุสแรงดันไฟตรง ขึ้นต่ำจะนำไปสู่ระลอกคลื่นไฟฟ้าแรงสูง แต่อยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้
2015	Li Zhang, Kai Sun, Zhen Huang and Yun Wei Li	นำเสนอโครงสร้างการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับอินเวอร์เตอร์ แบบหลายสตริงอนุกรมกันและเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย โดยที่อินเวอร์เตอร์แต่ละตัวเป็นแบบขั้นเดียว มีการติดตามจุดกำลังงานสูงสุด และควบคุมวงจรแปลงผันกำลังงานแบบสแต็ปอัพ ส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าสูงขึ้น โดยที่แรงดันอินพุตมีค่าต่ำ การเชื่อมต่อกันแบบหลายสตริง จะสร้างความน่าเชื่อถือให้กับระบบที่มีการเชื่อมต่อกับจำหน่าย
2016	LI Baiyu and WEI Dong	นำเสนอการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับตัวเก็บประจุและตัวต้านทานที่ต่ออนุกรม-ขนานและต่อกับวงจรอินเวอร์เตอร์ เอาต์พุตที่ออกจากอินเวอร์เตอร์จะเชื่อมต่อ

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
		กับตัวเหนี่ยวนำก่อนเข้าสู่ระบบจำหน่าย โดยอาศัยการควบคุมอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันเป็นอินพุตและแหล่งจ่ายกระแสเป็นเอาต์พุต ควบคุมทั้งรูปในและรูปนอก ด้วยการวัดค่าแรงดันจากเครื่องมือวัดและจากระบบจำหน่ายป้อนกลับเข้าสู่ระบบควบคุม
2017	Jiuhe Wang, Xiaobin Mu, and Qing-Kui Li	นำเสนอการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อระบบจำหน่ายแบบ T-type neutral point clamped (T-NPC) ที่ระบบจำหน่ายมีขนาดใหญ่ โดยมีการควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายและตัวกรองที่มีตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ โดยใช้การควบคุมกระแสตรงร่วมกับการควบคุมแบบพาสซีฟ และมีการเชื่อมต่อจุดนิวทรัลของวงจรเข้าด้วยกัน ทำให้ประสิทธิภาพของการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงดีขึ้น ปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า และลดทอนอิทธิพลของการหน่วงเวลาในอินเวอร์เตอร์
2018	Ahmed I. M. Ali, Essam E. M. Mohamed, Mahmoud A. Sayed and Mahmoud S. R. Saeed	นำเสนออินเวอร์เตอร์แบบหลายระดับ สำหรับระบบผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย ที่มีแหล่งพลังงานเดียว เชื่อมต่อกับตัวเก็บประจุตัวที่เชื่อมต่อบนุกรมเพื่อสร้างเอาต์พุตเก้าระดับ อินเวอร์เตอร์จะประกอบด้วยวงจรหลักและวงจรเสริม วงจรหลักเป็นอินเวอร์เตอร์ H-bridge ซึ่งจะควบคุมแรงดันขาออก วงจรเสริมเป็นแบบพิเศษมีโครงสร้างของอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งเพื่อให้ได้เอาต์พุตหลายระดับ ทั้งนี้ยังมีการติดตามจุดพลังงานสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้ลดกำลังความสูญเสียในวงจรและอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่ง ฮาร์มอนิกรวมต่ำ และสามารถเพิ่มแรงดันเอาต์พุตได้

จากการปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย โครงสร้างของระบบจะประกอบไปด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เชื่อมต่อกับวงจรรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งวงจรรักษาระดับแรงดันจะต้องมีตัวควบคุมการตามรอย

จุดกำลังสูงสุดเพื่อให้สามารถดึงกำลังงานสูงสุดที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ ณ ความเข้มแสง และสภาพแวดล้อมขณะนั้นมาใช้งานให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด และเชื่อมต่อกับวงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้ โดยวงจรดังกล่าวจะต้องอาศัยการควบคุมและตัวควบคุม โดยมีการวัดค่าแรงดันและเฟสไฟฟ้าจากการไฟฟ้าเพื่ออ้างอิงให้ระบบควบคุม เพื่อทำให้วงจรสามารถผลิตไฟฟ้าที่มีลักษณะเหมือนกับไฟฟ้าของการไฟฟ้า ทำให้ไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโซล่าเซลล์สามารถป้อนให้กับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าได้

ดังนั้นต้องปรับโครงสร้างกรรมในและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า (Grid tie inverter) เพื่อให้มีความเข้าใจเกี่ยวกับการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่ายมากขึ้นสามารถแบ่งประเภทอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายได้ดังหัวข้อที่ 2.3

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับชนิดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าหรืออินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย มีหน้าที่แปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ตามขนาดแรงดันและความถี่ที่ต้องการ และส่งเข้าสายส่งไฟฟ้าใช้งานได้ทันที รวมทั้งสามารถรักษาระดับแรงดันขาออกให้มีค่าคงที่แม้แรงดันขาเข้าจะมีการเปลี่ยนแปลง โดยจะต้องใช้แรงดันอ้างอิงจากไฟฟ้ากระแสสลับของการไฟฟ้า และผลิตไฟฟ้าที่มีลักษณะเหมือนกับไฟฟ้าของการไฟฟ้า ทำให้ไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถจำหน่ายไฟให้การไฟฟ้าได้ ซึ่งการผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นเป็นการผลิตไฟฟ้าและใช้ทันทีโดยไม่ต้องสำรองในแบตเตอรี่ ซึ่งสามารถแสดงเป็นปฏิสัมพันธ์กรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังตารางที่ 2.2 ดังนี้

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2003	F.Z. Peng.	นำเสนอโครงสร้างและแบบจำลองของอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ ซึ่งเป็นอินเวอร์เตอร์ขั้นเดียว โดยการใช้อิมพีแดนซ์ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และไดโอดต่อร่วมกัน ทำให้สามารถเพิ่มระดับแรงดันและลดทอนระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ อีกทั้งการควบคุมสัญญาณสวิทซ์ในแต่ละโหมดของอินเวอร์เตอร์

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2007	Wu Libo, Zhao Z. and Liu Jianzheng	นำเสนออินเวอร์เตอร์แบบขั้นเดียวสามเฟสเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย โดยใช้การควบคุมติดตามจุดพลังงานสูงสุดด้วยวิธีเพิ่มค่าความนำ และมีการชดเชยพลังงานรีแอกทีฟสำหรับโหลดเพื่อลดภาระของกริด ด้วยตัวควบคุมค่ากระแสเอาต์พุตอ้างอิงที่เชื่อมต่อกับกริดสามเฟส ผลการจำลองและผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวงจรด้วยอินเวอร์เตอร์แบบขั้นเดียวมีความเสถียรและมีประสิทธิภาพในการควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตได้สูง
2008	Yang Chen and Keyue Smedley	นำเสนออินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายแบบบустขั้นเดียว เนื่องจากวงจรบустจะสามารถทำงานได้ในช่วงแรงดันไฟฟ้าอินพุตที่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตสามารถทำงานในช่วงแรงดันพิกัดที่กว้างกว่าการใช้อินเวอร์เตอร์แบบบัก อีกทั้งยังสามารถลดการสูญเสียพลังงาน และลดความซับซ้อนของวงจร แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอินพุตได้ อีกทั้งยังสามารถติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ด้วยวิธีการควบคุมแบบการควบคุมรอบเดียว และความกว้างพัลส์สำหรับอินเวอร์เตอร์แบบบуст
2008	Joel Anderson and F.Z. Peng.	นำเสนอโครงสร้างและแบบจำลองของอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ ที่พัฒนามาจากโครงสร้างดั้งเดิม เพื่อให้สามารถจ่ายกระแสได้อย่างต่อเนื่อง ลดขนาดพิกัดของอิมพีแดนซ์ในวงจร เพิ่มอัตราขยายแรงดัน และลดความเครียดสวิตช์รวมไปถึงการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์
2012	Fabricio Bradaschia, and Marcelo C. Cavalcanti	นำเสนออินเวอร์เตอร์ Z-source (ZSI) ที่ใช้เทคนิคการมอดูเลตเฉพาะ เพื่อลดการรั่วไหลกระแสในระบบไฟฟ้าโซลาร์เซลล์สามเฟสแบบไม่ใช้หม้อแปลงไฟฟ้า โดยเมื่อเทียบกับโครงสร้างเดิมจะเกิดการรั่วไหลผ่านทางตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงมอดูเลตทำให้อินเวอร์เตอร์ชนิดนี้ทำงานได้อย่างต่อเนื่อง ลดการรั่วไหลกระแสไฟฟ้า และมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2019	Shri Prakash Sonkar, V.N. Lal and R. K. Singh	นำเสนออินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์จำนวนสองตัวซึ่งเชื่อมต่อกันแบบขนาน และแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์เชื่อมต่ออนุกรมกัน ซึ่งมีเอาต์พุตเป็นสามเฟส เพื่อนำไปสู่การพัฒนาอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อ n-parallel หรือ n-series ซึ่งแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ที่ต่อกันแบบอนุกรม และแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ต่อกันขนานจะได้เอาต์พุตแรงดันและกระแสกระแสสลับที่เท่ากัน โดยใช้เทคนิคการควบคุมการปรับความกว้างพัลส์ของสวิตช์อินเวอร์เตอร์
2022	Ravi Teja Pogulaguntla and Narsa Reddy Tummuru	นำเสนออินเวอร์เตอร์สามเฟสแบบฟลายแบ็คที่สามารถทำงานภายใต้โหมดการนำไฟฟ้าต่อเนื่องได้ สำหรับการใช้งานสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย เนื่องจากอินเวอร์เตอร์ฟลายแบ็คเป็นตัวแปลงต้นทุนต่ำ การทำงานของอินเวอร์เตอร์โดยมีการควบคุมมอดูเลตสวิตช์ทั้งความถี่สูงและความถี่ต่ำทำให้อินเวอร์เตอร์แบบฟลายแบ็คสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง

จากการปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายพบว่าวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดไม่มีหม้อแปลง สำหรับระบบไฟฟ้าสามเฟสที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายได้ อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันเป็นที่นิยม และใช้งานอย่างแพร่หลายแต่เนื่องจากวงจรต้องการระดับแรงดันไฟฟ้าที่สูงทำให้ต้องต่อเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรมจำนวนมากเพื่อให้มีระดับแรงดันที่เพียงพอ ซึ่งอาจทำให้มีระดับแรงดันสูงจนเกินไปดังนั้นอาจจำเป็นต้องใช้วงจรขยายแรงดันต่อเพิ่มในวงจร สำหรับอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแส ระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าต่ำ แต่กระแสไฟฟ้าจะมีค่าสูง ซึ่งส่งผลให้เกิดกำลังสูญเสียในวงจรเพิ่มขึ้นด้วย อีกทั้งจะต้องต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบขนานจำนวนหลายแผง เพื่อให้มีกระแสไฟฟ้ากระแสตรงเพียงพอ และอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์เป็นวงจรแปลงผันพลังงานที่ถูกออกแบบโดย F.Z.Peng ในปี ค.ศ. 2003 มีความสามารถในการขยายและลดทอนแรงดันจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้โดยอาศัยการทำงานของอิมพีแดนซ์ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และไดโอด ไม่ต้องต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรมและขนานจำนวนหลายแผง กระแสและแรงดันมีค่าไม่สูงมาก อิมพีแดนซ์ในวงจรไม่จำเป็นต้องมีขนาดใหญ่มาก มีกำลังสูญเสียน้อยและความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกสในระบบมีค่าต่ำ ซึ่งใน

หัวข้อถัดไปจะทำการปริทัศน์วรรณกรรม สํารวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายทั้งอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ และอินเวอร์เตอร์ชนิดอื่นๆที่เกี่ยวข้องด้วย

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2009	Hui Zhang, Hongwei Zhou, Jing Ren , Weizeng Liu , Shaohua Ruan and Yongjun Gao	นำเสนอการควบคุมอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันสามเฟสสำหรับพลังงานไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ ที่มีการการควบคุมติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดและรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าด้วยตัวควบคุมกระแสพี-ไอ โดยใช้เทคนิคการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ และมีการควบคุมการซิงโครไนส์บนแกนดีคิว โดยการควบคุมแบบดังกล่าวมีการตอบสนองไดนามิกที่รวดเร็วมาก มีกระแสกระเพื่อมน้อย และสัญญาณเอาต์พุตกระแสสลับมีลูกคลื่นสัญญาณต่อเนื่อง
2011	M. A. Mahmud, H. R. Pota, M. J. Hossain and N. K. Roy	นำเสนอการรักษาเสถียรภาพที่ของระบบไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ที่เชื่อมต่อกับกริดสามเฟส โดยควบคุมกระแสที่ฉีดเข้าไปในกริดและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อดึงพลังงานสูงสุดจากแผงโซลาร์เซลล์ด้วยตัวควบคุมแบบโรบัสแบบเชิงเส้นที่มีการป้อนกลับ ผลการจำลองสถานการณ์ในบทความแสดงให้เห็นว่าการควบคุมดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการรักษาเสถียรภาพที่ของระบบ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงได้ดี
2013	Zhiqiang Guo, Deshang Sha and Xiaozhong Lia	นำเสนอการควบคุมด้วยวิธีขนาดแรงดันและความถี่สำหรับอินเวอร์เตอร์สามเฟสชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย โดยควบคุมร่วมกับการก้าวผ่านสถานะการเชื่อมต่อแบบไร้รอยต่อ(seamless transfer) จากสถานะเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไปสถานะสแตนด์บายหรือไม่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2014	Lin Chen, Ahmadreza Amirahmadi and Qian Zhang	นำเสนอการควบคุมอินเวอร์เตอร์สองชั้น การทำงานในสถานะแรกจะควบคุมแรงดันดีซีของวงจรแปลงผันกำลังไฟตรงเป็นไฟตรง และสถานะที่สองควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟตรงเป็นไฟสลับ โดยควบคุมผ่านแรงดันดีซีที่ผ่านวงจรเรโซแนนซ์ นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอินเวอร์เตอร์สองชั้น และวงจรเรโซแนนซ์
2014	Ahmed Al-Durra, Alex Reznik, M. Godoy Simoes and S.M. Muyeen	นำเสนอการควบคุมสำหรับอินเวอร์เตอร์สามเฟสชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่เชื่อมต่อบริษัทจำหน่าย โดยใช้การควบคุมด้วยกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าปรากฏ โดยอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันสามารถทำงานได้ทั้งในโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย และโหมดอิสระที่ไม่ได้เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายเนื่องจากมีตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำเชื่อมต่อที่จุดต่อร่วม
2016	Abhisek Maiti, Kaushik Mukherjee and PrasidSyam	นำเสนอโครงสร้างตัวควบคุมประสิทธิภาพสูงของอินเวอร์เตอร์แบบสองชั้น แบบสามเฟสที่เชื่อมต่อกับพลังงานแสงอาทิตย์ระบบโซล่าเซลล์ และมีการติดตามจุดพลังงานสูงสุด โดยเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงก่อนแล้วจึงแปลงเพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสโดยการควบคุมความกว้างของพัลส์มอดูเลต ของอินเวอร์เตอร์สามเฟส
2016	F. Karbakhsh, G.B. Gharehpetian, J. Milimonfared and Armin Teymoori	นำเสนอการควบคุมสำหรับอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีชซีบนแกนดีคิวสำหรับระบบควบคุมกระแสและแรงดันสามเฟส แทนตัวควบคุมแบบพีไอ ออกแบบตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษาของตัวควบคุมพีชซีค่า อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดของกระแสในแกนดี และแรงดันบนแกนคิว และเอาต์พุตของตัวควบคุมพีชซีจะกำหนดให้เป็นค่าแรงดันกริดบนแกนดีคิว

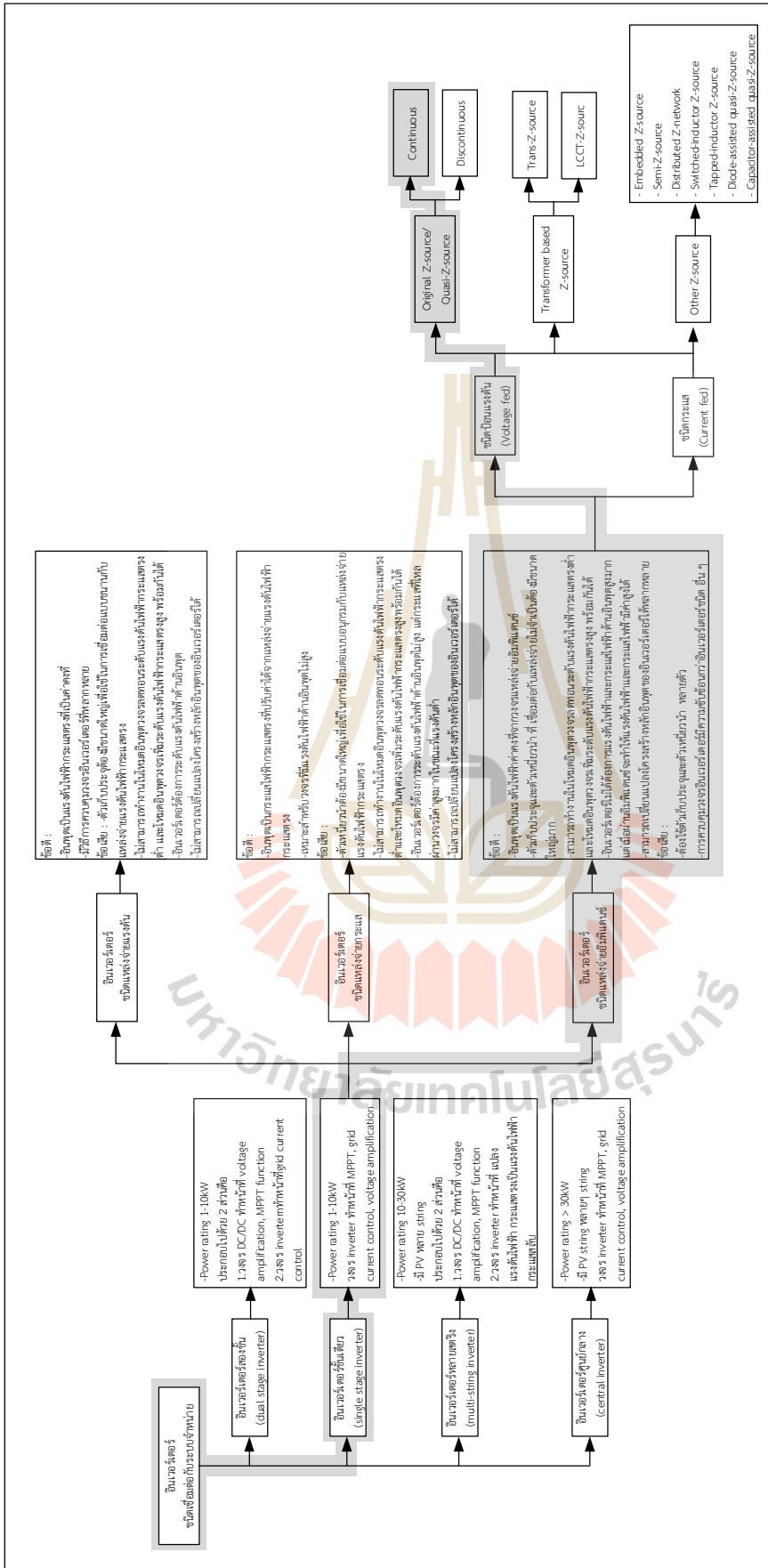
ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2017	L.Campanhol and S.Silva	นำเสนอการควบคุมอินเวอร์เตอร์ขั้นเดียวและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยการควบคุมเป็นชดเชยและฟีดฟอร์เวิร์ด โดยโครงสร้างของระบบเป็นการต่อแบบผสมอินเวอร์เตอร์ขนานและอินเวอร์เตอร์อนุกรม เข้ากับระบบจำหน่าย เพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้ทั้งในสภาวะสแตนด์บายและสภาวะเชื่อมต่อบริเวณจำหน่าย
2017	Nasif Mahmud, Ahmad Zahedi and Asif Mahmud	นำเสนอปัญหาการควบคุมแรงดันไฟฟ้าในระบบที่มีการเชื่อมต่อบริเวณจำหน่าย เสนอการควบคุมการทำงานร่วมกันของตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID) และการควบคุมแบบโครงข่ายระบบประสาทยืดหยุ่นแบบปรับได้ โดยสามารถสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสภายใต้สภาพการทำงานที่ไม่เชิงเส้นได้
2019	Hasan Komurcugil and Sertac Bayhan	นำเสนอตัวควบคุมแบบพีไอและการควบคุมตามโหมดเคลื่อนสำหรับกริดสามเฟส โดยใช้อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอดไรต์ชนิด T สามระดับ โดยใช้วิธีการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอ เพื่อควบคุมแรงดันตัวของเก็บประจุกระแสตรงและกระแสเหนี่ยวนำ และการควบคุมโหมดการเคลื่อนสำหรับการควบคุมกระแสกริด
2019	Basil Hamed and Nouh A. Qaoud	นำเสนอตัวควบคุมแบบพีซีสำหรับอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์โดยใช้วิธีการอนุमानในระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือแบบมีมดानी มีอินพุต 3 ตัวได้แก่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง กระแสไฟฟ้ากระแสตรง และแรงดันที่ตัวเก็บประจุ (V_{C1}) และ เอาต์พุต 2 ตัวได้แก่ มอดูเลต และ ค่าวัฏจักรหน้าที ของอินเวอร์เตอร์
2021	Mohamed Ali, Abdelbasset Krama and Shady S. Refaat	นำเสนอการควบคุมโหมดการเคลื่อนอินทิกรัลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเชื่อมต่อบริเวณจำหน่าย โดยการควบคุมด้วยโหมดการเคลื่อนจะอาศัยการอ้างอิงตามแรงดันไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายสามเฟส และกระแสไฟฟ้าที่วงจรดีซี

ในการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายพบว่า งานวิจัยส่วนมากนิยมใช้การควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอ เนื่องจากมีโครงสร้างการควบคุมที่ไม่ซับซ้อน ให้ประสิทธิภาพการควบคุมที่ดี และการออกแบบพารามิเตอร์ตัวควบคุมมีหลากหลายวิธีการ แต่การออกแบบตัวควบคุมพีไอยังมีข้อจำกัด เช่นพารามิเตอร์วงจรถูกใช้ออกแบบ พิกัดและขอบเขตของการควบคุมมีความจำเพาะเจาะจงกับระบบใดระบบหนึ่ง และสมรรถนะของระบบอาจเปลี่ยนไปถ้าพารามิเตอร์ของระบบมีการเปลี่ยนแปลง ผู้วิจัยจึงได้ปริทัศน์เพิ่มเติมเกี่ยวกับตัวควบคุมพีซีซี เนื่องจากสามารถออกแบบการควบคุมโดยอาศัยความสัมพันธ์ของอินพุตและเอาต์พุตระหว่างตัวควบคุม มีความยืดหยุ่นกับระบบมากกว่า และไม่ต้องอาศัยพารามิเตอร์วงจรถูกใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุม ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้ตัวควบคุมพีซีซีในการควบคุมอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย ซึ่งรายละเอียดการออกแบบตัวควบคุมจะนำเสนอในบทที่ 6

2.5 สรุป

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเกี่ยวกับพลังงานแสงอาทิตย์ติดตั้งบนหลังคาที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายสามารถสรุปเป็นแผนภาพแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 โดยผลการศึกษา งานวิจัยที่เกี่ยวข้องทำให้ผู้วิจัยได้มีองค์ความรู้เกี่ยวกับ ชนิดของอินเวอร์เตอร์ และระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ สำหรับการเลือกชนิดของอินเวอร์เตอร์สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะเลือกศึกษาและพัฒนาอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ ซึ่งเป็นอินเวอร์เตอร์ขั้นเดียวที่มีความสามารถในการขยายและลดทอนแรงดันจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ โดยอาศัยการทำงานของอิมพีแดนซ์ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และไดโอด ไม่ต้องต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรมและขนานจำนวนหลายแผง อีกทั้งอิมพีแดนซ์ในวงจรไม่จำเป็นต้องมีขนาดใหญ่มาก นอกจากนี้จากการปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์จะเป็นองค์ความรู้นำไปสู่การศึกษา พัฒนาและออกแบบตัวควบคุมโดยใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ของระบบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ในอนาคตอีกด้วย



รูปที่ 2.1 แผนภาพผลการบริษัทวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

บทที่ 3

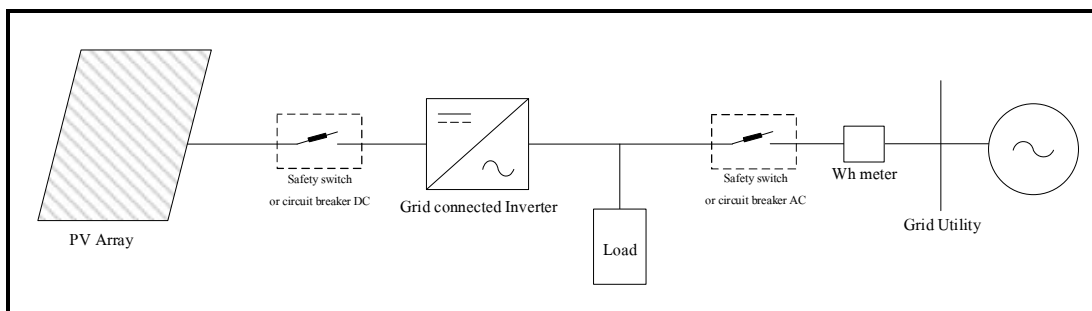
โครงสร้างของระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

3.1 บทนำ

โครงสร้างของระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายในงานวิจัยวิทยานิพนธ์แบ่งออกเป็นสองส่วนที่สำคัญได้แก่ระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย โดยระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์มุ่งเน้นวิจัยเกี่ยวกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา ซึ่งการติดตั้งจะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดในการติดตั้ง และข้อกำหนดการเชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เพื่อความเข้าใจและนำไปสู่การวิจัยในอนาคต นอกจากนี้ยังได้ทำการปฐมนิเทศวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า การเลือกศึกษาชนิดอินเวอร์เตอร์ รวมไปถึงข้อดีและข้อเสียของอินเวอร์เตอร์ ที่เลือกใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์อีกด้วย

3.2 พลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา (Solar PV Rooftop)

พลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา คือการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องติดตั้งไว้บนหลังคาบ้าน/ตาดฟ้าของอาคารเท่านั้น แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำหน้าที่เป็นตัวรับแสงแดดแล้วเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current : DC) และจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้ากับอุปกรณ์แปลงผันไฟฟ้าชนิดต่อเข้ากับระบบจำหน่าย (Grid connected Inverter) เพื่อเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternative current : AC) เพื่อจ่ายไฟให้กับเครื่องใช้ไฟฟ้าในบ้านใช้งาน อีกทั้งจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านเครื่องวัดพลังงาน (Watt hour meter) และเชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าเพื่อจำหน่ายคืนให้การไฟฟ้า แสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

3.2.1 ข้อดีของพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา

ข้อดีของพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา ได้แก่

- 1) แผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นตัวรับแสงแดดแทนหลังคา จึงช่วยลดความร้อนของหลังคาได้
- 2) ช่วยลดค่าไฟฟ้า เนื่องจากสามารถผลิตไฟฟ้าใช้เองได้
- 3) เป็นการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังงานหมุนเวียนที่สะอาด ไม่มีที่สิ้นสุด ช่วยชะลอการก่อสร้างโรงไฟฟ้า
- 4) เป็นการผลิตไฟฟ้าแบบกระจายไปในภูมิภาคต่างๆ ช่วยลดการก่อสร้างระบบสายส่งไฟฟ้า และลดการสูญเสียไฟฟ้าในระบบสายส่ง
- 5) สร้างรายได้ หากมีการขายไฟคืนให้แก่การไฟฟ้า
- 6) สร้างความมั่นคงทางด้านพลังงานให้แก่ประเทศชาติ และช่วยลดภาวะโลกร้อน

3.2.2 ข้อกำหนดในการติดตั้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา

งานวิจัยวิทยานิพนธ์จะมุ่งเน้นวิจัยเกี่ยวกับระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่ายในลักษณะที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้งบนหลังคาสำหรับบ้านอยู่อาศัย และแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีขนาดกำลังการผลิตติดตั้งไม่เกิน 10 กิโลวัตต์ ซึ่งตามข้อกำหนดการขออนุญาตจะต้องติดตั้งบนหลังคาบ้านพื้นที่ไม่เกิน 160 ตารางเมตร และน้ำหนักไม่เกิน 20 กิโลกรัมต่อตารางเมตร จึงจะไม่ถือว่าเป็นการตัดแปลงบ้าน/อาคาร การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถติดตั้งได้บนพื้นที่ว่าง ทั้งบนหลังคาบ้าน บนหลังคาโรงจอดรถ บนหลังคาอาคารต่าง ๆ และตำแหน่งการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องเป็นตำแหน่งที่สามารถรับแสงอาทิตย์ได้ตลอดเวลาทั้งวัน โดยต้องไม่มีสิ่งปลูกสร้างหรือสิ่งของอื่นใดมาบดบังแสงอาทิตย์ โดยปกติแล้วการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในเมืองไทย นิยมที่จะติดตั้งให้ด้านหน้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หันไปทางทิศใต้ เนื่องจากดวงอาทิตย์จะเคลื่อนที่

จากทิศตะวันออกไปทางทิศตะวันตกโดยเคลื่อนที่อ้อมทิศใต้ นอกจากนี้ความลาดเอียงของแผงควรมีความลาดชันประมาณ 15- 20 องศากับพื้นดิน เพื่อให้แสงอาทิตย์กระทบตั้งฉากกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในช่วงเที่ยงให้มากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ โดยการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาบ้านแสดงจะต้องทำการขออนุญาตและเป็นไปตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

3.2.3 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

การติดตั้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาสำหรับบ้านอยู่อาศัยและเชื่อมต่อบริเวณโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิกษาค้นจำเป็นจะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อบริเวณโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2559 (ระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิกษาค้นว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อบริเวณโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2559, 2559) ซึ่งสรุปใจความสำคัญได้ดังนี้

1. ข้อกำหนดทางเทคนิค

1.1 แรงดันและความถี่

แรงดันและความถี่ของระบบผลิตไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากจะต้องเข้ากันได้กับระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิกษาค้นและเป็นไปตามระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิกษาค้นว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อบริเวณโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2559

1.2 ฮาร์โมนิก (Harmonics)

ระบบผลิตไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากจะต้องไม่สร้างกระแสฮาร์โมนิกจ่ายเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าเกินขีดจำกัดที่กำหนดไว้ ตามระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิกษาค้นว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อบริเวณโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2559 สำหรับการตรวจวัดที่ระดับแรงดันอื่นๆ นอกเหนือจากข้อกำหนดข้างต้นให้นำมาตราชาน IEC ที่เหมาะสมมาใช้

1.3 แรงดันกระเพื่อม (Voltage Fluctuation)

ระบบผลิตไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากจะต้องไม่ก่อให้เกิดแรงดันกระเพื่อมเกินขีดจำกัดที่กำหนดไว้ตามระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิกษาค้นว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อบริเวณโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2559

1.4 การจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Injection)

ระบบผลิตไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากจะต้องไม่จ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าเกินขีดจำกัดที่กำหนดไว้ ตามระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิกษาค้นว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อบริเวณโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2559

1.5 การควบคุมกำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Reactive Power control)

ระบบผลิตไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากจะต้องสามารถควบคุมตัวประกอบกำลังหรือกำลังไฟฟารีแอกทีฟเพื่อรักษาระดับแรงดัน ณ จุดต่อเชื่อม ให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของ กฟภ. โดยระบบผลิตไฟฟ้าของผู้ขอใช้บริการจะต้องมีความสามารถดังตารางที่ 3.1 ดังนี้

ตารางที่ 3.1 การควบคุมตัวประกอบไฟฟ้ากำลังของระบบผลิตไฟฟ้าแบ่งตามระดับแรงดัน ณ จุดต่อเชื่อมกับระบบของ กฟภ.

ระดับแรงดัน ณ จุด PCC	* ความสามารถในการปรับค่า Power factor	วิธีการควบคุมกำลังไฟฟารีแอกทีฟ
1) ระดับแรงดันต่ำ 2) ระดับแรงดันปานกลางหรือระดับแรงดันสูง (กำลังผลิตติดตั้งไม่เกิน 500 กิโลวัตต์)	0.95 lagging to 0.95 leading เป็นอย่างน้อย	ควบคุมได้อย่างน้อย 1 วิธี คือ A fixed displacement factor $\cos\theta$
3) ระดับแรงดันปานกลางหรือระดับแรงดันสูง (กำลังผลิตติดตั้งมากกว่า 500 กิโลวัตต์)	0.90 lagging to 0.90 leading เป็นอย่างน้อย	ควบคุมได้อย่างน้อย 2 วิธี คือ 1) A fixed displacement factor $\cos\theta$ 2) A variable reactive power depending on the voltage Q(U)

1.6 การควบคุมกำลังไฟฟ้า (Active power control)

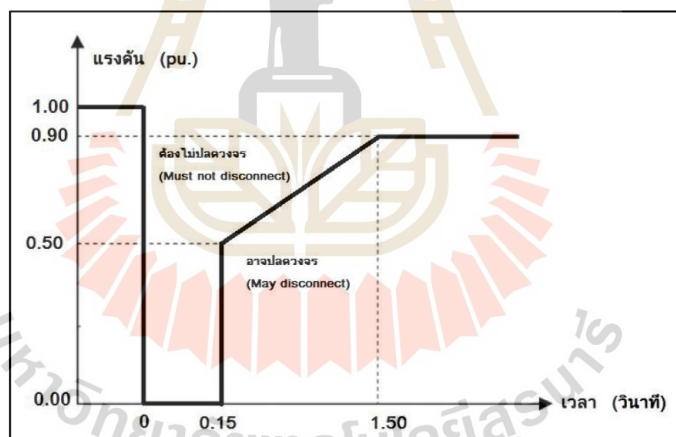
ระบบผลิตไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากจะต้องสามารถปรับลดกำลังไฟฟ้าจาก 100 เปอร์เซ็นต์ เหลือศูนย์เปอร์เซ็นต์ได้ โดยสามารถปรับลดกำลังไฟฟ้าอย่างน้อยครั้งละ 10 เปอร์เซ็นต์ต่อนาที ทั้งนี้กรณีที่เกิดเหตุการณ์ผิดปกติในระบบโครงข่ายไฟฟ้าหรือเหตุการณ์ใดๆ ที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคพิจารณาแล้วเห็นว่ามีความกระทบต่อความปลอดภัยและเสถียรภาพของระบบโครงข่ายไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจะแจ้งและ/หรือสั่งการให้ปรับลดกำลังไฟฟ้าได้ตามความเหมาะสม

1.7 ความสามารถในการทนต่อสภาวะแรงดันตกชั่วขณะ (Low voltage fault Ride through)

ระบบผลิตไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากจะต้องไม่ปลดตัวเองออกจากระบบโครงข่ายไฟฟ้าภายในเวลาที่กำหนด ขณะเกิดแรงดันตกชั่วขณะในระบบโครงข่ายไฟฟ้า โดยกำหนดตามระดับแรงดัน ณ จุดต่อเชื่อมดังตารางที่ 3.2 ดังนี้

ตารางที่ 3.2 ระยะเวลาที่ระบบผลิตไฟฟ้าสามารถทนต่อสภาวะแรงดันตกชั่วขณะได้

ระดับแรงดัน ณ จุด PCC	Duration time (วินาที)
1) ระดับแรงดันต่ำ	ไม่ต้องการ
2) ระดับแรงดันปานกลางหรือระดับแรงดันสูง (กำลังผลิตติดตั้งไม่เกิน 500 กิโลวัตต์)	
3) ระดับแรงดันปานกลางหรือระดับแรงดันสูง (กำลังผลิตติดตั้งมากกว่า 500 กิโลวัตต์)	ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 3.2 กราฟแสดงความสามารถในการทนต่อสภาวะแรงดันตกชั่วขณะ

1.8 การป้องกันแรงดันต่ำและแรงดันเกิน (Under and Over voltage protection)

ระบบผลิตไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากจะต้องปลดวงจรออกจากระบบโครงข่ายไฟฟ้า หากขนาดของแรงดัน Line to Neutral ในระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่าออกนอกช่วงที่ระบุไว้ตามตารางที่ 3.3 ดังนี้

ตารางที่ 3.3 ระยะเวลาปลดวงจรเมื่อแรงดันไม่อยู่ในช่วงแรงดันปกติ

ระดับแรงดัน ณ จุดPCC	ระยะเวลาตัดวงจร (วินาที)
$V < 50\%$	0.3
$50\% < V < 90\%$	2.0
$90\% < V < 110\%$	แรงดันทำงานต่อเนื่อง
$110\% < V < 120\%$	1.0
$V > 120\%$	0.16

1.9 การป้องกันความถี่ต่ำและความถี่เกิน (Under and Over frequency protection)

ระบบผลิตไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากจะต้องปลดวงจรออกจากระบบโครงข่ายไฟฟ้าภายใน 0.1 วินาที เมื่อความถี่ที่จุดเชื่อมต้อมีค่าไม่อยู่ในช่วง 48 Hz – 51 Hz

1.10 การป้องกันการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดด (Anti-Islanding)

เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดดในขณะที่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าไม่มีไฟฟ้าให้ระบบผลิตไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากปลดวงจรออกจากระบบโครงข่ายไฟฟ้า ภายใน 2 วินาที

1.11 การเชื่อมต่อกลับคืนเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า (Response to utility recovery)

ภายหลังจากที่ระบบผลิตไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากปลดตัวเองออกจากระบบโครงข่ายไฟฟ้า เนื่องจากเกิดไฟฟ้าดับหรือแรงดัน/ความถี่ไม่อยู่ในช่วงที่กำหนด เมื่อระบบโครงข่ายไฟฟ้ากลับเข้าสู่สภาวะปกติแล้วระบบผลิตไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากจะต้องหน่วงเวลาการเชื่อมต่อกลับเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าเป็นเวลาอย่างน้อย 20 วินาทีถึง 5 นาที

2. ข้อกำหนดอื่นๆ

2.1 การต่อลงดิน (Earthing), การป้องกันการลัดวงจร (Short circuit protection) และการตัดตอนและการปลดสับ (Isolation and switching) ให้เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60364-7-712

2.2 การจัดหาและติดตั้งเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า (Power quality Monitoring) ตามระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2559 นั้น ผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก จะต้องจัดหา ออกแบบ และติดตั้งระบบ Monitoring Systems สำหรับคุณภาพไฟฟ้าที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสามารถเรียกดูข้อมูลในรูปแบบเวลาจริง (Real time) ผ่าน

ระบบอินเทอร์เน็ตซึ่งได้แก่ข้อมูล แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ความถี่ไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า ตัวประกอบกำลัง THDv, THDi, Pst, และ Plt เป็นต้น รวมทั้งจะต้องจัดส่งรายงานผลการตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้าจาก PQM ตามแบบฟอร์มหรือรูปแบบที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคกำหนดเป็นประจำทุกเดือน

2.3 ผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากที่ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้ามากกว่า 56 กิโลวัตต์ จะต้องมีระบบ Monitoring Systems ที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสามารถเรียกดูข้อมูลการผลิตไฟฟ้าในรูปแบบเวลาจริง (Real time) ผ่านระบบอินเทอร์เน็ตหรือแอปพลิเคชันต่างๆ ซึ่งได้แก่ข้อมูล กำลังไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้า ความเข้มแสงอาทิตย์ อุณหภูมิ เป็นต้น

2.4 สำหรับการเชื่อมโยงในระบบจำหน่ายแรงต่ำ 380/220 กิโลโวลต์

2.4.1 ขนาดกำลังผลิตติดตั้งรวมของระบบผลิตไฟฟ้าที่เชื่อมต่อในหม้อแปลงจำหน่ายแรงต่ำจะต้องไม่เกิน 25% ของขนาดพิกัดหม้อแปลง (หน่วยเป็นกิโลโวลต์-แอมแปร์)

2.4.2 หากกำลังผลิตติดตั้งรวมของระบบผลิตไฟฟ้าตามข้อ 2.4.1 เชื่อมต่อเต็มขีดจำกัด 25% ของขนาดพิกัดหม้อแปลงแล้ว ผู้ผลิตไฟฟ้าจะต้องไปเชื่อมต่อในระบบจำหน่ายแรงดัน 22 หรือ 33 กิโลโวลต์ โดยผู้ผลิตไฟฟ้าจะต้องเป็นผู้จัดหาหม้อแปลงจำหน่ายและอุปกรณ์ป้องกันตามมาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคต่อไป

2.5 ผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากรายใดที่ไม่ผ่านข้อกำหนดทางเทคนิคผู้ขอใช้บริการ จะต้องทำการศึกษาและแก้ไขผลกระทบที่เกิดขึ้นถ้าหากมีความจำเป็นต้องมีการปรับปรุงระบบโครงข่ายไฟฟ้าผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากจะต้องรับผิดชอบค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้น ทั้งนี้การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคขอสงวนสิทธิ์การพิจารณาอนุญาตให้เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าเป็นรายๆ ไป

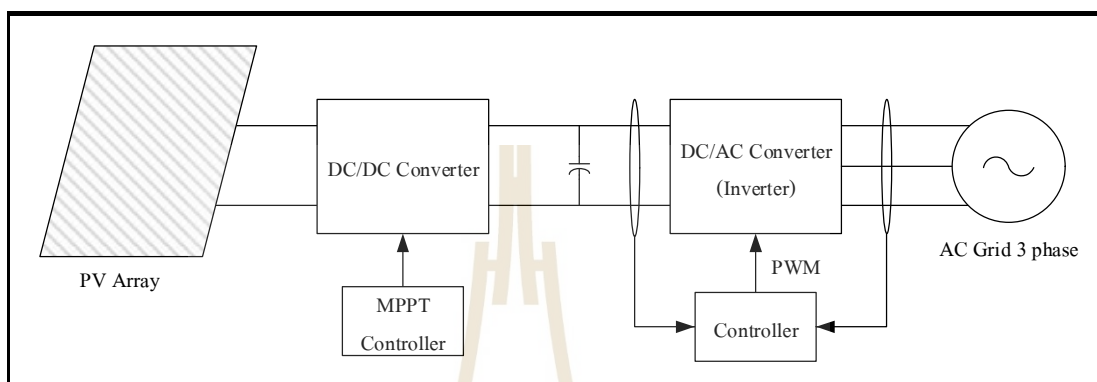
2.6 การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสงวนสิทธิ์ในการเปลี่ยนแปลงข้อกำหนดทางเทคนิคตามความเหมาะสมเพื่อความปลอดภัยความเชื่อถือได้ของระบบโครงข่ายไฟฟ้าและผลประโยชน์ต่อส่วนรวมเป็นหลัก

โดยจากองค์ความรู้เกี่ยวกับข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค สำหรับการติดตั้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาสำหรับบ้านอยู่อาศัยและเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิกาคนั้น ทำให้ผู้วิจัยได้เข้าใจเกี่ยวกับระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่ายยิ่งขึ้นสามารถนำองค์ความรู้ดังกล่าวไปปรับปรุงและพัฒนาใช้กับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ในอนาคตได้

3.3 การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย (PV Grid connected system)

การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบ เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ถูกออกแบบสำหรับผลิตไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเข้าสู่

ระบบสายส่งไฟฟ้าโดยตรง ใช้ผลิตไฟฟ้าในเขตเมืองหรือพื้นที่ที่มีระบบจำหน่ายไฟฟ้าเข้าถึง ระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่าย ส่วนใหญ่ในระบบจะประกอบไปด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ วงจรรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง วงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า แสดงได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย

จากรูปที่ 3.3 ระบบที่พิจารณานั้นมีแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เชื่อมต่อกับวงจรรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งวงจรรักษาระดับแรงดันจะต้องมีตัวควบคุมการตามรอยจุดกำลังสูงสุด เพื่อให้สามารถดึงกำลังงานสูงสุดที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ ณ ความเข้มแสง และสภาพแวดล้อมขณะนั้นมาใช้งานให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด และเชื่อมต่อกับวงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้ โดยวงจรดังกล่าวจะต้องอาศัยการควบคุมและตัวควบคุม โดยมีการวัดค่าแรงดันและเฟสไฟฟ้าจากการไฟฟ้าเพื่ออ้างอิงให้ระบบควบคุม เพื่อให้วงจรสามารถผลิตไฟฟ้าที่มีลักษณะเหมือนกับไฟฟ้าของการไฟฟ้า ทำให้ไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถป้อนให้กับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าได้

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมในและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า (Grid tie inverter) เพื่อให้มีความเข้าใจเกี่ยวกับการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่ายมากขึ้น สามารถแบ่งประเภทอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายได้ดังหัวข้อที่ 3.4

3.4 วงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า (Grid tie inverter)

วงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า หรือ อินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย มีหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ตามขนาดแรงดันและความถี่ที่ต้องการ และส่งเข้าสายส่งไฟฟ้าใช้งานได้ทันที รวมทั้งสามารถรักษาระดับแรงดันขาออกให้คงที่ แม้แรงดันขาเข้าจะมีการเปลี่ยนแปลง โดยจะต้องใช้แรงดันอ้างอิงจากไฟฟ้ากระแสสลับของการไฟฟ้า และผลิตไฟฟ้าที่มีลักษณะเหมือนกับไฟฟ้าของการไฟฟ้า ทำให้ไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถรวมเข้าไปกับไฟฟ้าของการไฟฟ้าได้ ซึ่งการผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นเป็นการผลิตไฟฟ้าและใช้ทันทีโดยไม่ต้องสำรองในแบตเตอรี่จากการปรัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีตสามารถสรุปอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า ตามพิกัดกำลังไฟฟ้า หน้าที่ และการเชื่อมต่อแรงดันไฟฟ้าชนิดเฟสเดียวหรือสามเฟส

3.4.1 อินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

อินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย ที่ทำการปรัศน์วรรณกรรมแบ่งออกเป็น 4 แบบ และสามารถแสดงการแยกชนิดของอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายได้ดังรูปที่ 3.4

1. อินเวอร์เตอร์ชั้นเดียว (single stage inverter) พิกัดกำลังไฟฟ้า 1-10 กิโลวัตต์ โดยประกอบไปด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่อกันหลาย ๆ แผง (PV string) เชื่อมต่อกับวงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าทั้งแบบ 1 เฟส และ 3 เฟส จะเห็นได้ว่าอินเวอร์เตอร์แบบนี้จะไม่มีการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

2. อินเวอร์เตอร์สองชั้น (dual stage inverter) พิกัดกำลังไฟฟ้า 1-10 กิโลวัตต์ โดยประกอบไปด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่อกันหลาย ๆ แผง (PV string) เชื่อมต่อกับวงจรรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และวงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าทั้งแบบ 1 เฟสและ 3 เฟส

3. อินเวอร์เตอร์หลายสตริง (multi-string inverter) พิกัดกำลังไฟฟ้า 10-30 กิโลวัตต์ โดย 1 สตริงจะประกอบไปด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่อกันหลาย ๆ แผงต่อกันแบบอนุกรมเพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้า จากนั้นเชื่อมต่อกับวงจรรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งมีลิตีสตริง คือการนำเอาวงจรรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงหลาย ๆ ชุดมาเชื่อมต่อเข้าด้วยกัน จากนั้นค่อยเชื่อมต่อกับวงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าทั้งแบบ 1 เฟสและ 3 เฟส

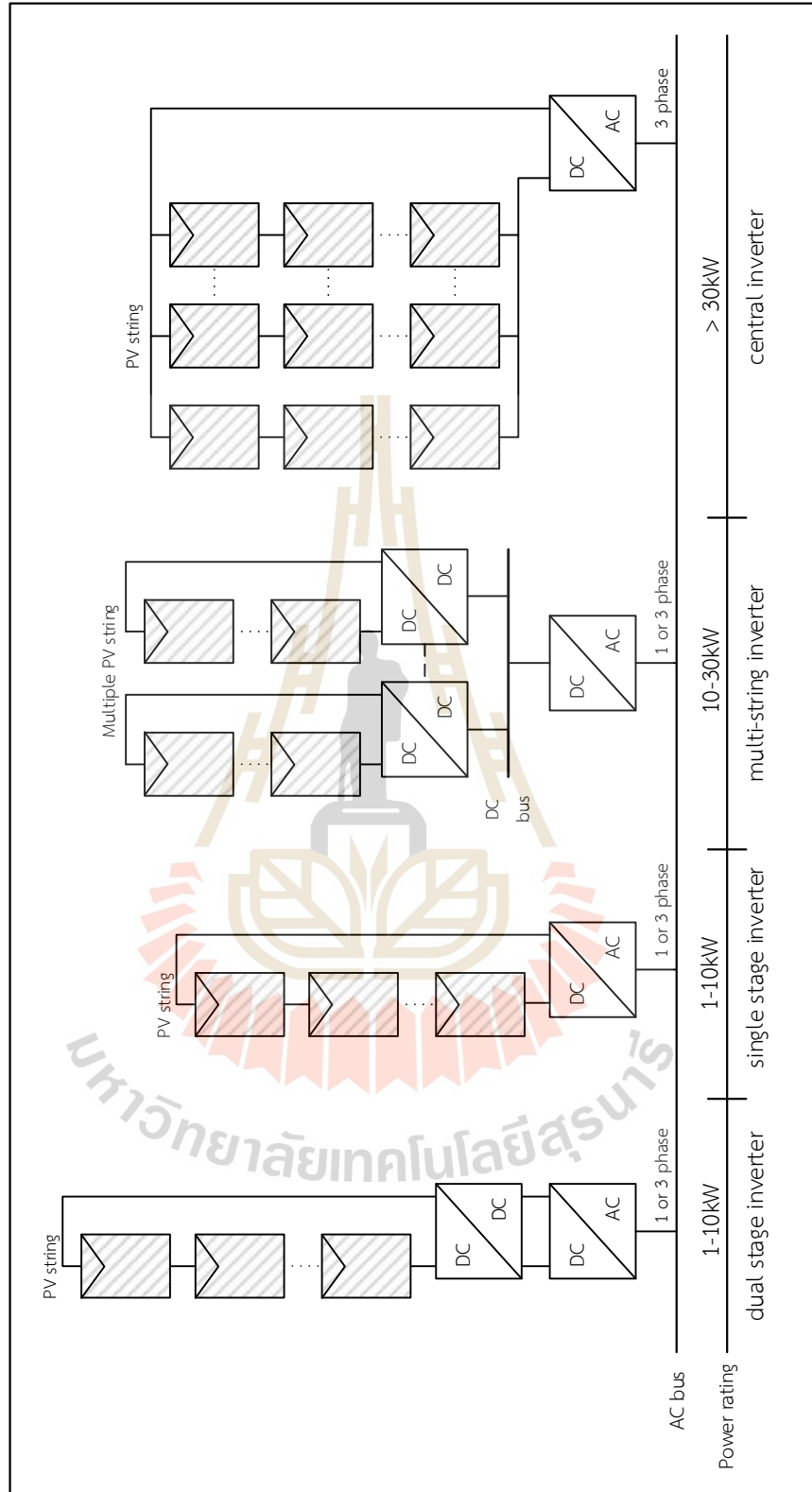
4. อินเวอร์เตอร์ศูนย์กลาง (central inverter) พิกัดกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 30 กิโลวัตต์ขึ้นไป โดยประกอบไปด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่อกันแบบอาร์เรย์หลาย ๆ แผงทั้งแบบขนานและอนุกรม เพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า จากนั้นเชื่อมต่อกับวงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า 3 เฟส อินเวอร์เตอร์ชนิดนี้จะไม่มีการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

จากการปริทัศน์วรรณกรรมเกี่ยวกับอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายข้างต้น ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์พิจารณาพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาพิกัดกำลังไฟฟ้าไม่เกิน 10 กิโลวัตต์ ดังนั้นชนิดของอินเวอร์เตอร์ที่เหมาะสมกับพิกัดกำลังไฟฟ้างกล่าว คืออินเวอร์เตอร์ขั้นเดียว และอินเวอร์เตอร์สองขั้น อีกทั้งจากการศึกษาอินเวอร์เตอร์ทั้งสองชนิดนั้น พบว่า อินเวอร์เตอร์ขั้นเดียว จะไม่มีการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง มีแค่วงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายได้ ซึ่งทำหน้าที่ได้หลากหลาย ทั้งสามารถดึงจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ รักษากระดับแรงดัน ควบคุมและผลิตไฟฟ้าที่มีลักษณะเหมือนกับไฟฟ้าของการไฟฟ้า ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงเลือกศึกษาเฉพาะอินเวอร์เตอร์แบบขั้นเดียวเท่านั้น

3.4.2 ชนิดของอินเวอร์เตอร์ขั้นเดียว

ชนิดของอินเวอร์เตอร์ขั้นเดียว สามารถแบ่งชนิดอินเวอร์เตอร์ได้หลายชนิด ได้แก่

- 1) อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter)
- 2) อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันร่วมกับอินเวอร์เตอร์ชนิดขยายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (VSI with a Boost Converter)
- 3) อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันร่วมกับตัวเก็บประจุไฟฟ้ากระแสสลับอนุกรม (VSI with Series AC Capacitors)
- 4) อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแส (Current Source Inverter)
- 5) อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแสร่วมกับอินเวอร์เตอร์ชนิดลดทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (CSI with a Buck Converter)
- 6) อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแสร่วมกับตัวเก็บประจุไฟฟ้ากระแสสลับอนุกรม (CSI with Series AC Capacitors)
- 7) อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ชนิดป้อนแรงดัน (Impedance or Z-Source Inverter with Voltage Fed)
- 8) อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ชนิดป้อนกระแส (Impedance or Z-Source Inverter with Current Fed)



รูปที่ 3.4 การแยกชนิดของอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะเลือกปริทัศน์วรรณกรรม 3 ชนิดคือ อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน และอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแส และอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ โดยอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันเป็นวงจรที่มีการใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในวงจรมีน้อยที่สุดจึงเป็นวงจรที่นิยมมากที่สุดในการใช้งานการแปลงพลังงาน ส่วนอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแสเป็นอีกวงจรหนึ่งที่มีอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำภายในวงจรมีน้อย อีกทั้งมีความสามารถในการรับแรงดันระดับต่ำจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ จึงเหมาะในการทำงานร่วมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์อีกวงจรหนึ่ง ส่วนอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์เป็นวงจรแปลงผันพลังงานที่ถูกออกแบบโดย F.Z.Peng ในปี ค.ศ. 2003 มีความสามารถในการขยายและลดทอนแรงดันจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้โดยอาศัยการทำงานของอิมพีแดนซ์ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และไดโอด ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการเปรียบเทียบข้อดี – ข้อเสียของอินเวอร์เตอร์แต่ละชนิดแสดงได้ดังตารางที่ 3.4 เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและวิจัยอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายในอนาคตได้

ตารางที่ 3.4 ตารางเปรียบเทียบข้อดี – ข้อเสียของอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน แหล่งจ่ายกระแส และแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์

ชนิดของอินเวอร์เตอร์		
อินเวอร์เตอร์ ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน	อินเวอร์เตอร์ ชนิดแหล่งจ่ายกระแส	อินเวอร์เตอร์ ชนิดแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์
อินพุตของอินเวอร์เตอร์ชนิดนี้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่เป็นค่าคงที่	อินพุตของอินเวอร์เตอร์ชนิดนี้เป็นกระแสไฟฟ้ากระแสตรงที่ปรับค่าได้จากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	อินพุตของอินเวอร์เตอร์ชนิดนี้เป็นแรงดันไฟฟ้าค่าคงที่จากวงจรแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์
ตัวเก็บประจุต้องมีขนาดใหญ่เพื่อใช้ในการเชื่อมต่อแบบขนานกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	ตัวเหนี่ยวนำต้องมีขนาดใหญ่เพื่อใช้ในการเชื่อมต่อแบบอนุกรมกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำที่เชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไม่จำเป็นต้องมีขนาดใหญ่มาก
อินเวอร์เตอร์ไม่สามารถทำงานในโหมดอินพุตวงจรลดทอนระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่ำ และโหมดอินพุตวงจรเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสูงพร้อมกันได้	อินเวอร์เตอร์ไม่สามารถทำงานในโหมดอินพุตวงจรลดทอนระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่ำและโหมดอินพุตวงจรเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสูงพร้อมกันได้	อินเวอร์เตอร์สามารถทำงานในโหมดอินพุตวงจรลดทอนระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่ำและโหมดอินพุตวงจรเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสูงพร้อมกันได้

ตารางที่ 3.4 ตารางเปรียบเทียบข้อดี – ข้อเสียของอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน แหล่งจ่ายกระแส และแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ (ต่อ)

ชนิดของอินเวอร์เตอร์		
อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน	อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแส	อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์
อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันต้องระดับแรงดันไฟฟ้าด้านอินพุตมากกว่าทำให้ต้องต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรมจำนวนมากเพื่อให้มีแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพียงพอ	อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแสต้องการระดับแรงดันไฟฟ้าด้านอินพุตไม่สูงจึงทำให้กระแสที่ไหลผ่านวงจรมีค่าสูงมาก ในขณะที่แรงดันต่ำ	วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ไม่ได้ต้องการแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าด้านอินพุตสูงมาก แต่เมื่อผ่านอิมพีแดนซ์จะทำให้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามีค่าสูงได้
ระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีระดับแรงดันสูง ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าเมื่อผ่านตัวเก็บประจุ และสวิตช์ในวงจรอินเวอร์เตอร์ ทำให้เกิดกำลังสูญเสียในวงจร	กระแสที่ไหลผ่านวงจรมีปริมาณสูง และเมื่อผ่านสวิตช์ในวงจรอินเวอร์เตอร์ ทำให้เกิดกำลังสูญเสียในวงจรมาก	ในวงจรไฟฟ้ากระแสตรงไม่มีสวิตช์ ทำให้เกิดกำลังสูญเสียน้อย และจากผลการทำงานของสวิตช์ในวงจรอินเวอร์เตอร์ทำให้เกิดกำลังสูญเสียน้อยกว่าอินเวอร์เตอร์ชนิดอื่นอีกด้วย
โครงสร้างหลักอินพุตของอินเวอร์เตอร์ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างได้	โครงสร้างหลักอินพุตของอินเวอร์เตอร์ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างได้	โครงสร้างหลักอินพุตของอินเวอร์เตอร์สามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างได้หลากหลายแบบ
เมื่อระบบมีกำลังไฟฟ้าสูง ความผิดพลาดฮาร์โมนิกส์ก็จะสูงไปด้วย	เมื่อระบบมีกำลังไฟฟ้าสูง ความผิดพลาดฮาร์โมนิกส์ก็จะสูงไปด้วย	ความผิดพลาดฮาร์โมนิกส์ของระบบมีค่าต่ำ

จากตารางที่ 3.4 เป็นการเปรียบเทียบข้อดี – ข้อเสียของอินเวอร์เตอร์แต่ละชนิด ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะพิจารณาระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่าย 3 เฟส ถ้าเลือกใช้อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะต้องมีค่าสูง จึงต้องใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรมจำนวนหลาย ๆ แผง เพื่อให้มีแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพียงพอ หรืออาจต้องใช้วงจรเพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อให้แรงดันเป็นไปตามต้องการ ซึ่งการใช้วงจรเพิ่มแรงดันไฟฟ้างดกล่าวอาจทำให้เกิดกำลังสูญเสียในวงจรได้ และถ้าเลือกใช้อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแส

ระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่ำ แต่กระแสไฟฟ้าจะมีค่าสูง ซึ่งส่งผลให้เกิดกำลังสูญเสียในวงจรเพิ่มขึ้นด้วย อีกทั้งจะต้องต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบขนานจำนวนหลาย ๆ แผง เพื่อให้มีกระแสไฟฟ้ากระแสตรงเพียงพอ

ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงเลือกใช้อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ เพื่อทำการศึกษา และพัฒนางจรอินเวอร์เตอร์ชนิดนี้ เนื่องจากอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ไม่ต้องต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรมและขนานจำนวนหลาย ๆ แผง กระแสและแรงดันมีค่าไม่สูงมาก อิมพีแดนซ์ในวงจรไม่จำเป็นต้องมีขนาดใหญ่มาก มีกำลังสูญเสียน้อยและความผิดพลาดเพี้ยนฮาร์มอนิกในระบบมีค่าต่ำ

3.5 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 3 เป็นการศึกษาเกี่ยวกับระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายและชนิดของอินเวอร์เตอร์ พลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา และข้อกำหนดในการติดตั้ง และข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค อีกทั้งยังได้กล่าวถึงการเลือกศึกษาชนิดของอินเวอร์เตอร์ โดยเลือกศึกษาอินเวอร์เตอร์แบบขั้นเดียว เนื่องจากไม่มีวงจรรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง มีแค่วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถดึงจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ รักษากระดับแรงดันควบคุมและผลิตไฟฟ้าที่มีลักษณะเหมือนกับไฟฟ้าของการไฟฟ้า และจากการปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับชนิดของอินเวอร์เตอร์ขั้นเดียว พบว่า มีทั้งชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน แหล่งจ่ายกระแส และชนิดแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ ท้ายที่สุดแล้วในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงสนใจศึกษาและพัฒนาอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ โดยจะกล่าวถึงรายละเอียดของอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ในบทต่อไป

บทที่ 4

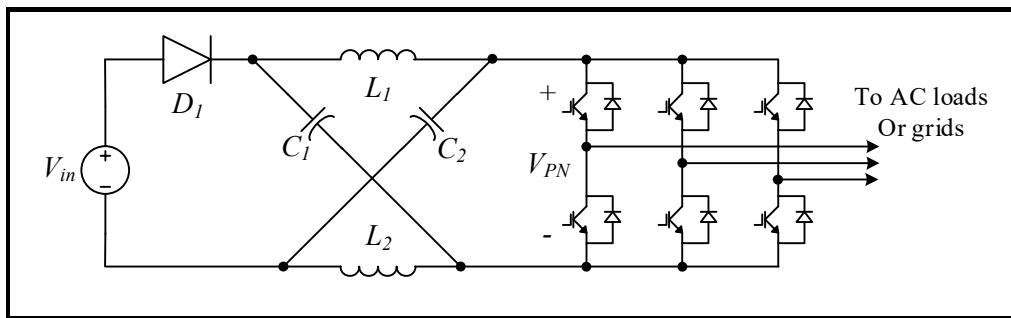
อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์

4.1 บทนำ

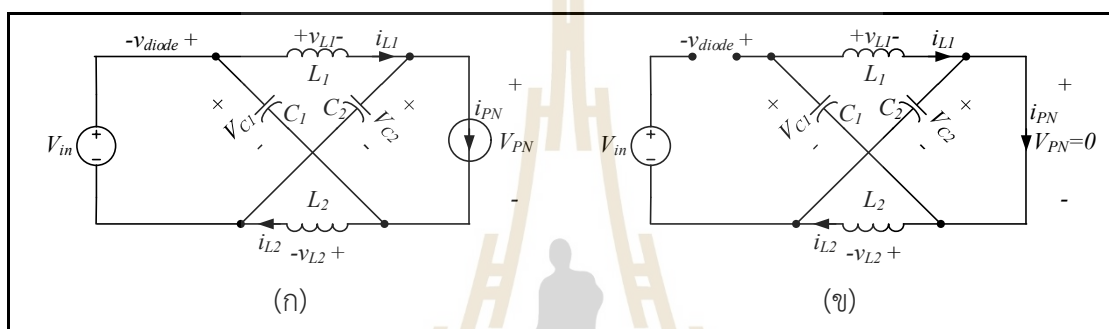
จากเนื้อหาในบทที่ 3 ได้กล่าวถึงการศึกษาและเลือกชนิดของอินเวอร์เตอร์ โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์สนใจศึกษาอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ ดังนั้นเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ในหัวข้อที่ 4.2 และการปรับปรุงและพัฒนาวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์สู่แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ในหัวข้อที่ 4.3 โดยนำเสนอโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ การพิจารณาสภาวะโหมตการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ รวมไปถึงการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้งแบบจำลองในสถานะอยู่ตัวและแบบจำลองพลวัตเพื่อจากการพิจารณาโหมตการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ และหาแบบจำลอง ในสถานะอยู่ตัวและแบบจำลองพลวัตเพื่อเป็นประโยชน์ในการนำไปตรวจสอบเสถียรภาพของระบบ การออกแบบตัวควบคุม และการเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับระบบ และในหัวข้อสุดท้ายจะกล่าวถึงวิธีการควบคุมสัญญาณการสวิตช์อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์

4.2 อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ (Z-Source inverter : ZSI)

อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แสดงได้ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นอินเวอร์เตอร์ขั้นเดียว และเป็นวงจรแปลงผันกำลังงานที่ออกแบบโดย F. Z. Peng เมื่อปี ค.ศ. 2003 วงจรดังกล่าวมีความสามารถในการขยายและลดทอนแรงดันจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ โดยอาศัยการทำงานของวงจรอิมพีแดนซ์ ได้แก่ ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และไดโอด ต่อในลักษณะตัวเอ็กซ์ (X) ระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ หรืออิมพีแดนซ์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุต่อในลักษณะตัวแซด หรือซี (Z) โดยอินเวอร์เตอร์สามารถทำงานได้ทั้งในโหมดอินพุตวงจรลดทอนระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (Buck) และโหมดอินพุตวงจรเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (Boost) โหมตการทำงานแบ่งออกเป็น 2 โหมต ได้แก่ สภาวะ non shoot-through เป็นโหมตการทำงานในสภาวะปกติโดยวงจรจะจ่ายกระแสไปยังอินเวอร์เตอร์ และไดโอดทำงานไบแอสตรง (forward bias) และสภาวะ shoot-through คือสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์อยู่ในสภาวะลัดวงจร ทำให้แรงดันเอาต์พุตของวงจรมีค่าเท่ากับศูนย์ และไดโอดทำงานไบแอสตรง (reverse bias) แสดงได้ดังรูปที่ 4.2 (ก) และ 4.2 (ข)

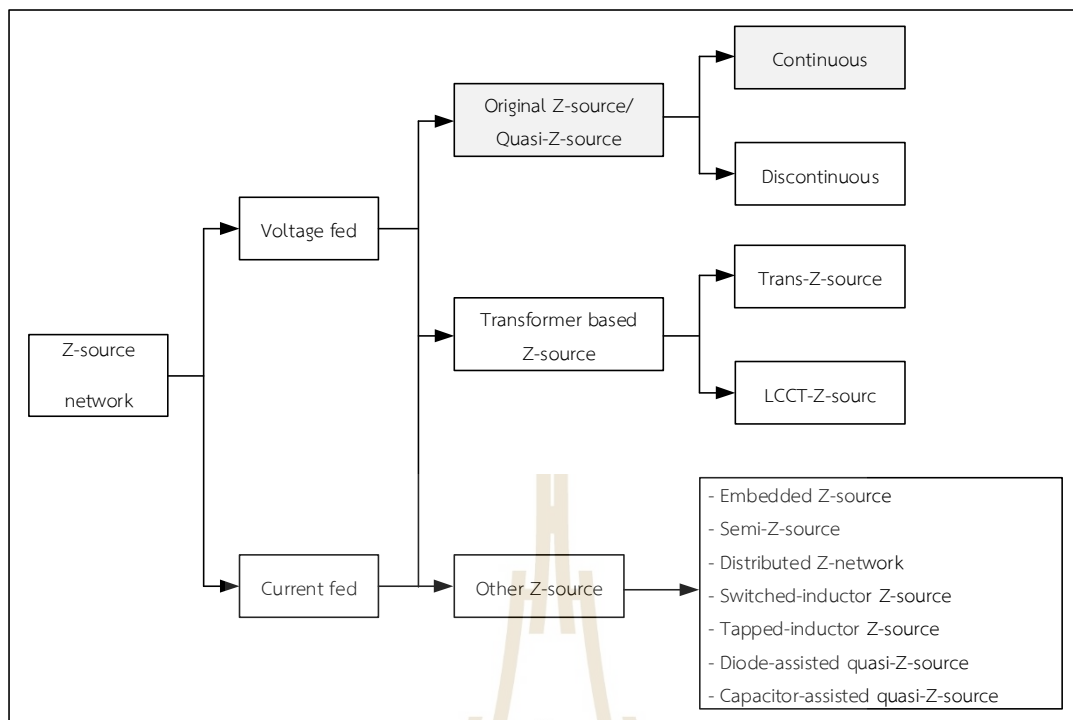


รูปที่ 4.1 วงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์



รูปที่ 4.2 สถานะโหมดการทำงาน (ก) non shoot-through และ (ข) shoot-through ของอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์

จากการปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ พบว่าได้มีการปรับปรุงและพัฒนาโดยใช้โครงสร้างพื้นฐานวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบดั้งเดิม ไม่ว่าจะเป็นการปรับเปลี่ยนตำแหน่งอิมพีแดนซ์ การต่ออิมพีแดนซ์เพิ่มและการต่อหม้อแปลง เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อลดจำนวนและขนาดพิกัดของอิมพีแดนซ์ในวงจร เพิ่มอัตราขยายของวงจร เพิ่มประสิทธิภาพและการปรับปรุงการควบคุมวงจร ซึ่งสามารถแสดงแผนผังการปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงและพัฒนาวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ได้ดังรูปที่ 4.3



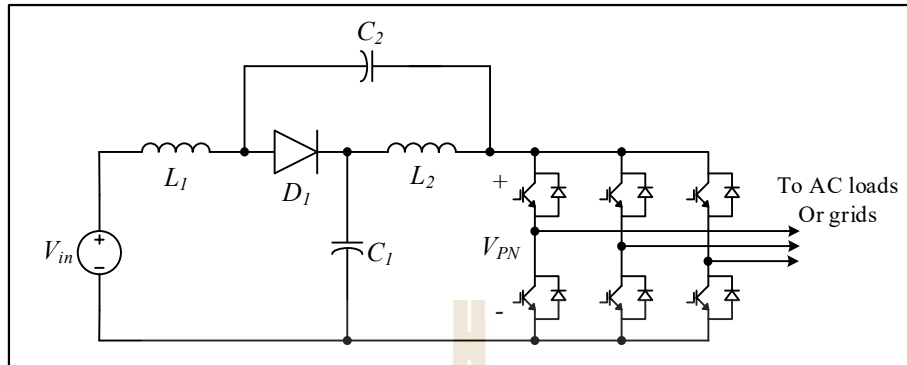
รูปที่ 4.3 แผนผังการปรีทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงและพัฒนาวงจรอินเวอร์เตอร์ แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์

จากรูปที่ 4.3 แผนผังการปรีทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงและพัฒนาวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ สำหรับในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะเลือกศึกษาวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ชนิดป้อนแรงดันที่สามารถจ่ายกระแสได้อย่างต่อเนื่อง หรือ Quasi-Z-source Inverter (qZSI) ซึ่งจากการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของอิมพีแดนซ์ของอินเวอร์เตอร์ ส่งผลให้สามารถลดขนาดพิกัดของอิมพีแดนซ์ในวงจรลงได้ และอัตราการขยายของวงจรเพิ่มขึ้น อีกทั้งกระแสไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ยังมีความต่อเนื่อง

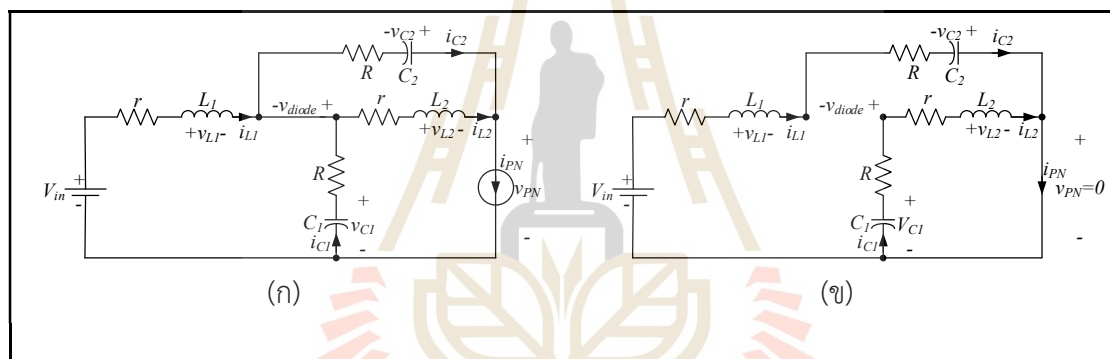
4.3 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ (Quasi-Z-Source Inverter : qZSI)

โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ชนิดป้อนแรงดันที่สามารถจ่ายกระแสได้อย่างต่อเนื่อง ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะเรียกอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ แสดงได้ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ประยุกต์มาจากโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบดั้งเดิม โดยในวงจรประกอบไปด้วยตัวเหนี่ยวนำ (L_1, L_2) ตัวเก็บประจุ (C_1, C_2) และไดโอด (D_1) โดยอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์สามารถแบ่งสภาวะโหมดการ

ทำงานออกเป็น 2 โหมด ได้แก่ สภาวะ non shoot-through และ shoot-through แสดงได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์



รูปที่ 4.5 สภาวะโหมตการทำงาน (ก) non shoot-through และ (ข) shoot-through ของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์

จากรูปที่ 4.5 โหมตการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ ในสภาวะโหมตการทำงาน (ก) non shoot-through เป็นโหมตการทำงานในสภาวะปกติโดยวงจรจะจ่ายกระแส i_{PN} ไปยังอินเวอร์เตอร์ และในสภาวะโหมตการทำงาน (ข) shoot-through เกิดขึ้นเมื่อสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์อยู่ในสภาวะลัดวงจร ส่งผลให้ $v_{PN} = 0$ แต่วงจรยังสามารถจ่ายกระแส i_{PN} ไปยังอินเวอร์เตอร์ได้อยู่ จากการพิจารณาการทำงานของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ จะเห็นได้ว่าเป็นอินเวอร์เตอร์ที่สามารถจ่ายกระแสได้อย่างต่อเนื่องนั่นเอง

จากรูปที่ 4.5 ทำการพิจารณาวงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ ในสภาวะ non shoot-through และ shoot-through โดยใช้กฎของแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) สามารถแสดงได้ดังนี้

- สภาวะ non shoot-through

$$\begin{aligned} v_{L1} &= V_{in} - v_{C1} \\ v_{L2} &= -v_{C2} \\ v_{PN} &= v_{C1} - v_{L2} = v_{C1} + v_{C2} \\ v_{diode} &= 0 \end{aligned} \quad (4-1)$$

- สภาวะ shoot-through

$$\begin{aligned} v_{L1} &= v_{C2} + V_{in} \\ v_{L2} &= v_{C1} \\ v_{PN} &= 0 \\ v_{diode} &= -(v_{C1} + v_{C2}) \end{aligned} \quad (4-2)$$

จากสมการที่ (4-1) และ (4-2) วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของวงจรรในสภาวะ non shoot-through และ shoot-through โดย

กำหนดให้ T คือ คาบเวลาสวิตช์
 T_{sh} คือ คาบเวลาในสภาวะ shoot-through
 T_{nsh} คือ คาบเวลาในสภาวะ non shoot-through

ในสภาวะ non shoot-through จะได้ $T_{sh} = 0$ และในสภาวะ shoot-through จะได้ $T_{sh} = 1$ โดยที่ $T_{nsh} = T - T_{sh}$ จะได้ความสัมพันธ์ของ $V_{L1}, V_{L2}, V_{C1}, V_{C2}$ และ V_{PN} ในสภาวะ non shoot-through และ shoot-through ดังสมการที่ (4-3)

$$\begin{aligned} V_{L1} &= \frac{T_{sh}(V_{in} + V_{C2}) + T_{nsh}(V_{in} - V_{C1})}{T} \\ V_{L2} &= \frac{T_{sh}(V_{C1}) + T_{nsh}(-V_{C2})}{T} \\ V_{C1} &= \frac{T_{nsh}}{T_{nsh} - T_{sh}} V_{in} \\ V_{C2} &= \frac{T_{sh}}{T_{nsh} - T_{sh}} V_{in} \\ V_{PN} = V_{C1} + V_{C2} &= \frac{T_{nsh}}{T_{nsh} - T_{sh}} V_{in} = \frac{1}{1 - 2\left(\frac{T_{sh}}{T}\right)} V_{in} \end{aligned} \quad (4-3)$$

4.3.1 แบบจำลองในสถานะอยู่ตัว (Steady-State Model)

การหาแบบจำลอง ในสถานะอยู่ตัวของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ พิจารณาจากวงจรสมมูลในรูปที่ 4.5 และเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณากำหนดให้ $L = L_1 = L_2$ และ $C = C_1 = C_2$ ดังนั้นสามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสถานะอยู่ตัว $\dot{x} = \mathbf{A}x + \mathbf{B}u$ ของโหมดการทำงานสภาวะ shoot-through ได้ดังสมการที่ (4-4) และ non shoot-through ได้ดังสมการที่ (4-5)

$$\dot{x} = \mathbf{A}_1 x + \mathbf{B}_1 u \quad (4-4)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{L1} \\ \dot{i}_{L2} \\ \dot{v}_{C1} \\ \dot{v}_{C2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-(R+r)}{L} & 0 & 0 & \frac{1}{L} \\ 0 & \frac{-(R+r)}{L} & \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{C} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ v_{C1} \\ v_{C2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{in} \\ i_{PN} \end{bmatrix}$$

$$\dot{x} = \mathbf{A}_2 x + \mathbf{B}_2 u \quad (4-5)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{L1} \\ \dot{i}_{L2} \\ \dot{v}_{C1} \\ \dot{v}_{C2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-(R+r)}{L} & 0 & -\frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{-(R+r)}{L} & 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ v_{C1} \\ v_{C2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & \frac{R}{L} \\ 0 & \frac{R}{L} \\ 0 & -\frac{1}{C} \\ 0 & -\frac{1}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{in} \\ i_{PN} \end{bmatrix}$$

จากสมการที่(4-4) และ (4-5) วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของแบบจำลองในสถานะอยู่ตัวของโหมดการทำงานสภาวะ non shoot-through และ shoot-through ในรูปแบบฟังก์ชันสถานะได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \mathbf{A}x + \mathbf{B}u \\ \mathbf{A} &= d\mathbf{A}_1 + (1-d)\mathbf{A}_2 \\ \mathbf{B} &= d\mathbf{B}_1 + (1-d)\mathbf{B}_2 \end{aligned}$$

เมื่อ d คือ ค่าวัฏจักรหน้าที่ในสภาวะ shoot-through (shoot-through duty)

$1-d$ คือค่าวัฏจักรหน้าที่ในสภาวะ non shoot-through (non shoot-through duty)

จะได้แบบจำลองในสถานะอยู่ตัวของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{L1} \\ \dot{i}_{L2} \\ \dot{v}_{C1} \\ \dot{v}_{C2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-(R+r)}{L} & 0 & \frac{d-1}{L} & \frac{d}{L} \\ 0 & \frac{-(R+r)}{L} & \frac{d}{L} & \frac{d-1}{L} \\ \frac{1-d}{C} & \frac{d}{C} & 0 & 0 \\ \frac{-d}{C} & \frac{1-d}{C} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ v_{C1} \\ v_{C2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & \frac{(1-d)R}{L} \\ 0 & \frac{(1-d)R}{L} \\ 0 & \frac{d-1}{C} \\ 0 & \frac{d-1}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{in} \\ i_{PN} \end{bmatrix} \quad (4-6)$$

และถ้าระบบที่พิจารณาอยู่ในสถานะอยู่ตัว

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{AX} + \mathbf{BU} = 0$$

จากสมการที่ (4-6) จะได้

$$\begin{aligned} \frac{-(R+r)}{L} I_{L1} + \frac{(d-1)}{L} V_{C1} + \frac{d}{L} V_{C2} + V_{in} + \frac{(1-d)R}{L} I_{PN} &= 0 \\ \frac{-(R+r)}{L} I_{L2} + \frac{d}{L} V_{C1} + \frac{(d-1)}{L} V_{C2} + \frac{(1-d)R}{L} I_{PN} &= 0 \\ \frac{(1-d)}{C} I_{L1} - \frac{d}{C} I_{L2} - \frac{(d-1)}{C} I_{PN} &= 0 \\ -\frac{d}{C} I_{L1} + \frac{(1-d)}{C} I_{L2} - \frac{(d-1)}{C} I_{PN} &= 0 \end{aligned} \quad (4-7)$$

จากสมการที่ (4-7) จัดรูปสมการจะได้ V_{C1} , V_{C2} , I_{L1} และ I_{L2} ที่ขึ้นอยู่กับค่าวัฏจักรหน้าที่ได้
ดังสมการที่ (4-8)

$$\begin{aligned} V_{C1} &= \frac{1-d}{1-2d} V_{in} - V_{22} \\ V_{C2} &= \frac{d}{1-2d} V_{in} - V_{22} \\ I_{L1} = I_{L2} &= \frac{1-d}{1-2d} I_{PN} \end{aligned} \quad (4-8)$$

$$\text{เมื่อ } V_{22} = \frac{(1-d)(R+2DR)}{(1-2d)^2} I_{PN}$$

จากแบบจำลองในสถานะอยู่ตัวของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ จากสมการที่ (4-8) หากพิจารณาให้ในวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ไม่มีค่าความต้านทานของตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 ($R=0$) ในวงจร ดังนั้นค่าแรงดัน V_{22} ในสมการที่ (4-8) จะมีค่าเท่ากับศูนย์ หรือ $V_{22} = 0$ จะได้สมการค่าวัฏจักรหน้าที่ V_{C1} และ V_{C2} ดังสมการที่ (4-9)

$$\begin{aligned} V_{C1} &= \frac{1-d}{1-2d} V_{in} \\ V_{C2} &= \frac{d}{1-2d} V_{in} \end{aligned} \quad (4-9)$$

ซึ่งค่า V_{C1} และ V_{C2} สามารถนำไปใช้กำหนดการออกแบบค่าแรงดันอินพุตและค่าวัฏจักรหน้าที่ของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์

4.3.2 แบบจำลองพลวัต (Dynamic Model)

จากสมการที่ (4-6) หาแบบจำลองพลวัตของระบบ เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุม โดยกำหนดให้

ตัวแปรสถานะ

$$\hat{x} = [\hat{i}_{L1} \quad \hat{i}_{L2} \quad \hat{v}_{c1} \quad \hat{v}_{c2}]^T$$

อินพุต

$$\hat{u} = [\hat{V}_{in} \quad \hat{I}_{PN}]^T$$

ค่าวัฏจักรหน้าที่

$$\hat{d}$$

จะได้

$$F\hat{x} = \mathbf{A}\hat{x} + \mathbf{B}\hat{u} + [(\mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_2) \cdot X(\mathbf{B}_1 + \mathbf{B}_2) \cdot U] \cdot \hat{d}$$

$$F\hat{x} = \begin{bmatrix} -(R+r) & 0 & d-1 & d \\ 0 & -(R+r) & d & d-1 \\ 1-d & -d & 0 & 0 \\ -d & 1-d & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_{L1} \\ \hat{i}_{L2} \\ \hat{v}_{c1} \\ \hat{v}_{c2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & (1-d)R \\ 0 & (1-d)R \\ 0 & d-1 \\ 0 & d-1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{in} \\ I_{PN} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{c1} + V_{c2} - I_{PN}R \\ V_{c1} + V_{c2} - I_{PN}R \\ -I_{L1} - I_{L2} + I_{PN} \\ -I_{L1} - I_{L2} + I_{PN} \end{bmatrix} \hat{d} \quad (4-10)$$

ถ้ากำหนดให้ $V_{11} = V_{c1} + V_{c2} - I_{PN}R$ และ $I_{11} = I_{PN} - 2I_L$ จากสมการที่ (4-10) ทำการแปลงลาปลาซ (Laplace transform) ของสมการดังกล่าวเพื่อให้ได้สมการทางโดเมนเอสดีเอ็น

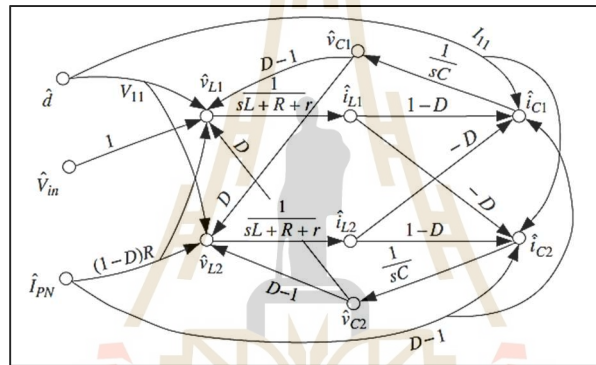
$$sL\hat{i}_{L1}(s) = -(R+r)\hat{i}_{L1}(s) + (d-1)\hat{v}_{c1}(s) + d\hat{v}_{c2}(s) + \hat{V}_{in}(s) + (1-d)R\hat{I}_{PN}(s) + V_{11}\hat{d}(s)$$

$$sL\hat{i}_{L2}(s) = -(R+r)\hat{i}_{L2}(s) + d\hat{v}_{c1}(s) + (d-1)\hat{v}_{c2}(s) + (1-d)R\hat{I}_{PN}(s) + V_{11}\hat{d}(s) \quad (4-11)$$

$$sC\hat{v}_{c1}(s) = (1-d)\hat{i}_{L1}(s) - d\hat{i}_{L2}(s) + (d-1)\hat{I}_{PN}(s) + I_{11}\hat{d}(s)$$

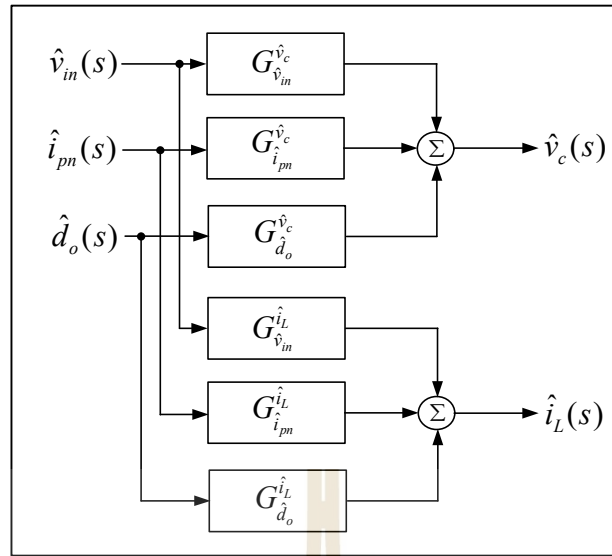
$$sC\hat{v}_{c2}(s) = -d\hat{i}_{L1}(s) + (1-d)\hat{i}_{L2}(s) + (d-1)\hat{I}_{PN}(s) + I_{11}\hat{d}(s)$$

จากสมการแบบจำลองพลวัตของระบบทางโดเมนเอสในสมการที่ (4-11) สามารถแสดงกราฟการไหลของสัญญาณ (Signal flow graph) ได้ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 กราฟการไหลของสัญญาณอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์

จากสมการแบบจำลองพลวัตของระบบทางโดเมนเอสและกราฟการไหลของสัญญาณอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์นำมาสร้างเป็นแผนผังแบบจำลองพลวัตของระบบได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แผนผังแสดงแบบจำลองพลวัตของระบบ

จากรูปที่ 4.7 สามารถแสดงสมการแบบจำลองพลวัตของระบบ $G_{v_{in}}^{v_c}$, $G_{i_{pn}}^{v_c}$, $G_{d_o}^{v_c}$, $G_{v_{in}}^{i_L}$, $G_{i_{pn}}^{i_L}$ และ $G_{d_o}^{i_L}$ ได้ดังสมการที่ (4-12) ถึง (4-17) ตามลำดับ

$$G_{v_{in}}^{v_c} = \frac{(1-D_o)(1-2D_o)-LCs^2(1-D_o)}{(LCs^2+1)(LCs^2+(1-2D_o)^2)} \quad (4-12)$$

$$G_{i_{pn}}^{v_c} = \frac{R(1-D_o)(1-2D_o)-(1-D_o)(Ls+r+R)}{LCs^2+C(r+R)s+(1-2D_o)^2} \quad (4-13)$$

$$G_{d_o}^{v_c} = \frac{(V_{c1}+V_{c1}-RI_{pn})(1-2D_o)+(I_{pn}-I_{L1}-I_{L2})(Ls+r+R)}{LCs^2+C(r+R)s+(1-2D_o)^2} \quad (4-14)$$

$$G_{v_{in}}^{i_L} = \frac{[(LCs^2+D_o)+(1-D_o)(1-2D_o)]Cs}{LCs^2+(1-2D_o)^2} \quad (4-15)$$

$$G_{i_{pn}}^{i_L} = \frac{R(1-D_o)Cs+(1-D_o)(1-2D_o)}{LCs^2+C(r+R)s+(1-2D_o)^2} \quad (4-16)$$

$$G_{d_o}^{i_L} = \frac{(V_{c1} + V_{c1} - RI_{pn})Cs + (I_{pn} - I_{L1} - I_{L2})(1 - 2D_o)}{LCs^2 + C(r + R)s + (1 - 2D_o)^2} \quad (4-17)$$

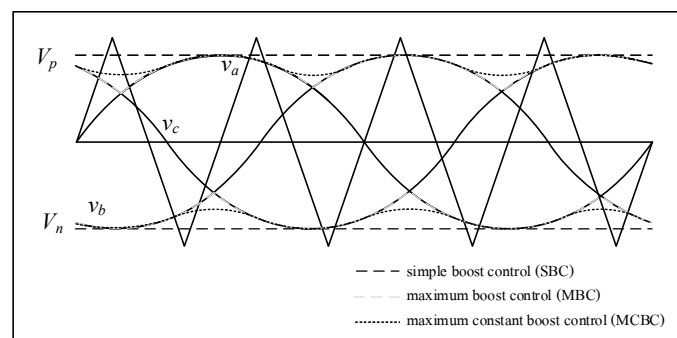
จากการพิจารณาโหมดการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์และหาแบบจำลอง ในสถานะอยู่ตัวและแบบจำลองพลวัต จะได้แบบจำลองของระบบซึ่งจากสมการที่ (4-12) ถึง (4-17) จะสามารถนำไปตรวจสอบเสถียรภาพของระบบได้ รวมไปถึงการออกแบบตัวควบคุม และการเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับระบบได้อีกด้วย

4.4 การควบคุมสัญญาณการสวิตช์อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์

จากที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้ อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์มีความสามารถในการขยายและลดทอนแรงดันจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้โดยอาศัยการทำงานของอิมพีแดนซ์ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และไดโอด ทำงานร่วมกับการสวิตช์ซึ่งภายในวงจรแบบพิเศษ โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการควบคุมสัญญาณการสวิตช์สำหรับอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 วิธีการ ได้แก่

1. การควบคุมบูสต์แบบง่าย (simple boost control : SBC)
2. การควบคุมบูสต์แบบค่าสูง (maximum boost control : MBC)
3. การควบคุมบูสต์แบบค่าคงที่สูง (maximum constant boost control : MCBC)

การควบคุมสัญญาณการสวิตช์ในแต่ละวิธีจะแตกต่างกัน เนื่องจากค่าวัฏจักรหน้าที่อ้างอิงสัญญาณการสวิตช์เกิดจากสัญญาณค่าวัฏจักรหน้าที่ในสถานะ shoot-through และสัญญาณแรงดันอ้างอิงด้วยเทคนิคพีดับเบิลยูเอ็ม (Sinusoidal Pulse-width Modulation: SPWM) เปรียบเทียบกับสัญญาณพาร์รูปสามเหลี่ยมซึ่งสามารถแสดงสัญญาณการควบคุมสัญญาณการสวิตช์ ได้แสดงในดังรูปที่ 4.8



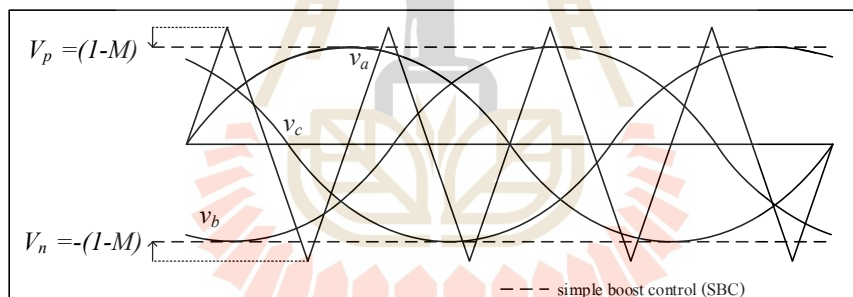
รูปที่ 4.8 สัญญาณการสวิตช์สำหรับอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์

ลักษณะของการสวิตช์สำหรับอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ พิจารณา สัญญาณขอบเขตบน(V_p) และขอบเขตล่าง(V_n) ร่วมกับสัญญาณแรงดันอ้างอิงรูปคลื่นไซน์สามเฟส (v_a, v_b , และ v_c) เปรียบเทียบกับสัญญาณพาร์รูปสามเหลี่ยม (V_{tri})

เงื่อนไขการสวิตช์ขั้นตอนที่ 1 พิจารณาเมื่อสัญญาณ v_a, v_b , และ v_c ยกตัวอย่างกรณีเมื่อ สัญญาณ v_a มากกว่าสัญญาณ V_{tri} ทำให้สวิตช์ S_{ap} นำกระแสหรือมีค่าเท่ากับ 1 และสวิตช์ S_{an} ผ่าน NOT หยุดนำกระแสหรือมีค่าเท่ากับ 0 ขั้นตอนที่ 2 พิจารณาเมื่อสัญญาณ V_{tri} มากกว่าสัญญาณ V_p สัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับ 1 และเมื่อสัญญาณ V_{tri} น้อยกว่าสัญญาณ V_n สัญญาณเอาต์พุตจะ เท่ากับ 1 ขั้นตอนที่ 3 นำสัญญาณที่ได้จากการพิจารณาในขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 2 มา OR จะได้ สัญญาณ S'_{ap} และ S'_{an}

4.4.1 การควบคุมบูสต์แบบง่าย

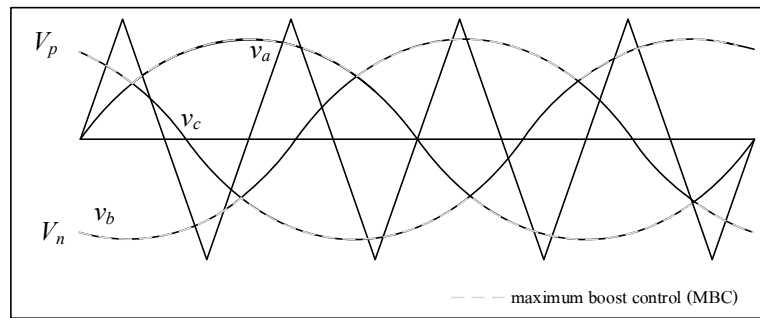
การกำหนด V_p และ V_n ในการควบคุมบูสต์แบบง่าย กำหนดเป็นค่าคงที่ซึ่งจะได้ เป็นเส้นตรง โดยกำหนดจากการพิจารณาร่วมกับค่าวัฏจักรหน้าที่ในสภาวะ shoot-through จาก $D_{max} = 1 - M$ จะได้ $V_p = 1 - M$ และ $V_n = -(1 - M)$



รูปที่ 4.9 สัญญาณการควบคุมบูสต์แบบง่าย

4.4.2 การควบคุมบูสต์แบบค่าสูง

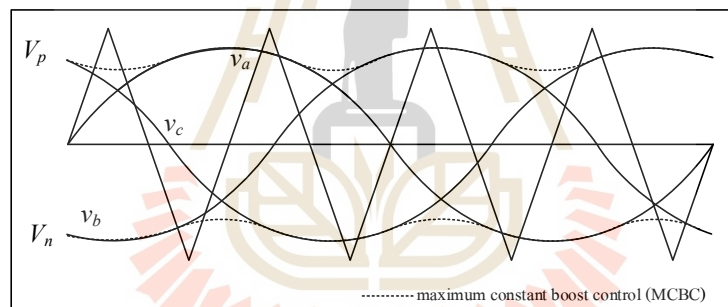
การกำหนด V_p และ V_n ในการควบคุมบูสต์แบบค่าสูง กำหนด V_p เป็นค่าที่มากที่สุดของสัญญาณ v_a, v_b , และ v_c ทั้งสามสัญญาณและกำหนด V_n เป็นค่าที่น้อยที่สุดของสัญญาณ v_a, v_b , และ v_c ทั้งสามสัญญาณ



รูปที่ 4.10 สัญญาณการควบคุมบูสต์แบบค่าสูง

4.4.3 การควบคุมบูสต์แบบค่าคงที่สูง

การกำหนด V_p และ V_n ในการควบคุมบูสต์แบบค่าคงที่สูง กำหนดเป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณดังกล่าวมีค่าคงที่ ค่าแอมพลิจูดสูงสุดของ V_p มีค่าเท่ากับค่าที่มากที่สุดของ v_a, v_b , และ v_c และค่าแอมพลิจูดสูงสุดของ V_n มีค่าเท่ากับค่าที่น้อยที่สุดของ v_a, v_b , และ v_c

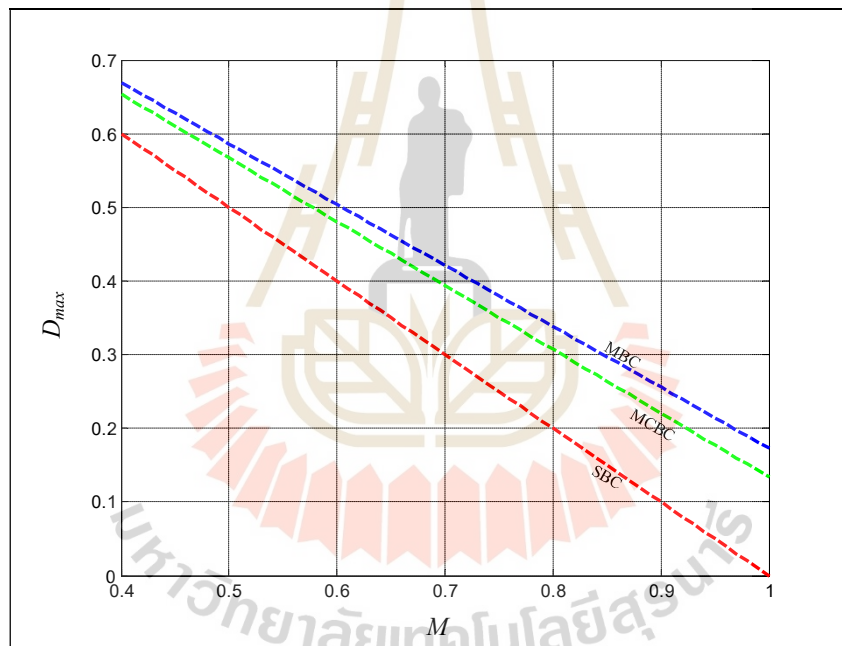


รูปที่ 4.11 สัญญาณการควบคุมบูสต์แบบค่าคงที่สูง

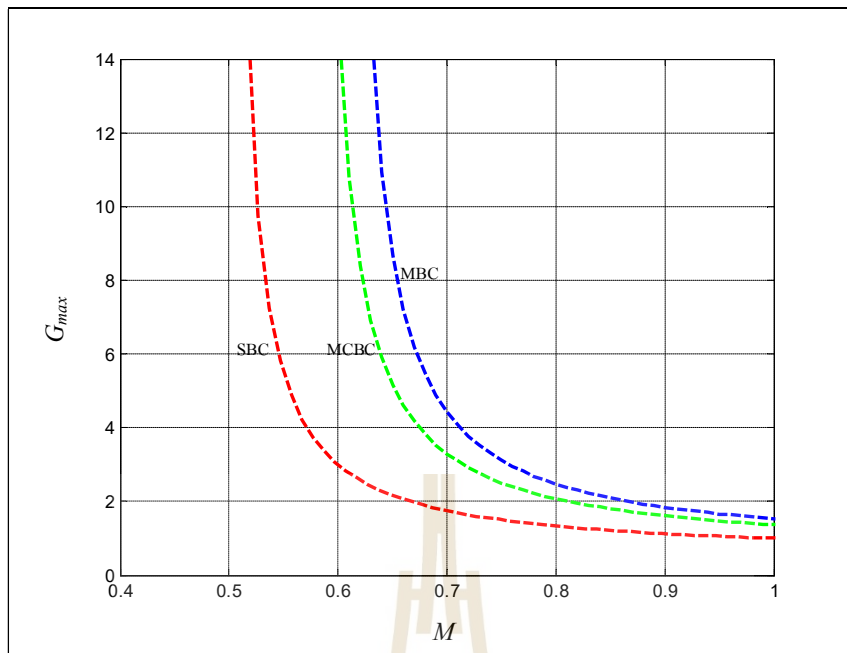
จากลักษณะของการสวิตช์สำหรับอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ทั้ง 3 วิธีการ สามารถแสดงค่าวัฏจักรหน้าที่ (D), อัตราขยายแรงดัน (B), อัตราขยายของอินเวอร์เตอร์ (G) และความเครียดสวิตช์ (V_s / V_{in}) ได้ดังตารางที่ 4.1 และ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูเลตและค่าวัฏจักรหน้าที่ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูเลตและอัตราขยาย และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายและความเครียดของสวิตช์ ได้ดังรูปที่ 4.12 - 4.14 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าวิภูจักรหน้าที่ อัตราขยายแรงดัน อัตราขยายของอินเวอร์เตอร์ และ ความเครียดของสวิตช์ ของการสัญญาณการสวิตช์แบบต่าง ๆ

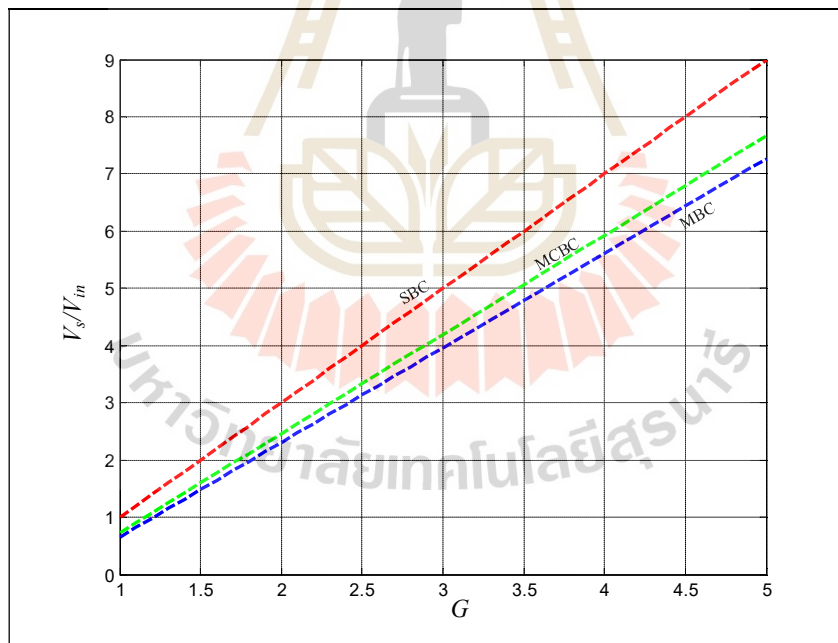
	SBC	MBC	MCBC
D_{\max}	$1 - M$	$1 - \frac{3\sqrt{3}M}{2\pi}$	$1 - \frac{\sqrt{3}M}{2}$
B	$\frac{1}{2M - 1}$	$\frac{\pi}{3\sqrt{3}M - \pi}$	$\frac{1}{\sqrt{3}M - 1}$
G_{\max}	$\frac{M}{2M - 1}$	$\frac{\pi M}{3\sqrt{3}M - \pi}$	$\frac{M}{\sqrt{3}M - 1}$
$\frac{V_s}{V_{in}}$	$2G - 1$	$\frac{3\sqrt{3}G}{\pi} - 1$	$\sqrt{3}G - 1$



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูเลตและค่าวิภูจักรหน้าที่



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูเลตและอัตราขยาย



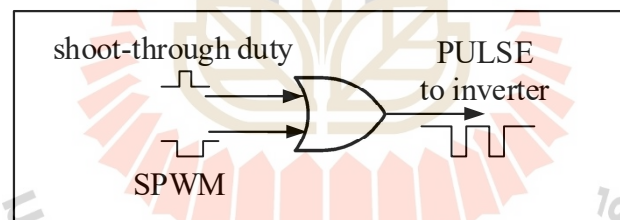
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายและความเครียดของสวิตช์

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.12 - 4.14 พบว่า การควบคุมสัญญาณการสวิตช์แบบ SBC ค่อนข้างง่าย แต่อัตราขยายของอินเวอร์เตอร์ต่ำ ส่วนการสวิตช์แบบ MBC มีอัตราขยายของอินเวอร์เตอร์สูง และความเครียดสวิตช์ต่ำกว่าการสวิตช์แบบอื่น ๆ แต่จากการปรับที่ศัณวกรรม

พบว่า การสวิตช์แบบ MBC มีเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกสูงกว่าการสวิตช์แบบอื่น ๆ ส่วนการสวิตช์แบบ MCBC มีอัตราขยายของอินเวอร์เตอร์สูงและความเครียดสวิตช์ต่ำ ซึ่งการควบคุมสัญญาณการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ด้วยการสวิตช์แบบ MCBC ส่วนใหญ่จะใช้การควบคุมแบบเวกเตอร์ แต่เพื่อให้ง่ายต่อการดำเนินงานวิจัย งานวิจัยวิทยานิพนธ์จะเลือกใช้การควบคุมสัญญาณการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ด้วยการควบคุมบวสต์แบบง่าย ด้วยสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์ (Sinusoidal Pulse Width Modulation : SPWM) ร่วมกับสัญญาณลอจิก

4.5 เทคนิคการควบคุมสัญญาณการสวิตช์ด้วยการควบคุมบวสต์แบบง่าย

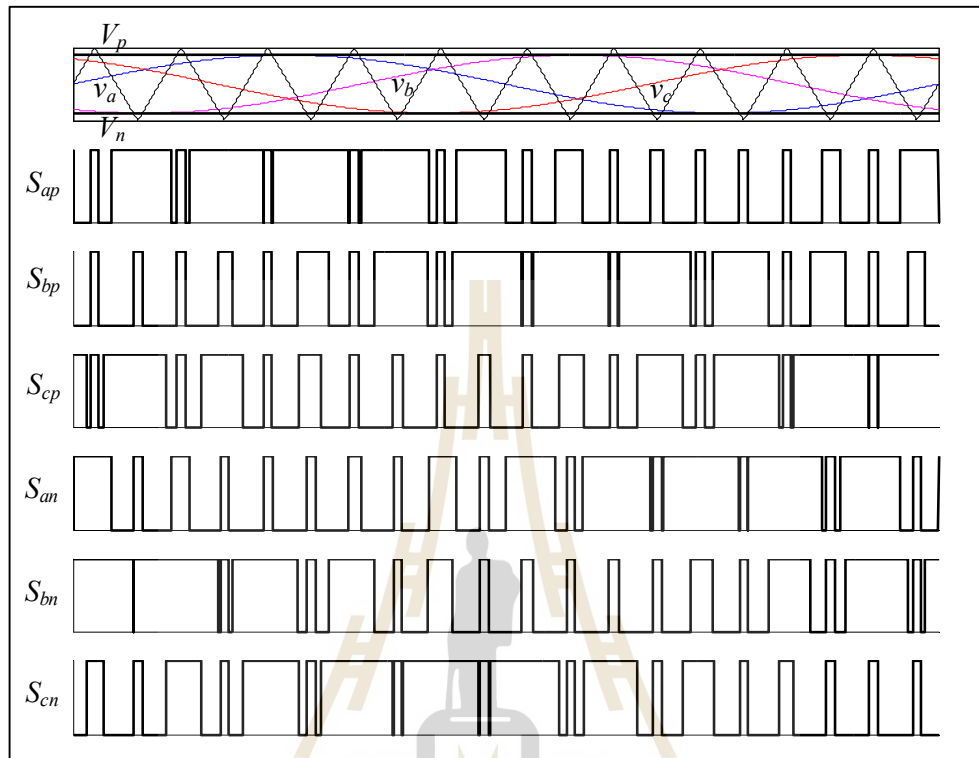
จากในหัวข้อก่อนหน้านี้นี้ได้นำเสนอเกี่ยวกับการควบคุมสัญญาณการสวิตช์อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ซึ่งซึ่งแบ่งออกเป็น 3 วิธีการ ได้แก่ การควบคุมบวสต์แบบง่าย การควบคุมบวสต์แบบค่าสูง และการควบคุมบวสต์แบบค่าคงที่สูง ซึ่งงานวิจัยวิทยานิพนธ์เลือกใช้การควบคุมสัญญาณการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ด้วยการควบคุมบวสต์แบบง่าย ดังนั้นในหัวข้อนี้จะนำเสนอเกี่ยวกับการควบคุมสัญญาณการสวิตช์ สัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์ร่วมกับสัญญาณลอจิกเกต สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.15 และการสร้างสัญญาณการสวิตช์ด้วยการควบคุมบวสต์แบบง่ายได้ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.15 สัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์ทำงานร่วมกับสัญญาณลอจิกเกต

การสร้างสัญญาณการสวิตช์ด้วยการควบคุมบวสต์แบบง่ายแสดงได้ดังรูปที่ 4.16 โดยสัญญาณขอบเขตบน (V_p) และขอบเขตล่าง (V_n) คือค่าวัฏจักรหน้าที่ในสถานะ shoot-through และสัญญาณแรงดันอ้างอิงรูปคลื่นไซน์สามเฟส (v_a , v_b และ v_c) เปรียบเทียบกับสัญญาณพาร์รูปสามเหลี่ยม (V_{tri}) ยกตัวอย่างในกรณีเมื่อสัญญาณ v_a มากกว่าสัญญาณ V_{tri} ทำให้สวิตช์ S_{ap} นำกระแสหรือมีค่าเท่ากับ 1 ขั้นตอนที่ 2 พิจารณาเมื่อสัญญาณ V_{tri} มากกว่าสัญญาณ V_p สัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับ 1 และเมื่อสัญญาณ V_{tri} น้อยกว่าสัญญาณ V_n สัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับ 1 ขั้นตอนที่ 3 นำสัญญาณที่ได้จากการพิจารณาในขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 2 ผ่านลอจิกเกตแบบอ็อกเกตดังในรูปที่ 4.15 จะได้สัญญาณ S_{ap} และ S_{an} ดังแสดงในรูปที่ 4.16 และสัญญาณสวิตช์

S_{bp} , S_{bn} , S_{cp} และ S_{cn} แสดงได้ดังรูปที่ 4.16 เช่นกัน สัญญาณสวิตช์ที่ได้จากการควบคุมบูสต์แบบง่ายนำไปทริกสวิตช์อินเวอร์เตอร์ไอจีบีทีทั้ง 6 ตัว



รูปที่ 4.16 สัญญาณการสวิตช์ด้วยการควบคุมบูสต์แบบง่าย

4.6 สรุป

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบดั้งเดิม ซึ่งเป็นอินเวอร์เตอร์ชนิดขั้นเดียวที่มีความสามารถในการขยายแรงดันอินพุตได้โดยอาศัยการทำงานของวงจรอิมพีแดนซ์ ได้แก่ ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และไดโอด โดยจากการปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงและพัฒนาวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ พบว่า วงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ชนิดป้อนแรงดันที่สามารถจ่ายกระแสได้อย่างต่อเนื่อง โดยมีการปรับปรุงและเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์มาจากแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบดั้งเดิม จึงทำให้สามารถจ่ายกระแสได้อย่างต่อเนื่อง และสามารถลดขนาดฟิสิกส์ของอิมพีแดนซ์ในวงจรลงได้นอกจากนี้ยังได้นำเสนอรายละเอียดเกี่ยวกับอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ สถานะใหม่คการทำงาน การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ รวมถึงวิธีการควบคุมสัญญาณการสวิตช์อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์เพื่อนำไปสู่วิธีการควบคุมสัญญาณการสวิตช์สำหรับใช้ควบคุมอินเวอร์เตอร์ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 5

วงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ ที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

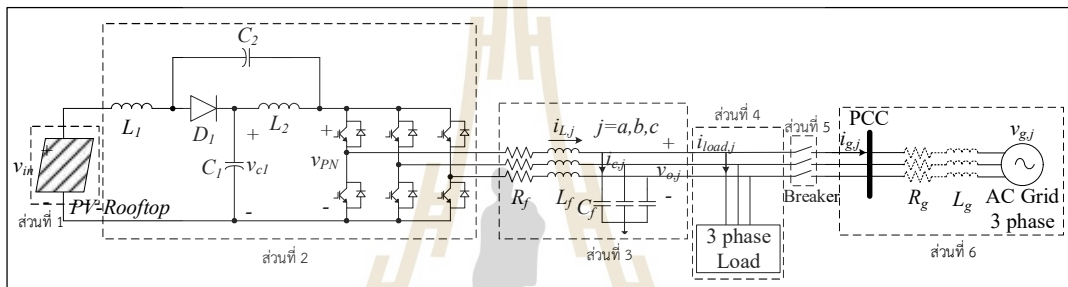
5.1 บทนำ

จากเนื้อหาในบทที่ 4 ได้กล่าวถึงโหมดการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ และการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึง โครงสร้างการควบคุมอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ทั้งในโหมดอิสระและโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายในหัวข้อที่ 5.2 และการควบคุมอินเวอร์เตอร์ทั้งสองโหมดการทำงานในหัวข้อที่ 5.3 สำหรับในหัวข้อที่ 5.4 จะกล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีโลจิสของรากของระบบที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ รวมไปถึงการตรวจสอบผลตอบสนองต่ออินพุตแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของตัวควบคุม และในหัวข้อสุดท้ายนำเสนอการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ของระบบที่พิจารณาด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังใน Simulink บนโปรแกรม MATLAB โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมที่ได้จากการออกแบบตัวควบคุมที่นำเสนอ

5.2 โครงสร้างอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

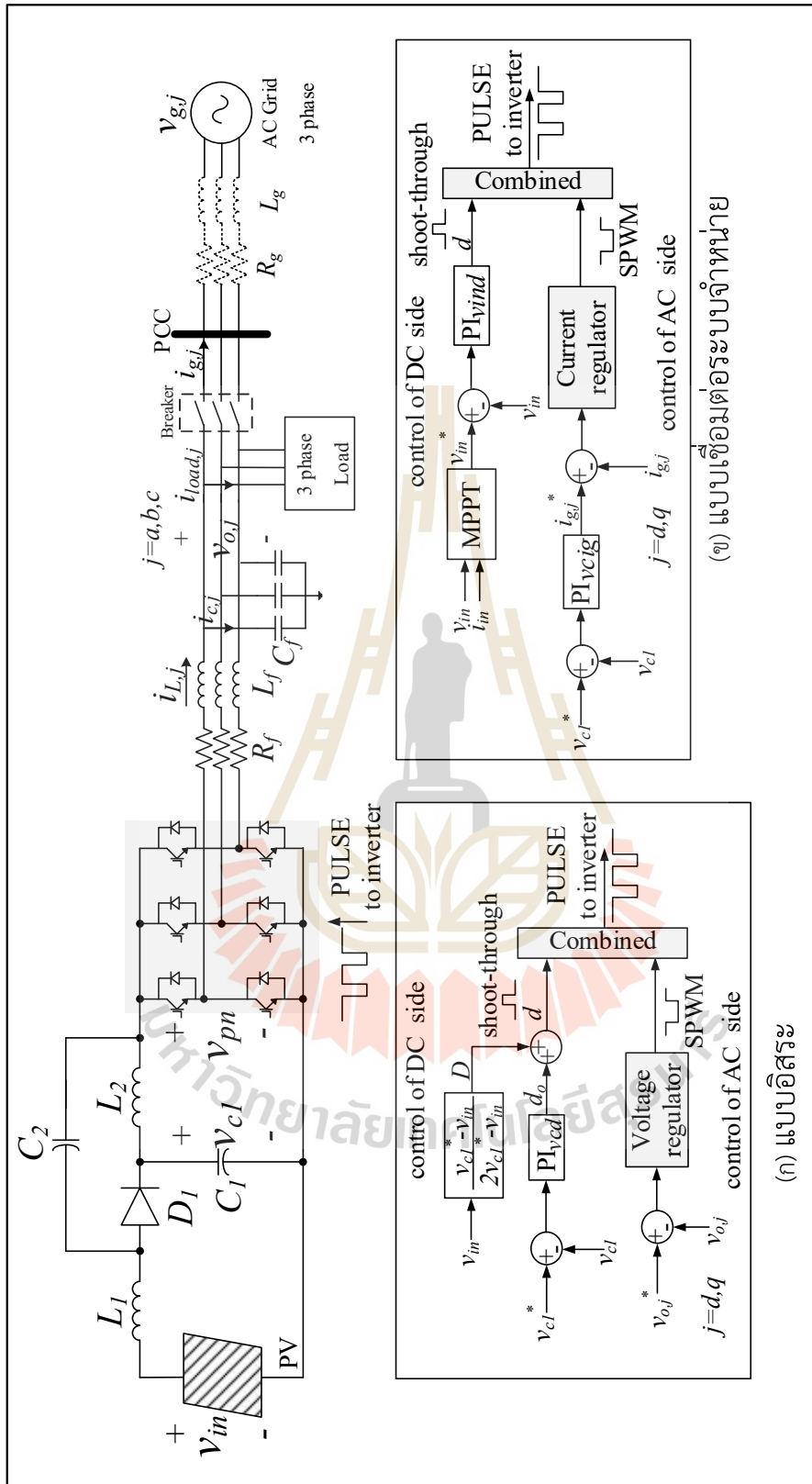
โครงสร้างของระบบอินเวอร์เตอร์ที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์แสดงได้ดังรูปที่ 5.1 ซึ่งประกอบไปด้วย 6 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้งบนหลังคาซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานให้กับระบบ ส่วนที่ 2 อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อจ่ายไฟให้กับโหลดและเชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่ายของกริดไฟฟ้า ส่วนที่ 3 วงจรกรองสัญญาณซึ่งประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ส่วนที่ 4 โหลดกำลังไฟฟ้าสามเฟส ที่เปรียบเสมือนเป็นโหลดเครื่องใช้ไฟฟ้าในบ้าน ส่วนที่ 5 เบรกเกอร์ (Breaker) สำหรับเชื่อมต่อระหว่างวงจรที่พิจารณากับระบบจำหน่ายไฟฟ้า และป้องกันวงจร และส่วนที่ 6 ระบบจำหน่ายไฟฟ้า (Grid Connected) โดยกระแสไฟฟ้าจากระบบที่พิจารณาจะเข้าสู่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าผ่านจุดต่อร่วม หรือ PCC (point of common coupling) ระบบอินเวอร์เตอร์ที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ จะแบ่งออกเป็น 2 โหมดการทำงาน ได้แก่โหมดไม่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายหรือโหมดอิสระโดยเบรกเกอร์จะกำหนดให้มีสถานะ OFF โดยในโหมดนี้ ค่าแรงดันของตัวเก็บประจุ

v_{c1} ถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมด้านกระแสดตรง (DC side control) โดยใช้ตัวควบคุมพีไอ ส่วนตัวควบคุมด้านกระแสสลับ (AC side control) จะควบคุมค่าแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ (terminal output voltage, v_o) โดยใช้ตัวควบคุมพีไอบนแกนหมุนดีคิว (dq -axis) โดยแผนภาพในโหมคนี้แสดงได้ดังรูปที่ 5.2 (ก) ส่วนโหมคเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายหรือเบรกเกอร์จะกำหนดให้มีสถานะ ON ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (MPPT) ถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอด้านกระแสดตรง ส่วนการควบคุมด้านกระแสสลับ คือการควบคุมกระแสไฟฟ้าอ้างอิง โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันของตัวเก็บประจุ และกระแสไฟฟ้ากริด การควบคุมในโหมคนี้แสดงได้ดังรูปที่ 5.2 (ข)



รูปที่ 5.1 อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอดไรต์ที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

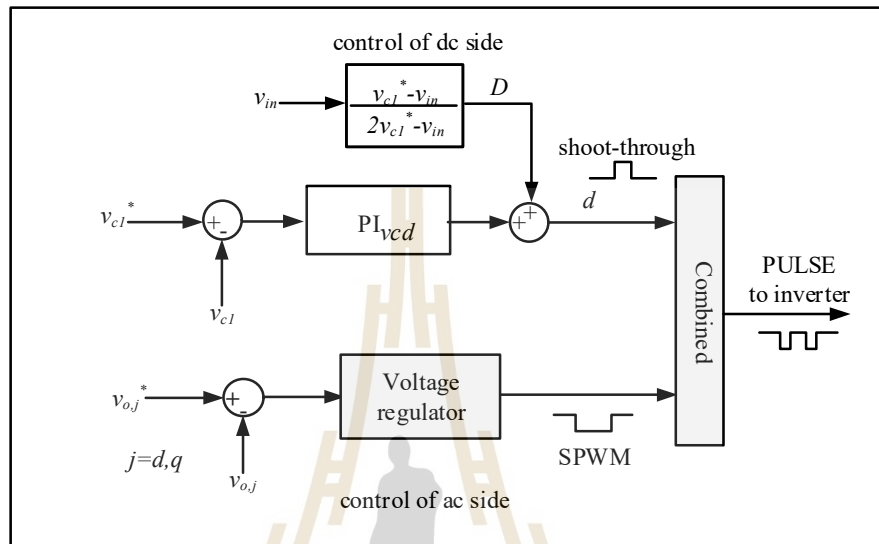




รูปที่ 5.2 โหมตการควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบคอไซด์

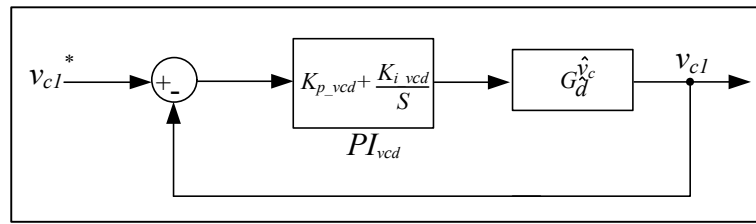
5.2.1 การควบคุมอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์โหมดอิสระ

โครงสร้างตัวควบคุมอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์โหมดอิสระ แสดงได้ดังรูปที่ 5.3 ในกรณีที่เบรกเกอร์ของระบบในรูปที่ 5.1 อยู่ในสถานะ OFF

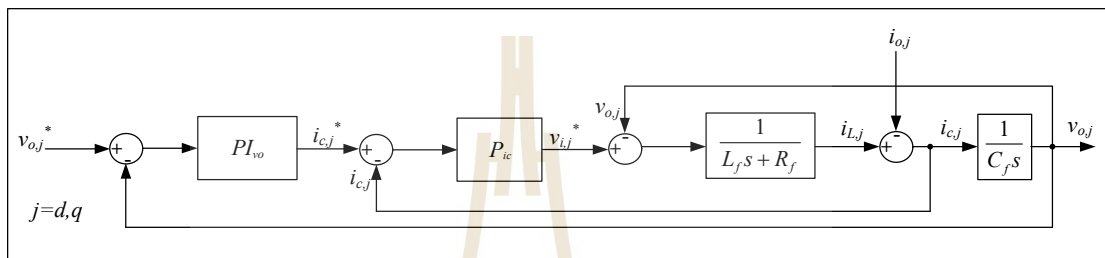


รูปที่ 5.3 การควบคุมอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์โหมดอิสระ

การควบคุมอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์จะแยกพิจารณาเป็นการออกแบบตัวควบคุมด้านกระแสตรง (control of dc side) และการออกแบบตัวควบคุมด้านกระแสสลับ (control of ac side) ซึ่งการควบคุมด้านกระแสตรงคือการควบคุมค่าวัฏหน้าที่ในสถานะ shoot-through เพื่อรักษาระดับแรงดัน v_{cl} ให้มีค่าเป็นไปตามค่าแรงดันอ้างอิงที่กำหนด โดยจากรูปที่ 5.3 จะเห็นได้ว่าค่าวัฏหน้าที่จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพารามิเตอร์รูปสามเหลี่ยม จะได้สัญญาณ shoot-through ซึ่งสามารถออกแบบตัวควบคุมด้านกระแสตรงได้ดังแผนภาพรูปที่ 5.4 ส่วนการควบคุมด้านกระแสสลับคือการควบคุมค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง v_o ที่กำหนด โดยจากรูปที่ 5.3 จะเห็นได้ว่าค่า $v_{o,d}^*$ และ $v_{o,q}^*$ จะถูกแปลงสัญญาณบนแกนดีคิว ให้อยู่บนแกนสามเฟส abc แล้วนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพารามิเตอร์รูปสามเหลี่ยม จะได้สัญญาณ $v_a, v_b,$ และ v_c หรือสัญญาณ SPWM ซึ่งสามารถออกแบบตัวควบคุมด้านกระแสสลับได้ดังแผนภาพรูปที่ 5.5 นอกจากนี้การควบคุมสัญญาณการสวิตช์อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์จะต้องนำสัญญาณ shoot-through จากตัวควบคุมด้านกระแสตรง และสัญญาณ SPWM จากตัวควบคุมด้านกระแสสลับมาต่อเข้ากับ ลอจิกเกตแบบออคเกต (OR) จึงจะได้สัญญาณพัลส์นำไปทรานส์มิทอินเวอร์เตอร์ไอจีบีที 6 ตัว



รูปที่ 5.4 แผนภาพตัวควบคุมด้านกระแสตรงในโหมดอิสระ



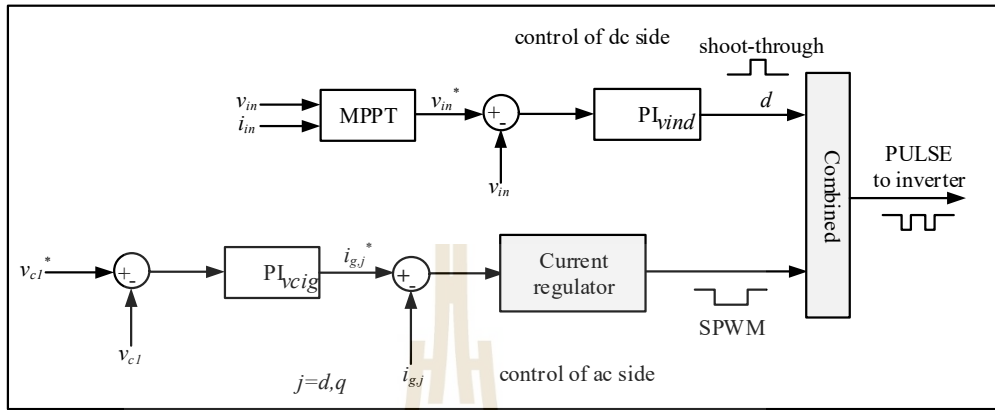
รูปที่ 5.5 แผนภาพตัวควบคุมด้านกระแสสลับในโหมดอิสระ

5.2.2 การควบคุมอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์โหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

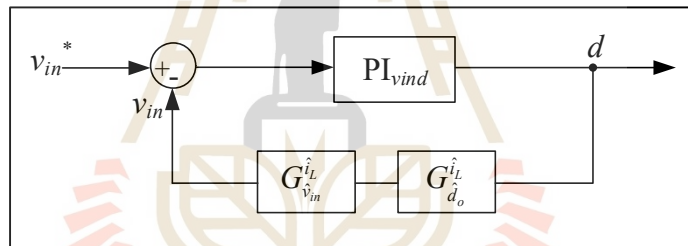
โครงสร้างตัวควบคุมอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์โหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายในกรณีที่เบรกเกอร์ของระบบในรูปที่ 5.1 อยู่ในสถานะ ON แสดงได้ดังรูปที่ 5.6 การออกแบบตัวควบคุมด้านกระแสตรงและการออกแบบตัวควบคุมด้านกระแสสลับจะพิจารณาเหมือนกันกับโหมดอิสระ แต่การควบคุมด้านกระแสตรงคือการควบคุมค่าวัฏหน้าที่ในสถานะ shoot-through เพื่อให้ได้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ v_{mppt} เป็นการดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายได้ ณ ขณะนั้นมาใช้งานให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยจากรูปที่ 5.6 ค่าวัฏหน้าที่จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพารามิเตอร์รูปสามเหลี่ยมได้สัญญาณ shoot-through ซึ่งสามารถออกแบบตัวควบคุมด้านกระแสตรงได้ดังแผนภาพรูปที่ 5.7

สำหรับการควบคุมด้านกระแสสลับคือการควบคุมกระแสไฟฟ้าอ้างอิง โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่าง v_{cl} และ i_g^* โดยจากรูปที่ 5.6 จะได้ค่า $v_{o,d}^*$ และ $v_{o,q}^*$ แปลงสัญญาณบนแกน dq ให้อยู่บนแกนสามเฟส abc แล้วนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพารามิเตอร์รูปสามเหลี่ยมจะได้สัญญาณ $v_a, v_b,$ และ v_c หรือสัญญาณ SPWM ซึ่งสามารถออกแบบตัวควบคุมด้านกระแสสลับได้ดังแผนภาพรูปที่ 5.8 และ 5.9 สำหรับการควบคุมสัญญาณการสวิตช์จะเหมือนกับในโหมดอิสระคือต้องนำสัญญาณ shoot-through จากตัวควบคุมด้านกระแสตรง และสัญญาณ SPWM จากตัวควบคุมด้าน

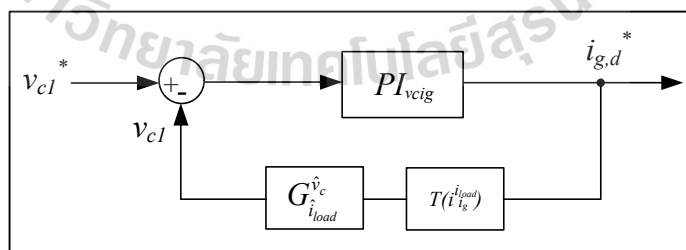
กระแสสลับต่อเข้ากับ ลอจิกเกตแบบอเกต (OR) จึงจะได้สัญญาณพัลส์นำไปทริกสวิตซ์อินเวอร์เตอร์ ไอจีบีที 6 ตัว



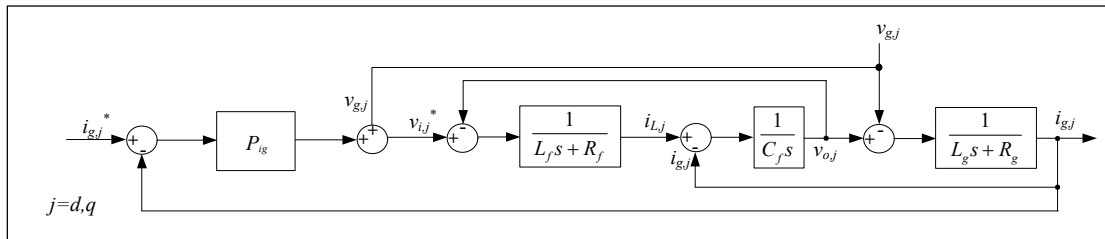
รูปที่ 5.6 การควบคุมอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์โหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย



รูปที่ 5.7 แผนภาพตัวควบคุมด้านกระแสตรงในโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย



รูปที่ 5.8 แผนภาพตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าอ้างอิงในแกนดี



รูปที่ 5.9 แผนภาพตัวควบคุมด้านกระแสสลับในโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

สำหรับการออกแบบตัวควบคุมด้านกระแสตรงและด้านกระแสสลับทั้งโหมดอิสระและโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย จะอาศัยการออกแบบโดยใช้แบบจำลองพลวัตของจากสมการที่ (4-12) ถึง (4-17) ในบทที่ 4 ซึ่งนำไปออกแบบตัวควบคุม และการเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับระบบโดยในหัวข้อถัดไปจะกล่าวถึงรายละเอียดการออกแบบตัวควบคุมของตัวควบคุมในระบบที่พิจารณา

5.3 การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีโลโก้ของราก

การออกแบบตัวควบคุมอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ จะดำเนินการออกแบบตัวควบคุมของระบบด้วยวิธีโลโก้ของราก ซึ่งวิธีการดังกล่าวสามารถผลการตอบสนองของระบบเชิงเวลาได้ ไม่ว่าจะเป็นผลการตอบสนองในสภาวะชั่วคราว และความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวจึงเป็นวิธีการที่เหมาะสมกับระบบที่พิจารณา

5.3.1 ความรู้พื้นฐานวิธีโลโก้ของราก

วิธีโลโก้ของราก เป็นวิธีการทางกราฟ ที่ดำเนินงานในระนาบ-เอส (s-plane) เพื่อการออกแบบระบบควบคุมและวินิจฉัยเกี่ยวกับการตอบสนองในสภาวะชั่วคราวของระบบ วิธีการนี้คล้ายกับเป็นการแยกตัวประกอบสมการลักษณะเฉพาะ เมื่อพารามิเตอร์ K ในระบบแปรค่าไปจากศูนย์ถึงค่าอนันต์ ($0-\infty$) ค่าตัวประกอบที่ได้ ถูกวาดลงไปเป็นกราฟในระนาบ-เอส วิธีการออกแบบโดยอาศัยโลโก้ของรากเป็นการพิจารณาดำเนินงานของโพลกับซีโรของระบบป้อนกลับ ว่าควรมีตำแหน่งอย่างเหมาะสมอยู่ตำแหน่งใด จึงจะทำให้ระบบป้อนกลับหรือระบบควบคุมวงปิดให้สมรรถนะที่ต้องการ

การดำเนินงานวาดโลโก้ของราก มีขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 หาฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบ $G(s)H(s)$ และทำการแยกตัวประกอบพหุนามเศษและส่วน และทำการจัดรูปให้ปรากฏตัวประกอบโพล ซีโร และอัตราขยาย

ค่าของโพลและซีโรที่อ่านค่าได้ จากพจน์ $GH(s)$ เรียกว่า ค่าโพลจำกัด (finite poles) และ ค่าซีโรจำกัด (finite zeros) ค่าจำกัดของโพลและซีโรเหล่านี้ หากวาดลงบนระนาบเอส ด้วย สัญลักษณ์ “x” แสดงตำแหน่งที่เป็นโพล และ “o” แสดงตำแหน่งซีโร

ขั้นที่ 2 วาดแกน σ และ $j\omega$ ของระนาบ-เอส และวาดเครื่องหมายแสดงตำแหน่งโพล และซีโร ที่หามาได้จากขั้นที่ 1 ลงบนระนาบ-เอส

ขั้นที่ 3 พิจารณาว่าส่วนใดบ้างบนแกน σ ปรากฏโลโก้ของราก

ขั้นที่ 4 คำนวณข้อมูลของเส้นกำกับ (asymptotes) และวาดเส้นกำกับ

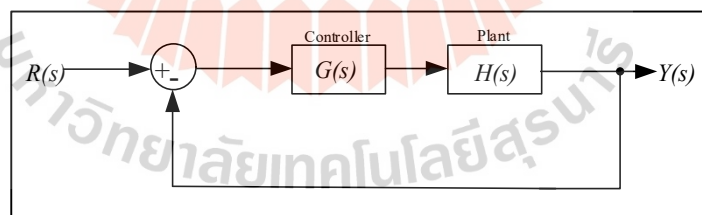
ขั้นที่ 5 วิจัยเกี่ยวกับจุดแตกตัว (breakaway point) และจุดแทรก (break-in point)

ขั้นที่ 6 ถ้าปรากฏโพลเชิงซ้อน ก็ให้คำนวณมุมจาก (angle of departure หรือ AOD) สำหรับโลโก้ของราก และถ้าปรากฏซีโรเชิงซ้อน ก็จะต้องคำนวณมุมมาถึง (angle of arrival หรือ AOA) สำหรับโลโก้ของรากด้วย

ขั้นที่ 7 วิจัยว่าโลโก้ของรากจะตัดแกน $j\omega$ หรือไม่ ถ้าหากตัด ให้คำนวณจุดตัดแกน $j\omega$ ด้วย

ขั้นที่ 8 วาดโลโก้ของรากโดยประมาณให้ได้แผนภาพที่เสร็จสมบูรณ์

จากความรู้พื้นฐานวิธีโลโก้ของราก จะนำมาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นระบบควบคุมวงปิดและตัวควบคุมสำหรับระบบที่พิจารณาคือ ตัวควบคุมพีไอ โดยสามารถแสดงแผนภาพระบบควบคุมวงปิด ได้ดังรูปที่ 5.10 และ



รูปที่ 5.10 แผนภาพระบบควบคุมวงปิด

จากรูปที่ 5.10 ระบบควบคุมวงปิด สามารถเขียนแสดงสมการลักษณะเฉพาะของระบบวงปิดได้สมการที่ (5-1)

$$1 + G(s)H(s) = 0 \quad (5-1)$$

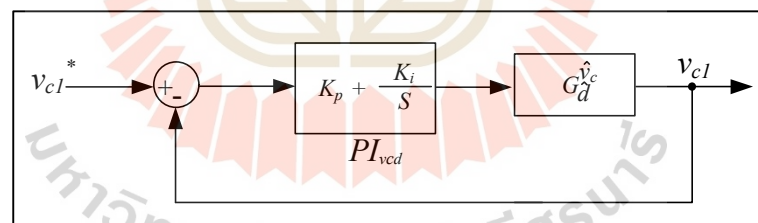
ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ระบบที่พิจารณาเลือกใช้ตัวควบคุมพีไอ ซึ่งสามารถเขียนแสดงฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมพีไอได้ดังสมการที่ (5-2)

$$G(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (5-2)$$

การออกแบบตัวควบคุมพีไอในโหมดอิสระและโหมดเชื่อมต่อบนระบบจำหน่าย โดยอาศัยวิธีโลโก้ของราก็จะแสดงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

5.3.2 การออกแบบตัวควบคุมพีไอในโหมดอิสระ

จากรูปที่ 5.3 การควบคุมแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์โหมดอิสระ แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุจะถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอดังแผนภาพในรูปที่ 5.11 และการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์จะถูกควบคุมด้วยการควบคุมสองลูปบนแกนดีคิว โดยจะมีการควบคุมทั้งลูปในและลูปนอก ด้วยตัวควบคุมพีและตัวควบคุมพีไอ สำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีโลโก้ของราก็จะต้องดำเนินการหาฟังก์ชันการถ่ายโอนของตัวควบคุมก่อนการออกแบบ การหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของลูปลการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ (v_{cl}) สามารถแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 5.11 แผนภาพการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

จากรูปที่ 5.11 สามารถเขียนแสดงสมการลักษณะเฉพาะตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุได้ดังสมการที่ (5-3)

$$1 + \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (G_{d_o}^{v_c}) = 0 \quad (5-3)$$

จากสมการแบบจำลองพลวัตของระบบ $G_{d_o}^{nc}$ สมการที่ (4-14) ในบทที่ 4 นำมาแทนลงสมการที่ (5-3) จะได้สมการลักษณะเฉพาะตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ ดังสมการที่ (5-4)

$$1 + \frac{c_0 K_p s^2 + (c_0 K_i + e_0 K_p) s + e_0 K_i}{a_1 s^3 + b_1 s^2 + c_1 s} = 0 \quad (5-4)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ} \quad a_0 &= (V_{c1} + V_{c1} - RI_{pm})(1 - 2D_o) \\ b_0 &= (I_{pm} - I_{L1} - I_{L2}) \\ c_0 &= b_0 L \\ d_0 &= r + R \\ e_0 &= a_0 + b_0 d_0 \\ a_1 &= LC \\ b_1 &= C(r + R) \\ c_1 &= (1 - 2D_o)^2 \end{aligned}$$

จากสมการที่ (5-4) สามารถนำมาเขียนให้อยู่ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดแยกตามตัวประกอบพหุนามได้ดังนี้

$$a_1 s^3 + (b_1 c_0 K_p) s^2 + (c_1 + c_0 K_i + e_0 K_p) s + e_0 K_i = 0 \quad (5-5)$$

พิจารณาเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพี (K_p) จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนดังสมการที่ (5-6)

$$1 + \frac{(c_0 s^2 + e_0 s) K_p}{a_1 s^3 + b_1 s^2 + (c_1 + c_0) s + e_0 K_i} = 0 \quad (5-6)$$

พิจารณาเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมไอ (K_i) จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนดังสมการที่ (5-7)

$$1 + \frac{(c_0 s + e_0) K_i}{a_1 s^3 + (b_1 + c_0 K_p) s^2 + (c_1 + e_0 K_p) s} = 0 \quad (5-7)$$

จากสมการที่ (5-6) และ (5-7) ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ มีค่าสัมประสิทธิ์ของเศษ (num) และค่าสัมประสิทธิ์ของส่วน (den) ดังสมการที่ (5-8) และ (5-9) ตามลำดับ

$$\text{num}_{K_{pvcd}} = [c_0 \quad e_0 \quad 0] \quad (5-8)$$

$$\text{den}_{K_{pvcd}} = [a_1 \quad b_1 \quad c_1 + c_0 K_i \quad e_0 K_i]$$

$$\text{num}_{K_{ivcd}} = [c_0 \quad e_0] \quad (5-9)$$

$$\text{den}_{K_{ivcd}} = [a_1 \quad b_1 + c_0 K_p \quad c_1 + e_0 K_p \quad 0]$$

จากสมการที่ (5-8) และ (5-9) ค่าสัมประสิทธิ์ของเศษและส่วนของตัวควบคุมพีและไอ นำไปสร้างแผนภาพโพลัสของราก โดยอาศัยค่าพารามิเตอร์ของระบบดังตารางที่ 5.1 ร่วมกับคำสั่ง rlocus ใน MATLAB และหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอที่เหมาะสมกับการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุซึ่งสามารถแสดง แผนภาพโพลัสของตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุในโหมดอิสระได้ดังตารางที่ 5.2 สำหรับระบบที่พิจารณากำหนดให้แรงดันที่กริดมีค่าเท่ากับ $120V_{\text{rms}}$ และแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่ากำลังไฟฟ้าอินพุต $4200W$ เพื่อทำการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่เหมาะสมกับระบบดังกล่าว

ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่พิจารณา

รายละเอียด	ค่าพารามิเตอร์
แรงดันอินพุต	$V_{pv,mppt} = 250V$
กำลังไฟฟ้าอินพุต	$P_{pv} = 4200 W$
แรงดันที่กริด	$v_{grid} = 120V_{\text{rms}}$
ความถี่ของระบบ	$f_s = 50Hz$
ตัวเก็บประจุ	$C = C_1 = C_2 = 400\mu F$
ความต้านทานภายในตัวเก็บประจุ	$r = 0.03\Omega$
ตัวเหนี่ยวนำ	$L = L_1 = L_2 = 0.5mH$
ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ	$r = 0.47\Omega$
ตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง	$L_f = 4mH$
ความต้านทานของวงจรกรอง	$R_f = 0.05\Omega$
ตัวเก็บประจุของวงจรกรอง	$C_f = 50\mu F$
ความต้านทานของโหลดไฟฟ้า	$R_{load} = 20\Omega / phase$

ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่พิจารณา (ต่อ)

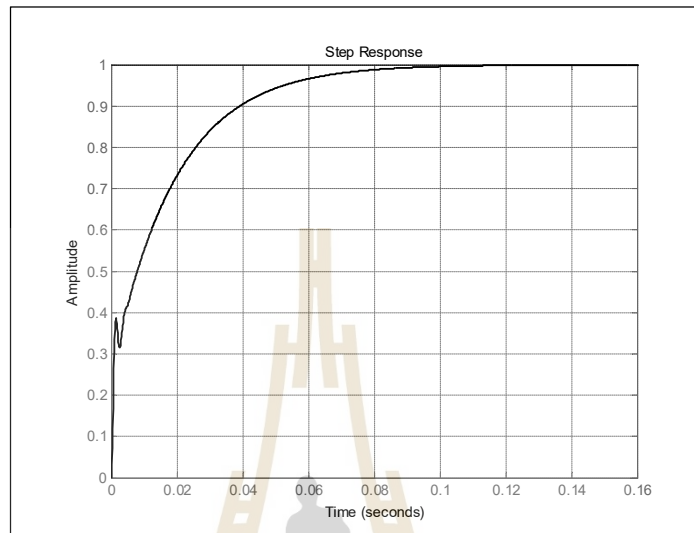
รายละเอียด	ค่าพารามิเตอร์
ตัวเหนี่ยวนำของกริด	$L_g = 10\mu\text{H}$
ความต้านทานของกริด	$R_g = 0.2\Omega$
ความถี่ของสัญญาณพาร์รูปสามเหลี่ยม	$f_{tri} = 10\text{kHz}$
ค่าวัฏจักรหน้าที่	$D = 0.2$
กระแสของโหลด	$I_{load} = 8.6\text{A}$

ตารางที่ 5.2 แผนภาพโพล์ของตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุในโหมดดิสระ

ตัวควบคุม	แผนภาพโพล์ของราก
ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ จากสมการที่ (5-8) กำหนดให้ $K_{ivcd} = 0.1$ มีค่าคงที่ $K_{pvcd} = [0.001 : 0.001 : 0.1]$	

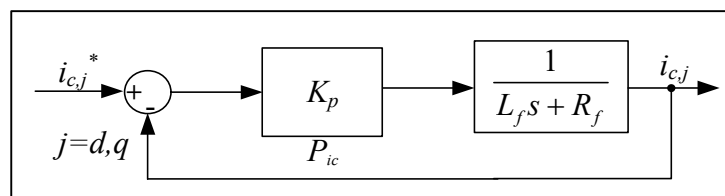
จากแผนภาพโพล์ของราก พบว่าตำแหน่งของโพลและซีโรขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ K_p และ K_i การกำหนดค่าอัตราส่วนการหน่วง และกำหนดเวลาในการช่วงเวลาเข้าที่ สำหรับตัวควบคุมในโหมดดิสระ ดังตารางที่ 5.2 ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุด้านกระแสตรง งานวิจัยวิทยานิพนธ์จะกำหนดให้ผลตอบสนองของระบบมีอัตราส่วนการหน่วงแบบหน่วงวิกฤต ($\zeta = 1$) และช่วงเวลาเข้าที่ (setting time) เท่ากับ 0.1 วินาที ($T_s = 0.1\text{s}$) ดำเนินการสร้างแผนภาพโพล์ของรากจะกำหนดให้ K_{ivcd} มีค่าคงที่ และปรับค่า K_{pvcd} ตั้งแต่ 0.001-0.1 เพื่อดูทางเดินของราก จากตารางที่ 5.2 ตำแหน่งโพลที่เป็นค่าจริงที่สื่อถึงการตอบสนองแบบหน่วงวิกฤต สำหรับตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ คือ $s = -40$ สำหรับโพลคู่เชิงซ้อนถือว่าอยู่ไกลจากแกน $j\omega$ จึงไม่นำมาพิจารณา จะพิจารณาแค่โพลค่าจริงตำแหน่งนี้ค่าเดียว โดยที่ตำแหน่งดังกล่าวมีค่า $K_{pvcd} = 0.005$ เมื่อ $K_{ivcd} = 0.1$ เพื่อยืนยันค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ สามารถแสดงผลการตอบสนองของระบบต่ออินพุตแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของตัวควบคุมได้ดังรูปที่ 5.12 จากรูป จะ

เห็นได้ว่าผลตอบสนองของระบบมีอัตราส่วนการหน่วงแบบหน่วงวิกฤตและช่วงเวลาเข้าที่ 0.1 วินาทีตามที่ออกแบบไว้



รูปที่ 5.12 ผลตอบสนองต่ออินพุตแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

ลำดับถัดไปพิจารณาตัวควบคุมด้านกระแสสลับในโหมดอิสระ โดยแผนภาพของระบบที่พิจารณาแสดงได้ดังรูปที่ 5.5 จากรูปจะเห็นว่า การควบคุมแรงดันเอาต์พุตของเทอร์มินัลของอินเวอร์เตอร์จะถูกควบคุมด้วยการควบคุมสองลูปบนแกนดีคิว ลูปกระแสของตัวเก็บประจุ ($i_{c,j}$) ถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมพีแอสแตงได้ดังรูปที่ 5.13 และลูปแรงดันถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอแอสแตงได้ดังรูปที่ 5.14 สามารถแสดงการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมด้านกระแสสลับในโหมดอิสระได้ดังนี้



รูปที่ 5.13 แผนภาพตัวควบคุมกระแสของตัวเก็บประจุ

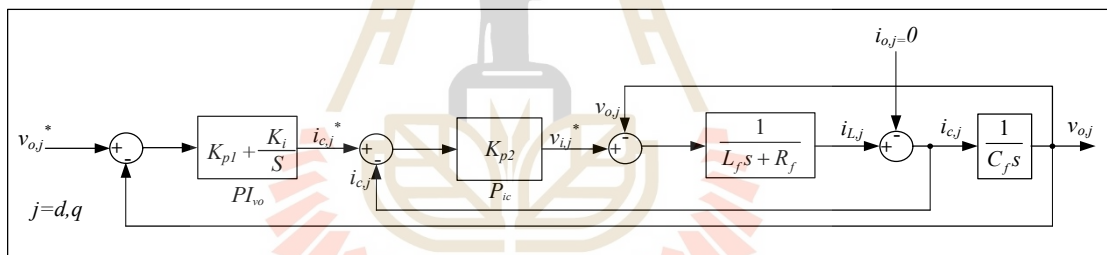
จากรูปที่ 5.13 จะสามารถเขียนแสดงสมการลักษณะเฉพาะลูปกระแสของตัวเก็บประจุ $i_{c,j}$ ได้ดังนี้

$$1 + K_p \left(\frac{1}{L_f s + R_f} \right) = 0 \quad (5-10)$$

จากสมการที่ (5-10) ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพี มีค่าสัมประสิทธิ์ของเศษและค่าสัมประสิทธิ์ของส่วน ดังสมการที่ (5-11)

$$\begin{aligned} \text{num}_{-K_{pic}} &= [1] \\ \text{den}_{-K_{pic}} &= [L_f \quad R_f] \end{aligned} \quad (5-11)$$

สำหรับลูปในของตัวควบคุมแรงดัน แสดงได้ดังแผนภาพรูปที่ 5.13 ทำการพิจารณาลูปแรงดัน และกำหนดให้กระแสเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ 0 $i_{o,j} = 0$



รูปที่ 5.14 แผนภาพตัวควบคุมลูปแรงดัน เมื่อ $i_{o,j} = 0$

จากรูปที่ 5.14 การหาฟังก์ชันการถ่ายโอนของตัวควบคุมลูปแรงดันจะใช้กฎของเมสัน (Mason's Rule) เข้ามาช่วยเนื่องจากแผนภาพระบบควบคุมมีความซับซ้อน และสามารถเขียนแสดงสมการลักษณะเฉพาะลูปในของตัวควบคุมแรงดันได้ดังสมการที่ (5-12)

$$1 + \frac{K_{p1} K_{p2} s + K_i K_{p2}}{L_f C_f s^3 + (K_{p2} + R_f) C_f s^2 + s} = 0 \quad (5-12)$$

จากสมการที่ (5-12) สามารถนำมาเขียนให้อยู่ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดแยกตามตัวประกอบพหุนามได้ดังสมการที่ (5-13)

$$L_f C_f s^3 + (K_{p2} + R_f) C_f s^2 + (K_{p1} K_{p2} + 1) s + K_i K_{p2} = 0 \quad (5-13)$$

จากสมการที่ (5-13) พิจารณาเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนดังสมการที่ (5-14) และ (5-15) ตามลำดับ

$$1 + \frac{K_{p1} K_{p2} s}{L_f C_f s^3 + (K_{p2} + R_f) C_f s^2 + s + K_i K_{p2}} = 0 \quad (5-14)$$

$$1 + \frac{K_i K_{p2}}{L_f C_f s^3 + (K_{p2} + R_f) C_f s^2 + (K_{p1} K_{p2} + 1) s} = 0 \quad (5-15)$$

จากสมการที่ (5-14) และ (5-15) ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ มีค่าสัมประสิทธิ์ของเศษและค่าสัมประสิทธิ์ของส่วน ดังสมการที่ (5-16) และ (5-17) ตามลำดับ

$$num_K_{pvo} = [K_{p2} \quad 0] \quad (5-16)$$

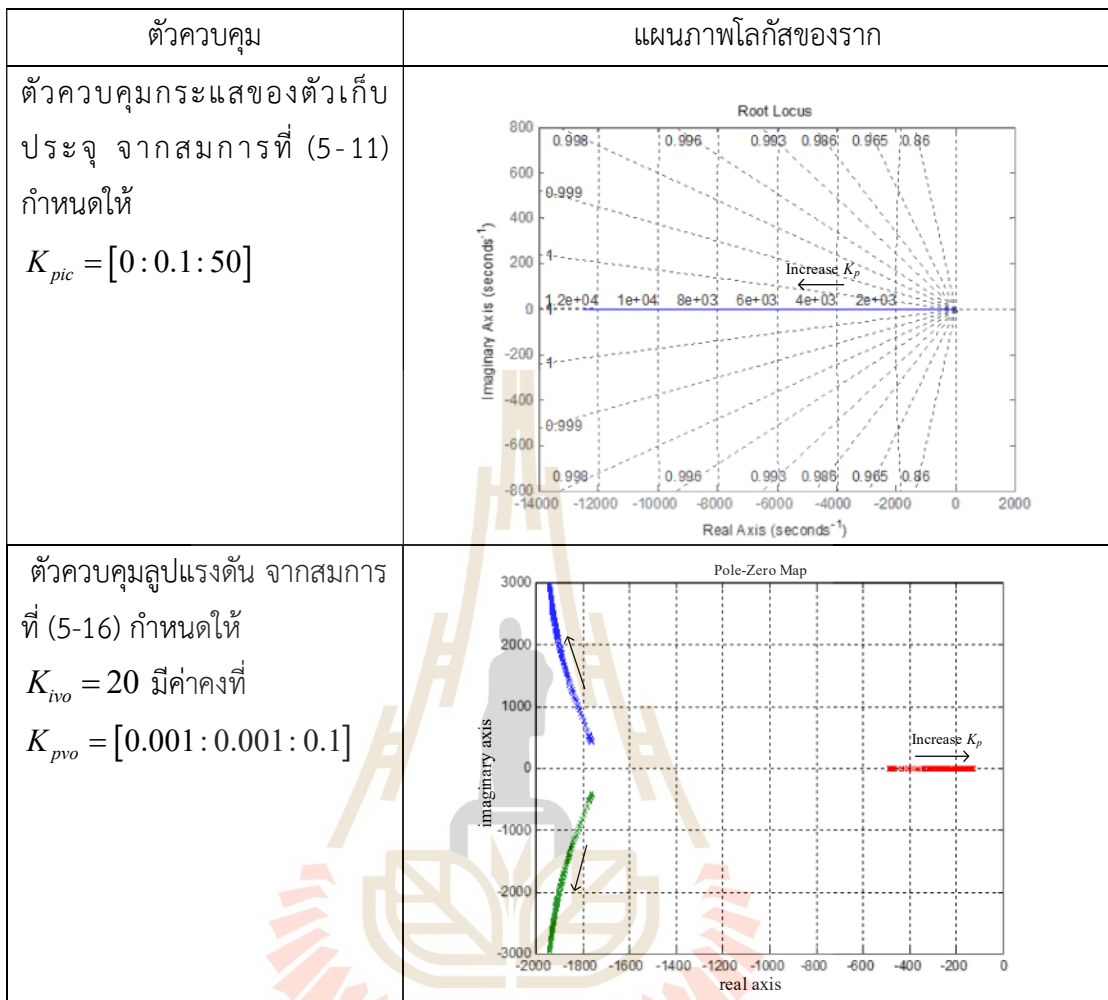
$$den_K_{pvo} = [L_f C_f \quad (K_{p2} + R_f) C_f \quad 1 \quad K_i K_{p2}]$$

$$num_K_{ivo} = [K_{p2}] \quad (5-17)$$

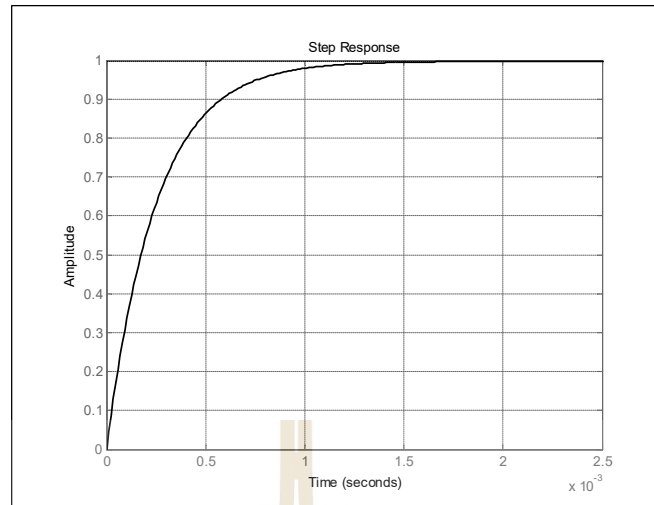
$$den_K_{ivo} = [L_f C_f \quad (K_{p2} + R_f) C_f \quad (K_{p1} K_{p2} + 1) \quad 0]$$

จากสมการที่ (5-16) และ (5-17) ค่าสัมประสิทธิ์ของเศษและส่วนของตัวควบคุมพีและไอนำไปสร้างแผนภาพโลกซ์ของราก และหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอที่เหมาะสมกับลูปแรงดันในโหมดอิสระ ซึ่งสามารถแสดงแผนภาพโลกซ์ของรากตัวควบคุมด้านกระแสสลับในโหมดอิสระในได้อังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 แผนภาพโลโก้ของรากตัวควบคุมด้านกระแสสลับในโหมดอิสระ

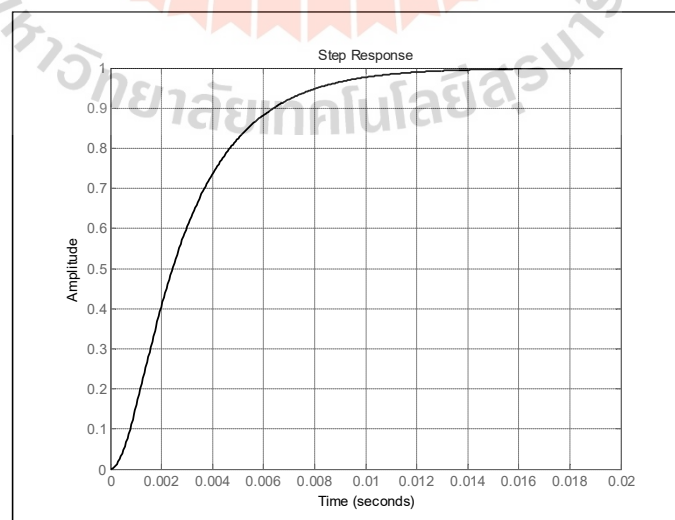


ตัวควบคุมด้านกระแสสลับในโหมดอิสระแบ่งการควบคุมออกเป็นสองลูบการควบคุม ได้แก่ ลูบกระแสของตัวเก็บประจุและลูบแรงดัน ในส่วนของลูบกระแสของตัวเก็บประจุ งานวิจัยวิทยานิพนธ์กำหนดให้ผลตอบสนองของระบบเป็นแบบหน่วงวิกฤต $\zeta = 1$ และช่วงเวลาเข้าที่ $T_s = 0.001s$ (เวลาไวกว่าตัวควบคุมด้านกระแสตรง) ดังนั้นตำแหน่งโพลที่เป็นค่าจริงคือ $s = -4000$ จากแผนภาพโลโก้ของรากตัวควบคุมกระแสของตัวเก็บประจุในตารางที่ 5.3 ที่ตำแหน่ง $s = -4000$ มีค่า $K_{pic} = 16$ สามารถแสดงผลการตอบสนองของระบบต่ออินพุตแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วยได้ดังรูปที่ 5.15 จากรูปจะเห็นได้ว่าผลตอบสนองของระบบมีอัตราส่วนการหน่วงแบบหน่วงวิกฤตและช่วงเวลาเข้าที่ 0.001 วินาทีตามที่ออกแบบไว้



รูปที่ 5.15 ผลตอบสนองต่ออินพุตแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของตัวควบคุมกระแสของตัวเก็บประจุ

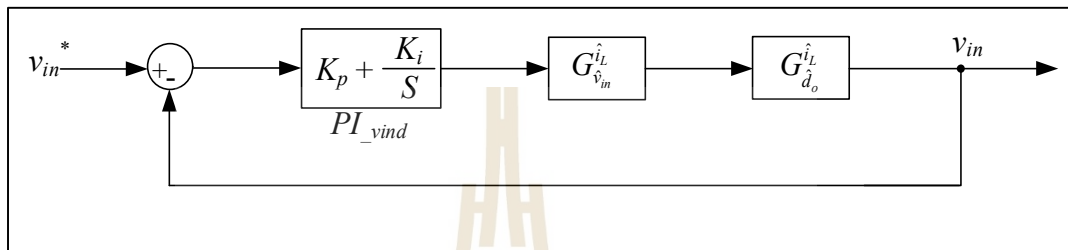
สำหรับตัวควบคุมด้านกระแสสลับรูปแรงดัน งานวิจัยวิทยานิพนธ์กำหนดให้ผลตอบสนองของระบบเป็นแบบหน่วงวิกฤต $\zeta = 1$ และช่วงเวลาเข้าที่ $T_s = 0.01s$ การสร้างแผนภาพโพล์ของรากจะกำหนดให้ $K_{pic} = 16$ และ $K_{ivo} = 20$ มีค่าคงที่ และปรับค่า K_{pvo} ตั้งแต่ 0.001-0.1 เพื่อดูทางเดินของราก จากตารางที่ 5.2 ตำแหน่งโพลที่เป็นค่าจริงสำหรับตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้า คือ $s = -400$ และ ที่ตำแหน่งดังกล่าวมีค่า $K_{pvo} = 0.005$ สามารถแสดงผลการตอบสนองของระบบต่ออินพุตแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วยได้ดังรูปที่ 5.16 จากรูปจะเห็นได้ว่าผลตอบสนองของระบบมีอัตราส่วนการหน่วงแบบหน่วงวิกฤตและช่วงเวลาเข้าที่ 0.0103 วินาทีตามที่ออกแบบไว้



รูปที่ 5.16 ผลตอบสนองต่ออินพุตแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของตัวควบคุมแรงดันเอาต์พุต

5.3.3 การออกแบบตัวควบคุมในโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

การควบคุมอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์โหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย ดังรูปที่ 5.6 พิจารณาการควบคุมด้านกระแสตรง คือการควบคุมค่าวัฏหน้าที่ในสถานะ shoot-through เพื่อให้ได้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยสามารถแสดงแผนภาพตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าอินพุตได้ดังแผนภาพในรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.17 แผนภาพตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าอินพุต

จากแผนภาพตัวควบคุมค่าวัฏหน้าที่ในรูปที่ 5.17 จะสามารถเขียนแสดงสมการลักษณะเฉพาะตัวควบคุมได้ดังนี้

$$1 + \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (G_{d_o}^{iL}) (G_{v_{in}}^{iL}) = 0 \quad (5-18)$$

จากสมการแบบจำลองพลวัตของระบบ $G_{d_o}^{iL}$ และ $G_{v_{in}}^{iL}$ ในสมการที่ (4-15) และ (4-17) ในบทที่ 4 นำมาแทนลงสมการที่ (5-18) จะได้สมการลักษณะตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าอินพุต ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดแยกตามตัวประกอบพหุนามได้ดังสมการที่ (5-19)

$$a_1 c_0 s^6 + b_1 c_0 s^5 + (a_0 a_1 + c_0 c_1 + a_0 a_1 K_p) s^4 + (b_1 d_0 + b_0 a_1 K_p + a_0 a_1 K_i) s^3 + (c_1 d_0 + a_0 c_1 K_p + b_0 a_1 K_i) s^2 + (b_0 c_1 K_p + a_0 c_1 K_i) s + b_0 c_1 K_i = 0 \quad (5-19)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ} \quad a_0 &= (V_{c1} + V_{c1} - R I_{pm}) C \\ b_0 &= (I_{pm} - I_{L1} - I_{L2}) (1 - 2D_o) \\ c_0 &= b_0 L \\ d_0 &= (D_o + (1 - D_o)(1 - 2D_o)) C \\ a_1 &= LC \end{aligned}$$

$$b_1 = C(r + R)$$

$$c_1 = (1 - 2D_o)^2$$

พิจารณาเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนดังสมการที่ (5-20) และ (5-21) ตามลำดับ

$$1 + \frac{(a_0 a_1 s^4 + b_0 a_1 s^3 + a_0 c_1 s^2 + b_0 c_1) K_p}{a_1 c_0 s^6 + b_1 c_0 s^5 + (a_0 a_1 + c_0 c_1) s^4 + (b_1 d_0 + a_0 a_1 K_i) s^3 + (c_1 d_0 + b_0 a_1 K_i) s^2 + (a_0 c_1 K_i) s + a_0 c_1 K_i s + b_0 c_1 K_i} = 0 \quad (5-20)$$

$$1 + \frac{(a_0 a_1 s^3 + b_0 a_1 s^2 + a_0 c_1 s + b_0 c_1) K_i}{a_1 c_0 s^6 + b_1 c_0 s^5 + (a_0 a_1 + c_0 c_1 + a_0 a_1 K_p) s^4 + (b_1 d_0 + b_0 a_1 K_p) s^3 + (c_1 d_0 + a_0 c_1 K_p) s^2 + b_0 c_1 K_p s} = 0 \quad (5-21)$$

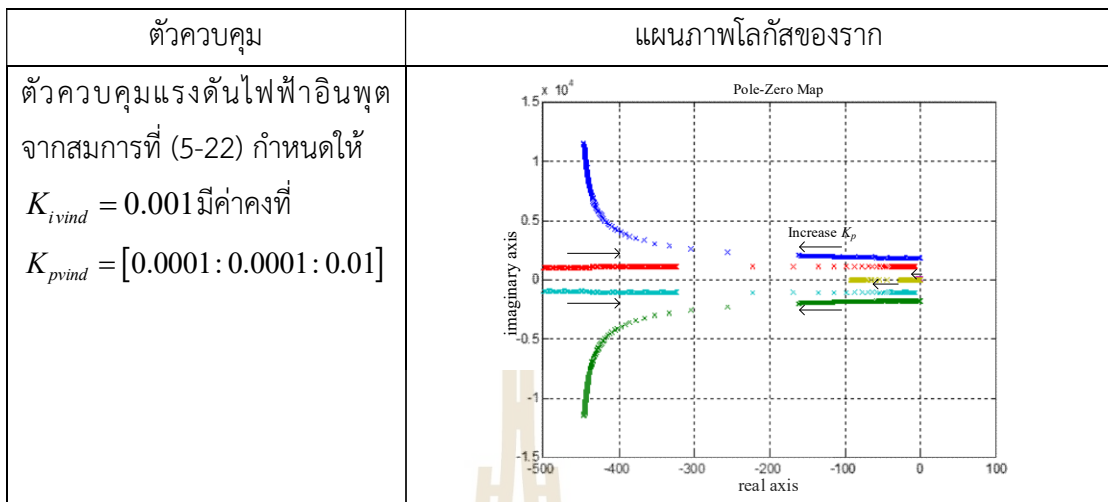
จากสมการที่ (5-20) และ (5-21) ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ มีค่าสัมประสิทธิ์พิเศษ และค่าสัมประสิทธิ์ของส่วน ดังสมการที่ (5-22) และ (5-23) ตามลำดับ

$$\begin{aligned} num_K_{pvind} &= [a_0 a_1 \quad b_0 a_1 \quad a_0 c_1 \quad b_0 c_1 \quad 0] \\ den_K_{pvind} &= [a_1 c_0 \quad b_1 c_0 \quad (a_0 a_1 + c_0 c_1) \quad (b_1 d_0 + a_0 a_1 K_i) \quad (c_1 d_0 + b_0 a_1 K_i) \quad a_0 c_1 K_i \quad b_0 c_1 K_i] \end{aligned} \quad (5-22)$$

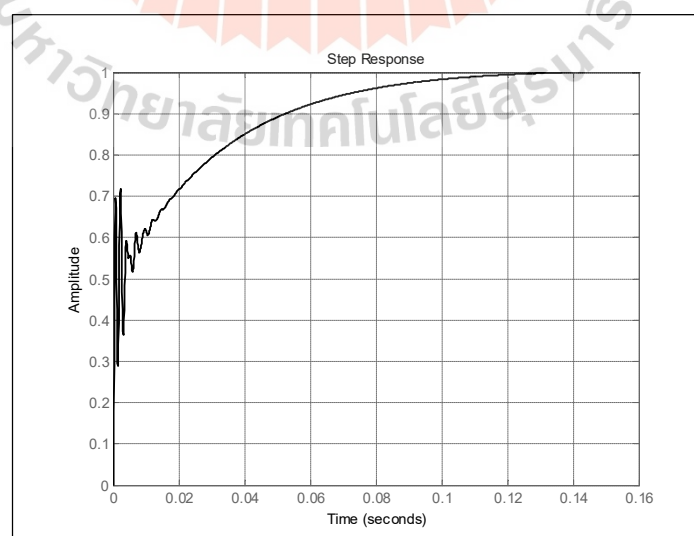
$$\begin{aligned} num_K_{ivind} &= [a_0 a_1 \quad b_0 a_1 \quad a_0 c_1 \quad b_0 c_1] \\ den_K_{ivind} &= [a_1 c_0 \quad b_1 c_0 \quad (a_0 a_1 + c_0 c_1 + a_0 a_1 K_p) \quad (b_1 d_0 + b_0 a_1 K_p) \quad (c_1 d_0 + a_0 c_1 K_p) \quad b_0 c_1 K_p] \end{aligned} \quad (5-23)$$

จากสมการที่ (5-22) และ (5-23) ค่าสัมประสิทธิ์พิเศษและส่วนของตัวควบคุมพีและไอนำไปสร้างแผนภาพโพลัสของราก และหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอที่เหมาะสมกับตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าอินพุตในโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย ซึ่งสามารถแสดงแผนภาพโพลัสของรากตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าอินพุตในโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย ได้ดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 แผนภาพโพล์สของรากตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าอินพุตในโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย



จากตารางที่ 5.4 ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าอินพุตในโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย งานวิจัยวิทยานิพนธ์กำหนดให้ผลตอบสนองของระบบเป็นแบบหน่วงวิกฤต $\zeta = 1$ และช่วงเวลาเข้าที่ $T_s = 0.1s$ การสร้างแผนภาพโพล์สของรากจะกำหนดให้ K_{ivind} มีค่าคงที่ และปรับค่า K_{pvind} ตั้งแต่ 0.0001-0.01 เพื่อดูทางเดินของราก จากในตารางที่ 5.4 ตำแหน่งโพลที่เป็นค่าจริงสำหรับตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าอินพุต คือ $s = -40$ และที่ตำแหน่งดังกล่าวมีค่า $K_{pvind} = 0.0017$ $K_{ivind} = 0.001$ สามารถแสดงผลการตอบสนองของระบบต่ออินพุตแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วยได้ดังรูปที่ 5.18 จากรูปจะเห็นว่าผลตอบสนองของระบบมีอัตราส่วนการหน่วงแบบหน่วงวิกฤตและช่วงเวลาเข้าที่ 0.0763 วินาทีใกล้เคียงกับเวลาที่ออกแบบไว้



รูปที่ 5.18 ผลตอบสนองต่ออินพุตแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าอินพุต

ลำดับถัดไปพิจารณาตัวควบคุมด้านกระแสสลับในโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย การควบคุมกระแสไฟฟ้าอ้างอิงจะอาศัยความสัมพันธ์ระหว่าง v_{c1} และ i_g^* ดังรูปที่ 5.6 แบ่งการควบคุมออกเป็นสองลูปรการควบคุมได้แก่ ตัวควบคุมแรงดันของตัวเก็บประจุ v_{c1} ดังรูปที่ 5.7 และตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าของระบบจำหน่าย i_g ดังรูปที่ 5.8 จากแผนภาพดังกล่าวจะสามารถเขียนแสดงสมการลักษณะเฉพาะตัวควบคุมแรงดันของตัวเก็บประจุในโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย ได้ดังนี้

$$1 + \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (G_{i_{pn}}^{v_c}) T(i_{i_g}^{pn}) = 0 \quad (5-24)$$

จากสมการแบบจำลองพลวัตของระบบ $G_{i_{pn}}^{v_c}$ ในสมการที่ (4-15) และ $T(i_{i_g}^{pn}) = \frac{3\sqrt{2}M}{4}$ แทนลงในสมการที่ (5-24) จะได้สมการลักษณะตัวควบคุมแรงดันของตัวเก็บประจุในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดแยกตามตัวประกอบพหุนามได้ดังสมการที่ (5-25)

$$a_1 s^3 + (b_1 + a_0 c_0 K_p) s^2 + (b_0 c_0 K_p + a_0 c_0 K_i + c_1) s + b_0 c_0 K_i = 0 \quad (5-25)$$

เมื่อ $a_0 = (D_o - 1)L$

$$b_0 = (D_o - 1)(r + R) + R(1 - D_o)$$

$$c_0 = \frac{3\sqrt{2}M}{4}$$

$$a_1 = LC$$

$$b_1 = C(r + R)$$

$$c_1 = (1 - 2D_o)^2$$

พิจารณาเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนดังสมการที่ (5-26) และ (5-27) ตามลำดับ

$$1 + \frac{(a_0 c_0 s^2 + b_0 c_0 s) K_p}{a_1 s^3 + b_1 s^2 + (a_0 c_0 K_i + c_1) s + b_0 c_0 K_i} = 0 \quad (5-26)$$

$$1 + \frac{(a_0 c_0 + b_0 c_0) K_i}{a_1 s^3 + (b_1 + a_0 c_0 K_p) s^2 + (b_0 c_0 K_p + c_1) s} = 0 \quad (5-27)$$

จากสมการที่ (5-26) และ (5-27) ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ มีค่าสัมประสิทธิ์ของเศษ และค่าสัมประสิทธิ์ของส่วน ดังสมการที่ (5-28) และ (5-29) ตามลำดับ

$$\text{num}_{-K_{pvcig}} = [a_0 c_0 \quad b_0 c_0 \quad 0] \quad (5-28)$$

$$\text{den}_{-K_{pvcig}} = [a_1 \quad b_1 \quad a_0 c_0 K_i + c_1 \quad b_0 c_0 K_i]$$

$$\text{num}_{-K_{pvcig}} = [a_0 c_0 \quad b_0 c_0] \quad (5-29)$$

$$\text{den}_{-K_{pvcig}} = [a_1 \quad b_1 + a_0 c_0 K_p \quad b_0 c_0 K_p + c_1 \quad 0]$$

สำหรับรูปในตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าของระบบจำหน่ายดังแผนภาพรูปที่ 5.7 ทำการพิจารณาตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าและกำหนดให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ 0 ($v_{o,j} = 0$) ดำเนินการหาฟังก์ชันการถ่ายโอนของตัวควบคุมโดยใช้กฎของเมสันสามารถเขียนแสดงสมการลักษณะเฉพาะตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าได้ดังสมการที่ (5-30)

$$1 + \frac{K_p}{L_f C_f L_g s^3 + (L_f R_g + L_g R_f) C_f s^2 + (C_f R_f R_g + L_f + L_g) s + (R_f + R_g)} = 0 \quad (5-30)$$

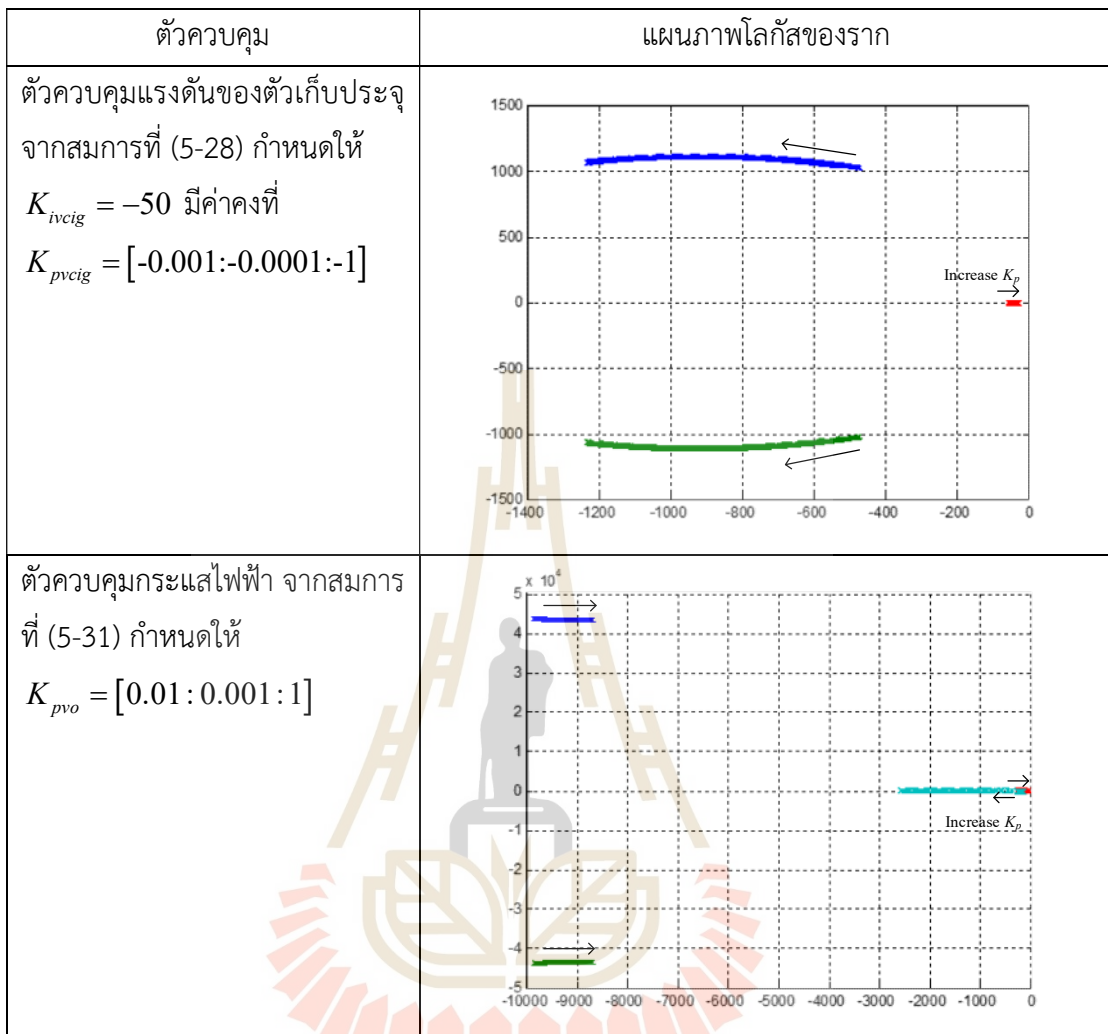
จากสมการที่ (5-30) ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพี มีค่าสัมประสิทธิ์ของเศษและค่าสัมประสิทธิ์ของส่วน ดังนี้

$$\text{num}_{-K_{ig}} = [1] \quad (5-31)$$

$$\text{den}_{-K_{ig}} = [L_f C_f L_g \quad (L_f R_g + L_g R_f) C_f \quad C_f R_f R_g + L_f + L_g \quad R_f + R_g]$$

จากสมการที่ (5-31) ค่าสัมประสิทธิ์ของเศษและส่วนของตัวควบคุมพี นำไปสร้างแผนภาพโพลัสของราก และหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีที่เหมาะสมกับตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าในโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย ซึ่งสามารถแสดงแผนภาพโพลัสของรากตัวควบคุมด้านกระแสสลับ ในโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย ได้ดังตารางที่ 5.5

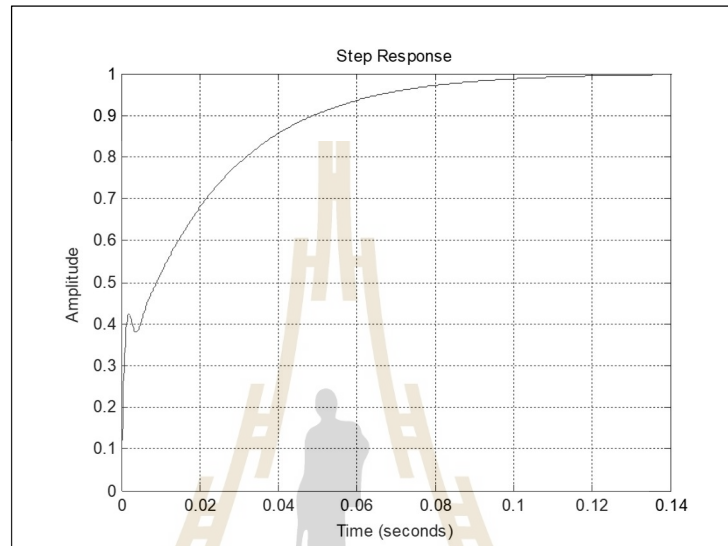
ตารางที่ 5.5 แผนภาพโพล์ของรากตัวควบคุมด้านกระแสสลับ ในโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย



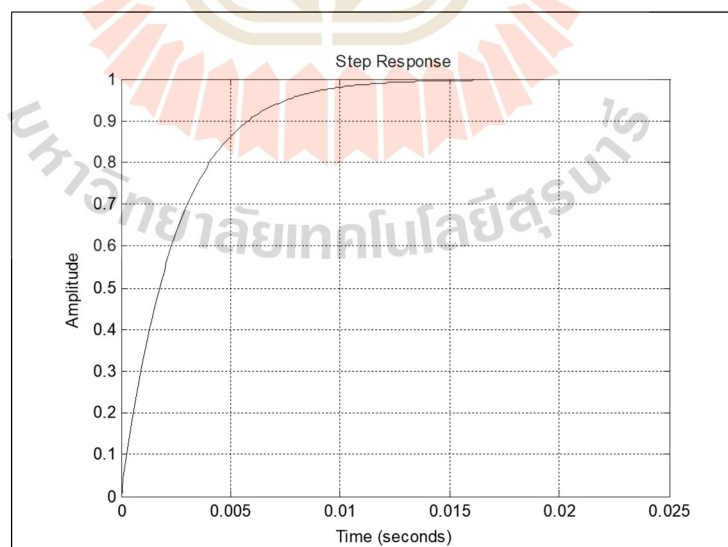
สำหรับตัวควบคุมด้านกระแสสลับในโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายประกอบไปด้วยตัวควบคุมแรงดันของตัวเก็บประจุ และตัวควบคุมกระแสไฟฟ้า งานวิจัยวิทยานิพนธ์กำหนดให้ผลตอบแทนของระบบทั้งสองเป็นแบบหน่วงวิกฤต $\zeta = 1$ โดยตัวควบคุมแรงดันของตัวเก็บประจุช่วงเวลาเข้าที่ $T_s = 0.1s$ ดำเนินการสร้างแผนภาพโพล์ของรากโดยกำหนดให้ $K_{ivcig} = -50$ มีค่าคงที่ และปรับค่า K_{pvcig} ตั้งแต่ -0.001 ถึง -0.1 เพื่อดูทางเดินของราก จากตารางที่ 5.5 ตำแหน่งโพลที่เป็นค่าจริงสำหรับตัวควบคุมแรงดันของตัวเก็บประจุคือ $s = -40$ และที่ตำแหน่งดังกล่าวมีค่า $K_{pvcig} = -0.344$ สามารถแสดงผลการตอบสนองของระบบต่ออินพุตแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วยได้ดังรูปที่ 5.19 จากรูปจะเห็นได้ว่าผลตอบแทนของระบบมีอัตราส่วนการหน่วงแบบหน่วงวิกฤตและช่วงเวลาเข้าที่ 0.12 วินาทีใกล้เคียงกับเวลาที่ต้องการ

ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าด้านกระแสสลับในโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย กำหนดให้ผลตอบแทนของระบบช่วงเวลาเข้าที่ $T_s = 0.01s$ วินาที (เวลาไวกว่าตัวควบคุมด้านกระแสตรง)

ดังนั้นตำแหน่งโพลที่เป็นค่าจริงคือ $s = -400$ จากแผนภาพโพล์ของรากตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าในตารางที่ 5.5 มีค่า $K_{pvo} = 0.153$ สามารถแสดงผลการตอบสนองของระบบต่ออินพุตแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วยได้ดังรูปที่ 5.20 จากรูปจะเห็นได้ว่าผลตอบสนองของระบบมีอัตราส่วนการหน่วงแบบหน่วงวิกฤตและช่วงเวลาเข้าที่ 0.01 วินาทีตามที่ออกแบบไว้



รูปที่ 5.19 ผลตอบสนองต่ออินพุตแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของตัวควบคุมแรงดันของตัวเก็บประจุ



รูปที่ 5.20 ผลตอบสนองต่ออินพุตแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้า

5.4 การจำลองสถานการณ์ของระบบที่พิจารณา

จากโครงสร้างระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอดไรต์ที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายในรูปที่ 5.2 และ การออกแบบและการตรวจสอบสมรรถนะตัวควบคุมพีไอของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอดไรต์โหมตอิสระและโหมตเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย ในหัวข้อที่ 5.3 พบว่า ผลตอบสนองต่ออินพุตแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของตัวควบคุมที่ได้นำเสนอเป็นไปตามที่ออกแบบไว้ และสามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ K_p และ K_i ของตัวควบคุมที่พิจารณาได้ดังตารางที่ 5.6 จากค่าพารามิเตอร์ในตารางดังกล่าวจะนำไปจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ของระบบที่พิจารณาด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังใน Simulink บนโปรแกรม MATLAB เพื่อยืนยันผลการควบคุมอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอดไรต์ในโหมตอิสระและโหมตเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

ตารางที่ 5.6 ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอของระบบที่พิจารณา

รายละเอียด	ค่าพารามิเตอร์
โหมตอิสระ	
ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ	$K_{pvd} = 0.005$
	$K_{ivcd} = 0.1$
ตัวควบคุมกระแสของตัวเก็บประจุ	$K_{pic} = 16$
ตัวควบคุมแรงดันเอาต์พุต	$K_{pvo} = 0.005$
	$K_{ivo} = 20$
โหมตเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย	
ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าอินพุต	$K_{pvind} = 0.0017$
	$K_{ivind} = 0.001$
ตัวควบคุมแรงดันของตัวเก็บประจุ	$K_{pvcig} = -0.344$
	$K_{ivcig} = -50$
ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้า	$K_{pvo} = 0.153$

การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ของระบบที่พิจารณาด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังใน Simulink บนโปรแกรม MATLAB แสดงในภาคผนวก ข. และกำหนดให้พารามิเตอร์ของระบบที่พิจารณาแสดงดังตารางที่ 5.1 และค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอตัวแสดงดังตารางที่ 5.6 การจำลองสถานการณ์แบ่งเป็น 3 กรณี ได้แก่

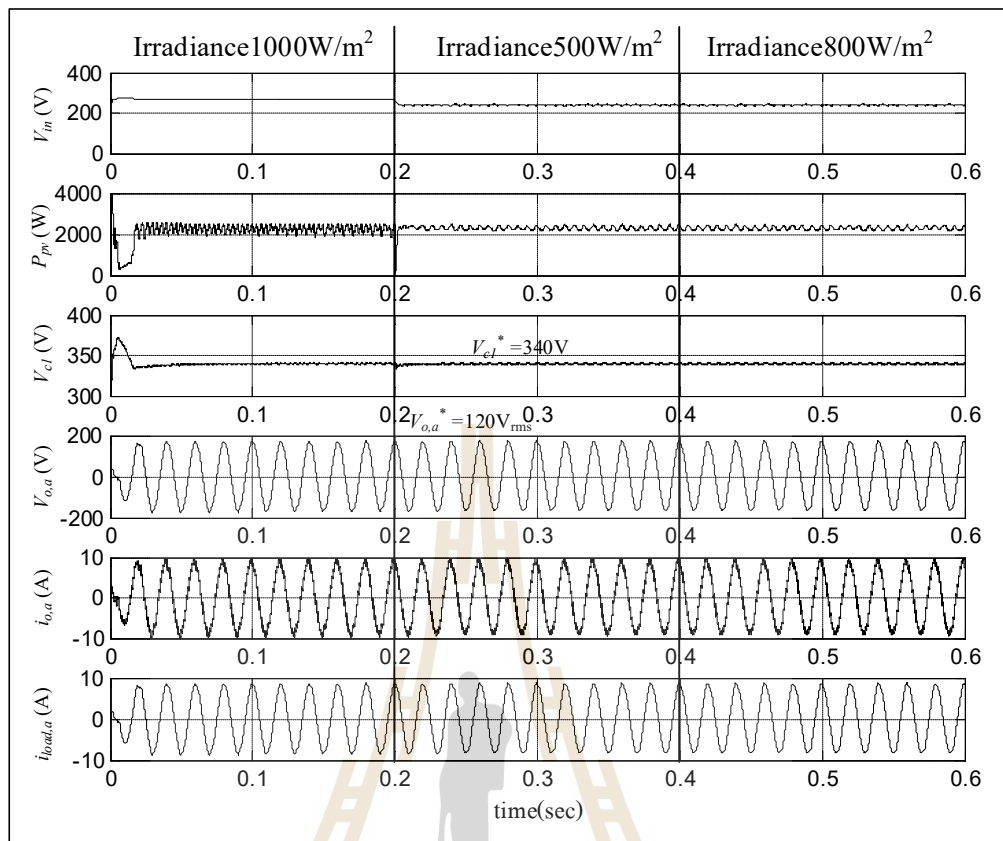
กรณีที่ 1 อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ทำงานในโหมดอิสระ โดยเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง 1000 500 และ 800W/m² ที่เวลา 0.2 และ 0.4 วินาทีตามลำดับ

กรณีที่ 2 อินเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายโดยเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง 1000 500 และ 800W/m² ที่เวลา 0.2 และ 0.4 วินาทีตามลำดับ

กรณีที่ 3 เมื่อความเข้มแสงมีค่าคงที่ 1000 W/m² อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์เปลี่ยนโหมดการทำงานจากโหมดอิสระเป็นโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายเวลาที่ 0.3 วินาที สำหรับในกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 ทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง 1000 500 และ 800W/m² สำหรับการเลือกปรับความเข้มแสงเริ่มต้นที่ความเข้มแสง 1000W/m² เปรียบเสมือนแสงอาทิตย์ในเวลากลางวันที่มีความเข้มแสงมากที่สุด ที่ความเข้มแสง 800W/m² เปรียบเสมือนแสงอาทิตย์ในเวลาสิบเอ็ดโมงเช้า หรือบ่ายสองที่แสงอาทิตย์ยังสว่างอยู่ และที่ความเข้มแสง 500W/m² เปรียบเสมือนแสงอาทิตย์ในเวลาสิบโมงเช้า หรือบ่ายสามที่มีความเข้มแสงกลาง ๆ ไม่สว่างมาก ซึ่งที่ความเข้มแสง 500W/m² แผงเซลล์แสงอาทิตย์ยังคงสามารถจ่ายค่าแรงดันและกระแสให้แก่ระบบได้อยู่ แต่ถ้าหากความเข้มแสงน้อยกว่า 500W/m² อินเวอร์เตอร์ในโหมดอิสระจะไม่สามารถทำงานได้ เนื่องจากค่าแรงดันมีค่าต่ำกว่าแรงดันที่อินเวอร์เตอร์ต้องการ แต่สำหรับในโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายหากค่าความเข้มแสงน้อยกว่า 500W/m² อินเวอร์เตอร์ยังคงสามารถทำงานได้ปกติ จนถึงค่าความเข้มแสงน้อยกว่า 300W/m² นอกจากนี้การปรับเพิ่มหรือลดความเข้มแสงสำหรับการจำลองสถานการณ์ เปรียบเสมือนแสงอาทิตย์ในธรรมชาติที่มีการลดหรือเพิ่มความเข้มแสงตามธรรมชาติได้

การเลือกโหมดควบคุมอินเวอร์เตอร์ในโหมดอิสระและโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายจะพิจารณาจากเบรกเกอร์ที่ระหว่างจุดเชื่อมต่องดรูปที่ 5.5 ถ้าเบรกเกอร์ OFF หรือสัญญาณ 0 คือการทำงานในโหมดอิสระ และถ้าเบรกเกอร์ ON หรือสัญญาณ 1 คือการทำงานในโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย สามารถแสดงผลการจำลองสถานการณ์ของระบบที่พิจารณาได้ดังนี้

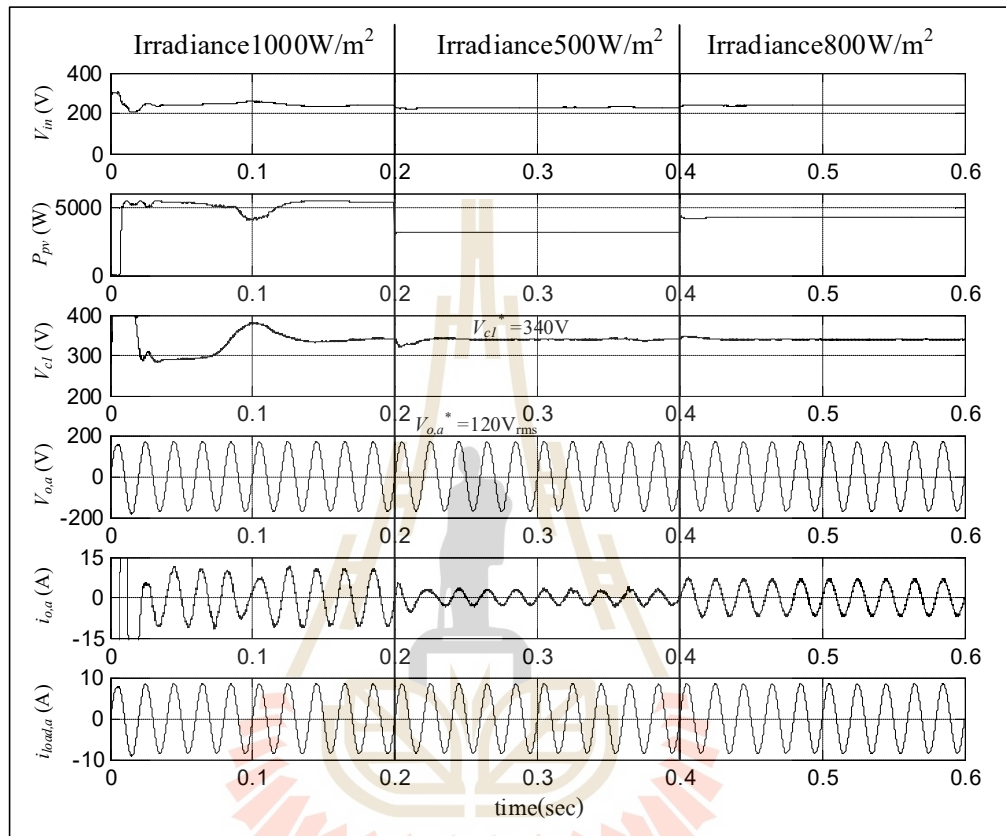
กรณีที่ 1 อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ทำงานในโหมดอิสระ โดยเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง 1000 500 และ 800W/m² ที่เวลา 0.2 และ 0.4 วินาทีตามลำดับ สามารถแสดงผลการจำลองสถานการณ์ได้ดังรูปที่ 5.21



รูปที่ 5.21 ผลการจำลองสถานการณ์จากโปรแกรม Simulink ร่วมกับชุดบล็อกไฟฟ้าของวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ในโหมดอิสระ

จากผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 5.21 พบว่า V_{in} ซึ่งเป็นแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อเปลี่ยนความเข้มแสงแรงดันจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความเข้มแสง เมื่อความเข้มแสงมีค่าลดลง ค่าแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะมีค่าลดลง และเมื่อความเข้มแสงมีค่าเพิ่มขึ้นค่าแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น และกำลังไฟฟ้าไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะแปรผันตามความเข้มแสง หากความเข้มแสงมีค่าลดลงกำลังไฟฟ้าไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะมีค่าลดลงด้วย สำหรับค่าแรงดันของตัวเก็บประจุ V_{c1} ในการจำลองสถานการณ์กำหนดให้ค่าแรงดันของตัวเก็บประจุ อ้างอิงมีค่า $v_{c1}^* = 340V$ พบว่าวงจรสามารถรักษาระดับแรงดันได้เท่ากับ $340V$ ส่วนค่าแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ $V_{o,a}$ ในโหมดอิสระ กำหนดให้แรงดันที่มีค่าเท่ากับ $V_{o,a} = 120V_{rms}$ จากรูปที่ 5.21 จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับ $120V_{rms}$ ส่วนค่ากระแสที่เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ในเฟส a $i_{o,a}$ ในโหมดอิสระระบบจะจ่ายกระแสให้แก่โหลด จากรูปที่ 5.21 จะเห็นได้ว่าค่า $i_{load,a}$ จะมีค่าเท่ากับค่ากระแสที่ได้จากอินเวอร์เตอร์

กรณีที่ 2 อินเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายโดยเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง 1000 500 และ 800W/m² ที่เวลา 0.2 และ 0.4 วินาทีตามลำดับ สามารถแสดงผลการจำลองสถานการณ์ได้ดังรูปที่ 5.22

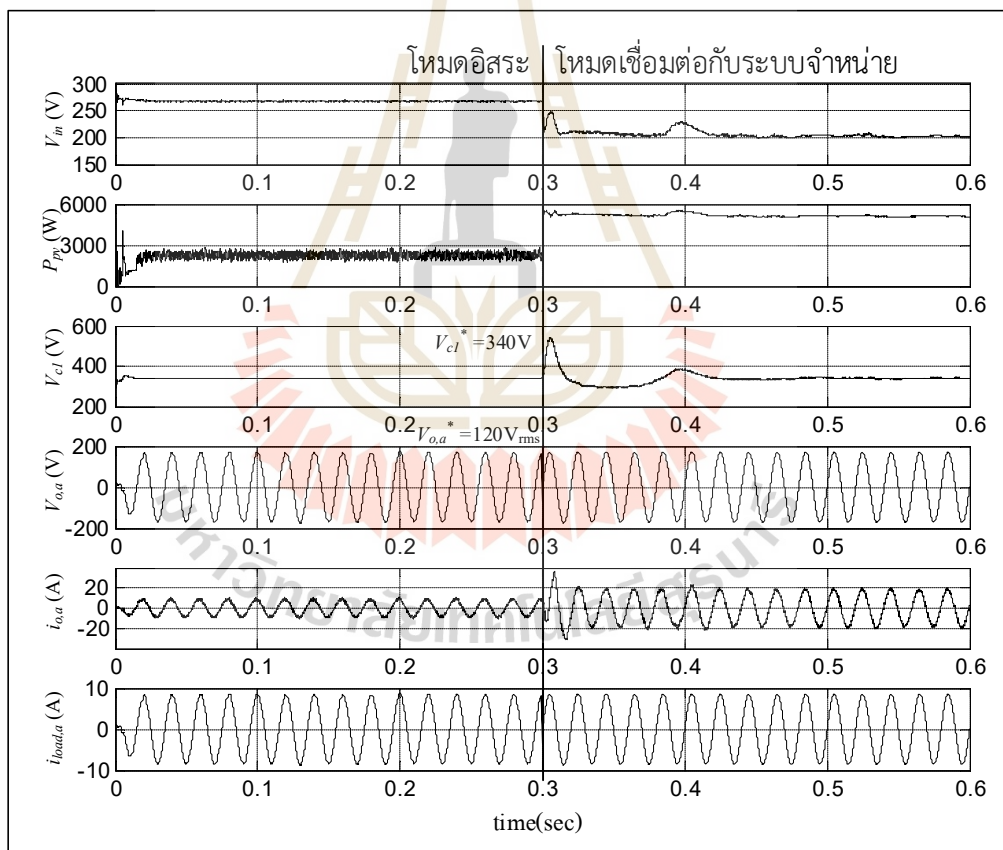


รูปที่ 5.22 ผลการจำลองสถานการณ์จากโปรแกรม Simulink ร่วมกับชุดบล็อกไฟฟ้าของวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ในโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

จากผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 5.22 พบว่าค่าแรงดันอินพุตมีค่าเท่ากับค่าแรงดันที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด หรือ $V_{in} = V_{mpp}$ หากเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะมีค่าเปลี่ยนแปลง เมื่อความเข้มแสงมีค่าลดลง ค่ากำลังไฟฟ้าก็จะมีค่าลดลง โดยการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานตามความเข้มแสง จะอาศัยการตามรอยจุดกำลังงานสูงสุด ด้วยอัลกอริทึมเพิ่มค่าความนำ เพื่อให้สามารถถึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ณ สภาวะความเข้มแสงขณะนั้นมาใช้งานได้ (รายละเอียดการตามรอยจุดกำลังงานสูงสุดด้วยอัลกอริทึมเพิ่มค่าความนำ แสดงได้ในภาคผนวก ค.) นอกจากนี้ค่าแรงดันของตัวเก็บประจุ V_{c1} ในการจำลองสถานการณ์กำหนดให้ค่าแรงดันของตัวเก็บประจุ อ้างอิงมีค่า $v_{c1}^* = 340V$ จากรูปที่ 5.22 พบว่าวงจรสามารถรักษาระดับ

แรงดันได้เท่ากับ 340V สำหรับค่าแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ในโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย มีค่าเท่ากับแรงดันกริดอ้างอิง 120 V ($v_{grid} = 120V_{rms}$) และค่ากระแสที่อินเวอร์เตอร์ในเฟส a $i_{o,a}$ ที่ความเข้มแสง 1000 W/m^2 จะมีค่ากระแสมากที่สุดเนื่องจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากกว่าที่ความเข้มแสง 500 และ 800 W/m^2 ซึ่งอินเวอร์เตอร์ก็จะจ่ายกระแสให้แก่โหลด จากค่า $i_{load,a}$ จะมีค่าเท่ากันในทุกสภาวะความเข้มแสงและในโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย กระแสที่เกินกว่าโหลดต้องการจะจ่ายเข้าสู่ระบบจำหน่ายทั้งหมด ซึ่งกระแส $i_{grid,a}$ ที่ความเข้มแสง 1000 800 และ 500 W/m^2 มีค่ากระแสที่กริด $i_{grid,a}$ มากไปน้อย ตามลำดับ

กรณีที่ 3 เมื่อความเข้มแสงมีค่าคงที่ 1000 W/m^2 อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์เปลี่ยนโหมดการทำงานจากโหมดอิสระเป็นโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายเวลา 0.3 วินาที



รูปที่ 5.23 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่ออินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์เปลี่ยนโหมดการทำงานโหมดอิสระเป็นโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย ที่เวลา 0.3 วินาที

จากผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 5.23 พบว่า แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เมื่ออินเวอร์เตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงาน จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยมีค่าเท่ากับแรงดันที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และมีการแกว่งของสัญญาณเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยอัลกอริทึมตามรอยกำลังงานสูงสุด ทั้งนี้ค่าแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะส่งผลต่อค่ากำลังไฟฟ้าอีกด้วยในส่วนของค่าแรงดันของตัวเก็บประจุ V_{c1} ในการจำลองสถานการณ์กำหนดให้ค่าแรงดันของตัวเก็บประจุ อ้างอิงมีค่า $v_{c1}^* = 340V$ พบว่าวงจรสามารถรักษาระดับแรงดันได้เท่ากับ 340V ทั้งในโหมดอิสระและโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย และมีการพุ่งเกินหลังจากการเปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย ส่วนค่าแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ $V_{o,a}$ ในโหมดอิสระ กำหนดให้แรงดันที่มีค่าเท่ากับ $120V_{rms}$ และโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายมีค่าเท่ากับแรงดันกริดอ้างอิง $120V$ จากรูปที่ 5.23 จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ทั้งในสองโหมดมีค่าเท่ากับ $120V_{rms}$ ส่วนค่ากระแสที่เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ในเฟส a ในโหมดอิสระระบบจะจ่ายกระแสให้แก่โหลด ค่า $i_{load,a}$ จะมีค่าเท่ากับค่ากระแสที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ และโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายจะผลิตกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ได้มากกว่า และกระแสที่เกินกว่าโหลดต้องการจะจ่ายเข้าสู่ระบบจำหน่ายทั้งหมด

ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ของระบบที่พิจารณาด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังใน Simulink บนโปรแกรม MATLAB โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอที่ออกแบบด้วยวิธีโลกซ์ของ ราก จากผลการจำลองสถานการณ์ทั้ง 3 กรณีจะเห็นได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมที่ออกแบบสามารถควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ทั้งในโหมดอิสระและโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายได้ และให้ผลการตอบสนองที่น่าพึงพอใจ

5.5 สรุป

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงโครงสร้างการควบคุมอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ทั้งในโหมดอิสระและโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย การออกแบบตัวควบคุมของระบบที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ รวมไปถึงการตรวจสอบความถูกต้องของการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีโลกซ์ของราก สำหรับระบบที่พิจารณาแรงดันกริดมีค่าเท่ากับ $120V_{rms}$ และแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่ากำลังไฟฟ้าอินพุต $4200W$ ซึ่งในอนาคตหากต้องการพิจารณากรณีที่แรงดันกริดมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง และกำลังไฟฟ้าอินพุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเปลี่ยนแปลง จะสามารถนำองค์ความรู้ของการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีโลกซ์ของรากที่นำเสนอไปใช้สำหรับออกแบบระบบได้ โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์เลือกใช้ตัวควบคุมพีไอ เนื่องจากให้ผลตอบสนองของรวดเร็วหรือระบบช่วงเวลาเข้าที่ได้เร็วขึ้น และผลตอบสนองสุดท้ายของกระบวนการเข้าใกล้เป้าหมายมากขึ้นหรือมีค่าความผิดพลาดลดลง อีกทั้งยังได้นำเสนอการจำลองสถานการณ์ของระบบที่พิจารณาบนคอมพิวเตอร์ของระบบที่

พิจารณาด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังใน Simulink บนโปรแกรม MATLAB โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมที่ได้จากการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีโลกัสของรากอีกด้วย แต่เนื่องจากข้อจำกัดของการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีโลกัสของราก ไม่ว่าจะเป็นค่าพารามิเตอร์ที่จำเพาะกับระบบ ค่าพารามิเตอร์ของความต้านทาน ตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ และค่าขอบเขตของพิกัดสำหรับระบบที่พิจารณา อีกทั้งข้อจำกัดในสมรรถนะการตอบสนองของระบบ โดยในบทถัดไปจะกล่าวถึงการควบคุมฟuzzy เป็นวิธีการควบคุมที่ชาญฉลาดและให้ประสิทธิภาพสูง โดยการออกแบบตัวควบคุมฟuzzy ไม่จำเป็นต้องพึ่งพาแบบจำลอง และค่าพารามิเตอร์ของระบบ แต่จะอาศัยข้อมูล ความรู้ และความเข้าใจในระบบที่พิจารณา เนื้อหาในบทนี้ได้รับการตีพิมพ์ในบทความ P. Wongyai, K-N. Areerak and K-L Areerak. (2019). **PI Controller Design Using root-locus For Quasi-Z-Source Inverter**. 16th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON). Chonburi, Thailand, 10-13 July 2019, pp. 549-552.



บทที่ 6

การควบคุมแบบฟัซซีสำหรับ วงจรรินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์

6.1 บทนำ

จากเนื้อหาในบทที่ 5 ได้กล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมของระบบที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ รวมไปถึงการตรวจสอบความถูกต้องของการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีโลกัสของราก แต่การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีโลกัสรากสำหรับระบบที่พิจารณา มีข้อจำกัดในการออกแบบไม่ว่าจะเป็น ค่าพารามิเตอร์จำเพาะของระบบ ค่าพารามิเตอร์ของความต้านทาน ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ รวมไปถึงขอบเขตพิกัดสำหรับระบบที่พิจารณา โดยในบทนี้จะนำเสนอการควบคุมแบบฟัซซี ที่ได้ถูกนำเสนอในปี ค.ศ. 1965 โดย Lotfi A. Zadeh ซึ่งเป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะในงานด้านระบบควบคุม เนื่องจากการควบคุมแบบฟัซซีเป็นวิธีการควบคุมที่ชาญฉลาด ไม่จำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองของระบบ แต่จะอาศัยข้อมูล ความรู้ และประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญในระบบที่พิจารณา เป็นพื้นฐานในการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี ดังนั้นตัวควบคุมฟัซซีจึงเหมาะนำมาประยุกต์ใช้กับวงจรรินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ โดยเนื้อหาในบทนี้ จะนำเสนอทฤษฎีต่าง ๆ ของฟัซซี ได้แก่ ฟัซซีเซต การดำเนินการทางฟัซซีเซต ฟังก์ชันสมาชิก ตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษากฎของฟัซซี และการอนุมานฟัซซี นำเสนอในหัวข้อที่ 6.2 ถึง 6.6 ตามลำดับ นอกจากนี้ ในแต่ละหัวข้อจะได้อธิบายการออกแบบโครงสร้างส่วนต่าง ๆ ของตัวควบคุมฟัซซีสำหรับสำหรับวงจรรินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์โหมดอิสระและโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไปพร้อมกัน และในหัวข้อสุดท้ายนำเสนอการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ของระบบที่พิจารณาด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังใน Simulink บนโปรแกรม MATLAB โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมฟัซซีที่ได้จากการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีที่นำเสนอ

6.2 ทฤษฎีของฟัซซี

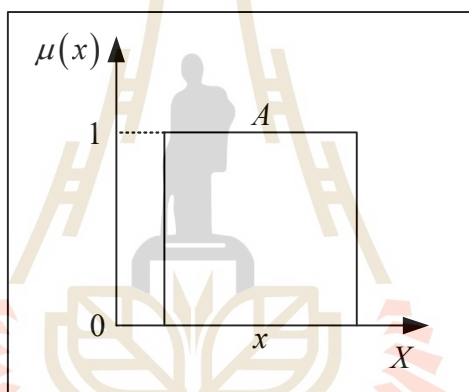
6.2.1 ฟัซซีเซต

ฟัซซีเซต (Fuzzy Set) เป็นเซตที่มีขอบเขตที่ราบเรียบ ทฤษฎีฟัซซีเซตจะครอบคลุมทฤษฎีเซตแบบฉบับ โดยฟัซซีเซตยอมให้มีค่าความเป็นสมาชิกของเซตระหว่าง 0 และ 1

เซตชัดเจน (crisp set) คือ เซตที่มีการกำหนดขอบเขตอย่างชัดเจน ซึ่งจะให้ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 0 และ 1 เท่านั้น (ตรรกะบูลีน) โดย 0 หมายถึง การไม่เป็นสมาชิกของเซต และ 1 หมายถึง การเป็นสมาชิกของเซต รูปร่างฟังก์ชันสมาชิกของเซตชัดเจนสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.1 จากรูปดังกล่าว ค่าความเป็นสมาชิกของเซต A ที่ตำแหน่งตัวแปรสมาชิก x ใด ๆ ($\mu_A(x)$) ในเอกภพสัมพัทธ์ x จะเป็นไปตามสมการที่ (6.1)

$$\mu_A(x) : X \rightarrow \{0,1\} \quad (6-1)$$

โดยที่ $\mu_A(x) = 1$ เมื่อ x อยู่ในเซต A อย่างสมบูรณ์
 $\mu_A(x) = 0$ เมื่อ x ไม่อยู่ในเซต A

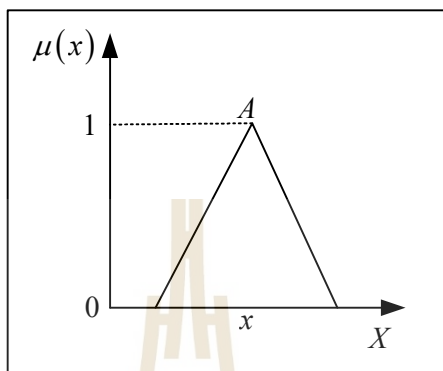


รูปที่ 6.1 ฟังก์ชันลักษณะเฉพาะของเซตชัดเจน

ฟัซซีเซตคือ เซตที่มีความคลุมเครือไม่มีการกำหนดขอบเขตที่ชัดเจน ค่าความเป็นสมาชิกสามารถมีมากกว่า 2 ค่า (ตรรกะหลายระดับ) ขึ้นอยู่กับรูปร่างฟังก์ชันสมาชิก ซึ่งรูปร่างฟังก์ชันสมาชิกที่นิยมใช้มีหลายรูปแบบ เช่น ฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยม ฟังก์ชันรูปสี่เหลี่ยม และฟังก์ชันรูปเกาส์เซียน เป็นต้น สำหรับในหัวข้อนี้จะยกตัวอย่างการอธิบายฟัซซีเซตกรณีฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยม ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 6.2 จากรูปดังกล่าว ค่าความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต A ที่ตำแหน่งตัวแปรสมาชิก x ใด ๆ สามารถมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงได้ระหว่าง 0 ถึง 1 ดังสมการที่ (6.2)

$$\mu_A(x) : X \rightarrow [0,1] \quad (6-2)$$

โดยที่ $\mu_A(x) = 1$ เมื่อ x อยู่ในเซต A อย่างสมบูรณ์
 $\mu_A(x) = 0$ เมื่อ x ไม่อยู่ในเซต A
 $0 < \mu_A(x) < 1$ เมื่อ x อยู่ในเซต A เพียงบางส่วน



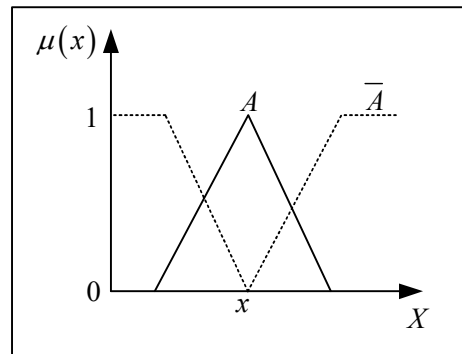
รูปที่ 6.2 ฟังก์ชันสมาชิกของฟuzzyเซต รูปสามเหลี่ยม

6.2.2 การดำเนินการทางฟuzzyเซต

การดำเนินการทางฟuzzyเซต (fuzzy set operations) จะมีความหมายเหมือนกับเซตชัดเจนแต่จะให้ค่าเชิงตัวเลขที่แตกต่างกัน โดยเซตชัดเจนจะให้ผลว่า ตัวแปรสมาชิกอยู่หรือไม่อยู่ในเซต $\{0,1\}$ แต่สำหรับฟuzzyเซตจะให้ผลว่า ตัวแปรสมาชิกอยู่ในเซตด้วยระดับค่าความเป็นสมาชิกระหว่าง 0 ถึง 1 $[0,1]$ พิจารณาตัวดำเนินการทางเซต 3 รูปแบบ คือ ส่วนเติมเต็ม (complement) ยูเนียน (union) และอินเตอร์เซกชัน (intersection) ดังนี้

ส่วนเติมเต็ม ของฟuzzyเซต $A(\bar{A})$ คือ เซตที่ประกอบด้วยตัวแปรสมาชิก x ที่อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์ X แต่ไม่อยู่ในฟuzzyเซต A (ส่วนที่แสดงเป็นเส้นประ) ดังรูปที่ 6.3 โดยค่าความเป็นสมาชิกของ $\bar{A}(\mu_{\bar{A}}(x))$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6.3) ซึ่งเท่ากับผลต่างระหว่างค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 กับค่าระดับความเป็นสมาชิกของฟuzzyเซต $A(\mu_A(x))$

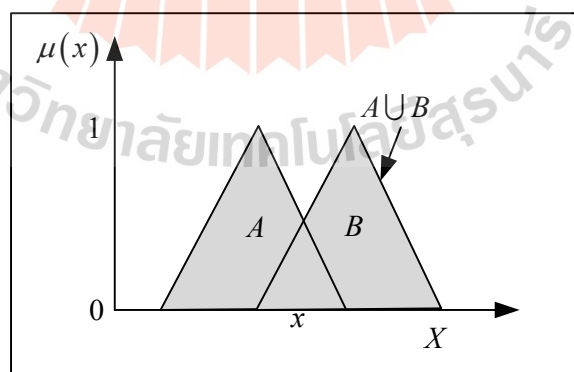
$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (6-3)$$

รูปที่ 6.3 ส่วนเติมเต็มของฟัซซีเซต A

การยูเนียน ของฟัซซีเซต A กับฟัซซีเซต B ($A \cup B$) แสดงได้ดังรูปที่ 6.4 จากรูปดังกล่าวผลการยูเนียนของฟัซซีเซต A และ B ที่ประกอบด้วยตัวแปรสมาชิก x ใด ๆ คือ ฟัซซีเซตทั้งหมด(ส่วนที่แรเงา) โดยค่าความเป็นสมาชิกของการยูเนียนระหว่างฟัซซีเซต A และ B ($\mu_{A \cup B}(x)$) คือค่ามากที่สุด (maximum: max) ที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างค่าความเป็นสมาชิกของทั้งสองฟัซซีเซต ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6.4)

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (6-4)$$

โดยที่ \vee หมายถึง OR ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบหาค่ามากที่สุดระหว่างฟัซซีเซต

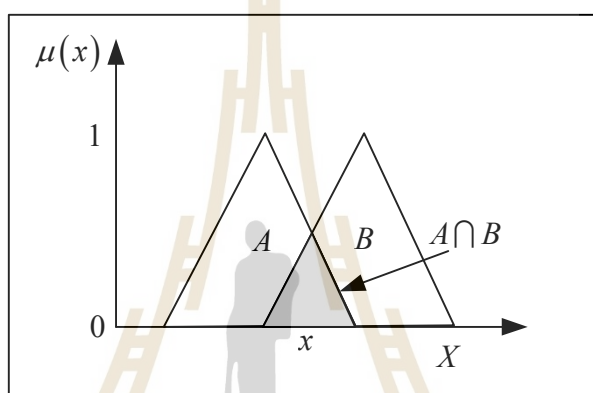
รูปที่ 6.4 การยูเนียนของฟัซซีเซต A และ B

การอินเตอร์เซกชัน ของฟัซซีเซต A กับฟัซซีเซต B ($A \cap B$) แสดงได้ดังรูปที่ 6.5 โดยผลการอินเตอร์เซกชันระหว่างฟัซซีเซต A และ B คือ ฟัซซีเซตที่ประกอบด้วยตัวแปรสมาชิก x

ที่เหมือนกันของฟัซซีเซต A และ B (ส่วนที่แรเงา) ซึ่งค่าความเป็นสมาชิกของการอินเตอร์เซกชันระหว่างฟัซซีเซต A และ B ($\mu_{A \cap B}(x)$) คือ ค่าน้อยที่สุด (minimum: min) ที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างค่าความเป็นสมาชิกของทั้งสองฟัซซีเซต ดังสมการที่ (6.5)

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (6-5)$$

โดยที่ \wedge หมายถึง AND ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบหาค่าน้อยที่สุดระหว่างฟัซซีเซต



รูปที่ 6.5 การอินเตอร์เซกชันของฟัซซีเซต A และ B

นอกจากการดำเนินการต่าง ๆ ของฟัซซีเซตจะให้ความหมายเหมือนกับเซตชัดเจน แล้วฟัซซีเซตยังมีคุณสมบัติต่าง ๆ ที่เหมือนกับเซตชัดเจนด้วยเช่นกัน ดังนี้

คุณสมบัติการสลับที่

$$A \cup B = B \cup A$$

$$A \cap B = B \cap A$$

คุณสมบัติการจัดกลุ่ม

$$A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap C$$

$$A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup C$$

คุณสมบัติการกระจาย

$$A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$$

$$A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$$

คุณสมบัติความเหมือน

$$A \cup A = A$$

$$A \cap A = A$$

คุณสมบัติเอกลักษณ์

$$A \cup \phi = A \quad \text{เมื่อ } \phi \text{ คือ ฟังก์ชันเซตว่าง}$$

$$A \cap U = A \quad \text{เมื่อ } U \text{ คือ เอกภพสัมพัทธ์}$$

$$A \cap \phi = \phi$$

$$A \cup U = U$$

คุณสมบัติการผกผัน

$$\overline{\overline{A}} = A$$

คุณสมบัติการส่งผ่าน

ถ้า $(A \subset B) \cap (B \subset C)$ แล้วจะได้ว่า $A \subset C$

กฎของเดมอร์แกน (De Morgan)

$$\overline{(A \cup B)} = \overline{A} \cap \overline{B}$$

$$\overline{(A \cap B)} = \overline{A} \cup \overline{B}$$

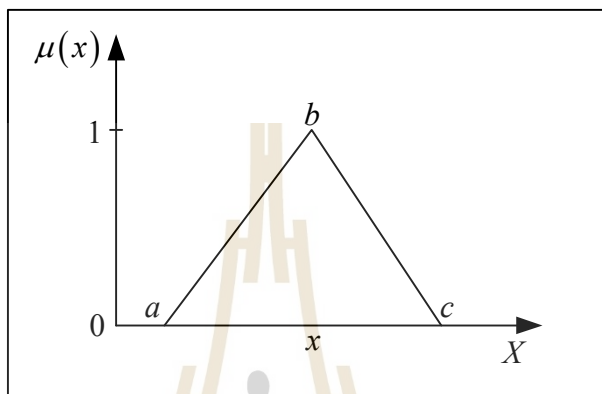
6.3 ฟังก์ชันสมาชิก

6.3.1 รูปร่างของฟังก์ชันสมาชิก

ฟังก์ชันสมาชิก (membership function) คือ ฟังก์ชันสำหรับใช้กำหนดค่าความเป็นสมาชิกของตัวแปรสมาชิก x ใด ๆ ซึ่งจะประกอบด้วยฟังก์ชันเซตอย่างน้อย 1 เซต ฟังก์ชันสมาชิกสามารถมีรูปร่างที่แตกต่างกันออกไปทั้งนี้เพื่อความเหมาะสมกับระบบปัญหาที่พิจารณาควบคุม และจะถูกกำหนดเลือกใช้โดยผู้เชี่ยวชาญ รูปร่างฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟังก์ชันที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายมีอยู่ 4 รูปแบบ คือ ฟังก์ชันสมาชิกรูปสามเหลี่ยม (triangular membership function: trimf) ฟังก์ชันสมาชิกรูปสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoidal membership function: trapmf) ฟังก์ชันสมาชิกรูปเกาส์เซียน (Gaussian membership function: gaussmf) และฟังก์ชันสมาชิกรูประฆังคว่ำ (generalized bell membership function: gbellmf) ซึ่งแต่ละฟังก์ชันมีรายละเอียดดังนี้

ฟังก์ชันสมาชิกรูปสามเหลี่ยม ประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ตำแหน่ง 3 ค่า คือ ค่าตำแหน่ง a b และ c ดังรูปที่ 6.6 โดยการคำนวณหาความเป็นสมาชิกของตำแหน่งตัวแปรสมาชิก x ใด ๆ ($\mu(x)$) ถูกแบ่งออกเป็น 5 กรณีซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6.6) ดังนี้

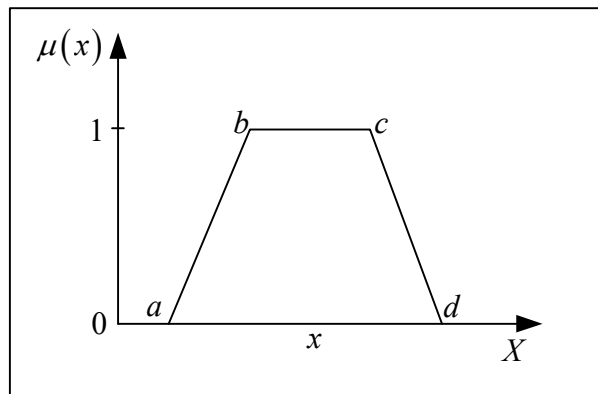
$$\mu(x) = \text{trimf}(x, [a \ b \ c]) = \begin{cases} 0 & ; x \leq a \\ (x-a)/(b-a) & ; a < x < b \\ 1 & ; x = b \\ (c-x)/(c-b) & ; b < x < c \\ 0 & ; x \geq c \end{cases} \quad (6-6)$$



รูปที่ 6.6 ฟังก์ชันสมาชิกรูปสามเหลี่ยม

ฟังก์ชันสมาชิกรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ตำแหน่ง 4 ค่า คือ ค่าตำแหน่ง a b c และ d ดังรูปที่ 6.7 ซึ่งค่าความเป็นสมาชิกของตำแหน่งตัวแปรสมาชิก x ใด ๆ ได้ถูกแบ่งออกเป็น 5 กรณี ดังสมการที่ (6.7)

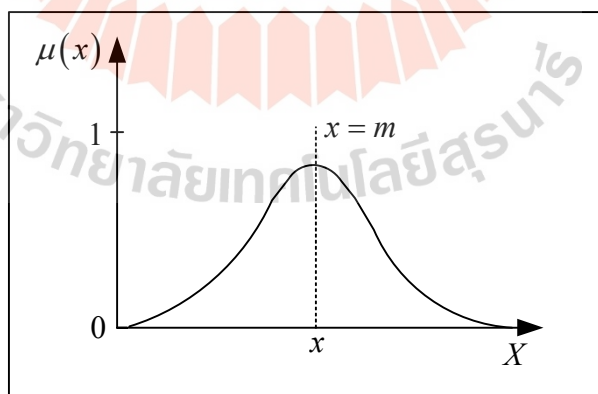
$$\mu(x) = \text{trapezmf}(x, [a \ b \ c \ d]) = \begin{cases} 0 & ; x \leq a \\ (x-a)/(b-a) & ; a < x < b \\ 1 & ; b \leq x \leq c \\ (d-x)/(d-c) & ; c < x < d \\ 0 & ; x \geq d \end{cases} \quad (6-7)$$



รูปที่ 6.7 ฟังก์ชันสมาชิกรูปสี่เหลี่ยมคางหมู

ฟังก์ชันสมาชิกรูปเกาส์เซียน ดังรูปที่ 6.8 จะใช้ค่าพารามิเตอร์ 2 ค่า ในการกำหนด ขนาดรูปร่างฟังก์ชันสมาชิก คือ ค่า σ และ m โดย σ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งจะใช้สำหรับการกำหนดความกว้างของรูปเกาส์เซียน ส่วน m คือ ค่าเฉลี่ยที่ใช้สำหรับกำหนดค่าตำแหน่งกึ่งกลางของรูปเกาส์เซียน การคำนวณหาความเป็นสมาชิกของตำแหน่งตัวแปรสมาชิก x ใด ๆ ในฟังก์ชันดังกล่าว สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6.8) ดังนี้

$$\mu(x) = \text{gussmf}(x, [\sigma \ m]) = \exp\left(-\frac{(x - m)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6-8)$$

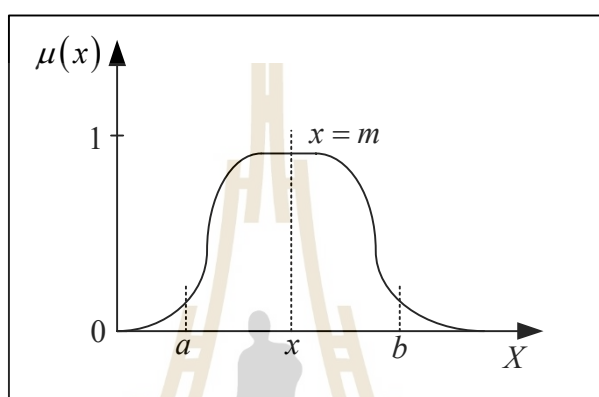


รูปที่ 6.8 ฟังก์ชันสมาชิกรูปเกาส์เซียน

ฟังก์ชันสมาชิกรูปประฆังคว่ำ ดังรูปที่ 6.9 ใช้ค่าพารามิเตอร์ 3 ค่า คือ a b และ m โดยพารามิเตอร์ a และ b จะใช้สำหรับกำหนดความกว้างของรูปประฆังคว่ำ ในขณะที่ m ใช้

กำหนดค่าตำแหน่งกึ่งกลางของรูปประฆังคว่ำเช่นเดียวกับกรณีรูปเกาส์เซียน การคำนวณหาค่าความเป็นสมาชิกของตำแหน่งตัวแปรสมาชิก x ใด ๆ คำนวณได้จากสมการที่ (6.9) ดังนี้

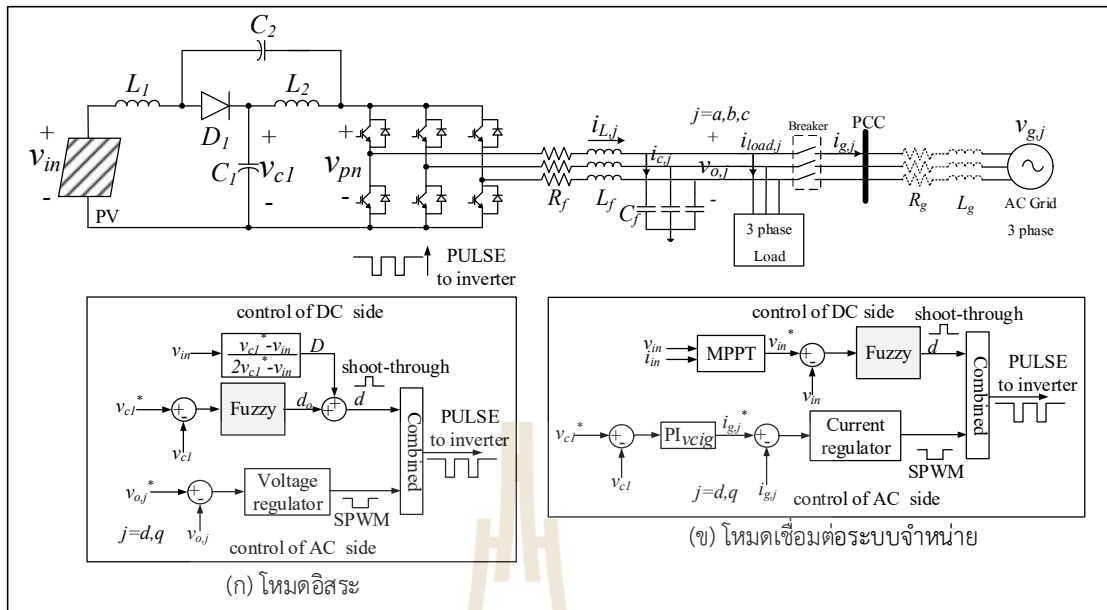
$$\mu(x) = \text{gbellmf}(x, [a \ b \ m]) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-m}{a} \right|^{2b}} \quad (6-9)$$



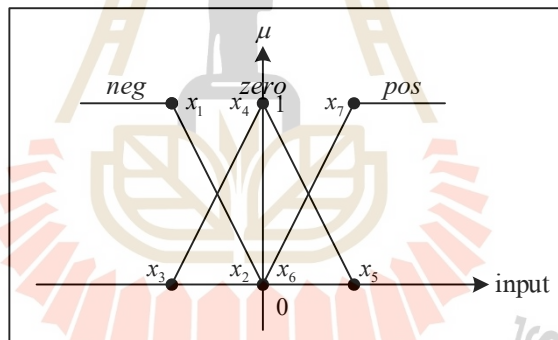
รูปที่ 6.9 ฟังก์ชันสมาชิกรูปประฆังคว่ำ

6.3.2 การออกแบบตัวควบคุมฟuzzyสำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์

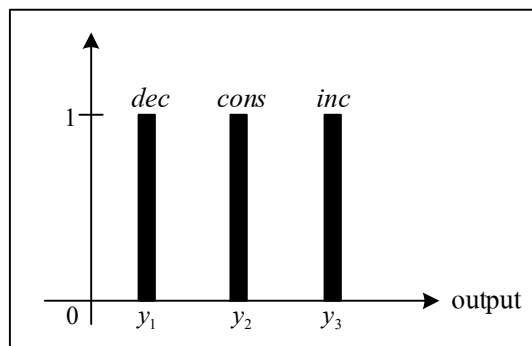
การออกแบบตัวควบคุมฟuzzyสำหรับใช้ควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ในโหมดอิสระในระบบที่พิจารณา แสดงได้ดังรูปที่ 6.10 โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ผู้วิจัยจะพิจารณาการออกแบบโครงสร้างของตัวควบคุมฟuzzy โดยเลือกใช้ตัวควบคุมฟuzzyที่มีฟังก์ชันสมาชิกภาพอินพุตรูปสามเหลี่ยม แสดงได้ดังรูปที่ 6.11 เนื่องจากเป็นรูปร่างฟังก์ชันสมาชิกภาพที่มีค่าพารามิเตอร์ตำแหน่ง 3 ค่า ส่วนฟังก์ชันสมาชิกภาพเอาต์พุตจะเลือกใช้รูปแท่งตรงโทนตามหลักการอนุมานฟuzzyแบบ Takagi-Sugeno เนื่องจากการอนุมานฟuzzyแบบ Takagi-Sugeno ใช้ฟังก์ชันเส้นตรงโทนที่มีลักษณะเป็นค่าคงที่ แทนการใช้ฟังก์ชันสมาชิกภาพแบบฟuzzyเซต ทำให้การคำนวณหาค่าความเป็นสมาชิกของตำแหน่งตัวแปรสมาชิกฟuzzyไม่ซับซ้อน ซึ่งสามารถแสดงฟังก์ชันสมาชิกภาพเอาต์พุตรูปแท่งตรงโทนได้ดังรูปที่ 6.12



รูปที่ 6.10 แผนผังวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ที่ใช้ตัวควบคุมฟัซซี



รูปที่ 6.11 ฟังก์ชันสมาชิกภาพอินพุตรูปสามเหลี่ยม



รูปที่ 6.12 ฟังก์ชันสมาชิกภาพเอาต์พุตรูปแท่งตรงโทน

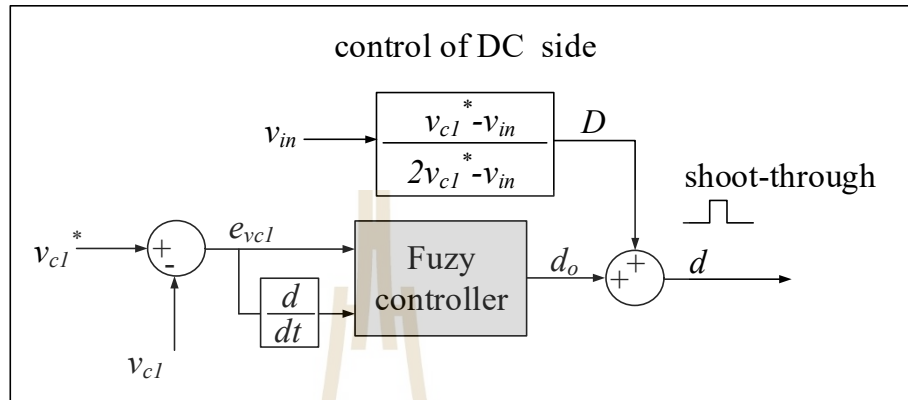
6.4 ตัวแปรทางภาษาและค่าเชิงภาษา

การควบคุมแบบฟuzzyถูกออกแบบเพื่อให้มีความฉลาดใกล้เคียงกับมนุษย์ สามารถคิด อ่าน เข้าใจ ตัดสินใจ รวมถึงสามารถสรุปต่อเหตุการณ์ที่ซับซ้อนได้ อย่างไรก็ตามมนุษย์ไม่ได้มีกลไกการคิดแบบเชิงตัวเลขเช่นเดียวกับคอมพิวเตอร์ แต่จะใช้ภาษาช่วยในการอธิบายให้ความหมายแทน ซึ่งจะทำได้ง่ายกว่าการอธิบายในเชิงตัวเลข การควบคุมแบบฟuzzyใช้ฟังก์ชันสมาชิกที่ประกอบด้วยฟuzzyเซตสำหรับระบุค่าความเป็นสมาชิกของตัวแปรสมาชิกในระบบที่พิจารณา โดยตัวแปรสมาชิกดังกล่าวสำหรับการควบคุมแบบฟuzzyจะถูกกำหนดให้อยู่ในรูปของภาษาแทนการใช้ตัวเลข ซึ่งเรียกว่าตัวแปรภาษา (linguistic variables) ตัวอย่างเช่น ความคลาดเคลื่อน (error) อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความคลาดเคลื่อน (error rate) เป็นต้น นอกจากนี้ ตัวแปรภาษาจะถูกกำหนดให้มีระดับค่าต่าง ๆ ในรูปแบบภาษาที่แตกต่างกัน เช่น “มาก” “ปานกลาง” หรือ “น้อย” เป็นต้น ซึ่งระดับค่าของตัวแปรภาษาเหล่านี้จะเรียกว่า ค่าเชิงภาษา (linguistic value) การออกแบบตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษาของตัวควบคุมฟuzzyสำหรับระบบควบคุมกระแสชดเชยจะอธิบายในหัวข้อต่อไป

6.4.1 การออกแบบตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษาของตัวควบคุมฟuzzyสำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ โหมดอิสระ

ระบบควบคุมด้านกระแสตรงวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ โหมดอิสระที่ใช้ตัวควบคุมฟuzzyแสดงได้ดังรูปที่ 6.13 จากรูปดังกล่าว อินพุตการควบคุม คือ ค่าความผิดพลาดของแรงดันของตัวเก็บประจุ ($e_{v_{c1}}$) ซึ่งคำนวณได้จากผลต่างระหว่างค่าแรงดันของตัวเก็บประจุอ้างอิง (v_{c1}^*) กับค่าแรงดันของตัวเก็บประจุจากตัวตรวจวัดแรงดัน (v_{c1}) ดังสมการที่ (6.10) นอกจากนี้อินพุตการควบคุมอีกค่าหนึ่ง คือ ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดของแรงดันของตัวเก็บประจุ ($\frac{de_{v_{c1}}}{dt}$) สำหรับเอาต์พุตของตัวควบคุมฟuzzyจะกำหนดให้เป็นค่าวัฏจักรหน้าที่ shoot-through (d_o) ซึ่งค่าวัฏจักรหน้าที่ดังกล่าวจะถูกนำไปดำเนินการทางคณิตศาสตร์กับค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจร (D) จากนั้นถูกนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพารามิเตอร์สามเหลี่ยม จะได้สัญญาณ shoot-through ผ่านเทคนิคการสวิตช์แบบ SPWM เพื่อให้ได้พัลส์สำหรับใช้ควบคุมไอจีบีทีของวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ สำหรับตัวควบคุมฟuzzyของวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์โหมดอิสระ จะใช้ตัวควบคุมฟuzzyเฉพาะด้านกระแสตรงเท่านั้น เนื่องจากการออกแบบตัวควบคุมจำเป็นต้องใช้ค่าพารามิเตอร์จำเพาะของระบบ ค่าวัฏจักรหน้าที่ ณ แรงดันที่ทำการพิจารณา และการพิจารณาขอบเขตจำกัดของพิกัดพารามิเตอร์ที่ใช้ออกแบบด้วย แต่สำหรับการออกแบบตัวควบคุมด้านกระแสสลับ สามารถใช้การพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ เพื่อออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมฟuzzyที่เหมาะสมกับระบบ ดังนั้นตัวควบคุมฟuzzyในโหมดอิสระ

จึงพิจารณาเฉพาะด้านกระแสดังในรูปที่ 6.13 สำหรับการออกแบบตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษาของตัวควบคุมฟuzzyซึ่งวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์โหมดอิสระ 3 ค่าเชิงภาษาสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 6.1



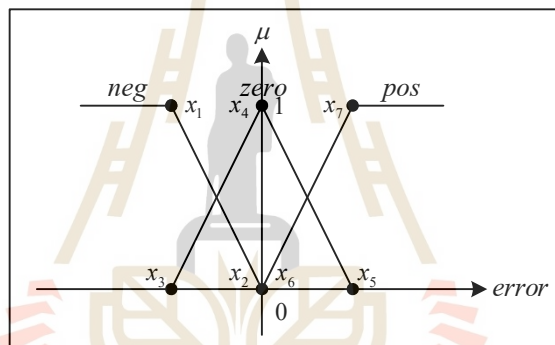
รูปที่ 6.13 ระบบควบคุมด้านกระแสดังของวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์โหมดอิสระที่ใช้ตัวควบคุมฟuzzy

$$e_{v_{cl}} = v_{cl}^* - v_{cl} \tag{6-10}$$

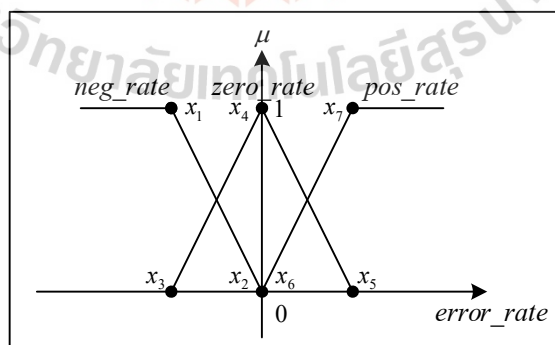
ตารางที่ 6.1 ตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษาของตัวควบคุมฟuzzyสำหรับระบบควบคุมด้านกระแสดังของวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์โหมดอิสระ

ค่าของระบบ	ตัวแปรภาษาและความหมาย		ค่าเชิงภาษาและความหมาย	
	ตัวแปรภาษา	ความหมาย	ค่าเชิงภาษา	ความหมาย
อินพุต	error ($e_{v_{cl}}$)	ค่าความผิดพลาด	<i>neg</i> (negative)	$v_{cl}^* < v_{cl}$ (น้อยกว่า)
			<i>zero</i>	$v_{cl}^* = v_{cl}$ (เท่ากับ)
			<i>pos</i> (positive)	$v_{cl}^* > v_{cl}$ (มากกว่า)
อินพุต	error rate ($\frac{de_{v_{cl}}}{dt}$)	อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด	<i>neg_rate</i>	ลบ
			<i>zero_rate</i>	คงที่
			<i>pos_rate</i>	บวก
เอาต์พุต	shoot-through duty (d_o)	ค่าวัฏจักรหน้าที่	<i>dec</i> (decrease)	ลดลง
			<i>cons</i> (constant)	คงที่
			<i>inc</i> (increase)	เพิ่มขึ้น

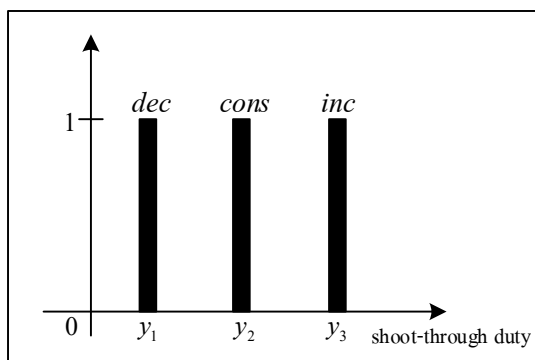
จากตารางที่ 6.1 อินพุต error อินพุต error rate และเอาต์พุต shoot-through duty ถูกกำหนดให้เป็นตัวแปรทางภาษาของตัวควบคุมฟัซซี ในขณะที่ค่าเชิงภาษาของอินพุต error มีจำนวน 3 ค่า คือ “neg” “zero” และ “pos” ซึ่งแสดงเป็นฟังก์ชันสมาชิกได้ดังรูปที่ 6.14 error rate กำหนดให้มีจำนวนค่าเชิงภาษา 3 ค่า เช่นกัน คือ “neg_rate” “zero_rate” และ “pos_rate” สามารถแสดงเป็นฟังก์ชันสมาชิกดังรูปที่ 6.15 ส่วนเอาต์พุต shoot-through duty ประกอบด้วยค่าเชิงภาษา 3 ค่า คือ “dec” “cons” และ “inc” แสดงเป็นฟังก์ชันสมาชิกได้ดังรูปที่ 6.16 โดยความหมายของค่าเชิงภาษาทั้งหมดสามารถดูได้จากตารางที่ 6.1 การกำหนดใช้ค่าเชิงภาษาจำนวน 3 ค่า ถือเป็นพื้นฐานการออกแบบโครงสร้างตัวควบคุมฟัซซีสำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ โหมดอิสระ



รูปที่ 6.14 ฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error กรณี 3 ค่าเชิงภาษา



รูปที่ 6.15 ฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error rate กรณี 3 ค่าเชิงภาษา

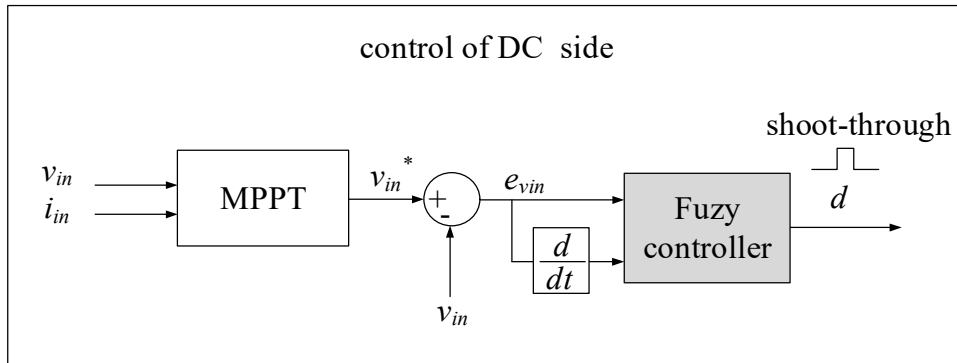


รูปที่ 6.16 ฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต shoot-through duty กรณี 3 ค่าเชิงภาษา

6.4.2 การออกแบบตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษาของตัวควบคุมฟuzzyสำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ โหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

ระบบควบคุมด้านกระแสตรงวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ โหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายที่ใช้ตัวควบคุมฟuzzyแสดงได้ดังรูปที่ 6.17 จากรูปดังกล่าว อินพุตการควบคุม คือ ค่าความผิดพลาดของแรงดันอินพุต ($e_{v_{in}}$) ซึ่งคำนวณได้จากผลต่างระหว่างค่าแรงดันอินพุตอ้างอิง (v_{in}^*) ที่ได้มาจากอัลกอริทึมการตามรอยจุดกำลังงานสูงสุด กับค่าแรงดันอินพุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากตัวตรวจวัดแรงดัน (v_{in}) ดังสมการที่ (6.11) นอกจากนี้อินพุตการควบคุมอีกค่าหนึ่ง คือ ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดของแรงดันอินพุต ($\frac{de_{v_{in}}}{dt}$) สำหรับเอาต์พุตของตัวควบคุมฟuzzyจะกำหนดให้เป็นค่าวัฏจักรหน้าที่ shoot-through (d) ซึ่งค่าวัฏจักรหน้าที่ดังกล่าวจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพารามิเตอร์สามเหลี่ยม จะได้สัญญาณ shoot-through ผ่านเทคนิคการสวิตช์แบบ SPWM เพื่อให้ได้พัลส์สำหรับใช้ควบคุมไอจีบีทีของวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ ตัวควบคุมฟuzzyของวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์โหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย จะใช้ตัวควบคุมฟuzzyเฉพาะด้านกระแสตรงเท่านั้น นอกจากนี้การออกแบบตัวควบคุมด้านกระแสสลับยังคงใช้การออกแบบตัวควบคุมฟuzzyด้วยวิธีโลกัสรากที่นำเสนอไว้ในบทที่ 5

ตัวควบคุมฟuzzyในโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายด้านกระแสตรง แสดงได้ในรูปที่ 6.17 และการออกแบบตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษาของตัวควบคุมฟuzzyวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์โหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย กรณี 3 ค่าเชิงภาษาสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 6.2



รูปที่ 6.17 ระบบควบคุมด้านกระแสตรงของวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ โหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายที่ใช้ตัวควบคุมฟัซซี

$$e_{v_{in}} = v_{in}^* - v_{in} \tag{6-11}$$

ตารางที่ 6.2 ตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษาของตัวควบคุมฟัซซีสำหรับระบบควบคุมด้านกระแสตรงของวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์โหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

ค่าของระบบ	ตัวแปรภาษาและความหมาย		ค่าเชิงภาษาและความหมาย	
	ตัวแปรภาษา	ความหมาย	ค่าเชิงภาษา	ความหมาย
อินพุต	error ($e_{v_{in}}$)	ค่าความผิดพลาด	neg (negative)	$v_{in}^* < v_{in}$ (น้อยกว่า)
			zero	$v_{in}^* = v_{in}$ (เท่ากับ)
			pos (positive)	$v_{in}^* > v_{in}$ (มากกว่า)
	error rate ($\frac{de_{v_{in}}}{dt}$)	อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด	neg_rate	ลบ
			zero_rate	คงที่
			pos_rate	บวก
เอาต์พุต	shoot-through duty d	ค่าวัฏจักรหน้าที่	dec (decrease)	ลดลง
			cons (constant)	คงที่
			inc (increase)	เพิ่มขึ้น

จากตารางที่ 6.1 อินพุต error อินพุต error rate และเอาต์พุต shoot-through duty ถูกกำหนดให้เป็นตัวแปรทางภาษาของตัวควบคุมฟัซซีเหมือนกับในโหมดอิสระ โดยที่ค่าเชิงภาษาของอินพุต error มีจำนวน 3 ค่า คือ “neg” “zero” และ “pos” อินพุต error rate กำหนดให้มีจำนวนค่าเชิงภาษา 3 ค่า เช่นกัน คือ “neg_rate” “zero_rate” และ “pos_rate” สามารถแสดงเป็นฟังก์ชัน

สมาชิกดังรูปที่ 6.14 และ 6.15 ตามลำดับเหมือนกับเหมือนกับในโหมตติสระ ส่วนเอาต์พุต shoot-through duty ประกอบด้วยค่าเชิงภาษา 3 ค่า คือ “*dec*” “*cons*” และ “*inc*” แสดงเป็นฟังก์ชันสมาชิกได้ดังรูปที่ 6.16 เหมือนกับในโหมตติสระ โดยความหมายของค่าเชิงภาษาทั้งหมดสามารถดูได้จากตารางที่ 6.2 การกำหนดใช้ค่าเชิงภาษาจำนวน 3 ค่า ถือเป็นพื้นฐานการออกแบบโครงสร้างตัวควบคุมฟัซซีสำหรับวงจรถูกอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ โหมตติสระเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

6.5 กฎของฟัซซี

กฎของฟัซซี คือ เงื่อนไขและข้อปฏิบัติในการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซี ซึ่งเป็นสิ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อสมรรถนะการควบคุม กฎฟัซซีจะถูกออกแบบและกำหนดขึ้นโดยผู้เชี่ยวชาญในระบบที่พิจารณา โดยรูปแบบของกฎฟัซซีจะประกอบด้วยเงื่อนไขและข้อปฏิบัติ (IF THEN) ดังนี้

IF x is A
 THEN y is B
 โดยที่ x และ y คือ ตัวแปรภาษา
 A และ B คือ ค่าเชิงภาษา

เงื่อนไขในส่วนของ IF และข้อปฏิบัติของ THEN สามารถมีได้หลายเงื่อนไขและข้อปฏิบัติ ดังรูปแบบต่อไปนี้

IF x is A AND y is B OR z is C
 THEN p is D q is E

จากรูปแบบของกฎฟัซซีข้างต้น ทุกเงื่อนไขในส่วนของ IF จะถูกตรวจสอบไปพร้อมกันและจะรวมกันด้วยตัวดำเนินการทางฟัซซีเซต เช่น อินเตอร์เซกชัน (AND) และยูเนียน (OR) โดยถ้าเงื่อนไขทั้งหมดเป็นจริงแล้ว ส่วนของ THEN จะถูกประเมินนำไปเป็นข้อปฏิบัติสำหรับการควบคุมการออกแบบรูปแบบของกฎฟัซซี รวมไปถึงจำนวนกฎฟัซซีที่ใช้ควบคุมไม่ควรกำหนดให้มีมากเกินไป โดยควรเลือกใช้กฎเท่าที่จำเป็นเท่านั้น ทั้งนี้เพื่อลดความซับซ้อนของตัวควบคุมฟัซซีที่อาจส่งผลกระทบต่อความเร็วในการประมวลผลได้

6.5.1 การออกแบบกฎฟuzzyสำหรับระบบควบคุมวงจรรีโวลต์อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ โหมดอิสระ

จากการออกแบบตัวควบคุมฟuzzyที่ใช้ค่าเชิงภาษาของอินพุต error จำนวน 3 ค่า และอินพุต error rate จำนวน 3 ค่า ในหัวข้อที่ 6.4.2 ดังนั้น จำนวนกฎฟuzzyที่เป็นไปได้สำหรับระบบที่กล่าวถึงจึงมีเท่ากับ 9 กฎ ($3 \times 3 = 9$) โดยแต่ละกฎเกิดจากการการวิเคราะห์ค่าผลต่างแรงดันของตัวเก็บประจุ และค่าวัฏจักรหน้าที่

จากรูปแบบของกฎฟuzzyข้างต้น ทุกเงื่อนไขในส่วนของ IF จะถูกตรวจสอบไปพร้อมกันและจะรวมกันด้วยตัวดำเนินการทางฟuzzyเซต

กฎข้อที่ 1	IF error = <i>neg</i> AND error rate = <i>neg_rate</i> THEN $d_0 = dec$
กฎข้อที่ 2	IF error = <i>neg</i> AND error rate = <i>zero_rate</i> THEN $d_0 = dec$
กฎข้อที่ 3	IF error = <i>neg</i> AND error rate = <i>pos_rate</i> THEN $d_0 = dec$
กฎข้อที่ 4	IF error = <i>zero</i> AND error rate = <i>neg_rate</i> THEN $d_0 = inc$
กฎข้อที่ 5	IF error = <i>zero</i> AND error rate = <i>zero_rate</i> THEN $d_0 = cons$
กฎข้อที่ 6	IF error = <i>zero</i> AND error rate = <i>pos_rate</i> THEN $d_0 = dec$
กฎข้อที่ 7	IF error = <i>pos</i> AND error rate = <i>neg_rate</i> THEN $d_0 = inc$
กฎข้อที่ 8	IF error = <i>pos</i> AND error rate = <i>zero_rate</i> THEN $d_0 = inc$
กฎข้อที่ 9	IF error = <i>pos</i> AND error rate = <i>pos_rate</i> THEN $d_0 = inc$

จากกฎฟuzzyที่ได้ออกแบบสำหรับใช้ควบคุมด้านกระแสตรงวงจรรีโวลต์อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ โหมดอิสระทั้ง 9 กฎ ข้างต้น จะอธิบายความหมายได้ดังนี้

ความหมายของกฎข้อที่ 1 2 และ 3 ถ้าค่าอินพุต error มีค่าเท่ากับ *neg* และค่า error rate เท่ากับ *neg_rate* *zero_rate* หรือ *pos_rate* แล้ว กำหนดให้ค่าเอาต์พุต shoot-through duty เท่ากับ *dec* ซึ่งหมายความว่า ค่าแรงดันของตัวเก็บประจุอ้างอิงน้อยกว่าค่าแรงดันจากตัวตรวจวัด และค่า $\frac{de_{vc1}}{dt}$ มีค่าเป็นลบ ศูนย์ หรือบวก จะต้องลดค่าวัฏจักรหน้าที่ shoot-through duty เพื่อให้ค่าแรงดันของตัวเก็บประจุมีค่าลดลง

ความหมายของกฎข้อที่ 4 ถ้าค่าอินพุต error มีค่าเท่ากับ *zero* และค่า error rate เท่ากับ *neg_rate* แล้ว กำหนดให้ค่าเอาต์พุต shoot-through duty เท่ากับ *inc* ซึ่งหมายความว่า ค่าแรงดันของตัวเก็บประจุอ้างอิงเท่ากับค่าแรงดันจากตัวตรวจวัด และค่า $\frac{de_{vc1}}{dt}$ มีค่าเป็นลบ จะต้องเพิ่มค่าวัฏจักรหน้าที่ shoot-through duty เพื่อให้ค่าแรงดันของตัวเก็บประจุมีค่าเพิ่มขึ้น

ความหมายของกฎข้อที่ 5 ถ้าค่าอินพุต error มีค่าเท่ากับ zero และค่า error rate เท่ากับ zero_rate แล้ว กำหนดให้ค่าเอาต์พุต shoot-through duty เท่ากับ cons ซึ่งหมายความว่า ค่าแรงดันของตัวเก็บประจุอ้างอิงเท่ากับค่าแรงดันจากตัวตรวจวัด และค่า $\frac{de_{v_{cl}}}{dt}$ มีค่าเท่ากับศูนย์ จะกำหนดให้ค่าวัฏจักรหน้าที่มีค่าคงที่

ความหมายของกฎข้อที่ 6 ถ้าค่าอินพุต error มีค่าเท่ากับ zero และค่า error rate เท่ากับ zero_rate แล้วกำหนดให้ค่าเอาต์พุต shoot-through duty เท่ากับ dec ซึ่งหมายความว่า ค่าแรงดันของตัวเก็บประจุอ้างอิงเท่ากับค่าแรงดันจากตัวตรวจวัด และค่า $\frac{de_{v_{cl}}}{dt}$ มีค่าเป็นบวก จะต้องลดค่าวัฏจักรหน้าที่ shoot-through duty เพื่อให้ค่าแรงดันของตัวเก็บประจุมีค่าลดลง

ความหมายของกฎข้อที่ 7 8 และ 9 ถ้าค่าอินพุต error มีค่าเท่ากับ pos และค่า error rate เท่ากับ neg_rate zero_rate หรือ zero_rate แล้ว กำหนดให้ค่าเอาต์พุต shoot-through duty เท่ากับ inc ซึ่งหมายความว่า ค่าแรงดันของตัวเก็บประจุอ้างอิงมากกว่าค่าแรงดันจากตัวตรวจวัด และค่า $\frac{de_{v_{cl}}}{dt}$ มีค่าเป็นลบ ศูนย์ หรือบวก จะต้องเพิ่มค่าวัฏจักรหน้าที่ shoot-through duty เพื่อให้ค่าแรงดันของตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้น

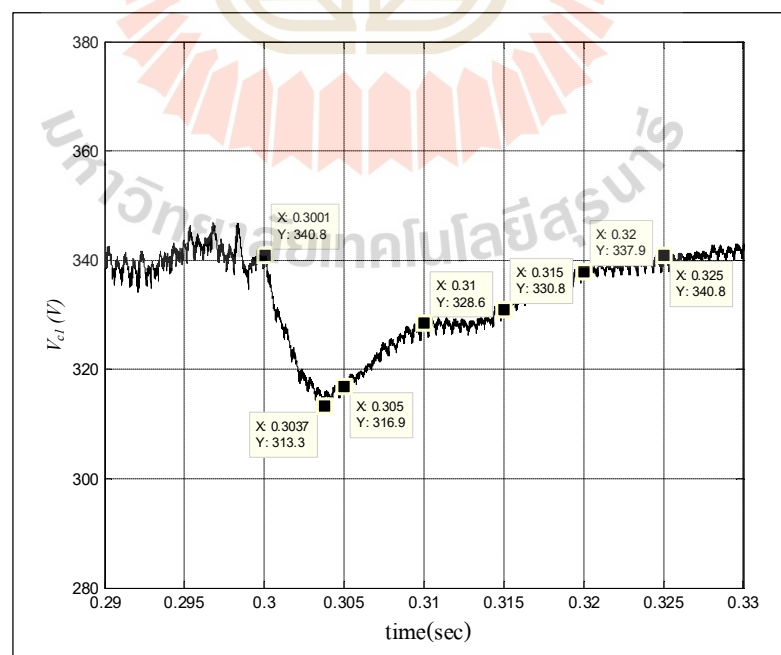
กฎฟuzzyที่ได้ออกแบบสำหรับระบบควบคุมวงจรมอเตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์โหมดอิสระ สามารถแสดงในรูปแบบตารางเมตริกซ์ดังรูปที่ 6.18 ซึ่งตารางเมตริกซ์แสดงกฎดังกล่าว เรียกว่า หน่วยความจำฟuzzyสัมพันธ์ (fuzzy associative memory: FAM) โดยจากรูปที่ 6.18 จะเห็นได้ว่า จำนวนกฎฟuzzyทั้ง 9 กฎ ถูกบรรจุลงในตารางเมตริกซ์ที่มีขนาดเท่ากับ 3x3

		error		
		neg	zero	pos
error rate	neg_rate	dec	inc	inc
	zero_rate	dec	cons	inc
	pos_rate	dec	dec	inc

รูปที่ 6.18 กฎฟuzzyสำหรับระบบควบคุมวงจรมอเตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์โหมดอิสระ ในรูปแบบ FAM

การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพของตัวควบคุมฟuzzyตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพอินพุตและเอาต์พุตเป็นอีกส่วนหนึ่งที่สำคัญต่อสมรรถนะการควบคุม ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกดังกล่าวจะต้องถูกออกแบบให้เหมาะสมกับระบบที่พิจารณา โดยการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพอินพุต x_1 ถึง x_7 และการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพเอาต์พุต k_1 ถึง k_3 ดังแสดงในรูปที่ 6.14 ถึง 6.16 เริ่มต้นจากการพิจารณาวัตถุประสงค์การนำตัวควบคุมฟuzzyมาใช้ควบคุมค่าแรงดันของตัวเก็บประจุ พิจารณาค่าวัฏจักรหน้าที่ shoot-through ที่ส่งผลต่อการควบคุมวงจรที่พิจารณา เพื่อใช้สำหรับการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพอินพุตแบบสมมาตรและตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพเอาต์พุต

การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพของอินพุต ได้รับการออกแบบให้มีลักษณะสมมาตรกัน โดยทำการกำหนดค่าความผิดพลาดของแรงดันของตัวเก็บประจุ ($e_{v_{c1}}$) สำหรับตัวควบคุมฟuzzy จากการระบบทดสอบที่พิจารณาด้วยตัวควบคุมแบบพีไอตามที่ได้นำเสนอในบทที่ 5 เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง 1000 W/m^2 เป็น 500 W/m^2 ที่เวลา 0.3 วินาที ผลของแรงดันของตัวเก็บประจุเมื่อความเข้มแสงมีค่าลดลงแสดงได้ดังรูปที่ 6.19 โดยข้อมูลในรูปดังกล่าวจะถูกนำมาใช้คำนวณและกำหนดหาค่า x_1 ถึง x_7 ของ error ($e_{v_{c1}}$) และ error rate ($\frac{de_{v_{c1}}}{dt}$) ในรูปที่ 6.14 และ 6.15 ที่เหมาะสมกับระบบพิจารณา สำหรับผลการออกแบบค่าตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพอินพุตของตัวควบคุมฟuzzyสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 6.3



รูปที่ 6.19 ข้อมูลแรงดันของตัวเก็บประจุ เมื่อความเข้มแสงมีค่าลดลง

สำหรับการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพของเอาต์พุต ซึ่งประกอบไปด้วย k_1 , k_2 และ k_3 ได้รับการออกแบบโดยพิจารณาข้อจำกัดของวงจรที่พิจารณา โดยจากระบบที่พิจารณาค่า shoot-through duty จะอยู่ในช่วง 0.6 ถึง 1 ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันของตัวเก็บประจุและค่าวัฏจักรหน้าที่ได้ดังสมการที่ (6-12)

$$d = \frac{v_{c1}^* - V_{in}}{2v_{c1}^* - V_{in}} \quad (6-12)$$

จากสมการที่ (6-12) หากพิจารณาค่าวัฏจักรหน้าที่ ที่ความเข้มแสง 1000 W/m^2 ซึ่งมีค่าแรงดันอินพุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ 270V ดังนั้นค่าวัฏจักรหน้าที่จะมีค่าเท่ากับ 0.17 และพิจารณาค่าวัฏจักรหน้าที่ ที่ความเข้มแสง 600 W/m^2 ซึ่งค่าแรงดันอินพุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ 250V ค่าวัฏจักรหน้าที่จะมีค่าเท่ากับ 0.209 นอกจากนี้พิจารณาข้อมูลค่าแรงดันของตัวเก็บประจุ ในรูปที่ 6.19 นำมาออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพด้วยวิธีการลองผิดลองถูก และปรับจูนค่าตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพ และกำหนดค่าตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพของเอาต์พุตพิจารณาจากข้อมูลของผลการจำลองสถานการณ์ด้วยตัวควบคุมพีไอในบทที่ 5 จะได้ค่าตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพที่เหมาะสมกับระบบที่พิจารณาแสดงดังตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพของตัวควบคุมพีไอสำหรับระบบควบคุมวงจรมอเตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ โหมดอิสระ

ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพของอินพุต $e_{v_{c1}}$						
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
-5	0	-5	5	5	0	5
ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพของอินพุต $\frac{de_{v_{c1}}}{dt}$						
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
-2	0	-2	2	2	0	2
ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพของเอาต์พุต d_o						
y_1		y_2		y_3		
-0.2		0		0.2		

6.5.2 การออกแบบกฎฟuzzyสำหรับระบบควบคุมวงจรรีจิสเตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ โหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

จากการออกแบบตัวควบคุมฟuzzyที่ใช้ค่าเชิงภาษาของอินพุต *error* จำนวน 3 ค่าและอินพุต *error rate* จำนวน 3 ค่า ในหัวข้อที่ 6.4.2 ดังนั้น จำนวนกฎฟuzzyที่เป็นไปได้สำหรับระบบที่กล่าวถึงจึงมีเท่ากับ 9 กฎ ($3 \times 3 = 9$) โดยแต่ละกฎเกิดจากการวิเคราะห์ค่าผลต่างแรงดันของตัวเก็บประจุ และค่าวัฏจักรหน้าที่

จากรูปแบบของกฎฟuzzyข้างต้น ทุกเงื่อนไขในส่วนของ IF จะถูกตรวจสอบไปพร้อมกันและจะรวมกันด้วยตัวดำเนินการทางฟuzzyเซต

กฎข้อที่ 1	IF <i>error</i> = <i>neg</i> AND <i>error rate</i> = <i>neg_rate</i> THEN <i>d</i> = <i>inc</i>
กฎข้อที่ 2	IF <i>error</i> = <i>neg</i> AND <i>error rate</i> = <i>zero_rate</i> THEN <i>d</i> = <i>inc</i>
กฎข้อที่ 3	IF <i>error</i> = <i>neg</i> AND <i>error rate</i> = <i>pos_rate</i> THEN <i>d</i> = <i>inc</i>
กฎข้อที่ 4	IF <i>error</i> = <i>zero</i> AND <i>error rate</i> = <i>neg_rate</i> THEN <i>d</i> = <i>dec</i>
กฎข้อที่ 5	IF <i>error</i> = <i>zero</i> AND <i>error rate</i> = <i>zero_rate</i> THEN <i>d</i> = <i>cons</i>
กฎข้อที่ 6	IF <i>error</i> = <i>zero</i> AND <i>error rate</i> = <i>pos_rate</i> THEN <i>d</i> = <i>inc</i>
กฎข้อที่ 7	IF <i>error</i> = <i>pos</i> AND <i>error rate</i> = <i>neg_rate</i> THEN <i>d</i> = <i>dec</i>
กฎข้อที่ 8	IF <i>error</i> = <i>pos</i> AND <i>error rate</i> = <i>zero_rate</i> THEN <i>d</i> = <i>dec</i>
กฎข้อที่ 9	IF <i>error</i> = <i>pos</i> AND <i>error rate</i> = <i>pos_rate</i> THEN <i>d</i> = <i>dec</i>

จากกฎฟuzzyที่ได้ออกแบบสำหรับใช้ควบคุมด้านกระแสตรงวงจรรีจิสเตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ โหมดอิสระทั้ง 9 กฎ ข้างต้น จะอธิบายความหมายได้ดังนี้

ความหมายของกฎข้อที่ 1 2 และ 3 ถ้าค่าอินพุต *error* มีค่าเท่ากับ *neg* และค่า *error rate* เท่ากับ *neg_rate* *zero_rate* หรือ *pos_rate* แล้ว กำหนดให้ค่าเอาต์พุต shoot-through duty เท่ากับ *inc* ซึ่งหมายความว่า ค่าแรงดันอินพุตอ้างอิงจากอัลกอริทึมตามรอยจุดกำลังงานสูงสุดมีค่าน้อยกว่าแรงดันอินพุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และค่า $\frac{de_{v_m}}{dt}$ มีค่าเป็นลบ ศูนย์ หรือบวก จะต้องเพิ่มค่าวัฏจักรหน้าที่ shoot-through duty เพื่อทำให้ค่าแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลง

ความหมายของกฎข้อที่ 4 ถ้าค่าอินพุต *error* มีค่าเท่ากับ *zero* และค่า *error rate* เท่ากับ *neg_rate* แล้ว กำหนดให้ค่าเอาต์พุต shoot-through duty เท่ากับ *dec* ซึ่งหมายความว่า ค่าแรงดันอินพุตอ้างอิงจากอัลกอริทึมตามรอยจุดกำลังงานสูงสุดมีค่าเท่ากับแรงดันอินพุตของแผงเซลล์

แสงอาทิตย์ และค่า $\frac{de_{v_{in}}}{dt}$ มีค่าเป็นลบ จะต้องลดค่าวัฏจักรหน้าที่ shoot-through duty เพื่อให้ค่าแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้น

ความหมายของกฎข้อที่ 5 ถ้าค่าอินพุต error มีค่าเท่ากับ zero และค่า error rate เท่ากับ zero_rate แล้ว กำหนดให้ค่าเอาต์พุต shoot-through duty เท่ากับ cons ซึ่งหมายความว่า ค่าแรงดันอินพุตอ้างอิงจากอัลกอริทึมตามรอยจุดกำลังงานสูงสุดมีค่าเท่ากับแรงดันอินพุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และค่า $\frac{de_{v_{in}}}{dt}$ มีค่าเท่ากับศูนย์ จะกำหนดให้ค่าวัฏจักรหน้าที่มีค่าคงที่

ความหมายของกฎข้อที่ 6 ถ้าค่าอินพุต error มีค่าเท่ากับ zero และค่า error rate เท่ากับ zero_rate แล้วกำหนดให้ค่าเอาต์พุต shoot-through duty เท่ากับ inc ซึ่งหมายความว่า ค่าแรงดันอินพุตอ้างอิงจากอัลกอริทึมตามรอยจุดกำลังงานสูงสุดมีค่าเท่ากับแรงดันอินพุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และค่า $\frac{de_{v_{in}}}{dt}$ มีค่าเป็นบวก จะต้องลดค่าวัฏจักรหน้าที่ shoot-through duty เพื่อให้ค่าแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลง

ความหมายของกฎข้อที่ 7 8 และ 9 ถ้าค่าอินพุต error มีค่าเท่ากับ pos และค่า error rate เท่ากับ neg_rate zero_rate หรือ zero_rate แล้ว กำหนดให้ค่าเอาต์พุต shoot-through duty เท่ากับ dec ซึ่งหมายความว่า ค่าแรงดันอินพุตอ้างอิงจากอัลกอริทึมตามรอยจุดกำลังงานสูงสุดมีค่ามากกว่าแรงดันอินพุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และค่า $\frac{de_{v_{in}}}{dt}$ มีค่าเป็นลบ ศูนย์ หรือบวก จะต้องเพิ่มค่าวัฏจักรหน้าที่ shoot-through duty เพื่อให้ค่าแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้น

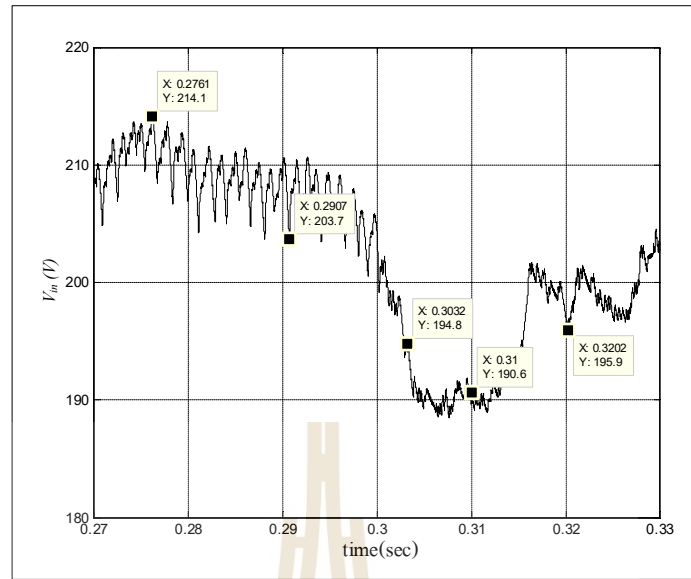
กฎฟิซซีที่ได้ออกแบบสำหรับระบบควบคุมวงจรรีอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซโดโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายทั้งหมด สามารถแสดงในรูปแบบตารางเมตริกซ์ดังรูปที่ 6.20 ซึ่งตารางเมตริกซ์แสดงกฎดังกล่าว หรือ หน่วยความจำฟิซซีสัมพันธ์ จากรูปจะเห็นได้ว่า จำนวนกฎฟิซซีทั้ง 9 กฎ ถูกบรรจุลงในตารางเมตริกซ์ที่มีขนาดเท่ากับ 3x3

		<i>error</i>		
		<i>neg</i>	<i>zero</i>	<i>pos</i>
<i>error rate</i>	<i>neg_rate</i>	<i>inc</i>	<i>dec</i>	<i>dec</i>
	<i>zero_rate</i>	<i>inc</i>	<i>cons</i>	<i>dec</i>
	<i>pos_rate</i>	<i>inc</i>	<i>inc</i>	<i>dec</i>

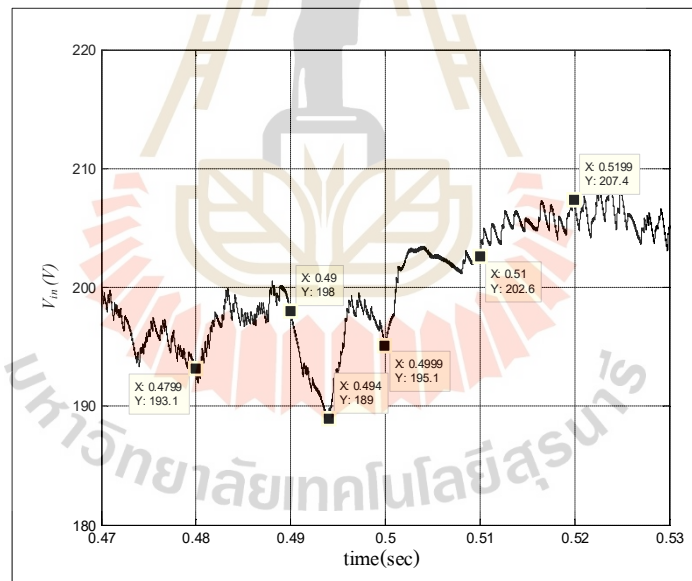
รูปที่ 6.20 กฎฟuzzyสำหรับระบบควบคุมวงจรรินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ โหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย ในรูปแบบ FAM

การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพอินพุต และการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพเอาต์พุตสำหรับระบบควบคุมวงจรรินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์โหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย จะพิจารณาวัตถุประสงค์การนำตัวควบคุมฟuzzyมาใช้ควบคุมแรงดันอินพุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ พิจารณาค่าวัฏจักรหน้าที่ shoot-through ที่ส่งผลต่อการควบคุมวงจรถือพิจารณาเพื่อใช้สำหรับการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพอินพุตแบบสมมาตรและตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพเอาต์พุต

การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพของอินพุต ได้รับการออกแบบให้มีลักษณะสมมาตรกัน โดยทำการกำหนดค่าความผิดพลาดแรงดันอินพุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (e_{v_m}) สำหรับตัวควบคุมฟuzzyจากการระบบทดสอบที่พิจารณาด้วยตัวควบคุมแบบพีไอระบบควบคุมวงจรรินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์โหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย ตามที่ได้นำเสนอในบทที่ 5 เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง 1000 W/m^2 เป็น 500 W/m^2 ที่เวลา 0.3 วินาที และเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง 500 W/m^2 เป็น 800 W/m^2 ที่เวลา 0.5 วินาที ผลของค่าแรงดันอินพุตเมื่อความเข้มแสงมีค่าลดลง และเมื่อความเข้มแสงมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงได้ดังรูปที่ 6.21 และรูปที่ 6.22ตามลำดับ โดยข้อมูลในรูปดังกล่าวจะถูกนำมาใช้คำนวณและกำหนดหาค่า x_1 ถึง x_7 ของ $\text{error}(e_{v_m})$ และ $\text{error rate}(\frac{de_{v_m}}{dt})$ ในรูปที่ 6.14 และ 6.15 ที่เหมาะสมกับระบบพิจารณา สามารถแสดงผลการออกแบบค่าตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพอินพุตของตัวควบคุมฟuzzyสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 6.4



รูปที่ 6.21 ข้อมูลแรงดันอินพุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อความเข้มแสงมีค่าลดลง



รูปที่ 6.22 ข้อมูลแรงดันอินพุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อความเข้มแสงมีค่าเพิ่มขึ้น

สำหรับการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพของเอาต์พุต ซึ่งประกอบไปด้วย k_1 , k_2 และ k_3 ได้รับการออกแบบโดยพิจารณาข้อจำกัดของวงจรที่พิจารณา โดยทำการพิจารณาขอบเขตของค่า shoot-through duty ในช่วง 0.6 ถึง 1 และพิจารณาค่าวัฏจักรหน้าที่ตั้งในสมการที่ (6-12) พบว่า ในโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย ที่ความเข้มแสง 1000 W/m^2 ค่าแรงดันอินพุตของแผง

เซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ 220V ดังนั้นค่าวัฏจักรหน้าที่จะมีค่าเท่ากับ 0.26 และพิจารณาค่าวัฏจักรหน้าที่ ที่ความเข้มแสง 600 W/m² ค่าแรงดันอินพุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ 205 V ค่าวัฏจักรหน้าที่จะมีค่าเท่ากับ 0.284 และความเข้มแสง 800 W/m² ค่าแรงดันอินพุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ 210V ค่าวัฏจักรหน้าที่จะมีค่าเท่ากับ 0.276 นอกจากนี้พิจารณาข้อมูลแรงดันอินพุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อความเข้มแสงมีค่าลดลงและเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 6.21 และ 6.22 ตามลำดับ จากข้อมูลดังกล่าวนำมาออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพด้วยวิธีการลองผิดลองถูก และปรับจูนค่าตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพ และกำหนดค่าตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพของเอาต์พุตพิจารณา จะได้ค่าตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพที่เหมาะสมกับระบบที่พิจารณาแสดงได้ดังตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.4 ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพของตัวควบคุมฟัซซีสำหรับระบบควบคุมวงจรถูกอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ โหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพของอินพุต $e_{v_{in}}$						
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
-50	0	-50	50	50	0	50
ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพของอินพุต $\frac{de_{v_{in}}}{dt}$						
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
-0.2	0	-0.2	0.2	0.2	0	0.2
ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพของเอาต์พุต d						
y_1		y_2		y_3		
0.18		0.2		0.22		

6.6 การอนุมานฟัซซีแบบ Takagi-Sugeno

การอนุมานฟัซซี (fuzzy inference) คือ กระบวนการส่งค่าอินพุตของระบบที่พิจารณาไปเป็นค่าเอาต์พุต โดยใช้ทฤษฎีทางฟัซซี วิธีการอนุมานฟัซซีที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์คือ การอนุมานฟัซซีแบบ Takagi-Sugeno เนื่องจากการอนุมานฟัซซีแบบ Takagi-Sugeno แตกต่างจาก Mamdani ในส่วนของรูปแบบของฟังก์ชันสมาชิกภาพเอาต์พุต โดย Takagi-Sugeno ได้ใช้ฟังก์ชันเส้นตรงโทที่มีลักษณะเป็นค่าคงที่ แทนการใช้ฟังก์ชันสมาชิกภาพแบบฟัซซีเซต ทำให้การคำนวณหาค่าความเป็นสมาชิกของตำแหน่งตัวแปรสมาชิกฟัซซีไม่ซับซ้อน ซึ่งการอนุมานฟัซซีแบบ Takagi-Sugeno ในส่วนกฎของฟัซซีสามารถเขียนได้ดังนี้

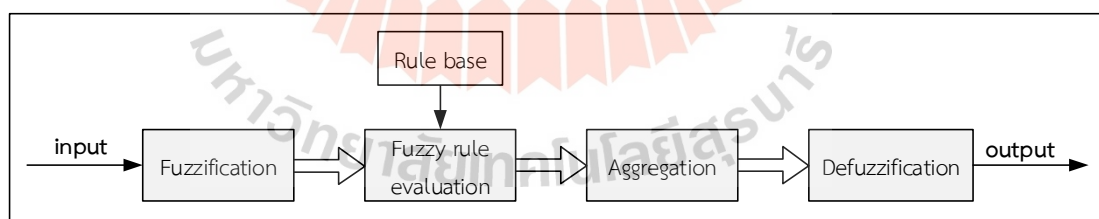
IF x is A AND y is B
 THEN z is $f(x,y)$

โดยที่ x และ z คือ ตัวแปรภาษา
 A และ B คือ ค่าเชิงภาษา
 $f(x,y)$ คือ ฟังก์ชันเส้นตรง

สำหรับฟังก์ชัน $f(x,y)$ ที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย คือ ฟังก์ชันแบบจำลองฟuzzyของTakagi-Sugeno อันดับศูนย์ (zero order Takagi-Sugeno fuzzy model) ซึ่งฟังก์ชันดังกล่าวจะเป็นเพียงค่าคงที่เส้นตรงโทน (y) เท่านั้น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ค่อนข้างสะดวกและง่ายในขั้นตอนการรวมกฎรูปแบบกฎของฟuzzyที่ใช้แบบจำลองฟuzzyของ Takagi-Sugeno อันดับศูนย์มีลักษณะดังนี้

IF x is A AND y is B
 THEN z is y

หลักการอนุมานฟuzzy จะประกอบด้วย 4 ส่วนที่สำคัญ คือ การทำฟuzzy การประเมินกฎของฟuzzy การรวมกฎ และการทำดีฟuzzy ดังแผนภาพรูปที่ 6.23 โดยในส่วนของ การประเมินกฎของฟuzzy ต้องอาศัยฐานกฎ (rule base) ที่ออกแบบไว้ในการวิเคราะห์ร่วมด้วย



รูปที่6.23 หลักการอนุมานฟuzzy

การทำฟuzzy (fuzzification) คือ การระบุค่าเชิงภาษา และการคำนวณหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุตของระบบที่ต้องการควบคุม โดยค่าระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุตจะสามารถคำนวณหาได้จากฟังก์ชันสมาชิกภาพที่ถูกเลือกใช้

การประเมินกฎของฟัซซี (fuzzy rule evaluation) คือ การตรวจสอบค่าเชิงภาษาของตัวแปรอินพุตทุกตัวภายในระบบควบคุมว่าอยู่ในกฎหรือเงื่อนไขในข้อใด และด้วยค่าความเป็นสมาชิกเท่าไร จากนั้นจะดำเนินการกำหนดค่าเอาต์พุตเชิงภาษาตามส่วนของข้อปฏิบัติในกฎนั้น ๆ

การรวมกฎ (aggregation) คือ การหาผลลัพธ์ฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุตจากกฎที่ได้รับการประเมินแล้ว (กฎที่เงื่อนไขเป็นจริง) โดยจะรวมฟัซซีเซตของค่าเชิงภาษาของเอาต์พุตทุกกฎที่เป็นจริงให้เป็นเซตเดียวกันเพียงหนึ่งเซต ทั้งนี้เนื่องจากค่าของตัวแปรอินพุตหนึ่งค่าสามารถอยู่ในเงื่อนไขของกฎได้หลายกฎพร้อมกัน

การทำดีฟัซซี (defuzzification) คือ ขั้นตอนการแปลงค่าผลลัพธ์ฟังก์ชันสมาชิกภาพเอาต์พุตจากผลการรวมกฎให้อยู่ในรูปของค่าเอาต์พุตชัดเจน โดยการอนุมานฟัซซีแบบ Takagi-Sugeno จะทำดีฟัซซีด้วยวิธีค่าน้ำหนักเฉลี่ย (Weighted Average : WA) ดังการคำนวณตามสมการที่ (6-12)

$$WA = \frac{\sum_{m=1}^m \mu(y_m) \times y_m}{\sum_{m=1}^m \mu(y_m)} \quad (6-12)$$

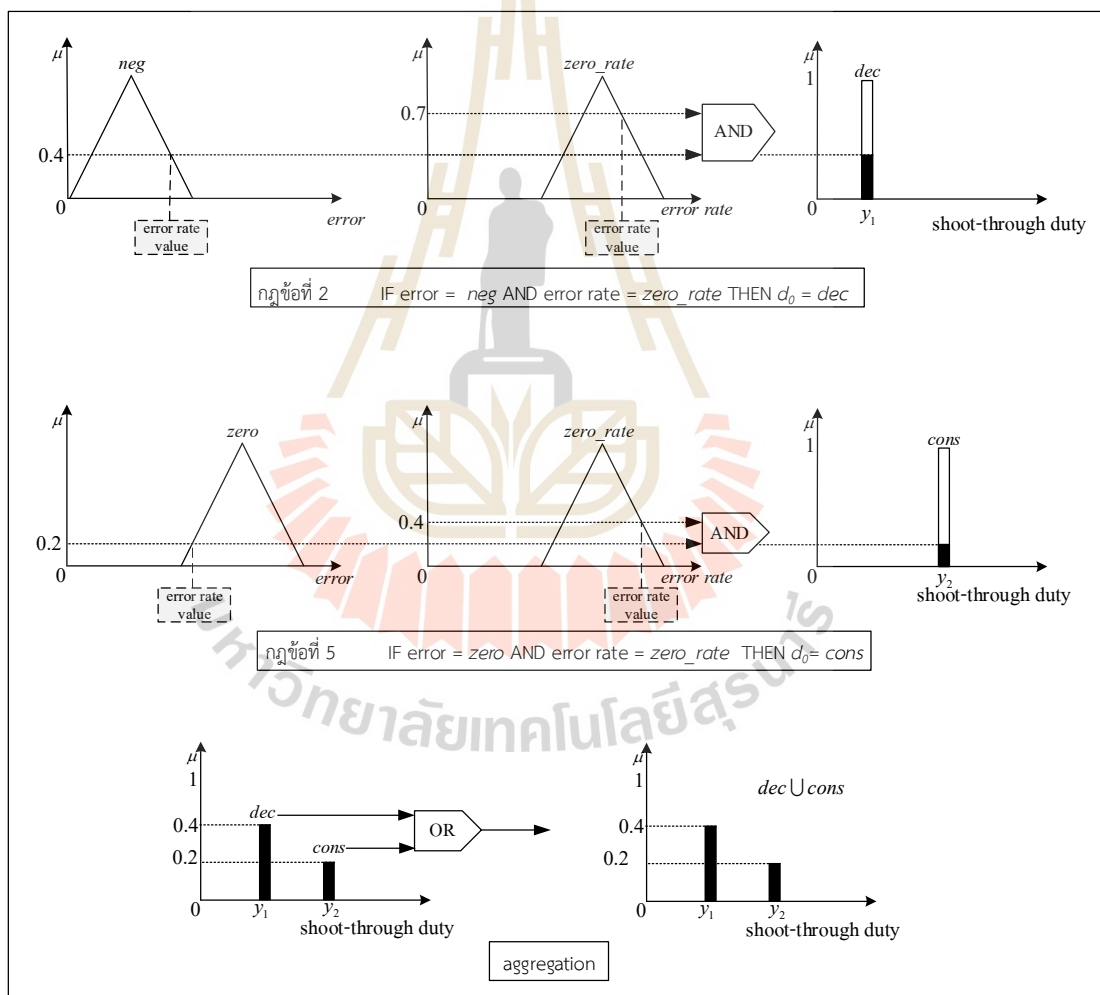
โดยที่ $\mu(y_m)$ คือ ค่าความเป็นสมาชิกของฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุต

y_m คือ ค่าคงที่ของเอาต์พุตที่เป็นเส้นตรง

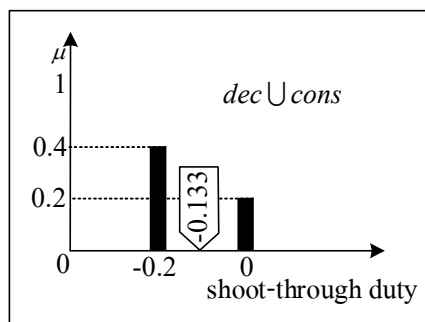
ตัวควบคุมฟัซซีเชิงจริงอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ โหมดอิสระนำมาใช้ควบคุมค่าแรงดันของตัวเก็บประจุ และโหมดเชื่อมต่อระบบจำหน่ายนำมาใช้ในการควบคุม ค่าแรงดันอินพุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งตัวควบคุมฟัซซีของระบบที่พิจารณามีอินพุต error และ error rate มีค่าเชิงภาษาจำนวน 5 ค่า สำหรับเอาต์พุต shoot-through duty มีค่าเชิงภาษาจำนวน 3 ค่า รูปร่างฟังก์ชันสมาชิกภาพอินพุต และเอาต์พุต แสดงได้ดังรูปที่ 6.14 ถึงรูปที่ 6.16 ตามลำดับ โดยใช้กฎของฟัซซีจำนวน 9 กฎ และวิธีการอนุมานฟัซซีจะใช้วิธีการอนุมานแบบ Takagi-Sugeno ที่มีการทำดีฟัซซีด้วยวิธีค่าน้ำหนักเฉลี่ย

สำหรับตัวอย่างการอนุมานฟัซซีด้วยวิธี Takagi-Sugeno ของตัวควบคุมฟัซซีเชิงจริงอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ โหมดอิสระแสดงได้ดังรูปที่ 6.24 จากรูปดังกล่าว ได้พิจารณาค่าความผิดพลาดของแรงดันของตัวเก็บประจุ v_{c1}^* น้อยกว่า v_{c1} ($v_{c1}^* < v_{c1}$) ซึ่งส่งผลให้ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพของอินพุต error จึงมีค่าความเป็นสมาชิกภาพของอินพุตอยู่ในเซต *neg* และเซต *zero* โดยมีค่าความเป็นสมาชิกภาพในแต่ละเซตขึ้นอยู่กับฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยมดังสมการที่ (6-6) จากกฎของฟัซซีตามที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อที่ 6.5.1 ทำให้ได้ค่าความเป็นสมาชิกของเอาต์พุต y_m อยู่ในแห่งตรง โทน *dec* และ *cons* ตามลำดับ ที่มีตำแหน่งตรงกับค่า y_2 และ y_3 โดยมีค่าความ

เป็นสมาชิกของเอาต์พุตขึ้นจะอยู่กับระดับค่าความเป็นสมาชิกของอินพุต $e_{v_{c1}}$ เมื่อได้ค่าความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตจะดำเนินการรวมกฎของฟัซซี ดังแสดงในรูปที่ 6.24 โดยมีขั้นตอนที่สำคัญ คือ การประมวลค่าความเป็นสมาชิกภาพของเอาต์พุตในแต่ละแห่งตรงโหนด ($dec, cons$) โดยใช้ตัวกระทำ OR เพื่อหาค่าความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตสูงสุดในแต่ละแห่งตรงโหนด และอีกขั้นตอนหนึ่งเป็นการรวมผลลัพธ์ค่าความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตรวมเข้าด้วยกันด้วยตัวกระทำฟัซซีแบบยูเนียน เมื่อผ่านการรวมกฎเรียบร้อยแล้ว จะเข้าสู่กระบวนการดีฟัซซี ซึ่งเป็นการแปลงค่าความเป็นสมาชิกเอาต์พุตให้อยู่ในรูปของ shoot-through duty สำหรับนำไปใช้งานในระบบควบคุม ด้วยวิธีค่าน้ำหนักเฉลี่ยดังสมการที่ (6-13) และแสดงค่าเอาต์พุตชัดเจนที่ได้จากการทำดีฟัซซีแบบ WA ได้ดังรูปที่ 6.25



รูปที่ 6.24 การอนุมานแบบ Takagi-Sugeno (โหนดอิสระ)



รูปที่ 6.25 ค่าเอาต์พุตชัดเจนที่ได้จากการทำดีฟัซซีแบบ WA (โหมตอิสระ)

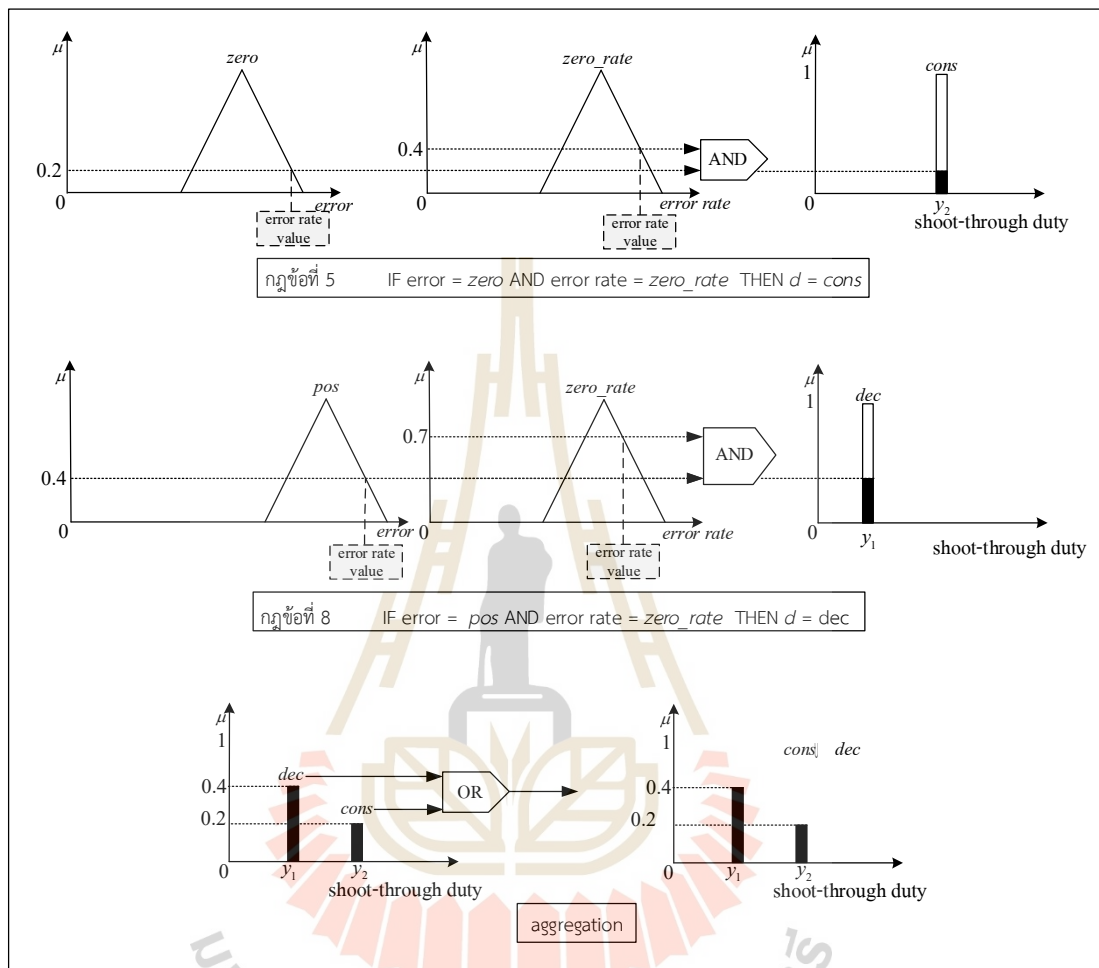
จากรูปที่ 6.25 สมมติกำหนดให้ค่าตำแหน่ง y_2 และ y_3 เท่ากับ -0.2 และ 0 ตามลำดับ ซึ่งการคำนวณเพื่อหาค่าเอาต์พุตชัดเจนแสดงได้ดังนี้

$$x_{WA} = \frac{(0.4 \times -0.2) + (0.2 \times 0)}{0.4 + 0.2} = -0.133 \quad (6-13)$$

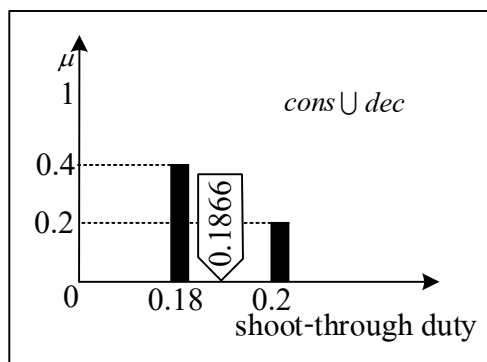
จากค่าเอาต์พุตชัดเจนเท่ากับ -0.133 หมายถึงระบบควบคุมค่าแรงดันของตัวเก็บประจุจะต้องปรับค่าวัฏจักรหน้าที่ให้มีเท่ากับ -0.133 เพื่อให้ค่าแรงดันของตัวเก็บประจุมีค่าลดลง

ส่วนการอนุมานฟัซซีด้วยวิธี Takagi-Sugeno ของตัวควบคุมฟัซซีวงจรรินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ โหมตเชื่อมต่อบริเวณที่กำหนดแสดงได้ดังรูปที่ 6.26 จากรูปดังกล่าวได้พิจารณาค่าความผิดพลาดของแรงดันอินพุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ v_{in}^* มากกว่า v_{in} ($v_{in}^* > v_{in}$) ซึ่งส่งผลให้ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพของอินพุต error จึงมีค่าความเป็นสมาชิกภาพของอินพุตอยู่ในเซต *zero* และเซต *pos* โดยมีค่าความเป็นสมาชิกภาพในแต่ละเซตขึ้นอยู่กับฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยมดังสมการที่ (6-6) ทำให้ได้ค่าความเป็นสมาชิกของเอาต์พุต y_m อยู่ในแท่งตรง โทน *cons* และ *dec* ตามลำดับ ที่มีตำแหน่งตรงกับค่า y_2 และ y_3 โดยมีค่าความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตขึ้นจะอยู่กับระดับค่าความเป็นสมาชิกของอินพุต $e_{v_{in}}$ เมื่อได้ค่าความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตจะดำเนินการรวมกฎของฟัซซี ดังแสดงในรูปที่ 6.26 โดยมีขั้นตอนที่สำคัญ คือ การประมวลค่าความเป็นสมาชิกภาพของเอาต์พุตในแต่ละแท่งตรงโตน (*cons*, *dec*) โดยใช้ตัวกระทำ OR เพื่อหาค่าความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตสูงสุดในแต่ละแท่งตรงโตน และอีกขั้นตอนหนึ่งเป็นการรวมผลลัพธ์ค่าความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตรวมเข้าด้วยกันด้วยตัวกระทำฟัซซีแบบยูเนียน เมื่อผ่านการรวมกฎเรียบร้อยแล้ว จะเข้าสู่กระบวนการดีฟัซซี ซึ่งเป็นการแปลงค่าความเป็นสมาชิกเอาต์พุตให้อยู่ในรูปของ shoot-through

duty สำหรับนำไปใช้งานในระบบควบคุม ด้วยวิธีค่าน้ำหนักเฉลี่ยดังสมการที่ (6-14) และแสดงค่าเอาต์พุตชัดเจนที่ได้จากการทำดีฟัซซีแบบ WA ได้ดังรูปที่ 6.27



รูปที่ 6.26 การอนุมานแบบ Takagi-Sugeno (โหนดเชื่อมต่อระบบจำหน่าย)



รูปที่ 6.27 ค่าเอาต์พุตชัดเจนที่ได้จากการทำดีฟัซซีแบบ WA (โหนดเชื่อมต่อบระบบจำหน่าย)

จากรูปที่ 6.27 สมมติกำหนดให้ค่าตำแหน่ง y_2 และ y_3 เท่ากับ 0.18 และ 0.2 ตามลำดับ ซึ่งการคำนวณเพื่อหาค่าเอาต์พุตชัดเจนแสดงได้ดังนี้

$$x_{WA} = \frac{(0.4 \times 0.18) + (0.2 \times 0.2)}{0.4 + 0.2} = 0.1866 \quad (6-13)$$

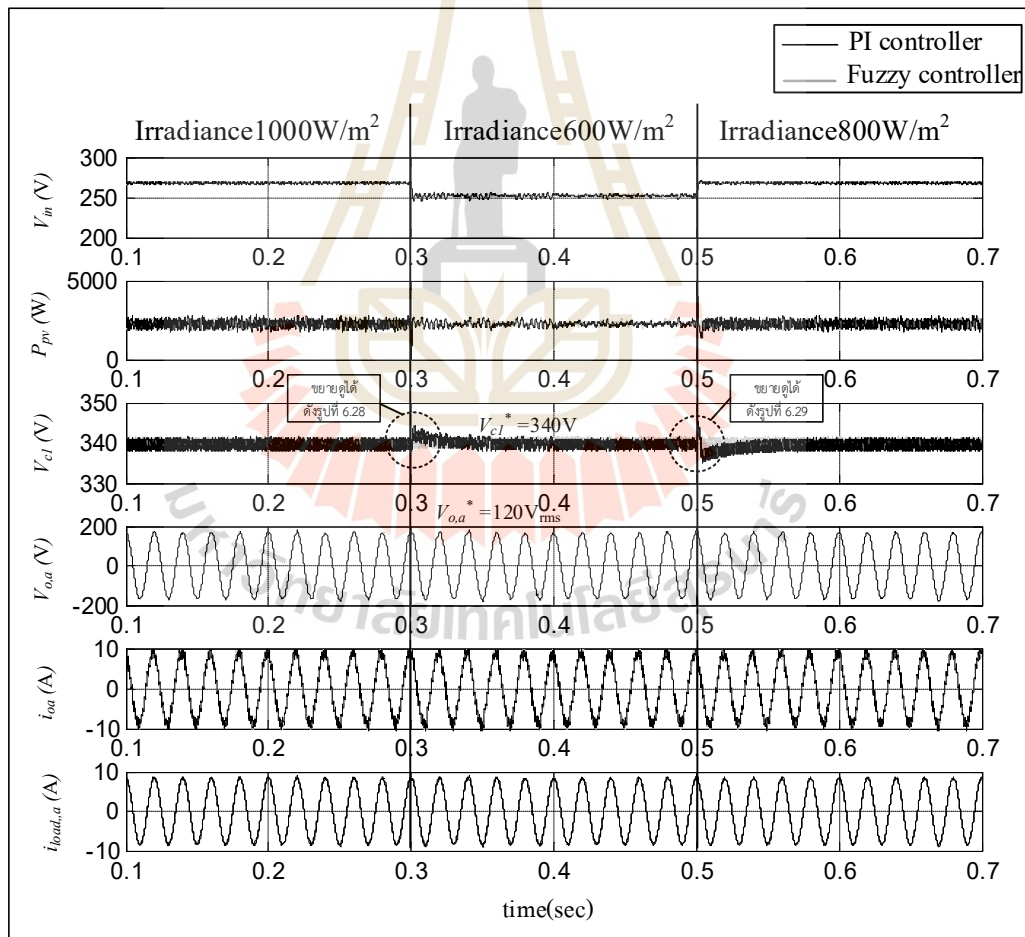
จากค่าเอาต์พุตชัดเจนเท่ากับ 0.1866 หมายถึงระบบควบคุมค่าแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จะต้องปรับค่าวัฏจักรหน้าที่ให้มีเท่ากับ 0.1866 เพื่อให้ค่าแรงดันอินพุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้น

6.7 การจำลองสถานการณ์ตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมฟัซซีที่ได้จากการออกแบบ

การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ของระบบที่พิจารณาจะใช้โครงสร้างระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอดไรต์ที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายดังรูปที่ 5.2 ในบทที่ 5 โดยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์จะใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังใน Simulink บนโปรแกรม MATLAB เพื่อตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมฟัซซีที่ได้จากการออกแบบ สำหรับตัวควบคุมฟัซซีในโปรแกรม MATLAB จะใช้บล็อก Fuzzy Logic Controller แสดงในภาคผนวก ข. โดยบล็อกตัวควบคุมฟัซซีดังกล่าวจะอาศัยค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมตามที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อก่อนหน้านี้ และค่าตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพของตัวควบคุมฟัซซีสำหรับระบบควบคุมวงจรรินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอดไรต์ ทั้งในโหมดอิสระและโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายจะใช้ค่าพารามิเตอร์ดังในตารางที่ 6.3 และ 6.4 ตามลำดับ และค่าพารามิเตอร์ของระบบที่พิจารณาแสดงได้ดังตารางที่ 5.1 และค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมฟัซซีแสดงดังตารางที่ 5.6 ในบทที่ 5

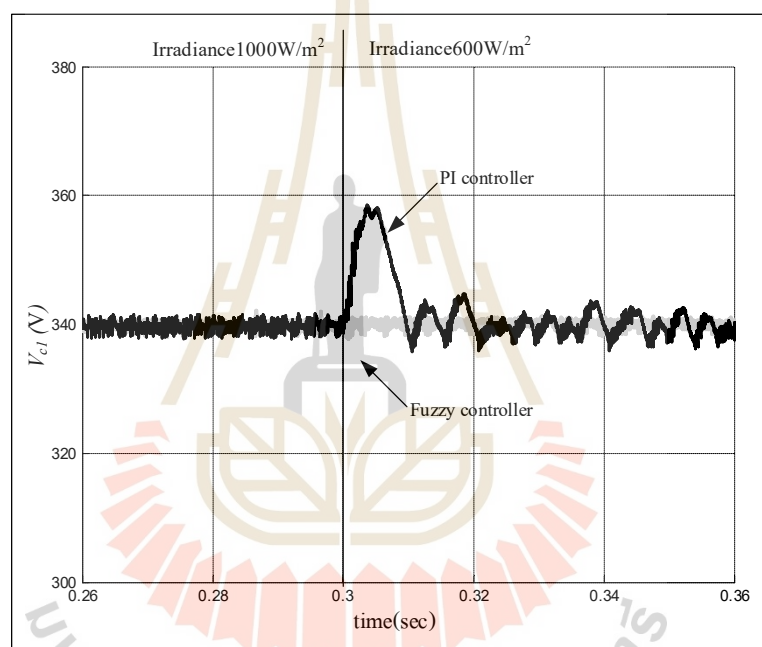
การจำลองสถานการณ์จะทำการเปรียบเทียบผลของการควบคุมวงจรถวายอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ด้วยตัวควบคุมพีไอ เปรียบเทียบกับการควบคุมวงจรถวายอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ด้วยตัวควบคุมพีซี โดยจะแบ่งการจำลองสถานการณ์ออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ทำงานในโหมดอิสระและมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง และกรณีที่อินเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายและมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง สามารถแสดงผลการจำลองสถานการณ์ของระบบที่พิจารณาได้ดังนี้

กรณีที่ 1 อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ทำงานในโหมดอิสระ โดยเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง 1000 600 และ 800W/m² ที่เวลา 0.3 และ 0.5 วินาทีตามลำดับ สามารถแสดงผลการจำลองสถานการณ์ได้ดังรูปที่ 6.28



รูปที่ 6.28 ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรถวายอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ในโหมดอิสระ ด้วยตัวควบคุมพีไอเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีซี

การจำลองสถานการณ์จะกำหนดให้ค่าแรงดันอ้างอิงของตัวเก็บประจุอ้างอิงมีค่า $v_{c1}^* = 340V$ และแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของอินเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับ $V_{o,a} = 120V_{rms}$ จากผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 6.28 จะเห็นได้ว่า ค่าแรงดันของตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ 340V ในทุก ๆ สถานะความเข้มแสงไม่ว่าความเข้มแสงจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ตาม อีกทั้งตัวควบคุมพีไอและตัวควบคุมฟัซซีสามารถรักษาค่าระดับแรงดันของตัวเก็บประจุได้ จากผลของ v_{c1} ในรูป 6.28 เมื่อทำการขยายค่าแรงดัน v_{c1} ในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสงลดลงและเพิ่มขึ้น แสดงได้ดังรูปที่ 6.29 และ 6.30 ตามลำดับ

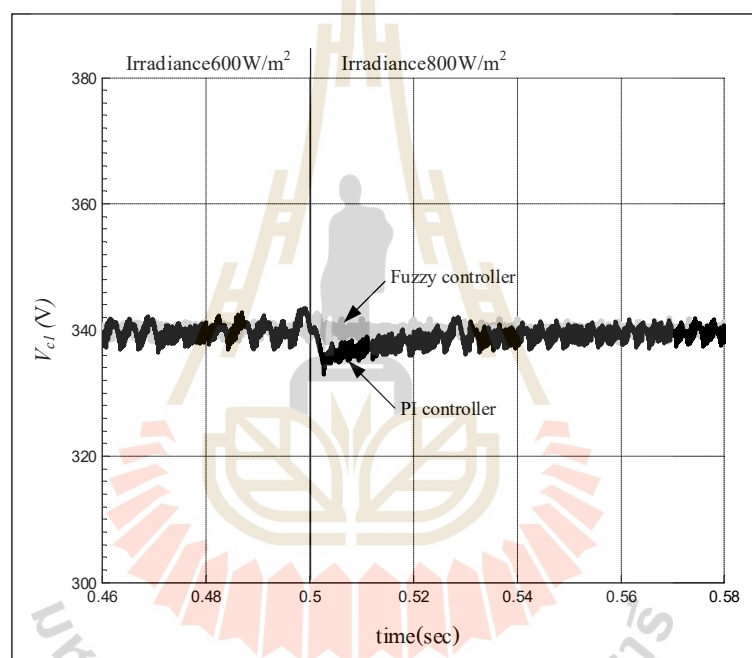


รูปที่ 6.29 ผลการตอบสนองค่าแรงดันตัวเก็บประจุ

เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 1000 W/m² เป็น 600W/m² ที่เวลา 0.3 วินาที

จากรูปที่ 6.29 ผลการตอบสนองค่าแรงดันตัวเก็บประจุเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 1000 W/m² เป็น 600W/m² ที่เวลา 0.3 วินาที พบว่า ผลการตอบสนองของตัวควบคุมฟัซซี(เส้นสีเทา) ไม่มีการพุ่งเกิน (overshoot) และเข้าสู่สถานะอยู่ตัวได้รวดเร็วกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบพีไอ(เส้นสีดำ) ซึ่งมีค่าแรงดันพุ่งเกินที่สูงที่สุดถึง 358.5V แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมฟัซซีมีสมรรถนะในการควบคุมค่าแรงดันของตัวเก็บประจุของวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ได้ดีกว่าตัวควบคุมแบบพีไอ สำหรับในรูปที่ 6.30 ผลการตอบสนองค่าแรงดันตัวเก็บประจุเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 600 W/m² เป็น 800W/m² ที่เวลา 0.5 วินาที พบว่าผลการตอบสนอง

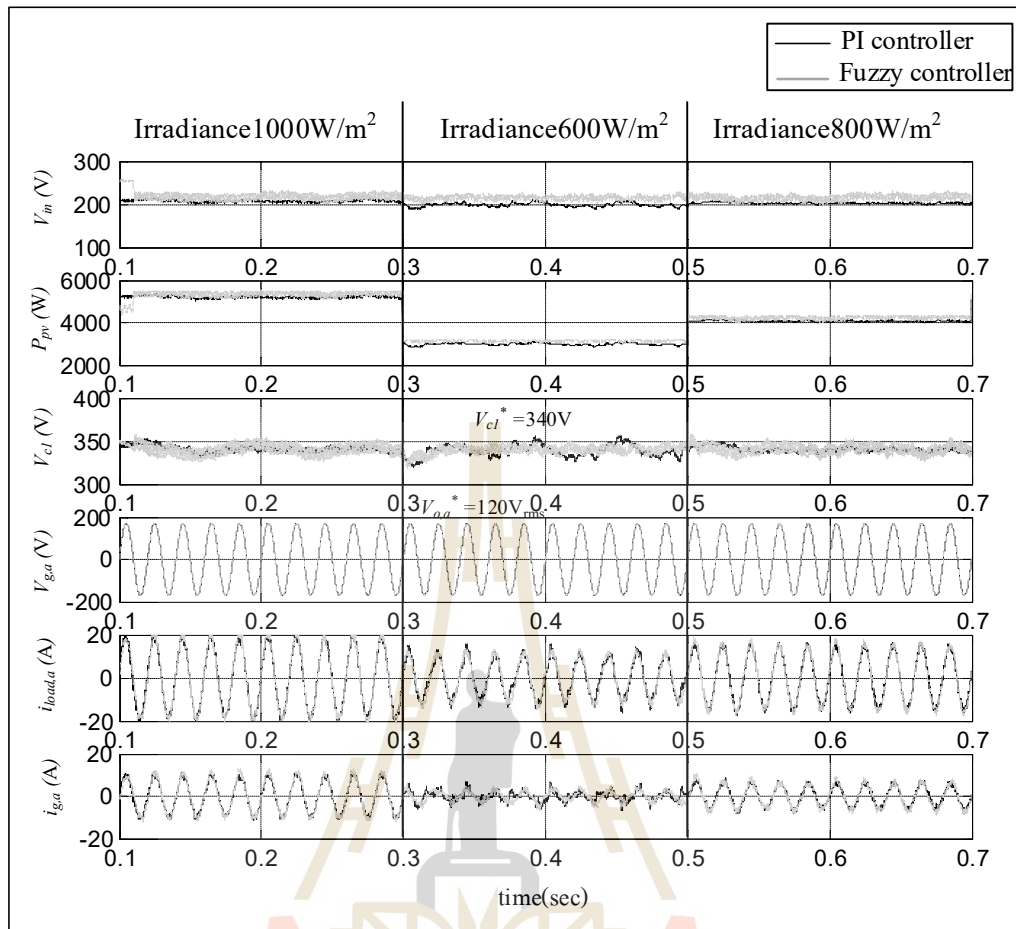
ของตัวควบคุมฟuzzy(เส้นสีเทา) ไม่มีการหน่วงต่ำ (undershoot) และเข้าสู่สถานะอยู่ตัวได้รวดเร็วกว่าตัวควบคุมแบบพีไอ(เส้นสีดำ) ซึ่งมีค่าแรงดันของตัวเก็บประจุลดลงต่ำที่สุดถึง 334.4V ส่วนผลการจำลองสถานการณ์ค่าอื่น ๆ ในรูปที่ 6.28 ค่าแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ $V_{o,a}$ มีค่าเท่ากับ $120V_{rms}$ ค่ากระแสที่เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ในเฟส a $i_{o,a}$ ในโหมดอิสระค่ากระแสที่ได้จากอินเวอร์เตอร์จะถูกจ่ายกระแสให้แก่โหลดทั้งหมด จากรูปที่ 6.28 ถึง 6.30 แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมฟuzzyที่ได้จากการออกแบบและนำเสนอในหัวข้อก่อนก่อนหน้านี้นี้สามารถควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ในโหมดอิสระได้ และมีสมรรถนะผลการตอบสนองของระบบที่ดีกว่าตัวควบคุมแบบพีไอ



รูปที่ 6.30 ผลการตอบสนองค่าแรงดันตัวเก็บประจุ

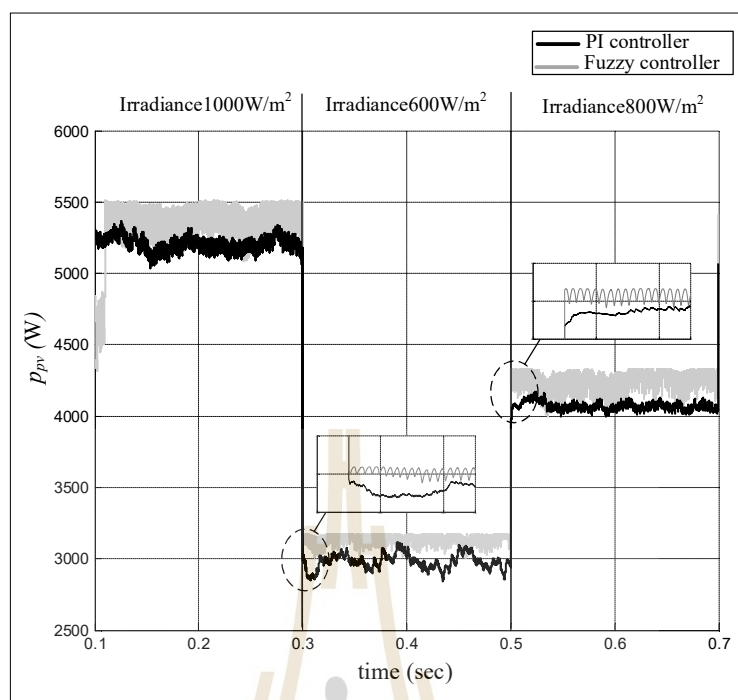
เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 600 W/m^2 เป็น 800 W/m^2 ที่เวลา 0.5 วินาที

กรณีที่ 2 อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ทำงานในโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย โดยเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง 1000 600 และ 800 W/m^2 ที่เวลา 0.3 และ 0.5 วินาที ตามลำดับ สามารถแสดงผลการจำลองสถานการณ์ได้ดังรูปที่ 6.31



รูปที่ 6.31 ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอดซีดีใน โหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย ด้วยตัวควบคุมพีไอเปรียบเทียบกับตัวควบคุมฟuzzy

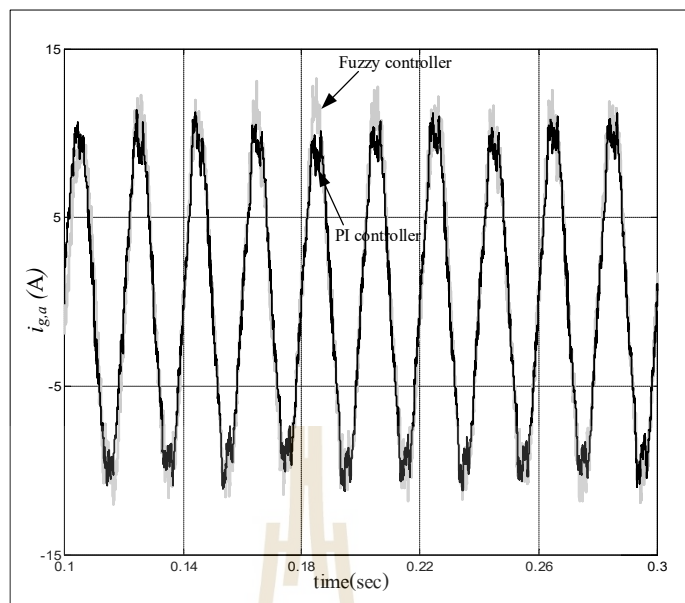
จากผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 6.31 จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มแสงมีค่าเปลี่ยนแปลง จะส่งผลให้ค่าแรงดันอินพุต V_{in} มีค่าเปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยค่าแรงดันอินพุตมีค่าเท่ากับค่าแรงดันที่ จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด หรือ $V_{in} = V_{mpp}$ โดยอาศัยการทำงานของอัลกอริทึมการตามรอยจุดกำลังงาน สูงสุด เพื่อดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ณ สภาวะความเข้มแสงขณะนั้นมาใช้งานได้ เมื่อความเข้มแสงมีค่าลดลงค่ากำลังไฟฟ้าก็จะมีค่าลดลง และเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นค่ากำลังไฟฟ้าก็ จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย สำหรับการควบคุมค่าแรงดันอินพุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกควบคุมผ่านตัว ควบคุมพีไอหรือตัวควบคุมฟuzzyดังในรูปที่ 6.10 โดยค่าแรงดันอินพุตจะส่งผลต่อค่ากำลังไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถแสดงค่ากำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดังในรูปที่ 6.32



รูปที่ 6.32 ค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 6.32 พบว่า ค่ากำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ของตัวควบคุมพีซีซี(เส้นสีเทา) มีค่ากำลังไฟฟ้าได้มากกว่าตัวควบคุมพีไอ(เส้นสีดำ) ในทุกสภาวะความเข้มแสง อีกทั้งยังสามารถหาจุดกำลังงานสูงสุดได้รวดเร็ว ถูกต้องและแม่นยำกว่า ส่งผลให้ผลรวมค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ของตัวควบคุมพีซีซีมีค่ามากกว่าตัวควบคุมพีไอ จึงสามารถสรุปได้ว่าตัวควบคุมพีซีซีมีประสิทธิภาพในการควบคุมที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอ ในการควบคุมค่าแรงดันอินพุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์วงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ ในโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

นอกจากนี้ในรูปที่ 6.31 ค่าแรงดันของตัวเก็บประจุ V_{c1} ในการจำลองสถานการณ์กำหนดให้ค่าแรงดันของตัวเก็บประจุ อ้างอิงมีค่า $v_{c1}^* = 340V$ พบว่าระบบที่พิจารณาสามารถรักษาระดับแรงดันตัวเก็บประจุได้เท่ากับ 340V และค่าแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ในโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายมีค่าเท่ากับแรงดันกริด $120 V_{rms}$ ส่วนค่ากระแสที่อินเวอร์เตอร์ในเฟส a $i_{o,a}$ ที่ความเข้มแสง $1000 W/m^2$ จะมีค่ากระแสมากที่สุดเนื่องจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากกว่าที่ความเข้มแสง 800 และ $600 W/m^2$ ซึ่งอินเวอร์เตอร์จ่ายกระแสให้แก่โหลด $i_{load,a}$ ค่าเท่ากันในทุกสภาวะความเข้มแสง ในส่วนของกระแสที่เกินกว่าโหลดต้องการจะจ่ายเข้าสู่ระบบจำหน่ายทั้งหมด จากผลของค่ากำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้ตัวควบคุมพีซีซีสามารถดึงกระแสได้มากกว่าตัวควบคุมพีไอ ส่งผลให้กระแสที่จ่ายเข้าสู่ระบบจำหน่าย $i_{grid,a}$ ของตัวควบคุมพีซีซี มีค่ามากกว่าตัวควบคุมพีไอด้วย แสดงได้ดังรูปที่ 6.33



รูปที่ 6.33 ค่ากระแสเอาต์พุตที่จ่ายเข้าสู่ระบบจำหน่าย ที่ความเข้มแสง 1000 W/m^2

จากรูปที่ 6.33 จะเห็นได้ว่ากระแสที่จ่ายเข้าสู่ระบบจำหน่าย ที่ความเข้มแสง 1000 W/m^2 ของตัวควบคุมฟัซซีมีค่ามากกว่ากระแสของตัวควบคุมพีไอ เป็นผลมาจากการควบคุมค่าแรงดันอินพุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยตัวควบคุมฟัซซี จากผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรถออินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ในโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายด้วยตัวควบคุมพีไอเปรียบเทียบกับตัวควบคุมฟัซซีในรูปที่ 6.31 ถึง 6.33 แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมฟัซซีที่ได้ออกแบบและนำเสนอสามารถควบคุมวงจรถออินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ในโหมดเชื่อมต่อในระบบจำหน่ายได้ และมีสมรรถนะที่ดีกว่าตัวควบคุมแบบพีไอ

6.8 สรุป

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีต่าง ๆ ของฟัซซี ได้แก่ ฟัซซีเซต การดำเนินการทางฟัซซีเซต ฟังก์ชันสมาชิก ตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษา กฎของฟัซซี และการอนุมานฟัซซี โดยการนำเสนอได้อธิบายไปพร้อมกับการยกตัวอย่างสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้สำหรับวงจรถออินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์โหมดอิสระและโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย นอกจากนี้ยังได้นำเสนอการออกแบบตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษา การออกแบบกฎฟัซซี และวิธีการอนุมานฟัซซี ซึ่งระบบที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ใช้ฟังก์ชันสมาชิกรูปสามเหลี่ยมที่มีค่าเชิงภาษาของอินพุต error 3 ค่า คือ “neg” “zero” “pos” ค่าเชิงภาษาของอินพุต error rate 3 ค่า คือ “neg_rate” “zero_rate” “pos_rate” และค่าเชิงภาษาของเอาต์พุต shoot-through duty จำนวน 3 ค่า คือ “dec” “cons”

“inc” สามารถออกแบบกฎฟuzzyจำนวน 9 กฎ และวิธีการอนุมานฟuzzyใช้แบบ Takagi-Sugeno ที่มี การทำดีฟuzzyแบบการหาค่าน้ำหนักเฉลี่ย และทำการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ของระบบที่ พิจารณาด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังใน Simulink บนโปรแกรม MATLAB โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ตัว ควบคุมฟuzzyที่ได้จากการออกแบบตัวควบคุมที่นำเสนอ จากผลการจำลองสถานการณ์พบว่าตัว ควบคุมฟuzzyที่ได้ทำการออกแบบ สามารถควบคุมวงจรถอนอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอ ไซต์โหมตอิสระและโหมตเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายได้ดี และมีสมรรถนะที่ดีกว่าตัวควบคุมแบบพีไอที่ ได้อธิบายรายละเอียดการออกแบบไว้ในบทที่ 5 เพื่อแสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมและตัวควบคุมที่ทำการ ออกแบบ สามารถนำไปใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ โดยจากการจำลองสถานการณ์บน คอมพิวเตอร์ในโปรแกรม Simulink ร่วมกับชุดบล็อกไฟฟ้า PSB อาจไม่เพียงพอและอาจมีความ แตกต่างจากฮาร์ดแวร์ระบบควบคุมจริงในทางปฏิบัติ ดังนั้นในบทต่อไปจะกล่าวถึงการจำลอง สถานการณ์โดยใช้เทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปที่ใช้โปรแกรม Simulink ร่วมกับบอร์ด eZdspTMF28335 เพื่อใช้ในการตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมพีไอและตัวควบคุมฟuzzyที่ได้นำเสนอสำหรับระบบที่ พิจารณา นอกจากนี้การยืนยันสมรรถนะของตัวควบคุมฟuzzyด้วยชุดทดสอบจริงจะดำเนินการกับ ระบบที่ค่ากำลังไฟฟ้าต่ำซึ่งจะได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 7 เช่นเดียวกัน เนื้อหาในบทนี้ได้รับการ ตีพิมพ์ในบทความ P. Wongyai, J. Pakdeeto, K. Chaicharoenaudomrung, K-N. Areerak and K-L. Areerak. (2023). The Controller Design of Quasi-Z-Source Inverter for PV-Rooftop System using Fuzzy controller. ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics and Communications (ECTI-EEC).

บทที่ 7

เทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูบและการสร้างชุดทดสอบ วงจรรีเนเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์

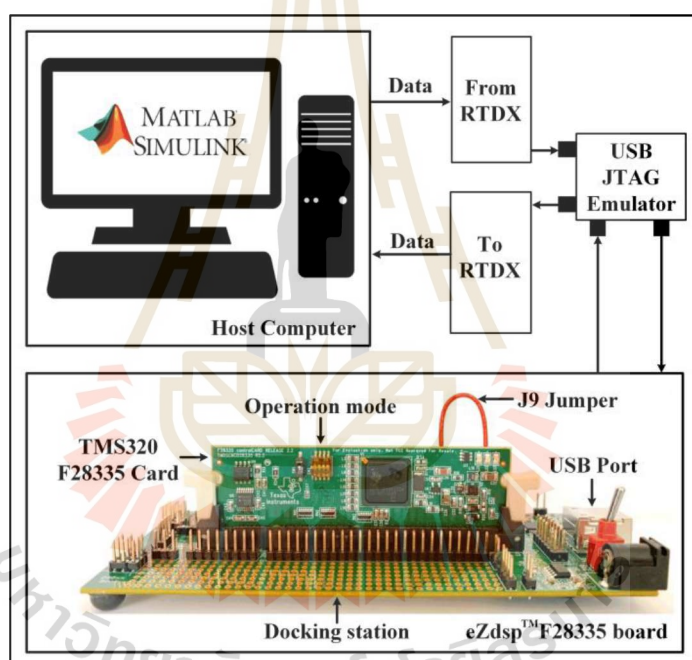
7.1 บทนำ

ระบบควบคุมและตัวควบคุมที่ถูกคิดค้น ออกแบบ หรือพัฒนาขึ้นสำหรับวงจรรีเนเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์โหมตอิสระและโหมตเชื่อมต่อกับระบบ จำเป็นจะต้องอาศัยโปรแกรมช่วยจำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบสมรรถนะการควบคุม ก่อนที่จะดำเนินการสร้างฮาร์ดแวร์ระบบควบคุมจริง ทั้งนี้เพื่อป้องกันอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์รวมถึงอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบที่พิจารณาที่อาจเสียหายได้เนื่องจากระบบควบคุมหรือตัวควบคุมที่มีสมรรถนะการควบคุมไม่ดี ในบทที่ผ่านมา ผู้วิจัยวิทยานิพนธ์ได้ใช้โปรแกรม Simulink ใน MATLAB เป็นเครื่องมือช่วยสำหรับการจำลองสถานการณ์ อย่างไรก็ตาม การจำลองสถานการณ์ดังกล่าวได้ดำเนินการอยู่บนคอมพิวเตอร์ทั้งหมด ซึ่งอาจไม่สมจริงและมีความแตกต่างจากฮาร์ดแวร์ระบบควบคุมจริง งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้บอร์ด DSP สำหรับการประมวลผลเพื่อให้ผลการจำลองสถานการณ์มีความถูกต้องใกล้เคียงกับระบบฮาร์ดแวร์มากยิ่งขึ้น ในบทนี้จึงได้นำเสนอ เทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูบ (Hardware In the Loop: HIL) ที่ใช้โปรแกรม Simulink ร่วมกับบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 รายละเอียดการเชื่อมโยงโปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp™ F28335 จะนำเสนอในหัวข้อที่ 7.2 และการทดสอบจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูบของระบบการทดสอบรับและส่งข้อมูลระหว่างโปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp™ F28335 ผ่านทางช่องสื่อสารแบบ RIDX นอกจากนี้ได้นำเสนอการสร้างชุดทดสอบจริงสำหรับยืนยันผลการควบคุมวงจรรีเนเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์โหมตอิสระ ด้วยตัวควบคุมพีไอและตัวควบคุมพีซีในห้องปฏิบัติการอีกด้วย

7.2 การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบ

การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบ (hard ware in the loop: HIL) เป็นเทคนิคการจำลองสถานการณ์ที่ใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ร่วมกับบอร์ด DSP ซึ่งมีจุดเด่นหลายประการ เช่น ผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้มีความถูกต้องใกล้เคียงกับระบบฮาร์ดแวร์จริง และสามารถคาดการณ์ผลกระทบที่จะเกิดขึ้นก่อนการทดสอบกับระบบฮาร์ดแวร์จริงในห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้เพื่อป้องกันอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้นกับผู้วิจัย และความเสียหายของอุปกรณ์ ดังนั้น ในงานวิจัย

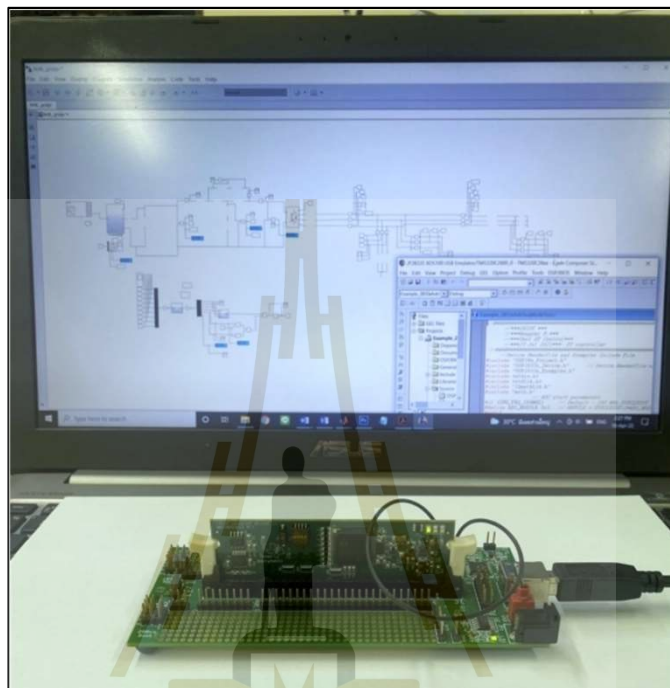
วิทยานิพนธ์ จึงได้นำเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปมาใช้สำหรับการจำลองสถานการณ์เพื่อพิจารณาสมรรถนะการควบคุมวงจรถ่ายอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ โดยระบบฮาร์ดแวร์ เช่น แผงเซลล์แสงอาทิตย์ อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ วงจรกรองกำลังไฟฟ้า และระบบจำหน่ายไฟฟ้า ที่พิจารณาจะดำเนินการสร้างด้วยชุดบล็อกกำลังไฟฟ้าบนโปรแกรม MATLAB/Simulink ส่วนระบบควบคุม เช่น ระบบควบคุมแรงดันตัวเก็บประจุ ระบบควบคุมกระแส และระบบควบคุมแรงดันอินเวอร์เตอร์ ถูกเขียนขึ้นด้วยโปรแกรมภาษาซีผ่านโปรแกรม Code Composer Studio เวอร์ชัน 3.3 (CCstudio v3.3) ลงบนบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 การเชื่อมต่ออุปกรณ์สำหรับเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปแสดงได้ดังรูปที่ 7.1 และการเชื่อมต่อฮาร์ดแวร์ในรูประหว่างคอมพิวเตอร์โปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp™ F28335 แสดงได้ดังรูปที่ 7.2



รูปที่ 7.1 การเชื่อมต่ออุปกรณ์สำหรับเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป

จากรูปที่ 7.1 เราจะเห็นการเชื่อมโยงโฮสต์คอมพิวเตอร์และบอร์ด eZdsp™ F28335 เชื่อมต่อผ่านพอร์ต USB พร้อมการขนส่ง JTAG (Joint Test Action Group) ข้อมูลเข้าและออกกันในรูปแบบ RTDX (Real Time Data Exchange) ถือว่า MATLAB/Simulink เขียนและถ่ายโอนจากโปรแกรมผ่านบล็อก RTDX (จากการแลกเปลี่ยนข้อมูลตามเวลาจริง) ไปยังการประมวลผลบนบอร์ด eZdsp™ F28335 ผ่านพอร์ต USB eZdsp™ F28335 ออนบอร์ดเขียนชุดคำสั่งในภาษา C เพื่อคำนวณค่าวัฏจักรหน้าที่และควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเอาต์พุตและออฟเซตจะเสร็จสิ้นใน

หนึ่งรอบเมื่อบอร์ด eZdsp™ F28335 ส่งข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลไปยังโปรแกรม MATLAB/Simulink ใช้บล็อก To RTDX (To real-time data exchange) เพื่อใช้ค่าดังกล่าวในวิธีการควบคุม วงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์



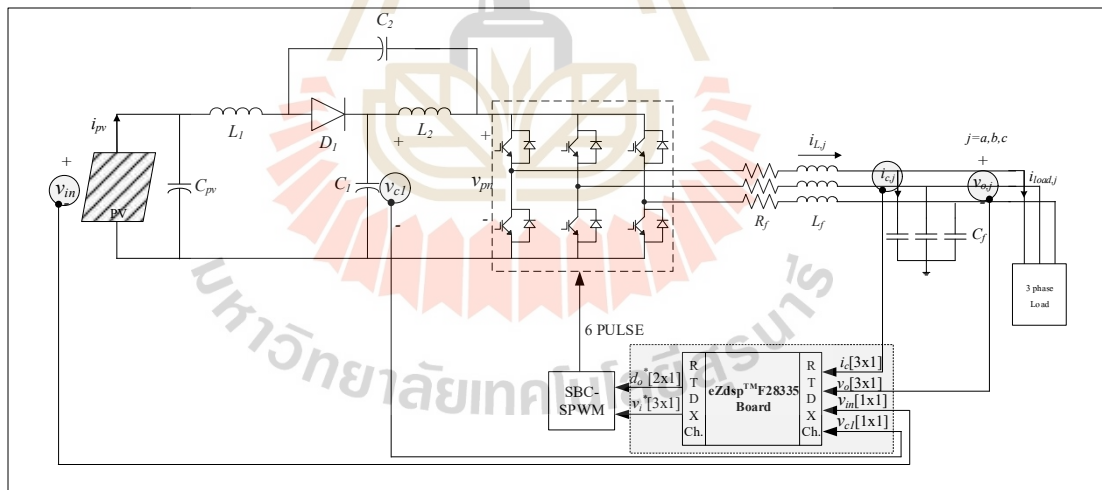
รูปที่ 7.2 การเชื่อมต่อฮาร์ดแวร์ในรูประหว่างคอมพิวเตอร์โปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp™ F28335

7.2.1 อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์โหมดอิสระ

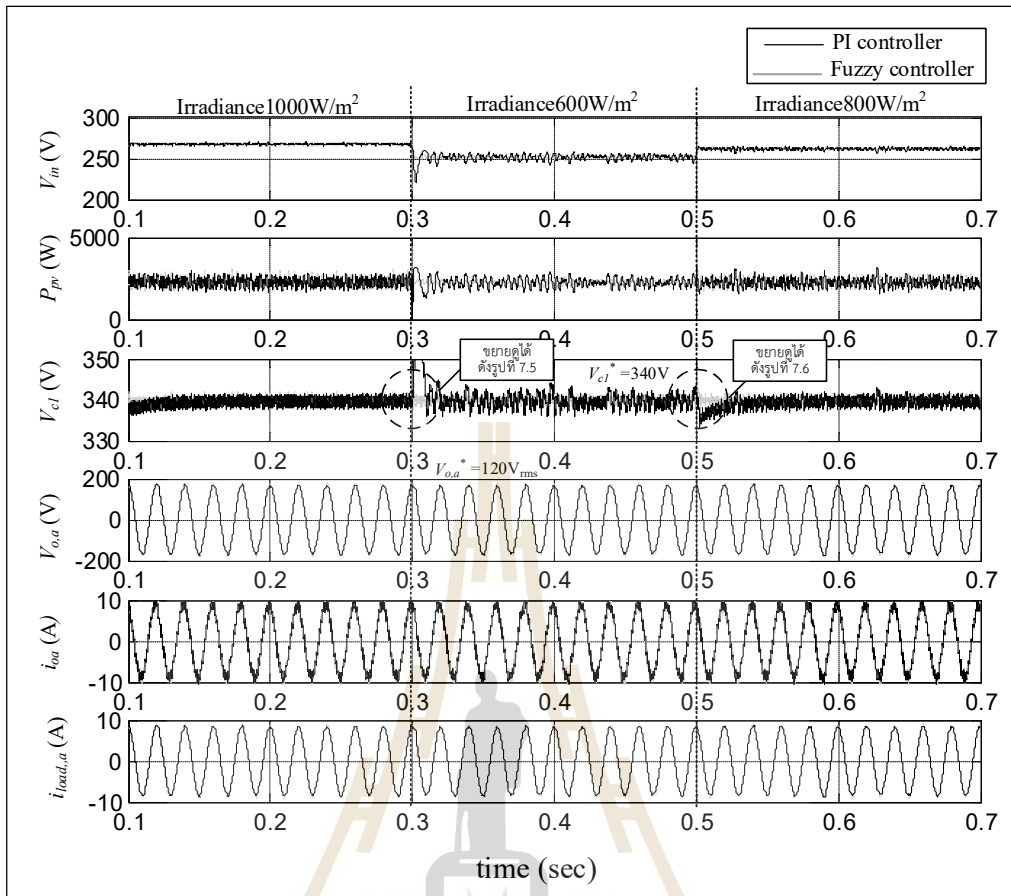
การจำลองสถานการณ์สำหรับอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์โหมดอิสระ เพื่อทดสอบสมรรถนะการควบคุม แสดงได้ดังรูปที่ 7.3 โดยโครงสร้างของระบบที่พิจารณาประกอบด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ที่ทำงานอยู่ในโหมดอิสระ เชื่อมต่อกับวงจรกรองสัญญาณที่ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ และเอาต์พุตของระบบคือ โหลดกำลังไฟฟ้าสามเฟสที่เปรียบเสมือนเป็นโหลดเครื่องใช้ไฟฟ้าในบ้าน สำหรับโหมดอิสระ เบรกเกอร์สำหรับเชื่อมต่อระหว่างวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์กับระบบจำหน่าย กำหนดให้มีสถานะ OFF จากการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 7.3 จะเห็นได้ว่า มีการรับและส่งข้อมูลระหว่างกันใช้บอร์ด eZdsp™ F28335 เพื่อโปรแกรม Simulink ผ่านช่องทางการสื่อสาร RTDX ของระบบ RTDXTest มีความแม่นยำ โดยบล็อกอินพุตของการจำลอง

สถานการณ์รับข้อมูล ผ่านช่องทางการสื่อสาร RTDX ได้แก่ค่า i_c , v_o , v_{in} และ v_{c1} หลังจากนั้นบอร์ด eZdsp™ F28335 รับข้อมูลดังกล่าว ทำการประมวลผลการควบคุมผ่านโค้ดโปรแกรมภาษาซีของการทดสอบ จากนั้นส่งข้อมูลเอาต์พุตกลับมาที่โปรแกรม Simulink ผ่านทางช่องเอาต์พุต RTDX โดยข้อมูลเอาต์พุตได้แก่ สัญญาณ v_i^* และ d_0^* ถูกส่งกลับไปทีโปรแกรม Simulink และควบคุมสัญญาณการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ด้วยเทคนิค การควบคุมมูสต์แบบง่ายดังที่กล่าวไปแล้วในบทที่ 4 จะได้สัญญาณพัลส์นำไปทริกสวิตช์อินเวอร์เตอร์ไอจีบีที ในโปรแกรม Simulink สามารถแสดงผลการการจำลองสถานการณ์อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์โหมตอิสระด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป ได้ดังรูปที่ 7.4

การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปของระบบทดสอบ จะใช้โครงสร้างของระบบทดสอบเหมือนกับในบทที่ 5 สำหรับค่าพารามิเตอร์ของระบบ ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ และค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีซี จะใช้ค่าพารามิเตอร์เหมือนกับการจำลองสถานการณ์ Simulink บนโปรแกรม MATLAB ดังแสดงไว้ในบทที่ 5 และ บทที่ 6 ตามลำดับ จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลของการควบคุมวงจรถูกอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ด้วยตัวควบคุมพีไอกับตัวควบคุมพีซี

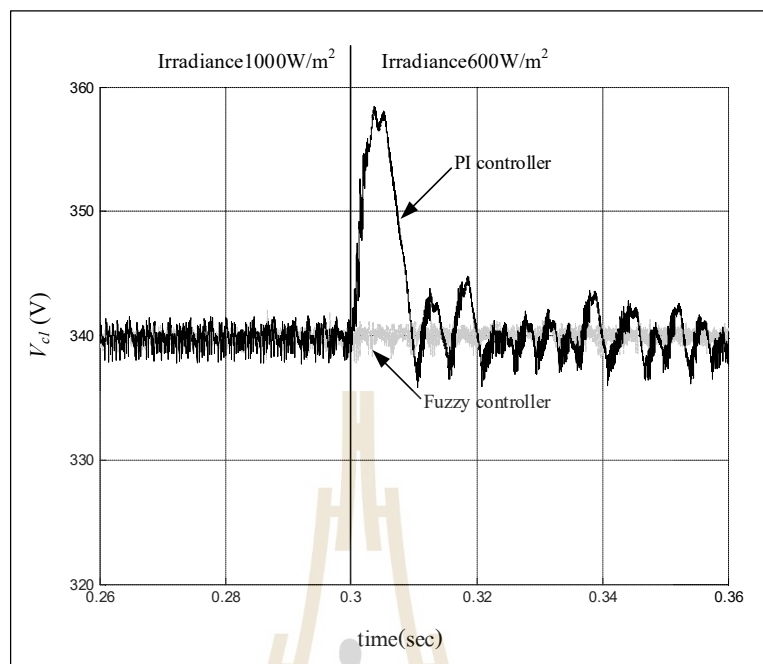


รูปที่ 7.3 การจำลองสถานการณ์สำหรับอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์โหมตอิสระ ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป



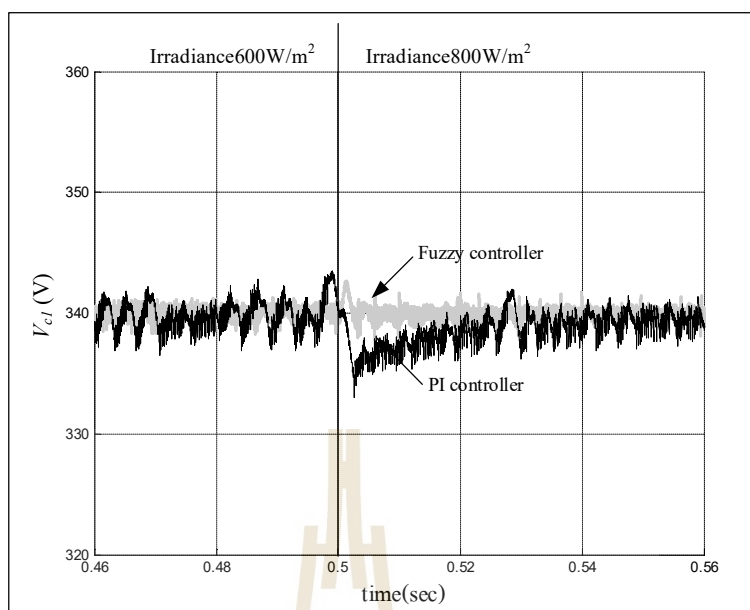
รูปที่ 7.4 ผลการจำลองสถานการณ์อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์โหมดอิสระ ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบ

จากรูปที่ 7.4 อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ทำงานในโหมดอิสระ โดยเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง 1000 600 และ 800W/m² ที่เวลา 0.3 และ 0.5 วินาที ตามลำดับ การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบ จะกำหนดค่าแรงดันอ้างอิงของตัวเก็บประจุอ้างอิง มีค่า $v_{cl}^* = 340V$ และแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของอินเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับ $V_{o,a} = 120V_{rms}$ เหมือนกับการจำลองสถานการณ์จากโปรแกรม Simulink ร่วมกับชุดบล็อกไฟฟ้าดังในบทที่ 5 จากผลการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบในรูปที่ 7.4 จะเห็นได้ว่า ค่าแรงดันของตัวเก็บประจุ มีค่าเท่ากับ 340V ในทุก ๆ สภาวะความเข้มแสงไม่ว่าความเข้มแสงจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ตาม ตัวควบคุมพีไอและตัวควบคุมพีซีสามารถรักษาค่าระดับแรงดันของตัวเก็บประจุได้ 340V และผลของค่าแรงดัน v_{cl} ในรูป 7.4 เมื่อทำการขยายค่าแรงดัน v_{cl} ในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสง ลดลงและเพิ่มขึ้น สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.5 และ 7.6 ตามลำดับ



รูปที่ 7.5 ผลการตอบสนองค่าแรงดันตัวเก็บประจุ
เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 1000 W/m^2 เป็น 600 W/m^2 ที่เวลา 0.3 วินาที

จากรูปที่ 7.5 ผลการตอบสนองค่าแรงดันตัวเก็บประจุเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 1000 W/m^2 เป็น 600 W/m^2 ที่เวลา 0.3 วินาที พบว่า ผลการตอบสนองของตัวควบคุมฟัซซี (เส้นสีเทา) ไม่มีการพุ่งเกิน (overshoot) และเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้รวดเร็วกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอ (เส้นสีดำ) ซึ่งมีค่าแรงดันพุ่งเกินที่สูงที่สุดถึง 358.5 V แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมฟัซซีมีประสิทธิภาพในการควบคุมค่าแรงดันของตัวเก็บประจุของวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอดไรต์ได้ดีกว่าตัวควบคุมพีไอ สำหรับผลการตอบสนองค่าแรงดันตัวเก็บประจุ ในรูปที่ 7.6 เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 600 W/m^2 เป็น 800 W/m^2 ที่เวลา 0.5 วินาที พบว่า ผลการตอบสนองของตัวควบคุมฟัซซี (เส้นสีเทา) ไม่มีการหน่วงต่ำ (undershoot) และเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้รวดเร็วกว่าตัวควบคุมพีไอ (เส้นสีดำ) ซึ่งมีค่าแรงดันของตัวเก็บประจุลดต่ำที่สุดถึง 334.4 V



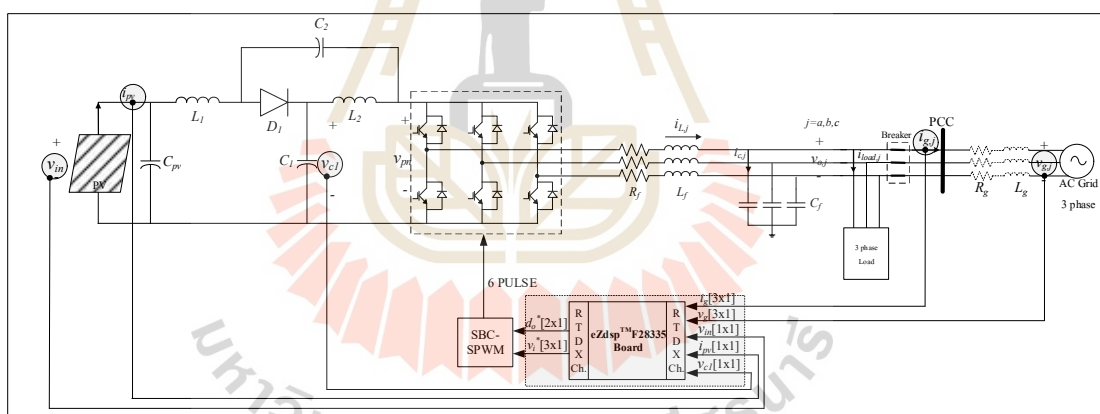
รูปที่ 7.6 ผลการตอบสนองค่าแรงดันตัวเก็บประจุ
เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 600 W/m^2 เป็น 800 W/m^2 ที่เวลา 0.5 วินาที

ส่วนผลการจำลองสถานการณ์ค่าอื่น ๆ ในรูปที่ 7.4 ค่าแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ $V_{o,a}$ มีค่าเท่ากับ $120 \text{ V}_{\text{rms}}$ ค่ากระแสที่เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ในเฟส a $i_{o,a}$ ในโหมตอิสระค่ากระแสที่ได้จากอินเวอร์เตอร์จะถูกจ่ายกระแสให้แก่โหลดทั้งหมด จากผลการจำลองสถานการณ์อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์โหมตอิสระด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบในรูปที่ 7.4 ถึง 7.6 แสดงให้เห็นว่า การจำลองสถานการณ์อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์โหมตอิสระด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบที่น่าเสนอ สามารถควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์โหมตอิสระได้ ซึ่งตัวควบคุมพีซีซีมีสมรรถนะการตอบสนองของระบบที่ดีกว่าตัวควบคุมพีโอ นอกจากนี้การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบ ทำให้ทราบถึงค่าพิกัดแรงดันพุ่งเกินและแรงดันหน่วงต่ำ เพื่อเป็นประโยชน์ในการเลือกขนาดพิกัดของตัวเก็บประจุสำหรับการสร้างฮาร์ดแวร์ระบบควบคุมจริง

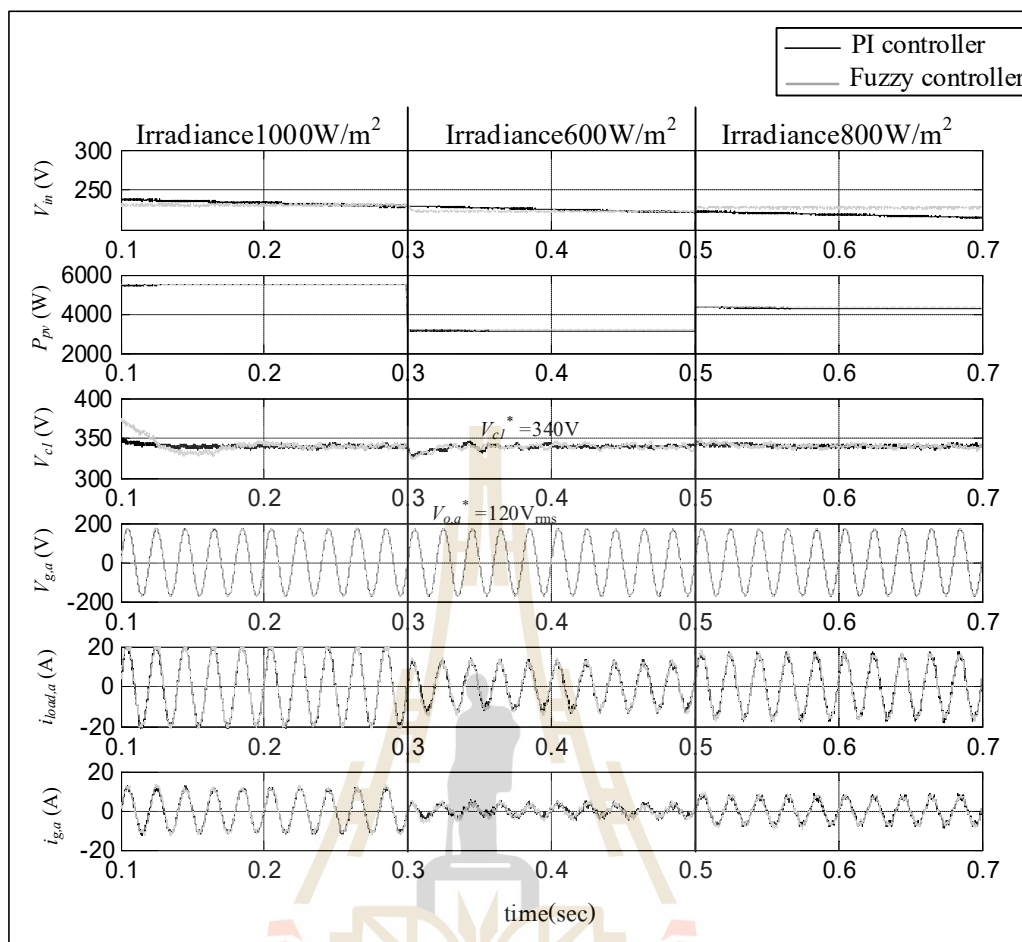
7.2.2 อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์โหมตเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

การจำลองสถานการณ์สำหรับอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์โหมตเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย เพื่อทดสอบสมรรถนะการควบคุม แสดงได้ดังรูปที่ 7.7 โดยโครงสร้างของระบบที่พิจารณา ประกอบด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ และวงจรกรองสัญญาณที่ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ หลังจากนั้น

เอาต์พุตของระบบคือ โหลดกำลังไฟฟ้าสามเฟสที่เปรียบเสมือนเป็นโหลดเครื่องใช้ไฟฟ้าในบ้าน และเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้า เบรกเกอร์สำหรับเชื่อมต่อระหว่างวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์กับระบบจำหน่าย กำหนดให้มีสถานะ ON จากการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 7.7 กำหนดให้มีการรับและส่งข้อมูลระหว่างกันใช้บอร์ด eZdsp™ F28335 เพื่อโปรแกรม Simulink ผ่านช่องทางการสื่อสาร RTDX โดยบล็อกอินพุตของการจำลองสถานการณ์รับข้อมูล ผ่านช่องทางการสื่อสาร RTDX ได้แก่ค่า i_g v_g v_{in} i_{pv} และ v_{c1} หลังจากนั้นบอร์ด eZdsp™ F28335 รับข้อมูลดังกล่าว ทำการประมวลผลการควบคุมผ่านโค้ดโปรแกรมภาษาซีของการทดสอบ จากนั้นส่งข้อมูลเอาต์พุตกลับมาที่โปรแกรม Simulink ผ่านทางช่องเอาต์พุต RTDX โดยข้อมูลเอาต์พุตได้แก่ สัญญาณ v_i^* และ d_0^* ถูกส่งกลับไปให้โปรแกรม Simulink และควบคุมสัญญาณการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ด้วยเทคนิค การควบคุมบัสต์แบบง่ายดังที่กล่าวไปแล้วในบทที่ 4 จะได้สัญญาณพัลส์นำไปทริกสวิตช์อินเวอร์เตอร์ไอจีบีที ในโปรแกรม Simulink สามารถแสดงผลการการจำลองสถานการณ์อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์โหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป ได้ดังรูปที่ 7.8

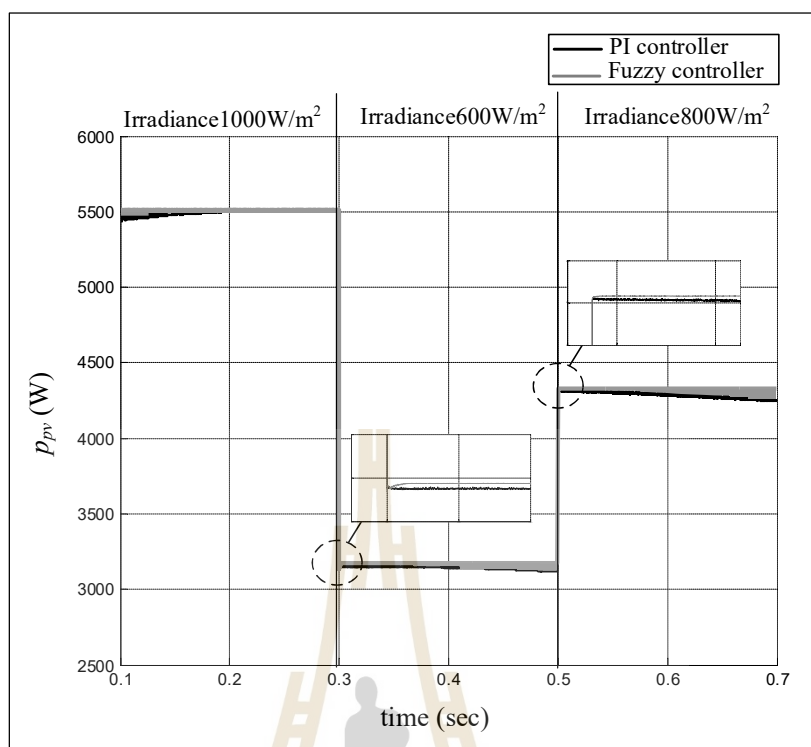


รูปที่ 7.7 การจำลองสถานการณ์สำหรับอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ โหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป



รูปที่ 7.8 ผลการจำลองสถานการณ์อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ โหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป

จากรูปที่ 7.8 อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ทำงานในโหมดโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย โดยเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง 1000 600 และ 800W/m² ที่เวลา 0.3 และ 0.5 วินาที ตามลำดับ ผลการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปตัวรูปที่ 7.7 จะเห็นได้ว่า เมื่อความเข้มแสงมีค่าเปลี่ยนแปลง จะส่งผลให้ค่าแรงดันอินพุต V_m มีค่าเปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยค่าแรงดันอินพุตจะมีค่าเท่ากับค่าแรงดันที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยอาศัยการทำงานของอัลกอริทึมการตามรอยจุดกำลังงานสูงสุด หากเมื่อความเข้มแสงมีค่าลดลงค่ากำลังไฟฟ้าก็จะมีค่าลดลง และเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นค่ากำลังไฟฟ้าก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย สำหรับการควบคุมค่าแรงดันอินพุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกควบคุมผ่านตัวควบคุมพีไอหรือตัวควบคุมพีซีซี โดยค่าแรงดันอินพุตจะส่งผลต่อค่ากำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถแสดงค่ากำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดังในรูปที่ 7.9



รูปที่ 7.9 ผลค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ สำหรับการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป

จากรูปที่ 7.9 พบว่า ค่ากำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ของตัวควบคุมฟัซซี(เส้นสีเทา) มีค่ากำลังไฟฟ้าได้มากกว่าตัวควบคุมพีไอ(เส้นสีดำ) ในทุกสภาวะความเข้มแสง อีกทั้งยังสามารถหาจุดกำลังงานสูงสุดได้รวดเร็ว ถูกต้องและแม่นยำกว่า ส่งผลให้ผลรวมค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ของตัวควบคุมฟัซซีมีค่ามากกว่าตัวควบคุมพีไอ จากผลการจำลองสถานการณ์จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมฟัซซีมีสมรรถนะในการควบคุมที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอ ในการควบคุมค่าแรงดันอินพุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์วงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ในโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

นอกจากนี้ในรูปที่ 7.8 ค่าแรงดันของตัวเก็บประจุ V_{c1} ในการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปกำหนดให้ค่าแรงดันของตัวเก็บประจุ อ้างอิงมีค่า $v_{c1}^* = 340V$ พบว่าระบบที่พิจารณาสามารถรักษาระดับแรงดันตัวเก็บประจุได้เท่ากับ $340V$ และค่าแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ในโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายมีค่าเท่ากับแรงดันกริด $120 V_{rms}$ สำหรับค่ากระแสที่อินเวอร์เตอร์ในเฟส a $i_{o,a}$ ที่ความเข้มแสง $1000 W/m^2$ จะมีค่ากระแสมากที่สุดเนื่องจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด ซึ่งอินเวอร์เตอร์จ่ายกระแสให้แก่โหลด $i_{load,a}$ ค่าเท่ากันในทุกสภาวะความเข้มแสง และกระแสที่เกินกว่าโหลดต้องการจะจ่ายเข้าสู่ระบบจำหน่ายทั้งหมด จาก

ผลของค่ากำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้ตัวควบคุมพีซีสามารถดึงกระแสได้มากกว่าตัวควบคุมพีไอ ส่งผลให้กระแสที่จ่ายเข้าสู่ระบบจำหน่าย $i_{grid,a}$ ของตัวควบคุมพีซีมีค่ามากกว่าตัวควบคุมพีไออีกด้วย จากผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ในโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบ ในรูปที่ 7.8 ถึง 7.9 แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมพีซีที่สามารถควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ในโหมดเชื่อมต่อในระบบจำหน่ายมีสมรรถนะที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอ

จากการนำเสนอการจำลองสถานการณ์อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ในโหมดอิสระในโหมดอิสระ และโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบเพื่อตรวจสอบสมรรถนะการควบคุม ก่อนที่จะดำเนินการสร้างฮาร์ดแวร์ระบบควบคุมจริง ด้วยตัวควบคุมพีไอและตัวควบคุมพีซีที่ออกแบบและนำเสนอตั้งในบทที่ 5 และ บทที่ 6 นั้น พบว่า ผลการ ทดสอบรับและส่งข้อมูลระหว่างโปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp™ F28335 ผ่านทางช่องสื่อสารแบบ RTDX ให้ผลการจำลองสถานการณ์ คือ ระบบการทดสอบสามารถรับและส่งข้อมูลได้อย่างถูกต้อง ให้ผลการจำลองสถานการณ์ใกล้เคียงกับการจำลองสถานการณ์ของระบบที่พิจารณาบนคอมพิวเตอร์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังใน Simulink บนโปรแกรม MATLAB โดยการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบมีข้อดีอยู่หลายประการ เช่น การตรวจสอบความถูกต้องของระบบควบคุมที่ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบบนบอร์ด eZdsp™ F28335 การคาดการณ์ผลกระทบที่เกิดขึ้นก่อนการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับชุดทดสอบหรืออันตรายที่เกิดจากระบบควบคุมที่ไม่สามารถทำงานได้ เป็นต้น นอกจากนี้การจำลองสถานการณ์ทำให้ทราบถึงค่าพิกัด แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังงานไฟฟ้า เพื่อนำไปใช้กำหนดค่าพิกัดของอุปกรณ์ในฮาร์ดแวร์จริง

7.3 การจำลองสถานการณ์สำหรับอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ในโหมดอิสระด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบโดยอาศัยบอร์ด eZdsp™ F28335 สำหรับระบบที่มีการปรับลดพิกัด

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการจำลองสถานการณ์สำหรับอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ในโหมดอิสระด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบ ซึ่งจะทำการปรับลดพิกัดของระบบที่พิจารณาเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของระบบก่อนจะนำไปสร้างชุดทดสอบจริง ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะสร้างชุดทดสอบแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์เฉพาะในโหมดอิสระเท่านั้น สามารถแสดงค่าพารามิเตอร์ของระบบที่พิจารณาได้ดังตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 ค่าพารามิเตอร์ของระบบการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป

รายละเอียด	ค่าพารามิเตอร์
แรงดันอินพุต	$V_{pv,mppt} = 85V$
กำลังไฟฟ้าอินพุต	$P_{pv} = 550W$
แรงดันที่กริด	$v_{grid} = 25V_{rms}$
ความถี่ของระบบ	$f_s = 50Hz$
ตัวเก็บประจุ	$C = C_1 = C_2 = 200\mu F$
ความต้านทานภายในตัวเก็บประจุ	$r = 0.03\Omega$
ตัวเหนี่ยวนำ	$L = L_1 = L_2 = 0.3mH$
ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ	$r = 0.1\Omega$
ตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง	$L_f = 4mH$
ความต้านทานของวงจรกรอง	$R_f = 0.05\Omega$
ตัวเก็บประจุของวงจรกรอง	$C_f = 50\mu F$
ความต้านทานของโหลดไฟฟ้า	$R_{load} = 20\Omega / phase$
ความถี่ของสัญญาณพาห้รูปสามเหลี่ยม	$f_{tri} = 10kHz$

จากบทที่ 5 ได้ทำการนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์โหมดอิสระ ดังหัวข้อที่ 5.3 ทำการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับระบบที่พิจารณาโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของระบบดังตารางที่ 5.1 จะได้ค่าพารามิเตอร์ K_p และ K_i ของตัวควบคุมพีไอของระบบที่พิจารณาได้ดังตารางที่ 7.2 และจากบทที่ 6 การออกแบบตัวควบคุมพีซีซีสำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์โหมดอิสระ ดังหัวข้อที่ 6.5.1 โดยใช้ค่าเชิงภาษาของอินพุต error จำนวน 3 ค่าและอินพุต error rate จำนวน 3 ค่า และจำนวนกฎพีซีซีจำนวนเท่ากับ 9 กฎ ($3 \times 3 = 9$) จะได้ค่าตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพของเอาต์พุตของระบบที่พิจารณาแสดงได้ดังตารางที่ 7.3 จากค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 7.1 ถึง 7.3 จะนำไปจำลองสถานการณ์สำหรับอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์โหมดอิสระด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป โดยอาศัยบอร์ด eZdsp™ F28335 การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปของระบบควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์โหมดอิสระ จะใช้โครงสร้างของระบบทดสอบเหมือนกับในรูปที่ 7.3 สำหรับค่าพารามิเตอร์ของระบบ ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ และค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีซีซี จะใช้ค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 7.1 ถึง 7.3 ตามลำดับ จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลของการควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ด้วยตัวควบคุม

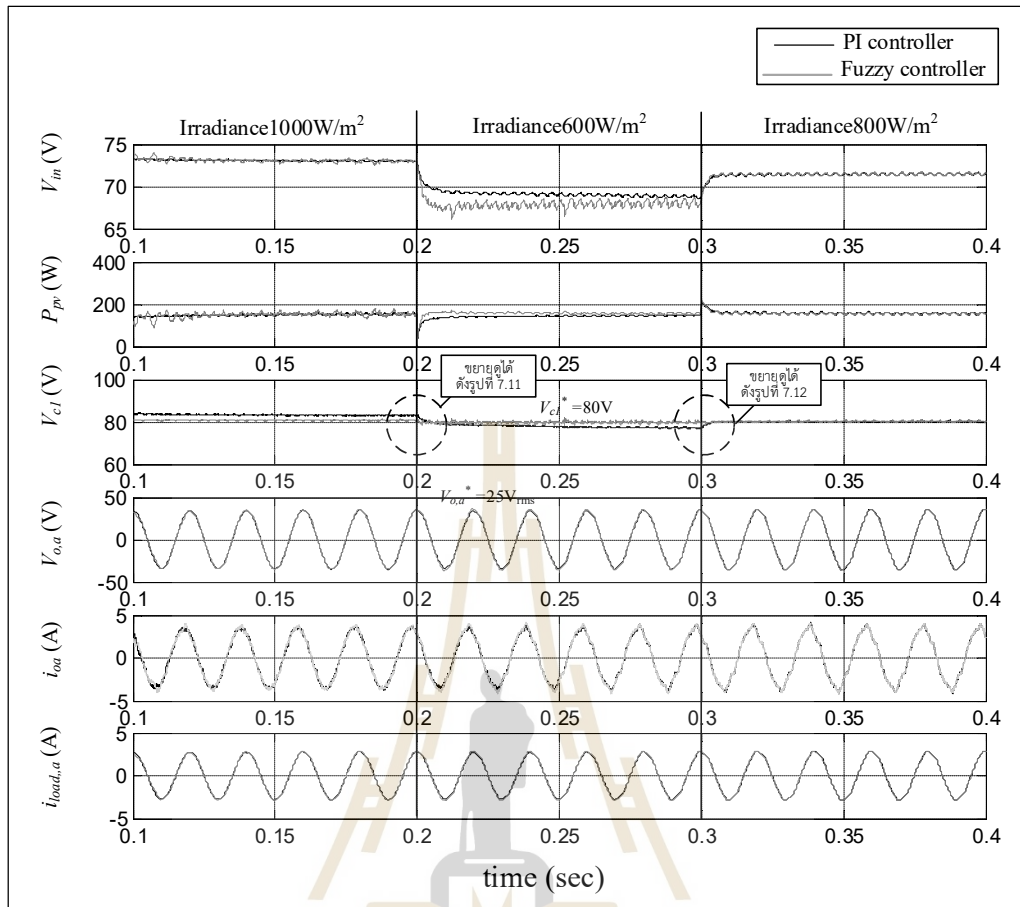
พีไอกับตัวควบคุมพีซี สามารถแสดงผลการจำลองสถานการณ์อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์โหมตอิสระด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป ได้ดังรูปที่ 7.10

ตารางที่ 7.2 ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอสำหรับการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป

รายละเอียด	ค่าพารามิเตอร์
โหมตอิสระ	
ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ	$K_{pvcd} = 0.015$
	$K_{ivcd} = 0.001$
ตัวควบคุมกระแสของตัวเก็บประจุ	$K_{pic} = 16$
ตัวควบคุมแรงดันเอาต์พุต	$K_{pvo} = 0.005$
	$K_{ivo} = 20$

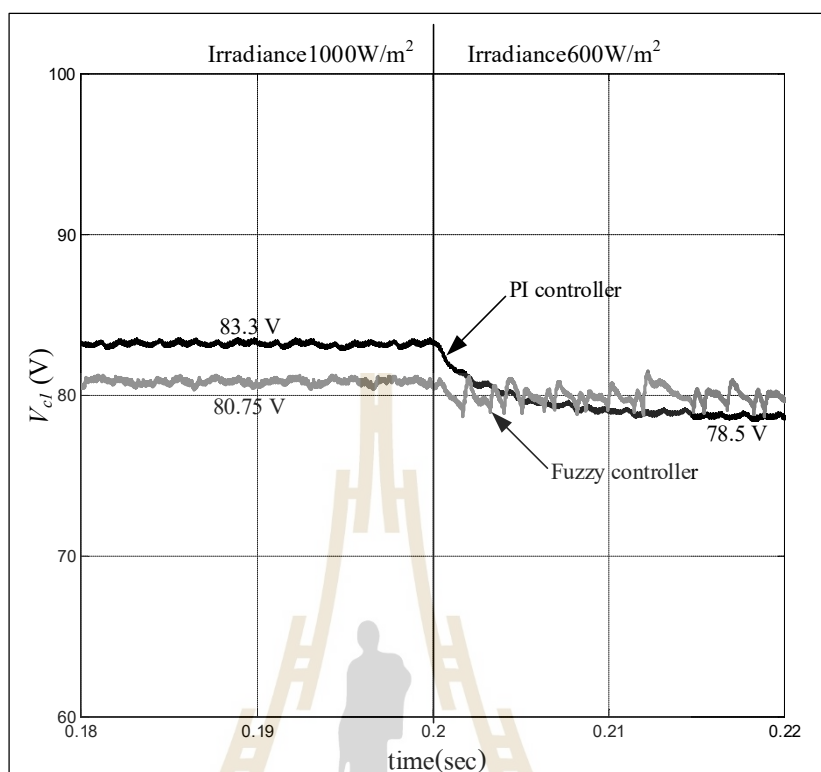
ตารางที่ 7.3 ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพของตัวควบคุมพีซีสำหรับระบบควบคุมวงจรมอเตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ โหมตอิสระ

ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพของอินพุต $e_{v_{c1}}$						
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
-2	0	-2	2	2	0	2
ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพของอินพุต $\frac{de_{v_{c1}}}{dt}$						
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
-1	0	-1	1	1	0	1
ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพของเอาต์พุต d_o						
y_1		y_2		y_3		
-0.2		0		0.2		



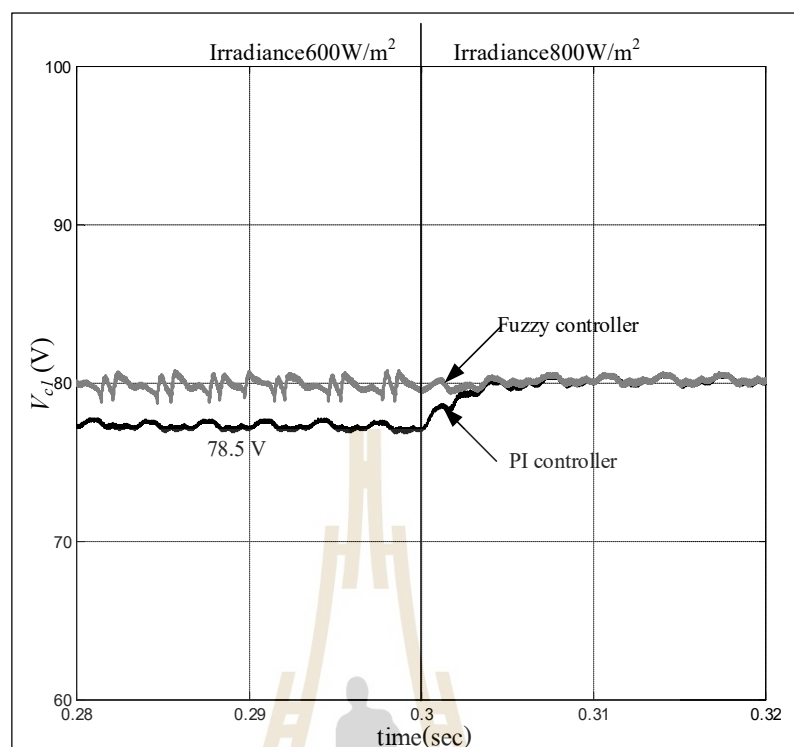
รูปที่ 7.10 ผลการจำลองสถานการณ์อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์โหมดอิสระ ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป สำหรับระบบที่มีการปรับลดพิกัด

จากรูปที่ 7.10 อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ทำงานในโหมดอิสระ โดยเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง 1000 600 และ 800W/m² ที่เวลา 0.2 และ 0.3 วินาที ตามลำดับ การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป จะกำหนดค่าแรงดันอ้างอิงของตัวเก็บประจุอ้างอิงมีค่า $v_{c1}^* = 80V$ และแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของอินเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับ $V_{o,a} = 25V_{rms}$ ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการปรับลดพิกัดของระบบที่พิจารณาเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ในหัวข้อที่ 7.2.1 จากผลการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปแสดงได้ดังรูปที่ 7.10 จะเห็นได้ว่า ค่าแรงดันของตัวเก็บประจุมีค่าใกล้เคียงกับแรงดันตัวเก็บประจุอ้างอิงซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 80V โดยจากผลการจำลองสถานการณ์พบว่าตัวควบคุมพีซีสามารถรักษาค่าระดับแรงดันของตัวเก็บประจุได้ 80 V ในทุก ๆ สถานะความเข้มแสง ซึ่งหากเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีโอ ที่มีค่าความผิดพลาดของแรงดันของตัวเก็บประจุ โดยผลของค่าแรงดัน v_{c1} ในรูป 7.10 เมื่อทำการขยายค่าแรงดัน v_{c1} ในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสงลดลงและเพิ่มขึ้น สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.11 และ 7.12 ตามลำดับ



รูปที่ 7.11 ผลการตอบสนองค่าแรงดันตัวเก็บประจุ
เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก $1000 W/m^2$ เป็น $600W/m^2$ ที่เวลา 0.2 วินาที

จากรูปที่ 7.11 ผลการตอบสนองค่าแรงดันตัวเก็บประจุเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก $1000 W/m^2$ เป็น $600W/m^2$ ที่เวลา 0.2 วินาที พบว่า โดยที่ความเข้มแสงจาก $1000 W/m^2$ ผลการตอบสนองของตัวควบคุมฟัซซี (เส้นสีเทา) มีค่าใกล้เคียงกับค่าแรงดันอ้างอิงของตัวเก็บประจุอ้างอิง แต่ตัวควบคุมพีไอ (เส้นสีดำ) มีค่าผิดพลาดที่มากกว่า และที่ความเข้มแสงจาก $600 W/m^2$ ผลการตอบสนองของตัวควบคุมฟัซซีมีค่าใกล้เคียงแรงดันตัวเก็บประจุอ้างอิง $80V$ แต่จะมีการแกว่งของสัญญาณเกิดขึ้น เป็นผลมาจากการกำหนดค่าตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพที่ผู้วิจัยออกแบบให้สามารถทำงานได้ในทุกสภาวะความเข้มแสง จึงอาจทำให้ที่ความเข้มแสงจาก $600 W/m^2$ เกิดการแกว่งของสัญญาณ สำหรับผลการตอบสนองค่าแรงดันตัวเก็บประจุ ในรูปที่ 7.12 เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก $600 W/m^2$ เป็น $800W/m^2$ ที่เวลา 0.3 วินาที พบว่า ผลการตอบสนองของตัวควบคุมฟัซซี (เส้นสีเทา) มีค่าใกล้เคียงแรงดันตัวเก็บประจุอ้างอิง $80V$ และเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้รวดเร็วกว่าตัวควบคุมพีไอ



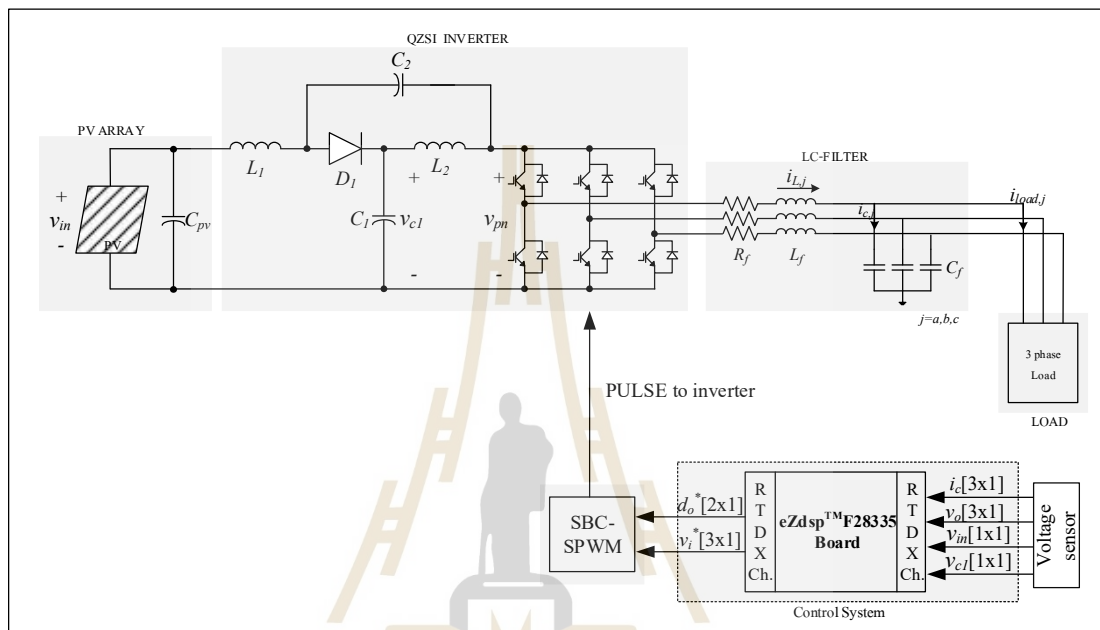
รูปที่ 7.12 ผลการตอบสนองค่าแรงดันตัวเก็บประจุ
เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 600 W/m^2 เป็น 800 W/m^2 ที่เวลา 0.3 วินาที

สำหรับผลการจำลองสถานการณ์ค่าอื่น ๆ ในรูปที่ 7.10 ค่าแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ $V_{o,a}$ มีค่าเท่ากับ $25V_{\text{rms}}$ ตามที่กำหนดไว้สำหรับการควบคุมตั้งนั้นจากผลการจำลองสถานการณ์อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์โหมดอิสระด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปในรูปที่ 7.10 ถึง 7.12 แสดงให้เห็นว่า การจำลองสถานการณ์อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์โหมดอิสระด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปและค่าพารามิเตอร์ของระบบทดสอบที่น่าเสนอ สามารถควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์โหมดอิสระได้ ซึ่งตัวควบคุมฟัซซีมีสมรรถนะผลการตอบสนองของระบบที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอ ดังนั้นในหัวข้อถัดไปจะกล่าวถึงการสร้างชุดทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์โหมดอิสระในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของระบบทดสอบ ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอและตัวควบคุมฟัซซี ดังกล่าวไปแล้วข้างต้นสำหรับการสร้างชุดทดสอบในห้องปฏิบัติการ

7.4 การสร้างชุดทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอการสร้างชุดทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์โหมดอิสระในห้องปฏิบัติการ ซึ่งทำการปรับลดพิกัดของชุดทดสอบจริง พิกัดแมงเซลล์แสงอาทิตย์

พิกัดอิมพีแดนซ์ และพิกัดแรงดันเอาต์พุตของวงจร โครงสร้างชุดทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ในห้องปฏิบัติการ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.13 และสามารถแสดงชุดต้นแบบวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์โหมดอิสระในห้องปฏิบัติการได้ดังรูปที่ 7.14



รูปที่ 7.13 โครงสร้างชุดทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์โหมดอิสระในห้องปฏิบัติการ

จากรูปที่ 7.13 สามารถแบ่งชุดทดสอบออกเป็น 6 ส่วน ประกอบด้วย อินพุตแหล่งจ่ายแผงเซลล์แสงอาทิตย์ วงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ ตัวตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและตัวตรวจวัดกระแสไฟฟ้า วงจรกรองสัญญาณฝั่งกระแสสลับ โหลดกำลังไฟฟ้าสามเฟส และส่วนสุดท้าย วงจรสร้างสัญญาณการสวิตช์ รายละเอียดขององค์ประกอบทั้ง 6 ส่วนสามารถอธิบายได้ดังนี้

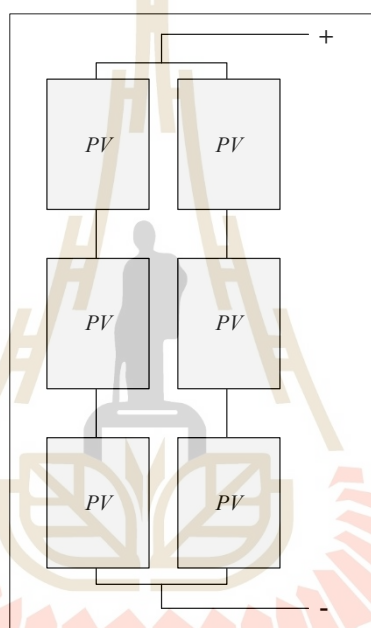


รูปที่ 7.14 ชุดต้นแบบวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์โหมตอิสระ
ในห้องปฏิบัติการ

ส่วนที่ 1: อินพุตแหล่งจ่ายแผงเซลล์แสงอาทิตย์ พิกัดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผงสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 7.4 สำหรับการสร้างชุดทดสอบจะใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 6 แผงเชื่อมต่อกันแบบอนุกรมและขนาน สามารถแสดงโครงสร้างการเชื่อมต่อของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในชุดทดสอบจริงได้ดังรูปที่ 7.15 และ 7.16 ตามลำดับ โดยแหล่งจ่ายสำหรับชุดคอมโหลดไฟฮาโลเจนสำหรับการจำลองแสงอาทิตย์เทียม จะใช้หม้อแปลงสามเฟสแบบปรับค่าได้ที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้า 6.6 kVA และมีความถี่ 50 Hz โดยทางด้านอินพุตสามารถรับแรงดันได้สูงสุด 380 V ในส่วนทางด้านเอาต์พุตสามารถปรับค่าได้ในช่วง 0-450 V ซึ่งหม้อแปลงดังกล่าวถูกใช้ในการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าสำหรับการจำลองความเข้มแสงของแสงอาทิตย์เทียมหม้อแปลงสามเฟสแบบปรับค่าได้ที่ใช้งานในงานวิจัยวิทยานิพนธ์แสดงได้ดังรูปที่ 7.17 (กราฟคุณลักษณะของกระแสและแรงดัน และกราฟคุณลักษณะของกำลังไฟฟ้าและแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในชุดทดสอบสามารถดูได้จาก ภาคผนวก ง.)

ตารางที่ 7.4 พิกัดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการสร้างชุดทดสอบ

รายละเอียด	ค่าพารามิเตอร์
แรงดันเปิดวงจร (V_{OC})	25 V
แรงดันที่กำลังสูงสุดของแผง (V_{mpp})	21.6 V
กระแสเปิดวงจร (I_{SC})	2.5 A
กระแสที่กำลังสูงสุดของแผง (I_{mpp})	2.35 A
กำลังการผลิตของแผง (P_{max})	50 W



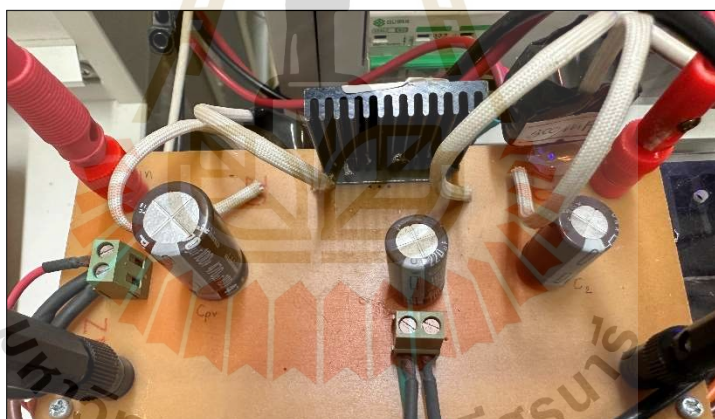
รูปที่ 7.15 โครงสร้างการเชื่อมต่อของแผงเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 7.16 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในชุดทดสอบจริง



รูปที่ 7.17 หม้อแปลงสามเฟสแบบปรับค่าได้



รูปที่ 7.18 วงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์

ส่วนที่ 2: วงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์แสดงได้ดังรูปที่ 7.18 ประกอบไปด้วย ตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ ไดโอด และมอดูลไอจีบีทีสำเร็จรูปรุ่น IPM6MBP50RA120-55 ที่ไอจีบีทีจำนวน 6 ตัวและบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMDSDOCK28335 สำหรับโปรแกรมควบคุมการทำงานของมอดูลไอจีบีทีทั้ง 6 ตัว ส่วนประกอบต่าง ๆ สามารถแสดงรายละเอียดดังนี้

ตัวเก็บประจุของวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์สำหรับชุดทดสอบนี้ใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาด $220\mu\text{F}$ มีค่าพิกัดแรงดันที่ 100 V

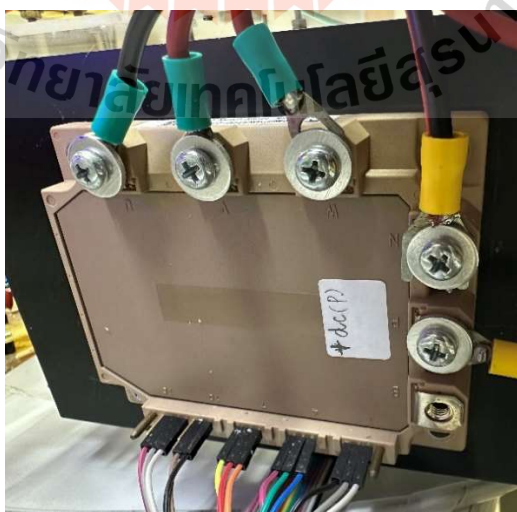
ตัวเหนี่ยวนำสำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ใช้ตัวเหนี่ยวนำขนาด 0.3mH มีพิกัดกระแสอยู่ที่ 3 A

ไดโอดของวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ ใช้ไดโอด 2 ขา เบอร์ 1822AE ซึ่งมีค่าพิกัดแรงดันที่ 200V และพิกัดกระแส 5A แสดงได้ดังรูปที่ 7.19



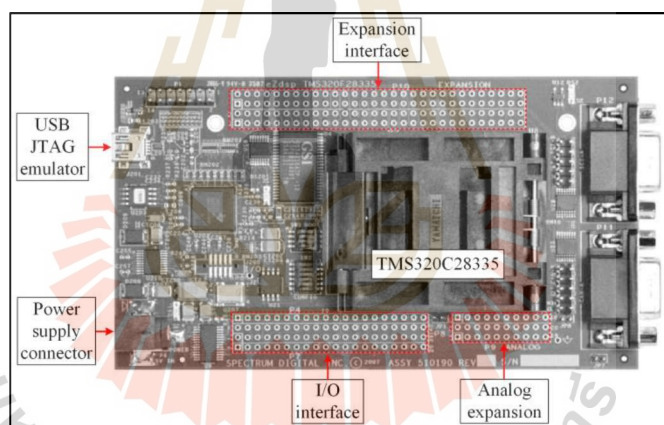
รูปที่ 7.19 ไดโอด 2 ขา เบอร์ 1822AE

มอดูลไอจีบีทีรุ่น IPM6MBP50RA120-55 ที่มีไอจีบีที6 ตัวสำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ อุปกรณ์สวิตช์ของวงจรในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ใช้ไอจีบีที6 ตัวที่เป็นมอดูลสำเร็จรูปรุ่น IPM6MBP50RA120-55 ของบริษัท FUJI Electric มีพิกัดการใช้งาน 50 A 1200 V ซึ่งถือว่าเพียงพอต่อการใช้งาน มอดูลไอจีบีทีที่ใช้สำหรับชุดทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์แสดงได้ดังรูปที่ 7.20 รายละเอียดการใช้งานสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก (พลสิทธิ์ ศานติประพันธ์, 2559)

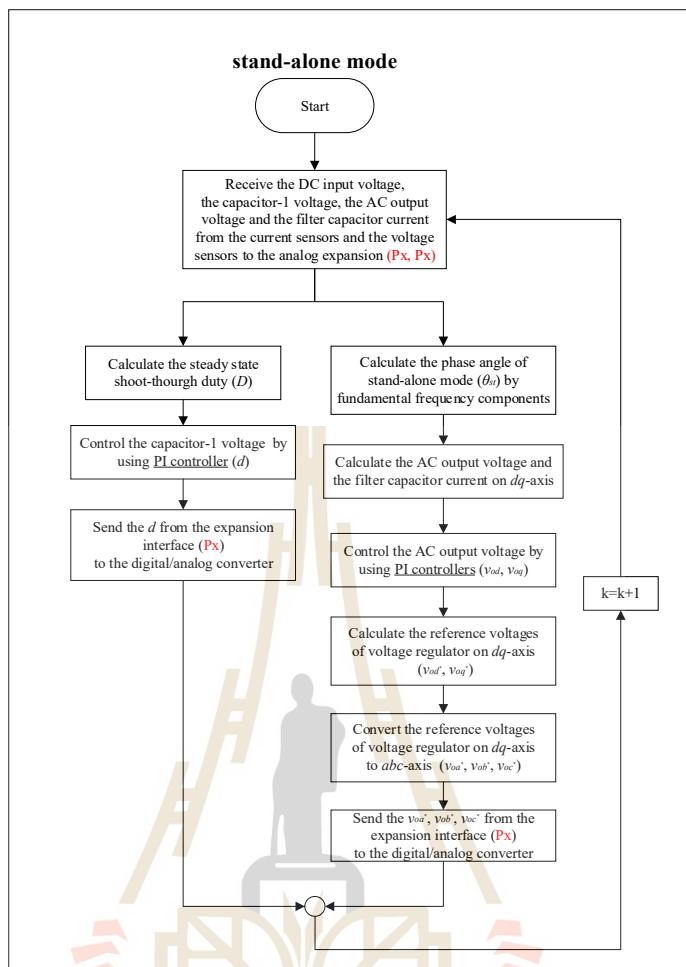


รูปที่ 7.20 มอดูลไอจีบีที3 เฟส IPM6MBP50RA120-55

บอร์ด eZdsp™ F28335 ใช้สำหรับควบคุมวงจรรวมอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ โดยบอร์ด eZdsp™ F28335 มีส่วนประมวลผลกลางรุ่น TMS320C28335 ซึ่งเป็นรุ่นเดียวกับการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปที่มีความเร็วในการประมวลผล 150 MHz และมีความละเอียดของข้อมูลที่ประมวลผล 32 บิต รายละเอียดการใช้งานสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก (ทศพร ณรงค์ฤทธิ์, 2557) นอกจากนี้มีส่วนเชื่อมต่อสัญญาณแอนะล็อก จากภายนอกโดยตรง (analog expansion) จำนวน 30 ช่องสัญญาณ ซึ่งมีขนาดความแยกชัดในแต่ละช่องการรับสัญญาณเท่ากับ 12 บิต โดยมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 4095 ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้ช่องการเชื่อมต่อแอนะล็อกจำนวน 8 ช่องสัญญาณ ได้แก่ ADCINA0 ถึง ADCINA7 สำหรับรับสัญญาณ i_c , v_o , v_m และ v_{c1} จากวงจรปรุงแต่งสัญญาณ ตามลำดับ แสดงได้ดังรูปที่ 7.21 ค่าดังกล่าวจะถูกใช้ในการคำนวณกระแสอ้างอิง การควบคุมกระแสชดเชย และการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ ตามการโปรแกรมสำหรับระบบควบคุมของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ ซึ่งสามารถแสดงแผนภาพการโปรแกรมได้ดังรูปที่ 7.22 และรายละเอียดโค้ดโปรแกรมสามารถดูได้จาก ภาคผนวก จ.



รูปที่ 7.21 โครงสร้างสถาปัตยกรรมบอร์ด eZdsp™ F28335 (ชาคริต ปานแป้น, 2564)



รูปที่ 7.22 แผนภาพการโปรแกรมสำหรับระบบควบคุมของควบคุมของวงจรถวายอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่าย อิมพีแดนซ์แบบควอไซต์โหมดอิสระ

จากรูปที่ 7.22 สามารถอธิบายขั้นตอนการดำเนินการของโปรแกรมสำหรับระบบควบคุมของ วงจรถวายอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ได้ดังนี้

ตัวควบคุมด้านกระแสตรง

ขั้นที่ 1: ประกาศฟังก์ชันสำหรับการใช้งานบอร์ด eZdsp™F28335 และฟังก์ชันมาตรฐาน ของการโปรแกรมด้วยภาษาซี

ขั้นที่ 2: รับค่าแรงดันอินพุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (v_m) และแรงดันของตัวเก็บประจุ (v_{c1}) ซึ่งเป็นสัญญาณแอนะล็อกผ่านทางช่องการเชื่อมต่อแอนะล็อกของบอร์ด eZdsp™F28335

ขั้นที่ 3: กำหนดตัวแปรและค่าเริ่มต้นของตัวแปรสำหรับการคำนวณแรงดันตัวเก็บประจุ อ่างอิง

ขั้นที่ 4: คำนวณค่าวิภูหน้าทีในสภาวะ shoot-through

ขั้นที่ 5: ควบคุมค่าค่าวัฏหน้าที่โดยใช้ตัวควบคุมพีไอ เพื่อรักษาระดับแรงดัน v_{c1}

ขั้นที่ 6: ส่งค่าสัญญาณอ้างอิงค่าวัฏหน้าที่ในการสร้างสัญญาณการสวิตช์ออกจากบอร์ด eZdsp™F28335 ในรูปแบบสัญญาณแอนะล็อก

ตัวควบคุมด้านกระแสกลับ

ขั้นที่ 1: ประกาศฟังก์ชันสำหรับการใช้งานบอร์ด eZdsp™F28335 และฟังก์ชันมาตรฐานของการโปรแกรมด้วยภาษาซี

ขั้นที่ 2: รับค่ากระแสตัวเก็บประจุที่วงจรกรองสัญญาณ (i_c) และค่าแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ (v_o) ซึ่งเป็นสัญญาณแอนะล็อกผ่านทางช่องการเชื่อมต่อแอนะล็อกของบอร์ด eZdsp™F28335

ขั้นที่ 3: กำหนดตัวแปรและค่าเริ่มต้นของตัวแปรสำหรับการคำนวณแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์อ้างอิง

ขั้นที่ 4: คำนวณค่ามอดูเลชันอ้างอิง บนแกนหมุนดีคิว

ขั้นที่ 5: คำนวณค่ากระแสตัวเก็บประจุอ้างอิงของวงจรกรองสัญญาณ (i_c^*) แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ (v_o^*)

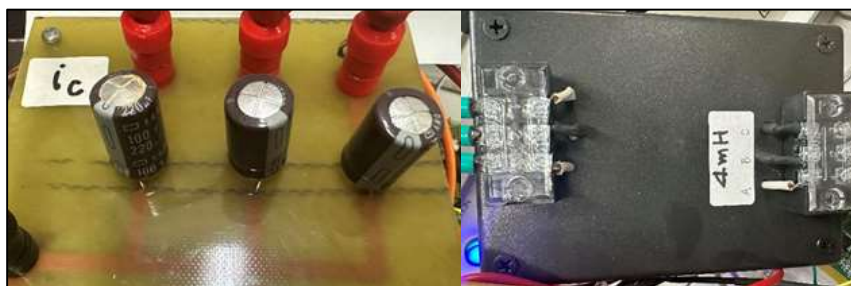
ขั้นที่ 6: ควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ โดยใช้ตัวควบคุมพีไอ ซึ่งรายละเอียดการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอและสามารถศึกษาในบทที่ 5

ขั้นที่ 7: คำนวณค่าสัญญาณอ้างอิงในการสร้างสัญญาณการสวิตช์ ซึ่งใช้การสร้างสัญญาณการสวิตช์การควบคุมบูสต์แบบง่าย

ขั้นที่ 8: ส่งค่าสัญญาณอ้างอิงในการสร้างสัญญาณการสวิตช์ออกจากบอร์ด eZdsp™F28335 ในรูปแบบสัญญาณแอนะล็อก

ส่วนที่ 3: วงจรกรองสัญญาณฝั่งกระแสกลับ

ตัวเก็บประจุของวงจรกรองสัญญาณฝั่งกระแสกลับสำหรับชุดทดสอบนี้ใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาด $220\mu\text{F}$ มีค่าพิกัดแรงดันที่ 100 V จำนวน 3 ตัว และตัวเหนี่ยวนำสำหรับวงจรกรองสัญญาณฝั่งกระแสกลับจะใช้ตัวเหนี่ยวนำสามเฟสขนาด $4\text{mH} / \text{phase}$ มีพิกัดกระแสอยู่ที่ 5 A แสดงได้ดังรูปที่ 7.23



รูปที่ 7.23 วงจรกรองสัญญาณฝั่งกระแสสลับ

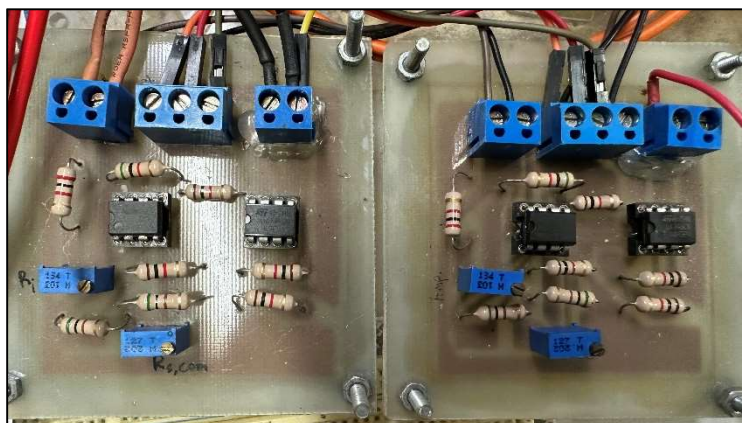
ส่วนที่ 4: ตัวตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า และ ตัวตรวจวัดกระแสไฟฟ้า

ตัวตรวจวัดแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่ตรวจวัดค่าแรงดันไฟฟ้า จากนั้นทำการส่งค่าแรงดันดังกล่าวไปยังวงจรปรุงแต่งสัญญาณ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้หม้อแปลงแท็บกลาง (center-tapped transformer) ชนิดลดแรงดันไฟฟ้า ที่มีพิกัดแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ เท่ากับ 220 V และ 9 V ตามลำดับ ส่วนพิกัดกระแสทางด้านปฐมภูมิมีค่าเท่ากับ 1 A สามารถแสดงหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับตรวจวัดแรงดันได้ดังรูปที่ 7.24 และวงจรปรุงแต่งสัญญาณได้ดังรูปที่ 7.24



รูปที่ 7.24 หม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับตรวจวัดแรงดัน V_{ab} และ V_{bc}

วงจรปรุงแต่งสัญญาณทำหน้าที่ปรับแรงดันไฟฟ้าจากตัวตรวจวัด แรงดันไฟฟ้าและตัวตรวจวัดกระแสไฟฟ้าให้มีรูปสัญญาณอยู่ในช่วงการรับค่าทางไฟฟ้าของบอร์ด eZdsp™ F28335 ที่สามารถรับข้อมูลได้เฉพาะซีกบวก และอยู่ในช่วงแรงดัน 0 ถึง 3.3 V ดังนั้น วงจรปรุงแต่งสัญญาณจึงปรับลดขนาดและยกระดับรูปสัญญาณ V_{ab} และ V_{bc} ให้อยู่ในช่วง 0 ถึง 3.3 V โดยโครงสร้างของวงจรปรุงแต่งสัญญาณประกอบด้วย ออปแอมป์ รุ่น Texas instruments UA741CN และตัวต้านทาน แสดงได้ดังรูปที่ 7.25 สำหรับการออกแบบค่าความต้านทานสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากงานวิจัยของ ภักดี สวัสดิ์นะที (ภักดี สวัสดิ์นะที, 2556)



รูปที่ 7.25 วงจรปรุ่งแต่งสัญญาณ

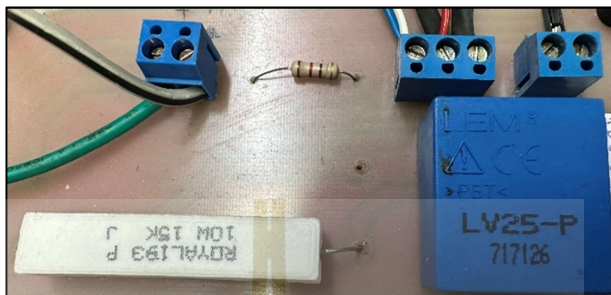
ตัวตรวจวัดกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่วงจรกรองสัญญาณ ใช้ตัวตรวจวัดกระแสไฟฟ้ารุ่น LA55-P ของบริษัท LEM มีลักษณะการใช้งานเป็นแบบคล้องสายไฟลอดผ่านเพื่อตรวจวัดค่ากระแสไฟฟ้า ตัวตรวจวัดกระแสดังกล่าวสามารถตรวจวัดในย่านที่มีค่าติดลบได้นั้นหมายถึงสามารถนำตัวตรวจวัดดังกล่าวมาใช้สำหรับตรวจวัดค่ากระแสทางฝั่งไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส ทั้งนี้ค่าเอาต์พุตของวงจรตรวจวัดกระแสจะต้องทำการปรับแต่งสัญญาณก่อนเข้าสู่บอร์ด ไมโครคอนโทรลเลอร์ เนื่องจากหากวัดค่ากระแสนั้นลบจะได้เอาต์พุตของวงจรตรวจวัดกระแสที่เป็นค่าลบ ซึ่งค่าดังกล่าวยังไม่เหมาะสมในการอ่านค่าเข้าสู่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ การปรับแต่งสัญญาณก่อนเข้าสู่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จะใช้วงจรปรับแต่งสัญญาณในรูปที่ 7.25 และองค์ความรู้ดังกล่าวไปแล้วข้างต้นสามารถแสดงวงจรตรวจวัดค่ากระแสไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 7.26



รูปที่ 7.26 วงจรตรวจวัดค่ากระแสไฟฟ้า

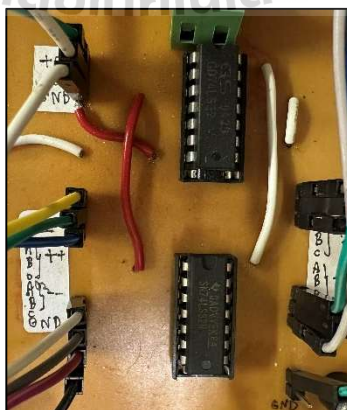
วงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง อินพุตของวงจรคือแรงดันที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ และแรงดันที่ตัวเก็บประจุ C_1 สำหรับเอาต์พุตของวงจรจะขึ้นอยู่กับารออกแบบตัวต้านทานของวงจรซึ่ง

จะทำให้ได้แรงดันเอาต์พุตเพื่อนำไปใช้ในการประมวลผลด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ใช้อุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้ารุ่น LEM LV 25-P ซึ่งวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า กระแสตรงแสดงได้ดังรูปที่ 7.27

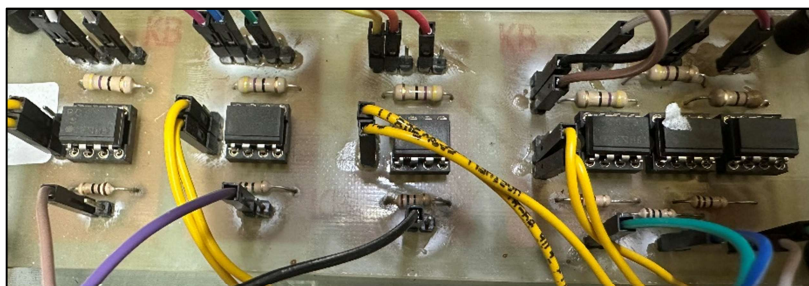


รูปที่ 7.27 วงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า

ส่วนที่ 5: วงจรสร้างสัญญาณการสวิตช์ สำหรับควบคุมการทำงานของไอจีบีที ประกอบด้วย วงจรตรรกะหรือ (or gate circuit) และวงจรขับเคลื่อนเกต (gate drive circuit) จากที่กล่าวไปในบทที่ 4 การควบคุมสัญญาณการสวิตช์อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ ด้วยการควบคุมแบบง่าย เป็นการเปรียบเทียบสัญญาณด้านกระแสตรงและด้านกระแสสลับด้วยวงจร or gate จึงจะได้สัญญาณพัลส์นำไปทริกสวิตช์อินเวอร์เตอร์ไอจีบีที 6 ตัว สามารถแสดงวงจร or gate ได้ดังรูปที่ 7.28 และ วงจรขับเคลื่อนเกตทำหน้าที่สร้างสัญญาณจุดชนวนเกตให้กับอุปกรณ์สวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอดไซดโหมดซิสระ นอกจากนี้วงจรขับเคลื่อนเกตที่นำมาใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ยังทำหน้าที่แยกกราวด์ทางฝั่งแรงดันสูงและฝั่งแรงดันต่ำออกจากกัน แผนภาพวงจรขับเคลื่อนเกตแสดงได้ดังรูปที่ 7.29

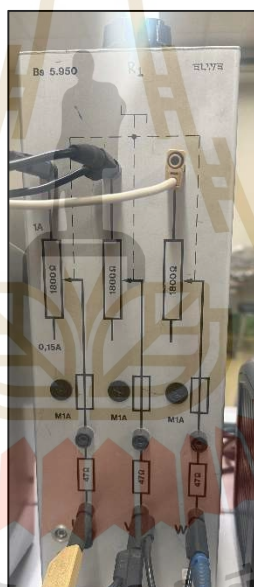


รูปที่ 7.28 วงจร or gate



รูปที่ 7.29 วงจรขับเคลื่อนสำหรับอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์

ส่วนที่ 6: โหลดกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต กำหนดให้โหลดไฟฟ้าคือโหลดความต้านทาน โดยใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ รุ่น Bs 5.950 ของ ELWE ปรับค่าความต้านทานเท่ากับ $20\Omega / phase$



รูปที่ 7.30 โหลดตัวต้านทาน

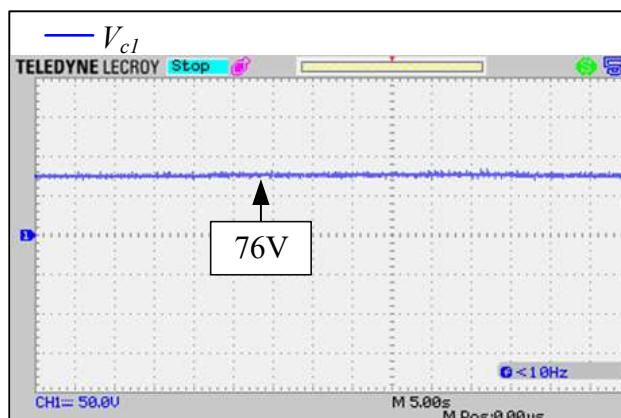
7.5 ผลการทดสอบชุดทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ โหมดอิสระ

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลการทดสอบการควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์โหมดอิสระในห้องปฏิบัติการ โดยสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

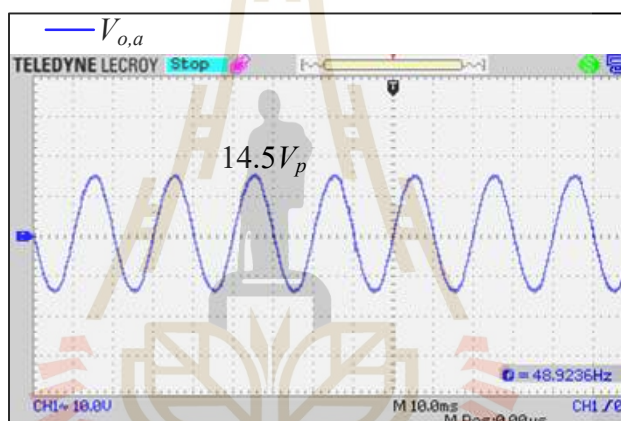
กรณีที่ 1 การทดสอบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ทำงานในโหมดอิสระ และความเข้มแสงมีค่าคงที่ตลอดช่วงการทดสอบ สำหรับการปรับค่าความเข้มแสงที่ส่องลงแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะใช้การปรับค่าแรงดันของหม้อแปลงสามเฟส และทำการวัดความเข้มแสงด้วยเครื่องมือวัดความเข้มแสง (lux meter) ดังแสดงในรูปที่ 7.31 เครื่องมือวัดความเข้มแสงสามารถวัดค่าความเข้มแสงได้ในหน่วยของ lux ซึ่ง 100 lux มีค่าเท่ากับ 1 W/m^2 ดังนั้นหากวัดค่าความเข้มแสงได้ 100,000 lux จะได้ค่าความเข้มแสงในหน่วย W/m^2 มีค่าเท่ากับ 1000 W/m^2 เพื่อยืนยันผลการจำลองสถานการณ์จะทำการทดสอบด้วยชุดทดสอบจริงที่สร้างขึ้นดังนำเสนอในหัวข้อที่ 7.4 สำหรับการทดสอบชุดทดสอบจริงในหัวข้อนี้จะกำหนดค่าแรงดันอ้างอิงของตัวเก็บประจุอ้างอิงมีค่า $v_{c1}^* = 76 \text{ V}$ และแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของอินเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับ $V_{o,a} = 11 \text{ V}_{\text{rms}}$ เนื่องจากการใช้แสงอาทิตย์เทียม เกิดความร้อนจากหลอดไฟ ทำให้ค่ากำลังงานเอาต์พุตที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้มีค่าน้อยกว่าค่าที่วัดที่ระบุในแผงเซลล์แสงอาทิตย์จริง ผู้วิจัยจึงต้องลดค่าแรงดันอ้างอิงลงเพื่อให้เหมาะสมกับการทดสอบชุดทดสอบจริง และใช้ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอของระบบที่พิจารณาดังตารางที่ 7.2 ผลการทดสอบรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ และสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ ที่ความเข้มแสงเท่ากับ 1000 W/m^2 ได้ดังรูปที่ 7.32 และ 7.33 ตามลำดับ และรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ และสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ ที่ความเข้มแสงเท่ากับ 600 W/m^2 แสดงได้ดังรูปที่ 7.34 และ 7.35 ตามลำดับ



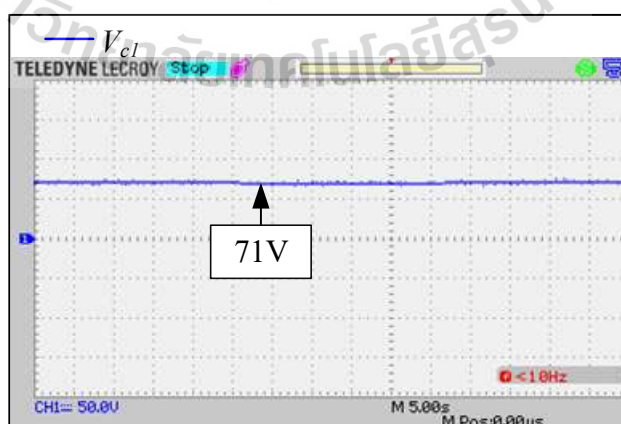
รูปที่ 7.31 เครื่องมือวัดความเข้มแสง (lux meter)



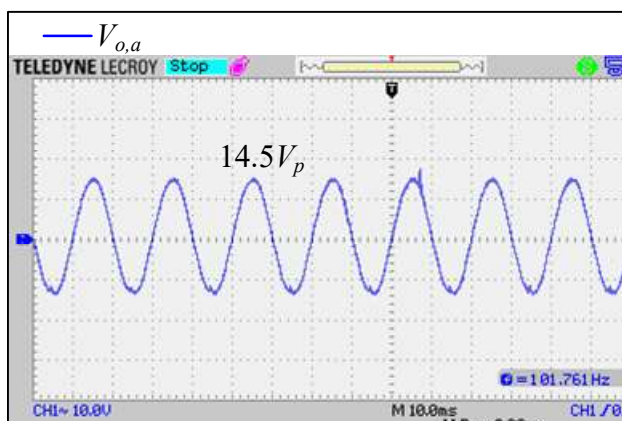
รูปที่ 7.32 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ ที่ความเข้มแสง 1000 W/m^2



รูปที่ 7.33 รูปสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ ที่ความเข้มแสง 1000 W/m^2

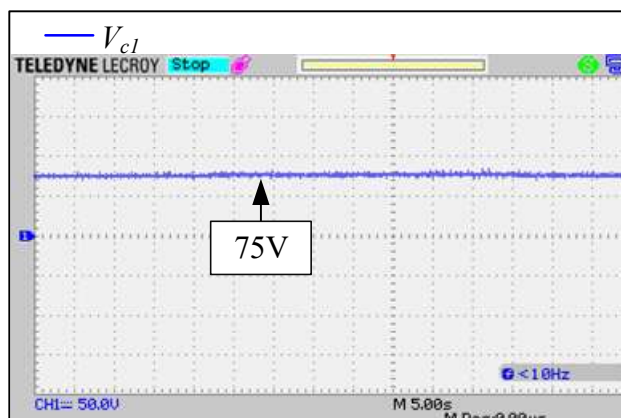


รูปที่ 7.34 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ ที่ความเข้มแสง 600 W/m^2

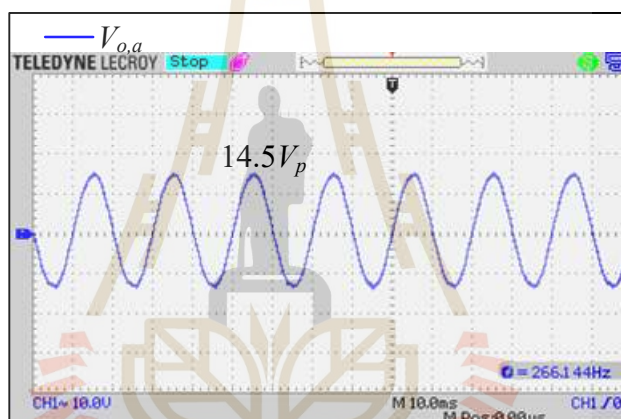


รูปที่ 7.35 รูปสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ ที่ความเข้มแสง 600 W/m²

จากรูปผลการทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ทำงานในโหมดอิสระด้วยตัวควบคุมพีไอ ที่ความเข้มแสงเท่ากับ 1000 W/m² สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุในรูปที่ 7.32 จะเห็นได้ว่า ค่าแรงดันตัวเก็บประจุของระบบทดสอบมีค่าเท่ากับ 76V ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าแรงดันอ้างอิงของตัวเก็บประจุอ้างอิงที่กำหนดไว้ และสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 7.33 มีค่าเท่ากับ $V_{o,a} = 14.5V_p$ และที่ความเข้มแสงเท่ากับ 600 W/m² สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุในรูปที่ 7.34 จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ 71V มีค่าผิดพลาดจากแรงดันอ้างอิงประมาณ 5V เป็นผลมาจากที่ความเข้มแสงเท่ากับ 600 W/m² ค่าแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลง อีกทั้งค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอที่ออกแบบไม่เหมาะสมกับระบบทดสอบที่ความเข้มแสงนี้ ส่วนสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 7.35 มีค่าเท่ากับ $14.5V_p$ และที่ความเข้มแสงเท่ากับ 800 W/m² รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ และสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.36 และ 7.37 ตามลำดับ จากรูปที่ 7.36 จะเห็นได้ว่า ค่าแรงดันตัวเก็บประจุของระบบทดสอบมีค่าเท่ากับ 75 V ซึ่งมีค่าผิดพลาดจากแรงดันอ้างอิงเล็กน้อย และสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 7.37 มีค่าเท่ากับ $V_{o,a} = 14.5V_p$ เท่ากับค่าแรงดันอ้างอิงของอินเวอร์เตอร์ที่ได้กำหนดไว้ในระบบควบคุม



รูปที่ 7.36 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ ที่ความเข้มแสง 800 W/m^2

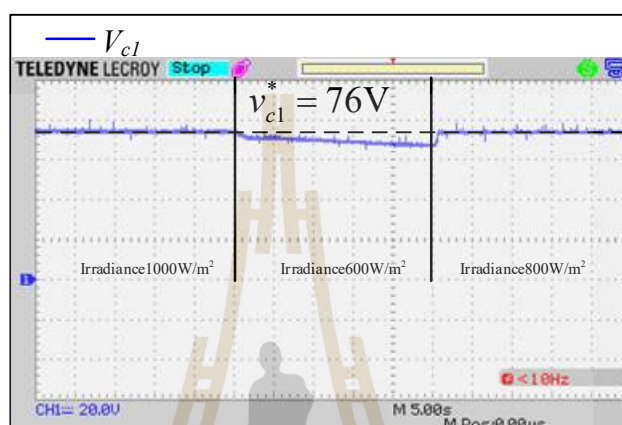


รูปที่ 7.37 รูปสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ ที่ความเข้มแสง 800 W/m^2

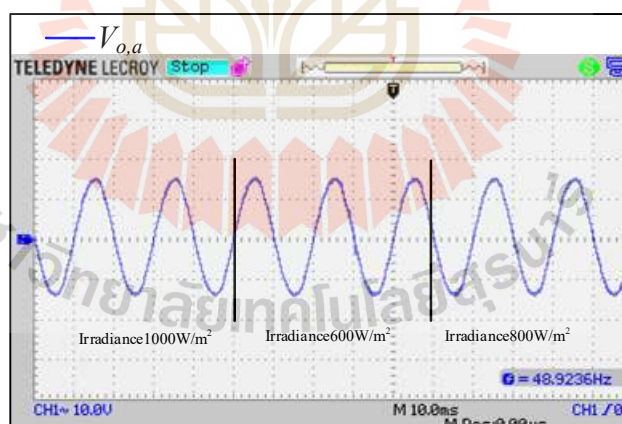
กรณีที่ 2 การทดสอบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอดไซด์ทำงานในโหมดอิสระ ด้วยตัวควบคุมพีไอ และความเข้มแสงมีค่าเปลี่ยนแปลง 1000 W/m^2 600 W/m^2 และ 800 W/m^2 สามารถแสดงรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ และสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ได้ดังรูปที่ 7.38 และ 7.39 ตามลำดับ

จากรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ จะเห็นได้ว่า ค่าแรงดันตัวเก็บประจุอ้างอิงของระบบทดสอบกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 76 V โดยที่ความเข้มแสง 1000 W/m^2 และ 800 W/m^2 ระบบควบคุมสามารถรักษาระดับแรงดันของตัวเก็บประจุได้ ในขณะที่ความเข้มแสง 600 W/m^2 เมื่อเวลาผ่านไป ค่าแรงดันของตัวเก็บประจุจะยังมีค่าลดลง สำหรับสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 7.39 จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มแสงมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ในทุกสภาวะความเข้มแสงก็จะมีค่าเท่ากับ 14.5 V_p และมีความถี่เท่ากับ 50 Hz ค่าแรงดันอ้างอิงของ

อินเวอร์เตอร์ที่กำหนดไว้ในระบบควบคุม แสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ด้วยตัวควบคุมพีไอ ที่ได้นำเสนอสามารถใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ ส่วนการควบคุมค่าแรงดันของตัวเก็บประจุด้วยตัวควบคุมพีไอยังให้สมรรถนะการควบคุมที่ไม่ดีเท่าที่ควรในทุก สภาวะความเข้มแสง ดังนั้นในกรณีถัดไปจะนำเสนอผลการทดสอบชุดทดสอบด้วยตัวควบคุมพีซีซี ที่ได้ นำเสนอองค์ความรู้ไว้ในบทที่ 6

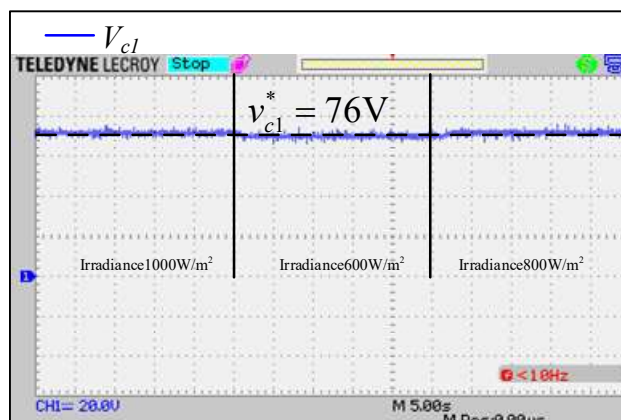


รูปที่ 7.38 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง

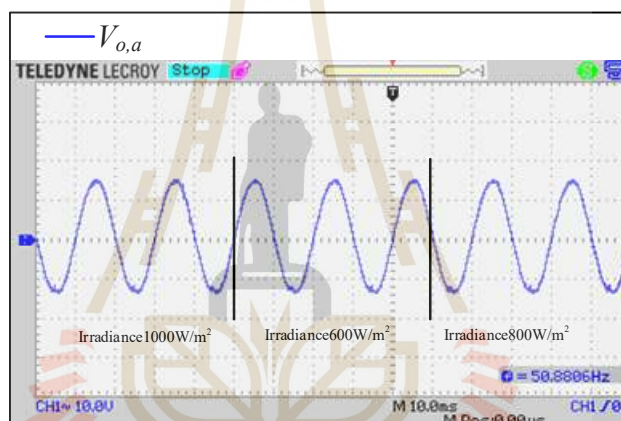


รูปที่ 7.39 รูปสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง

กรณีที่ 3 การทดสอบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ทำงานในโหมดอิสระด้วยตัวควบคุมพีซีซี และความเข้มแสงมีค่าเปลี่ยนแปลง 1000 W/m² 600 W/m² และ 800 W/m² สามารถแสดงรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ และสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ ได้ดังรูปที่ 7.40 และ 7.41 ตามลำดับ



รูปที่ 7.40 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ ควบคุมด้วยตัวควบคุมฟัซซี



รูปที่ 7.41 รูปสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ การทดสอบกรณีที่ 3

การทดสอบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ทำงานในโหมดอิสระด้วยตัวควบคุมฟัซซี จากรูปที่ 7.40 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ จะเห็นได้ว่า ค่าแรงดันตัวเก็บประจุอ้างอิงของระบบทดสอบกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 76V โดยที่ความเข้มแสง 1000 W/m² 600 W/m² และ 800 W/m² ระบบควบคุมด้วยตัวควบคุมฟัซซี สามารถรักษาระดับแรงดันของตัวเก็บประจุได้ ในทุกสภาวะความเข้มแสง สำหรับสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 7.41 แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ในทุกสภาวะความเข้มแสงก็จะมีค่าเท่ากับ $14.5V_p$ และมีความถี่เท่ากับ 50Hz จากผลการทดสอบชุดทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ โหมดอิสระด้วยตัวควบคุมฟัซซี แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมฟัซซีที่ได้ออกแบบและนำเสนอในงานวิจัย วิทยานิพนธ์ สามารถใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ และให้สมรรถนะการควบคุมที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอ

7.6 สรุป

ในบทนี้ ได้นำเสนอแนะนำเทคนิคการจำลองฮาร์ดแวร์ในรูปที่ใช้โปรแกรม Simulink ร่วมกับบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 ด้วยเทคนิคการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวจะให้ผลการจำลองสถานการณ์ใกล้เคียงกับระบบฮาร์ดแวร์จริง นอกจากนี้ยังสามารถตรวจสอบสมรรถนะของระบบควบคุมและตัวควบคุมที่ออกแบบก่อนการดำเนินการสร้างชุดทดสอบจริงจะช่วยป้องกันความเสียหายของอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์และอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบที่พิจารณาได้ การทดสอบจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูประบบทดสอบรับและส่งข้อมูลระหว่างโปรแกรม Simulink และบอร์ด eZdsp™ F28335 ผ่านช่องทางสื่อสาร RTDX ให้ผลการจำลองสถานการณ์ คือ ระบบการทดสอบสามารถรับและส่งข้อมูลได้อย่างถูกต้อง ซึ่งเทคนิคการรับและส่งข้อมูลในระบบทดสอบดังกล่าวจะถูกใช้สำหรับการสร้างระบบการจำลองสถานการณ์วงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป จากผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่า ระบบควบคุมที่นำเสนอสามารถควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ในโหมดอิสระและโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายได้ ซึ่งตัวควบคุมพีซีซีมีสมรรถนะผลการตอบสนองของระบบที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอ โดยการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปมีประโยชน์ในการตรวจสอบความถูกต้องของระบบควบคุม การคาดการณ์ผลกระทบที่เกิดขึ้นก่อนการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับชุดทดสอบหรืออันตรายที่เกิดจากระบบควบคุมและยังสามารถประเมินค่าพิกัด แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังงานไฟฟ้า เพื่อนำไปใช้กำหนดค่าพิกัดของอุปกรณ์ในฮาร์ดแวร์จริง นอกจากนี้ในบทนี้ได้นำเสนอการสร้างชุดทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์โหมดอิสระในห้องปฏิบัติการซึ่งทำการปรับลดพิกัดของชุดทดสอบ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมพีซีซีที่ได้ออกแบบและนำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ สามารถใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ และให้สมรรถนะการควบคุมที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอเช่นเดียวกัน

บทที่ 8

สรุปและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการศึกษาการควบคุมพลังงานแสงอาทิตย์ติดตั้งบนหลังคาที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยเริ่มต้นจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย อินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายและระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย ซึ่งรายละเอียดการค้นคว้าและการศึกษางานวิจัยต่าง ๆ ได้นำเสนอไว้แล้วในบทที่ 2 สำหรับโครงสร้างของระบบผลิตกระแสไฟฟ้าเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า ประกอบด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์และอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์สนใจศึกษาแผงเซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้งบนหลังคาซึ่งการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาเป็นอีกหนึ่งในพลังงานทดแทนที่มีประโยชน์ คุ่มค่าและนำลงทุน สำหรับโรงงาน อาคารธุรกิจ ไร่บ้านพักอาศัย สำหรับอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายซึ่งนำเสนอไว้ในบทที่ 2 และบทที่ 3 พบว่า อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์เหมาะสมกับระบบที่พิจารณาที่สุด โดยมีข้อดี คือ ไม่ต้องต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรมและขนานจำนวนหลาย ๆ แผง กระแสและแรงดันของวงจรไม่ต้องมีค่าสูงมาก อิมพีแดนซ์ในวงจรไม่จำเป็นต้องมีขนาดใหญ่มาก จึงเลือกศึกษาอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ทั้งนี้ได้นำเสนอโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้งแบบจำลองในสถานะอยู่ตัว แบบจำลองพลวัตของระบบ และการควบคุมสัญญาณการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ไว้ในบทที่ 4

สำหรับในบทที่ 5 ได้นำเสนอรายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างการควบคุมอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ทั้งในโหมดอิสระและโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย การออกแบบตัวควบคุมของระบบที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ รวมไปถึงการตรวจสอบความถูกต้องของการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีโลกส์ของรอก โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์เลือกใช้ตัวควบคุมพีไอ เนื่องจากให้ผลตอบสนองของรวดเร็วหรือระบบช่วงเวลาเข้าที่ได้เร็วขึ้น และผลตอบสนองสุดท้ายของกระบวนการเข้าใกล้เป้าหมายมากขึ้นหรือมีความผิดพลาดลดลง อีกทั้งยังได้นำเสนอการจำลองสถานการณ์ของระบบที่พิจารณาบนคอมพิวเตอร์ของระบบที่พิจารณาด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังใน Simulink บนโปรแกรม MATLAB โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมที่ได้จากการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีโลกส์ของรอกอีกด้วย แต่เนื่องจากข้อจำกัดของการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีโลกส์ของรอก ที่

จะต้องใช้ค่าพารามิเตอร์ที่จำเพาะของระบบ และค่าขอบเขตของพิกัดสำหรับระบบที่พิจารณาทำให้การออกแบบตัวควบคุมพีโอสำหรับอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์มีข้อจำกัด ในบทที่ 6 ผู้วิจัยจึงได้นำเสนอการควบคุมแบบฟuzzy หรือฟuzzy ซึ่งเป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะในงานด้านระบบควบคุม เนื่องจากการควบคุมแบบฟuzzyเป็นวิธีการควบคุมที่ชาญฉลาด ไม่จำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองของระบบ แต่จะอาศัยข้อมูล ความรู้ และประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญในระบบที่พิจารณาเป็นพื้นฐานในการออกแบบตัวควบคุมฟuzzy ดังนั้นตัวควบคุมฟuzzyจึงเหมาะนำมาประยุกต์ใช้กับวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ ซึ่งระบบที่พิจารณาใช้ฟังก์ชันสมาชิกอุปสามเหลี่ยมที่มีค่าเชิงภาษาของอินพุต error 3 ค่า ค่าเชิงภาษาของอินพุต error rate 3 ค่า และค่าเชิงภาษาของเอาต์พุต 3 ค่า สามารถออกแบบกฎฟuzzyจำนวน 9 กฎ และวิธีการอนุมานฟuzzyใช้แบบ Takagi-Sugeno ที่มีการทำดีฟuzzyแบบการหาค่าน้ำหนักเฉลี่ย อีกทั้งยังได้ทำการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ของระบบที่พิจารณาด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังใน Simulink บนโปรแกรม MATLAB โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมฟuzzyที่ได้จากการออกแบบตัวควบคุมที่นำเสนอ จากผลการจำลองสถานการณ์ พบว่า ตัวควบคุมฟuzzyที่ได้ทำการออกแบบ สามารถควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์โหมดอิสระและโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายได้ดี และมีสมรรถนะที่ดีกว่าตัวควบคุมแบบพีโอที่ได้อธิบายรายละเอียดการออกแบบไว้ในบทที่ 5

ในบทสุดท้ายได้นำเสนอเทคนิคการจำลองฮาร์ดแวร์ในลูปที่ใช้โปรแกรม Simulink ร่วมกับบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 ด้วยเทคนิคการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวจะให้ผลการจำลองสถานการณ์ใกล้เคียงกับระบบฮาร์ดแวร์จริง และยังสามารถตรวจสอบสมรรถนะของระบบควบคุมและตัวควบคุมที่ออกแบบก่อนการดำเนินการสร้างชุดทดสอบจริง จากผลการจำลองสถานการณ์พบว่า ระบบควบคุมที่นำเสนอสามารถควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ในโหมดอิสระและโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายได้ ซึ่งตัวควบคุมฟuzzyมีสมรรถนะผลการตอบสนองของระบบที่ดีกว่าตัวควบคุมพีโอ โดยการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปมีประโยชน์ในการตรวจสอบความถูกต้องของระบบควบคุม การคาดการณ์ผลกระทบที่เกิดขึ้นก่อนการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับชุดทดสอบหรืออันตรายที่เกิดจากระบบควบคุมและยังสามารถประเมินค่าพิกัด แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังงานไฟฟ้า เพื่อนำไปใช้กำหนดค่าพิกัดของอุปกรณ์ในฮาร์ดแวร์จริง อีกทั้งได้นำเสนอการสร้างชุดทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์โหมดอิสระในห้องปฏิบัติการซึ่งทำการปรับลดพิกัดของชุดทดสอบ จากผลการทดสอบชุดทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมฟuzzyที่ได้ออกแบบและนำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ สามารถใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ และให้สมรรถนะการควบคุมที่ดีกว่าตัวควบคุมพีโอเช่นเดียวกัน

8.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต

1. ควรมีการเพิ่มพิกัดของเซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้งบนหลังคา ที่เป็นแหล่งจ่ายให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ เพื่อปรับปรุงและพัฒนาระบบควบคุมให้มีประสิทธิภาพ และมีผลตอบสนองที่ดียิ่งขึ้น

2. ควรมีการศึกษาต่อยอด และพัฒนา การสร้างชุดทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ ในโหมดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายด้วย

3. ควรมีการพัฒนาตัวควบคุมพีซี วิจารณ์พุต เอาต์พุต และกฎพีซีเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพื่อให้ตัวควบคุมพีซีมีความสามารถในการควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ที่ดีขึ้นในทุกสภาวะความเข้มแสง

4. ควรมีการศึกษาและทดสอบ การควบคุมสัญญาณการสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ด้วยสัญญาณการสวิตช์แบบ อื่น ๆ เพิ่มเติม เช่น MBC MCBC เป็นต้น เพื่อให้เห็นถึงสมรรถนะของวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์

5. ควรมีเพิ่มขนาดพิกัดของชุดทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์ เพื่อให้สามารถรองรับกับการใช้งานระบบที่มีขนาดใหญ่กว่านี้

6. ควรมีงานภาคปฏิบัติสำหรับการควบคุมพลังงานแสงอาทิตย์ติดตั้งบนหลังคาที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า สำหรับอาคารธุรกิจหรือบ้านพักอาศัย เพื่อใช้ยืนยันกับผลการจำลองสถานการณ์ และสามารถใช้เป็นต้นแบบสำหรับการศึกษาวิจัย และพัฒนาระบบให้ดีขึ้นต่อไปในอนาคต

รายการอ้างอิง

- ทศพร ณรงค์ฤทธิ (2557). การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีแบบปรับตัวสำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบสามเฟสสมดุล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทชั้นปริญญาตรีบัณฑิต. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- อาทิตย์ ศรีแก้ว. (2552). ปัญญาเชิงคำนวณ. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- พลสิทธิ์ ศานติประพันธ์. (2554). การควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานด้วยเทคนิคพีดีบีเบิลยูเอ็มบนแกนดีคิว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทชั้นปริญญาตรีบัณฑิต. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- จักรกริช ภัคทีโต. (2561). การบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบโครงข่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กโดยใช้เทคนิคคูลูปยกเล็ก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทชั้นปริญญาตรีบัณฑิต. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- R. Teodorescu, M. Liserre and Pedro Rodriguez (2007). *Grid converters for photovoltaic and wind power systems*. USA, Wiley-IEEE Press.
- Y. Liu et al (2016). *Impedance Source Power Electronic Converters*. USA, Wiley-IEEE Press.
- J. Anderson and F. Z. Peng, Four quasi-Z Source inverters (2008). A direct DC-link boost voltage PID-like fuzzy control strategy in Z-source inverter. *IEEE Power Electronics Specialists Conference*. June: 2743–2749
- F. Z. Peng (2003). Z-source inverter. *IEEE Transaction on Industrial Applications (IEEE IA)*. 39(2): 504-510
- Jingbo Liu, Jiangang Hu and Longya Xu (2007). Dynamic modeling and analysis of Z-source converter: Derivation of AC small signal model and design-oriented analysis. *IEEE Transaction on Power Electronics (IEEE TPEL)*. 22(5): 1786–1796
- Poh Chiang Loh, D.M. Vilathgamuwa, C.J. Gajanayake, Y.R. Lim and C.W. Teo (2007). Transient modeling and analysis of Pulsewidth modulated Z-source inverter. *IEEE Transaction on Power Electronics (IEEE TPEL)*. 22(2): 498–507

- Y. Tang, J. Wei and S. Xie (2010). A new direct peak dc-link voltage control strategy of Z-source inverters. *Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. Feb: 867–872
- Li Yuan, F. Z. Peng and S. Jiang (2010). Controller design for quasi-Z-source inverter in photovoltaic systems. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. Sep: 3187-3194
- W. Mo, P. C. Loh and F. Blaabjerg (2011). Model predictive control for Z-source power converter. *Proc. 8th Int. Conf. Power Electronics*. June: 3022–3028
- Y. Liu, S. Jiang, Jorge G. Cintron-Rivera and F.Z. Peng (2013). Modeling and control of Quasi-Z-source inverter for distributed generation applications. *IEEE Transaction on Industrial Electronics (IEEEIE)*. 60(4): 1532–1541
- G. N. V. Prakash and M. K. Kazimierczuk (2013). Small-signal modeling of open-loop PWM Z-source converter by circuit averaging technique. *IEEE Transaction on Power Electronics (IEEE TPEL)*. 28(3): 1286–1296
- Y. Liu, H. Abu-Rub, B. Ge and F.Z. Peng (2014). An Effective Control Method for Three-Phase Quasi-Z-Source Cascaded Multilevel Inverter Based Grid-Tie Photovoltaic Power System. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 61(12): 6794 - 6802
- C. H. van der Broeck, R.W. De Doncker, S. A. Richter and J. von Bloh (2015). Unified Control of a Buck Converter for Wide-Load-Range Applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 51(6): 775 - 4784
- M. A. Hannan, Z. A. Ghani, A. Mohamed and M. N. Uddin (2015). Real-Time Testing of a Fuzzy-Logic-Controller-Based Grid-Connected Photovoltaic Inverter System. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 51(5): 4061 – 4071
- S. Liu, B. Ge, X. Jiang, H. Abu-Rub and F. Z. Peng (2015). Comparative Evaluation of Three Z-Source/Quasi-Z-Source Indirect Matrix Converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 62(2): 692 – 701
- Q-N. Trinh, F.H. Choo and P.Wang (2017). Control Strategy to Eliminate Impact of Voltage Measurement Errors on Grid Current Performance of Three-Phase Grid-Connected Inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 64(9): 7508 – 7519

- A. M. Bozorgi, H.G. Khesht, M. Farasat, S. Mehraeen and M.Monfared (2018). Model Predictive Direct Power Control of Three-Phase Grid-Connected Converters With Fuzzy-Based Duty Cycle Modulation. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 54(5): 4875 - 4885
- X. Zhang, D. Xia, Z. Fu, G. Wang and D. Xu (2018). An Improved Feedforward Control Method Considering PLL Dynamics to Improve Weak Grid Stability of Grid-Connected Inverters. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 54(5): 5143 – 5151
- B. Hamed and N. A. Qaoud (2019). Fuzzy Control Design for Quasi-Z-Source Three Phase Inverter. *IEEE 7th Palestinian International Conference on Electrical and Computer Engineering (PICECE)*. Mar: 1-6
- P. K. Ray, S.R. Das and A. Mohanty (2019). Fuzzy-Controller-Designed-PV-Based Custom Power Device for Power Quality Enhancement. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 34(1): 405 - 414
- P. Wongyai, K-N. Areerak and K-L Areerak (2019). PI Controller Design Using root-locus For Quasi-Z-Source Inverter. *ECTI-CON 2019*. July:549-552
- R. Ramya; T.S. Sivakumaran (2019). Design And Control Strategies of Quasi – Z Source Inverter For Photovoltaic Power Generation Systems. *International Conference on Devices, Circuits and Systems (ICDCS)*. Mar: 262-266
- A. Kumar and P. Kumar (2021). Power Quality Improvement for Grid-connected PV System Based on Distribution Static Compensator with Fuzzy Logic Controller and UVT/ADALINE-based Least Mean Square Controller. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 9(6): 1289 - 1299
- F.B. Gonzalez, C.R. Clemente and J.G Escalona (2022).Three-Level T-Type Quasi-Z Source PV Grid-Tied Inverter With Active Power Filter Functionality Under Distorted Grid Voltage. *IEEE Access*. 10: 44503 - 44516

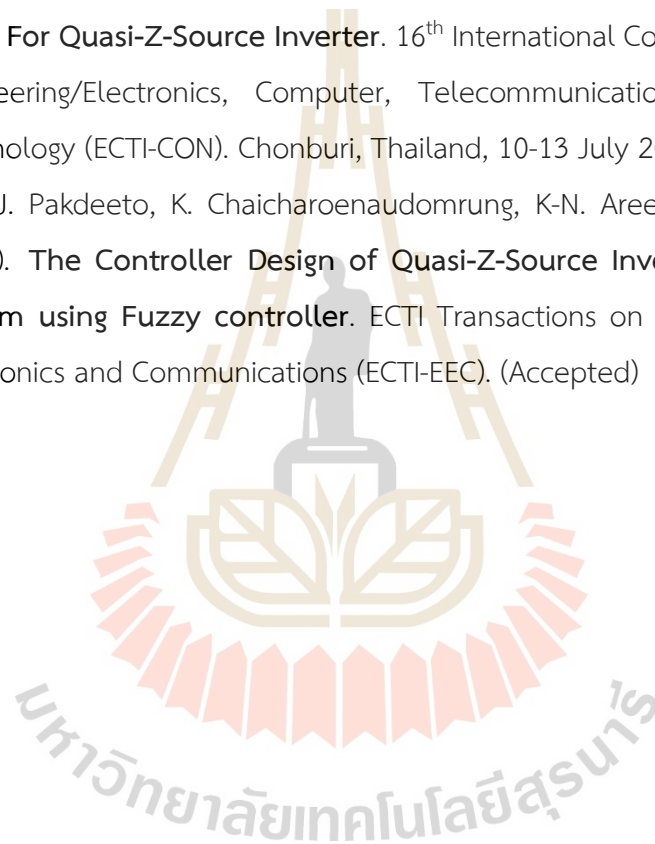


ภาคผนวก ก

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

- C. Thueanpangthaim, P. Wongyai, K-N. Areerak and K-L Areerak. (2017). **The maximum power point tracking for stand-alone photovoltaic system using current based approach**. 5th International Electrical Engineering Congress (iEECON). Chonburi, Thailand, 8-10 March 2017.
- P. Wongyai, K-N. Areerak and K-L Areerak. (2019). **PI Controller Design Using root-locus For Quasi-Z-Source Inverter**. 16th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON). Chonburi, Thailand, 10-13 July 2019, pp. 549-552.
- P. Wongyai, J. Pakdeeto, K. Chaicharoenaudomrung, K-N. Areerak and K-L. Areerak. (2023). **The Controller Design of Quasi-Z-Source Inverter for PV-Rooftop System using Fuzzy controller**. ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics and Communications (ECTI-EEC). (Accepted)



5th International Electrical Engineering Congress, Pattaya, Thailand, 8-10 March 2017

The Maximum Power Point Tracking for Stand-Alone Photovoltaic System using Current Based Approach

Chavaree Thueanpangthaim, Patumporn Wongyai, Kongpan Areerak* and Kongpol Areerak
 Power Electronic, Energy, Machines and Control Research Group
 School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology
 Nakhon Ratchasima, THAILAND
 *kongpan@sut.ac.th

Abstract— This paper presents the maximum power point tracking for stand-alone photovoltaic system using current based technique. This method mitigates the disadvantage of conventional perturb and observe (P&O) technique in term of both transient and steady-state responses. The simulation results show that the proposed current based MPPT technique can provide the maximum power point value closed to the corresponding maximum power of photovoltaic for each irradiance. Both transient and steady state responses are better than those of conventional P&O technique.

Keywords— stand-alone photovoltaic; maximum power point tracking; perturb and observe algorithm; current based maximum power point tracking

I. INTRODUCTION

Presently, solar energy is widely used in the world because it is clean, free and pollution-free. Thailand is located in the subtropical region and possesses excellent sunshine conditions. However, the efficiency of energy conversion of solar energy into electrical energy is still low. Moreover, the receiving energy depend on an environment and connected load. If engineers can control the operating point of photovoltaic to the maximum power point (MPP), the maximize power from the photovoltaic can be achieved.

MPP can be determined by many techniques, such as the solar tracking by rotating solar panels toward the sun or the maximum power point tracking (MPPT) by controllers. The MPPT algorithm for the photovoltaic is simple and widely used. From a literature survey of MPPT, many techniques such as fractional open circuit voltage [1-3], fractional short circuit current [1-3], perturb and observe (P&O) [4-5], current based [6-7], incremental conductance [8], fuzzy logic [3],[9] have been used. However, it can be found that the P&O technique is one of the most commonly used because of simplicity and ease of implementation. The P&O approach is working well when the irradiance changes slowly. However, it presents drawbacks such as slow response, oscillation around the MPP in steady-state, and poor tracking under changing conditions. Therefore, this paper proposes the current based technique that is improved from the current based algorithm in [3] and [4] by concerning ΔP in the algorithm. It is to ensure that the

maximum power point can be achieved. The current reference for the maximum power point can be determined from the proposed approach. After that a PI controller is used to control such current to be equal to the resulting current reference via a buck converter. The results will show that the proposed technique can provide the better transient and steady-state power response.

The paper is structured as follows. The characteristic of photovoltaic is explained in section II. In section III, the algorithm of current based technique is fully presented. The simulation results when the proposed MPPT technique is used are shown in Section IV. Moreover, the comparison results between the P&O method and current based approach are also illustrated in section IV. Finally, the section V concludes the benefit of the proposed current based MPPT technique for stand-alone photovoltaic.

II. CHARACTERISTICS OF PHOTOVOLTAIC

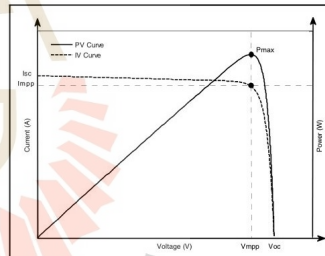


Fig. 1. I-V and P-V characteristics of photovoltaic

Characteristics of photovoltaic are depicted in Fig. 1 in which the I-V and P-V curves of photovoltaic are tested at 25°C and 1,000W/m² as the standard condition. As can be seen in Fig. 1, each irradiance can provide only one MPP. The MPPT is used to control the system operated around MPP. The voltage and current at MPP are set as V_{mpp} and I_{mpp} , respectively. It can be seen from the I-V curve, the MPP is changed when temperature and irradiance are changed. It is important to operate photovoltaic at the maximum power

978-1-5090-4666-9/17/\$31.00 ©2017 IEEE

5th International Electrical Engineering Congress, Pattaya, Thailand, 8-10 March 2017

condition. The proposed method will control the current of photovoltaic at I_{mpp} . As a result, the MPP can be achieved.

III. PROPOSED CURRENT BASED MPPT

A. MPPT for stand-alone photovoltaic system

The MPP can be determined by the MPPT. The MPPT is a technique commonly used with photovoltaic systems to maximize power extraction under all conditions. MPPT for stand-alone photovoltaic system is shown in Fig. 2 in which the MPP is determined from the MPPT algorithm. The DC/DC converter is used to convert DC output voltage from PV panel to the voltage level suitable for feeding battery or load. In this paper, 40W PV panel, buck converter, and 12V battery are used. As for MPPT algorithm, the proposed current based technique is applied.

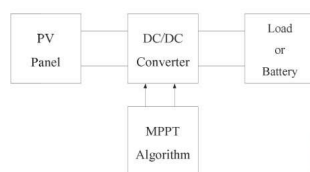


Fig. 2. Maximum power point tracking for stand-alone photovoltaic system

B. P&O technique

For P&O technique [1], PV panel voltage is perturbed by changing the duty ratio (ΔD_{step}) of DC/DC converter. To achieve the maximum power, PV panel voltage is increased or decreased. If ΔD_{step} is set as a high value, the transient response will be fast. However, the oscillation in power response at steady-state will be occurred. In contrast, if ΔD_{step} is set as a small value, the transient response is very slow. The disadvantage of changing ΔD_{step} is that the varying duty ratio of DC/DC converter affects to the PV power indirectly. As a result, the maximum power value may be incorrect as expected. Therefore, this paper presents a current based MPPT technique to handle such problem. A current based technique uses a current ratio (ΔI_{step}) instead of the duty ratio because changing the current ratio can affect to the PV power directly. As a result, this technique can provide smooth and fast transient response.

C. Current based technique

As can be seen in P-I curve of Fig. 3, if the operating point of the system is initially assumed at B. To achieve the MPP at A, the operating point at B is moved to A. For this case, both ΔP and ΔI are positive that result in $\Delta P/\Delta I > 0$. The PV panel current should be increased by $I_{pv} + \Delta I_{step}$ until $I_{pv} = I_{mpp}$. If the operating point of the system is initially assumed at C, To achieve the MPP at A, the operating point at C is moved to A. For this case, ΔP is positive, while ΔI is negative that result in $\Delta P/\Delta I < 0$. The PV panel current should be decreased by $I_{pv} - \Delta I_{step}$ until $I_{pv} = I_{mpp}$. In case of irradiance variation, the P-I

curve is depicted in Fig. 4. The operating point is initially assumed at the MPP for I_1 at B. If the irradiance is increased to I_2 , the MPP will be changed to A. The operating point should be changed from B to A by using the same condition, here is increasing current. In contrast, if the irradiance is decreased, the PV current should be decreased.

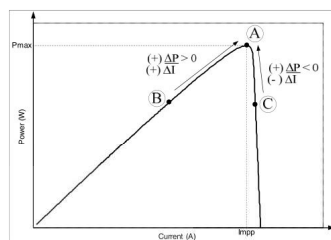


Fig. 3. P-I curve of PV panel for current based

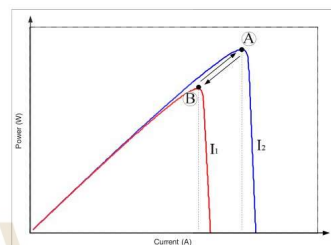


Fig. 4. P-I curve for irradiance variation

As for temperature variation, the V-I curve of PV panel will be considered as shown in Fig. 5. The initial operating point is assumed at D that is the MPP of T_1 . If the temperature is increased from T_1 to T_2 , the MPP is changed to E. Therefore, the operating point should be changed from D to E ($\Delta V_{pv} < 0$) by increasing the PV current. In contrast, if the temperature is decreased ($\Delta V_{pv} > 0$), the PV current must be decreased to achieve the new MPP.

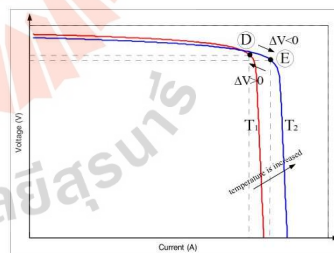


Fig. 5. V-I curve for temperature variation

The flow chart of current based algorithm is depicted in Fig. 6 as follows:

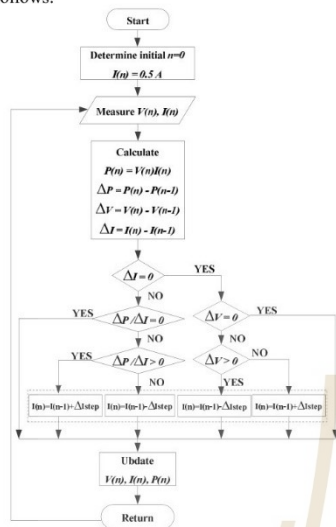


Fig. 6. Flowchart of current based MPPT

IV. SIMULATION RESULTS

The considered system is shown in Fig. 7. It consists of PV panel, MPPT current based controller, buck converter feeding 12V battery. The current and voltage of PV panel are measured into the current based algorithm. The proposed algorithm will provide the reference current in which the MPP can be obtained. The PI controller will provide the control signal for adjusting the pulse for the switch *S* of buck converter to achieve the PV current following on the reference.

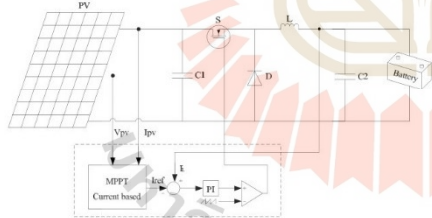


Fig. 7. The considered system

In order to show the feasibility and performance of the proposed current based technique, the system of Fig. 7 is simulated via the SIMULINK and MATLAB with the PV module conditions as given in Table I and parameters of buck converter as given in Table II.

TABLE I. SPECIFICATION OF PV MODULE

Parameter	Value	Details
V_{oc}	43.125 V	Open circuit voltage
I_{sc}	1.1 A	Short circuit current
V_{mpp}	38.73 V	Maximum power point voltage
I_{mpp}	1.033 A	Maximum power point current
P_{max}	40 W	Rated maximum power (W)

TABLE II. PARAMETER OF BUCK CONVERTER

Parameter	Value	Details
C_1	100 μ F	Capacitor
C_2	2200 μ F	Capacitor
L	10 mH	Inductance
f_{sw}	10 kHz	Switching frequency
V_{batt}	12 V	Output voltage

The simulation results of the system in Fig. 7 with current based algorithm are shown in Fig. 8. Step changes of irradiance equal to 600, 400, 500, 1000 and 800 W/m^2 at temperature 25°C are applied. At irradiance equal to 1000 W/m^2 , PV panel can generate power 40W in which this value is the MPP for 1000 W/m^2 . If irradiance is decreased or increased, the proposed technique can track the power and the MPP can be obtained.

The comparison results between P&O and current based technique are shown in Fig. 9 in which a step change of irradiance equal to 500, 1000 and 750 W/m^2 at temperature 25°C is applied. It can be seen that the proposed algorithm can provide the better transient performance compared with P&O technique. Moreover, for the steady-state response, oscillation around the MPP is occurred for P&O method. The error of MPP in steady-state under changing conditions can be also found. In contrast, the current based technique can provide the faster response as well as a good accuracy in steady-state response.

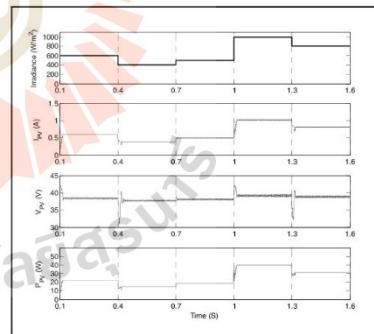


Fig. 8. Simulation results of current based technique

5th International Electrical Engineering Congress, Pattaya, Thailand, 8-10 March 2017

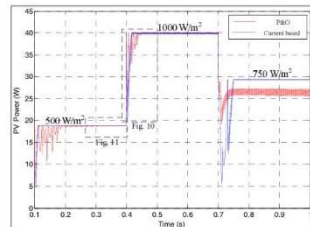


Fig. 9. Simulation result of compare P&O and current based

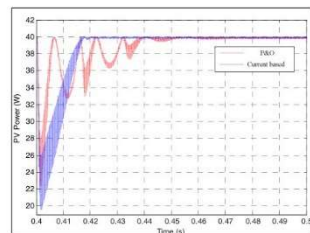


Fig. 10. Power transient at irradiance 1000 W/m²

The zoom area of transient response for 1000W/m² is shown in Fig. 10. It can be seen that the current based method can provide the better transient response than those from the P&O method. As for steady-state response, the zoom area of power response for 500W/m² is considered as depicted in Fig.11. The high oscillation is occurred when the P&O method is applied. Moreover, the power delivered from PV panel from the P&O method is lower than those from the proposed MPPT method.

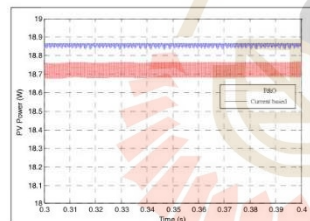


Fig. 11. Steady-state power at irradiance 500 W/m²

The percentage of increased power when using P&O and current based MPPT technique compared with the system without MPPT technique can be calculated by (1).

$$\frac{P_{MPPT} - P_{without}}{P_{without}} \times 100\% \quad (1)$$

where P_{MPPT} is the power from the MPPT methods, while $P_{without}$ is the power for the system without MPPT algorithm.

As for the irradiance equal to 500, 750 and 1000 W/m², the power of photovoltaic without MPPT technique equal to 6.42,

9.72, 13.01 W, respectively. As a result, the percentage of increased power following on (1) is given in TABLE III. It can be seen that the current based approach can provide maximum power for each irradiance, especially the power at irradiance equal to 750 W/m².

TABLE III. PERCENTAGE OF INCREASED POWER

Irradiance(W/m ²)	P&O		Current based	
	P_{MPPT} (W)	% of increased power	P_{MPPT} (W)	% of increased power
500	18.7	191.27	18.87	193.92
750	26.35	171.09	29.37	202.16
1000	40	206.98	40	206.98

V. CONCLUSION

The paper presents the current based MPPT technique for maximize the PV panel power of stand-alone photovoltaic. The simulation results show that the maximum power point can be obtained via the proposed current based MPPT technique. The transient and steady-state responses of PV power are better than those of P&O technique.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by Suranaree University of Technology (SUT).

REFERENCES

- [1] Trishan Eswam and Patrick L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques", in IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 22, No. 2, June 2007.
- [2] Ali F Murtaza, Hadeed Ahmed Sher, Marcello Chiaberge, Diego Boero, Mirko De Giuseppe and Khaled E Addowesh, "Comparative Analysis of Maximum Power Point Tracking Techniques for PV applications", Pakistan, Saudi Arabia and Italy, pp. 83-88, IEEE 2013.
- [3] Mei Shan Ngan and Chee Wei Tan, "A Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms for Stand-alone Photovoltaic Systems", in IEEE Applied Power Electronics Colloquium (IAPEC), Johor Bahru, Malaysia, pp.22-27, April 2011.
- [4] Patumporn Wongyai, kongpan Arerak and Kongpol Arerak, "Perturb and Observe MPPT for Stand-alone Photovoltaic," The 38th Electrical Engineering Conference (EECON-38), Ayutthaya, 18-20 November 2015.
- [5] R. Boukenoui, R. Bradai, A. Mellit, M. Ghanes and H. Salhi, "Comparative Analysis of P&O, Modified Hill Climbing-FLC, and Adaptive P&O-FLC MPPTs for Microgrid Standalone PV System", in 4th International Conference on Renewable Energy Renewable Energy Research and Applications, Palermo, 22-25 Nov 2015, pp. 1095-1099.
- [6] Hanju Cha and Sanghoey Lee, "Design and Implementation of Photovoltaic Power Conditioning System using a Current based Maximum Power Point Tracking," Chungnam National University/Department of Electrical Engineering, Korea, 2008.
- [7] Alivarani Mohapatra1, Byamaksh Nayak2, and K.B.Mohanty3, "Current Based Novel Adaptive P&O MPPT Algorithm for Photovoltaic System Considering Sudden Change in the Irradiance", in IEEE International Conference on Power Electronics, 2014.
- [8] J. William Christopher and Dr.R.Ramesh, "Comparative Study of P&O and InC MPPT Algorithms", in American Journal of Engineering Research (AJER), Volume-02, Issue-12, pp. 402-408, 2013.
- [9] L. Bouselham and B. Hajji, H. Hajji, "Comparative Study of Different MPPT Methods for Photovoltaic System", ENSA-UMP, Morocco, BP 669, 60000 oujda, 2015.

PI Controller Design Using root-locus For Quasi-Z-Source Inverter

Patumporn Wongyai

Power electronics, Energy, Machines,
and Control (PEMC) Research Group
Suranaree University of Technology
Nakhon Ratchasima, THAILAND
tall_pa@hotmail.com

Kongpan Areerak

Power electronics, Energy, Machines,
and Control (PEMC) Research Group
Suranaree University of Technology
Nakhon Ratchasima, THAILAND
kongpan@sut.ac.th

Kongpol Areerak

Power electronics, Energy, Machines,
and Control (PEMC) Research Group
Suranaree University of Technology
Nakhon Ratchasima, THAILAND
kongpol@sut.ac.th

Abstract—This paper presents a design of proportional-Integral (PI) controller using root-locus technique for a quasi-Z-source inverter (qZSI) in two mode operations: stand-alone and grid-connected. Controller design for qZSI is separated into two-stage controls which are DC side and AC side in both two mode operations. For the DC side of the converter, PI controller are designed through decoupling capacitor. As for the AC side, the voltage and current regulations are used for stand-alone operation and grid-connected operation, respectively. Simulation results via the exact topological model of MATLAB are used to verify the effectiveness of the proposed control design.

Keywords—PI controller; root-locus; quasi-z-source inverter

I. INTRODUCTION

Quasi-Z-source inverter has been developed from the original Z-source inverter (ZSI) [1]. The qZSI is composed of dc-dc converter and voltage-source inverter that are combined into a single-stage buck/boost inverter. The qZSI is designed to reduce an impedance rating and to keep the continuous current operation. The qZSI has two operation states, the non-shoot-through state (i.e. the six active states and two conventional zero states) and the shoot-through state (i.e. both switches in at least one phase conduct simultaneously). The equivalent circuits of voltage-fed qZSI with continuous input current for PV application (renewable energy sources) are shown in Fig. 1. This qZSI consists of two LC filters and single diode connected to the AC loads or grids via the three-phase inverter bridge. The operation of the qZSI depends on the parameters of two inductors, two capacitors and diode as well as a switching technique.

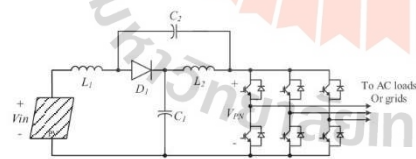


Fig. 1. The qZSI with continuous input current for PV application

The qZSI with a closed-loop control is developed from a two-stage DC-DC converter cascaded with DC-AC structure [2-3]. Therefore, the control of qZSI is separated into two stages which are DC side and AC side. The DC side is controlled via shoot-through duty ratio (d_o), while the AC side is controlled by the modulation index (M). The switching technique for qZSI is based on sinusoidal pulse width modulation (SPWM) operated with the shoot-through references. These references can be computed from a simple boost control (SBC), maximum boost control (MBC), and maximum constant boost control (MCBC) [4-5]. In this paper, the SBC is selected because it is very simple.

There are many conventional controller design methods such as phase lead-lag compensator, bode plot and root-locus methods [6]. However, the root-locus technique can directly represent the time-domain responses of the proposed system. Therefore, this technique is used in the paper. As a result, mathematical model of the proposed system is required. The dynamic model used in the design process is the small-signal model [7].

This paper presents the details of dynamic modeling, structure of stand-alone and grid-connected mode controller, two-stage design control method for qZSI by using root-locus design. Finally, simulation results are presented as the validation of the proposed control design.

II. DYNAMIC MODELING OF QUASI-Z-SOURCE INVERTER

The qZSI has two operation states. When the system operates at shoot-through state, the AC load terminals are shorted through both upper and lower devices of any phase legs. As a result, the single switch is ON and the equivalent circuit of the qZSI for this case is shown in Fig. 2 (a). When the system operates at non-shoot-through state, the single switch is OFF as shown in Fig. 2 (b).

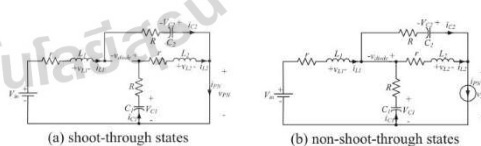


Fig. 2. Equivalent circuit of quasi-Z-source network.

Assume that $C = C_1 = C_2$, $L = L_1 = L_2$ and r is a resistance of inductor and R is a resistance of capacitor. In addition, shoot-through period is defined as T_0 and T_1 is for the non-shoot-through period. Hence, the switching period $T_s = T_0 + T_1$ and the shoot-through duty ratio (d) is equal to T_0 / T_s .

As for small-signal model, the small perturbation of state variables, input signals, and shoot-through duty cycle are denoted by $\hat{x} = [\hat{i}_{L1} \ \hat{i}_{L2} \ \hat{v}_{c1} \ \hat{v}_{c2}]^T$, $\hat{u} = [\hat{v}_{in} \ \hat{i}_{PN}]^T$ and \hat{d} , respectively. The small-signal model can be represented in shoot-through and non-shoot-through states by

$$F\hat{x} = \mathbf{A}\hat{x} + \mathbf{B}\hat{u} + [(\mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_2) \cdot X(\mathbf{B}_1 + \mathbf{B}_2) \cdot U] \hat{d} \quad (1)$$

$$= \begin{bmatrix} -(R+r) & 0 & d-1 & d \\ 0 & -(R+r) & d & d-1 \\ 1-d & -d & 0 & 0 \\ -d & 1-d & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_{L1} \\ \hat{i}_{L2} \\ \hat{v}_{c1} \\ \hat{v}_{c2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & (1-d)R \\ 0 & (1-d)R \\ 0 & d-1 \\ 0 & d-1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{v}_{in} \\ \hat{i}_{PN} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{c1} + V_{c2} - I_{pm}R \\ V_{c1} + V_{c2} - I_{pm}R \\ -I_{L1} - I_{L2} + I_{PN} \\ -I_{L1} - I_{L2} + I_{PN} \end{bmatrix} \hat{d}$$

Taking the Laplace-transform into Eq. (1), the small-signal model diagram of the quasi-Z-source network can be shown in Fig. 3.

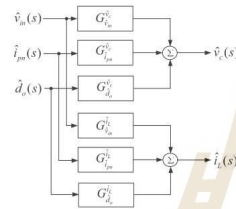


Fig. 3. The small-signal model diagram of the quasi-Z-source network.

The details of transfer functions appeared in Fig. 3 as given in (2)-(7).

$$G_{v_d}^c = \frac{(1-D_s)(1-2D_s) - LCs^2(1-D_s)}{(LCs^2 + 1)(LCs^2 + (1-2D_s)^2)} \quad (2)$$

$$G_{v_d}^s = \frac{R(1-D_s)(1-2D_s) - (1-D_s)(Ls+r+R)}{LCs^2 + C(r+R)s + (1-2D_s)^2} \quad (3)$$

$$G_{i_d}^c = \frac{(V_{c1} + V_{c2} - RI_{pm})(1-2D_s) + (I_{pm} - I_{L1} - I_{L2})(Ls+r+R)}{LCs^2 + C(r+R)s + (1-2D_s)^2} \quad (4)$$

$$G_{i_d}^s = \frac{[(LCs^2 + D_s) + (1-D_s)(1-2D_s)]Cs}{LCs^2 + (1-2D_s)^2} \quad (5)$$

$$G_{v_v}^c = \frac{R(1-D_s)Cs + (1-D_s)(1-2D_s)}{LCs^2 + C(r+R)s + (1-2D_s)^2} \quad (6)$$

$$G_{v_v}^s = \frac{(V_{c1} + V_{c2} - RI_{pm})Cs + (I_{pm} - I_{L1} - I_{L2})(1-2D_s)}{LCs^2 + C(r+R)s + (1-2D_s)^2} \quad (7)$$

III. THE ROOT-LOCUS TECHNIQUE FOR THE CONTROLLER DESIGN OF QZSI

The overall system configuration of the proposed qZSI is depicted in Fig.4. It can be seen that qZSI has two mode operations, stand-alone mode (Breaker is OFF or "0") and grid-connected mode (Breaker is ON or "1"). In the case of stand-alone mode as shown in Fig. 4 (a), the capacitor voltage v_{c1} is regulated for the DC side control in which the PI controller is applied. As for the AC side control, the voltage regulator block is used in which the terminal output voltage of inverter is controlled on the $d-q$ axis. In the case of grid-connected mode as shown in Fig. 4 (b), the maximum power point tracking (MPPT) is applied including the PI controller for the DC side control. As for AC side control, the grid current magnitude is controlled by using the PI controller and the current regulator block.

A. Controller Design for stand-alone mode

As can be seen from Fig.4 (a), the PI controller for the capacitor voltage control PI_{vd} can be designed by using $G_{v_d}^c$ and block diagram as shown in Fig. 5.

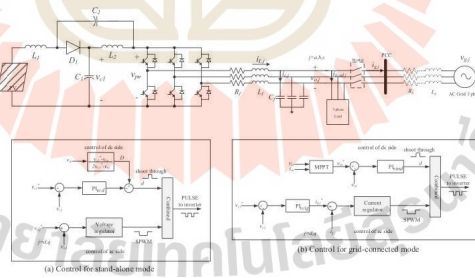


Fig. 4. System configuration of the proposed qZSI.

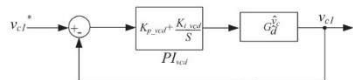


Fig. 5. Block diagram of DC side control design for stand-alone mode.

The root-locus in term of pole-zero map is used for the design. It depends on K_p and K_i parameters in which K_p and K_i represent proportional and integral controls, respectively. In the DC side control for stand-alone mode, K_{p_vcd} is varied from 0.001 to 0.1 and K_{i_vcd} is fixed equal to 0.1. The qZSI parameters of proposed system are $L = 500 \mu\text{H}$, $C = 400 \mu\text{F}$, $R = 0.03 \Omega$, $r = 0.47 \Omega$, $D = 0.25$, $I_{load} = 9.9 \text{ A}$, $V_{in} = 130 \text{ V}$, $M = 0.75$, $L_f = 4 \text{ mH}$, $C_f = 50 \mu\text{F}$, $R_f = 0.03 \Omega$, $L_g = 10 \mu\text{H}$ and $R_g = 0.2 \Omega$. The root-locus by using MATLAB for this case is shown in Fig. 6 (a).

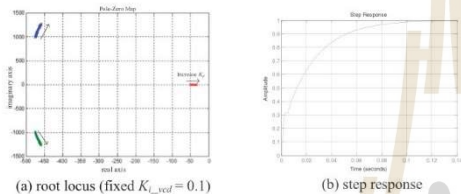


Fig. 6. Root locus and step response of DC side control for stand-alone mode.

The pole location can be determined from the damping ratio and the settling time. The critically damped is required so as to achieve $\zeta = 1$. The settling time (T_s) is also determined equal to 0.1 s. As a result, the pole location is a real pole at $s = -40$. For this location, the K_{p_vcd} gain is equal to 0.00468. The step response when the system uses the $K_{p_vcd} = 0.00468$ and $K_{i_vcd} = 0.1$ is given in Fig. 6 (b). The critically damped and the settling time can be achieved following the requirement.

For the AC side control, the multi-loop control is applied for the voltage regulator block in stationary frame as shown in Fig. 7.



Fig. 7. Block diagram of voltage regulator AC side control for stand-alone mode.

The Mason's gain rule was used to obtain the open-loop and closed-loop transfer functions of Fig. 7. The damping ratio is set equal to 1 to obtain the critically damped as same as the DC side control, while the settling time is defined equal to 0.001s. As a result, the pole location is at -4000. The K_{p_ic} is equal to 16 designed from this pole location. After that, K_{p_vo} is varied for 0.00001 to 0.1 and K_{i_vo} is fixed to 20. The root locus of AC side control is shown in Fig. 8(a). The

critically damped and the settling time equal to 0.01s., the pole location is at -400. From Fig. 8(a), the K_{p_vo} equal to 0.005. Therefore, the step response when the system uses the fixed K_{p_ic} and K_{i_vo} with the selected K_{p_vo} equal to 0.005 is presented in Fig. 8(b). The critically damped and settling time equal to 0.0103s. can be obtained.

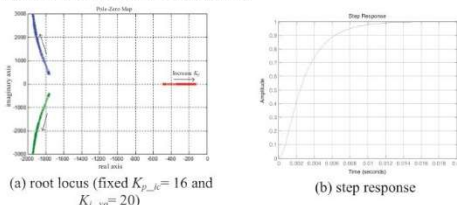


Fig. 8. Root locus and step response of AC side control for stand-alone mode.

B. Controller Design for grid-connected mode

The PI controller for the maximum power point tracking is designed by the small signal model of G_d^i and G_L^{vo} . The DC side control block diagram for grid-connected mode is shown in Fig. 9.

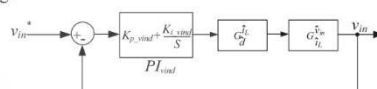


Fig. 9. DC side control block diagram for grid-connected mode.

In the DC side control for grid-connected mode, K_{p_vind} is varied from 0.0001 to 0.1 and K_{i_vind} is fixed to 0.001. The root locus of DC side control is shown in Fig. 10(a). The critically damped and the settling time equal to 0.1s. are determined to locate the pole. Thus, the pole location is at -40. K_{p_vind} results in 0.0017. The step response for this case is presented in Fig. 10(b). The critically damped and settling time equal to 0.106s. can be followed the requirement. However, the effect from other poles is occurred in the transient response in which this effect can be acceptable.

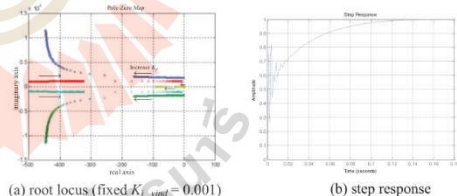


Fig. 10. Root locus and step response of DC side control for grid-connected mode.

For AC side control, the capacitor voltage is also controlled by using the PI controller. The block diagram for the design of such PI controller can be shown in Fig. 11. It can

be seen that the small signal model of $G_{v_{cl}}^{dc}$ and the transfer function of grid current magnitude ($T(i_g^{load})$) are included in the block diagram. As for the grid current control, the block diagram for the design is shown in Fig. 12.

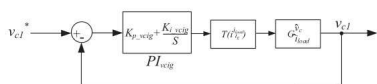


Fig. 11. Block diagram for the design of capacitor voltage control.

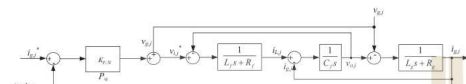


Fig. 12. Block diagram for the design of grid current control.

For the design process, $K_{p,vcig}$ is varied from -0.001 to -1 and $K_{i,vcig}$ is fixed to -50. The critically damped and the settling time equal to 0.1s. are required. Thus, the pole location is at -40. $K_{p,vcig}$ results in -0.344. The step response of capacitor voltage control is presented in Fig. 13(a). The critically damped and settling time equal to 0.0892s. can be followed the requirement. As for the grid current control, $K_{p,ig}$ is varied from 0.001 to 1. The critically damped and the settling time equal to 0.01s. are required. Hence, the pole location is at -400. $K_{p,ig}$ equal to 0.153. The step response of grid current control is shown in Fig. 13(b). The critically damped and settling time equal to 0.01s. can be followed the requirement.

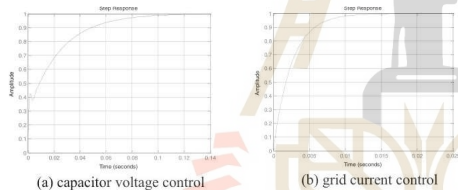


Fig. 13. step response of AC side control for grid-connected mode.

IV. SIMULATION RESULTS

Simulation results are used to confirm the proposed controller design by using the root-locus technique. The qZSI system is simulated by using the system parameters from Section III with the system output frequency $f = 50$ Hz, switching frequency $f_s = 10$ kHz, and the command value of v_{cl}^* equal to 340V.

Simulation conditions are divided into two modes: stand-alone mode at $0 < t \leq 0.3$ s. and grid-connected mode at $0.3 < t \leq 0.6$ s.. The simulation results are shown in Fig. 14., It can be seen the command value of AC output voltage is $v_o^* = 120V_{rms}$, while the command value of v_{cl}^* is equal to

340V, and load current $i_{load} = 9.9A$ (AC load). For grid-connected mode, the maximum power point can be achieved by the MPPT controller. As a result, the current output from this mode is more than that from the stand-alone mode. From the simulation results of Fig. 14, the proposed system can be controlled via the qZSI designed by the proposed technique. The good transient and steady-state responses can be achieved.

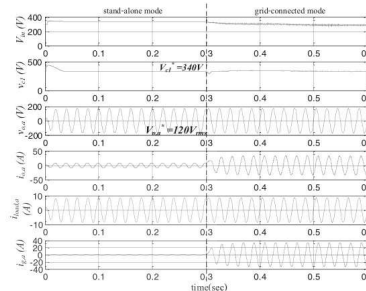


Fig. 14. simulation results two modes operation.

V. CONCLUSIONS

In this paper, the PI controller is designed by using the root-locus technique in which the small-signal models for a qZSI are also used in the design process. The proposed design technique is very useful. The engineers can use software package of MATLAB during the design process. The simulation results confirm that the good transient and steady-state responses can be achieved.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the research fund from Suranaree University of Technology, Thailand.

REFERENCES

- [1] Fang, Z. P. (2003). Z-source inverter. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 39(2), 504-510.
- [2] Yuan, L., Joel, A., & Fang, Z. P., Dichen, L. (2011). Modeling and SVPWM control of quasi-Z-source inverter. *IEEE 2011 Conference: 11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation* (pp.1-7). Lisbon, Portugal.
- [3] Gajanayake, C. J., Vilathgamuwa, D. M., & Loh, P. C. (2007). Development of a comprehensive model and a multiloop controller for Z-source inverter DG systems. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 54(4), 2352-2359.
- [4] Fang, Z. P., Shen, M., & Qian, Z. (2005). Maximum boost control of the Z-source inverter. *IEEE Trans. Power Electron.*, 20(4), 833-838.
- [5] Shen, M., Wang, J., & Fang, Z. P. (2006). Constant boost control of the Z-source inverter to minimize current ripple and voltage stress. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 42(3), 770-778.
- [6] Shuitao, Y., Xiping, D., Fan, Z., Fang, Z. P., & Zhaoming, Q. (2008). Unified control technique for Z-Source inverter. *IEEE 2008 Conference: Power Electronics Specialists* (pp. 3236-3242), Rhodes, Greece.
- [7] Yuan, L., & Fang, Z. P. (2010). Controller design for quasi-Z-source inverter in photovoltaic systems. *IEEE 2010 Conference: Energy Conversion Congress and Exposition* (pp. 3187-3194). Atlanta, GA, USA.

The Controller Design of Quasi-Z-Source Inverter for PV-Rooftop System using Fuzzy controller

Patumporn Wongyai¹, Jakkrit Pakdeeto², Koson Chaicharoenaudomrung³,
Kongpol Areerak¹, and Kongpan Areerak^{1*}

¹School of Electrical Engineering, Instituted of Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand.

²Department of Teacher Training in Electrical Engineering, Faculty of Technical Education, KMUTNB, Thailand.

³Department of Electrical Engineering Technology, College of Industrial Technology, KMUTNB, Thailand.

*kongpan@sut.ac.th

ABSTRACT

This paper presents the controller design for PV-rooftop system. This system can operate both standalone and grid connection modes. The quasi-Z-source inverter is chosen to convert the electrical power from direct current to alternating current. Both conventional PI and proposed fuzzy controllers are designed for the considered system operating in both standalone and grid connection modes. The simulation results by using the SimPowerSystem® in MATLAB and the hardware-in-loop simulation were used to confirm the effectiveness of the proposed controller. The results can confirm that the proposed fuzzy controller can provide the better performance compared with the conventional PI controller.

Keywords: Controller Design, Quasi-Z-Source Inverter, Fuzzy Logic controller, PV-Rooftop System

1. INTRODUCTION

Today, the global warming issue caused by greenhouse gases affects to increase renewable energy usage. The popular choice of renewable energy is the photovoltaic (PV) system which can operate in both standalone and grid-connected modes [1]-[2]. However, the output power of the PV system is the direct current (DC). This reason affects that the PV system cannot connect to the appliances or utility grid directly. Hence, the inverters is then required to convert the electrical power from DC to AC. Many types of single-phase inverter can convert the DC to alternating current (AC) such as half bridge inverter, full bridge inverter, class-D inverter, etc. Nevertheless, the power condition of PV system including the inverter needs to meet the requirement of high step-up voltage as similar as the buck-boost converter in the DC power system. Generally, the inverters require the high input voltage obtained from the photovoltaic in series arrays. One type of the inverters reported in [3]-[6] is the quasi-Z-source inverter (qZSI). It can be used to perform the lower input voltage requirement and it can supply the output voltage as similar as the other inverters. The qZSI was designed by F. Z. Peng in 2003 in which this inverter absorbs a continuous constant dc current from the source while the conventional ZSI draws a discontinuous current. Thus, the qZSI is suitable for the PV power system and

was reported with the better performance for the PV rooftop system. The output power from PV rooftop system will depend on the environmental conditions as follows: irradiance intensity and temperature. This reason results in the output voltage of PV system does not constant. Thus, the maximum power point tracking (MPPT) is very important to obtain the maximum power (MPP) at any irradiance intensity. To regulate the output voltage and track the MPP for the PV rooftop system, the controller design is very important.

The qZSI can divide in two stages operation, shoot-through and non-shoot-through states, where it can be used to perform the dynamical model. In this paper, the proposed model is used for the conventional PI controller design by using the basic control theory. However, the response from the conventional controller cannot provide a good performance. To improve the better performance, the fuzzy controller is selected to apply in the considered system. The proposed fuzzy controller is designed based on both the standalone and grid-connection modes. The system responses controlled by the proposed fuzzy controller will be compared with the conventional PI controller. In addition, this paper presents the hardware-in-loop simulation to provide the results which can confirm the ability for the implementation. The results show that the proposed controller can be used to regulate the PV rooftop system in both standalone and grid connection modes. Moreover, the proposed fuzzy controller can provide the better performance compared with the PI controller.

This paper is structured in six sections as follows: the first section is an introduction, and the considered system will be described in section II. In section III, the proposed controller design is addressed. The simulation and hardware-in-loop (HIL) results are reported in part IV and V, respectively. Finally, part VI is the conclusion of this paper.

2. CONSIDERED SYSTEM

The PV rooftop system connected with the utility grid is depicted in *Fig. 1*. It consists of PV arrays, qZSI, filter circuit, three-phase active load, and AC utility grid.

The proposed system can be operated in two modes. The first mode is the standalone operation in which the PV

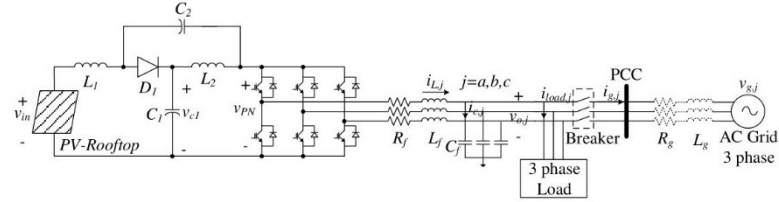


Fig. 1: Considered system

rooftop is not connected with the utility grid. In this mode, the power from PV rooftop system will be only supplied to three-phase load via the qZSI.

Another mode is the grid-connected operation. The three-phase load can obtain the power from both rooftop system and utility grid. However, if the power output from PV arrays is more than the load consumption, the remaining power will be fed into the utility grid for sales with the Electricity Authority.

In contrast, if the power output from PV array is not sufficient, the three-phase load can be also received the power from the utility grid. The operational states and control modes of qZSI are explained as follows:

2.1 Operational states of qZSI network

There are two states of qZSI. The first state is the shoot-through mode occurring when the inverter's switches are short circuit and diode (D) is reverse bias (open circuit) as shown in Fig. 2(a). Although the voltage across the inverter is equal to 0 V ($v_{pn} = 0$ V) in this case, the current from PV arrays can be also supplied to the inverter [7]-[10]. Another state is the non-shoot-through state in which it is the normal operation and diode is forward bias (short circuit) as depicted in Fig. 2(b). Both states can be operated in order to supply the current toward the inverter continuously, resulting in uninterrupted load current operation.

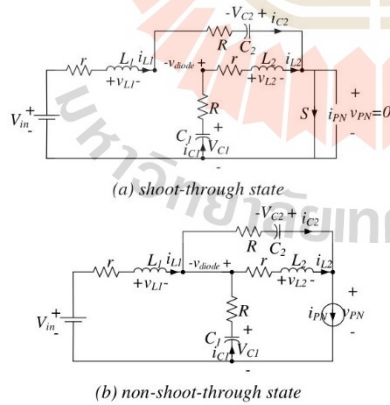


Fig. 2: Operational states of quasi-Z source network

From Fig. 2: the mathematical model of the considered system can be derived from the equivalent circuit in both shoot-through and non-shoot-through states. The variables are defined as follows: $L = L_1 = L_2$ and $C = C_1 = C_2$. The period time of shoot-through and non-shoot-through scenarios are set as T_0 and T_1 , respectively. In addition, the switching period (T_s) can be calculated by $T_s = T_0 + T_1$ and the shoot-through duty cycle (d) is equal to T_0 / T_s . After the variables are set as the previous explanations and the basic circuit theory is applied, the dynamical model of the considered system can be shown in (1).

$$F \dot{\hat{x}} = \begin{bmatrix} -(R+r) & 0 & d-1 & d \\ 0 & -(R+r) & d & d-1 \\ 1-d & -d & 0 & 0 \\ -d & 1-d & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_{L1} \\ \hat{i}_{L2} \\ \hat{v}_{c1} \\ \hat{v}_{c2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & (1-d)R \\ 0 & (1-d)R \\ 0 & d-1 \\ 0 & d-1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{in} \\ I_{PN} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{c1} + V_{c2} - I_{PN}R \\ V_{c1} + V_{c2} - I_{PN}R \\ -I_{L1} - I_{L2} + I_{PN}R \\ -I_{L1} - I_{L2} + I_{PN}R \end{bmatrix} \quad (1)$$

where the state variables are $\hat{x} = [\hat{i}_{L1} \ \hat{i}_{L2} \ \hat{v}_{c1} \ \hat{v}_{c2}]^T$
the input variables are $\hat{u} = [V_{in} \ I_{PN}]^T$ and \hat{d}

To obtain the plant model of the considered system, the Laplace transform will be applied to (1) after that the block diagram of qZSI plant model is illustrated in Fig. 3. The plant equations of $G_{v_{in}}^i$, $G_{i_{pn}}^i$, $G_{d_0}^i$, $G_{v_{c1}}^i$, $G_{v_{c2}}^i$ and $G_{d_0}^i$ in Fig. 3, can be calculated by (2) to (7), respectively.

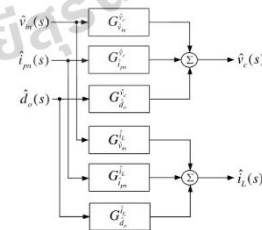


Fig. 3: Block diagram of qZSI plant model

$$G_{v_c}^i = \frac{(1-D_0)(1-2D_0) - LCs^2(1-D_0)}{(LCs^2+1)(LCs^2+(1-2D_0)^2)} \quad (2)$$

$$G_{i_m}^i = \frac{R(1-D_0)(1-2D_0) - (1-D_0)(Ls+r+R)}{LCs^2+C(r+R)s+(1-2D_0)^2} \quad (3)$$

$$G_{d_0}^i = \frac{(V_{c1}+V_{c2}-RI_{pm})(1-2D_0) + (I_{pm}-I_{L1}-I_{L2})(Ls+r+R)}{LCs^2+C(r+R)s+(1-2D_0)^2} \quad (4)$$

$$G_{v_c}^h = \frac{[(LCs^2+D_0) + (1-D_0)(1-2D_0)]Cs}{LCs^2+(1-2D_0)^2} \quad (5)$$

$$G_{i_m}^h = \frac{R(1-D_0)Cs + (1-D_0)(1-2D_0)}{LCs^2+C(r+R)s+(1-2D_0)^2} \quad (6)$$

$$G_{d_0}^h = \frac{(V_{c1}+V_{c2}-RI_{pm})Cs + (I_{pm}-I_{L1}-I_{L2})(1-2D_0)}{LCs^2+C(r+R)s+(1-2D_0)^2} \quad (7)$$

From the plant model of qZSI, it can then be used to design the controller to operate in both shoot-through and non-shoot-through states. In addition, these equations can be also applied to optimize the considered system parameters in the future.

2.2 Control modes of qZSI

The considered system from Fig. 1 can be divided into standalone and grid-connected modes. The block diagram of qZSI control modes is shown in Fig. 4.

For standalone mode as depicted in Fig. 4(a), it can be called "constant voltage control mode". The voltage across capacitor (v_{c1}) is regulated from the DC side using the PI controller when the breaker is off. In this mode, the inverter's output voltage at AC side will be also controlled by the remaining PI controller on d-q axes for the voltage amplitude and frequency regulations. Another mode is grid-connected mode that occurs when the breaker is on. The PI controller combined with MPPT algorithm will be applied, resulting in the MPP from PV rooftop feeding into the three-phase resistance load 20Ω /phase and utility grid. For AC side control in the grid connection mode, PI controller will be used to control only the reference current because the voltage and frequency have been then synchronized.

The controllers of DC and AC sides in both operation modes are designed by using the qZSI plant model as shown in Fig. 3. Many methods can be used to design these controllers such as phase lead or phase lag compensators, bode plot and root-locus methods [11]-[13].

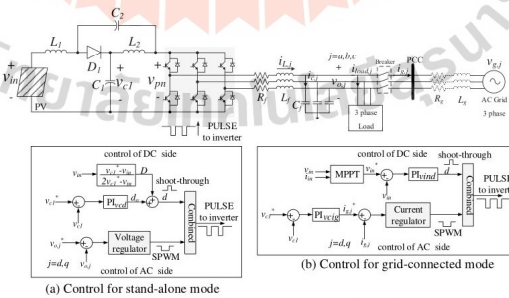


Fig. 4: Block diagram of control modes

For this paper, the root-locus method will be applied because it can provide a good steady-state error as well as time domain and transient responses. The deep details of the root-locus method for the controller design can be found in [14] and the parameters of PI controllers can be shown in Table 1. In addition, the parameter values of the proposed qZSI are set as follows: $L = 500\ \mu\text{H}$, $L = 400\ \mu\text{H}$, $R = 0.03\ \Omega$, $r = 0.47\ \Omega$, $I_{load} = 9.9\ \text{A}$, $V_m = 130\ \text{V}$, $M = 0.75$, $L_f = 4\ \text{mH}$, $C_f = 450\ \mu\text{F}$, $R_f = 0.03\ \Omega$, $L_g = 10\ \mu\text{H}$ and $R_g = 0.2\ \Omega$.

Table 1: The PI controller parameters for the considered system

Parameter	Stand-alone mode	Grid connected mode
DC side control	$K_{i_vcd} = 0.1$ $K_{p_vcd} = 0.00468$	$K_{i_vind} = -0.001$ $K_{p_vind} = 0.0017$
AC side control	$K_{i_vo} = 20$ $K_{p_vo} = 0.005$ $K_{p_ic} = 16$	$K_{i_vig} = -50$ $K_{p_vig} = -0.344$ $K_{i_ig} = 300$ $K_{p_ig} = 2.1$

3. FUZZY DESIGN FOR THE CONTROLLER OF QZSI

This section is the design of fuzzy logic controllers for qZSI operating in stand-alone mode and grid-connected mode. The fuzzy controller regulates the DC side system instead of the PI controller. The AC side controller of the considered system still uses a PI controller on the d-q axis. The control diagram for a quasi-source inverter connected with utility grid is shown in Fig. 5.

3.1 Fuzzy Controller Design for stand-alone mode

In Fig. 5(a), the diagram shows the qZSI control structure for stand-alone mode. A fuzzy controller is used to control the voltage of the capacitor V_{c1} . The input value of controller is the error between V_{c1} (err_{vc1}) and the slope value of the V_{c1} error (err_rate_{vc1}). The output from the controller is the shoot-through duty rate (d_0).

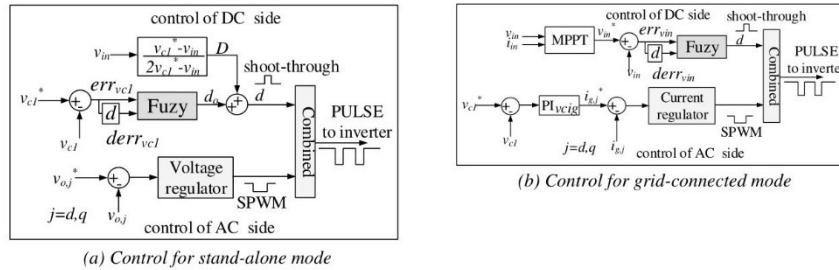


Fig. 5: Block diagram of control modes. Control diagram of a qZSI with fuzzy logic controller.

The fuzzy controller design of qZSI for stand-alone mode uses triangular input membership function and straight-line tone output membership function as shown in Fig. 6(a) and 6(b), respectively.

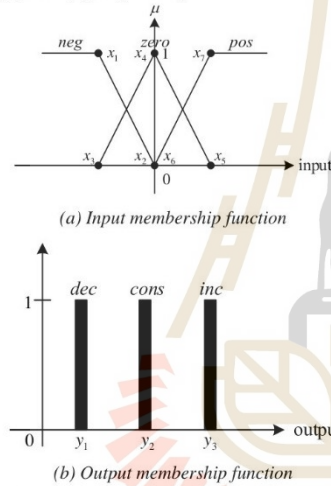


Fig. 6: The membership function for the proposed fuzzy controller

The linguistic design of the error input member function determines three linguistic values: “neg”, “zero”, and “pos” as depicted in Fig. 6(a). The linguistic value of the error rate output member function is determined 3 linguistic values. It consists of “neg_rate”, “zero_rate”, and “pos_rate” as implicitly shown in Fig. 6(b). Thus, the number of possible fuzzy rules for control is 9 (3 x 3=9). The fuzzy rules are shown in Table 2.

From the fuzzy rule in Table 2, when the input error value is negative and the input error rate is any value, the output value must be adjusted to reduce the shoot-through duty rate according to Rules 1-3. In addition, when the input error value is zero and the input error rate is positive, zero, or negative, the output value follows rule 4, 5, or 6, respectively.

Table 2: Fuzzy rules for regulating the voltage value across capacitor (V_{c1})

		error		
		neg	zero	pos
error rate	neg_rate	dec	inc	inc
	zero_rate	dec	cons	inc
	pos_rate	dec	dec	inc

In case of the input error value is positive and the input error rate is any value, the output value must be adjusted shoot-through duty rate incremented according to Rules 7-9. The fuzzy rules for controlling the voltage of a capacitor can be summarized as follows:

- Rule 1 IF error = neg AND error rate = neg_rate THEN $d_0 = dec$
- Rule 2 IF error = neg AND error rate = zero_rate THEN $d_0 = dec$
- Rule 3 IF error = neg AND error rate = pos_rate THEN $d_0 = dec$
- Rule 4 IF error = zero AND error rate = neg_rate THEN $d_0 = inc$
- Rule 5 IF error = zero AND error rate = zero_rate THEN $d_0 = cons$
- Rule 6 IF error = zero AND error rate = pos_rate THEN $d_0 = dec$
- Rule 7 IF error = pos AND error rate = neg_rate THEN $d_0 = inc$
- Rule 8 IF error = pos AND error rate = zero_rate THEN $d_0 = inc$
- Rule 9 IF error = pos AND error rate = pos_rate THEN $d_0 = inc$

After the input of controller has been evaluated with fuzzy rules, the output is then calculated via the weighted average (WA) defuzzification method, a Takagi-Sugeno fuzzy inference [15]-[18]. This method is very simple for implementation. The positions of the input and output member functions can be determined by relationship of the considered system.

3.2 Fuzzy Controller Design for grid-connected mode

The control diagram for the grid-connected mode is depicted in Fig. 4(b). The input voltage (v_m) is controlled by a fuzzy controller in which it is the voltage at the maximum power point of the solar arrays using the MPPT algorithm. The input voltage error value (err_{vin}) and the difference of error values ($err_{rate_{vin}}$) are the fuzzy controller's inputs. The output of fuzzy controller is shoot-through duty (d) The grid-connected mode of a fuzzy logic controller for qZSI uses a triangular input member function and a straight-line tone output membership function. For this case, the linguistic design of the error rate input ion has 3 values and the linguistic value of the error rate input member function has also 3 linguistic values as well. As a result, there are 9 possible fuzzy rules (3x3=9) as shown in Table 3.

Table 3: Fuzzy rules for regulating input voltage (V_{in})

		error		
		neg	zero	pos
error rate	neg_rate	inc	dec	dec
	zero_rate	inc	cons	dec
	pos_rate	inc	inc	dec

From the fuzzy rules for regulating the input voltage, the 9 rules are given in Table 3. When the input error value is negative and the input error rate is any value, the output d must be adjusted with shoot-through duty increments according to Rules 1-3. When the input error value is zero and the input error rate is negative, zero, or positive, the output value follows rule 4, 5, or 6, respectively. In addition, when the input error value is positive and the input error rate is any value, the output value must be reduced shoot-through duty according to rule 7-9. The fuzzy rules for controlling the input voltage can be summarized as follows:

- Rule 1** IF error = neg AND error rate = neg_rate THEN $d = inc$
- Rule 2** IF error = neg AND error rate = zero_rate THEN $d = inc$
- Rule 3** IF error = neg AND error rate = pos_rate THEN $d = inc$
- Rule 4** IF error = zero AND error rate = neg_rate THEN $d = dec$
- Rule 5** IF error = zero AND error rate = zero_rate THEN $d = cons$
- Rule 6** IF error = zero AND error rate = pos_rate THEN $d = inc$
- Rule 7** IF error = pos AND error rate = neg_rate THEN $d = dec$
- Rule 8** IF error = pos AND error rate = zero_rate THEN $d = dec$
- Rule 9** IF error = pos AND error rate = pos_rate THEN $d = dec$

The member function positions of the DC side fuzzy logic controllers for the qZSI in both stand-alone and grid-connected modes are shown in Table 4 and Table 5, respectively. The position of the membership function is obtained via trial-and-error method. The stand-alone mode input and output member function position shape is determined by the relationship between capacitor voltage and the shoot-through duty while the grid-connected mode is determined by the relationship between the voltage of the solar arrays and shoot-through duty.

Table 4: Membership function for stand-alone mode

Input error member function position						
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
-5	0	-5	5	5	0	5
Input error rate member function position						
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
-2	0	-2	2	2	0	2
Output member function position						
y_1		y_2		y_3		
-0.2		0		0.2		

Table 5: Membership function for grid-connected mode

Input error member function position						
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
-50	0	-50	50	50	0	50
Input error rate member function position						
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
-0.2	0	-0.2	0.2	0.2	0	0.2
Output member function position						
y_1		y_2		y_3		
0.18		0.2		0.22		

4. SIMULATION RESULTS

According to Section 2, the locus-root approach was used to design the conventional PI controller for a qZSI, and the parameters of this controller are derived as indicated in Table 1. In addition, the fuzzy controller is designed for qZSI as provided in Section 3.

The SimPowerSystem® simulation was used to evaluate the control performance. The simulation determines that the system frequency of 50 Hz, the grid voltage 120 V_{rms} and the capacitor reference voltage $V_{c1}^* = 340 V$. The SimPowerSystem® model for both stand-alone and grid-connected modes are shown in Fig. 7.

The conditions for the simulation in both stand-alone and grid-connected modes were set by changing the irradiance from 1000 W/m^2 to 600 W/m^2 and 800 W/m^2 at 0.3 and 0.5 s., respectively.

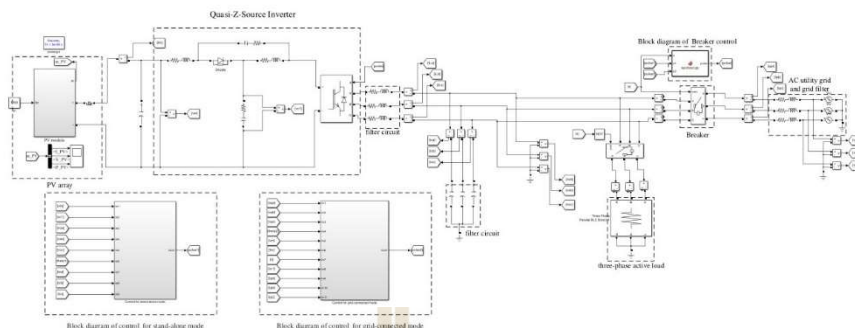


Fig. 7: Simulation model for the qZSI.

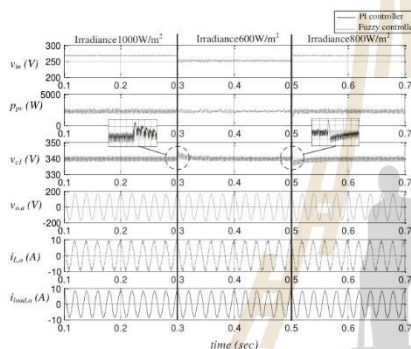


Fig. 8: Simulation results of stand-alone mode

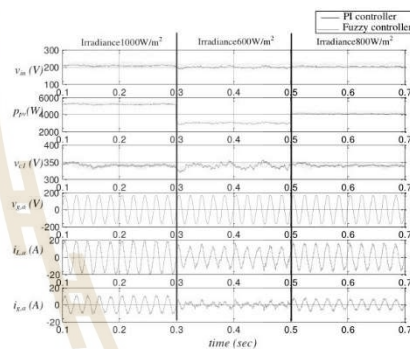


Fig. 9: Simulation results of grid-connected mode

For the stand-alone mode, the simulation results are given in Fig. 8. The voltage across capacitor is set equal to 340 V. The PI and the fuzzy controllers can regulate the capacitor voltage with the different irradiance. When the irradiance is varied suddenly, the transient response of the capacitor voltage demonstrates that the fuzzy controller can quickly reach into the command value. Moreover, the overshoot from the conventional PI controller is more than the proposed fuzzy controller. The results show that the fuzzy logic controller can provide better performance of the capacitor voltage of qZSI than the PI controller.

For the stand-alone mode, the simulation results are given in Fig. 8. The voltage across capacitor is set equal to 340 V. The PI and the fuzzy controllers can regulate the capacitor voltage with the different irradiance. When the irradiance is varied suddenly, the transient response of the capacitor voltage demonstrates that the fuzzy controller can quickly reach into the command value. Moreover, the overshoot from the conventional PI controller is more than the proposed fuzzy controller. The results show that the fuzzy logic controller can provide better performance of the capacitor voltage of qZSI than the PI controller.

The simulation results of grid-connected mode are shown in Fig. 9. When the irradiance is changed, the

voltage of the solar arrays (v_{in}) will be also changed equal to the voltage at the maximum power point of the solar arrays ($v_{in} = v_{mpp}$). The oscillation of p_{pv} is from the MPPT calculation. In this paper, the incremental conductance approach is used as the MPPT algorithm. Fig. 10 shows the power response comparison at different irradiance between the fuzzy controller and the PI controller. The response of the system regulated by PI controller is the black line in which the grey line is the system response controlled by the Fuzzy logic. The responses shown that the fuzzy controller can perform the better power response, more efficient and fast response time than the PI controller. As a result, a higher power output of the solar arrays can be achieved.

Moreover, the $V_{c1} = 340$ V and $V_{grid} = 120$ V_{rms} corresponding to the reference voltage is defined. The current produced by the qZSI in grid-connected mode is higher than stand-alone mode because of the MPPT for solar arrays to achieve a higher power production. The load and grid are fed by the inverter current as shown in Fig. 9, which shows that the proposed controller can control a qZSI in grid-connected mode with a good performance.

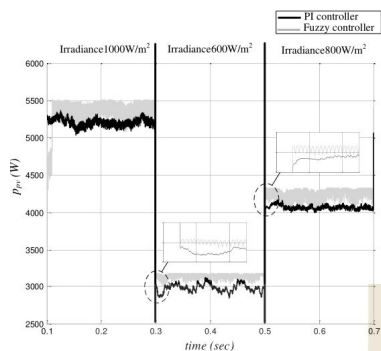


Fig. 10: The output power of the solar arrays of the qZSI in the grid-connected mode

5. HIL SIMULATION RESULTS

Practically, the results simulated by SimPowerSystem® in MATLAB are not sufficient to confirm the performance of the proposed controller. To ensure that the proposed controller design for qZSI can be implemented in the microcontroller board, the hardware-in-loop (HIL) simulation will be used. In addition, HIL simulation can confirm that the system can operate by the proposed controller without the failure of practical conditions. In this paper, the eZdspTMF28335 was used to program the proposed controller in which this board will be used to simulate along with the SimPowerSystem® in MATLAB. The connection between eZdspTMF28335 and the SimPowerSystem® in MATLAB can be depicted in Fig. 11.



Fig. 11: HIL simulation connection

From Fig. 11, both standalone and grid-connected modes of the considered system were used as the same connection between microcontroller board and MATLAB. In addition, the system parameters for HIL were set to the

same as the simulation results. For the HIL simulation, the irradiance was changed from 1000 W/m² to 600 W/m² and 800 W/m² at the time instants 0.3 and 0.5 s, respectively. In this scenario, the reference voltage across the capacitor (V_{cl}^*) was set equal to 340 V and the reference output voltage of inverter ($v_{o,at}$) was defined at 120 V_{rms}. The results of standalone and grid-connected modes are illustrated in Fig. 12.

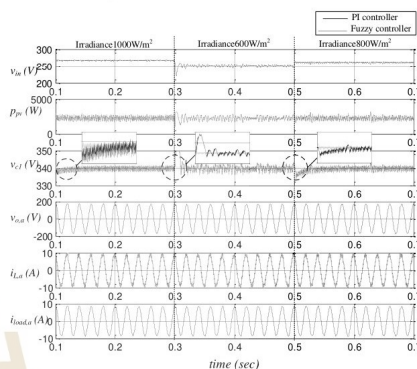


Fig. 12: HIL simulation results of stand-alone mode

From Fig. 12, the V_{cl} can be regulated at 340 V in any irradiance by using the proposed controllers while the stand-alone mode is operated. For this mode, the fuzzy controller can provide the better performance in transient response compared with the PI controller at the time equal 0.3 and 0.5 s.

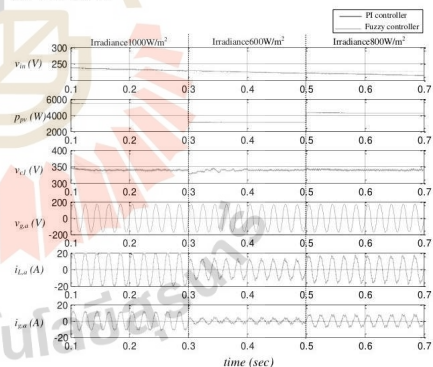


Fig. 13: HIL simulation results of grid-connected mode

In addition, the proposed controllers can be used to control the qZSI in the mode of grid-connection as depicted in Fig. 13. The V_{cl}^* can be controlled with the combination between the MPPT algorithm and the proposed controllers for tracking the MPP from PV arrays.

In the grid-connection mode, the lower oscillation and faster response of V_{ci} can be achieved by the fuzzy controller. Moreover, when the output power from PV arrays (p_{pv}) is considered, the better response of p_{pv} can be also provided by the fuzzy controller as seen the zoom area of p_{pv} response in Fig. 14.

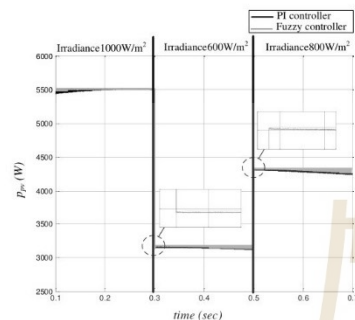


Fig. 14: Output power comparison of PV arrays grid-connected mode between PI and fuzzy controllers.

As for the HIL results in both mode operations, it can confirm that the fuzzy controller can provide the better performance compared with the conventional PI controller.

6. CONCLUSION

This paper presents a PV-Rooftop system operated in both stand-alone and grid-connected modes. The fuzzy logic controllers for the considered system used the triangular input membership function and the tone bar output membership function. There are 9 fuzzy rules for 3linguistic values. The membership function position of the fuzzy logic controller design was determined via trial-and-error approach. This is based on the relationship between the input voltage and shoot-through duty. The designed PI and fuzzy logic controllers were tested using simulation to verify the controller performance. According to simulation and HIL results, the proposed fuzzy controller can efficiently regulate the Quasi-Z-Source Inverter in both stand-alone and grid-connected modes compared with the conventional PI control.

7. ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the research fund from Suranaree University of Technology, Thailand.

8. REFERENCES

- [1] T. Meyer, "Photovoltaic Energy: Stand-Alone and Grid-Connected Systems," in Encyclopedia of Energy, C. J. Cleveland, Ed. New York: Elsevier, 2004, pp. 35-46.

- [2] W. Chaichan, J. Waewsak, R. Nikhom, C. Kongruang, S. Chiwamongkhonkarn, and Y. Gagnon, "Optimization of stand-alone and grid-connected hybrid solar/wind/fuel cell power generation for green islands: Application to Koh Samui, southern Thailand," Energy Reports, vol. 8, pp. 480-493, 2022/11/01/ 2022.
- [3] J. Anderson and F. Z. Peng, "Four quasi-Z-Source inverters," in 2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2008, pp. 2743-2749.
- [4] P. Fang Zheng, "Z-source inverter," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 39, no. 2, pp. 504-510, 2003.
- [5] Y. Tang, J. Wei, and S. Xie, "A new direct peak dc-link voltage control strategy of Z-source inverters," in 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010, pp. 867-872.
- [6] Y. Liu, Impedance source power electronic converters, First edition ed. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley and Sons, Inc, 2016, p. 1.
- [7] P. C. Loh, D. M. Vilathgamuwa, C. J. Gajanayake, Y. R. Lim, and C. W. Teo, "Transient Modeling and Analysis of Pulse-Width Modulated Z-Source Inverter," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 22, no. 2, pp. 498-507, 2007.
- [8] W. Mo, P. C. Loh, and F. Blaabjerg, "Model predictive control for Z-source power converter," in 8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia, 2011, pp. 3022-3028.
- [9] Y. Li, S. Jiang, J. G. Cintron-Rivera, and F. Z. Peng, "Modeling and Control of Quasi-Z-Source Inverter for Distributed Generation Applications," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 60, no. 4, pp. 1532-1541, 2013.
- [10] N. V. P and M. K. Kazimierczuk, "Small-Signal Modeling of Open-Loop PWM Z-Source Converter by Circuit-Averaging Technique," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 3, pp. 1286-1296, 2013.
- [11] J. Liu, J. Hu, and L. Xu, "Dynamic Modeling and Analysis of Z Source Converter—Derivation of AC Small Signal Model and Design-Oriented Analysis," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 22, no. 5, pp. 1786-1796, 2007.
- [12] C. H. v. d. Broeck, R. W. D. Doncker, S. A. Richter, and J. v. Blöth, "Unified control of a buck converter for wide load range applications," in 2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC 2014, 2014, pp. 2788-2795.
- [13] Y. Li, F. Z. Peng, J. G. Cintron-Rivera, and S. Jiang, "Controller design for quasi-Z-source inverter in photovoltaic systems," in 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2010, pp. 3187-3194.

- [14] P. Wongyai, K. Areerak, and K. Areerak, "PI Controller Design Using root-locus For Quasi-Z-Source Inverter," in 2019 16th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2019, pp. 549-552.
- [15] E. H. Mamdani, "Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant," Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, vol. 121, no. 12, pp. 1585-1588 Available: <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/piee.1974.0328>
- [16] R. M. Hilloowala and A. M. Sharaf, "A rule-based fuzzy logic controller for a PWM inverter in photovoltaic energy conversion scheme," in Conference Record of the 1992 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 1992, pp. 762-769 vol.1.
- [17] B. Hamed and N. A. Qaoud, "Fuzzy Control Design for Quasi-Z-Source Three Phase Inverter," in 2019 IEEE 7th Palestinian International Conference on Electrical and Computer Engineering (PICECE), 2019, pp. 1-6.
- [18] R. Ramya and T. S. Sivakumaran, "Design And Control Strategies of Quasi – Z Source Inverter For Photovoltaic Power Generation Systems," in 2020 5th International Conference on Devices, Circuits and Systems (ICDCS), 2020, pp. 262-266.

AUTHORS' INFORMATION

¹School of Electrical Engineering, Instituted of Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand.

²Department of Teacher Training in Electrical Engineering, Faculty of Technical Education, KMUTNB, Thailand.

³Department of Electrical Engineering Technology, College of Industrial Technology, KMUTNB, Thailand.



Patumporn Wongyai was born in Lamphun, Thailand, in 1991. She received the B.Eng. (first-class honors) and M.Eng. degrees in electrical engineering from Suranaree University of Technology (SUT), Nakhon Ratchasima, Thailand, in 2014 and 2016 respectively. Now, she study in Ph.D. of electrical engineering in SUT. Her main research interests include power electronics, modeling of power electronic system, solar energy conversion and control theory.



Jakkrit Pakdeeto received B.Eng. (first-class honors), M.Eng., and Ph.D. degrees in electrical engineering from Suranaree University of Technology (SUT), Nakhon Ratchasima, Thailand, in 2013, 2015 and 2019, respectively. In 2019, he was a researcher in Institute of research and development at SUT. Since 2020,

he has been a lecturer in the department of Teacher Training in Electrical Engineering, Faculty of Technical Education, King Mongkut's University of Technology (KMUTNB), Thailand. He has received the Assistant Professor in Electrical Engineering in 2021. His main research interests include stability analysis, power electronics, AI applications, control theory and DC micro-grid systems.



Koson Chaicharoenaudomrung received B.Eng, M.Eng, and Ph.D. degrees in electrical engineering from Suranaree University of Technology (SUT), Nakhon Ratchasima, Thailand, in 2008 2011 and 2018, respectively. In 2019, he was a researcher in research and development at SUT. Since 2020, he has been a lecturer in the Department of Electrical Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Thailand. He has received the Assistant Professor in Electrical Engineering in 2022. His main research interests include stability analysis, modeling of power electronic system, wind energy conversion system, power electronic and control system, and AI application.



Kongpol Areerak received the B.Eng, M.Eng, and Ph.D. degrees in electrical engineering from Suranaree University of Technology (SUT), Thailand, in 2000, 2003, and 2007, respectively. Since 2007, he has been a lecturer and Head of Power Quality Research Unit (PQRU) in the School of Electrical Engineering, SUT. He received the Associate Professor in Electrical Engineering in 2015. His main research interests include active power filter, harmonic elimination, AI application, motor drive, and intelligence control systems.

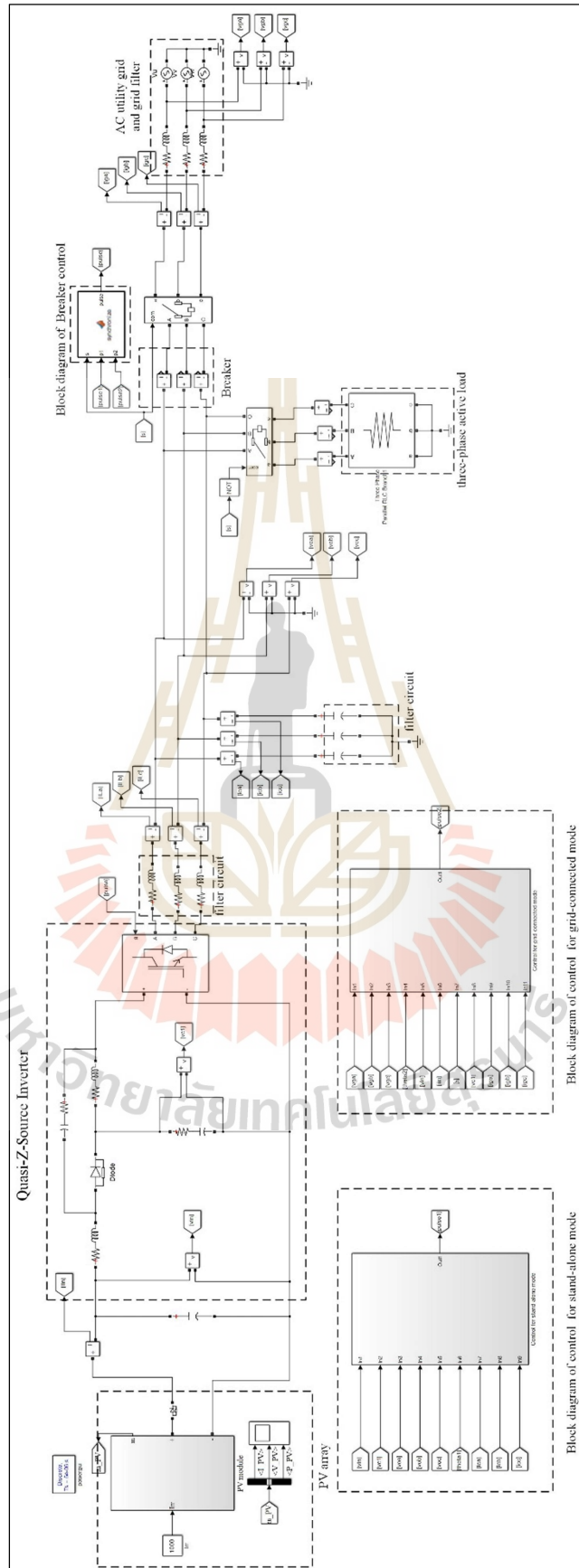


Kongpan Areerak received the B.Eng. M.Eng degrees from Suranaree University of Technology (SUT), Nakhon Ratchasima, Thailand, in 2000 and 2001, respectively and the Ph.D. degree from the University of Nottingham, Nottingham, UK., in 2009, all in electrical engineering. In 2002, he was a lecturer in the Electrical and Electronic Department, Rangsit University, Thailand. Since 2003, he has been a Lecturer in the School of Electrical Engineering, SUT. He has received the Associate Professor in Electrical Engineering in 2015. His main research interests include system identifications, artificial intelligence applications, stability analysis of power systems with constant power loads, modeling and control of power electronic based systems, and control theory.

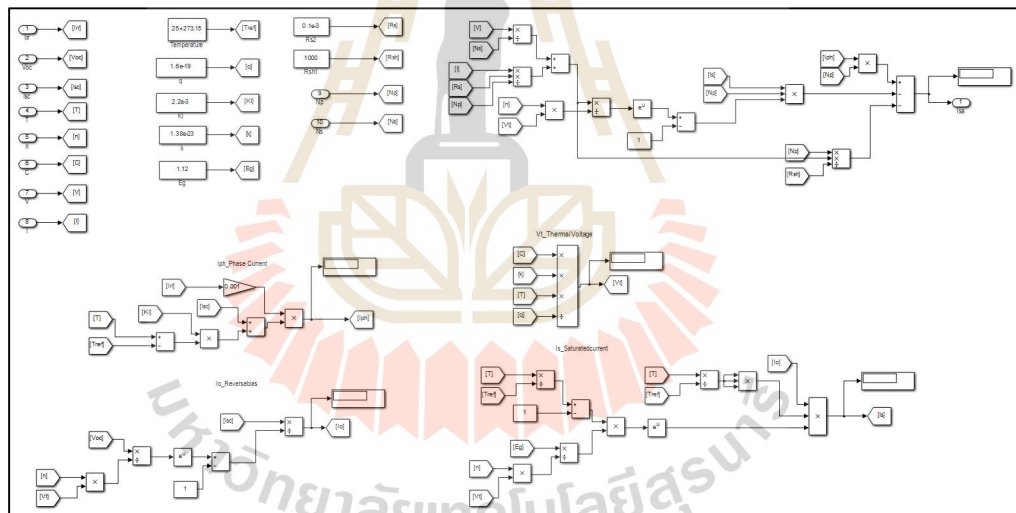
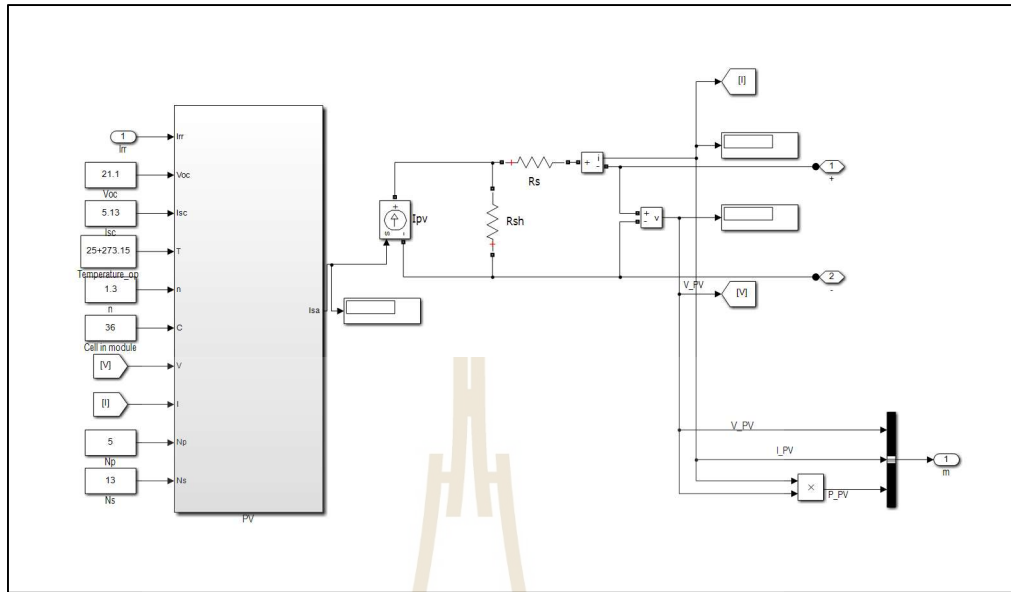
ภาคผนวก ข

ชุดแผนภาพไฟฟ้ากำลังสำหรับการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ใน
Simulink บนโปรแกรม MATLAB ของระบบที่พิจารณา

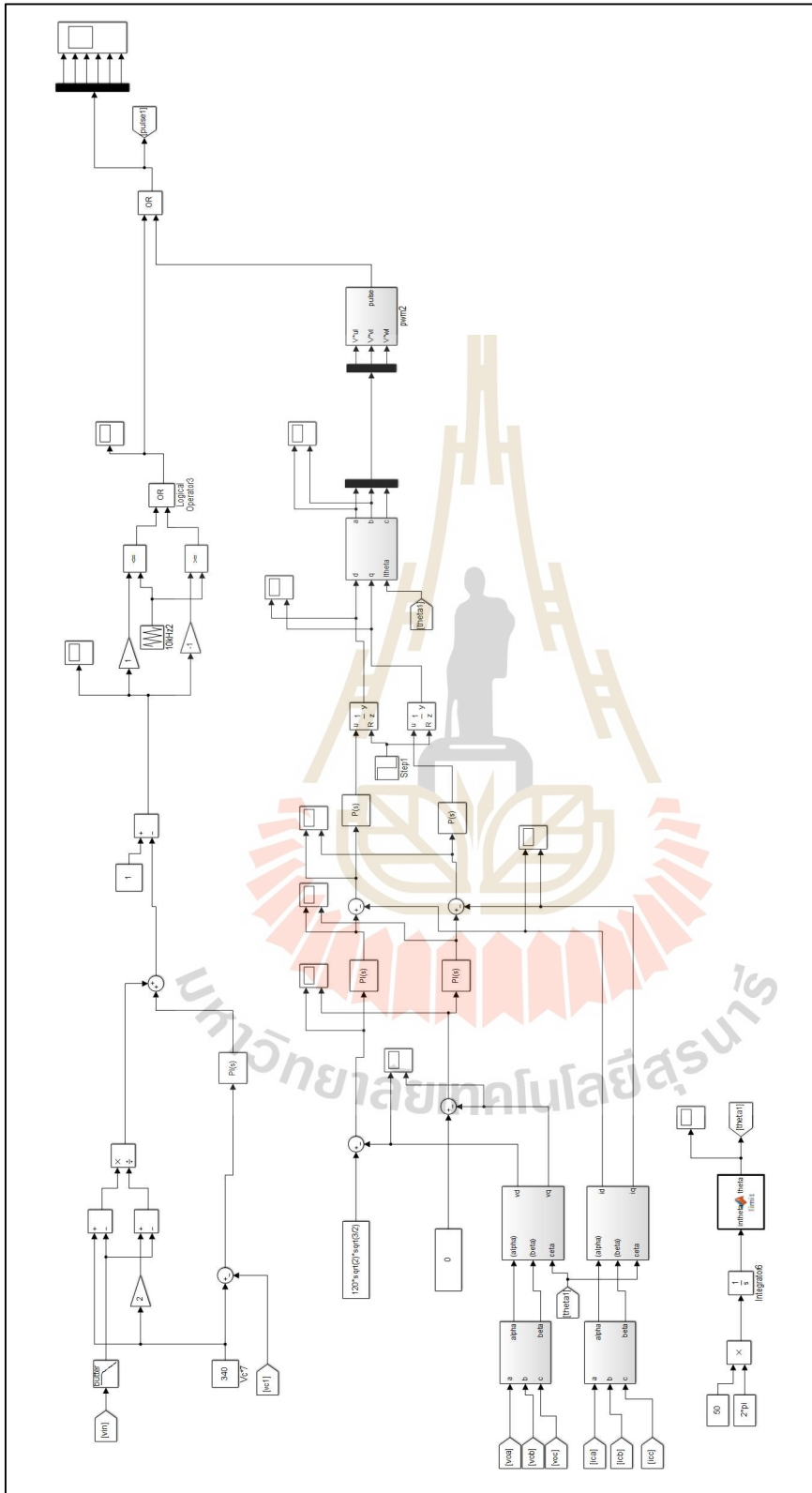
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



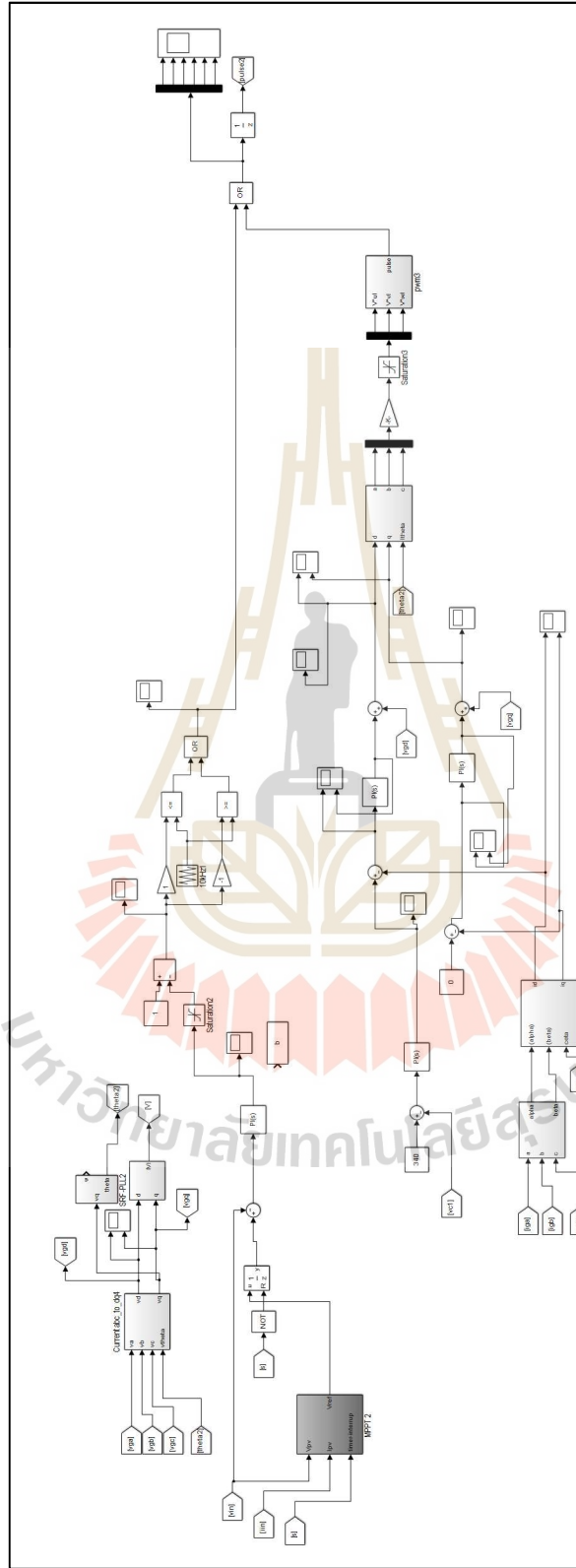
รูปที่ ข.1 แผนภาพไฟฟ้ากำลังสำหรับการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ใน Simulink บนโปรแกรม MATLAB ของวงจรมอเตอร์เหนี่ยวนำจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอซีเซด



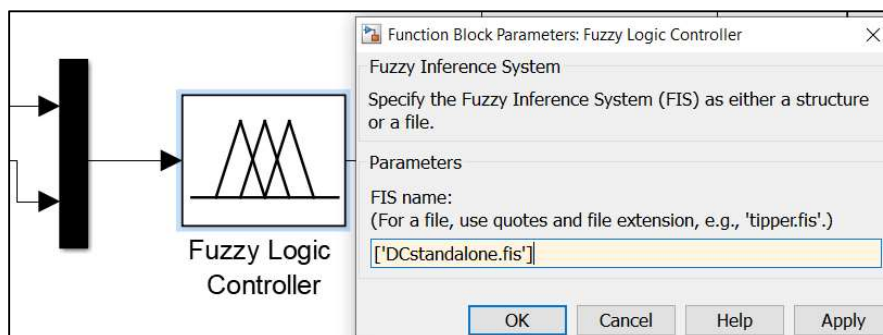
รูปที่ ข.2 แผนภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ใน Simulink



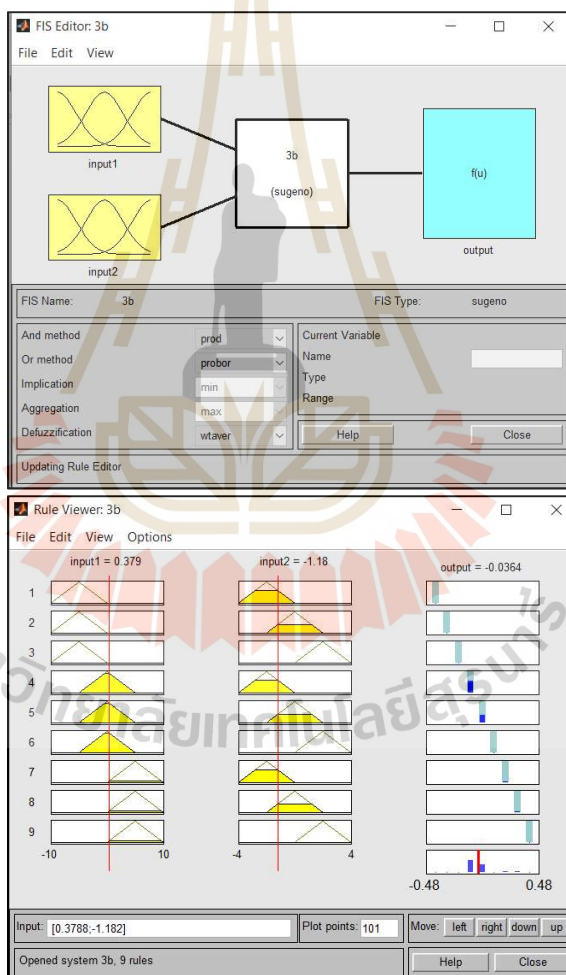
รูปที่ ข.3 แผนภาพแสดงการควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์ใหม่ทีสิสร



รูปที่ ข.4 แผนภาพแสดงการควบคุมวงจรวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอซีเซตโหมด
เชื่อมต่อบนหน้าจอ



รูปที่ ข.5 แผนภาพ Fuzzy Logic Controller ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ตัวควบคุมฟัซซี

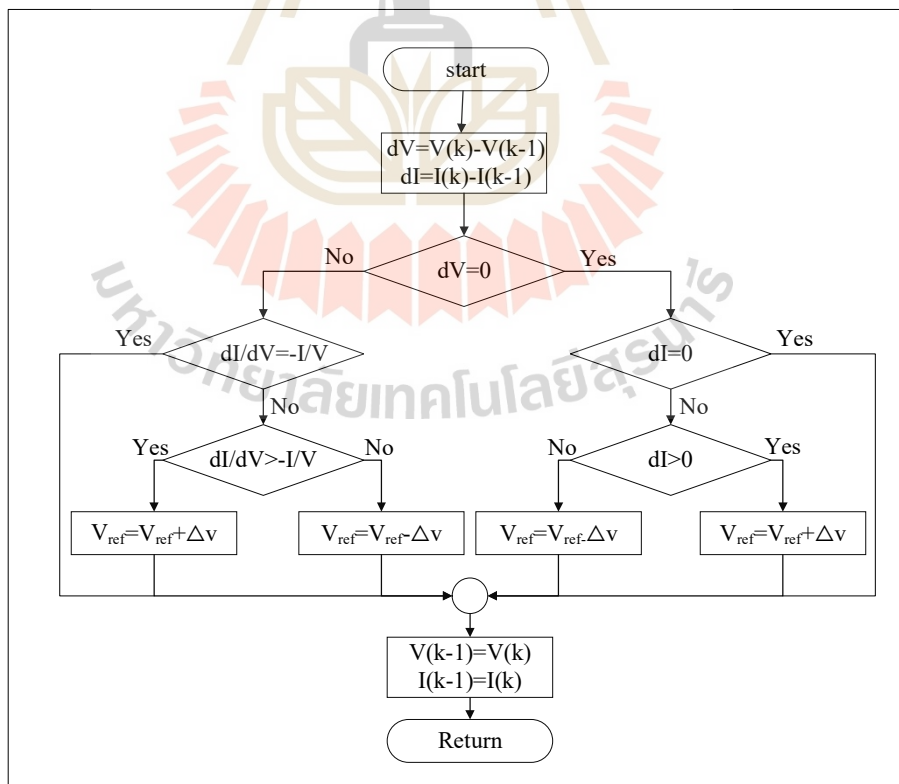


รูปที่ ข.6 Rule view ในโปรแกรม MATLAB
(สามารถดูรูปร่างฟังก์ชันอินพุต เอาต์พุต และกฎฟัซซี
 อีกทั้งสามารถคำนวณค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซีได้)

ภาคผนวก ค
การตามรอยจุดกำลังงานสูงสุดด้วยอัลกอริทึมเพิ่มค่าความนำ



หลักการสำคัญของระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังสูงสุด (MPPT) คือดึงกำลังไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้ได้มากที่สุด โดยการทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานที่แรงดันไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยใช้อัลกอริทึมการตามรอยจุดกำลังงานสูงสุด เช่น วิธีแรงดันเปิดวงจร (Fractional Open Circuit Voltage: Voc) วิธีรบกวนและสังเกต (Conventional Perturb and Observe method: Conventional P&O) วิธีอิงกระแส (Current based Method) และวิธีเพิ่มค่าความนำ (Incremental Conductance Method: IncCond) เป็นต้น โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์เลือกใช้อัลกอริทึมการตามรอยจุดกำลังงานสูงสุดด้วยวิธีเพิ่มค่าความนำ เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถหาจุดจ่ายกำลังสูงสุดได้แม้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณแสงอย่างรวดเร็ว ใช้ตัวตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและตัวตรวจวัดกระแสไฟฟ้าเท่านั้น โดยสามารถแสดงแผนผังการตามรอยจุดกำลังสูงสุดของอัลกอริทึมเพิ่มค่าความนำได้ดังรูปที่ ค.1 จากรูปจะเห็นได้ว่า แผนผังการตามรอยจุดกำลังสูงสุดของอัลกอริทึมเพิ่มค่าความนำ เริ่มต้นจากการรับค่าแรงดันไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าจากตัวตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและตัวตรวจวัดกระแสไฟฟ้านำมาคำนวณหาค่าผลต่างระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าในรอบปัจจุบันและรอบก่อนหน้า จากนั้นตรวจสอบเงื่อนไขการทำงานเพื่อทำการปรับเพิ่มหรือลด ค่าแรงดันอ้างอิงที่นำไปเป็นค่าอินพุตให้แก่ตัวควบคุมต่อไป

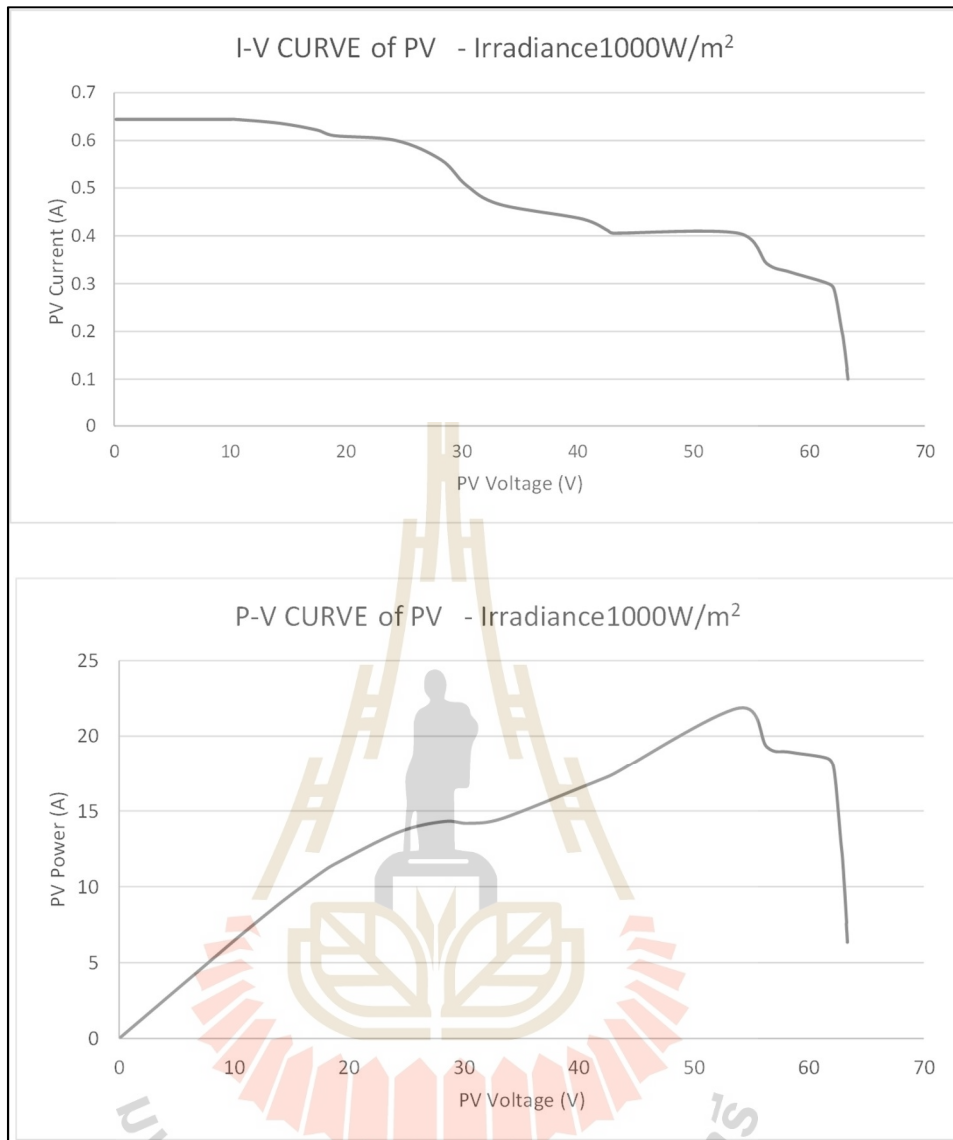


รูปที่ ค.1 แผนผังการตามรอยจุดกำลังสูงสุดของอัลกอริทึมเพิ่มค่าความนำ



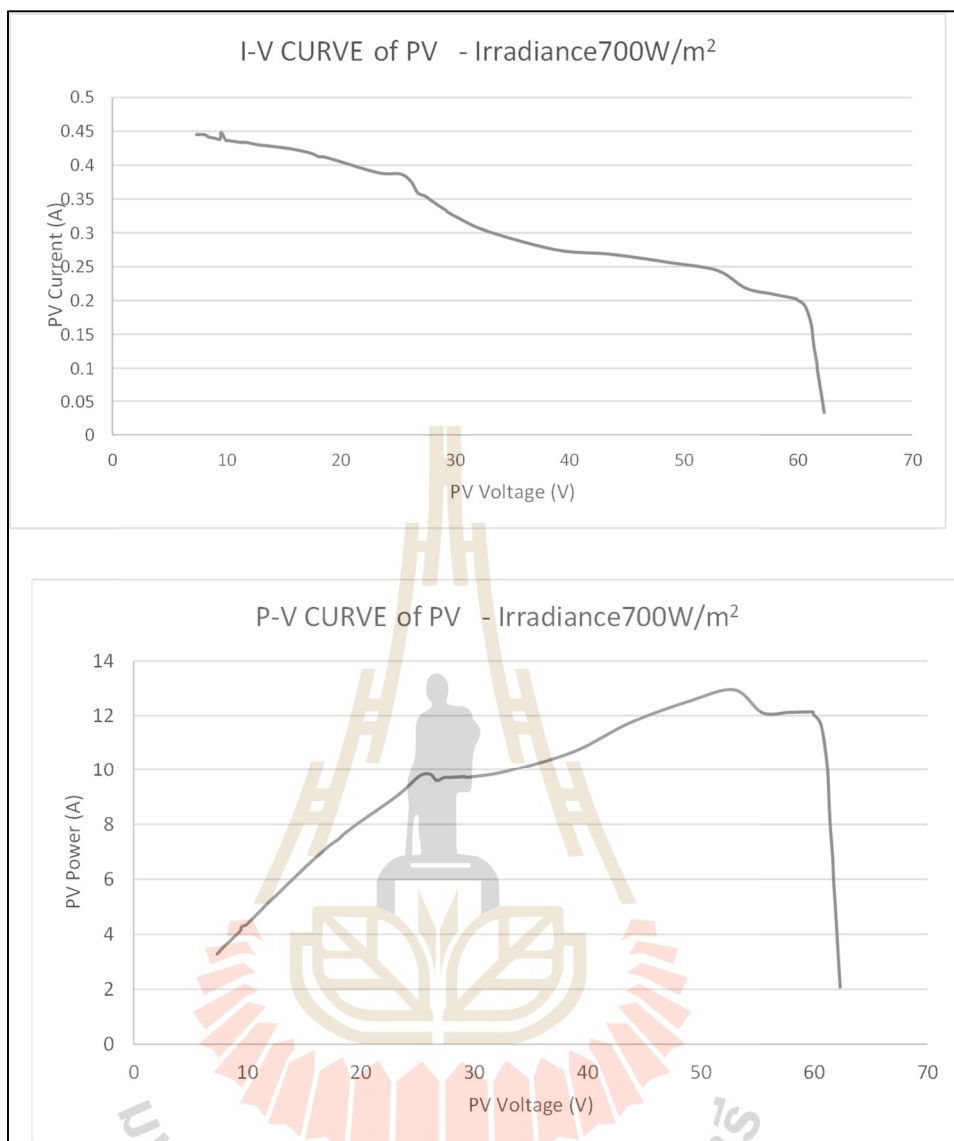
ภาคผนวก ง

กราฟคุณลักษณะของกระแสและแรงดัน และ
กราฟคุณลักษณะของกำลังไฟฟ้าและแรงดัน
ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในชุดทดสอบ




รูปที่ ง.1 กราฟคุณลักษณะของกระแสและแรงดัน และกราฟคุณลักษณะของกำลังไฟฟ้าและแรงดัน
ที่ความเข้มแสง 1000W/m²

$$(V_{mpp}=53.92V, I_{mpp}=0.4055A, P_{pv}=20.0852W)$$



รูปที่ ๓.2 กราฟคุณลักษณะของกระแสและแรงดัน และกราฟคุณลักษณะของกำลังไฟฟ้าและแรงดัน
ที่ความเข้มแสง 700W/m²

$$(V_{mpp}=52.98V, I_{mpp}=0.2443A, P_{pv}=12.94301W)$$



ภาคผนวก จ
รายละเอียดการโปรแกรมตัวควบคุมพีไอสำหรับชุดทดสอบ
วงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซด์โหมดอิสระ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โปรแกรมตัวควบคุมพีไอสำหรับชุดทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบควอไซต์โหมตอิสระ

```

1.  #include "DSP28x_Project.h"
2.  #include "DSP2833x_Device.h"    // Device Headerfile and Examples
    Include File
3.  #include "DSP2833x_Examples.h"
4.  #include <stdio.h>
5.  #include <stdlib.h>
6.  #include "IQmathLib.h"
7.  #include "math.h"
8.  #if (CPU_FRQ_150MHZ)    // Default - 150 MHz SYSCLKOUT
9.  #define ADC_MODCLK 0x3 // HSPCLK = SYSCLKOUT/2*ADC_MODCLK2 =
    150/(2*3) = 25.0 MHz
10. #endif
11. #if (CPU_FRQ_100MHZ)
12. #define ADC_MODCLK 0x2 // HSPCLK = SYSCLKOUT/2*ADC_MODCLK2 =
    100/(2*2) = 25.0 MHz
13. #endif
14. #define ADC_CKPS 0x0 // ADC module clock = HSPCLK/1 = 25.5MHz/(1)
    = 25.0 MHz
15. #define ADC_SHCLK 0x1 // S/H width in ADC module periods = 2 ADC
    cycle
16. #define AVG 1000 // Average sample limit
17. #define ZOFFSET 0x00 // Average Zero offset
18. #define BUF_SIZE 1024 // Sample buffer sizes
19. // Prototype statements for functions found within this file.
20. void InitEPwm1Example(void);
21. void InitEPwm2Example(void);
22. void InitEPwm3Example(void);

```

```

23. void InitEPwm4Example(void);
24. interrupt void epwm1_isr(void);
25. interrupt void epwm2_isr(void);
26. interrupt void epwm3_isr(void);
27. interrupt void epwm4_isr(void);
28. interrupt void cpu_timer0_isr(void);
29. void Gpio_select(void);
30. Uint32 EPwm1TimerIntCount;
31. Uint32 EPwm2TimerIntCount;
32. Uint32 EPwm3TimerIntCount;
33. Uint32 EPwm4TimerIntCount;
34. Uint16 EPwm1_DB_Direction;
35. Uint16 EPwm2_DB_Direction;
36. Uint16 EPwm3_DB_Direction;
37. Uint16 EPwm4_DB_Direction;
38. void Fuzzy_controller(float e);
39. // Global variable for this example
40. float Va=1800,Vb=2000,Vc=2200;
41. float ksqr23=0.8165,kinvsqr23=1.2247,k=0.8165;
42. float
Voltage_VR1=0,Voltage_VR2=0,Voltage_VR3=0,Voltage_VR4=0,Voltage_VR5=0
,Voltage_VR6=0,Voltage_VR7=0,Voltage_VR8=0;
43. float
V_ch1=0,V_ch2=0,V_ch3=0,V_ch4=0,V_ch5=0,V_ch6=0,V_ch7=0,V_ch8=0;
44. float Valpha=0,Vbeta=0,theta=0,theta1=0,amplitudeV=0,Vd=0,Vq=0;
45. float Vab_actual=0,Vbc_actual=0,Vdc=0,Ia=0,Ib=0,Ic=0,Idc=0,Vc1=32,Vin=25;
46. float w,intheta_0=0,intheta=0,Ialpha=0,Ibeta=0,Id=0,Iq=0;
47. int a=0;
48. // Global Variables ---> PI controller
49. float Vc1_ref,D,err_v=0,d=0.05,d_ref=0.2,Upv,Uiv,err_v_0=0,Uiv_1=0,Uiv_0=0;

```

```

50. float
    Vd_ref=0,err_vd=0,Upvd=0,Uivd=0,Upi_vd=0,err_id=0,err_id_0=0,Upi_vd_ref=
    0,err_vd_0=0,Uivd_1=0,Uivd_0=0,Upi_vd_ref0=0;
51. float
    Vq_ref=0,err_vq=0,Upvq=0,Uivq=0,Upi_vq=0,err_iq=0,err_iq_0=0,Upi_vq_ref=
    0,err_vq_0=0,Uivq_1=0,Uivq_0=0,Upi_vq_ref0=0;
52. // -----> PI controller
53. float kpv=0.0015,kiv=0.0011,kpww=0.05,kivv=0.020,kpi=0.016; //kpv=PIvcd
    kpww=PIvo kpi=Pic
54. float Ts=1.5e-5;
55. float
    M_alpha=0,M_beta=0,M_0=0,Ma=0,Mb=0,Mc=0,Ma_compare=0,Mb_compare
    =0,Mc_compare=0;
56. float M=0,Ma_1=0,Mb_1=0,Mc_1=0,CCC=0;
57. float fil_1=0.945,fil_2=0.0549,AA=0,BB=0,CC=0;
58. // Maximum Dead Band values
59. #define EPWM1_MAX_DB 0x03FF
60. #define EPWM2_MAX_DB 0x03FF
61. #define EPWM3_MAX_DB 0x03FF
62. #define EPWM4_MAX_DB 0x03FF
63. #define EPWM1_MIN_DB 0
64. #define EPWM2_MIN_DB 0
65. #define EPWM3_MIN_DB 0
66. #define EPWM4_MIN_DB 0
67. // To keep track of which way the Dead Band is moving
68. #define DB_UP 1
69. #define DB_DOWN 0
70. // Prototype statements for functions found within this file.
71. void main(void)
72. {
73.     InitSysCtrl();

```

```

74. // Specific clock setting for this example:
75. EALLOW;
76. SysCtrlRegs.HISPCP.all = ADC_MODCLK; // HSPCLK =
    SYSCLKOUT/ADC_MODCLK
77. EDIS;
78. Gpio_select();
79. DINT;
80. InitPieCtrl();
81. // Disable CPU interrupts and clear all CPU interrupt flags:
82. IER = 0x0000;
83. IFR = 0x0000;
84. InitPieVectTable();
85. EALLOW; // This is needed to write to EALLOW protected registers
86. EDIS; // This is needed to disable write to EALLOW protected registers
87. InitAdc(); // For this example, init the ADC
88. AdcRegs.ADCTRL1.bit.ACQ_PS = ADC_SHCLK;
89. AdcRegs.ADCTRL1.bit.SEQ_CASC = 1; // 1 Cascaded mode
90. AdcRegs.ADCTRL1.bit.CONT_RUN = 1; // Setup continuous run
91. AdcRegs.ADCTRL1.bit.SEQ_OVRD = 1; // Enable Sequencer override
    feature
92. AdcRegs.ADCTRL2.all = 0x2000;
93. AdcRegs.ADCTRL3.bit.ADCCLKPS = ADC_CKPS;
94. AdcRegs.ADCMAXCONV.bit.MAX_CONV1=0xf;
95. AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV00 = 0x0; //A0
96. AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV01 = 0x1; //A1
97. AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV02 = 0x2; //A2
98. AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV03 = 0x3; //A3
99. AdcRegs.ADCCHSELSEQ2.bit.CONV04 = 0x4; //A4
100. AdcRegs.ADCCHSELSEQ2.bit.CONV05 = 0x5; //A5
101. AdcRegs.ADCCHSELSEQ2.bit.CONV06 = 0x6; //A6
102. AdcRegs.ADCCHSELSEQ2.bit.CONV07 = 0x7; //A7

```

```

103.  AdcRegs.ADCST.bit.INT_SEQ1_CLR = 1;
104.  InitEPwm1Example();
105.  InitEPwm2Example();
106.  InitEPwm3Example();
107.  InitEPwm4Example();
108.  DINT;
109.  //Enable CPU INT1 which is connected to CPU-Timer 0:
110.  IER |= M_INT1;
111.  // Enable TINT0 in the PIE: Group 1 interrupt 7
112.  PieCtrlRegs.PIEIER1.bit.INTx7 = 1;
113.  // Step 4. Initialize all the Device Peripherals:
114.  // This function is found in DSP2833x_InitPeripherals.c
115.  EALLOW;
116.  SysCtrlRegs.PCLKCR0.bit.TBCLKSYNC = 0;
117.  EDIS;
118.  EALLOW;
119.  SysCtrlRegs.PCLKCR0.bit.TBCLKSYNC = 1;
120.  EDIS; // Enable global Interrupts and higher priority real-time debug events:
121.  EINT; // Enable Global interrupt INTM
122.  ERTM; // Enable Global real-time interrupt DBGEM
123.  // Step 6. IDLE loop. Just sit and loop forever (optional):
124.  for(;;){
125.  //=====Starting ADC process=====//
126.  //////////////// Recieve Vab_and_Vbc ////////////////
127.  Voltage_VR1 = (AdcRegs.ADCRESULT0>>4); //V_ch1 **Bit
128.  V_ch1= (Voltage_VR1*3.3)/4095;
129.  Voltage_VR2 = (AdcRegs.ADCRESULT1>>4); //V_ch2
130.  V_ch2=(Voltage_VR2*3.3)/4095;
131.  //////////////// Recieve ia_ib_ic ////////////////
132.  Voltage_VR3 = (AdcRegs.ADCRESULT2>>4); //V_ch3
133.  V_ch3= Voltage_VR3*3.3/4095;

```

```

134. Voltage_VR4 = (AdcRegs.ADCRESULT3>>4); //V_ch4
135. V_ch4= Voltage_VR4*3.3/4095;
136. Voltage_VR5 = (AdcRegs.ADCRESULT4>>4); //V_ch5
137. V_ch5= Voltage_VR5*3.3/4095;
138. //////////////// Recieve ldc ////////////////
139. Voltage_VR6 = (AdcRegs.ADCRESULT5>>4); //V_ch6
140. V_ch6= (Voltage_VR6*3.3/4095);
141. //////////////// Recieve Vc1 ////////////////
142. Voltage_VR7 = (AdcRegs.ADCRESULT6>>4); //V_ch7
143. V_ch7= (Voltage_VR7*3.3/4095);
144. //////////////// Recieve Vin ////////////////
145. Voltage_VR8 = (AdcRegs.ADCRESULT7>>4); //V_ch8
146. V_ch8= (Voltage_VR8*3.3/4095);
147. //////////////// V and I actual ////////////////
148. Vab_actual= (V_ch1-1.907)*59.996; //Vactual-Vp
149. Vbc_actual= (V_ch2-1.895)*59.996;
150. Ia=(V_ch3-1.834)*10.285;
151. Ib=(V_ch4-1.855)*10.285
152. Ic=(V_ch5-1.829)*10.285;
153. ldc=((V_ch6)*0.283)+0.0084;
154. Vc1=(V_ch7*50.073) +0.1159;
155. Vin=(V_ch8*48.81) - 0.3099;
156. //////////////// V and I actual+filter ////////////////
157. Vab_actual=fil_1*Vab_actual+fil_2*Vab_actual;
158. Vbc_actual=fil_1*Vbc_actual+fil_2*Vbc_actual;
159. Ia=fil_1*Ia+fil_2*Ia;
160. Ib=fil_1*Ib+fil_2*Ib;
161. Ic=fil_1*Ic+fil_2*Ic;
162. Vc1=fil_1*Vc1+fil_2*Vc1;
163. Vin=fil_1*Vin+fil_2*Vin;
164. //-----> abc to stationary frame -----

```



```

165.  /**** theta stand-alone mode***/
166.      w=2*3.14159*50 ;    //f=50Hz  w=2*pi*f //2.525
167.      theta = intheta ;
168.      intheta = intheta_0 + (w*Ts);
169.      intheta_0 = intheta ;
170.      if (intheta > 6.283185){intheta = 0;intheta_0 = 0;}
171.  //-----> abc to stationary frame -----
172.      Valpha=ksqrt23*(Vab_actual+(0.5*Vbc_actual));
173.      Vbeta=ksqrt23*(0.866*Vbc_actual);
174.      lalpha=(ksqrt23)*(Ia-0.5*Ib-0.5*Ic);
175.      lbeta =(ksqrt23)*(0.866*Ib-0.866*Ic);
176.  //-----> stationary frame to DQ -----
177.      Vd=Valpha*(cos(theta))+Vbeta*(sin(theta));
178.      Vq=-Valpha*(sin(theta))+Vbeta*(cos(theta));
179.      Id=lalpha*(cos(theta))+lbeta*(sin(theta));
180.      Iq=-lalpha*(sin(theta))+lbeta*(cos(theta));
181.  // PI controller AC loop D-axis ----->>>
182.      Vd_ref=15; //43.3013
183.      err_vd = Vd_ref-Vd;
184.      Upvd=kpv*err_vd;
185.      Uivd=(kiv*err_vd)*Ts;
186.      Uivd_1=Uivd+Uivd_0; //Uivd new
187.      Uivd_0=Uivd_1;          //Uivd old
188.      Upi_vd=(Upvd+Uivd_1);
189.      err_id = Upi_vd-Id;
190.      Upi_vd_ref0= (kpi*err_id);
191.      Upi_vd_ref=Upi_vd_ref0;
192.  // PI controller AC loop Q-axis ----->>>
193.      Vq_ref=0;
194.      err_vq = Vq_ref-Vq;
195.      Upvq=kpv*err_vq;

```

```

196.     Uivq=(kiv*err_vq)*Ts;
197.     Uivq_1=Uivq+Uivq_0; //Uivq new
198.     Uivq_0=Uivq_1;           //Uivq old
199.     Upi_vq=(Upvq+Uivq_1);
200.     err_iq = Upi_vq-Iq;
201.     Upi_vq_ref0= (kpi*err_iq);
202.     Upi_vq_ref=Upi_vq_ref0;
203.     // PI controller DC loop----->>>
204.     Vc1_ref=50;
205.     D = (Vc1_ref-Vin)/((2* Vc1_ref)- Vin);
206.     err_v = Vc1_ref - Vc1;
207.     // PI controller DC loop----->>>
208.     Vc1_ref=50;
209.     D = (Vc1_ref-Vin)/((2* Vc1_ref)- Vin);
210.     err_v = Vc1_ref - Vc1;
211.     Upv=kpv*err_v;
212.     Uiv=(kiv*err_v)*Ts;
213.     Uiv_1=Uiv+Uiv_0; //Uiv new
214.     Uiv_0=Uiv_1; //Uiv old
215.     d=(Upv+Uiv_1)/10;
216.     d_ref=(d+D);
217.     if(d_ref>0.4){d_ref=0.4;}if(d_ref<=0.001){d_ref=0.001;} //limit
218.     //****End DC Controller*****/
219.     //-----> DQ to stationary frame -----
220.     M_alpha=Upi_vd_ref*cos(theta)+ Upi_vq_ref*(-sin(theta));
221.     M_beta=Upi_vd_ref*sin(theta)+ Upi_vq_ref*cos(theta);
222.     M_0=0;
223.     //-----> stationary frame to abc -----
224.     Ma_1=(((kinvsqrt23)*(0.6667*M_alpha)));
225.     Mb_1=(((kinvsqrt23)*(-0.3333*M_alpha+0.5774*M_beta)));
226.     Mc_1=(((kinvsqrt23)*(-0.3333*M_alpha-0.5774*M_beta)));

```

```

227. AA((((kinvsqrt23)*(0.6667*M_alpha)));
228. //-----> DQ to abc-----
229.     Ma = ((Ma_1/1)+1)*0.5*3750;
230.     Mb = ((Mb_1/1)+1)*0.5*3750;
231.     Mc = ((Mc_1/1)+1)*0.5*3750;
232.     if(Ma>3750){Ma=3750;}if(Ma<=0){Ma=0;}
233.     if(Mb>3750){Mb=3750;}if(Mb<=0){Mb=0;}
234.     if(Mc>3750){Mc=3750;}if(Mc<=0){Mc=0;}
235.     Va = Ma;
236.     Vb = Mb;
237.     Vc = Mc;
238.     d_ref=d_ref;
239.     EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA = 3750-Va;
240.     EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA = 3750-Vb;
241.     EPwm3Regs.CMPA.half.CMPA = 3750-Vc;
242.     EPwm4Regs.CMPA.half.CMPA = (1 -d_ref)*1875;//
243. // end of forever loop //
244. }
245. }
246. void InitEPwm1Example()
247. {
248.     EPwm1Regs.TBPRD = 3750; // Period = 1600 TBCLK counts
249.     EPwm1Regs.TBPHS.half.TBPHS = 0; // Set Phase register to zero
250.     EPwm1Regs.TBCTL.bit.CTRMODE = TB_COUNT_UPDOWN; // Symmetrical
mode
251.     EPwm1Regs.TBCTL.bit.PHSEN = TB_DISABLE; // Master module
252.     EPwm1Regs.TBCTL.bit.PRDL = TB_SHADOW;
253.     EPwm1Regs.TBCTL.bit.SYNCSEL = TB_CTR_ZERO; // Sync down-stream
module
254.     EPwm1Regs.CMPCTL.bit.SHDWAMODE = CC_SHADOW;
255.     EPwm1Regs.CMPCTL.bit.SHDWBMODE = CC_SHADOW;

```

```
256. EPwm1Regs.CMPCTL.bit.LOADAMODE = CC_CTR_ZERO; // load on CTR=Zero
257. EPwm1Regs.CMPCTL.bit.LOADBMODE = CC_CTR_ZERO; // load on CTR=Zero
258. EPwm1Regs.AQCTLA.bit.CAU = AQ_SET; // set actions for EPWM1A
259. EPwm1Regs.AQCTLA.bit.CAD = AQ_CLEAR;
260. EPwm1Regs.DBCTL.bit.OUT_MODE = DB_FULL_ENABLE; // enable Dead-band
    module
261. EPwm1Regs.DBCTL.bit.POLSEL = DB_ACTV_HIC; // Active Hi complementary
262. EPwm1Regs.DBFED = 10; // 10 = 1usec
263. EPwm1Regs.DBRED = 10; // 10 = 1usec
264. }
265. void InitEPwm2Example()
266. {
267. EPwm2Regs.TBPRD = 3750; // Period= 1600 TBCLK counts
268. EPwm2Regs.TBPHS.half.TBPHS = 0; // Set Phase register to zero
269. EPwm2Regs.TBCTL.bit.CTRMODE = TB_COUNT_UPDOWN; // Symmetrical
    mode
270. EPwm2Regs.TBCTL.bit.PHSEN = TB_ENABLE; // Slave module
271. EPwm2Regs.TBCTL.bit.PRDL = TB_SHADOW;
272. EPwm2Regs.TBCTL.bit.SYNCOSEL = TB_SYNC_IN; // sync flow-through
273. EPwm2Regs.CMPCTL.bit.SHDWAMODE = CC_SHADOW;
274. EPwm2Regs.CMPCTL.bit.SHDWBMODE = CC_SHADOW;
275. EPwm2Regs.CMPCTL.bit.LOADAMODE = CC_CTR_ZERO; // load on CTR=Zero
276. EPwm2Regs.CMPCTL.bit.LOADBMODE = CC_CTR_ZERO; // load on CTR=Zero
277. EPwm2Regs.AQCTLA.bit.CAU = AQ_SET; // set actions for EPWM2A
278. EPwm2Regs.AQCTLA.bit.CAD = AQ_CLEAR;
279. EPwm2Regs.DBCTL.bit.OUT_MODE = DB_FULL_ENABLE; // enable Dead-band
    module
280. EPwm2Regs.DBCTL.bit.POLSEL = DB_ACTV_HIC; // Active Hi complementary
281. EPwm2Regs.DBFED = 10; // 10 = 1usec
282. EPwm2Regs.DBRED = 10; // 10 = 1usec
283. }
```

```
284. void InitEPwm3Example()
285. {
286.     EPwm3Regs.TBPRD = 3750; // Period = 1600 TBCLK counts
287.     EPwm3Regs.TBPHS.half.TBPHS = 0; // Set Phase register to zero
288.     EPwm3Regs.TBCTL.bit.CTRMODE = TB_COUNT_UPDOWN; // Symmetrical
        mode
289.     EPwm3Regs.TBCTL.bit.PHSEN = TB_ENABLE; // Slave module
290.     EPwm3Regs.TBCTL.bit.PRDL = TB_SHADOW;
291.     EPwm3Regs.TBCTL.bit.SYNCOSEL = TB_SYNC_IN; // sync flow-through
292.     EPwm3Regs.CMPCTL.bit.SHDWAMODE = CC_SHADOW;
293.     EPwm3Regs.CMPCTL.bit.SHDWBMODE = CC_SHADOW;
294.     EPwm3Regs.CMPCTL.bit.LOADAMODE = CC_CTR_ZERO; // load on CTR=Zero
295.     EPwm3Regs.CMPCTL.bit.LOADBMODE = CC_CTR_ZERO; // load on CTR=Zero
296.     EPwm3Regs.AQCTLA.bit.CAU = AQ_SET; // set actions for EPWM3A
297.     EPwm3Regs.AQCTLA.bit.CAD = AQ_CLEAR;
298.     EPwm3Regs.DBCTL.bit.OUT_MODE = DB_FULL_ENABLE; // enable Dead-band
        module
299.     EPwm3Regs.DBCTL.bit.POLSEL = DB_ACTV_HIC; // Active Hi complementary
300.     EPwm3Regs.DBFED = 10; // 10 = 1usec
301.     EPwm3Regs.DBRED = 10; // 10 = 1usec
302. }
303. void InitEPwm4Example()
304. {
305.     EPwm4Regs.TBPRD = 1875; // Period = 1600 TBCLK counts
306.     EPwm4Regs.TBPHS.half.TBPHS = 0; // Set Phase register to zero
307.     EPwm4Regs.TBCTL.bit.CTRMODE = TB_COUNT_UPDOWN; // Symmetrical
        mode
308.     EPwm4Regs.TBCTL.bit.PHSEN = TB_ENABLE; // Slave module
309.     EPwm4Regs.TBCTL.bit.PRDL = TB_SHADOW;
310.     EPwm4Regs.TBCTL.bit.SYNCOSEL = TB_SYNC_IN; // sync flow-through
311.     EPwm4Regs.CMPCTL.bit.SHDWAMODE = CC_SHADOW;
```

```

312. EPwm4Regs.CMPCTL.bit.SHDWBMODE = CC_SHADOW;
313. EPwm4Regs.CMPCTL.bit.LOADAMODE = CC_CTR_ZERO; // load on CTR=Zero
314. EPwm4Regs.CMPCTL.bit.LOADBMODE = CC_CTR_ZERO; // load on CTR=Zero
315. EPwm4Regs.AQCTLA.bit.CAU = AQ_SET; // set actions for d++
316. EPwm4Regs.AQCTLA.bit.CAD = AQ_CLEAR;
317. EPwm4Regs.DBCTL.bit.OUT_MODE = DB_FULL_ENABLE; // enable Dead-band
    module
318. EPwm4Regs.DBCTL.bit.POLSEL = DB_ACTV_HIC; // Active Hi complementary
319. EPwm4Regs.DBFED = 10; // 10 = 1usec
320. EPwm4Regs.DBRED = 10; // 10 = 1usec
321. }
322. void Gpio_select(void)
323. {
324.     EALLOW;
325.     GpioCtrlRegs.GPAMUX1.all = 0x0000;
326.     GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO0 = 1; // ePWM1A active
327.     GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO1 = 1; // ePWM1B active
328.     GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO2 = 1; // ePWM2A active
329.     GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO3 = 1; // ePWM2B active
330.     GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO4 = 1; // ePWM3A active
331.     GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO5 = 1; // ePWM3B active
332.     GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO6 = 1; // duty (1-d)OUTDUTY++ 20k
333.     GpioCtrlRegs.GPBMUX1.all = 0x0000; // GPIO functionality GPIO32-GPIO47
334.     // GpioCtrlRegs.GPBMUX2.all = 0x00000000;
335.     GpioCtrlRegs.GPCMUX1.all = 0x0000; // GPIO functionality GPIO64-GPIO79
336.     // GpioCtrlRegs.GPCMUX2.all = 0x00000000;
337.     GpioCtrlRegs.GPADIR.all = 0x0000;
338.     GpioCtrlRegs.GPBDIR.all = 0x0000; // GPIO32-GPIO47 are output
339.     GpioCtrlRegs.GPCDIR.all = 0x0000; // GPIO64-GPIO79 are output
340.     EDIS;}

```

การอธิบายรายละเอียดคำสั่งโปรแกรมสำหรับชุดทดสอบ

บรรทัดที่1 – 7	การประกาศเรียกใช้งานไฟล์ในไลบรารีของบอร์ด TMDSDOCK28335
บรรทัดที่8 – 18	ตั้งค่าการใช้งานพอร์ตอนาล็อกเป็นดิจิตอลเพื่ออ่านค่าจากเซ็นเซอร์
บรรทัดที่19 – 38	ตั้งค่าฟังก์ชันต่าง ๆ ที่ใช้งาน
บรรทัดที่39 – 57	กำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้งาน
บรรทัดที่58 – 69	กำหนดค่าเดธแบนด์(dead band) สำหรับสร้างสัญญาณ PWM ของสวิตช์ ไอจีบีที6 ตัว
บรรทัดที่70 – 71	เข้าสู่ฟังก์ชันเมน
บรรทัดที่72 – 86	ตั้งค่าต่าง ๆ ของบอร์ด TMDSDOCK28335
บรรทัดที่87 – 103	คำสั่งเปิดการใช้งานพอร์ตอนาล็อกเป็นดิจิตอล
บรรทัดที่104 – 107	คำสั่งเปิดการใช้งาน ePWM จากบอร์ด
บรรทัดที่108– 122	ล้างค่ารีจิสเตอร์ต่าง ๆ ที่ค้างอยู่ในบอร์ด TMDSDOCK28335
บรรทัดที่123 – 124	เข้าสู่รูปแบบการทำงานไม่รู้จบ
บรรทัดที่125 – 163	คำสั่งอ่านค่าอะนาล็อกจากอุปกรณ์ตรวจวัดต่าง ๆ และแปลงเป็นค่าดิจิตอล ในส่วนนี้ยังมีสมการแปลงค่าต่าง ๆ ให้เป็นค่าจริงสำหรับนำไปใช้ควบคุม วงจร
บรรทัดที่164 – 180	แปลงปริมาณกระแสและแรงดันของไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสให้อยู่บน แกนหยุดนิ่ง
บรรทัดที่181 – 191	ตัวควบคุมพีไอฟ้งกระแสสลับบนแกนดี
บรรทัดที่192 – 202	ตัวควบคุมพีไอฟ้งกระแสสลับบนแกนคิว
บรรทัดที่203 – 217	ตัวควบคุมพีไอฟ้งกระแสตรง
บรรทัดที่219 – 238	กระบวนการแปลงปริมาณบนแกนดีคิวให้ได้สัญญาณควบคุมสามเฟส และ คำสั่งสัญญาณวัฏจักรหน้าที่
บรรทัดที่239 – 245	คำสั่งสร้างสัญญาณ PWM โดยการเปรียบเทียบสัญญาณควบคุมกับ สัญญาณนาฬิกาของบอร์ด
บรรทัดที่246 – 264	ฟังก์ชันการทำงานของพอร์ตePWM 1
บรรทัดที่265 – 283	ฟังก์ชันการทำงานของพอร์ตePWM 2
บรรทัดที่284 – 302	ฟังก์ชันการทำงานของพอร์ตePWM 3
บรรทัดที่303 – 321	ฟังก์ชันการทำงานของพอร์ตePWM 4
บรรทัดที่322 – 340	ฟังก์ชันการตั้งค่าพอร์ตอินพุตเอาต์พุตของบอร์ด TMDSDOCK28335

ประวัติผู้เขียน

นางสาวพุ่มพร วงศ์ใหญ่ เกิดเมื่อวันที่ 20 ตุลาคม พ.ศ. 2534 ที่อำเภอบ้านไธสง จังหวัดลำพูน การศึกษาระดับประถมศึกษาโรงเรียนบ้านไธสงวิทยา ระดับมัธยมศึกษาปีโรงเรียนธีรภานท์บ้านไธสง สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง ในปี พ.ศ. 2556 และในปีเดียวกันได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากนั้นในปีพ.ศ. 2558 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

ปี พ.ศ. 2559 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยได้รับทุนการศึกษากิตติบัณฑิตจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ระหว่างการศึกษาในระดับปริญญาเอกได้ทำหน้าที่เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้แก่ รายวิชา Fundamental of Electrical Engineering Laboratory, Applied Electronic Circuit Laboratory, Circuit & Devices Laboratory, Fundamental Of Electrical Machinery Laboratory, Engineering Electronics Laboratory

ผู้วิจัยมีความสนใจในงานทางด้านพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ อิเล็กทรอนิกส์กำลัง และการควบคุมอัตโนมัติ นอกจากนี้ ผู้วิจัยมีผลงานทางด้านวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่ซึ่งประกอบด้วยวารสารวิชาการจำนวน 1 บทความ การประชุมวิชาการจำนวน 2 บทความ ดังที่ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก