

เทคนิคการเพิ่มกระแสไฟตอร์นงสำหรับอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกิต



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2565  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A FAULT CURRENT BOOSTING TECHNIQUE FOR GRID CONNECTED INVERTERS



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2022

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เทคนิคการเพิ่มกระแสไฟตพ่วงสำหรับอินเวอร์เตอร์ชนิด เชื่อมต่อกริด
โดย	น.ส.ปริณพวรรณ ปัญญา
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพงศ์ สุวรรณกวิน

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพงศ์ สุวรรณกวิน)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.แนบบุญ หุ่นเจริญ)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.สมภาพ ผลไม้)	

ปริญาพรรณ ปัญญา : เทคนิคการเพิ่มกระแสผิดพลาดสำหรับอินเวอร์เตอร์ชนิด  
 เชื่อมต่อกริด. ( A FAULT CURRENT BOOSTING TECHNIQUE FOR GRID  
 CONNECTED INVERTERS) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.สุรพงศ์ สุวรรณกวิน

การเพิ่มขึ้นของการใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ และระบบไฟฟ้าแบบไมโครกริด ทำให้เกิดผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าดั้งเดิมหลายประการ ประเด็นสำคัญที่กล่าวถึงในวิทยานิพนธ์นี้คือ การเปลี่ยนแปลงของระดับกระแสผิดพลาดในระบบไฟฟ้า เมื่อโครงสร้างของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์ไม่สามารถจ่ายกระแสผิดพลาดในปริมาณเช่นเดียวกับเครื่องจักรกลเชิงโรตารี ทำให้กระแสผิดพลาดมีขนาดน้อยเกินไป โดยเฉพาะเมื่อระบบที่เป็นไมโครกริดเกิดการแยกโดดออกจากระบบ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการจ่ายกระแสผิดพลาดของอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อกริด โดยการควบคุมให้อินเวอร์เตอร์จ่ายกระแสผิดพลาดที่มีขนาดมากกว่า 2 เท่าของกระแสผิดพลาดที่เกิดขึ้นที่ยังเชื่อมต่อกับระบบเมื่อเกิดสภาวะแรงดันตก ภายใต้พิกัดกระแสและพิกัดแรงดันของอินเวอร์เตอร์ แนวคิดที่ใช้ในการเพิ่มขนาดกระแสคือ การใช้ความถี่เรโซแนนซ์ของตัวกรองแบบ LCL ที่เป็นวงจรรองทั่วไปที่ใช้ในอินเวอร์เตอร์ โดยที่อินเวอร์เตอร์สามารถทำงานได้ทั้งสองโหมดและสามารถเปลี่ยนโหมดระหว่างการทำงานแบบปกติ ไปยังโหมดการทำงานเมื่อเกิดความผิดพลาดในระบบ และสามารถกลับมาทำงานได้ในโหมดการทำงานปกติเมื่อกลับเข้าสู่สภาวะปกติได้ โดยทดสอบด้วยผลการจำลองผ่านโปรแกรม Matlab Simulink และอินเวอร์เตอร์ในห้องปฏิบัติการ จากผลการทดสอบทั้งในการจำลองและการทดสอบจริงเมื่อเกิดแรงดันตกหรือความผิดพลาดที่แรงดันที่จุดเชื่อมต่อ อินเวอร์เตอร์จ่ายกระแสรีแอคทีฟความถี่ปกติได้ตามข้อกำหนดของระบบไฟฟ้าได้และสามารถเชื่อมต่อบริบบกลับมาในโหมดปกติเมื่อแรงดันกลับเข้าสู่สภาวะปกติได้ อัลกอริทึมที่นำเสนอสามารถจ่ายกระแสความถี่สูงขณะเกิดแรงดันตกที่มีขนาดมากถึง 2.4 เท่าของกระแสผิดพลาดได้ โดยที่ขนาดกระแสและแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์มีขนาดไม่เกินพิกัด ทำให้อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับระบบได้โดยไม่ปลดตัวเองออกจากวงจร และกลับคืนสู่การควบคุมในโหมดปกติได้เมื่อแรงดันที่จุดเชื่อมต่อกลับเข้าสู่ค่าปกติ

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 6170467721 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD: Fault Current, Microgrid, Grid Connected Inverter, Renewable Energy  
Preenapan Panya : A FAULT CURRENT BOOSTING TECHNIQUE FOR GRID  
CONNECTED INVERTERS. Advisor: Assoc. Prof. SURAPONG SUWANKAWIN,  
Ph.D.

The growth of renewable energy sources and microgrid systems is becoming challenges in various aspects of the electrical power system. The main focus of this thesis is to address the decrease in fault current levels since inverters cannot inject a high fault current similar to synchronous generators in conventional electrical systems. This issue becomes particularly crucial when the microgrid operates in islanding mode. In this thesis, a fault current boosting technique for grid-connected inverters is proposed, by using the resonance frequency of the inverter's LCL filter to enlarge the output current up to 2 times of the inverter rated current. The inverter will switch from normal operation to low voltage operation when a fault occurs in the system and revert back to normal operation when the fault is cleared. The proposed algorithm is simulated using Matlab Simulink and confirmed by laboratory testing with a 3 kVA three-phase inverter. The results demonstrate that the inverter can inject high-frequency current and enlarge the current at the point of common coupling (PCC) to 2.4 times the inverter's output current, while the output current of inverter does not exceed its rating. The inverter remains connected throughout the low voltage period and switches back to normal operation when the voltage at PCC returns to the nominal voltage.

Field of Study: Electrical Engineering

Student's Signature .....

Academic Year: 2022

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์สุรพงศ์ สุวรรณกวิน ที่ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือตลอดการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบคุณพ่อและแม่ที่ให้เงินสนับสนุนทั้งทางการศึกษาและการใช้ชีวิต ขอขอบคุณครอบครัวที่ช่วยเหลือดูแลและเป็นกำลังใจให้ตลอดมา

นอกจากนี้ขอขอบคุณเพื่อนที่เข้าใจ ช่วยให้ความคิดเห็น และให้คำปรึกษาในบางโอกาส

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณทุกท่านที่ให้คำแนะนำ คำพูดที่ดี และให้เกียรติข้าพเจ้า ทุกท่านที่ได้มีโอกาสสื่อสารกันอย่างเข้าใจ และแลกเปลี่ยนความรู้กันอย่างไม่มีอคติ ไม่ว่าจะมากหรือน้อย ตลอดระยะเวลาการศึกษา และจัดทำวิทยานิพนธ์ แม้อาจไม่ได้กล่าวถึง

ปริณายพรณ ปัญญา



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	14
ความแตกต่างของลักษณะของกระแสผิวดพ่วงจากเครื่องจักรกลกลึงเชิงโครนัสและอินเวอร์เตอร์ .	16
ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า .....	17
วัตถุประสงค์ .....	21
ขอบเขต.....	21
ขั้นตอนการทำการศึกษาวิจัย.....	21
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	21
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
การลดลงของกระแสผิวดพ่วงในระบบไฟฟ้าเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของ.....	23
การจ่ายกระแสในช่วงแรงดันตกของอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับแหล่งพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ .....	25
การเพิ่มกระแสผิวดพ่วงในระบบไฟฟ้า.....	28
การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของระบบป้องกัน.....	29
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	31
ทฤษฎีไฟฟ้ากำลัง.....	31

โครงสร้างของระบบที่ใช้ในงานวิจัย.....	34
อินเวอร์เตอร์ชนิดสามระดับแบบ Neutral-Point-Clamped (NPC).....	35
วิธีการมอดูเลตแรงดันด้านออก.....	36
บทที่ 4 ระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์.....	38
ระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ในโหมดปกติ.....	38
แนวคิดระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ในสภาวะที่เกิดความผิดพลาดในระบบ.....	40
การควบคุมอินเวอร์เตอร์ในขณะเกิดความผิดพลาด.....	43
บทที่ 5 ผลการจำลองระบบด้วยโปรแกรมจำลอง.....	61
การจำลองวงรอบควบคุมกระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์.....	62
การจำลองวงรอบควบคุมกระแสกริด.....	63
การจำลองการจ่ายกระแสรีแอกทีฟความถี่ปกติเมื่อเกิดแรงดันตก.....	65
การจำลองการจ่ายกระแสความถี่สูงและกระแสรีแอกทีฟความถี่ต่ำเมื่อเกิดแรงดันตก.....	69
การจำลองการจ่ายกระแสความถี่สูงเมื่อเกิดแรงดันตก.....	72
บทที่ 6 ระบบอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	86
โครงสร้างของระบบอินเวอร์เตอร์.....	86
ระบบตรวจวัดและมอดูเลต.....	87
ซอฟต์แวร์และคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในการควบคุม.....	87
บทที่ 7 ผลการทดสอบกับระบบอินเวอร์เตอร์ในห้องแลปปฏิบัติการ.....	90
การทดสอบวงรอบควบคุมกระแสด้านออกอินเวอร์เตอร์.....	90
การทดสอบวงรอบควบคุมกระแสกริด.....	92
การทดสอบการจ่ายกระแสรีแอกทีฟความถี่ปกติขณะเกิดแรงดันตก.....	93
การทดสอบการจ่ายกระแสความถี่สูง.....	96
บทที่ 8 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	104
ข้อเสนอแนะ.....	105



บรรณานุกรม..... 106

ประวัติผู้เขียน..... 109



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ผลการจำลองของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินเมื่อเกิดความผิดปกติพ่วงแบบ 1 เฟส [4] .....	24
ตารางที่ 2 ผลการจำลองของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินเมื่อเกิดความผิดปกติพ่วงแบบ 3 เฟส [4] .....	24
ตารางที่ 3 แรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ตามสถานะของสวิตช์.....	35
ตารางที่ 4 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ของระบบ.....	61



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 ลักษณะการจ่ายกระแสผิดพลาดของเครื่องจักรกลเชิงโรตอร์[1].....	16
รูปที่ 2 ขนาดของกระแสผิดพลาดจากเครื่องจักรกลเชิงโรตอร์เทียบกับอินเวอร์เตอร์[2].....	17
รูปที่ 3 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อในสภาวะแรงดันต่ำ (Low-Voltage Ride-Through (LVRT))[3].....	18
รูปที่ 4 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อในสภาวะแรงดันต่ำจนถึงศูนย์ (Zero-Voltage Ride-Through (ZVRT) ) [3].....	19
รูปที่ 5 ข้อกำหนดการจ่ายกระแสรีแอกทีฟให้กับระบบในช่วงแรงดันตก[3].....	19
รูปที่ 6 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อในสภาวะแรงดันตกของประเทศเยอรมัน.....	20
รูปที่ 7 ข้อกำหนดการจ่ายกระแสรีแอกทีฟให้กับระบบในช่วงแรงดันตก .....	20
รูปที่ 8 ระบบที่ใช้จำลองใน[4].....	23
รูปที่ 9 ผลการจำลองในงานวิจัยที่[7] .....	27
รูปที่ 10 แผนผังการควบคุม STATCOM ใน[9].....	28
รูปที่ 11 โครงสร้างของระบบอินเวอร์เตอร์แบบสามเฟสสามสายชนิดเชื่อมต่อกริด.....	34
รูปที่ 12 อินเวอร์เตอร์ชนิดสามระดับแบบ Neutral-Point-Clamped (NPC).....	35
รูปที่ 13 แผนผังการควบคุมอินเวอร์เตอร์ในโหมดปกติ.....	38
รูปที่ 14 วงจรควบคุมเวกเตอร์เฟสล้อยู่ในโหมดปกติ .....	39
รูปที่ 15 วงจรควบคุมของอินเวอร์เตอร์บนแกนอ้างอิงเชิงโรตอร์.....	40
รูปที่ 16 วงจรสมมูลเมื่อเกิดความผิดพลาดแบบสามเฟสที่จุด PCC.....	41
รูปที่ 17 แผนภาพโเบเดของฟังก์ชันโอนย้ายระหว่างกระแสด้านจุด PCC และกระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์ .....	42
รูปที่ 18 แผนผังการควบคุมอินเวอร์เตอร์ในสภาวะแรงดันตก .....	43
รูปที่ 19 วงจรเฟสล้อยู่ในขณะเกิดความผิดพลาด .....	44
รูปที่ 20 แผนผังไดอะแกรมของระบบคอนโทรลคอนเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสแบบ LCL .....	45

รูปที่ 21 แผนภาพแสดงเวกเตอร์และเฟสของแรงดันอ้างอิง.....	46
รูปที่ 22 ไดอะแกรมวงรอบควบคุมกระแสอินเวอร์เตอร์ .....	47
รูปที่ 23 วงรอบควบคุมกระแสอินเวอร์เตอร์บนแกนหมุนซิงโครนัส .....	48
รูปที่ 24 แผนภาพตำแหน่งขั้วและศูนย์ของวงรอบควบคุมกระแสอินเวอร์เตอร์ .....	49
รูปที่ 25 แผนภาพโบทเดของวงรอบควบคุมกระแสอินเวอร์เตอร์ .....	49
รูปที่ 26 ผลตอบสนองของวงรอบควบคุมกระแสอินเวอร์เตอร์ .....	50
รูปที่ 27 วงรอบควบคุมกระแสที่จุด PCC บนกรอบอ้างอิงซิงโครนัส.....	51
รูปที่ 28 วงรอบควบคุมกระแสที่จุด PCC .....	51
รูปที่ 29 แผนภาพโบทเดของวงรอบควบคุมกระแสกริด .....	53
รูปที่ 30 แผนภาพตำแหน่งขั้วและศูนย์ของวงรอบควบคุมกระแสกริด.....	53
รูปที่ 31 ผลตอบสนองของวงรอบควบคุมกระแสกริด .....	53
รูปที่ 32 แนวคิดการสร้างระบบจ่ายกระแสทั้งสองความถี่ .....	54
รูปที่ 33 วงรอบควบคุมขนาดกระแสอินเวอร์เตอร์.....	56
รูปที่ 34 แผนภาพโบทเดฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรรอง .....	57
รูปที่ 35 แผนภาพตำแหน่งขั้วและศูนย์ของวงจรรอง.....	57
รูปที่ 36 การกำหนดกระแสความถี่สูงที่จ่าย .....	58
รูปที่ 37 ขอบเขตของพิกัดกระแสและแรงดันอินเวอร์เตอร์.....	60
รูปที่ 38 ผลตอบสนองของวงรอบควบคุมกระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์เมื่อมีการสั่งกระแสในแกน d 7.89 A.....	62
รูปที่ 39 ผลตอบสนองของวงรอบควบคุมกระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์เมื่อมีการสั่งกระแสในแกน q 7.89 A.....	63
รูปที่ 40 ผลตอบสนองของวงรอบควบคุมกระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์เมื่อมีการสั่งกระแสในแกน d 7.89 A.....	64
รูปที่ 41 ผลตอบสนองของวงรอบควบคุมกระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์เมื่อมีการสั่งกระแสในแกน q 7.89 A.....	65

รูปที่ 42 สัดส่วนการจ่ายกระแสรีแอกทีฟตามขนาดแรงดัน .....	66
รูปที่ 43 ผลการจำลองสภาวะแรงดันตกช่วงเวลา -0.2 ถึง 0.5 .....	67
รูปที่ 44 ผลการจำลองสภาวะแรงดันตกช่วงเวลา -0.02 ถึง 0.04.....	68
รูปที่ 45 ผลการจำลองสภาวะแรงดันตกช่วงเวลา 0.2 ถึง 0.28 .....	69
รูปที่ 46 ผลการจำลองการจ่ายกระแสความถี่สูงในสภาวะแรงดันตก.....	71
รูปที่ 47 ผลการจำลองวงรอบควบคุมการจ่ายกระแสความถี่สูงในสภาวะแรงดันตก .....	72
รูปที่ 48 ผลการจำลองระบบเมื่อแรงดันกริดลดลงเหลือ 0.8 p.u. ....	74
รูปที่ 49 ผลการจำลองระบบเมื่อแรงดันกริดลดลงเหลือ 0.5 p.u. ....	75
รูปที่ 50 ผลการจำลองระบบเมื่อแรงดันกริดลดลงเหลือ 0.2 p.u. ....	76
รูปที่ 51 ผลการจำลองระบบเมื่อแรงดันกริดลดลงเหลือ 0 p.u. ....	77
รูปที่ 52 ขนาดกระแสอินเวอร์เตอร์และกระแสกริดเฟส a ในช่วงแรงดันตกที่ 0.8 p.u.....	78
รูปที่ 53 ขนาดกระแสอินเวอร์เตอร์และกระแสกริดเฟส a ในช่วงแรงดันตกที่ 0.5 p.u.....	79
รูปที่ 54 ขนาดกระแสอินเวอร์เตอร์และกระแสกริดเฟส a ในช่วงแรงดันตกที่ 0.2 p.u.....	79
รูปที่ 55 ขนาดกระแสอินเวอร์เตอร์และกระแสกริดเฟส a ในช่วงแรงดันตกที่ 0.0 p.u.....	80
รูปที่ 56 ผลการจำลองระบบเมื่อแรงดันกริดลดลงเหลือ 0.0 p.u. (จ่ายเฉพาะกระแสความถี่สูง).....	82
รูปที่ 57 ผลการจำลองระบบเมื่อแรงดันกริดลดลงเหลือ 0.0 p.u. (จ่ายเฉพาะกระแสความถี่สูง).....	83
รูปที่ 58 ขนาดกระแสอินเวอร์เตอร์และกระแสกริดเฟส a ในช่วงแรงดันตกที่ 0.3 p.u. (จ่ายเฉพาะ กระแสความถี่สูง) .....	84
รูปที่ 59 ขนาดกระแสอินเวอร์เตอร์และกระแสกริดเฟส a ในช่วงแรงดันตกที่ 0.0 p.u. (จ่ายเฉพาะ กระแสความถี่สูง) .....	85
รูปที่ 60 ผลตอบสนองของวงรอบควบคุมกระแสกระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์ในระบบจริงเมื่อมี การสั่งกระแสในแกน d 7.89 A.....	91
รูปที่ 61 ผลตอบสนองของวงรอบควบคุมกระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์ในระบบจริงเมื่อมีการสั่ง กระแสในแกน q 7.89 A.....	91

รูปที่ 62 ผลตอบสนองของวงรอบควบคุมกระแสกริดในระบบจริงเมื่อมีการสั่งกระแสในแกน  $q$  7.89  
A..... 92

รูปที่ 63 ผลตอบสนองของวงรอบควบคุมกระแสกริดในระบบจริงเมื่อมีการสั่งกระแสในแกน  $q$  7.89  
A..... 93

รูปที่ 64 ผลการทดสอบการจ่ายกระแสรีแอคทีฟขณะเกิดแรงดันตกแบบสามเฟส ..... 94

รูปที่ 65 ผลการทดสอบการจ่ายกระแสรีแอคทีฟขณะเกิดแรงดันตกแบบสามเฟสขณะแรงดันลด.... 95

รูปที่ 66 ผลการทดสอบการจ่ายกระแสรีแอคทีฟขณะเกิดแรงดันตกแบบสามเฟสขณะแรงดันเพิ่ม .. 96

รูปที่ 67 ผลตอบสนองของระบบควบคุมในโหมดการจ่ายกระแสความถี่สูงของอินเวอร์เตอร์ในระบบ  
จริงเมื่อเกิดสภาวะแรงดันตกแบบสามเฟสในระบบไฟฟ้าช่วงเวลา  $t = -0.2 - 0.6$ ..... 97

รูปที่ 68 ผลการทดสอบการจ่ายกระแสความถี่สูงเกิดเมื่อแรงดันตกแบบสามเฟส ..... 98

รูปที่ 69 ผลการทดสอบการจ่ายกระแสความถี่สูงเกิดเมื่อแรงดันตกแบบสามเฟส ..... 99

รูปที่ 70 ผลการทดสอบการจ่ายกระแสความถี่สูงเกิดเมื่อแรงดันตกแบบสามเฟส ..... 100

รูปที่ 71 ภาพขยายของขนาดกระแสอินเวอร์เตอร์และกระแสกริดที่สภาวะคงตัว ..... 101

รูปที่ 72 ผลการทดสอบการจ่ายกระแสความถี่สูงเกิดเมื่อแรงดันตกแบบสามเฟสและแรงดันกลับสู่  
สภาวะปกติแบบต่อเนื่อง ด้วยอินเวอร์เตอร์ในห้องแลปปฏิบัติการ..... 102

รูปที่ 73 ผลตอบสนองของระบบควบคุมในโหมดการจ่ายกระแสความถี่สูงขนาดเท่ากับกระแสพิกัด  
ของอินเวอร์เตอร์ในระบบจริงเมื่อเกิดสภาวะแรงดันตกแบบสามเฟสในระบบไฟฟ้า..... 103

## บทที่ 1

### บทนำ

ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน เช่น แหล่งไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ หรือ กังหันลม ได้เข้ามามีสัดส่วนเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ในระบบโครงข่ายไฟฟ้า เนื่องจากความต้องการอนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อมในปัจจุบัน ไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนเหล่านี้ เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าผ่านอินเวอร์เตอร์ (Inverter Interfaced distributed energy source; IIDERs) ที่มีคุณลักษณะและการตอบสนองต่อระบบที่แตกต่างจากระบบแบบดั้งเดิมที่ส่วนมากมีแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าหลักเป็นเครื่องจักรกลเชิงโครนัส การเพิ่มเข้ามาของ IIDERs ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในหลายส่วนของระบบโครงข่ายไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเกิดสภาวะแรงดันตกหรือความผิดปกติในระบบไฟฟ้า ระบบป้องกันของอินเวอร์เตอร์จะปลดตัวเองออกจากระบบโครงข่ายเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ภายในระบบ การปลดตัวเองออกจากระบบโครงข่ายเป็นจำนวนมากพร้อมๆกันของ IIDERs อาจก่อให้เกิดปัญหาด้านเสถียรภาพต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า นำไปสู่การเกิดไฟดับเป็นวงกว้าง ผู้ให้บริการโครงข่ายไฟฟ้าจึงได้ออกข้อกำหนดในการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าให้ IIDERs ทำการเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายในขณะเกิดแรงดันตกเป็นระยะเวลาหนึ่ง ในข้อกำหนดของระบบโครงข่ายในบางประเทศเช่น ประเทศเยอรมัน ยังได้มีการกำหนดให้อินเวอร์เตอร์จ่ายกระแสรีแอกทีฟให้กับระบบโครงข่ายในขณะที่เกิดแรงดันตก เพื่อช่วยรักษาระดับแรงดันในระบบโครงข่าย อย่างไรก็ตาม IIDERs มีลักษณะการจ่ายกระแสผิดปกติที่แตกต่างออกไป การจ่ายกระแสจะถูกจำกัดกระแสผ่านวงรอบควบคุมกระแสของอินเวอร์เตอร์ เพื่อป้องกันการเกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์สวิตช์กำลังจากการกระแสเกินพิกัด การควบคุมจึงจำกัดให้จ่ายกระแสผิดปกติให้แก่ระบบเพียง 1-1.2 เท่าของกระแสพิกัดเท่านั้นตาม แตกต่างจากระบบดั้งเดิมที่เครื่องจักรกลเชิงโครนัสจะจ่ายกระแสผิดปกติมากถึง 4-10 เท่าของกระแสพิกัด อุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้ากำลังที่ถูกปรับตั้งการทำงานตามขนาดกระแสผิดปกติจากระบบโครงข่ายไฟฟ้าดั้งเดิม เช่น ฟิวส์ และ รีเลย์ป้องกันกระแสเกินไม่สามารถตรวจจับความผิดปกติในระบบไฟฟ้าได้อย่างถูกต้อง นำไปสู่ความเสียหายต่ออุปกรณ์ในระบบโครงข่ายไฟฟ้าและความไม่ปลอดภัยต่อผู้ใช้ไฟฟ้า ผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจาย (Distributed Generators; DG) โดยเฉพาะ IIDERs เข้ามาในระบบโครงข่าย สามารถเกิดได้หลายกรณีเช่น

#### 1. ระบบป้องกันไม่สามารถปิดวงจรกลับแบบอัตโนมัติได้

เมื่อเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้า รีเลย์จะไม่ได้ตัดวงจรอย่างถาวรในทันที แต่จะมีการตัดวงจรเป็นช่วงระยะเวลาสั้น ๆ (Recloser) ชั่วขณะเพื่อตัดแยกความผิดปกติที่เกิดขึ้นชั่วคราว โดยอาจมีการตัด

และเชื่อมต่อบางจรสลับไปมาอย่างต่อเนื่องอยู่หลายครั้ง จนกว่าจะแยกแยะได้ว่าเป็นความผิดปกติของแบบถาวรจึงทำการเปิดวงจร แต่เมื่อมีการเพิ่ม IIDERs เข้ามาในระบบ พฤติกรรมบางประการของอินเวอร์เตอร์ที่เกิดขึ้นโดยไม่ได้ตั้งใจ ตัวอย่างเช่นการเกิดอาร์คตอนเปิดวงจรชั่วขณะ อาจจะทำให้ความผิดปกติชั่วคราวถูกตีความว่าเป็นความผิดปกติแบบถาวรได้ และเกิดการเปิดวงจรอย่างถาวร

## 2. เกิดการแยกโดด (Islanding) จากระบบโดยไม่ตั้งใจ

การแยกโดดจากระบบหมายถึงการที่ DG หลายตัวปลดตัวเองออกจากระบบพร้อมกัน ทำให้เกิดการจ่ายโหลดด้วยกำลังไฟฟ้าจาก DG เท่านั้น ซึ่งเป็นปัญหาด้านความปลอดภัย ต่อการซ่อมแซมและฟื้นฟูระบบ เนื่องจากยังมีส่วนที่มีการเชื่อมต่อและยังคงมีกระแสไฟฟ้าอยู่ นอกจากนี้การแยกโดดออกจากระบบเมื่อต้องจ่ายโหลดด้วย DG เพียงอย่างเดียวอาจส่งผลกระทบต่อโหลดบางประเภทที่มีความเปราะบาง

## 3. รีเลย์ไม่สามารถตรวจจับความผิดปกติได้ (Protection Blinding)

เมื่อเกิดความผิดปกติ DG จะสร้างกระแสผิดปกติซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดพิกัดของ DG ซึ่งอาจจะไปช่วยจ่ายกระแสผิดปกติของระบบ ซึ่งหากอุปกรณ์ป้องกันอยู่ในตำแหน่งด้านบน (upstream) จะได้รับกระแสที่มีขนาดน้อยกว่าขนาดกระแสที่ออกแบบไว้ให้ระบบป้องกันเปิดวงจรในตอนก่อนที่จะมีการติดตั้ง DG ทำให้รีเลย์ป้องกันไม่สามารถตรวจจับความผิดปกติได้ อาจจะต้องมีการปรับค่ากระแสรีเลย์ใหม่ได้หากมีการเพิ่ม DG อย่างไรก็ตาม การปรับค่าใหม่ก็อาจทำให้ระบบป้องกันมีความอ่อนไหวมากขึ้น และทำให้เกิดการเปิดวงจรโดยไม่จำเป็น

## 4. ขนาดกระแสผิดปกติลดลง

โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบไมโครกริดแบบแยกโดด (islanded microgrid) ที่อุปกรณ์ส่วนใหญ่ในระบบเป็น IIDERs ขนาดของกระแสผิดปกติในระบบจะมีขนาดลดลงอย่างมาก ซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างอย่างมากระหว่างระบบขณะที่แยกโดด กับระบบขณะที่เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายทำให้อุปกรณ์ในระบบป้องกันไม่สามารถทำงานได้อย่างปกติ ตามที่ได้ออกแบบไว้เดิม

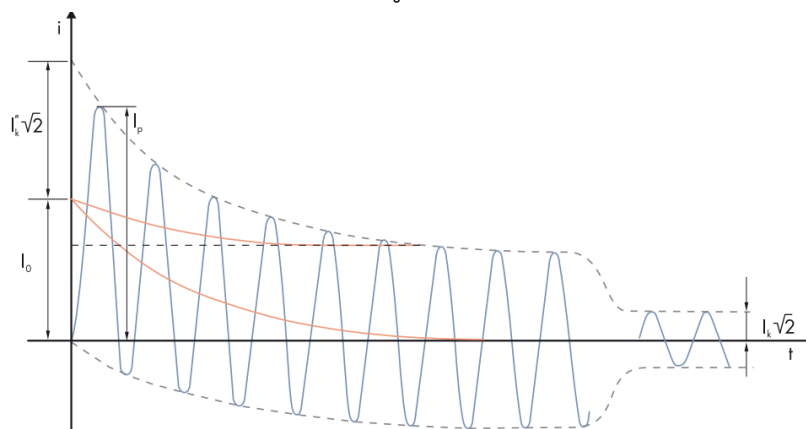
## 5. ความคลุมเครือของลักษณะรูปแบบของกระแสผิดปกติที่จ่ายโดย IIDERs

แม้จะมีข้อกำหนดการเชื่อมต่อกับระบบเมื่อเกิดความผิดปกติ หรือการจ่ายกระแสรีแอกทีฟขณะเกิดแรงดันตก แต่ข้อกำหนดเหล่านี้อ้างอิงจากการเกิดความผิดปกติแบบสมดุลเท่านั้น ยังไม่มีข้อกำหนดใด ๆ ที่อ้างอิงถึงการเกิดความผิดปกติที่ไม่สมดุล ดังนั้นรูปแบบของกระแสผิดปกติที่จ่ายโดย IIDERs จึงขึ้นอยู่กับผู้ผลิต



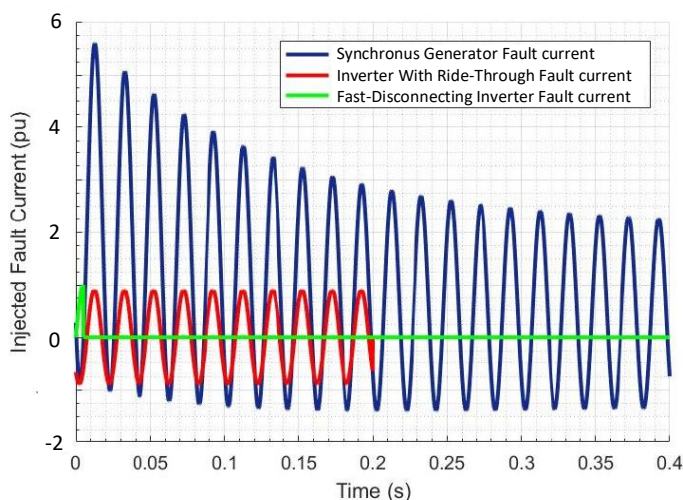
### ความแตกต่างของลักษณะของกระแสผิดพลาดจากเครื่องจักรกลเชิงโครนัสและอินเวอร์เตอร์

เมื่อเกิดความผิดพลาดในระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องจักรกล จะมีการจ่ายกระแสผิดพลาดชั่วแวบ ( $I_k''$ ) ที่มีขนาดสูงสุดประมาณ 6 เท่าของกระแสพิกัด เป็นเวลาประมาณ 0.1 วินาที ตามมาด้วย กระแสในช่วงสภาวะชั่วครู่ ( $I_0$ ) ขนาด 2 – 4 เท่าของกระแสพิกัดเป็นเวลาประมาณ 0.5 ถึง 2 วินาที และสุดท้ายคือกระแสในช่วงสภาวะอยู่ตัว ( $I_k$ ) ที่จะจ่ายไปอย่างต่อเนื่องจนกว่าจะมีการเปิดวงจร ลักษณะกระแสอย่างคร่าวๆ เป็นไปตามรูปที่ 3



รูปที่ 1 ลักษณะการจ่ายกระแสผิดพลาดของเครื่องจักรกลเชิงโครนัส[1]

แหล่งผลิตไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายผ่านอินเวอร์เตอร์ เช่น ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ หรือระบบผลิตไฟฟ้าจากกังหันลม ไม่มีคุณสมบัติเช่นเดียวกับเครื่องจักรกลเชิงโครนัส กระแสต้านออกของอินเวอร์เตอร์จะถูกจำกัดกระแสผ่านวงรอบควบคุมกระแส หากไม่มีข้อกำหนดในการกำกับการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าในช่วงแรงดันตกหรือเมื่อเกิดความผิดพลาดในระบบ การทำงานของอินเวอร์เตอร์จะเป็นไปตามแต่ที่ผู้ผลิตหรือผู้ใช้งานกำหนด โดยส่วนมากเนื่องจากระบบอินเวอร์เตอร์ถูกควบคุมด้วยซอฟต์แวร์ เมื่ออินเวอร์เตอร์ตรวจจับความผิดพลาดได้ก็จะสามารถตัดตัวเองออกจากระบบในทันที เพื่อไม่ให้เกิดกระแสเกินพิกัดที่ส่งผลให้อุปกรณ์สวิตซ์กำลังภายในเสียหาย แต่หากอินเวอร์เตอร์ถูกกำหนดให้จ่ายกระแสโดยข้อกำหนดของระบบไฟฟ้า ก็จะสามารถจ่ายกระแสผิดพลาดที่มีสูงสุดได้เพียง 1.2 เท่าของกระแสพิกัดเท่านั้น ขนาดกระแสผิดพลาดจากอินเวอร์เตอร์ก็ยังมีขนาดน้อยกว่ากระแสผิดพลาดที่จ่ายจากเครื่องจักรกลเชิงโครนัสถึง 4-10 เท่า รูปที่ 2 หากเปรียบเทียบกระแสผิดพลาดจากเครื่องจักรกลและอินเวอร์เตอร์จะเห็นได้ว่ากระแสผิดพลาดของอินเวอร์เตอร์เมื่อจ่ายกระแสผิดพลาดเท่ากับ 1.2 เท่าก็ยังคงน้อยกว่ามาก และหากจ่ายกระแส ทำให้การเพิ่มขึ้นของ IEDRs ที่เข้ามาแทนที่เครื่องจักรกลเชิงโครนัสเป็นปริมาณมากในระบบโครงข่ายทำให้กระแสผิดพลาดโดยรวมลดลง



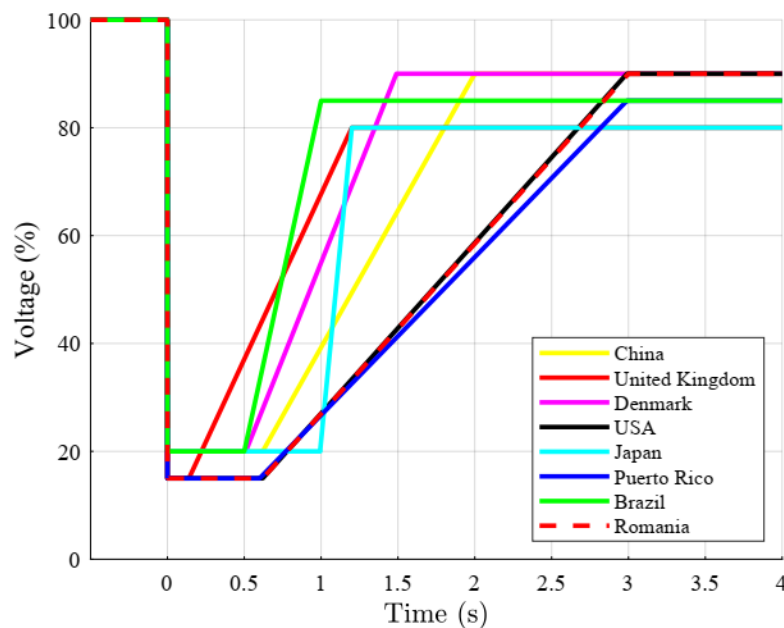
รูปที่ 2 ขนาดของกระแสผิดพลาดจากเครื่องจักรกลเชิงโรตอร์เทียบกับอินเวอร์เตอร์[2]

### ข้อกำหนดการเชื่อมต่อบนระบบโครงข่ายไฟฟ้า

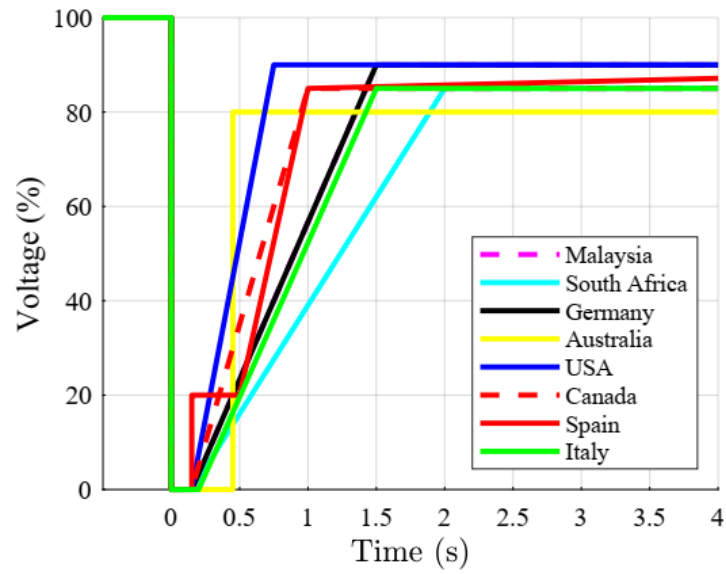
โดยทั่วไปเมื่อเกิดความผิดพลาดในระบบไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมักเป็นความผิดพลาดแบบชั่วคราว เมื่อระบบป้องกันตรวจจับความผิดพลาดได้จะทำการเปิดวงจรเพื่อกำจัดความผิดพลาดที่เกิดขึ้น และปิดวงจรโดยอัตโนมัติเมื่อความผิดพลาดถูกกำจัด ดังนั้นระบบป้องกันจะต้องสามารถรับมือกับความผิดพลาดและทั้งแบบถาวร และความผิดพลาดชั่วคราวได้หากเกิดสภาวะผิดพลาดชั่วคราวในระบบโครงข่ายไฟฟ้าหาก IIDERs จำนวนมาก หรือขนาดใหญ่ปลดตัวเองออกจากระบบโครงข่ายไฟฟ้าทันที อาจส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าของระบบโดยรวม โครงข่ายไฟฟ้าจึงต้องมีความสามารถที่ทำงานหรือยังคงเชื่อมต่อกับระบบอย่างต่อเนื่องในช่วงระยะเวลาหนึ่งที่เกิดความผิดพลาดแบบชั่วคราว ผู้ให้บริการโครงข่ายไฟฟ้าจึงได้ออกข้อกำหนดในการเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายที่กำหนดให้ IIDERs ยังคงการเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายในระยะเวลาหนึ่ง ข้อกำหนดในแต่ละประเทศ[1] แตกต่างกันไปดังรูปที่ 2 แสดงรายละเอียดของการเชื่อมต่อและช่วงเวลาที่ยอดเชื่อมต่อกับระบบเมื่อเกิดแรงดันตกชั่วคราว (Low-Voltage Ride-Through (LVRT)) ของแต่ละประเทศโดยเมื่อแรงดันลดลงต่ำกว่า 80% ถึงแรงดันต่ำที่สุดโดยทั่วไปคือ 20% IIDERs จะต้องไม่ปลดการเชื่อมต่อเป็นระยะเวลาหนึ่งที่กำหนด เช่น ประเทศบราซิลกำหนดให้มีการเชื่อมต่อกับระบบเมื่อเกิดแรงดันตกเหลือ 20% เป็นระยะเวลา 0.5s ระบบสามารถฟื้นฟูแรงดันกลับมาที่ 85% ภายใน 1s และจนกว่านอกจากนี้ยังมีกรณีพิเศษที่มีข้อกำหนดให้เชื่อมต่อกับระบบเมื่อแรงดันตกเหลือ 0 V (Zero-Voltage Ride-Through (ZVRT)) ซึ่งเป็นกรณีพิเศษแยกต่างหากจาก ข้อกำหนดของแต่ละประเทศได้มีช่วงเวลาที่กำหนดการเชื่อมต่อของระบบต่างกันออกไป เช่น ประเทศอิตาลีจะกำหนดให้เชื่อมต่อกับระบบเป็นเวลา 200ms และจะต้องเชื่อมต่ออย่างต่อเนื่องหากระบบสามารถฟื้นฟูแรงดันกลับมาที่

85% ได้โดยไม่ปลดออกจากระบบ ประเทศเยอรมัน 150ms และประเทศออสเตรเลียมากถึง 450ms แสดงให้เห็นได้ในรูปที่ 3 รูปที่ 4 คือตัวอย่างข้อกำหนดของประเทศเยอรมันซึ่งเป็นผู้นำในด้านพลังงานทดแทนได้มีข้อกำหนดการเชื่อมต่อในสภาวะเกิดแรงดันตกที่จุดเชื่อมต่อ พื้นที่ A คือส่วนที่ IIDERs จะต้องคงการเชื่อมต่อกับระบบตามระยะเวลาที่กำหนด เนื่องจากระบบโครงข่ายต้องการให้ IIDERs มีคุณลักษณะการตอบสนองที่เหมือนกับระบบดั้งเดิมคือการจ่ายกระแสรีแอกทีฟให้กับระบบ ในขณะที่เกิดความผิดปกติในระบบโครงข่าย ในข้อกำหนดของระบบโครงข่ายในแต่ละประเทศจึงได้มีการกำหนดการจ่ายกระแสรีแอกทีฟให้กับระบบโครงข่ายในขณะอื่นเวอร์เตอร์ยังคงเชื่อมต่อกับระบบขณะที่เกิดแรงดันตกอีกด้วยตามรูปที่ 4 โดยแต่อาจมีการกำหนดขนาดกระแสที่ต่อขนาดแรงดันต่างกันออกไป ตัวอย่างเช่นประเทศเยอรมันได้มีการกำหนดการจ่ายกระแสรีแอกทีฟดังนี้

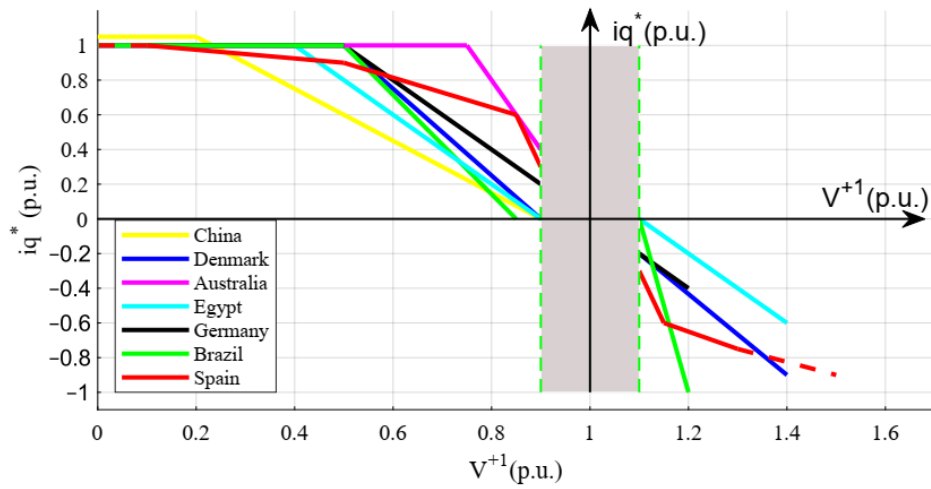
$$\begin{cases} i_q^* = 2(0.9 - v)I_{rated} & (0.5 < v < 0.9) \\ i_q^* = 1I_{rated} & (v \leq 0.5) \\ i_q^* = 0 & (v \geq 0.9) \end{cases} \quad (1)$$



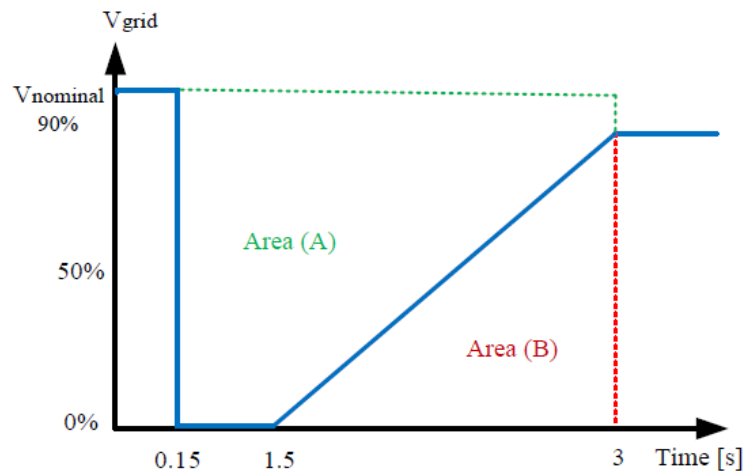
รูปที่ 3 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อในสภาวะแรงดันต่ำ (Low-Voltage Ride-Through (LVRT))[3]



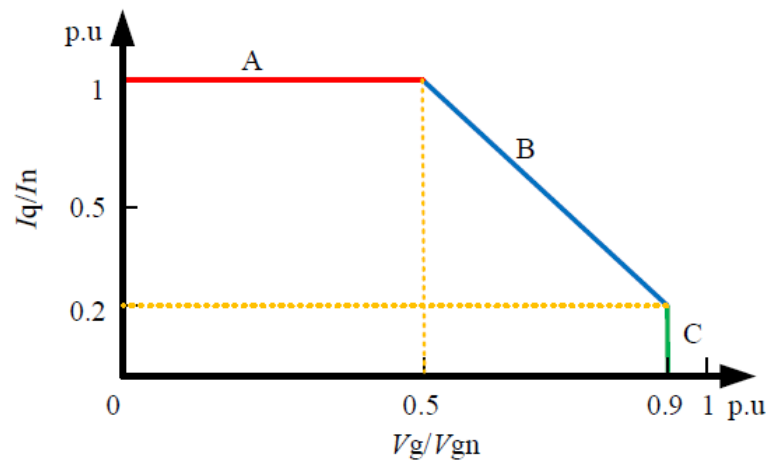
รูปที่ 4 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อในสภาวะแรงดันต่ำจนถึงศูนย์ (Zero-Voltage Ride-Through (ZVRT) ) [3]



รูปที่ 5 ข้อกำหนดการจ่ายกระแสรีแอกทีฟให้กับระบบในช่วงแรงดันตก [3]



รูปที่ 6 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อในสภาวะแรงดันตกของประเทศเยอรมัน



รูปที่ 7 ข้อกำหนดการจ่ายกระแสรีแอกทีฟให้กับระบบในช่วงแรงดันตก

### วัตถุประสงค์

1. ควบคุมให้อินเวอร์เตอร์จ่ายกระแสผิดพลาดที่มีขนาดมากกว่า 2 เท่าของกระแสพิกัดในขณะที่ยังเชื่อมต่อกับระบบเมื่อเกิดสภาวะแรงดันตก ภายใต้พิกัดกระแสและพิกัดแรงดันของอินเวอร์เตอร์
2. ควบคุมให้อินเวอร์เตอร์สามารถทำงานได้ทั้งสองโหมดและสามารถเปลี่ยนโหมดระหว่างการทำงานแบบปกติ ไปยังโหมดการทำงานเมื่อเกิดความผิดปกติในระบบ และสามารถกลับมาทำงานได้ในโหมดการทำงานปกติเมื่อกลับเข้าสู่สภาวะปกติ

### ขอบเขต

1. นำเสนออัลกอริทึมในการควบคุมให้อินเวอร์เตอร์จ่ายกระแสผิดพลาดที่มากกว่า 2 เท่าของกระแสพิกัดโดยที่กระแสภายในอินเวอร์เตอร์และแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ยังอยู่ภายใต้ค่าพิกัด
2. อินเวอร์เตอร์ที่พิจารณาเป็นอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกิริต แบบสามเฟสสามสาย ขนาด 3 kVA 230/400V
3. วงจรกรองกระแสที่ใช้ในวงจรเป็นชนิด LCL

### ขั้นตอนการทำการศึกษาวิจัย

1. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับผลกระทบของแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่เชื่อมต่อกับอินเวอร์เตอร์ในแง่ของกระแสผิดพลาดที่หายไปจากระบบ และงานวิจัยที่เกี่ยวกับวิธีพัฒนาการจ่ายกระแสรีแอกทีฟของอินเวอร์เตอร์
2. ศึกษาวิธีการควบคุมอินเวอร์เตอร์
3. ออกแบบการควบคุมอินเวอร์เตอร์
4. ทำการจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์ทั้งในโหมดปกติและในโหมดแรงดันตกชั่วคราว
5. ออกแบบซอฟต์แวร์สำหรับการควบคุมอินเวอร์เตอร์
6. ทดสอบการทำงานกับอุปกรณ์จริง
7. เขียนวิทยานิพนธ์

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การจ่ายกระแสที่เพิ่มขึ้นของอินเวอร์เตอร์ขณะที่เกิดความผิดปกติจะช่วยลดผลกระทบต่อระบบป้องกันเนื่องจากกระแสที่ผิดพลาดที่ลดลงจากการเพิ่มขึ้นของ IIDERS โดยสามารถทำให้รีเลย์

สามารถตัดวงจรได้รวดเร็วขึ้นเป็นการกำจัดความผิดพลาดในระบบ โดยที่ปรับตั้งการจ่ายกระแสได้ตามความเหมาะสมของกระแสผิดพลาดที่ต้องการให้ปรับเปลี่ยนไปตามตำแหน่งและขนาดของ IIDERS ได้

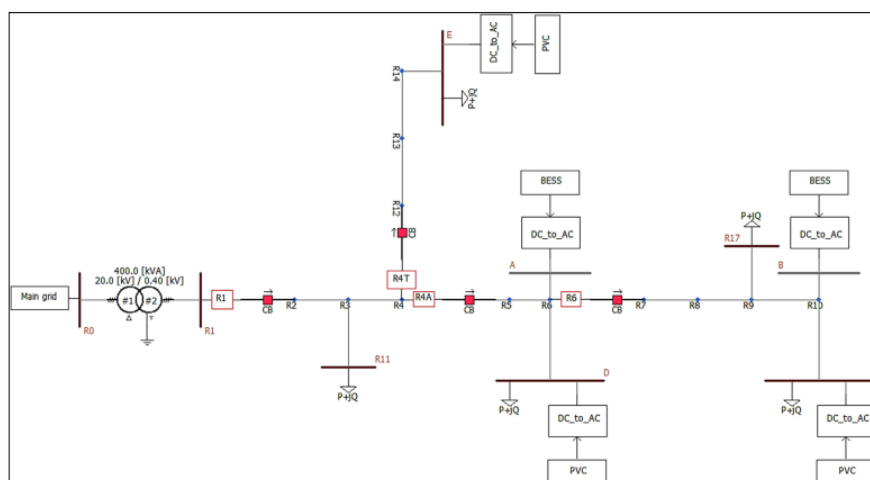


## บทที่ 2

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### การลดลงของกระแสผิดพลาดในระบบไฟฟ้าเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของ

งานวิจัยที่ [4] ได้ทำการวิเคราะห์ระบบป้องกันของระบบไมโครกริดแรงดัน 400V โดยใช้ระบบโครงข่ายมาตรฐานของ CIGRE ที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบต่อการเชื่อมต่อ DG เข้ากับระบบโครงข่าย โครงสร้างของระบบทดสอบคือ ระบบเชื่อมต่อกับหม้อแปลง 20/0.4kV 400kVA และมี PV DG ขนาด 3kW และ 4kW, แหล่งผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมขนาด 5.5kW แบตเตอรี่ขนาด 35kVA และ 25kVA และรีเลย์ป้องกันกระแสเกินตามตำแหน่งในรูปที่ 8 โดยได้ทดสอบด้วยการจำลองเปรียบเทียบกระแสที่ผ่านรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบเวลาผกผันและระยะเวลาที่ใช้ในการตัดวงจรของรีเลย์ ใน 3 สถานการณ์คือ ไมโครกริดเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าโดยไม่มี PV, ไมโครกริดเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าโดยมี PV และไมโครกริดแบบแยกโดด โดยทดสอบการเกิดความผิดพลาดที่ตำแหน่งต่างๆกัน และชนิดของความผิดพลาดทั้งแบบหนึ่งเฟสและสามเฟส ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า ระบบไมโครกริดเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าโดยไม่มี PV ใช้เวลาในการตัดวงจรเฉลี่ยเป็น ความผิดพลาดแบบหนึ่งเฟสที่ 0.131s และความผิดพลาดแบบสามเฟสที่ 0.121s ระบบไมโครกริดเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าโดยมี PV ทำให้รีเลย์มีปัญหาเกี่ยวกับการตัดวงจร เกิดการตัดวงจรผิดพลาดเนื่องจากการไหลของกระแสแบบสองทิศทาง และใช้เวลาในการตัดวงจรที่มากขึ้นเนื่องจากกระแสผิดพลาดน้อยลง โดยเวลาที่ใช้การตัดวงจรโดยเฉลี่ยเป็น 0.199s และ 0.135s ตามลำดับ ส่วนระบบไมโครกริดแบบแยกโดด รีเลย์กระแสเกินเกือบทั้งหมดในระบบไม่ตัดวงจร และรีเลย์ที่ยังตัดวงจรได้อยู่ก็จะใช้เวลาในการตัดวงจรที่มากขึ้นเนื่องจากกระแสผิดพลาดน้อยลงอย่างมาก ผลการทดสอบแสดงดังและ



รูปที่ 8 ระบบที่ใช้จำลองใน[4]



Fault Location (SLG Fault)	Grid Mode (No PV)		Grid Mode (With PV)		Island Mode	
	Operating	Relay &	Operating	Relay &	Operating	Relay &
	$t_{trip}(s)$		$t_{trip}(s)$		$t_{trip}(s)$	
R1 – R3	R1 – 0.128		R1 – 0.144		No Trip	
R3 – R11	R1 – 0.187		R1 – 0.361		No Trip	
R3 – R4	R1 – 0.138		R1 – 0.176		No Trip	
R4 – R14	R4T – 0.128		R4T – 0.161		No Trip	
R4 – R6	R4A – 0.122		R4A – 0.162 R6 – 0.159		No Trip	
R6 – D	R4A – 0.122		R4A – 0.351		No Trip	
R6 – R10	R6 – 0.115		R6 – 0.132		R6 – 0.178	
R9 – R17	R6 – 0.116		R6 – 0.153		No Trip	
R10 – RC	R6 – 0.120		R6 – 0.154		R6 – 0.276	

ตารางที่ 1 ผลการจำลองของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินเมื่อเกิดความผิดปกติพ่วงแบบ 1 เฟส [4]

Fault Location (3Ph Fault)	Grid Mode (No PV)		Grid Mode (With PV)		Island Mode	
	Operating	Relay &	Operating	Relay &	Operating	Relay &
	$t_{trip}(s)$		$t_{trip}(s)$		$t_{trip}(s)$	
R1 – R3	R1 – 0.121		R1 – 0.131		No Trip	
R3 – R11	R1 – 0.135		R1 – 0.164		No Trip	
R3 – R4	R1 – 0.126		R1 – 0.140		No Trip	
R4 – R14	R4T – 0.124		R4T – 0.131		R4T – 0.257	
R4 – R6	R4A – 0.115		R4A – 0.134 R6 – 0.132		R6 – 0.356	
R6 – D	R4A – 0.133		R4A – 0.142		No Trip	
R6 – R10	R6 – 0.109		R6 – 0.120		R6 – 0.144	
R9 – R17	R6 – 0.112		R6 – 0.126		R6 – 0.180	
R10 – RC	R6 – 0.110		R6 – 0.125		R6 – 0.164	

ตารางที่ 2 ผลการจำลองของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินเมื่อเกิดความผิดปกติพ่วงแบบ 3 เฟส [4]

งานวิจัยที่ [5] ได้ศึกษาผลกระทบจากกระแสผิดปกติที่ลดลงต่อการปรับตั้งค่าระบบป้องกัน โดยได้สรุปว่า หากมีการเพิ่มขึ้นของแหล่งผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนชนิดอินเวอร์เตอร์จากพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมในสัดส่วน 36% ของกำลังผลิตติดตั้งตามแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของ

ประเทศไทย พ.ศ. 2561 – 2580 (PDP 2018) และกำหนดให้อินเวอร์เตอร์จ่ายกระแสขนาดเท่ากระแสพิคกโดยไม่คำนึงถึงแรงดัน หากเปรียบเทียบกระแสผิตพ่วงเฉพาะแหล่งจ่ายที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนส์กับกระแสผิตพ่วงเมื่อมีแหล่งผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนชนิดอินเวอร์เตอร์ ปริมาณ 18,453 MW ตามแผน PDP 2018 แล้ว ค่ากระแสผิตพ่วงที่เกิดขึ้นจะลดลงมากกว่า 10% ซึ่งเกินกว่าย่านที่รับได้ตามแนวปฏิบัติของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ส่งผลต่อสถานีไฟฟ้าแรงสูงถึง 26 สถานี เนื่องจากอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้ากำลังที่ถูกปรับตั้งการทำงานตามขนาดกระแสผิตพ่วงจากระบบโครงข่ายไฟฟ้าดั้งเดิม ไม่สามารถตรวจจับความผิตพ่วงในระบบไฟฟ้าได้อย่างถูกต้อง ซึ่งอาจทำให้เกิดการทำงานผิดพลาดและนำไปสู่ความเสียหายต่ออุปกรณ์ในระบบโครงข่ายไฟฟ้าและความไม่ปลอดภัยต่อผู้ใช้ไฟฟ้า

งานวิจัยที่[6] ได้ทำการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนเช่นแหล่งพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ และพลังงานจากกังหันลม ต่ออุปกรณ์ในระบบป้องกันในระบบโครงข่ายไฟฟ้าโดยใช้โมเดล distribution network อย่างง่ายแบ่งออกเป็น 3 ส่วนป้องกันแต่ละส่วนมีตำแหน่งการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีระยะห่างจากสถานีไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ดังภาพ และทำการทดสอบแบบ IEEE 13-node test โดยกำหนดขนาดของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเป็น 3 กรณีคือ 1 2 และ 3 MW ซึ่งเทียบได้กับสัดส่วน 25%, 50% และ 75% ของโหลดไฟฟ้าตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์สรุปได้ว่า ระยะเวลาที่อุปกรณ์ป้องกันใช้ในการตัดวงจรเมื่อเพิ่มแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เข้ามาในระบบจะเพิ่มขึ้นได้มากที่สุดถึง 167% เมื่อมีสัดส่วน PV DG 25% และ 180% เมื่อมีสัดส่วน PV DG 50% และ 75%

### การจ่ายกระแสในช่วงแรงดันตกของอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับแหล่งพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

โดยทั่วไปข้อกำหนดของระบบไฟฟ้าบังคับให้มีการจ่ายกระแสรีแอกทีฟให้กับระบบเพื่อช่วยสนับสนุนแรงดันในช่วงแรงดันตกแต่ไม่ได้มีการกำหนดการจ่ายกระแสแอกทีฟ ทำให้การจ่ายกระแสรีแอกทีฟของแต่ละผู้ผลิตมีการออกแบบการจ่ายกระแสผิตพ่วงที่ต่างกันออกไป โดยงานวิจัยที่[7] สรุปความเป็นไปได้ของรูปแบบการจ่ายกระแสผิตพ่วงที่เป็นไปได้ของ PV Inverter ไว้ดังนี้

1. การจ่ายกระแสแอกทีฟแบบเปลี่ยนแปลงได้

วิธีนี้จะจ่ายกระแสรีแอกทีฟขนาดตามข้อกำหนดของระบบไฟฟ้า จากนั้นกระแสแอกทีฟจะถูกจ่ายด้วยค่า

$$i_d = i_{max} - i_q \quad (2)$$

โดยค่า  $i_{max}$  คือค่ากระแสขนาดสูงสุดโดยที่อินเวอร์เตอร์ไม่เกิดความเสียหายจากกระแสพิกัด

## 2. การจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบคงที่

วิธีนี้จะทำให้อินเวอร์เตอร์สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบได้อย่างต่อเนื่องถึงแม้เกิดสภาวะแรงดันตกโดยเลือกจ่ายกระแสรีแอกทีฟตามข้อกำหนดของระบบไฟฟ้าก่อนจากนั้นจ่ายกระแสแอกทีฟตามสมการ

$$i_d = \frac{K_p}{V_g} i_n \quad (3)$$

โดย  $K_p$  คือสัดส่วนการจ่ายกระแสแอกทีฟ

## 3. การจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟแบบคงที่

วิธีนี้สามารถเลือกค่ากระแสรีแอกทีฟที่ต้องการจ่ายแบบคงที่ได้ตามสมการ

$$i_q = \frac{K_Q}{V_g} \quad (4)$$

แต่ในกรณีนี้จะต้องระมัดระวังการเลือกค่า  $K_Q$  ให้ครอบคลุมการจ่ายกระแสรีแอกทีฟขั้นต่ำได้ตามข้อกำหนดของระบบไฟฟ้า

## 4. การจ่ายกระแสแอกทีฟแบบคงที่

วิธีนี้จะพิจารณาจ่ายกระแสรีแอกทีฟตามข้อกำหนดของระบบไฟฟ้าก่อน จากนั้นจึงเลือกจ่ายกระแสแอกทีฟด้วยค่าคงที่

$$i_d = \beta i_n \quad (5)$$

โดยที่  $i_n$  คือกระแสพิกัดของอินเวอร์เตอร์และ  $\beta$  อยู่ในช่วง

$$0 \leq \beta \leq 1 \quad (6)$$

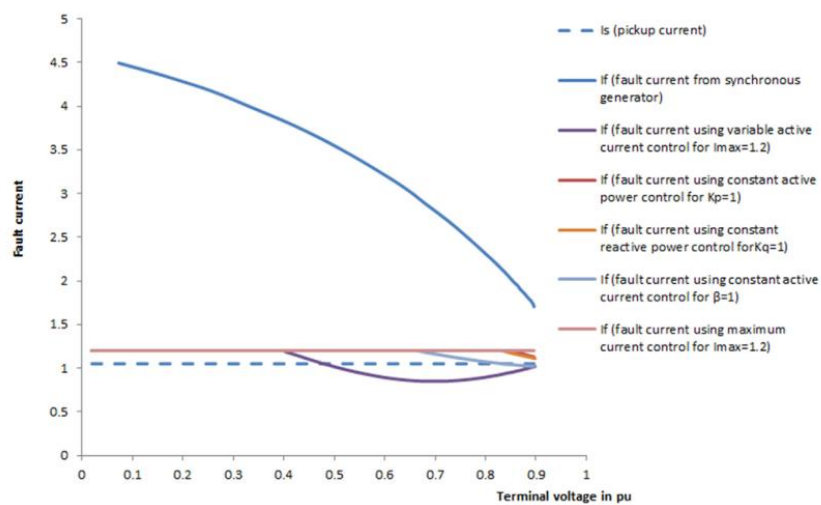
## 5. การจ่ายกระแสที่กระแสสูงสุด

วิธีนี้เป็นวิธีที่ป้องกันไม่ให้อินเวอร์เตอร์จ่ายกระแสเกินพิกัดที่จะสร้างความเสียหายให้กับอินเวอร์เตอร์ จึงมีการจ่ายกระแสตามสมการ

$$i_d = \sqrt{i_{max}^2 - i_q^2} \quad (7)$$

ซึ่งค่า  $i_{max}$  คือค่ากระแสสูงสุดจะขึ้นอยู่กับขีดจำกัดของอุปกรณ์ของอินเวอร์เตอร์ที่จะไม่ให้เกิดความเสียหายต่อสวิตช์กำลังโดยเฉพาะอย่างยิ่งความเสียหายด้วยความร้อน และเลือกจ่ายกระแสรีแอกทีฟตามข้อกำหนดของระบบไฟฟ้าก่อน

ด้วยการวิเคราะห์เปรียบเทียบกระแสที่อินเวอร์เตอร์จ่ายด้วยวิธีต่าง ๆ เทียบกับเครื่องจักรกลซิงโครนัสที่มีขนาดพิกัดเท่ากัน กำหนด Pickup current ของรีเลย์กระแสเกินตามขนาดโดยทั่วไป 1.05 p.u. ผลสรุปของงานวิจัยคือ วิธีการจ่ายกระแสแบบ การจ่ายกระแสแอกทีฟแบบคงที่ การจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบคงที่ และการจ่ายกระแสที่กระแสสูงสุด จะสามารถเลือกค่าที่ทำให้สามารถจ่ายกระแสที่มีขนาดมากกว่ากระแส Pick up current และรีเลย์ทำงานได้อย่างปกติแต่ วิธีจ่ายกระแสแบบ การจ่ายกระแสแอกทีฟแบบเปลี่ยนแปลงได้และ การจ่ายกระแสแอกทีฟแบบคงที่ จะไม่สามารถทำให้รีเลย์ทำงานได้ในบางช่วง สรุปได้ในรูปที่ 9 ผลการจำลองในงานวิจัยที่[7] อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ที่ในงานวิจัยฉบับนี้ใช้การตั้งค่ารีเลย์แบบค่าคงที่โดยไม่ได้คำนึงถึงปัจจัยด้านเวลา อีกทั้งยังสังเกตเห็นได้ว่าไม่ว่าอินเวอร์เตอร์จะจ่ายกระแสวิธีใดก็ตามขนาดกระแสก็ยังมีค่าน้อยกว่ากระแสผิตพ่วงของเครื่องจักรกลซิงโครนัสอยู่มาก โดยผลที่สังเกตเห็นได้เฉพาะการตั้งค่ากระแสผิตพ่วงที่ 1.05 A โดยไม่ได้ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของรีเลย์



รูปที่ 9 ผลการจำลองในงานวิจัยที่[7]

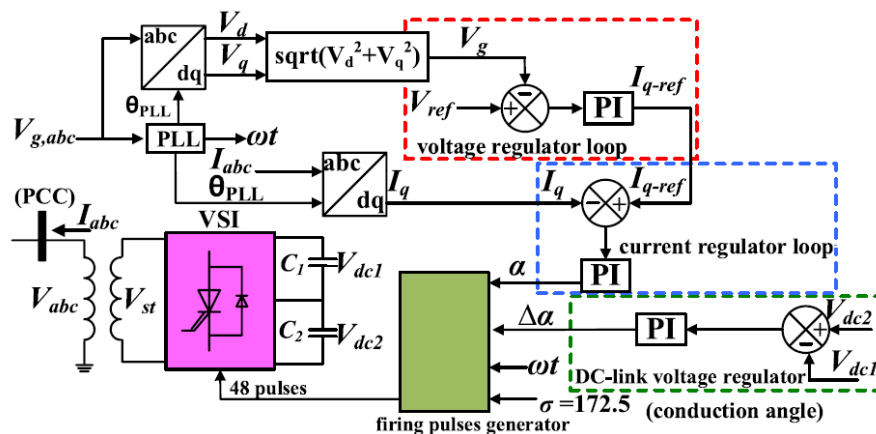
วิธีแก้ปัญหาลดลงของกระแสผิตพ่วงในระบบไฟฟ้าแบ่งเป็นสองทางเลือกใหญ่ๆ คือ การเพิ่มกระแสผิตพ่วงของระบบ และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของระบบป้องกัน การเพิ่มกระแสผิตพ่วงของระบบเช่นการเพิ่มแหล่งกำเนิดกระแสผิตพ่วง เช่น ล้อตุ่นกำลัง (Flywheel) หรือการเพิ่มขนาดพิกัดของ IIDERS ให้มากขึ้น วิธีนี้จะทำให้ไม่ต้องเปลี่ยนแปลงระบบป้องกันมากนัก อีกทั้งล้อตุ่นกำลังนั้น ได้มีการใช้งานในระบบไฟฟ้ามาเป็นระยะเวลาานานทำให้ผู้คนทั่วไปมีความคุ้นเคยกับ

การใช้งาน อย่างไรก็ตามวิธีการนี้เป็น การเพิ่มค่าใช้จ่ายให้กับการลงทุนระบบ IIDERs อีกทั้งไม่มีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงของระบบที่จะพัฒนาขึ้นในอนาคต อีกวิธีหนึ่งซึ่งก็คือ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของระบบป้องกัน โดยการนำรีเลย์แบบดิจิทัลมาใช้งานในระบบ และใช้ระบบป้องกันที่ปรับตัวได้ (Adaptive protection) วิธีนี้จะไม่ทำให้ค่าใช้จ่ายในการลงทุน IIDERs เพิ่มขึ้น และทำให้ระบบป้องกันมีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลง แต่ก็จะทำให้ความน่าเชื่อถือของระบบป้องกันลดลง รวมถึงจะต้องมีการปรับปรุงอุปกรณ์ที่มีจำนวนมากในระบบ

### การเพิ่มกระแสผิดพลาดในระบบไฟฟ้า

บทความที่ [8] นำเสนอการเพิ่มขนาดกระแสผิดพลาดในไมโครกริด โดยการติดตั้งแหล่งจ่ายกระแสขนาดสูง คือ ล้อตุ้มกำลัง เพื่อช่วยจ่ายกระแสผิดพลาดขนาดสูงทำให้อุปกรณ์ป้องกันสามารถทำงานได้ และการเพิ่มขนาดพิกัดกำลังของอินเวอร์เตอร์ หรือการเพิ่มระบบทำให้เย็น (Cooling System) เพิ่มเติมให้กับสวิตช์กำลัง ให้อินเวอร์เตอร์สามารถจ่ายกระแสขนาดสูงเพิ่มมากขึ้น

งานวิจัย [9] นำเสนอการควบคุม (Static Synchronous Compensator; STATCOM) ในการจ่ายกระแสรีแอคทีฟให้กับระบบไฟฟ้าในขณะเกิดแรงดันตก โดยทำการเปรียบเทียบค่าแรงดันที่จุดเชื่อมต่อที่วัดได้กับค่าแรงดันอ้างอิงที่ต้องการ เพื่อทำการสร้างกระแสรีแอคทีฟคำสั่ง ค่ากระแสรีแอคทีฟถูกปรับผ่านมุมคำสั่งระหว่างแรงดันจุดเชื่อมต่อและแรงดันของ STATCOM



รูปที่ 10 แผนผังการควบคุม STATCOM ใน [9]

งานวิจัยที่ [10] นำเสนอการใช้แบตเตอรี่ร่วมกับคอนเวอร์เตอร์เพื่อพัฒนาเสถียรภาพของระบบ ในสภาวะแรงดันตกโดยแบตเตอรี่สามารถจ่ายกระแสสามเฟสสมมูลได้ปกติแม้ในช่วงแรงดันที่จุดสายส่งตกลงเหลือ 0% และสามารถกลับมาทำงานได้อย่างราบรื่นเมื่อ แรงดันที่จุดเชื่อมต่อกลับมาเป็น 100%

จากงานวิจัยที่ [9] และ [10] การติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติมทำให้ระบบ IIDERs สามารถจ่ายกระแสรีแอคทีฟได้มากขึ้นตามขนาดของตัวเก็บประจุหรือแบตเตอรี่ที่ติดตั้งเข้าไป การติดตั้งอุปกรณ์เหล่านี้เข้าไปในระบบรวมถึงต้องมีอุปกรณ์อื่นๆ อีก เช่น หม้อแปลง และคอนเวอร์เตอร์ที่เพิ่มเข้ามาทำให้ระบบโดยรวมมีค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้น และระบบมีความซับซ้อนมากขึ้น

### การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของระบบป้องกัน

การปรับปรุงระบบป้องกัน เช่นการใช้ระบบป้องกันแบบปรับตัวได้ (Adaptive Protection) เป็นหนึ่งในวิธีการที่ใช้การเปลี่ยนแปลงการตั้งค่าของอุปกรณ์ในระบบป้องกันเพื่อตอบสนองการทำงานของระบบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจากระบบ IIDERs ที่เพิ่มเข้ามาหรือ การแยกโดดเป็นไมโครกริด โดยการใช้ระบบสื่อสารเข้ามาเพื่อปรับปรุงการตั้งค่าของรีเลย์ โดยจะมีการเพิ่มอุปกรณ์ตรวจวัดที่สามารถบันทึกและส่งข้อมูลไปยังส่วนประมวลผลกลาง เพื่อทำการวิเคราะห์สถานการณ์และคำนวณค่าต่างๆในระบบแบบตามเวลาจริง จากนั้นส่งค่ากลับมาเพื่อกำหนดการทำงานของอุปกรณ์โครงสร้างระบบป้องกันประกอบไปด้วย

1. ระบบตรวจจับความผิดปกติ เป็นส่วนที่ทำการตรวจจับตำแหน่งของความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง มีการวิเคราะห์ชนิดของความผิดปกติ เช่น ความผิดปกติแบบเฟสเดียวหรือแบบสามเฟส และวิเคราะห์ความรุนแรงเช่น ความผิดปกติแบบชั่วคราวหรือความผิดปกติแบบถาวร
2. ระบบโครงข่ายสื่อสาร เพื่อทำการปรับค่าการตั้งค้ำระบบป้องกัน ตามการเปลี่ยนแปลงของระบบไฟฟ้า
3. การระบุตำแหน่งการตัดวงจร เป็นส่วนที่กำหนดการทำงานของรีเลย์ในตำแหน่งต่างๆ เพื่อตอบสนองการตัดวงจรหรือกำจัดความผิดปกติในระบบเมื่อเกิดความผิดปกติเกิดขึ้นในสถานการณ์ต่างๆ ตามโครงสร้างของระบบ

งานวิจัยที่[11] นำเสนอระบบป้องกันแบบใหม่ที่สามารถปรับตัวได้ต่อการเปลี่ยนแปลงและโหมดการทำงานของไมโครกริด เนื่องจากรีเลย์แบบดิจิทัล หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันสามารถจัดเก็บการตั้งค่าแบบต่างๆตามสถานการณ์ของระบบ แต่มักไม่ค่อยได้กลับมาใช้ในระบบป้องกันของผู้ให้บริการโครงข่าย งานวิจัยนี้จึงใช้การวิเคราะห์ตัวแปรในระบบไมโครกริดแบบออนไลน์และทำการปรับตั้งค้ำรีเลย์ โดยมีหน่วยควบคุมประมวลผลส่วนกลางที่สถานีย่อย โดยการใช้การเก็บข้อมูลตามเวลาจริงจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ติดตั้งภายในระบบ อย่างไรก็ตามระบบสื่อสารจำเป็นต้องมีความรวดเร็วที่เพียงพอต่อการเปลี่ยนโหมดของระบบ และการปิด เปิดวงจร ของอุปกรณ์

ในระบบเช่นตัวตัดวงจร และรีเลย์ ระบบนี้ได้มีการพัฒนาและติดตั้งที่เกาะ Hailuoto ประเทศฟินแลนด์

งานวิจัยที่[12] ใช้การปรับเวลาของรีเลย์กระแสเกิน เมื่อระบบไมโครกริดมีการเปลี่ยนแปลงใดๆ ขนาดของกระแสผิดพลาดย่อมเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้นจึงต้องมีการปรับเปลี่ยนการตั้งค่าของรีเลย์ตามโดยมีการทำงานทั้งหมด 5 ขั้นตอน คือ การตรวจสอบระบบการทำงานของไมโครกริดเป็นการเชื่อมต่อบริษัทไฟฟ้าหรือ ไมโครกริดแบบแยกโดด การตรวจสอบตำแหน่งการเกิดกระแสผิดพลาด, ปรับค่าของตัวแปรในระบบเช่น ขนาดของ DG, ขนาดของโหลดไฟฟ้า และขนาดของแบตเตอรี่ในระบบ, ทำการปรับการตั้งค่าเวลาที่ใช้ในการตัดวงจรรีเลย์ และท้ายสุดทำการเปรียบเทียบเวลาที่ตั้งค่ากับช่วงเวลาซึ่งเป็นตัวแปรกำหนดเสถียรภาพของระบบ (Critical clearing time) หากเวลาที่ใช้ในการตัดวงจรมีค่ามากจะทำการกลับไปทำขั้นตอนการปรับตั้งค่ารีเลย์ใหม่อีกครั้งให้จนกว่าจะน้อยกว่าผลการจำลองด้วยโปรแกรม DigSILENT Power Factory ได้ผลว่าในโหมดเชื่อมต่อบริษัทโครงข่ายจะใช้เวลาในการตัดวงจรที่กระแสผิดพลาดน้อยที่สุด 0.2 วินาทีและที่กระแสผิดพลาดมากที่สุด 0.053 วินาที แต่เมื่ออยู่ในโหมดแยกโดดเป็นไมโครกริด จะใช้เวลาในการตัดวงจรที่กระแสผิดพลาดน้อยที่สุด 0.023 วินาทีและที่กระแสผิดพลาดมากที่สุด 0.11วินาที

### บทที่ 3

#### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

##### ทฤษฎีไฟฟ้ากำลัง

การใช้ประโยชน์จากการผลิตกระแสไฟฟ้าได้จะสามารถทำได้มากที่สุดก็ต่อเมื่อเครื่องจักรผลิตไฟฟ้า หรือระบบผลิตไฟฟ้า มีความสามารถในการกำหนดหรือควบคุมการจ่ายไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนได้ตามที่ต้องการ ในส่วนนี้จึงกล่าวถึงทฤษฎีไฟฟ้ากำลัง เพื่อทำความเข้าใจถึงความหมายและนิยามของไฟฟ้ากำลัง นำไปสู่การกำหนดและควบคุมการปริมาณกำลังไฟฟ้าตามต้องการ

ในระบบไฟฟ้าทั่วไปปัจจุบัน แรงดันไฟฟ้าถูกกำหนดเป็นรูปไซน์ 3 เฟสที่ความถี่หนึ่ง แต่ละเฟสมีมุมต่างกันที่  $\frac{2\pi}{3} \text{ rad}$  หากแรงดันไฟฟ้าขณะใดขณะหนึ่งเป็นไปตามอุดมคติ แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขณะใดขณะหนึ่งในแต่ละเฟสจะเป็น

$$v(t) = \sqrt{2} \sin(\omega t) \quad (8)$$

$$i(t) = \sqrt{2} \sin(\omega t - \phi) \quad (9)$$

กำลังไฟฟ้า ณ ขณะหนึ่ง หมายถึงผลคูณของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า

$$p(t) = VI \cos(\phi) (1 - \cos(2\omega t)) - VI \sin(\phi) \sin(2\omega t) \quad (10)$$

โดยสามารถแยกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกมีค่าเฉลี่ยที่ไม่เป็น 0 ค่าเฉลี่ยถูกนิยามเป็นกำลังไฟฟ้าจริง

$$Q = VI \cos(\phi) \quad (11)$$

ส่วนที่ 2 คือมีค่าเฉลี่ยเป็น 0 ค่ายอดถูกนิยามเป็น กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

$$Q = VI \sin(\phi) \quad (12)$$

ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสทั่วไปไฟฟาระบบสามเฟสสามารถประมาณอย่างง่ายเป็นแบบต่อหนึ่งเฟสซึ่งหมายถึงการใช้ปริมาณเชิงมุมหรือเฟสเซอร์เพียงแอมพลิจูดของค่าต่างๆในระบบ และความต่างเฟส เพียงเฟสเดียว

$$v(t) = V_m \sin(\omega t - \theta) = \mathbb{V} \angle \theta \quad (13)$$

$$i(t) = I_m \sin(\omega t - \theta - \phi) = \mathbb{I} \angle (\theta - \phi) \quad (14)$$

และเมื่อถือว่าค่าต่างๆทั้งสามเฟสเป็นแบบสมดุล จะสามารถใช้การคูณปริมาณต่างๆและความต่างเฟสเพื่อประมาณค่าในระบบสามเฟสได้ ในกรณีที่ระบบไฟฟ้ามีลักษณะไม่สมดุลจะวิเคราะห์โดยการใชปริมาณเฟสเซอร์ในแต่ละเฟสสร้างเป็น 3 องค์ประกอบคือ บวก ลบ และศูนย์

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_+ \\ V_- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (15)$$



ในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีเครื่องแปรผันพลังงานไฟฟ้าหรือคอนเวอร์เตอร์ ด้วยความสามารถของระบบในการกำหนดแรงดันไฟฟ้า จึงทำให้การควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าสามารถทำได้ละเอียดและรวดเร็วมากขึ้นการวิเคราะห์ปริมาณไฟฟ้าสามเฟสจึงใช้เป็นแบบ Instantaneous Power ซึ่งต่างจากการวิเคราะห์แบบเฟสเซอร์ที่จะแทนองค์ประกอบในระบบไฟฟ้าเป็นขนาดและมุมที่ ความถี่ใดความถี่หนึ่ง และวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าเป็นค่าเฉลี่ยในสภาวะคงที่ แต่วิธี Instantaneous Power จะใช้เป็นปริมาณ ณ ขณะใดขณะหนึ่ง โดยไม่ขึ้นกับความถี่ใด ความถี่หนึ่ง ทำให้สามารถวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าได้อย่างละเอียดแม่นยำมากขึ้นโดยเฉพาะในช่วงภาวะชั่วคราว โดยปริมาณต่างๆ จะใช้การแปลง Clarke

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 1 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (16)$$

และการแปลงกลับ Inverse Clarke

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} \quad (17)$$

เพื่อแปลงปริมาณในระบบสามเฟสเช่น แรงดันไฟฟ้า ณ ขณะใดขณะหนึ่ง ทั้งสามเฟส จะถูกแปลงเป็นเวกเตอร์ อยู่บนกรอบอ้างอิงใหม่  $\alpha\beta 0$  หรือในระบบไฟฟ้ากำลังแบบสามเฟสสามสายเนื่องจากผลรวมของกระแสทั้งสามเฟสเป็น 0 จึงมีเพียงเวกเตอร์ 2 มิติปริมาณในแกน  $\alpha$  และ  $\beta$  ที่หมุนรอบจุดกำเนิดด้วยความถี่ของระบบ และเมื่อคิดกำลังไฟฟ้าปรากฏเช่นเดียวกับการคำนวณกำลังไฟฟ้าปรากฏจากแบบเฟสเซอร์

$$S = VI^* \quad (18)$$

กำลังไฟฟ้าที่คำนวณบนกรอบอ้างอิง  $\alpha\beta$  สามารถคำนวณได้จาก

$$s = (v_\alpha + jv_\beta)(i_\alpha - ji_\beta) \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (20)$$

นอกจากนี้เพื่อให้ทำให้การวิเคราะห์ปริมาณใดๆบนกรอบอ้างอิงหนึ่งได้ง่ายขึ้นจึงใช้การแปลง Park

$$\begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} d \\ q \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (22)$$

และการแปลงกลับ Inverse Park

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ q \\ 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

ในการแปลงเวกเตอร์  $abc$  ให้อยู่บนกรอบอ้างอิงหมุน  $dq0$  เสมือนเป็นการสะท้อนเวกเตอร์ที่หมุนอยู่บนแกน  $\alpha\beta0$  ด้วยความถี่ระบบ ลงบนแกนสมมุติที่หมุนด้วยความถี่ของระบบทำให้ค่าที่สะท้อนลงบนแกนหมุน  $dq0$  นั้นเป็นค่าคงที่หรือค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยลง ส่งผลให้การวิเคราะห์และควบคุมผ่านค่าบนแกนหมุนทำได้ง่ายขึ้น เช่นการนำมาใช้ในการแปลงเพื่อการควบคุมปริมาณบนระบบไฟฟ้าให้เชิงโครโนสไปกับแกนอ้างอิงที่ต้องการ

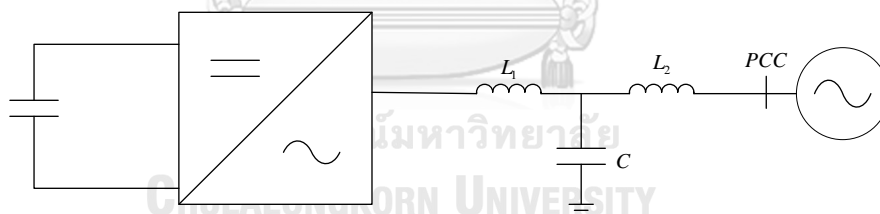
จากสมการ ( 20 ) และ ( 23 ) กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟมีค่าเท่ากับ

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_d & v_q \\ -v_q & v_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (25)$$

### โครงสร้างของระบบที่ใช้ในงานวิจัย

ระบบอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบสามเฟสสามสาย ใช้ในการเชื่อมต่อกับแหล่งไฟฟ้าเช่น พลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกระแส จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบโครงข่ายผ่านคำสั่งกำลังไฟฟ้า โครงสร้างของระบบอินเวอร์เตอร์ประกอบไปด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้ ตามรูปที่

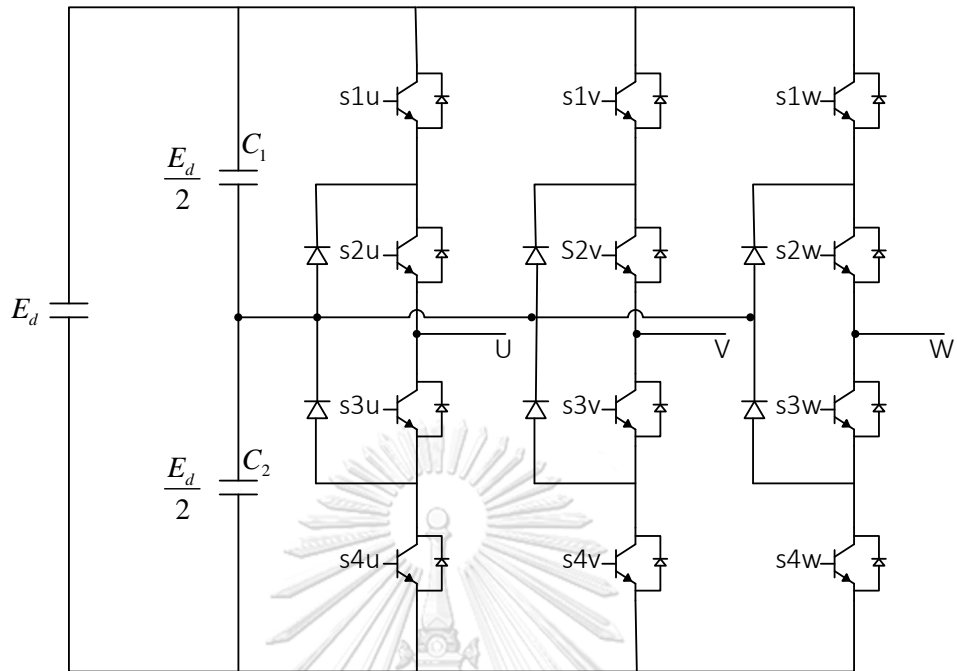
1. แหล่งแรงดันกระแสตรงด้านเข้าในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะถือว่าแรงดันกระแสตรงมีค่าคงที่
2. อินเวอร์เตอร์ เป็นส่วนที่ทำการแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับด้วยการมอดูเลตแบบพีดีดับลิวเอ็มแบบ (Pulse-Width Modulation; PWM) และถูกควบคุมผ่านวงรอบควบคุม
3. วงจรกรองกระแส *LCL* ประกอบด้วย ตัวเหนี่ยวนำด้านอินเวอร์เตอร์  $L_1$ , ตัวเหนี่ยวนำด้านจุดเชื่อมต่อ  $L_2$  และ ตัวเก็บประจุ  $C$  ถูกนำมาใช้เพื่อกรององค์ประกอบแรงดันที่มีความถี่สูงที่เกิดจากการมอดูเลตแบบ PWM เมื่ออินเวอร์เตอร์มีการจ่ายกระแสโดยการสวิตช์เปิดปิด วงจรด้วยความถี่สูง ก็จะทำให้แรงดันที่ตัวเก็บประจุด้าน DC แกว่งไปด้วย การที่มีการกรองด้วยตัวกรอง *LCL* ตัวเก็บประจุในตัวกรอง *LCL* จึงทำหน้าที่อัดประจุและคายประจุเพื่อช่วยลดการแกว่งจากการสวิตช์ ทำให้กระแสด้านออกที่จุด PCC มีความใกล้เคียงรูปไซน์มากขึ้น



รูปที่

รูปที่ 11 โครงสร้างของระบบอินเวอร์เตอร์แบบสามเฟสสามสายชนิดเชื่อมต่อกกริด

## อินเวอร์เตอร์ชนิดสามระดับแบบ Neutral-Point-Clamped (NPC)



รูปที่ 12 อินเวอร์เตอร์ชนิดสามระดับแบบ Neutral-Point-Clamped (NPC)

อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้คืออินเวอร์เตอร์ชนิดสามระดับแบบ Neutral-Point-Clamped (NPC) มีโครงสร้างวงจรตาม รูปที่ 12 ซึ่งประกอบไปด้วย

1. ตัวเก็บประจุ  $C_1$  และ  $C_2$  ทำหน้าที่ตรึงแรงดันกระแสตรงจากแหล่งกำเนิดกระแสตรงที่นำมาต่อเข้ากับอินเวอร์เตอร์
2. สวิตช์ Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) 12 ตัว แบ่งออกเป็นสามเฟส เฟสละ 4 ตัว ทำให้อินเวอร์เตอร์ชนิดนี้สามารถสร้างแรงดันได้ทั้งค่าบวก ค่าลบและศูนย์หรือแรงดันจุดนิวทรัล เมื่อควบคุมการเปิดปิดของสวิตช์ตามตารางที่ 3

แรงดันด้านออก	S1	S2	S3	S4
$\frac{E_d}{2}$	1	1	0	0
0	0	1	1	0
$-\frac{E_d}{2}$	0	0	1	1

ตารางที่ 3 แรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ตามสถานะของสวิตช์

3. Clamping Diode ใช้กำหนดทิศทางกระแสที่ไหล ขณะที่แรงดันด้านออกต่อกับจุดนิวทรัล

### วิธีการมอดูเลตแรงดันด้านออก

ในอินเวอร์เตอร์ชนิดสามระดับการสร้างสัญญาณเพื่อสร้างแรงดันด้านออกโดยทั่วไปจะทำให้เกิดกระแสในทรานซิสเตอร์สามตัวที่สามทำให้แรงดันด้านเข้ากระแสตรงเกิดความไม่สมดุล เนื่องจากแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุทั้งสองเกิดความไม่สมดุลจากกระแสในทรานซิสเตอร์ที่เกิดขึ้นในขณะสวิตช์

วิธีการมอดูเลตที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้จึงใช้แบบ 2u1d ตามงานวิจัย[13] คือ การมอดูเลตแบบขั้วเดียว (unipolar) 2 เฟสและ แบบสองขั้ว (dipolar) 1 เฟส วิทยานิพนธ์นี้ใช้วิธีการหาโดยการประยุกต์ใช้ทฤษฎีเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ และเลือกค่าที่เหมาะสมในการควบคุมกระแสที่จุดนิวทรัลให้เป็น 0 ทำให้แรงดันจุดนิวทรัลที่บัสกระแสตรงไม่เปลี่ยนแปลง

ค่าสัญญาณเพื่อสร้างแรงดันด้านออก  $v_u^*$ ,  $v_v^*$  และ  $v_w^*$  ที่ต้องการจากแรงดันบัสกระแสตรงด้านเข้า  $v_{c1}$ ,  $v_{c2}$  สามารถคำนวณหาได้โดยทำการสร้างแรงดันสมมติ  $v_p$ ,  $v_o$  และ  $v_n$  เป็นแรงดันเทียบกับจุดอ้างอิงเสมือนในรูปของแรงดัน  $v_{c1}$ ,  $v_{c2}$

$$\begin{bmatrix} v_p \\ v_o \\ v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{c1} \\ 0 \\ v_{c2} \end{bmatrix} - \frac{v_{c1} - v_{c2}}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

จากคำตอบทั่วไปของเมทริกซ์มอดูเลตจะสามารถหาสัญญาณเพื่อสร้างแรงดันด้านออกได้โดยจะมีตัวแปรอิสระ 2 ตัวคือ a และ b ที่สามารถเลือกค่าเพื่อกำหนดกระแสในทรานซิสเตอร์ได้ให้เป็น 0 ได้

$$\begin{bmatrix} m'_{up} \\ m'_{vp} \\ m'_{wp} \end{bmatrix} = \frac{v_n + \frac{a}{\sqrt{3}}v_{c1}}{\|v_i^*\|} \begin{bmatrix} v_u^* \\ v_v^* \\ v_w^* \end{bmatrix} + \frac{bv_{c2}}{3\|v_i^*\|} \begin{bmatrix} v_u^* - v_w^* \\ v_v^* - v_u^* \\ v_w^* - v_v^* \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\begin{bmatrix} m'_{un} \\ m'_{vn} \\ m'_{wn} \end{bmatrix} = \frac{v_n + \frac{a}{\sqrt{3}}v_{c1}}{\|v_i^*\|} \begin{bmatrix} v_u^* \\ v_v^* \\ v_w^* \end{bmatrix} + \frac{bv_{c2}}{3\|v_i^*\|} \begin{bmatrix} v_u^* - v_w^* \\ v_v^* - v_u^* \\ v_w^* - v_v^* \end{bmatrix} \quad (28)$$

โดยค่า a และ b จากการแก้สมการเมทริกซ์มอดูเลตของกระแสเพื่อให้ค่ากระแสในทรานซิสเตอร์เป็น 0 จะได้

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{v_{c2} - v_{c1}}{\sqrt{3}E_d} \\ b &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

จากค่า a และ b ที่เลือกจะเห็นได้ว่าหากแรงดันบัสกระแสตรงทั้งสองมีความสมดุล a จะมีค่าเท่ากับ 0 แต่หากไม่สมดุล จะทำให้คงแรงดันที่ไม่สมดุลต่อไปเรื่อยๆ อย่างคงที่โดยไม่ลู่ออก และเพื่อทำการเลือกโหมดจากสวิตช์ให้เป็นแบบ 2u1d วิทยานิพนธ์นี้จะถูกปรับโดย

$$\begin{bmatrix} v_{uo} \\ v_{vo} \\ v_{wo} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m'_{up} + x \\ m'_{vp} + x \\ m'_{wp} + x \end{bmatrix} v_{c1} + \begin{bmatrix} -(m'_{up} + y) \\ -(m'_{vp} + y) \\ -(m'_{wp} + y) \end{bmatrix} v_{c2} \quad (30)$$

และเลือกค่า  $x$  และ  $y$  เท่ากับ

$$\left. \begin{aligned} x &= -\min(m'_{up} + m'_{up} + m'_{up}) \\ y &= -\min(m'_{un} + m'_{un} + m'_{un}) \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

เพื่อเป็นการทำให้สัญญาณมอดูเลตเฟสใดเฟสหนึ่งเป็น 0 ทำให้สามารถลดการสวิตช์แรงดันด้านออก เพื่อช่วยลดฮาร์มอนิกที่สามทั้งในแรงดันด้านออกและจุดนิวทรัล



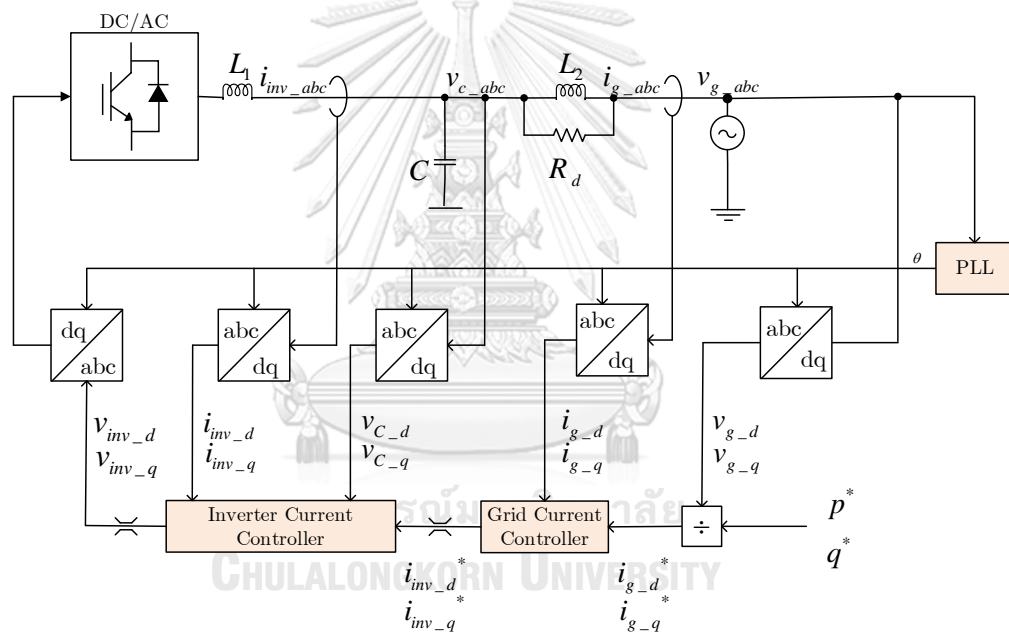
## บทที่ 4

### ระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์

งานวิจัยนี้นำเสนอการจ่ายกระแสรีแอคทีฟเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบโครงข่ายไฟฟ้า โดยการควบคุมให้อินเวอร์เตอร์สามารถจ่ายกระแสรีแอคทีฟที่มีขนาดมากกว่า 2 เท่าของกระแสพิกัด ในช่วงแรงดันตกให้กับระบบโครงข่ายไฟฟ้าในช่วงแรงดันตกได้โดยที่กระแสและแรงดันของอินเวอร์เตอร์ยังคงไม่เกินค่าพิกัด โดยการปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์เพื่อให้เกิดการเกิดเรโซแนนซ์ของตัวกรองกระแส LCL ที่มีอยู่ในระบบ

ระบบควบคุมแบ่งการทำงานออกเป็น 2 โหมดคือ ระบบควบคุมในโหมดปกติ และระบบควบคุมในโหมดที่มีความผิดปกติในระบบโครงข่าย

#### ระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ในโหมดปกติ

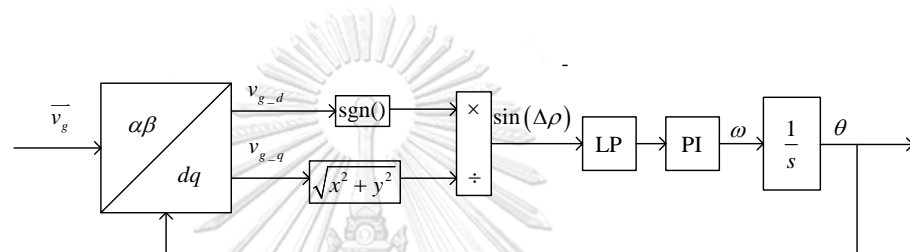


รูปที่ 13 แผนผังการควบคุมอินเวอร์เตอร์ในโหมดปกติ

ระบบอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งกำเนิดกระแสที่ทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบโครงข่ายตามกำลังไฟฟ้าคำสั่ง ระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลัก คือ เฟสล็อกคลูป, วงรอบควบคุมกำลังไฟฟ้า และ วงรอบควบคุมกระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ตามรูปที่ 13

เนื่องจากต้องการควบคุมกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟารีแอคทีฟที่ต้องการส่งจ่ายให้กับระบบโครงข่าย อินเวอร์เตอร์จึงต้องใช้ข้อมูลของตำแหน่งเฟสและความถี่ของแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ เพื่อนำมาใช้ควบคุมการจ่ายกระแสของอินเวอร์เตอร์ วงรอบควบคุมของอินเวอร์เตอร์จะทำการควบคุมบนกรอบอ้างอิงซิงโครนัส เฟสล็อกคลูปเป็นส่วนทำหน้าที่ซิงโครไนซ์ระหว่างคอนเวอร์เตอร์และระบบ

โครงข่ายให้อยู่บนกรอบอ้างอิงเดียวกัน โดยการสร้างสัญญาณเวกเตอร์จากวงรอบควบคุมและใช้ตัวควบคุมพีโอปรับให้ค่าความผิดพลาดเป็นศูนย์ จะได้สัญญาณด้านนอกเป็นความถี่ ผ่านการอินทิเกรตเป็นมุมเฟส สัญญาณมุมเฟสที่ได้ถูกป้อนกลับให้กับวงรอบควบคุมดังรูปที่ 14 สัญญาณมุมเฟสที่ได้จะใช้แปลงปริมาณสัญญาณจากวงรอบควบคุมของอินเวอร์เตอร์ในแกนให้หมุนซึ่งโครโนซ์กับสัญญาณที่จุดเชื่อมต่อ การควบคุมบนแกนอ้างอิงที่เทียบกับสัญญาณเวกเตอร์แรงดันที่จุดเชื่อมต่อนอกจากจะทำให้ควบคุมกำลังไฟฟ้าแอคทีฟและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟได้อย่างเป็นอิสระต่อกันแล้วยังทำให้การควบคุมสามารถทำได้ง่ายขึ้นเนื่องจากสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมจะเป็นค่ากระแสตรงที่สามารถปรับค่าได้ด้วยตัวควบคุมพีโอ.



รูปที่ 14 วงจรควบคุมเวกเตอร์เฟสลือคูลูปในโหมดปกติ

ส่วนควบคุมกำลังไฟฟ้าภายนอกเป็นส่วนที่รับคำสั่งกำลังไฟฟ้าคำสั่ง ( $p^*$  และ  $q^*$ ) แล้วทำการสร้างกระแสคำสั่งที่จุดเชื่อมต่อ ( $i_{gd}^*$  และ  $i_{gq}^*$ ) โดยใช้การคำนวณตามสมการที่

$$p^* = i_{gd} + v_{gd} \quad (32)$$

$$q^* = i_{gq} + v_{gd} \quad (33)$$

วงรอบควบคุมกระแสที่จุดเชื่อมต่อจะทำการสร้างกระแสของอินเวอร์เตอร์คำสั่งให้กับวงรอบควบคุมกระแสด้านนอกของอินเวอร์เตอร์ ( $i_{invd}^*$  และ  $i_{invq}^*$ ) ด้วยการควบคุมแบบป้อนกลับผ่านตัวควบคุมพีโอ

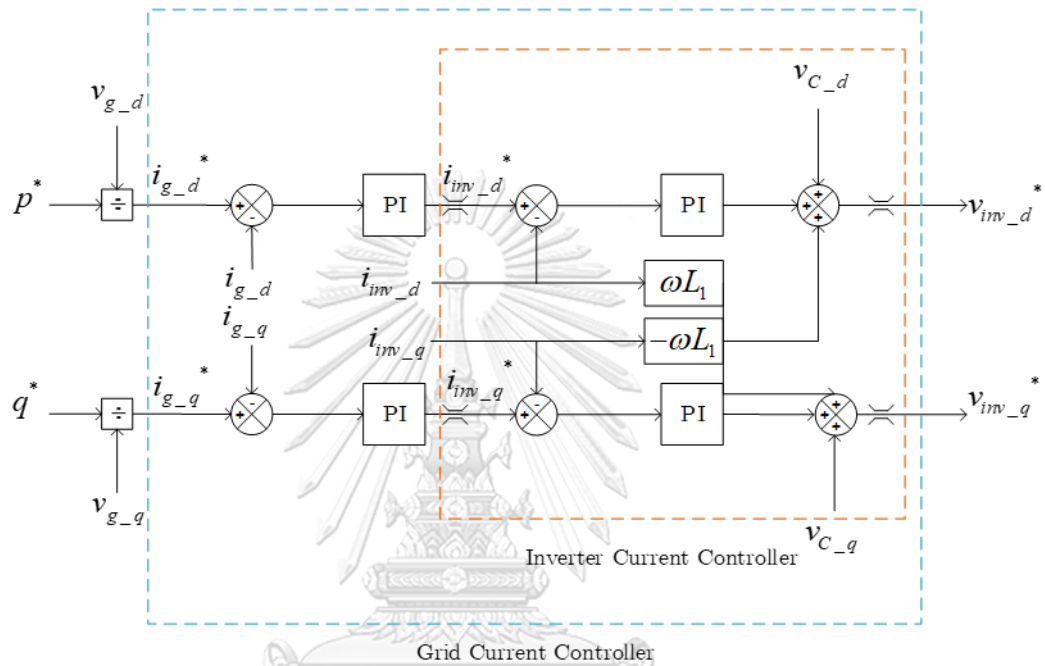
วงรอบควบคุมกระแสด้านนอกของอินเวอร์เตอร์ซึ่งเป็นวงรอบด้านในทำการสร้างแรงดันด้านนอกของอินเวอร์เตอร์ด้วยการควบคุมแบบป้อนกลับผ่านตัวควบคุมแบบพีโอ เพื่อสร้างแรงดันคำสั่ง พร้อมทั้งการชดเชยแรงดันคร่อมตัวเหนี่ยวนำด้านอินเวอร์เตอร์ ( $L_1$ ) และการป้อนไปหน้าด้วยค่าแรงดันที่ตัวเก็บประจุ ( $v_{Cd}$  และ  $v_{Cq}$ ) ตามสมการ

$$v_{invd} = L_1 \frac{di_{invd}}{dt} - \omega L_1 i_{invq} + v_{Cd} \quad (34)$$

$$v_{invq} = L_1 \frac{di_{invq}}{dt} + \omega L_1 i_{invd} + v_{Cq} \quad (35)$$



ค่าของกระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์คำสั่งและแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์มีการจำกัดค่าภายใต้ค่าพิคกิ้งของอุปกรณ์ แผนผังการควบคุมของวงรอบควบคุมอินเวอร์เตอร์บนแกนอ้างอิงซิงโครนัสแสดงในรูปที่ 15



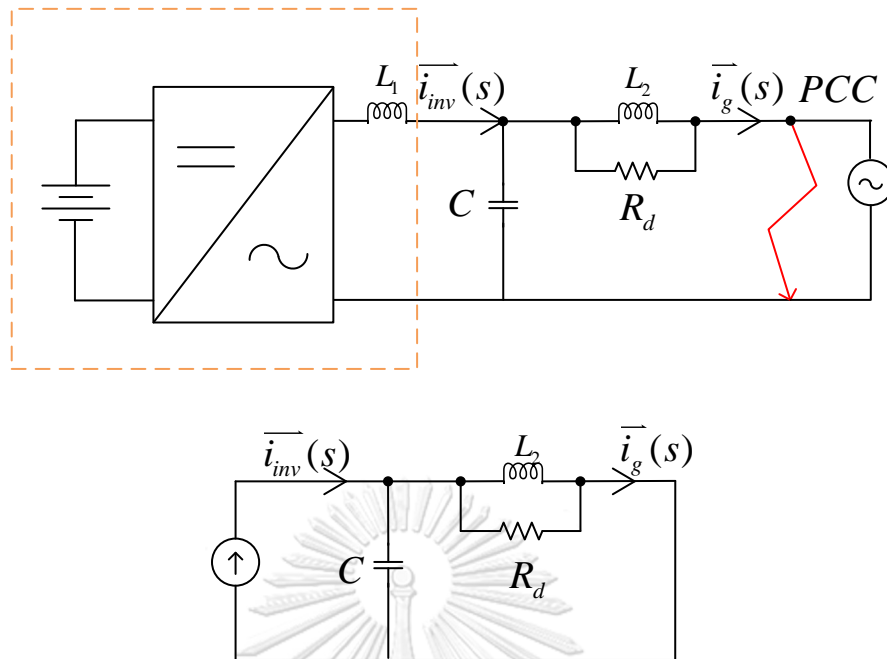
รูปที่ 15 วงรอบควบคุมของอินเวอร์เตอร์บนแกนอ้างอิงซิงโครนัส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

แนวคิดระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ในสถานะที่เกิดความผิดปกติในระบบ

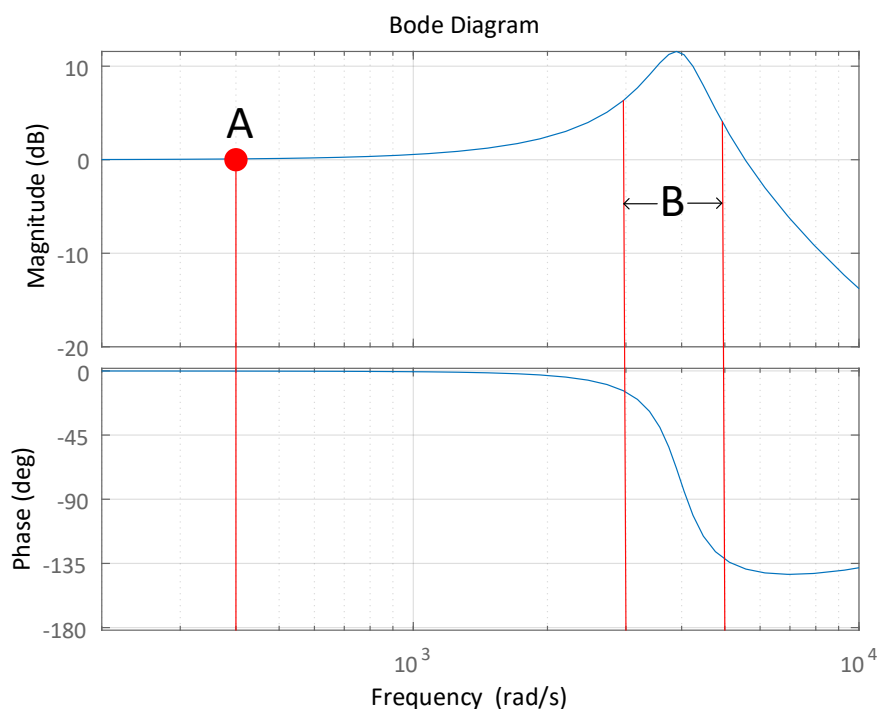
อินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับกริดเมื่อเกิดความผิดปกติในระบบแบบสามเฟสที่จุด PCC สามารถเขียนวงจรสมมูลได้และส่วนอินเวอร์เตอร์และ  $L_1$  สามารถจัดรูปได้เป็นแหล่งจ่ายกระแสตรงดังรูปที่



รูปที่ 16 วงจรสมมูลเมื่อเกิดความผิดปกติแบบสามเฟสที่จุด PCC

จากวงจรสมมูลจะเห็นได้ว่าขนาดของกระแสแอกทีฟที่จ่ายในขณะเกิดความผิดปกติในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ( $\bar{i}_g(s)$ ) จะขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ตัวเก็บประจุ  $C$  และตัวเหนี่ยวนำต้านจุดเชื่อมต่อกับระบบโครงข่าย (Point of Common Coupling; PCC)  $L_2$  และขนาดของกระแสต้านออกของอินเวอร์เตอร์ขณะเกิดความผิดปกติ ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามความถี่ สามารถเขียนฟังก์ชันโอนย้ายได้ตามสมการ

$$\frac{\bar{i}_g(s)}{\bar{i}_{inv}(s)} = \frac{L_2 s + (R_2 + R_d)}{(CL_2 R_d) s^2 + (CR_2 R_d + L_2) s + (R_2 + R_d)} \quad (36)$$



รูปที่ 17 แผนภาพโบเดของฟังก์ชันโอนย้ายระหว่างกระแสด้านจุด PCC และกระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์

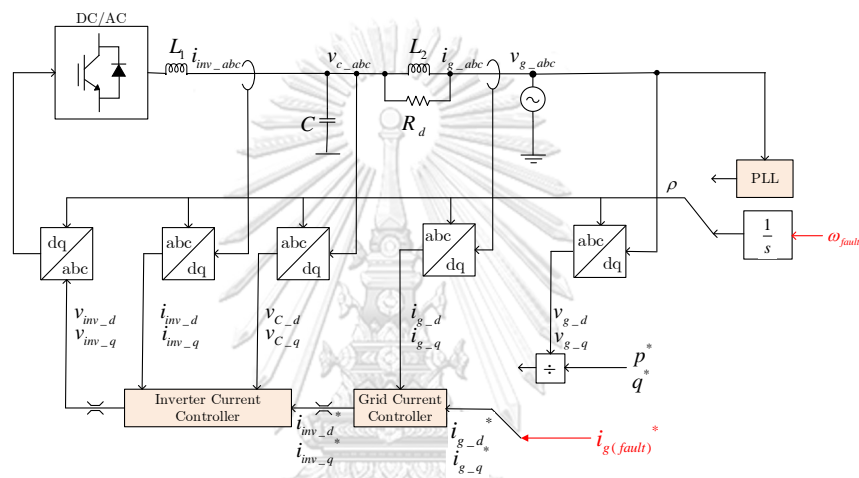
จากการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ตามแผนภาพโบเดในรูปที่ 17 สังเกตได้ว่าช่วงความถี่ 314 rad/s (จุด A) เป็นส่วนความถี่ในย่านการทำงานปกติ สัดส่วนของกระแสด้านจุด PCC ต่อขนาดกระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์  $\left(\frac{\bar{i}_g(s)}{\bar{i}_{inv}(s)}\right)$  มีขนาดประมาณ 1 ความถี่ที่ทำให้ขนาดสัดส่วนระหว่างกระแสด้านจุด PCC ต่อกระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดคือ ช่วงความถี่เรโซแนนซ์ที่ประมาณ 3000 – 5000 rad/s (ช่วงความถี่ B) ดังนั้นหากควบคุมให้อินเวอร์เตอร์ให้จ่ายกระแสภายใต้กระแสพิกัดที่ความถี่ จะทำให้สามารถจ่ายกระแสด้านจุดเชื่อมต่อได้มากขึ้นถึง 3 เท่าของกระแสพิกัดของอินเวอร์เตอร์โดยที่กระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์ยังคงอยู่ภายใต้กระแสพิกัด อย่างไรก็ตามการเลือกความถี่และขนาดของกระแสนั้น เพื่อป้องกันไม่ให้อินเวอร์เตอร์ทำงานเกินพิกัดซึ่งเป็นเหตุทำให้ระบบป้องกันของอินเวอร์เตอร์ปลดตัวเองออกจากวงจรต้องคำนึงถึงข้อจำกัดต่อไปนี้

1. แรงดันที่บัส DC ของอินเวอร์เตอร์จะต้องไม่เกินแรงดันพิกัด
2. ขนาดของกระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์จะต้องไม่เกินกระแสพิกัด

3. ความถี่ที่ใช้จะต้องอยู่ในย่านที่อุปกรณ์ป้องกันรองรับ โดยย่านความถี่ที่รองรับสำหรับบริลีย์ทั่วไปคือ 3.6k Hz และอัตราการซีกตัวอย่างที่ 4 – 32 samples/cycle สามารถรองรับความถี่ได้มากที่สุด 3.2k Hz หรือ 20,000 rad/s [9]

### การควบคุมอินเวอร์เตอร์ในขณะเกิดความผิดปกติ

ในส่วนนี้จะอธิบายวิธีการควบคุมอินเวอร์เตอร์ในขณะเกิดความผิดปกติโดยใช้คำสั่งที่ได้ในตอนก่อนหน้า



รูปที่ 18 แผนผังการควบคุมอินเวอร์เตอร์ในสภาวะแรงดันตก

การตรวจจับเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในโครงข่ายสามารถตรวจจับได้จากขนาดของเวกเตอร์แรงดันในแกน dq ดังสมการ

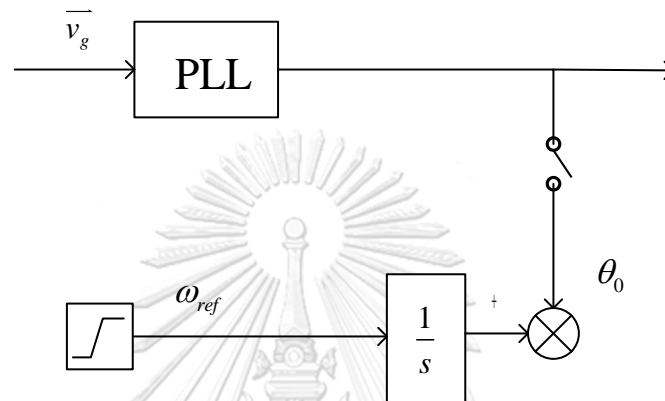
$$|\vec{v}_{dqg}| = \sqrt{v_{gd}^2 + v_{gq}^2} \quad (37)$$

หากขนาดแรงดันที่จุดเชื่อมต่อต่ำกว่าข้อกำหนดของระบบโครงข่ายอินเวอร์เตอร์จะเปลี่ยนการทำงานเป็นโหมดจ่ายกระแสรีแอกทีฟหากแรงดันกลับเข้ามาในขอบเขตของข้อกำหนดระบบจะกลับมาทำงานในโหมดปกติ เมื่อเกิดความผิดปกติในระบบโครงข่าย วงรอบควบคุมของอินเวอร์เตอร์ในส่วนของวงรอบควบคุมกระแสด้านในหรือกระแสด้านนอกของอินเวอร์เตอร์ วงรอบควบคุมจะเปลี่ยนไปตามดังรูปที่ 12

คำสั่งแรงดันด้านนอกของอินเวอร์เตอร์ในแกน dq จะถูกแปลงเป็นปริมาณ 3 เฟสด้วยมุมที่ได้จากการอินทิเกรตของความถี่คำสั่งที่เลือกในหัวข้อก่อนหน้าโดยใช้มุมเริ่มต้นจากมุมต่อเนื่องตั้งแต่มุมก่อนการเกิดความผิดปกติที่ได้จากเฟสล็อคคู่ตามรูปที่ 19 เพื่อป้องกันผลของการเปลี่ยนแปลงอย่าง

รวดเร็วของมุมที่จะใช้ควบคุมในวงรอบควบคุมของอินเวอร์เตอร์ และมีคำสั่งความถี่ในช่วงเปลี่ยน โหมดจะใช้ คำสั่งแบบลาด (ramp) เนื่องจากเมื่อแรงดันกริดมีขนาดน้อยลงมากอย่างรวดเร็วแต่

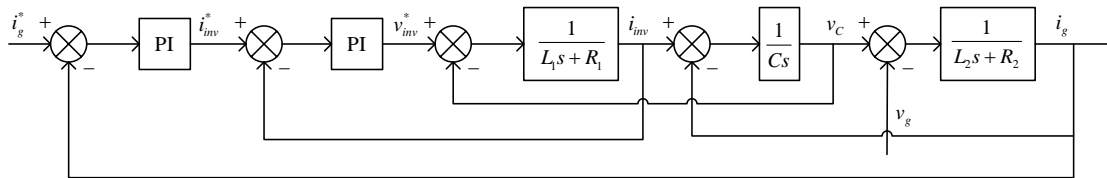
องค์ประกอบวงจรกรอง LCL จะทำให้มียังกระแสไหลในตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าสูงมากในสถานะ ชั่วครู่ หากมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินเวอร์เตอร์จากการเปลี่ยนโหมดที่กระทันหันเพิ่มเข้าไป อาจทำให้เกิดกระแสต้านออกของอินเวอร์เตอร์เกินพิกัดและทำให้ตัวตัดวงจรของอินเวอร์เตอร์ทำการปลด ตัวเองออกจากระบบ การควบคุมสามารถอธิบายได้



รูปที่ 19 วงจรเฟสล็อกคูลูปในขณะเกิดความผิดพลาด

### การออกแบบระบบควบคุมสำหรับใช้กับอินเวอร์เตอร์ในห้องปฏิบัติการ

จากรูปที่ 11 และ รูปที่ 13 แผนผังไดอะแกรมของระบบจะเขียนได้ดังรูปที่



รูปที่ 20 แผนผังไดอะแกรมของระบบคอนโทรลคอนเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสแบบ LCL

การออกแบบระบบควบคุมสำหรับระบบที่ใช้ควบคุมจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ

1. วงรอบควบคุมเฟสล็อกกลุ๊ป
2. วงรอบควบคุมกระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ( $i_{inv}$ )
3. วงรอบควบคุมกระแสที่จุด PCC หรือกระแสกริด ( $i_g$ )

#### 1. วงรอบควบคุมเฟสล็อกกลุ๊ป

ระบบเฟสล็อกกลุ๊ปที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประยุกต์จากแนวคิดในงานวิจัย [14] ซึ่งเป็นระบบเฟสล็อกกลุ๊ปที่ใช้ในการประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งของโรเตอร์ โดยได้นำมาใช้ในการประมาณความถี่และตำแหน่งของแรงดันที่จุด PCC เพื่อการทำให้ค่าความผิดพลาดมีขนาดที่น้อยลง จะมีการประมาณค่าความผิดพลาดของตำแหน่งเวกเตอร์แรงดัน  $\Delta \rho$  ด้วยค่า  $\sin(\Delta \rho)$  ซึ่งสะท้อนถึงค่าในแกน  $q$  โดยอาจมองได้ว่าเมื่อมุมผลลัพธ์จากการประมาณถูกต้องจะทำให้ค่า  $q$  ของแรงดันที่ต้องการใช้เป็นแรงดันอ้างอิงของระบบมีค่าเป็น 0 และเนื่องจากเมื่อ  $\rho$  มีค่าเข้าใกล้ 0  $\sin(\rho)$  ก็จะมีค่าเข้าใกล้ 0 ด้วยเช่นกัน จึงสามารถใช้ในการประมาณได้

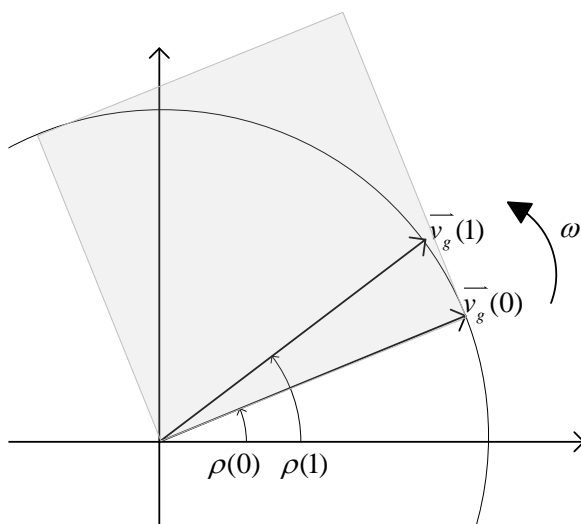
สังเกตได้จากรูปที่รูปที่ 21 ว่าหากแปลงเวกเตอร์แรงดัน  $\vec{v}_g$  ด้วยค่ามุมด้านเข้า  $\rho(0)$  แล้วหากค่าความผิดพลาดของมุมเป็น 0 แล้วค่า  $v_{gq}$  จะมีขนาดเป็น 0 เสมอ แต่หากมุมที่ประมาณได้มีค่าความผิดพลาดจะทำให้เกิดปริมาณในแกน  $q$

$$\sin(\Delta \rho) = \frac{v_{gq} \cdot \text{sgn}(v_{gd})}{|\vec{v}_g|} \quad (38)$$

จึงนำมาใช้ในการควบคุมแทนเนื่องจากค่ามีขนาดสัดส่วนที่เล็กกว่าเพื่อลดขนาดของค่าความผิดพลาด นอกจากนี้ยังมีการใส่วงจรรองต่ำเพื่อลดผลจากสัญญาณรบกวนในระบบเพิ่มเติมเข้าไปโดยวงรอบ

ควบคุมแสดงได้ตามรูปที่ 14 ข้อกำหนดในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ต่างๆสามารถเลือกตามเงื่อนไขต่อไปนี้

เลือกค่าความถี่ตัดข้ามของวงจรรองต่ำ  $\omega_{LP}$  โดยพิจารณาจากความถี่ของสัญญาณรบกวนในระบบ เลือกอัตราขยาย  $K_i$  โดยพิจารณาจากขนาดของค่าความผิดพลาดมุม  $\theta$  ในสภาวะอยู่ตัว เลือกอัตราขยาย  $K_p$  โดยคำนึงถึงเฟสล่าช้า และส่วนเผื่อเฟส



รูปที่ 21 แผนภาพแสดงเวกเตอร์และเฟสของแรงดันอ้างอิง

ความถี่ของวงจรรองต่ำสามารถเลือกได้โดยพิจารณาสัญญาณรบกวนที่มาจากความถี่สวิตช์ ที่อยู่ที่ 62,832 rad/s ดังนั้นสามารถเลือกความถี่ตัดข้ามของวงจรรองต่ำได้ที่  $\omega_{LP} = 3,141$  rad/s

การออกแบบค่าพารามิเตอร์  $K_p$  และ  $K_i$  ของตัวควบคุม PI จะคิดจากค่าความผิดพลาด โดยค่าความผิดพลาดของมุมโดยตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้า[15] ความถี่ของระบบสามารถแกว่งได้ไม่เกิน  $50 \pm 0.5$  Hz/s กำหนดค่าความผิดพลาดเป็น  $\Delta\rho_{ss} = 0.005$  rad จะได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้

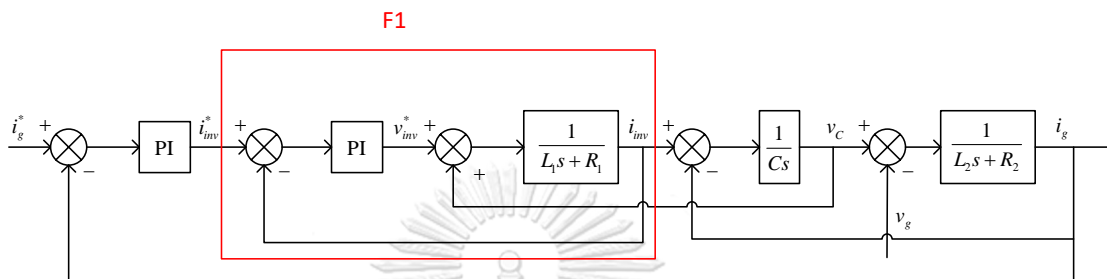
จากเงื่อนไขด้านบนจะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI และ ตัวควบคุมกรองต่ำดังนี้

$$\omega_{LP} = 50 \text{ rad/s}$$

$$K_p = 628$$

$$K_i = 12.56$$

## 2. วงรอบควบคุมกระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 22 ไดอะแกรมวงรอบควบคุมกระแสอินเวอร์เตอร์

วงรอบควบคุมกระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์หรือส่วน F1 ในรูปที่ 23 ในเป็นวงรอบด้านในใช้ในการควบคุมกระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์และจำกัดกระแสและแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ไม่ให้เกินพิกัด เนื่องจากความถี่การสวิตช์เท่ากับ 10k Hz ดังนั้นความเร็วของวงรอบควบคุมจะออกแบบให้มีความเร็วช้ากว่า 10 เท่าของความถี่สวิตช์เพื่อหลีกเลี่ยงผลของการสวิตช์ ดังนั้นจะออกแบบให้มีความเร็วผลตอบสนองเป็น 1ms และมีส่วนเผื่ออัตราขยายมากกว่า 5dB และส่วนเผื่อเฟสมากกว่า 50 องศา องค์ประกอบที่นำมาใช้ในการควบคุมอยู่บนแกนหมุนเชิงโคโรนัสซึ่งมีค่าเป็นองค์ประกอบกระแสตรงที่แยกเป็นสององค์ประกอบคือองค์ประกอบในแกน d และ q คือ องค์ประกอบขนานกับมุมของแรงดันกริด และองค์ประกอบที่ตั้งฉากกับแรงดันกริด ซึ่งสะท้อนถึงกำลังไฟฟ้าจริงและ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ต้องการควบคุมระหว่างอินเวอร์เตอร์และจุดแรงดันที่ตัวเก็บประจุ วงรอบควบคุมกระแสอินเวอร์เตอร์นี้รับอินพุตจากวงจรตรวจวัดกระแสที่จุดตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  ( $i_{inv,d}$  และ  $i_{inv,q}$ ) เทียบกับค่าอ้างอิงคำสั่ง ( $i_{inv,d}^*$  และ  $i_{inv,q}^*$ ) ควบคุมผ่านตัวควบคุม PI ปรับค่าผ่านแรงดันเอาต์พุตแรงดันอินเวอร์เตอร์คำสั่ง โดย ฟังก์ชันโอนย้ายของวงรอบควบคุมนี้คือ

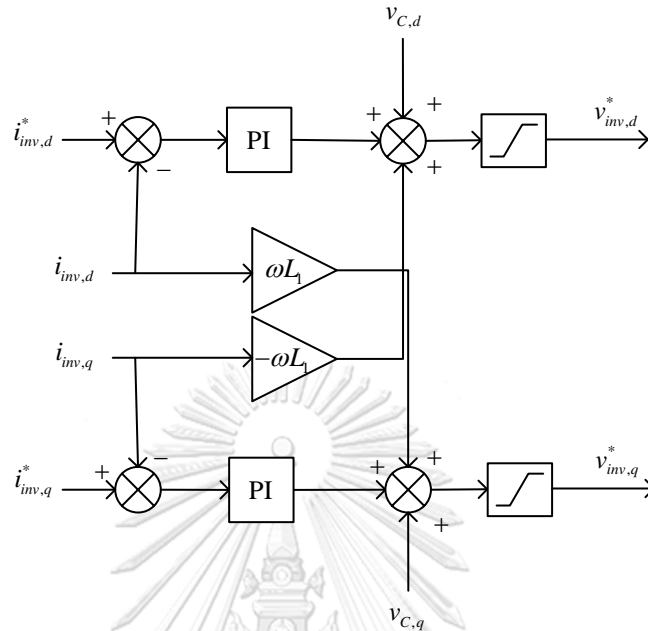
$$G_1(s) = \frac{v_{inv}}{i_{inv}} = \frac{1}{L_1 s + R_1} + v_c \quad (39)$$

วงรอบควบคุมกระแสอินเวอร์เตอร์สามารถแปลงให้อยู่บนแกนหมุนเชิงโคโรนัสได้เป็น

$$\begin{bmatrix} v_{inv,d} \\ v_{inv,q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & -\omega L_1 \\ \omega L_1 & R_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{inv,d} \\ i_{inv,q} \end{bmatrix} + L_1 \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{inv,d} \\ i_{inv,q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{c,d} \\ v_{c,q} \end{bmatrix} \quad (40)$$



และโมเดลวงรอบควบคุมได้ตามรูปที่ 23 โดยใช้แรงดันที่ตัวเก็บประจุ ( $v_{C,d}$  และ  $v_{C,q}$ ) เป็นตัวป้อนไปหน้า



รูปที่ 23 วงรอบควบคุมกระแสอินเวอร์เตอร์บนแกนหมุนซิงโครนัส

การออกแบบค่าของตัวควบคุมพีไอ พิจารณาสมการฟังก์ชันโอนย้ายจะเห็นได้ว่าระบบมีค่าขั้วอยู่ที่ตำแหน่ง  $s = -\frac{R_1}{L_1}$  เมื่อใช้ตัวควบคุม PI จะทำให้เกิดค่าขั้วที่ตำแหน่ง  $s = 0$  ตามรูปที่ 24 ทำให้สามารถเลือกค่าศูนย์ของตัวควบคุม PI เท่ากับ  $-\frac{R_1}{L_1}$  เพื่อหักล้างกับค่าขั้วของฟังก์ชันโอนย้าย  $G_1(s)$  เนื่องจากวงรอบควบคุมนี้กำหนดให้มีความเร็วผลตอบสนองเป็น 1ms หรือ 1000 rad/s เมื่อต้องการค่าคงตัวเวลา ( $\tau$ ) เท่ากับ 1ms จะเลือกค่า  $K = 1000$

$$G_{PI}(s) = K \frac{(s - z)}{s} \quad (41)$$

$$G_{PI}(s) = 1000 \frac{(L_1 s + R_1)}{s} \quad (42)$$

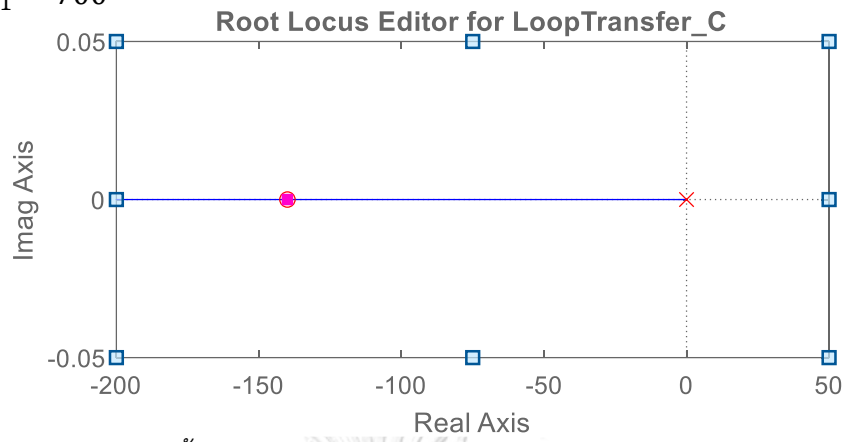
เมื่อแทนค่าตัวแปร  $R_1$  และ  $L_1$  สามารถจัดรูปเป็นแบบขนานได้ค่า  $K_p$  และ  $K_i$  ได้เป็น

$$G_{PI}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (43)$$

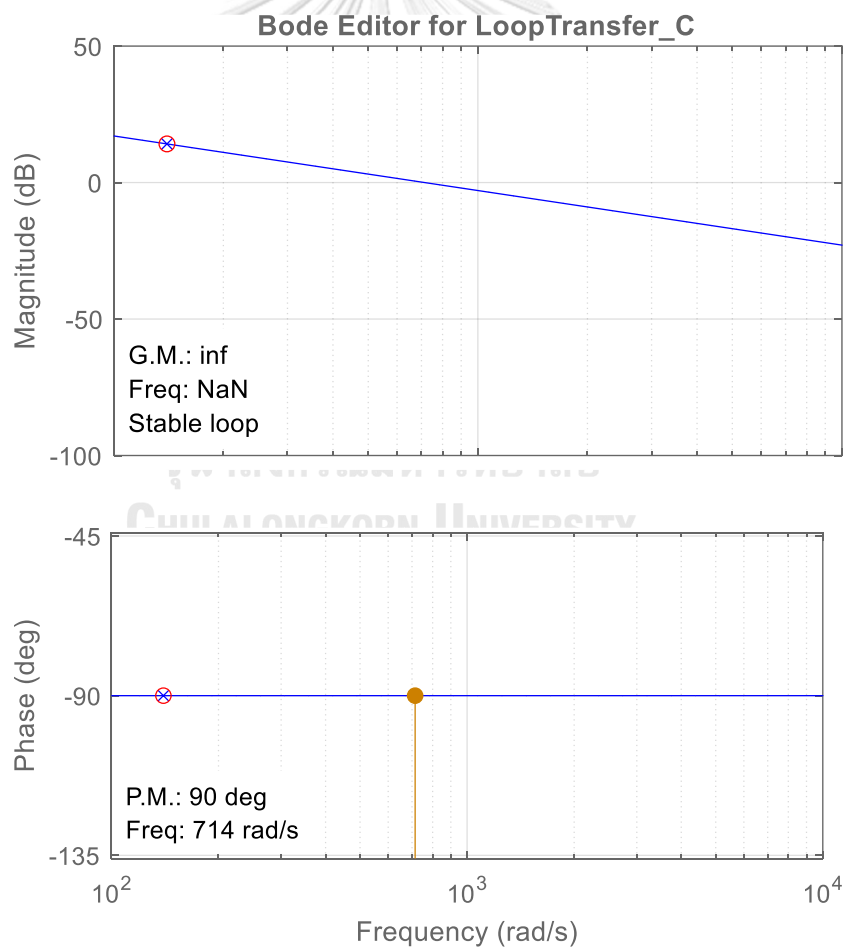
โดย

$$K_{p1} = 5$$

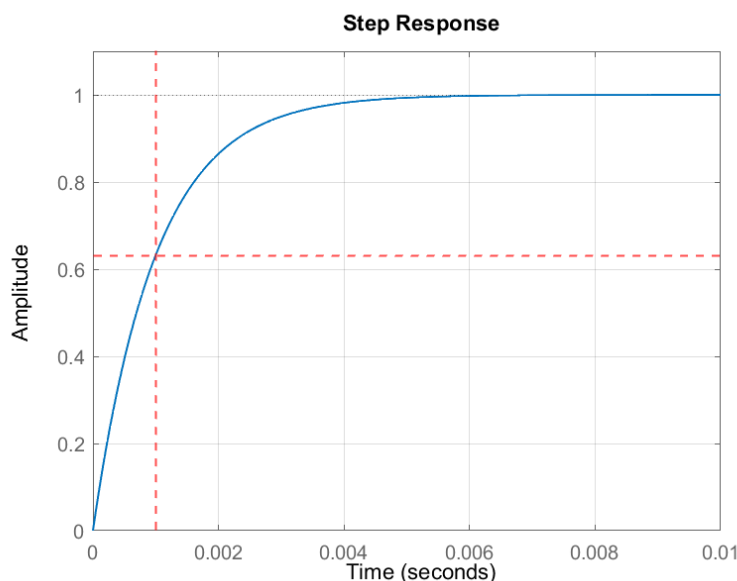
$$K_{i1} = 700$$



รูปที่ 24 แผนภาพตำแหน่งขั้วและศูนย์ของวงรอบควบคุมกระแสอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 25 แผนภาพโบเดของวงรอบควบคุมกระแสอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 26 ผลตอบสนองของรอบควบคุมกระแสอินเวอร์เตอร์

เมื่อแทนค่า  $K_p$  และ  $K_i$  จะได้ผลตอบสนองทางความถี่มีส่วนเฟ้ออัตราขยายเท่ากับอนันต์ และส่วนเฟ้อเฟสเท่ากับ 90 องศา ดังรูปที่ 25 การจำลองที่มีผลตอบสนองเป็น 1 ms ดังรูปที่ 26

### 3. วงรอบกระแสที่จุด PCC

วงรอบควบคุมกระแสที่จุด PCC ใช้ในการควบคุมกระแสที่จุด PCC ซึ่งสะท้อนถึงการรับหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้าโดยตรง วงรอบนี้เป็นวงรอบด้านนอกที่ให้ผลลัพธ์เป็นคำสั่งกระแสต้านออกของอินเวอร์เตอร์โดยมีการปรับผ่านตัวควบคุม PI ความเร็วของวงรอบควบคุมนี้จะเลือกให้ช้ากว่า วงรอบควบคุมด้านใน 10 เท่า คือ 100 rad/s เพื่อที่จะทำให้สามารถประมาณวงรอบควบคุมกระแสต้านออกของอินเวอร์เตอร์ด้านในให้มีค่าเป็น 1 เสมอ และมีส่วนเฟ้ออัตราขยายมากกว่า 5dB และส่วนเฟ้อเฟสมากกว่า 50 องศา ในการออกแบบตัวควบคุมของวงรอบนี้ พิจารณาฟังก์ชันโอนย้ายระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของระบบคือกระแสต้านออกของอินเวอร์เตอร์และกระแสที่จุด PCC สามารถเขียนได้ดังนี้

$$G_2(s) = \frac{i_{inv}}{i_g} = \frac{1}{L_2 C_f s^2 + R_2 C_f s + 1} \quad (44)$$

สำหรับการแยกองค์ประกอบการควบคุมสัญญาณบนแกนหมุนพิจารณาที่จุดขั้วของตัวเก็บประจุ C ของตัวกรอง LCL จะได้สมการ KCL

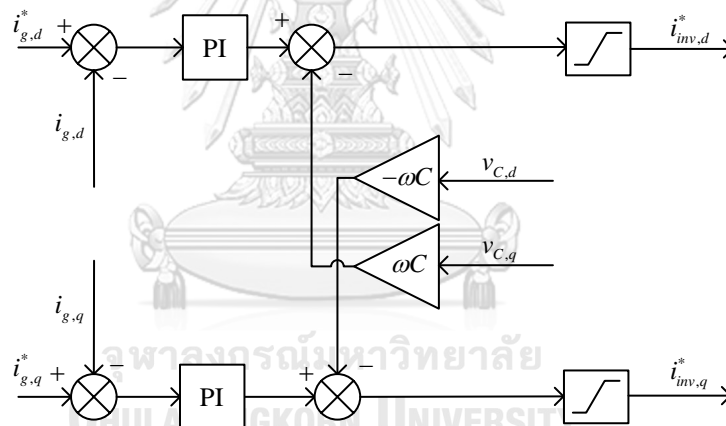
$$i_{inv}(s) = i_g(s) - i_c(s) \tag{45}$$

เมื่อประมาณความเร็วของวงรอบด้านในเร็วกว่าด้านนอก 10 เท่าคือวงรอบควบคุมด้านในมีความเร็ว 1000 rad/s และด้านนอกที่ 100 rad/s จะประมาณวงรอบด้านในได้เป็น F1 ที่มีค่าเท่ากับ 1 ได้ตามรูปที่ 28 อย่างไรก็ตามการชดเชยกระแสที่ไหลในตัวเก็บประจุ C ( $i_c$ ) ของตัวกรอง LCL จะต้องเพิ่มวงจรถาวรจัดกระแสแต่ในกรณีที่มีข้อมูลจากการตรวจจับแรงดันที่ตัวเก็บประจุจะสามารถประมาณกระแส  $i_c$  เท่ากับ

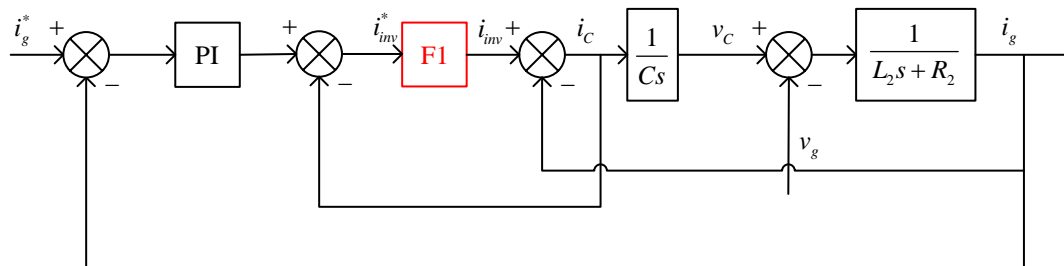
$$i_c(s) = v_c s \tag{46}$$

และบนกรอบอ้างอิงซิงโครนัส

$$\begin{aligned} i_{c,d} &= -\omega C v_{c,d} \\ i_{c,q} &= \omega C v_{c,d} \end{aligned} \tag{47}$$



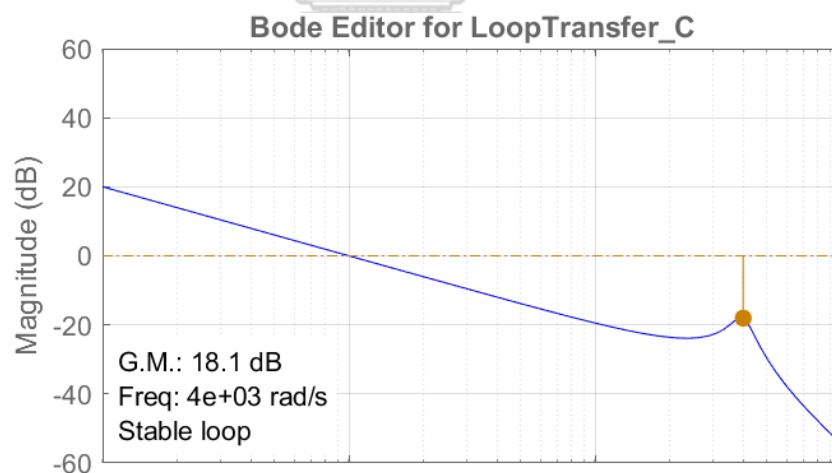
รูปที่ 27 วงรอบควบคุมกระแสที่จุด PCC บนกรอบอ้างอิงซิงโครนัส

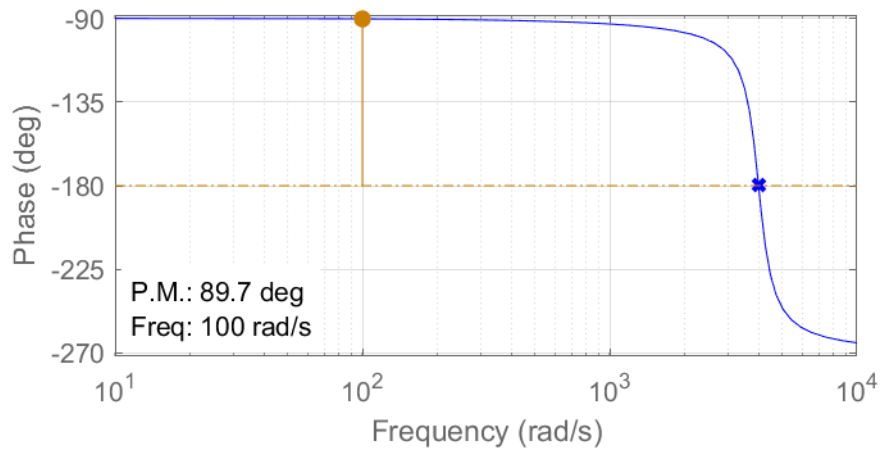


รูปที่ 28 วงรอบควบคุมกระแสที่จุด PCC

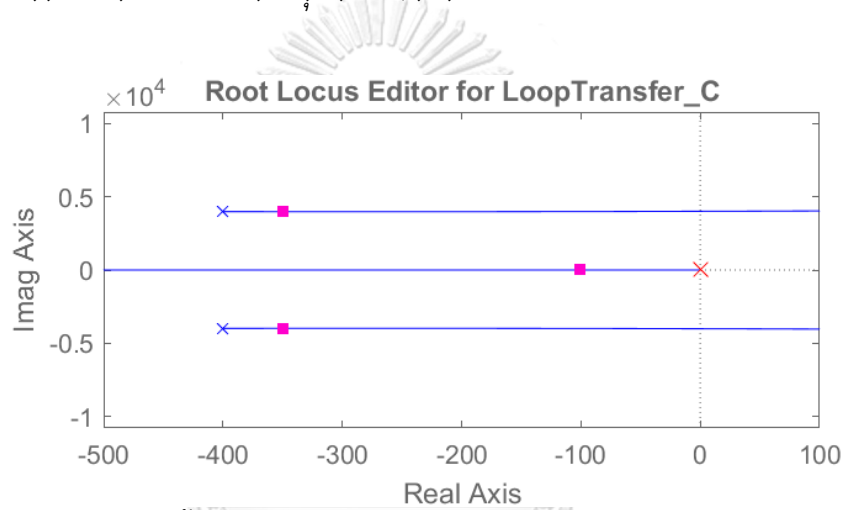
วงรอบควบคุมบนกรอบอ้างอิงซิงโครนัสจึงสามารถเขียนได้ดังรูปที่ 27 เมื่อประมาณด้วย กระแส  $i_c$  แล้วจึงสามารถกำหนดค่าของตัวควบคุม PI ของวงรอบควบคุมกระแส  $i_g$  เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆด้วยค่าพารามิเตอร์ในระบบจริงจะได้ค่าฟังก์ชันโอนย้ายที่มีค่าขั้ว (Pole) บนแกนจินตภาพที่  $400 \pm 3980i$  และความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ที่  $4000 \text{ rad/s}$  ดังรูปที่ 30

การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอของวงรอบควบคุมนี้ เมื่อต้องการความเร็วผลตอบสนองที่  $0.01 \text{ ms}$  จะเลือกจุดขั้วที่  $s = 0$  และใช้ค่า  $K = 100$  และเนื่องจากขั้วที่เหลือขึ้นอยู่กับความถี่เรโซแนนซ์ซึ่งอยู่ห่างจากตำแหน่ง  $s = 0$  มาก ตำแหน่งของศูนย์จึงไม่มีต่อความเร็วของผลวงรอบควบคุมจึงสามารถเลือก  $K_{i2} = 100$  และ  $K_{p2} = 0$  ได้ จากผลตอบสนองทางความถี่ในรูปที่ 29 จะเห็นว่าระบบมีส่วนเผื่ออัตราขยาย (Gain margin) เท่ากับ  $17 \text{ dB}$  และส่วนเผื่อเฟส (Phase margin)  $89.7 \text{ dB}$  ซึ่งเพียงพอต่อเสถียรภาพอย่างไรก็ตามจะเห็นว่าระบบยังคงมีขั้วที่แกว่งอยู่เล็กน้อยที่  $4000 \text{ rad/s}$  เนื่องจากระบบไม่ได้ใช้ตัวต้านทานหน่วง (Damping Resistor) ที่ตัวกรอง LCL เพราะจากต้องการผลของการขยายขนาดกระแสที่ความถี่เรโซแนนซ์ที่  $3455.8$  หรือ  $550 \text{ Hz}$  ดังนั้นอาจเพิ่มเติมการลดการแกว่งได้โดยวิธีการการลดการแกว่งแบบแอกทีฟแทน ผลตอบสนองของวงรอบปิดที่มีการเพิ่มตัวควบคุมสามารถแสดงดังรูปที่ 31 โดยมีค่าคงตัวเวลา ( $\tau$ ) เท่ากับ  $10 \text{ ms}$

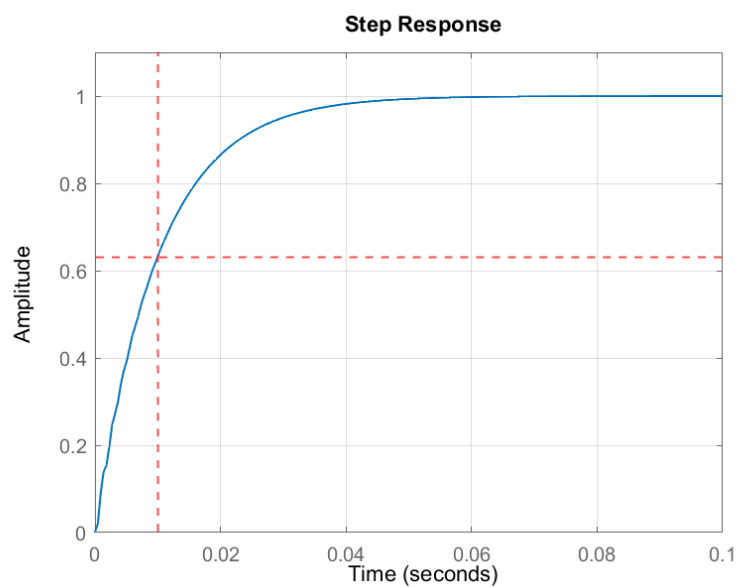




รูปที่ 29 แผนภาพโพลเดของวงรอบควบคุมกระแสกริด



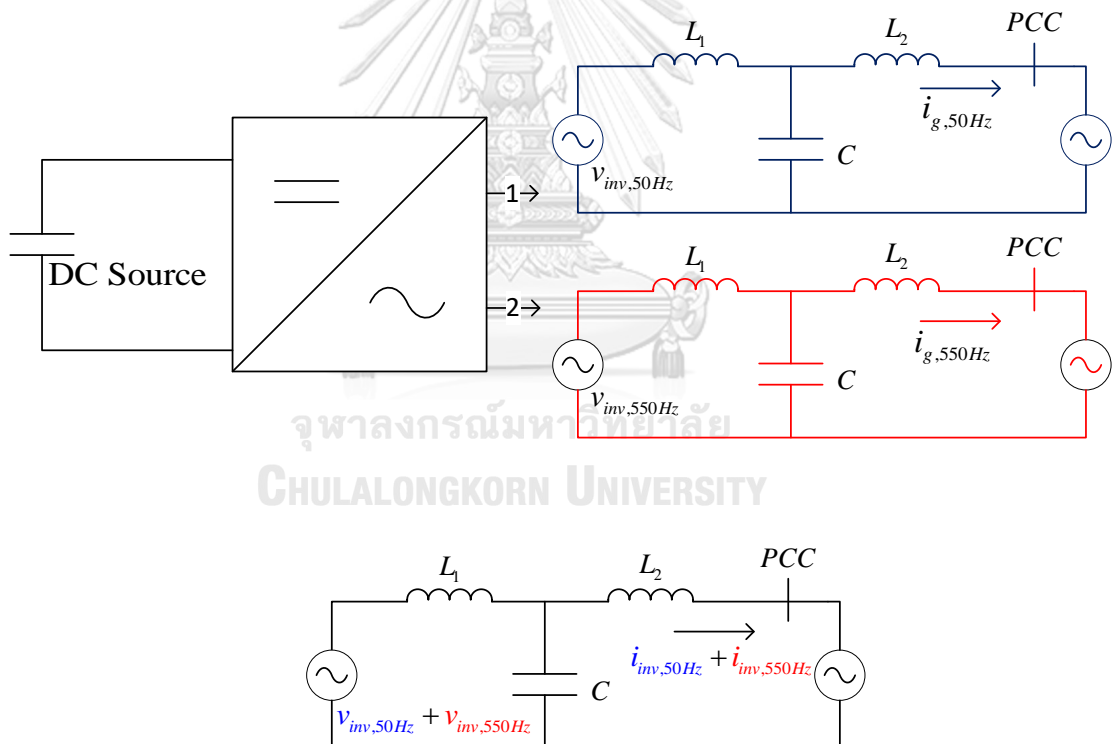
รูปที่ 30 แผนภาพตำแหน่งขั้วและศูนย์ของวงรอบควบคุมกระแสกริด



รูปที่ 31 ผลตอบสนองของวงรอบควบคุมกระแสกริด

#### 4. การออกแบบระบบการจ่ายกระแสแบบสองความถี่

การจ่ายกระแสทั้งสองความถี่จะมองอินเวอร์เตอร์เป็นแหล่งกำเนิดแรงดันสองแหล่ง จึงสามารถแบ่งการควบคุมออกเป็นสองส่วนแยกจากกันคือส่วนสร้างแรงดันความถี่สูงและแรงดันความถี่ต่ำซึ่งจะควบคุมโดยค่าบนแกนหมุน แรงดันความถี่ต่ำที่สร้างซึ่งโครโนซ์กับมุมของแรงดันกริดที่ตรวจจับมุมโดยเฟสล็อกกลูป ส่วนแรงดันความถี่สูงจะจ่ายแรงดันที่มีมุมเฟสเป็นมุมที่สร้างจากความถี่ที่กำหนดขึ้นเอง แรงดันที่อินเวอร์เตอร์จ่ายจะเป็นแรงดันและสร้างแรงดันด้านออกเป็นผลรวมของแรงดันความถี่ต่ำและความถี่สูง เมื่อใช้ทฤษฎี Superposition ทำให้สามารถวิเคราะห์วงจรได้เป็นแหล่งกำเนิดสองอันที่แยกจากกันเป็นสองวงจร กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรคือกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าหรือแรงดันของอินเวอร์เตอร์ทั้งสองวงจร อธิบายได้ตามรูปที่ 32 แนวคิดการสร้างระบบจ่ายกระแสทั้งสองความถี่



รูปที่ 32 แนวคิดการสร้างระบบจ่ายกระแสทั้งสองความถี่

หากผ่านการแปลง Clarke ด้วยมุมจากเฟสล็อกกลูป สัญญาณความถี่ 50Hz จะกลายเป็นสัญญาณกระแสตรง และสัญญาณไซน์ความถี่อื่นๆในระบบสามเฟสจะกลายเป็นสัญญาณที่มีความถี่สัญญาณเดิมลบด้วย 50 หากเลือกจ่ายสัญญาณความถี่สูงที่ 550Hz เพิ่มเข้าไป ผลการแปลง Clarke จะได้เป็นสัญญาณกระแสตรงตรงที่เป็นปริมาณของสัญญาณ 50Hz บวกกับสัญญาณคลื่นไซน์ที่มีความถี่ 500Hz เป็นปริมาณของสัญญาณ 550Hz ในอีกทางหนึ่งเมื่อพิจารณาระบบควบคุมบนแกน

หมุนที่แปลงด้วยหมุนที่สร้างขึ้นจากความถี่ 550Hz จะกลายเป็นสัญญาณกระแสตรงที่เป็นปริมาณของสัญญาณ 550Hz และสัญญาณคลื่นไซน์ที่มีความถี่ 500Hz ที่เป็นปริมาณ ของสัญญาณ 50Hz จึงสามารถแยกสัญญาณทั้งสองความถี่ออกจากกันโดยการใช้ตัวกรองผ่านต่ำ

การควบคุมแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ

1. ส่วนควบคุมกระแสความถี่ต่ำ

ส่วนนี้จะใช้การควบคุมแบบการควบคุมแบบปกติ คือการควบคุมกระแสกริดบนแกนหมุนซิงโครนัส โดยใช้หมุนที่ตรวจจับผ่านเฟสล็อกกลุ๊ปของแรงดันกริดเป็นหมุนอ้างอิงที่ใช้จ่ายกระแสรีแอคทีฟความถี่ปกติ

2. ส่วนควบคุมกระแสความถี่สูง

กำหนดให้มีความเร็วผลตอบสนองเป็น 1ms เท่ากับวงรอบควบคุมกระแสที่จุด PCC ความถี่ต่ำเนื่องจากส่วนนี้จะใช้ในการจ่ายกระแสความถี่สูง โดยหมุนที่ใช้ในการสร้างแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์นั้นจะเป็นหมุนที่สร้างขึ้นตามความถี่ที่ต้องการ ดังนั้นองค์ประกอบบนแกนหมุนซิงโครนัสจะไม่มี ความหมายที่แสดงถึงกำลังไฟฟ้าจริงหรือกำลังไฟฟารีแอคทีฟ ในความเป็นจริง ความหมายของกระแสในแกน  $d$  และ  $q$  ของส่วนควบคุมนี้จะหมายถึง องค์ประกอบสมมุติของกระแสความถี่สูงเท่านั้น เมื่อพิจารณาวงจรที่ความถี่ 550Hz จะเห็นว่าขนาดของแรงดันกริดที่ 550Hz นั้นไม่มี อีกทั้งเมื่อความถี่ของแรงดันและกระแสมีขนาดใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ  $L_2$  และ ตัวเก็บประจุ  $C$  ของวงจรกรอง LCL ทำให้อิมพีแดนซ์ของ ตัวเหนี่ยวนำ  $L_2$  และ ตัวเก็บประจุ  $C$  มีขนาดใหญ่มาก เมื่อเทียบกับหมุนเฟสของแรงดันของอินเวอร์เตอร์กระแสอินเวอร์เตอร์จะเป็นกระแสรีแอคทีฟหรือกระแสในแกน  $q$  เท่านั้น ดังนั้นจึงประมาณองค์ประกอบของกระแสในแกน  $d$  และ  $q$  เท่านั้นได้ เหลือแค่ขนาดรวมของเวกเตอร์ของกระแสอินเวอร์เตอร์บนแกนหมุน จากนั้นจะใช้การควบคุมขนาดของกระแสอินเวอร์เตอร์เพื่อปรับขนาดของแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ เพื่อให้ได้ขนาดกระแสอินเวอร์เตอร์ตามต้องการ ในการออกแบบค่าของวงจรควบคุมจะพิจารณา ฟังก์ชันโอนย้ายระหว่างกระแสอินเวอร์เตอร์และแรงดันอินเวอร์เตอร์ตามสมการ

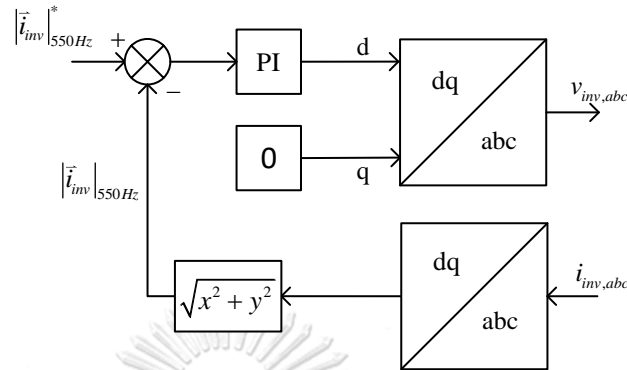
$$G_{550\text{Hz}}(s) = \frac{i_{inv}}{v_{inv}} \quad (48)$$

$$= \frac{CL_2s^2 + CR_2s + 1}{L_1L_2Cs^3 + (CL_1R_2 + CL_2R_1)s^2 + (CR_1R_2 + L_2 + L_1)s + (R_1 + R_2)}$$

เมื่อความถี่ของแรงดันถูกกำหนดอยู่ที่ 550Hz และเลือกอัตราการเปลี่ยนแปลงของขนาดที่ 0.01s เนื่องจากต้องการให้มีความเร็วน้อยกว่าวงรอบความถี่ 500Hz ทำให้สามารถ



พิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนที่ความถี่คงที่ที่ 550Hz เท่านั้นและประมาณฟังก์ชันโอนย้ายเป็นค่าคงตัว หากแทนค่าพารามิเตอร์ด้วยพารามิเตอร์ของระบบจะได้ค่าคงตัวเท่ากับ 0.0141 เล็ก Ki ของวงรอบควบคุมนี้เท่ากับ 8000 วงรอบควบคุมแสดงได้ในรูปที่ 33



รูปที่ 33 วงรอบควบคุมขนาดกระแสอินเวอร์เตอร์

### 3. วงจรกรอง

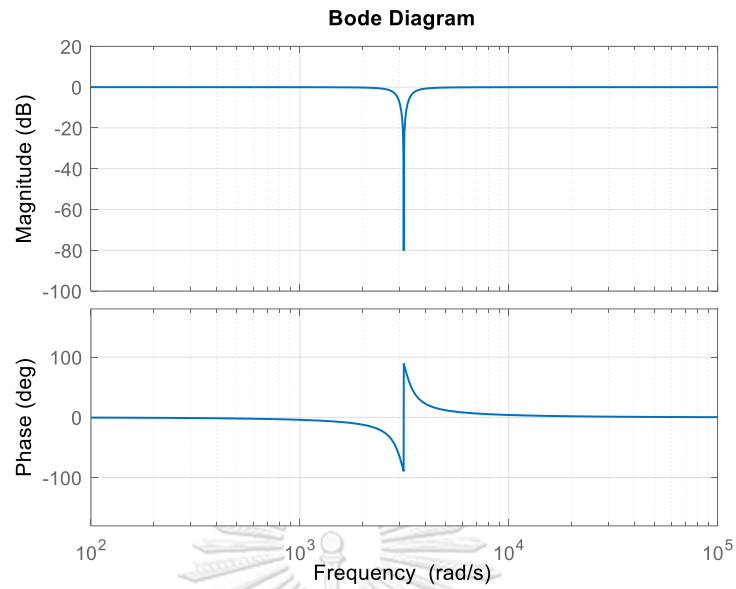
วงจรกรองผ่านต่ำที่ใช้สำหรับกรองสัญญาณไซน์ความถี่ความถี่ 500Hz ที่ บนแกนหมุนเชิงโครนัส ต้องการอัตราการลดทอนที่ 80dB จะใช้นotchฟิลเตอร์ (Notch filter) ที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนตามสมการ

$$G_f = \frac{s^2 + 2\zeta_z \omega_N s + \omega_N^2}{s^2 + 2\zeta_p \omega_N s + \omega_N^2} \quad (49)$$

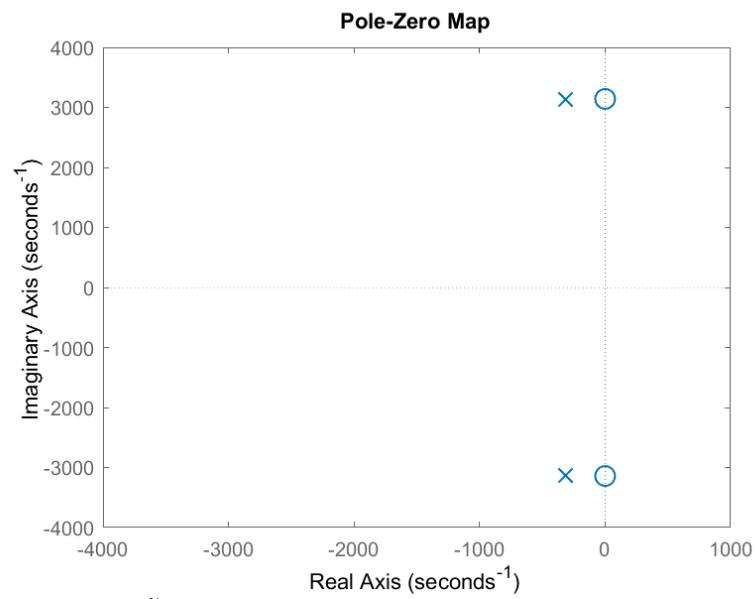
โดยการเลือกตำแหน่งของศูนย์บนแกนจินตภาพที่ความถี่ 500Hz หรือ 3141.6 rad/s คือและอัตราการลดทอนให้มากกว่า 80dB เล็กน้อยคือประมาณ 100dB ตามสมการ

$$-20 \log(2\zeta_z) \quad (50)$$

เลือกค่า  $\zeta_z$  เท่ากับ  $5 \times 10^{-6}$  จากนั้นเลือกจุดขั้วบนแกนจินตภาพที่ความถี่เดียวกันแต่ให้มีอัตราส่วนการหน่วงที่มากกว่าเพื่อหักล้างกับผลของขนาดและมุมเฟสตำแหน่งศูนย์ที่ความถี่อื่นๆ โดยเฉพาะค่าความถี่ 1000 rad/s เนื่องจากเป็นความเร็วของวงรอบควบคุมกระแสอินเวอร์เตอร์ จึงเลือกใช้ค่า  $\zeta_p$  เท่ากับ  $5 \times 10^{-2}$  ซึ่งมีอัตราขยายที่ 20dB ซึ่งจะมีผลทำให้อัตราการลดทอนที่ความถี่ 3141.6 rad/s ลดลงเหลือประมาณ 80dB ตามที่แสดงในรูปที่ 34 จะเห็นได้ว่าสามารถลดทอนสัญญาณที่ 3141.6 rad/s ได้โดยไม่มีผลต่อความถี่อื่นๆ ส่วนมุมเฟสของสัญญาณที่ถูกลดทอนทำให้ไม่มีผลอย่างป็นนัยสำคัญ ตำแหน่งของขั้วและศูนย์ของตัวกรองคือ ตำแหน่งขั้วที่  $-0.3142 \pm 3141.6i$  และตำแหน่งศูนย์ที่  $\pm 3.1416i$  ตามรูปที่ 35



รูปที่ 34 แผนภาพโบเดฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรกรอง

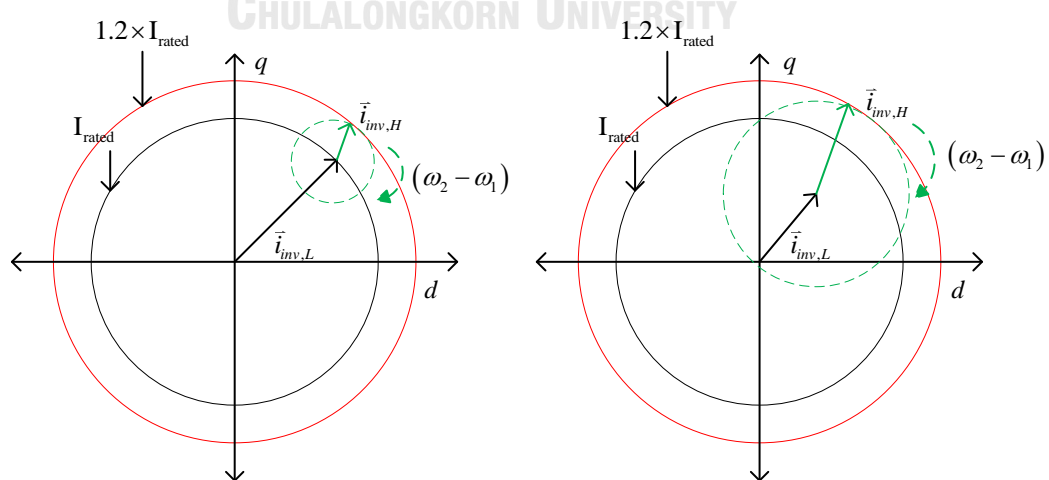


รูปที่ 35 แผนภาพตำแหน่งขั้วและศูนย์ของวงจรกรอง

#### 4. การจำกัดกระแสและแรงดัน

หากข้อกำหนดของผู้ให้บริการโครงข่ายกำหนดให้จ่ายกระแสรีแอกทีฟในช่วงแรงดันตก แต่หากต้องการเพิ่มขนาดกระแส อินเวอร์เตอร์สามารถจ่ายกระแสทั้งความถี่สูงและความถี่ปกติ ได้พร้อมกัน ซึ่งจะใช้ช่วงพิกัดแรงดันและพิกัดกระแสที่เหลืออยู่จากที่จ่ายกระแสความถี่ปกติ ไปใช้ในการจ่ายกระแสความถี่สูงเพิ่มเข้าไป ในการพิจารณากระแส เพื่อให้เกิดขนาดกระแสที่สูงขึ้น โดยที่การจ่ายกระแสยังเป็นไปตามข้อกำหนดของผู้ให้บริการโครงข่ายอยู่ โดยการออกแบบการจ่ายกระแสจะแยกการควบคุมทั้งสององค์ประกอบความถี่ออกจากกัน โดยยึดการจ่ายกระแสความถี่ปกติตามข้อกำหนดระบบไฟฟ้าก่อน เป็นอันดับแรก หลังจากนั้นจึงพิจารณาจ่ายกระแสความถี่สูงโดยยึดจากขนาดกระแสที่เหลือก่อนที่กระแสจ่ายอดจะถึงขนาด 1.2 ของขนาดพิกัดปกติเนื่องจากในอินเวอร์เตอร์ทั่วไปจะสามารถจ่ายกระแสขนาด 1.2 เท่าของกระแสพิกัดได้หากเป็นกรณีช่วงสั้นๆ เนื่องจากอุปกรณ์ต่างๆ จะยังไม่เกิดความร้อนมากเพียงพอที่จะทำให้เกิดความเสียหาย คำสั่งกระแสความถี่สูง สามารถคำนวณได้จากขนาดกระแสอินเวอร์เตอร์ที่ตรวจวัดและแยกองค์ประกอบเป็นความถี่ 50Hz จากรูปจะแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขนาดกระแสที่ความถี่สูงเข้าไปโดยขนาดกระแสแสดงเป็นเวกเตอร์ในแกนหมุนที่ความถี่แรงดันกริดเวกเตอร์นี้จะมีขนาดกระแสไม่เกินค่ากระแสพิกัด ส่วนเวกเตอร์กระแสความถี่สูงที่จ่ายเพิ่มเข้าไปจะหมุนอยู่บนเวกเตอร์กระแสความถี่ปกติ ซึ่งกำหนดให้ขนาดสูงสุดที่รวมกันของกระแสจะต้องไม่ 1.2 เท่าของกระแสพิกัดจึงหาขนาดกระแสได้จาก โดยเมื่อเกิดแรงดันตก อินเวอร์เตอร์จะต้องจ่ายกระแสเฉพาะ กระแสรีแอกทีฟเท่านั้น จึงสามารถประมาณกระแสที่อินเวอร์เตอร์ต้องจ่ายได้เป็น

$$|\vec{i}_{inv,H}| = 1.2 \times I_{rated} - |\vec{i}_{inv,L}| \quad (51)$$



รูปที่ 36 การกำหนดกระแสความถี่สูงที่จ่าย

ส่วนการจำกัดแรงดัน หากอินเวอร์เตอร์จ่ายกระแสตามกระแสพิกัด เมื่อแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุในวงจรมีค่าสูง โดยเฉพาะเมื่อมีการจ่ายความถี่สูงร่วมด้วย ก็อาจทำให้เกิดแรงดันเกินพิกัด เป็นเหตุให้อินเวอร์เตอร์ปลดตัวเองออกจากระบบ ดังนั้นจึงต้องมีการจำกัดแรงดันด้านออกในขณะที่จ่ายกระแสความถี่สูงด้วย เมื่อถือว่าแรงดันอินเวอร์เตอร์เป็นแหล่งจ่ายแรงดันทั้งสองความถี่ แรงดันที่อินเวอร์เตอร์จะแปรตามกระแสและความถี่เนื่องจากที่ความถี่เรโซแนนซ์จะทำให้อิมพีแดนซ์  $L_2$  และ  $C$  ดังนั้นขนาดของแรงดันอินเวอร์เตอร์จึงหาได้จากสมการ ของกระแสและความถี่ที่สภาวะคงตัว

$$\vec{v}_{inv} = \vec{v}_{inv,LO} + \vec{v}_{inv,HI} \quad (52)$$

โดยแบ่งเป็นองค์ประกอบความถี่ต่ำ

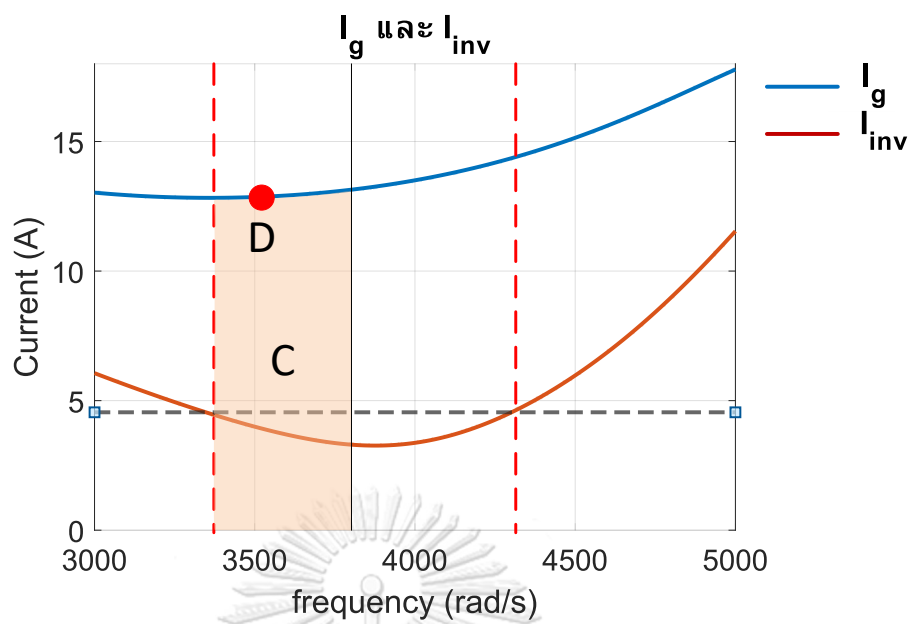
$$\vec{v}_{inv,LO} = \vec{i}_{inv,LO} (R_1 + sL_2) + \vec{v}_{c,LO} \Big|_{s=j\omega_{LO}} \quad (53)$$

และองค์ประกอบความถี่สูง

$$\vec{v}_{inv,HI} = \vec{i}_{inv,HI} \left[ (R_1 + sL_1) + \left( (R_2 + sL_2) // \frac{1}{sC} \right) \right] \quad (54)$$

$$\begin{aligned} & \vec{v}_{inv,HI} \\ &= \vec{i}_{inv,HI} \frac{CL_2s^2 + CR_2s + 1}{CL_1L_2s^3 + (CL_2R_1 + CL_1R_2)s^2 + (L_1 + L_2 + CR_1R_2)s + (R_1 + R_2)} \Big|_{s=j\omega_{HI}} \end{aligned} \quad (55)$$

เมื่อแทนค่าขนาดแรงดันที่ต้องการภายใต้พิกัดจะทำให้สามารถเลือกค่ากระแสอินเวอร์เตอร์ และค่าความถี่ที่ต้องการได้ **รูปที่ 1** แสดงความสัมพันธ์ของขนาดแรงดันกริดที่ขนาดพิกัด กระแสกริด และกระแสอินเวอร์เตอร์เมื่อแรงดันที่จุด PCC ตกลงเหลือ 0V ที่ช่วงความถี่เรโซแนนซ์จะเห็นได้ว่าช่วงบริเวณ C คือช่วงที่อัตราขยายมีขนาดมากเมื่อขนาดกระแสอินเวอร์เตอร์ยังอยู่ภายใต้พิกัด จากรูปจะเลือกความถี่ที่ 550Hz หรือ 3455.8 rad/s โดยจุด D คือกระแสอินเวอร์เตอร์ที่จ่ายได้เท่ากับ 4 A และกระแสกริดจะมีค่าเท่ากับ 13.03 A แต่หากอินเวอร์เตอร์ยังคงต้องจ่ายกระแสรีแอกทีฟตามข้อกำหนดของผู้ให้บริการโครงข่ายก่อนให้ความสำคัญแรงดันที่ความถี่ต่ำก่อนและส่วนที่เหลือจึงนำมาพิจารณาการจ่ายกระแสความถี่ต่ำ



รูปที่ 37 ขอบเขตของพิกัดกระแสและแรงดันอินเวอร์เตอร์

## บทที่ 5

### ผลการจำลองระบบด้วยโปรแกรมจำลอง

ผลการทดลองการจำลองวงรอบควบคุมกระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์ด้วยโปรแกรม Matlab Simulink โดยตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบบนโปรแกรมจำลองด้วยพารามิเตอร์ตามตารางที่ 4 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ของระบบ ซึ่งเป็นค่าของพารามิเตอร์ของระบบจริงของระบบอินเวอร์เตอร์ของห้องแลปปฏิบัติการและแรงดันระบบที่จุด PCC ที่ 400Vrms เงื่อนไขในการจำลองคือแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์เท่ากับแรงดันอินเวอร์เตอร์คำสั่ง ทดสอบการจำลองทั้งหมด 3 แบบคือ

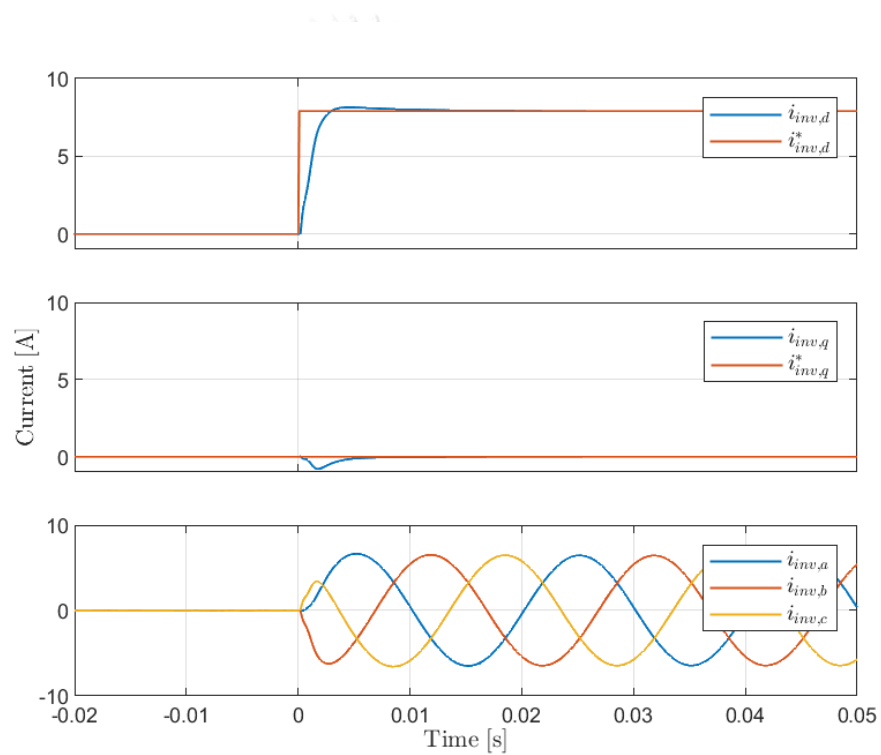
1. การจำลองวงรอบควบคุมกระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์
2. การจำลองวงรอบควบคุมกระแสกริด
3. การจำลองการจ่ายกระแสรีแอคทีฟความถี่ปกติเมื่อเกิดแรงดันตก
4. การจำลองการจ่ายกระแสความถี่สูงเมื่อเกิดแรงดันตก
5. การจำลองการจ่ายกระแสความถี่สูงและกระแสรีแอคทีฟความถี่ต่ำเมื่อเกิดแรงดันตก

พารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์	
พิกัดกำลังของอินเวอร์เตอร์	3 kVA
ระดับแรงดันบัลไฟตรง	900 VDC
ระดับแรงดันระหว่างสายปกติ (nominal line to line voltage)	380 V
พิกัดกระแสของอินเวอร์เตอร์	4.55 A (rms)
ความถี่การสวิตช์ (switching frequency)	10 kHz
ความถี่ปกติ (nominal frequency)	50 Hz
พารามิเตอร์ของวงจรกรอง LCL	
ค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำด้านออกของอินเวอร์เตอร์	5 mH
ค่าความต้านทานแฝงของตัวเหนี่ยวนำด้านออกของอินเวอร์เตอร์	0.067 $\Omega$
ค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำด้านจุดเชื่อมต่อกับระบบ	5 mH
ค่าความต้านทานแฝงของตัวเหนี่ยวนำจุดเชื่อมต่อกับระบบ	0.067 $\Omega$
ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ	12.5 $\mu F$
ค่าความต้านทานแฝงของตัวเก็บประจุ	3 $\Omega$

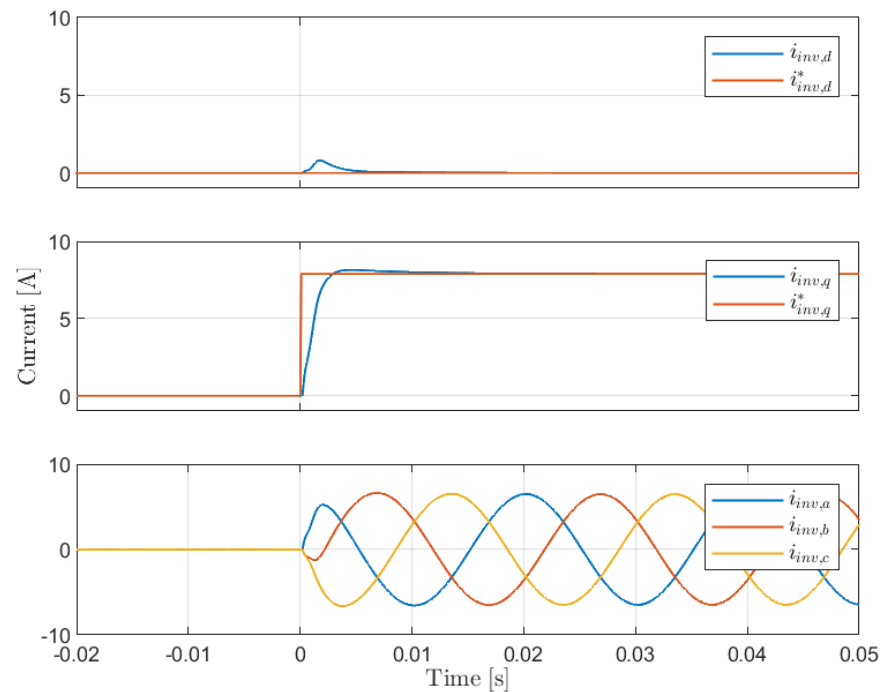
ตารางที่ 4 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ของระบบ

### การจำลองวงรอบควบคุมกระแสต้านออกของอินเวอร์เตอร์

โดยใช้ค่า  $K_{p1}$  และ  $K_{i1}$  ตามที่กำหนดตามการออกแบบก่อนหน้านี้ การจำลองสั่งกระแสต้านออกของอินเวอร์เตอร์ด้วยค่าคำสั่งกระแสที่กักด้วยสัญญาณคำสั่งแบบฟังก์ชันขั้นบันได  $i_{inv,d} = 7.89 \text{ A}$  จะเห็นได้ว่าระบบได้มีผลตอบสนองตามที่ได้ออกแบบไว้คือค่าคงตัวเวลาที่ 1ms ทั้งกระแสในแกน d และแกน q วงรอบควบคุมสามารถควบคุมกระแสทั้งสองแกนได้อย่างแยกจาก กระแสกริดอินเวอร์เตอร์เฟส a b และ c เพิ่มขึ้นอย่างสมดุล และกระแสต้านออกของอินเวอร์เตอร์ที่ทั้งสามเฟสเพิ่มขึ้นตาม รูปที่ 39



รูปที่ 38 ผลตอบสนองของวงรอบควบคุมกระแสต้านออกของอินเวอร์เตอร์เมื่อมีการสั่งกระแสในแกน d 7.89 A

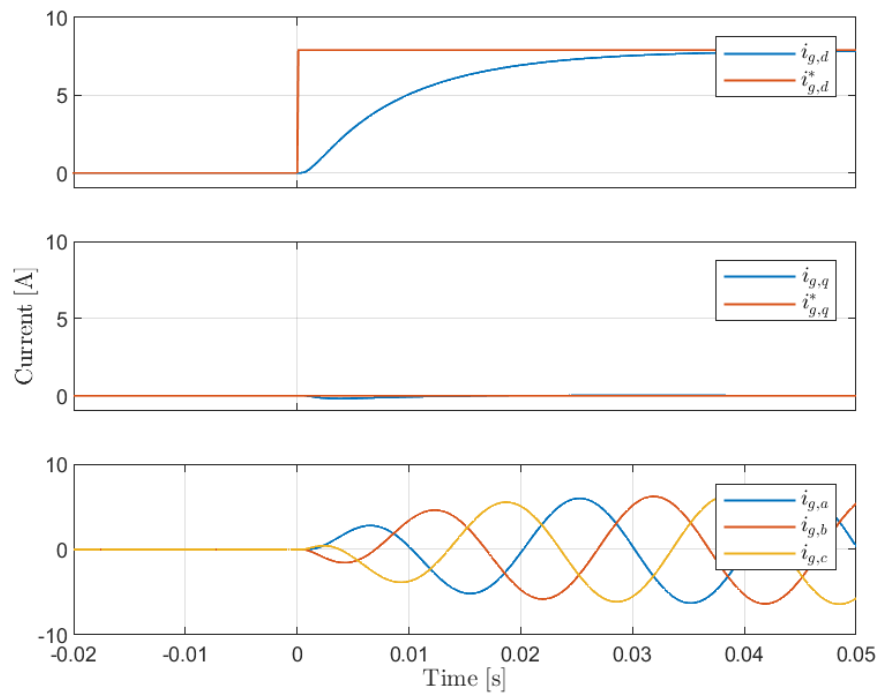


รูปที่ 39 ผลตอบสนองของวงรอบควบคุมกระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์เมื่อมีการสั่งกระแสในแกน q 7.89 A

#### การจำลองวงรอบควบคุมกระแสกริด

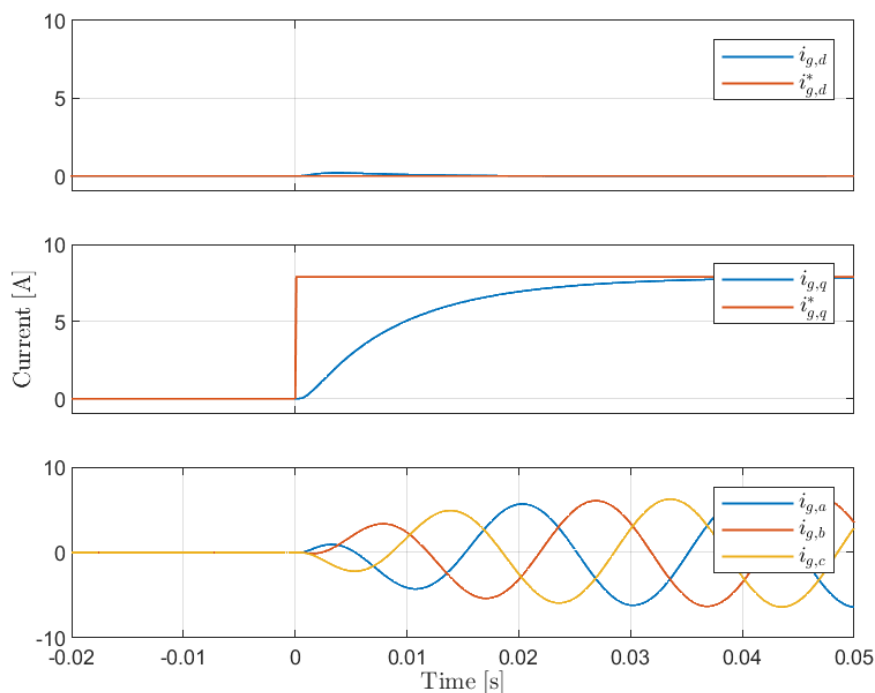
ทดสอบวงรอบควบคุมกระแสกริดเช่นเดียวกับวงรอบควบคุมกระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์ โดยการใช้ค่าที่ออกแบบ  $K_{p2}$  และ  $K_{i2}$  จากบทก่อนหน้า ด้วยการทดลองสั่งคำสั่งกระแสกริดด้วยสัญญาณแบบฟังก์ชันขั้นบันได  $i_{g,d} = 7.89 A$  และ  $i_{g,q} = 7.89 A$  ได้ผลดังเช่น รูปที่ 40 และ รูปที่ 41 ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลตอบสนองของกระแสเอาต์พุตในแกน d และแกน q มีค่าคงตัวเวลาที่ 10ms สามารถควบคุมทั้งสองปริมาณได้อย่างแยกอิสระจากกันและกระแสกริดเฟส a b และ c เพิ่มขึ้นอย่างสมดุล





รูปที่ 40 ผลตอบสนองของวงรอบควบคุมกระแสต้านออกของอินเวอร์เตอร์เมื่อมีการลั้งกระแสในแกน d 7.89 A

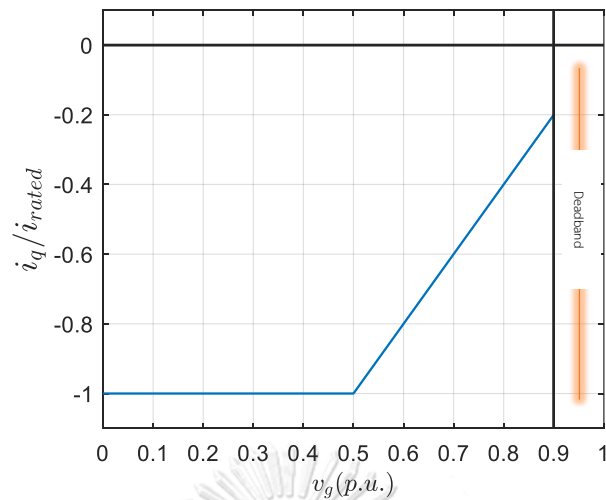




รูปที่ 41 ผลตอบสนองของวงรอบควบคุมกระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์เมื่อมีการลั้งกระแสในแกน  $q$  7.89 A

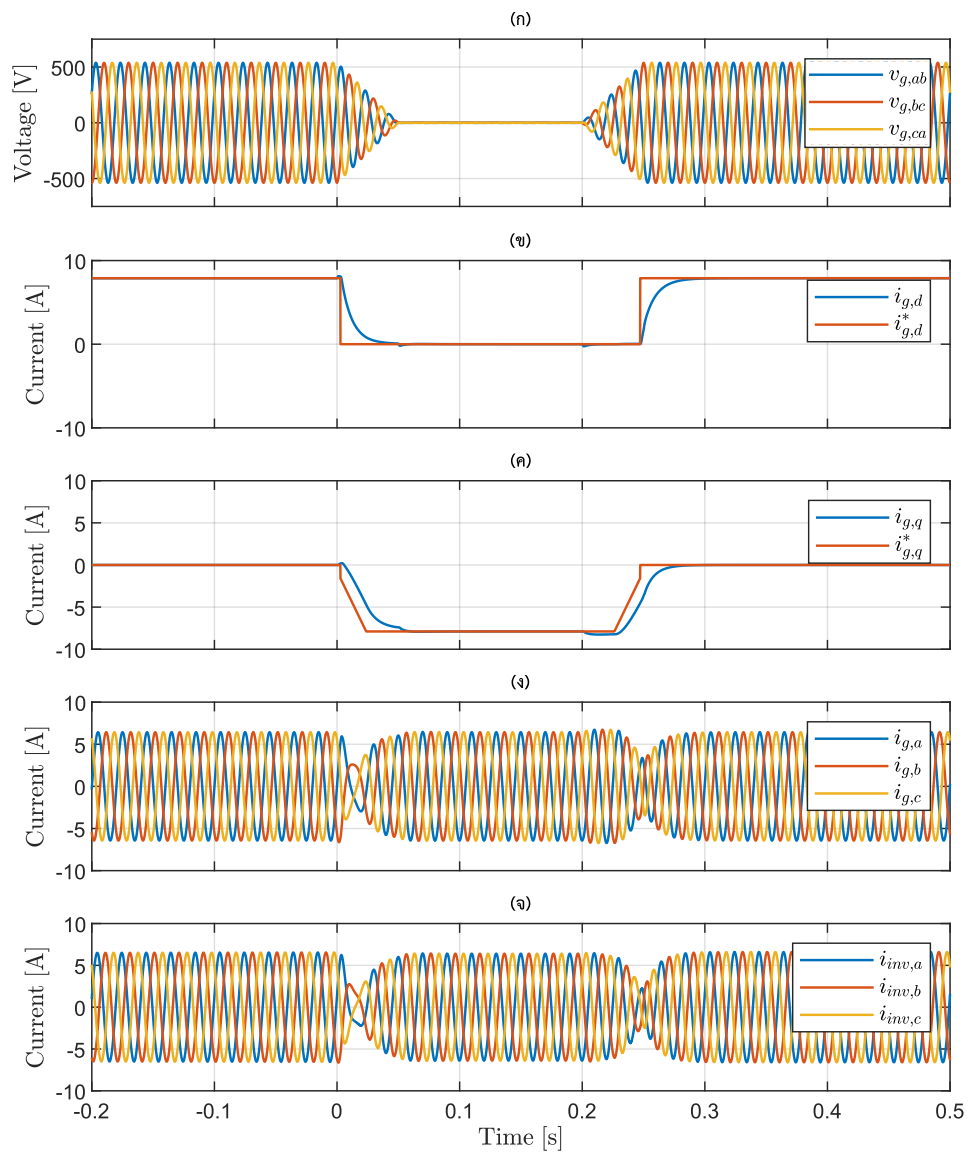
#### การจำลองการจ่ายกระแสรีแอกทีฟความถี่ปกติเมื่อเกิดแรงดันตก

จากการทดลองการจ่ายกระแสรีแอกทีฟขณะแรงดันตกโดยจะจ่ายเป็นสัดส่วนของแรงดัน โดยอินเวอร์เตอร์จะทำงานตามสภาวะปกติคือจ่ายกระแสตามคำสั่งกระแสที่กำหนดโดยผู้ใช้ เมื่อแรงดันมีขนาดอยู่ในช่วง 1 p.u. ถึง 0.9 p.u. เนื่องจากถูกกำหนดให้เป็นช่วงแถบไร้ผลสนองแต่หากแรงดันมีขนาดลดลงต่ำกว่า 0.9 p.u. ไปจนถึงค่า 0 p.u. อินเวอร์เตอร์จะต้องจ่ายขนาดกระแสรีแอกทีฟต่อขนาดกระแสพิกัดตามกราฟในรูปที่ 42 ซึ่งจะมีทิศทางเป็นลบเนื่องจากการกำหนดทิศทางของการแปลง Clarke ให้การจ่ายกระแสรีแอกทีฟเป็นเครื่องหมายลบ

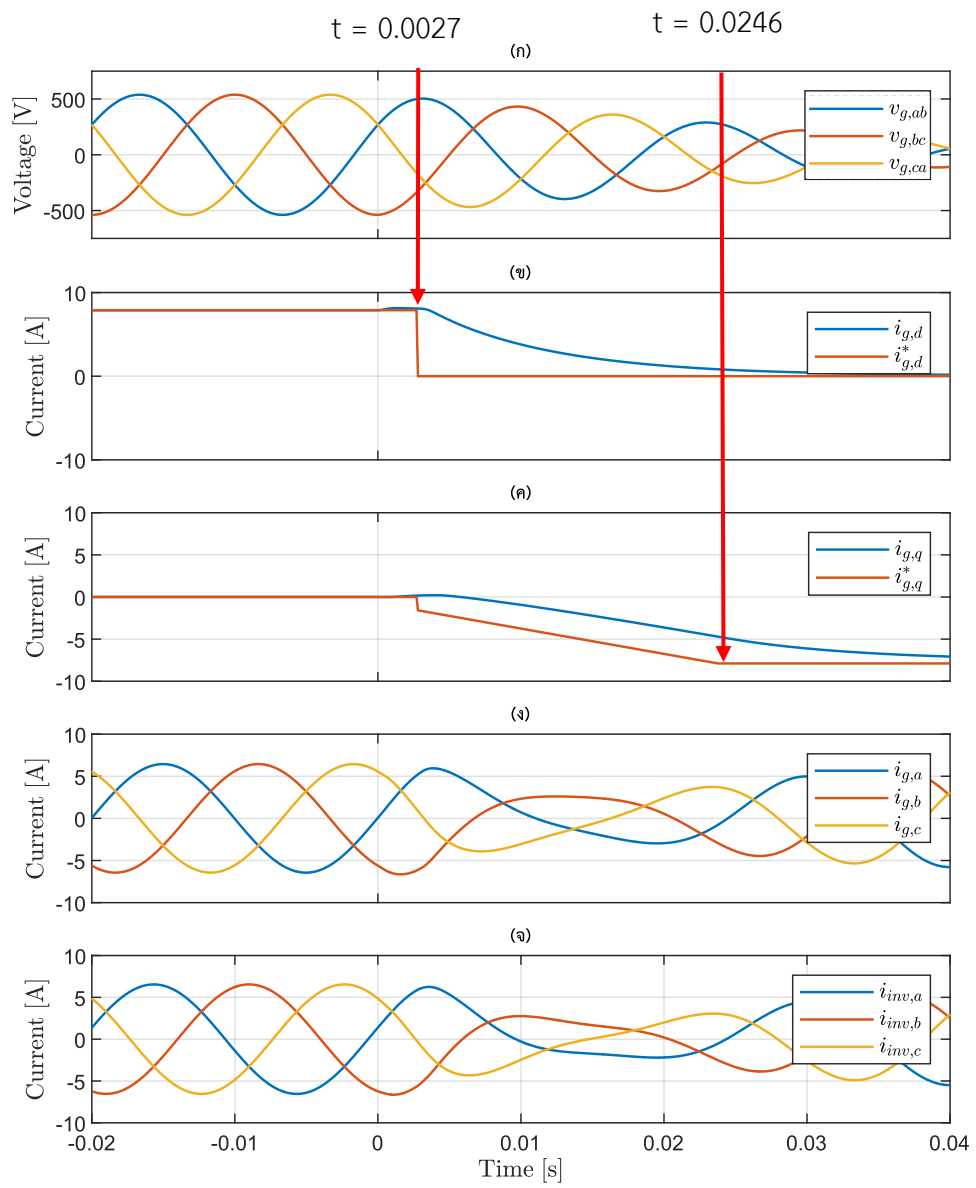


รูปที่ 42 สัดส่วนการจ่ายกระแสรีแอกทีฟตามขนาดแรงดัน

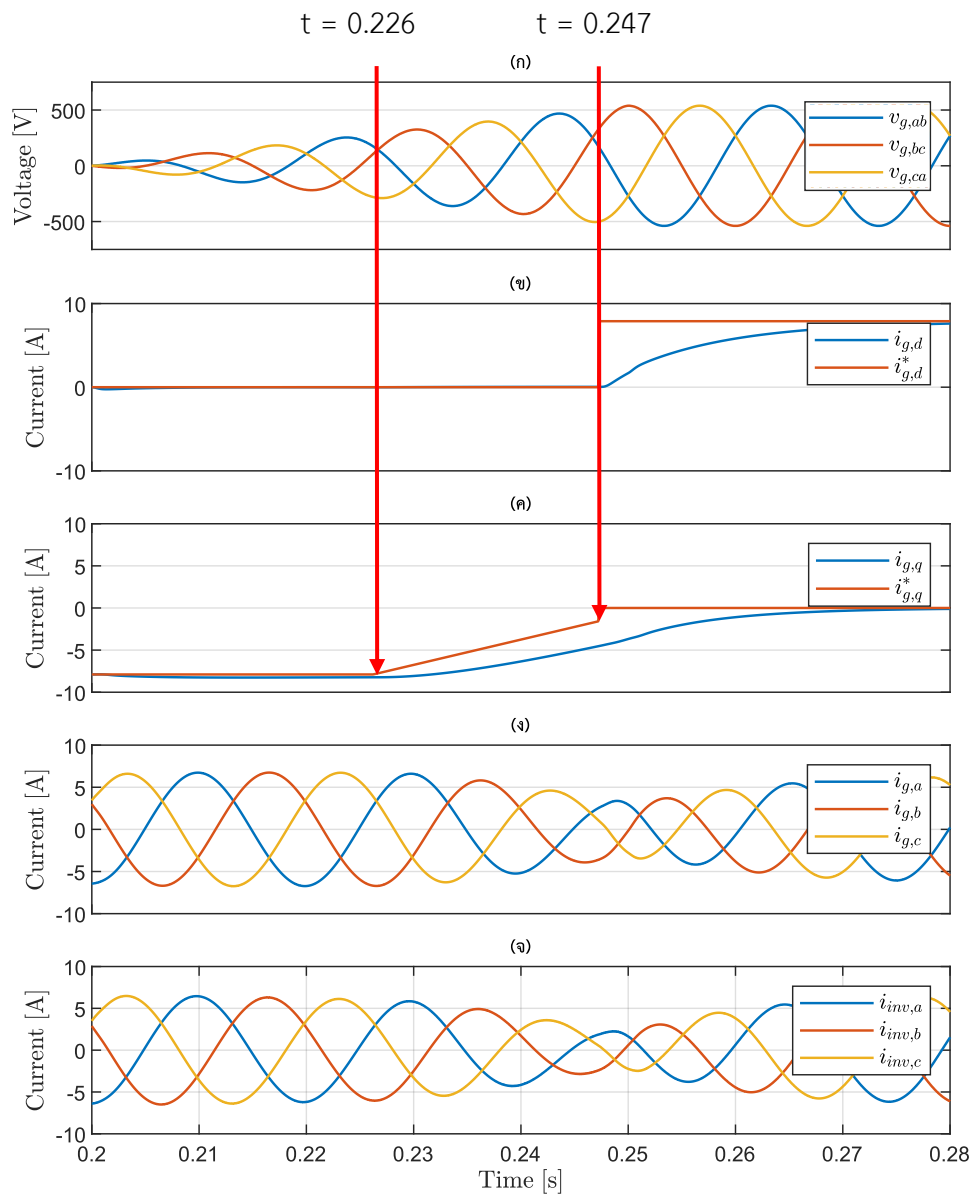
ทำการจำลองการจ่ายกระแสรีแอกทีฟเมื่อเกิดแรงดันตกแบบสามเฟสด้วยโปรแกรม matlab Simulink ได้ผลดังรูปที่ 43 ช่วงเวลา -0.2 ถึง 0 เมื่อแรงดันที่จุด PCC (ก) มีขนาดปกติ อินเวอร์เตอร์จ่ายกระแสกริดในแกน d ที่กระแสต้านออกของอินเวอร์เตอร์พิกัด  $i_{g,d} = 7.89 A$  ต่อมาเมื่อถึงช่วงเวลา 0 แรงดันที่จุด PCC ค่อยๆลดลง ด้วยความชันค่อยๆลดลงด้วยความชัน 1 p.u. ต่อ 50 ms ช่วงเวลา 0 ถึง 0.0027 วินาที ตามรูปที่ 44 แสดงภาพขยายของรูปที่ 43 แสดงให้เห็นว่าในช่วงที่แรงดันที่จุด PCC มากกว่า 0.9 p.u. อินเวอร์เตอร์จะยังคงจ่ายกระแสตามปกติอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งแรงดันที่จุด PCC น้อยกว่า 0.9 p.u. คำสั่งกระแสกริดในแกน d ลดลงเหลือ 0 และคำสั่งกระแสกริดในแกน q หรือกระแสรีแอกทีฟค่อยๆเพิ่มขึ้นตามคำสั่งกระแสที่กำหนดจนถึงเมื่อขนาดแรงดันที่จุด PCC ลดลงจนถึง 0.5 p.u. กระแสกริดในแกน q เท่ากับกระแสพิกัดและคงค่าที่พิกัดต่อไปเรื่อยๆจนแรงดันที่จุด PCC ลดลงจนเหลือ 0 p.u. และยังคงจ่ายต่อไปเรื่อยๆเป็นระยะเวลา 0.2 วินาที จากกราฟในรูปที่ 42 รูปขยายขณะที่แรงดันที่จุด PCC เพิ่มขึ้น กระแสรีแอกทีฟจะยังคงจ่ายด้วยค่ากระแสพิกัดไปจนกว่าแรงดันจะขึ้นถึง 0.5 p.u. ที่เวลา 0.226 วินาที แล้วกระแสรีแอกทีฟจึงจะค่อยๆลดลงตามอัตราส่วนการจ่ายกระแสต่อแรงดัน เมื่อแรงดันขึ้นถึง 0.9 p.u. ในวินาทีที่ 0.2247



รูปที่ 43 ผลการจำลองสภาวะแรงดันตกช่วงเวลา -0.2 ถึง 0.5



รูปที่ 44 ผลการจำลองสถานะแรงดันตกช่วงเวลา -0.02 ถึง 0.04



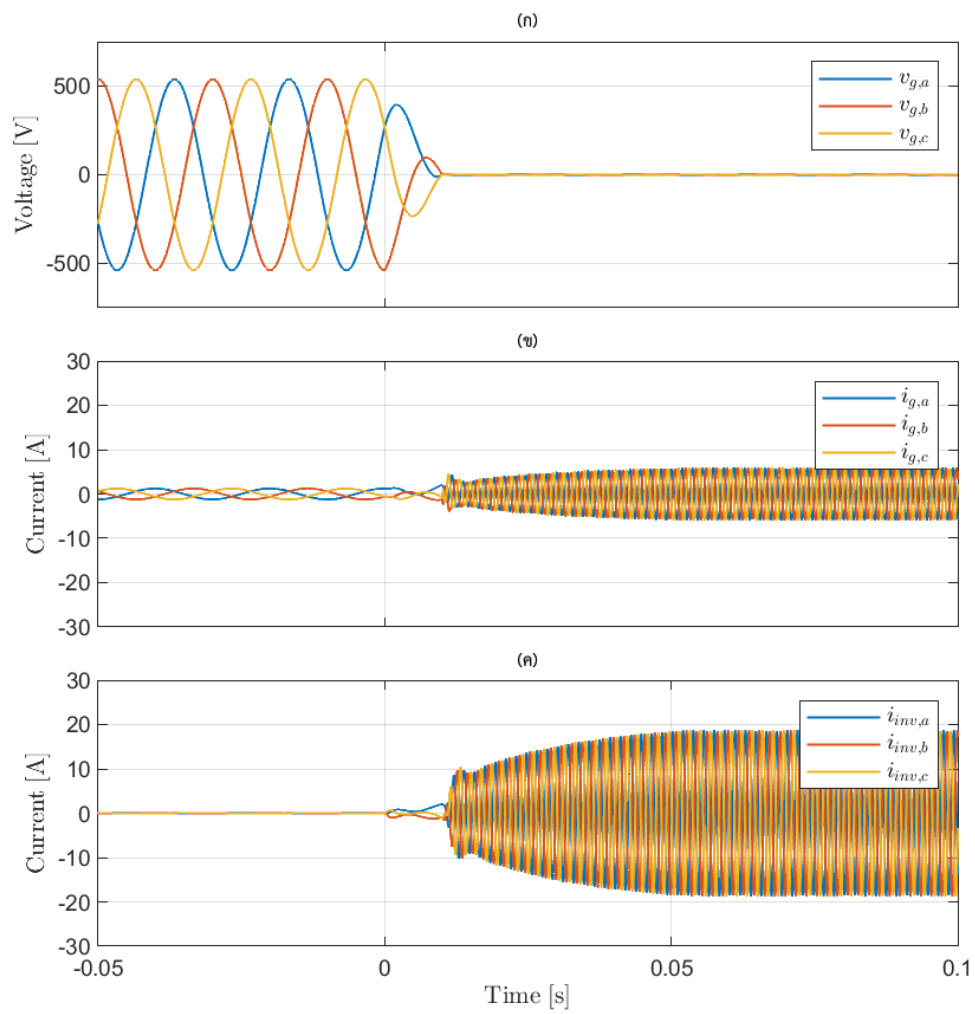
รูปที่ 45 ผลการจำลองสถานะแรงดันตกช่วงเวลา 0.2 ถึง 0.28

#### การจำลองการจ่ายกระแสความถี่สูงและกระแสรีแอกทีความถี่ต่ำเมื่อเกิดแรงดันตก

ในการจำลองการจ่ายกระแสความถี่สูงเมื่อเกิดแรงดันตก จะทำการสั่งกระแสความถี่สูงที่มีขนาดเท่ากับพิกัด และใช้ความถี่กระแสที่ 550Hz บริเวณใกล้กับความถี่เรโซแนนซ์เพื่อให้อัตราขยายมีขนาดตามสมการฟังก์ชันโอนย้าย จากรูปที่ 46 เมื่อแรงดันที่จุด PCC (ก.) ช่วงเวลา  $t = 0$  มีขนาดลดลง จนขนาดแรงดัน PCC เท่ากับ 0 อัลกอริทึมควบคุมถูกสลับไปใช้ลู่วควบคุมกระแสด้านออกของ

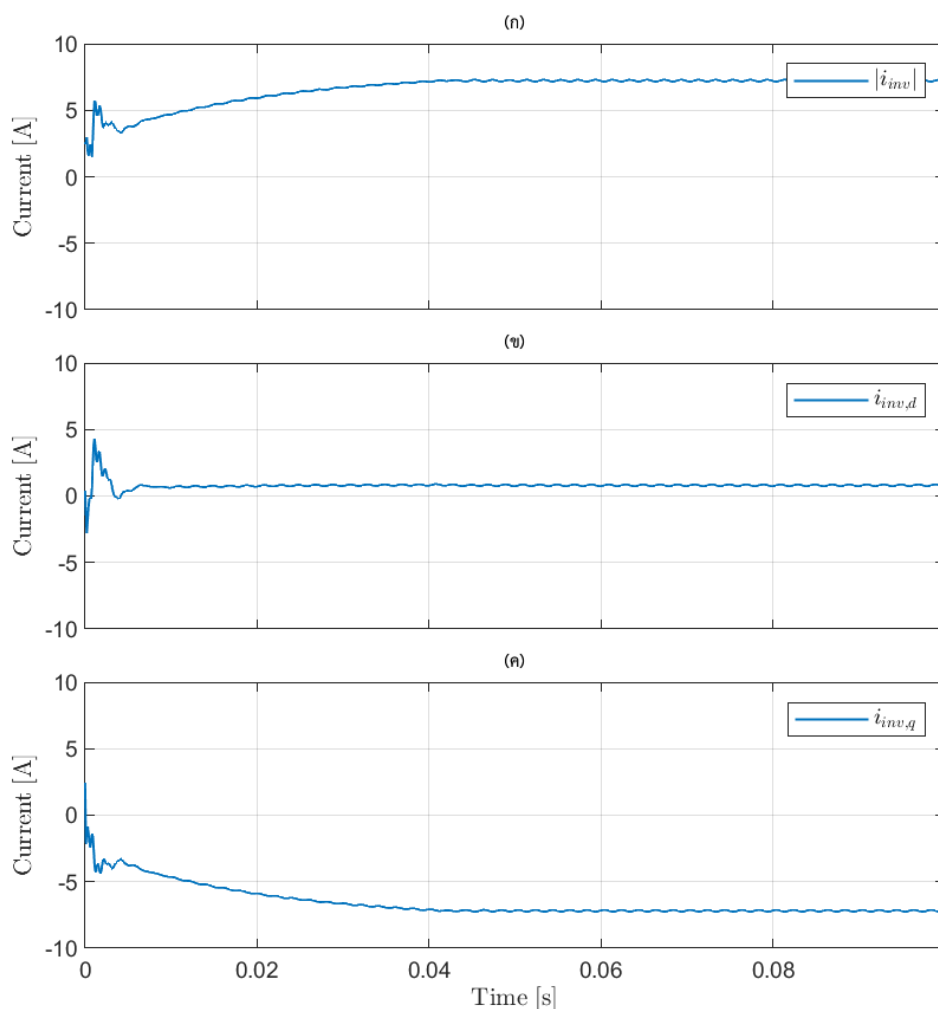
อินเวอร์เตอร์แบบความถี่สูง อินเวอร์เตอร์จ่ายกระแสความถี่สูงที่ขนาด และความถี่ตามคำสั่ง กระแส ด้านออกของอินเวอร์เตอร์เฟส a b และ c (ข) มีขนาดเพิ่มขึ้นจนเท่ากับขนาดคำสั่ง กระแสกริดเฟส a b และ c (ค) มีขนาดตามอัตราขยายในตามสมการฟังก์ชันโอนย้ายระหว่างกระแสกริดกับกระแสด้าน ออกของอินเวอร์เตอร์ รูปที่ 47 แสดงขนาดกระแสในแกนหมุนอ้างอิงที่สร้างจากมุมเฟสที่ความถี่ 550Hz จะเห็นได้ว่าขนาดของเวกเตอร์กระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์ (ก) สามารถควบคุมได้โดยมี ค่าคงตัวเวลาที่ 10 ms

จากการจำลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อควบคุมอินเวอร์เตอร์ด้วยการจ่ายกระแสความถี่สูงตาม แนวคิดที่ได้นำเสนอเบื้องต้น อินเวอร์เตอร์สามารถจ่ายกระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงได้ และกระแสกริดได้มีขนาดเพิ่มขึ้นตามอัตราขยายได้จริงโดยที่ขนาดของกระแสด้านออกของ อินเวอร์เตอร์ยังคงถูกควบคุมอยู่ภายใต้ค่าพิกัด และแรงดันอินเวอร์เตอร์มีขนาดไม่เกินแรงดันบัส กระแสตรงที่นำมาต่อเข้ากับระบบ ทำให้อินเวอร์เตอร์ไม่ปลดตัวเองออกจากระบบโครงข่ายใน ช่วงเวลาที่เกิดแรงดันตก รูปที่ 47 แสดงให้เห็นว่าขนาดของกระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ( $|I_{inv}|$ ) ปรับเพิ่มขึ้นเมื่อเกิดแรงดันตกและมีค่าใกล้เคียงกับขนาดของกระแสในแกน q ส่วนกระแสในแกน d นั้นมีค่าประมาณ 0 สอดคล้องกับที่อธิบายไว้ในบทที่ 4 ว่าองค์ประกอบของแรงดันและกระแสที่ ความถี่ 550 Hz นั้นจะเป็นปริมาณในแกน q เท่านั้นเนื่องจากอิมพีแดนซ์ในระบบจะประกอบด้วยตัว เหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเป็นหลักทำให้กระแสจะมีทิศทางตั้งฉากกับแรงดันที่อินเวอร์เตอร์สร้าง



รูปที่ 46 ผลการจำลองการจ่ายกระแสความถี่สูงในสภาวะแรงดันตก





รูปที่ 47 ผลการจำลองวงรอบควบคุมการจ่ายกระแสความถี่สูงในสภาวะแรงดันตก

### การจำลองการจ่ายกระแสความถี่สูงเมื่อเกิดแรงดันตก

การจำลองการจ่ายกระแสความถี่ปกติและกระแสความถี่สูง ที่แรงดันโครงข่ายค่าต่างๆ เช่น 0.8, 0.5, 0.2 และ 0 p.u. โดยในส่วนนี้จะกำหนดการจ่ายเป็นจ่ายกระแสความถี่ต่ำที่กระแสพิคกิ้งไปจนถึงขนาดแรงดันกริดที่ 0 p.u. และเพิ่มกระแสความถี่ต่ำเข้าไปในช่วงพิคกิ้งที่เหลือ

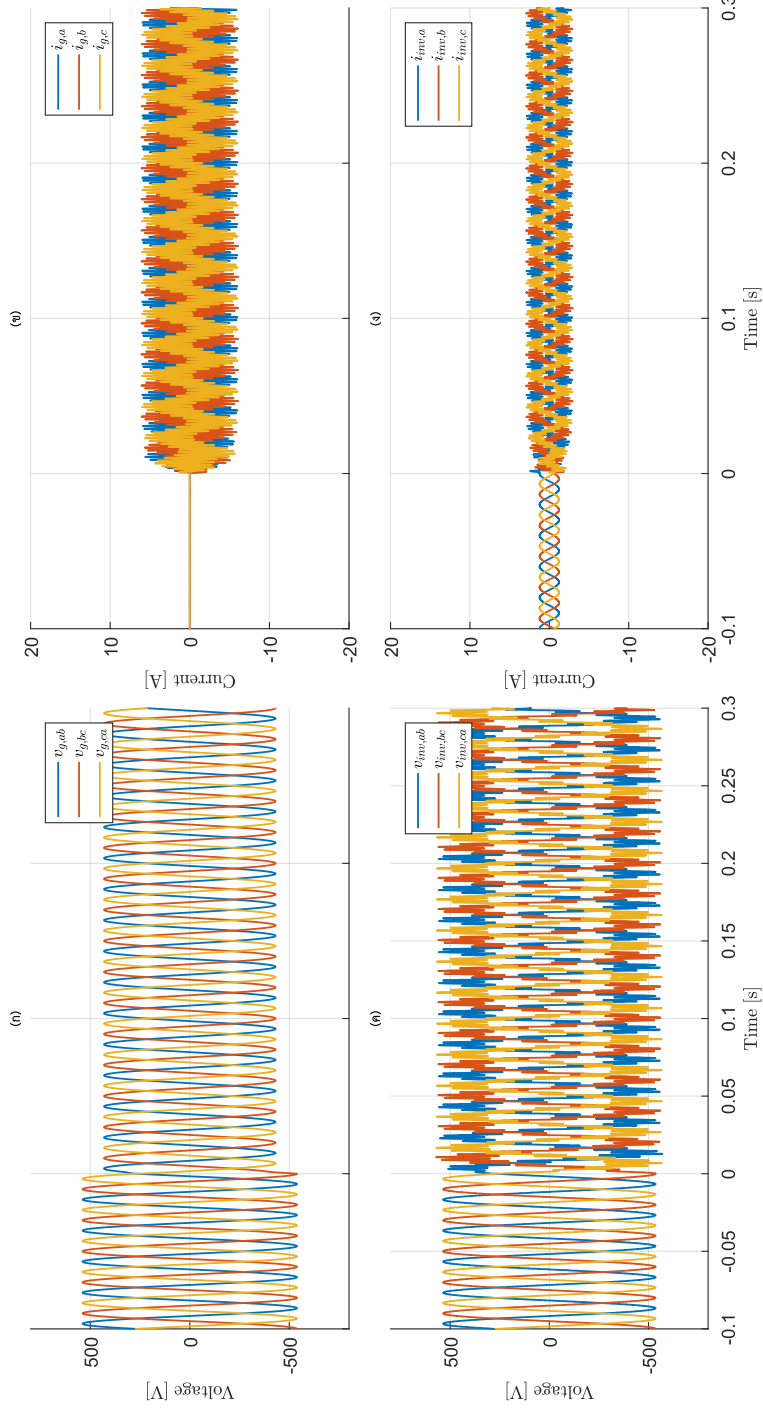
(ก), (ข), (ค) และ (ง) แทนรูปคลื่นสามเฟส แรงดันสายของแรงดันกริด ( $v_{g,ab}$ ,  $v_{g,bc}$  และ  $v_{g,ca}$ ) กระแสกริด ( $i_{g,a}$ ,  $i_{g,b}$  และ  $i_{g,c}$ ) แรงดันอินเวอร์เตอร์ ( $v_{inv,ab}$ ,  $v_{inv,bc}$  และ  $v_{inv,ca}$ ) กระแสกริด ( $i_{inv,a}$ ,  $i_{inv,b}$  และ  $i_{inv,c}$ ) จะเห็นได้ว่าอินเวอร์เตอร์สามารถจ่ายกระแสภายใต้ข้อจำกัดต่างๆ ได้ตั้ง Error! Reference source not found., รูปที่ 49, รูปที่ 50 และ รูปที่ 51 จะเห็นได้ว่าที่แรงดันตกค่าต่างๆ จะมีผลลัพธ์ที่แตกต่างกันออกไปตามข้อจำกัดการทำงาน

ในรูปที่ 48 แรงดันตกที่ 0.8 p.u. จะจ่ายกระแสความถี่ต่ำตามข้อกำหนดของผู้ให้บริการ โคร่งข่ายที่  $i_d^* = 1.5A$  ดังนั้นขนาดกระแสความถี่สูงด้านออกของอินเวอร์เตอร์ที่สามารถจ่ายได้เท่ากับ 7.83A แต่เนื่องจากขนาดแรงดันกริดหากยังมีค่ามาก จะทำให้แรงดันอินเวอร์เตอร์ที่จ่ายต้องมีค่ามากตามไปด้วย ทำให้ที่แรงดันระดับนี้จะไม่สามารถจ่ายกระแสที่สูงมากเนื่องจากติดพิกัดแรงดันจึงสามารถจ่ายกระแสความถี่สูงได้ที่ 1.3A

ในรูปที่ 49 แรงดันตกที่ 0.5 p.u. จะจ่ายกระแสความถี่ต่ำตามข้อกำหนดของผู้ให้บริการ โคร่งข่ายที่ หรือที่กระแสพิกัดของอินเวอร์เตอร์ 7.5A ดังนั้นที่กระแสอินเวอร์เตอร์จะเหลือพิกัดที่สามารถจ่ายกระแสได้อีก 1.5A แต่เนื่องพิกัดแรงดันของอินเวอร์เตอร์ ทำให้ไม่สามารถจ่ายกระแสได้เต็มพิกัดเนื่องจากการเพิ่มกระแสเข้าไปจะต้องเพิ่มขนาดแรงดันอินเวอร์เตอร์ด้วยจึงทำให้สามารถจ่ายกระแสเพิ่มได้ขึ้นอยู่กับแรงดันที่เหลืออยู่

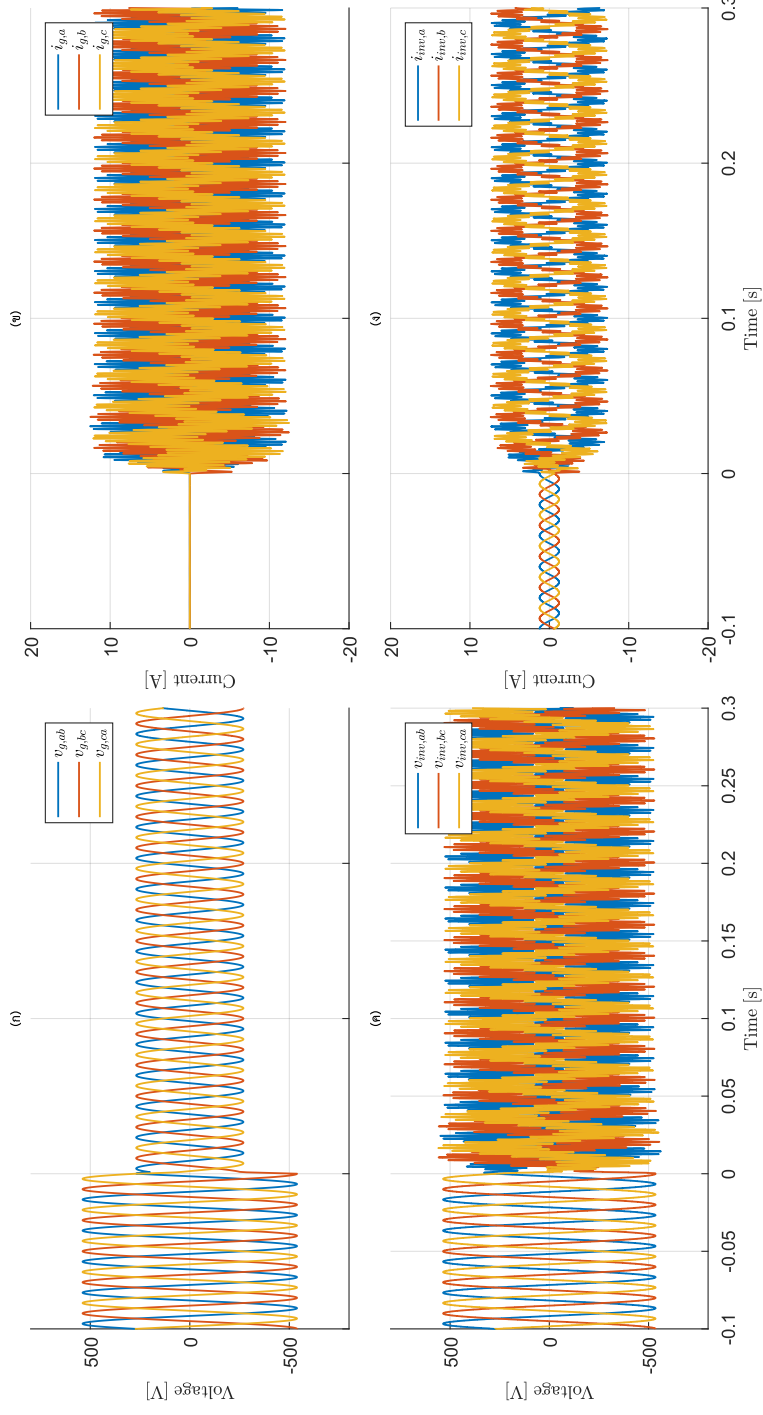
ในรูปที่ 50 แรงดันตกที่ 0.2 p.u. จะจ่ายกระแสความถี่ต่ำตามข้อกำหนดของผู้ให้บริการ โคร่งข่ายที่ หรือที่กระแสพิกัดของอินเวอร์เตอร์ 7.5A ดังนั้นที่กระแสอินเวอร์เตอร์จะเหลือพิกัดที่สามารถจ่ายกระแสได้อีก 1.5A เนื่องจากแรงดันกริดมีขนาดน้อยลง ทำให้แรงดันที่อินเวอร์เตอร์ต้องจ่ายมีขนาดน้อยลงไปด้วย ทำให้สามารถจ่ายกระแสได้ตามกระแสคำสั่งโดยไม่ติดข้อจำกัดของแรงดันด้านออก

ในรูปที่ 51 แรงดันตกที่ 0.2 p.u. จะจ่ายกระแสความถี่ต่ำตามข้อกำหนดของผู้ให้บริการ โคร่งข่ายที่ หรือที่กระแสพิกัดของอินเวอร์เตอร์ 7.5A ดังนั้นที่กระแสอินเวอร์เตอร์จะเหลือพิกัดที่สามารถจ่ายกระแสได้อีก 1.5A เนื่องจากแรงดันกริดมีขนาดน้อยมาก ทำให้แรงดันที่อินเวอร์เตอร์ต้องจ่ายมีขนาดน้อยลงไปด้วย ทำให้สามารถจ่ายกระแสได้ตามกระแสคำสั่งโดยไม่ติดข้อจำกัดของแรงดันด้านออก

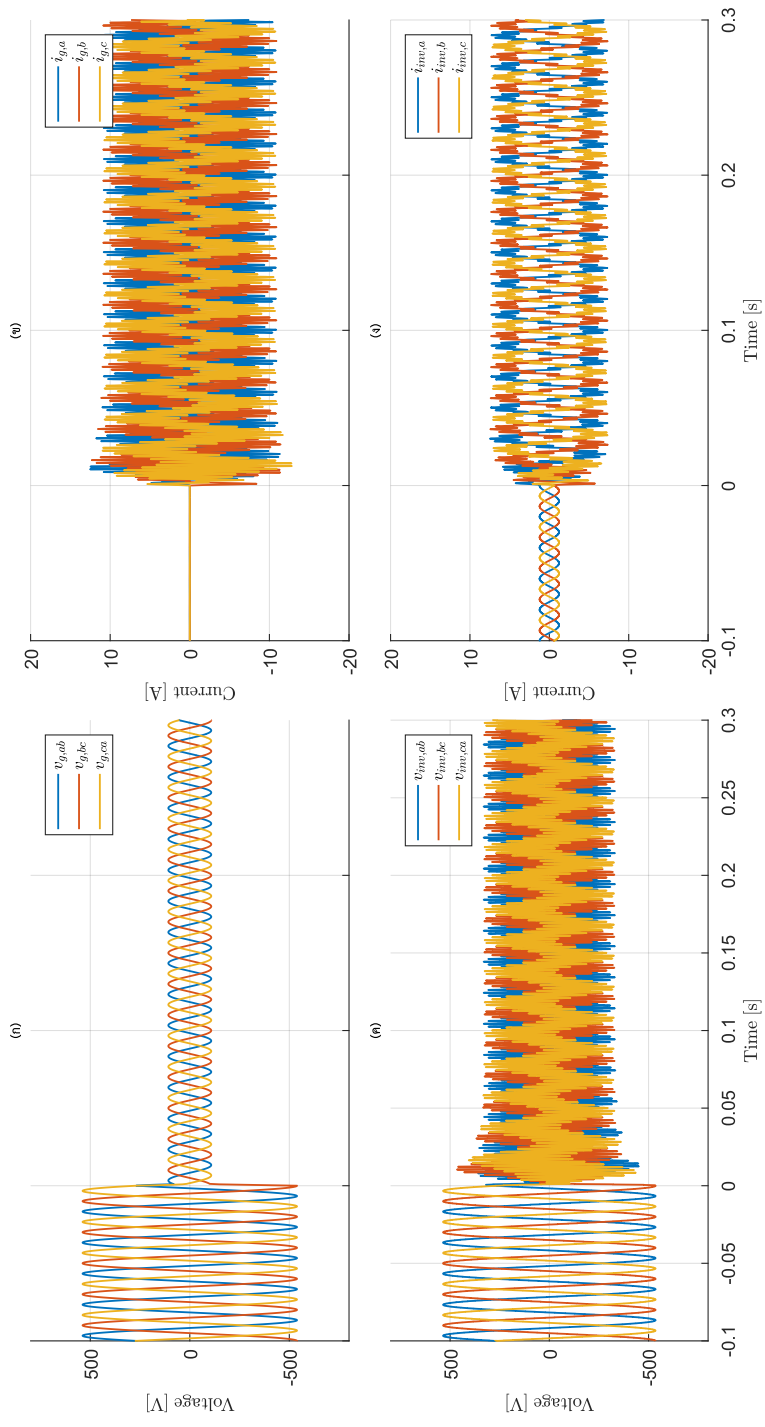


รูปที่ 48 ผลการจำลองระบบเมื่อแรงดันกริดลดลงเหลือ 0.8 p.u.

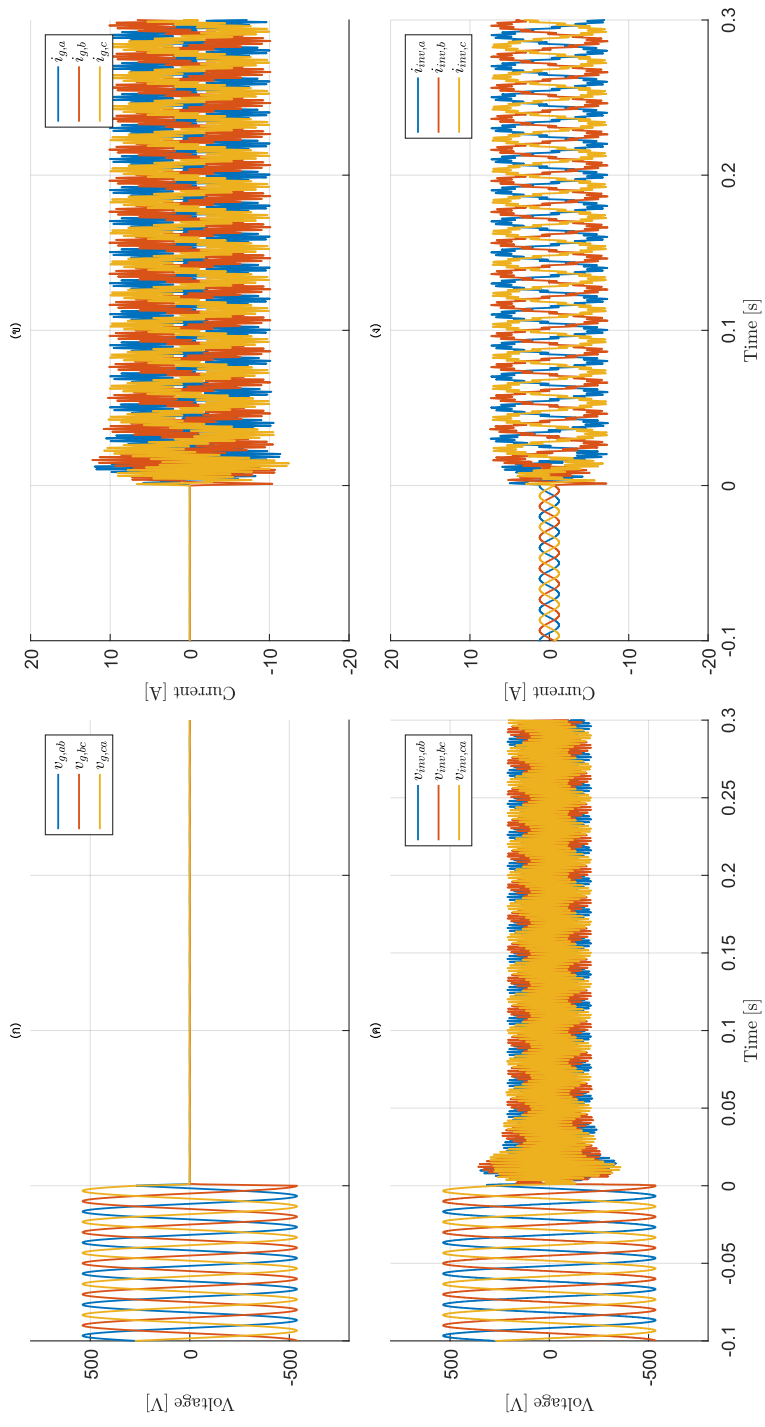
(ก) แรงดันกริด ( $v_g$ ). (ข) กระแสกริด ( $i_g$ ). (ค) แรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ( $v_{inv}$ ) และ (ง) กระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ( $i_{inv}$ )



รูปที่ 49 ผลการจำลองระบบเมื่อแรงดันกริดลดลงเหลือ 0.5 p.u.  
 (ก) แรงดันกริด ( $v_g$ ). (ข) กระแสกริด ( $i_g$ ). (ค) แรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ( $v_{inv}$ ) และ (ง) กระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ( $i_{inv}$ )

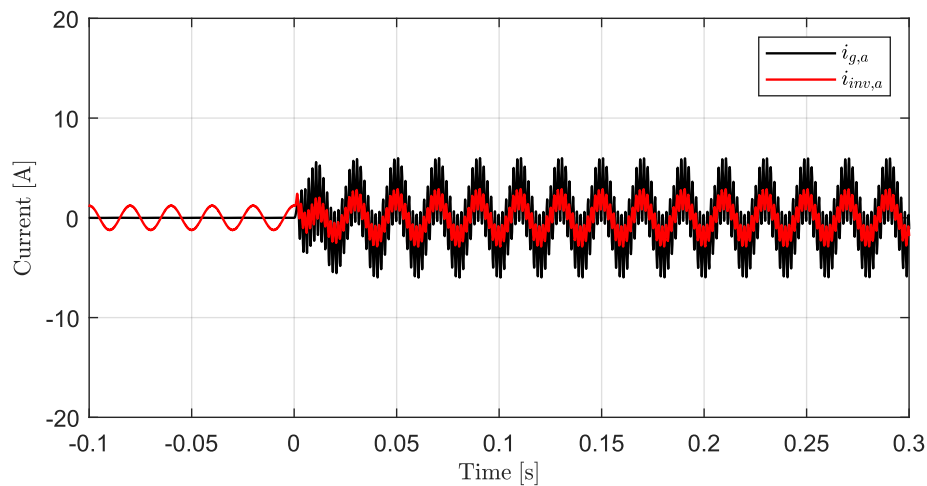


รูปที่ 50 ผลการจำลองระบบเมื่อแรงดันกริดลดลงเหลือ 0.2 p.u.  
 (ก) แรงดันกริด ( $v_g$ ). (ข) กระแสกริด ( $i_g$ ). (ค) แรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ( $v_{inv}$ ) และ (ง) กระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ( $i_{inv}$ )



รูปที่ 51 ผลการจำลองระบบเมื่อแรงดันกริดลดลงเหลือ 0 p.u.  
 (ก) แรงดันกริด ( $v_g$ ). (ข) แรงดันกริด ( $v_m$ ). (ค) กระแสกริด ( $i_g$ ). (ด) กระแสกริด ( $i_m$ )

จากรูปที่ 52, รูปที่ 53, รูปที่ 54 และ รูปที่ 55 ขนาดของกระแสอินเวอร์เตอร์และกระแสกริดมีขนาดต่างกันไปขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันตก และการจ่ายกระแสรีแอคทีฟของข้อกำหนดของระบบโครงข่าย โดยที่จุดที่ทำให้จ่ายกระแสอินเวอร์เตอร์และกระแสกริดมีขนาดเพิ่มมากขึ้นคือช่วง ระหว่างแรงดันกริดที่ 0.5 และ 0.2 p.u. เนื่องจากมีพิกัดแรงดันและกระแสที่เพียงพอ ค่ายอดของขนาดกระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์มีขนาดสูงสุดไม่เกิน 1.2 เท่าของขนาดกระแสพิกัด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 7.34A โดยมีค่าขนาดของกระแส True rms (Root mean square) และค่ายอดของกระแส ของช่วงที่ยกตัวอย่างแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 52 ขนาดกระแสอินเวอร์เตอร์และกระแสกริดเฟส a ในช่วงแรงดันตกที่ 0.8 p.u.

$$\text{เมื่อ } v_{g,a} = 0.8 \text{ p.u.}$$

$$i_{g,a} = 3.005 \text{ Arms}$$

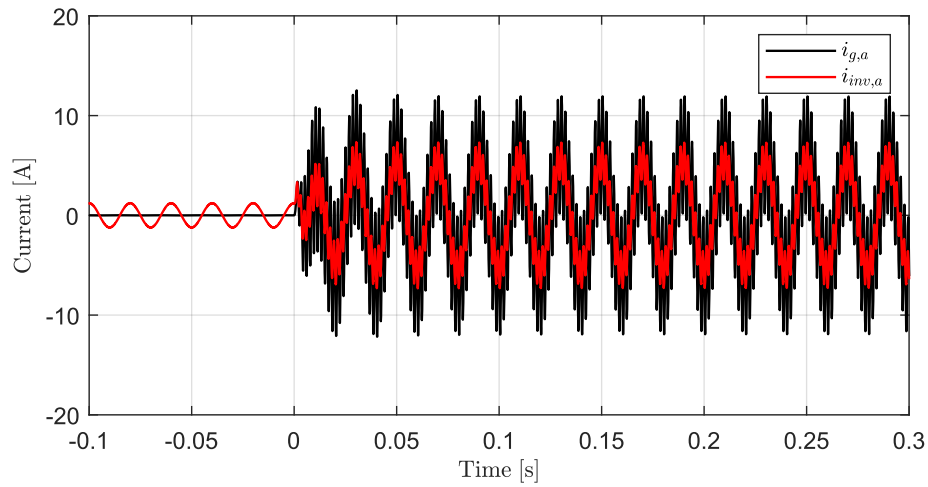
$$i_{inv,a} = 1.510 \text{ Arms}$$

$$i_{g,a}(\text{peak}) = 5.987 \text{ A}$$

$$i_{inv,a}(\text{peak}) = 2.889 \text{ A}$$

จำนวนเท่าของขนาดกระแสกริด rms เมื่อเทียบกับขนาดกระแสพิกัด rms ของอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 0.69 เท่า

จำนวนเท่าของขนาดค่ายอดกระแสกริดเมื่อเทียบกับขนาดค่ายอดของกระแสพิกัดของอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 0.978 เท่า



รูปที่ 53 ขนาดกระแสอินเวอร์เตอร์และกระแสกริดเฟส  $a$  ในช่วงแรงดันตกที่  $0.5 p.u.$

เมื่อ  $v_{g,a} = 0.5 p.u.$

$i_{g,a} = 6.017 Arms$

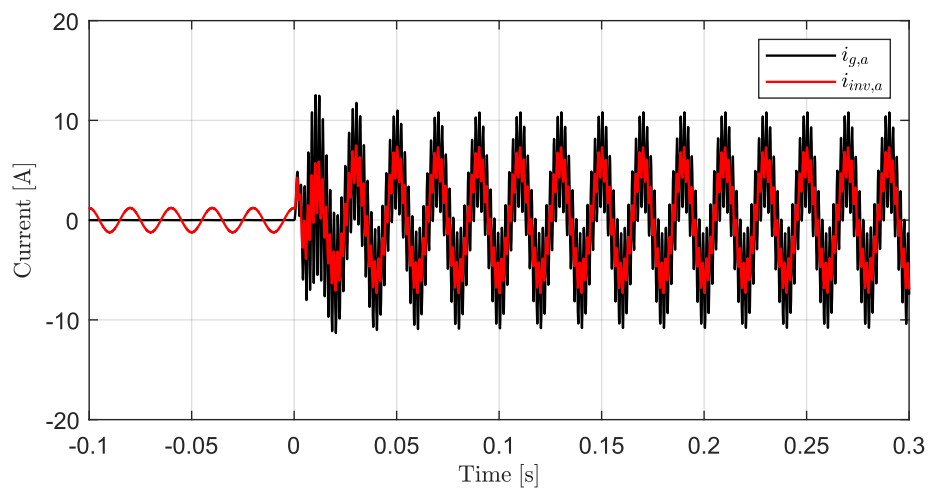
$i_{inv,a} = 4.080 Arms$

$i_{g,a}(peak) = 11.933 A$

$i_{inv,a}(peak) = 7.295 A$

จำนวนเท่าของขนาดกระแสกริด rms เมื่อเทียบกับขนาดกระแสพิกัด rms ของอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 1.38 เท่า

จำนวนเท่าของขนาดค่ายอดกระแสกริดเมื่อเทียบกับขนาดค่ายอดของกระแสพิกัดของอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 1.78 เท่า



รูปที่ 54 ขนาดกระแสอินเวอร์เตอร์และกระแสกริดเฟส  $a$  ในช่วงแรงดันตกที่  $0.2 p.u.$

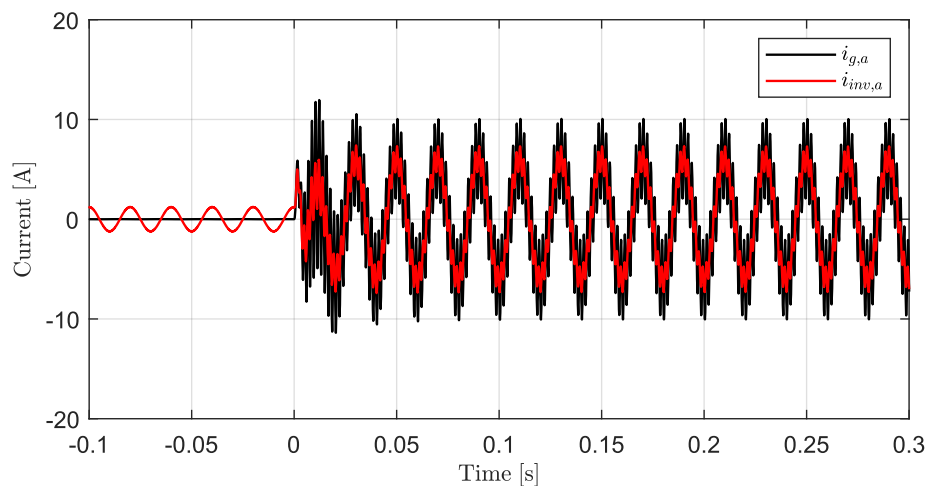
เมื่อ  $v_{g,a} = 0.2 p.u.$



$$\begin{aligned}
 i_{g,a} &= 5.486 \text{ Arms} \\
 i_{inv,a} &= 4.259 \text{ Arms} \\
 i_{g,a}(peak) &= 10.059 \text{ A} \\
 i_{inv,a}(peak) &= 7.310 \text{ A}
 \end{aligned}$$

จำนวนเท่าของขนาดกระแสกริด rms เมื่อเทียบกับขนาดกระแสพิกัด rms ของอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 1.26 เท่า

จำนวนเท่าของขนาดค่ายอดกระแสกริดเมื่อเทียบกับขนาดค่ายอดของกระแสพิกัดของอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 1.76 เท่า



รูปที่ 55 ขนาดกระแสอินเวอร์เตอร์และกระแสกริดเฟส  $a$  ในช่วงแรงดันตกที่ 0.0 p.u.

$$\text{เมื่อ } v_{g,a} = 0 \text{ p.u.}$$

$$i_{g,a} = 5.173 \text{ Arms}$$

$$i_{inv,a} = 4.390 \text{ Arms}$$

$$i_{g,a}(peak) = 10.059 \text{ A}$$

$$i_{inv,a}(peak) = 7.310 \text{ A}$$

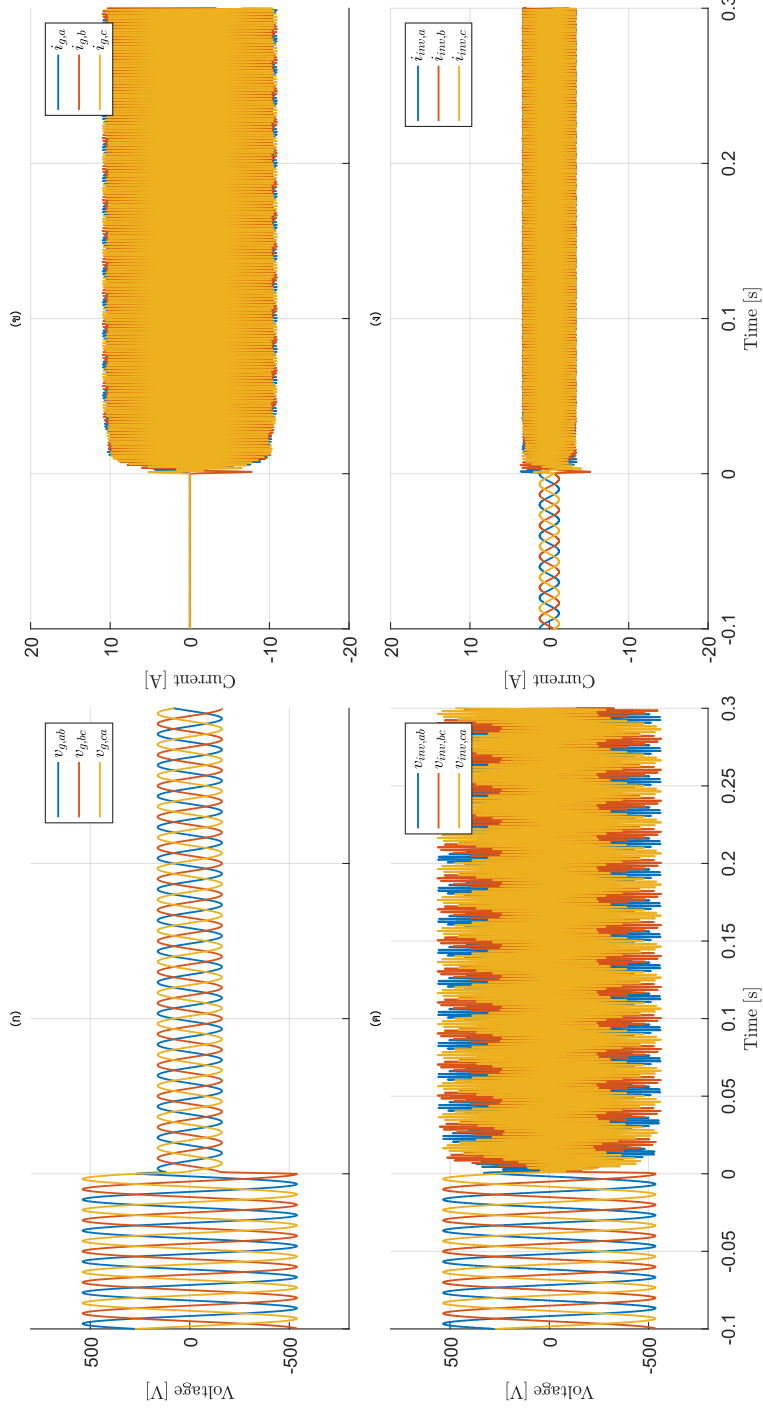
จำนวนเท่าของขนาดกระแสกริด rms เมื่อเทียบกับขนาดกระแสพิกัด rms ของอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 1.19 เท่า

จำนวนเท่าของขนาดค่ายอดกระแสกริดเมื่อเทียบกับขนาดค่ายอดของกระแสพิกัดของอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 1.64 เท่า

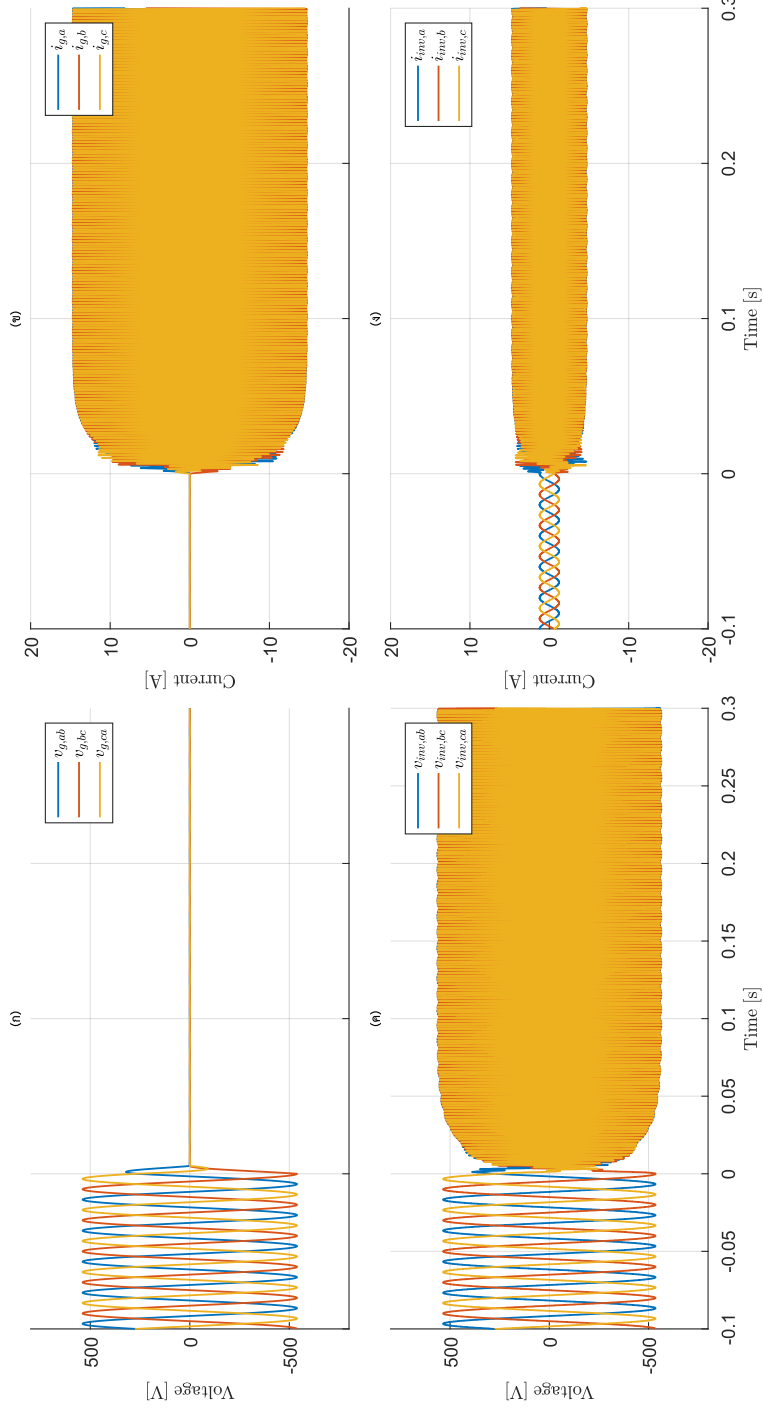
ต่อมาทำการทดสอบการจ่ายกระแสในช่วงแรงดันตก 0.3 p.u. และ 0 p.u. แบบจ่ายเฉพาะกระแสความถี่สูง ได้ผลดัง รูปที่ 56 และ รูปที่ 58 จะเห็นได้ว่าหากลดการจ่ายกระแสความถี่ต่ำลงเหลือ 0 A และจ่ายเฉพาะกระแสความถี่สูง อินเวอร์เตอร์จึงจ่ายกระแสความถี่สูงได้จำกัดอยู่ภายใต้ข้อจำกัดแรงดัน อย่างไรก็ตามขนาดของกระแสกริดมีขนาดมากขึ้นเนื่องจากสัดส่วนกระแสความถี่สูงที่

จ่ายมีขนาดมากขึ้น ขนาดของกระแส rms (Root mean square) และค่ายอดของกระแส ของช่วงที่ ยกตัวอย่างแสดงได้ดังนี้

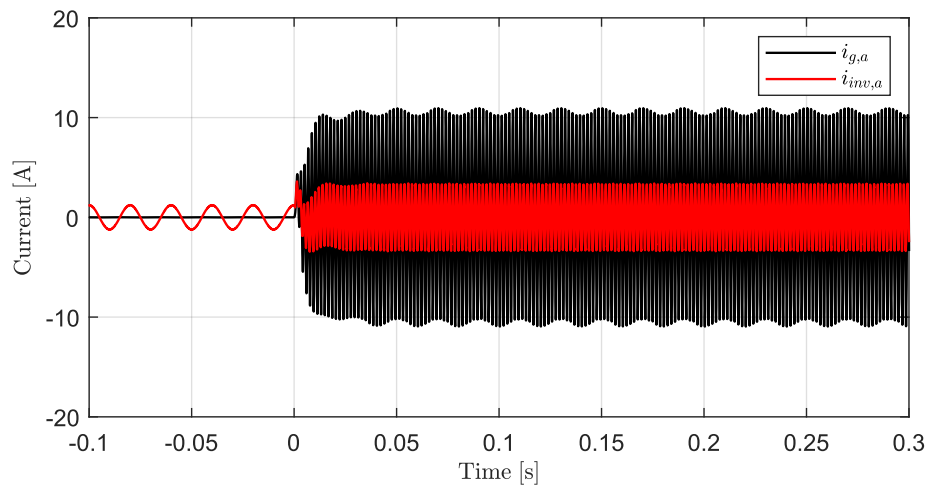




รูปที่ 56 ผลการจำลองระบบเมื่อแรงดันกริดลดลงเหลือ 0.0 p.u. (จ่ายเฉพาะกระแสและความถี่สูง)  
 (ก) แรงดันกริด ( $v_g$ ). (ข) กระแสกริด ( $i_g$ ). (ค) แรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ( $v_{mv}$ ) และ (ง) กระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ( $i_{mv}$ )



รูปที่ 57 ผลการจำลองระบบเมื่อแรงดันกริดลดลงเหลือ 0.0 p.u. (จ่ายเฉพาะกระแสความถี่สูง)  
 (ก) แรงดันกริด ( $v_g$ ) , (ข) กระแสกริด ( $i_g$ ) , (ค) แรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ( $v_{mv}$ ) และ (ง) กระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ( $i_{mv}$ )



รูปที่ 58 ขนาดกระแสอินเวอร์เตอร์และกระแสกริดเฟส  $a$  ในช่วงแรงดันตกที่  $0.3$  p.u. (จ่ายเฉพาะกระแสความถี่สูง)

เมื่อ  $v_{g,a} = 0$  p.u.

$i_{g,a} = 7.468$  Arms

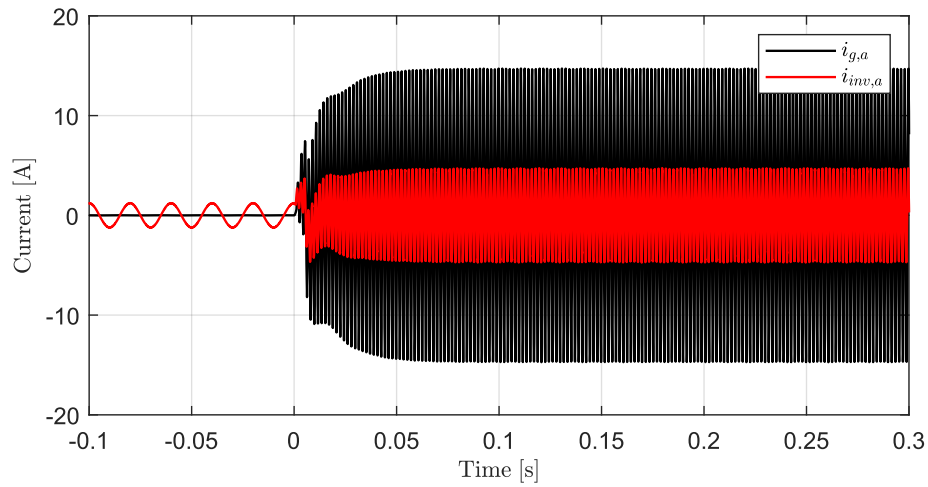
$i_{inv,a} = 2.291$  Arms

$i_{g,a}(peak) = 10.957$  A

$i_{inv,a}(peak) = 3.399$  A

จำนวนเท่าของขนาดกระแสกริด rms เมื่อเทียบกับขนาดกระแสพิกัด rms ของอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 1.72 เท่า

จำนวนเท่าของขนาดค่ายอดกระแสกริดเมื่อเทียบกับขนาดค่ายอดของกระแสพิกัดของอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 1.78 เท่า



รูปที่ 59 ขนาดกระแสอินเวอร์เตอร์และกระแสกริดเฟส  $a$  ในช่วงแรงดันตกที่  $0.0$  p.u. (จ่ายเฉพาะกระแสความถี่สูง)

เมื่อ  $v_{g,a} = 0$  p.u.

$$i_{g,a} = 10.384 \text{ Arms}$$

$$i_{inv,a} = 3.187 \text{ Arms}$$

$$i_{g,a}(\text{peak}) = 14.732 \text{ A}$$

$$i_{inv,a}(\text{peak}) = 4.739 \text{ A}$$

จำนวนเท่าของขนาดกระแสกริด rms เมื่อเทียบกับขนาดกระแสพิกัด rms ของอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 2.40 เท่า

จำนวนเท่าของขนาดค่ายอดกระแสกริดเมื่อเทียบกับขนาดค่ายอดของกระแสพิกัดของอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 2.40 เท่า

## บทที่ 6

### ระบบอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

ในการทดสอบอัลกอริทึมในระบบจริง ระบบที่ใช้ในการทดลองเป็นระบบอินเวอร์เตอร์ของห้องแล็บวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อินเวอร์เตอร์ที่ใช้เป็นอินเวอร์เตอร์ชนิดสามระดับแบบ Neutral-Point-Clamped (NPC) โดยมีพารามิเตอร์ของระบบดังตารางที่ 4 ในส่วนนี้จะให้ข้อมูลส่วนประกอบคร่าวๆของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดลองและอธิบายเกี่ยวกับการพัฒนาระบบซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการควบคุมโดยมีรายการดังนี้

1. โครงสร้างของระบบอินเวอร์เตอร์
2. ระบบตรวจวัดและมอนิเตอร์
3. ซอฟต์แวร์และคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในการควบคุม

#### โครงสร้างของระบบอินเวอร์เตอร์

โครงสร้างของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดลองประกอบไปด้วย

1. แหล่งกำเนิดแรงดันกระแสตรง 600 – 900 VDC

แหล่งกำเนิดแรงดันกระแสตรงโดยทั่วไปของระบบอินเวอร์เตอร์มักจะเป็นแรงดันจากเซลล์แสงอาทิตย์ แต่ระบบที่ใช้ในระบบอินเวอร์เตอร์ในวิทยานิพนธ์จะใช้วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ต่อเข้ากับแหล่งแรงดันกระแสสลับแบบปรับค่าได้เพื่อสร้างแหล่งแรงดันกระแสตรงเป็นแรงดันด้านเข้าให้กับอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับ จึงถือว่าแรงดันบัสกระแสตรงสำหรับวิทยานิพนธ์นี้เป็นแหล่งแรงดันกระแสตรงที่มีขนาดคงที่

2. อินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ขนาดพิกัด 3kVA พิกัดแรงดัน 400Vrms 4.55 Arms แรงดันด้านเข้าต่อบัสกับกระแสตรง ส่วนแรงดันด้านออกต่อบววงจรกรอง LCL ด้านเข้า ส่วนสวิทช์กำลังประกอบด้วยสวิทช์ IGBT 12 ตัวดังรูปที่ 12 และวงจรขั้วนำสวิทช์ที่รับแรงดันพัลส์คำสั่งจากไมโครคอนโทรลเลอร์ และมีวงจรสำหรับตรวจจับเมื่อเกิดความผิดปกติในวงจร เพื่อป้องกันกระแสสูงที่อาจสร้างความเสียหายกับสวิทช์ เมื่อตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นแล้วจะสร้างสัญญาณสถานะการเกิดความผิดปกติเพื่อส่งกลับไปทีระบบควบคุมเพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการปฏิบัติการเมื่อมีความผิดปกติในระบบ

3. ส่วนแรงดันกริด (PCC)

แหล่งแรงดันกระแสสลับแบบปรับค่าได้ตั้งแต่ 0 ถึง 400 Vrms ความถี่ 50Hz ต่อเข้ากับตัวกรอง LCL ด้านออก ใช้จำลองเป็นแรงดันระบบไฟฟ้า

## ระบบตรวจวัดและมอนิเตอร์

ระบบตรวจวัดใช้สำหรับวัดค่าแรงดันและกระแสในวงจรและสร้างแรงดันที่มีขนาดสูงให้มีขนาดลดลงเพื่อใช้เป็นแรงดันด้านเข้าให้กับวงจรแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (ADC) และส่งไปที่คอนโทรลเลอร์เพื่อใช้ในการประมวลผลควบคุม โดยวงจรตรวจจับแรงดันจะตรวจจับแรงดันระหว่างเฟส ab และ bc และ วงจรตรวจจับกระแสจะตรวจจับกระแสเฟส a และเฟส b เนื่องจากระบบนี้เป็นแบบสามเฟสสามสาย สัญญาณเฟสอีกหนึ่งเฟส จึงสามารถคำนวณได้จากสัญญาณ 2 เฟสที่ตรวจวัด โดยวงจรตรวจวัดที่ใช้ในระบบมีดังนี้

### 1. วงจรตรวจวัดกระแส

- วงจรตรวจวัดกระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์ เฟส a และ b
- วงจรตรวจวัดกระแสกริด เฟส a และ b
- วงจรตรวจวัดกระแสกริด เฟส a และ b

### 2. วงจรตรวจวัดแรงดัน

- วงจรตรวจวัดแรงดันที่จุด PCC เฟส ab และ bc
- วงจรตรวจวัดแรงดันที่ตัวเก็บประจุของวงจรกรอง เฟส ab และ bc
- วงจรตรวจวัดแรงดันที่ตัวเก็บประจุแหล่งแรงดันกระแสตรงบัสบวกและบัสลบ

นอกจากนี้ยังมีบอร์ดตัวแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อก เพื่อแสดงค่าสัญญาณที่ประมวลผลบนไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อใช้ในการมอนิเตอร์สัญญาณจำนวน 8 ช่อง

## ซอฟต์แวร์และคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในการควบคุม

### 1. ไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในการควบคุมอินเวอร์เตอร์นี้ คือ Texas Instruments TMS320F28379D Dual-Core Microcontrollers เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ 32 bit ที่พัฒนาสำหรับการควบคุมระบบการจ้างงานการตรวจจับและประมวลผลสัญญาณในระบบไดรฟ์มอเตอร์ในอุตสาหกรรม, อินเวอร์เตอร์พลังงานแสงอาทิตย์, ยานพาหนะไฟฟ้าและการขนส่ง ไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่นนี้จะมีส่วนสนับสนุนสำหรับการสร้างโมเดลจำลองบนซอฟต์แวร์จำลองที่จะกล่าวถึงต่อไป

### 2. ซอฟต์แวร์

ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการควบคุมระบบคือ Matlab ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองระบบ โดยต่างจากระบบควบคุมแบบก่อนทั่วไปที่ใช้จะใช้ภาษา C แต่ปัจจุบันผู้ผลิตไมโครคอนโทรลเลอร์ได้สร้างโมเดลของอุปกรณ์รอบข้าง (peripheral) ของไมโครคอนโทรลเลอร์ เช่น ตัวแปลงผันแอนะล็อกเป็นดิจิทัล, ตัวแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อก และตัวสร้างสัญญาณพัลส์วิดธ์เอ็ม (PWM)



อยู่ในรูปของบล็อกไดอะแกรม เพื่อให้สามารถที่จะจำลองอุปกรณ์รอบข้างของไมโครคอนโทรลเลอร์ไปพร้อมกับระบบควบคุมที่สร้างแบบบล็อกไดอะแกรมบนโปรแกรม Matlab ได้ และสามารถแปลโปรแกรมแบบจำลองที่สร้างเป็นภาษา C เข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์และทำงานบนระบบจริงได้ จึงได้นำระบบนี้มาใช้ในการสร้างซอฟต์แวร์สำหรับทดสอบแนวคิดของวิทยานิพนธ์นี้

ส่วนประกอบของระบบซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการทดสอบประกอบไปด้วย

- โปรแกรมหลัก

การควบคุมของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่สวิตช์ 10kHz จะมีการสุ่มตัวอย่างทุกๆ คาบของการสวิตช์เท่ากับ  $100\mu\text{s}$  ส่วนนี้จึงเป็น Interrupt Service Routine ที่ทำงานเพื่อประมวลผลและส่งออกค่าทุกๆ  $100\mu\text{s}$  โดยเริ่มต้นด้วยการรับค่าอินพุตที่จากตัวแปลงผันแอนะล็อกเป็นดิจิทัลที่แปลงค่าจากวงจรตรวจวัดโดยใช้การส่งแบบขนาน (Parallel bit) และคำสั่งเช่นคำสั่งกระแสผู้ใช้จากโปรแกรมด้วยการส่งแบบ Serial Communications Interface (SCI) จากนั้นทำการแปลงแรงดันจากวงจรตรวจจับเป็นค่าจริงในระบบ ประมวลผลผ่านอัลกอริทึมควบคุมสร้างผลลัพธ์เป็นแรงดันอินเวอร์เตอร์คำสั่งสามเฟส แรงดันคำสั่งที่สร้างนำไปใช้ในการคำนวณค่าสัญญาณคำสั่งของการมอดูเลตโดยวิธี  $2u1d$  ผลลัพธ์ที่ได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับคลื่นพาห์สามเหลี่ยมเพื่อสร้างสัญญาณขับสวิตช์ที่ใช้สร้างแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์

- SCI Transmit และ SCI Receive

ส่วนการรับสัญญาณและส่งสัญญาณ SCI ส่วนนี้ได้พัฒนาขึ้นเพื่อการรับส่งสัญญาณจากผู้ใช้โดยไมโครคอนโทรลเลอร์จะประพฤติตัวเป็น target จะทำการสื่อสารกับอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ที่เป็น host เพื่อรับคำสั่งต่างๆ เช่นคำสั่งกระแส แรงดัน หรือคำสั่งใดๆตามแต่ที่อัลกอริทึมต้องการ และคอนโทรลเลอร์ยังสามารถส่งค่าใดๆ ไปแสดงผลบน host ได้ ด้วยเช่นกันเพื่อใช้ในการวิเคราะห์และแก้ไขจุดบกพร่องของระบบและอัลกอริทึม

- SPI Transmit

ส่วนการส่งสัญญาณดิจิทัลที่ประมวลผลบนไมโครคอนโทรลเลอร์โดยจะมีการส่งค่าทุกๆ 1 คาบการสวิตช์ สัญญาณที่ส่งจากไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านโมดูล SPI จะส่งไปยัง บอร์ดแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อกขนาดแรงดัน  $-5$  ถึง  $5$  เพื่อใช้ในการมอดูเลตและบันทึกค่า

- Trip Zone

ส่วนการสั่งการตัดวงจรการทำงาน ส่วนนี้จะทำงานด้วยคำสั่งสองส่วน ส่วนแรกคือ คำสั่งจากการเปรียบเทียบค่าของวงจรตรวจวัด โดยผู้ใช้สามารถตั้งค่าที่ต้องการให้วงจรหยุดทำงาน

เช่นคำสั่งกระแสวิกฤต หรือคำสั่งแรงดันเกิน หรืออีกส่วนหนึ่งเมื่อได้รับสัญญาณสถานะแสดง ความผิดปกติจากวงจรขับนำสวิตช์ โดยการตัดวงจรจะทำโดยการสั่งให้สัญญาณขับสวิตช์ทุก ตัวเป็นศูนย์ หรือเป็นการเปิดวงจรภาคกำลังของอินเวอร์เตอร์ โดยส่วนนี้จะทำงานทันทีไม่ ขึ้นกับการทำงานอื่นบนไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อเป็นการปกป้องระบบจากความเสียหาย เมื่อเกิดความผิดพลาดหรืออุบัติเหตุ เพิ่มเติมนอกเหนือจากการตัดวงจรในทางฮาร์ดแวร์ด้วย ตัวตัดวงจร



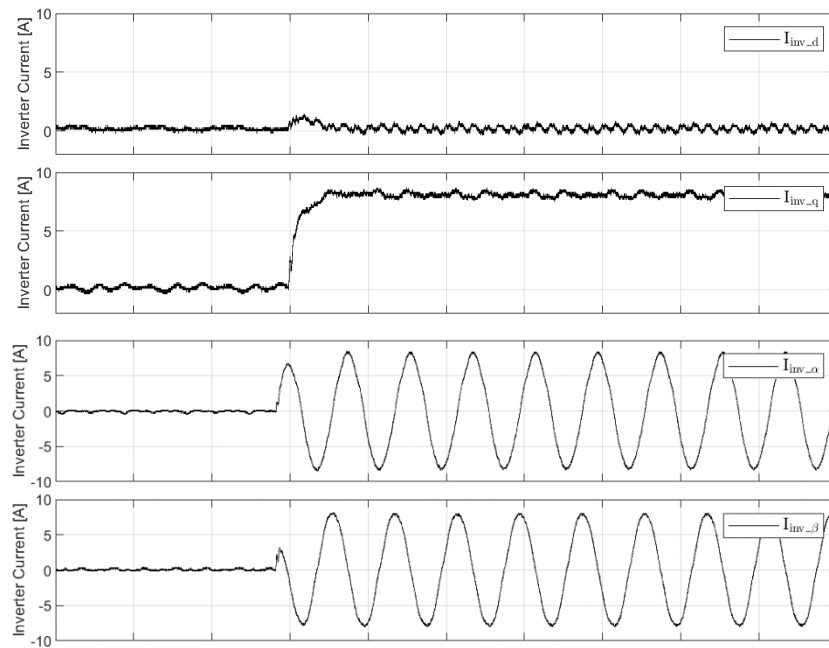
## บทที่ 7

### ผลการทดสอบกับระบบอินเวอร์เตอร์ในห้องแลปปฏิบัติการ

ในบทนี้จะแสดงผลการอัลกอริทึมในการควบคุมที่ได้นำเสนอกับระบบอินเวอร์เตอร์จริงที่ได้กล่าวไปในบทข้างต้นโดยเงื่อนไขในการใช้งานระบบคือแรงดันบัลลัสกระแสตรงขนาด 500V DC และแรงดันที่จุด PCC ขนาดค่ายอด 200V ความถี่ 50 Hz เพื่อแยกผลของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความไม่อุดมคติของฮาร์ดแวร์ภายในระบบจากผลของอัลกอริทึม ผลการทดลองจะแบ่งเป็นสามการทดลอง คือ การทดลองวงรอบควบคุมกระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์ วงรอบควบคุมกระแสกริด การจ่ายกระแสรีแอคทีฟความถี่ปกติขณะเกิดแรงดันตก และการจ่ายกระแสความถี่สูงระหว่างเกิดแรงดันตก

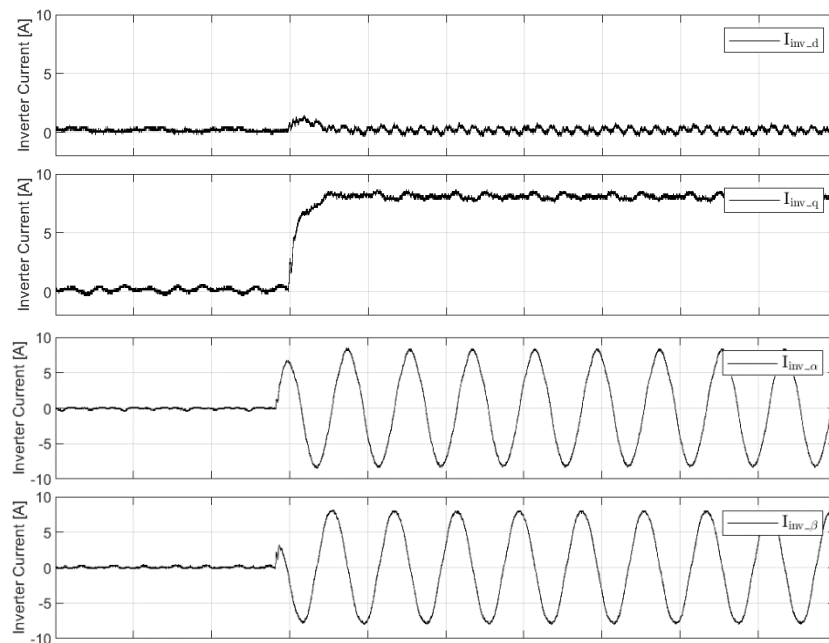
#### การทดสอบวงรอบควบคุมกระแสด้านออกอินเวอร์เตอร์

เพื่อการทดสอบการทำงานของระบบจริงเมื่อนำอัลกอริทึมที่ได้ออกแบบมาใช้ในส่วนนี้จะทำการทดสอบระบบอินเวอร์เตอร์ด้วยการสั่งขนาดคำสั่งกระแสเท่ากับกระแสพิกัดของอินเวอร์เตอร์  $i_{inv,d} = 7.89 A$  ผลการทดสอบเป็นไปตามรูปที่ 60 กระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์ในแกน d มีขนาดเพิ่มขึ้นตามขนาดของกระแสคำสั่งและด้วยการสั่งกระแสในแกน q  $i_{inv,q} = 7.89 A$  รูปที่ 26 กระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์ในแกน q มีขนาดเพิ่มขึ้นตามขนาดของกระแสคำสั่ง ช่วงเวลาตอบสนองคำสั่งประมาณ 1 ms จากทั้งสองรูปขนาดกระแสในแกน d และ แกน q เกิดระลอกกระแสขนาดประมาณ 0.7 A อันเนื่องมาจากความไม่อุดมคติของแหล่งจ่ายแรงดันสามเฟส ซึ่งประกอบด้วยฮาร์มอนิกลำดับต่ำ การแสดงรูปคลื่นสามเฟสกระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์จะแทนด้วยรูปคลื่นในแกน  $\alpha$  และ  $\beta$  เห็นได้ว่ามีขนาดเพิ่มขึ้นตามขนาดกระแสคำสั่งอย่างสมดุลเข้าสู่ภาวะคงตัวที่ขนาด 4.55 Arms



$t = 10\text{ms/div}$

รูปที่ 60 ผลตอบสนองของวงรอบควบคุมกระแสแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์ในระบบจริงเมื่อมีการลั้งกระแสในแกน  $d$  7.89 A

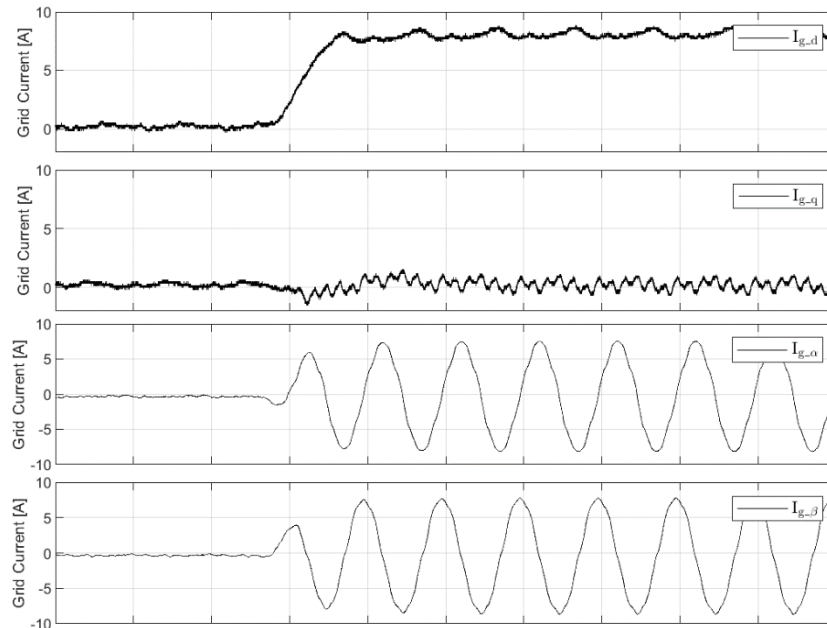


$t = 10\text{ms/div}$

รูปที่ 61 ผลตอบสนองของวงรอบควบคุมกระแสแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์ในระบบจริงเมื่อมีการลั้งกระแสในแกน  $q$  7.89 A

### การทดสอบวงรอบควบคุมกระแสกริด

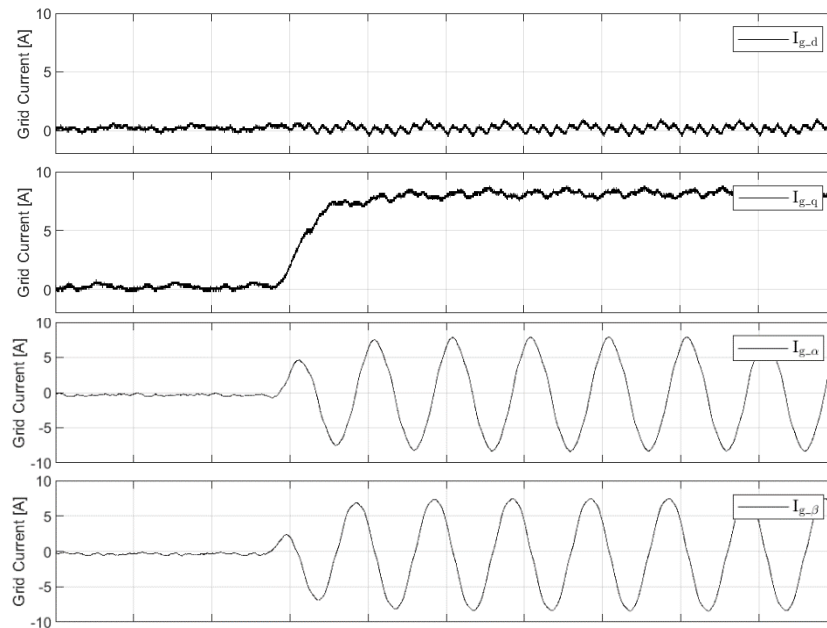
ในส่วนถัดมาคือวงรอบควบคุมกระแสกริดที่เป็นวงรอบควบคุมกระแสด้านนอก ทำการทดสอบด้วยการสั่งกระแสขนาดคำสั่งกระแสเท่ากับกระแสพิคต์ของอินเวอร์เตอร์ที่  $i_{g,d} = 7.89 A$  และ  $i_{g,q} = 7.89 A$  ตามลำดับ จากผลการทดสอบในรูปที่ 62 ผลตอบสนองของวงรอบควบคุมกระแสกริดในระบบจริงเมื่อมีการสั่งกระแสในแกน  $q$  และ รูปที่ 63



$t = 10\text{ms/div}$

รูปที่ 62 ผลตอบสนองของวงรอบควบคุมกระแสกริดในระบบจริงเมื่อมีการสั่งกระแสในแกน  $q$  7.89

A



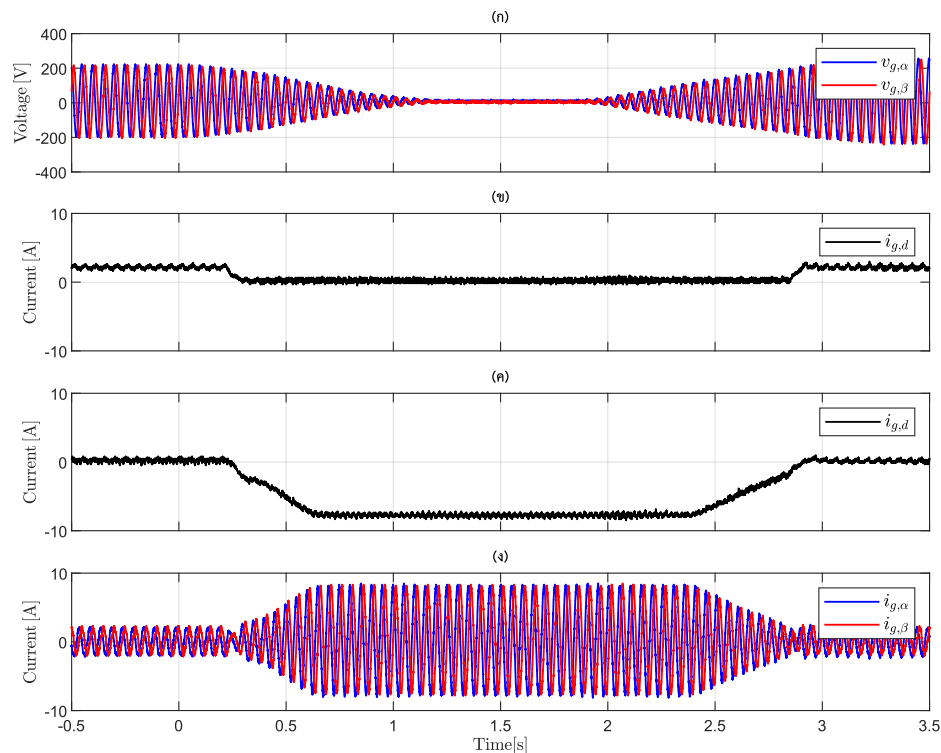
$t = 10\text{ms/div}$

รูปที่ 63 ผลตอบสนองของวงรอบควบคุมกระแสกริดในระบบจริงเมื่อมีการสั่งกระแสในแกน  $q$  7.89 A

#### การทดสอบการจ่ายกระแสรีแอกทีฟความถี่ปกติขณะเกิดแรงดันตก

การทดสอบนี้จะทดสอบด้วยการลดแรงดันที่จุด PCC ลงจากแรงดันตั้งต้น  $200\text{Vpeak}$  จนถึง  $5\text{V}$  เพื่อดูผลตอบสนองของระบบควบคุมและอัลกอริทึมที่ได้ตั้งค่าคำสั่งกระแสตามอัตราส่วนการจ่ายกระแสรีแอกทีฟต่อแรงดัน รูปที่ 64 แสดงผลการทดลองการจำลองการเกิดแรงดันตกด้วยอินเวอร์เตอร์ในห้องปฏิบัติการเมืองแรงดันลดลงจากแรงดันตั้งต้นจนถึง  $200\text{Vpeak}$  โดยจะคิดเป็นแรงดัน  $1\text{ p.u.}$  จนถึงแรงดัน  $5\text{Vpeak}$  เป็นช่วงเวลาประมาณ 2 วินาที หลังจากนั้นเพิ่มแรงดันที่จุด PCC กลับมาจนถึง  $200\text{Vpeak}$  ดังเดิม ผลการทดลองในรูปที่ 65 แสดงรูปขยายขณะแรงดันลดลง ในช่วงระยะเวลา  $t = 0 - 0.21\text{ s}$  เป็นช่วงเวลาก่อนเกิดแรงดันตกกำหนดให้อินเวอร์เตอร์จ่ายกระแสในแกน  $d$  ตามคำสั่งกระแสกริด  $i_{g,d} = 5\text{ A}$  ช่วงระยะเวลา  $t = 0.21\text{ s}$  ทำการปรับลดแรงดันที่จุด PCC ด้วยปรับลดแรงดันสามเฟสของแหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับที่ใช้เป็นแรงดัน PCC เมื่อแรงดันลดลงจนเหลือ  $0.9\text{ p.u.}$  จะเห็นได้ว่ากระแสกริดในแกน  $d$  ปรับลดลงเหลือ  $0\text{ A}$  และกระแสในแกน  $q$  ค่อยๆเพิ่มขึ้นจนกระทั่ง  $t = 0.61\text{ s}$  แรงดัน PCC ลดลงเหลือ  $0.5\text{ p.u.}$  กระแสในแกน  $q$  เพิ่มขึ้นจนถึงกระแสพิกัดและจ่ายไปเรื่อยๆอย่างต่อเนื่องที่แรงดัน PCC เหลือ  $0.025\text{ p.u.}$  หรือประมาณ  $5\text{ Vpeak}$  เมื่อระยะเวลาผ่านไป รูปที่ 69 แสดงรูปขยายขณะทำการเพิ่มแรงดันที่จุด PCC ให้เพิ่มขึ้นจนกระทั่งเมื่อแรงดันเพิ่มขึ้นถึง  $0.5\text{ p.u.}$  เมื่อเวลา  $t = 2.4\text{ s}$  กระแสกริดในแกน  $q$  จะค่อยๆลดลง ขณะที่แรงดันกริดค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนถึงช่วงเวลาที่  $t = 2.85$  แรงดันที่จุด PCC เพิ่มขึ้นจนมีขนาด

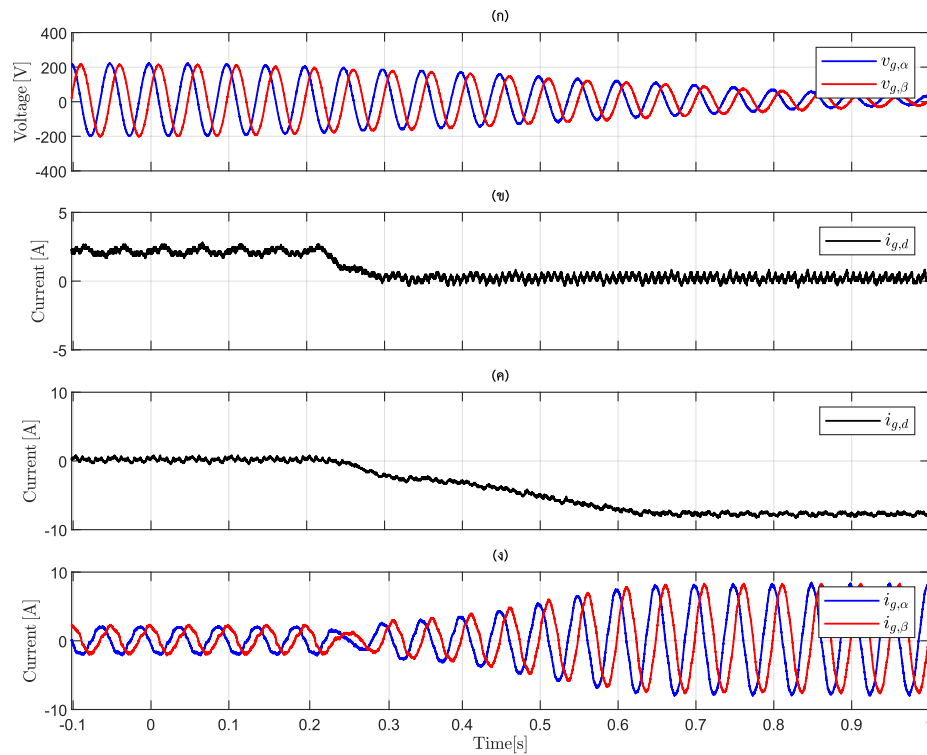
เท่ากับ 0.9 p.u. จึงหยุดจ่ายกระแสในแกน  $q$  และกลับเข้าสู่โหมดปกติที่จ่ายกระแสในแกน  $d$  เหมือนช่วงระยะเวลาก่อนเกิดแรงดันตก จากการทดลองจะเห็นได้ว่า อินเวอร์เตอร์ในโหมดปกติสามารถควบคุมให้ตรวจจับแรงดัน PCC เพื่อจ่ายได้ตามค่าที่ต้องการ และคงการเชื่อมต่อกับระบบตลอดระยะเวลาที่เกิดแรงดันตกเพื่อจ่ายกระแสรีแอกทีฟได้อย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 64 ผลการทดสอบการจ่ายกระแสรีแอกทีฟขณะเกิดแรงดันตกแบบสามเฟส

ด้วยอินเวอร์เตอร์ในห้องแลปปฏิบัติการ  $t = -0.5 - 3.5$

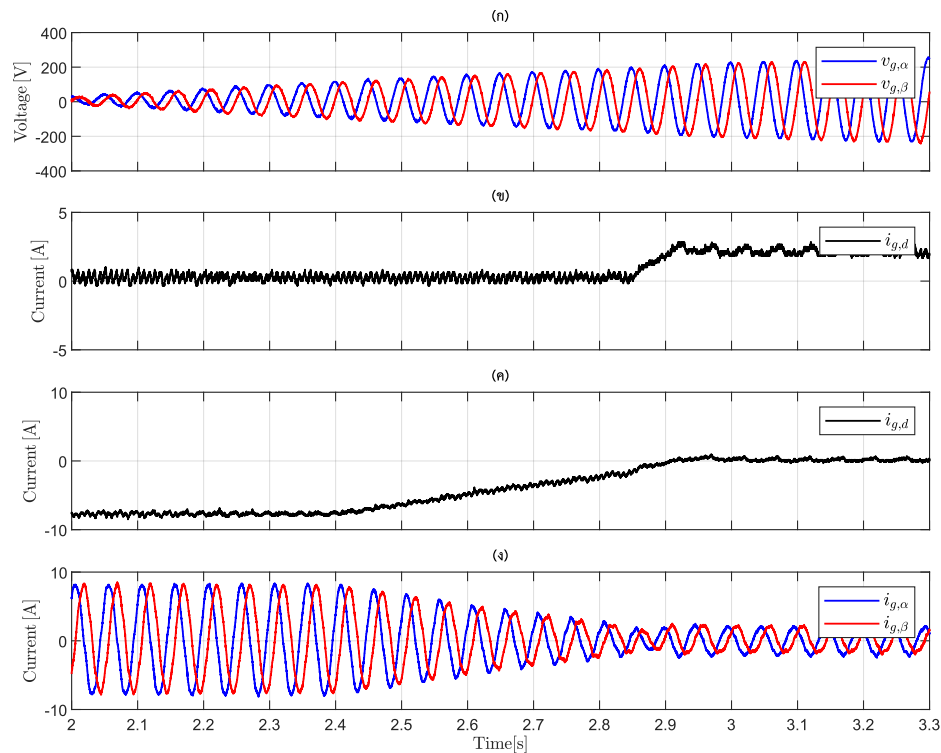
(ก) แรงดันกริด  $v_{g,\alpha}$  และ  $v_{g,\beta}$ , (ข) กระแสกริดแอกทีฟ  $i_{g,d}$ , (ค) กระแสกริดรีแอกทีฟ  $i_{g,q}$  และ (ง) กระแสกริด  $i_{g,\alpha}$  และ  $i_{g,\beta}$



รูปที่ 65 ผลการทดสอบการจ่ายกระแสรีแอกทีฟขณะเกิดแรงดันตกแบบสามเฟสขณะแรงดันลด  
ด้วยอินเวอร์เตอร์ในห้องแลปปฏิบัติการช่วงเวลา -0.1 ถึง 1

(ก) แรงดันกริด  $v_{g,\alpha}$  และ  $v_{g,\beta}$ , (ข) กระแสกริดแอกทีฟ  $i_{g,d}$ , (ค) กระแสกริดรีแอกทีฟ  $i_{g,q}$  และ (ง)  
กระแสกริด  $i_{g,\alpha}$  และ  $i_{g,\beta}$





รูปที่ 66 ผลการทดสอบการจ่ายกระแสรีแอกทีฟขณะเกิดแรงดันตกแบบสามเฟสขณะแรงดันเพิ่ม  
ด้วยอินเวอร์เตอร์ในห้องแล็บปฏิบัติการ

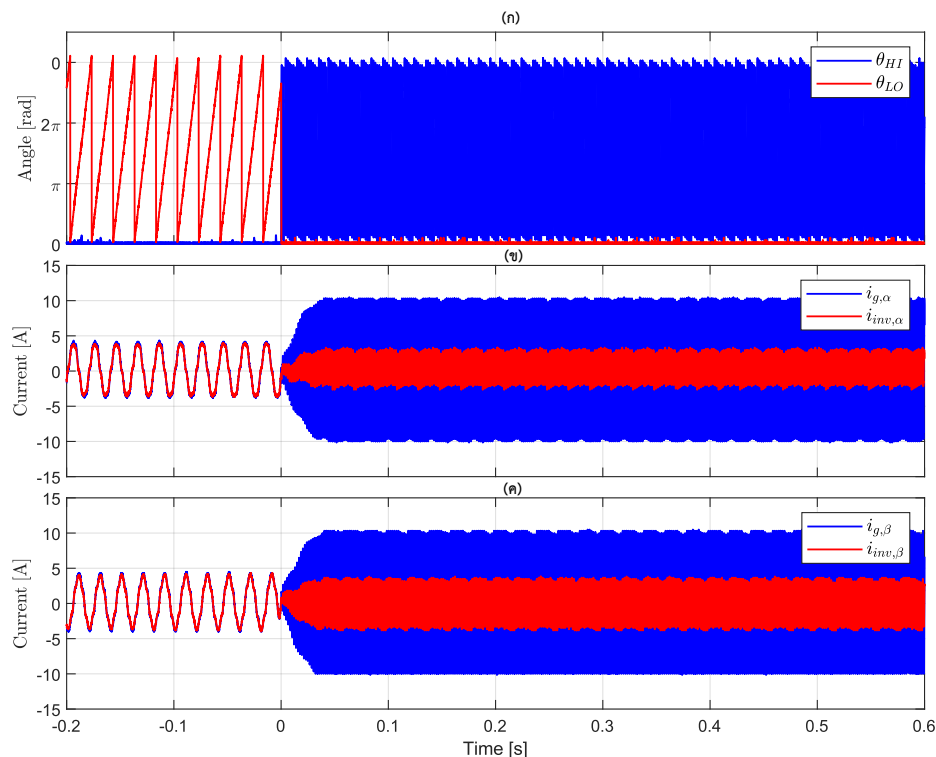
(ก) แรงดันกริด  $v_{g,\alpha}$  และ  $v_{g,\beta}$ , (ข) กระแสกริดแอกทีฟ  $i_{g,d}$ , (ค) กระแสกริดรีแอกทีฟ  $i_{g,q}$  และ (ง)  
กระแสกริด  $i_{g,\alpha}$  และ  $i_{g,\beta}$

### การทดสอบการจ่ายกระแสความถี่สูง

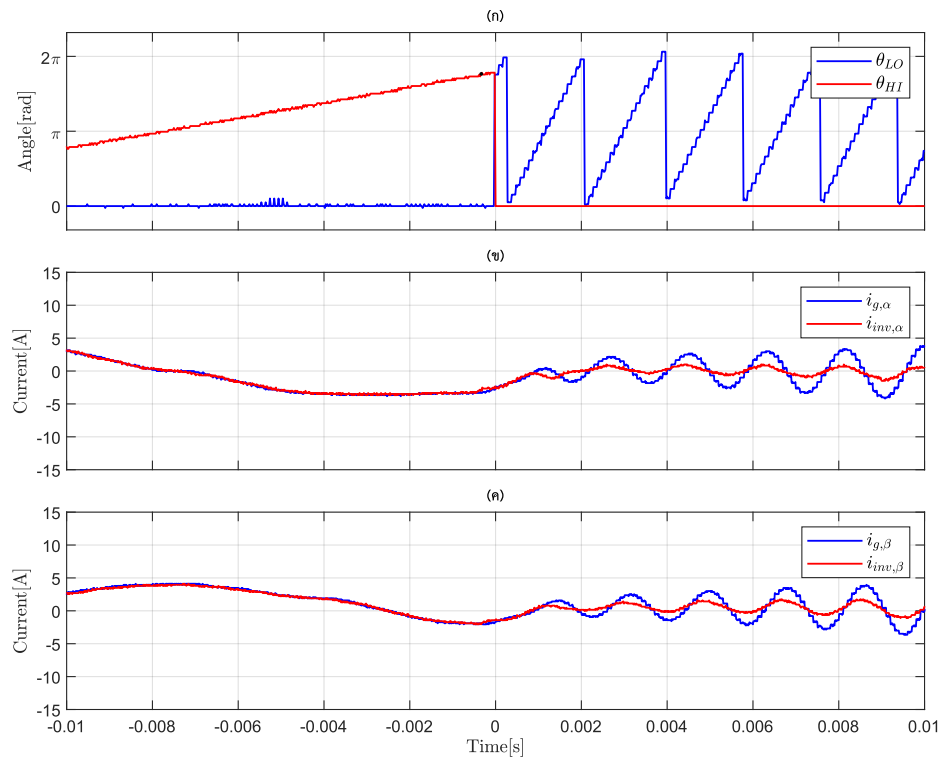
#### 1. การทดสอบการจ่ายกระแสความถี่สูงขนาด 3A

การทดสอบนี้จะทดสอบด้วยการลดแรงดันที่จุด PCC ลงจากแรงดันตั้งต้น 200Vpeak จนถึง 5V โดยกำหนดให้จ่ายกระแสความถี่สูงเมื่อแรงดันที่จุด PCC มีขนาดต่ำกว่า 5V กำหนดกระแสต้านออกของอินเวอร์เตอร์ขนาดคำสั่งความถี่ 550Hz ขนาด 3A รูปที่ 67 ตั้งแต่เวลา  $t = 0.2s$  อินเวอร์เตอร์จ่ายกระแสกริดในแกน d  $i_{g,d}$  ที่ 5A เมื่อเวลา  $t = 0s$  ลดแรงดัน PCC ลงเหลือ 5V จะเห็นว่าในมุมที่ใช้ในการแปลงให้อยู่บนแกนหมุนซิงโครนัสจะเปลี่ยนจาก  $\theta_{LO}$  ซึ่งเป็นมุมจากเฟสล็อกของแรงดันที่จุด PCC เป็นมุมที่สร้างขึ้นจากความถี่ 550Hz รูปที่ 68 จะแสดงภาพขยายของ รูปที่ 67 ที่จะแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของมุม รูป (ก) เมื่อแรงดันตกลงมุมความถี่แรงดัน PCC ขณะนั้นเท่ากับ  $\frac{7}{4}\pi$  เมื่อระบบเปลี่ยนการทำงานเป็นโหมดจ่ายความถี่สูง มุมความถี่สูง 550Hz จะเริ่มต้นด้วยค่าเท่ากับ  $\frac{7}{4}\pi$  เพื่อให้จ่ายได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่เกิดผลต่างของมุมของกระแสในขณะเกิดการ

เปลี่ยนผ่าน รูป (ข) และ (ค) จะเห็นได้ว่ากระแสอินเวอร์เตอร์เปลี่ยนแปลงความถี่ทันทีโดยไม่เกิดกระแสเกิน จะแสดงให้เห็นว่าเมื่อเปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นการจ่ายกระแสความถี่สูง กระแสอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 550Hz จะมีมอดุ้ประกอบอยู่บนแกน  $q$  ดังรูปที่ รูปที่ 69 แต่มีการกระเพื่อมของกระแสที่เกิดจากการแรงดันที่จุด PCC 50Hz ยังคงมีเหลืออยู่ที่ 10V รูปที่ 70 จะแสดงการเปลี่ยนแปลงขนาดของกระแสกริดในโหมดปกติที่จ่ายกระแสที่ความถี่ 50Hz ขนาดกระแสกริดต่อกระแสอินเวอร์เตอร์จะมีขนาดประมาณ 1 เท่า แต่เมื่อจ่ายกระแสอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 550Hz แล้วจะขนาดกระแสกริดต่อกระแสอินเวอร์เตอร์มีขนาดมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เมื่อพิจารณาช่วงสภาวะคงตัวในรูปที่ 71 แสดงให้เห็นว่าเมื่อจ่ายกระแสอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 2.474 Arms แล้วขนาดกระแสกริดจะเพิ่มขึ้นเป็น 7.071Arms ซึ่งคิดเป็น 2.855 เท่า ผลการทดลองนี้สรุปได้ว่าการเพิ่มความถี่กระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์ให้ใกล้เคียงกับความถี่โซ่แนวนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ  $L_2$  และตัวเก็บจุ  $C$  ของวงจรกรอง LCL แล้วจะแล้วทำให้ขนาดกระแสกริดมีขนาดเพิ่มขึ้นจริง โดยอินเวอร์เตอร์ของห้องแลปปฏิบัติการสามารถเพิ่มกระแสได้ถึง 2.855 เท่า



รูปที่ 67 ผลตอบสนองของระบบควบคุมในโหมดการจ่ายกระแสความถี่สูงของอินเวอร์เตอร์ในระบบจริงเมื่อเกิดสภาวะแรงดันตกแบบสามเฟสในระบบไฟฟ้าช่วงเวลา  $t = -0.2 - 0.6$

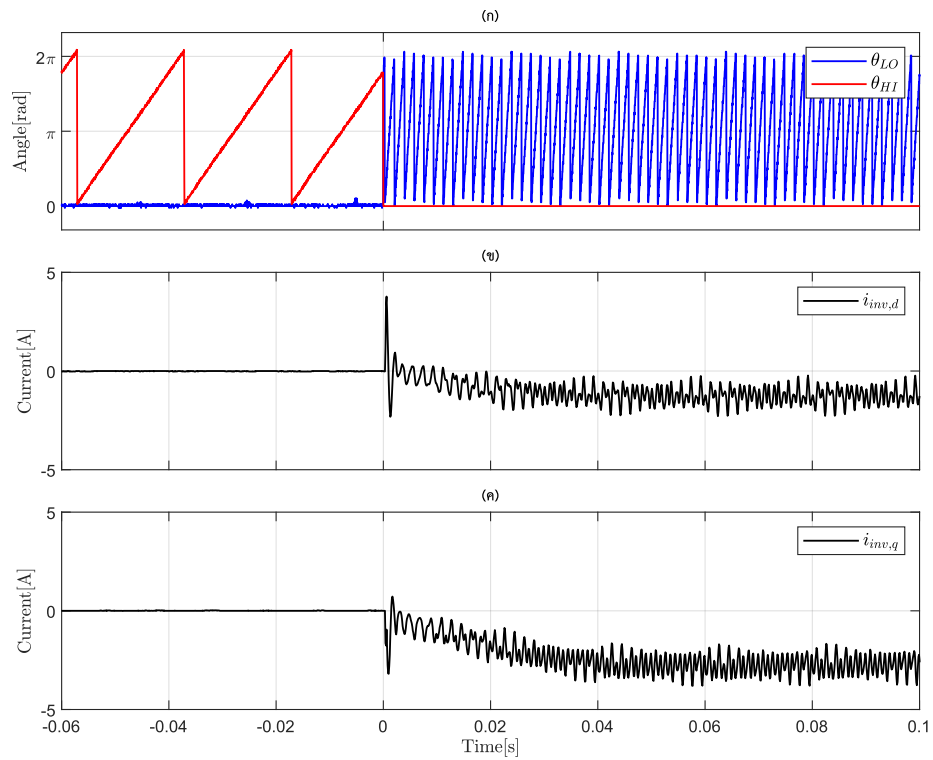


รูปที่ 68 ผลการทดสอบการจ่ายกระแสความถี่สูงเกิดเมื่อแรงดันตกแบบสามเฟส

ด้วยอินเวอร์เตอร์ในห้องแลปปฏิบัติการ

(ก) มุมของแรงดันด้านออก  $\theta_{LO}$  และ  $\theta_{HI}$  (ข) กระแสกริดในแกน  $\alpha$   $i_{g,\alpha}$  และ กระแสอินเวอร์เตอร์ใน

แกน  $\alpha$   $i_{inv,\alpha}$  และ (ค) กระแสกริดในแกน  $\beta$   $i_{g,\beta}$  และ กระแสอินเวอร์เตอร์ในแกน  $\beta$   $i_{inv,\beta}$

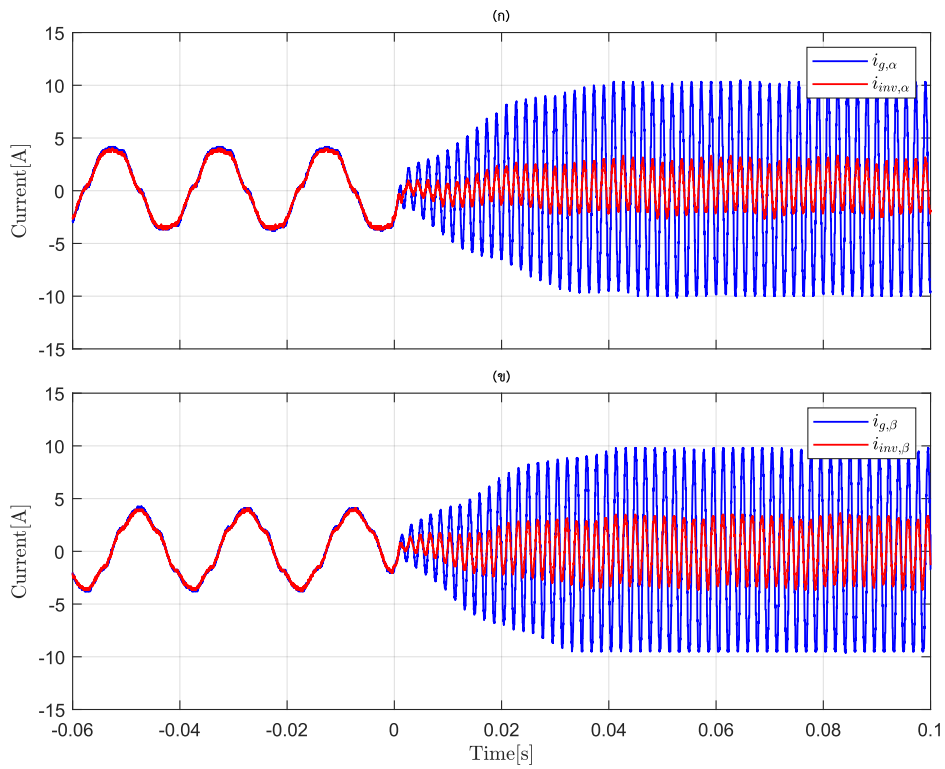


รูปที่ 69 ผลการทดสอบการจ่ายกระแสความถี่สูงเกิดเมื่อแรงดันตกแบบสามเฟส

ด้วยอินเวอร์เตอร์ในห้องแลปปฏิบัติการ

(ก) มุมของแรงดันด้านออก  $\theta_{LO}$  และ  $\theta_{HI}$ , (ข) กระแสอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงในแกน d  $i_{inv,d}$  และ

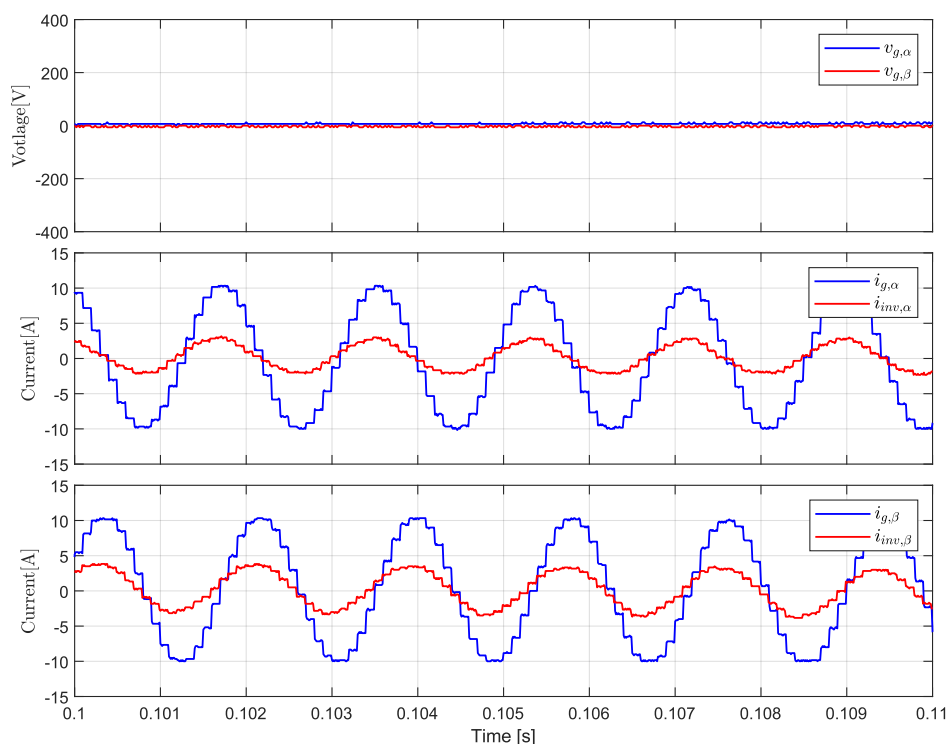
(ค) กระแสอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงในแกน q  $i_{inv,q}$



รูปที่ 70 ผลการทดสอบการจ่ายกระแสความถี่สูงเกิดเมื่อแรงดันตกแบบสามเฟส

ด้วยอินเวอร์เตอร์ในห้องแล็บปฏิบัติการ

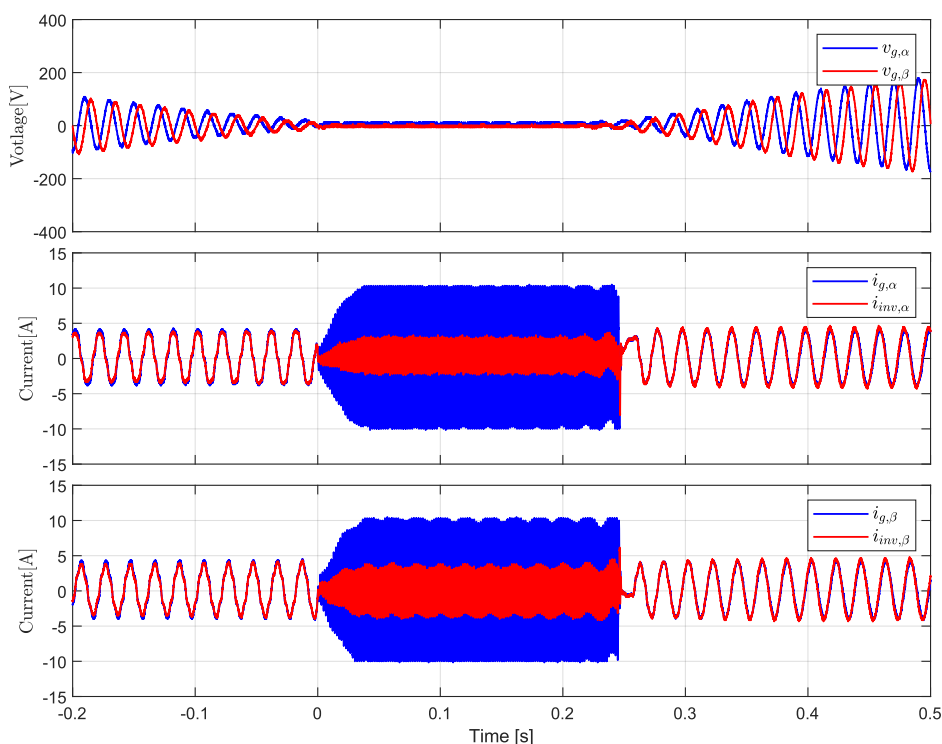
(ก) กระแสกริดในแกน  $\alpha$   $i_{g,\alpha}$  และ กระแสอินเวอร์เตอร์ในแกน  $\alpha$   $i_{inv,\alpha}$  และ (ข) กระแสกริดในแกน  $\beta$   $i_{g,\beta}$  และ กระแสอินเวอร์เตอร์ในแกน  $\beta$   $i_{inv,\beta}$



รูปที่ 71 ภาพขยายของขนาดกระแสอินเวอร์เตอร์และกระแสกริดที่สภาวะคงตัว

(ก) แรงดันกริด  $v_{g,\alpha}$  และ  $v_{g,\beta}$  (ข) กระแสกริดในแกน  $\alpha$   $i_{g,\alpha}$  และ กระแสอินเวอร์เตอร์ในแกน  $\alpha$   $i_{inv,\alpha}$  และ (ค) กระแสกริดในแกน  $\beta$   $i_{g,\beta}$  และ กระแสอินเวอร์เตอร์ในแกน  $\beta$   $i_{inv,\beta}$

ทำการทดลองในเงื่อนไขข้างต้นอีกครั้งโดยจำลองแรงดันตกเป็นเวลา 0.2 วินาที จากนั้นแรงดันเพิ่มขึ้นและกลับเข้าสู่สภาวะปกติ ตามรูปที่ 72 จะเห็นว่าอินเวอร์เตอร์สามารถจ่ายกระแสความถี่สูงในช่วงเกิดแรงดันตกได้และกลับมาทำงานที่ความถี่ปกติเมื่อแรงดันที่จุด PCC กลับมาสู่สภาวะปกติอีกครั้งโดยไม่มีกระแสเกินพิกัดหรือปลดตัวเองออกจากระบบ



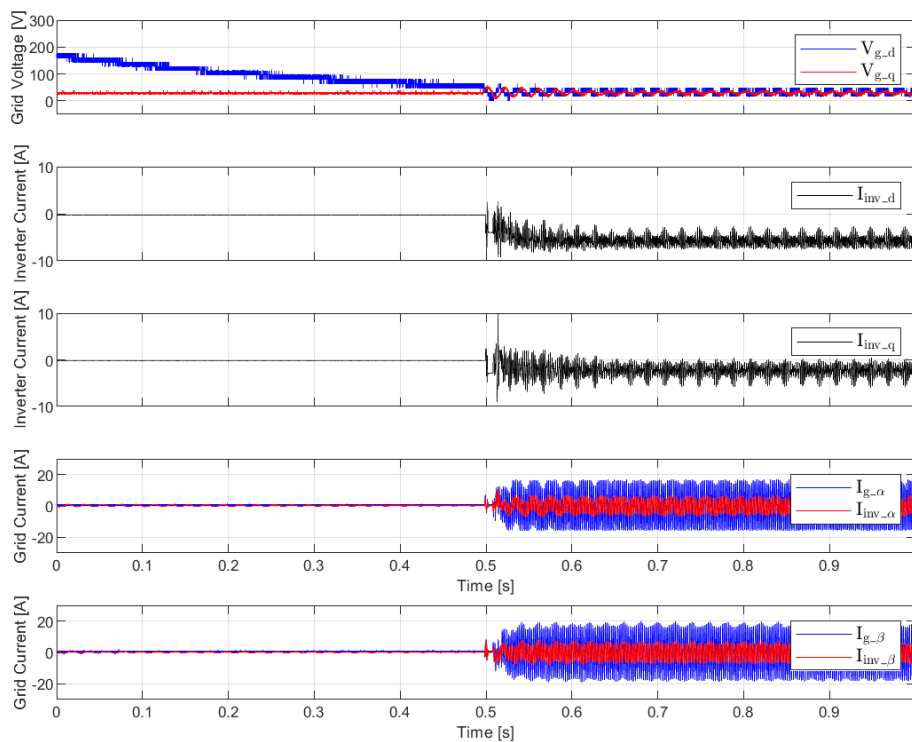
รูปที่ 72 ผลการทดสอบการจ่ายกระแสความถี่สูงเกิดเมื่อแรงดันตกแบบสามเฟสและแรงดันกลับสู่สถานะปกติแบบต่อเนื่อง ด้วยอินเวอร์เตอร์ในห้องแลปปฏิบัติการ

(ก) มุมของแรงดันกริด  $v_{g,\alpha}$  และ  $v_{g,\beta}$  (ข) กระแสกริดในแกน  $\alpha$   $i_{g,\alpha}$  และ กระแสอินเวอร์เตอร์ในแกน  $\alpha$   $i_{inv,\alpha}$  และ (ค) กระแสกริดในแกน  $\beta$   $i_{g,\beta}$  และ กระแสอินเวอร์เตอร์ในแกน  $\beta$   $i_{inv,\beta}$

- การทดสอบการจ่ายกระแสความถี่สูงขนาดเท่ากับกระแสพิกัดโดยไม่จำกัดแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์

ในการทดสอบนี้จะทดลองจ่ายกระแสความถี่สูงที่ขนาดกระแสพิกัดโดยใช้สถานการณ์แรงดันตกแบบเดียวกับการทดสอบข้างต้นแต่มีการกำหนดกระแสความถี่สูงที่จ่ายเท่ากับกระแสพิกัด โดยไม่มีการจำกัดคำสั่งแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ และให้แรงดันกระแสตรงมีค่าคงที่เท่ากับ 500VDC ทำการลดแรงดันที่จุดPCC จนมีขนาดต่ำสุดที่ 10V จากผลการสอบรูปที่ 73 (ก) จะแสดงขนาดแรงดันเป็นแรงดันในแกน d และแกน q เมื่อแรงดันที่จุด PCC ที่มีค่าอยู่อยู่ที่ 200Vpeak ลดลงจนเหลือ 10V กำหนดการจ่ายขนาดกระแสอินเวอร์เตอร์ที่กระแสพิกัดเมื่อแรงดันลดลงต่ำกว่า 15 Vpeak จะเห็นได้ว่าเมื่อแรงดันมีขนาดลดลงจนถึง 10V อินเวอร์เตอร์จ่ายกระแสขนาด พิกัด 7.89A ความถี่สูงได้ดังรูปที่ 73 (ง) และ (จ) และกระแสกริดมีขนาดสูงถึง 19A ซึ่งมีขนาดเป็นอัตราส่วน 2.4 เท่า รูปที่ 73 (ข) และ (ค) แสดงกระแสอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง บนแกนหมุนของ

ความถี่ที่สร้างขึ้นจะเห็นได้ว่ากระแสอินเวอร์เตอร์จะอยู่บนแกน  $q$  เป็นหลัก จากการทดลองจะเห็นว่าหากไม่ได้จำกัดแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์อินเวอร์เตอร์แล้วจ่ายกระแสอินเวอร์เตอร์อย่างต่อเนื่องก็จะได้ขนาดกระแสที่มาขนาดมากที่สุดถึง 19A หรือประมาณ 2.4 เท่า



รูปที่ 73 ผลตอบสนองของระบบควบคุมในโหมดการจ่ายกระแสความถี่สูงขนาดเท่ากับกระแสพิกัดของอินเวอร์เตอร์ในระบบจริงเมื่อเกิดสภาวะแรงดันตกแบบสามเฟสในระบบไฟฟ้า



## บทที่ 8

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

การใช้งานกำลังไฟฟ้าได้มีการเปลี่ยนแปลงไปจากอดีต ด้วยปริมาณการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้น และด้วยแนวความคิดการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมและการประหยัดการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงที่มีราคาสูงขึ้น การใช้ประโยชน์พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์คือหนึ่งในพลังงานสะอาดที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย และเริ่มมีสัดส่วนเพิ่มขึ้นในระบบไฟฟ้าปัจจุบัน โดยส่วนสำคัญของระบบพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ คืออินเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่จากการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้แหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อทำหน้าที่นำพลังงานจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้า อย่างไรก็ตามเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนพลังงานไฟฟ้าเหล่านี้ส่งผลกระทบกับระบบไฟฟ้าดั้งเดิมหลายประการ ประเด็นสำคัญที่กล่าวถึงในวิทยานิพนธ์นี้คือ การเปลี่ยนแปลงของระดับกระแสผิดพลาดในระบบไฟฟ้า โดยระบบไฟฟ้าดั้งเดิมซึ่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงที่ใช้เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสเป็นหลัก เมื่อเกิดความผิดพลาดในระบบ เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสเหล่านี้จะจ่ายกระแสผิดพลาดที่มีขนาดสูงถึง 2 – 4 เท่าของขนาดกระแสปกติ ระบบป้องกันของระบบไฟฟ้าจึงถูกออกแบบโดยยึดขนาดกระแสไฟฟ้างดกล่าว ทำให้ตัวตัดวงจรได้ถูกตั้งค่าให้ทำงานในย่านกระแสที่มีขนาดสูง แต่โครงสร้างของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์ไม่จ่ายกระแสผิดพลาดในปริมาณเช่นเดียวกับเครื่องจักรกลซิงโครนัส แม้จะมีข้อกำหนดของระบบไฟฟ้าให้จ่ายกระแสไฟฟ้าขณะเกิดแรงดันตก ก็จะสามารถจ่ายได้ไม่เกิดขนาดของกระแสผิดพลาด ส่งผลกระทบต่อระบบป้องกันแบบดั้งเดิม คือกระแสผิดพลาดมีขนาดน้อยเกินไป ที่จะทำให้ระบบป้องกันทำงานได้เหมือนเดิม ซึ่งเป็นสิ่งประเด็นที่มีความสำคัญอย่างยิ่งเนื่องจากจะทำให้เกิดความไม่ปลอดภัยและความเสียหายต่อชีวิต และอุปกรณ์ในระบบได้ รวมถึงทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ระบบและจุดเกิดความผิดพลาดได้ วิธีแก้ไขหนึ่ง คือการเปลี่ยนแปลงการตั้งค่าระบบป้องกัน ซึ่งมีความซับซ้อนเนื่องจาก ระบบไฟฟ้าในปัจจุบันมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาและรวดเร็ว อีกหนึ่งทางเลือกคือการปรับปรุงให้อินเวอร์เตอร์สามารถจ่ายกระแสผิดพลาดขนาดสูงขึ้นเพื่อเป็นการเพิ่มกระแสผิดพลาดให้ระบบไฟฟ้า ทำให้ใกล้เคียงกับการตั้งค่าอุปกรณ์ในระบบป้องกันแบบดั้งเดิม

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการจ่ายกระแสผิดพลาดของอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่องริด โดยการควบคุมให้อินเวอร์เตอร์จ่ายกระแสผิดพลาดที่มีขนาดมากกว่า 2 เท่าของกระแสผิดพลาดในขณะที่ยังเชื่อมต่อกับระบบเมื่อเกิดสภาวะแรงดันตก ภายใต้พิกัดกระแสและพิกัดแรงดันของอินเวอร์เตอร์ โดยที่อินเวอร์เตอร์สามารถทำงานได้ทั้งสองโหมดและสามารถเปลี่ยนโหมดระหว่างการทำงานแบบปกติ ไปยังโหมดการทำงานเมื่อเกิดความผิดพลาดในระบบ และสามารถกลับมาทำงานได้ในโหมดการทำงานปกติเมื่อกลับเข้าสู่สภาวะปกติได้ โดยทดสอบด้วยผลการจำลองผ่านโปรแกรมจำลอง Matlab

Simulink และผลการทดสอบกับอินเวอร์เตอร์ในห้องปฏิบัติการ โดยการทดสอบแบ่งออกเป็น 3 อย่างคือการทดสอบการใช้งานในโหมดปกติ การทดสอบการจ่ายกระแสรีแอกทีฟตามข้อกำหนดของระบบไฟฟ้าเมื่อเกิดสภาวะแรงดันตก และการทดสอบการจ่ายกระแสความถี่สูง

แนวคิดที่ใช้ในการเพิ่มขนาดกระแสคือ การใช้ความถี่เรโซแนนซ์ของตัวกรองแบบ LCL ที่เป็นวงจรกรองทั่วไปที่ใช้ในอินเวอร์เตอร์ ประกอบกับการควบคุมบนแกนหมุนอ้างอิงซึ่งโครนัสที่ความถี่เรโซแนนซ์

จากผลการทดสอบทั้งในการจำลองและการทดสอบจริงด้วยอัลกอริทึมที่ได้นำเสนอ อัลกอริทึมที่นำเสนอสามารถควบคุมให้อินเวอร์เตอร์จ่ายกระแสในโหมดปกติแบบเชื่อมต่อกิตทั้งกระแสแอกทีฟ และกระแสรีแอกทีฟได้ตามที่ออกแบบ ในโหมดแรงดันตกเมื่อเกิดแรงดันตกหรือความผิดพลาดที่แรงดันที่จุด PCC กระแสรีแอกทีฟความถี่ปกติได้ตามข้อกำหนดของระบบไฟฟ้าได้และสามารถเชื่อมต่อบนกลับมาในโหมดปกติเมื่อแรงดันกลับเข้าสู่สภาวะปกติได้ ผลการทดสอบการจ่ายกระแสที่อัลกอริทึมสามารถจ่ายกระแสความถี่สูงขณะเกิดแรงดันตกที่มีขนาดมากถึง 2.4 เท่าของกระแสพิกัดได้ โดยที่ขนาดกระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์มีขนาดไม่เกินพิกัด ทำให้อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับระบบได้โดยไม่ปลดตัวเองออกจากวงจร และกลับคืนสู่การควบคุมในโหมดปกติได้เมื่อแรงดันที่จุด PCC กลับเข้าสู่ค่าปกติ

### ข้อเสนอแนะ

1. วิธีการควบคุมกระแสอินเวอร์เตอร์นั้นจะการควบคุมขนาดแรงดันอินเวอร์เตอร์และกำหนดมุมของแรงดันอินเวอร์เตอร์ด้วยความถี่ที่สร้างขึ้นทำให้การควบคุมนั้นสามารถใช้ได้กับระบบสามเฟสที่มีความสมดุลเท่านั้น ต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับกระแสผิดพลาดของเครื่องจักรกลเชิงโครนัสและปรับปรุงให้ระบบแยกการทำงานเฉพาะเฟสได้ในกรณีที่เกิดความผิดพลาดแบบเฟสเดียว
2. การจ่ายกระแสความถี่สูงเพื่อเพิ่มขนาดของกระแสผิดพลาดขณะที่เกิดแรงดันตกอาจมีผลต่อการการสนับสนุนแรงดันที่จะต้องมีการศึกษาต่อไป

บรรณานุกรม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

- [1] “Short-Circuit Currents Information on short-circuit currents in SMA PV inverters,” SMA.
- [2] M. Jafari, T. O. Olowu, A. I. Sarwat, and M. A. Rahman, “Study of Smart Grid Protection Challenges with High Photovoltaic Penetration,” in *2019 North American Power Symposium (NAPS)*, Wichita, KS, USA: IEEE, Oct. 2019, pp. 1–6. doi: 10.1109/NAPS46351.2019.9000275.
- [3] Y. G. Landera, O. C. Zevallos, R. C. Neto, J. F. D. C. Castro, and F. A. S. Neves, “A Review of Grid Connection Requirements for Photovoltaic Power Plants,” *Energies*, vol. 16, no. 5, p. 2093, Feb. 2023, doi: 10.3390/en16052093.
- [4] J. D. Pradhan, S. S. Hadpe, and R. G. Shrivastava, “Analysis and design of overcurrent protection for grid-connected microgrid with PV generation,” *Global Transitions Proceedings*, vol. 3, no. 1, pp. 349–358, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.gltp.2022.03.023.
- [5] ธรรมชาติ เพ็ชรนพรัตน์, “การศึกษาผลกระทบของแหล่งผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนชนิดอินเวอร์เตอร์ต่อกระแสลัดวงจรในระบบส่งกำลังไฟฟ้า,” *จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*, 2562.
- [6] D. Alcala-Gonzalez, E. M. García Del Toro, M. I. Más-López, and S. Pindado, “Effect of Distributed Photovoltaic Generation on Short-Circuit Currents and Fault Detection in Distribution Networks: A Practical Case Study,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 1, p. 405, Jan. 2021, doi: 10.3390/app11010405.
- [7] K. H. Oon, C. Tan, A. H. A. Bakar, H. S. Che, H. Mokhlis, and H. A. Illias, “Establishment of fault current characteristics for solar photovoltaic generator considering low voltage ride through and reactive current injection requirement,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 92, pp. 478–488, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.05.001.
- [8] D. Lagos, V. Papaspiliotopoulos, G. Korres, and N. Hatziaargyriou, “Microgrid Protection Against Internal Faults: Challenges in Islanded and Interconnected

Operation,” *IEEE Power and Energy Mag.*, vol. 19, no. 3, pp. 20–35, May 2021, doi: 10.1109/MPE.2021.3057950.

[9] I. Hamdan, A. M. A. Ibrahim, and O. Noureldeen, “Modified STATCOM control strategy for fault ride-through capability enhancement of grid-connected PV/wind hybrid power system during voltage sag,” *SN Appl. Sci.*, vol. 2, no. 3, p. 364, Mar. 2020, doi: 10.1007/s42452-020-2169-6.

[10] J. I. Y. Ota, T. Sato, and H. Akagi, “Enhancement of Performance, Availability, and Flexibility of a Battery Energy Storage System Based on a Modular Multilevel Cascaded Converter (MMCC-SSBC),” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 4, pp. 2791–2799, Apr. 2016, doi: 10.1109/TPEL.2015.2450757.

[11] H. Laaksonen, D. Ishchenko, and A. Oudalov, “Adaptive Protection and Microgrid Control Design for Hailuoto Island,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 3, pp. 1486–1493, May 2014, doi: 10.1109/TSG.2013.2287672.

[12] N. Tummasit, S. Premrudeepreechacharn, and N. Tantichayakorn, “Adaptive overcurrent protection considering critical clearing time for a microgrid system,” in *2015 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT ASIA)*, Bangkok, Thailand: IEEE, Nov. 2015, pp. 1–6. doi: 10.1109/ISGT-Asia.2015.7387061.

[13] A. Saengseethong and S. Sangwongwanich, “A new modulation strategy for capacitor voltage balancing in three-level NPC inverters based on matrix converter theory,” in *The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA -*, Sapporo, Japan: IEEE, Jun. 2010, pp. 2358–2365. doi: 10.1109/IPEC.2010.5543689.

[14] ศุภโชค เตชะอุดมถาวร, “การประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรภายในจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเทียบโดยการฉีดสัญญาณที่ความถี่การสวิตช์,” *จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*, 2558.

[15] “Provincial Electricity Authority’s Regulation on the Power Network System Interconnection Code B.E.2559 (2016).” 2016.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ปรีณาพรรณ ปัญญา
วัน เดือน ปี เกิด	31 ตุลาคม 2538
สถานที่เกิด	ประเทศไทย
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ที่อยู่ปัจจุบัน	จังหวัดนนทบุรี ประเทศไทย
ผลงานตีพิมพ์	เทคนิคการเพิ่มกระแสผิวดพ้องสำหรับอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกิริต ETCI- CON 2021



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY