

การควบคุมกำลังรีแอกทีฟของอินเวอร์เตอร์สามเฟสเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าสำหรับการผลิต
ไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์



นายศิวัช ชัยฤกษ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

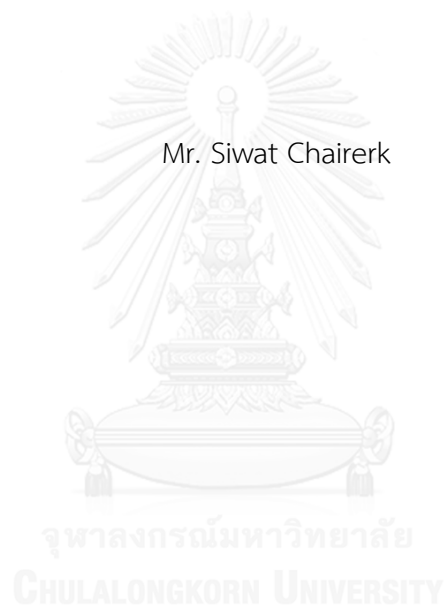
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REACTIVE-POWER CONTROL OF THREE-PHASE GRID-
CONNECTED INVERTERS FOR PV GENERATION

Mr. Siwat Chairerk



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering
Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2014
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การควบคุมกำลังรีแอกทีฟของอินเวอร์เตอร์สามเฟส
เชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าสำหรับการผลิตไฟฟ้าจาก
พลังงานแสงอาทิตย์

โดย

นายศิวัช ชัยฤกษ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพงศ์ สุวรรณกวิน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. เดวิด บรรณเจตพงศ์ชัย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพงศ์ สุวรรณกวิน)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. แนบบุญ หุนเจริญ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร. สมภพ ผลไม้)

ศิวัช ชัยฤกษ์ : การควบคุมกำลังรีแอกทีฟของอินเวอร์เตอร์สามเฟสเชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้าสำหรับการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ (REACTIVE-POWER CONTROL OF THREE-PHASE GRID-CONNECTED INVERTERS FOR PV GENERATION) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. สุรพงศ์ สุวรรณกวิน, 91 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการควบคุมกำลังรีแอกทีฟผ่านอินเวอร์เตอร์เพื่อคุมระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ พร้อมทั้งมีความสามารถในการทนต่อสภาวะแรงดันตกชั่วขณะ และการป้องกันการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดด ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในข้อกำหนดการเชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้า จุดเด่นของระบบนี้คือสามารถช่วยสนับสนุนระบบโครงข่ายไฟฟ้าให้มีเสถียรภาพมากขึ้น ระบบแปลงผันที่นำเสนอเป็นแบบไร้หม้อแปลงความถี่สาย ใช้วงจรกรองผ่านต่ำแบบ LCL และอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับ โดยการจำลองด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink และผลการทดสอบกับอินเวอร์เตอร์เครื่องต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการนั้นแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถจ่ายกำลังรีแอกทีฟและกำลังจริงพร้อมกับควบคุมแรงดันให้อยู่ภายใต้ข้อกำหนดโครงข่ายไฟฟ้าได้ ในขณะที่เกิดสภาวะแรงดันตกชั่วขณะ ระบบสามารถจ่ายกำลังรีแอกทีฟเพื่อช่วยสนับสนุนเสถียรภาพของระบบได้ตลอดช่วงเวลาที่กำหนดตามข้อกำหนดฯ รวมไปถึงเมื่อระบบผลิตไฟฟ้าฯ อยู่ในสภาวะการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดด ระบบสามารถตรวจจับสภาวะดังกล่าวและปลดวงจรออกจากระบบโครงข่ายไฟฟ้าภายในระยะเวลาที่ระบุไว้ในข้อกำหนดการเชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้า



ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2557

5470396821 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: PHOTOVOLTAIC GENERATION, GRID-CONNECTED INVERTER, REACTIVE-POWER CONTROL, GRID CODES

SIWAT CHAIRERK: REACTIVE-POWER CONTROL OF THREE-PHASE GRID-CONNECTED INVERTERS FOR PV GENERATION. ADVISOR: ASST. PROF. SURAPONG SUWANKAWIN, Ph.D., 91 pp.

In this thesis, a reactive-power control scheme of three-phase grid-connected inverters for photovoltaic generation is proposed. With regard to the grid codes, the proposed control scheme takes three features into consideration: 1) to maintain the voltage at Point of Common Coupling within the acceptable range, 2) to support the electrical grid with Fault-Ride-Through operation in order to strengthen the stability of the power system, and 3) to support the electrical grid with the Anti-Islanding operation. The simulation using Matlab / Simulink and experimentation with the prototype inverter are carried out with a 3-level 3-phase inverter including a grid-tied LCL filter. The results show that the proposed concept can, not only, deliver both real power and reactive power, but also, simultaneously regulate the voltage at the PCC according to the grid codes. When there is an electrical fault, the system can successfully operate the fault-ride-through function during the fault interval. Furthermore, the system can detect the islanding and disconnect from the grid within the specified time according to the grid codes when the islanding occurs.

Department: Electrical Engineering Student's Signature

Field of Study: Electrical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และบริษัท ไทยตาบูซิ อิเล็กทริก จำกัด ภายใต้โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม-พวอ. ระดับปริญญาโท (ความเห็นในรายงานผลการวิจัยเป็นของผู้รับทุน สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และบริษัท ไทยตาบูซิ อิเล็กทริก จำกัด ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป) ความช่วยเหลือดูแลและเอาใจใส่อย่างดียิ่ง จากอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพงศ์ สุวรรณวิน ขอขอบคุณ นายกิติศักดิ์ อุตมโชค เป็นอย่างยิ่ง ที่ช่วยเหลือทางด้านการสร้างอินเวอร์เตอร์เครื่องต้นแบบ ขอขอบคุณ นายกรวิชญ์ นิยมเสถียร ที่ได้ออกแบบวงจรภาคกำลังและนำมาใช้ในโครงการวิจัยนี้ ขอขอบคุณเพื่อนๆ นิสิตร่วมรุ่นที่สังกัดห้องปฏิบัติการวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ที่ได้ร่วมทุกข์ร่วมสุขกันมาตลอดระยะเวลาการศึกษา สุดท้ายขอขอบคุณบิดามารดาและญาติพี่น้อง ที่ให้กำลังใจและช่วยเหลือในด้านอื่นๆ ขณะกำลังศึกษาวิจัยด้วยดีเสมอมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเบื้องต้น	1
1.2 อินเวอร์เตอร์กับการควบคุมกำลังรีแอกทีฟ	2
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	4
บทที่ 2 บทบาทของการควบคุมกำลังรีแอกทีฟต่อการสนับสนุนระบบโครงข่ายไฟฟ้าตาม ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่เกี่ยวข้อง	5
2.2 ความสามารถในการทนต่อสภาวะแรงดันตกชั่วขณะ	7
2.3 การป้องกันการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดด	9
บทที่ 3 ระบบควบคุมกำลังรีแอกทีฟของอินเวอร์เตอร์สามเฟสเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า	12
3.1 หลักการทำงานพื้นฐาน.....	12
3.2 วิธีควบคุมกำลังรีแอกทีฟ	13
3.3 โพรไฟล์สำหรับกำหนดขนาดกระแสคำสั่ง.....	14
3.4 การรักษาระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อโดยใช้วิธีควบคุมกำลังรีแอกทีฟ	15
3.4.1 ทฤษฎี.....	15
3.4.2 เงื่อนไขที่ใช้ควบคุมแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ	16

3.4.2.1	การทำงานในภาวะปกติ	16
3.4.2.2	การทำงานเมื่อเกิดภาวะแรงดันเกิน	17
3.4.2.3	การทำงานเมื่อเกิดภาวะแรงดันตก	19
3.5	ความสามารถในการทนต่อสภาวะแรงดันตกชั่วขณะ	22
3.6	การป้องกันการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดด	25
3.7	ผลการจำลองการทำงาน	28
บทที่ 4	ผลการทดสอบการทำงานของเครื่องต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการ	38
4.1	โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์เครื่องต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการ	38
4.1.1	วงจรภาคกำลัง	40
4.1.2	วงจรตรวจจับแรงดันและกระแส	41
4.1.3	วงจรควบคุม	41
4.2	วิธีการคำนวณกระแสที่ไหลในตัวเก็บประจุของวงจรกรองแบบผ่านต่ำ	42
4.3	เงื่อนไขการทดสอบการทำงาน	44
4.4	ผลการทดสอบการทำงาน	45
4.4.1	การทดสอบส่งจ่ายกระแสพิกัดเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า	45
4.4.2	การทดสอบผลตอบแทนชั่วคราวของระบบควบคุม	52
4.4.3	การทดสอบการแปรผันค่ากระแสคำสั่งตามวิธีที่กำหนด	52
4.4.4	การทดสอบการรักษาระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ	60
4.4.5	การทดสอบความสามารถในการทนต่อสภาวะแรงดันตกชั่วขณะ	66
4.4.6	การทดสอบการป้องกันการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดด	71
บทที่ 5	บทสรุปและข้อเสนอแนะ	73
5.1	บทสรุปผลการวิจัย	73
5.2	ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต	73

รายการอ้างอิง 75

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 78



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดการเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์เข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับการรักษา ระดับแรงดัน.....	6
ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดการเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์เข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับ ความสามารถในการทนต่อสภาวะแรงดันตกชั่วขณะ	7
ตารางที่ 2.3 ช่วงเวลาที่อินเวอร์เตอร์จะต้องปลดจากโครงข่ายไฟฟ้าหากเกิดภาวะการจ่ายไฟฟ้า แบบระบบไฟฟ้าแยกโดด	11
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบ	28
ตารางที่ 3.2 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลองระบบ	30
ตารางที่ 4.1 พิกัดของอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรภาคกำลัง	40
ตารางที่ 4.2 เงื่อนไขการทดสอบการทำงาน	44
ตารางที่ 4.3 ขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกตามข้อกำหนดฯ ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.....	45
ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการทดสอบการรักษาระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ.....	60

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้า	1
รูปที่ 1.2 ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบสแตนด์อโลน	1
รูปที่ 2.1 ผลกระทบต่อแรงดันในระบบจำหน่ายเมื่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าในปริมาณสูง	5
รูปที่ 2.2 กราฟของความสามารถในการทนต่อสถานะแรงดันตกชั่วขณะสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก ตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อฯ ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	8
รูปที่ 2.3 แหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายตัวและโหลดค่าหนึ่งเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อเดียวกัน	9
รูปที่ 2.4 บริเวณที่ตรวจจับไม่ได้.....	10
รูปที่ 3.1 แผนภาพอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้าสามเฟสที่มีส่วนควบคุมกำลังรีแอกทีฟ	13
รูปที่ 3.2 กรอบอ้างอิงของกระแสในแกน d, q ที่ใช้แรงดันเป็นเวกเตอร์อ้างอิง	13
รูปที่ 3.3 โพรไฟล์สำหรับกำหนดขนาดกระแสคำสั่ง i_d^* ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์	15
รูปที่ 3.4 วงจรสมมูลของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ต่อเชื่อมกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า.....	15
รูปที่ 3.5 ขนาดของกระแส i_d^* , i_q^* สำหรับเงื่อนไขการทำงานในภาวะปกติ	16
รูปที่ 3.6 ขนาดของกระแสคำสั่งในแต่ละเงื่อนไขการทำงาน.....	17
รูปที่ 3.7 ขนาดกระแสคำสั่งในแต่ละจุดทำงาน กรณีอินเวอร์เตอร์ได้รับกระแสคำสั่ง i_d^* ค่อนข้างสูง.....	19
รูปที่ 3.8 ขนาดของกระแสคำสั่งในแต่ละจุดทำงาน.....	20
รูปที่ 3.9 ขนาดกระแสคำสั่งในแต่ละจุดทำงาน กรณีอินเวอร์เตอร์ได้รับกระแสคำสั่ง i_d^* ค่อนข้างสูง.....	20
รูปที่ 3.10 ผังงานของการควบคุมกระแสต่อเงื่อนไขการรักษาระดับแรงดันที่นำเสนอ	21

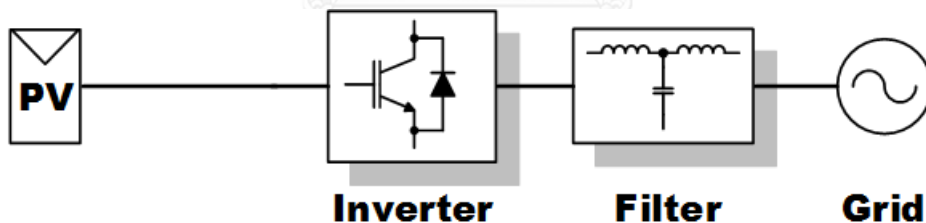
รูปที่ 3.11 (ก) รูปคลื่นแรงดันแต่ละเฟสซึ่งเกิดความผิดพลาดตั้งแต่เวลา 0.04 s.....	23
รูปที่ 3.12 การตรวจจับแรงดันลำดับบวกโดยใช้วงจรกรองแบบผ่านต่ำ.....	24
รูปที่ 3.13 ขนาดของกระแส i_d^* , i_q^* เมื่อเกิดภาวะความผิดพลาดขึ้นในระบบโครงข่ายไฟฟ้า.....	24
รูปที่ 3.14 วงจรทดสอบความสามารถในการตรวจจับสภาวะการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้า แยกโดดของอินเวอร์เตอร์ตามมาตรฐาน IEC-62116.....	25
รูปที่ 3.15 รูปคลื่นของกระแสคำสั่งในแกน q ที่บวกเพิ่มไปในวงรอบควบคุม.....	27
รูปที่ 3.16 แผนภาพเส้นเดี่ยวของระบบที่ใช้จำลองการทำงาน.....	28
รูปที่ 3.17 ผลจำลองการควบคุมระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ.....	32
รูปที่ 3.18 ผลจำลองการทำงานการควบคุมกำลังรีแอกทีฟสำหรับความสามารถในการทนต่อ สภาวะแรงดันตกชั่วขณะเกิดความผิดพลาดแบบสมมาตร.....	34
รูปที่ 3.19 ผลจำลองการทำงานการควบคุมกำลังรีแอกทีฟสำหรับความสามารถในการทนต่อ สภาวะแรงดันตกชั่วขณะเกิดความผิดพลาดแบบอสมมาตร.....	35
รูปที่ 3.20 ผลจำลองการทำงานการควบคุมกำลังรีแอกทีฟสำหรับการป้องกันการจ่ายไฟฟ้าแบบ ระบบไฟฟ้าแยกโดด.....	37
รูปที่ 4.1 ภาพรวมของอินเวอร์เตอร์เครื่องต้นแบบที่ใช้สำหรับทดสอบการทำงานของ การควบคุมกำลังรีแอกทีฟ.....	39
รูปที่ 4.2 วงจรสมมูลที่ใช้ในการคำนวณกระแสที่ไหลในตัวเก็บประจุของวงจรกรองแบบผ่านต่ำ.....	42
รูปที่ 4.3 รูปคลื่นแรงดันและกระแสเฟส a ของการทดสอบกรณีที่ 1.....	46
รูปที่ 4.4 สเปกตรัมของกระแสด้านออกของรูปคลื่นกระแสในกรณีที่ 1 เปรียบเทียบกับขีดจำกัด กระแสฮาร์มอนิกตามข้อกำหนดๆ ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.....	47
รูปที่ 4.5 รูปคลื่นแรงดันและกระแสเฟส a ของการทดสอบกรณีที่ 2.....	48
รูปที่ 4.6 สเปกตรัมของกระแสด้านออกของรูปคลื่นกระแสในกรณีที่ 2 เปรียบเทียบกับขีดจำกัด กระแสฮาร์มอนิกตามข้อกำหนดๆ ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.....	49
รูปที่ 4.7 รูปคลื่นแรงดันและกระแสเฟส a ของการทดสอบกรณีที่ 3.....	50
รูปที่ 4.8 สเปกตรัมของกระแสด้านออกของรูปคลื่นกระแสในกรณีที่ 3 เปรียบเทียบกับขีดจำกัด กระแสฮาร์มอนิกตามข้อกำหนดๆ ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.....	51

รูปที่ 4.9	วิธีของกระแสคำสั่งที่ใช้สำหรับการทดสอบกรณีที่ 7	52
รูปที่ 4.10	วิธีของกระแสคำสั่งที่ใช้สำหรับการทดสอบกรณีที่ 8	53
รูปที่ 4.11	วิธีของกระแสคำสั่งที่ใช้สำหรับการทดสอบกรณีที่ 9	53
รูปที่ 4.12	รูปคลื่นกระแสและแรงดันเฟส a และสัญญาณกระแสคำสั่งในการทดสอบกรณีที่ 4.....	54
รูปที่ 4.13	รูปคลื่นกระแสและแรงดันเฟส a และสัญญาณกระแสคำสั่งในการทดสอบกรณีที่ 5.....	55
รูปที่ 4.14	รูปคลื่นกระแสและแรงดันเฟส a และสัญญาณกระแสคำสั่งในการทดสอบกรณีที่ 6.....	56
รูปที่ 4.15	รูปคลื่นของปริมาณต่างๆ ที่ตรวจวัดได้สำหรับการทดสอบกรณีที่ 7	57
รูปที่ 4.16	รูปคลื่นของปริมาณต่างๆ ที่ตรวจวัดได้สำหรับการทดสอบกรณีที่ 8	58
รูปที่ 4.17	รูปคลื่นของปริมาณต่างๆ ที่ตรวจวัดได้สำหรับการทดสอบกรณีที่ 9	59
รูปที่ 4.18	รูปคลื่นกระแส แรงดัน สัญญาณกระแสคำสั่งต่างๆ ในการทดสอบกรณีที่ 10.....	62
รูปที่ 4.19	รูปคลื่นกระแส แรงดัน สัญญาณกระแสคำสั่งต่างๆ ในการทดสอบกรณีที่ 11.....	63
รูปที่ 4.20	รูปคลื่นกระแส แรงดัน สัญญาณกระแสคำสั่งต่างๆ ในการทดสอบกรณีที่ 12.....	64
รูปที่ 4.21	รูปคลื่นกระแส แรงดัน สัญญาณกระแสคำสั่งต่างๆ ในการทดสอบกรณีที่ 13.....	65
รูปที่ 4.22	ขนาดของตัวคูณแรงดันระหว่างสายที่ใช้ในการจำลองความผิดพลาด	66
รูปที่ 4.23	รูปคลื่นกระแส แรงดัน สัญญาณกระแสคำสั่งต่างๆ ในการทดสอบกรณีที่ 14.....	68
รูปที่ 4.24	รูปคลื่นกระแส แรงดัน สัญญาณกระแสคำสั่งต่างๆ ในการทดสอบกรณีที่ 15.....	69
รูปที่ 4.25	รูปคลื่นกระแส แรงดัน สัญญาณกระแสคำสั่งต่างๆ ในการทดสอบกรณีที่ 16.....	70
รูปที่ 4.26	วงจรที่ใช้ทดสอบการป้องกันการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดด	71
รูปที่ 4.27	รูปคลื่นกระแส แรงดัน และความถี่ที่ตรวจจับได้ ในการทดสอบกรณีที่ 17.....	72

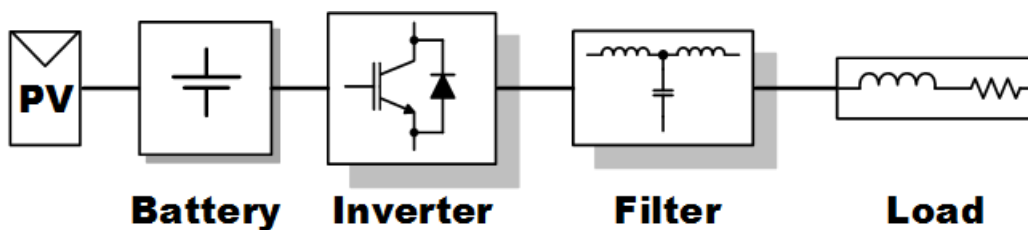
บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเบื้องต้น

ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic System) คือระบบที่ประกอบด้วย 3 ส่วนหลักได้แก่ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Panel) ทำหน้าที่แปลงรูปแบบพลังงานจากพลังงานแสงอาทิตย์ให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้าในรูปแบบไฟฟ้ากระแสตรง อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ทำหน้าที่แปลงผันแรงดันไฟตรงที่ได้จากแผงเซลล์สุริยะ ให้กลายเป็นแรงดันไฟสลับหนึ่งเฟสหรือสามเฟสตามประเภทของอินเวอร์เตอร์ และวงจรกรองแบบผ่านต่ำ (Low Pass Filter) ทำหน้าที่กรองความถี่สวิตซ์จากอินเวอร์เตอร์ให้เหลือแต่ความถี่สาย นอกจากนี้ ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ยังสามารถแบ่งได้ตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน หากมีวัตถุประสงค์เพื่อป้อนพลังงานไฟฟ้าเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า (Grid) จะเรียกว่าเป็นระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า (Grid-Connected Photovoltaic System) ดังรูปที่ 1.1 แต่หากมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นแหล่งพลังงานให้กับโหลดค่าหนึ่ง โดยไม่มีการเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า จะเรียกว่าเป็นระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบสแตนด์อโลน (Stand-alone Photovoltaic System) ซึ่งมักจะต้องมีแบตเตอรี่เป็นแหล่งสำรองพลังงานไฟฟ้าต่อพ่วงด้วย ดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.1 ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า



รูปที่ 1.2 ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบสแตนด์อโลน

ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อบริเวณระบบโครงข่ายไฟฟ้าเริ่มมีบทบาทมากยิ่งขึ้นในภาคอุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) เพราะประเทศไทยเป็นพื้นที่ที่มีศักยภาพด้านพลังงานแสงอาทิตย์ โดยมีความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ยประมาณ 18.2 MJ/m^2 ประกอบกับมีการส่งเสริมจากภาครัฐให้มีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน ดังที่กระทรวงพลังงานจัดทำแผนการพัฒนากำลังผลิตพลังงานหมุนเวียนและพลังงานทางเลือก 25% ใน 10 ปี (พ.ศ. 2555-2564) โดยกำหนดเป้าหมายการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ไว้ 2,000 MW ซึ่งสัดส่วนใหญ่เป็นการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

1.2 อินเวอร์เตอร์กับการควบคุมกำลังรีแอกทีฟ

โดยทั่วไปเป้าหมายของการพัฒนาการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนเช่นพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมต่างให้ความสำคัญแก่การควบคุมกำลังงานจริงให้ได้ค่าสูงสุด โดยมุ่งเน้นไปในด้านประสิทธิภาพและต้นทุนของราคาพลังงานต่อหน่วยเป็นสำคัญ ซึ่งจะเห็นได้จากรายละเอียดทางเทคนิคของอุปกรณ์เช่น แผงเซลล์สุริยะ และอินเวอร์เตอร์ที่ผู้ผลิตต่างหยาบยกประเด็นในเรื่องของประสิทธิภาพที่สูงขึ้นในขณะที่ราคามีแนวโน้มที่ลดลง แต่นอกเหนือไปจากความพยายามที่จะนำพลังงานหมุนเวียนดังกล่าวมาแปลงผันเป็นพลังงานไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพสูงที่สุดเท่าที่จะทำได้แล้ว สิ่งที่สำคัญอีกประเด็นหนึ่งคือ คุณภาพ เสถียรภาพ และความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีแหล่งผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนเชื่อมต่ออยู่เป็นจำนวนมาก สำหรับประเทศไทย หน่วยงานซึ่งมีหน้าที่ดูแลกำกับระบบจำหน่าย ได้แก่ การไฟฟ้าส่วนกลาง และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ได้กำหนดกฎเกณฑ์ของอินเวอร์เตอร์สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าไว้ในข้อกำหนดการเชื่อมต่อบริเวณโครงข่ายไฟฟ้า (Grid Codes) [1] - [2] ส่งผลให้อินเวอร์เตอร์อันเป็นอุปกรณ์หลักในการแปลงผันพลังงานในยุคใหม่จำเป็นต้องมีฟังก์ชันการทำงานเพิ่มเติมในหัวข้อต่างๆ ดังนี้ [3]

1. การรักษาระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ
2. ความสามารถในการทนต่อสถานะแรงดันตกชั่วขณะ (Fault-Ride-Through)
3. การป้องกันการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดด (Anti-Islanding Detection)

โดยเฉพาะการรักษาระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ (หัวข้อที่ 1) ตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อบริเวณโครงข่ายไฟฟ้าบังคับให้ระบบผลิตไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้าจะต้องสามารถควบคุมตัวประกอบกำลัง หรือกำลังรีแอกทีฟเพื่อรักษาระดับแรงดัน ณ จุดเชื่อมต่อให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน สำหรับหัวข้อที่ 2-3 นั้นวิธีการควบคุมกำลังรีแอกทีฟเป็นเทคนิคหนึ่งที่สามารถใช้เพื่อสนับสนุนระบบโครงข่ายไฟฟ้าตามเงื่อนไขที่กำหนดในแต่ละหัวข้อได้

อย่างไรก็ตาม จากการศึกษางานวิจัยต่างๆ ผู้วิจัยพบว่ามีการศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมกำลังรีแอกทีฟของอินเวอร์เตอร์ แต่ก็ไม่ได้เน้นในส่วนของการช่วยสนับสนุนโครงข่ายตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า และยังขาดการอธิบายเงื่อนไขสำหรับวิธีควบคุมกำลังรีแอกทีฟของอินเวอร์เตอร์เพื่อช่วยสนับสนุนระบบโครงข่ายไฟฟ้าตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าอย่างละเอียดในหลายๆ ด้านด้วยกัน รวมถึงการป้องกันการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดดที่พิจารณาตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อภายในประเทศ

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อศึกษาและออกแบบระบบควบคุมของอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าสามเฟส ที่ให้ความสำคัญกับการควบคุมกำลังรีแอกทีฟเพื่อช่วยสนับสนุนโครงข่ายไฟฟ้าใน 3 ประเด็น คือ การรักษาระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ ความสามารถในการทนต่อสภาวะแรงดันตกชั่วขณะ และการป้องกันการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดด โดยจะพิจารณาข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่ครอบคลุมถึงข้อกำหนดการเชื่อมต่อๆ ภายในประเทศ

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

ออกแบบระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่มีส่วนควบคุมกำลังรีแอกทีฟสำหรับช่วยสนับสนุนระบบโครงข่ายไฟฟ้า ใน 3 ฟังก์ชันหลัก ได้แก่ การรักษาระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ ความสามารถในการทนต่อสภาวะแรงดันตกชั่วขณะ และการป้องกันการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดด ทดสอบแนวคิดทางทฤษฎีด้วยการจำลองผลการดำเนินงานโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ และพัฒนาฮาร์ดแวร์เพื่อใช้ทดสอบจริงในทางปฏิบัติ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เป็นแนวทางในการพัฒนาอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ที่นอกจากมีประสิทธิภาพสูงแล้วยังมีส่วนช่วยรักษาเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้ากำลัง ภายใต้ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย

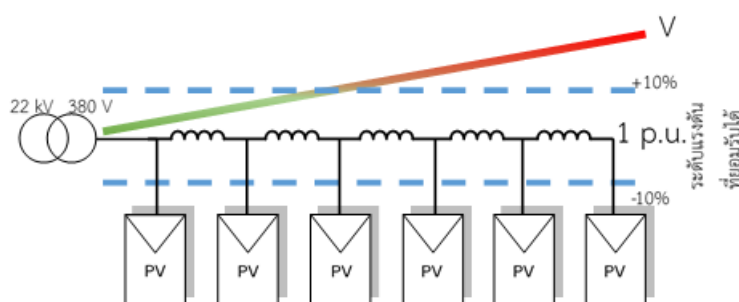
1.6 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

- 1) ศึกษาข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าสำหรับอินเวอร์เตอร์
- 2) ศึกษาหลักการควบคุมกำลังรีแอกทีฟในระบบโครงข่ายไฟฟ้า
- 3) พัฒนารูปแบบควบคุมกำลังรีแอกทีฟสำหรับอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า
- 4) ออกแบบตัวควบคุมกำลังรีแอกทีฟสำหรับอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า
- 5) จำลองระบบโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อหาเงื่อนไขและวิธีการที่เหมาะสม รวมถึงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ
- 6) พัฒนาฮาร์ดแวร์เพื่อใช้ทดสอบการทำงานที่ภาวะแรงดันเกิน ภาวะที่เกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้า และการป้องกันภาวะการฉ้อจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดด
- 7) เก็บข้อมูลผลการทดลอง ประเมินผล สรุปผล
- 8) เขียนวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 บทบาทของการควบคุมกำลังรีแอกทีฟต่อการสนับสนุนระบบโครงข่ายไฟฟ้า ตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อบนระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่เกี่ยวข้อง

2.1 การรักษาระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ

ปัญหาหนึ่งของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนคือช่วงเวลาการแปลงผันพลังงานนั้นมีลักษณะไม่ต่อเนื่อง ในกรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์สามารถผลิตไฟฟ้าได้มาก แต่ความต้องการใช้ไฟฟ้าในขณะนั้นมีน้อย อาจทำให้เกิดปรากฏการณ์แรงดันเกิน (overvoltage) ซึ่งหากแก้ไขโดยปลดบางระบบออกจากระบบโครงข่ายไฟฟ้าเพื่อจำกัดพลังงานที่ป้อนเข้าสู่ระบบโครงข่ายฯ จะทำให้เสียโอกาสในการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ ผลกระทบของระดับแรงดันที่เพิ่มขึ้นเมื่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าในปริมาณสูงแสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ผลกระทบต่อแรงดันในระบบจำหน่ายเมื่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าในปริมาณสูง

สำหรับประเทศไทย ข้อกำหนดการเชื่อมต่อบนระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับการรักษาระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ (Point of Common Coupling, PCC) ของการไฟฟ้านครหลวงและการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค แสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดการเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์เข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับการรักษา
ระดับแรงดัน

การไฟฟ้านครหลวง		การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	
ช่วงแรงดันเฟส (โวลต์)	ตัดวงจรภายในเวลา (วินาที)	ช่วงแรงดันเฟส (ร้อยละ)	ตัดวงจรภายในเวลา (วินาที)
$V < 115$	0.1	$V < 50\%$	0.3
$115 \leq V < 200$	2.0	$50\% \leq V < 90\%$	2.0
$200 \leq V < 240$	ทำงานต่อเนื่อง	$90\% \leq V \leq 110\%$	ทำงานต่อเนื่อง
$240 \leq V < 311$	2.0	$110\% < V < 120\%$	1.0
$V \geq 311$	0.05	$V \geq 120\%$	0.16

จากตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดๆ สำหรับการรักษาระดับแรงดันของหน่วยงานทั้งสองสามารถ
แบ่งช่วงแรงดันออกได้เป็น 5 ช่วง ได้แก่ ช่วงแรงดันตกมาก ช่วงแรงดันตก ช่วงแรงดันปกติ ช่วง
แรงดันเกิน และช่วงแรงดันเกินมาก เมื่อพิจารณาความกว้างของช่วงแรงดันตกและช่วงแรงดันเกิน
พบว่าในช่วงแรงดันเกินจะแคบกว่าช่วงแรงดันตก อีกทั้งเวลาที่กำหนดให้ตัดวงจรสำหรับการทำงาน
ในช่วงแรงดันเกินนั้นน้อยกว่าช่วงแรงดันตก ดังนั้นจะเห็นได้ว่าข้อกำหนดๆ ได้ให้ความสำคัญกับ
สถานการณ์แรงดันเกินอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งพิจารณาจากความเข้มงวดที่มีต่อสถานการณ์แรงดันเกิน
มากกว่าแรงดันตก

ในอนาคต หากสัดส่วนของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนมีปริมาณสูงจะไม่สามารถใช้
วิธีปลดระบบผลิตไฟฟ้าออกจากระบบโครงข่ายได้เมื่อเกิดเหตุการณ์ดังกล่าว เพราะจะกระทบต่อ
เสถียรภาพของระบบโครงข่ายไฟฟ้าซึ่งอาจทำให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นวงกว้าง การควบคุมกำลังรีแอกทีฟ
เป็นวิธีหนึ่งที่จะช่วยรักษาระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อโดยไม่ต้องปลดระบบผลิตไฟฟ้าออกจากระบบ
โครงข่าย บทความวิจัย [4] นำเสนอถึงการป้องกันแรงดันเกินด้วยการควบคุมกำลังรีแอกทีฟ โดยได้มีการ
วิเคราะห์และสร้างแบบจำลองอ้างอิงตามข้อมูลกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งในแต่ละช่วงเวลาในหนึ่งวันที่
ผลิตได้จริง ผลการจำลองพบว่าในขณะที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าได้
มากและส่งผลให้แรงดันที่จุดเชื่อมต่อสูงขึ้น ระบบควบคุมที่นำเสนอในบทความดังกล่าวสามารถ
ป้องกันสภาวะแรงดันเกินได้จริง

2.2 ความสามารถในการทนต่อสภาวะแรงดันตกชั่วขณะ

ความหมายของความสามารถในการทนต่อสภาวะแรงดันตกชั่วขณะ (Low Voltage Ride Through: LVRT, Fault Ride Through: FRT) คือการที่แหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Distributed Generator) โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ จำเป็นต้องเชื่อมต่ออยู่กับระบบโครงข่ายไฟฟ้าขณะเกิดความผิดปกติขึ้น พร้อมกับป้องกันกำลังรีแอกทีฟเพื่อช่วยสนับสนุนระบบโครงข่ายไฟฟ้าให้มีเสถียรภาพ สามารถลดปัญหาการเกิดไฟดับของระบบไฟฟ้าในวงกว้างได้ แนวปฏิบัติของแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายตัวขณะที่แรงดันของระบบโครงข่ายไฟฟ้าอยู่ในช่วงต่ำสุด และหลังจากที่ผ่านช่วงต่ำสุดไปแล้วนั้นมี 3 ประการ ซึ่งขึ้นอยู่กับข้อกำหนดการเชื่อมต่อๆ ของระบบโครงข่ายไฟฟ้าในแต่ละแห่ง ได้แก่

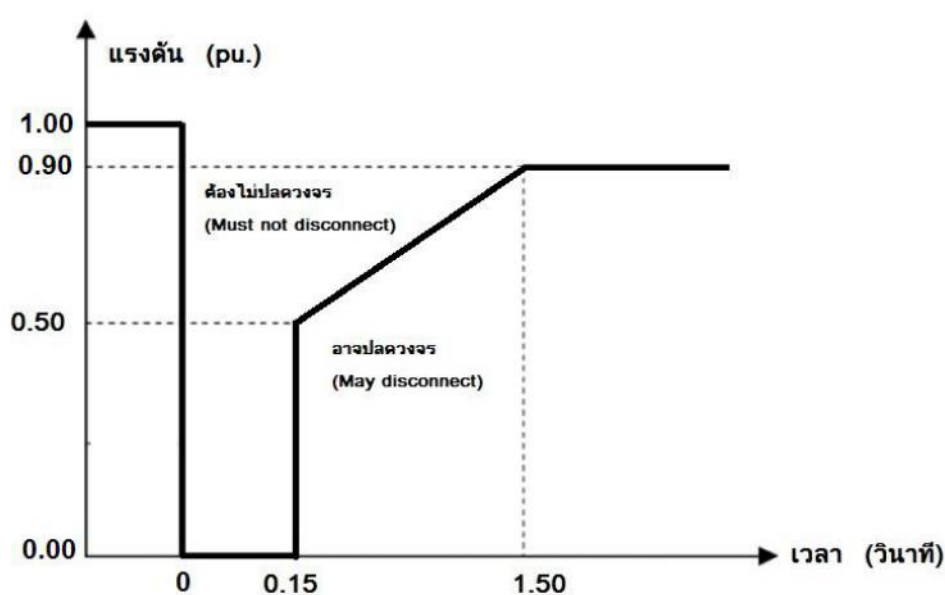
- ปลดออกจากระบบโครงข่ายไฟฟ้าชั่วคราวขณะแรงดันอยู่ในช่วงต่ำสุด และเชื่อมต่อกลับเข้าไปใหม่หลังจากระดับแรงดันเริ่มเพิ่มขึ้น
- ยังคงทำงานต่อเนื่องโดยไม่ต้องปลดออกจากระบบโครงข่ายไฟฟ้า
- เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า แต่ช่วยสนับสนุนโครงข่ายโดยการป้องกันกำลังรีแอกทีฟเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า

สำหรับข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการทนต่อสภาวะแรงดันตกชั่วขณะของการไฟฟ้านครหลวง และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค แสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดการเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์เข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการทนต่อสภาวะแรงดันตกชั่วขณะ

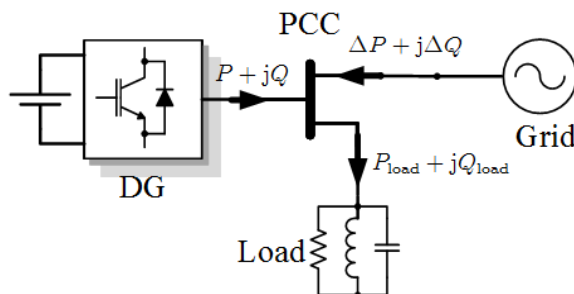
ระดับแรงดัน ณ จุดต่อเชื่อม	ระยะเวลาที่ระบบผลิตไฟฟ้าสามารถทนต่อสภาวะแรงดันตกได้	
	การไฟฟ้านครหลวง	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
ระดับแรงดันต่ำ (220/380 V)	ไม่ได้ระบุไว้ในข้อกำหนดฯ	ไม่ต้องการ
ระดับแรงดันสูง (สูงกว่า 220/380 V) กำลังผลิต < 500 kW		
ระดับแรงดันสูง (สูงกว่า 220/380 V) กำลังผลิต > 500 kW		ดังรูปที่ 2.2

นอกจากนี้ โดยทั่วไปข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการทนต่อสภาวะแรงดันตกชั่วขณะจะมีการกำหนดกราฟความสัมพันธ์ของระดับแรงดันทำงานกับเวลาที่อินเวอร์เตอร์ต้องไม่ปลดวงจรเมื่อเกิดความผิดปกติ ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 2.2 เป็นตัวอย่างกราฟของความสามารถในการทนต่อสภาวะแรงดันตกชั่วขณะสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (Very Small Power Producer, VSPP) ตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ซึ่งกราฟสำหรับการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์กับระบบโครงข่ายไฟฟ้าในต่างประเทศก็มีลักษณะที่คล้ายกัน

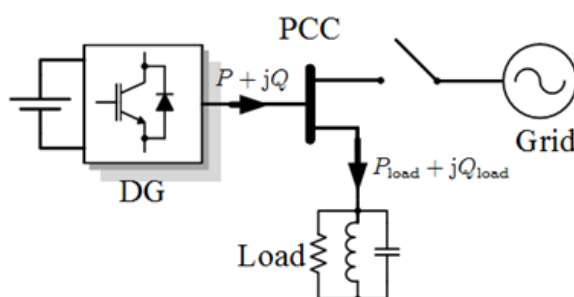


รูปที่ 2.2 กราฟของความสามารถในการทนต่อสภาวะแรงดันตกชั่วขณะสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก ตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อฯ ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

2.3 การป้องกันการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดด



(ก) ก่อนเกิดภาวะการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดด



(ข) ขณะเกิดภาวะการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดด

รูปที่ 2.3 แหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายตัวและโหลดค่าหนึ่งเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อเดียวกัน

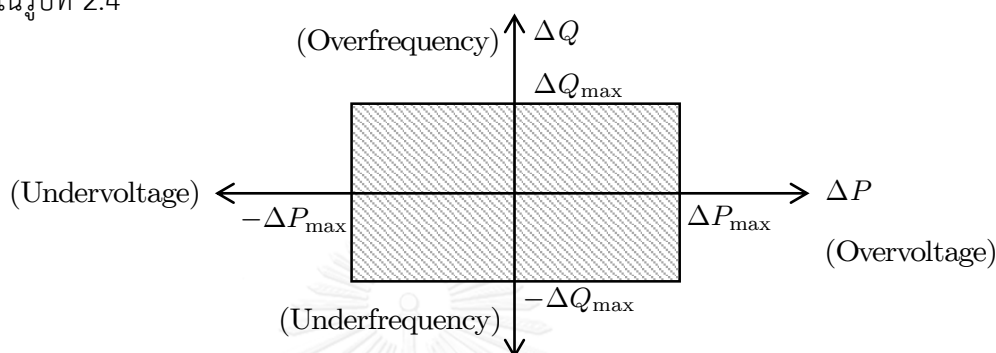
พิจารณาระบบไฟฟ้าย่อยดังรูปที่ 2.3 ซึ่งประกอบด้วยแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายตัวและโหลดค่าหนึ่ง ทั้งสองเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อเดียวกัน กำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่โหลดสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$P_{\text{load}} = P_{\text{DG}} + \Delta P \quad (2.1)$$

$$Q_{\text{load}} = Q_{\text{DG}} + \Delta Q \quad (2.2)$$

ตัวแปร ΔP , ΔQ แทนผลต่างระหว่างกำลังที่โหลดได้รับกับกำลังออกของแหล่งผลิตพลังงานฯ และเท่ากับกำลังที่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าจ่ายให้กับโหลด (กรณี ΔP , $\Delta Q > 0$) หรือกำลังที่ระบบโครงข่ายไฟฟ้ารับจากแหล่งผลิตพลังงานฯ (กรณี ΔP , $\Delta Q < 0$) ในสภาวะก่อนถูกแยกโดดที่ ΔP , ΔQ ค่าน้อยเช่นในกรณีที่กำลังจากแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายตัวเท่ากับกำลังที่โหลดได้รับ (ΔP , $\Delta Q = 0$) จะส่งผลให้ระดับแรงดันและความถี่ของระบบไฟฟ้าย่อยนั้นยังอยู่ในข้อกำหนดระบบการเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้า แหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายตัวจึงยังเชื่อมต่ออยู่

กับโครงข่ายโดยไม่ถูกปลดออก การทำงานขณะนี้อาจจัดว่าเป็นภาวะการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดด เงื่อนไขดังกล่าวจะเป็นจริงภายใน ΔP , ΔQ สูงสุดค่าหนึ่ง เมื่อนำความสัมพันธ์ระหว่าง ΔP , ΔQ สูงสุดที่ทำให้แหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายตัวถูกปลดจากระบบโครงข่ายไฟฟ้าตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อฯ มาวาดกราฟ จะได้ว่าบริเวณภายใน ΔP , ΔQ ที่ทำให้ระบบไฟฟ้าย่อยอยู่ในภาวะแยกโดดนี้เรียกว่า “บริเวณที่ตรวจจับไม่ได้” (Non-detection Zone) คือบริเวณที่แรเงาดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 บริเวณที่ตรวจจับไม่ได้

โดยทั่วไปวิธีป้องกันการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดดของอินเวอร์เตอร์สามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทหลักๆ ได้แก่

- 1.) วิธีเฉื่อยงาน (Passive Methods)
- 2.) วิธีไวงาน (Active Methods)

วิธีตรวจจับภาวะการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดดประเภทเฉื่อยงานอาศัยการเฝ้าสังเกตพารามิเตอร์ของระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่มักจะมีค่าเปลี่ยนแปลงขณะเกิดสภาวะการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดด เช่น ความถี่ แรงดัน เฟส และฮาร์โมนิก ข้อดีของวิธีนี้คือมีการตอบสนองที่รวดเร็ว แต่ข้อเสียคือวิธีเฉื่อยงานจะมีบริเวณที่ตรวจจับไม่ได้ที่กว้าง ในทางปฏิบัติ วิธีเฉื่อยงานมักใช้คู่กับวิธีไวงานซึ่งจุดเด่นคือสามารถกำจัดหรือลดบริเวณที่ตรวจจับไม่ได้ให้น้อยลง ทำให้ความผิดพลาดในการตรวจจับสภาวะการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดดน้อยลงด้วยเช่นกัน

วิธีไวงานอาศัยหลักการรบกวนระบบ (Perturbation) โดยป้อนสัญญาณขนาดเล็กที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์เพื่อให้แรงดันหรือความถี่ของระบบเปลี่ยนแปลงขณะเกิดสภาวะการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดด หรือเพื่อสังเกตพารามิเตอร์เช่น อิมพีแดนซ์ของระบบ เพื่อวิเคราะห์สถานะของระบบโครงข่ายไฟฟ้าขณะนั้นว่าอยู่ในสภาวะการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดดหรือไม่ อย่างไรก็ตามจากการศึกษาวิธีป้องกันการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดดประเภทไวงานดังที่ได้มีผู้เสนอในบทความต่างๆ เช่น วิธีเลื่อนความถี่แบบแอคทีฟ (Active Frequency Drift) [5], วิธีเลื่อนความถี่แบบแอคทีฟที่มีการป้อนกลับเชิงบวก (Active Frequency Drift with Positive Feedback) หรืออีกชื่อ

หนึ่งว่า Sandia Frequency Shift) ซึ่งพัฒนามาจากวิธีเลื่อนความถี่แบบแอกทีฟ [6], และวิธีฉีดกระแสฮาร์โมนิก (Harmonic Injection) [7] พบว่ามีข้อเสียในประเด็นเรื่องคุณภาพไฟฟ้า ซึ่งเป็นผลจากการรบกวนระบบด้วยการฉีดกระแสฮาร์โมนิก จึงทำให้รูปคลื่นกระแสผิดเพี้ยน ส่วนวิธีประมาณอิมพีแดนซ์ของระบบโครงข่ายไฟฟ้าโดยการแปรผันกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟ (Grid Impedance Estimation by Active and Reactive Power Variation) [8] มีข้อดีคือสามารถกำจัดบริเวณที่ตรวจจับไม่ได้ แต่ข้อเสียคือเกิดกำลังสูญเสียขึ้นเนื่องจากการป้อนกำลังจริงเข้าไปในระบบโครงข่ายไฟฟ้า และมีโอกาสตรวจจับผิดพลาดได้ง่ายขึ้นในกรณีที่มีระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อที่จุดเดียวกันหลายมอดูล ในขณะที่วิธีแปรผันกำลังรีแอกทีฟ (Reactive Power Variation) [9] โดยการป้อนกระแสความถี่ต่ำกว่าความถี่หลักมูลหลายๆ (ประมาณ 1 Hz) นั้นมีข้อดีคือสามารถกำจัดบริเวณที่ตรวจจับไม่ได้ ขณะเดียวกันวิธีดังกล่าวยังไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพไฟฟ้า แต่มีข้อเสียคือใช้เวลาตรวจจับนาน เช่นเดียวกับวิธีแปรผันกำลังรีแอกทีฟแบบสองข้างไม่สม่ำเสมอ (Intermittent Bilateral Reactive Power Variation) [10] ที่เกือบจะไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพไฟฟ้า เพราะใช้การควบคุมกำลังรีแอกทีฟในความถี่หลักมูลระบบแทนที่จะใช้กระแสฮาร์โมนิกดังเช่นวิธีอื่นๆ ที่กล่าวมาข้างต้น อีกทั้งสามารถตรวจจับสภาวะการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดดได้ในเวลาอันรวดเร็ว

ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดดของการไฟฟ้านครหลวง, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, มาตรฐาน IEC 62116 และมาตรฐาน IEEE 1547 แสดงได้ดังตารางที่ 2.3 ดังนี้

ตารางที่ 2.3 ช่วงเวลาที่อินเวอร์เตอร์จะต้องปลดจากโครงข่ายไฟฟ้าหากเกิดสภาวะการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดด

	การไฟฟ้านครหลวง	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	IEC-62116 / IEEE-1547
ช่วงเวลาที่อินเวอร์เตอร์จะต้องปลดจากระบบโครงข่ายไฟฟ้า	ภายใน 2 วินาที	ภายใน 2 วินาที	ภายใน 2 วินาที

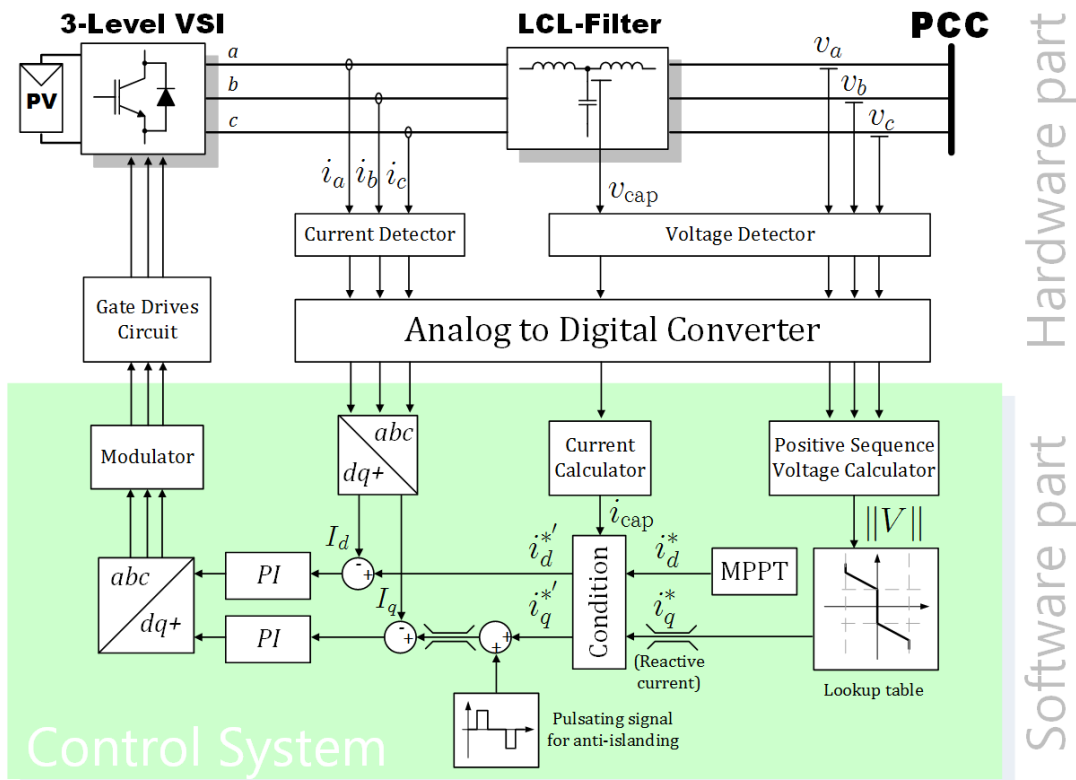
บทที่ 3 ระบบควบคุมกำลังรีแอกทีฟของอินเวอร์เตอร์สามเฟสเชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้า

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีควบคุมกำลังรีแอกทีฟ ตลอดจนถึงเงื่อนไขที่กำหนดไว้เพื่อใช้สั่งการทำงานให้แก่อินเวอร์เตอร์ ระบบควบคุมฯ ที่นำเสนอเน้นให้ความสำคัญกับการควบคุมกำลังรีแอกทีฟเพื่อสนับสนุนระบบโครงข่ายใน 3 หัวข้อ ได้แก่ การรักษาระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ ความสามารถในการทนต่อสภาวะแรงดันตกชั่วขณะ และการป้องกันการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดด โดยจะเริ่มกล่าวถึงหลักการงานพื้นฐาน วิธีการควบคุมกำลังรีแอกทีฟ และต่อเนื่องไปยังการประยุกต์ใช้วิธีควบคุมกำลังรีแอกทีฟมาสร้างเงื่อนไขเพื่อใช้สั่งการทำงานอินเวอร์เตอร์ในหัวข้อต่างๆ และท้ายสุดการจำลองการทำงานของระบบควบคุมฯ ที่นำเสนอเป็นสิ่งที่ช่วยยืนยันได้ว่าหลักการและแนวคิดที่นำเสนอนี้สามารถทำได้จริง

3.1 หลักการทำงานพื้นฐาน

รูปที่ 3.1 แสดงภาพรวมของอินเวอร์เตอร์สามเฟสเชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้าและแผนภาพการควบคุมที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ ระบบประกอบด้วยส่วนควบคุมกำลังจริง ซึ่งได้มาจากการคำนวณการติดตามจุดที่ให้กำลังสูงสุด (Maximum Power Point Tracking, MPPT) ส่วนควบคุมแรงดันที่จุดเชื่อมต่อผ่านการควบคุมกำลังรีแอกทีฟ และอินเวอร์เตอร์สามเฟสเชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้าผ่านวงจรกรองแบบผ่านต่ำแบบ LCL สำหรับอินเวอร์เตอร์ที่ใช้เป็นแบบสามระดับ ซึ่งช่วยลดผลกระทบจากการแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference, EMI) และระบบที่นำเสนอเป็นแบบไร้หม้อแปลง ซึ่งมีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับแบบใช้หม้อแปลงได้ดังนี้

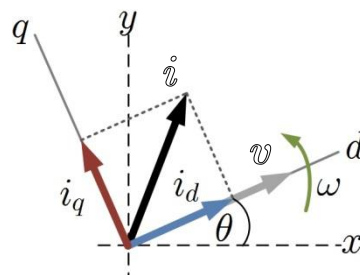
- 1.) น้ำหนักเบากว่าประเภทที่ใช้หม้อแปลงถึงร้อยละ 50-70
- 2.) มีขนาดเล็ก ใช้พื้นที่ติดตั้งน้อย
- 3.) ประสิทธิภาพสูง เนื่องจากไม่มีกำลังสูญเสียในหม้อแปลง
- 4.) มีราคาถูกกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับประเภทที่ใช้หม้อแปลง



รูปที่ 3.1 แผนภาพอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าสามเฟสที่มีส่วนควบคุมกำลังรีแอกทีฟ

3.2 วิธีควบคุมกำลังรีแอกทีฟ

รูปที่ 3.2 แสดงถึงแนวคิดในการควบคุมกระแสของอินเวอร์เตอร์ โดยอาศัยแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ เป็นเวกเตอร์อ้างอิงในแกน d อินเวอร์เตอร์จะควบคุมกำลังจริงผ่านกระแสแกน d และกำลังรีแอกทีฟผ่านกระแสแกน q กระแสออกจากอินเวอร์เตอร์ถูกควบคุมด้วยการคำนวณกระแสคำสั่งซึ่งมี 2 ประเภท ได้แก่ **กระแสคำสั่งปฏิกิริยา** i_d^* , i_q^* โดยกระแสคำสั่ง i_d^* ได้มาจากการคำนวณการติดตามจุดที่ให้กำลังสูงสุด ส่วนกระแสคำสั่ง i_q^* ได้จากโพรไฟล์สำหรับกำหนดขนาดกระแสคำสั่ง และกระแสคำสั่งทุติยภูมิ $i_d'^*$, $i_q'^*$ ซึ่งได้จากการพิจารณาเงื่อนไขในแต่ละโหมดการทำงาน



รูปที่ 3.2 กรอบอ้างอิงของกระแสในแกน d, q ที่ใช้แรงดันเป็นเวกเตอร์อ้างอิง

พิจารณาสมการของกำลังไฟฟ้าสามเฟสขณะหนึ่ง (Instantaneous Power)

$$s = \mathcal{V} \mathcal{I}^* \quad (3.1)$$

แรงดันที่จุดเชื่อมต่อ และกระแสอินเวอร์เตอร์ นิยามบนกรอบอ้างอิงหมุน dq ได้ดังสมการ

$$\mathcal{V} = v_d + jv_q \quad (3.2)$$

$$\mathcal{I} = i_d + ji_q \quad (3.3)$$

แทนค่าสมการ (3.2), (3.3) ลงในสมการ (3.1) จะได้ว่า

$$s = (v_d + jv_q)(i_d - ji_q) = v_d i_d + v_q i_q + j(v_q i_d - v_d i_q) \quad (3.4)$$

จากสมการ (3.4) ส่วนจริงและส่วนจินตภาพแสดงถึงขนาดของกำลังจริง และกำลังรีแอกทีฟ ซึ่งสามารถเขียนได้ว่า

$$p = v_d i_d + v_q i_q \quad (3.5)$$

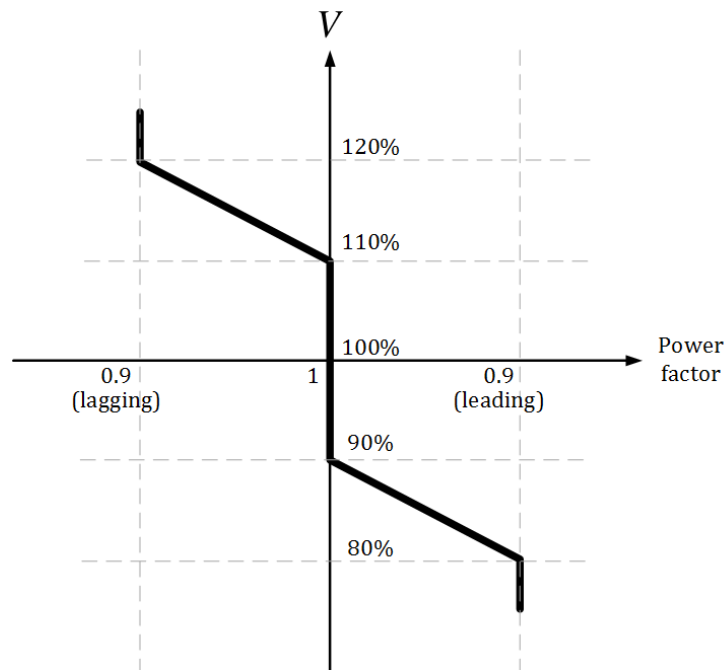
$$q = v_q i_d - v_d i_q \quad (3.6)$$

เนื่องจากใช้แรงดันที่จุดเชื่อมต่อเป็นเวกเตอร์อ้างอิงในแกน d ซึ่งจะได้ว่าแรงดันขณะหนึ่งมีแต่ขนาดขององค์ประกอบในแกน d และไม่มีขนาดขององค์ประกอบในแกน q ($v_q = 0$) ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังจริง และกำลังรีแอกทีฟ กับองค์ประกอบแรงดันและกระแสในแกน d, q สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_d i_d \\ -v_d i_q \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

3.3 โพรไฟล์สำหรับกำหนดขนาดกระแสคำสั่ง

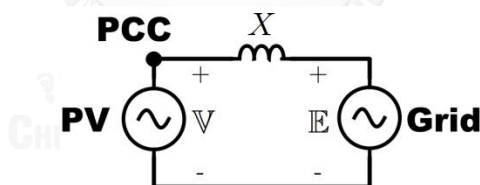
ขนาดกระแสคำสั่ง i_q^* อ้างอิงตามโพรไฟล์ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ ดังแสดงใน การกำหนดโพรไฟล์พิจารณาจากข้อกำหนดการเชื่อมต่อฯ ตามตารางที่ 2.1 ระบบควบคุมจะสั่งให้มีการรับ/จ่ายกำลังรีแอกทีฟเมื่อขนาดของแรงดันที่ตรวจจับได้อยู่นอกช่วงการทำงานต่อเนื่อง โดยขนาดของกระแสคำสั่ง i_q^* จะสัมพันธ์กับตัวประกอบกำลังด้านออก ซึ่งต้องไม่น้อยกว่า 0.9



รูปที่ 3.3 โพรไฟล์สำหรับกำหนดขนาดกระแสคำสั่ง i_q^* ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์

3.4 การรักษาระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อโดยใช้วิธีควบคุมกำลังรีแอกทีฟ

3.4.1 ทฤษฎี



รูปที่ 3.4 วงจรสมมูลของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ต่อเชื่อมกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า

ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อ และมีค่าความเหนี่ยวนำ X ซึ่งเป็นความเหนี่ยวนำอันเนื่องมาจากสายป้อนหรือความเหนี่ยวนำรั่วไหลอันเนื่องมาจากหม้อแปลง แสดงได้ดังรูปที่ 3.4 สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรีแอกทีฟที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ป้อนเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้ากับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อเป็นไปตามสมการ

$$Q = \frac{|E| (|E| - |V|)}{X} \quad (3.8)$$

จัดรูปสมการ (3.8) จะได้ว่า

$$|V| = |E| - \frac{QX}{|E|} \quad (3.9)$$

จากสมการ (3.9) จะเห็นว่ากำลังรีแอกทีฟเป็นปริมาณหนึ่งที่มีผลต่อระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ ดังนั้นการควบคุมแรงดันที่จุดเชื่อมต่อจึงสามารถทำได้ผ่านการควบคุมกำลังรีแอกทีฟ และการควบคุมกำลังรีแอกทีฟสามารถทำได้ผ่านการควบคุมกระแสในแกน q ดังที่ได้กล่าวมาในหัวข้อก่อนหน้า

3.4.2 เงื่อนไขที่ใช้ควบคุมแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ

จากรูปที่ 3.1 ในส่วนบล็อก Condition มีการกำหนดของเงื่อนไขที่ใช้ควบคุมดังต่อไปนี้

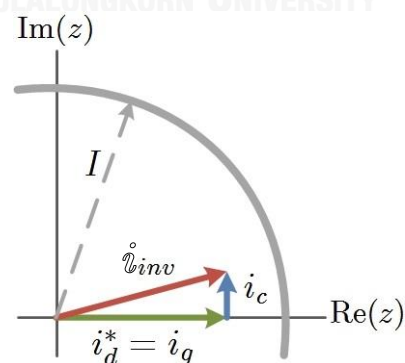
3.4.2.1 การทำงานในภาวะปกติ

เมื่อไม่มีภาวะแรงดันเกินหรือแรงดันตก และไม่มี ความผิดปกติเกิดขึ้นในระบบโครงข่ายไฟฟ้า อินเวอร์เตอร์จะจ่ายกำลังจริงเพียงอย่างเดียว ซึ่งได้รับกระแสคำสั่ง i_d^* จากการติดตามจุดให้กำลังงานสูงสุด แต่เนื่องจากอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับวงจรกรองแบบผ่านต่ำแบบ LCL โดยไม่ได้ต่อกับจุดเชื่อมต่อโดยตรง และเพื่อต้องการควบคุมตัวประกอบกำลังที่จุดเชื่อมต่อเท่ากับหนึ่ง จำเป็นต้องชดเชยกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ [11] ซึ่งตรวจจับผ่านตัวตรวจจับกระแสที่กึ่งของตัวเก็บประจุ (i_c) เมื่อพิจารณาการชดเชยกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุในวงจรกรองแบบผ่านต่ำแล้ว จะได้ว่ากระแสคำสั่ง i_d^* , i_q^* สำหรับการทำงานในภาวะปกติเป็นดังนี้

$$i_d^* = i_d^* \quad (3.10)$$

$$i_q^* = i_c \quad (3.11)$$

เงื่อนไขการทำงานตามสมการที่ (3.10) - (3.11) สามารถแสดงขนาดของกระแสคำสั่งได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ขนาดของกระแส i_d^* , i_q^* สำหรับเงื่อนไขการทำงานในภาวะปกติ

จากรูปที่ 3.5 เวกเตอร์ของกระแสคำสั่งอยู่ภายในบริเวณพื้นที่ใต้โค้งกระแสพิคัด / ซึ่งเงื่อนไขการทำงานขณะหนึ่งของอินเวอร์เตอร์อยู่ภายในบริเวณพื้นที่ใต้โค้งนั้น บริเวณขอบเขตของกระแสคำสั่ง i_d^* , i_q^* แสดงได้ดังสมการ

$$\|i_{inv}\| = \sqrt{(i_d^*)^2 + (i_q^*)^2} \leq I \quad (3.12)$$

3.4.2.2 การทำงานเมื่อเกิดภาวะแรงดันเกิน

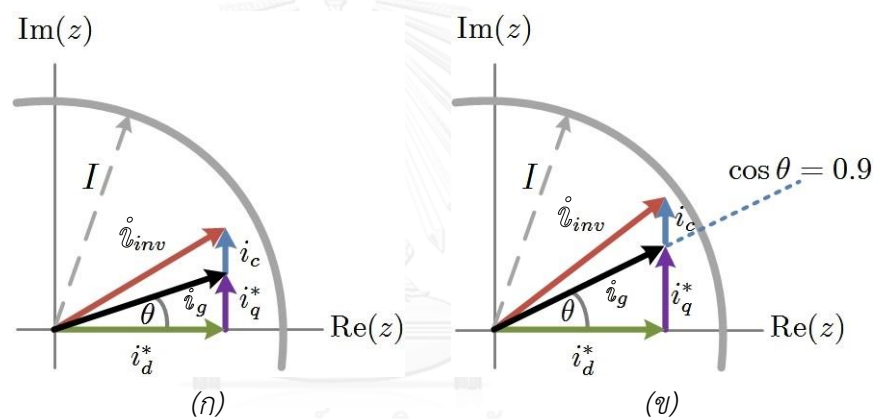
ประเด็นอื่นที่ต้องร่วมพิจารณานอกจากข้อกำหนดฯ ที่เกี่ยวกับช่วงระดับแรงดันดังตารางที่

2.1 ขณะเกิดภาวะแรงดันเกินได้แก่

- 1.) พิกัดกระแสของอินเวอร์เตอร์
- 2.) การควบคุมตัวประกอบกำลัง ซึ่งในข้อกำหนดฯ [2] ได้กำหนดให้อินเวอร์เตอร์จะต้องสามารถปรับค่าตัวประกอบกำลังได้ตั้งแต่ 0.9 นำหน้า ถึง 0.9 ล้าหลัง

กระแส i_q^* จากโพรไฟล์อ้างอิง ซึ่งมีการจำกัดกระแส i_q^* ไม่ให้เกินกระแสพิกัด I ก่อนพิจารณาเงื่อนไข ในกรณีที่เกิดภาวะแรงดันเกิน ขนาดของกระแส i_d^* , i_q^* จะมีขนาดเป็นไปตามรูปที่

3.6



รูปที่ 3.6 ขนาดของกระแสคำสั่งในแต่ละเงื่อนไขการทำงาน

(ก) ภาวะแรงดันเกินที่ตัวประกอบกำลังมากกว่า 0.9

(ข) ภาวะแรงดันเกินที่ตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9

จากรูปที่ 3.6 ขณะที่เกิดภาวะแรงดันเกิน อินเวอร์เตอร์ได้รับกระแสคำสั่ง i_q^* เพื่อควบคุมแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ กระแสคำสั่ง i_q^* จะมีขนาดเพิ่มขึ้นจนกว่าระดับแรงดันนั้นอยู่ในช่วงทำงานต่อเนื่องตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อฯ ขณะเดียวกันเพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดเกี่ยวกับการควบคุมตัวประกอบกำลัง จึงต้องมีการจำกัดขนาดของกระแสคำสั่ง i_q^* เพื่อให้ตัวประกอบกำลังมีค่าไม่น้อยกว่าที่กำหนดไว้ โดยค่าตัวประกอบกำลัง 0.9 นำหน้าและ 0.9 ล้าหลัง สามารถคิดเป็นผลต่างเฟสระหว่างแรงดันและกระแสเท่ากับ

$$\theta = \arccos(0.9) = 25.84^\circ \quad (3.13)$$

เพื่อควบคุมลักษณะสมบัติตามข้อกำหนดดังกล่าว จำเป็นต้องกำหนดบริเวณจุดทำงานไว้ภายใต้เส้นประที่แสดงในรูปที่ 3.6 (ข) โดยจะได้ว่ากระแสคำสั่ง i_d^* มากสุดสำหรับ i_d^* ค่าหนึ่งมีค่าไม่เกิน

$$i_{d\max}^* = i_d^* \tan(25.84^\circ) = 0.484i_d^* \quad (3.14)$$

ดังนั้นหากขนาดของกระแสคำสั่งลัพท์มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับกระแสพิกัดตั้งรูปที่ 3.6 (ก) – (ข) กระแสคำสั่ง i_d^* , i_q^* จะมีค่าดังสมการ

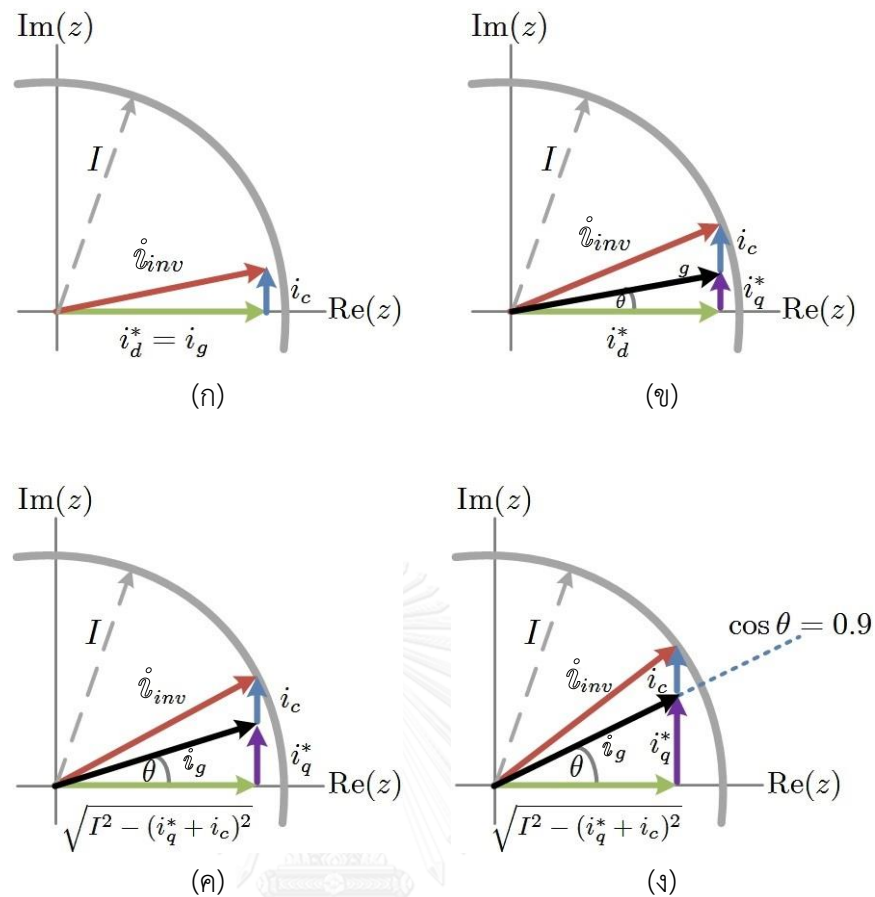
$$i_d^* = i_d^* \quad (3.15)$$

$$i_q^* = \begin{cases} i_q^* + i_c & , i_q^* < 0.484i_d^* \\ 0.484i_d^* + i_c & , i_q^* \geq 0.484i_d^* \end{cases} \quad (3.16)$$

สำหรับกรณีภาวะแรงดันเกินขณะที่อินเวอร์เตอร์ได้รับกระแสคำสั่ง i_d^* บางค่า ดังรูปที่ 3.7 (ก) เมื่อกระแสคำสั่ง i_q^* มีขนาดเพิ่มขึ้น แต่แรงดันยังไม่เข้าสู่ระดับทำงานปกติและไม่สามารถเพิ่มขนาดกระแส i_q^* ได้มากกว่านี้เนื่องด้วยเงื่อนไขข้อจำกัดขนาดกระแสพิกัดตั้งรูปที่ 3.7 (ข) จากเหตุดังกล่าว ทำให้ต้องลดขนาดของ i_d^* ดังรูปที่ 3.7 (ค)-(ง) ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของกระแสคำสั่ง i_d^* , i_q^* สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$i_d^* = \sqrt{I^2 - (i_q^* + i_c)^2} \quad (3.17)$$

$$i_q^* = \begin{cases} i_q^* + i_c & , i_q^* < 0.484i_d^* \\ 0.484i_d^* + i_c & , i_q^* \geq 0.484i_d^* \end{cases} \quad (3.18)$$



รูปที่ 3.7 ขนาดกระแสคำสั่งในแต่ละจุดทำงาน กรณีอินเวอร์เตอร์ได้รับกระแสคำสั่ง i_d^* ค่อนข้างสูง
 (ก) ขนาดของกระแสคำสั่งในภาวะการทำงานปกติ
 (ข) ภาวะแรงดันเกินหลังเพิ่มขนาดของ i_q^* จนถึงพิกัดกระแสอินเวอร์เตอร์
 (ค) ภาวะแรงดันเกินที่ตัวประกอบกำลังมากกว่า 0.9 หลังจากลดขนาดของ i_d^* แล้ว
 (ง) ภาวะแรงดันเกินที่ตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9 หลังจากลดขนาดของ i_d^* แล้ว

3.4.2.3 การทำงานเมื่อเกิดภาวะแรงดันตก

ในทำนองเดียวกันกับกรณีแรงดันเกินที่ต้องพิจารณาในเรื่องพิกัดกระแสของอินเวอร์เตอร์และตัวประกอบกำลัง อีกทั้งกระแส i_q^* จากโพรไฟล์อ้างอิงมีการจำกัดกระแส i_q^* ไม่ให้เกินกระแสพิกัด รูปที่ 3.8 (ก) – (ข) แสดงกรณีที่ขนาดของกระแสคำสั่งล้นมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับกระแสพิกัด กระแสคำสั่ง i_d^* , i_q^* สามารถแสดงได้ดังสมการ (3.19), (3.20) ซึ่งคล้ายกับกรณีแรงดันเกิน แต่เครื่องหมายของกระแส i_d^* เป็นลบ

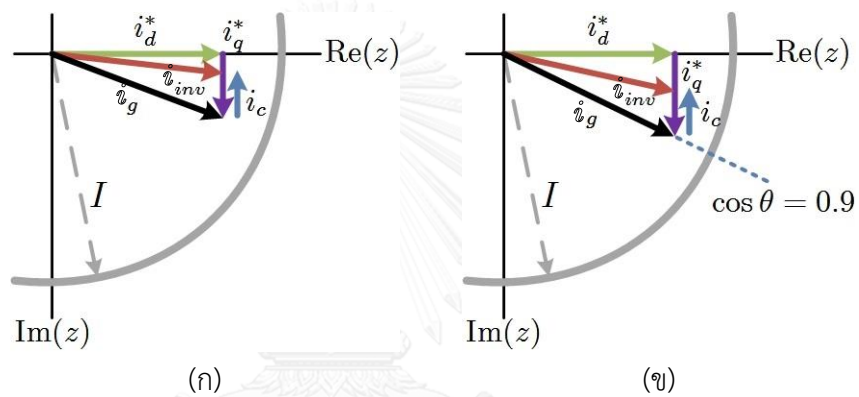
$$i_d^{*'} = i_d^* \tag{3.19}$$

$$i_q^{*'} = \begin{cases} i_q^* + i_c & , i_q^* > -0.484i_d^* \\ 0.484i_d^* + i_c & , i_q^* = -0.484i_d^* \end{cases} \tag{3.20}$$

ในทำนองเดียวกัน เมื่ออินเวอร์เตอร์พยายามควบคุมแรงดันโดยใช้กระแสคำสั่ง i_q^* ค่าสูงมาก (รูปที่ 3.9) จนทำให้ขนาดกระแสของอินเวอร์เตอร์เกินพิกัด อินเวอร์เตอร์จะปรับลดกระแสคำสั่ง $i_d^{*'}$ ในสมการ (3.21) เพื่อให้กระแสคำสั่ง $i_q^{*'}$ มีปริมาณมากพอสำหรับการควบคุมแรงดัน

$$i_d^{*'} = \sqrt{I^2 - (i_q^* + i_c)^2} \tag{3.21}$$

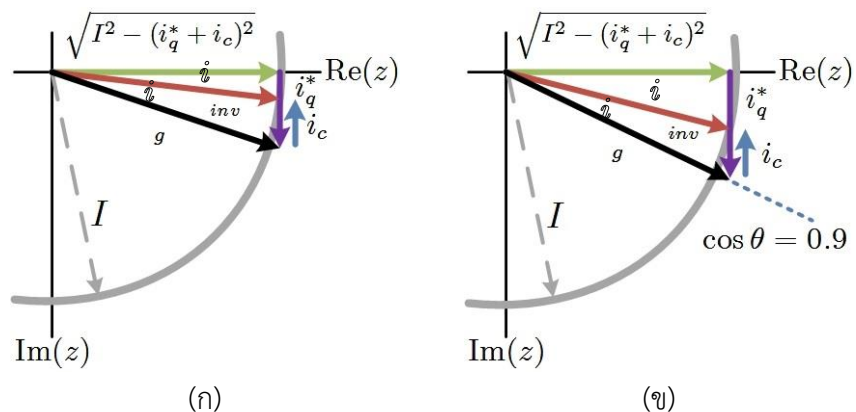
$$i_q^{*'} = \begin{cases} i_q^* + i_c & , i_q^* > -0.484i_d^* \\ 0.484i_d^{*'} + i_c & , i_q^* = -0.484i_d^* \end{cases} \tag{3.22}$$



รูปที่ 3.8 ขนาดของกระแสคำสั่งในแต่ละจุดทำงาน

(ก) ภาวะแรงดันตกที่ตัวประกอบกำลังมากกว่า 0.9

(ข) ภาวะแรงดันตกที่ตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9



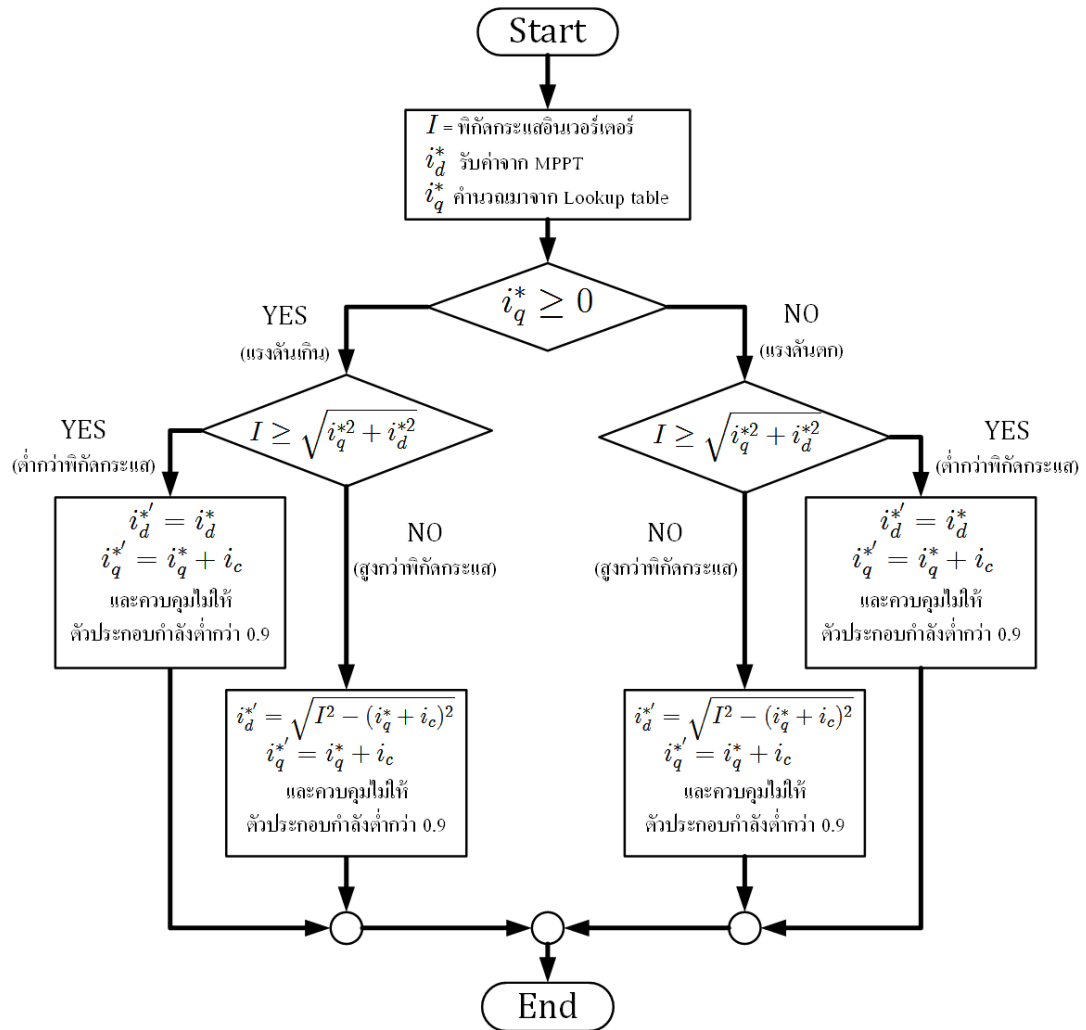
รูปที่ 3.9 ขนาดกระแสคำสั่งในแต่ละจุดทำงาน กรณีอินเวอร์เตอร์ได้รับกระแสคำสั่ง i_d^* ค่อนข้างสูง

(ก) ภาวะแรงดันตกที่ตัวประกอบกำลังมากกว่า 0.9 หลังจากลดขนาดของ $i_d^{*'}$ แล้ว

(ข) ภาวะแรงดันตกที่ตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9 หลังจากลดขนาดของ $i_d^{*'}$ แล้ว

3.4.2.4 ฟังก์ชันของการควบคุมกระแสต่อเงื่อนไขการรักษาระดับแรงดันที่นำเสนอ

หลักการที่นำเสนอในหัวข้อ 3.4.2.1 ถึง 3.4.2.3 สามารถแสดงเป็นผังงานได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ฟังก์ชันของการควบคุมกระแสต่อเงื่อนไขการรักษาระดับแรงดันที่นำเสนอ

3.5 ความสามารถในการทนต่อสถานะแรงดันตกชั่วขณะ

3.5.1 แนวคิด

ความผิดปกติของทางไฟฟ้า เป็นปรากฏการณ์ที่ส่งผลให้ขนาดของแรงดันในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ลดลงอย่างฉับพลัน ดังนั้นการทำงานของอินเวอร์เตอร์ขณะเกิดความผิดปกติอาจจัดได้ว่าเป็นกรณี พิเศษของการทำงานในภาวะแรงดันตก อย่างไรก็ตาม ในระบบไฟฟ้าสามเฟส ประเภทของความผิด พิธีของแรงดันเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือความผิดปกติแบบสมมาตร (Symmetrical fault) ซึ่งส่งผลกับ ระดับแรงดันทั้งสามเฟส และความผิดปกติแบบอสมมาตร (Asymmetrical fault) ซึ่งส่งผลกับระดับ แรงดันบางเฟส สำหรับความผิดปกติประเภทหลังนี้ทำให้เกิดแรงดันที่ไม่สมดุลซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการ ทำงานของอินเวอร์เตอร์ โดยสามารถพิจารณาได้ดังนี้

ในระบบไฟฟ้ากำลังแบบสามเฟสสามสาย แรงดันขณะเกิดความผิดพิธีนั้นสามารถ พิจารณาในรูปแบบของส่วนประกอบสมมาตร (Symmetrical components) ซึ่งประกอบด้วย แรงดันลำดับบวก (Positive sequence) และแรงดันลำดับลบ (Negative sequence) เท่านั้น เขียน เป็นสมการได้ดังนี้

$$\mathbf{v}_{abc} = \mathbf{v}_{abc}^+ + \mathbf{v}_{abc}^- \quad (3.23)$$

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = V^+ \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} + V^- \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

จากสมการ (3.24) เวกเตอร์ของแรงดันสามารถนิยามบนกรอบอ้างอิง $\alpha\beta$ โดยใช้เมทริกซ์การแปลง คลาร์ก

$$\mathbf{v}_{\alpha\beta} = [T_{\alpha\beta}] \cdot \mathbf{v}_{abc} \quad (3.25)$$

โดยที่

$$[T_{\alpha\beta}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

แทนค่าจากสมการ (3.25) ลงในสมการ (3.24) จะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} V^+ \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ -\cos(\omega t) \end{bmatrix} + \sqrt{\frac{3}{2}} V^- \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \cos(\omega t) \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

เวกเตอร์ของแรงดันในสมการที่ (3.27) สามารถนิยามบนกรอบอ้างอิงหมุน dq ได้ตามสมการ

$$\mathbf{v}_{dq} = [T_{dq}] \cdot \mathbf{v}_{\alpha\beta} \quad (3.28)$$

โดยที่

$$[T_{dq}] = \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & -\cos(\omega t) \\ \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

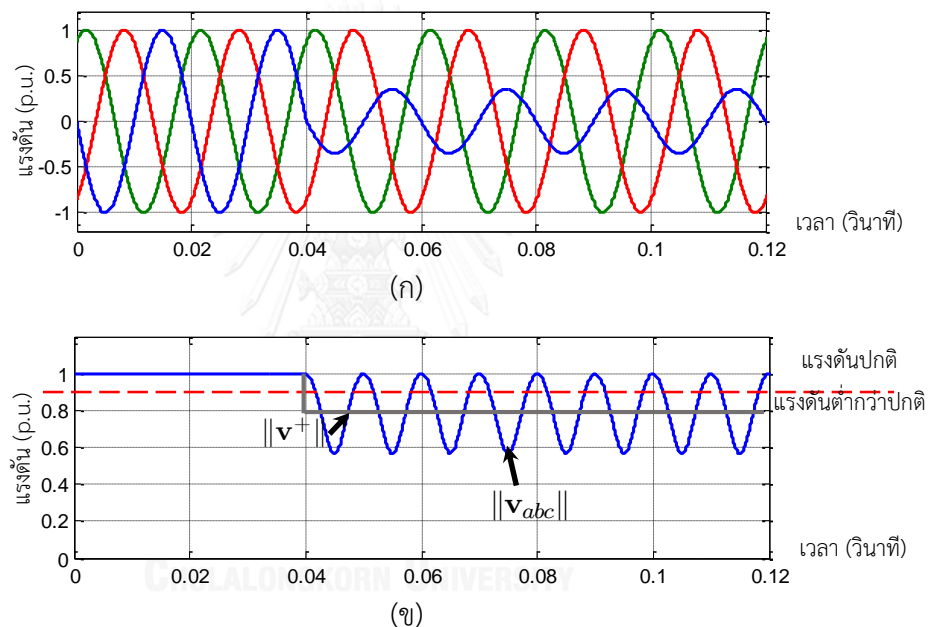
แทนค่าจากสมการ (3.29) ลงในสมการ (3.28) จะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \left(V^+ \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + V^- \begin{bmatrix} -\cos(2\omega t) \\ \sin(2\omega t) \end{bmatrix} \right) \quad (3.30)$$

ซึ่งขนาดของแรงดันขณะหนึ่งมีค่าดังสมการ

$$v_{dq} = \sqrt{v_d^2 + v_q^2} = \sqrt{\frac{3}{2}} \sqrt{(V^+)^2 + (V^-)^2 - 2V^+V^- \cos(2\omega t)} \quad (3.31)$$

จากสมการ (3.31) ขณะเกิดความผิดพร่อง หากขนาดของแรงดันองค์ประกอบลำดับลบ $V^- > 0$ ซึ่งเกิดจากความผิดพร่องแบบอสมมาตร จะทำให้รูปคลื่นของแรงดันขณะหนึ่งแกว่งด้วยความถี่สองเท่าของความถี่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า ได้แสดงในรูปที่ 3.11 โดยการตรวจจับแรงดันตกจะพิจารณาจากองค์ประกอบของแรงดันลำดับบวก

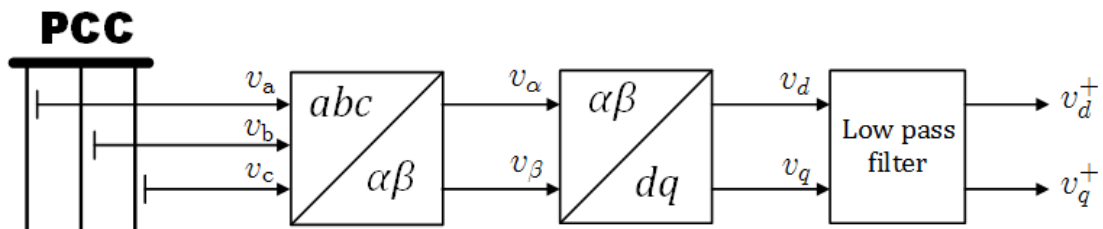


รูปที่ 3.11 (ก) รูปคลื่นแรงดันแต่ละเฟสซึ่งเกิดความผิดพร่องตั้งแต่เวลา 0.04 s

(ข) ขนาดของแรงดันขณะหนึ่งที่วิเคราะห์ได้

3.5.2 วิธีการที่นำเสนอ

วิธีการตรวจจับแรงดันที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ใช้วงจรกรองแบบผ่านต่ำ (Low Pass Filter) กรององค์ประกอบความถี่ที่เป็นสองเท่าของความถี่ในระบบไฟฟ้าเพื่อให้เหลือเพียงองค์ประกอบแรงดันลำดับบวกสำหรับนำไปใช้คำนวณในระบบควบคุมต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 การตรวจจับแรงดันลำดับบวกโดยใช้วงจรกรองแบบผ่านต่ำ

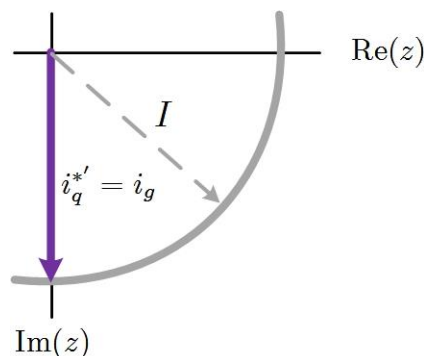
โดยวงจรกรองแบบผ่านต่ำออกแบบให้มีอันดับ (order) เท่ากับ 4 ความถี่ตัด (cutoff frequency) เท่ากับ 50 Hz ซึ่งต่ำกว่าความถี่ที่ต้องการกรอง 2 เท่า วงจรกรองที่ออกแบบดังกล่าวมีฟังก์ชันถ่ายโอนแสดงได้ดังนี้

$$T(s) = \left(\frac{2\pi f}{s + 2\pi f} \right)^4 = \left(\frac{314.16}{s + 314.16} \right)^4 \quad (3.32)$$

องค์ประกอบแรงดันลำดับบวกที่ตรวจจับได้จากตัวตรวจจับแรงดันจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับระดับแรงดันอ้างอิง ค่าความผิดพลาดที่ได้จากการเปรียบเทียบจะถูกนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อให้ได้กระแสคำสั่ง i_q^* , i_d^* ในขั้นต่อไป เพื่อช่วยสนับสนุนระบบโครงข่ายไฟฟ้าขณะเกิดความผิดปกติตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า อินเวอร์เตอร์จะหยุดจ่ายกำลังจริงแต่จ่ายกำลังรีแอกทีฟเต็มพิกัดขณะเกิดความผิดปกติ ทำให้กระแสคำสั่งสำหรับเงื่อนไขการทำงานขณะเกิดความผิดปกติเป็นดังสมการ

$$i_d^{*'} = 0 \quad (3.33)$$

$$i_q^{*'} = -I \quad (3.34)$$

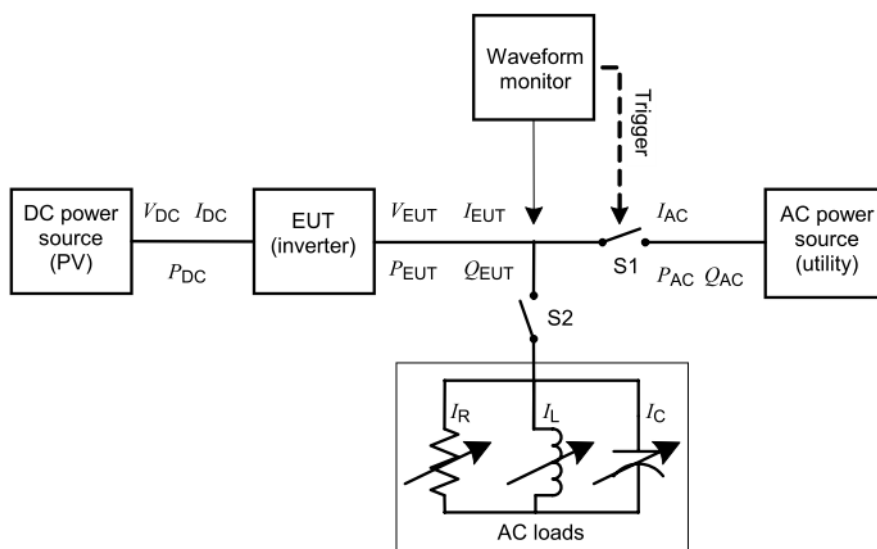


รูปที่ 3.13 ขนาดของกระแส i_d^{*} , i_q^{*} เมื่อเกิดภาวะความผิดปกติขึ้นในระบบโครงข่ายไฟฟ้า

3.6 การป้องกันการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดด

3.6.1 วิธีการทดสอบการป้องกันการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดด

ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวงและการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้ระบุแนวทางการทดสอบการป้องกันการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดดของอินเวอร์เตอร์ให้เป็นไปตามมาตรฐาน IEC-62116 รูปแบบการต่อวงจรทดสอบอินเวอร์เตอร์ (อุปกรณ์ที่นำมาตรวจสอบ, Equipment Under Test: EUT) ตามมาตรฐานดังกล่าวเป็นไปดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 วงจรทดสอบความสามารถในการตรวจจับสถานะการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดดของอินเวอร์เตอร์ตามมาตรฐาน IEC-62116

วิธีทดสอบเริ่มจากปรับโหลด RLC ขนานให้รับกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟทั้งหมดจากอินเวอร์เตอร์ในปริมาณตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน พิจารณาได้จากการที่ไม่มีกระแสไหลผ่าน $S1$ ($I_{AC} = 0$) ขณะปิดวงจรทั้งสวิตช์ $S1$ และ $S2$ ซึ่งในมาตรฐานได้ระบุแนวทางสำหรับการปรับตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเพื่อให้ได้คุณลักษณะดังกล่าว เงื่อนไขจุดทำงานของการทดสอบดังกล่าวคือเงื่อนไขที่อยู่ ณ จุดกำเนิดของบริเวณที่ตรวจจับไม่ได้ (ผลต่างกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟเท่ากับศูนย์) เมื่อกำหนดโหลดที่จะใช้ทดสอบแล้วจึงเริ่มทดสอบโดยเปิดอินเวอร์เตอร์ เมื่ออินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับโหลดและโครงข่ายไฟฟ้าแล้วหลังจากปิดวงจรที่สวิตช์ $S1$ และ $S2$ จากนั้นเปิดวงจรที่สวิตช์ $S1$ เพื่อให้ระบบอยู่ในสถานะการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดด จับเวลาตั้งแต่วันที่เริ่มเปิดวงจรจนกระทั่งอินเวอร์เตอร์หยุดทำงาน บันทึกผลเวลาที่ได้ ต่อมาทดสอบเงื่อนไขต่างๆ โดยแปรค่าโหลดเป็นค่าอื่นๆ ตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน การประเมินผลให้ผ่านในแต่ละเงื่อนไขการทดสอบพิจารณาจากช่วงเวลาที่บันทึกได้ต้องต่ำกว่าตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อ

หมายเหตุ: ในการพิจารณาค่ากระแสผ่านสวิตช์ S1 เท่ากับศูนย์นั้น มาตรฐาน IEC-62116 ได้อนุญาตให้ใช้ค่าเฉลี่ยของกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์ S1 ดังนั้นเราจึงสามารถป้อนกำลังรีแอกทีฟที่แปรเปลี่ยนไป ($\overline{\Delta Q} = 0$; $\Delta Q(t) \neq 0$) และใช้กระตุ่นระบบเพื่อตรวจจับภาวะการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดดได้

3.6.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับกำลังรีแอกทีฟที่อินเวอร์เตอร์ป้อนให้โหลด

RLC ขนานขณะเกิดสภาวะการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดด

จากหัวข้อที่แล้ว เมื่อให้อินเวอร์เตอร์ป้อนกำลังรีแอกทีฟเพื่อกระตุ่นระบบ $\Delta Q(t) \neq 0$ ($\overline{\Delta Q} = 0$) เมื่อเปิดวงจรที่สวิตช์ S1 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta Q(t)$ และโหลดไฟสลับแสดงได้ดังสมการ

$$\Delta Q = V^2 \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C \right) \quad (3.35)$$

จัดรูปสมการ

$$(LCV^2)\omega^2 + (\Delta QL)\omega - V^2 = 0 \quad (3.36)$$

สมการ (3.36) อยู่ในรูปแบบของสมการกำลังสอง ซึ่งมีรากของสมการเป็น

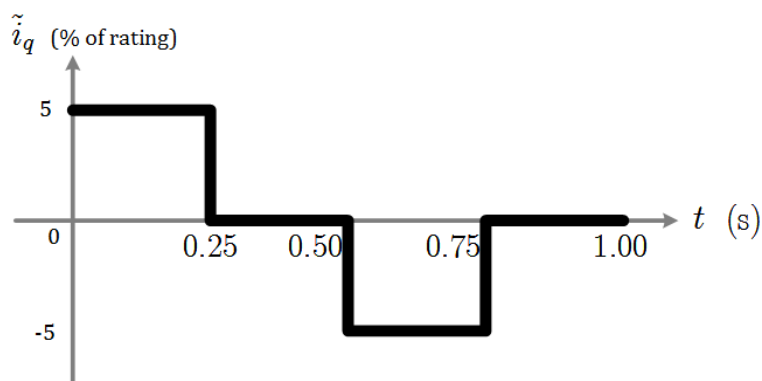
$$\omega = \frac{-\Delta QL \pm \sqrt{(\Delta QL)^2 + 4LCV^4}}{2LCV^2} \quad (3.37)$$

รากของสมการ (3.37) มีค่าเป็นจำนวนจริงบวกเท่านั้น แทนค่า $\omega = 2\pi f$ จะได้ความสัมพันธ์ของความถี่ซึ่งมีค่าดังสมการ

$$f = -\frac{\Delta Q}{4\pi CV^2} + \frac{\sqrt{(\Delta QL)^2 + 4LCV^4}}{4\pi LCV^2} \quad (3.38)$$

จากสมการ (3.38) แสดงให้เห็นว่าการป้อนกำลังรีแอกทีฟให้กับโหลดขณะเกิดสภาวะการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดดจะทำให้ความถี่เปลี่ยนแปลงเสมอ หาก ΔQ มีค่ามากเพียงพอที่ทำให้ความถี่เปลี่ยนแปลงไปยังค่าที่กำหนดไว้จะทำให้สามารถตรวจจับภาวะการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดดได้

3.6.3 วิธีที่นำเสนอ



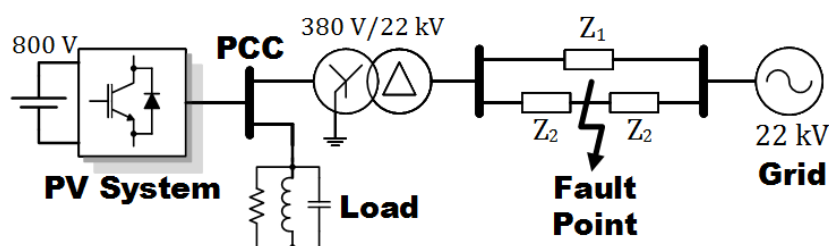
รูปที่ 3.15 รูปคลื่นของกระแสคำสั่งในแกน q ที่บวกเพิ่มไปในวงรอบควบคุม

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอวิธีตรวจจับสภาวะป้องกันการจ่ายไฟฟ้าแบบอิสระโดยให้อินเวอร์เตอร์จ่ายและรับกำลังรีแอกทีฟโดยกำหนดกราฟของกระแส i_q ดังรูปคลื่นที่แสดงอยู่ในรูปที่ 3.15 ซึ่งเป็นกระแสที่บวกเพิ่มไปในวงรอบควบคุมหลังจากการคำนวณกระแสคำสั่ง i_q^* ($i_q^* + i_q$) กำลังรีแอกทีฟที่จ่ายและรับเพิ่มเข้ามานี้จะรบกวนความถี่ในสภาวะการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดด อินเวอร์เตอร์จะหยุดทำงานก็ต่อเมื่อความถี่ถูกรบกวนจนถึงค่าที่กำหนดไว้ เนื่องจากความถี่ดังกล่าวจะลู่เข้าสู่ค่าความถี่ตามสมการ (3.38) ซึ่งอยู่ในสถานะอยู่ตัว ค่ายอดของกระแส i_q จะสัมพันธ์โดยตรงกับผลตอบสนองในการตรวจจับสภาวะการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดด จากผลการคำนวณพบว่าค่าของของ i_q ที่ร้อยละ 5 ของพิกัดกระแสอินเวอร์เตอร์ ให้ผลตอบสนองในการตรวจจับที่รวดเร็ว ซึ่งสอดคล้องตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และกำหนดค่าความถี่ไว้หากมีค่าน้อยกว่า 48 Hz หรือ 51 Hz อินเวอร์เตอร์จะหยุดทำงานทันที

3.7 ผลการจำลองการทำงาน

3.7.1 รายละเอียดของการจำลองการทำงาน

ระบบที่ใช้จำลองประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์ต่อเข้ากับโครงข่ายไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อที่มีระดับแรงดัน 380 V ซึ่งมีโหลดและหม้อแปลงลดระดับแรงดันจากระบบจำหน่ายขนาด 22 kV เชื่อมต่อที่จุดนี้ร่วมกัน ในสายจำหน่ายแรงสูงมีอิมพีแดนซ์ในสาย 2 ค่า Z_1 , Z_2 ต่อผสมกัน โดยสรุปองค์ประกอบทั้งหมดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.16 และพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.16 แผนภาพเส้นเดียวของระบบที่ใช้จำลองการทำงาน

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบ

ชื่อพารามิเตอร์	ค่าที่ใช้	หน่วย
แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งแทนด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง		
- แรงดัน	800	V
อินเวอร์เตอร์		
- พิกัดกระแส	10	A (peak)
	7	A (rms)
- ความถี่สวิตช์	10	kHz
วงจรกรองแบบผ่านต่ำแบบ LCL		
- ค่าความเหนี่ยวนำ (ด้านอินเวอร์เตอร์)	5	mH
- ค่าความเหนี่ยวนำ (ด้านจุดเชื่อมต่อ)	5	mH
- ค่าความจุไฟฟ้า	12.5	μ F
ระบบโครงข่ายไฟฟ้า		
- ระดับแรงดันที่ตั้งไว้	380 (220)	V
- อิมพีแดนซ์ของสายส่ง Z_1		
- ความต้านทาน	0.1	Ω
- ความเหนี่ยวนำ	0.2	mH

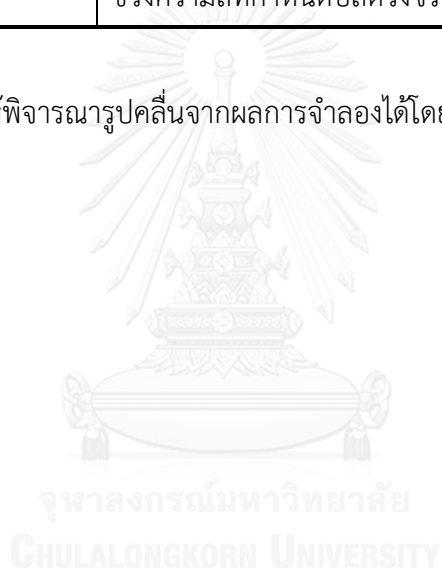
ชื่อพารามิเตอร์	ค่าที่ใช้	หน่วย
<ul style="list-style-type: none"> - อิมพีแดนซ์ของสายส่ง Z_2 - ความต้านทาน - ความเหนี่ยวนำ 	0.2 0.4	Ω mH
หม้อแปลง		
<ul style="list-style-type: none"> - อิมพีแดนซ์ของขดลวดด้านแรงดันต่ำ - ความต้านทาน - ความเหนี่ยวนำ 	0.00755 0.0779	Ω mH
<ul style="list-style-type: none"> - อิมพีแดนซ์ของขดลวดด้านแรงดันสูง - ความต้านทาน - ความเหนี่ยวนำ 	0.001 0.001	Ω mH
โหนดที่ต่ออยู่ (สำหรับการทดสอบการป้องกันสภาวะการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดด)		
<ul style="list-style-type: none"> - โหลดตัวต้านทาน - โหลดตัวเหนี่ยวนำ - โหลดตัวเก็บประจุ 	40 12.73 79.58	Ω mH μF

การจำลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การจำลองการควบคุมระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ การจำลองความสามารถในการทนต่อสภาวะแรงดันตกชั่วขณะ และการจำลองการป้องกันการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดด ซึ่งในการจำลองตามสถานการณ์ต่างๆ ได้ใช้ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลองระบบ

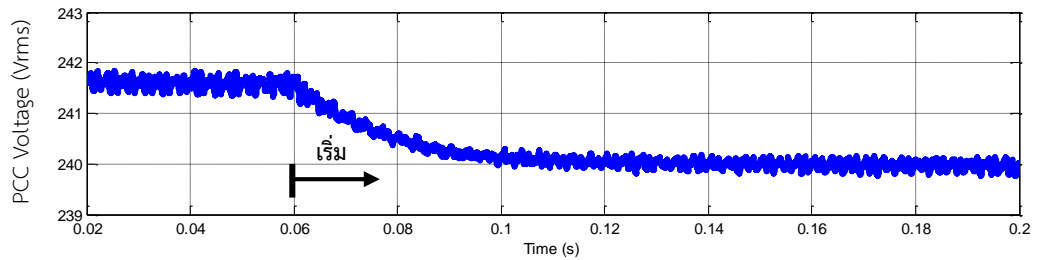
หัวข้อ	รายละเอียด
การรักษาระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ	ระดับแรงดันเฟสปกติกำหนดให้อยู่ในช่วง 200 – 240 V
ความสามารถในการทนต่อสภาวะแรงดันตกชั่วขณะ	อินเวอร์เตอร์จะต้องไม่ปลดตัวเองและจะต้องจ่ายกำลังรีแอกทีฟเพื่อสนับสนุนโครงข่ายขณะเกิดความผิดปกติพร้อมตลอดระยะเวลาที่เกิดความผิดปกติพร้อมภายในเวลา 150 ms
การป้องกันการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดด	อินเวอร์เตอร์จะต้องปลดวงจรออกจากระบบโครงข่ายไฟฟ้าภายใน 2 วินาที ช่วงความถี่ที่กำหนดปลดวงจรคือ $f < 48$ Hz และ $f > 51$ Hz

นอกจากนี้เพื่อให้พิจารณารูปคลื่นจากผลการจำลองได้โดยง่าย สำหรับค่ากระแสจะพิจารณา ค่ายอด (peak) เป็นหลัก

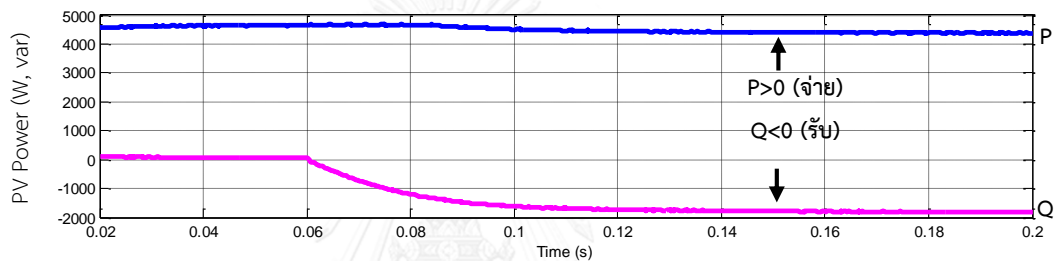


3.7.2 ผลจำลองการควบคุมระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ

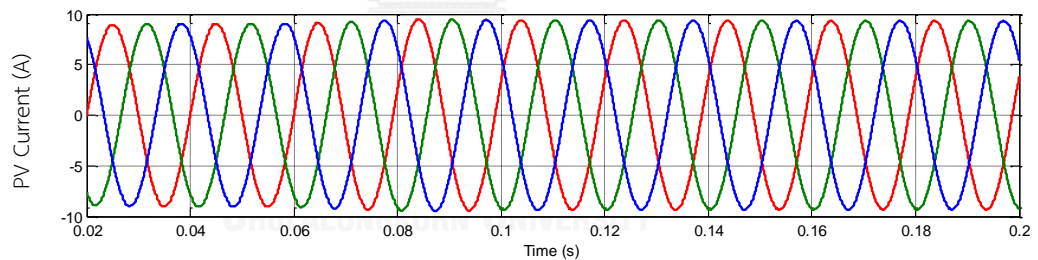
ในสถานะเริ่มต้นแรงดันเฟสที่จุดเชื่อมต่อวัดได้ 241.6 V (rms) เมื่ออินเวอร์เตอร์เริ่มทำงานตามหลักการที่ได้นำเสนอตั้งแต่เวลา 60 ms พบว่าสามารถลดระดับแรงดันลงมาอยู่ที่ 240 V (rms) ที่เวลา 120 ms หรือใช้เวลาประมาณ 60 ms ดังรูปที่ 3.17



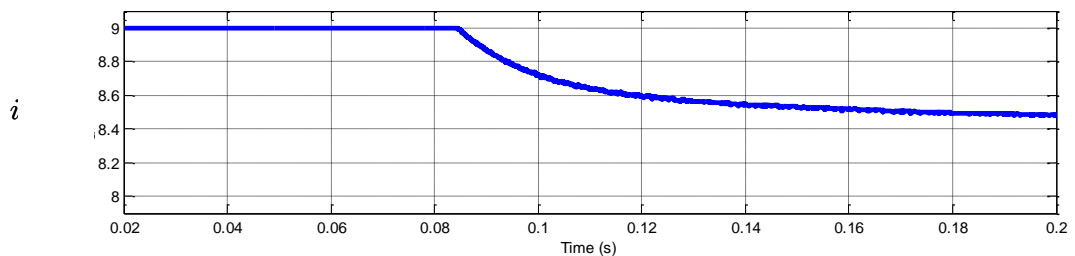
(ก) ระดับแรงดันเฟสที่จุดเชื่อมต่อ



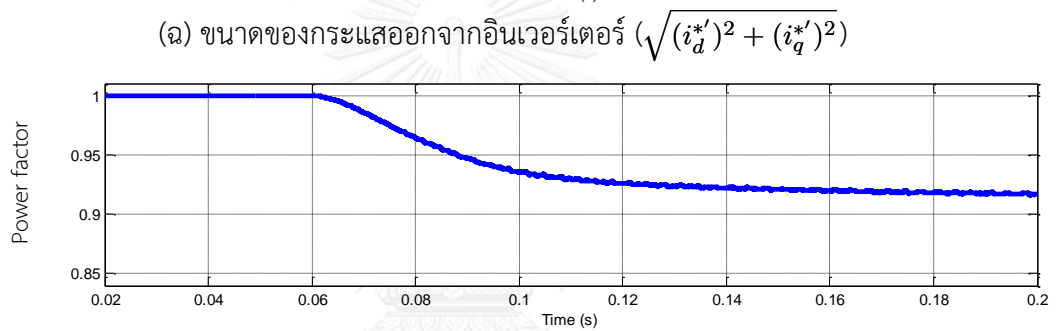
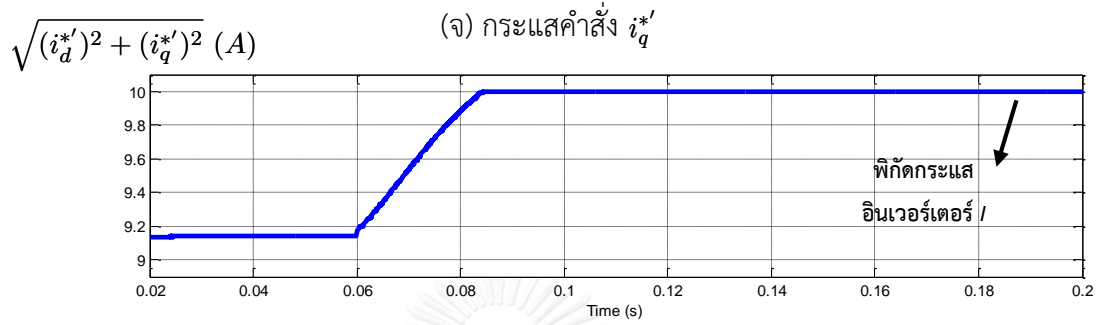
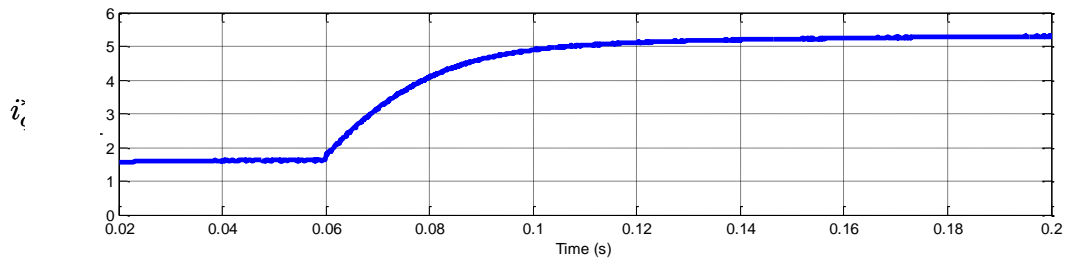
(ข) กำลังที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์รับ / จ่ายให้ระบบโครงข่ายไฟฟ้า



(ค) รูปคลื่นกระแสออกจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์



(ง) กระแสคำสั่ง i_d^*

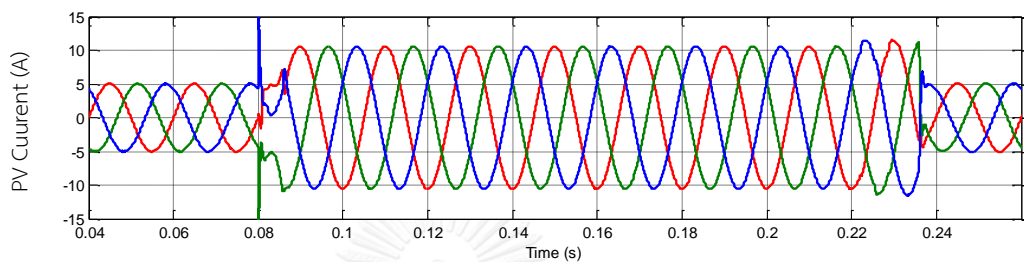


(ซ) ตัวประกอบกำลังของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ วัดที่จุดเชื่อมต่อ
รูปที่ 3.17 ผลจำลองการควบคุมระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ

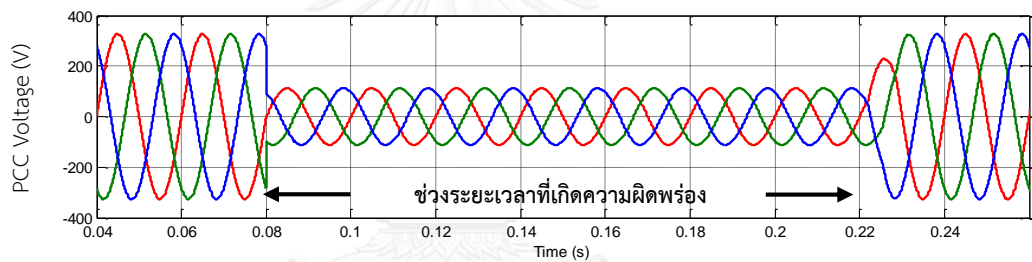
3.7.3 ผลจำลองความสามารถในการทนต่อสภาวะแรงดันตกชั่วขณะ

3.7.3.1 ความผิดปกติพร้อมมาตรการ

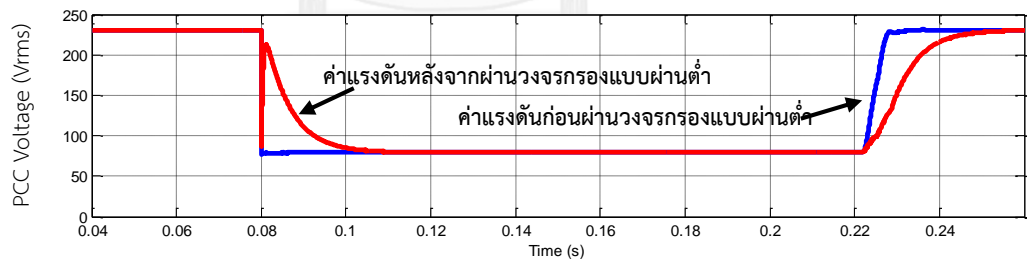
กำหนดให้เกิดความผิดปกติแบบสามเฟสลงดินตั้งแต่เวลา 80 ถึง 220 ms จากรูปที่ 3.18 จะเห็นว่าเมื่อสามารถตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบโครงข่ายไฟฟ้าได้ อินเวอร์เตอร์จะหยุดจ่ายกำลังจริงและช่วยจ่ายกำลังรีแอกทีฟเต็มพิกัด เพื่อช่วยสนับสนุนระบบโครงข่ายไฟฟ้าตลอดช่วงเวลาที่เกิดความผิดปกติ



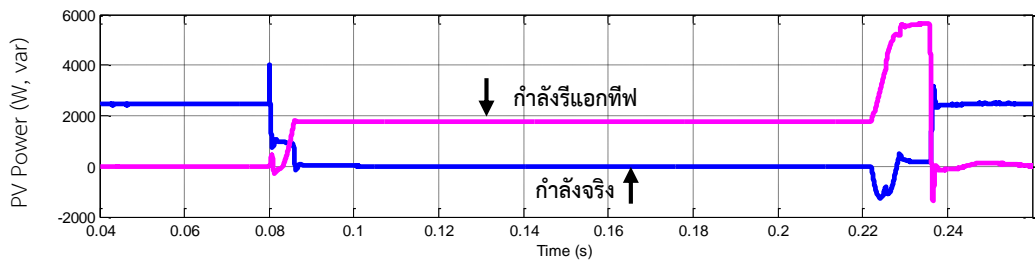
(ก) กระแสที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ป้อนเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า



(ข) แรงดันเฟสที่จุดเชื่อมต่อ



(ค) แรงดันเฟสที่จุดเชื่อมต่อ (rms)

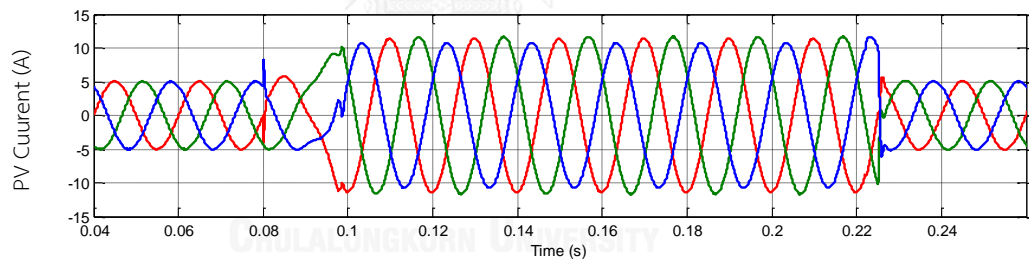


(ง) กำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์
ป้อนเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า

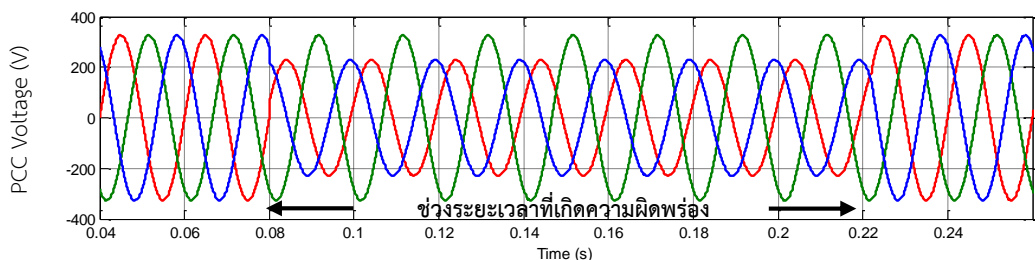
รูปที่ 3.18 ผลจำลองการทำงานการควบคุมกำลังรีแอกทีฟสำหรับความสามารถในการทนต่อสภาวะ
แรงดันตกชั่วขณะเกิดความผิดปกติแบบสมมาตร

3.7.3.2 ความผิดปกติสมมาตร

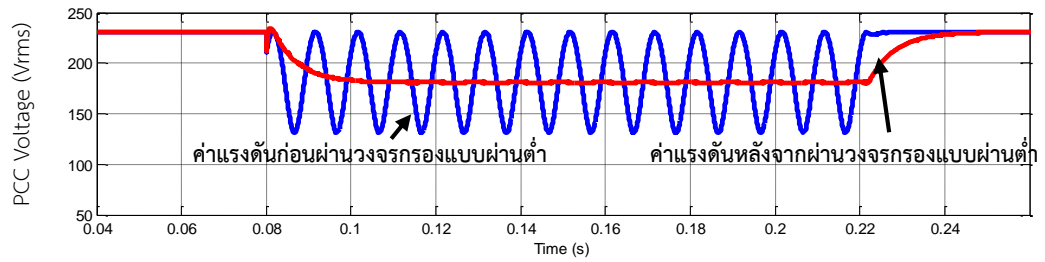
กำหนดให้เกิดความผิดปกติแบบสองเฟสลงดินตั้งแต่วันที่ 80 ถึง 220 ms แม้ว่าจะเกิด
ความผิดปกติแบบสมมาตร แต่เมื่ออินเวอร์เตอร์สามารถตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบ
โครงข่ายไฟฟ้าได้ อินเวอร์เตอร์จะช่วยจ่ายกำลังรีแอกทีฟเต็มพิกัด เพื่อช่วยสนับสนุนระบบโครงข่าย
ไฟฟ้าตลอดช่วงเวลาที่เกิดความผิดปกติ



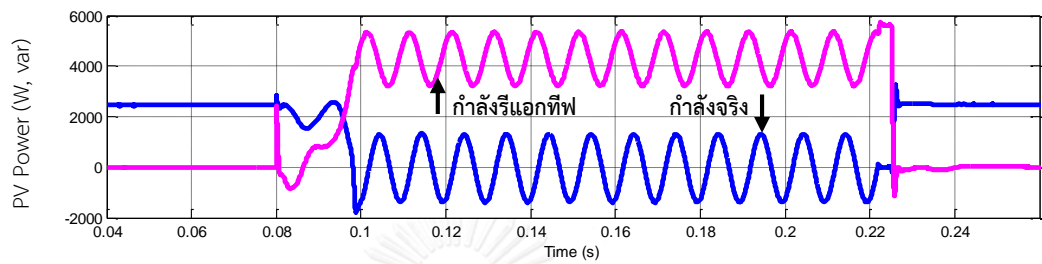
(ก) กระแสที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ป้อนเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า



(ข) แรงดันเฟสที่จุดเชื่อมต่อ



(ค) แรงดันเฟสที่จุดเชื่อมต่อ (rms)

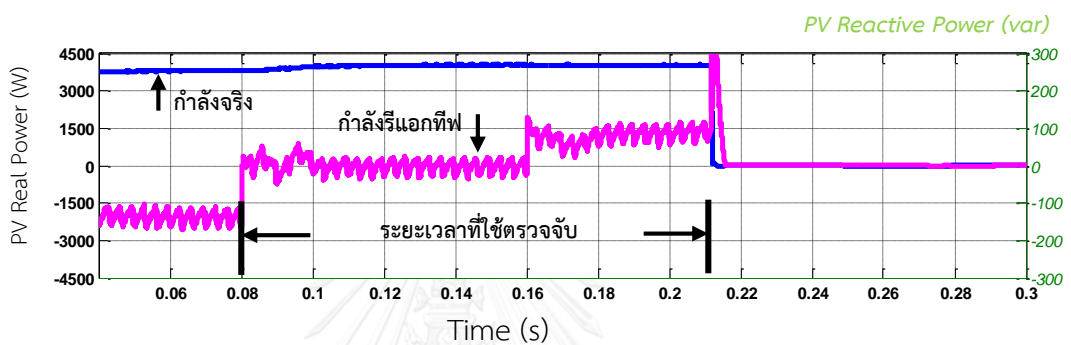


(ง) กำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ป้อนเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า

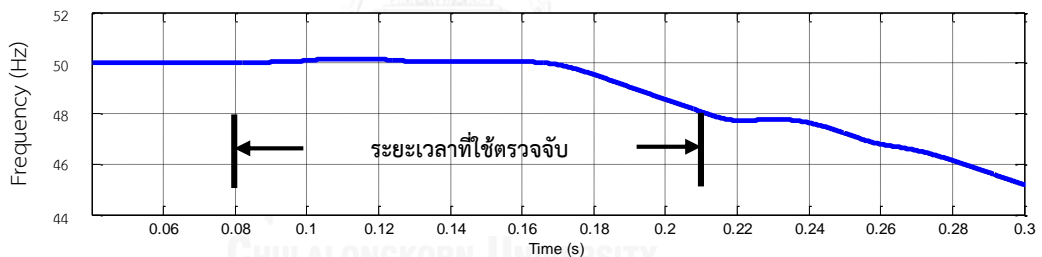
รูปที่ 3.19 ผลจำลองการทำงานการควบคุมกำลังรีแอกทีฟสำหรับความสามารถในการทนต่อสถานะแรงดันตกชั่วขณะเกิดความผิดปกติแบบอสมมาตร

3.7.4 ผลจำลองการป้องกันการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดด

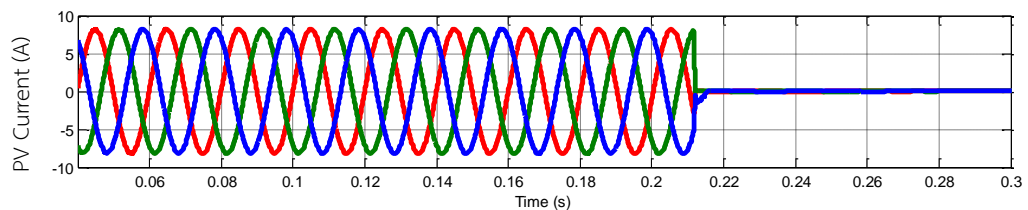
เงื่อนไขในการจำลองการป้องกันการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดดอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC-62116 โดยอินเวอร์เตอร์ทำงานที่พิกัด และแรงดันป้อนอินเวอร์เตอร์มากกว่าร้อยละ 90 ของพิกัด วิธีการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐานดังกล่าวทำให้ได้ค่าโหลดดังแสดงในตารางที่ 3.1 กำหนดให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ปลดออกจากจุดเชื่อมต่อที่เวลา 0.25 วินาที ผลจำลองเป็นไปดังรูปที่ 3.15 ซึ่งจะได้ว่าที่เงื่อนไขการจำลองดังกล่าวระบบสามารถตรวจจับภาวะการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดดโดยใช้เวลา 1.1 วินาที



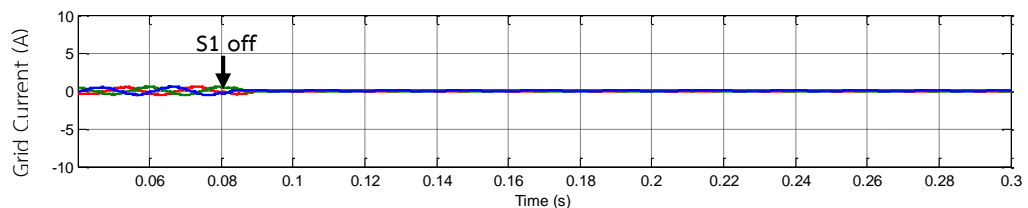
(ก) กำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่รับ / จ่ายโดยอินเวอร์เตอร์



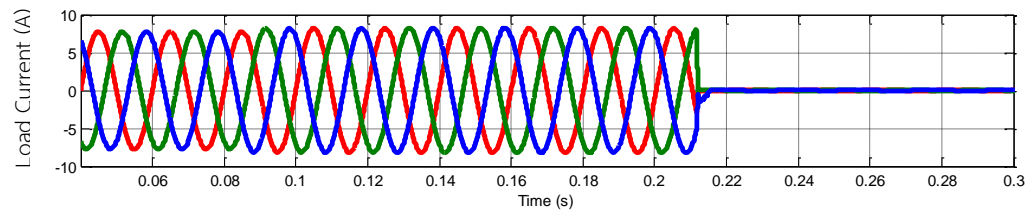
(ข) ความถี่ที่ตรวจจับได้



(ค) กระแสจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ไหลเข้าสู่จุดเชื่อมต่อ



(ง) กระแสจากระบบโครงข่ายไฟฟ้าไหลเข้าสู่จุดเชื่อมต่อ



(จ) กระแสไหลด

รูปที่ 3.20 ผลจำลองการทำงานการควบคุมกำลังรีแอกทีฟสำหรับการป้องกันการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดด



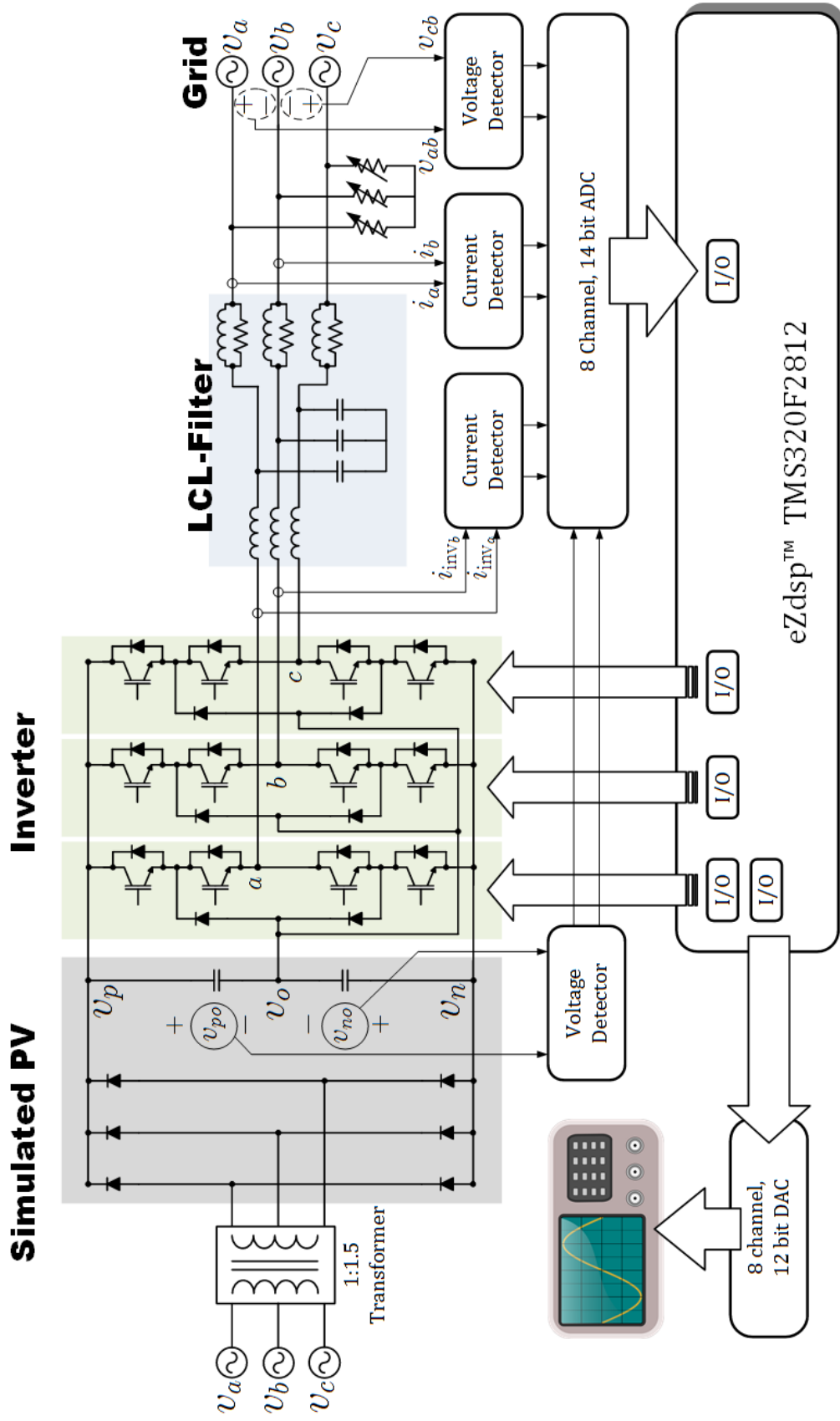
บทที่ 4 ผลการทดสอบการทำงานของเครื่องต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการ

บทนี้จะนำเสนอผลการทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้าสามเฟสเครื่องต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการ (Prototype machine) ที่มีการควบคุมกำลังรีแอกทีฟเพื่อสนับสนุนให้ระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีเสถียรภาพ ตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่ตั้งนำเสนอในวิทยานิพนธ์ ผลการทดสอบที่ได้นั้นเป็นสิ่งที่ยืนยันได้ว่าเทคนิคการควบคุมกำลังรีแอกทีฟของอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีส่วนช่วยในการสนับสนุนเสถียรภาพได้จริง

4.1 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์เครื่องต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการ

ส่วนประกอบของอินเวอร์เตอร์เครื่องต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการมีด้วยกัน 3 ส่วน ได้แก่ วงจรภาคกำลัง วงจรตรวจจับกระแสและแรงดัน และวงจรส่วนควบคุมการทำงาน ภาพรวมของอินเวอร์เตอร์เครื่องต้นแบบสามารถแสดงได้ดัง





รูปที่ 4.1 ภาพรวมของอินเวอร์เตอร์เครื่องต้นแบบที่ใช้สำหรับทดสอบการทำงานของการทำงานของควบคุมกำลังรีแอกทีฟ

4.1.1 วงจรภาคกำลัง

วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสสามระดับแบบตรึงจุดนิวทรัล (3-phase Neutral-Point Clamped) ในแต่ละกิ่งเฟสของอินเวอร์เตอร์จะประกอบด้วยไดโอดจำนวน 2 ตัว และสวิตช์ไวงาน (Active Switch) ซึ่งใช้ทรานซิสเตอร์ประเภทไอจีบีที (Insulated-gate bipolar transistor, IGBT) จำนวน 4 ตัว รุ่นและพิกัดของไดโอดและสวิตช์ไวงานที่ใช้แสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 พิกัดของอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรภาคกำลัง

อุปกรณ์ / รุ่น	พิกัดแรงดัน (V)	พิกัดกระแส (A)
ไดโอด / RHRP15120	1,200	15
ไอจีบีที / IRG7PH35UD1PBF	1,200	20

ในแต่ละกิ่งเฟส อุปกรณ์ไดโอดและสวิตช์ไวงานถูกนำมาประกอบกันบนแผ่นวงจรเป็นมอดูล สำหรับอินเวอร์เตอร์สามเฟสจะต้องใช้ทั้งหมด 3 มอดูล ซึ่งจะได้ว่าจำนวนไดโอดที่ใช้ทั้งหมดเท่ากับ 6 ตัว และสวิตช์ไวงาน 12 ตัว วงจรอินเวอร์เตอร์ออกแบบให้สามารถรองรับพิกัดกำลังไฟฟ้า 3 kVA โดยมีการจำกัดกระแสด้านออกให้ไม่เกิน 5 A เพื่อป้องกันไม่ให้อุปกรณ์ต่างๆ เสียหาย

ด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์เป็นการจำลองไฟตรงจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจำลองโดยการใช้วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์รับไฟสลับจากแหล่งจ่ายสามเฟส ซึ่งมีการแยกโดดผ่านหม้อแปลงสามเฟส อัตราส่วน 1:1.5 เนื่องจากอินเวอร์เตอร์มีการเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่ด้านออก หากไม่มีการแยกโดดอาจทำให้เกิดการลัดลงจรขณะอินเวอร์เตอร์ทำงานได้

วงจรกรองแบบผ่านต่ำที่ใช้เป็นวงจรกรองแบบผ่านต่ำแบบตัวเหนี่ยวนำ-ตัวเก็บประจุ-ตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งอาจเรียกแบบย่อว่าวงจรกรองแบบผ่านต่ำแบบแอลซีแอล (LCL Filter) ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออยู่ด้านอินเวอร์เตอร์ และตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออยู่ด้านระบบโครงข่ายไฟฟ้า ตัวเหนี่ยวนำทั้งสองตัวใช้ค่าความเหนี่ยวนำ 5 mH สำหรับตัวเก็บประจุใช้ค่าความจุไฟฟ้า 12.5 μ F ตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออยู่ด้านระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีการขนานความต้านทาน 15 Ω

4.1.2 วงจรตรวจจับแรงดันและกระแส

จากรูปที่ 4.1 มีการตรวจจับแรงดัน 2 จุด คือที่บัสไฟตรง โดยตรวจจับขนาดแรงดันบัสบวกและบัสลบ และมีการตรวจจับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อกับอีกจุดหนึ่ง วงจรตรวจจับแรงดันใช้หลักการของวงจรแบ่งแรงดัน เพื่อลดทอนไม่ให้ขนาดแรงดันตรวจจับมีค่าสูงกว่าพิกัดของแรงดันด้านเข้าของไอซีแยกกราวด์รุ่น ACPL-790C ไอซีดังกล่าวทำหน้าที่ตรวจวัดแรงดันพร้อมทั้งแยกกราวด์ของวงจรในส่วนภาคกำลัง และวงจรในส่วนระบบควบคุมออกจากกันโดยใช้หลักการทางแสง หนึ่งบอร์ดยังของวงจรตรวจจับแรงดันสามารถวัดความต่างศักย์ได้ 2 ค่า แต่จะมีศักย์ไฟฟ้าร่วมกัน 1 จุด ดังนั้นในการตรวจจับแรงดันระหว่างสาย ค่าแรงดันที่ตรวจจับได้จึงเป็นแรงดันระหว่างเฟส a และ b กับแรงดันระหว่างเฟส c และ b โดยได้เลือกให้ศักย์ไฟฟ้าของเฟส b เป็นศักย์ร่วมกันในวงจรตรวจจับ ดังนั้นขนาดของแรงดันระหว่างสาย จึงหาได้โดยกลับเครื่องหมายของแรงดัน ที่ตรวจจับได้ สำหรับแรงดันระหว่างเฟส c กับเฟส a นั้นสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$v_{ca} = v_{cb} - v_{ab} \quad (4.1)$$

ในการทำงานเดียวกัน การตรวจจับแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุบัสไฟตรง เมื่อเลือกจุดกึ่งกลางบัสเป็นจุดศักย์ไฟฟ้าร่วม ทำให้ค่าแรงดัน เกิดจากการคำนวณโดยการกลับเครื่องหมายของแรงดัน ที่ตรวจจับได้

สำหรับวงจร ตรวจจับกระแสจะอาศัยเซนเซอร์รุ่น HX10-NP ซึ่งใช้สำหรับตรวจวัดกระแส โดยแปลงขนาดกระแสเป็นแรงดันและแยกโดดทางไฟฟ้าไปในตัวพร้อมกัน เนื่องจากระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการทดสอบนี้เป็นระบบสามเฟสสามสาย ดังนั้นการตรวจจับกระแสเพียง 2 เฟสจึงเพียงพอแล้ว เพราะขนาดของกระแสอีกเฟสที่เหลือสามารถคำนวณได้ดังสมการ ซึ่งสอดคล้องกับกฎของ

$$i_c = -i_a - i_b \quad (4.2)$$

สัญญาณแอนะล็อกที่ได้จากวงจรตรวจจับทั้งหมด จะถูกแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิทัลผ่านวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลซึ่งใช้ไอซีรุ่น AD7607 ทำหน้าที่หลัก ไอซีรุ่นดังกล่าวสามารถรับสัญญาณแอนะล็อกพิสัย -10 ถึง 10 V มีความละเอียด 14 บิต และมีช่องสัญญาณเข้า 8 ช่องสัญญาณ สัญญาณที่ถูกแปลงแล้วจะส่งไปให้วงจรควบคุมใช้คำนวณต่อไป

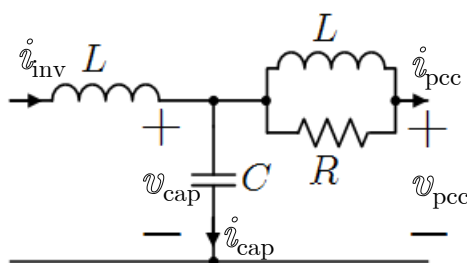
4.1.3 วงจรควบคุม

วงจรที่ควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์เครื่องต้นแบบในงานวิจัยนี้จะอาศัยบอร์ด DSP รุ่น eZdsp TMS320F2812 ของบริษัท Texas Instrument จำกัด บอร์ดควบคุมรุ่นดังกล่าว 1 บอร์ดเพียงพอสำหรับการสั่งการทำงานตามเงื่อนไขการควบคุมกำลังรีแอกทีฟต่างๆ

นอกจากนี้ ยังมีวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกสำหรับแปลงค่าตัวแปรที่ต้องการสังเกตผ่านออสซิลอสโคป ตัวแปรดังกล่าวคือค่าที่คำนวณได้จากบอร์ดควบคุม สำหรับไอซีแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกมีความละเอียด 12 บิต และมี 8 ช่องสัญญาณ

4.2 วิธีการคำนวณกระแสที่ไหลในตัวเก็บประจุของวงจรกรองแบบผ่านต่ำ

เนื่องจากส่วนวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลมีเพียง 8 ช่องสัญญาณ ไม่เพียงพอสำหรับการตรวจจับกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ สำหรับกระแสที่ไหลในตัวเก็บประจุของวงจรกรองแบบผ่านต่ำได้จึงใช้การคำนวณแทนการตรวจจับโดยตรง โดยการคำนวณเป็นดังนี้



รูปที่ 4.2 วงจรสมมูลที่ใช้ในการคำนวณกระแสที่ไหลในตัวเก็บประจุของวงจรกรองแบบผ่านต่ำ

จาก ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออกจากอินเวอร์เตอร์ กระแสที่ไหลในตัวเก็บประจุและกระแสที่ไหลเข้าระบบโครงข่ายไฟฟ้าอ้างอิงบนกรอบอ้างอิง dq เป็นดังสมการ

$$i_{cap} = i_{inv} - i_{pcc} \quad (4.3)$$

ปัญหาอย่างหนึ่งของการคำนวณหากระแสที่ไหลในตัวเก็บประจุตามสมการ (4.3) เนื่องจากกระแส i_{inv} มีองค์ประกอบความถี่สูงปนอยู่มาก ทำให้การคำนวณตามสมการ (4.3) ไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงคำนวณกระแส i_{cap} ผ่านความสัมพันธ์ของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ ซึ่งความสัมพันธ์ของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ และกระแสที่ไหลเข้าจุดต่อเชื่อม แสดงได้ดังสมการ

$$v_{cap} = i_{pcc} \cdot Z + v_{pcc} \quad (4.4)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ไหลเข้าตัวเก็บประจุ กับแรงดันที่ตกคร่อมเป็น

$$i_{cap} = j\omega C \parallel v_{cap} \parallel \quad (4.5)$$

สมการ (4.6) - (4.10) จะเป็นการคำนวณหาค่า $\parallel v_{cap} \parallel$ เพื่อใช้ในการหาค่ากระแสที่ไหลเข้าตัวเก็บประจุต่อไป

อิมพีแดนซ์ที่ขนานกันระหว่างตัวต้านทานกับตัวเหนี่ยวนำเป็นดังสมการ

$$\mathbf{z} = \frac{j\omega LR}{R + j\omega L} = \frac{\omega^2 L^2 R}{R^2 + \omega^2 L^2} + j \frac{\omega LR^2}{R^2 + \omega^2 L^2} \quad (4.6)$$

แทนค่าจากสมการ (4.6) ลงในสมการ (4.4)

$$\begin{bmatrix} v_{\text{cap}_d} \\ v_{\text{cap}_q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{\text{pcc}_d} \cdot \frac{\omega^2 L^2 R}{R^2 + \omega^2 L^2} - i_{\text{pcc}_q} \cdot \frac{\omega LR^2}{R^2 + \omega^2 L^2} \\ i_{\text{pcc}_d} \cdot \frac{\omega LR^2}{R^2 + \omega^2 L^2} + i_{\text{pcc}_q} \cdot \frac{\omega^2 L^2 R}{R^2 + \omega^2 L^2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{\text{pcc}_d} \\ v_{\text{pcc}_q} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

กำหนดให้

$$A = i_{\text{pcc}_d} \cdot \frac{\omega^2 L^2 R}{R^2 + \omega^2 L^2} - i_{\text{pcc}_q} \cdot \frac{\omega LR^2}{R^2 + \omega^2 L^2} + v_{\text{pcc}_d} \quad (4.8)$$

$$B = i_{\text{pcc}_d} \cdot \frac{\omega LR^2}{R^2 + \omega^2 L^2} + i_{\text{pcc}_q} \cdot \frac{\omega^2 L^2 R}{R^2 + \omega^2 L^2} + v_{\text{pcc}_q} \quad (4.9)$$

ดังนั้นจะได้ว่าขนาดของ \mathcal{V}_{cap} มีค่าเท่ากับ

$$\|\mathcal{V}_{\text{cap}}\| = \sqrt{A^2 + B^2} \quad (4.10)$$

นำค่าที่ได้จากสมการ แทนค่าลงสมการ

$$\mathbf{i}_{\text{cap}} = \begin{bmatrix} i_{\text{cap}_d} \\ i_{\text{cap}_q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega C \sqrt{A^2 + B^2} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

ขนาดของกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บตัวประจุที่คำนวณได้ดังสมการที่ (4.11) จะนำไปใช้ในการคำนวณดังที่ได้นำเสนอเงื่อนไขและวิธีการควบคุมกำลังรีแอกทีฟในบทที่ 2 ต่อไป

4.3 เงื่อนไขการทดสอบการทำงาน

เงื่อนไขของการทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์สามเฟสเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่มีการควบคุมกำลังรีแอกทีฟในแบบต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 เงื่อนไขการทดสอบการทำงาน

หัวข้อการทดสอบ	ข้อกำหนดการเชื่อมต่อ	เงื่อนไข	กรณี
การส่งจ่ายกระแสฟีดเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า	ตามตารางที่ 4.3	ตัวประกอบกำลังด้านออก = 1	1
		ตัวประกอบกำลังด้านออก = 0 ล้าหลัง	2
		ตัวประกอบกำลังด้านออก = 0 นำหน้า	3
การตอบสนองชั่วคราวของระบบควบคุม	-	ตัวประกอบกำลังด้านออก = 1	4
		ตัวประกอบกำลังด้านออก = 0 ล้าหลัง	5
		ตัวประกอบกำลังด้านออก = 0 นำหน้า	6
การแปรผันค่ากระแสคำสั่งตามวิธีที่กำหนด	ตัวประกอบกำลังด้านออกต้องไม่ต่ำกว่า 0.9	ตามรูปที่ 4.9	7
		ตามรูปที่ 4.10	8
		ตามรูปที่ 4.11	9
การรักษาระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ	ตามตารางที่ 2.1	แรงดันเกิน	10
		แรงดันเกินและมีการลดกระแส i_d^*	11
		แรงดันตก	12
		แรงดันตกและมีการลดกระแส i_d^*	13
ความสามารถในการทนต่อสภาวะแรงดันตกชั่วขณะ	ตามรูปที่ 2.2	ความผิดพลาดหนึ่งเฟส	14
		ความผิดพลาดสองเฟส	15
		ความผิดพลาดสามเฟส	16
การป้องกันการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดด	กำหนดเวลาไม่เกิน 2 วินาที	เกิดภาวะการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดด	17

4.4 ผลการทดสอบการทำงาน

4.4.1 การทดสอบส่งจ่ายกระแสฟลักซ์เข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า

ฟลักซ์กำลังของอินเวอร์เตอร์เครื่องต้นแบบเท่ากับ 3000 VA เชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าสามเฟสระดับแรงดันระหว่างสาย 380 V ขนาดกระแสฟลักซ์เท่ากับ

$$I_{L-L} = \frac{S}{\sqrt{3}V_{L-L}} = \frac{3000}{\sqrt{3} \cdot 380} = 4.56 \text{ A} \quad (4.12)$$

ขนาดกระแสฟลักซ์ตามสมการ (4.12) มีแอมป์ลิจูดเท่ากับ

$$I_{L-L_{\text{peak}}} = \sqrt{2} \cdot I_{L-L} = 6.45 \text{ A} \quad (4.13)$$

ในการอธิบายผลการทดสอบการทำงาน รูปคลื่นของกระแสผลการทดสอบส่งจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ตัวประกอบกำลังด้านออกตั้งแต่ 0 ถึง 1 เป็นการยืนยันว่าอินเวอร์เตอร์สามารถส่งจ่ายกระแสที่ตัวประกอบกำลังค่าใดก็ได้ ไม่มีข้อจำกัดในประเด็นนี้

เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาผลการทดสอบสำหรับหัวข้อนี้ จึงแสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันเพียงเฟสเดียว และแสดงขนาดของกระแสค่าสั่งค่ายอด (peak current) แทนค่ารากกำลังสองเฉลี่ย สำหรับสัญญาณแต่ละรูปคลื่นของกรณีที่ 1-3 เป็นแรงดันเฟส a และกระแสด้านออกเฟส a ของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้จากการทดสอบส่งจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ตัวประกอบกำลังด้านออกเท่ากับหนึ่ง, ตัวประกอบกำลังด้านออกเท่ากับศูนย์แบบล้าหลัง และแบบนำหน้าตามลำดับที่ตัวประกอบกำลังด้านออกเท่ากับหนึ่ง รูปคลื่นกระแสและแรงดันมีเฟสตรงกัน และที่ตัวประกอบกำลังด้านออกเท่ากับศูนย์ทั้งสองกรณี รูปคลื่นกระแสและแรงดันมีเฟสต่างกัน 90 องศา สำหรับฮาร์มอนิกของกระแสในการทดสอบทั้งสามกรณีผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่ขีดจำกัดความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม (Total Harmonic Distortion, THD) มีค่าไม่เกินร้อยละ 5 และมีขนาดกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ไม่เกินขีดจำกัดดังตารางที่ 4.3

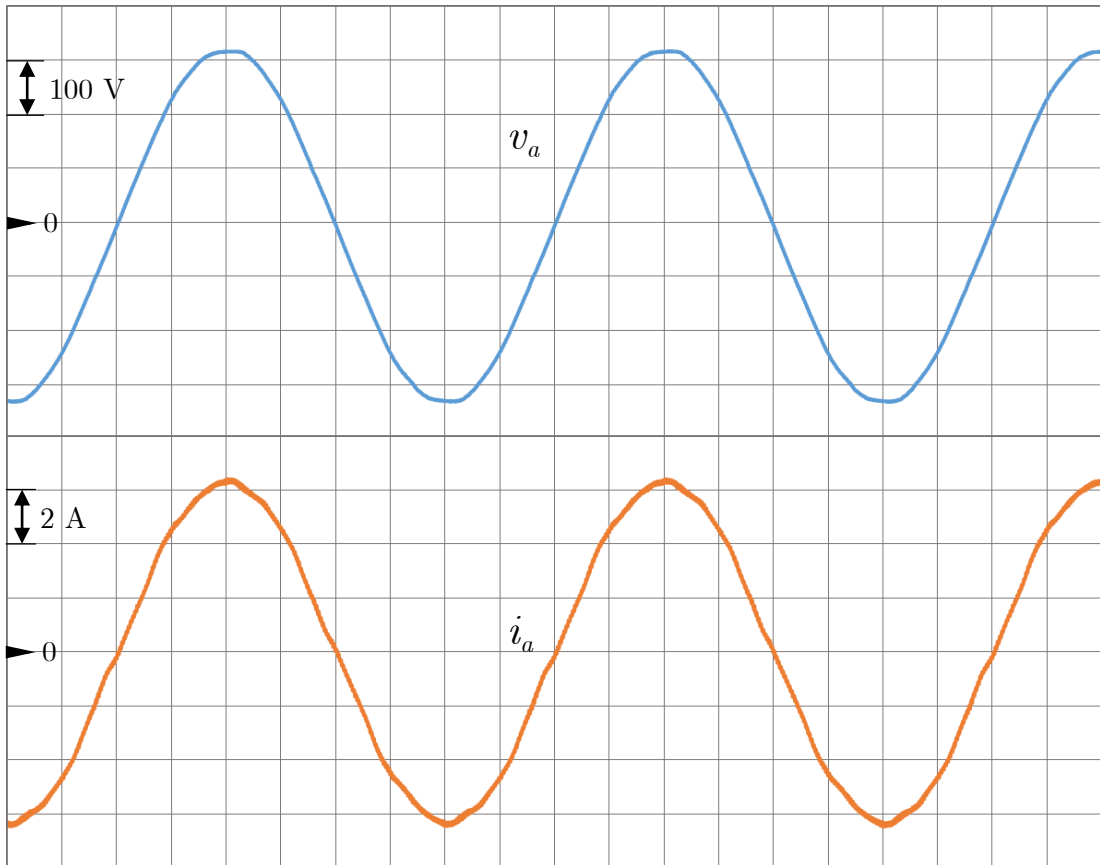
ตารางที่ 4.3 ขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกตามข้อกำหนดฯ ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

อันดับคี่	ขีดจำกัดกระแส (ร้อยละ)	อันดับคู่	ขีดจำกัดกระแส (ร้อยละ)
3,5,7,9	4.0	2,4,6,8	1.0
11,13,15	2.0	10,12,,,,,30,32	0.5
17,19,21	1.5		
23,25,27,29,31,33	0.6		

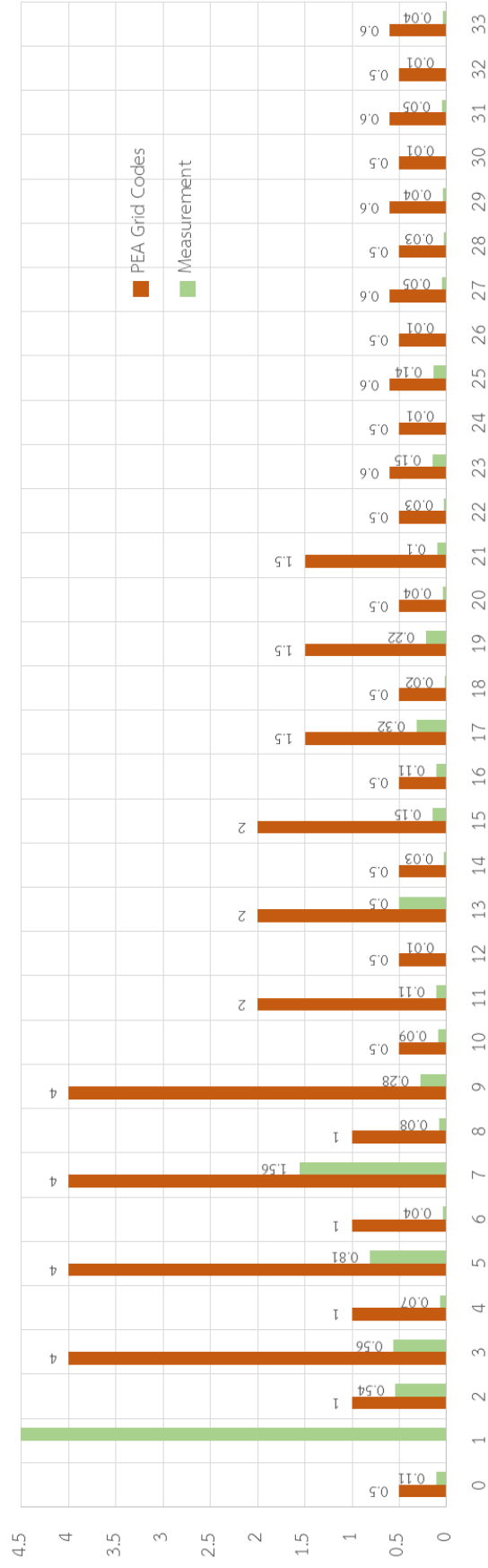
กรณีที่ 1 การทดสอบป้อนกระแสเข้าสู่ระบบโครงข่ายฯ ที่ตัวประกอบกำลังด้านออกเท่ากับหนึ่ง

2.5 ms



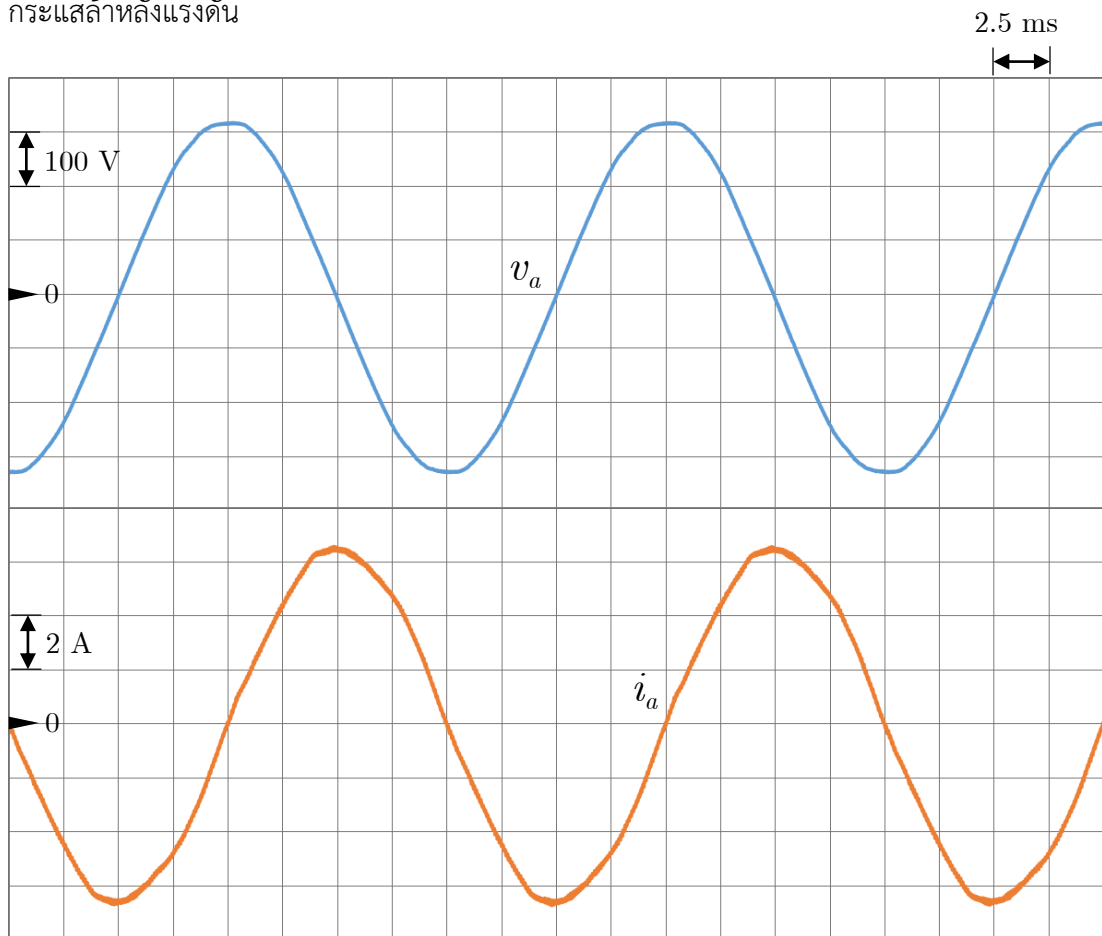


รูปที่ 4.3 รูปคลื่นแรงดันและกระแสเฟส a ของการทดสอบกรณีที่ 1

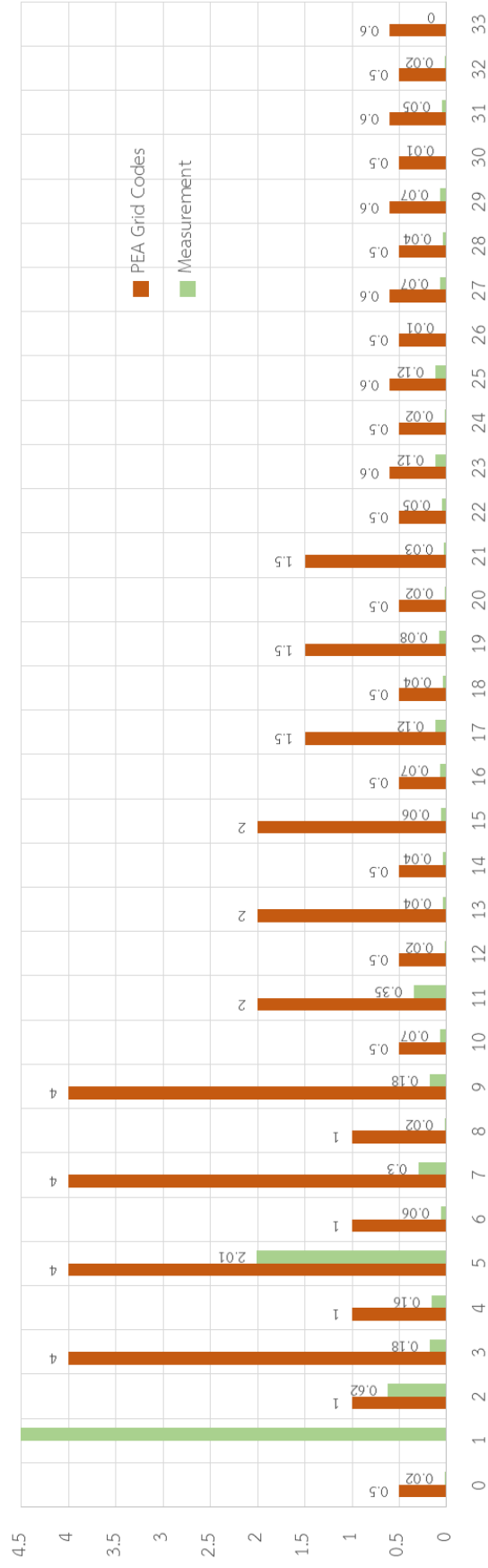


รูปที่ 4.4 สเปกตรัมของกระแสต้านออกของรูปคลื่นกระแสในกรณีข้อที่ 1 เปรียบเทียบกับขีดจำกัดกระแสแอสซาร์เมอนิกตามข้อกำหนดของไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

กรณีที่ 2 การทดสอบป้อนกระแสเข้าสู่ระบบโครงข่ายฯ ที่ตัวประกอบกำลังด้านออกเท่ากับศูนย์ แบบ
กระแสล่าหลังแรงดัน

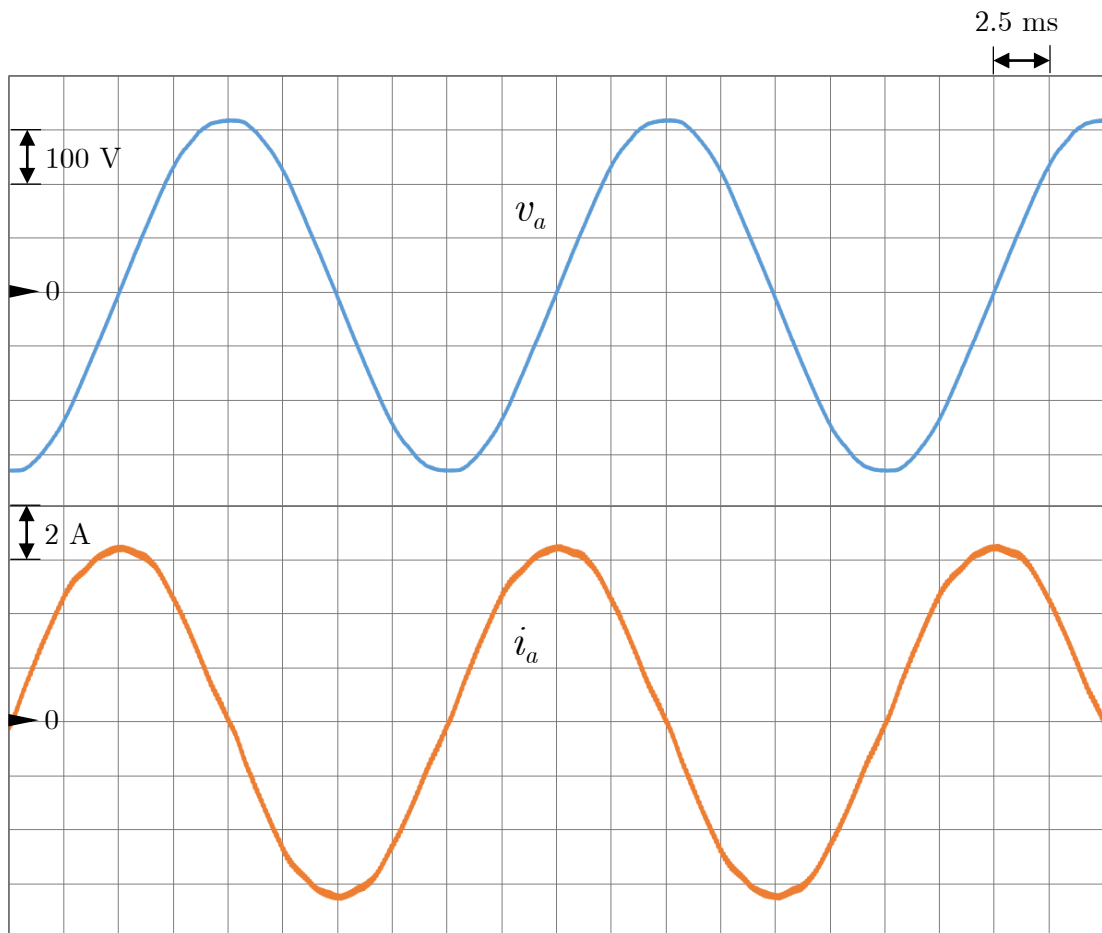


รูปที่ 4.5 รูปคลื่นแรงดันและกระแสเฟส a ของการทดสอบกรณีที่ 2

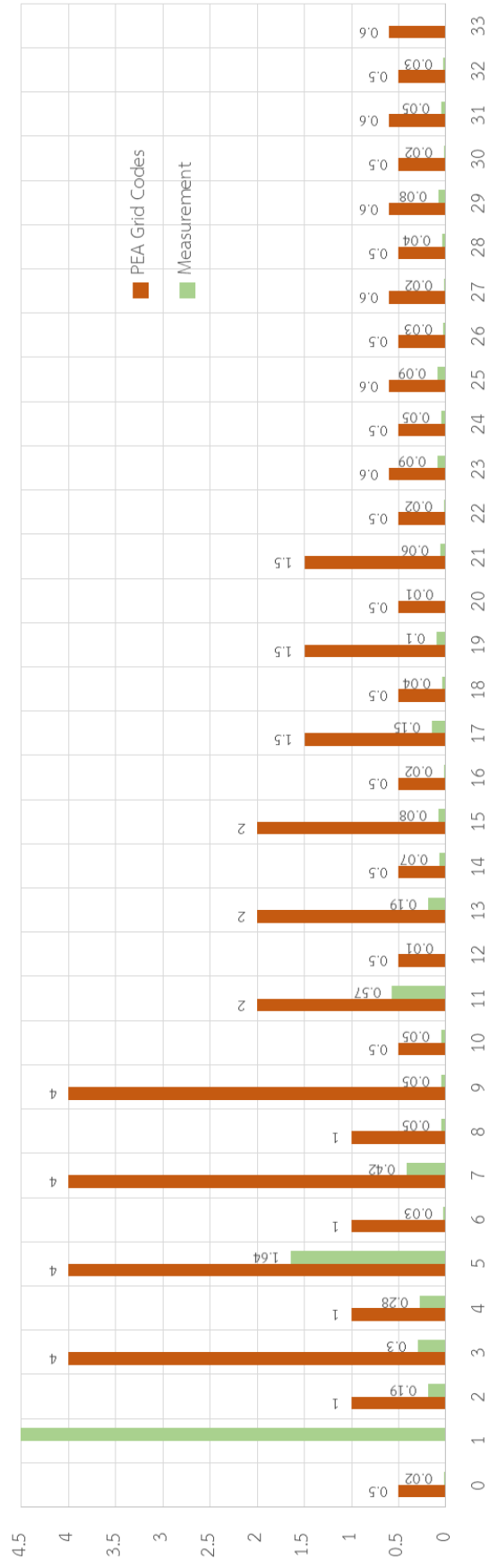


รูปที่ 4.6 สเปกตรัมของกระแสต้านออกของรูปคลื่นกระแสในกรณีที่มี 2 เปรียบเทียบกับชนิดจำกัดกระแสแอสซิงโครนัสตามข้อกำหนดของไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

กรณีที่ 3 การทดสอบป้อนกระแสเข้าสู่ระบบโครงข่ายฯ ที่ตัวประกอบกำลังด้านออกเท่ากับศูนย์ แบบ
กระแสนำหน้าแรงดัน



รูปที่ 4.7 รูปคลื่นแรงดันและกระแสเฟส a ของการทดสอบกรณีที่ 3



รูปที่ 4.8 สเปกตรัมของกระแสเสถียรด้านออกของรูปคลื่นกระแสเสถียรชนิดที่ 3 เปรียบเทียบกับขีดจำกัดกระแสเสถียรชนิดที่กำหนดค่าของไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

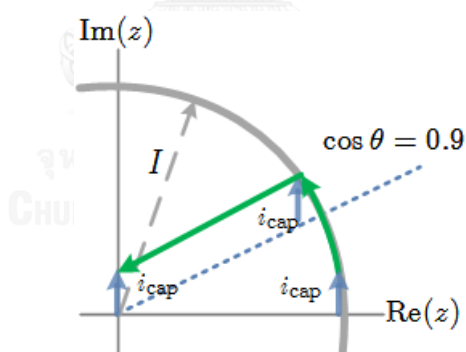
4.4.2 การทดสอบผลตอบแทนของชั่วคราวของระบบควบคุม

ผลการทดสอบเปลี่ยนกระแสคำสั่งไฟฟ้าฉับพลันจากศูนย์เป็นพิกัดในแบบฟังก์ชันขั้นบันได มีจุดประสงค์เพื่อแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของอินเวอร์เตอร์ที่สามารถตอบสนองได้ภายในระยะเวลาอันรวดเร็ว ซึ่งจาก

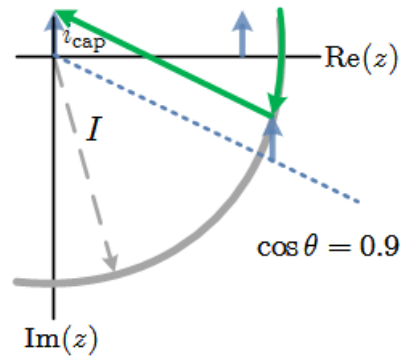
รูปที่ 4.12 - รูปที่ 4.14 จะเห็นว่าใช้เวลาประมาณ 6 ms ขนาดของกระแสจึงอยู่ในสถานะอยู่ตัว สำหรับกรณีที่ 6 และ 7 ขนาดของกระแสคำสั่ง i_q^* ก่อนการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ เนื่องจากต้องสร้างกระแสคำสั่งส่วนหนึ่งเพื่อชดเชยกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุในวงจรกรองแบบผ่านต่ำ ในเงื่อนไขแรงดันที่จุดเชื่อมต่อเท่ากับ 380 V ขนาดกระแสชดเชยมีค่าสอดคล้องกับ 1.22 A

4.4.3 การทดสอบการแปรผันค่ากระแสคำสั่งตามวิธีที่กำหนด

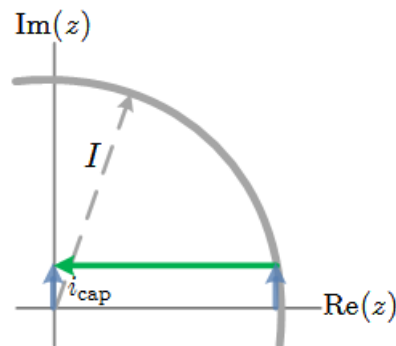
เพื่อยืนยันว่าระบบควบคุมที่ได้ออกแบบสามารถทำงานในทุกเงื่อนไขกระแสคำสั่ง ภายใต้เงื่อนไขข้อกำหนดการเชื่อมต่อบริเวณโครงข่ายไฟฟ้า และภายใต้เงื่อนไขพิกัดอุปกรณ์ จึงได้ออกแบบการทดสอบให้อินเวอร์เตอร์สั่งจ่ายกระแสแบบแปรผันกระแสคำสั่ง โดยค่าที่แปรผันแสดงได้ตามวิถี (path) ดังรูปที่ 4.9 - รูปที่ 4.11 สำหรับช่วงระยะเวลาที่แปรผันจากจุดเริ่มต้นถึงจุดสุดท้ายเท่ากับ 2 วินาที



รูปที่ 4.9 วิธีของกระแสคำสั่งที่ใช้สำหรับการทดสอบกรณีที่ 7



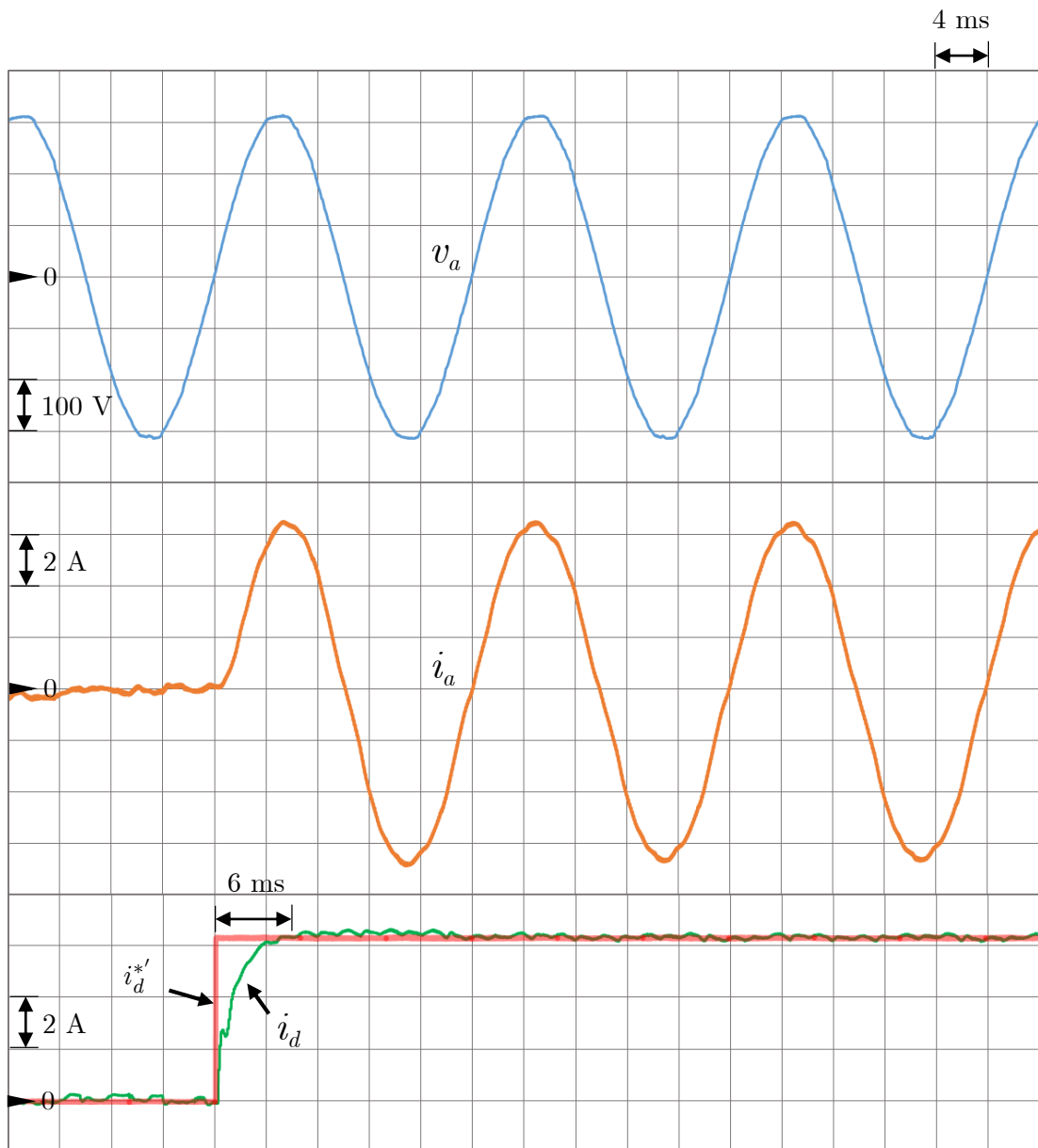
รูปที่ 4.10 วิธีของกระแสดำสั่งที่ใช้สำหรับการทดสอบกรณีที่ 8



รูปที่ 4.11 วิธีของกระแสดำสั่งที่ใช้สำหรับการทดสอบกรณีที่ 9

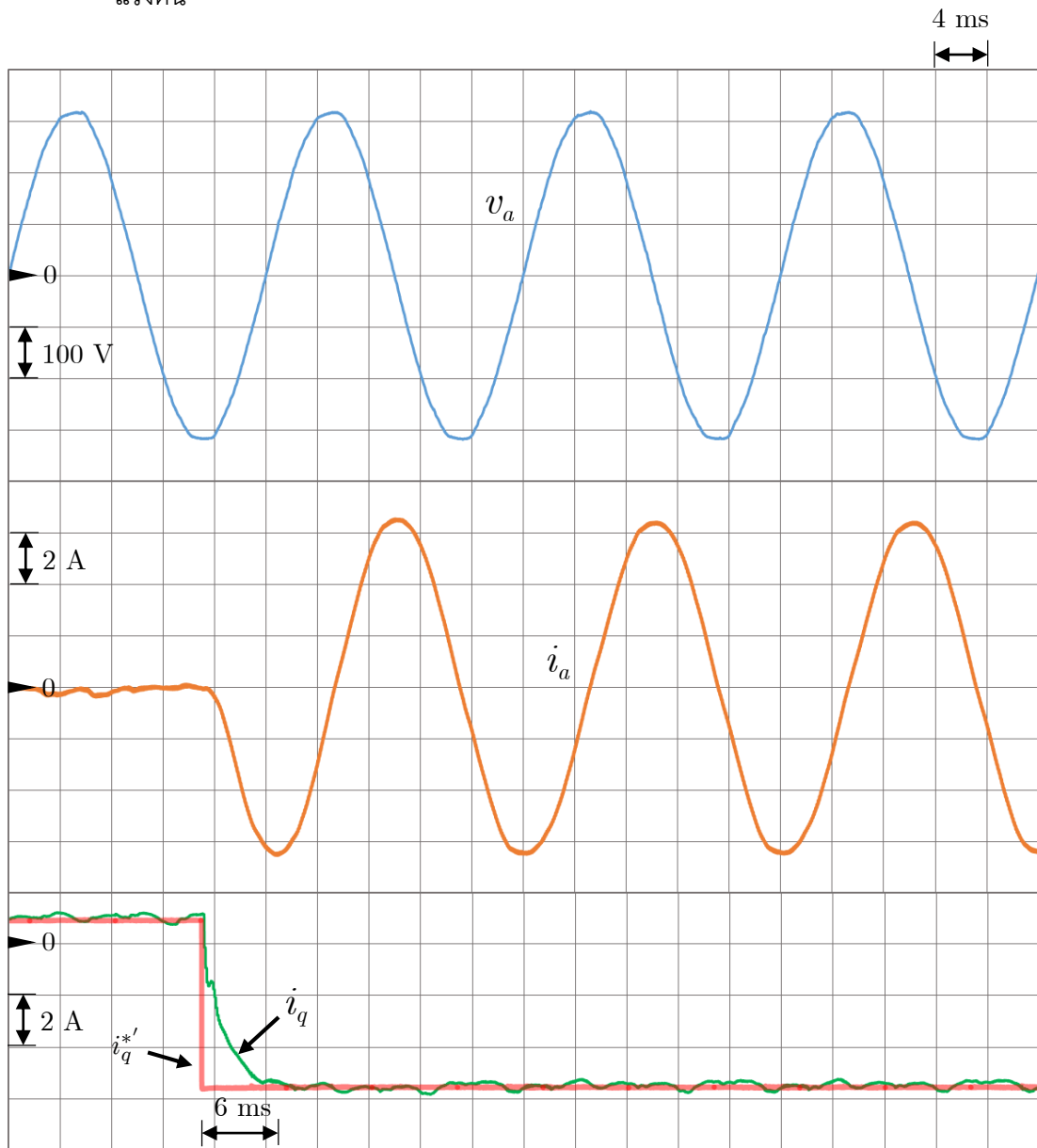
จากผลการทดสอบในกรณีที่ 7-9 เนื่องจากการออกแบบระบบควบคุมให้มีผลตอบสนองที่รวดเร็ว จะเห็นว่ารูปคลื่นกระแสดำสั่งและกระแสที่ตรวจจับได้จึงมีลักษณะทาบกันได้แนบสนิทพอดี ซึ่งในทางปฏิบัติปรากฏการณ์แรงดันเกินและแรงดันตกจะมีช่วงเวลาการตอบสนองที่ช้ากว่านี้ ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าอินเวอร์เตอร์สามารถทำงานตามเงื่อนไขต่างๆ ที่นำเสนอได้ทันอย่างแน่นอน

กรณีศึกษาที่ 4 การทดสอบผลตอบสนองชั่วครู่ของระบบควบคุม ที่ตัวประกอบกำลังด้านออกเท่ากับหนึ่ง



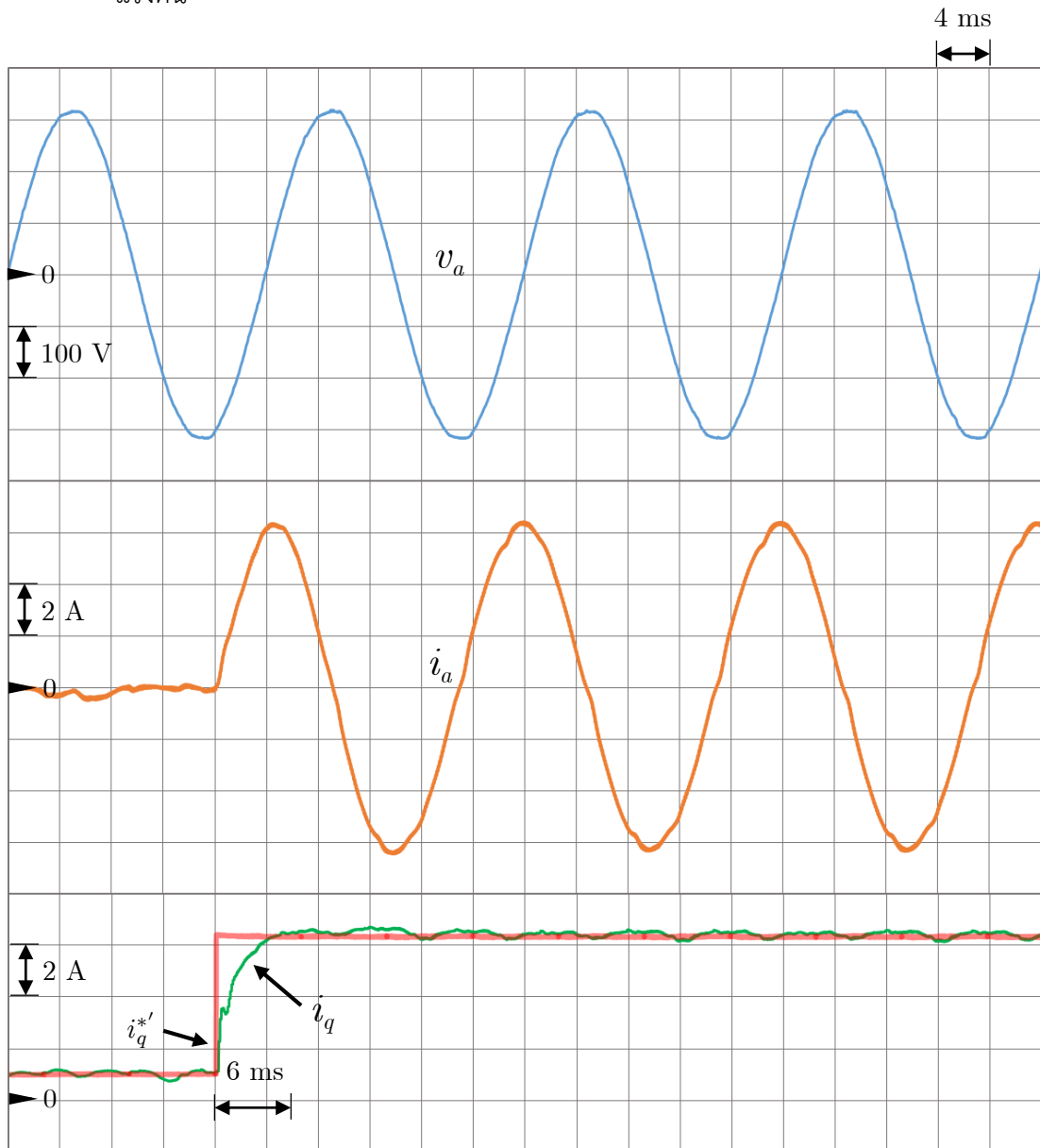
รูปที่ 4.12 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเฟส a และสัญญาณกระแสคำสั่งในการทดสอบกรณีศึกษาที่ 4

กรณีศึกษาที่ 5 การทดสอบผลตอบสนอง ที่ตัวประกอบกำลังด้านออกเท่ากับศูนย์ แบบกระแสล้าหลัง แรงดัน



รูปที่ 4.13 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเฟส a และสัญญาณกระแสคำสั่งในการทดสอบกรณีศึกษาที่ 5

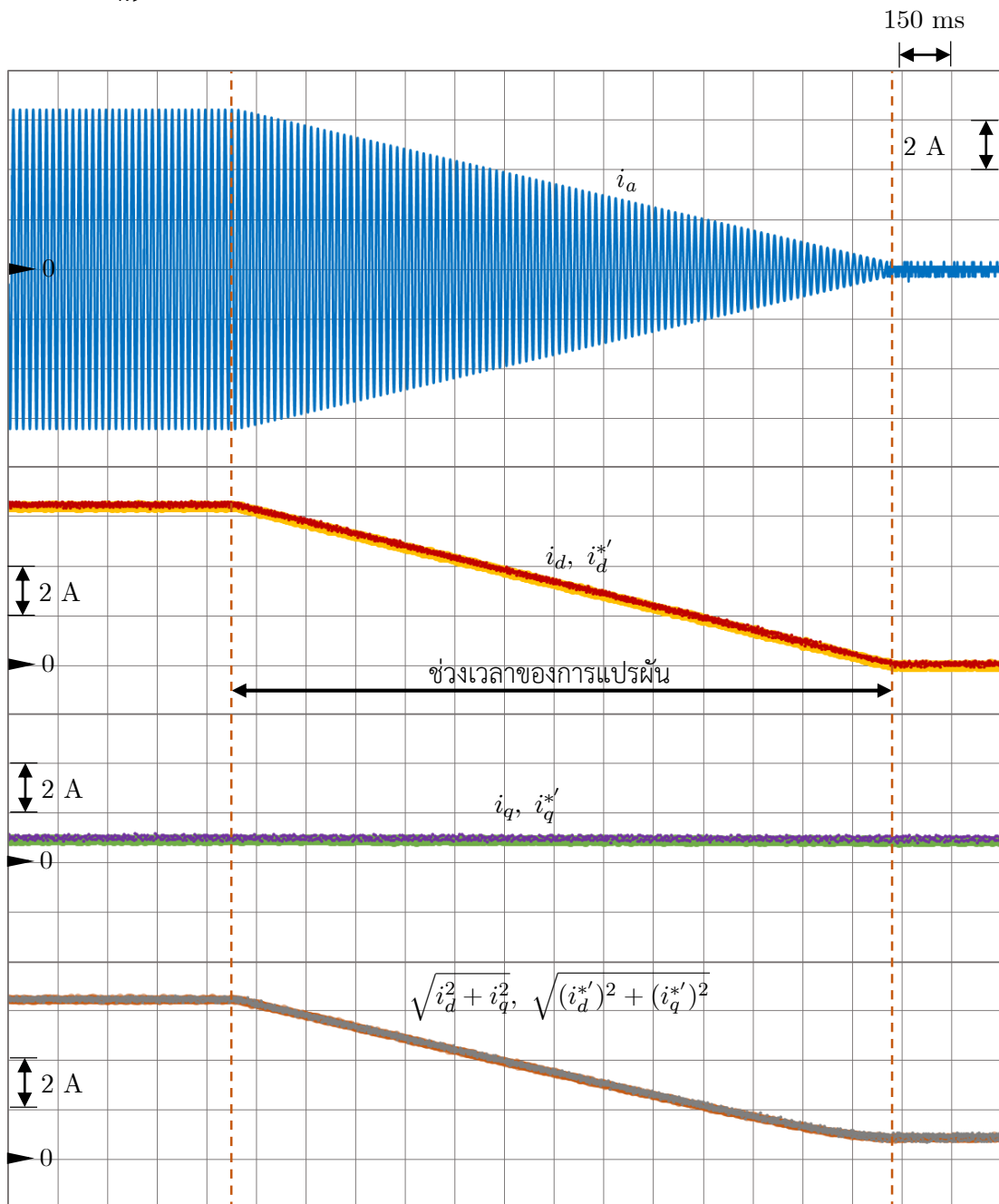
กรณีศึกษาที่ 6 การทดสอบผลตอบสนอง ที่ตัวประกอบกำลังด้านออกเท่ากับศูนย์ แบบกระแสหน้า
แรงดัน



รูปที่ 4.14 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเฟส a และสัญญาณกระแสคำสั่งในการทดสอบกรณีศึกษาที่ 6

กรณีศึกษาที่ 7 การทดสอบการส่งจ่ายกระแสไฟฟ้าตามวิธีของขอบเขตจุดทำงานของอินเวอร์เตอร์ในรูปแบบที่

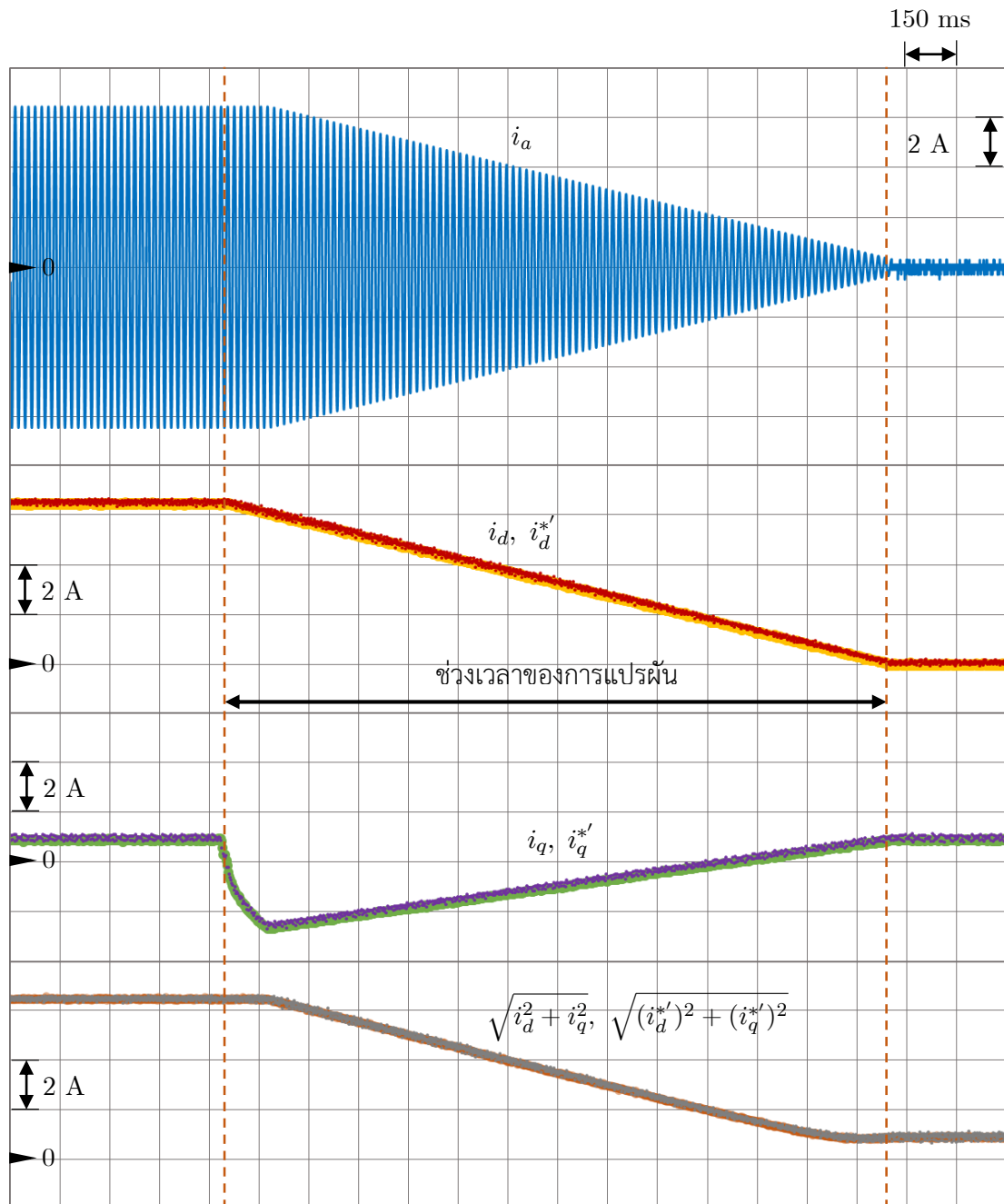
4.9



รูปที่ 4.15 รูปคลื่นของปริมาณต่างๆ ที่ตรวจวัดได้สำหรับการทดสอบกรณีศึกษาที่ 7

กรณีศึกษาที่ 8 การทดสอบการส่งจ่ายกระแสไฟฟ้าตามวิธีของขอบเขตจุดทำงานของอินเวอร์เตอร์ในรูปแบบที่

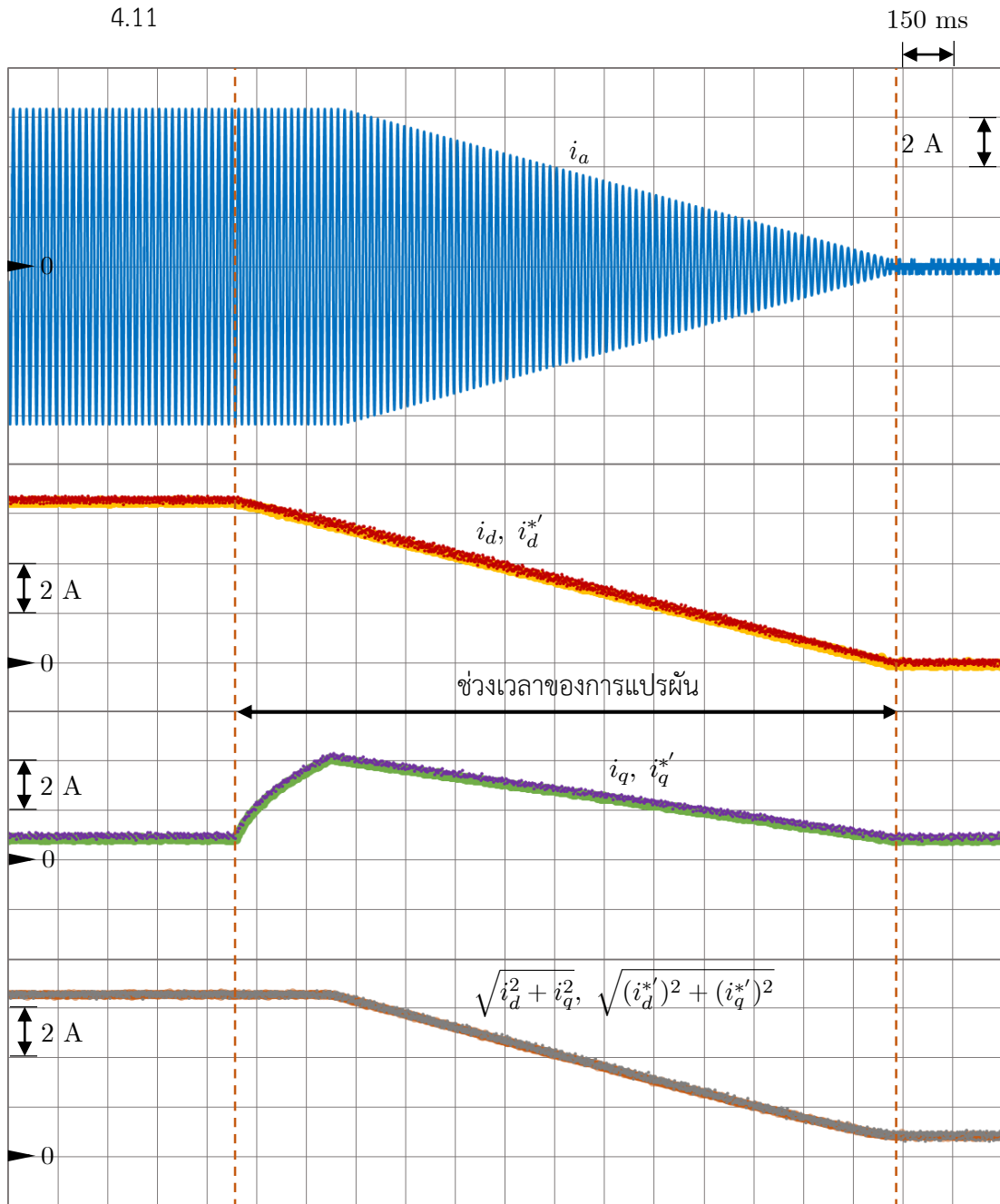
4.10



รูปที่ 4.16 รูปคลื่นของปริมาณต่างๆ ที่ตรวจวัดได้สำหรับการทดสอบกรณีศึกษาที่ 8

กรณีศึกษาที่ 9 การทดสอบการสั่งจ่ายกระแสไฟฟ้าตามวิธีของขอบเขตจุดทำงานของอินเวอร์เตอร์ในรูปแบบที่

4.11



รูปที่ 4.17 รูปคลื่นของปริมาณต่างๆ ที่ตรวจวัดได้สำหรับการทดสอบกรณีศึกษาที่ 9

4.4.4 การทดสอบการรักษาระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ

การทดสอบในหัวข้อนี้มีจุดประสงค์เพื่อทดสอบสมรรถนะการทำงานของอินเวอร์เตอร์ดังที่ได้เสนอหลักการตามหัวข้อที่ 3.3 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในแต่ละเงื่อนไขแสดงได้ดัง

ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการทดสอบการรักษาระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ

หัวข้อการทดสอบ	กระแสคำสั่ง i_d^* เริ่มต้น	ระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ	ขนาด V_{ref} ในระบบควบคุม
กรณีที่ 7 แรงดันเกิน	4 A	230 V (398 V)	225 V (390 V)
กรณีที่ 8 แรงดันเกิน	4 A	230 V (398 V)	225 V (390 V)
กรณีที่ 9 แรงดันตก	6.45 A (พิกัด)	195 V (337 V)	198 V (343 V)
กรณีที่ 10 แรงดันตก	6.45 (พิกัด)	195 V (337 V)	198 V (343 V)

การทดสอบในหัวข้อนี้จะปรับตั้งระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อไว้ก่อนล่วงหน้า จากนั้นจึงโปรแกรมตั้งเวลาให้ระบบควบคุมกำลังรีแอกทีฟทำงาน ก่อนที่ระบบควบคุมรีแอกทีฟจะทำงานจะใช้เงื่อนไขกระแสคำสั่งในสภาวะปกติ (หัวข้อที่ 3.4.2.1) อินเวอร์เตอร์จะส่งป้อนกำลังจริงเข้าระบบโครงข่ายไฟฟ้าเท่านั้น เมื่อระบบควบคุมกำลังรีแอกทีฟทำงานแล้ว อินเวอร์เตอร์จึงทำงานตามเงื่อนไขอื่นๆ ที่กำหนดต่อไป

ในกรณีที่ 7-8 เป็นการทดสอบในสภาวะแรงดันเกิน เนื่องจากมีข้อจำกัดทางด้านอุปกรณ์กำเนิดแรงดันในการวิจัย โดยไม่สามารถสร้างระดับแรงดันที่สูงกว่า 400 V ได้ ในกรณีการทดสอบนี้จึงปรับข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า ให้ระดับแรงดันช่วงทำงานต่อเนื่องสูงสุดเป็น 225 V (390 V) แทนค่า 242 V (419 V) ที่ระบุในข้อกำหนดฯ

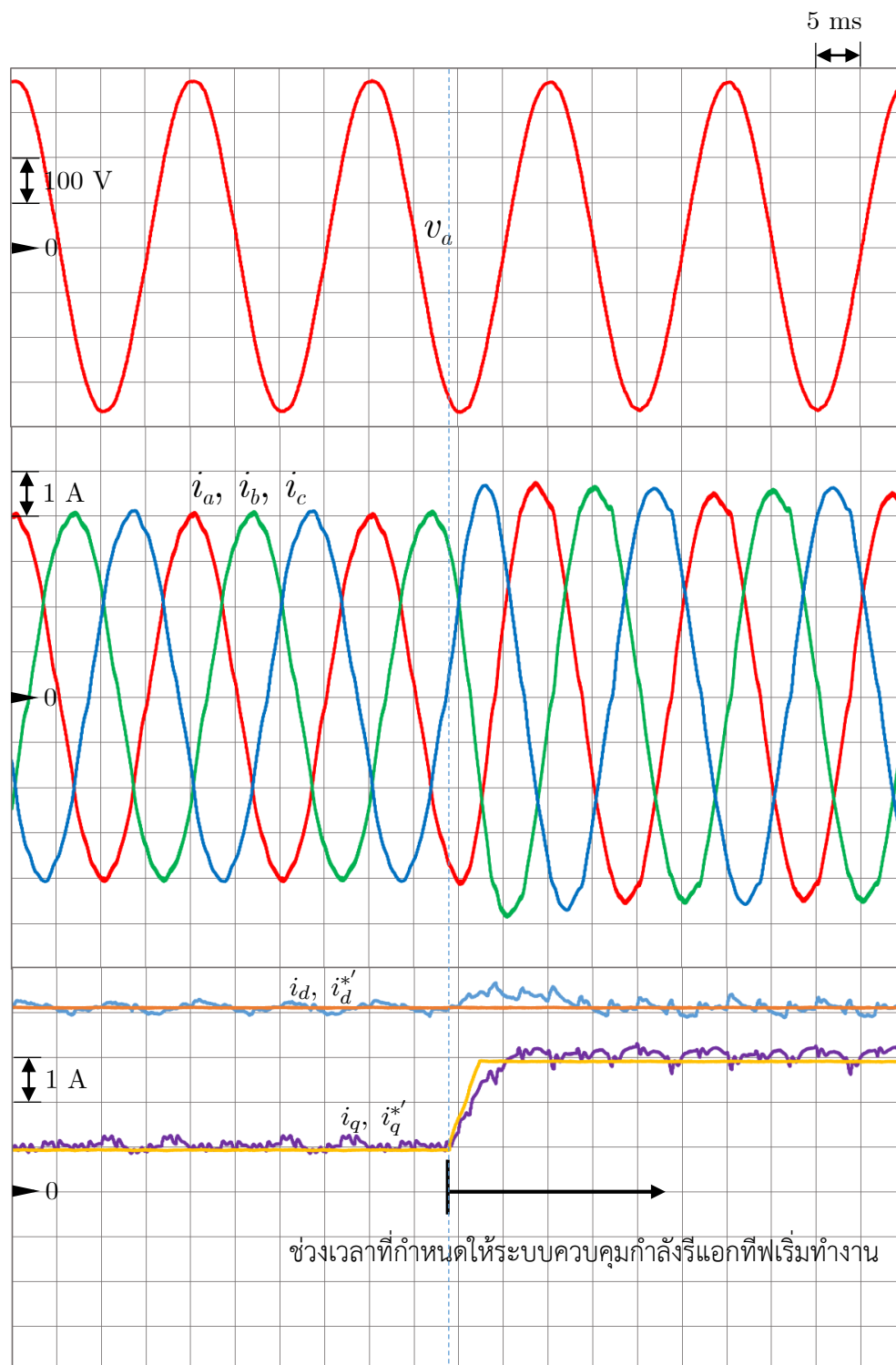
สำหรับกรณีที่ 7 กำหนดให้อินเวอร์เตอร์ทำงานที่จุดทำงานต่ำกว่าพิกัด และไม่จำเป็นต้องลดขนาดของกระแส i_d^* หากระดับแรงดันไม่อยู่ในระดับช่วงปกติ ก่อนที่ระบบควบคุมรีแอกทีฟจะทำงานจุดทำงานของอินเวอร์เตอร์เป็นดังรูปที่ 3.5 และจุดทำงานของอินเวอร์เตอร์หลังจากระบบควบคุมกำลังรีแอกทีฟเริ่มทำงานและอยู่ในสถานะอยู่ตัวแล้วเป็นดังรูปที่ 3.6 (ข)

ในกรณีที่ 8 กำหนดให้อินเวอร์เตอร์ทำงานที่จุดทำงานพิกัด เมื่อสั่งให้ระบบควบคุมกำลังรีแอกทีฟทำงาน จำเป็นต้องมีการลดขนาดกระแสคำสั่ง i_d^* เพื่อควบคุมไม่ให้อินเวอร์เตอร์ทำงานเกินพิกัด จนกระทั่งตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9 กระแสคำสั่งของอินเวอร์เตอร์จะคงที่ไว้จนกว่าระดับแรงดันจะลดลงมาอยู่ในระดับปกติ (รูปที่ 3.7 ง) หากปรากฏการณ์แรงดันเกินเกิดขึ้นนานกว่าที่ข้อกำหนดการเชื่อมต่อฯ ระบุไว้ อินเวอร์เตอร์จะหยุดการทำงานทันที

ในกรณีที่ 9-10 เป็นการทดสอบในสภาวะแรงดันตก สำหรับกรณีที่ 9 เงื่อนไขการทำงานคล้ายกันกับกรณีที่ 7 แต่ทิศของกระแสคำสั่ง i_d^* เป็นลบ จุดทำงานของอินเวอร์เตอร์เป็นดังรูปที่ 3.5 ก่อนที่ระบบควบคุมกำลังรีแอกทีฟจะถูกละทิ้งให้ทำงาน และหลังจากระบบควบคุมกำลังรีแอกทีฟเริ่มทำงานและอยู่ในสถานะอยู่ตัวแล้วจุดทำงานจะเป็นดังรูปที่ 3.8 (ข)

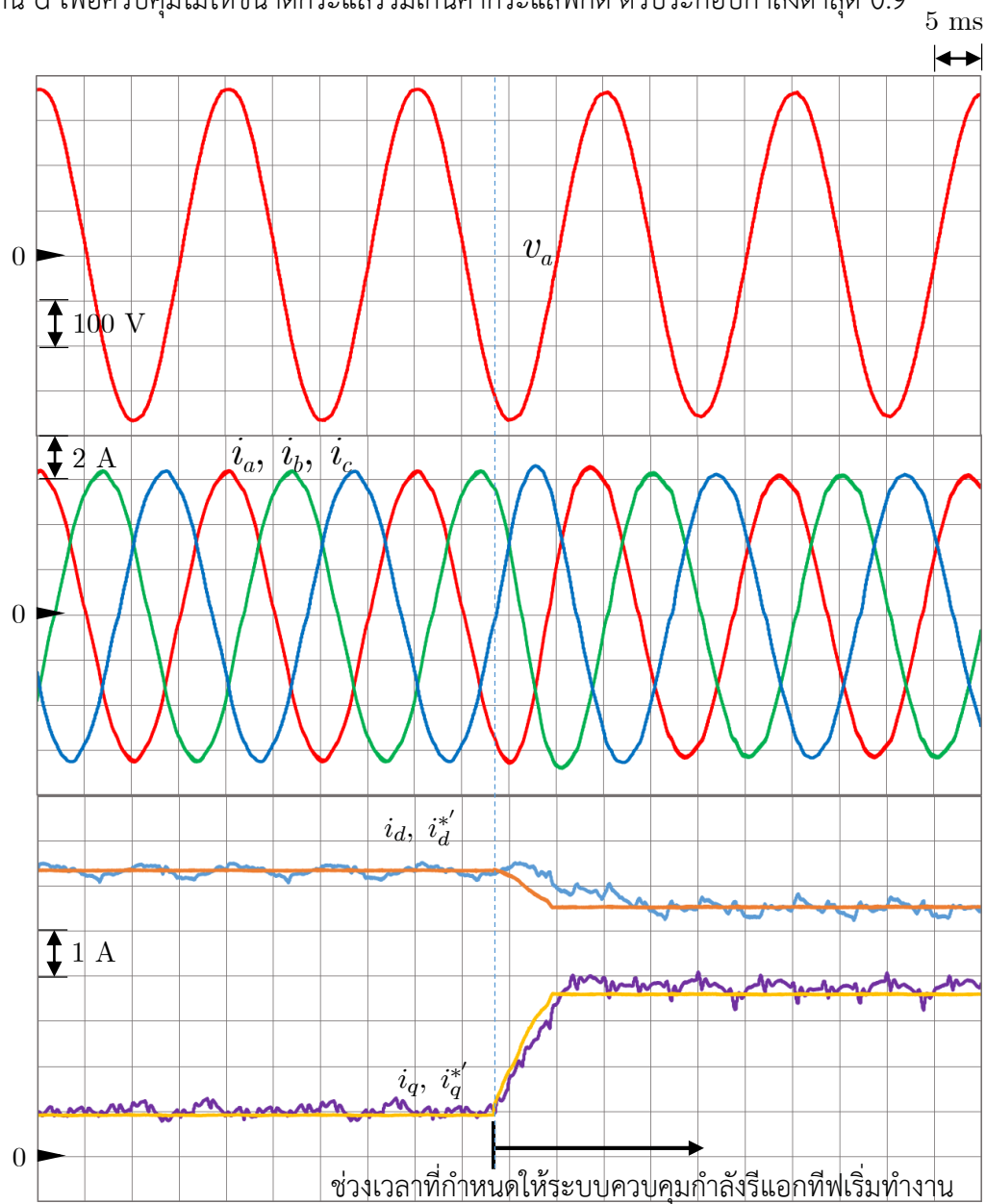
สำหรับกรณีที่ 10 ทำนองเดียวกันกับกรณีที่ 8 กำหนดให้อินเวอร์เตอร์ทำงานที่จุดทำงานพิกัด เมื่อสั่งให้ระบบควบคุมกำลังรีแอกทีฟทำงาน จำเป็นต้องมีการลดขนาดกระแสคำสั่ง i_d^* เพื่อควบคุมไม่ให้อินเวอร์เตอร์ทำงานเกินพิกัด จนกระทั่งตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9 กระแสคำสั่งของอินเวอร์เตอร์จะคงที่ไว้จนกว่าระดับแรงดันจะเพิ่มขึ้นมาอยู่ในระดับปกติ (รูปที่ 3.9 ข) หากปรากฏการณ์แรงดันตกเกิดขึ้นนานกว่าที่ข้อกำหนดการเชื่อมต่อฯ ระบุไว้ อินเวอร์เตอร์จะหยุดการทำงานทันที

กรณีศึกษาที่ 10 การทดสอบการควบคุมกำลังรีแอกทีฟขณะเกิดแรงดันเกิน ตัวประกอบกำลังต่ำสุด 0.9



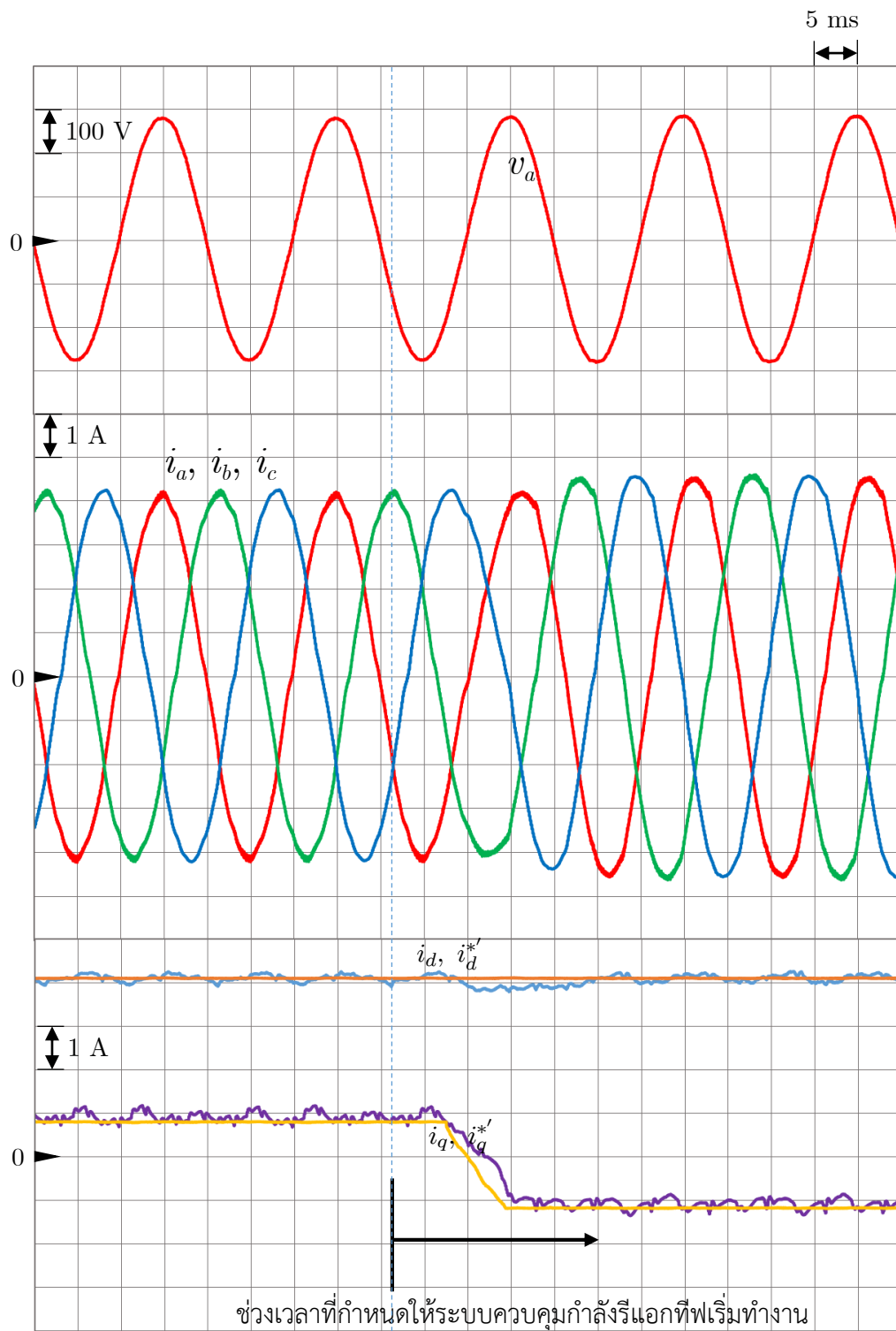
รูปที่ 4.18 รูปคลื่นกระแส แรงดัน สัญญาณกระแสคำสั่งต่างๆ ในการทดสอบกรณีศึกษาที่ 10

กรณีศึกษาที่ 11 การทดสอบการควบคุมกำลังรีแอกทีฟขณะเกิดแรงดันเกิน โดยมีการลดขนาดกระแสในแกน d เพื่อควบคุมไม่ให้ขนาดกระแสรวมเกินค่ากระแสพิกัด ตัวประกอบกำลังต่ำสุด 0.9



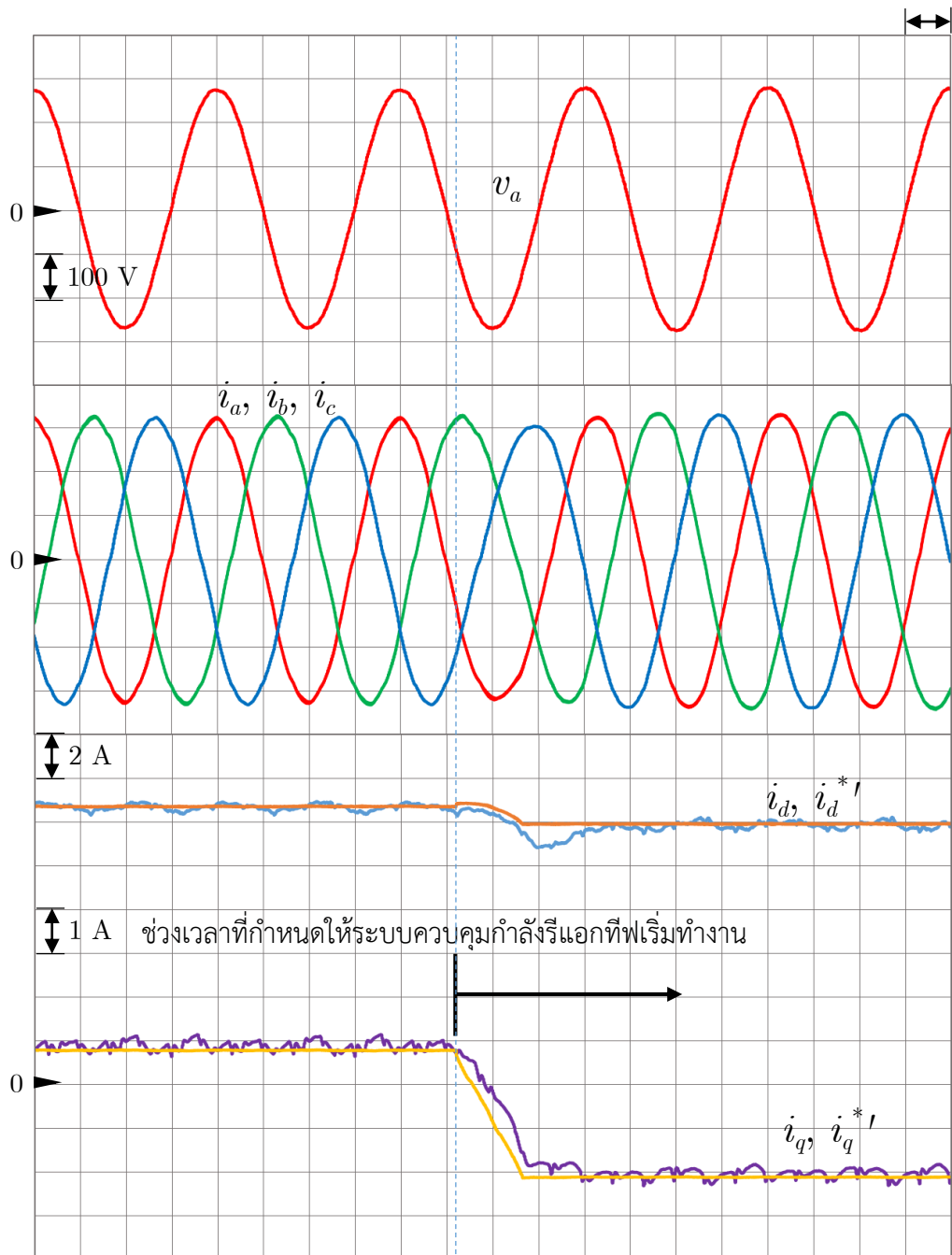
รูปที่ 4.19 รูปคลื่นกระแส แรงดัน สัญญาณกระแสคำสั่งต่างๆ ในการทดสอบกรณีศึกษาที่ 11

กรณีที่ 12 การทดสอบการควบคุมกำลังรีแอกทีฟขณะเกิดแรงดันตก ตัวประกอบกำลังต่ำสุด 0.9



รูปที่ 4.20 รูปคลื่นกระแส แรงดัน สัญญาณกระแสคำสั่งต่างๆ ในการทดสอบกรณีที่ 12

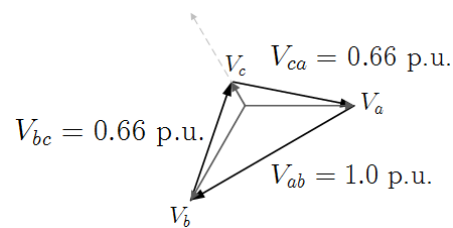
กรณีศึกษาที่ 13 การทดสอบการควบคุมกำลังรีแอกทีฟขณะเกิดแรงดันตก โดยมีการลดขนาดกระแสในแกน d เพื่อควบคุมไม่ให้ขนาดกระแสรวมเกินค่ากระแสพิกัด ตัวประกอบกำลังต่ำสุด 0.9



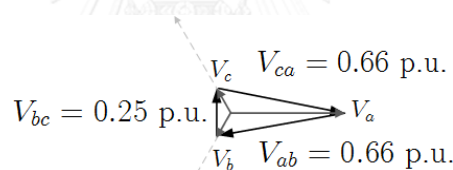
รูปที่ 4.21 รูปคลื่นกระแส แรงดัน สัญญาณกระแสคำสั่งต่างๆ ในการทดสอบกรณีศึกษาที่ 13

4.4.5 การทดสอบความสามารถในการทนต่อสภาวะแรงดันตกชั่วขณะ

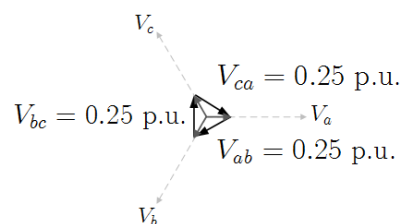
การทดสอบความสามารถของอินเวอร์เตอร์สำหรับหัวข้อนี้แบ่งได้เป็น 3 กรณี ได้แก่ การทดสอบขณะเกิดความผิดปกติหนึ่งเฟส สองเฟส และสามเฟสตามลำดับ ขนาดแรงดันขณะเกิดความผิดปกติใช้วิธีจำลองโดยกำหนดให้ขนาดแรงดันของเฟสที่ผิดปกติมีขนาดเป็นร้อยละ 25 ของระดับแรงดันเฟสปกติ สำหรับแผนภาพเฟสเซอร์ของแรงดันที่จุดเชื่อมต่อที่จำลองความผิดปกติขึ้นในแต่ละกรณีเป็นดังรูปที่ 4.22



(ก) แผนภาพเฟสเซอร์ของการจำลองความผิดปกติหนึ่งเฟส



(ข) แผนภาพเฟสเซอร์ของการจำลองความผิดปกติสองเฟส



(ค) แผนภาพเฟสเซอร์ของการจำลองความผิดปกติสามเฟส

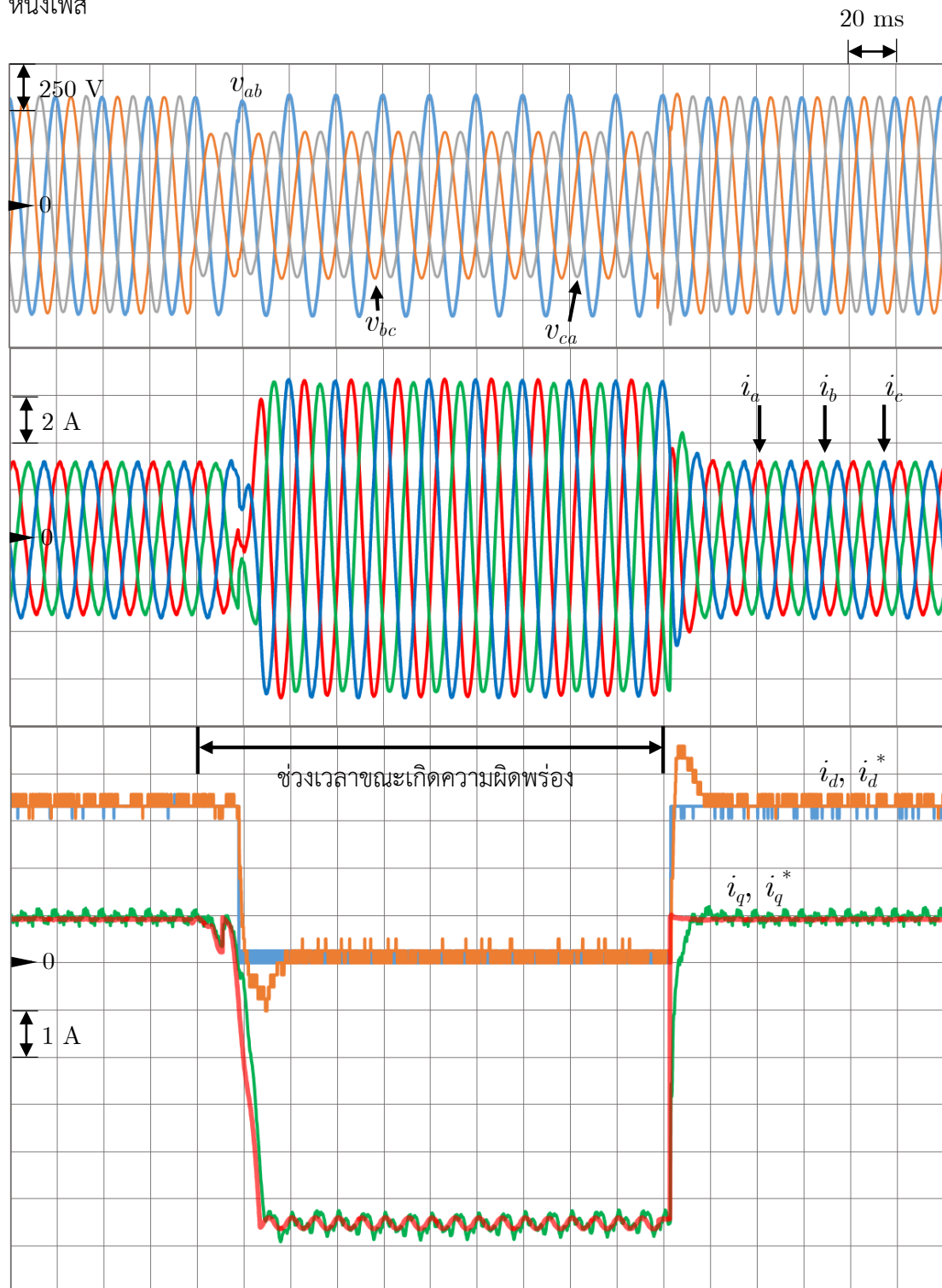
รูปที่ 4.22 ขนาดของตัวคูณแรงดันระหว่างสายที่ใช้ในการจำลองความผิดปกติ

ในการจำลองความผิดพลาด ขนาดของแรงดันระหว่างสายที่ตรวจวัดได้จะนำมาคูณกับตัวคูณที่คำนวณได้ในแต่ละกรณี สำหรับการทดสอบกำหนดให้ความผิดพลาดเกิดขึ้นเป็นเวลา 0.2 วินาที และกำหนดให้ในภาวะปกติ กระแสคำสั่ง i_d^* เท่ากับ 3 A

จากรูปที่ 4.23 ถึงรูปที่ 4.27 แสดงให้เห็นถึงความสามารถของอินเวอร์เตอร์ที่ตอบสนองต่อการทำงานขณะเกิดความผิดพลาดชั่วขณะอย่างรวดเร็วสำหรับรูปแบบความผิดพลาดทั้ง 3 กรณี โดยไม่ปลดตัวเองออกจากระบบโครงข่ายไฟฟ้า

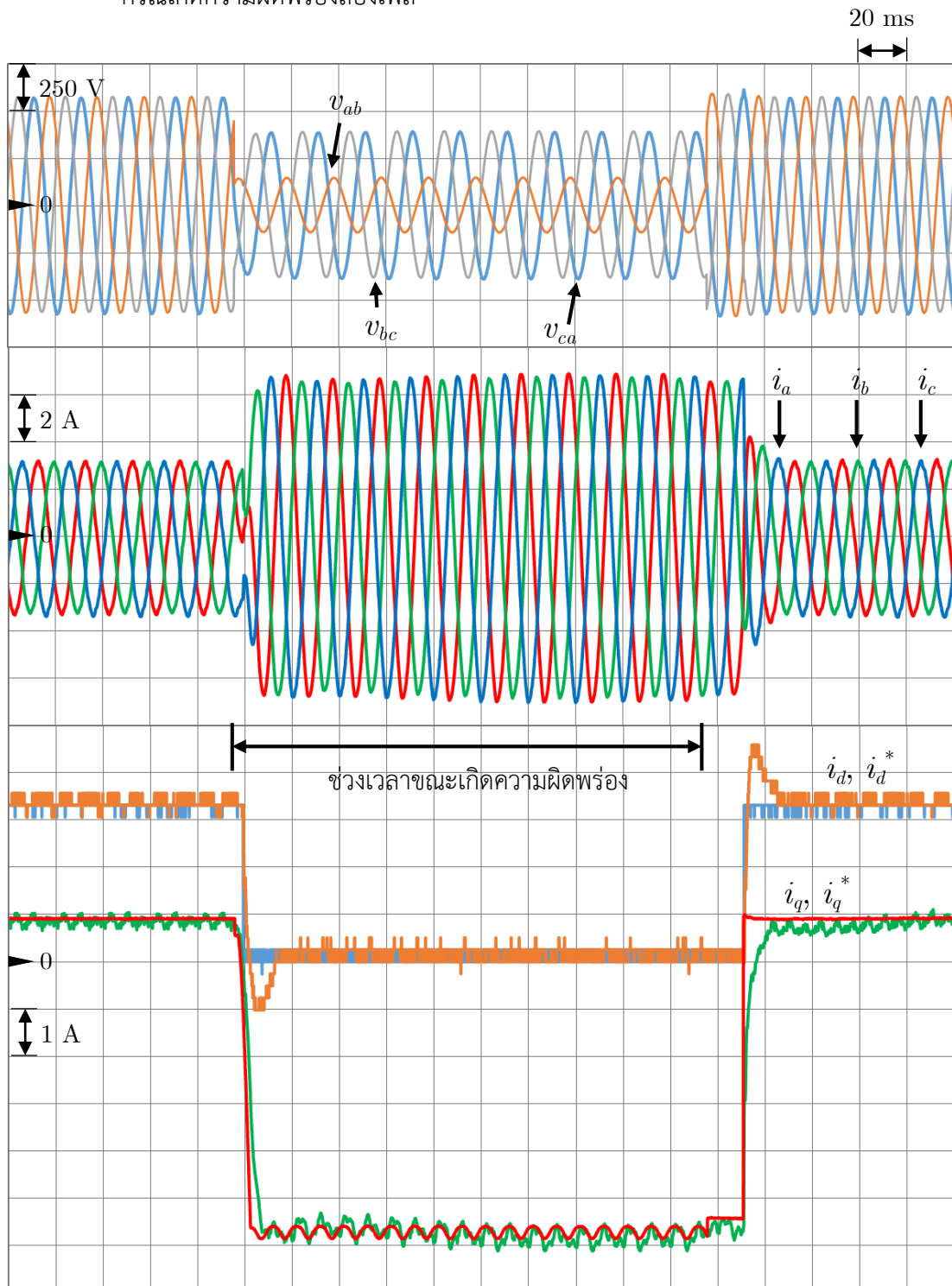


กรณีศึกษาที่ 14 การทดสอบความสามารถในการทนต่อสถานะแรงดันตกชั่วขณะ กรณีเกิดความผิดพลาดหนึ่งเฟส



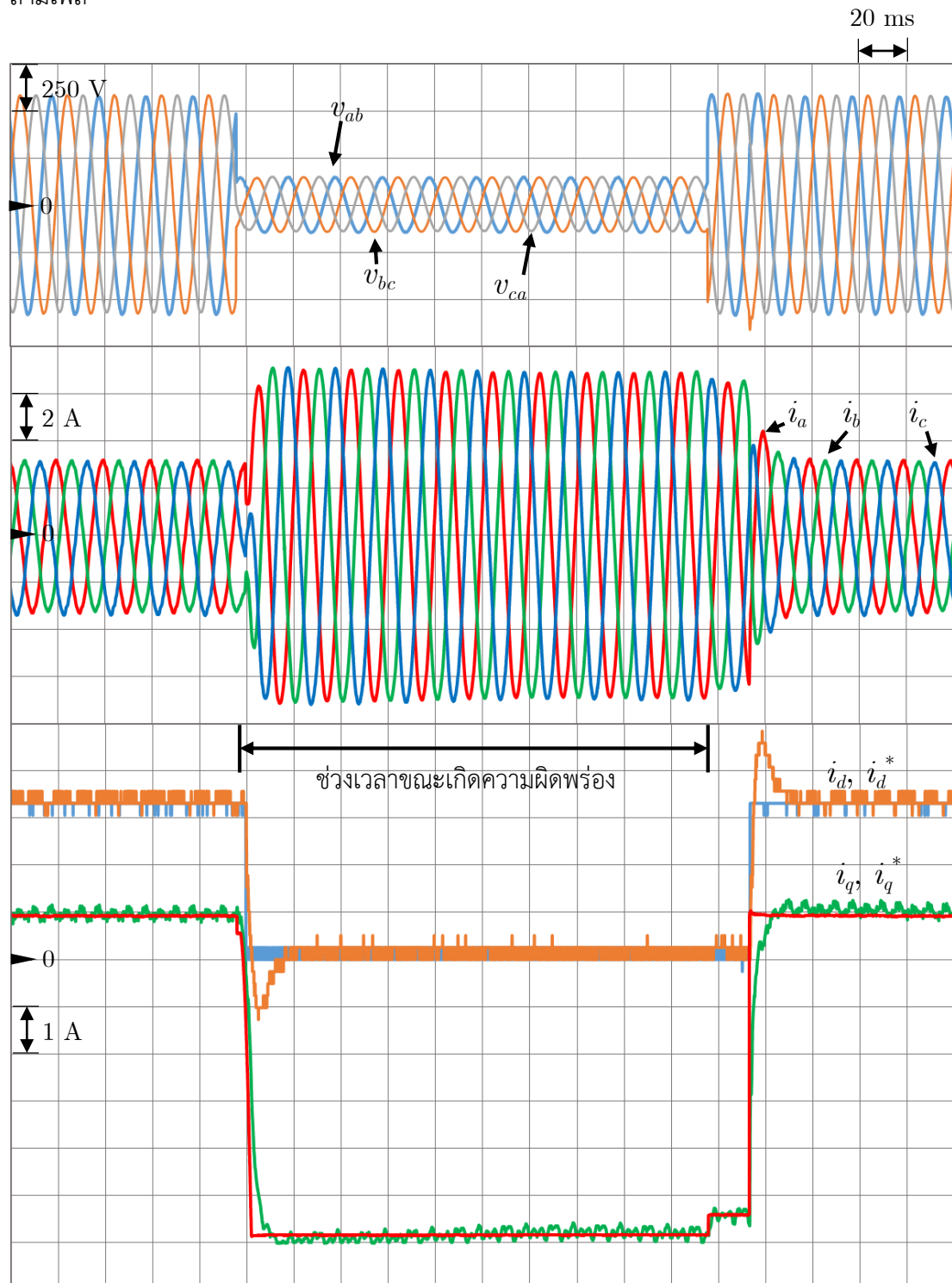
รูปที่ 4.23 รูปคลื่นกระแส แรงดัน สัญญาณกระแสคำสั่งต่างๆ ในการทดสอบกรณีศึกษาที่ 14

กรณีศึกษาที่ 15 การทดสอบความสามารถในการทนต่อสภาวะแรงดันตกชั่วขณะ
กรณีเกิดความผิดปกติพร้อมสองเฟส



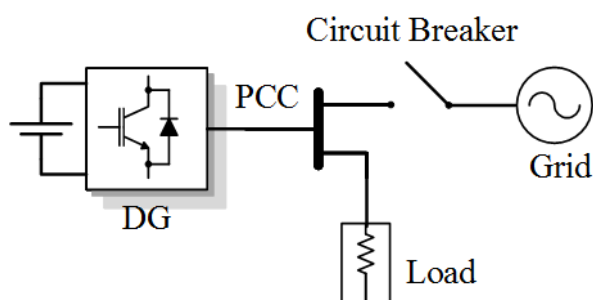
รูปที่ 4.24 รูปคลื่นกระแส แรงดัน สัญญาณกระแสคำสั่งต่างๆ ในการทดสอบกรณีศึกษาที่ 15

กรณีศึกษาที่ 16 การทดสอบความสามารถในการทนต่อสภาวะแรงดันตกชั่วขณะ กรณีเกิดความผิดปกติพร้อมสามเฟส



รูปที่ 4.25 รูปคลื่นกระแส แรงดัน สัญญาณกระแสคำสั่งต่างๆ ในการทดสอบกรณีศึกษาที่ 16

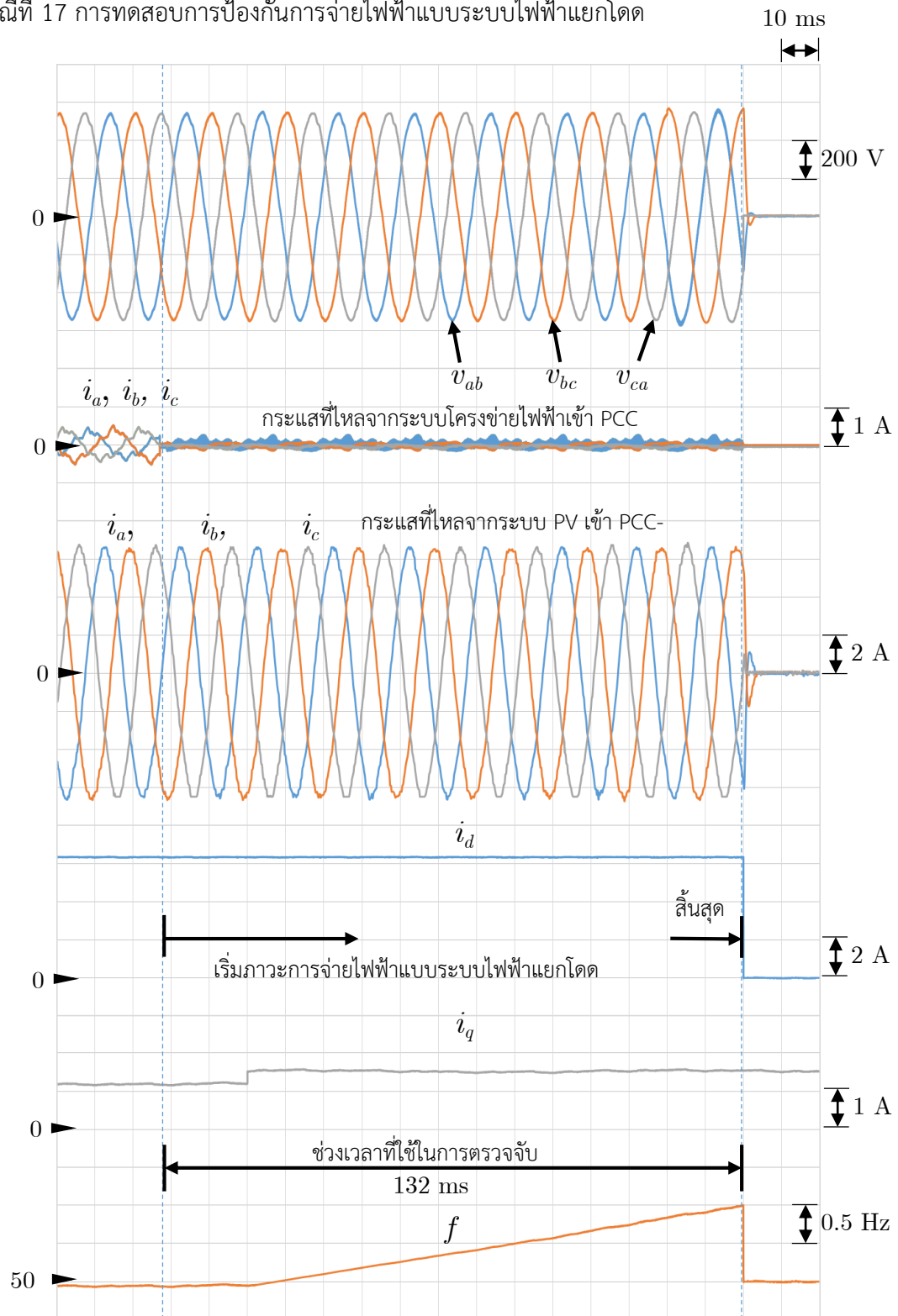
4.4.6 การทดสอบการป้องกันการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดด



รูปที่ 4.26 วงจรที่ใช้ทดสอบการป้องกันการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดด

ในการทดสอบการป้องกันการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดด เนื่องจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่นำเสนอสามารถควบคุมตัวประกอบกำลังด้านออกให้เท่ากับหนึ่งได้ ดังนั้นในการทดสอบจึงไม่จำเป็นต้องนำโหลดตัวเหนี่ยวนำหรือตัวเก็บประจุมาใช้เพื่อชดเชยตัวประกอบกำลัง สำหรับการทดสอบมีเพียงการนำโหลดประเภทความต้านทานขนาด 3 kW มาต่อที่จุดเชื่อมต่อ การตัดวงจรใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์สามเฟสตัดวงจรเพื่อสร้างภาวะการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดด ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงความสามารถของอินเวอร์เตอร์ที่สามารถตรวจจับภาวะการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดดในระยะเวลาอันสั้น และหยุดการทำงานทันที

กรณีศึกษาที่ 17 การทดสอบการป้องกันการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดด



รูปที่ 4.27 รูปคลื่นกระแส แรงดัน และความถี่ที่ตรวจจับได้ ในการทดสอบกรณีศึกษาที่ 17

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอระบบควบคุมกำลังรีแอกทีฟของอินเวอร์เตอร์สามเฟสเชื่อมต่อบรรบบโครงข่ายไฟฟ้า สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ประเด็นสำคัญของงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

- 1.) นำเสนอแนวคิดใหม่ในการพัฒนาอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อบรรบบโครงข่ายไฟฟ้าสำหรับการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ที่โดยทั่วไปจะเน้นไปในด้านของการป้องกันกำลังจริงเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ไม่ได้ช่วยให้เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังสูงขึ้น แต่ยังคงทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับเสถียรภาพในด้านอื่นๆ ตามมา เช่น ปัญหาแรงดันเกิน เป็นต้น สำหรับแนวคิดใหม่ที่ได้นำเสนอจะเน้นการช่วยรักษาเสถียรภาพเป็นอันดับหนึ่ง ซึ่งเป็นแนวคิดของอินเวอร์เตอร์ยุคใหม่ที่ไม่ได้เน้นในเรื่องประสิทธิภาพเพียงอย่างเดียว หากระบบไฟฟ้ากำลังมีเสถียรภาพที่มั่นคงแล้ว จะทำให้ออกาสที่จะเกิดปรากฏการณ์ทางไฟฟ้ากำลังที่ก่อให้เกิดปัญหาต่อผู้ขายและผู้ใช้ไฟฟ้าน้อยลง
- 2.) นำเสนอวิธีการควบคุมกำลังรีแอกทีฟเพื่อสนับสนุนระบบโครงข่ายไฟฟ้าตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อบรรบบโครงข่ายไฟฟ้า เงื่อนไขการควบคุมกำลังรีแอกทีฟในหัวข้อต่างๆ ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้กำหนดขึ้นโดยยึดตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อบรรบบโครงข่ายไฟฟ้าในประเทศเป็นเกณฑ์ ซึ่งต่อไปอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อบรรบบโครงข่ายไฟฟ้าจากผู้ผลิตรายใดก็ตามจะต้องมีความสามารถตามที่ข้อกำหนดการเชื่อมต่อบรรบบโครงข่ายไฟฟ้ากำหนดไว้

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

การวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมกำลังรีแอกทีฟของอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อบรรบบโครงข่ายไฟฟ้ายังมีประเด็นที่สามารถศึกษาได้เพิ่มเติมเช่น

- 1.) การควบคุมกำลังรีแอกทีฟของอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวเชื่อมต่อบรรบบโครงข่ายไฟฟ้า เนื่องจากในอนาคตแนวโน้มการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์กำลังขยายฐานการผลิตไปสู่ครัวเรือน ในรูปแบบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้งบนหลังคา (Rooftop solar panel) ซึ่งครัวเรือนส่วนใหญ่เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าในลักษณะของระบบไฟฟ้าเฟสเดียว ภายใต้ข้อกำหนดการเชื่อมต่อบรรบบโครงข่ายไฟฟ้า อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวที่เป็นส่วนหนึ่งของระบบดังกล่าวจำเป็นต้องมีความสามารถในการควบคุมกำลังรีแอกทีฟด้วย ดังนั้นปัญหาและ

อุปสรรคของการควบคุมกำลังรีแอกทีฟที่ไม่ปรากฏในงานวิจัยนี้ซึ่งวิจัยเกี่ยวกับอินเวอร์เตอร์สามเฟส อาจเป็นประเด็นที่เหมาะสมแก่การศึกษาในลำดับถัดไป

- 2.) หัวข้อของการช่วยสนับสนุนเสถียรภาพของระบบโครงข่ายไฟฟ้าไม่ได้จำกัดอยู่เพียง 3 หัวข้อดังที่งานวิจัยชิ้นนี้นำเสนอ ประเด็นอื่นๆ ที่สามารถนำการควบคุมกำลังรีแอกทีฟมาช่วยเพิ่มเสถียรภาพแก่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าได้จึงเป็นประเด็นที่เหมาะสมแก่การศึกษาวิจัยในอนาคตต่อไป
- 3.) โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์แบบอื่นที่นอกเหนือจากแบบตรึงจุดนิวทรัล การพัฒนาโครงสร้างอินเวอร์เตอร์ที่เหมาะสมเมื่อประยุกต์กับการควบคุมกำลังรีแอกทีฟจะทำให้อินเวอร์เตอร์ไม่เพียงแต่มีส่วนช่วยในการสนับสนุนเสถียรภาพของระบบโครงข่ายไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว แต่ประสิทธิภาพและสมรรถนะที่ได้จะเพิ่มขึ้นจากโครงสร้างเดิมด้วย
- 4.) การปรับปรุงวิธีการตรวจจับภาวะการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดด เนื่องจากรูปคลื่นกระแสคำสั่ง i_d^* ที่บวกเพิ่มเข้าไปในวงรอบควบคุมกระแสดังที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นั้นมีลักษณะสมมาตรทั้งในแกนเวลาและขนาดของกระแส มีข้อจำกัดในการทำงานหากมีอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อบนระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อเดียวกันหลายระบบ เนื่องจากมีโอกาสที่กำลังรีแอกทีฟที่รับ/จ่ายออกมาจากอินเวอร์เตอร์แต่ละตัวนั้นจะหักล้างกัน ทำให้การตรวจจับภาวะการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดดมีโอกาสล้มเหลวได้ ดังนั้นจึงเสนอแนะว่าควรมีการศึกษาปรับปรุงลักษณะรูปคลื่นในหัวข้อนี้สำหรับการศึกษาวิจัยในอนาคต
- 5.) ในอนาคตข้อกำหนดการเชื่อมต่อบนระบบโครงข่ายไฟฟ้าสามารถปรับปรุงได้ หากข้อกำหนดการเชื่อมต่อบนระบบโครงข่ายไฟฟ้าฉบับใหม่กำหนดเงื่อนไขที่รัดกุมกว่าปัจจุบัน อาจทำให้อินเวอร์เตอร์รวมถึงอินเวอร์เตอร์ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานใหม่ การศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาอินเวอร์เตอร์ให้สามารถทำงานภายใต้ข้อกำหนดการเชื่อมต่อบนระบบไฟฟ้าฉบับใหม่จึงเป็นประเด็นที่น่าศึกษาวิจัยเช่นกัน

รายการอ้างอิง

- [1] การไฟฟ้านครหลวง, ข้อกำหนดสำหรับอินเวอร์เตอร์ (ฉับร่าง) ที่ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าประเภทเชื่อมต่อกับโครงข่าย (Grid-connected Inverter), กรุงเทพมหานคร, 2554.
- [2] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, ร่างระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าเพิ่มเติม พ.ศ.2555 สำหรับผู้ผลิตไฟฟ้าประเภทที่ใช้อินเวอร์เตอร์, กรุงเทพมหานคร, 2555.
- [3] S. S. T. AG, "Reactive Power and Grid Integration with SUNY MINI CENTRAL and SUNNY TRIPOWER," *UEN101310*.
- [4] E. Demirok, P. C. González, K. H. B. Frederiksen, D. Sera, P. Rodriguez and R. Teodorescu, "Local Reactive Power Control Methods for Overvoltage Prevention of Distributed Solar Inverters in Low-Voltage Grids," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 1, no. 2, pp. 174-182, Dec. 2011.
- [5] M. E. Ropp, M. Begovic and A. Rohatgi, "Analysis and Performance Assessment of the Active Frequency Drift Method of Islanding Prevention," *IEEE Transaction on Energy Conversion*, vol. 14, no. 3, pp. 810-816, Sep. 1999.
- [6] L. A. C. Lopes and H. Sun, "Performance Assessment of Active Frequency Drifting Islanding Detection Methods," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, no. 1, pp. 171-180, Mar. 2006.
- [7] M. Ciobotaru, R. Teodorescu and F. Blaabjerg, "On-line Grid Impedance Estimation Based on Harmonic Injection for Grid-Connected PV Inverter," *IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE*, pp. 2437-2442, 2007.
- [8] A. V. Timbus, R. Teodorescu and P. Rodriguez, "Grid Impedance Identification Based on Active Power Variations and Grid Voltage Control," *IEEE Industry*

Applications Conference, 42nd IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2007 IEEE, pp. 949-954, September 2007.

- [9] G. Hernandez-Gonzalez and R. Iravani, "Current Injection for Active Islanding Detection of Electronically-Interfaced Distributed Resources," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 3, pp. 1698-1705, July 2006.
- [10] Jun Zhang, Dehong Xu, Guoqiao Shen, Ye Zhu, Ning He and Jie Ma, "An Improved Islanding Detection Method for a Grid-Connected Inverter With Intermittent Bilateral Reactive Power Variation," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 1, pp. 268-278, Jan. 2013.
- [11] Yi Tang, Poh Chiang Loh, P. W. F. H. C. and F. G. , "Exploring Inherent Damping Characteristic of LCL-Filters for Three-Phase Grid-Connected Voltage Source Inverters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 3, pp. 1433-1442, Mar. 2012.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ศิวัช ชัยฤกษ์ เกิดเมื่อวันที่ 15 ตุลาคม 2530 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551
ได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ณ ภาควิชา
วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในภาคการศึกษาต้น ปีการศึกษา
2554

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

1) ศิวัช ชัยฤกษ์ และสุรพงศ์ สุวรรณกวิน การควบคุมกำลังรีแอกทีฟของ
อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับกริดสามเฟสสำหรับโมดูลโฟโตโวลตาอิก. การประชุมวิชาการทาง
วิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 35 (2555):397-400.

