

การจำลองลักษณะสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสสำหรับอินเวอร์เตอร์
โฟโตวอลเทอิก



นายกิตติศักดิ์ อุดมโชค

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 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EMULATION OF SYNCHRONOUS GENERATOR'S CHARACTERISTICS FOR PHOTOVOLTAIC
INVERTERS

Mr. Kitisak Udomchoke



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 2015
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การจำลองลักษณะสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส
สำหรับอินเวอร์เตอร์โฟโตโวลเทอิก

โดย

นายกิตติศักดิ์ อุดมโชค

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพงษ์ สุวรรณกวิน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.เดวิด บรรจงพงศ์ชัย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพงษ์ สุวรรณกวิน)

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

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.สมภาพ ผลไม้)

กิตติศักดิ์ อุดมโชค : การจำลองลักษณะสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสสำหรับอินเวอร์เตอร์โฟโตโวลเทอิก (EMULATION OF SYNCHRONOUS GENERATOR'S CHARACTERISTICS FOR PHOTOVOLTAIC INVERTERS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.สุรพงษ์ สุวรรณกวิน, 130 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการควบคุมอินเวอร์เตอร์ยุคใหม่สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีฟังก์ชันการจำลองลักษณะสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสทั้งลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและลักษณะสมบัติทางกล โดยฟังก์ชันดังกล่าวสามารถช่วยสนับสนุนเสถียรภาพของความเร็วและแรงดันของโครงข่ายไฟฟ้าได้ครอบคลุมทั้งในสถานะอยู่ตัวและสถานะชั่วคราว วิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอ 3 ฟังก์ชันได้แก่ 1) ฟังก์ชันการควบคุมรูปที่อาศัยการปรับเพิ่ม/ลดการจ่ายกำลังจริงเมื่อความเร็วเปลี่ยนแปลงและปรับเพิ่ม/ลดกำลังรีแอกทีฟเมื่อแรงดันเปลี่ยนแปลง 2) ฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลจะปรับเพิ่ม/ลดการจ่ายกำลังจริงเมื่อเกิดอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร็ว และ 3) ฟังก์ชันการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์เสมือนค่าความเหนี่ยวนำซิงโครนัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า นอกจากนี้วิทยานิพนธ์นี้ยังได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพและการออกแบบวงรอบควบคุมกระแส วงรอบควบคุมกำลังจริงและวงรอบควบคุมกำลังรีแอกทีฟสำหรับการทำงานแบบเชื่อมต่อโครงข่าย และการออกแบบวงรอบควบคุมแรงดันสำหรับการทำงานแบบไม่เชื่อมต่อโครงข่าย ผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink และผลการทดสอบจากเครื่องต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการยืนยันให้เห็นถึงความถูกต้องของแนวคิดที่ได้นำเสนอ โดยอินเวอร์เตอร์สามารถทำงานได้ดีโดยมีลักษณะสมบัติเหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสและยังสามารถทำงานได้สอดคล้องตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อโครงข่ายได้

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2558

5470548921 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: PHOTOVOLTAIC INVERTERS / DROOP CONTROL / EMULATION / MECHANICAL INERTIA / VIRTUAL IMPEDANCE / SYNCHRONOUS GENERATORS / GRID CODES

KITISAK UDOMCHOKE: EMULATION OF SYNCHRONOUS GENERATOR'S CHARACTERISTICS FOR PHOTOVOLTAIC INVERTERS. ADVISOR: ASST. PROF. SURAPONG SUWANKAWIN, Ph.D., 130 pp.

This thesis proposes the control methods for photovoltaic inverters in order to emulate the electrical and mechanical characteristics of synchronous generators. The proposed functions of inverters can help support the stability of grid's frequency and voltage in both steady-state and transient operations. There are three functions which are taken into consideration: 1) droop control is conducted to adjust the feeding active and reactive power corresponding to the variation of frequency and voltage, respectively, 2) the emulation of mechanical inertia is to adjust the feeding of active power when the frequency is fluctuation and 3) the emulation of virtual impedance of synchronous inductance characteristic. Furthermore, this thesis presents the stability analysis and design guidelines of current-controlled loop, real-power controlled loop and reactive-power controlled loop for grid connected operations. Moreover, the design guidelines of voltage-controlled loop are also described for standalone operation. Simulation results with MATLAB/Simulink program and experimental results from the real implementation confirm the validity of the proposed concepts, the proposed operating functions can satisfactorily emulate the characteristics of synchronous generators and work well corresponding to the grid codes.

Department: Electrical Engineering Student's Signature

Field of Study: Electrical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความช่วยเหลือและเอาใจใส่อย่างดีของ อาจารย์ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพงศ์ สุวรรณกรวิน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้คำแนะนำด้านวิชาการและความช่วยเหลือด้านต่างๆที่เป็นประโยชน์ตลอดการทำวิจัยและการดำเนินชีวิตตลอดมา ขอขอบคุณ อาจารย์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์ ที่คอยชี้แนะวิธีการแก้ปัญหาในงานวิจัย ขอขอบคุณ นายศิวช ชัยฤกษ์ ที่ให้ความช่วยเหลือด้านการพัฒนาโปรแกรมและนายกรวิชญ์ นิยมเสถียร ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการออกแบบวงจรส่วนภาคกำลังที่ใช้ในงานวิจัยนี้ รวมถึงเงินทุนอุดหนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และบริษัท ไทยตาบูซิ อิเล็กทริก จำกัด ภายใต้โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม(พวอ.) ระดับปริญญาโท

ขอขอบคุณคำแนะนำและกำลังใจจากคณาจารย์และรุ่นพี่รุ่นน้องแห่งห้องปฏิบัติการวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลังทุกคนที่ทำให้ผมมีแรงผลักดันในการทำงานวิจัยจนประสบความสำเร็จสุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติพี่น้องของข้าพเจ้า ผู้ซึ่งให้โอกาสทางการศึกษาและเป็นกำลังใจด้วยดีเสมอมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1. ความเบื้องต้น.....	1
1.2. ลักษณะสมบัติและการควบคุมแบบตรูของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสในแบบดั้งเดิม	3
1.2.1. ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า.....	3
1.2.2. ความสัมพันธ์ของกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	4
1.2.3. การควบคุมตรูของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	5
1.2.4. ลักษณะสมบัติทางกล	6
1.3. การจำแนกประเภทของอินเวอร์เตอร์ในระบบผลิตไฟฟ้า	8
1.3.1. อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายกำลังงานเข้าสู่โครงข่าย (grid-feeding inverters).....	8
1.3.2. อินเวอร์เตอร์แบบสร้างโครงข่าย (grid-forming inverters).....	8
1.3.3. อินเวอร์เตอร์ที่มีฟังก์ชันช่วยสนับสนุนโครงข่าย (grid-supporting inverters)	9
1.3.3.1. อินเวอร์เตอร์ที่มีลักษณะสมบัติเป็นแหล่งจ่ายกระแส	9
1.3.3.2. อินเวอร์เตอร์ที่มีลักษณะสมบัติเป็นแหล่งจ่ายแรงดัน.....	10
1.4. ลักษณะสมบัติและการควบคุมอินเวอร์เตอร์โพโตวอลเทอิกแบบดั้งเดิม	10
1.4.1. อินเวอร์เตอร์โพโตวอลเทอิกแบบเชื่อมต่อโครงข่ายที่มีส่วนติดตามกำลังงานสูงสุด.....	11
1.4.2. อินเวอร์เตอร์โพโตวอลเทอิกแบบเชื่อมต่อโครงข่ายที่มีส่วนควบคุมกำลังรีแอกทีฟ	12

1.4.3. อินเวอร์เตอร์โพลีโวลเทจแบบเชื่อมต่อโครงข่ายที่มีส่วนควบคุมรูป	13
1.5. สรุปปัญหาและข้อจำกัดในงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต	15
1.6. วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์	16
1.7. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับด้านวิชาการและด้านประยุกต์	16
1.8. ขอบเขตวิทยานิพนธ์	16
1.9. ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย	17
บทที่ 2 การจำลองลักษณะสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสด้วยอินเวอร์เตอร์	18
2.1. ความสัมพันธ์ของกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟของอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อโครงข่าย	18
2.2. การจำลองลักษณะสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสด้วยอินเวอร์เตอร์	20
2.2.1. ฟังก์ชันการควบคุมแบบทรูป (Droop control)	21
2.2.2. ฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกล (Emulation of inertia)	23
2.2.3. ฟังก์ชันการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์ (Emulation of impedance)	25
บทที่ 3 การวิเคราะห์เสถียรภาพและการออกแบบวงรอบควบคุมอินเวอร์เตอร์	30
3.1. การวิเคราะห์เสถียรภาพและออกแบบวงรอบควบคุมกระแสสำหรับโหมดสนับสนุนโครงข่ายและโหมดไม่เชื่อมต่อโครงข่าย	30
3.2. การวิเคราะห์เสถียรภาพและออกแบบวงรอบควบคุมกำลังสำหรับโหมดสนับสนุนโครงข่าย	39
3.3. การวิเคราะห์เสถียรภาพและการออกแบบวงรอบควบคุมแรงดันด้านออกสำหรับโหมดไม่เชื่อมต่อโครงข่าย	51
บทที่ 4 การออกแบบเครื่องต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการ	59
4.1. วงจรส่วนภาคกำลัง (high power circuits)	61
4.1.1. อินเวอร์เตอร์สามระดับแบบตรีจจุดนิวทรัล (NPC structure 3 level inverters)	61
4.1.2. วงจรขับนำสวิตช์กำลัง (gate drive circuit)	68
4.1.3. วงจรไดโอดเรียงกระแสไฟตรง (bridge diode circuit)	68

4.1.4. วงจรกรองผ่านต่ำ LCL	68
4.2. วงจรตรวจวัด (measurement circuits) และวงจรป้องกัน	69
4.2.1. วงจรตรวจวัดแรงดัน (voltage sensor)	69
4.2.2. วงจรตรวจวัดกระแส (current sensor).....	69
4.2.3. วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (analog to digital converter, ADC)...	70
4.2.4. วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (digital to analog converter, DAC)...	70
4.2.5. บอร์ดกลับสัญญาณ PWM และวงจรป้องกัน	71
4.3. ส่วนควบคุมและประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Processing, DSP).....	72
บทที่ 5 การทดสอบการทำงาน.....	73
5.1. รายละเอียดการทดสอบการทำงาน.....	73
5.2. การทดสอบการทำงานสำหรับฟังก์ชันการควบคุมรูป	76
5.3. การทดสอบการทำงานสำหรับฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกล	89
5.4. การทดสอบการทำงานสำหรับฟังก์ชันการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์.....	108
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	124
6.1. บทสรุปผลการวิจัย.....	124
6.2. ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต	126
รายการอ้างอิง	127
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	130

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 ข้อกำหนดการเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์เข้ากับโครงข่ายที่เกี่ยวข้องกับระยะเวลาปลด วงจรเมื่อแรงดันที่จุดเชื่อมต่อไม่อยู่ในช่วงแรงดันพิกัด	11
ตารางที่ 1.2 ความสัมพันธ์ของอิมพีแดนซ์ของโครงข่ายกับส่วนควบคุมแบบดรู๊ป[6, 10]	14
ตารางที่ 2.1 สรุปคุณสมบัติของฟังก์ชันการควบคุมอินเวอร์เตอร์และฟังก์ชันการจำลองลักษณะ สมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนส์ต่อการสนับสนุนเสถียรภาพของโครงข่ายไฟฟ้า.....	29
ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการทดสอบการทำงานสำหรับวงรอบควบคุมกระแสเมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงาน ในโหมดสนับสนุนโครงข่ายและโหมดไม่เชื่อมต่อโครงข่าย	33
ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขการทดสอบการทำงานสำหรับวงรอบควบคุมกำลังเมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงาน ในโหมดสนับสนุนโครงข่าย.....	43
ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขการทดสอบการทำงานสำหรับวงรอบควบคุมแรงดันด้านออกเมื่อ อินเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดไม่เชื่อมต่อโครงข่าย ที่จุดเชื่อมต่อมีโหลด $Z_L(s) = 50 + j10.41\Omega$ ต่อแบบวาย	54
ตารางที่ 4.1 แสดงสถานะของสวิตช์กำลังสำหรับอินเวอร์เตอร์สามระดับแบบตริงจุดนิวทรัล	63
ตารางที่ 4.2 รุ่นและพิกัดของอุปกรณ์ที่เลือกใช้ในวงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับ	63
ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบการทำงาน	75
ตารางที่ 5.2 เงื่อนไขการทดสอบการทำงานสำหรับฟังก์ชันการควบคุมดรู๊ป เมื่ออินเวอร์เตอร์ ทำงานในโหมดสนับสนุนโครงข่าย	78
ตารางที่ 5.3 เงื่อนไขการทดสอบการทำงานสำหรับฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกล	91
ตารางที่ 5.4 เงื่อนไขการทดสอบการทำงานสำหรับฟังก์ชันการจำลองลักษณะสมบัติของ อิมพีแดนซ์ เมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดสร้างโครงข่าย	110

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 วงจรสมมูลของลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (ก) วงจรสมมูลเต็มรูปแบบ (ข) เมื่อประมาณ $R_s \approx 0$	3
รูปที่ 1.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่เชื่อมต่อกับโครงข่าย (ก) วงจรสมมูล (ข) เวกเตอร์ไดอะแกรม	4
รูปที่ 1.3 ลักษณะสมบัติการควบคุมรูปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (ก) การควบคุมรูปของกำลังจริงและความถี่ (ข) การควบคุมรูประหว่างกำลังรีแอกทีฟและขนาดแรงดัน	6
รูปที่ 1.4 ไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่เชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้า.....	6
รูปที่ 1.5 แบบจำลองอย่างง่ายของอินเวอร์เตอร์แบบจ่ายกำลังงานเข้าสู่โครงข่าย (grid-feeding inverters) หรืออินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อกับโครงข่าย (grid-connected inverters).....	8
รูปที่ 1.6 แบบจำลองอย่างง่ายของอินเวอร์เตอร์แบบสร้างโครงข่าย (grid-forming inverters) หรืออินเวอร์เตอร์แบบไม่เชื่อมต่อกับโครงข่าย (stand-alone inverters).....	9
รูปที่ 1.7 แบบจำลองอย่างง่ายของอินเวอร์เตอร์ที่มีฟังก์ชันช่วยสนับสนุนโครงข่าย (grid-supporting inverters) และมีลักษณะสมบัติเป็นแหล่งจ่ายกระแส.....	10
รูปที่ 1.8 แบบจำลองอย่างง่ายของอินเวอร์เตอร์ที่มีฟังก์ชันช่วยสนับสนุนโครงข่าย (grid-supporting inverters) และมีลักษณะสมบัติเป็นแหล่งจ่ายแรงดัน.....	10
รูปที่ 1.9 ระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้าที่มีส่วนติดตามกำลังงานสูงสุด	12
รูปที่ 1.10 ระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้าที่มีส่วนควบคุมกำลังรีแอกทีฟ ...	13
รูปที่ 1.11 ระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์โพลีโทลเทอิกแบบเชื่อมต่อกับโครงข่ายที่มีส่วนควบคุมรูป	14
รูปที่ 2.1 บล็อกไดอะแกรมของภาพรวมระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่มีส่วนจำลองลักษณะสมบัติและการควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	18
รูปที่ 2.2 เวกเตอร์ของแรงดันและกระแสบนกรอบอ้างอิง dq	20
รูปที่ 2.3 แผนภาพรวมการควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่มีฟังก์ชันการควบคุมแบบรูปและการจำลองลักษณะสมบัติความเฉื่อยทางกล	21

รูปที่ 2.4 กลไกการทำงานของ การควบคุมแบบดรู๊ปของอินเวอร์เตอร์เมื่อความเหนี่ยวนำในระบบ
ส่งมีนัยสำคัญ (ก) การควบคุมแบบดรู๊ประหว่างกำลังจริงและความถี่ (ข) การควบคุมแบบดรู๊ป
ระหว่างกำลังรีแอกทีฟและขนาดแรงดัน..... 22

รูปที่ 2.5 บล็อกไดอะแกรมการจำลองลักษณะสมบัติความเฉื่อยทางกลสำหรับอินเวอร์เตอร์..... 25

รูปที่ 2.6 บล็อกไดอะแกรมของอินเวอร์เตอร์ที่มีการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์ 26

รูปที่ 2.7 แผนภาพรวมของการควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่มีฟังก์ชันการจำลองลักษณะสมบัติของ
อิมพีแดนซ์..... 27

รูปที่ 2.8 แผนภาพของการควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่มีฟังก์ชันการจำลองลักษณะสมบัติของ
อิมพีแดนซ์(ก) บล็อกไดอะแกรม (ข) วงจรสมมูล 28

รูปที่ 2.9 รูปแบบของการสวิตซ์สำหรับการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะ 2 ชุด..... 64

รูปที่ 3.1 แผนภาพวงรอบควบคุมกระแสสำหรับโหมตสนับสนุนโครงข่ายและโหมตไม่เชื่อมต่อ
โครงข่าย..... 31

รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรมของวงรอบควบคุมกระแสในแนวแกน d-q..... 31

รูปที่ 3.3 แผนภาพโเบเดของฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดของวงรอบควบคุมกระแสที่ใช้ในงานวิจัย.... 32

รูปที่ 3.4 ผลการจำลองการทำงานแสดงผลตอบสนองของการเปลี่ยนค่ากระแสคำสั่งในแนวแกน
dแบบขั้นบันไดจาก 1A -> 7A 34

รูปที่ 3.5 ผลการทดลองแสดงผลตอบสนองของการเปลี่ยนค่ากระแสคำสั่งในแนวแกน d แบบ
ขั้นบันไดจาก 1A -> 7A 34

รูปที่ 3.6 ผลการจำลองการทำงานแสดงผลตอบสนองของการเปลี่ยนค่ากระแสคำสั่งในแนวแกน
q แบบขั้นบันไดจาก 0A -> 7A..... 35

รูปที่ 3.7 ผลการทดลองแสดงผลตอบสนองของการเปลี่ยนค่ากระแสคำสั่งในแนวแกน q แบบ
ขั้นบันไดจาก 0A -> 7A 35

รูปที่ 3.8 ผลการจำลองการทำงานแสดงผลตอบสนองของการเปลี่ยนค่ากระแสคำสั่งในแนวแกน
q แบบขั้นบันไดจาก 0A -> -7A 36

รูปที่ 3.9 ผลการทดลองแสดงผลตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสคำสั่งในแนวแกน q
แบบขั้นบันไดจาก 0A -> -7A..... 36

รูปที่ 3.10 ผลการจำลองการทำงานแสดงผลตอบสนองของการเปลี่ยนค่ากระแสคำสั่งใน แนวแกน d แบบแรมป์จาก 1A -> 7A.....	37
รูปที่ 3.11 ผลการทดลองแสดงผลตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสคำสั่งในแนวแกน d แบบแรมป์จาก 1A -> 7A	37
รูปที่ 3.12 ผลการจำลองการทำงานแสดงผลตอบสนองของการเปลี่ยนค่ากระแสคำสั่งใน แนวแกน q แบบแรมป์จาก -7A -> 7A.....	38
รูปที่ 3.13 ผลการทดลองแสดงผลตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสคำสั่งในแนวแกน q แบบแรมป์จาก -7A -> 7A	38
รูปที่ 3.14 แผนภาพวงรอบควบคุมกำลังสำหรับโหมดสนับสนุนโครงข่าย	39
รูปที่ 3.15 บล็อกไดอะแกรมแสดงวงรอบควบคุมกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟ	40
รูปที่ 3.16 แผนภาพโบทของฟังก์ชันอินทรีย์วงรอบเปิดของวงรอบควบคุมกำลัง	42
รูปที่ 3.17 ผลการจำลองการทำงานแสดงผลตอบสนองของการเปลี่ยนค่าคำสั่งกำลังจริง (P^*) แบบขั้นบันไดจาก 0W -> 3000W	44
รูปที่ 3.18 ผลการทดลองแสดงผลตอบสนองของการเปลี่ยนค่าคำสั่งกำลังจริง (P^*) แบบ ขั้นบันไดจาก 0W -> 3000W	44
รูปที่ 3.19 ผลการจำลองการทำงานแสดงผลตอบสนองการเปลี่ยนค่าคำสั่งกำลังรีแอกทีฟ (Q^*) แบบขั้นบันไดจาก 0VAR -> 3000VAR.....	45
รูปที่ 3.20 ผลการทดลองแสดงผลตอบสนองของการเปลี่ยนค่าคำสั่งกำลังรีแอกทีฟ (Q^*) แบบ ขั้นบันไดจาก 0VAR -> 3000VAR	45
รูปที่ 3.21 ผลการจำลองการทำงานแสดงผลตอบสนองของการเปลี่ยนค่าคำสั่งกำลังรีแอกทีฟ (Q^*) แบบขั้นบันไดจาก 0VAR -> -3000VAR.....	46
รูปที่ 3.22 ผลการทดลองแสดงผลตอบสนองของการเปลี่ยนค่าคำสั่งกำลังรีแอกทีฟ (Q^*) แบบ ขั้นบันไดจาก 0VAR -> -3000VAR.....	46
รูปที่ 3.23 ผลการจำลองการทำงานแสดงผลตอบสนองของการแปรเปลี่ยนค่าคำสั่งกำลังจริง (P^*)) แบบแรมป์จาก 0W -> 3000W	47
รูปที่ 3.24 ผลการทดลองแสดงผลตอบสนองของการแปรเปลี่ยนค่าคำสั่งกำลังจริง (P^*) แบบ แรมป์จาก 0W -> 3000W	48

รูปที่ 3.25 ผลการจำลองการทำงานแสดงผลตอบสนองของการแปรเปลี่ยนค่าคำสั่งกำลังรีแอกทีฟ (Q^*) แบบแรมป์จาก -3000VAR -> 3000VAR.....	49
รูปที่ 3.26 ผลการทดลองแสดงผลตอบสนองของการแปรเปลี่ยนค่าคำสั่งกำลังรีแอกทีฟ (Q^*) แบบแรมป์จาก -3000VAR -> 3000VAR.....	50
รูปที่ 3.27 แผนภาพวงรอบควบคุมแรงดันด้านออกสำหรับโหมดไม่เชื่อมต่อโครงข่าย	51
รูปที่ 3.28 วงจรสมมูลของวงรอบควบคุมแรงดันด้านออกสำหรับโหมดไม่เชื่อมต่อโครงข่าย	51
รูปที่ 3.29 บล็อกไดอะแกรมของวงรอบควบคุมแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์.....	52
รูปที่ 3.30 แผนภาพโบเดของฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดของวงรอบควบคุมแรงดันด้านออกเมื่อเปลี่ยนแปลงโหลด 4 ค่า.....	53
รูปที่ 3.31 ผลการจำลองการทำงานแสดงผลตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันคำสั่งในแนวแกน d แบบขั้นบันไดจาก 300V -> 380V เมื่อมีโหลด $Z_L(s) = 50 + j10.41\Omega$	55
รูปที่ 3.32 ผลการทดลองแสดงผลตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันคำสั่งในแนวแกน d แบบขั้นบันไดจาก 300V -> 380V เมื่อมีโหลด $Z_L(s) = 50 + j10.41\Omega$ ต่ออยู่ที่จุดเชื่อมต่อ	56
รูปที่ 3.33 ผลการจำลองการทำงานแสดงผลตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันคำสั่งในแนวแกน d แบบแรมป์จาก 0V -> 380V เมื่อมีโหลด $Z_L(s) = 50 + j10.41\Omega$ ต่ออยู่ที่จุดเชื่อมต่อ.....	57
รูปที่ 3.34 ผลการทดลองแสดงผลตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันคำสั่งในแนวแกน d แบบแรมป์จาก 0V -> 380V เมื่อมีโหลด $Z_L(s) = 50 + j10.41\Omega$ ต่ออยู่ที่จุดเชื่อมต่อ	58
รูปที่ 4.1 ภาพรวมของเครื่องต้นแบบที่ใช้สำหรับการทดสอบแนวคิดในการจำลองลักษณะสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสด้วยอินเวอร์เตอร์.....	59
รูปที่ 4.2 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์สามระดับแบบตริงจุดนิวทรัล (NPC 3 level inverter).....	62
รูปที่ 4.3 ฟังก์ชันการมอดูเลต m'_{ip}, m'_{in} โดยที่ $i = \{u, v, w\}$ และแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์เทียบจุดกึ่งกลางบัสสำหรับการมอดูเลตแบบชั่วเดียว 2 เฟสชั่วคราว 1 เฟส (2u1d).....	67
รูปที่ 4.4 แรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์เทียบจุดกึ่งกลางบัสสำหรับการมอดูเลตแบบชั่วเดียว 2 เฟสชั่วคราว 1 เฟส (2u1d) (ภาพขยาย)	67
รูปที่ 4.5 รายละเอียดของขา PWM1 – PWM12 ในโมดูล EVA และ EVB ที่มี internal pull up..	72

รูปที่ 5.1 ผลการจำลองการทำงานของฟังก์ชันการควบคุมรูปของกำลังจริงต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ของโครงข่ายตามโพรไฟล์ที่ตั้งไว้.....	79
รูปที่ 5.2 ผลการทดลองของฟังก์ชันการควบคุมรูปของกำลังจริงต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ของโครงข่ายตามโพรไฟล์ที่ตั้งไว้.....	80
รูปที่ 5.3 ผลการจำลองการทำงานของฟังก์ชันการควบคุมรูปของกำลังจริงเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความถี่แบบแรมป์จาก 49.5 Hz -> 50.5 Hz.....	81
รูปที่ 5.4 ผลการทดลองของฟังก์ชันการควบคุมรูปของกำลังจริงเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความถี่แบบแรมป์จาก 49.5 Hz -> 50.5 Hz.....	82
รูปที่ 5.5 ผลการจำลองการทำงานของฟังก์ชันการควบคุมรูปที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการจ่ายกำลังจริงตลอดย่านพิกัดกำลังของอินเวอร์เตอร์ต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ของโครงข่ายแบบแรมป์.....	83
รูปที่ 5.6 ผลการทดลองของฟังก์ชันการควบคุมรูปที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการจ่ายกำลังจริงตลอดย่านพิกัดกำลังของอินเวอร์เตอร์ต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ของโครงข่ายแบบแรมป์.....	83
รูปที่ 5.7 ผลการจำลองการทำงานของฟังก์ชันการควบคุมรูปของกำลังรีแอกทีฟต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันระหว่างสายของโครงข่ายตามโพรไฟล์ที่ตั้งไว้.....	84
รูปที่ 5.8 ผลการทดลองของฟังก์ชันการควบคุมรูปของกำลังรีแอกทีฟต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันระหว่างสายของโครงข่ายตามโพรไฟล์ที่ตั้งไว้.....	85
รูปที่ 5.9 ผลการจำลองการทำงานของฟังก์ชันการควบคุมรูปของกำลังรีแอกทีฟเมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันระหว่างสายแบบแรมป์จาก 335V -> 425V.....	86
รูปที่ 5.10 ผลการทดลองของฟังก์ชันการควบคุมรูปของกำลังรีแอกทีฟเมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันระหว่างสายแบบแรมป์จาก 335V -> 425V.....	87
รูปที่ 5.11 ผลการจำลองการทำงานของฟังก์ชันการควบคุมรูปที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการจ่ายกำลังรีแอกทีฟตลอดย่านพิกัดกำลังอินเวอร์เตอร์ต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันของโครงข่ายแบบแรมป์.....	88
รูปที่ 5.12 ผลการทดลองของฟังก์ชันการควบคุมรูปที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการจ่ายกำลังรีแอกทีฟตลอดย่านพิกัดกำลังอินเวอร์เตอร์ต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันของโครงข่ายแบบแรมป์.....	88

รูปที่ 5.22 ผลการทดลองการทำงานของฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเมื่อความถี่ของโครงข่ายลดลงด้วยความชัน -0.25Hz/s (กรณีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเสมือน K_d เท่ากับ 4).....	101
รูปที่ 5.23 ผลการจำลองการทำงานของฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเมื่อความถี่ของโครงข่ายลดลงด้วยความชัน -0.25Hz/s (กรณีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเสมือน K_d เท่ากับ 8).....	102
รูปที่ 5.24 ผลการทดลองการทำงานของฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเมื่อความถี่ของโครงข่ายลดลงด้วยความชัน -0.25Hz/s (กรณีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเสมือน K_d เท่ากับ 8).....	103
รูปที่ 5.25 ผลการจำลองการทำงานของฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเมื่อความถี่ของโครงข่ายลดลงด้วยความชัน -0.25Hz/s (กรณีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเสมือน K_d เท่ากับ 12).....	104
รูปที่ 5.26 ผลการทดลองการทำงานของฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเมื่อความถี่ของโครงข่ายลดลงด้วยความชัน -0.25Hz/s (กรณีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเสมือน K_d เท่ากับ 12).....	105
รูปที่ 5.27 ผลการจำลองการทำงานของฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเมื่อความถี่ของโครงข่ายลดลงด้วยความชัน -0.25Hz/s (กรณีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเสมือน K_d เท่ากับ 15).....	106
รูปที่ 5.28 ผลการทดลองการทำงานของฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเมื่อความถี่ของโครงข่ายลดลงด้วยความชัน -0.25Hz/s (กรณีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเสมือน K_d เท่ากับ 15).....	107
รูปที่ 5.29 การจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์ (ซ้าย) วงจรสมมูล (ขวา) เวกเตอร์ไดอะแกรมแสดงการเลื่อนเฟส.....	110
รูปที่ 5.30 ผลการจำลองการทำงานการควบคุมแรงดันด้านออกเมื่อเปลี่ยนโหมดจากกรณีไม่มีการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์เป็นกรณีมีการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์ $L_s = 17.46\text{mH}$ กรณีจ่ายโหลด $Z_L(s) = 50 + j10.41\Omega$	111

- รูปที่ 5.31 ผลการทดลองการควบคุมแรงดันด้านออกเมื่อเปลี่ยนโหมตจากกรณีไม่มีการจำลอง ลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์เป็นกรณีที่มีการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์
 $L_s = 17.46\text{mH}$ กรณีจ่ายโหลด $Z_L(s) = 50 + j10.41\Omega$ 112
- รูปที่ 5.32 ผลการจำลองการทำงานการควบคุมแรงดันด้านออกเมื่อเปลี่ยนโหมตจากกรณีไม่มีการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์เป็นกรณีที่มีการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์
 $L_s = 8.73\text{mH}$ กรณีจ่ายโหลด $Z_L(s) = 50 + j10.41\Omega$ 113
- รูปที่ 5.33 ผลการทดลองการควบคุมแรงดันด้านออกเมื่อเปลี่ยนโหมตจากกรณีไม่มีการจำลอง ลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์เป็นกรณีที่มีการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์ $L_s = 8.73\text{mH}$ กรณีจ่ายโหลด $Z_L(s) = 50 + j10.41\Omega$ 114
- รูปที่ 5.34 ผลการจำลองการทำงานแสดงการควบคุมแรงดันด้านออกเมื่อเปลี่ยนโหมตจากกรณีไม่มีการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์เป็นกรณีที่มีการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์
 $L_s = 17.46\text{mH}$ กรณีจ่ายโหลด $Z_L(s) = 100 + j20.82\Omega$ 115
- รูปที่ 5.35 ผลการทดลองแสดงการควบคุมแรงดันด้านออกเมื่อเปลี่ยนโหมตจากกรณีไม่มีการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์เป็นกรณีที่มีการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์
 $L_s = 17.46\text{mH}$ กรณีจ่ายโหลด $Z_L(s) = 100 + j20.82\Omega$ 116
- รูปที่ 5.36 ผลการจำลองการทำงานแสดงแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์เสมือนเมื่อมีการจำลอง ลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์ $L_s = 17.46\text{mH}$ กรณีจ่ายโหลด $Z_L(s) = 50 + j10.41\Omega$ 117
- รูปที่ 5.37 ผลการทดลองแสดงแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์เสมือนเมื่อมีการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์ $L_s = 17.46\text{mH}$ กรณีจ่ายโหลด $Z_L(s) = 50 + j10.41\Omega$ 118
- รูปที่ 5.38 ผลการจำลองการทำงานแสดงแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์เสมือนเมื่อมีการจำลอง ลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์ $L_s = 8.73\text{mH}$ กรณีจ่ายโหลด $Z_L(s) = 50 + j10.41\Omega$ 119
- รูปที่ 5.39 ผลการทดลองแสดงแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์เสมือนเมื่อมีการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์ $L_s = 8.73\text{mH}$ กรณีจ่ายโหลด $Z_L(s) = 50 + j10.41\Omega$ 120
- รูปที่ 5.40 ผลการจำลองการทำงานแสดงการเลื่อนเฟสของแรงดันเฟสเนื่องจากลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์เสมือน (ตัวเหนี่ยวนำ $L_s = 17.46\text{mH}$) กรณีจ่ายโหลด $Z_L(s) = 50 + j10.41\Omega$ 121
- รูปที่ 5.41 ผลการทดลองแสดงการเลื่อนเฟสของแรงดันเฟสเนื่องจากลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์เสมือน (ตัวเหนี่ยวนำ $L_s = 17.46\text{mH}$) กรณีจ่ายโหลด $Z_L(s) = 50 + j10.41\Omega$ 121

รูปที่ 5.42 ผลการจำลองการทำงานแสดงการเลื่อนเฟสของแรงดันเฟสเนื่องจากลักษณะสมบัติ
ของอิมพีแดนซ์เสมือน (ตัวเหนี่ยวนำ $L_s = 8.73\text{mH}$) กรณีจ่ายโหลด $Z_L(s) = 50 + j10.41\Omega$ 122

รูปที่ 5.43 ผลการทดลองแสดงการเลื่อนเฟสของแรงดันเฟสเนื่องจากลักษณะสมบัติของ
อิมพีแดนซ์เสมือน (ตัวเหนี่ยวนำ $L_s = 8.73\text{mH}$) กรณีจ่ายโหลด $Z_L(s) = 50 + j10.41\Omega$ 122

รูปที่ 5.44 ผลการจำลองการทำงานแสดงการเลื่อนเฟสของแรงดันเฟสเนื่องจากลักษณะสมบัติ
ของอิมพีแดนซ์เสมือน (ตัวเหนี่ยวนำ $L_s = 87.3\text{mH}$) กรณีจ่ายโหลด $Z_L(s) = 50 + j10.41\Omega$ 123

รูปที่ 5.45 ผลการทดลองแสดงการเลื่อนเฟสของแรงดันเฟสเนื่องจากลักษณะสมบัติของ
อิมพีแดนซ์เสมือน (ตัวเหนี่ยวนำ $L_s = 87.3\text{mH}$) กรณีจ่ายโหลด $Z_L(s) = 50 + j10.41\Omega$ 123



บทที่ 1

บทนำ

1.1. ความเบื้องต้น

โครงข่ายไฟฟ้าแบบดั้งเดิม (conventional grid) เป็นการควบคุมการผลิตแบบรวมศูนย์ (centralized power generation) ที่ผลิตไฟฟ้าจากพลังงานฟอสซิลเช่น พลังงานนิวเคลียร์ พลังงานจากถ่านหิน พลังงานจากแก๊สธรรมชาติ เป็นต้น และใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (synchronous generator) ซึ่งมีลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลโดยธรรมชาติที่สามารถสนับสนุนเสถียรภาพของโครงข่ายไฟฟ้าได้ดีหลายประการ [1]เช่น

1. เป็นแหล่งแรงดันขนาดคงตัว (infinite voltage source)
2. มีความเฉื่อยทางกลขนาดใหญ่ซึ่งแสดงถึงลักษณะสมบัติในการสะสมพลังงานช่วงสั้นในรูปของพลังงานจลน์ (short-term energy storage) ที่จะช่วยสนับสนุนระบบให้มีเสถียรภาพทั้งในด้านความถี่และแรงดัน
3. อิมพีแดนซ์ที่มีค่าต่ำที่ขดลวดสเตเตอร์ทำให้สามารถควบคุมกำลังรีแอกทีฟ ซึ่งช่วยรักษาเสถียรภาพทางด้านแรงดันให้แก่โครงข่ายได้

เสถียรภาพของแรงดันและความถี่ของโครงข่ายไฟฟ้าถูกควบคุมและดูแลอย่างใกล้ชิดโดยผู้ควบคุมระบบส่วนกลาง (centralized system operators) ที่ทำหน้าที่รักษาสมดุลระหว่างความต้องการใช้ไฟฟ้า(โหลด)และกำลังการผลิตไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลา ถ้าความถี่หรือแรงดันของโครงข่ายลดลงแสดงถึงปริมาณความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้ามากขึ้น ผู้ควบคุมระบบจะสั่งการไปยังโรงไฟฟ้าต่างๆให้เพิ่มกำลังการผลิตเพื่อตอบสนองต่อความต้องการโหลดเพื่อรักษาเสถียรภาพของโครงข่ายหรือในกรณีที่โครงข่ายไฟฟ้าเกิดความผิดปกติก็จะทำหน้าที่ปลดสายส่งและอุปกรณ์ต่างๆออกจากระบบและนำระบบกลับคืนสู่สภาวะปกติให้เร็วที่สุด ซึ่งในปัจจุบันข้อกำหนดในการเชื่อมต่อโครงข่าย (grid codes) และเงื่อนไขของเสถียรภาพของแรงดันและความถี่มีความเข้มงวดมากยิ่งขึ้น ทำให้โรงไฟฟ้าแต่ละโรงจะต้องมีฟังก์ชันการทำงานที่มีส่วนช่วยปฏิบัติในการรักษาเสถียรภาพดังกล่าว

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว (distributed generation, DG) ซึ่งผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน (renewable energy) เช่น พลังงานจากแสงอาทิตย์ และพลังงานลม เป็นต้น ได้เริ่มเข้ามามีบทบาทอย่างมากในระบบการผลิตไฟฟ้าและเข้ามาทดแทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่มีอยู่เดิม เนื่องจากเป็นพลังงานที่สะอาดและสามารถลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก อีกทั้งเทคโนโลยีทางอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีแนวโน้มของต้นทุนที่ลดลง ในขณะที่ประสิทธิภาพการ

แปลงผันพลังงานสูงขึ้น มีความยืดหยุ่นในการควบคุม และข้อดีอื่นๆอีกหลายประการที่ระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวมีข้อเด่นกว่าการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส จึงทำให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก แต่อย่างไรก็ดียังคงขาดลักษณะสมบัติในการช่วยสนับสนุนเสถียรภาพของโครงข่ายไฟฟ้าทั้งในด้านความถี่และแรงดัน ซึ่งเป็นอุปสรรคในการใช้พลังงานหมุนเวียนในปริมาณสูงในโครงข่ายไฟฟ้า

แนวคิดในการพัฒนาอินเวอร์เตอร์สำหรับการผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในอนาคต จะต้องให้ความสำคัญในด้านการสนับสนุนโครงข่ายทางด้านเสถียรภาพตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้า (grid codes) [2-4] สำหรับประเทศไทยหน่วยงานซึ่งมีหน้าที่กำกับดูแลโครงข่ายไฟฟ้าทั้งในระบบผลิตและระบบจำหน่าย ได้แก่ การไฟฟ้าฝ่ายผลิต การไฟฟ้านครหลวงและการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค หน่วยงานดังกล่าวได้ออกข้อกำหนดการเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้าที่กำหนดให้อินเวอร์เตอร์จะต้องมีฟังก์ชันการทำงานเพิ่มเติมได้แก่

- 1.) การรักษาเสถียรภาพของแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ (voltage regulation)
- 2.) การรักษาตัวประกอบกำลังที่จุดเชื่อมต่อ (power factor control)
- 3.) การควบคุมกำลังไฟฟ้า (active power control)
- 4.) การควบคุมกำลังรีแอกทีฟ (dynamic reactive power control)
- 5.) การทำงานผ่านช่วงความผิดปกติ (fault ride through)
- 6.) การป้องกันความถี่ต่ำและความถี่เกิน (under and over frequency protection)
- 7.) การป้องกันการจ่ายไฟฟ้าแบบแยกตัวอิสระ (anti-islanding)
- 8.) การรักษาเสถียรภาพของความถี่ (frequency stabilization)
- 9.) การวัดปริมาณทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องเพื่อเก็บข้อมูลไว้ศึกษา

อย่างไรก็ตาม หน่วยงานที่ดูแลโครงข่ายไฟฟ้าในประเทศไทยมีความคุ้นเคยกับระบบผลิตไฟฟ้าที่ผลิตด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสและมีวิธีการจัดการเมื่อโครงข่ายไฟฟ้าเกิดความผิดปกติ ถ้าระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวเริ่มเข้ามามีบทบาทมากขึ้นในระบบผลิต จะทำให้โครงข่ายไฟฟ้ามีลักษณะสมบัติต่างไปจากเดิม ในฐานะผู้ดูแลโครงข่ายไฟฟ้าจะต้องศึกษาวิธีการจัดการใหม่เพื่อให้โครงข่ายไฟฟ้ามีเสถียรภาพและมีความน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าหากเรามีวิธีในการควบคุมระบบผลิตไฟฟ้าด้วยอินเวอร์เตอร์ให้มีลักษณะสมบัติต่างๆเหมือนหรือคล้ายคลึงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสในแบบดั้งเดิม จะทำให้หน่วยงานที่ดูแลโครงข่ายไฟฟ้าใช้วิธีการจัดการโครงข่ายที่มีอยู่มาดูแลระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวได้เหมือนกับระบบผลิตที่ผลิตไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสและยังช่วยสนับสนุนในการใช้ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนปริมาณสูงในโครงข่ายได้

ฟังก์ชันการทำงานของอินเวอร์เตอร์ยุคใหม่ที่มีส่วนช่วยรักษาเสถียรภาพของแรงดันและความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลัง ได้แก่ จำลองลักษณะสมบัติต่างๆของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบดั้งเดิมที่พึงประสงค์ อาทิเช่น ฟังก์ชันการควบคุมแบบดรอป ฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกล ฟังก์ชันการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำที่ขดลวดสเตเตอร์ เป็นต้น

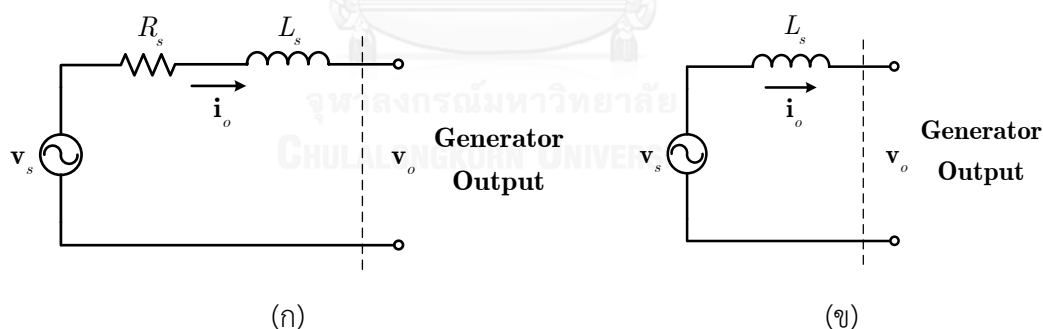
สำหรับวิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นที่จะนำเสนอการควบคุมของอินเวอร์เตอร์เพื่อจำลองลักษณะสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Generator Emulation Controls, GEC) ใน 2 ประเด็นคือ

1. ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า (electrical characteristics)
 - ส่วนควบคุมดรอปสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (droop control systems)
 - การจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์ (emulation of impedance)
2. ลักษณะสมบัติทางกล (mechanical characteristics)
 - การจำลองความเฉื่อยทางกล (emulation of inertia)

1.2. ลักษณะสมบัติและการควบคุมแบบดรอปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสในแบบดั้งเดิม

ลักษณะสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่จะศึกษาแบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลักๆ คือ

1.2.1. ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า



รูปที่ 1.1 วงจรสมมูลของลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (ก) วงจรสมมูลเต็มรูปแบบ (ข) เมื่อประมาณ $R_s \approx 0$

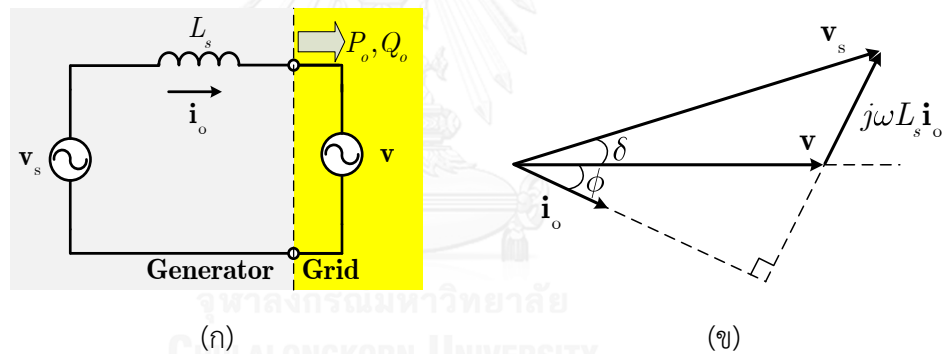
ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าพื้นฐานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแสดงได้ดังรูปที่ 1.1(ก) แบบจำลองประกอบไปด้วยแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายใน (EMF, v_s) อนุกรมกับความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ (R_s) [5] ผลรวมของความเหนี่ยวนำที่เกิดจากปฏิกิริยาอาร์เมเจอร์ (armature reaction effect) และความเหนี่ยวนำตัวเอง (self-inductance) คือ ความเหนี่ยวนำซิงโครนัส (synchronous inductance, L_s) เมื่อพิจารณากระแสที่ไหลในขดลวดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ซิงโครนัสจะถูกกำหนดโดยผลต่างระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและแรงดันด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สำหรับความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์จะออกแบบให้มีค่าน้อยมากเพื่อลดกำลังการสูญเสียของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจนสามารถประมาณได้ว่า $R_s \approx 0$ ได้ในวิทยานิพนธ์นี้ ดังนั้นวงจรสมมูลในรูปที่ 1.1(ก) จึงสามารถลดรูปได้ดังแสดงในรูปที่ 1.1(ข) ส่วนความสัมพันธ์ของขนาดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำภายในจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดของฟลักซ์แม่เหล็กที่โรเตอร์และความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ดังแสดงในสมการที่ (1.1) สำหรับในทางปฏิบัติการควบคุมขนาดของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำภายใน ($\|\mathbf{v}_s\|$) จะควบคุมได้จากการการปรับกระแสขดลวดสนาม (field winding) ที่ขดลวดด้านโรเตอร์เพื่อปรับขนาดของฟลักซ์แม่เหล็ก

$$\|\mathbf{v}_s\| \propto \omega_{\text{mech}} \cdot \phi \quad (1.1)$$

โดยที่ $\|\mathbf{v}_s\|$ คือ ขนาดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำภายใน ω_{mech} คือ ความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส และ ϕ คือ ขนาดของฟลักซ์แม่เหล็ก

1.2.2. ความสัมพันธ์ของกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 1.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่เชื่อมต่อกับโครงข่าย (ก) วงจรสมมูล (ข) เวกเตอร์ไดอะแกรม

เมื่อพิจารณาว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่เชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้าผ่านความเหนี่ยวนำซิงโครนัส (synchronous inductance, L_s) และมุมแรงบิด (torque angle, δ) ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์แรงดัน \mathbf{v} และ \mathbf{v}_s ดังแสดงในรูปที่ 1.2 (ก) และ รูปที่ 1.2 (ข) โดยปกติแล้วมุม δ จะมีขนาดเล็ก (ไม่เกิน 20 องศา ที่พิกัดแรงบิด) จึงสามารถประมาณได้ว่า $\sin \delta \approx \delta$ และ $\cos \delta \approx 1$ ดังนั้นความสัมพันธ์ของกำลังจริงที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าป้อนเข้าสู่โครงข่ายสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (1.2)

$$P_o \approx \frac{\|\mathbf{v}_s\| \cdot \|\mathbf{v}\| \cdot \delta}{\omega \cdot L_s} \Rightarrow P_o \propto \delta \quad (1.2)$$

และความสัมพันธ์ของกำลังรีแอกทีฟที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าป้อนเข้าสู่โครงข่ายแสดงได้ดังสมการที่ (1.3)

$$Q_o \approx \frac{\|\mathbf{v}\| \cdot (\|\mathbf{v}_s\| - \|\mathbf{v}\|)}{\omega \cdot L_s} \Rightarrow Q_o \propto (\|\mathbf{v}_s\| - \|\mathbf{v}\|) \quad (1.3)$$

จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (1.2) และ (1.3) จะเห็นได้ว่าค่ากำลังจริงจะสัมพันธ์กับมุม δ ซึ่งสะท้อนถึงความถี่ของโครงข่าย ω ในขณะที่กำลังรีแอกทีฟจะสัมพันธ์กับผลต่างระหว่างขนาดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำและแรงดันโครงข่ายที่จุดเชื่อมต่อ

1.2.3. การควบคุมรูปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัส

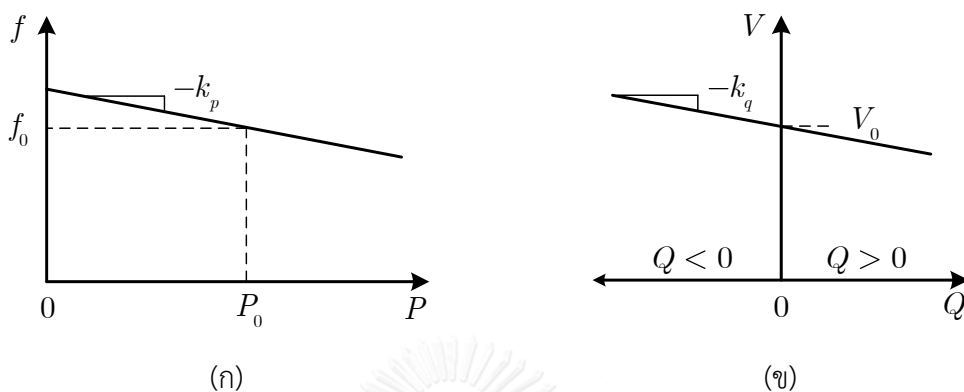
การควบคุมสัดส่วนการผลิตกำลังงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสแต่ละตัวที่ต่อขนานกันในโครงข่ายไฟฟ้ามีอยู่หลายวิธี[6] เช่น การควบคุมแบบรวมศูนย์ (centralized control) และวิธีการแบ่งโหลดเฉลี่ย (average load sharing) เป็นต้น แต่วิธีการดังกล่าวจำเป็นต้องมีสายเชื่อมโยงการสื่อสารแบนด์วิดท์สูง (high-bandwidth communication links) เพื่อติดต่อสื่อสารให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัวผลิตกำลังงานเท่าใดให้เพียงพอต่อความต้องการของโหลด ดังนั้นวิธีการควบคุมแบบดังกล่าวจึงมีข้อจำกัดสำหรับการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัวที่อยู่ห่างไกลกันมากๆ การควบคุมแบบดรู๊ป (droop control) จึงถูกใช้เป็นการควบคุมสัดส่วนการผลิตกำลังงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยปราศจากการใช้การติดต่อสื่อสารดังกล่าว วิธีนี้จึงสามารถลดข้อจำกัดในเรื่องการสื่อสารและตำแหน่งที่ตั้งของแหล่งพลังงานที่อยู่ห่างไกลกัน อีกทั้งยังเพิ่มสมรรถนะของการผลิตกำลังงานให้แก่โครงข่ายอีกด้วย สำหรับโครงข่ายไฟฟ้าเมื่อความเหนี่ยวนำในระบบส่ง/จำหน่ายมีนัยสำคัญ อาทิเช่น ความเหนี่ยวนำของสายส่ง ความเหนี่ยวนำเชิงโรนัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสและความเหนี่ยวนำรั่วไหลของหม้อแปลง เป็นต้น การควบคุมแบบดรู๊ปจะอาศัยการปรับการจ่ายกำลังจริงตามการเปลี่ยนแปลงของความถี่โครงข่ายและปรับการจ่ายกำลังรีแอกทีฟตามการเปลี่ยนแปลงของแรงดันรอบๆค่าพิกัดของความถี่และแรงดันตามลำดับ แสดงดังสมการที่ (1.4) และ (1.5)

$$f - f_0 = -k_p (P - P_0) \quad (1.4)$$

$$V - V_0 = -k_q (Q - Q_0) \quad (1.5)$$

โดยที่ f_0 คือค่าปกติของความถี่และ V_0 คือค่าปกติของแรงดัน P_0 และ Q_0 คือค่ากำลังของกำลังจริงปฏิกิริยาและค่ากำลังรีแอกทีฟปฏิกิริยา โดยมีอัตราขยาย k_p และ k_q เป็นสัมประสิทธิ์ที่กำหนดความชันของการควบคุมแบบดรู๊ป ระบบควบคุมจะจ่ายกำลังจริงทีติภูมิ P และกำลังรีแอกทีฟทีติภูมิ Q เข้าสู่ระบบที่จุดทำงานที่ความถี่และแรงดันค่าหนึ่งๆ (f, V) ดังแสดงในรูปที่ 1.3 สำหรับการควบคุมรูปของกำลังจริงที่จะกล่าวถึงในรูปที่ 1.3 (ก) จะเน้นเฉพาะส่วนที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกำลังจริงเข้าสู่โครงข่ายทิศทางเดียว ดังนั้นกำลังจริงจะมีเครื่องหมายเป็นบวกเท่านั้นแต่กำลังจริงอาจจะมีการไหลกลับได้สำหรับโรงไฟฟ้าที่รับกำลังจริงจากโครงข่ายได้แก่ โรงไฟฟ้าที่มี

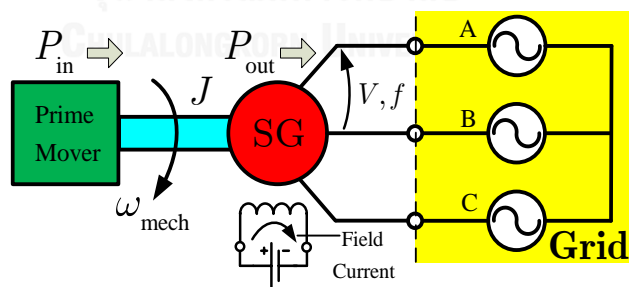
แบตเตอรี่สะสมพลังงาน (batteries energy storage, BES) ส่วนการควบคุมรูปของกำลังรีแอกทีฟ แสดงในรูปที่ 1.3 (ข) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถรับและจ่ายกำลังรีแอกทีฟเข้าสู่โครงข่ายได้ทั้ง 2 ทิศทาง ดังนั้นกำลังรีแอกทีฟจะมีเครื่องหมายได้ทั้งบวกและลบ



รูปที่ 1.3 ลักษณะสมบัติการควบคุมรูปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (ก) การควบคุมรูปของกำลังจริงและความถี่ (ข) การควบคุมรูประหว่างกำลังรีแอกทีฟและขนาดแรงดัน

1.2.4. ลักษณะสมบัติทางกล

ลักษณะสมบัติพื้นฐานทางกลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่จะศึกษาคือ ความเฉื่อยทางกล (mechanical Inertia) ความเฉื่อยทางกลรวมของระบบไฟฟ้ากำลังจะรวมทั้งความเฉื่อยทางกลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและความเฉื่อยทางกลของต้นกำลัง (prime mover) รูปที่ 1.4 แสดงถึงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสซิงโครนัสที่มีการเชื่อมร่วมทางกล (mechanical coupling) กับต้นกำลัง



รูปที่ 1.4 ไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่เชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้า

พลังงานจลน์ที่สะสมในความเฉื่อยทางกลรวม (inertia, J) เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานที่ความเร็วรอบ ω_{mech} สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1.6)

$$E_{\text{kinetic}} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega_{\text{mech}}^2 \quad (1.6)$$

โดยที่ความเร็วโรเตอร์จะสัมพันธ์กับความถี่ทางไฟฟ้าของแรงดันและกระแสที่ขดลวดสเตเตอร์ $\omega_{\text{mech}} = \omega / n$ และ n คือ จำนวนคู่ขั้วของโรเตอร์และ ω คือ ความถี่ทางไฟฟ้าของแรงดันและกระแสที่ขดลวดสเตเตอร์ อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ที่สะสมสามารถดังแสดงในสมการที่ (1.7)

$$P_{\text{in}} - P_{\text{out}} = \frac{dE_{\text{kinetic}}}{dt} = J \cdot \omega_{\text{mech}} \cdot \frac{d\omega_{\text{mech}}}{dt} \quad (1.7)$$

อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์จะแสดงถึงผลต่างของกำลังด้านเข้า (P_{in}) และกำลังด้านออก (P_{out}) เมื่อละเลยกำลังสูญเสีย จากสมการที่ (1.6) และ (1.7) เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของความถี่ขนาดเล็กรอบๆความถี่ปกติจะพบว่าความเฉื่อยทางกลจะเป็นสัดส่วนผกผันกับความถี่ของโครงข่าย ดังแสดงได้ในสมการที่ (1.8)

$$\Delta\omega = \frac{n^2}{J \cdot \omega_0} \cdot \int (P_{\text{in}} - P_{\text{out}}) \cdot dt \quad (1.8)$$

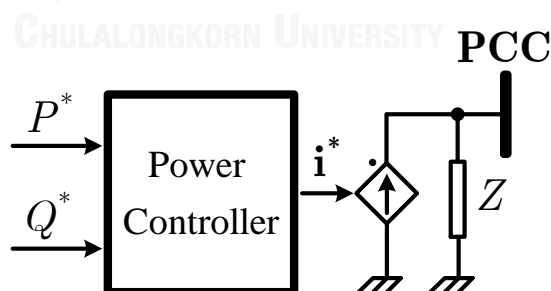
โดยที่ $\Delta\omega$ คือการเปลี่ยนแปลงความถี่ในช่วงแคบรอบๆความถี่ปกติ (nominal frequency, ω_0) พลังงานจลน์ที่สะสมในโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีกลไกในการรักษาเสถียรภาพทางความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลังดังนี้ เมื่อเกิดความไม่สมดุลระหว่างกำลังที่ผลิตและกำลังที่โหลด (เช่น กำลังที่โหลดมากกว่ากำลังที่ผลิต) พลังงานจลน์ที่สะสมอยู่จะถูกปลดปล่อยออกมาเพื่อตอบสนองต่อโหลดในสภาวะชั่วคราว ความเร็วโรเตอร์และความถี่ของโครงข่ายจะลดลงโดยขึ้นอยู่กับขนาดของโมเมนต์ความเฉื่อยทางกล ระบบควบคุมการผลิตอัตโนมัติ (Automatic Generation Control, AGC) จึงสั่งเพิ่มกำลังการผลิตเพื่อปรับความเร็วและความถี่ให้เพิ่มขึ้นและรักษาสมดุลกับโหลดที่เพิ่มขึ้น ระบบที่มีโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลรวมมากจะมีพลังงานจลน์สะสมอยู่มากและจะตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดในสภาวะชั่วคราวได้ดี กล่าวคือลักษณะสมบัติความเฉื่อยทางกลจะสามารถช่วยลดการแกว่งของความถี่ที่เกิดจากความแตกต่างระหว่างกำลังที่ผลิตและกำลังที่โหลด ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สามารถช่วยรักษาเสถียรภาพทางความถี่ของโครงข่ายไฟฟ้า

1.3. การจำแนกประเภทของอินเวอร์เตอร์ในระบบผลิตไฟฟ้า

อินเวอร์เตอร์ในระบบผลิตไฟฟ้าสามารถจำแนกได้หลากหลายประเภทขึ้นอยู่กับเกณฑ์ในการตัดสินใจ เช่น ลักษณะการทำงานและการเชื่อมต่อกับโครงข่าย การใช้หม้อแปลง รูปแบบของการแปลงผันพลังงาน รูปแบบการเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์เข้ากับแผงโฟโตวอลเทอิก เป็นต้น การแบ่งประเภทของอินเวอร์เตอร์ที่กล่าวถึงจะใช้ลักษณะการทำงานและการเชื่อมต่อกับโครงข่ายเป็นเกณฑ์จะสามารถจำแนกได้ 3 ประเภท ได้แก่ อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายกำลังงานเข้าสู่โครงข่าย อินเวอร์เตอร์แบบสร้างโครงข่าย และอินเวอร์เตอร์แบบมีส่วนช่วยสนับสนุนโครงข่าย[6]

1.3.1. อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายกำลังงานเข้าสู่โครงข่าย (grid-feeding inverters)

อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายกำลังงานเข้าสู่โครงข่าย (grid-feeding inverters) หรืออินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อโครงข่าย (grid-connected inverters) โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ดังกล่าวสามารถแสดงด้วยแหล่งจ่ายกระแส i^* ขนานกับอิมพีแดนซ์ด้านนอก Z ที่มีค่าสูงและเชื่อมต่อกับโครงข่ายดังแสดงในรูปที่ 1.5 อินเวอร์เตอร์ประเภทนี้จะต้องทำงานในลักษณะขนานโครงข่ายไฟฟ้าหรืออินเวอร์เตอร์แบบจ่ายกำลังงานเข้าสู่โครงข่ายตัวอื่นๆหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวอื่นๆ และอินเวอร์เตอร์แบบจ่ายกำลังงานเข้าสู่โครงข่ายนี้ ในทางปฏิบัติอินเวอร์เตอร์นี้จะไม่สามารถทำงานในโหมดไม่เชื่อมต่อโครงข่าย (stand-alone mode) อินเวอร์เตอร์ในระบบผลิตไฟฟ้าส่วนใหญ่จะทำงานในโหมดนี้เช่น การติดตามการจ่ายกำลังงานสูงสุด การควบคุมการจ่ายกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟ เป็นต้น และสามารถมีส่วนร่วมในการช่วยโครงข่ายรักษาเสถียรภาพของแรงดันและความถี่ได้โดยอาศัยการปรับการจ่ายกำลังจริง P^* และกำลังรีแอกทีฟ Q^* เข้าสู่โครงข่ายที่จุดเชื่อมต่อ

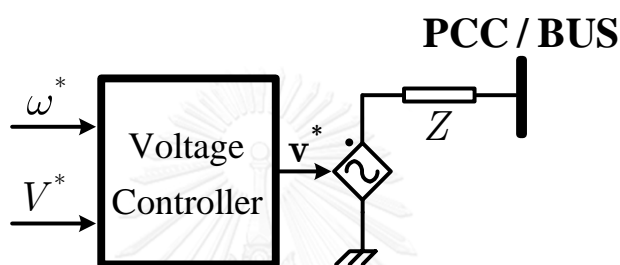


รูปที่ 1.5 แบบจำลองอย่างง่ายของอินเวอร์เตอร์แบบจ่ายกำลังงานเข้าสู่โครงข่าย (grid-feeding inverters) หรืออินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อโครงข่าย (grid-connected inverters)

1.3.2. อินเวอร์เตอร์แบบสร้างโครงข่าย (grid-forming inverters)

อินเวอร์เตอร์แบบสร้างโครงข่าย (grid-forming inverters) หรืออินเวอร์เตอร์แบบไม่เชื่อมต่อโครงข่าย (stand-alone inverters) สามารถแสดงได้ด้วยแหล่งจ่ายแรงดัน v^* ต่ออนุกรม

ผ่านอิมพีแดนซ์เชื่อมโยง (link impedance) Z ดังแสดงในรูปที่ 1.6 โดยปกติอิมพีแดนซ์ด้านออกนี้ จะมีค่าต่ำ การจ่ายกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟไปยังโหลดหรือจุดเชื่อมต่อจะขึ้นอยู่กับขนาดของ อิมพีแดนซ์ดังกล่าว ในทางปฏิบัติอินเวอร์เตอร์ชนิดนี้จะไม่เชื่อมต่อกับโครงข่าย เมื่อโครงข่ายไฟฟ้า เกิดความผิดปกติหรือไฟฟ้าดับ อินเวอร์เตอร์นี้จะประพฤติตนเป็นแหล่งจ่ายแรงดันแทนโครงข่าย ไฟฟ้าหรือทำงานในโหมดเครื่องสำรองไฟฟ้า (Uninterruptible Power Supply, UPS) สำหรับระบบ ผลิตไฟฟ้าไมโครกริด (microgrid) อินเวอร์เตอร์นี้จะทำหน้าที่สร้างแรงดัน v^* และความถี่ ω^* เพื่อ เป็นตัวอ้างอิงให้กับอินเวอร์เตอร์แบบจ่ายกำลังงานเข้าสู่โครงข่ายตัวอื่นหรือแหล่งผลิตไฟฟ้าตแบบ กระจายตัวตัวอื่นๆที่มาต่อขนานเพิ่ม



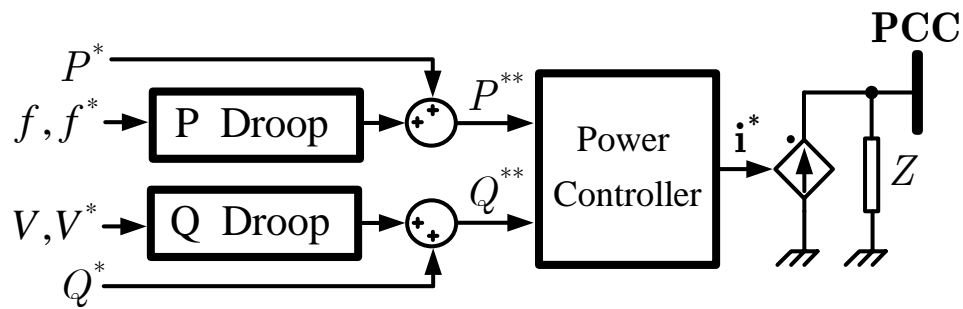
รูปที่ 1.6 แบบจำลองอย่างง่ายของอินเวอร์เตอร์แบบสร้างโครงข่าย (grid-forming inverters) หรือ อินเวอร์เตอร์แบบไม่เชื่อมต่อกับโครงข่าย (stand-alone inverters)

1.3.3. อินเวอร์เตอร์ที่มีฟังก์ชันช่วยสนับสนุนโครงข่าย (grid-supporting inverters)

อินเวอร์เตอร์ที่มีฟังก์ชันช่วยสนับสนุนโครงข่าย (grid-supporting inverters) สามารถ จำแนกออกได้เป็น 2 ประเภทย่อยได้แก่ อินเวอร์เตอร์ที่มีลักษณะสมบัติเป็นแหล่งจ่ายกระแสและ อินเวอร์เตอร์ที่มีลักษณะสมบัติเป็นแหล่งจ่ายแรงดัน

1.3.3.1. อินเวอร์เตอร์ที่มีลักษณะสมบัติเป็นแหล่งจ่ายกระแส

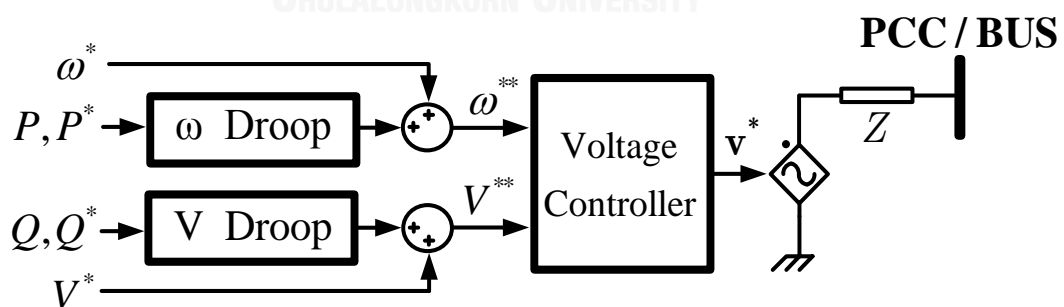
รูปที่ 1.7 แสดงถึงแหล่งจ่ายกระแส i^* ที่มีอิมพีแดนซ์ด้านออก Z ที่มีค่าสูงต่อ ขนานและเชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้า อินเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่หลักคล้ายคลึงกับ อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายกำลังงานเข้าสู่โครงข่ายในหัวข้อ 1.3.1 เพื่อจ่ายกำลังจริงและกำลังรี แอกทีฟเข้าสู่โครงข่าย และยังมีทำหน้าที่เพิ่มเติมในการปรับการจ่ายกำลังจริง P^{**} อัตโนมัติ เพื่อรักษาเสถียรภาพของความถี่และปรับการจ่ายกำลังรีแอกทีฟ Q^{**} อัตโนมัติเพื่อรักษา เสถียรภาพของแรงดัน ซึ่งขึ้นอยู่กับสถานะของความถี่ f และแรงดัน V ในขณะนั้น ในทาง ปฏิบัติการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในโหมดนี้คือ การควบคุมแบบดรอป (droop control)



รูปที่ 1.7 แบบจำลองอย่างง่ายของอินเวอร์เตอร์ที่มีฟังก์ชันช่วยสนับสนุนโครงข่าย (grid-supporting inverters) และมีลักษณะสมบัติเป็นแหล่งจ่ายกระแส

1.3.3.2. อินเวอร์เตอร์ที่มีลักษณะสมบัติเป็นแหล่งจ่ายแรงดัน

รูปที่ 1.8 แสดงถึงแหล่งจ่ายแรงดัน v^* ต่อนุกรมผ่านอิมพีแดนซ์ด้านออก Z ที่มีค่าต่ำและทำหน้าที่หลักคล้ายคลึงกับอินเวอร์เตอร์แบบสร้างโครงข่ายในหัวข้อ 1.3.2 อินเวอร์เตอร์นี้จะมีโหมดการทำงานที่ช่วยโครงข่ายไฟฟ้าบริหารจัดการจ่ายกำลังจริง P^* และกำลังรีแอกทีฟ Q^* ให้สอดคล้องต่อความต้องการโหลดผ่านค่าคำสั่งการควบคุมความถี่ ω^{**} แรงดัน E^{**} ตามลำดับ ซึ่งมีหลักการเช่นเดียวกับการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตารีในโรงไฟฟ้า การควบคุมดังกล่าวยังสามารถจำลองลักษณะสมบัติของแหล่งจ่ายแรงดันที่พึ่งประสงค์ได้จากวงรอบควบคุมแรงดันได้แก่ การจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์เสมือนในทางปฏิบัติอินเวอร์เตอร์ชนิดนี้สามารถทำงานได้ทั้งในโหมดเชื่อมต่อโครงข่ายและไม่เชื่อมต่อโครงข่าย อินเวอร์เตอร์ที่ทำงานในโหมดนี้ได้แก่ อินเวอร์เตอร์ไมโครกริดที่มีส่วนบริหารจัดการพลังงาน



รูปที่ 1.8 แบบจำลองอย่างง่ายของอินเวอร์เตอร์ที่มีฟังก์ชันช่วยสนับสนุนโครงข่าย (grid-supporting inverters) และมีลักษณะสมบัติเป็นแหล่งจ่ายแรงดัน

1.4. ลักษณะสมบัติและการควบคุมอินเวอร์เตอร์โฟโตวอลเทจิกแบบดั้งเดิม

วิธีการควบคุมอินเวอร์เตอร์โฟโตวอลเทจิกแบบดั้งเดิมจะให้ความสำคัญแก่การควบคุมกำลังจริงเข้าสู่โครงข่ายให้ได้ค่าสูงสุด (Maximum Power Point Tracking, MPPT) เมื่อโครงข่ายเกิด

ความผิดพลาดของแรงดันหรือความถี่ อินเวอร์เตอร์จะตัดตัวเองออกจากโครงข่ายตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อโครงข่ายตามระยะเวลาปลดวงจรดังแสดงในตารางที่ 1.1 โดยที่ไม่ได้มีส่วนช่วยสนับสนุนเสถียรภาพของโครงข่ายในระหว่างโครงข่ายไฟฟ้าเกิดความผิดพลาดแต่อย่างใด ในกรณีที่มิระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่ใช้อินเวอร์เตอร์จำนวนมาก หากโครงข่ายเกิดความผิดพลาดขึ้นแล้ว อินเวอร์เตอร์ทั้งหมดตัดตัวเองออกจากโครงข่ายจะทำให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นวงกว้างได้ ซึ่งส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายไฟฟ้า จึงเป็นอุปสรรคอย่างมากในการใช้พลังงานหมุนเวียนปริมาณสูงในโครงข่าย สำหรับการสนับสนุนเสถียรภาพของโครงข่ายที่พิจารณาในวิทยานิพนธ์นี้มี 2 ประเด็นคือเสถียรภาพของแรงดันและเสถียรภาพของความถี่ ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อโครงข่าย ดังแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ข้อกำหนดการเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์เข้ากับโครงข่ายที่เกี่ยวข้องกับระยะเวลาปลดวงจรเมื่อแรงดันที่จุดเชื่อมต่อไม่อยู่ในช่วงแรงดันปกติ

การไฟฟ้านครหลวง[2]		การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค[4]	
ระดับแรงดัน line to neutral (V)	ระยะเวลาปลดวงจร (วินาที)	ระดับแรงดัน line to neutral (V)	ระยะเวลาปลดวงจร (วินาที)
$V < 115$	0.1	$V < 50\%$	0.3
$115 \leq V < 200$	2.0	$50\% < V < 90\%$	2.0
$200 \leq V < 240$	ทำงานต่อเนื่อง	$90\% \leq V < 110\%$	ทำงานต่อเนื่อง
$240 \leq V < 311$	2	$110\% \leq V < 120\%$	1
$V \geq 311$	0.05	$V \geq 120\%$	0.16

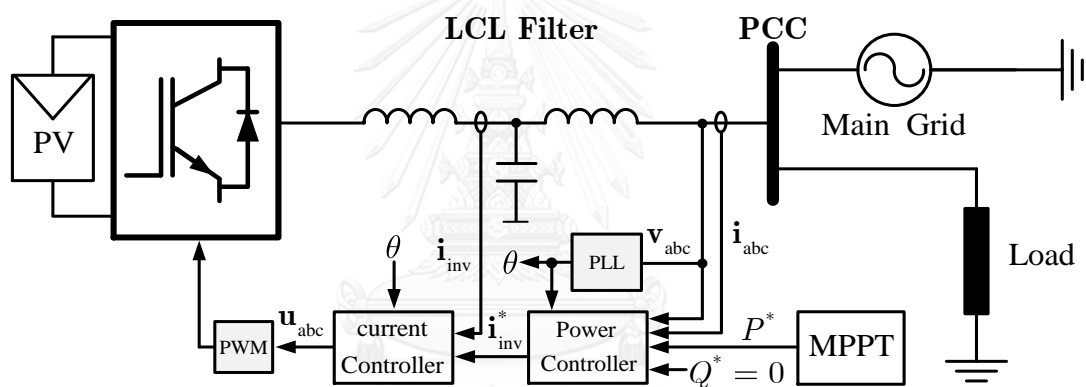
การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค[4] ได้กำหนดความถี่การใช้งานปกติเท่ากับ 50 Hz อินเวอร์เตอร์จะต้องควบคุมความถี่ ณ จุดเชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้าให้อยู่ในเกณฑ์ 50 ± 0.5 Hz และอินเวอร์เตอร์จะต้องปลดวงจรออกจากโครงข่ายไฟฟ้าภายใน 100 มิลลิวินาที เมื่อความถี่ของโครงข่ายไม่อยู่ในช่วง 48 – 51 Hz

1.4.1. อินเวอร์เตอร์โฟโตวอลเทอิกแบบเชื่อมต่อโครงข่ายที่มีส่วนติดตามกำลังงานสูงสุด

งานวิจัย[7, 8] นำเสนออินเวอร์เตอร์โฟโตวอลเทอิกแบบเชื่อมต่อโครงข่ายดังแสดงในรูปที่ 1.9 ที่ได้พัฒนาส่วนควบคุมการติดตามกำลังงานสูงสุด (Maximum Power Point Tracking, MPPT) ตามลักษณะสมบัติของกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ อินเวอร์เตอร์นี้จัดอยู่ในประเภทอินเวอร์เตอร์แบบจ่ายกำลังงานเข้าสู่โครงข่าย (grid-feeding inverters) และมีแบบจำลองอย่างง่ายแสดงได้ดังรูปที่ 1.5 โดยที่ค่ากำลังจริง P^* ได้มาจากส่วนควบคุมการติดตามกำลังงานสูงสุด จะ

เห็นได้ว่าระบบควบคุมจะเน้นเพียงแต่การจ่ายกำลังจริงสูงสุดเข้าสู่โครงข่ายเท่านั้น โดยที่ไม่มีส่วนช่วยสนับสนุนเสถียรภาพของโครงข่ายแต่อย่างใด จึงทำให้เกิดผลเสียต่อโครงข่ายไฟฟ้าหลายประการ ได้แก่

- 1.) ในกรณีที่โรงไฟฟ้าตั้งอยู่ห่างไกลจากสถานีไฟฟ้าย่อย เมื่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ผลิตได้มากแต่มีความต้องการโหลดน้อย จะทำให้เกิดปรากฏการณ์แรงดันเกิน (overvoltage) ได้ ส่งผลให้อินเวอร์เตอร์ต้องปลดวงจรออกตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อโครงข่ายในตารางที่ 1.1 ทำให้โรงไฟฟ้าเสียโอกาสในการขายไฟฟ้า
- 2.) ในแง่ของผู้ควบคุมโครงข่ายไฟฟ้า เช่น การไฟฟ้าฝ่ายผลิต ต้องแบกรับภาระในการรักษาเสถียรภาพของโครงข่ายทั้งความถี่และแรงดันอยู่เพียงผู้เดียว ทำให้การไฟฟ้าจะต้องติดตั้งอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันอื่นๆเพิ่มเติม เช่น รีแอกเตอร์ชาน (shunt reactors) หรือตัวเก็บประจุชาน (shunt capacitors) เป็นต้น



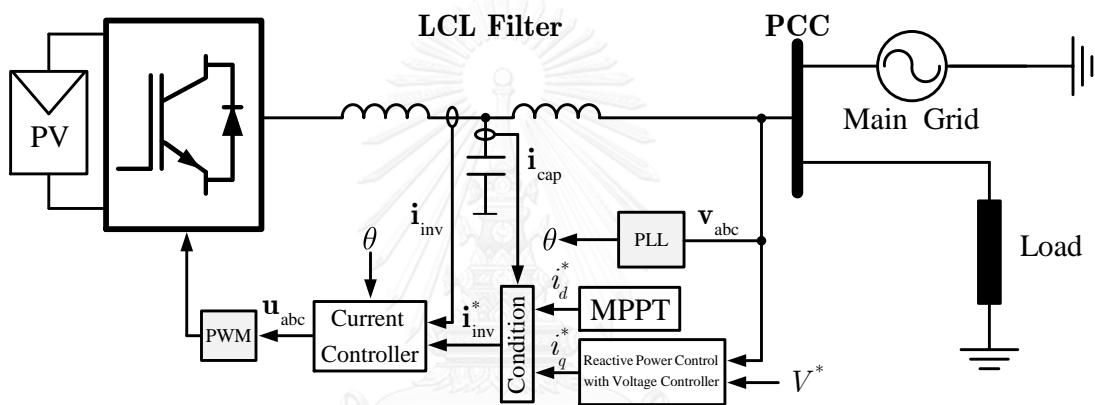
รูปที่ 1.9 ระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้าที่มีส่วนติดตามกำลังงานสูงสุด

1.4.2. อินเวอร์เตอร์ไฟโวลเทจแบบเชื่อมต่อโครงข่ายที่มีส่วนควบคุมกำลังรีแอกทีฟ

งานวิจัย[9] นำเสนอินเวอร์เตอร์ไฟโวลเทจแบบเชื่อมต่อโครงข่ายดังแสดงในรูปที่ 1.10 ที่ได้พัฒนาส่วนควบคุมกำลังรีแอกทีฟเพื่อสนับสนุนโครงข่ายไฟฟ้าในแง่ของแรงดันพร้อมทั้งกำหนดเงื่อนไขในการควบคุมแรงดันที่จุดเชื่อมต่อทั้งในการทำงานในภาวะปกติ ภาวะแรงดันตกและภาวะแรงดันเกิน อีกทั้งยังนำเสนอแนวคิดในการทำงานของอินเวอร์เตอร์ผ่านช่วงความผิดพลาด (Fault Ride Through, FRT) ซึ่งเป็นสถานะที่แรงดันของโครงข่ายมีขนาดต่ำที่สุด อินเวอร์เตอร์นี้จัดอยู่ในประเภทอินเวอร์เตอร์แบบจ่ายกำลังงานเข้าสู่โครงข่าย (grid-feeding inverters) และมีแบบจำลองอย่างง่ายแสดงได้ดังรูปที่ 1.5 ระบบควบคุมจะควบคุมกำลังจริงผ่านวงรอบควบคุมกระแสในแกน d ซึ่งคำนวณมาจากส่วนติดตามกำลังงานสูงสุด และควบคุมกำลังรีแอกทีฟผ่านวงรอบควบคุมกระแสในแกน q ซึ่งคำนวณมาจากวงรอบควบคุมแรงดันและมีส่วนช่วยสนับสนุนโครงข่ายในแง่ของแรงดัน จะ

เห็นได้ว่าระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ดังแสดงในรูปที่ 1.10 จะเน้นทั้งในส่วนจ่ายกำลังงานสูงสุดเข้าสู่โครงข่ายและส่วนช่วยสนับสนุนโครงข่ายในแง่ของแรงดัน แต่อย่างไรก็ตามระบบควบคุมดังกล่าวจะยังมีข้อจำกัดในการทำงานบางประการเช่น

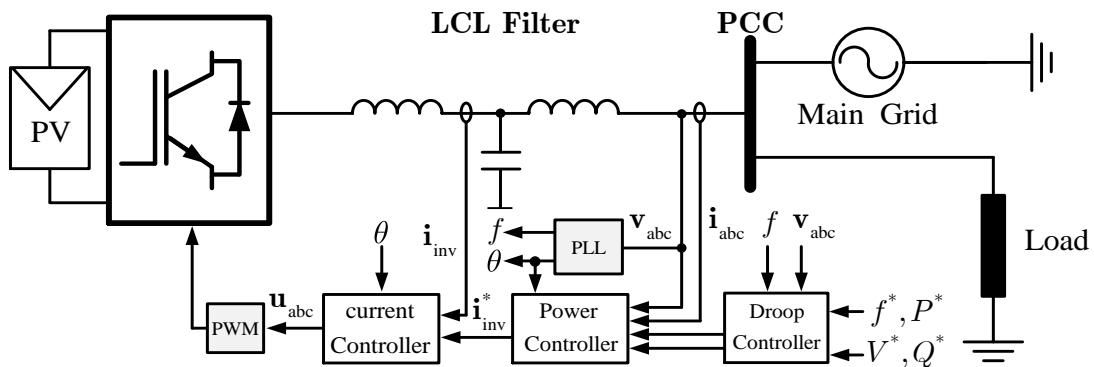
- 1.) เมื่อมีอินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมในลักษณะเดียวกันขนานกันโครงข่าย (parallel-operation inverters) หลายตัว อาจจะทำให้แรงดันที่จุดเชื่อมต่อเกิดการแกว่งได้
- 2.) ลักษณะสมบัติของโครงข่ายเป็นแหล่งจ่ายแรงดันโดยธรรมชาติซึ่งจะมีระดับแรงดันค่อนข้างจะคงที่ ดังนั้นอินเวอร์เตอร์อาจจะไม่สามารถควบคุมแรงดันที่จุดเชื่อมต่อให้มีค่าเท่ากับค่าคำสั่งได้ เนื่องจากโครงข่ายไฟฟ้าเป็นตัวกำหนดขนาดของแรงดัน
- 3.) ระบบควบคุมดังกล่าวยังขาดส่วนช่วยสนับสนุนโครงข่ายในแง่ของความถี่อีกด้วย



รูปที่ 1.10 ระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้าที่มีส่วนควบคุมกำลังรีแอกทีฟ

1.4.3. อินเวอร์เตอร์โฟโตวอลเทจิกแบบเชื่อมต่อโครงข่ายที่มีส่วนควบคุมรูป

งานวิจัย[6] นำเสนออินเวอร์เตอร์โฟโตวอลเทจิกแบบเชื่อมต่อโครงข่ายดังแสดงในรูปที่ 1.11 ได้พัฒนาส่วนควบคุมรูปเพื่อสนับสนุนโครงข่ายในแง่ของความถี่และแรงดัน โดยที่ระบบควบคุมจะปรับการจ่ายกำลังจริงเข้าสู่โครงข่ายเพื่อรักษาเสถียรภาพของความถี่และปรับการจ่ายกำลังรีแอกทีฟเข้าสู่โครงข่ายเพื่อรักษาเสถียรภาพของแรงดัน ซึ่งขึ้นอยู่กับสถานะของความถี่และแรงดันในขณะนั้นๆ อินเวอร์เตอร์นี้จัดอยู่ในประเภทอินเวอร์เตอร์ที่มีฟังก์ชันช่วยสนับสนุนโครงข่าย (grid-supporting inverters) ที่มีลักษณะสมบัติเป็นแหล่งจ่ายกระแสและมีแบบจำลองอย่างง่ายแสดงได้ดังรูปที่ 1.7 ส่วนควบคุมแบบรูปจะอาศัยหลักการเดียวกับการควบคุมแบบรูปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสในหัวข้อ 1.2.3



รูปที่ 1.11 ระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์โวลเทจแบบเชื่อมต่อกับโครงข่ายที่มีส่วนควบคุมรูป

ตารางที่ 1.2 ความสัมพันธ์ของอิมพีแดนซ์ของโครงข่ายกับส่วนควบคุมแบบรูป [6, 10]

อิมพีแดนซ์ของโครงข่าย	สมการความสัมพันธ์ของส่วนควบคุมแบบรูป
Inductive Grid ($X \gg R$) โครงข่ายแรงดันสูง High Voltage line	$f - f_0 = -k_p (P - P_0)$ $V - V_0 = -k_q (Q - Q_0)$
Resistive Grid ($R \gg X$) โครงข่ายแรงดันต่ำ Low Voltage line	$f - f_0 = k_q (Q - Q_0)$ $V - V_0 = -k_p (P - P_0)$
โครงข่ายในรูปแบบทั่วไป (general case) เมื่อ $Z = R + jX$	$f - f_0 = -k_p \frac{X}{Z} (P - P_0) + k_q \frac{R}{Z} (Q - Q_0)$ $V - V_0 = -k_p \frac{R}{Z} (P - P_0) - k_q \frac{X}{Z} (Q - Q_0)$

จากตารางที่ 1.2 จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ของความถี่กับกำลังจริงและความสัมพันธ์ของแรงดันกับกำลังรีแอกทีฟจะเป็นจริงก็ต่อเมื่ออิมพีแดนซ์ของโครงข่ายมีรีแอกแตนซ์เป็นส่วนใหญ่หรือ $X \gg R$ สำหรับโครงข่ายแรงดันต่ำเช่น ระบบผลิตไฟฟ้าไมโครกริด อิมพีแดนซ์ของโครงข่ายจะมีความต้านทานเป็นส่วนใหญ่หรือ $R \gg X$ ดังนั้นความสัมพันธ์ของความถี่จะขึ้นอยู่กับกำลังรีแอกทีฟและความสัมพันธ์ของแรงดันจะขึ้นอยู่กับกำลังจริง โดยที่ k_p และ k_q คือสัมประสิทธิ์การควบคุมรูปของกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟ ตามลำดับ

ถึงแม้ว่าส่วนควบคุมแบบรูปจะมีส่วนช่วยสนับสนุนโครงข่ายได้ดีแต่ก็มีข้อจำกัดในเรื่องจำเป็นต้องทราบพารามิเตอร์ของโครงข่าย (X และ R) จึงจะสามารถควบคุมความถี่และแรงดันของโครงข่ายได้ไปในทิศทางที่ถูกต้องและมีสมรรถนะที่ดี ซึ่งเป็นเรื่องที่ยากสำหรับโครงข่ายขนาดใหญ่ที่มีความซับซ้อน

งานวิจัย[11] ได้พัฒนาส่วนควบคุมแบบรูปเมื่อพิจารณาอิมพีแดนซ์ของโครงข่ายในรูปแบบทั่วไป (general case) ของตารางที่ 1.2 โดยอาศัยวิธีการปรับตัว (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference system, ANFIS) ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่จำเป็นต้องทราบโครงสร้างอิมพีแดนซ์ของโครงข่าย

สามารถสนับสนุนโครงข่ายได้เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของโหลดได้อย่างแม่นยำ แต่ก็ต้องอาศัยการคำนวณที่ซับซ้อน (5 ลำดับชั้น) และต้องใช้วิธีการทำซ้ำ (iterative method) เพื่อให้ได้ค่าความผิดพลาดที่ต่ำ (เช่น 0.00001 ms) จึงทำให้ไม่เหมาะสมกับโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่และซับซ้อน

งานวิจัย[12] ได้พัฒนาส่วนควบคุมแบบดรู๊ปโดยอาศัยการจำลองอิมพีแดนซ์ค่าจำกัดด้านออก (Emulation of a finite-output impedance) ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่จำเป็นต้องทราบโครงสร้างอิมพีแดนซ์ของโครงข่ายเช่นกันและสามารถสนับสนุนโครงข่ายได้เช่นกัน วิธีนี้ใช้ตัวประมาณแบบคัลมาน (Kalman estimator) และตัวควบคุมแบบกำลังสองเชิงเส้น (linear quadratic regulator) ซึ่งเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ ดังนั้นการแก้สมการเชิงอนุพันธ์จะต้องประยุกต์บนโดเมนตัวแปรสถานะ (state space domain) จึงทำให้การคำนวณซับซ้อน

จะเห็นว่าในงานวิจัย[11, 12] จะมีข้อจำกัดในด้านการคำนวณที่ยุ่งยากและซับซ้อนที่จะทำให้การควบคุมแบบดรู๊ปสามารถสนับสนุนโครงข่ายไปในทิศทางที่ถูกต้อง อีกทั้งการประยุกต์ใช้ความสัมพันธ์ของการควบคุมแบบดรู๊ปในระบบที่ไม่ทราบความสัมพันธ์ของโครงสร้างอิมพีแดนซ์หรือระบบที่มีความต้านทานเป็นส่วนใหญ่เช่นกรณีสายส่งในระบบแรงต่ำ ระบบไมโครกริด จะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการควบคุมแบบดรู๊ป

1.5. สรุปปัญหาและข้อจำกัดในงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต

ถึงแม้ว่าการพัฒนาระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ในงานวิจัย [6, 7, 9, 11, 12] จะมีส่วนช่วยสนับสนุนโครงข่ายไฟฟ้าด้วยวิธีการควบคุมกำลังรีแอกทีฟและการพัฒนาส่วนควบคุมแบบดรู๊ปซึ่งเป็นการสนับสนุนโครงข่ายในสถานะอยู่ตัว แต่ยังคงขาดการสนับสนุนโครงข่ายในแง่พลวัตของความถี่ (dynamic frequency regulation) อีกทั้งยังขาดฟังก์ชันการควบคุมให้มีลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส อีกทั้งยังขาดการออกแบบระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์เพื่อให้สอดคล้องกับข้อกำหนดการเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้าอีกด้วย

1.6. วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาอินเวอร์เตอร์ยุคใหม่ที่มีการจำลองลักษณะสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสในแบบดั้งเดิมใน 3 ประเด็น คือ

- 1.) ฟังก์ชันการควบคุมแบบดรู๊ป ทำหน้าที่สนับสนุนโครงข่ายของความถี่และขนาดแรงดันซึ่งใช้หลักการควบคุมเช่นเดียวกับการควบคุมแบบดรู๊ปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส
- 2.) ฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกล ซึ่งเป็นรูปแบบการสะสมพลังงานจลน์ชนิดหนึ่ง จะทำหน้าที่ช่วยสนับสนุนโครงข่ายโดยควบคุมลักษณะทางพลวัตของความถี่
- 3.) ฟังก์ชันการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์ วัตถุประสงค์หลักคือเพื่อให้อินเวอร์เตอร์มีลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์เช่นเดียวกับความเหนี่ยวนำซิงโครนัสในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส และเสริมสมรรถนะการควบคุมแบบดรู๊ปให้สามารถสนับสนุนโครงข่ายในแง่ของความถี่และแรงดันไปในทิศทางที่ถูกต้อง

1.7. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับด้านวิชาการและด้านประยุกต์

- 1.) เป็นแนวทางในการพัฒนาอินเวอร์เตอร์สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่มีฟังก์ชันการจำลองลักษณะสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส
- 2.) ทำให้หน่วยงานที่ดูแลโครงข่ายไฟฟ้าสามารถใช้วิธีการบริหารจัดการโครงข่ายที่มีอยู่เดิมจัดการกับระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวได้เหมือนระบบผลิตไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส
- 3.) เป็นการพัฒนาฟังก์ชันการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่มีส่วนช่วยสนับสนุนเสถียรภาพของความถี่และแรงดันของโครงข่ายไฟฟ้าภายใต้ข้อกำหนดการเชื่อมต่อโครงข่าย
- 4.) เป็นการช่วยสนับสนุนการใช้ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนปริมาณสูงในโครงข่ายได้
- 5.) รองรับต่อข้อกำหนดการเชื่อมต่อโครงข่ายที่มีการกำหนดฟังก์ชันการจำลองลักษณะสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่อาจจะมีผลบังคับใช้ในอนาคต

1.8. ขอบเขตวิทยานิพนธ์

- 1.) ออกแบบระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่มีการจำลองลักษณะสมบัติของเครื่องกำเนิดซิงโครนัสใน 3 ฟังก์ชันหลัก ได้แก่ ฟังก์ชันการควบคุมแบบดรู๊ปของกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟ ฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกล ฟังก์ชันการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์
- 2.) ทดสอบแนวคิดทางทฤษฎีด้วยการจำลองผลการดำเนินงานโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ และพัฒนาฮาร์ดแวร์เพื่อใช้ทดสอบในทางปฏิบัติ

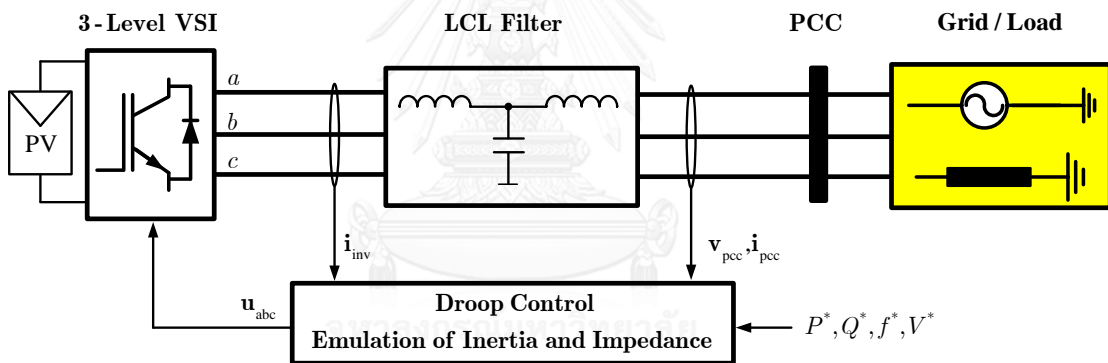
1.9. ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

- 1.) ศึกษาลักษณะสมบัติและการควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส
- 2.) ศึกษาโหมดการควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว
- 3.) ศึกษาหลักการควบคุมกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟสำหรับอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อโครงข่าย
- 4.) ศึกษาและพัฒนาวิธีการควบคุมแบบดรู๊ปสำหรับอินเวอร์เตอร์
- 5.) ศึกษาและพัฒนาการจำลองลักษณะสมบัติของโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลสำหรับอินเวอร์เตอร์
- 6.) ศึกษาและพัฒนาการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์สำหรับอินเวอร์เตอร์
- 7.) ออกแบบการจำลองลักษณะสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสด้วยอินเวอร์เตอร์
- 8.) จำลองระบบควบคุมโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (MATLAB SIMULINK) เพื่อพิสูจน์หลักการจำลองลักษณะสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสด้วยอินเวอร์เตอร์ ในทั้ง 3 ประเด็นดังกล่าว
- 9.) พัฒนาฮาร์ดแวร์เครื่องต้นแบบเพื่อใช้ในการทดสอบการจำลองลักษณะสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสด้วยอินเวอร์เตอร์ใน 3 ประเด็นดังกล่าว
- 10.) เก็บผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องต้นแบบ พร้อมสรุปผลการทดสอบ
- 11.) เขียนวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

การจำลองลักษณะสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสด้วยอินเวอร์เตอร์

รูปที่ 2.1 แสดงภาพรวมการควบคุมอินเวอร์เตอร์สามเฟสสามสายที่มีส่วนจำลองลักษณะสมบัติและการควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสทั้ง 3 ประเด็นได้แก่ การควบคุมรูป การจำลองลักษณะสมบัติของความเฉื่อยทางกล และการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อเข้ากับโครงข่ายที่จุดเชื่อมต่อร่วม (Point of Common Coupling, PCC) อนุกรมผ่านวงจรกรองผ่านต่ำ LCL filter ในทางปฏิบัติจริงจะใช้แหล่งจ่ายไฟตรงแทนแผงโฟโตวอลเทอิกเชื่อมต่อเข้ากับบัสไฟตรงของอินเวอร์เตอร์ สำหรับอินเวอร์เตอร์ที่ใช้เป็นแบบสามระดับซึ่งจะช่วยลดผลกระทบจากการแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference, EMI) และระบบที่นำเสนอเป็นแบบไร้หม้อแปลง ซึ่งมีข้อดีหลายประการเช่น มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ประสิทธิภาพสูงกว่าแบบมีหม้อแปลง และมีราคาถูกลงกว่าแบบมีหม้อแปลง เป็นต้น



รูปที่ 2.1 บล็อกไดอะแกรมของภาพรวมระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่มีส่วนจำลองลักษณะสมบัติและการควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

2.1. ความสัมพันธ์ของกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟของอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อโครงข่าย

กำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาได้จากผลคูณของแรงดันและกระแสบนกรอบอ้างอิงซิงโครนัส (synchronous reference frame, dq) เมื่อพิจารณาเวกเตอร์ของแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลังแบบสามเฟสสามสาย เราสามารถหาเวกเตอร์ของแรงดันบนกรอบอ้างอิงอยู่กับที่ (stationary reference frame, $\alpha\beta$) โดยใช้เมทริกซ์การแปลงคลาร์ก (Clarke transformation) ดังแสดงในสมการที่ (2.1)

$$\mathbf{v}_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} T_{\alpha\beta} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{v}_{abc} \quad (2.1)$$

โดยที่

$$[T_{\alpha\beta}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

และเวกเตอร์แรงดันบนแกนอ้างอิง $\alpha\beta$ ในสมการที่ (2.1) สามารถแปลงไปบนแกนอ้างอิง dq ดังแสดงในสมการที่ (2.3)

$$\mathbf{v}_{dq} = [T_{dq}] \cdot \mathbf{v}_{\alpha\beta} \quad (2.3)$$

โดยที่

$$[T_{dq}] = \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & -\cos(\omega t) \\ \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

และ ω คือความถี่ของกรอบอ้างอิงซิงโครนัสหรือความถี่ของโครงข่าย สำหรับเวกเตอร์ของกระแสบนแกนอ้างอิง dq เราสามารถใช้การแปลงเช่นเดียวกับการแปลงของแรงดันในสมการที่ (2.1) และ (2.3) ดังนั้นเวกเตอร์ของแรงดันและกระแสที่จุดเชื่อมต่อสามารถนิยามบนแกนอ้างอิง dq แสดงได้ดังสมการ (2.5) และ (2.6)

$$\mathbf{v} = v_d + jv_q \quad (2.5)$$

$$\mathbf{i} = i_d + ji_q \quad (2.6)$$

จากสมการของกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง (instantaneous power) ดังสมการที่ (2.7)

$$\mathbf{s} = \mathbf{vi}^* \quad (2.7)$$

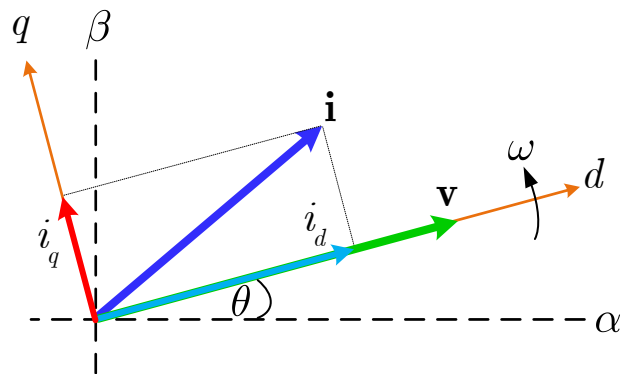
เมื่อแทนค่าสมการที่ (2.5) และ (2.6) ลงในสมการที่ (2.7) จะได้

$$\mathbf{s} = \mathbf{vi}^* = (v_d + jv_q) \cdot (i_d - ji_q) = v_d i_d + v_q i_q + j(v_d i_q - v_q i_d) \quad (2.8)$$

สมการที่ (2.8) ส่วนจริงจะแสดงถึงกำลังจริงและส่วนจินตภาพจะแสดงถึงกำลังรีแอกทีฟ ซึ่งจัดรูปใหม่ได้เป็นสมการที่ (2.9) และ (2.10)

$$P = v_d i_d + v_q i_q \quad (2.9)$$

$$Q = v_q i_d - v_d i_q \quad (2.10)$$



รูปที่ 2.2 เวกเตอร์ของแรงดันและกระแสบนกรอบอ้างอิง dq

เนื่องจากกำหนดแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ \mathbf{v} เป็นเวกเตอร์อ้างอิงในแนวแกน d ดังนั้นแรงดันขณะหนึ่งจึงมีเฉพาะองค์ประกอบในแนวแกน d ($v_q = 0$) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ดังนั้นความสัมพันธ์ของกำลังจริงจะขึ้นอยู่กับกระแสในแนวแกน d และกำลังรีแอกทีฟจะขึ้นอยู่กับกระแสในแนวแกน q ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.11) โดยทิศทางอ้างอิงการไหลของกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟจะกำหนดให้ไหลเข้าที่จุดเชื่อมต่อ

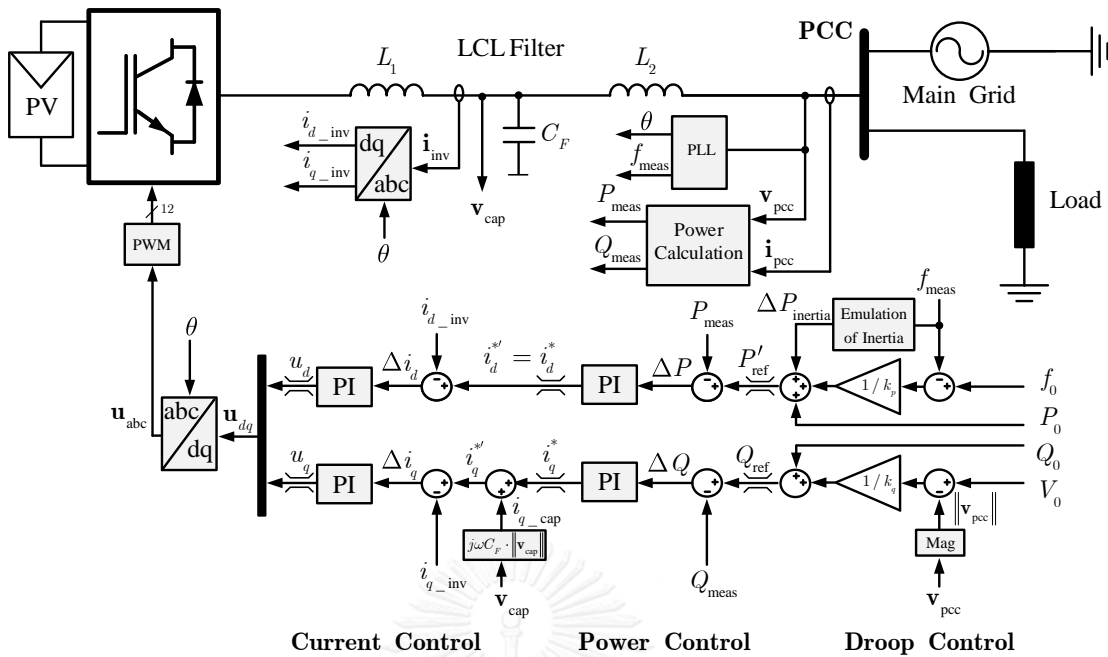
$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_d i_d \\ -v_d i_q \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

2.2. การจำลองลักษณะสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสด้วยอินเวอร์เตอร์

แนวคิดในการจำลองลักษณะสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสด้วยอินเวอร์เตอร์ในหัวข้อ 1.6 แสดงได้ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งมีการควบคุมกระแสของอินเวอร์เตอร์อยู่รอบในสุด อินเวอร์เตอร์จะควบคุมกำลังจริงผ่านกระแสในแนวแกน d และกำลังรีแอกทีฟผ่านกระแสในแนวแกน q ตามสมการที่ (2.11) นอกจากนี้ยังมีการชดเชยกระแสรีแอกทีฟไหลผ่านตัวเก็บประจุในวงจรกรองผ่านต่ำแบบ LCL [13] ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ด้วยวิธีการตรวจจับแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุและคำนวณกระแสไหลผ่านตัวเก็บประจุดังกล่าวได้จากสมการที่ (2.12)

$$\mathbf{i}_{\text{cap}} = \frac{\mathbf{v}_{\text{cap}}}{Z_{C_F}} = j\omega C_F \cdot \|\mathbf{v}_{\text{cap}}\| \quad (2.12)$$

ฟังก์ชันการควบคุมแบบดรูปจะอาศัยการควบคุมกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่จุดเชื่อมต่อ ฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลจะอาศัยการควบคุมกำลังจริง ฟังก์ชันการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์จะอาศัยการควบคุมแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.3 แผนภาพรวมการควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่มีฟังก์ชันการควบคุมแบบดรูปและการจำลองลักษณะสมบัติความเฉื่อยทางกล

2.2.1. ฟังก์ชันการควบคุมแบบดรูป (Droop control)

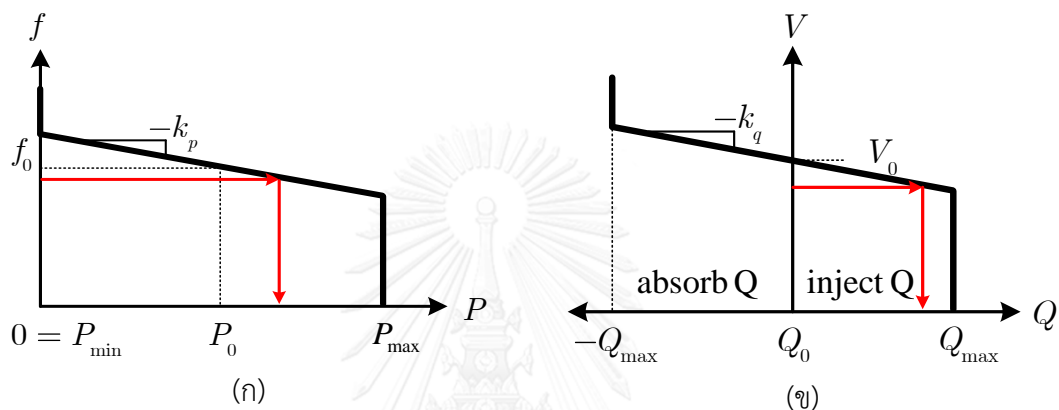
อินเวอร์เตอร์ที่มีฟังก์ชันการควบคุมแบบดรูปจะทำงานในโหมดสนับสนุนโครงข่าย (grid supporting inverters) โดยอินเวอร์เตอร์จะมีลักษณะสมบัติเป็นแหล่งจ่ายกระแส อินเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่ปรับการจ่ายกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟเข้าสู่โครงข่ายแบบอัตโนมัติตามการเปลี่ยนแปลงของความถี่และแรงดันในขณะนั้น เพื่อที่จะรักษาความถี่และแรงดันของโครงข่ายให้มีค่าเข้าใกล้ค่าปกติ หลักการดังกล่าวได้ถูกใช้ในการควบคุมการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส การควบคุมกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟของส่วนควบคุมแบบดรูปจะขึ้นอยู่กับอิมพีแดนซ์ของโครงข่ายดังแสดงในตารางที่ 1.2 ในกรณีที่โครงข่ายที่มีรีแอกแตนซ์มากกว่าความต้านทาน ($X \gg R$) ความสัมพันธ์ของการควบคุมกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟของส่วนควบคุมแบบดรูป สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.13) และ (2.14)

$$f - f_0 = -k_p (P_{ref} - P_0) \Rightarrow P_{ref} = P_0 + \frac{1}{k_p} (f_0 - f) \tag{2.13}$$

$$V - V_0 = -k_q (Q_{ref} - Q_0) \Rightarrow Q_{ref} = Q_0 + \frac{1}{k_q} (V_0 - V) \tag{2.14}$$

สำหรับส่วนควบคุมแบบดรูปจะเป็นวงรอบควบคุมด้านนอกสุดและตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่และการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันผ่านค่าสัมประสิทธิ์ความชัน $1/k_p$ และ $1/k_q$ ตามลำดับ

ค่าคำสั่งของกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟจากส่วนควบคุมแบบดรู๊ปจะรวมกับค่าคำสั่งของกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟจากส่วนควบคุมอื่นๆ อาทิเช่น การควบคุมแบบติดตามกำลังงานสูงสุด (maximum power point tracking, MPPT) หรือคำสั่งการผลิตจากศูนย์ควบคุมของการไฟฟ้า ค่าคำสั่งของกำลังรวมที่ได้ (P_{ref}, Q_{ref}) ตามสมการที่ (2.13) และ (2.14) จะถูกส่งผ่านไปยังวงรอบควบคุมกำลัง (power-controlled loop) และวงรอบควบคุมกระแส (current-controlled loop) ต่อไป ทั้งนี้วงรอบต่างๆจะต่อในลักษณะเรียงต่อกัน (cascade) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.4 กลไกการทำงานของ การควบคุมแบบดรู๊ปของอินเวอร์เตอร์เมื่อความถี่ในระบบส่งมีนัยสำคัญ (ก) การควบคุมแบบดรู๊ประหว่างกำลังจริงและความถี่ (ข) การควบคุมแบบดรู๊ประหว่างกำลังรีแอกทีฟและขนาดแรงดัน

รูปที่ 2.4(ก) แสดงกลไกการทำงานของฟังก์ชันการควบคุมแบบดรู๊ปสำหรับกำลังจริงคืออินเวอร์เตอร์จะต้องจ่ายกำลังจริงเพิ่มขึ้นจากค่าคำสั่งกำลังจริงปฐมภูมิ เมื่อความถี่ของโครงข่ายมีค่าน้อยกว่าค่าความถี่ปกติ (หรือน้อยกว่า 50 เฮิร์ตซ์, $f < f_0$) และอินเวอร์เตอร์จะต้องจ่ายกำลังจริงลดลงจากค่าคำสั่งกำลังจริงปฐมภูมิ เมื่อความถี่ของโครงข่ายมีค่ามากกว่าค่าความถี่ปกติ (หรือมากกว่า 50 เฮิร์ตซ์, $f > f_0$) โดยปริมาณกำลังจริงที่ปรับเปลี่ยนจะถูกกำหนดโดยค่าสัมประสิทธิ์ความชัน $1/k_p$ ทั้งนี้ค่าคำสั่งรวมของกำลังจริงจะต้องมีค่ามากกว่าศูนย์ เนื่องจากอินเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่จ่ายกำลังงานเข้าสู่โครงข่าย

การออกแบบค่าสัมประสิทธิ์ความชันของการควบคุมดรู๊ป $1/k_p$ จะพิจารณาถึงข้อกำหนดการเชื่อมต่อโครงข่าย [2-4, 14] เป็นสำคัญ เพื่อรักษาการเปลี่ยนแปลงของความถี่ให้อยู่ในกรอบ $50 \pm 0.5\text{Hz}$ และไม่เกิดการปลดวงจรเนื่องจากความถี่ผิดปกติ อินเวอร์เตอร์ควรจะปรับเพิ่ม/ลดการจ่ายกำลังจริง 100% ของพิกัดกำลังอินเวอร์เตอร์เมื่อความถี่โครงข่ายมีการเปลี่ยนแปลง $\pm 0.5\text{Hz}$ ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ความชันของการควบคุมดรู๊ป $1/k_p$ จะเท่ากับ 200% ของพิกัดกำลัง

จริงต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ 1 Hz (คิดเป็น 2pu./Hz) โดยปริมาณกำลังจริงจะต้องปรับตัวอย่างเป็นเชิงเส้นตามค่าสัมประสิทธิ์ $1/k_p$ และควรมีแถบไร้ผลตอบสนอง (dead band) ของความถี่เท่ากับ 50 mHz เพื่อป้องกันการแกว่งของความถี่ในสภาวะปกติ

รูปที่ 2.4(ข) แสดงกลไกการทำงานของฟังก์ชันการควบคุมแบบดรู๊ปสำหรับกำลังรีแอกทีฟคือ อินเวอร์เตอร์จะต้องจ่ายกำลังรีแอกทีฟเพิ่มขึ้นจากค่าคำสั่งกำลังรีแอกทีฟปรูมภูมิ เมื่อขนาดของแรงดันโครงข่ายมีค่าน้อยกว่าค่าของแรงดันปกติ (หรือแรงดันสายน้อยกว่า 380 โวลต์, $V < V_0$) และอินเวอร์เตอร์จะต้องจ่ายกำลังรีแอกทีฟลดลงจากค่าคำสั่งกำลังรีแอกทีฟปรูมภูมิ เมื่อขนาดของแรงดันโครงข่ายมีค่ามากกว่าค่าของแรงดันปกติ (หรือแรงดันสายมากกว่า 380 โวลต์, $V > V_0$) โดยปริมาณกำลังรีแอกทีฟที่ปรับเปลี่ยนจะถูกกำหนดโดยค่าสัมประสิทธิ์ความชัน $1/k_q$ ทั้งนี้ค่าคำสั่งรวมของกำลังรีแอกทีฟสามารถมีค่ามากกว่าศูนย์และน้อยกว่าศูนย์ เนื่องจากทิศทางกระแสของกำลังรีแอกทีฟสามารถไหลเข้าและออกที่จุดเชื่อมต่อได้

การออกแบบค่าสัมประสิทธิ์ความชันของการควบคุมดรู๊ป $1/k_q$ จะพิจารณาถึงข้อกำหนดการเชื่อมต่อโครงข่าย [2-4] และความน่าเชื่อถือของแรงดันเป็นสำคัญ ดังนั้นอินเวอร์เตอร์จะต้องช่วยโครงข่ายไฟฟ้าจ่ายกำลังรีแอกทีฟเพื่อรักษาการเปลี่ยนแปลงของแรงดันให้อยู่ในกรอบ $90\% \leq V < 110\%$ (แรงดันระหว่างสายมีค่าระหว่าง 346 V ถึง 416 V) โดยไม่เกิดการปลดวงจร ดังนั้นการควบคุมดรู๊ปสำหรับกำลังรีแอกทีฟ อินเวอร์เตอร์ควรจะปรับเพิ่ม/ลดการจ่ายกำลังรีแอกทีฟ 100% ของพิกัดกำลังอินเวอร์เตอร์เมื่อแรงดันโครงข่ายเปลี่ยนแปลงจนถึง $\pm 10\%$ ของค่าแรงดันปกติ ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ความชันของการควบคุมดรู๊ป $1/k_q$ จะเท่ากับ 100% ของพิกัดกำลังรีแอกทีฟต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันสาย 10% (คิดเป็น $1\text{pu.}/\pm 10\% V_{\text{line}}$) โดยปริมาณกำลังรีแอกทีฟจะต้องปรับตัวอย่างเป็นเชิงเส้นตามค่าสัมประสิทธิ์ความชันของการควบคุมดรู๊ป $1/k_q$ และควรมีแถบไร้ผลตอบสนอง (dead band) ของแรงดันสายเท่ากับ 15 V เพื่อป้องกันการแกว่งของแรงดันในสภาวะปกติ

2.2.2. ฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกล (Emulation of inertia)

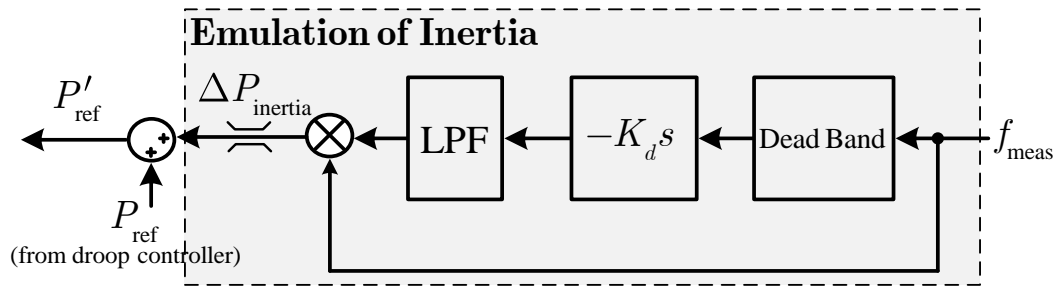
ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าในปัจจุบันนั้นถือว่ามีความเข้มงวดในเรื่องการควบคุมความถี่ที่จุดเชื่อมต่อ ($50 \pm 0.5\text{Hz}$) [2-4, 14] จึงทำให้อินเวอร์เตอร์ยุคใหม่จะต้องให้ความสำคัญกับการสนับสนุนโครงข่ายไฟฟ้าของความถี่มากขึ้น การเปลี่ยนแปลงของความถี่ของโครงข่ายจะขึ้นอยู่กับความสมดุลระหว่างกำลังงานที่โหลดต้องการและกำลังงานผลิตแล้ว นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับความเฉื่อยทางกลรวมของระบบไฟฟ้างำลังซึ่งหมายถึงความเฉื่อยทางกลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสรวมกับต้นกำลังตั้งในสมการที่ (1.8) อย่างไรก็ตามการผลิตไฟฟ้าด้วยอินเวอร์เตอร์ที่

เข้ามามีบทบาทมากขึ้นและเข้ามาทดแทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่มีอยู่เดิมจะทำให้ความเฉื่อยทางกลของโครงข่ายไฟฟ้าลดลง ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของความถี่ของโครงข่ายไฟฟ้า เพื่อให้โครงข่ายไฟฟ้ากำลังมีคุณสมบัติในการกักเก็บพลังงานจลน์เช่นเดียวกับความเฉื่อยทางกล อินเวอร์เตอร์ยุคใหม่จำเป็นต้องมีฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเพื่อตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของความถี่และต้องสามารถสนับสนุนเสถียรภาพของโครงข่ายได้เหมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสดังที่กล่าวมาในหัวข้อ 1.2.4 อินเวอร์เตอร์ที่มีฟังก์ชันนี้จะสามารถรองรับต่อข้อกำหนดการเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้าที่มีการกำหนดอัตรา ramps (ramp rate) และอาจจะมีผลบังคับใช้ในอนาคตได้

กลไกในการทำงานเพื่อจำลองลักษณะสมบัติความเฉื่อยทางกลก็คืออินเวอร์เตอร์จะต้องตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ (df / dt) เมื่อความถี่ของโครงข่ายกำลังจะลดลงหรืออัตราการเปลี่ยนแปลงของความถี่โครงข่ายมีค่าเป็นลบ อินเวอร์เตอร์จะต้องเพิ่มการจ่ายกำลังจริงจากค่าคำสั่ง (เสมือนกับพลังงานจลน์ที่สะสมอยู่ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าถูกจ่ายไปยังโหลดในสถานะชั่วคราว) หรือในทางตรงกันข้ามเมื่อความถี่ของโครงข่ายกำลังจะเพิ่มขึ้นหรืออัตราการเปลี่ยนแปลงของความถี่โครงข่ายมีค่าเป็นบวก อินเวอร์เตอร์จะต้องลดการจ่ายกำลังจริงลงจากค่าคำสั่ง (เสมือนกับกักเก็บพลังงานส่วนที่เกินไว้ในรูปแบบพลังงานจลน์ที่ความเฉื่อยทางกลในสถานะชั่วคราว) ซึ่งแนวคิดการจำลองลักษณะสมบัติของความเฉื่อยทางกลสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.15) ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะสมบัติของความเฉื่อยทางกลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสในสมการที่ (1.8)

$$\Delta P_{\text{inertia}} = -K_d \cdot f \cdot \frac{df}{dt} \quad (2.15)$$

โดยที่ $K_d \triangleq (2\pi / n)^2 \cdot J$ ค่าคงตัว K_d จะแสดงถึงโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเสมือน ซึ่งในกรณีที่ควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์จะมีความยืดหยุ่นกว่าโดยสามารถปรับเปลี่ยนค่าได้จากวงรอบการควบคุม ในส่วนเครื่องหมายลบจะแสดงถึงทิศทางการไหลของกำลังจริงที่ตรงข้ามกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของความถี่ตามกลไกข้างต้น ค่า $\Delta P_{\text{inertia}}$ ที่คำนวณได้ตามสมการที่ (2.15) จะถูกนำมาบวกเพิ่มเติมให้แก่ค่าคำสั่งกำลังจริงหตุยภูมิ P_{ref} ที่มาจากส่วนควบคุมรูปเพื่อเป็นค่าคำสั่งกำลังจริงหตุยภูมิของวงรอบควบคุมกำลังจริงและส่งผ่านไปยังวงรอบควบคุมกระแสต่อไปดังแสดงในรูปที่ 2.3 และรูปที่ 2.5 ซึ่งการตอบสนองของการเพิ่ม/ลดการจ่ายกำลังจริงเข้าสู่โครงข่ายที่จุดเชื่อมต่อตามสมการที่ (2.15) จะช่วยจำกัดและลดอัตราการเปลี่ยนแปลงของความถี่โครงข่ายได้และทำให้อินเวอร์เตอร์มีลักษณะสมบัติของความเฉื่อยทางกลเหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส



รูปที่ 2.5 บล็อกไดอะแกรมการจำลองลักษณะสมบัติความเฉื่อยทางกลสำหรับอินเวอร์เตอร์

การออกแบบฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลจะพิจารณาจากข้อกำหนดการเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้าประเทศสเปน[15] ได้แก่

- 1.) ค่าอัตราขยายของ K_d ควรมีค่าปรับได้ตั้งแต่ 0-15 วินาที
- 2.) ผลตอบสนองทางเวลา (response time) ของการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อย ($\Delta P_{inertia}$) ควรมีค่าไม่เกิน 50 มิลลิวินาทีโดยที่สามารถตอบสนองของการเพิ่มขึ้น/ลดลงของกำลังจริงอย่างน้อย 5% ของ $\Delta P_{inertia}$ โดยปกติแล้วจะตั้งค่าผลตอบสนองได้จากค่าคงตัวทางเวลา (time constant, τ) ของตัวกรองผ่านต่ำ
- 3.) เพื่อให้อินเวอร์เตอร์สามารถจ่ายกำลังจริงส่วนเพิ่มหรือลด $\Delta P_{inertia}$ ได้ตามกลไกการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อย ดังนั้นอินเวอร์เตอร์ควรมีระบบสะสมพลังงาน (energy storage systems) หรือเทคโนโลยีอื่นๆเพื่อที่จะเพิ่มหรือลดการจ่ายกำลังจริงอย่างน้อย 10% ของ $\Delta P_{inertia}$ เป็นเวลาอย่างน้อย 2 วินาที
- 4.) การจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลควรจะหยุดทำงานเมื่อแรงดันต่ำกว่า 0.85 pu.
- 5.) แถบไร้ผลตอบสนองของ (dead band) ของการเปลี่ยนแปลงความถี่เท่ากับ $\pm 10\text{mHz}$

2.2.3. ฟังก์ชันการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์ (Emulation of impedance)

ฟังก์ชันการควบคุมรูปในหัวข้อ 2.2.1 เป็นการควบคุมที่มีสมรรถนะในการรักษาความถี่และแรงดันของโครงข่ายไฟฟ้าในระดับแรงดันสูงหรือปานกลาง[1, 6] ซึ่งมีลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์ส่วนใหญ่เป็นรีแอกแตนซ์ เช่น รีแอกแตนซ์ของสายส่ง รีแอกแตนซ์ของหม้อแปลงในระบบส่งและระบบจำหน่าย รีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส เป็นต้น การประยุกต์ใช้การควบคุมรูปในโครงข่ายระดับแรงดันต่ำหรือไมโครกริดซึ่งมีลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์โครงข่ายแตกต่างออกไปจากโครงข่ายแรงดันสูง ส่งผลทำให้การควบคุมรูปมีประสิทธิภาพลดลงหรือไม่สามารถควบคุมความถี่และแรงดันไปในทิศทางที่ถูกต้อง

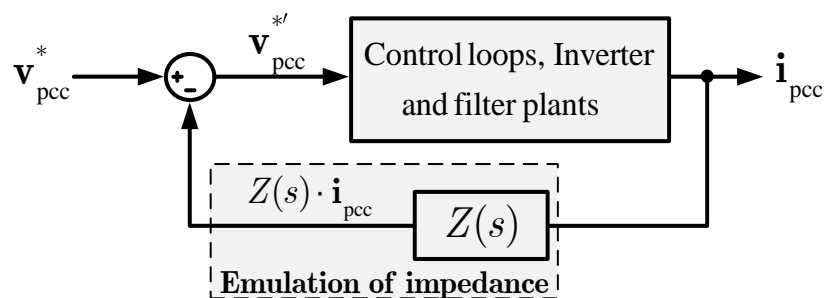
การแก้ปัญหาการประยุกต์การใช้การควบคุมแบบรูปกับระบบที่ไม่ทราบความสัมพันธ์ของโครงสร้างอิมพีแดนซ์ จะใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีขนาดใหญ่เชื่อมโยงระหว่างอินเวอร์เตอร์และโครงข่าย

ไฟฟ้าเพื่อให้โครงสร้างของอิมพีแดนซ์ของโครงข่ายให้มีรีแอกแตนซ์มากกว่าความต้านทาน ($X \gg R$) ซึ่งจะทำให้เกิดผลเสียหลายประการ เช่น ขนาดอินเวอร์เตอร์ที่ใหญ่ ประสิทธิภาพที่ลดลงเนื่องจากความสูญเสียที่ตัวเหนี่ยวนำเชื่อมโยง ราคาที่สูงขึ้น น้ำหนักที่มากขึ้นและแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ เป็นต้น การจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์จึงเป็นวิธีการควบคุมเพื่อจำลองให้เกิดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของอิมพีแดนซ์ผ่านการคำนวณโดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มอุปกรณ์อื่นใดเข้าไปที่อินเวอร์เตอร์ ซึ่งแนวคิดนี้เป็นวิธีการปรับเปลี่ยนอิมพีแดนซ์ด้านออกเพื่อใช้ในการแบ่งสัดส่วนการจ่ายกำลังของอินเวอร์เตอร์ที่ต่อขนานกันในโครงข่าย การจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์จะมีความยืดหยุ่นกว่าโดยสามารถกำหนดชนิดของอิมพีแดนซ์ที่ต้องการจำลองและสามารถปรับเปลี่ยนค่าได้จากวงจรการควบคุม

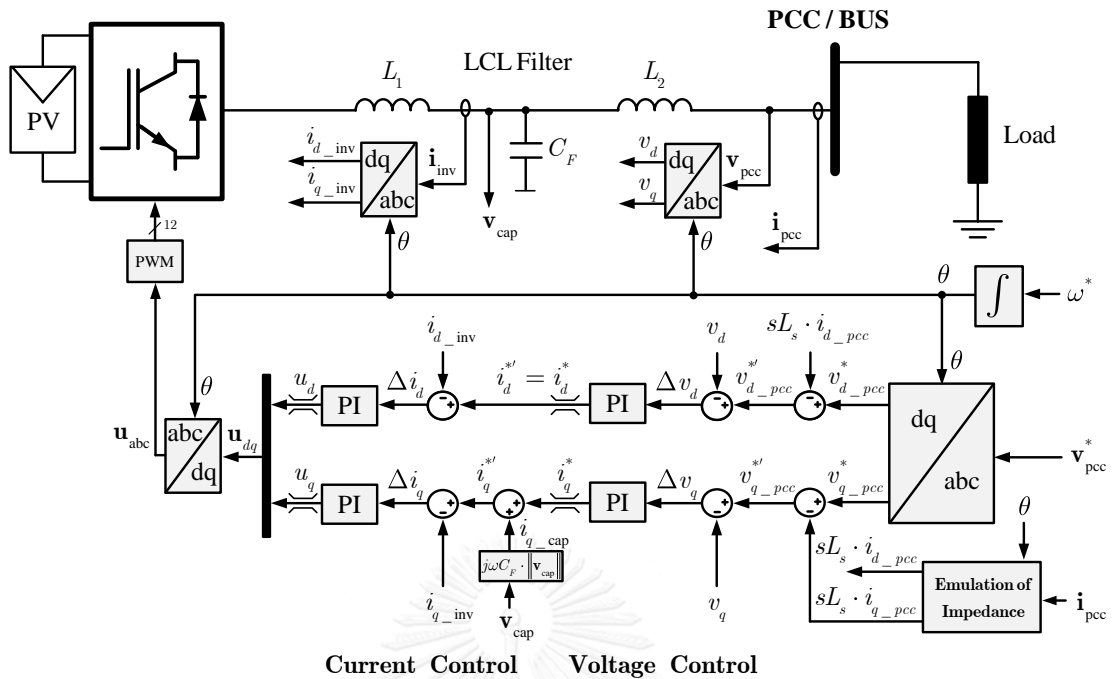
อินเวอร์เตอร์ที่มีฟังก์ชันการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์จะต้องทำงานในโหมดสร้างโครงข่าย (grid-forming inverters) หรือโหมดไม่เชื่อมต่อโครงข่าย (stand-alone inverters) กลไกการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์สามารถทำได้โดยการหักลบค่าแรงดันคำสั่งปฐมภูมิของอินเวอร์เตอร์ด้วยค่าแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์เสมือนที่จำลองขึ้น ดังแสดงในสมการที่ (2.16)

$$\mathbf{v}_{pcc}^* = \mathbf{v}_{pcc}^* - \mathbf{Z}(s) \cdot \mathbf{i}_{pcc} \quad (2.16)$$

โดยที่ \mathbf{v}_{pcc}^* คือค่าแรงดันคำสั่งทุติยภูมิในสถานะจำลองอิมพีแดนซ์ \mathbf{v}_{pcc}^* คือค่าแรงดันคำสั่งปฐมภูมิหรือค่าแรงดันคำสั่งในสถานะไร้โหลด $\mathbf{Z}(s)$ คือฟังก์ชันโอนย้ายของอิมพีแดนซ์เสมือนที่ต้องการจำลอง \mathbf{i}_{pcc} คือกระแสไหลเข้าที่จุดเชื่อมต่อ จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันคำสั่งทุติยภูมิจะมีค่าลดลงตามค่าแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์นั่นเอง รูปที่ 2.6 และรูปที่ 2.7 แสดงถึงบล็อกไดอะแกรมของการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์ด้วยอินเวอร์เตอร์ ในวิทยานิพนธ์นี้ต้องการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ $\mathbf{Z}(s) = sL_s$ โดยที่ s คือ Laplace operator ซึ่งเปรียบเสมือนความเหนี่ยวนำเชิงครอนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงครอน (synchronous inductance, L_s) ในรูปที่ 1.1(ข)



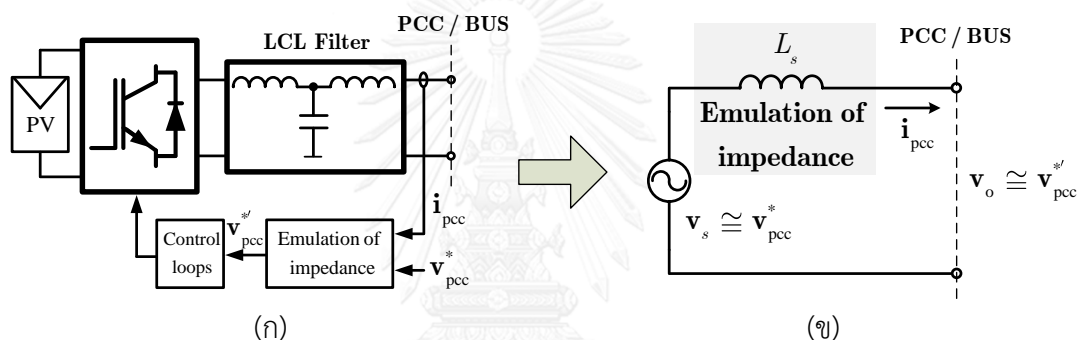
รูปที่ 2.6 บล็อกไดอะแกรมของอินเวอร์เตอร์ที่มีการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์



รูปที่ 2.7 แผนภาพรวมของการควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่มีฟังก์ชันการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์

รูปที่ 2.7 อินเวอร์เตอร์จะทำงานในโหมดควบคุมแรงดัน ค่าคำสั่งแรงดันปรัญมภูมิ (\mathbf{v}_{pcc}^*) จะถูกหักลบค่าแรงดันที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์เสมือนที่ได้จากการจำลองดังแสดงในสมการที่ (2.16) ค่าคำสั่งแรงดันทุติยภูมิ (\mathbf{v}_{pcc}^*) ที่ได้จะถูกส่งผ่านไปยังวงรอบควบคุมแรงดัน (voltage-controlled loop) และวงรอบควบคุมกระแส (current-controlled loop) ซึ่งจะต่อในลักษณะเรียงต่อกัน (cascade) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ดังนั้นอินเวอร์เตอร์ที่มีการจำลองอิมพีแดนซ์จะมีลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์เหมือนกับความเหนี่ยวนำเชิงโรนัสในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัส (L_s) และทำให้โครงสร้างของอิมพีแดนซ์ของโครงข่ายไฟฟ้ามีรีแอกแตนซ์มากกว่าความต้านทาน ($X \gg R$) ซึ่งจะเพิ่มสมรรถนะของส่วนการควบคุมแบบรูปของกำลังจริงกับความถี่และกำลังรีแอกทีฟกับขนาดแรงดันอีกด้วย อีกทั้งโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์นี้เป็นแหล่งจ่ายแรงดัน (voltage source inverter) โดยธรรมชาติซึ่งจะมีลักษณะสมบัติของแรงดันเช่นเดียวกับแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำภายใน (EMF, \mathbf{v}_s) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัส ซึ่งจะทำให้การควบคุมอินเวอร์เตอร์มีลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าสอดคล้องกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสในแบบดั้งเดิมดังแสดงในรูปที่ 2.8 เวกเตอร์ของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำภายในจะสอดคล้องกับแรงดันคำสั่งปรัญมภูมิ ($\mathbf{v}_s \cong \mathbf{v}_{pcc}^*$) และเวกเตอร์ของแรงดันด้านออกของแรงดันออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะสอดคล้องกับเวกเตอร์ของแรงดันคำสั่งทุติยภูมิ ($\mathbf{v}_o \cong \mathbf{v}_{pcc}^*$) มุมเฟสระหว่างเวกเตอร์ดังกล่าวจะแสดงถึงผลของตัวเหนี่ยวนำเสมือนที่จำลองขึ้นและเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการจ่ายกำลังจริงของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งสอดคล้องกับการจ่ายกำลังจริงของ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสตั้งแสดงในสมการที่ (1.2) ในทำนองเดียวกัน เมื่อสั่งแรงดันคำสั่งปฐมภูมิคงที่ แรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์เสมือนจากการที่อินเวอร์เตอร์จ่ายโหลดจะสอดคล้องกับขนาดของผลต่างของขนาดเวกเตอร์แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำภายในและแรงดันด้านออกซึ่งแสดงถึงการรักษาระดับแรงดัน (voltage regulation) [5] ผลต่างของแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการรับ/จ่ายกำลังรีแอกทีฟดังแสดงในสมการที่ (1.3) ถ้าหากอินเวอร์เตอร์จ่ายโหลดประเภทตัวต้านทานหรือโหลดตัวประกอบกำลังเท่ากับหนึ่ง แรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์จะลดลงจากสภาวะไร้โหลดเล็กน้อย หากอินเวอร์เตอร์จ่ายโหลดตัวประกอบกำลังล่าช้า (โหลดที่รับกำลังรีแอกทีฟหรือโหลดตัวเหนี่ยวนำ) แรงดันด้านออกจะลดลงจากสภาวะไร้โหลดอย่างมีนัยสำคัญ ในทางตรงกันข้ามหากอินเวอร์เตอร์จ่ายโหลดตัวประกอบกำลังนำหน้า (โหลดที่จ่ายกำลังรีแอกทีฟหรือโหลดตัวเก็บประจุ) แรงดันด้านออกของจะเพิ่มขึ้นจากสภาวะไร้โหลดเล็กน้อย



รูปที่ 2.8 แผนภาพของการควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่มีฟังก์ชันการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์ (ก) บล็อกไดอะแกรม (ข) วงจรสมมูล

ตัวอย่างการรักษาระดับแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์เนื่องจากการจ่ายโหลดประเภทตัวเหนี่ยวนำสามารถทำได้โดยการปรับเพิ่มค่าแรงดันคำสั่งปฐมภูมิ ($v_s \cong v_{pcc}^*$) เพื่อให้แรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ($v_o \cong v_{pcc}^*$) เพิ่มขึ้น ซึ่งหลักการนี้มีลักษณะเช่นเดียวกับการปรับเพิ่มพิกซ์แม่เหล็กจากการเพิ่มกระแสขดลวดสนาม เพื่อเพิ่มแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัส

การออกแบบขนาดของตัวเหนี่ยวนำเสมือนจะพิจารณาจากการรักษาระดับแรงดัน (voltage regulation) ของอินเวอร์เตอร์และความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรีแอกทีฟที่ป้อนเข้าสู่จุดเชื่อมต่อในสมการที่ (2.17)

$$\omega \cdot L_s \approx \frac{\|v_o\| \cdot (\|v_s\| - \|v_o\|)}{Q_o} \quad (2.17)$$

โดยที่ $\|v_s\|$ คือค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำภายในเสมือน $\|v_o\|$ คือแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ ω คือความถี่ของโครงข่ายไฟฟ้า Q_o คือกำลังรีแอกทีฟป้อนเข้าสู่โครงข่าย ขนาดของตัวเหนี่ยวนำเสมือน L_s จะถูก

จำกัดโดยข้อกำหนดการเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้า [2-4, 14] โดยที่การเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันจะต้องอยู่ในช่วง $\pm 10\%$ ของแรงดันปกติ ดังนั้นขนาดของรีแอกแตนซ์จะมีค่าสูงสุดเท่ากับ **0.114 per unit หรือ 11.4%**

ตารางที่ 2.1 สรุปคุณสมบัติของฟังก์ชันการควบคุมอินเวอร์เตอร์และฟังก์ชันการจำลองลักษณะสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสต่อการสนับสนุนเสถียรภาพของโครงข่ายไฟฟ้า

ฟังก์ชันการควบคุม อินเวอร์เตอร์	Frequency regulation		Voltage regulation	
	Steady state	Transient (Dynamic)	Steady state	Transient (Dynamic)
Droop controls	✓	-	✓	-
Emulation of inertia	-	✓	-	-
Emulation of impedance	-	-	✓	✓

บทที่ 3

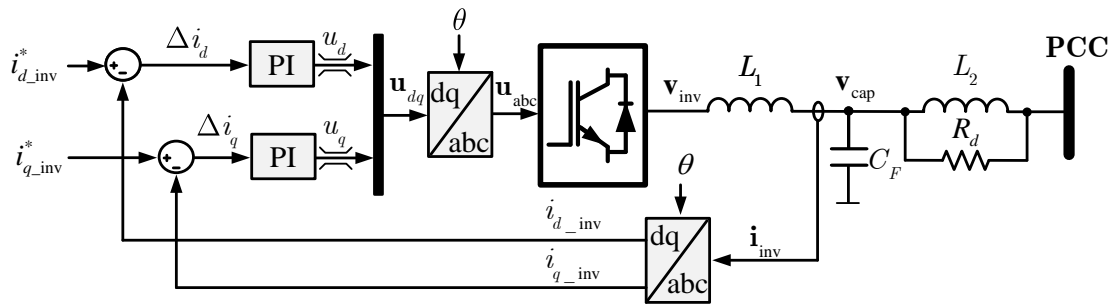
การวิเคราะห์เสถียรภาพและการออกแบบวงรอบควบคุมอินเวอร์เตอร์

ในบทนี้เราจะศึกษาวิเคราะห์เสถียรภาพของวงรอบควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่กล่าวมาในบทที่ 2 เพื่อให้ระบบควบคุมมีเสถียรภาพ รวมถึงศึกษาและวิเคราะห์การออกแบบอัตราขยายของตัวควบคุมพีไอ (PI controller) ของการทำงานของอินเวอร์เตอร์ทั้ง 2 โหมดได้แก่

- 1.) โหมดสนับสนุนโครงข่าย อินเวอร์เตอร์จะอาศัยการควบคุมกำลังจริงผ่านวงรอบควบคุมกระแสในแนวแกน d และควบคุมกำลังรีแอกทีฟผ่านวงรอบควบคุมกระแสในแนวแกน q โดยมีวงรอบควบคุมกำลังอยู่วงรอบนอกและวงรอบควบคุมกระแสอยู่วงรอบใน ฟังก์ชันอินเวอร์เตอร์ที่ทำงานในโหมดนี้ได้แก่ฟังก์ชันการควบคุมรูปและฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกล
- 2.) โหมดสร้างโครงข่ายหรือโหมดไม่เชื่อมต่อโครงข่าย อินเวอร์เตอร์จะอาศัยการควบคุมแรงดันด้านออกผ่านวงรอบควบคุมแรงดันซึ่งอยู่วงรอบนอกและวงรอบควบคุมกระแสซึ่งอยู่วงรอบใน ฟังก์ชันอินเวอร์เตอร์ที่ทำงานในโหมดนี้ได้แก่ฟังก์ชันการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์

3.1. การวิเคราะห์เสถียรภาพและออกแบบวงรอบควบคุมกระแสสำหรับโหมดสนับสนุนโครงข่ายและโหมดไม่เชื่อมต่อโครงข่าย

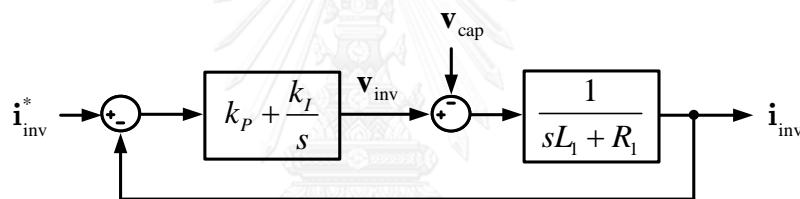
วงรอบควบคุมกระแสสำหรับอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อโครงข่ายจะอยู่วงรอบในสุดและใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่อยู่บนกรอบอ้างอิงซิงโครนัส (synchronous reference frame, dq) ที่หมุนด้วยความถี่ $\omega = 2\pi f$ โดยที่ f คือความถี่ของโครงข่าย รูปที่ 3.1 เราจะตรวจจับกระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 ของวงจรกรองผ่านต่ำ LCL เพื่อเป็นกระแสป้อนกลับที่ใช้ในการควบคุม เราสามารถหาฟังก์ชันโอนย้ายจากแรงดันเฟสตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L_1 ไปยังกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำ i_{mv} ได้จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (3.1) ดังนั้นเราสามารถเขียนบล็อกไดอะแกรมแสดงการควบคุมกระแสทั้งในแนวแกน d และในแนวแกน q ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 แผนภาพวงรอบควบคุมกระแสสำหรับโหมดสนับสนุนโครงข่ายและโหมดไม่เชื่อมต่อกับโครงข่าย

$$T_1(s) = \frac{\mathbf{i}_{inv}(s)}{\mathbf{v}_{inv}(s) - \mathbf{v}_{cap}(s)} = \frac{1}{sL_1 + R_1} \quad (3.1)$$

โดยที่ L_1 และ R_1 คือความเหนี่ยวนำและความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำด้านอินเวอร์เตอร์ L_1 และ $\mathbf{v}_{cap}(s)$ คือแรงดันเฟสคร่อมตัวเก็บประจุในวงจรกรองผ่านต่ำ LCL ซึ่งตรวจจับผ่านวงจรวัดแรงดัน

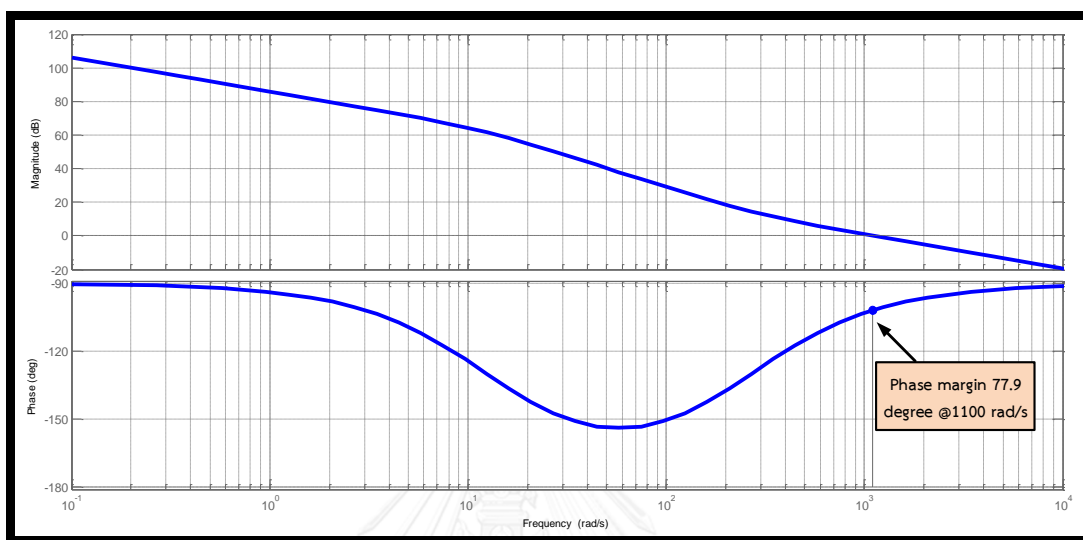


รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรมของวงรอบควบคุมกระแสในแนวแกน d-q

$$G_I(s) = \left(k_p + \frac{k_I}{s} \right) \cdot \left(\frac{1}{sL_1 + R_1} \right) \quad (3.2)$$

สมการที่ (3.2) แสดงฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดของระบบควบคุมกระแส เงื่อนไขสำหรับการออกแบบอัตราขยายของตัวควบคุม PI ได้แก่ 1.) เลือกความถี่ตัดข้าม ω_0 (crossover frequency) ของฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดและ 2.) ความถี่หักมุม (corner frequency) ของตัวควบคุม PI $\omega_{cn} = k_I / k_p$ จะต้องน้อยกว่าความถี่ตัดข้าม การพิจารณาเลือกความถี่ตัดข้ามจะพิจารณาจากผลตอบสนองของกระแสเป็นสำคัญ ในงานวิจัยนี้เราต้องการให้วงรอบควบคุมกระแสมีผลตอบสนองที่ไวเพราะเป็นวงรอบในโดยเลือกให้มีช่วงเวลาขาขึ้น (rise time, t_r) ประมาณ 2 มิลลิวินาทีที่ต้องการให้กระแสเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวภายในครึ่งรูปคลื่นของความถี่การไฟฟ้า จากความสัมพันธ์ของ $\omega_0 \approx 2.2 / t_r$ เราสามารถคำนวณความถี่ตัดข้ามได้เท่ากับ 1100 rad/s สำหรับการเลือกความถี่หักมุมของตัวควบคุม PI จะพิจารณาจากเสถียรภาพของระบบเป็นหลักโดยที่ระบบจะต้องมีส่วนเฟส (phase margin) ที่เพียงพอ สำหรับงานวิจัยนี้เราเลือกใช้ $\omega_{cn} = 250 \text{ rad/s}$ และพารามิเตอร์

$L_1 = 0.005\text{H}, R_1 = 0.067\Omega$ เมื่อแทนค่าดังกล่าวลงในสมการที่ (3.2) เราจะได้อัตราขยายของตัวควบคุม PI ทั้งในแกน d และแกน q เท่ากับ $k_p = 5.35 \text{ (V/A)}$, $k_I = 1337.5 \text{ (V/As)}$ เมื่อพล็อตแผนภาพโบเดของฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดแสดงได้ดังรูปที่ 3.3 พบว่ามีความถี่ตัดข้ามที่ 1100 rad/s มีส่วนเฟส 77.9 องศาซึ่งเพียงพอต่อเสถียรภาพของวงรอบควบคุม



รูปที่ 3.3 แผนภาพโบเดของฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดของวงรอบควบคุมกระแสที่ใช้ในงานวิจัย

ผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองในรูปที่ 3.4 ถึงรูปที่ 3.13 แสดงผลตอบสนองสถานะชั่วครู่และสถานะอยู่ตัวของวงรอบควบคุมกระแสใน 2 โหมดที่สำคัญได้แก่ 1.) การเปลี่ยนแปลงค่ากระแสคำสั่งแบบขั้นบันไดและ 2.) การเปลี่ยนแปลงค่ากระแสคำสั่งแบบแรมป์ตลอดย่านเมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดสนับสนุนโครงข่ายที่แรงดันระหว่างสายของโครงข่ายมีค่า 380 V โดยที่ใช้ค่าอัตราขยายของตัวควบคุม PI ที่ได้ทำการออกแบบไว้ข้างต้น โดยมีเงื่อนไขการทดสอบโดยสรุปดังแสดงในตารางที่ 3.1

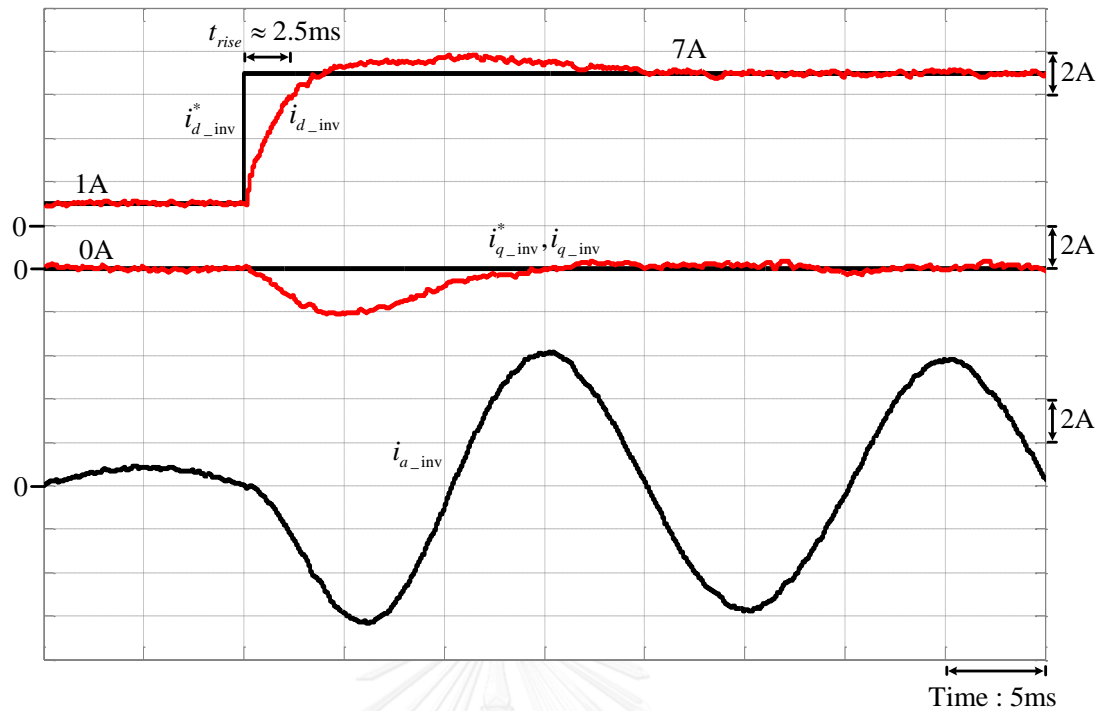
รูปที่ 3.4 ถึงรูปที่ 3.9 เป็นผลการจำลองการทำงานเปรียบเทียบกับผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนค่ากระแสคำสั่งในแนวแกน d และในแนวแกน q แบบขั้นบันไดตามเงื่อนไขในตารางที่ 3.1 พบว่าวงรอบควบคุมกระแสสามารถควบคุมกระแสทั้งในแนวแกน d และในแนวแกน q ตามค่าคำสั่งได้อย่างถูกต้อง อีกทั้งยังสามารถควบคุมกระแสในแนวแกน d และในแนวแกน q ในสถานะอยู่ตัวได้อย่างอิสระต่อกัน จะเห็นได้ว่าช่วงเวลาตอบสนองของผลการจำลองการทำงานมีช่วงเวลาขาขึ้นประมาณ 2.5 ms ส่วนช่วงเวลาตอบสนองของผลการทดลองมีช่วงเวลาขาขึ้นประมาณ 4-6 ms ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ได้ทำการออกแบบไว้ในข้างต้น อีกทั้งผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองของวงรอบควบคุมกระแสสามารถควบคุมรูปคลื่นกระแสเฟส a ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 ให้มีความใกล้เคียงสัญญาณไซน์ได้อย่างน่าพึงพอใจ เมื่อระบบเข้าสู่สถานะอยู่ตัวแล้วอินเวอร์เตอร์สามารถ

ควบคุมกระแสโดยมีค่าความผิดพลาดใกล้เคียงศูนย์และมีค่าระลอกอยู่ในช่วง $0 - 0.25$ A ($0 - 3.16\%$) ของพิกัดกระแสในแกน dq) ซึ่งยืนยันถึงเสถียรภาพของวงรอบควบคุมกระแสที่ได้ออกแบบไว้

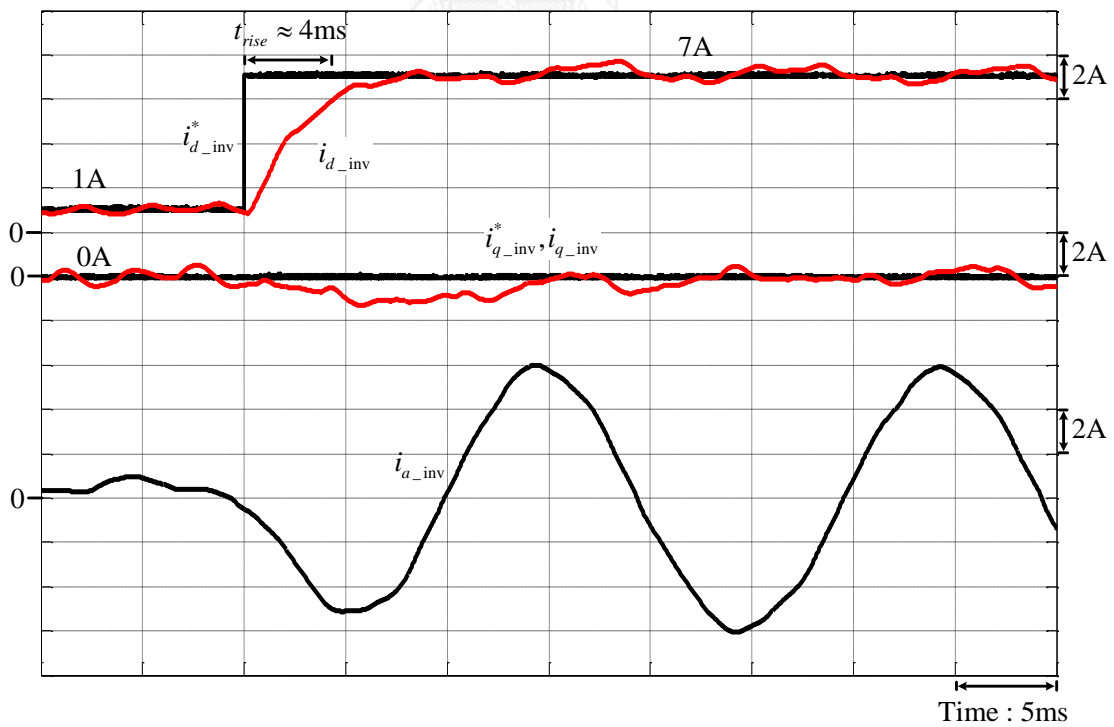
รูปที่ 3.10 ถึงรูปที่ 3.13 เป็นผลการจำลองการทำงานเปรียบเทียบกับผลการทดลองเมื่อมีการแปรเปลี่ยนค่ากระแสคำสั่งในแนวแกน d และในแนวแกน q แบบแรมป์ตลอดย่านภายในเวลา 2 วินาทีตามเงื่อนไขในตารางที่ 3.1 ค่ากระแสในแกน q ที่มีค่าทั้งบวกและลบแสดงถึงอินเวอร์เตอร์สามารถรับและจ่ายกำลังรีแอกทีฟได้ จะเห็นได้ว่าวงรอบควบคุมกระแสสามารถควบคุมกระแสทั้งในแนวแกน d และในแนวแกน q ตามค่าคำสั่งแบบแรมป์ตลอดย่านได้อย่างถูกต้อง อีกทั้งยังสามารถควบคุมกระแสในแนวแกน d และในแนวแกน q ในสภาวะอยู่ตัวได้อย่างอิสระต่อกัน โดยมีค่าความผิดพลาดตลอดย่านใกล้เคียงศูนย์และมีค่าระลอกอยู่ในช่วง $0 - 0.25$ A ($0 - 3.16\%$) ของพิกัดกระแสในแกน dq) ซึ่งสามารถยืนยันได้ถึงเสถียรภาพตลอดย่านของทุกค่ากระแสคำสั่งของวงรอบควบคุมกระแสทั้งในแนวแกน d และในแนวแกน q ที่ได้ออกแบบไว้ข้างต้น

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการทดสอบการทำงานสำหรับวงรอบควบคุมกระแสเมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดสนับสนุนโครงข่ายและโหมดไม่เชื่อมต่อโครงข่าย

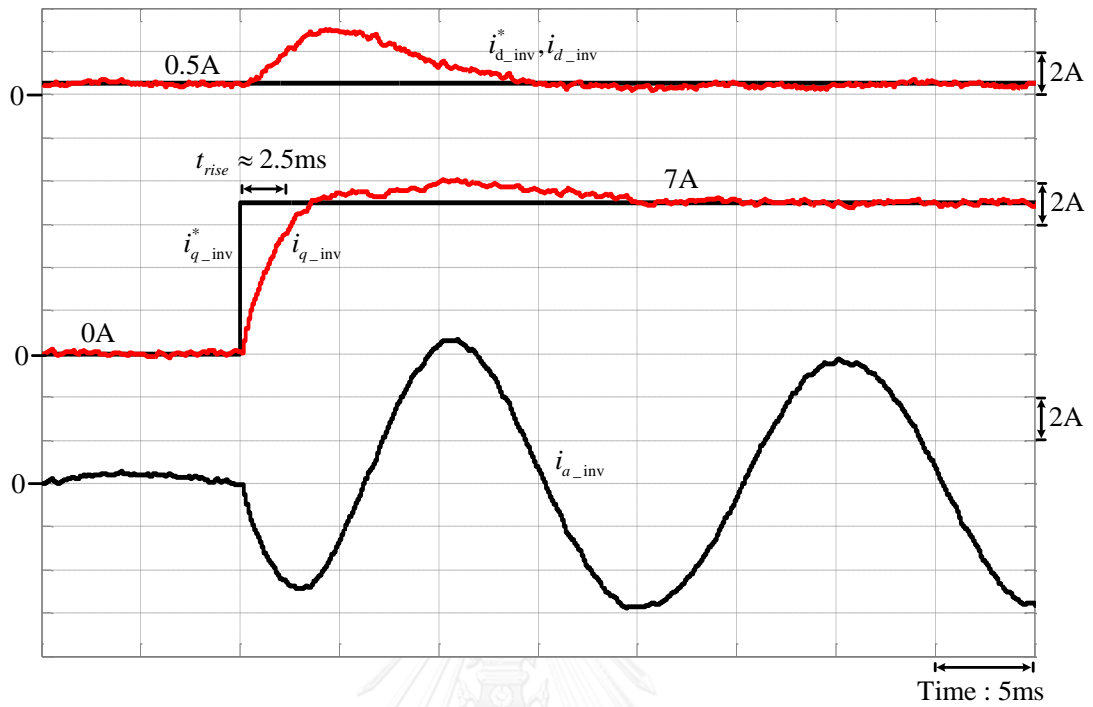
โหมดการทดสอบ	ตัวแปร	Initial current (A)	Final current (A)	ผลการจำลอง	ผลการทดลอง
Step i_d^* (+)	i_d^*	1	7	รูปที่ 3.4	รูปที่ 3.5
	i_q^*	0	0		
Step i_q^* (+)	i_d^*	0.5	0.5	รูปที่ 3.6	รูปที่ 3.7
	i_q^*	0	7		
Step i_q^* (-)	i_d^*	0.5	0.5	รูปที่ 3.8	รูปที่ 3.9
	i_q^*	0	-7		
Ramp i_d^* (2 sec.)	i_d^*	1	7	รูปที่ 3.10	รูปที่ 3.11
	i_q^*	0	0		
Ramp i_q^* (2 sec.)	i_d^*	0.5	0.5	รูปที่ 3.12	รูปที่ 3.13
	i_q^*	-7	7		
หมายเหตุ 0.5 A หมายถึง 6% ของพิกัดกระแสในแกน dq 7 A หมายถึง 88% ของพิกัดกระแสในแกน dq					



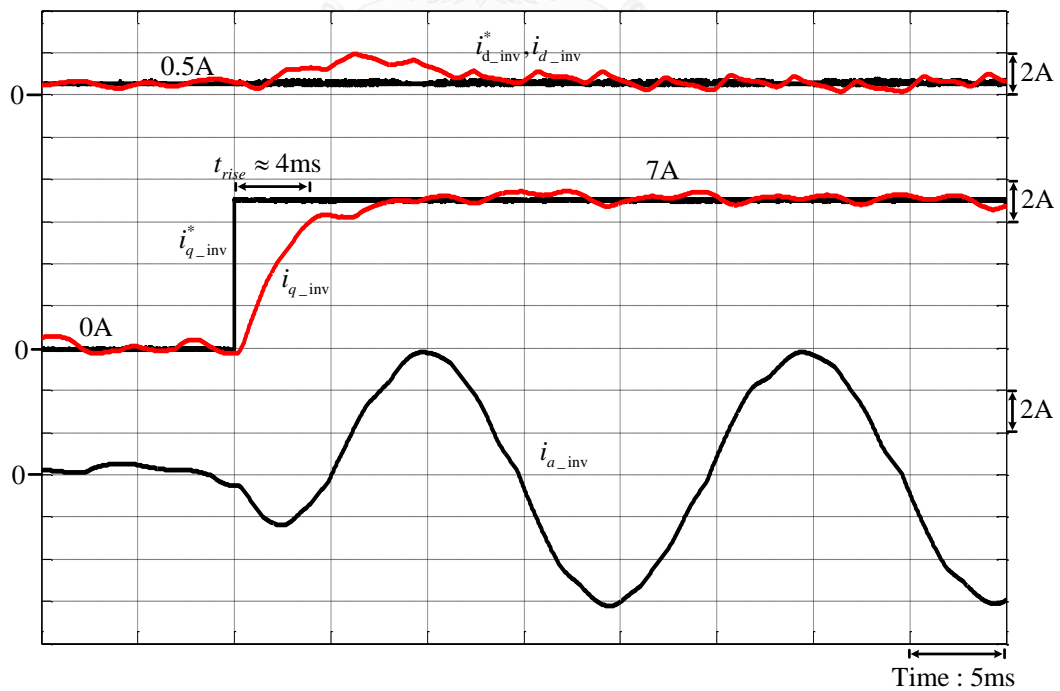
รูปที่ 3.4 ผลการจำลองการทำงานแสดงผลตอบสนองของการเปลี่ยนค่ากระแสคำสั่งในแนวแกน d แบบขั้นบันไดจาก 1A -> 7A



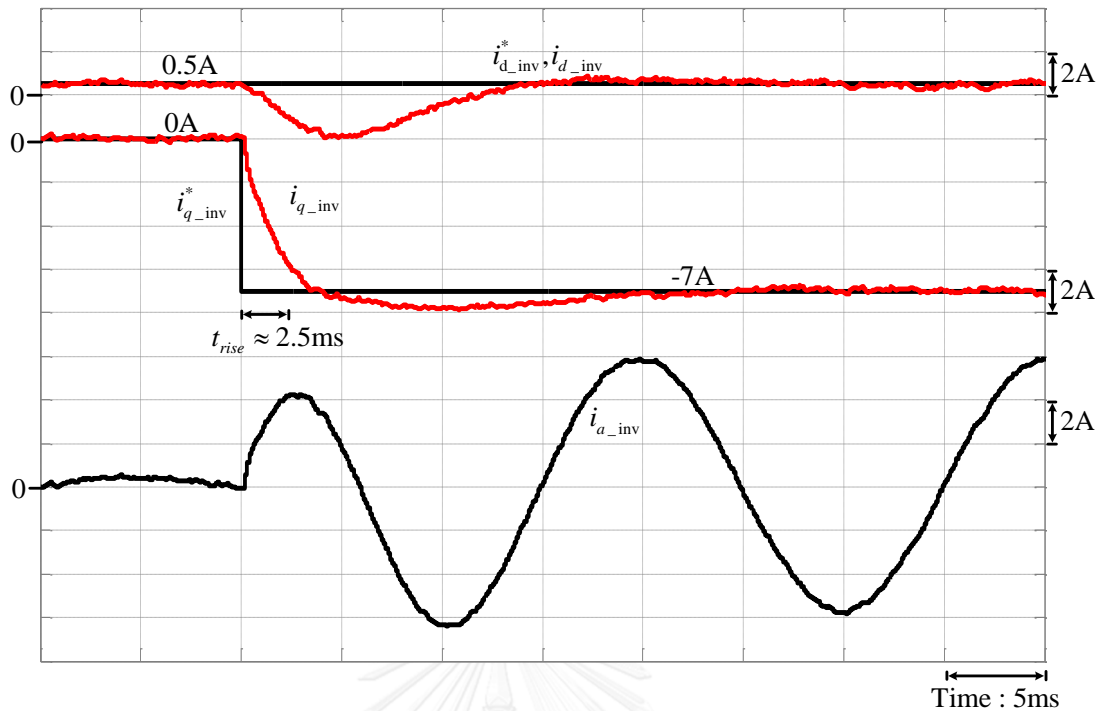
รูปที่ 3.5 ผลการทดลองแสดงผลตอบสนองของการเปลี่ยนค่ากระแสคำสั่งในแนวแกน d แบบขั้นบันไดจาก 1A -> 7A



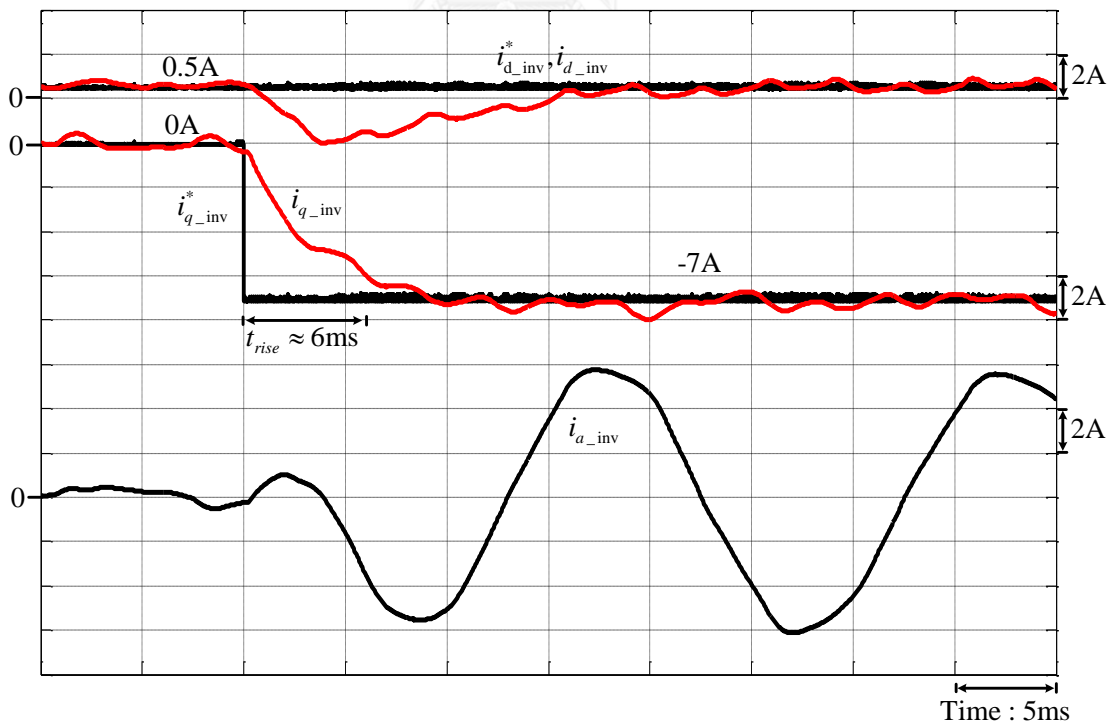
รูปที่ 3.6 ผลการจำลองการทำงานแสดงผลตอบสนองของการเปลี่ยนค่ากระแสคำสั่งในแนวแกน q แบบขั้นบันไดจาก 0A \rightarrow 7A



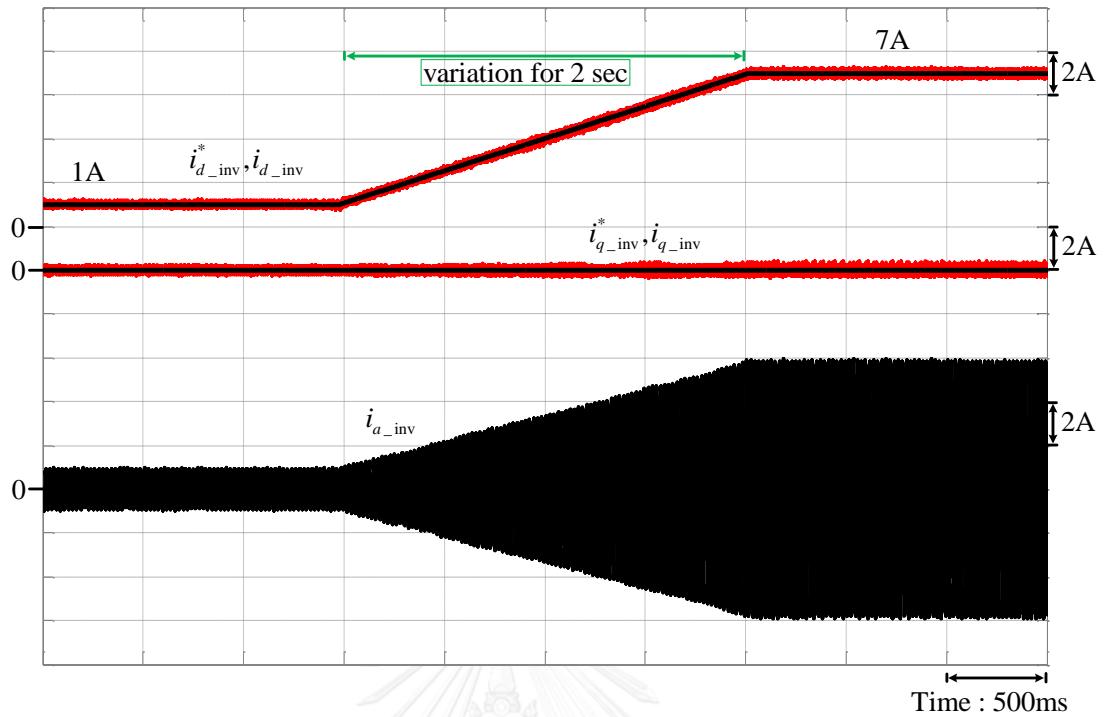
รูปที่ 3.7 ผลการทดลองแสดงผลตอบสนองของการเปลี่ยนค่ากระแสคำสั่งในแนวแกน q แบบขั้นบันไดจาก 0A \rightarrow 7A



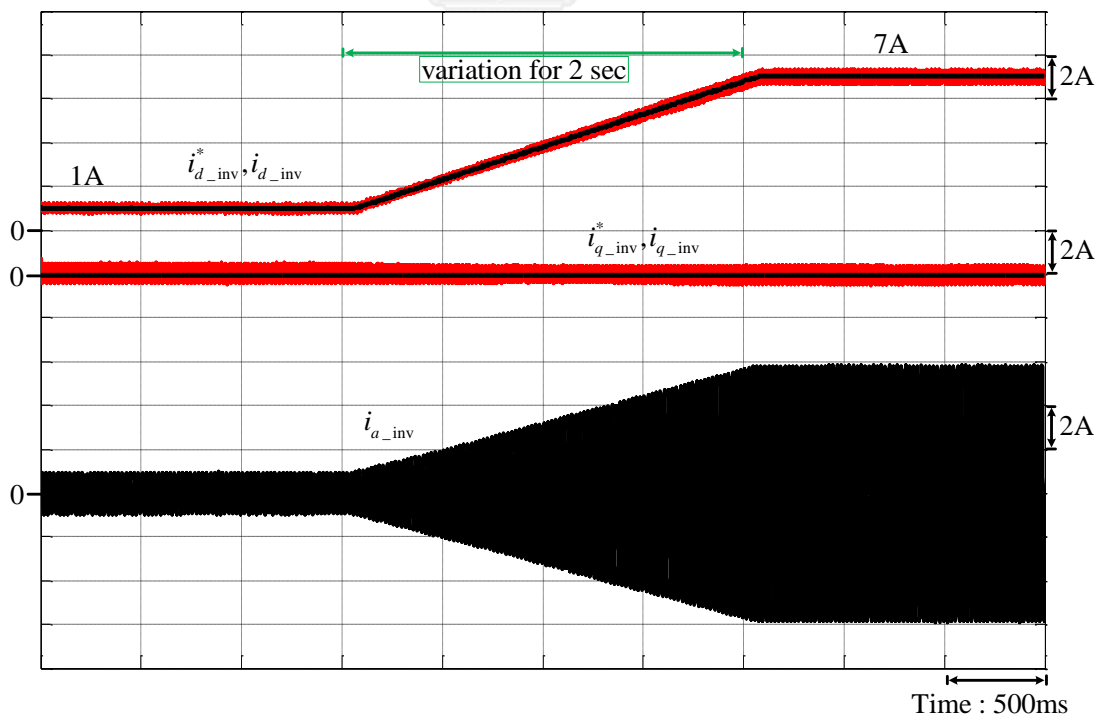
รูปที่ 3.8 ผลการจำลองการทำงานแสดงผลตอบสนองของการเปลี่ยนค่ากระแสคำสั่งในแนวแกน q แบบขั้นบันไดจาก 0A -> -7A



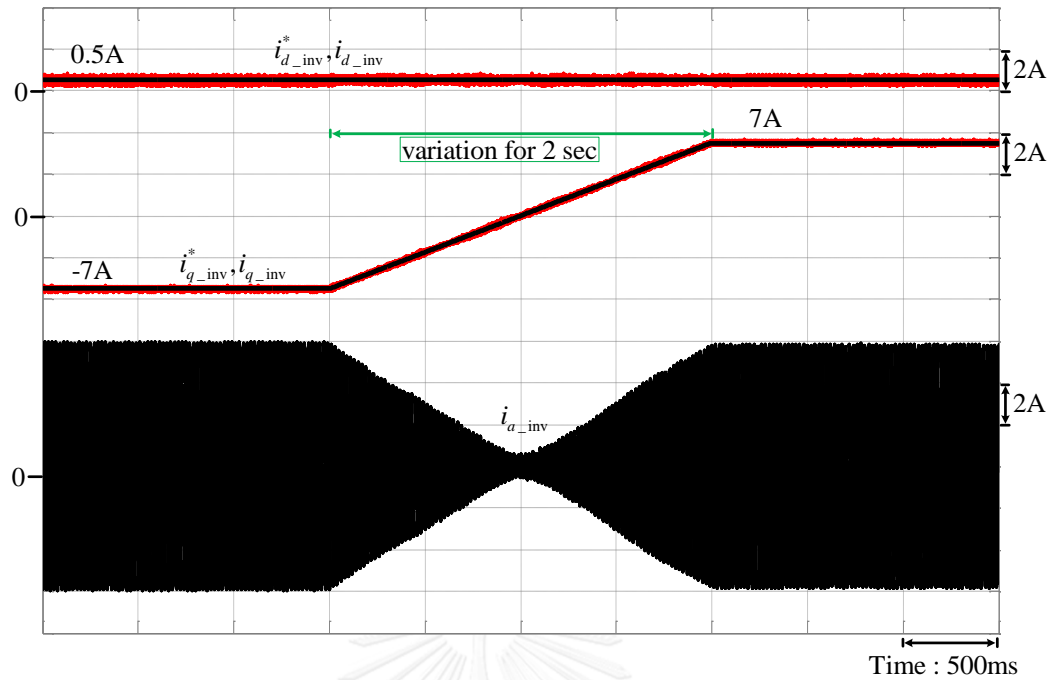
รูปที่ 3.9 ผลการทดลองแสดงผลตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสคำสั่งในแนวแกน q แบบขั้นบันไดจาก 0A -> -7A



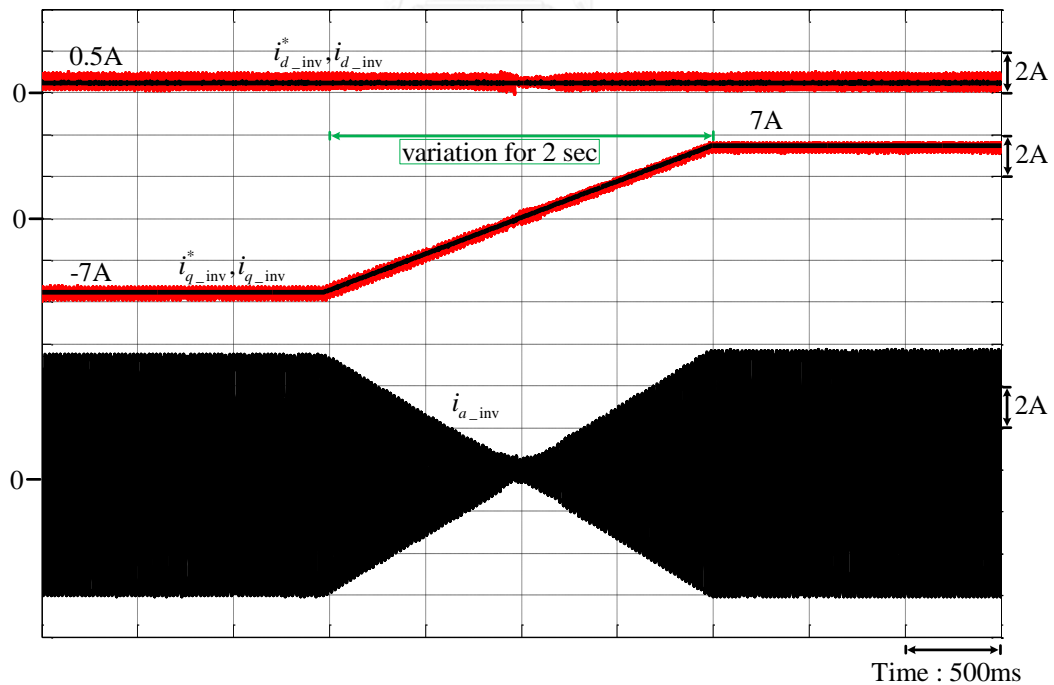
รูปที่ 3.10 ผลการจำลองการทำงานแสดงผลตอบสนองของการเปลี่ยนค่ากระแสคำสั่งในแนวแกน d แบบแรมป์จาก 1A -> 7A



รูปที่ 3.11 ผลการทดลองแสดงผลตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสคำสั่งในแนวแกน d แบบแรมป์จาก 1A -> 7A



รูปที่ 3.12 ผลการจำลองการทำงานแสดงผลตอบสนองของการเปลี่ยนค่ากระแสคำสั่งในแกน q แบบแรมป์จาก -7A -> 7A



รูปที่ 3.13 ผลการทดลองแสดงผลตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสคำสั่งในแกน q แบบแรมป์จาก -7A -> 7A

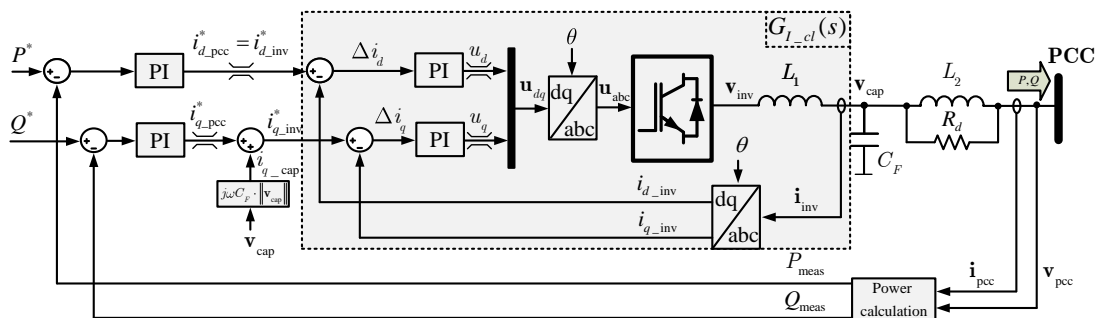
3.2. การวิเคราะห์เสถียรภาพและออกแบบวงรอบควบคุมกำลังสำหรับโหมดสลับสนุน โครงข่าย

วงรอบควบคุมกำลังสำหรับอินเวอร์เตอร์ที่ทำงานในโหมดสลับสนุนโครงข่ายจะอยู่วงรอบนอกโดยที่มีวงรอบควบคุมกระแสอยู่วงรอบในซึ่งมีลักษณะเรียงต่อกันเป็นทอด (cascade) สำหรับฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบปิด (closed loop transfer function) ของการควบคุมกระแส $G_{I-cl}(s)$ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.3)

$$G_{I-cl}(s) = \frac{\mathbf{i}_{inv}(s)}{\mathbf{i}_{inv}^*(s)} = \frac{\left(k_p + \frac{k_I}{s}\right) \cdot \left(\frac{1}{sL_1 + R_1}\right)}{1 + \left(k_p + \frac{k_I}{s}\right) \cdot \left(\frac{1}{sL_1 + R_1}\right)} \quad (3.3)$$

$$\begin{bmatrix} P_{meas} \\ Q_{meas} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{pcc-d} \\ i_{pcc-q} \end{bmatrix} \cdot \|\mathbf{v}_{pcc}\| \quad (3.4)$$

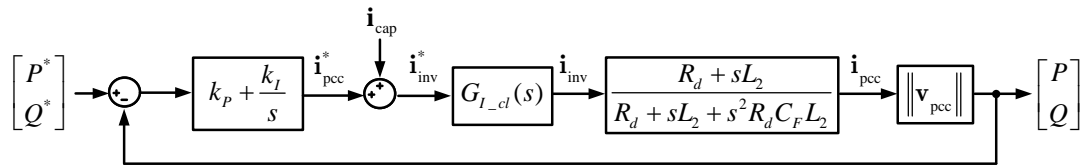
รูปที่ 3.14 เราจะอาศัยการตรวจจับแรงดันและกระแสที่ไหลเข้าที่จุดเชื่อมต่อเพื่อคำนวณกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่ไหลเข้าที่จุดเชื่อมต่อตามสมการที่ (3.4) และใช้เป็นค่าป้อนกลับของการควบคุมกำลัง อินเวอร์เตอร์จะควบคุมกำลังจริงผ่านวงรอบควบคุมกระแสในแนวแกน d และควบคุมกำลังรีแอกทีฟผ่านวงรอบควบคุมกระแสในแนวแกน q เราสามารถเขียนฟังก์ชันโอนย้าย $T_2(s)$ คือฟังก์ชันโอนย้ายจากกระแส \mathbf{i}_{inv} ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 ไปยังกระแส \mathbf{i}_{pcc} ที่ไหลเข้าจุดเชื่อมต่อได้จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (3.5) และเราสามารถเขียนบล็อกไดอะแกรมแสดงการควบคุมกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟได้ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.14 แผนภาพวงรอบควบคุมกำลังสำหรับโหมดสลับสนุนโครงข่าย

$$T_2(s) = \frac{\mathbf{i}_{pcc}(s)}{\mathbf{i}_{inv}(s)} = \frac{R_d + sL_2}{R_d + sL_2 + s^2 R_d C_F L_2} \quad (3.5)$$

โดยที่ L_2 คือความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำด้านเชื่อมต่อโครงข่าย C_F คือค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุในวงจรกรอง LCL R_d คือตัวต้านทานหน่วง (damping resistors) ของวงจรกรอง LCL ในที่นี้จะต่อขนานกับตัวเหนี่ยวนำ L_2 เพื่อป้องกันการเกิดเรโซแนนซ์ระหว่าง L_2 และ C_F



รูปที่ 3.15 บล็อกไดอะแกรมแสดงวงรอบควบคุมกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟ

$$\left. \begin{aligned} G_P(s) &= \frac{P}{P^*} = \left(k_p + \frac{k_I}{s} \right) \cdot G_{I-cl-d}(s) \cdot \left(\frac{R_d + sL_2}{R_d + sL_2 + s^2 R_d C_F L_2} \right) \cdot \left\| \mathbf{v}_{pcc} \right\| \\ G_Q(s) &= \frac{Q}{Q^*} = \left(k_p + \frac{k_I}{s} \right) \cdot G_{I-cl-q}(s) \cdot \left(\frac{R_d + sL_2}{R_d + sL_2 + s^2 R_d C_F L_2} \right) \cdot \left\| \mathbf{v}_{pcc} \right\| \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

สมการที่ (3.6) แสดงฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดของการควบคุมกำลังไหลเข้าที่จุดเชื่อมต่อ การออกแบบอัตราขยายของตัวควบคุม PI ของวงรอบควบคุมกำลังจะใช้เงื่อนไขเช่นเดียวกับการออกแบบวงรอบควบคุมกระแส การพิจารณาเลือกความถี่ตัดข้ามจะพิจารณาจากผลตอบสนองของการจ่ายกำลังเข้าที่จุดเชื่อมต่อเป็นสำคัญซึ่งมีปัจจัยในการเลือกโดยสรุปดังนี้

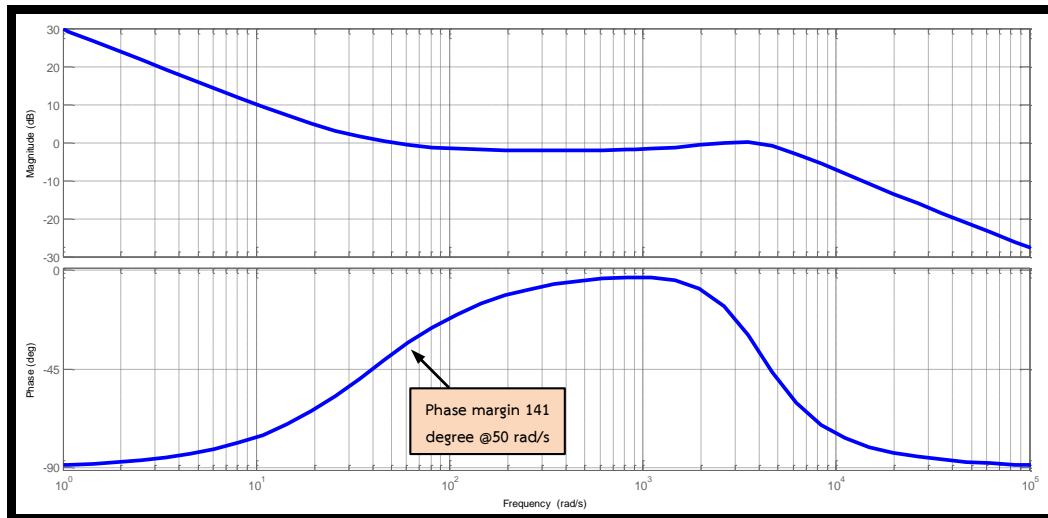
- 1.) ระบบควบคุมกำลังจะต้องมีผลตอบสนองที่เร็วกว่าข้อกำหนดการเชื่อมต่อโครงข่าย [15] กำหนดไว้ ซึ่งผลตอบสนองของฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลควรมีค่าไม่เกิน 50 มิลลิวินาทีโดยที่จะต้องตอบสนองการเพิ่ม/ลดการจ่ายกำลังจริงได้อย่างน้อย 5% ของ $\Delta P_{inertia}$ ในที่นี้จะออกแบบวงรอบควบคุมกำลังให้สามารถเพิ่ม/ลดการจ่ายกำลังจริง 100% ภายใน 200 มิลลิวินาที
- 2.) การควบคุมรูปของกำลังจริงกับความถี่จะต้องช่วยโครงข่ายไฟฟ้าสนับสนุนเสถียรภาพของความถี่ของโครงข่ายให้อยู่ในกรอบ ($50 \pm 0.5 \text{ Hz}$) [2-4, 14] โดยจะต้องมีผลตอบสนองที่ไวกว่าการปลดวงจรของ time over/under frequency relay หากความถี่อยู่นอกช่วงดังกล่าว ซึ่งโดยปกติรีเลย์จะถูกตั้งค่าเวลาดัตดวงจรไว้ที่ 0.16 วินาทีและจากสถิติการเปลี่ยนแปลงความถี่ในประเทศไอร์แลนด์ในงานวิจัย [16] พบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของความถี่จะมีค่าไม่เกิน 0.4 Hz/s ดังนั้นกรณีเลวร้ายที่สุดที่ความถี่ของโครงข่ายจะเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 0.5 Hz จะต้องใช้เวลาดำเนินการอย่างน้อย 1.25 วินาที ดังนั้นอินเวอร์เตอร์จะต้องสามารถเพิ่ม/ลดการจ่ายกำลังจริงให้ได้เร็วกว่า $1.25 + 0.16 = 1.41$ วินาที

- 3.) เพื่อให้โครงข่ายไฟฟ้ามีความน่าเชื่อถือและอินเวอร์เตอร์มีส่วนช่วยในการรักษาเสถียรภาพแรงดันที่จุดเชื่อมต่อให้อยู่ในกรอบ $90\% \leq V < 110\%$ อินเวอร์เตอร์จะต้องเพิ่ม/ลดการจ่ายกำลังรีแอกทีฟของการควบคุมรูปได้โดยไม่ปลดวงจรออกเนื่องจากกรณีแรงดันของโครงข่ายไฟฟ้าเกิดความผิดปกติครั้งใหญ่จะเกิดในช่วงเวลาสั้นๆไม่เกิน 200 มิลลิวินาที [3]

ในวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกออกแบบให้วงรอบควบคุมกำลังมีช่วงเวลาเข้าที่ (settling time, t_s) ประมาณไม่เกิน 200 มิลลิวินาทีโดยเลือกความถี่ตัดข้ามของวงรอบควบคุมกำลังเท่ากับ 50 rad/s ซึ่งถือว่ามัลติโพลที่เพียงพอ เนื่องจากวงรอบควบคุมกระแสมีแบนด์วิดท์สูงมากเมื่อเทียบกับวงรอบควบคุมกำลัง เราจึงสามารถประมาณฟังก์ชันวงรอบปิดของการควบคุมกระแส $G_{I_{cl}}(s)$ เท่ากับ 1 และสามารถเขียนฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดของวงรอบควบคุมกำลังจากสมการที่ (3.6) ได้ใหม่ดังแสดงในสมการที่ (3.7)

$$\left. \begin{aligned} G_P(s) &\approx \frac{P}{P^*} \approx \left(k_p + \frac{k_I}{s} \right) \cdot \left(\frac{R_d + sL_2}{R_d + sL_2 + s^2 R_d C_F L_2} \right) \cdot \left\| \mathbf{v}_{pcc} \right\| \\ G_Q(s) &\approx \frac{Q}{Q^*} \approx \left(k_p + \frac{k_I}{s} \right) \cdot \left(\frac{R_d + sL_2}{R_d + sL_2 + s^2 R_d C_F L_2} \right) \cdot \left\| \mathbf{v}_{pcc} \right\| \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

สำหรับการเลือกความถี่หักมุมของตัวควบคุม PI จะพิจารณาจากเสถียรภาพของระบบเป็นหลักโดยที่ระบบจะต้องมีส่วนเฟส (phase margin) ที่เพียงพอโดยที่ความถี่หักมุมของตัวควบคุม PI จะต้องน้อยกว่าความถี่ตัดข้าม ในงานวิจัยนี้จึงเลือกความถี่หักมุม $\omega_{cn} = k_I / k_p = 40 \text{ rad/s}$ และค่าพารามิเตอร์ $L_2 = 0.005 \text{ H}$, $R_d = 15 \Omega$, $C_F = 12.5 \times 10^{-6} \text{ F}$, $\left\| \mathbf{v}_{pcc} \right\| = 380 \text{ V}$ ตามลำดับ เมื่อแทนค่าดังกล่าวลงในสมการที่ (3.7) เราจะได้อัตราขยายของตัวควบคุม PI สำหรับวงรอบควบคุมกำลังเท่ากับ $k_p = 0.00204 \text{ (A/W)}$, $k_I = 0.0816 \text{ (A/Ws)}$ เมื่อพล็อตแผนภาพโพลเดของฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดของสมการที่ (3.7) จะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.16 จะเห็นได้ว่าวงรอบเปิดมีความถี่ตัดข้ามที่ 50 rad/s และมีส่วนเฟส 141 องศาซึ่งเพียงพอต่อเสถียรภาพของวงรอบควบคุมกำลัง



รูปที่ 3.16 แผนภาพโบเดของฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดของวงรอบควบคุมกำลัง

ผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองในรูปที่ 3.17 ถึงรูปที่ 3.26 แสดงถึงผลตอบสนองสถานะชั่วครู่และสถานะอยู่ตัวของวงรอบควบคุมกำลังด้านออกของอินเวอร์เตอร์ใน 2 โหมดที่สำคัญ ได้แก่ 1.) การเปลี่ยนแปลงค่าคำสั่งกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟแบบขั้นบันได 2.) การเปลี่ยนแปลงค่าคำสั่งกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟแบบแรมปีตตลอดย่านจนถึงค่าพิกัด เมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดสนับสนุนโครงข่ายที่แรงดันระหว่างสายของโครงข่ายมีค่า 380 V โดยที่ใช้ค่าอัตราขยายของตัวควบคุม PI ที่ได้ทำการออกแบบไว้ข้างต้น โดยมีเงื่อนไขการทดสอบโดยสรุปแสดงได้ดังตารางที่ 3.2

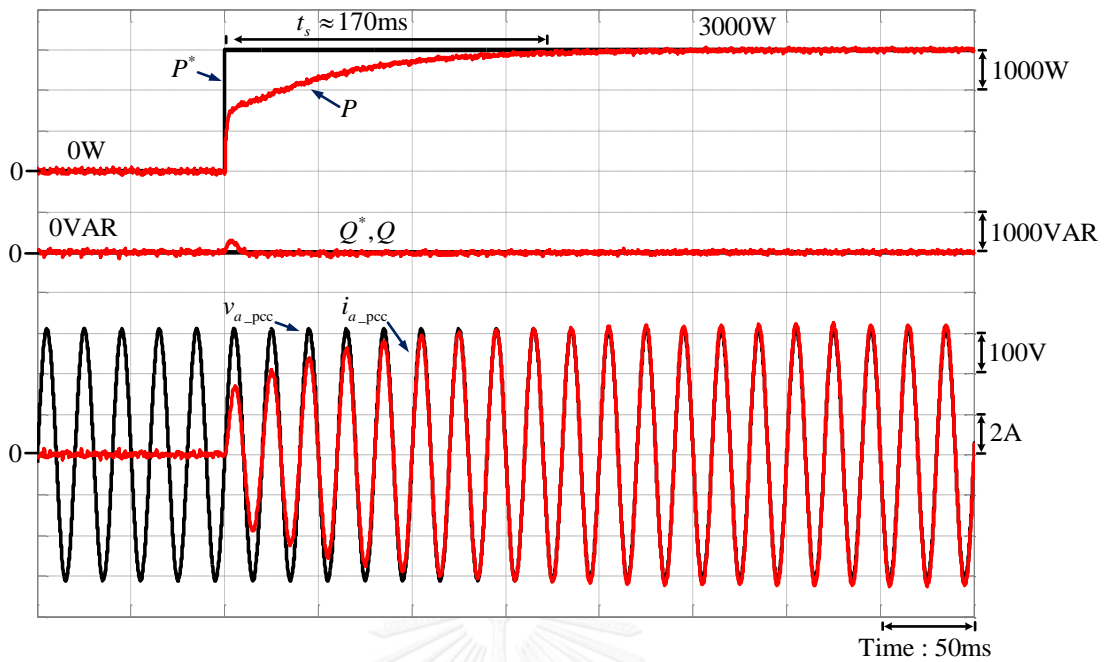
รูปที่ 3.17 ถึงรูปที่ 3.22 เป็นผลการจำลองการทำงานเปรียบเทียบกับผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนค่าคำสั่งกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟแบบขั้นบันไดตามเงื่อนไขในตารางที่ 3.2 พบว่าวงรอบควบคุมกำลังสามารถควบคุมทั้งกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟตามค่าคำสั่งได้อย่างถูกต้อง อีกทั้งยังสามารถควบคุมกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟในสถานะอยู่ตัวในสถานะอยู่ตัวได้อย่างอิสระต่อกัน จะเห็นได้ว่าค่ากำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟของผลการจำลองและผลการทดลองที่ตรวจวัดได้มีช่วงเวลาตอบสนองมีค่าใกล้เคียงกันและมีช่วงเวลาเข้าที่ (settling time, t_s) ประมาณ 170 ms ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ออกแบบไว้ข้างต้น (ไม่เกิน 200 ms) ผลของการทำงานของวงรอบควบคุมกำลังจริงที่อยู่วงรอบนอกและวงรอบควบคุมกระแสที่อยู่วงรอบในสามารถควบคุมให้รูปคลื่นของกระแสเฟส a ไหลเข้าที่จุดเชื่อมต่อมีความใกล้เคียงสัญญาณไซน์อย่างน่าพึงพอใจ เมื่อระบบเข้าสู่สถานะอยู่ตัวแล้ว อินเวอร์เตอร์สามารถควบคุมกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟโดยมีค่าความผิดพลาดใกล้เคียงศูนย์และมีค่าระลอกอยู่ในช่วง 0 – 100 W,VAR (0 – 3.3% ของพิกัดกำลังของอินเวอร์เตอร์) ซึ่งสามารถยืนยันได้ถึงสมรรถนะของวงรอบควบคุมกำลังที่ได้ออกแบบไว้ ค่าคำสั่งกำลังจริงของอินเวอร์เตอร์ที่นำเสนอจะมีเครื่องหมายเป็นบวกเท่านั้นซึ่งแสดงถึงอินเวอร์เตอร์จ่ายกำลังจริงเข้าที่จุดเชื่อมต่อ ส่วนค่าคำสั่งกำลังรีแอกทีฟของอินเวอร์เตอร์จะมีเครื่องหมายได้ทั้งบวกและลบ โดยที่ กำลังรีแอกทีฟที่มี

เครื่องหมายเป็นบวกจะแสดงถึงกระแสเฟสจะมีเฟสล่าหลัง (lagging) แรงดันเฟสหรืออินเวอร์เตอร์กำลังทำงานอยู่ย่านตัวเหนี่ยวนำ (inductive) และกำลังรีแอกทีฟที่มีเครื่องหมายเป็นลบจะแสดงถึงกระแสเฟสจะมีเฟสนำหน้า (leading) แรงดันเฟสหรืออินเวอร์เตอร์กำลังทำงานอยู่ย่านตัวเก็บประจุ (capacitive)

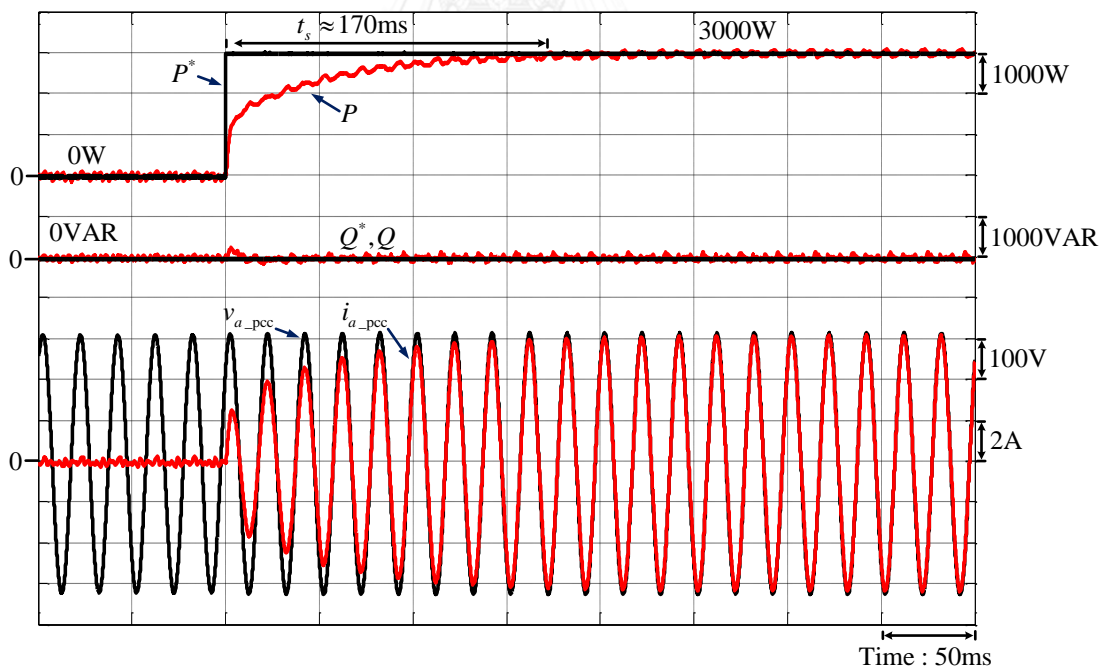
รูปที่ 3.23 ถึงรูปที่ 3.26 เป็นผลการจำลองการทำงานเปรียบเทียบกับผลการทดลองเมื่อมีการแปรเปลี่ยนค่าคำสั่งกำลังทั้งกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟแบบแรมป์ตลอดย่านภายในเวลา 10 วินาที ซึ่งแสดงถึงการทำงานที่สภาวะเกือบอยู่ตัวตลอดย่านที่ครอบคลุมพิกัดกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟ ตามเงื่อนไขในตารางที่ 3.2 พบว่าวงรอบควบคุมกำลังสามารถควบคุมกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟตามค่าคำสั่งแบบแรมป์ตลอดย่านได้อย่างถูกต้อง อีกทั้งยังสามารถควบคุมกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟในสภาวะอยู่ตัวได้อย่างอิสระต่อกัน โดยมีค่าความผิดพลาดตลอดย่านใกล้เคียงศูนย์และมีค่าระลอกอยู่ในช่วง 0 – 100 W,VAR (0 – 3.3% ของพิกัดกำลังของอินเวอร์เตอร์) ซึ่งสามารถยืนยันได้ถึงสมรรถนะของการควบคุมกำลังตลอดทุกค่าคำสั่งกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟ

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขการทดสอบการทำงานสำหรับวงรอบควบคุมกำลังเมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดสนับสนุนโครงข่าย

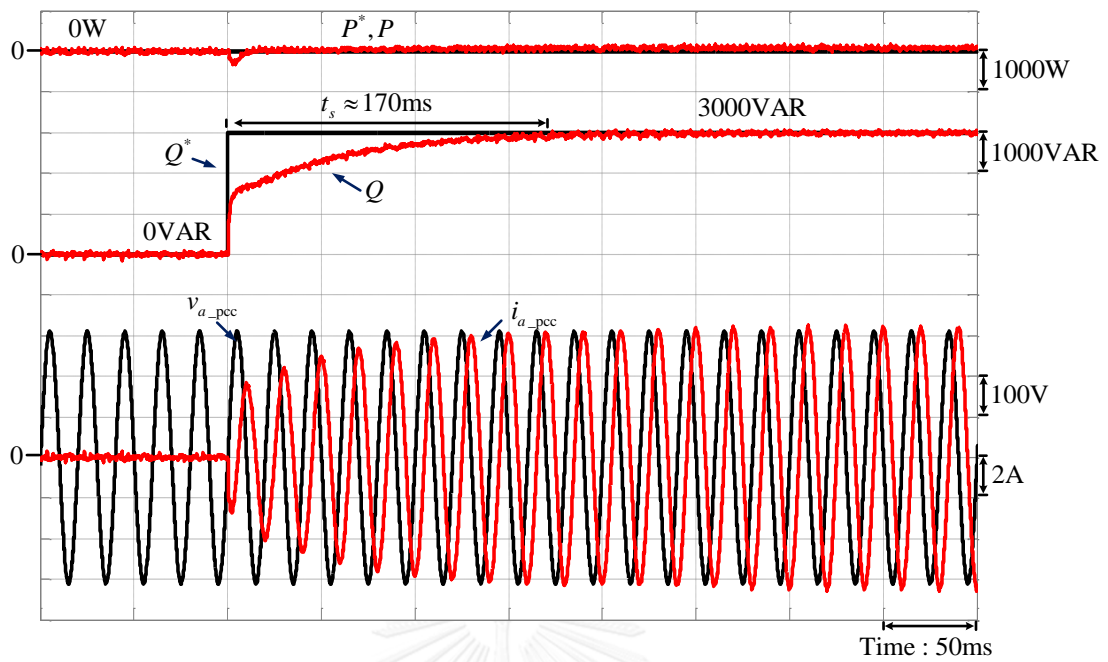
โหมดการทดสอบ	ตัวแปร	Initial Power (W,VAR)	Final Power (W,VAR)	ผลการจำลอง	ผลการทดลอง
Step P^* (+)	P^*	0	3000	รูปที่ 3.17	รูปที่ 3.18
	Q^*	0	0		
Step Q^* (+)	P^*	0	0	รูปที่ 3.19	รูปที่ 3.20
	Q^*	0	3000		
Step Q^* (-)	P^*	0	0	รูปที่ 3.21	รูปที่ 3.22
	Q^*	0	-3000		
Ramp P^* (10 sec.)	P^*	0	3000	รูปที่ 3.23	รูปที่ 3.24
	Q^*	0	0		
Ramp Q^* (10 sec.)	P^*	0	0	รูปที่ 3.25	รูปที่ 3.26
	Q^*	-3000	3000		
หมายเหตุ 3000 W หมายถึง 100% ของพิกัดกำลังอินเวอร์เตอร์ 0 W หมายถึง 0% ของพิกัดกำลังอินเวอร์เตอร์					



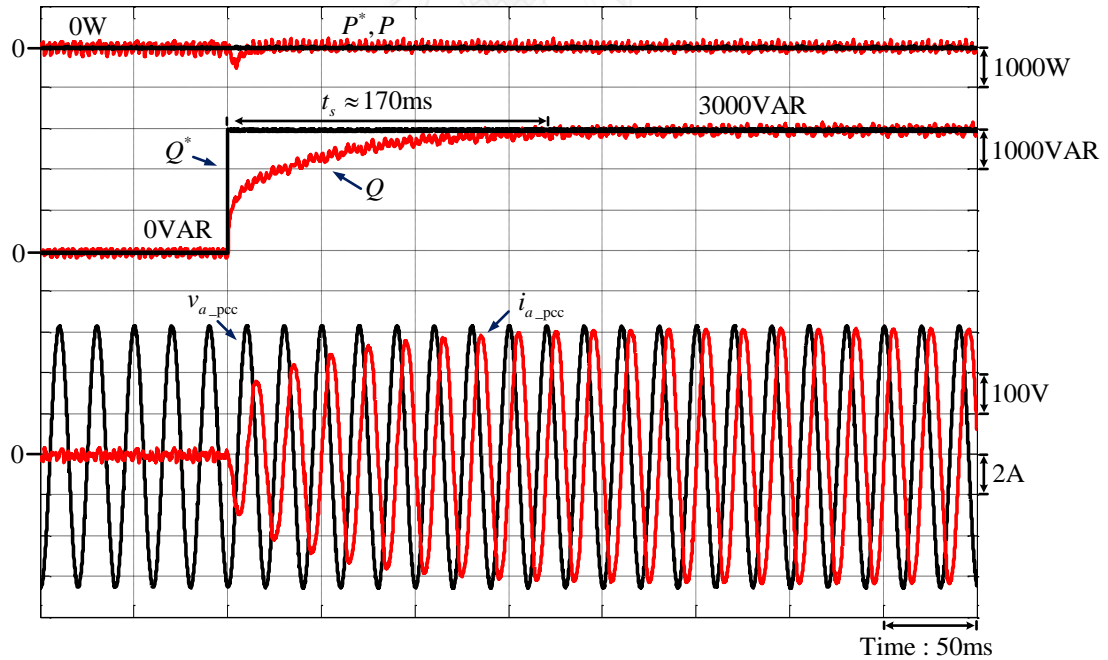
รูปที่ 3.17 ผลการจำลองการทำงานแสดงผลตอบสนองของการเปลี่ยนค่าคำสั่งกำลังจริง (P^*) แบบขึ้นบันไดจาก 0W \rightarrow 3000W



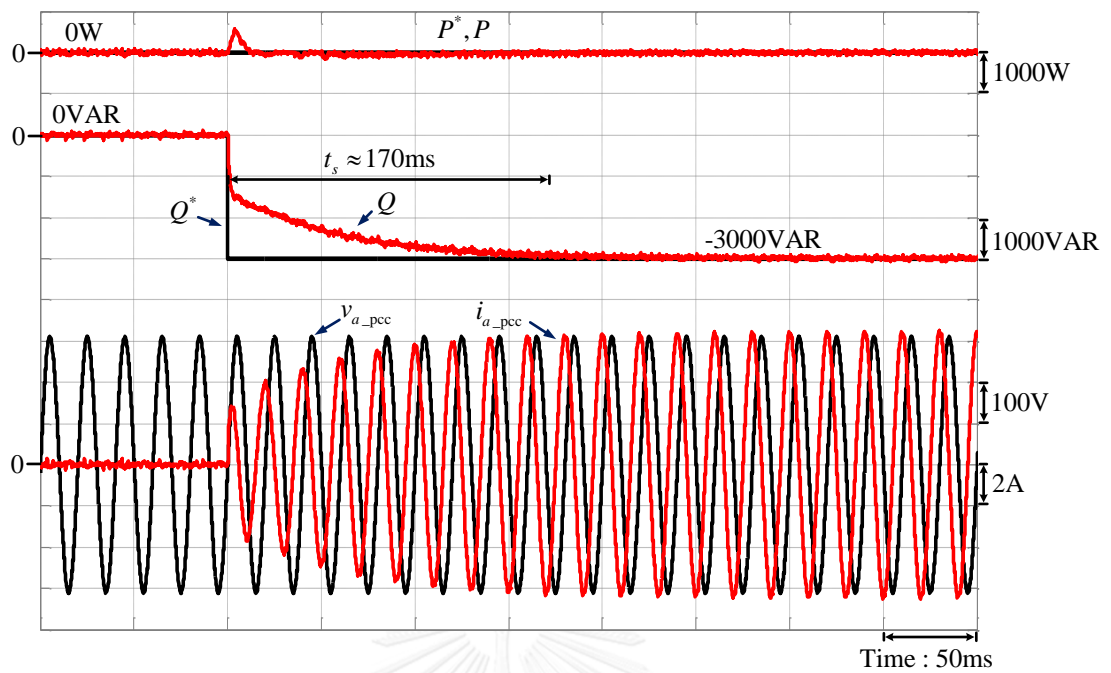
รูปที่ 3.18 ผลการทดลองแสดงผลตอบสนองของการเปลี่ยนค่าคำสั่งกำลังจริง (P^*) แบบขึ้นบันไดจาก 0W \rightarrow 3000W



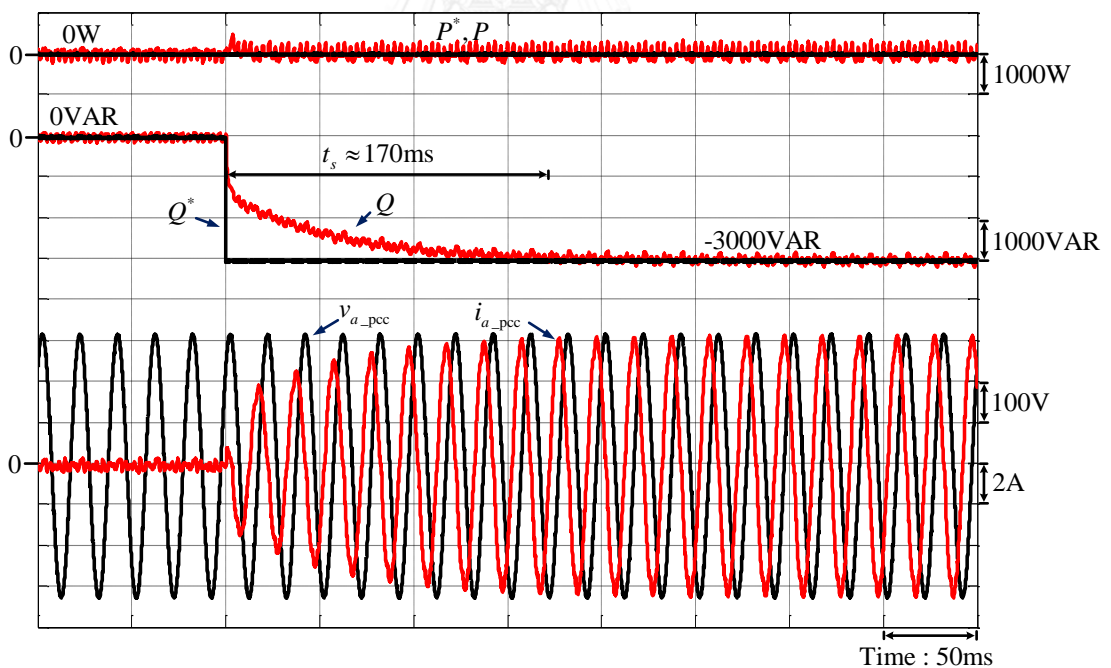
รูปที่ 3.19 ผลการจำลองการทำงานแสดงผลตอบสนองของการเปลี่ยนค่าคำสั่งกำลังรีแอกทีฟ (Q^*) แบบขึ้นบันไดจาก 0VAR -> 3000VAR



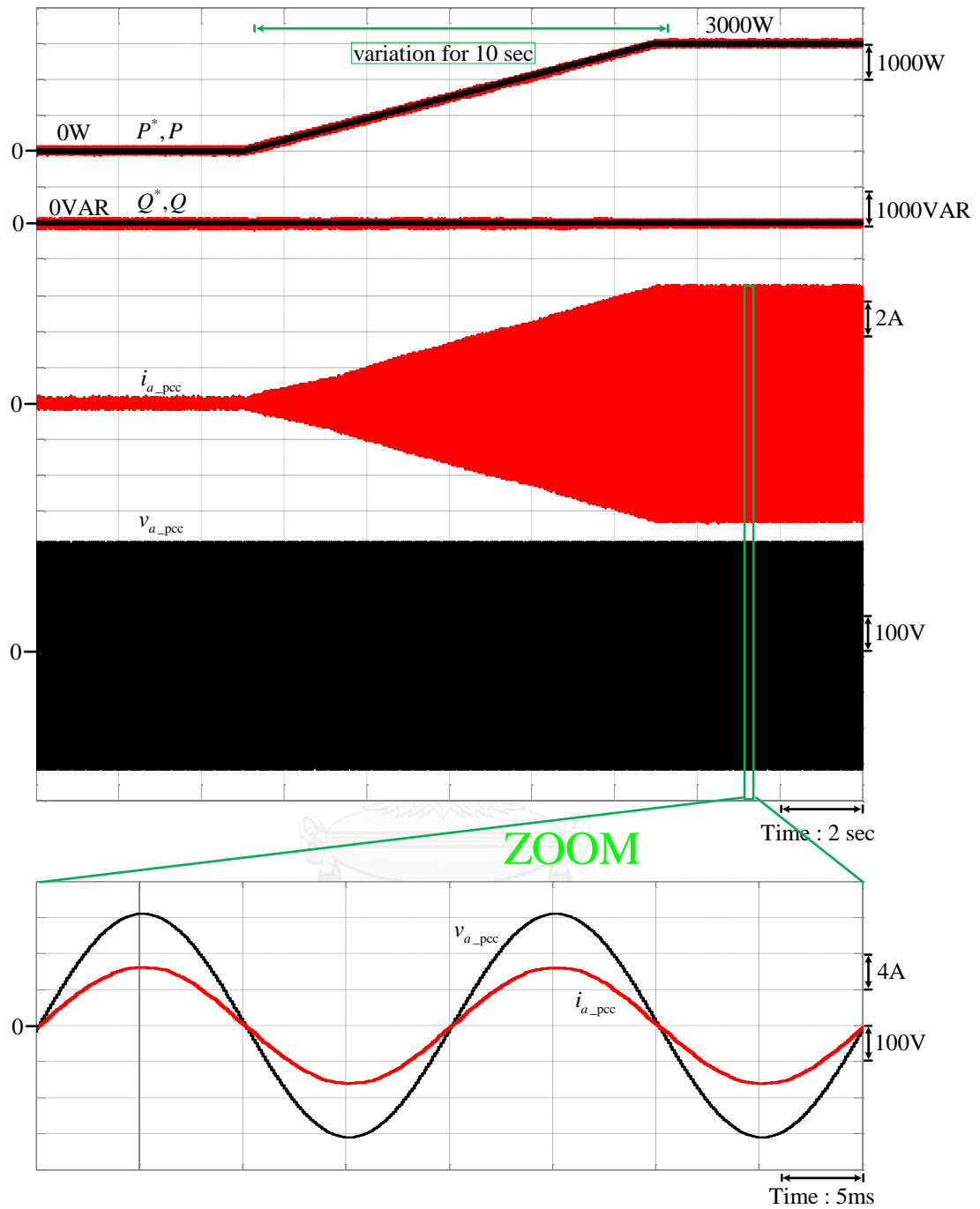
รูปที่ 3.20 ผลการทดลองแสดงผลตอบสนองของการเปลี่ยนค่าคำสั่งกำลังรีแอกทีฟ (Q^*) แบบขึ้นบันไดจาก 0VAR -> 3000VAR



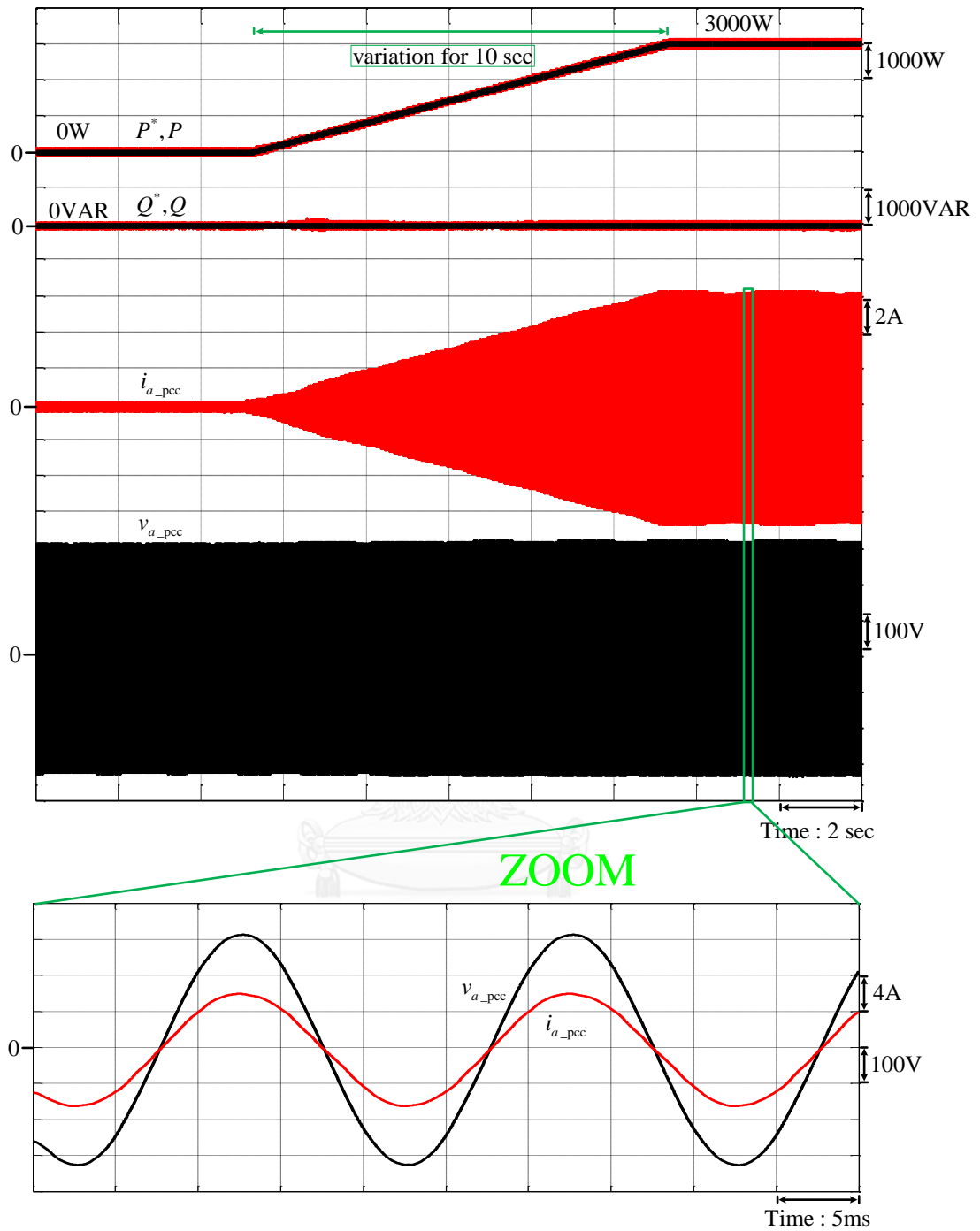
รูปที่ 3.21 ผลการจำลองการทำงานแสดงผลตอบสนองของการเปลี่ยนค่าคำสั่งกำลังรีแอกทีฟ (Q^*) แบบขั้นบันไดจาก 0VAR -> -3000VAR



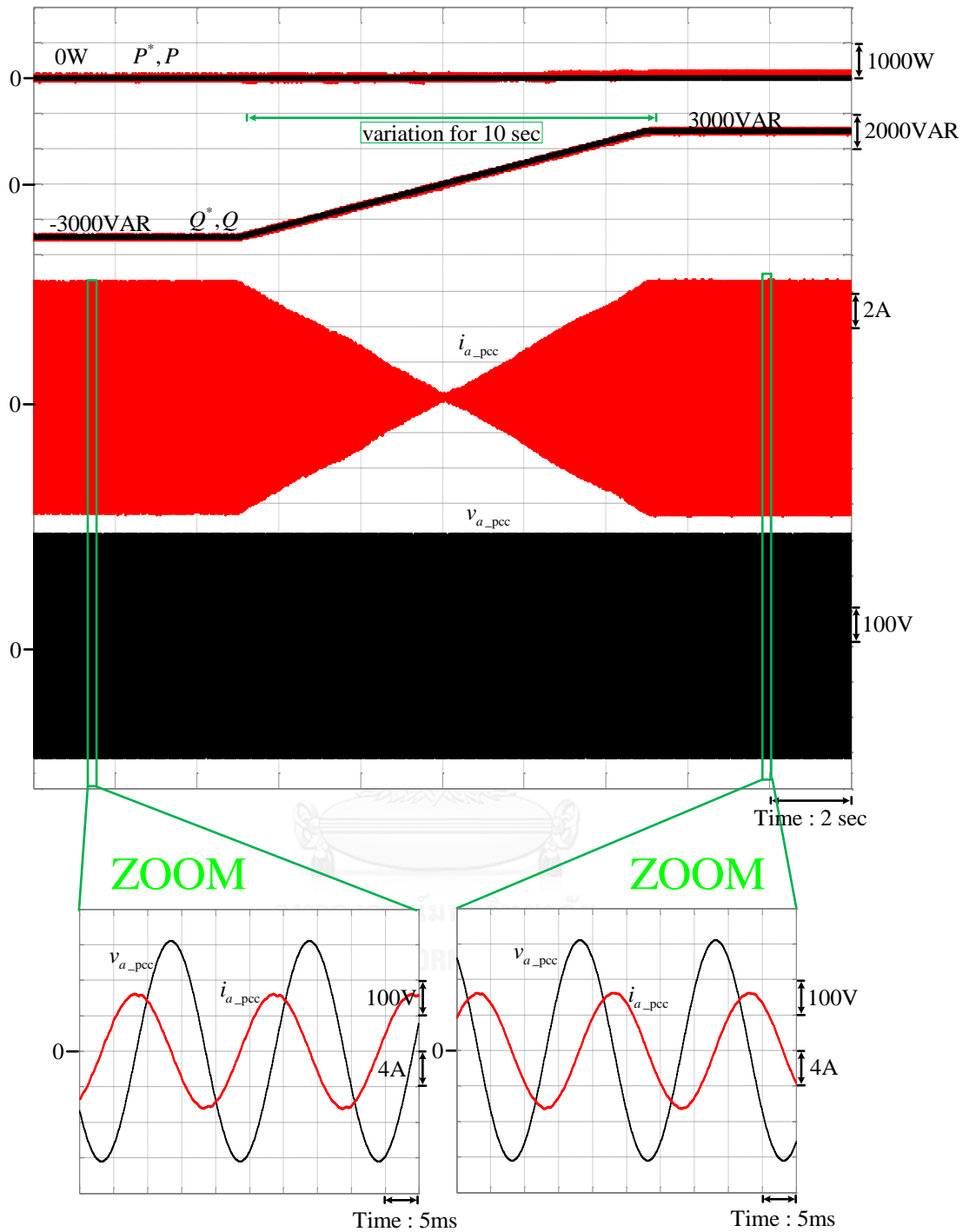
รูปที่ 3.22 ผลการทดลองแสดงผลตอบสนองของการเปลี่ยนค่าคำสั่งกำลังรีแอกทีฟ (Q^*) แบบขั้นบันไดจาก 0VAR -> -3000VAR



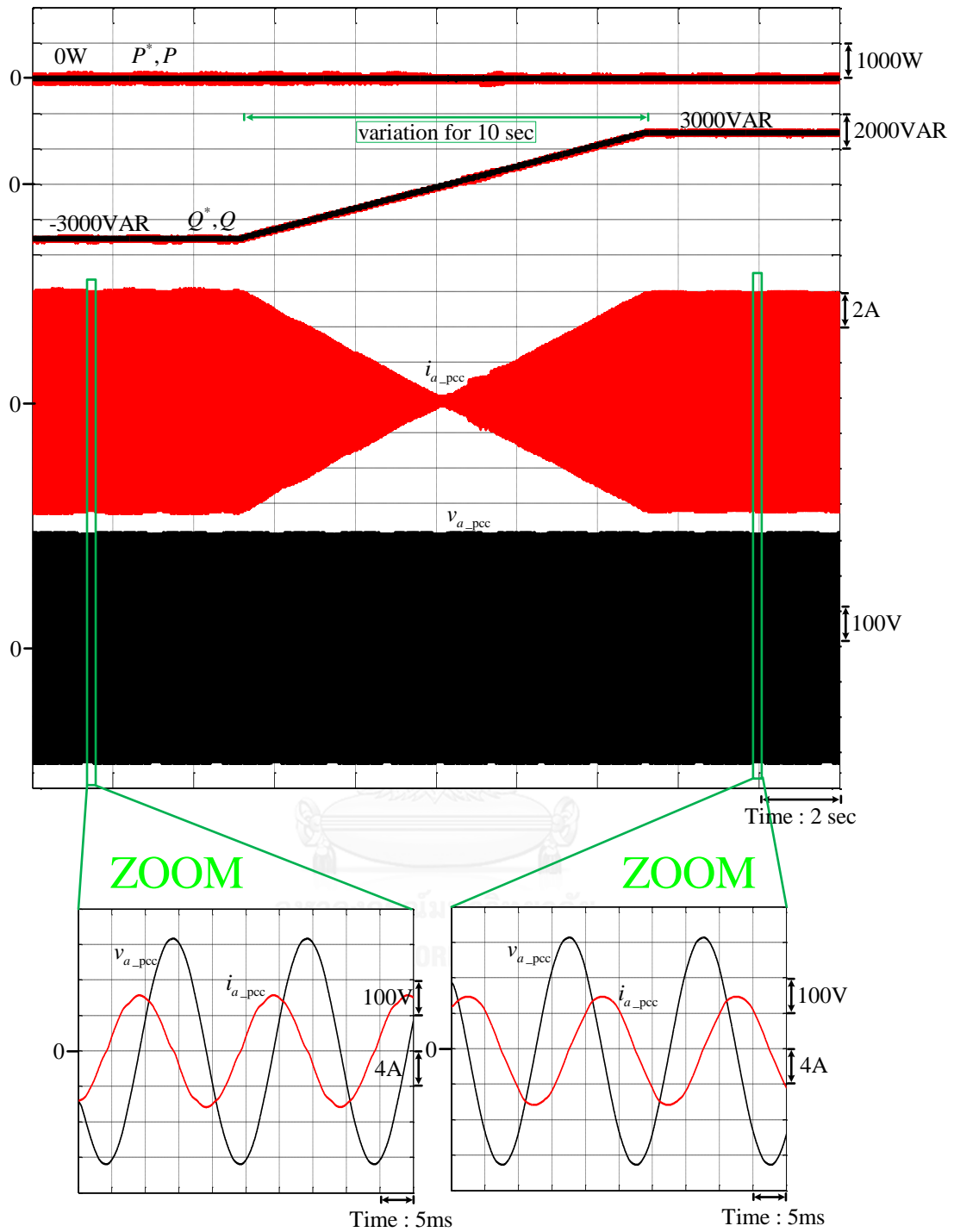
รูปที่ 3.23 ผลการจำลองการทำงานแสดงผลตอบสนองของการแปรเปลี่ยนค่ากำลังกำลังจริง (P^*) แบบแรมป์จาก 0W -> 3000W



รูปที่ 3.24 ผลการทดลองแสดงผลตอบสนองของการแปรเปลี่ยนค่ากำลังกำลังจริง (P^*) แบบแรมป์ จาก 0W -> 3000W



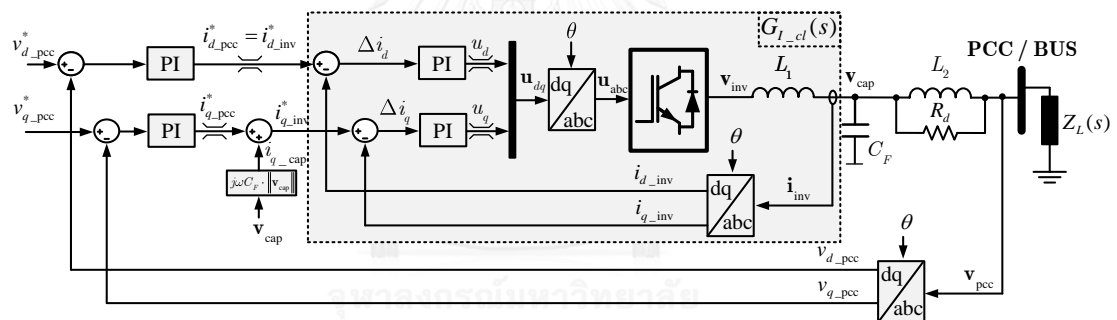
รูปที่ 3.25 ผลการจำลองการทำงานแสดงผลตอบสนองของการแปรเปลี่ยนค่าคำสั่งกำลังรีแอกทีฟ (Q^*) แบบแรมป์จาก -3000VAR -> 3000VAR



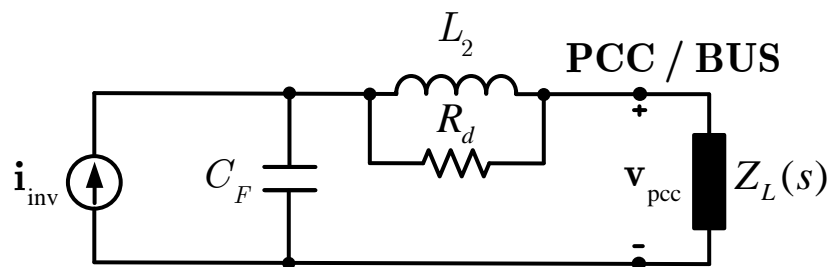
รูปที่ 3.26 ผลการทดลองแสดงผลตอบสนองของการแปรเปลี่ยนค่าคำสั่งกำลังรีแอกทีฟ (Q^*) แบบ
 แรมป์จาก -3000VAR -> 3000VAR

3.3. การวิเคราะห์เสถียรภาพและการออกแบบวงรอบควบคุมแรงดันด้านออกสำหรับโหมดไม่เชื่อมต่อโครงข่าย

สำหรับโหมดไม่เชื่อมต่อโครงข่ายอินเวอร์เตอร์จะสร้างแรงดันและความถี่อ้างอิงให้กับโครงข่ายไม่โครกริตตามค่าคำสั่งที่กำหนด โดยที่มีวงรอบควบคุมแรงดันด้านออกอยู่ด้านนอกและมีวงรอบควบคุมกระแสอยู่วงรอบใน ทั้งนี้จะต่อกันในลักษณะเรียงต่อกัน (cascade) สำหรับวงรอบควบคุมกระแสจะมีลักษณะการออกแบบเช่นเดียวกับอินเวอร์เตอร์ในโหมดสนับสนุนโครงข่ายในหัวข้อ 3.1 และ 3.2 การควบคุมแรงดันด้านออกจะอาศัยการตรวจจับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อหรือบัสเชื่อมต่อโหลดเพื่อเป็นค่าป้อนกลับของการควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 3.27 อินเวอร์เตอร์จะอาศัยการควบคุมแรงดันด้านออกในแกน d ผ่านการควบคุมกระแสในแนวแกน d และควบคุมแรงดันด้านออกในแนว q ผ่านการควบคุมกระแสในแนว q เราสามารถหาฟังก์ชันโอนย้ายจากกระแส i_{inv} ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 ไปยังแรงดันด้านออกที่จุดเชื่อมต่อ v_{pcc} ได้จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (3.8) และเราสามารถเขียนบล็อกไดอะแกรมแสดงการควบคุมแรงดันด้านออกทั้งในแนวแกน d และแกน q ได้ดังรูปที่ 3.29



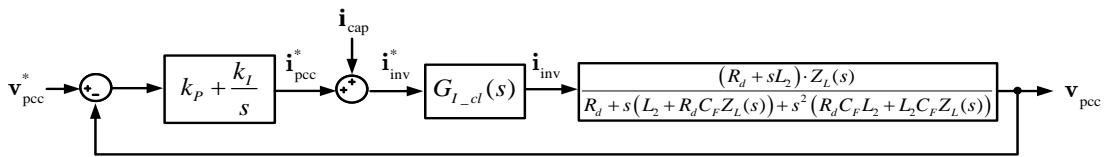
รูปที่ 3.27 แผนภาพวงรอบควบคุมแรงดันด้านออกสำหรับโหมดไม่เชื่อมต่อโครงข่าย



รูปที่ 3.28 วงจรสมมูลของวงรอบควบคุมแรงดันด้านออกสำหรับโหมดไม่เชื่อมต่อโครงข่าย

$$T_3(s) = \frac{v_{pcc}(s)}{i_{inv}(s)} = \frac{(R_d + sL_2) \cdot Z_L(s)}{R_d + s(L_2 + R_d C_F Z_L(s)) + s^2(R_d C_F L_2 + L_2 C_F Z_L(s))} \quad (3.8)$$

โดยที่ $Z_L(s)$ คืออิมพีแดนซ์ของโหลดใดๆที่ต่ออยู่ที่จุดเชื่อมต่อ



รูปที่ 3.29 บล็อกไดอะแกรมของวงรอบควบคุมแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์

$$G_v(s) = \left(k_p + \frac{k_I}{s} \right) \cdot G_{I-cl}(s) \cdot \left(\frac{(R_d + sL_2) \cdot Z_L(s)}{R_d + s(L_2 + R_d C_F Z_L(s)) + s^2 (R_d C_F L_2 + L_2 C_F Z_L(s))} \right) \quad (3.9)$$

สมการที่ (3.9) แสดงฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดของการควบคุมแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ สำหรับโหมตไม่เชื่อมต่อโครงข่าย การออกแบบอัตราขยายของตัวควบคุม PI ของวงรอบควบคุมกำลัง จะใช้เงื่อนไขเช่นเดียวกับการออกแบบวงรอบควบคุมกระแสและวงรอบควบคุมกำลัง การพิจารณาเลือกความถี่ตัดข้ามจะพิจารณาจากผลตอบสนองของการสร้างแรงดันด้านออกเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งมีปัจจัยในการพิจารณาโดยสรุปดังนี้

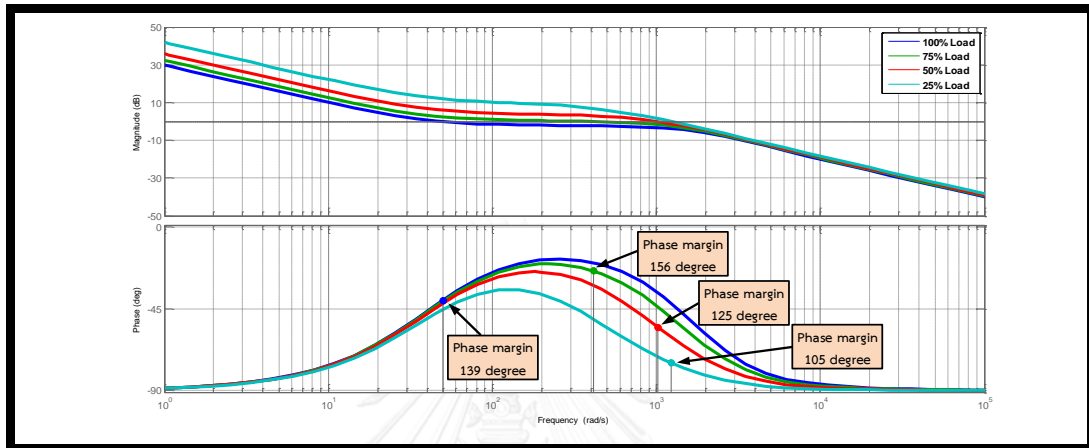
- 1.) อินเวอร์เตอร์ควรจะสร้างหรือพยายามรักษาระดับแรงดันด้านออกเนื่องจากโหลดมีการเปลี่ยนแปลงหรือมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันคำสั่งให้ทันภายใน 200 ms
- 2.) แบนด์วิดท์ของการควบคุมแรงดันจะต้องมีค่าไม่มากจนเกินไปเพราะอาจจะส่งผลกระทบต่อ การขยายสัญญาณรบกวนและฮาร์มอนิกของแรงดันอินเนื่องมาจากโหลดที่นำมาต่อได้

ในวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกออกแบบให้วงรอบควบคุมกำลังมีช่วงเวลาเข้าที่ (settling time, t_s) ประมาณไม่เกิน 200 มิลลิวินาทีโดยเลือกความถี่ตัดข้ามของวงรอบควบคุมกำลังเท่ากับ 50 rad/s ซึ่งถือว่ามึผลตอบสนองที่เพียงพอ เนื่องจากวงรอบควบคุมกระแสมีแบนด์วิดท์สูงมากเมื่อเทียบกับวงรอบควบคุมกำลัง เราจึงสามารถประมาณฟังก์ชันวงรอบปิดของการควบคุมกระแส $G_{I-cl}(s)$ เท่ากับ 1 และสามารถเขียนฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดของวงรอบควบคุมแรงดันด้านออกจากสมการที่ (3.9) ได้ใหม่ดังแสดงในสมการที่ (3.10)

$$G_v(s) \approx \left(k_p + \frac{k_I}{s} \right) \cdot \left(\frac{(R_d + sL_2) \cdot Z_L(s)}{R_d + s(L_2 + R_d C_F Z_L(s)) + s^2 (R_d C_F L_2 + L_2 C_F Z_L(s))} \right) \quad (3.10)$$

สำหรับการเลือกความถี่หักมุมของตัวควบคุม PI จะพิจารณาจากเสถียรภาพของระบบเป็นหลักโดยที่ระบบจะต้องมีส่วนเฟส (phase margin) ที่เพียงพอ ในงานวิจัยนี้เลือกความถี่หักมุม $\omega_{cn} = k_I / k_p = 40 \text{ rad/s}$ และค่าพารามิเตอร์ $L_2 = 0.005 \text{ H}$, $R_d = 15 \text{ } \Omega$, $C_F = 12.5 \times 10^{-6} \text{ F}$ ส่วน $Z_L(s)$ เป็นตัวแปรผันแปรขึ้นอยู่กับโหลดที่มาต่อบัสดังนั้นจึงแปรเปลี่ยนค่า $Z_L(s)$ ทั้งหมด 4 ค่าเพื่อยืนยันเสถียรภาพตลอดย่านการทำงานได้แก่ 100%, 75%, 50%, 25% ของพิกัดอินเวอร์เตอร์ ได้แก่

ค่าความต้านทานเท่ากับ 48.13, 64.17, 96.26, 192.53 โอห์ม ตามลำดับ เมื่อแทนค่า $Z_L(s) = 48.13$ ลงในสมการที่ (3.10) เราจะได้อัตราขยายของตัวควบคุม PI สำหรับวงรอบควบคุมแรงดันด้านออกเท่ากับ $k_P = 0.0162$ (A/V), $k_I = 0.6480$ (A/Vs) เมื่อพล็อตแผนภาพโบเดของฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดของสมการที่ (3.10) แสดงได้ดังรูปที่ 3.30 พบว่าทั้ง 4 กรณีมีส่วนเฟสเพียงพอต่อเสถียรภาพของวงรอบควบคุมแรงดัน



รูปที่ 3.30 แผนภาพโบเดของฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดของวงรอบควบคุมแรงดันด้านออกเมื่อเปลี่ยนแปลงโหลด 4 ค่า

ผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองในรูปที่ 3.31 ถึงรูปที่ 3.34 แสดงถึงผลตอบสนองต่อสภาวะชั่วคราวและสภาวะอยู่ตัวของวงรอบควบคุมแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ใน 2 โหมดที่สำคัญได้แก่ 1.) การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันคำสั่งแบบขั้นบันไดและ 2.) การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันคำสั่งแบบแรมป์ตลอดย่าน เมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดไม่เชื่อมต่อโครงข่าย (standalone mode) ที่จุดเชื่อมต่อกับโหลดตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำที่มีอิมพีแดนซ์ $Z_L(s) = 50 + j10.41\Omega$ ต่อแบบวายและใช้ค่าอัตราขยายของตัวควบคุม PI ที่ได้ออกแบบไว้ข้างต้น โดยมีเงื่อนไขการทดสอบโดยสรุปแสดงได้ดังตารางที่ 3.3

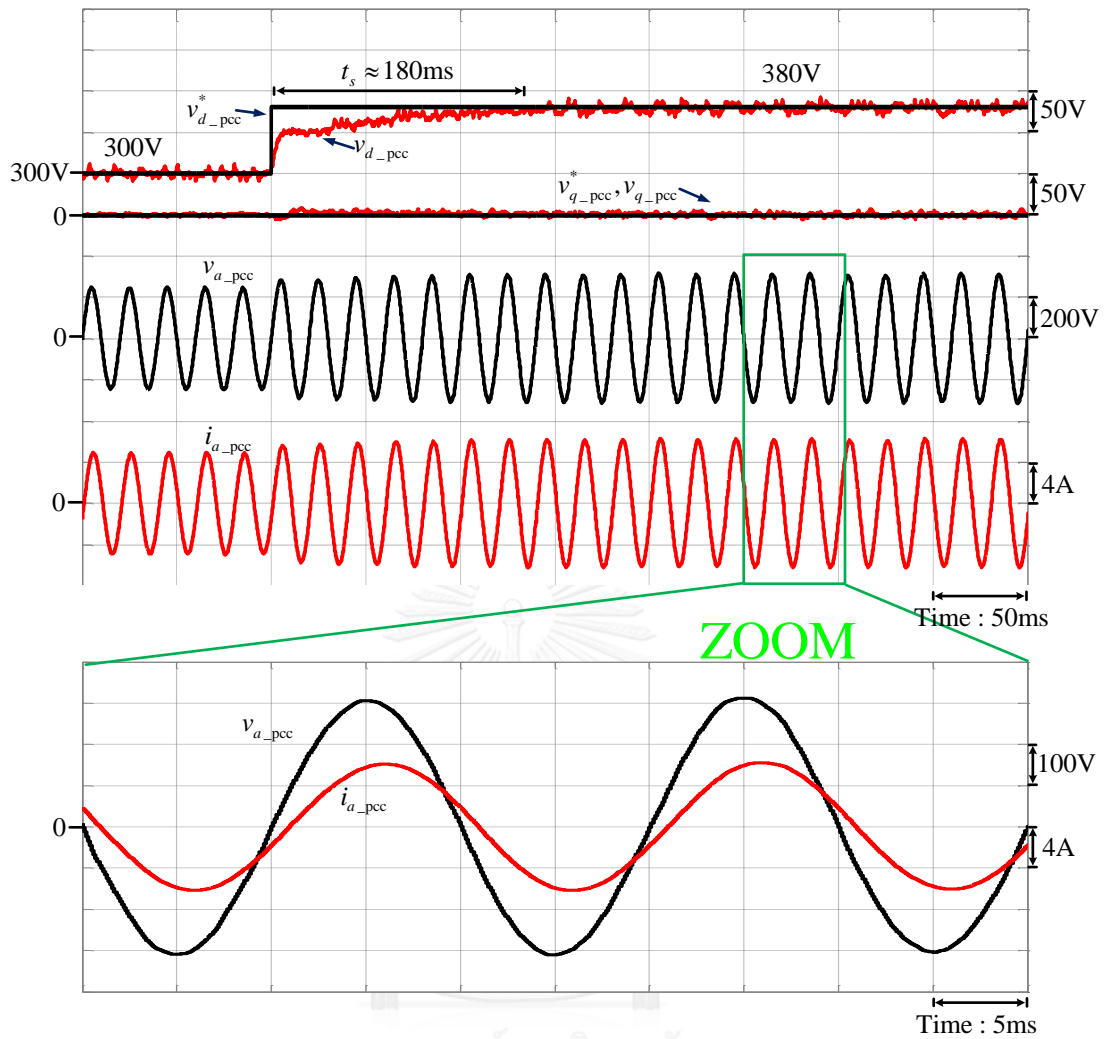
รูปที่ 3.31 ถึงรูปที่ 3.32 เป็นผลการจำลองการทำงานเปรียบเทียบกับผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนค่าแรงดันคำสั่งในแนวแกน d แบบขั้นบันไดจาก 300V เป็น 380V พบว่าวงรอบควบคุมแรงดันสามารถควบคุมแรงดันด้านออกในแนวแกน d ตามค่าคำสั่งได้อย่างถูกต้องและสามารถควบคุมแรงดันในแนวแกน q ในสภาวะอยู่ตัวได้อย่างอิสระต่อกัน จะเห็นได้ว่าวงรอบควบคุมแรงดันมีผลตอบสนองของผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีช่วงเวลาเข้าที่ (settling time, t_s) ประมาณ 180 ms ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ออกแบบไว้ข้างต้น (ไม่เกิน 200 ms) ภาพขยายที่ค่าคำสั่งแรงดันในแนวแกน d เท่ากับ 380 V (หรือแรงดันระหว่างสายมีค่า 380 V

เช่นกัน) พบว่าผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองของวงรอบควบคุมแรงดันสามารถควบคุมรูปคลื่นแรงดันเฟส a ที่คร่อมโพลต์ให้มีความใกล้เคียงสัญญาณไซน์ได้อย่างน่าพึงพอใจโดยที่กระแสจะล่าหลังแรงดันสอดคล้องตามอิมพีแดนซ์ของโพลต์ เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวแล้วอินเวอร์เตอร์สามารถควบคุมแรงดันด้านออกในแนวแกน d โดยมีค่าความผิดพลาดใกล้เคียงศูนย์และมีค่าระลอกอยู่ในช่วง $0 - 10 \text{ V}$ ($0 - 2.63\%$ ของพิกัดแรงดันในแกน dq) ซึ่งยืนยันได้ถึงสมรรถนะของวงรอบควบคุมกระแสที่ได้ออกแบบไว้

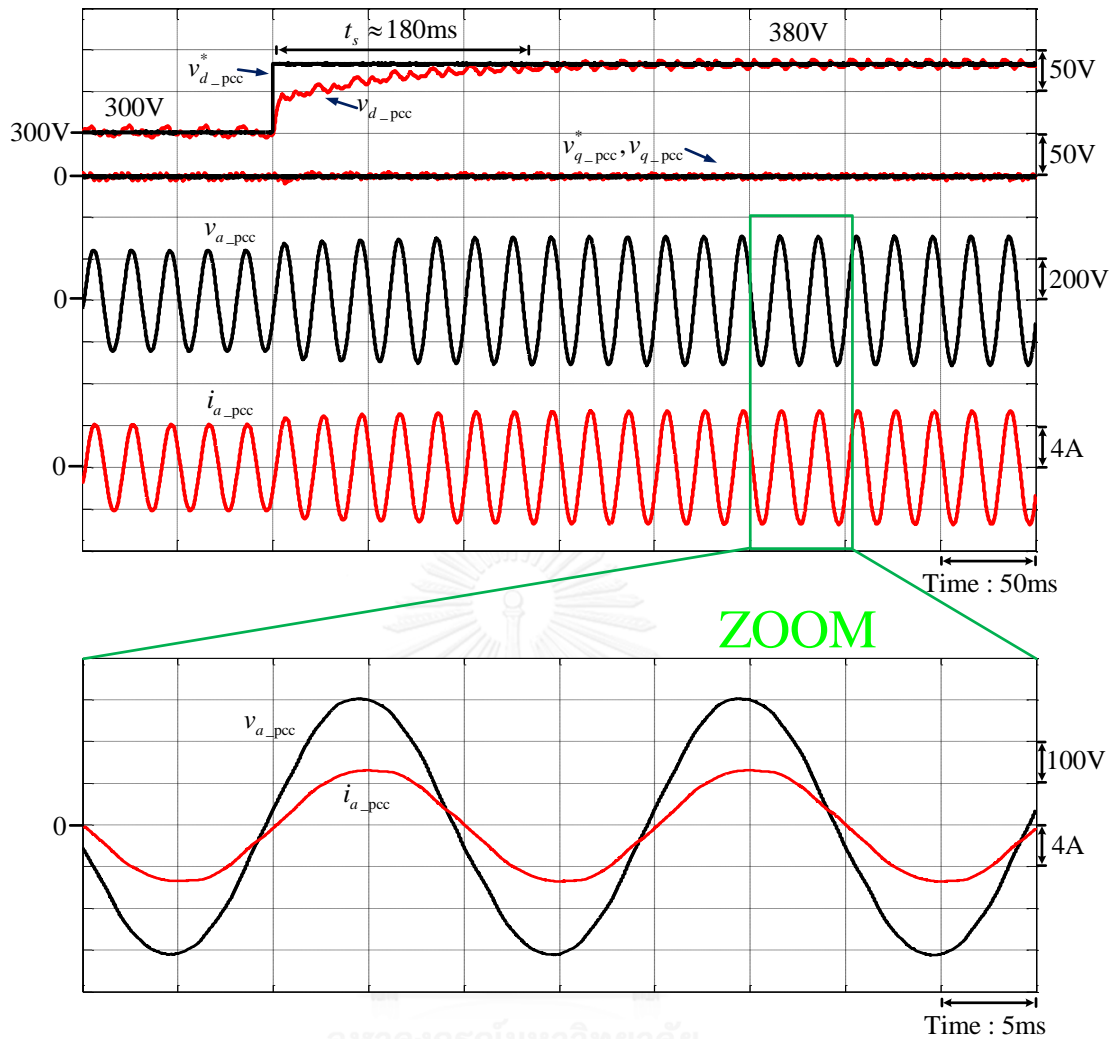
รูปที่ 3.33 ถึงรูปที่ 3.34 เป็นผลการจำลองการทำงานเปรียบเทียบกับผลการทดลองเมื่อมีการแปรเปลี่ยนค่าแรงดันคำสั่งในแนวแกน d แบบแรมป์จาก 0V เป็น 380V ในช่วงเวลา 10 วินาที พบว่าวงรอบควบคุมแรงดันด้านออกสามารถควบคุมแรงดันด้านออกตามค่าคำสั่งแบบแรมป์ตลอดย่านได้อย่างถูกต้อง อีกทั้งยังสามารถควบคุมแรงดันในแนวแกน d และในแนวแกน q ในสภาวะอยู่ตัวได้อย่างอิสระต่อกัน โดยมีค่าความผิดพลาดตลอดย่านใกล้เคียงศูนย์และมีค่าระลอกอยู่ในช่วง $0 - 10 \text{ V}$ ($0 - 2.63\%$ ของพิกัดแรงดันในแกน dq) ตลอดทุกค่าแรงดันคำสั่ง ซึ่งยืนยันได้ถึงสมรรถนะของวงรอบควบคุมแรงดันด้านออกที่ได้ออกแบบไว้

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขการทดสอบการทำงานสำหรับวงรอบควบคุมแรงดันด้านออกเมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดไม่เชื่อมต่อโครงข่าย ที่จุดเชื่อมต่อมีโพลต์ $Z_L(s) = 50 + j10.41\Omega$ ต่อแบบวาย

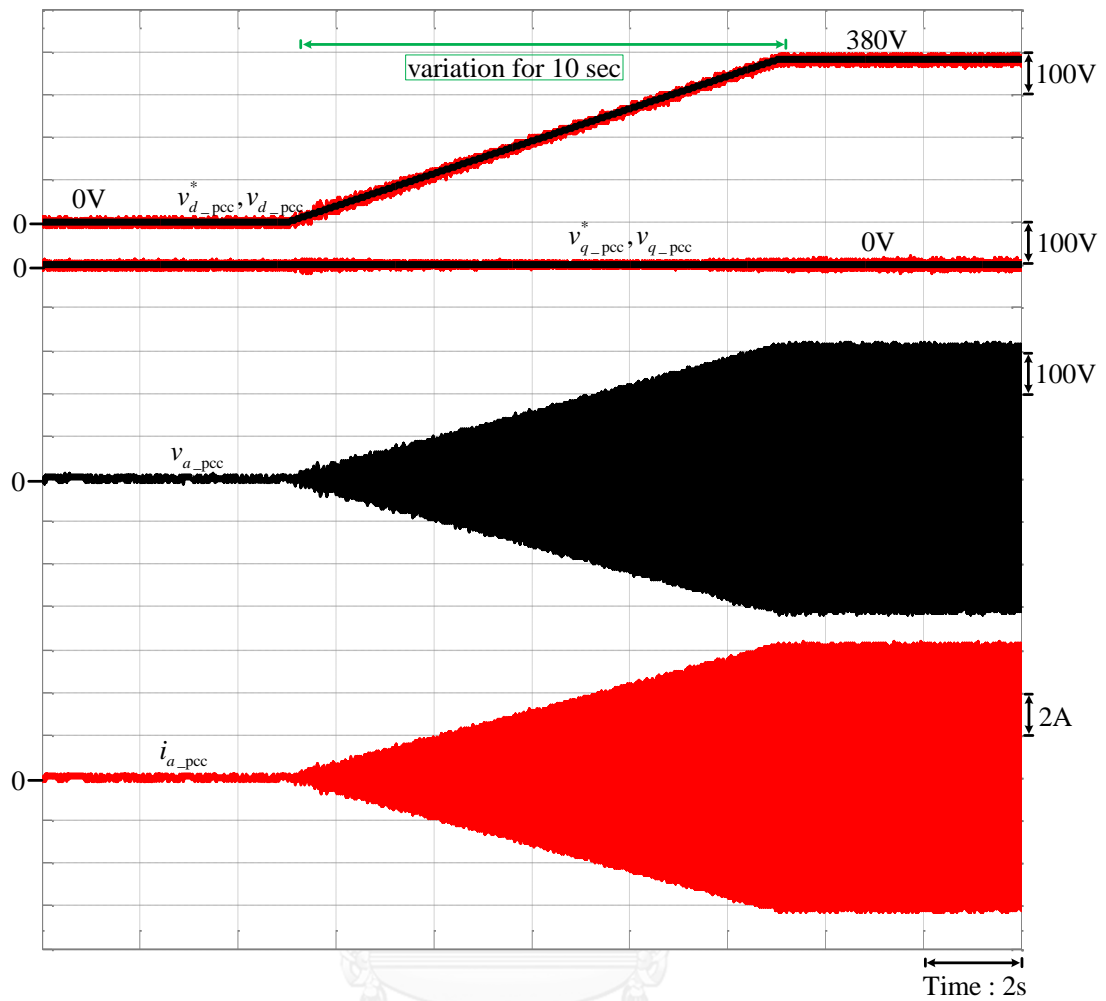
โหมดการทดสอบ	ตัวแปร	Initial voltage (V)	Final voltage (V)	ผลการจำลอง	ผลการทดลอง
Step v_d^* (+)	v_d^*	300	380	รูปที่ 3.31	รูปที่ 3.32
	v_q^*	0	0		
Ramp v_d^* (10 sec.)	v_d^*	0	380	รูปที่ 3.33	รูปที่ 3.34
	v_q^*	0	0		
หมายเหตุ 380 V หมายถึง 100% ของพิกัดแรงดันในแนว dq หรือพิกัดแรงดันระหว่างสาย 0 V หมายถึง 0% ของพิกัดแรงดันในแนว dq หรือพิกัดแรงดันระหว่างสาย					



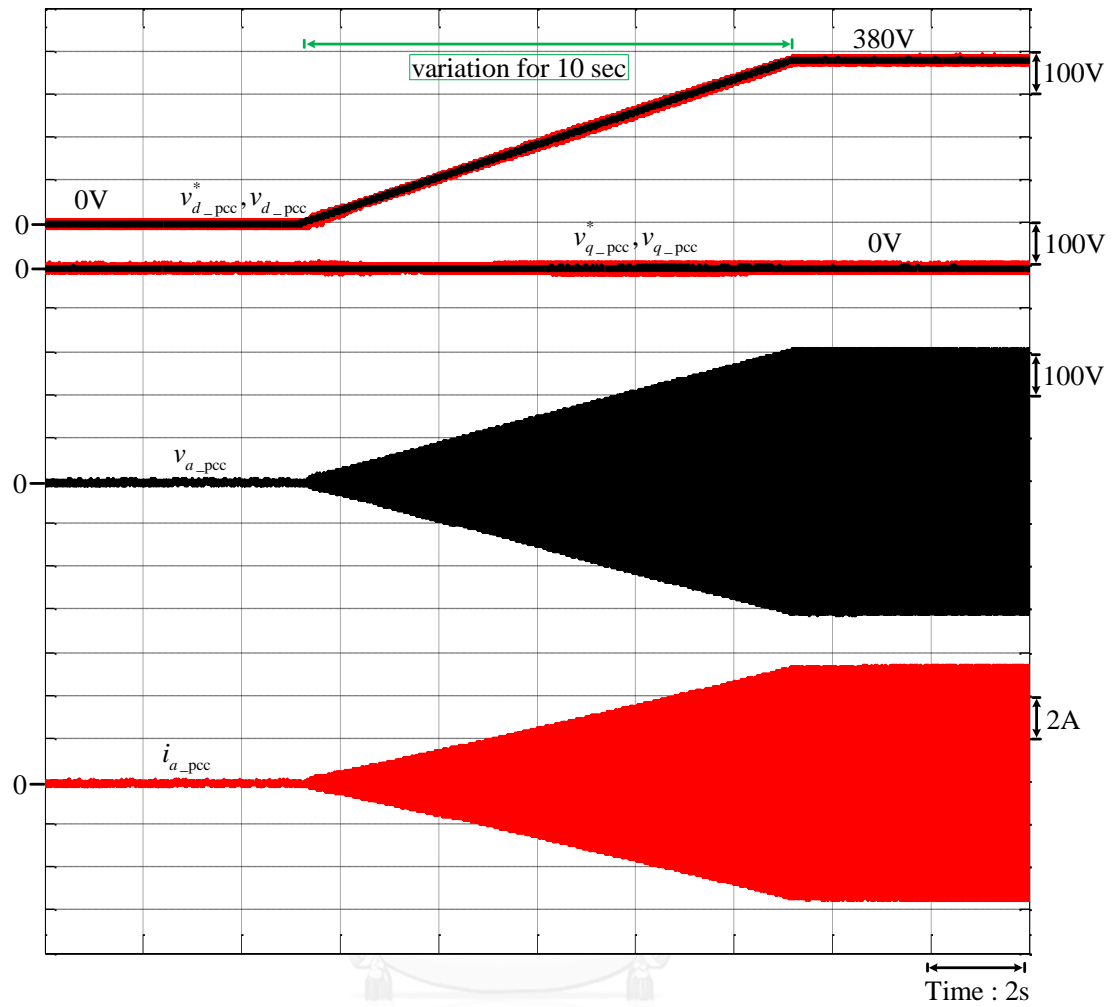
รูปที่ 3.31 ผลการจำลองการทำงานแสดงผลตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันคำสั่งในแนวแกน d แบบขั้นบันไดจาก 300V -> 380V เมื่อมีโหลด $Z_L(s) = 50 + j10.41\Omega$



รูปที่ 3.32 ผลการทดลองแสดงผลตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันคำสั่งในแนวแกน d แบบ
 ชับันได้จาก 300V \rightarrow 380V เมื่อมีโหลด $Z_L(s) = 50 + j10.41\Omega$ ต่ออยู่ที่จุดเชื่อมต่อ



รูปที่ 3.33 ผลการจำลองการทำงานแสดงผลตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันคำสั่งใน
 แนวแกน d แบบแรมป์จาก 0V -> 380V เมื่อมีโหลด $Z_L(s) = 50 + j10.41\Omega$ ต่ออยู่ที่จุดเชื่อมต่อ



รูปที่ 3.34 ผลการทดลองแสดงผลตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันคำสั่งในแกน d แบบ
 แรมป์จาก 0V -> 380V เมื่อมีโหลด $Z_L(s) = 50 + j10.41\Omega$ ต่ออยู่ที่จุดเชื่อมต่อ

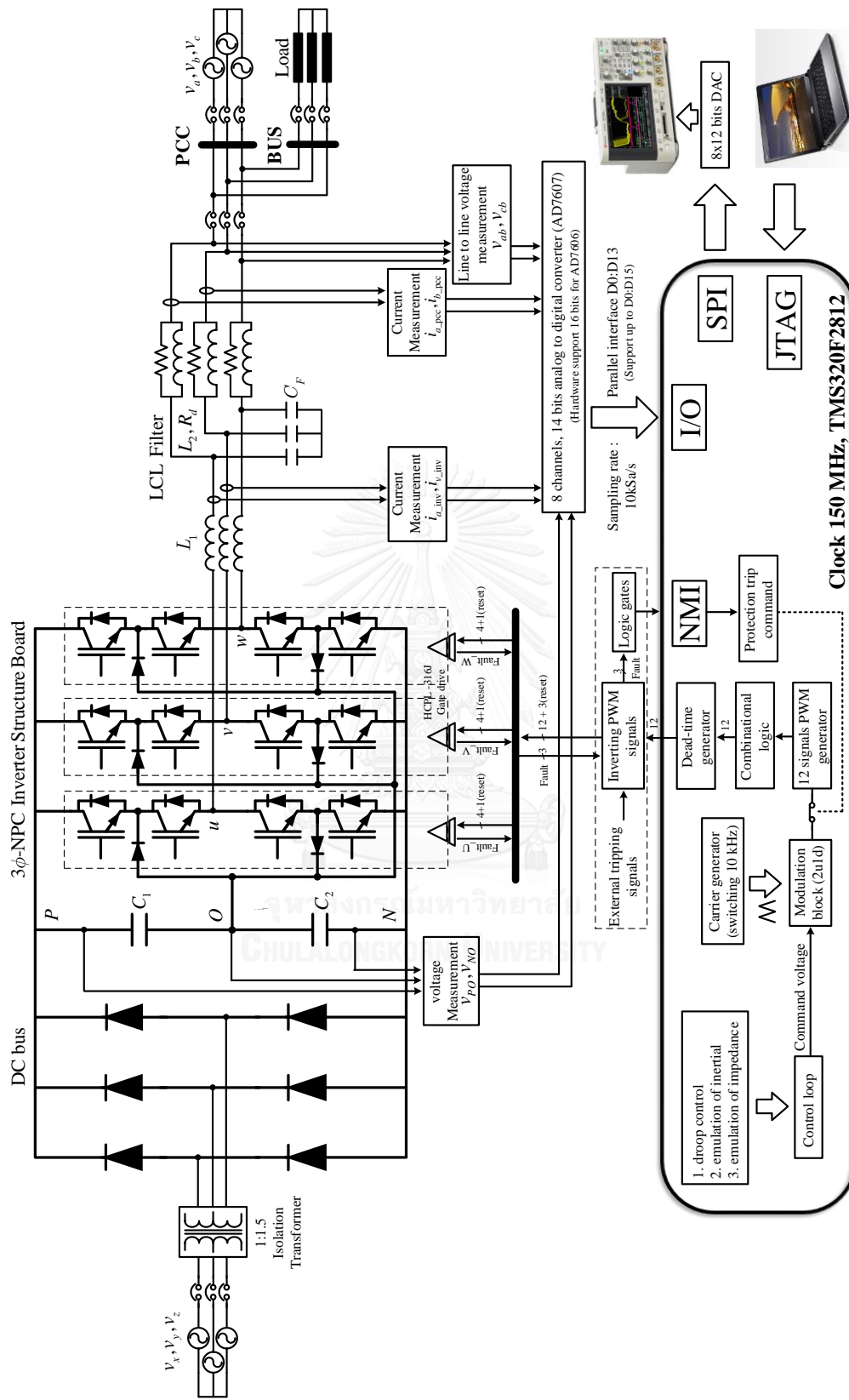
บทที่ 4

การออกแบบเครื่องต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบเครื่องต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการ (hardware prototype) เพื่อใช้ในการทดสอบการทำงานของแนวคิดในการจำลองลักษณะสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสด้วยอินเวอร์เตอร์ใน 3 ประเด็นได้แก่ 1.) ฟังก์ชันการควบคุมรูป 2.) ฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกล 3.) ฟังก์ชันการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์ โดยที่เครื่องต้นแบบ (อินเวอร์เตอร์) ที่ทำการออกแบบจะต้องรองรับการทำงานของอินเวอร์เตอร์ใน 2 โหมดคือโหมดเชื่อมต่อโครงข่ายหรือโหมดสนับสนุนโครงข่าย (grid connected mode หรือ grid supporting mode) และ โหมดไม่เชื่อมต่อโครงข่าย (standalone mode หรือ grid forming mode) โดยมีรายละเอียดสำหรับการออกแบบอินเวอร์เตอร์สรุปได้ดังนี้

- 1.) พิกัดกำลัง 3000 VA
- 2.) ระดับแรงดันบัสไฟตรงมีค่าระหว่าง 600 – 900 V DC
- 3.) ระดับแรงดันระหว่างสายด้านออกของอินเวอร์เตอร์ 380 V_{rms} ความถี่ปกติ 50 Hz
- 4.) ความถี่การสวิตช์ 10 kHz

ภาพรวมของเครื่องต้นแบบที่ใช้ทดสอบการทำงานแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วนที่สำคัญได้แก่ วงจรส่วนภาคกำลัง (high power circuits) วงจรตรวจวัด (measurement circuits) ส่วนควบคุมและประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Processing, DSP)



รูปที่ 4.1 ภาพรวมของเครื่องต้นแบบที่ใช้สำหรับการทดสอบแนวคิดในการจำลองลักษณะสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงไมโครนวัตินเวอร์เตอร์

4.1. วงจรส่วนภาคกำลัง (high power circuits)

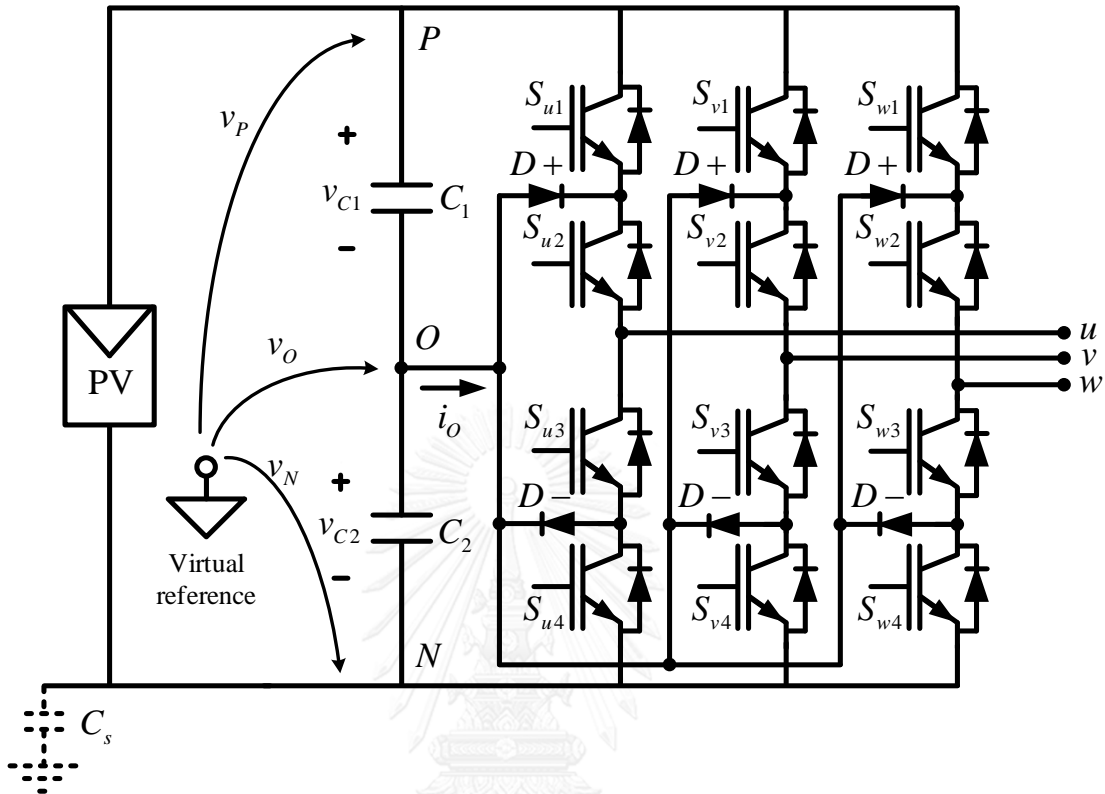
ประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์สามระดับแบบตริงจุดนิวทรัล วงจรขับนำสวิตช์ วงจรไดโอดเรียงกระแสไฟตรง วงจรกรองผ่านต่ำ LCL เป็นต้น

4.1.1. อินเวอร์เตอร์สามระดับแบบตริงจุดนิวทรัล (NPC structure 3 level inverters)

ข้อจำกัดด้านฮาร์ดแวร์เป็นหนึ่งในข้อกำหนดกำเนิดอินเวอร์เตอร์รูปแบบใหม่ๆ เพื่อรองรับต่อการใช้งานที่พิกัดกำลังสูง พิกัดของแรงดันและกระแสของสวิตช์กำลังถูกกำหนดโดยอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เช่น พิกัดแรงดันของ IGBTs มีค่าสูงประมาณ 1600 โวลต์ พิกัดกระแสมีค่าสูงประมาณ 800A เป็นต้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับผู้ผลิตและลักษณะการนำไปใช้งาน อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์จำเป็นต้องนำแผงโฟโตวอลเทอิกมาต่อเป็นอาร์เรย์โดยต่ออนุกรมหลายๆแผงเพื่อเพิ่มแรงดันบัสไฟตรงให้มีค่าสูงและนำแผงมาต่อขนานกันเพื่อเพิ่มกระแสบัสไฟตรง อินเวอร์เตอร์บางชนิดจะมีวงจรเพิ่มแรงดันไฟตรง (DC to DC boost converter) เพื่อคำนวณหาย่านของแรงดันไฟตรงที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าด้านออกสูงที่สุด (Maximum Power Point Tracking, MPPT) ทำให้ระดับแรงดันไฟตรงที่อินเวอร์เตอร์สูงกว่าแรงดันไฟตรงของแผงโฟโตวอลเทอิก จะเห็นได้ว่าการใช้อินเวอร์เตอร์ในระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ส่วนใหญ่จะต้องรองรับการใช้แรงดันบัสไฟตรงค่อนข้างสูง (800 – 900V) แต่ก็ยังอยู่ในย่านของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่มีอยู่สามารถรองรับได้ หากใช้อินเวอร์เตอร์แบบสองระดับ สำหรับข้อเด่นกว่าสำหรับการใช้อินเวอร์เตอร์สามระดับในระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ได้แก่

- 1.) เหมาะสมกับการใช้อินเวอร์เตอร์ในงานที่มีพิกัดกำลังสูงได้
- 2.) ประสิทธิภาพสูงระดับ 98% เนื่องจากความสูญเสียจากการสวิตช์ (switching loss) ต่ำกว่า ทำให้อุปกรณ์ระบายความร้อนเช่น heatsink มีขนาดเล็กลง
- 3.) สามารถลดพิกัดแรงดันของสวิตช์กำลังได้เหลือเพียงอย่างน้อย $v_{pv} / 4$ ในขณะที่อินเวอร์เตอร์สองระดับต้องใช้พิกัดแรงดันอย่างน้อย $v_{pv} / 2$ ทำให้อินเวอร์เตอร์สามระดับเหมาะสมกับงานที่ต้องใช้แรงดันบัสไฟตรงค่าสูง
- 4.) สามารถใช้งานตัวเก็บประจุพิกัดแรงดันที่มีขายตามท้องตลาดได้ เช่น 450V, 600V ทำให้ต้นทุนของอุปกรณ์เฉื่อยงานถูก
- 5.) ความเครียดจากการสวิตช์ (dv / dt) ต่ำกว่าอินเวอร์เตอร์แบบสองระดับ ดังนั้นวงจรกรองผ่านต่ำจึงมีขนาดเล็กกว่า และยังสามารถรองรับการใช้งานที่ความถี่การสวิตช์สูงได้ อีกทั้งยังสามารถลดความสูญเสียที่วงจรกรองได้
- 6.) การแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference, EMI) ต่ำกว่า

- 7.) กระแสรั่วไหลในตัวเก็บประจุแฝง (leakage current in stray capacitance, C_s) น้อยกว่าใช้อินเวอร์เตอร์สองระดับทำให้อายุการใช้งานของแผงโฟโตโวลเทอิกยาวนานขึ้น



รูปที่ 4.2 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์สามระดับแบบตริงจุดนิวทรัล (NPC 3 level inverter)

อินเวอร์เตอร์สามระดับแบบตริงจุดนิวทรัลหรือแคลมป์ไดโอดในรูปที่ 4.2 ได้ถูกพัฒนาโดย Nabae, Magi และ Takahashi ในปี 1981 เพื่อลดความเครียดของการสวิตช์ ความสูญเสียเนื่องจากการสวิตช์ (switching loss) เมื่อเปรียบเทียบกับอินเวอร์เตอร์สองระดับ อินเวอร์เตอร์โครงสร้างนี้สามารถนำมาใช้ได้ทั้งแบบเฟสเดียวและสามเฟส วงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับแบบตริงจุดนิวทรัลประกอบไปด้วยสวิตช์กำลังจำนวน 4 ตัวต่อเฟสต่ออนุกรมกับบัสไฟตรงและไดโอด 2 ตัวต่อเฟส แสดงได้ดังรูปที่ 4.2 เชื่อมต่อกับแรงดันบัสไฟตรงโดยอาศัยตัวเก็บประจุ 2 ตัวต่ออนุกรมเพื่อแบ่งครึ่งแรงดันเต็มบัส ภาคไฟตรงของอินเวอร์เตอร์จึงเกิดบัสไฟตรง 3 ค่าได้แก่ แรงดันบัสบวก (v_p) เป็นค่าศักย์ไฟฟ้าที่จุด P แรงดันบัสศูนย์ (v_o) เป็นศักย์ไฟฟ้าที่จุด O และแรงดันบัสลบ (v_n) เป็นค่าศักย์ไฟฟ้าที่จุด N ดังนั้นอินเวอร์เตอร์สามารถสร้างแรงดันด้านออกได้ 3 ค่าคือแรงดันบวก แรงดันศูนย์และแรงดันลบ ในขณะที่อินเวอร์เตอร์สองระดับสามารถสร้างแรงดันด้านออกได้เพียง 2 ค่าเท่านั้นคือแรงดันบวกและแรงดันลบ ขั้วของแรงดันด้านออกจะขึ้นอยู่กับสถานะการนำกระแสของสวิตช์แต่ละตัวในแขนดังแสดงในตารางที่ 4.1 ส่วนการสร้างแรงดันศูนย์ด้านออกเป็นไปได้ 2 กรณีคือ

1) สวิตช์ S2 และ D+ นำกระแส กระแสจะไหลออกจากจุด O 2) สวิตช์ S3 และ D- นำกระแส กระแสจะไหลเข้าจุด O

ตารางที่ 4.1 แสดงสถานะของสวิตช์กำลังสำหรับอินเวอร์เตอร์สามระดับแบบตริงจุดนิวทรัล

บัสเชื่อมต่อ	แรงดันเฟสเทียบจุด O	S1	S2	S3	S4
P	v_{C1}	ON	ON	OFF	OFF
O	0	OFF	ON	ON	OFF
N	$-v_{C2}$	OFF	OFF	ON	ON

การสร้างอินเวอร์เตอร์สามระดับแบบตริงจุดนิวทรัลของเครื่องต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการนี้จะพัฒนาแผงวงจร (print circuit board, PCB) เป็นแผ่นวงจรหนึ่งเฟสโดยแต่ละเฟสประกอบด้วยสวิตช์กำลังแบบบิสคริปต์ประเภทไอจีบีที (Insulated-gate bipolar transistor, IGBT) จำนวน 4 ตัวและไดโอดจำนวน 2 ตัว ในงานวิจัยนี้ออกแบบให้อินเวอร์เตอร์รองรับพิกัดกำลัง 3000 VA เพื่อเชื่อมต่อโครงข่ายที่ระดับแรงดันระหว่างสาย 380 V RMS ดังนั้นกระแสที่ไหลในสายจะมีค่าพิกัดกระแสไม่เกิน 4.55 A RMS อีกทั้งต้องรองรับกับการใช้งานในระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ส่วนใหญ่จะต้องรองรับการใช้แรงดันบัสไฟตรงค่อนข้างสูงระดับ 600 – 1000 V DC เพื่อป้องกันการเสียหายของอุปกรณ์เนื่องจากการสวิตช์แบบแข็ง (hard switching) ที่ความถี่ 10 kHz จึงเลือกอุปกรณ์ที่มีรุ่นและพิกัดของอุปกรณ์แสดงได้ดังตารางที่ 4.2 ซึ่งมีส่วนเพื่อความปลอดภัยเพียงพอสำหรับการกระเพื่อมของแรงดันและกระแส

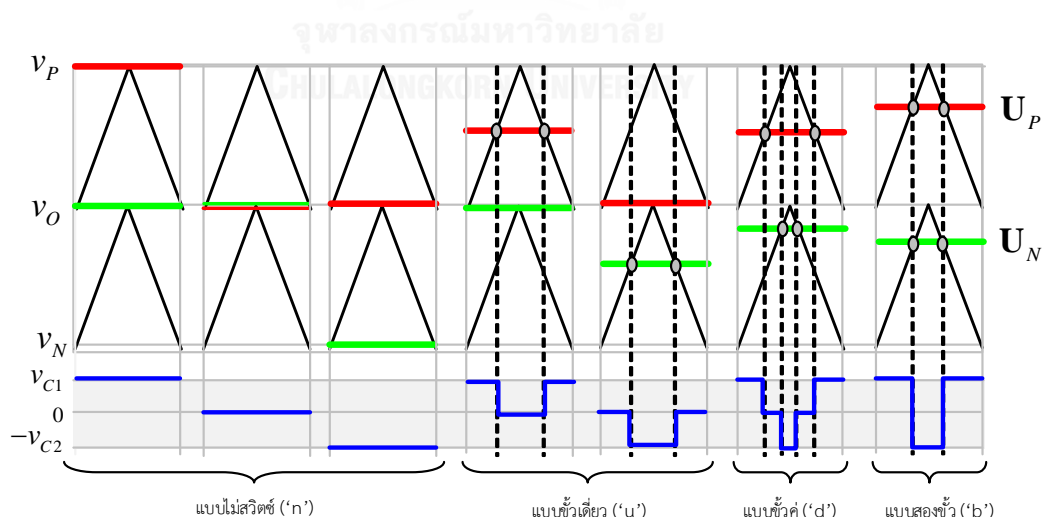
ตารางที่ 4.2 รุ่นและพิกัดของอุปกรณ์ที่เลือกใช้ในวงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับ

อุปกรณ์	พิกัดแรงดัน (V)	พิกัดกระแส (A)
IGBT with anti-parallel diode IRG7PH35UD1PBF	1200	20
Clamping diode RHRP15120 (Hyper fast diode)	1200	15

การมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะเป็นวิธีหนึ่งที่มีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในอินเวอร์เตอร์สองระดับและอินเวอร์เตอร์สามระดับ ในวิธีนี้ตำแหน่งและช่วงเวลาการนำกระแสของสวิตช์ในแต่ละเฟสได้มาจากการเปรียบเทียบสัญญาณอ้างอิงหรือฟังก์ชันการมอดูเลตกับคลื่นพาหะสำหรับอินเวอร์เตอร์สามระดับจะมีความพิเศษกว่าอินเวอร์เตอร์สองระดับคือจะมีการใช้คลื่นพาหะ

และสัญญาณอ้างอิง (U_P, U_N) จำนวน 2 ชุด โดยคลื่นพาหะตัวบนจะแสดงถึงแรงดันครึ่งบัสบวก ($v_p - v_o$) และคลื่นพาหะตัวล่างจะแสดงถึงแรงดันครึ่งบัสลบ ($v_o - v_N$) ดังนั้นค่าของฟังก์ชันการมอดูเลตจำนวน 2 ตัวในลักษณะต่างๆจะทำให้เกิดรูปแบบการสวิตช์แตกต่างกัน 4 รูปแบบดังแสดงในรูปที่ 2.9 ได้แก่

- 1.) แบบไม่สวิตช์ (non-switching) ในที่นี้จะใช้สัญลักษณ์แทนว่า “n” หมายถึงการต่อแรงดันเฟสด้านออกเข้ากับบัสบวก บัสศูนย์ หรือบัสลบตลอดคาบการสวิตช์ กรณีแรงดันด้านออกมีค่าเท่ากับ v_p, v_o, v_N ตามลำดับ
- 2.) แบบขั้วเดียว (unipolar switching) ในที่นี้จะใช้สัญลักษณ์แทนว่า “u” หมายถึงการใช้แรงดันบัส v_p, v_o หรือ v_N, v_o ในการสร้างแรงดันด้านออก ในกรณีนี้จะมีจำนวนการสวิตช์ 2 ครั้งในหนึ่งคาบการสวิตช์ มีข้อดีคือระลอกของกระแสและแรงดันด้านออกต่ำกว่าแบบอื่น และเป็นวิธีการมอดูเลตที่ได้รับความนิยมมากที่สุด
- 3.) แบบขั้วคู่ (dipolar switching) ในที่นี้จะใช้สัญลักษณ์แทนว่า “d” หมายถึงการใช้ทั้งแรงดันบัส v_p, v_o, v_N ทั้ง 3 บัสในการสร้างแรงดันด้านออก ในกรณีนี้จะมีจำนวนการสวิตช์ 4 ครั้งในหนึ่งคาบการสวิตช์ มีข้อดีคือมีอิสระมากขึ้นในการเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีความหลากหลายในการสร้างแรงดันด้านออก
- 4.) แบบสองขั้ว (bipolar switching) ในที่นี้จะใช้สัญลักษณ์แทนว่า “b” หมายถึงการใช้ทั้งแรงดันบัส v_p หรือ v_N เท่านั้นในการสร้างแรงดันด้านออก ในกรณีนี้จะมีจำนวนการสวิตช์ 2 ครั้งในหนึ่งคาบการสวิตช์



รูปที่ 2.9 รูปแบบของการสวิตช์สำหรับการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะ 2 ชุด

สิ่งที่ต้องคำนึงถึงเป็นอย่างมากสำหรับการใช้อินเวอร์เตอร์สามระดับคือแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุทั้งสองตัวที่ต่ออนุกรมอาจจะเกิดความไม่สมดุลเนื่องจากการทำงานที่ไม่สมมาตรของวงจรกำลังและการแกว่งที่ความถี่ต่ำของของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุด้วยฮาร์มอนิกที่สามของความถี่หลักมูลของแรงดันด้านออกในสภาวะการจ่ายกำลังด้านออกที่ตัวประกอบกำลังที่ต่ำหรือมีตรีซนการมอดูเลตสูง ซึ่งการแกว่งของแรงดันจุดกึ่งกลางบัสนี้จะส่งให้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำและตัวเก็บประจุที่เชื่อมต่อระหว่างบัสบวกและบัสทำงานนอกย่านความปลอดภัยของพิกัดแรงดัน ซึ่งจะส่งผลต่อการใช้งานอินเวอร์เตอร์ในระยะยาว งานวิจัย [17, 18] ได้นำเสนอวิธีการมอดูเลตแบบซัวเดี่ยว 2 เฟสและแบบซัวคู่ 1 เฟส (2u1d) ด้วยการประยุกต์ใช้ทฤษฎีเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์และการควบคุมสมดุลแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้วยการควบคุมกระแสนิวทรัล ซึ่งพิสูจน์ให้เห็นแล้วว่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุทั้งสองมีความสมดุลกันจริงทุกเงื่อนไขการทำงาน ผู้เขียนจึงได้นำวิธีการมอดูเลตดังกล่าวมาใช้งานกับอินเวอร์เตอร์สามระดับในวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งมีขั้นตอนการคำนวณฟังก์ชันการมอดูเลตก่อนจะนำไปเปรียบเทียบกับคลื่นพาหะกล่าวโดยสรุปได้ดังนี้

- 1.) คำนวณค่า $\|\mathbf{v}_i\|^2 = v_p^2 + v_o^2 + v_N^2$
- 2.) คำนวณแรงดัน v_p, v_o, v_N ด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์เทียบกับจุดนิวทรัลเสมือนที่กำหนดขึ้นในรูปที่ 4.2 เพื่อให้แรงดันด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์สามระดับมีผลรวมเป็นศูนย์เช่นเดียวกับแรงดันด้านเข้าของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่เป็นแหล่งแรงดันสามเฟสสมดุล ดังสมการที่(4.1)

$$\begin{bmatrix} v_p \\ v_o \\ v_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{C1} \\ 0 \\ -v_{C2} \end{bmatrix} - \frac{v_{C1} - v_{C2}}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

- 3.) คำนวณพารามิเตอร์อิสระ a, b เพื่อให้กระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อหนึ่งคาบการสวิตซ์ให้มีค่าเป็นศูนย์ ($i_o = 0$) สำหรับทุกเงื่อนไขของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุทั้งกรณีสมดุลและไม่สมดุลได้จากสมการ (4.2) เพื่อรักษาสมดุลของการอัด/คายประจุที่ตัวเก็บประจุทั้งสอง

$$a = a_0 = - \frac{v_o \sqrt{3}}{v_p - v_N} \left. \begin{array}{l} \\ b = 0 \end{array} \right\} \quad (4.2)$$

- 4.) คำนวณฟังก์ชันการมอดูเลตลำดับบวกและลำดับลบได้จากสมการ (4.3) และ (4.4)

$$\begin{bmatrix} m'_{uP} \\ m'_{vP} \\ m'_{wP} \end{bmatrix} = \frac{v_p + \frac{a}{\sqrt{3}} \cdot (v_N - v_o)}{\|\mathbf{v}_i\|^2} \begin{bmatrix} v_u^* \\ v_v^* \\ v_w^* \end{bmatrix} + \frac{b \cdot (v_N - v_o)}{3 \cdot \|\mathbf{v}_i\|^2} \begin{bmatrix} v_w^* - v_v^* \\ v_u^* - v_w^* \\ v_v^* - v_u^* \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$\begin{bmatrix} m'_{uN} \\ m'_{vN} \\ m'_{wN} \end{bmatrix} = \frac{v_N + \frac{a}{\sqrt{3}} \cdot (v_O - v_P)}{\|\mathbf{v}_i\|^2} \begin{bmatrix} v_u^* \\ v_v^* \\ v_w^* \end{bmatrix} + \frac{b \cdot (v_O - v_P)}{3 \cdot \|\mathbf{v}_i\|^2} \begin{bmatrix} v_w^* - v_v^* \\ v_u^* - v_w^* \\ v_v^* - v_u^* \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

โดยที่ v_u^*, v_v^*, v_w^* คือค่าแรงดันคำสั่งที่ต้องการให้อินเวอร์เตอร์สร้างแรงดันด้านออก

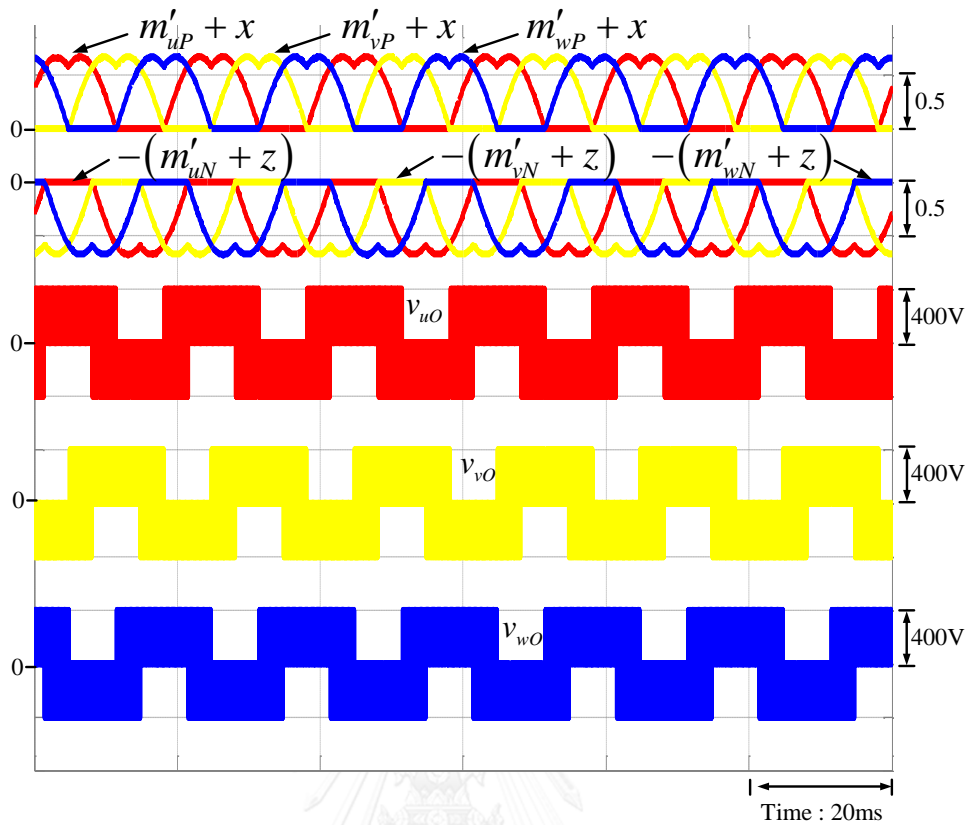
- 5.) คำนวณฟังก์ชันการมอดูเลตลำดับศูนย์เพื่อให้การมอดูเลตมีรูปแบบเป็นขั้วเดียว 2 เฟสและขั้วคู่ 1 เฟส (หรือ 2u1d) ดังสมการ

$$\begin{cases} x = -\min(m'_{uP}, m'_{vP}, m'_{wP}) \\ z = -\min(m'_{uN}, m'_{vN}, m'_{wN}) \end{cases} \quad (4.5)$$

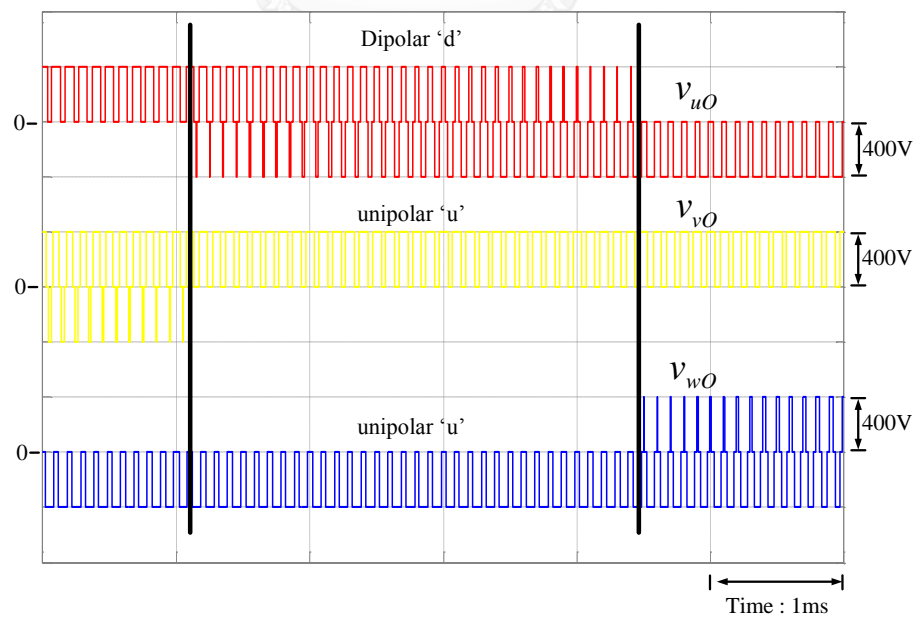
- 6.) จะเห็นว่าสัญญาณขั้วนำสวิตช์เกิดจากการเปรียบเทียบฟังก์ชันการมอดูเลตกับคลื่นพาหะ 2 ชุดและแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์สามารถเทียบเท่ากับจุดกึ่งกลางบัสหรือจุด 0 สามารถแสดงได้ดังสมการ (4.6)

$$\begin{bmatrix} v_{uO} \\ v_{vO} \\ v_{wO} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_u - v_O \\ v_v - v_O \\ v_w - v_O \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m'_{uP} + x \\ m'_{vP} + x \\ m'_{wP} + x \end{bmatrix} (v_P - v_O) + \begin{bmatrix} -(m'_{uN} + z) \\ -(m'_{vN} + z) \\ -(m'_{wN} + z) \end{bmatrix} (v_O - v_N) \quad (4.6)$$

รูปคลื่นฟังก์ชันการมอดูเลต $m'_{iP} + x$ และ $-(m'_{iN} + z)$ โดยที่ $i = \{u, v, w\}$ ของบัสบวกและบัสลบก่อนจะนำไปเปรียบเทียบกับคลื่นพาหะที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ (4.6) สามารถแสดงได้ดัง สำหรับแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์เทียบจุดกึ่งกลางบัสในรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 จะมีรูปแบบการสวิตช์เป็นแบบขั้วเดียว 2 เฟสและขั้วคู่ 1 เฟส (2u1d) ในทุกคาบการสวิตช์



รูปที่ 4.3 ฟังก์ชันการมอดูเลต m'_{iP}, m'_{iN} โดยที่ $i = \{u, v, w\}$ และแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ เทียบจุดกึ่งกลางบัสสำหรับการมอดูเลตแบบชั่วเดียว 2 เฟสชั่วคู่ 1 เฟส (2u1d)



รูปที่ 4.4 แรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์เทียบจุดกึ่งกลางบัสสำหรับการมอดูเลตแบบชั่วเดียว 2 เฟสชั่วคู่ 1 เฟส (2u1d) (ภาพขยาย)

4.1.2. วงจรขับนำสวิตช์กำลัง (gate drive circuit)

วงจรขับนำสวิตช์กำลังได้ถูกออกแบบให้รวมอยู่ในแผ่นวงจรหนึ่งเฟสของอินเวอร์เตอร์สามระดับเพื่อป้องกันการถูกรบกวน ไอซี HCPL-316J เป็นอุปกรณ์แยกโดดทางไฟฟ้า (electrical isolation) และใช้เป็นวงจรขับนำสวิตช์กำลัง ไอซีนี้มีคุณสมบัติพิเศษคือสามารถหยุดขับนำสวิตช์ได้ทันทีเมื่อเกิดความผิดปกติบางประการเช่น เกิดการลัดวงจรหรือมีกระแส shoot through โดยตรวจจับได้จากแรงดันที่ขา 14 (DESAT pin) ที่มีค่าเกิน 7 V จากนั้นจะส่งสัญญาณความผิดปกติ (fault) กลับมาเพื่อแจ้งเตือนให้ DSP ได้รับทราบ (active low) ดังนั้นฟังก์ชันนี้จึงสามารถช่วยป้องกันการเกิดความเสียหายต่อวงจรกำลังได้เป็นอย่างดี เพื่อให้ง่ายต่อออกแบบวงจรในหนึ่งเฟสและลดการใช้จำนวนช่อง I/O เราจึงสามารถรวม (tie) สัญญาณ fault ทั้ง 4 สัญญาณเป็นสัญญาณเดียวได้เพื่อแสดงถึงสัญญาณ fault สำหรับเฟสนั้นๆ

4.1.3. วงจรไดโอดเรียงกระแสไฟตรง (bridge diode circuit)

โดยปกติบัสไฟตรงที่ใช้ในงานของระบบผลิตจากพลังงานแสงอาทิตย์จะต้องนำแผงโฟโตวอลเทอิกมาต่ออนุกรมหลายๆแผงเพื่อสร้างแรงดันบัสไฟตรงและขนานเป็นอาร์เรย์เพื่อเพิ่มกระแสไฟตรง แต่ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้แหล่งแรงดันไฟตรงแทนแผงโฟโตวอลเทอิก ดังนั้นการออกแบบจะต้องรองรับต่อการใช้งานที่แรงดันไฟตรงค่าสูงระดับ 600 – 800 V DC และมีพิกัดกระแสสูงเพียงพอสำหรับอินเวอร์เตอร์ 3000 VA โมดูลไดโอดเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ RM15TA-2H ที่มีพิกัดแรงดันไฟตรงสูงถึง 1600 V และกระแสไฟตรง 30 A เหมาะสมที่ใช้เป็นแหล่งแรงดันไฟตรงในงานวิจัยนี้ ด้านเข้าของโมดูลบริดจ์ไดโอดใช้วาริแอกสามเฟสเพื่อปรับขนาดแรงดันบัสไฟตรงต่ออนุกรมกับหม้อแปลงสามเฟสแยกโดดทางไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนจำนวนรอบ 1 : 1.5 เท่าดังแสดงในรูปที่ 4.1 เพื่อเพิ่มแรงดันไฟตรงให้สูงถึงระดับ 700 V DC ตัวเก็บประจุแบบ electrolyte ขนาด 820 μF พิกัดแรงดัน 400 V จำนวน 2 ตัวต่ออนุกรมเพื่อแบ่งแรงดันไฟตรงเป็น 3 ค่าได้แก่แรงดันบัสบวกแรงดันบัสศูนย์และแรงดันบัสลบ เพื่อใช้เป็นบัสไฟตรงด้านเข้าสำหรับอินเวอร์เตอร์สามระดับ

4.1.4. วงจรกรองผ่านต่ำ LCL

สำหรับวงจรกรองผ่านต่ำในรูปที่ 4.1 จะออกแบบเพื่อกรองกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 ที่มีมอดูลประกอบความถี่การสวิตช์ 10 kHz ออกเพื่อให้กระแสที่ไหลเข้าโครงข่ายมีความใกล้เคียงรูปไซน์และมีมอดูลประกอบความถี่ฮาร์โมนิกต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนด ตัวเหนี่ยวนำด้านอินเวอร์เตอร์ขนาด 5 mH และตัวเก็บประจุขนาด 12.5 μF สามเฟสต่อแบบวายโดยมีความถี่หักมุมของวงจรกรองอยู่ที่ 637 Hz ซึ่งถือว่ามีความถี่เพียงพอที่จะกรององค์ประกอบความถี่การสวิตช์ได้และไม่ส่งผลกระทบต่อความถี่หลักมูลที่ 50 Hz

4.2. วงจรตรวจวัด (measurement circuits) และวงจรป้องกัน

ประกอบด้วยวงจรตรวจวัดแรงดัน วงจรตรวจวัดกระแส วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล บอร์ดแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก บอร์ดกลับสัญญาณ PWM เป็นต้น

4.2.1. วงจรตรวจวัดแรงดัน (voltage sensor)

วงจรตรวจวัดแรงดันจะใช้วัดแรงดันระหว่างสายสามเฟสที่จุดเชื่อมต่อเพื่อเป็นแรงดันอ้างอิงให้อินเวอร์เตอร์และใช้สำหรับคำนวณกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่จะป้อนเข้าโครงข่ายที่จุดเชื่อมต่อ นอกจากนี้ยังใช้วัดแรงดันบัสไฟตรงเพื่อใช้สำหรับการมอดูเลตแบบซัวเดี่ยว 2 เฟสซัวคู่ 1 เฟส (2u1d) เพื่อความปลอดภัยของวงจรส่วนควบคุมที่อยู่ด้านแรงต่ำและป้องกันการเกิดความเสียหายเนื่องจากการลัดวงจรของวงจรกำลังที่มีแรงดันสูง การแยกโดดทางไฟฟ้าเป็นเรื่องสำคัญที่ควรพิจารณา การใช้หม้อแปลงลดระดับแรงดันจะทำให้แรงดันที่วัดได้อยู่ในย่านของวงจรขยายสัญญาณและยังแยกโดดทางไฟฟ้าแต่ยังมีข้อจำกัดคือไม่สามารถวัดแรงดันไฟตรงได้อีกด้วย ไอซี ACPL-C79B เป็นตัวขยายสัญญาณแบบแยกโดดทางไฟฟ้าที่มีความแม่นยำสูง ($\pm 0.5\%$ accuracy) และแบนด์วิดท์สูง 200 kHz แรงดันด้านเข้าออกแบบให้รองรับการวัดแรงดันค่ายอดได้สูงถึง 1080 V (สูงกว่าค่ายอดของแรงดันระหว่างสาย 2 เท่า) ถูกลดขนาดด้วยวงจรแบ่งแรงดันเป็นแรงดันด้านเข้าของไอซีและให้สัญญาณด้านออกแบบ differential ซึ่งมีข้อดีคือช่วยกำจัดแรงดันโหมตรวม (common mode voltage) วงจรขยายสัญญาณแบบ differential amplifier ด้วยไอซี AD8022 ถูกใช้เพื่อขยายสัญญาณจากไอซี ACPL-C79B เพื่อให้แรงดันด้านออกของวงจรตรวจวัดมีค่าเหมาะสมกับย่านของแรงดันด้านเข้าของวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลซึ่งถูกเลือกไว้ที่ $\pm 10V$ ทั้งนี้ค่าอัตราขยายของบอร์ดตรวจวัดแรงดันมีค่าเท่ากับ $10V/1080V$

4.2.2. วงจรตรวจวัดกระแส (current sensor)

วงจรตรวจวัดกระแสจะใช้วัดกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 เพื่อใช้เป็นค่าป้อนกลับของวงรอบควบคุมกระแสและใช้วัดกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_2 เพื่อคำนวณกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่ไหลเข้าโครงข่ายที่จุดเชื่อมต่อและใช้เป็นค่าป้อนกลับของวงรอบควบคุมกำลัง เนื่องจากอินเวอร์เตอร์มีพิกัดกำลัง 3000 VA และมีกระแสไหลในสายเท่ากับ 4.55 A RMS เซนเซอร์วัดกระแส HX10-NP จากผู้ผลิต LEM มีพิกัดกระแส 10A RMS (สูงกว่าพิกัดอินเวอร์เตอร์ 2 เท่า) มีคุณสมบัติคือมีการแยกโดดทางไฟฟ้าแบบ hall effect และแบนด์วิดท์สูง 50 kHz ซึ่งถือว่าสูงเพียงพอสำหรับการวัดกระแสในงานวิจัยนี้ ส่วนวงจรขยายสัญญาณแบบ inverting amplifier ด้วยไอซี AD8022 ถูกใช้เพื่อขยายสัญญาณจากเซนเซอร์วัดกระแสเพื่อให้แรงดันด้านออกของวงจรตรวจวัดมีค่าเหมาะสมกับ

ย่านของแรงดันด้านเข้าของวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอลซึ่งถูกเลือกไว้ที่ $\pm 10V$ ทั้งนี้ค่าอัตราขยายของบอร์ดตรวจวัดกระแสมีค่าเท่ากับ 8V/10A

4.2.3. วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล (analog to digital converter, ADC)

การแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอลถือว่าเป็นสิ่งที่สำคัญมากที่จะทำให้ DSP เห็นค่าที่อ่านได้จากวงจรวัดอย่างถูกต้อง โดยปกติตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล TMS320F2812 ได้รวมโมดูลแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอลไว้ในชิปเรียบร้อยแล้วซึ่งมีรายละเอียดสเปกคร่าวดังนี้ ความละเอียด 12 bits ค่าความผิดพลาดโดยรวม ± 200 LSB (โดยที่ 1 LSB = 0.732 mV) รองรับเฉพาะสัญญาณแอนะล็อกแบบ unipolar ที่มีย่านแรงดันสูงสุดเพียง 0 – 3 V ปัญหาจากการใช้ ADC build in ในชิป TMS320F2812 คือมีค่าความผิดพลาดสูงมากและการอ่านค่าสัญญาณ bipolar จำเป็นต้องใช้วงจรบวก offset เพิ่มเติมซึ่งทำให้ความแม่นยำของการแปลงสัญญาณขึ้นอยู่กับความแม่นยำของวงจรบวก offset อีกด้วย อีกทั้งย่านสัญญาณแอนะล็อกด้านเข้ามีค่าต่ำเพียง 3 V ซึ่งอยู่ในพิสัยของสัญญาณรบกวนอาจจะทำให้เกิดการแปลงค่าสัญญาณผิดพลาดได้

บอร์ดแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอลภายนอกสำเร็จรูป EVAL-AD7606/07/08EDZ จากผู้ผลิต ANALOG DEVICES โดยมีไอซีหลัก AD7607 เป็นตัวแปลงสัญญาณจากแอนะล็อกเป็นดิจิตอลจำนวน 8 ช่องที่มีความละเอียด 14 bits มีค่าความผิดพลาดโดยรวม (total unadjusted error) ค่อนข้างต่ำเพียง ± 6 LSB (โดยที่ 1 LSB = 0.305 mV) และสามารถรองรับสัญญาณแอนะล็อกแบบ bipolar ที่มีย่านแรงดันสูงสุดถึง $\pm 10V$ (หรือสูงถึง 20 V peak to peak) รองรับการเชื่อมต่อที่หลากหลายทั้ง serial และ parallel (ในที่นี้จะใช้การเชื่อมต่อแบบ parallel เนื่องจากการเชื่อมต่อแบบ serial (SPI) ใช้สำหรับการแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะล็อก โดยออกแบบฮาร์ดแวร์ให้รองรับกับการใช้ชิป AD7606 ความละเอียด 16 bits ด้วย) มีช่วงเวลาการแปลงสัญญาณ 4 ไมโครวินาทีซึ่งถือว่าไม่สูงนักสำหรับรอบเวลาในการคำนวณของ DSP ที่มีช่วงเวลาทั้งสิ้น 100 ไมโครวินาที (ความถี่การสวิตช์ 10 kHz) การออกแบบการติดตั้งบอร์ดแปลงสัญญาณ ADC จะติดตั้งในตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับวงจรตรวจวัดมากที่สุดเพื่อลดผลของความยาวของสายสัญญาณแอนะล็อกซึ่งอาจจะถูกรบกวนต่อสัญญาณที่ไม่พึงประสงค์ได้

4.2.4. วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะล็อก (digital to analog converter, DAC)

ผู้พัฒนาโปรแกรมมีความจำเป็นต้องดูค่าหรือตัวแปรที่เป็นดิจิตอลจากการคำนวณเพื่อใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของการเขียนโปรแกรมและการคำนวณ วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะล็อกด้วยไอซี TLV5630I จากผู้ผลิต Texas Instrument จำนวน 8 ช่องสัญญาณแอนะล็อกด้านออก ความละเอียด 12 บิต ถูกใช้เพื่อแปลงสัญญาณดังกล่าวผ่านการเชื่อมต่อแบบ serial ผ่านโมดูล

SPI ของ DSP วงจรขยายสัญญาณถูกใช้เพื่อขยายสัญญาณแอนะล็อกให้อยู่ในย่านที่เหมาะสมต่อการวัดด้วย oscilloscope ทั้งนี้ออกแบบเลือกใช้สายเคเบิล RG-58A/U ที่มีชิลด์ลุ่มิเนียมภายในและใช้หัวต่อสายชนิด BNC ทั้งสองข้างเพื่อป้องกันการการรบกวนจากการเชื่อมต่อสาย

4.2.5. บอร์ดกลับสัญญาณ PWM และวงจรป้องกัน

เนื่องจากช่องการเชื่อมต่อสัญญาณ PWM1 – PWM12 ในโมดูล event manager (EVA, EVB) ของ DSP มีการ pull up อยู่ในภายใน (สังเกตได้จากกรอบสีแดงในรูปที่ 4.5) ดังนั้นจะทำให้สถานะลอจิกปกติของ pins นี้เป็น high เมื่อเปิด/รีเซ็ต DSP (logic high หมายถึงสวิตช์ on , logic low หมายถึงสวิตช์ off) ซึ่งจะทำให้เกิดความไม่ปลอดภัยต่อวงจรอินเวอร์เตอร์ได้เนื่องจากผู้พัฒนาโปรแกรมอาจจะรีเซ็ตหรือเปิด DSP ในขณะที่ยังมีแรงดันบัสไฟตรงค้างอยู่จะทำให้สวิตช์ทุกตัวในอินเวอร์เตอร์ on พร้อมกันนั้นหมายความว่าเกิดการลัดวงจรที่บัสไฟตรงจนเกิดความเสียหายต่อสวิตช์ได้ ดังนั้นจึงควรที่จะมีการกลับ logic ของ pins นี้ให้อยู่สถานะ low ตลอดเวลาไม่ว่าจะเปิดหรือรีเซ็ต DSP แม้ขณะยังคงมีบัสไฟตรงก็ไม่เกิดอันตรายต่อวงจรอินเวอร์เตอร์ ไอซี SN74LS04 หรือ NOT GATE ถูกใช้เพื่อกลับสถานะของขา PWM1 – PWM12 ให้สถานะปกติมีค่าเป็น low หรือเท่ากับสวิตช์ off จากนั้นส่งผ่านไปยังไอซี SN74LS08 หรือ AND GATE เพื่อกำหนดเงื่อนไขสถานะด้านออกของขา PWM (ด้านออกของ AND GATE = low แปลว่าสวิตช์ไม่นำกระแส) โดยอินพุตอีกขาหนึ่งเป็น Trigger จากภายนอกที่ออกแบบให้เข้ามามีส่วนร่วมในการตัดวงจรหรือหยุดขับนำสวิตช์ เช่นวงจรป้องกันกระแสเกิน (over current protection circuit) เพื่อแจ้งเตือนกระแสที่ไหลผ่านเซนเซอร์มีค่ามากกว่ากระแสขีดเริ่มเปลี่ยน (threshold current) ที่ตั้งไว้ ด้านออกของไอซี SN74LS08 จะส่งผ่านสัญญาณ PWM ไปยังไอซี SN74LS07 หรือ buffer with open-collector เพื่อ pull up ระดับลอจิกของสัญญาณ PWM ให้มีค่า 3.3 V ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วงของแรงดัน input pin V_{in+}, V_{in-} ที่ datasheet กำหนดไว้ โดยการส่งผ่านสัญญาณผ่านไอซีทั้ง 3 ตัวมีช่วงเวลา delay ทั้งหมดมากที่สุดอยู่ที่ $30 + 35 + 40 = 105$ ns ซึ่งถือว่าไม่กระทบต่อความกว้างพัลส์ของการการสวิตช์และช่วงเวลาประวิง (dead time)

อีกทั้งยังออกแบบการจัดการขา fault ที่วงจรขับนำสวิตช์กำลังแต่ละเฟสส่งกลับมายัง DSP โดยการนำสัญญาณขา fault (active low) ของแต่ละเฟสมาเข้าไอซี SN74LS08 หรือ AND GATE เพื่อรวมเป็นสัญญาณ fault trigger จากนั้นจะส่งผ่านไปยัง DSP ผ่านช่องการเชื่อมต่อ Non Maskable Interrupt, NMI หรือขา GPIOE2 - XNMI_XINT13 ซึ่งเป็น external interrupt ที่ให้ลำดับความสำคัญ (priority) สูงที่สุด โดยมีเงื่อนไขว่าหากมีการขัดจังหวะ (interrupt) นี้เกิดขึ้นให้หยุดการขับนำสวิตช์กำลังทุกตัว ดังนั้นทันทีที่เกิดความผิดปกติขึ้นที่สวิตช์กำลัง DSP จะสามารถรับรู้และสั่งหยุดการทำงานของอินเวอร์เตอร์ได้ทันก่อนที่จะเกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ได้

GPIOA OR EVA SIGNALS						
GPIOA0 - PWM1 (O)	M12	92	68	I/O	PU	GPIO or PWM Output Pin #1
GPIOA1 - PWM2 (O)	M14	93	69	I/O	PU	GPIO or PWM Output Pin #2
GPIOA2 - PWM3 (O)	L12	94	70	I/O	PU	GPIO or PWM Output Pin #3
GPIOA3 - PWM4 (O)	L13	95	71	I/O	PU	GPIO or PWM Output Pin #4
GPIOA4 - PWM5 (O)	K11	98	72	I/O	PU	GPIO or PWM Output Pin #5
GPIOA5 - PWM6 (O)	K14	101	75	I/O	PU	GPIO or PWM Output Pin #6
GPIOB OR EVB SIGNALS						
GPIOB0 - PWM7 (O)	N2	45	33	I/O	PU	GPIO or PWM Output Pin #7
GPIOB1 - PWM8 (O)	P2	46	34	I/O	PU	GPIO or PWM Output Pin #8
GPIOB2 - PWM9 (O)	N3	47	35	I/O	PU	GPIO or PWM Output Pin #9
GPIOB3 - PWM10 (O)	P3	48	36	I/O	PU	GPIO or PWM Output Pin #10
GPIOB4 - PWM11 (O)	L4	49	37	I/O	PU	GPIO or PWM Output Pin #11
GPIOB5 - PWM12 (O)	M4	50	38	I/O	PU	GPIO or PWM Output Pin #12

รูปที่ 4.5 รายละเอียดของขา PWM1 – PWM12 ในโมดูล EVA และ EVB ที่มี internal pull up

4.3. ส่วนควบคุมและประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Processing, DSP)

ตัวควบคุมและประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320F2812 จาก Texas Instrument ความถี่สัญญาณนาฬิกา 150 MHz (6.6 ns cycle time) ซึ่งมีความรวดเร็วเพียงพอต่อการใช้งาน จำนวนช่องการเชื่อมต่อสูงถึง 56 ช่อง รองรับโมดูล event manager, EV ถึง 2 โมดูลที่มีช่องการเชื่อมต่อสัญญาณ PWM จำนวน 12 ช่อง เหมาะสมสำหรับการพัฒนาโปรแกรมสำหรับอินเวอร์เตอร์สามระดับ มีพอร์ตสำหรับเชื่อมต่ออนุกรม (Serial Peripheral Interface, SPI) จำนวน 1 โมดูล สำหรับแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกเพื่อผู้พัฒนาโปรแกรมสามารถดูค่าตัวแปรต่างๆในการคำนวณหรือตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมได้ รองรับช่อง JTAG เพื่อติดต่อสื่อสารกับคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ต USB ด้วย XDX100V2 USB Emulator และสามารถพัฒนาโปรแกรมด้วยภาษา C ผ่านซอฟต์แวร์ Code Composer Studio, CCS

บทที่ 5

การทดสอบการทำงาน

เนื้อหาในบทนี้จะนำเสนอผลการทดสอบการทำงานของการจำลองลักษณะสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสด้วยอินเวอร์เตอร์ การทดสอบการทำงานจะอาศัยการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink และการทดสอบกับเครื่องต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการเปรียบเทียบกัน ผลการทดสอบที่ได้จะช่วยยืนยันว่าแนวคิดในการจำลองลักษณะสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสด้วยอินเวอร์เตอร์ที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 2 นั้นสามารถทำงานได้จริงและสอดคล้องกับทฤษฎี

5.1. รายละเอียดการทดสอบการทำงาน

การทดสอบการทำงานจะประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ ฟังก์ชันการควบคุมแบบดรู๊ป การจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลและการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์ ในการจำลองการทำงานและการทดสอบกับเครื่องต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการใช้พารามิเตอร์ต่างๆในตารางที่ 5.1

การทดสอบการทำงานสำหรับฟังก์ชันการควบคุมแบบดรู๊ปและการจำลองลักษณะสมบัติความเฉื่อยทางกล อินเวอร์เตอร์จะทำงานในโหมดสนับสนุนโครงข่าย (grid supporting inverters mode) โดยที่เชื่อมต่อเข้ากับโครงข่ายไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อและมีภาพรวมของการควบคุมอินเวอร์เตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และใช้ค่าอัตราขยายของตัวควบคุม PI ของวงรอบควบคุมกระแสและวงรอบควบคุมกำลังที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อ 3.1 และ 3.2 การทดสอบการทำงานฟังก์ชันการควบคุมดรู๊ปจะพิจารณาถึงผลตอบสนองในการควบคุมกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่จุดเชื่อมต่อตามค่าคำสั่งกำลังจริงทุติยภูมิและค่าคำสั่งกำลังรีแอกทีฟทุติยภูมิเมื่อความถี่และขนาดของแรงดันเปลี่ยนแปลงตามโพรไฟล์ที่กำหนด และใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความชันของการควบคุมดรู๊ป $1/k_p, 1/k_q$ ตามที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อ 2.2.1 เมื่อพิจารณาจากพิกัดกำลังของอินเวอร์เตอร์ 3000 VA ระดับแรงดันระหว่างสายปกติ 380 V และความถี่ปกติ 50 Hz พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความชันของการควบคุมดรู๊ป $1/k_p$ ที่ออกแบบไว้ 2 pu./Hz จะมีค่าเท่ากับ 6000 W/Hz และค่าสัมประสิทธิ์ความชันของการควบคุมดรู๊ป $1/k_q$ ที่ออกแบบไว้ 1 pu./ $\pm 10\% V_{line}$ จะมีค่าเท่ากับ 83.33 VAR/V การทดสอบการทำงานฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลจะกำหนดให้อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ $df/dt = \pm 0.25 \text{ Hz/s}$ ซึ่งอ้างอิงจากสถิติการเปลี่ยนแปลงความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลังที่เกิดขึ้นบ่อยที่สุดในประเทศไอร์แลนด์ในงานวิจัย [16] และค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเสมือน K_d ให้มีค่าปรับได้ 4 ค่าได้แก่ $K_d = 4, 8, 12, 15 \text{ s}$ เพื่อยืนยันการทำงานทุกค่าคงตัว K_d ที่ข้อกำหนดการเชื่อมต่อโครงข่าย [15]

การทดสอบการทำงานสำหรับฟังก์ชันการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์ อินเวอร์เตอร์ จะทำงานในโหมดสร้างโครงข่าย (grid forming inverters mode) และมีภาพรวมของการควบคุม อินเวอร์เตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.7 และใช้ค่าอัตราขยายของตัวควบคุม PI ของวงรอบควบคุมแรงดันที่ได้ ออกแบบไว้ในหัวข้อ 3.2 โดยจะพิจารณาถึงผลตอบสนองในการควบคุมแรงดันด้านออกและการ เลื่อนเฟสระหว่างแรงดันเฟสที่ตรวจวัดได้กับค่าแรงดันเฟสคำสั่งเมื่อด้านออกของอินเวอร์เตอร์มีการ ปรับเปลี่ยนโหลด เมื่อพิจารณาจากพิกัดกำลังของอินเวอร์เตอร์ 3000 VA ระดับแรงดันระหว่างสาย ปกติ 380 V และความถี่ปกติ 50 Hz รีแอกแตนซ์ที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อ 2.2.3 มีค่า 0.114 pu. จะ เท่ากับค่าความเหนี่ยวนำอนุกรมเสมือน 17.46 mH



ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบการทำงาน

ชื่อพารามิเตอร์	ค่าที่ใช้	หน่วย
พารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์		
แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเข้า (แทนแผงโฟโตวอลเทอิก)	700	V
พิกัดกำลังของอินเวอร์เตอร์	3000	kVA
ระดับแรงดันระหว่างสายปกติ (nominal line to line voltage)	380	V
พิกัดกระแสของอินเวอร์เตอร์	4.55	A(rms)
ความถี่ปกติ (nominal frequency)	50	Hz
ความถี่การสวิตช์ (switching frequency)	10	kHz
พารามิเตอร์ของวงจรกรองผ่านต่ำ LCL		
ค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ, L_1, L_2	5	mH
ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ, C_F	12.5	μF
ค่าความต้านทานของตัวต้านทานหน่วง (damping resistors), R_d	15	Ω
พารามิเตอร์ของส่วนควบคุมแบบรูป		
สัมประสิทธิ์ความชันของกำลังจริง, $1/k_p$	6,000	W/Hz
สัมประสิทธิ์ความชันของกำลังรีแอกทีฟ, $1/k_q$	83.33	VAR/V
แถบไร้ผลตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงความถี่ (frequency dead band)	± 50	mHz
แถบไร้ผลตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงแรงดัน (voltage dead band)	± 15	V
พารามิเตอร์ของการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกล		
อัตราการเปลี่ยนแปลงของความถี่, df/dt	± 0.25	Hz/s
แถบไร้ผลตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงความถี่ (frequency dead band)	± 10	mHz
ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเสมือน K_d เปลี่ยนแปลง 4 ค่า	4,8,12,15	sec.
ค่าคงตัวทางเวลา (time constant, τ) ของ low pass filter	0.05	sec.
พารามิเตอร์ของการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์		
ค่าความเหนี่ยวนำอนุกรมเสมือน, L_s	17.46 (0.114)	mH (p.u.)

5.2. การทดสอบการทำงานสำหรับฟังก์ชันการควบคุมรูป

ผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองในรูปที่ 5.1 ถึงรูปที่ 5.12 แสดงถึงการทำงานของฟังก์ชันการควบคุมรูปของกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟสำหรับอินเวอร์เตอร์ที่ทำงานในโหมดสนับสนุนโครงข่ายที่มีภาพรวมตามรูปที่ 2.3 โดยจะทดสอบการทำงานใน 2 โหมดที่สำคัญได้แก่ 1.) การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่และขนาดแรงดันระหว่างสายของโครงข่ายตามโพรไฟล์ที่ตั้งค่าไว้ 2.) การทดสอบการจ่ายกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟตลอดย่านพิกัดกำลังของอินเวอร์เตอร์ต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ของโครงข่ายและขนาดของแรงดันระหว่างสายแบบแรมป์ ตามลำดับ

รูปที่ 5.1 ถึงรูปที่ 5.2 เป็นผลการจำลองการทำงานเปรียบเทียบกับผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนค่าความถี่ของโครงข่ายตามโพรไฟล์ที่ตั้งไว้ทุกๆ 0.5 วินาที และรูปที่ 5.3 ถึงรูปที่ 5.6 เป็นผลการจำลองการทำงานเปรียบเทียบกับผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความถี่แบบแรมป์จากค่า 49.5 Hz จนถึง 50.5 Hz เป็นเวลาช่วงเวลา 10 วินาที โดยมีเงื่อนไขของตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 5.2 พบว่าการทดสอบทั้ง 2 โหมดของฟังก์ชันการควบคุมรูปของกำลังจริงสามารถปรับลดค่าคำสั่งกำลังจริงเมื่อความถี่ของโครงข่ายเพิ่มขึ้นและสามารถปรับเพิ่มค่าคำสั่งกำลังจริงเมื่อความถี่ของโครงข่ายลดลงได้อย่างถูกต้อง โดยปริมาณการปรับเพิ่ม/ลดการจ่ายกำลังจริงเป็นไปตามค่าสัมประสิทธิ์การควบคุมรูป $1/k_r$ สอดคล้องตามความสัมพันธ์ในสมการ (2.13) โดยมีแถบไร้ผลตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงความถี่ถูกต้องตามค่าที่ตั้งไว้ (สังเกตได้จากการปรับเพิ่ม/ลดของค่าคำสั่งกำลังจริงของส่วนควบคุมรูปเท่ากับศูนย์เมื่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่ำกว่าแถบไร้ผลตอบสนอง) จะเห็นได้ว่าการทดสอบทั้ง 2 โหมดอินเวอร์เตอร์สามารถควบคุมกำลังจริงตามค่าคำสั่งได้อย่างถูกต้องโดยการจ่ายกำลังจริงมีผลตอบสนองทางเวลาเป็นไปตามค่าที่ออกแบบไว้ในหัวข้อ 3.2 อีกทั้งยังสามารถควบคุมการเพิ่ม/ลดการจ่ายกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟในสภาวะอยู่ตัวได้อย่างอิสระต่อกัน เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวแล้วอินเวอร์เตอร์สามารถควบคุมกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟได้โดยมีค่าความผิดพลาดใกล้เคียงศูนย์และมีค่าระลอกอยู่ในช่วง 0 – 100 W,VAR (คิดเป็น 0 – 3.3% ของพิกัดกำลังของอินเวอร์เตอร์) ซึ่งสามารถยืนยันได้ถึงสมรรถนะและเสถียรภาพของการควบคุมสำหรับฟังก์ชันการควบคุมรูปของกำลังจริง

รูปที่ 5.3 ถึงรูปที่ 5.6 แสดงให้เห็นถึงผลรวมของค่าคำสั่งกำลังจริงทุติยภูมิ (P^*) ที่มาจากส่วนควบคุมรูปและค่าคำสั่งกำลังจริงปฐมภูมิ (P^*) จะต้องมีค่าเป็นบวกเท่านั้นซึ่งแสดงถึงอินเวอร์เตอร์จ่ายกำลังงานเข้าสู่โครงข่ายทิศทางเดียวและจะต้องมีค่าไม่เกินค่าพิกัดกำลังของอินเวอร์เตอร์ที่กำหนดไว้ในตารางที่ 5.2 ตัวอย่างเช่นกรณีที่ความถี่ของโครงข่ายขณะนั้นมีค่า 49.5 Hz และค่าคำสั่งกำลังจริงปฐมภูมิ (P^*) ตั้งค่าไว้ที่ 1500 W ส่วนควบคุมรูปจะต้องเพิ่มการจ่ายกำลังจริงตามสมการ (2.13) เท่ากับ 3000 W ดังนั้นค่าคำสั่งกำลังจริงทุติยภูมิ (P^*) จะเท่ากับ 4500 W

(เส้นสีม่วงในรูปที่ 5.4 และรูปที่ 5.6) แต่อินเวอร์เตอร์จะสามารถส่งค่าคำสั่งกำลังจริงทฤษฎีและควบคุมกำลังจริงได้เท่ากับค่าพิกัดของอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 3000 W เท่านั้น (เส้นสีดำและเส้นสีแดงในรูปที่ 5.4 และรูปที่ 5.6) สำหรับกรณีค่าคำสั่งกำลังจริงปฏิกิริยาอื่นๆที่ทำให้ค่าคำสั่งกำลังจริงทฤษฎีมีค่าเกินพิกัดของอินเวอร์เตอร์ก็ใช้วิธีคิดในทำนองเดียวกับที่กล่าวไว้ข้างต้น

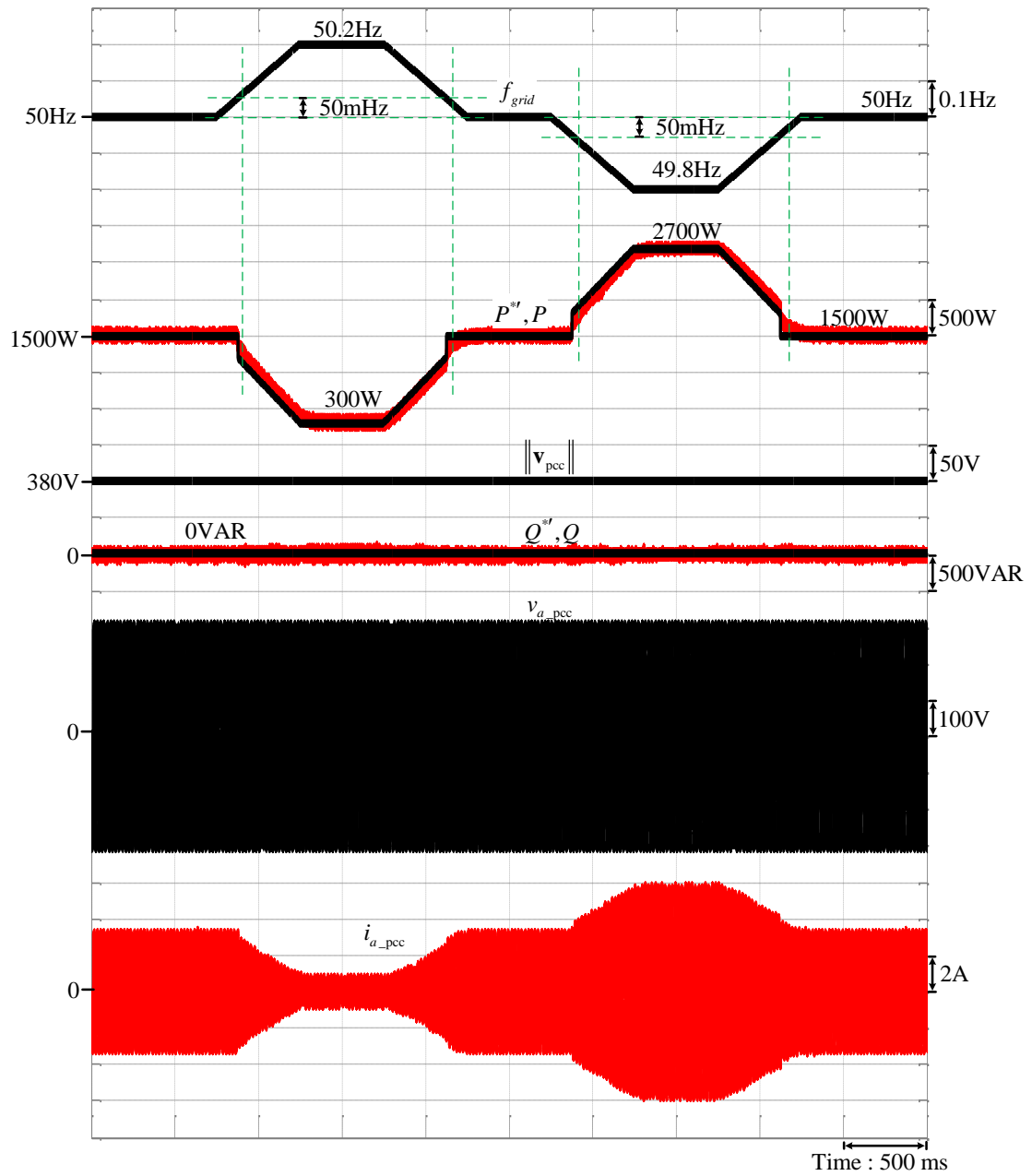
รูปที่ 5.7 ถึงรูปที่ 5.8 เป็นผลการจำลองการทำงานเปรียบเทียบกับผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนค่าขนาดของแรงดันตามโพรไฟล์ที่ตั้งไว้ทุกๆ 1 วินาทีและรูปที่ 5.9 ถึงรูปที่ 5.12 เป็นผลการจำลองการทำงานเปรียบเทียบกับผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันระหว่างสายแบบแรมป์จาก 335 V ถึง 425 V ในช่วงเวลา 10 วินาทีโดยมีเงื่อนไขตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 5.2 จะเห็นได้ว่าฟังก์ชันการควบคุมรูปของกำลังรีแอกทีฟสามารถปรับลดค่าคำสั่งกำลังรีแอกทีฟเมื่อขนาดแรงดันระหว่างสายเพิ่มขึ้นและสามารถปรับเพิ่มค่าคำสั่งกำลังรีแอกทีฟเมื่อขนาดแรงดันระหว่างสายลดลง โดยปริมาณการปรับเพิ่ม/ลดการจ่ายกำลังรีแอกทีฟเป็นไปตามค่าสัมประสิทธิ์การควบคุมรูป $1/k_q$ สอดคล้องตามความสัมพันธ์ในสมการ (2.14) โดยมีแถบรั้วผลตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันถูกต้องตามค่าที่ตั้งไว้ (สังเกตได้จากการปรับเพิ่ม/ลดของค่าคำสั่งกำลังรีแอกทีฟเท่ากับศูนย์เมื่อการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันต่ำกว่าแถบรั้วผลตอบสนอง) จะเห็นได้ว่าอินเวอร์เตอร์สามารถควบคุมกำลังรีแอกทีฟตามค่าคำสั่งได้อย่างถูกต้องโดยมีผลตอบสนองของการจ่ายกำลังรีแอกทีฟเป็นไปตามค่าที่ออกแบบไว้ในหัวข้อ 3.2 อีกทั้งยังสามารถควบคุมการเพิ่ม/ลดการจ่ายกำลังรีแอกทีฟและกำลังจริงในสภาวะอยู่ตัวได้อย่างอิสระต่อกัน เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวแล้วอินเวอร์เตอร์สามารถควบคุมกำลังรีแอกทีฟและกำลังจริงได้โดยมีความผิดพลาดใกล้เคียงศูนย์และมีค่าระลอกอยู่ในช่วง 0 – 100 W,VAR (คิดเป็น 0 – 3.3% ของพิกัดกำลังของอินเวอร์เตอร์) ซึ่งสามารถยืนยันได้ถึงสมรรถนะและเสถียรภาพของการควบคุมสำหรับฟังก์ชันการควบคุมรูปของกำลังรีแอกทีฟ

รูปที่ 5.9 ถึงรูปที่ 5.12 แสดงให้เห็นถึงผลรวมของค่าคำสั่งกำลังรีแอกทีฟทฤษฎี (Q^*) ที่มาจากส่วนควบคุมรูปและค่าคำสั่งกำลังรีแอกทีฟปฏิกิริยา (Q^*) สามารถมีค่าเป็นได้ทั้งบวกและลบโดยที่คำสั่งรีแอกทีฟที่มีค่าเป็นบวกจะแสดงถึงกระแสเฟสมีเฟสล่าหลัง (lagging) แรงดันเฟสหรืออินเวอร์เตอร์กำลังทำงานอยู่ในย่านตัวเหนี่ยวนำ (inductive) และคำสั่งรีแอกทีฟที่มีค่าเป็นลบจะแสดงถึงกระแสเฟสมีเฟสนำหน้า (leading) แรงดันเฟสหรืออินเวอร์เตอร์กำลังทำงานอยู่ในย่านตัวเก็บประจุ (capacitive) (สามารถสังเกตได้จากภาพขยายของรูปที่ 5.8) ทั้งนี้ค่าคำสั่งกำลังรีแอกทีฟทฤษฎี (Q^*) จะต้องมีค่าไม่เกินค่าพิกัดกำลังของอินเวอร์เตอร์ที่กำหนดไว้ในตารางที่ 5.2 ตัวอย่างเช่นกรณีที่ขนาดของแรงดันระหว่างสายเท่ากับ 335 V และค่าคำสั่งกำลังรีแอกทีฟปฏิกิริยา (Q^*) ตั้งค่าไว้ที่ 0 VAR ส่วนควบคุมรูปจะต้องเพิ่มการจ่ายกำลังรีแอกทีฟตามสมการ (2.14) เท่ากับ

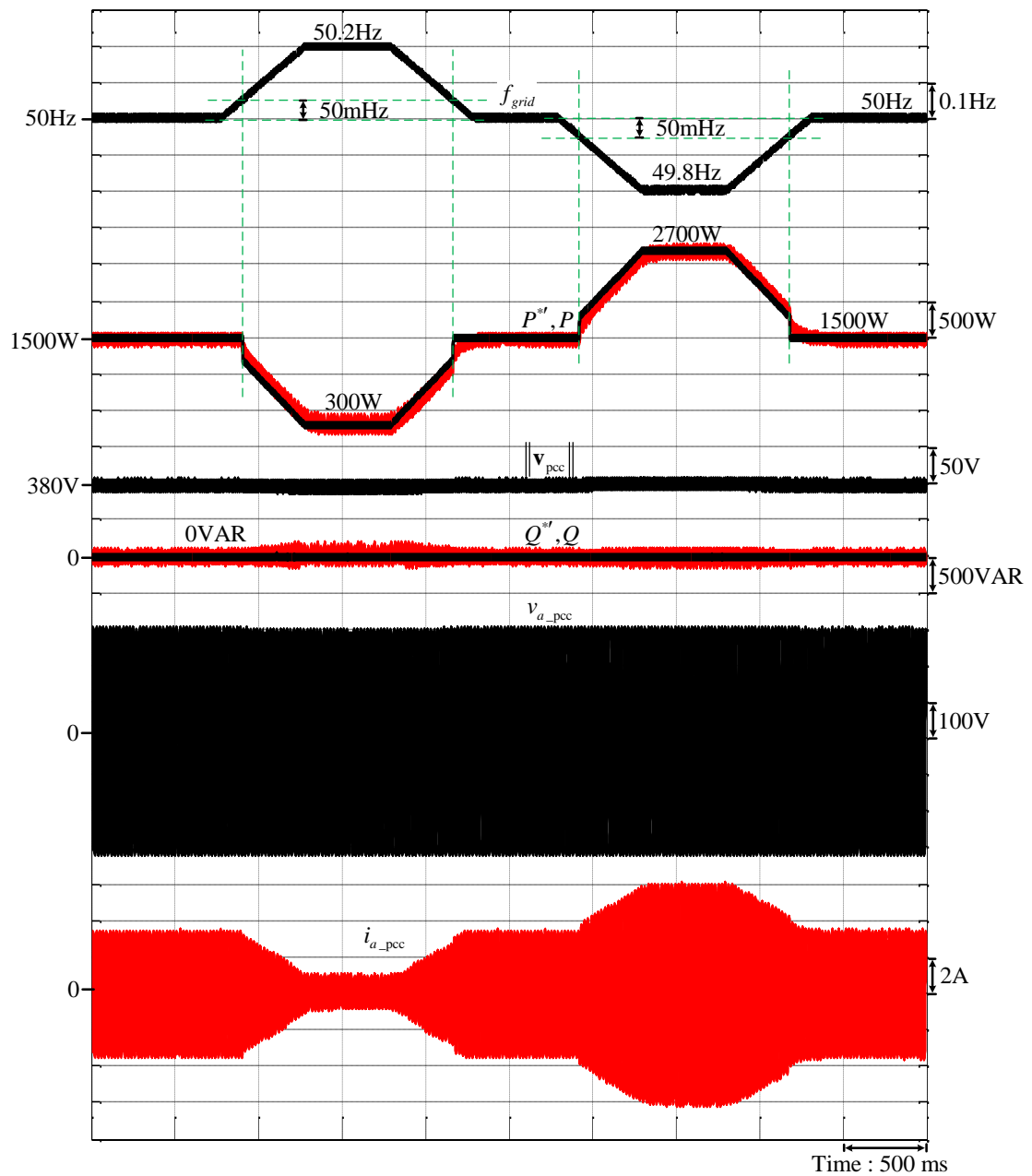
3750 VAR ดังนั้นค่ากำลังกำลังจริงพุดิยภูมิ (P^*) จะเท่ากับ 3750 VAR (เส้นสีม่วงในรูปที่ 5.10 และรูปที่ 5.12) แต่อินเวอร์เตอร์จะสามารถส่งค่ากำลังรีแอกทีฟพุดิยภูมิและควบคุมกำลังรีแอกทีฟได้เท่ากับค่าพิกัดของอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 3000 VAR เท่านั้น (เส้นสีดำและเส้นสีแดงในรูปที่ 5.10 และรูปที่ 5.12) สำหรับกรณีค่ากำลังรีแอกทีฟพุดิยภูมิอื่นๆที่ทำให้ค่ากำลังรีแอกทีฟพุดิยภูมิมีค่าเกินพิกัดของอินเวอร์เตอร์ก็ใช้วิธีคิดในทำนองเดียวกับที่กล่าวไว้ข้างต้น

ตารางที่ 5.2 เงื่อนไขการทดสอบการทำงานสำหรับฟังก์ชันการควบคุมรูป เมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดสนับสนุนโครงข่าย

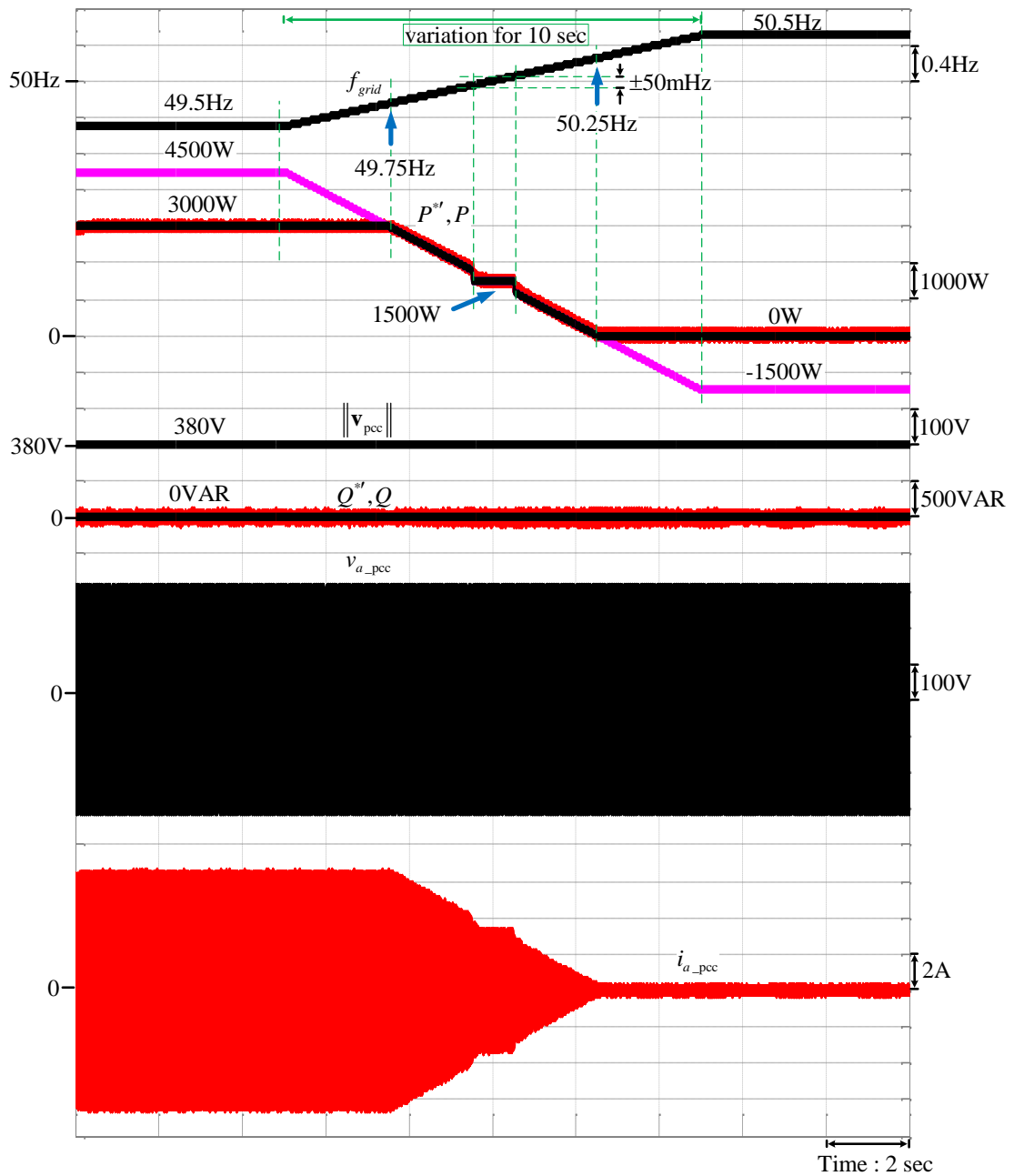
การทดสอบ	เงื่อนไขตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบ				ผลการจำลอง	ผลการทดลอง
	f (Hz)	$\ \mathbf{v}_{pcc}\ $ (V)	P^* (W)	Q^* (VAR)		
Change f profile	50->50.2 ->50-> 49.8->50	380	1500	0	รูปที่ 5.1	รูปที่ 5.2
Ramp f (10 sec.)	49.5->50.5	380	1500	0	รูปที่ 5.3 รูปที่ 5.5	รูปที่ 5.4 รูปที่ 5.6
Change $\ \mathbf{v}_{pcc}\ $ profile	50	380->410 ->380-> 350->380	1000	0	รูปที่ 5.7	รูปที่ 5.8
Ramp $\ \mathbf{v}_{pcc}\ $ (10 sec.)	50	335->425	0	0	รูปที่ 5.9 รูปที่ 5.11	รูปที่ 5.10 รูปที่ 5.12



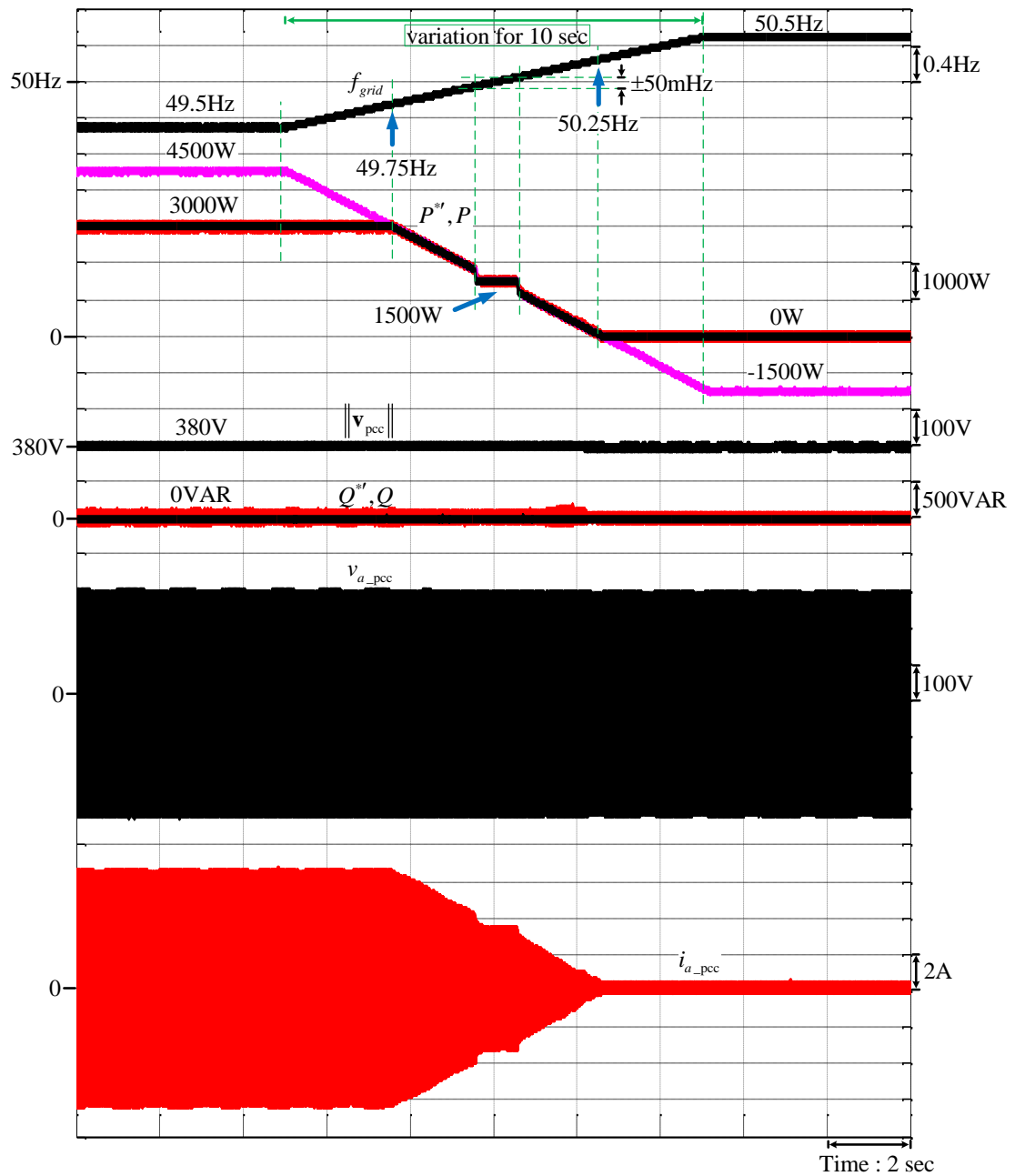
รูปที่ 5.1 ผลการจำลองการทำงานของฟังก์ชันการควบคุมรูปของกำลังจริงต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ของโครงข่ายตามโพรไฟล์ที่ตั้งไว้



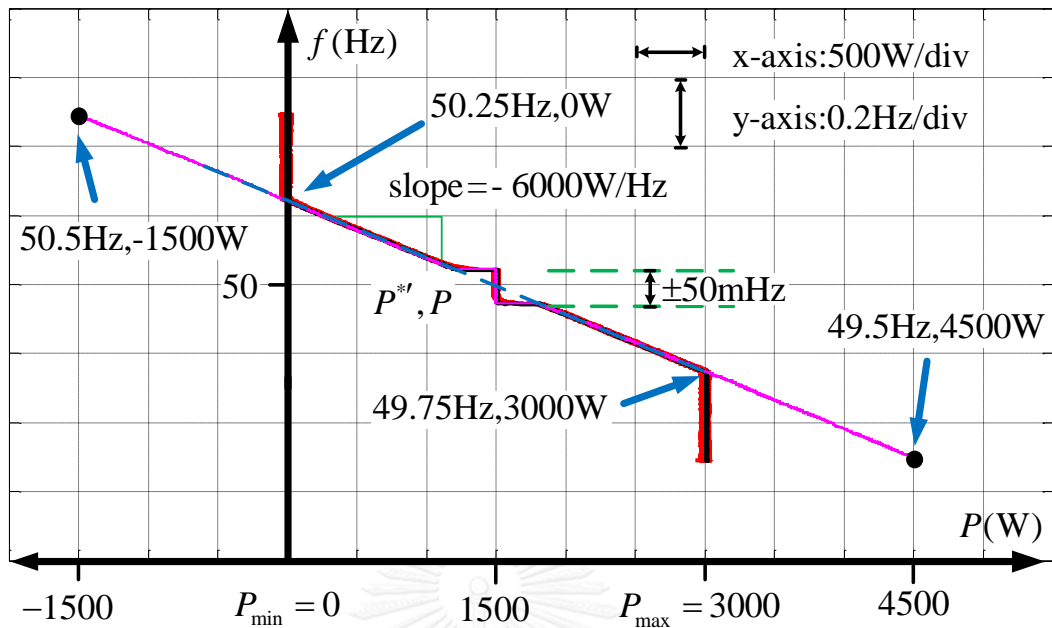
รูปที่ 5.2 ผลการทดลองของฟังก์ชันการควบคุมรูปของกำลังจริงต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ของโครงข่ายตามโพรไฟล์ที่ตั้งไว้



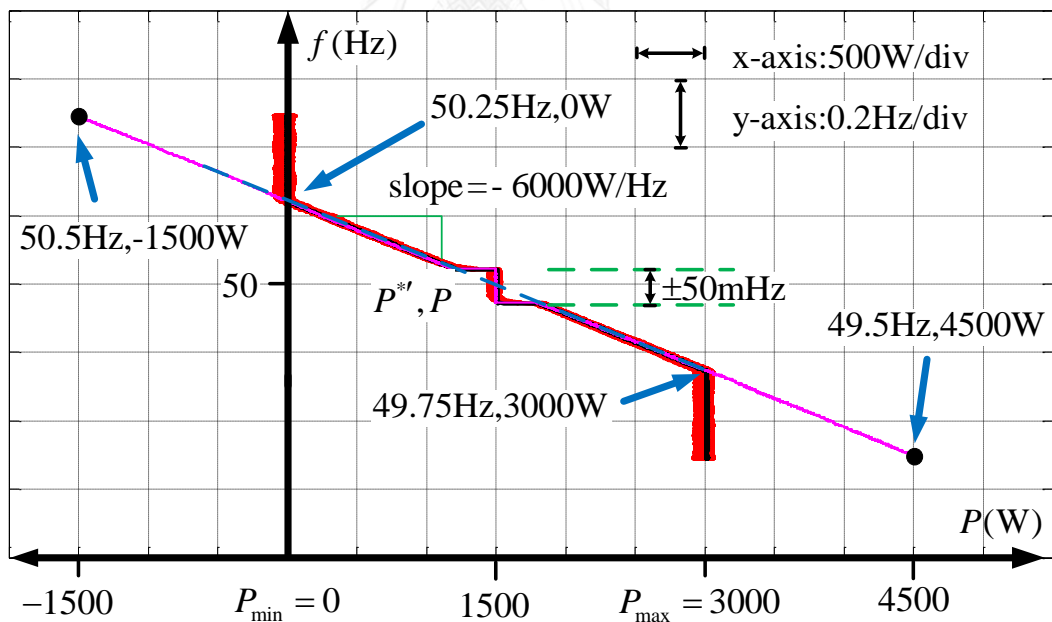
รูปที่ 5.3 ผลการจำลองการทำงานของฟังก์ชันการควบคุมรูปของกำลังจริงเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความถี่แบบแรมป์จาก 49.5 Hz -> 50.5 Hz



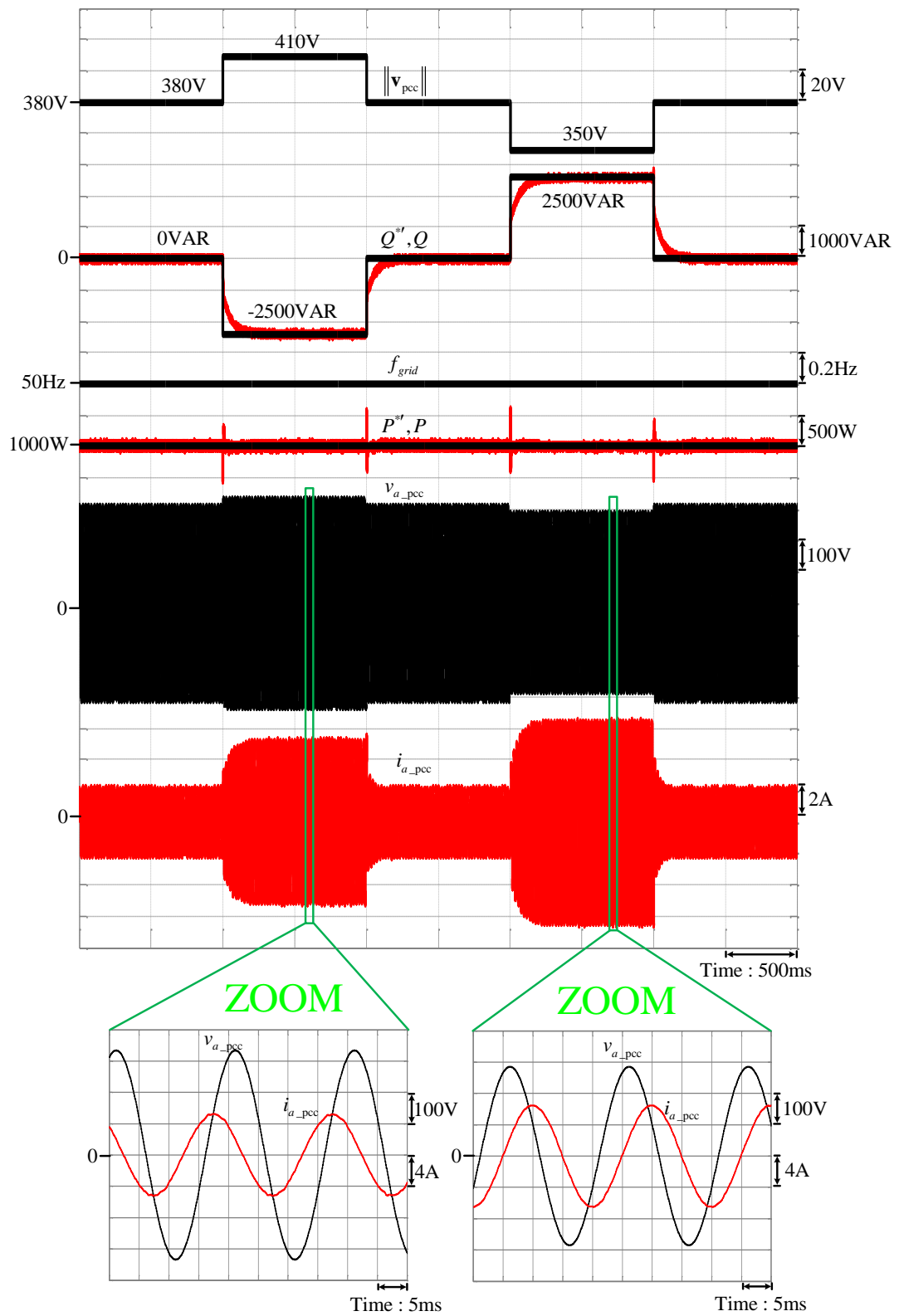
รูปที่ 5.4 ผลการทดลองของฟังก์ชันการควบคุมรูปของกำลังจริงเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความถี่แบบ
แรมป์จาก 49.5 Hz -> 50.5 Hz



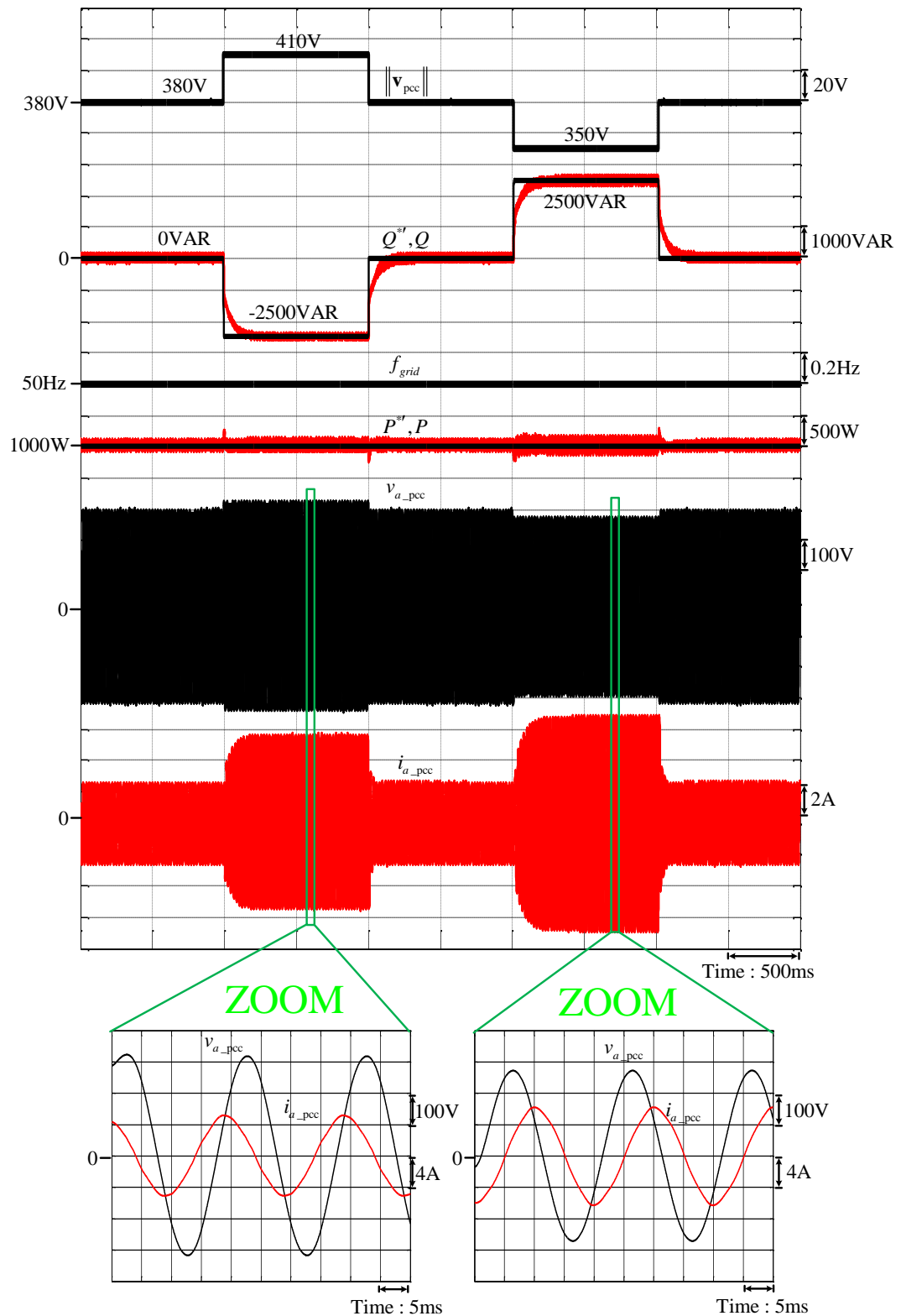
รูปที่ 5.5 ผลการจำลองการทำงานของฟังก์ชันการควบคุมรูปที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการจ่ายกำลังจริงตลอดย่านพิกัดกำลังของอินเวอร์เตอร์ต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ของโครงข่ายแบบแรมป์



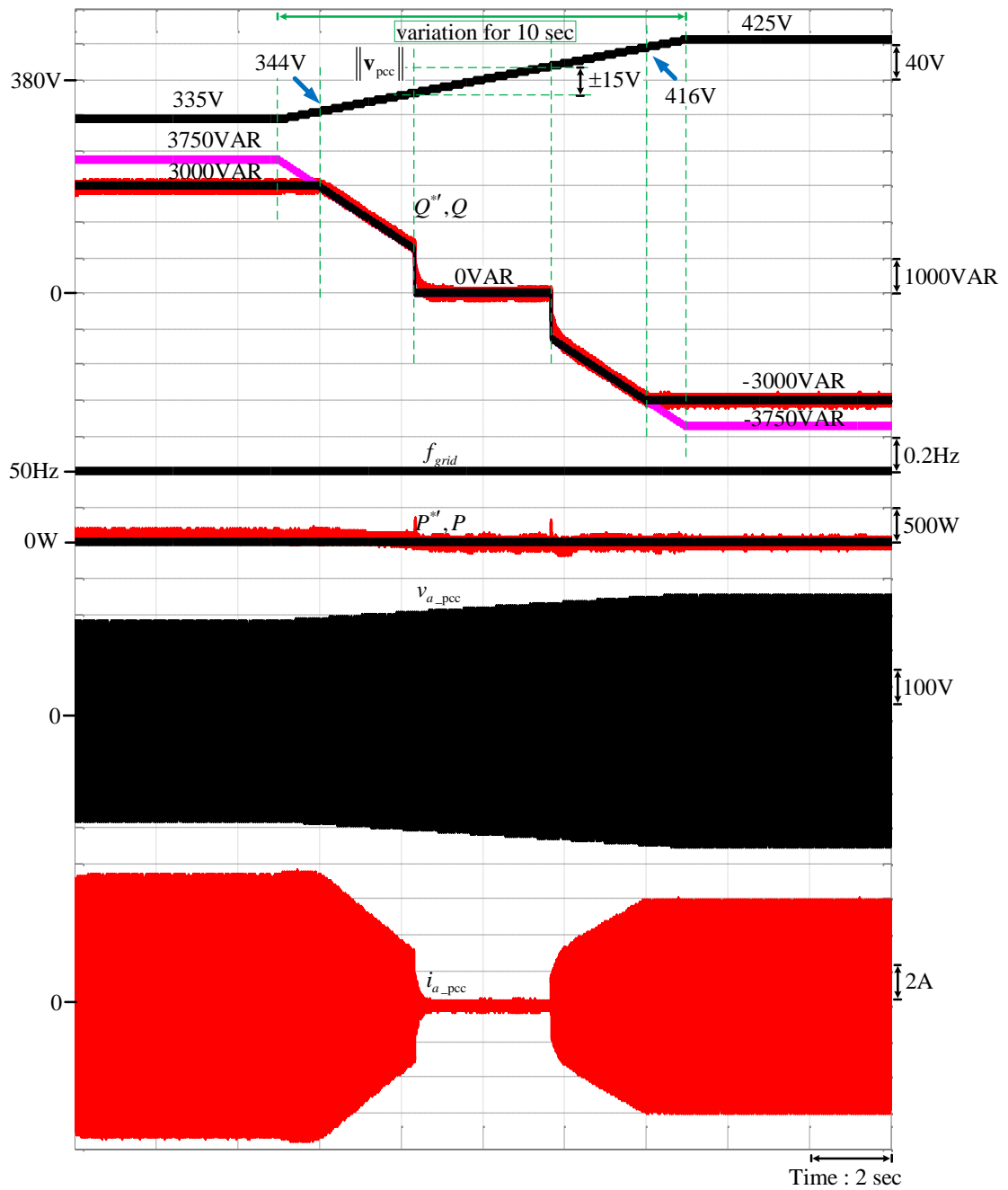
รูปที่ 5.6 ผลการทดลองของฟังก์ชันการควบคุมรูปที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการจ่ายกำลังจริงตลอดย่านพิกัดกำลังของอินเวอร์เตอร์ต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ของโครงข่ายแบบแรมป์



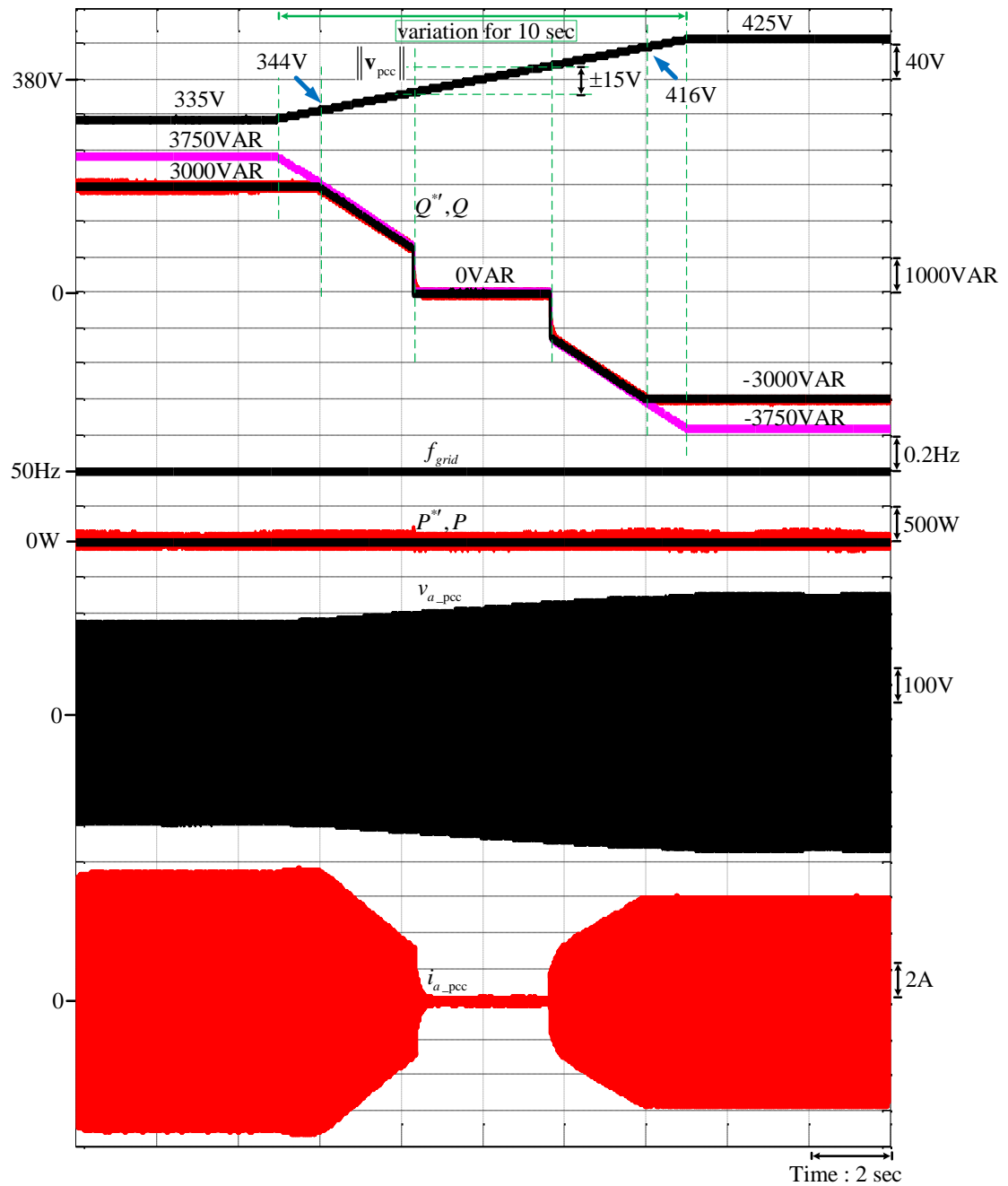
รูปที่ 5.7 ผลการจำลองการทำงานของฟังก์ชันการควบคุมรูปของกำลังรีแอกทีฟต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันระหว่างสายของโครงข่ายตามโพรไฟล์ที่ตั้งไว้



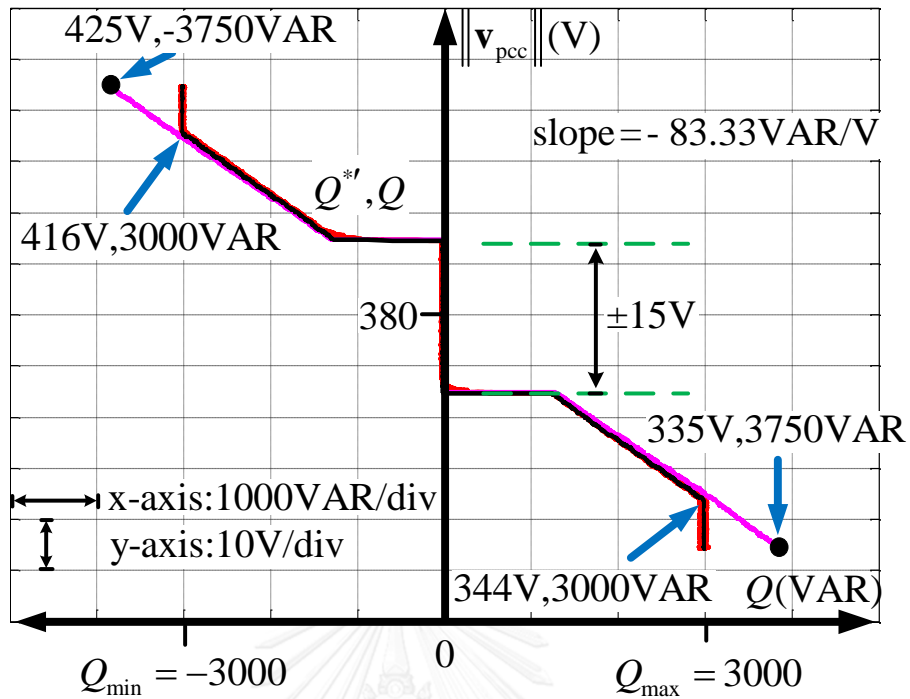
รูปที่ 5.8 ผลการทดลองของฟังก์ชันการควบคุมรูปของกำลังรีแอกทีฟต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันระหว่างสายของโครงข่ายตามโพรไฟล์ที่ตั้งไว้



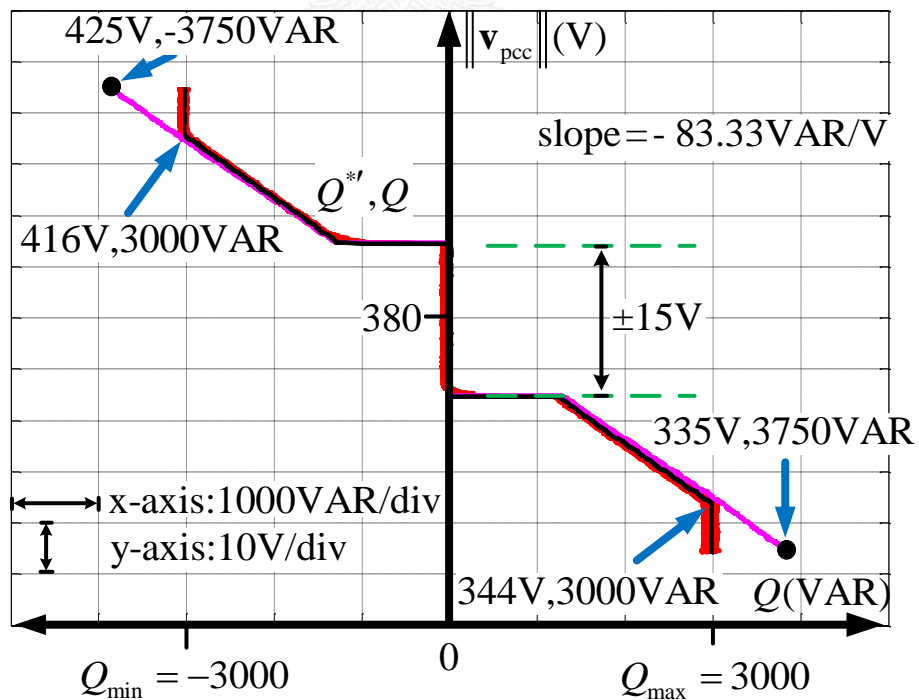
รูปที่ 5.9 ผลการจำลองการทำงานของฟังก์ชันการควบคุมรูปของกำลังรีแอกทีฟเมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันระหว่างสายแบบแรมป์จาก 335V -> 425V



รูปที่ 5.10 ผลการทดลองของฟังก์ชันการควบคุมรูปของกำลังรีแอกทีฟเมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันระหว่างสายแบบแรมป์จาก 335V -> 425V



รูปที่ 5.11 ผลการจำลองการทำงานของฟังก์ชันการควบคุมรูปที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการจ่ายกำลังรีแอกทีฟตลอดย่านพิกัดกำลังอินเวอร์เตอร์ต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันของโครงข่ายแบบแรบบี



รูปที่ 5.12 ผลการทดลองของฟังก์ชันการควบคุมรูปที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการจ่ายกำลังรีแอกทีฟตลอดย่านพิกัดกำลังอินเวอร์เตอร์ต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันของโครงข่ายแบบแรบบี

5.3. การทดสอบการทำงานสำหรับฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกล

ผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองในรูปที่ 5.13 ถึงรูปที่ 5.20 แสดงถึงการทำงานของฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลสำหรับอินเวอร์เตอร์ที่ทำงานในโหมดสลับขนุน โครงข่ายที่มีภาพรวมตามรูปที่ 2.3 และรูปที่ 2.5 และจะทดสอบการทำงานด้วยการเปลี่ยนแปลงความถี่ของโครงข่ายใน 2 โหมดที่สำคัญได้แก่ 1.) อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ของโครงข่ายแบบแรมป์ด้วยความชันขาขึ้น $df/dt = 0.25\text{Hz/s}$ 2.) อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ของโครงข่ายแบบแรมป์ด้วยความชันขาลง $df/dt = -0.25\text{Hz/s}$ โดยทั้ง 2 โหมดดังกล่าวจะปรับค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเสมือนทั้งหมด 4 ค่าได้แก่ $K_d = 4, 8, 12, 15\text{ s}$

รูปที่ 5.13 ถึงรูปที่ 5.20 เป็นผลการจำลองการทำงานเปรียบเทียบกับผลการทดลองของฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลสำหรับกรณีความถี่ของโครงข่ายมีอัตราการเปลี่ยนแปลงด้วยความชันขาขึ้น $df/dt = 0.25\text{Hz/s}$ เป็นช่วงเวลา 1 วินาที โดยมีเงื่อนไขตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 5.3 พบว่าเมื่อความถี่ของโครงข่ายเพิ่มขึ้น ฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลสามารถลดค่ากำลังกำลังจริงได้ถูกต้อง โดยปริมาณการปรับลดค่ากำลังกำลังจริงเป็นไปตามค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเสมือน K_d สอดคล้องตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.15) และเป็นไปตามกลไกการทำงานที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อ 2.2.2 ตัวอย่างเช่นกรณี $df/dt = 0.25\text{Hz/s}$, $K_d = 12$ จะได้ค่า $\Delta P_{\text{inertia}} = -12 \times 50 \times 0.25 = -150\text{ W}$ โดยค่ากำลังกำลังจริงจะลดลงด้วยค่าคงตัวทางเวลา (time constant, τ) เท่ากับ 50 มิลลิวินาทีถูกต้องตามที่ได้อ้างอิงไว้ ซึ่งสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนจากภาพขยายด้านล่างของทุกผลการทดสอบ และมีแถบไร้ผลตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงความถี่ถูกต้องตามค่าที่ตั้งไว้ (สังเกตได้จากกราฟการปรับลดของค่ากำลังกำลังจริงสำหรับฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเท่ากับศูนย์เมื่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่ำกว่าแถบไร้ผลตอบสนอง) เมื่อความถี่ของโครงข่ายเพิ่มขึ้นจนมีค่ามากกว่าแถบไร้ผลตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงความถี่สำหรับฟังก์ชันการควบคุมรูป อินเวอร์เตอร์ก็จะปรับลดค่ากำลังกำลังจริงโดยปริมาณการปรับลดการจ่ายกำลังจริงเป็นไปตามค่าสัมประสิทธิ์การควบคุมรูป $1/k_p$ สอดคล้องตามความสัมพันธ์ในสมการ (2.13) และเป็นไปตามกลไกการทำงานที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อ 2.2.1 และจะเห็นได้ว่าอินเวอร์เตอร์สามารถควบคุมการลดการจ่ายกำลังจริงตามค่ากำลังได้อย่างถูกต้องและมีช่วงเวลาตอบสนองของการลดการจ่ายกำลังจริงเป็นไปตามที่ออกแบบไว้ในหัวข้อ 3.2 เมื่อระบบเข้าสู่สถานะอยู่ตัวแล้วอินเวอร์เตอร์สามารถควบคุมกำลังจริงได้โดยมีค่าความผิดพลาดใกล้เคียงศูนย์และมีค่าระลอกอยู่ในช่วง 0 – 50 W (คิดเป็น 0 – 1.66% ของพิกัดกำลังของอินเวอร์เตอร์)

รูปที่ 5.21 ถึงรูปที่ 5.28 เป็นผลการจำลองการทำงานเปรียบเทียบกับผลการทดลองของฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลสำหรับกรณีความถี่ของโครงข่ายมีอัตราการเปลี่ยนแปลง

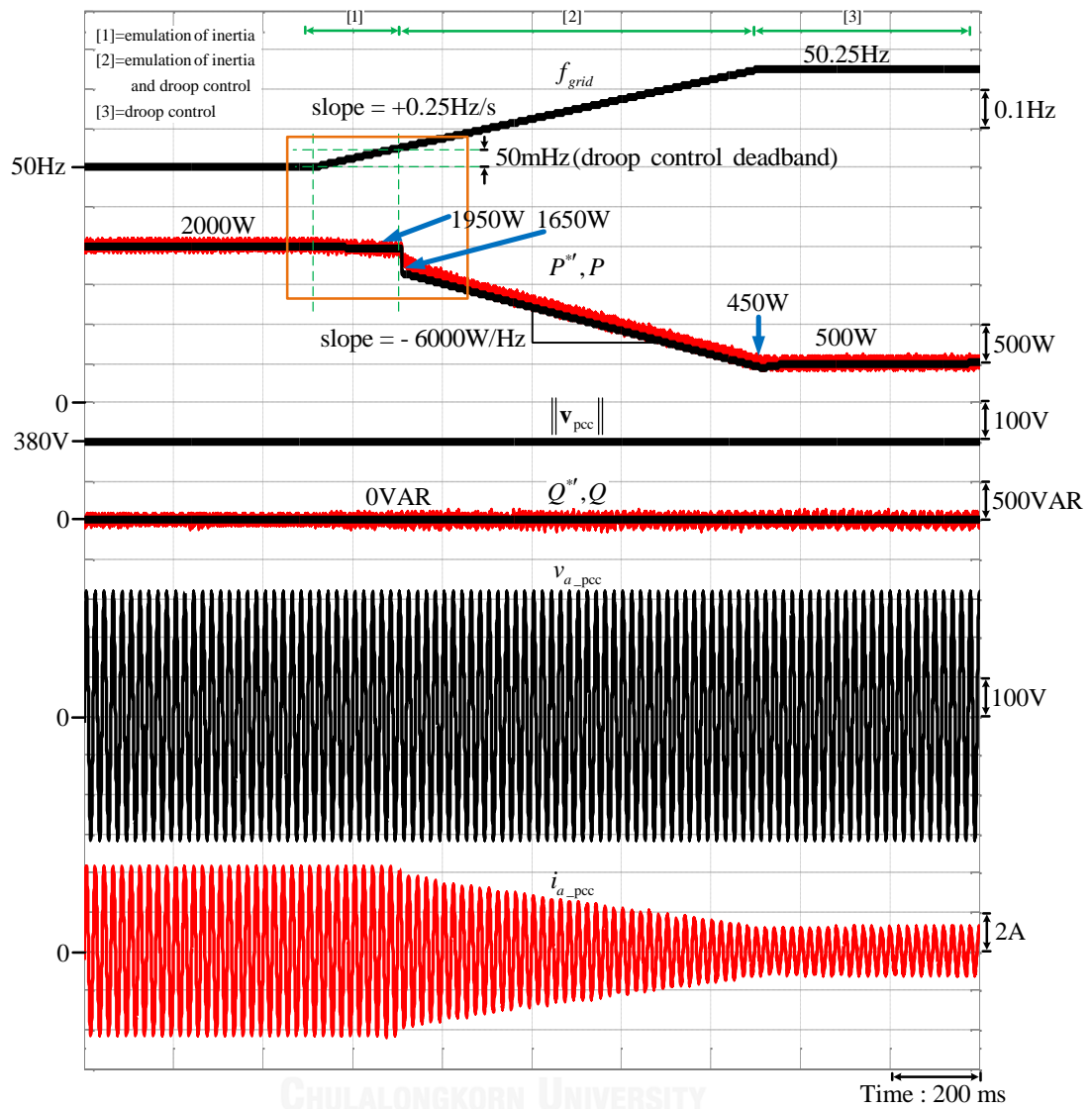
ด้วยความชันขาลง $df/dt = -0.25\text{Hz/s}$ เป็นช่วงเวลา 1 วินาที โดยมีเงื่อนไขตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 5.3 พบว่าเมื่อความถี่ของโครงข่ายลดลง ฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลสามารถปรับเพิ่มค่าคำสั่งกำลังจริงได้ถูกต้อง โดยปริมาณการปรับเพิ่มค่าคำสั่งกำลังจริงเป็นไปตามค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเสมือน K_d สอดคล้องตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.15) และเป็นไปตามกลไกการทำงานที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อ 2.2.2 ตัวอย่างเช่นกรณี $df/dt = -0.25\text{Hz/s}$, $K_d = 12$ จะได้ค่า $\Delta P_{\text{inertia}} = -12 \times 50 \times (-0.25) = 150\text{ W}$ โดยค่าคำสั่งกำลังจริงจะเพิ่มขึ้นด้วยค่าคงตัวทางเวลา (time constant, τ) เท่ากับ 50 มิลลิวินาทีถูกต้องตามที่ได้ตั้งค่าไว้ ซึ่งสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนจากภาพขยายด้านล่างของทุกผลการทดสอบ โดยมีแถบไร้ผลตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงความถี่ถูกต้องตามค่าที่ตั้งไว้ (สังเกตได้จากการปรับเพิ่มของค่าคำสั่งกำลังจริงสำหรับฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเท่ากับศูนย์เมื่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่ำกว่าแถบไร้ผลตอบสนอง) เมื่อความถี่ของโครงข่ายลดลงจนมีค่ามากกว่าแถบไร้ผลตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงความถี่สำหรับฟังก์ชันการควบคุมรูป อินเวอร์เตอร์ก็จะปรับเพิ่มค่าคำสั่งกำลังจริงโดยปริมาณการปรับเพิ่มการจ่ายกำลังจริงเป็นไปตามค่าสัมประสิทธิ์การควบคุมรูป $1/k_p$ สอดคล้องตามความสัมพันธ์ในสมการ (2.13) และเป็นไปตามกลไกการทำงานที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อ 2.2.1 และจะเห็นได้ว่าอินเวอร์เตอร์สามารถควบคุมการเพิ่มการจ่ายกำลังจริงตามค่าคำสั่งได้อย่างถูกต้องและมีช่วงเวลาตอบสนองของการเพิ่มการจ่ายกำลังจริงเป็นไปตามที่ออกแบบไว้ในหัวข้อ 3.2 เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวแล้วอินเวอร์เตอร์สามารถควบคุมกำลังจริงได้โดยมีค่าความผิดพลาดใกล้เคียงศูนย์และมีค่าระลอกอยู่ในช่วง $0 - 50\text{ W}$ (คิดเป็น $0 - 1.66\%$ ของพิกัดกำลังของอินเวอร์เตอร์)

จะเห็นได้ว่าเมื่อมีความถี่เกิดการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นที่มากกว่าแถบไร้ผลตอบสนองที่ตั้งไว้ อินเวอร์เตอร์จะสามารถตอบสนองต่อการจ่ายกำลังจริงได้ทั้งฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลและฟังก์ชันการควบคุมรูป โดยที่ฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลจะตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของความถี่ทางพลวัตและฟังก์ชันการควบคุมรูปจะตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ในสภาวะเกือบอยู่ตัว

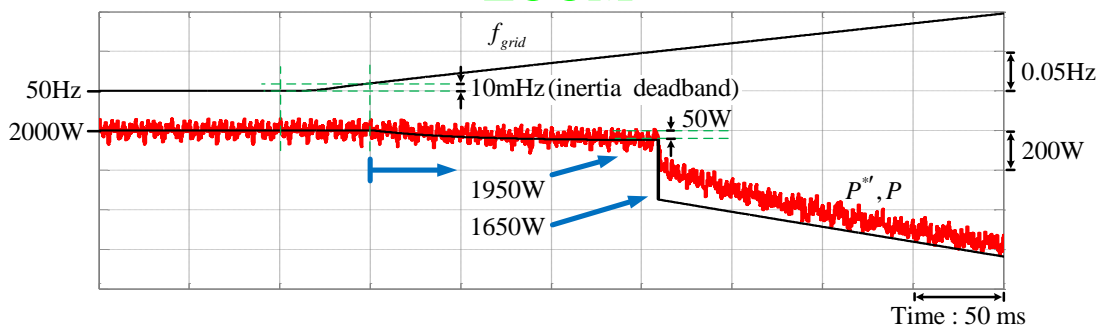
ตารางที่ 5.3 เงื่อนไขการทดสอบการทำงานสำหรับฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกล

การทดสอบ	เงื่อนไขตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบ						ผลการจำลอง	ผลการทดลอง
	K_d	f (Hz)	$\ v_{pcc}\ $ (V)	P^* (W)	Q^* (VAR)	$\Delta P_{inertia}$ (W)		
Ramp f 0.25Hz/s	4	50	380	2000	0	50	รูปที่ 5.13	รูปที่ 5.14
	8	50	380	2000	0	100	รูปที่ 5.15	รูปที่ 5.16
	12	50	380	2000	0	150	รูปที่ 5.17	รูปที่ 5.18
	15	50	380	2000	0	188	รูปที่ 5.19	รูปที่ 5.20
Ramp f -0.25Hz/s	4	50	380	1000	0	50	รูปที่ 5.21	รูปที่ 5.22
	8	50	380	1000	0	100	รูปที่ 5.23	รูปที่ 5.24
	12	50	380	1000	0	150	รูปที่ 5.25	รูปที่ 5.26
	15	50	380	1000	0	188	รูปที่ 5.27	รูปที่ 5.28

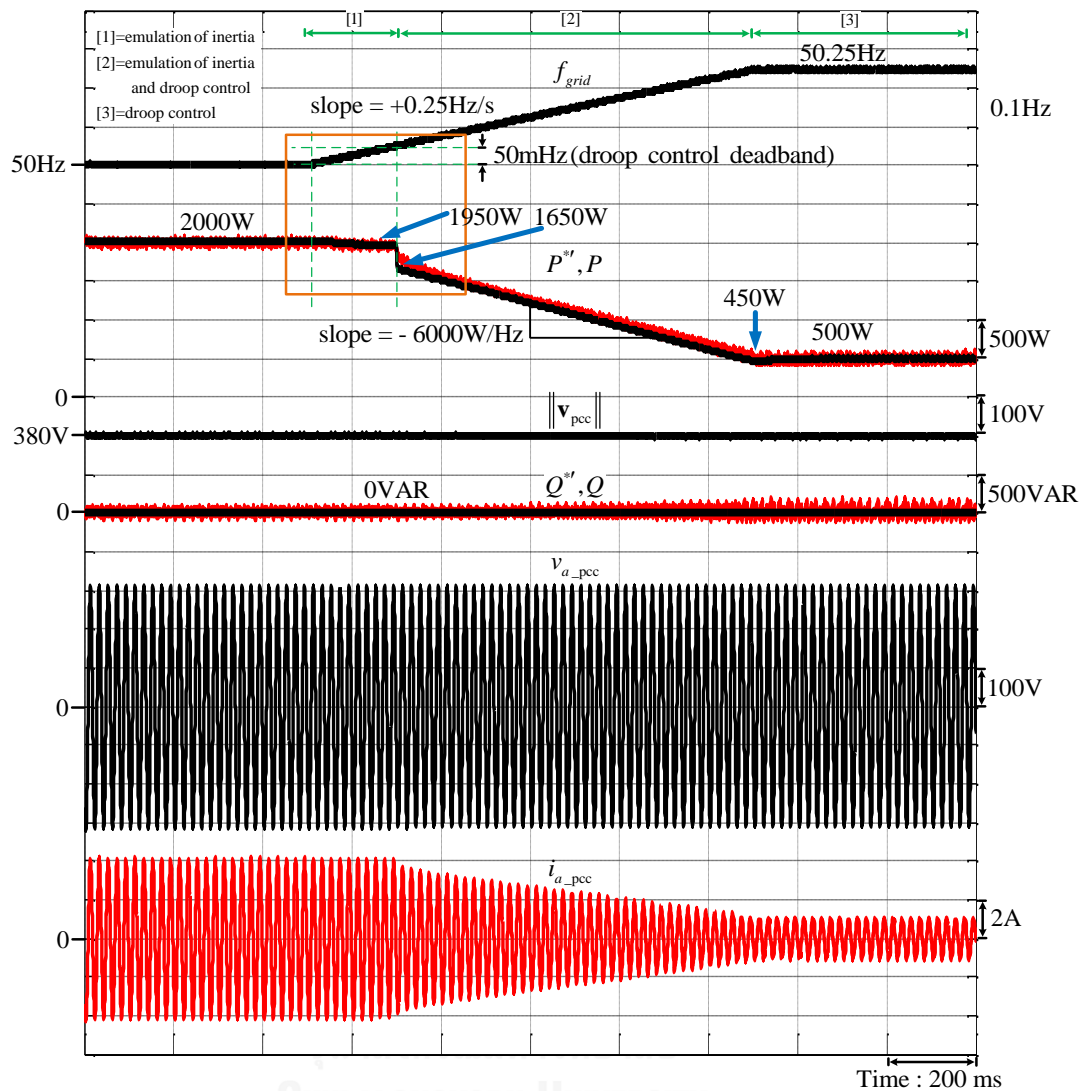




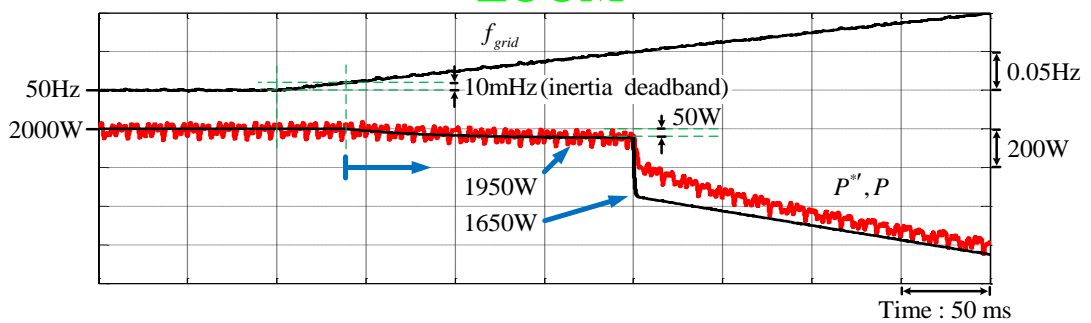
ZOOM



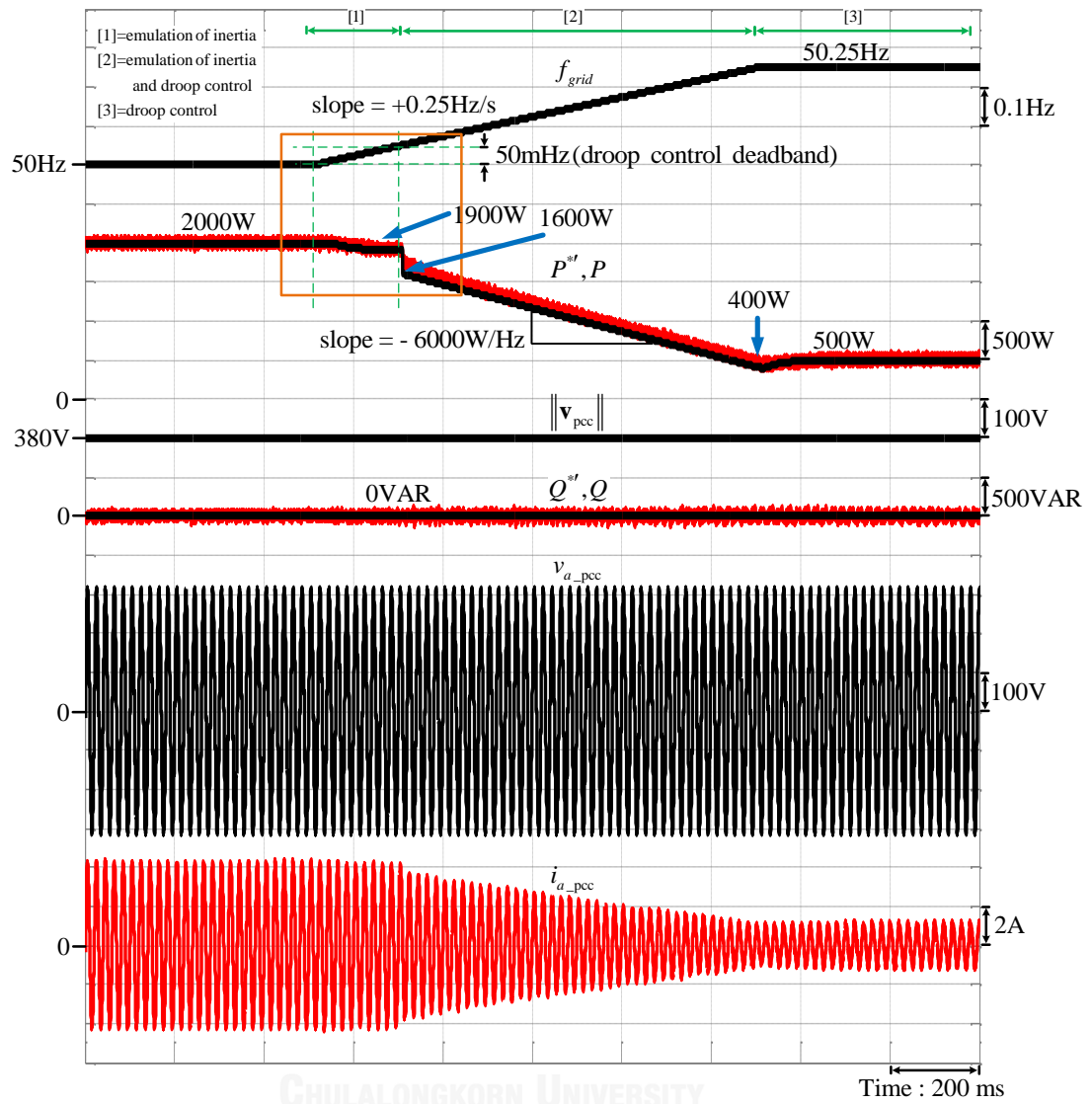
รูปที่ 5.13 ผลการจำลองการทำงานของฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเมื่อความถี่ของโครงข่ายเพิ่มขึ้นด้วยความชัน 0.25Hz/s (กรณีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเสมือน K_d เท่ากับ 4)



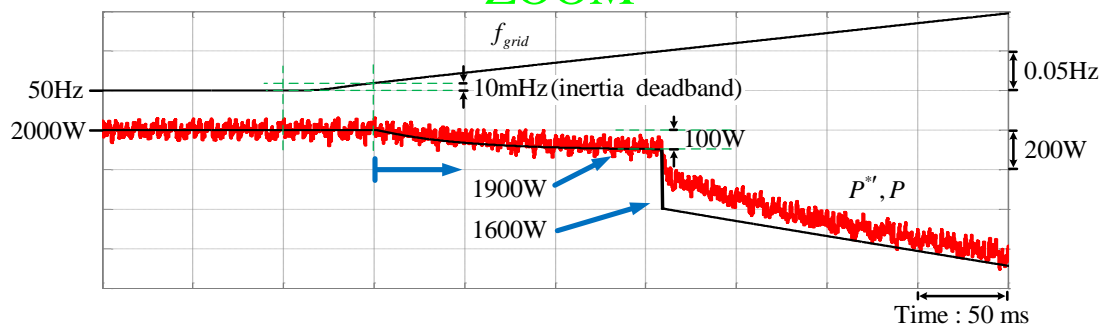
CHULALONGKORN UNIVERSITY
ZOOM



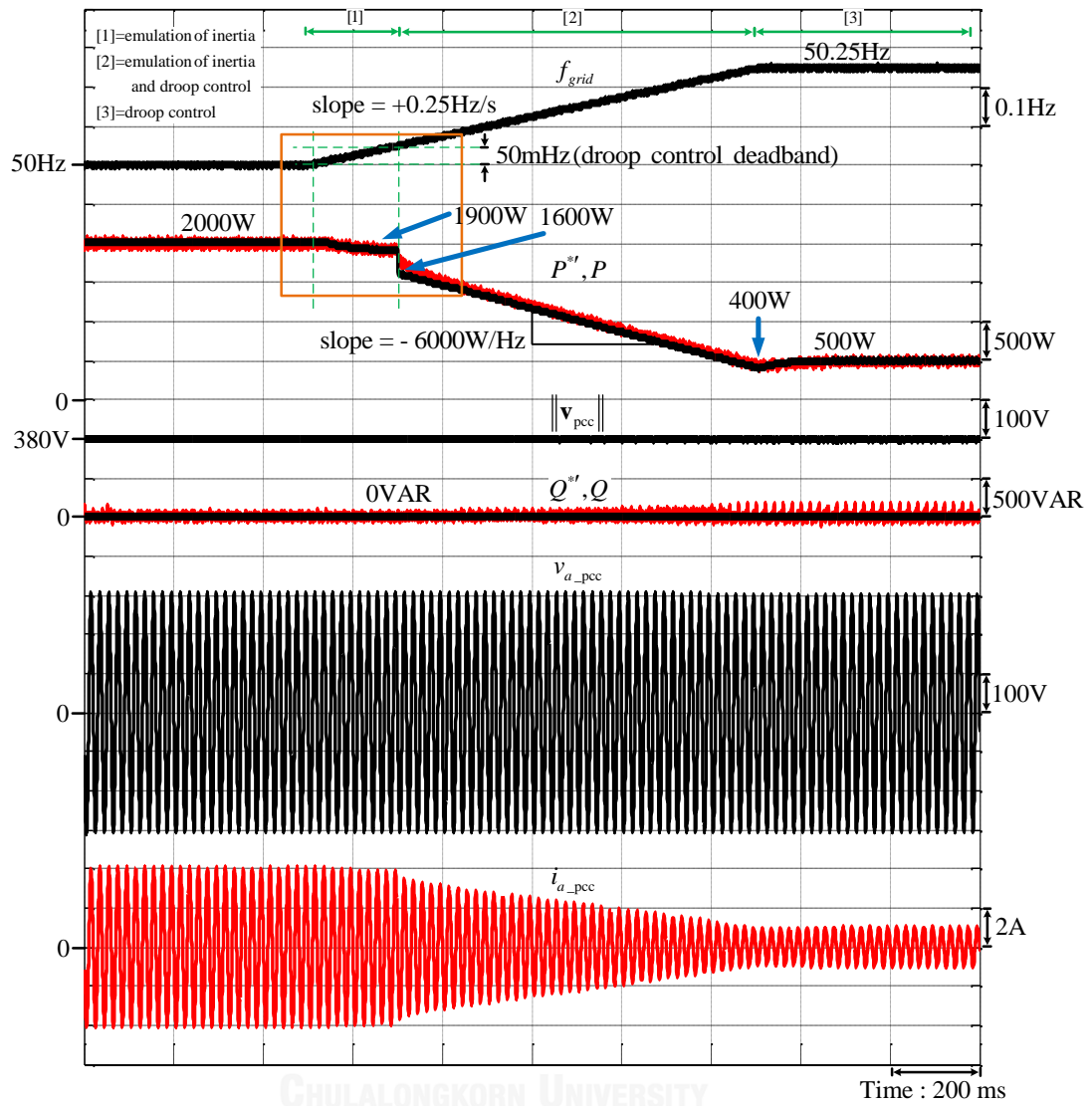
รูปที่ 5.14 ผลการทดลองการทำงานของฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเมื่อความถี่ของโครงข่ายเพิ่มขึ้นด้วยความชัน 0.25Hz/s (กรณีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเสมือน K_d เท่ากับ 4)



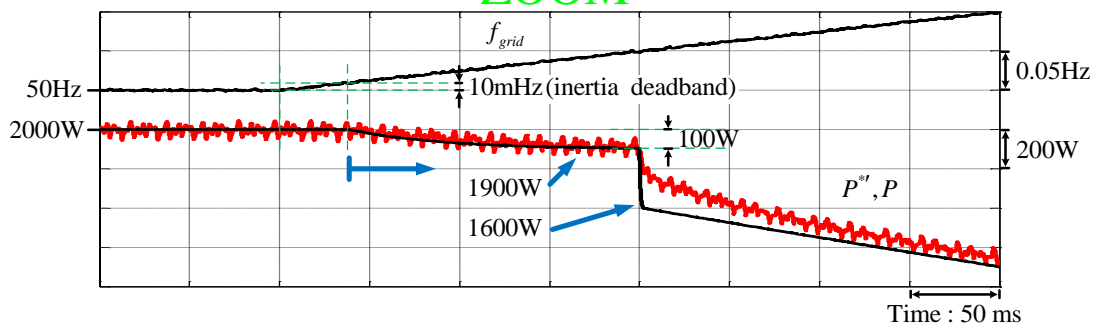
ZOOM



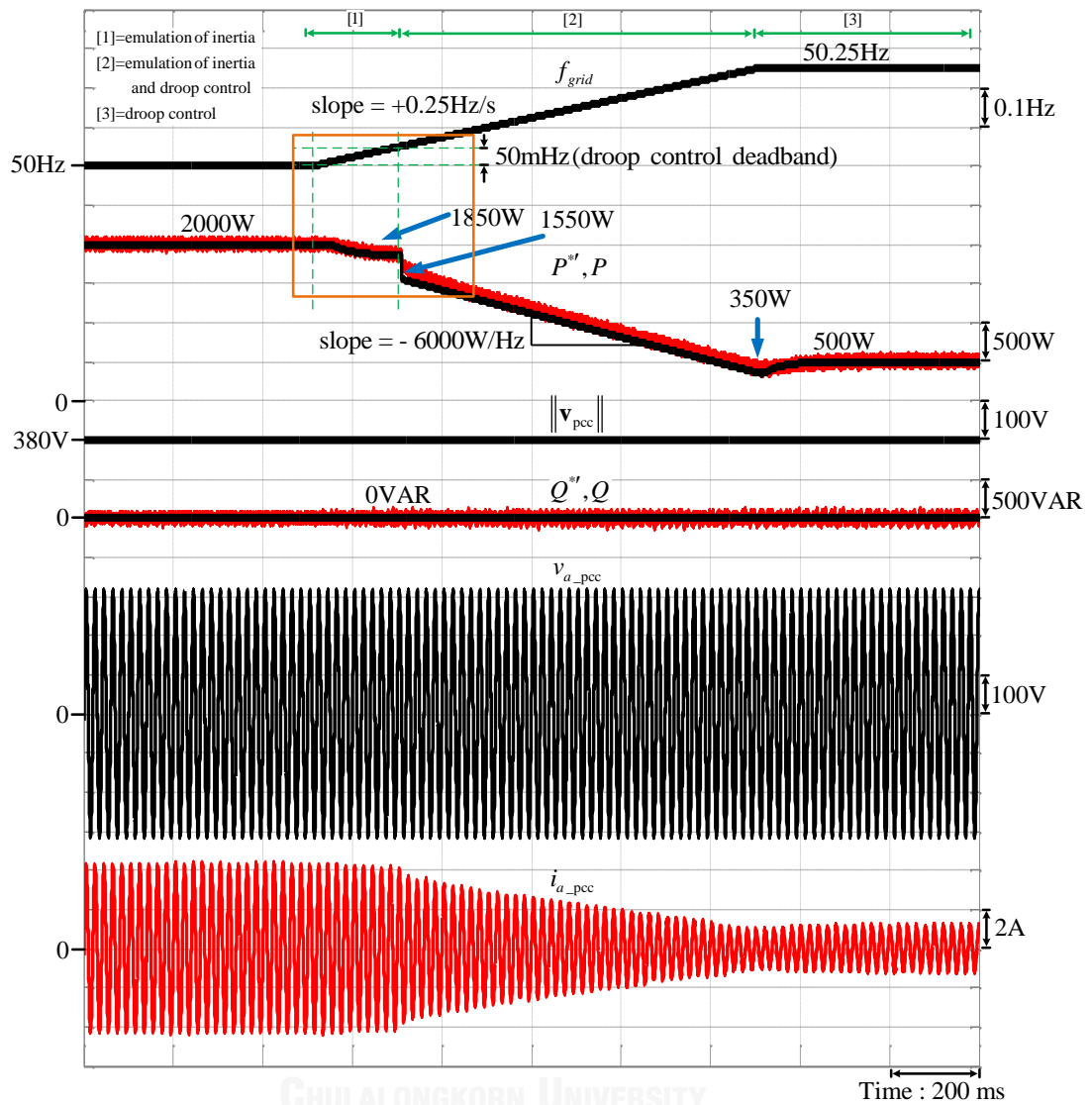
รูปที่ 5.15 ผลการจำลองการทำงานของฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเมื่อความถี่ของโครงข่ายเพิ่มขึ้นด้วยความชัน 0.25Hz/s (กรณีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเสมือน K_d เท่ากับ 8)



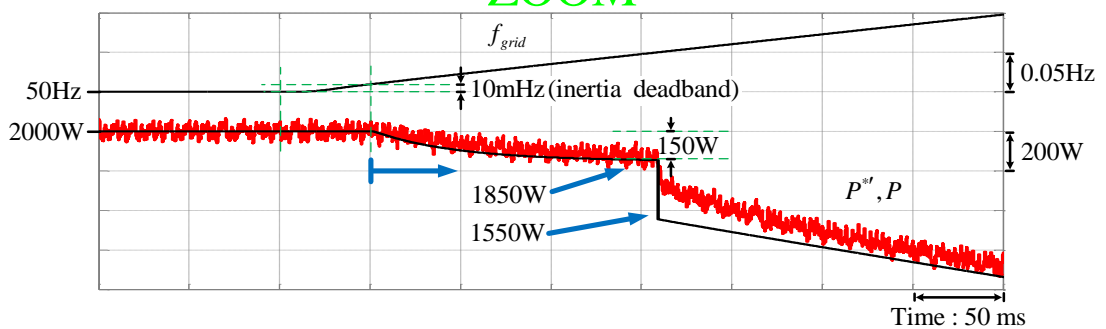
ZOOM



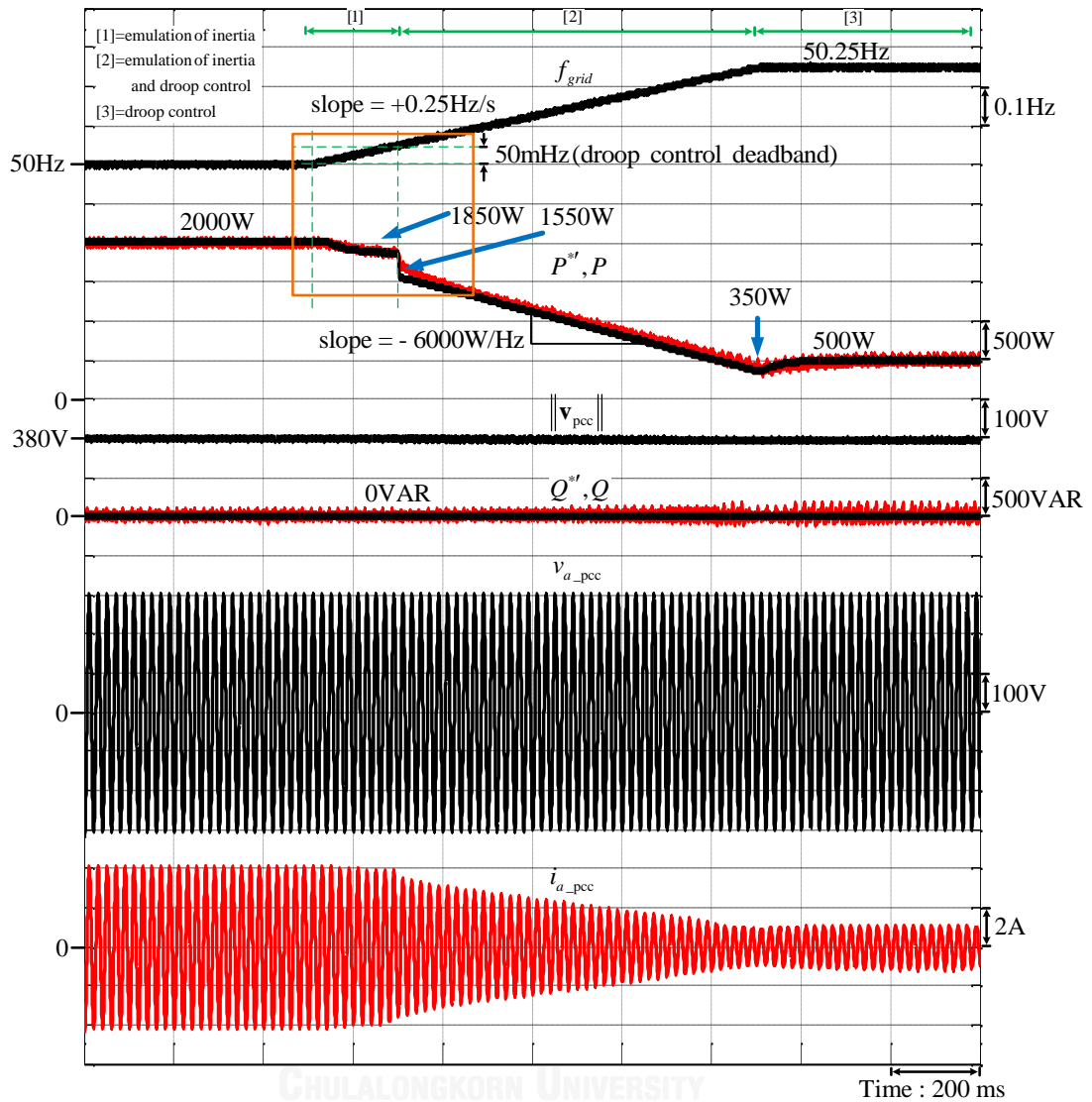
รูปที่ 5.16 ผลการทดลองการทำงานของฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเมื่อความถี่ของโครงข่ายเพิ่มขึ้นด้วยความชัน 0.25Hz/s (กรณีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเสมือน K_d เท่ากับ 8)



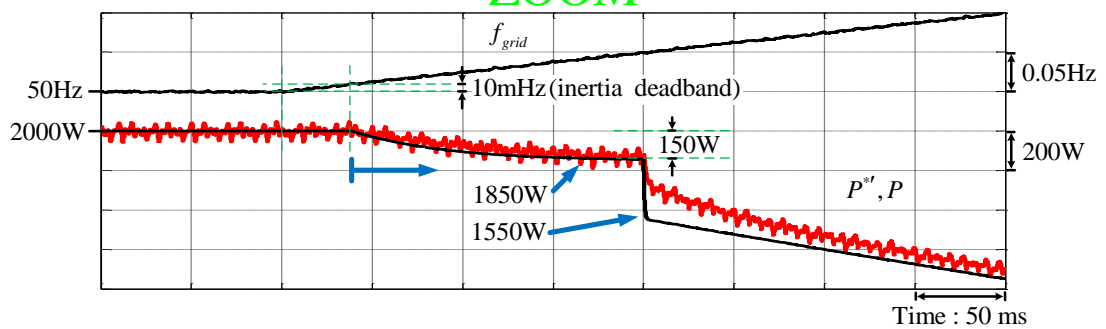
ZOOM



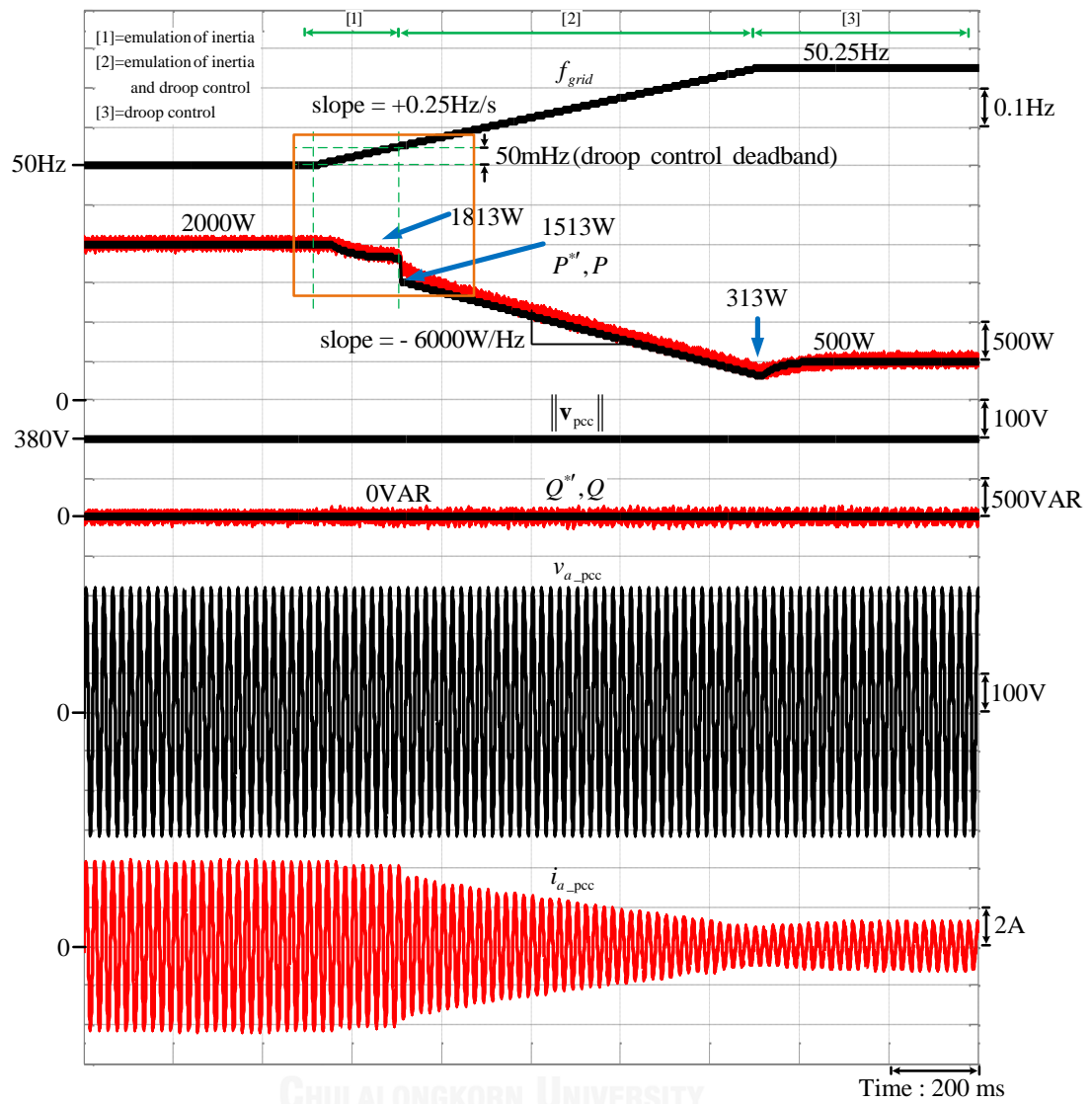
รูปที่ 5.17 ผลการจำลองการทำงานของฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเมื่อความถี่ของโครงข่ายเพิ่มขึ้นด้วยความชัน 0.25Hz/s (กรณีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเสมือน K_d เท่ากับ 12)



ZOOM

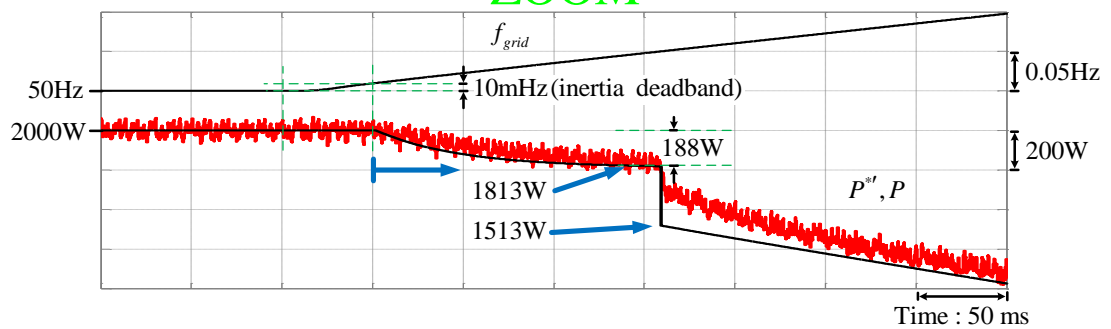


รูปที่ 5.18 ผลการทดลองการทำงานของฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเมื่อความถี่ของโครงข่ายเพิ่มขึ้นด้วยความชัน 0.25Hz/s (กรณีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเสมือน K_d เท่ากับ 12)

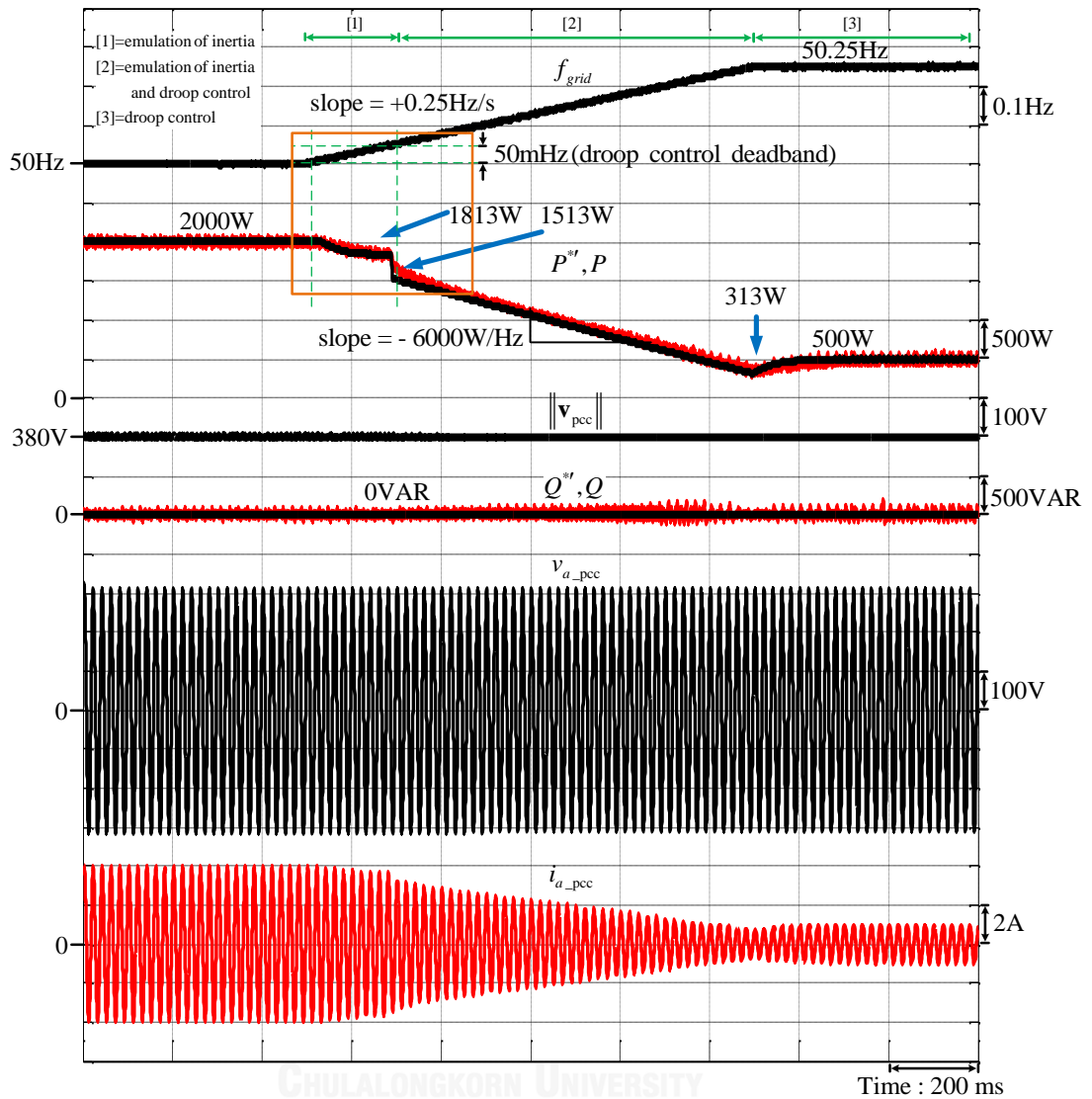


CHULALONGKORN UNIVERSITY

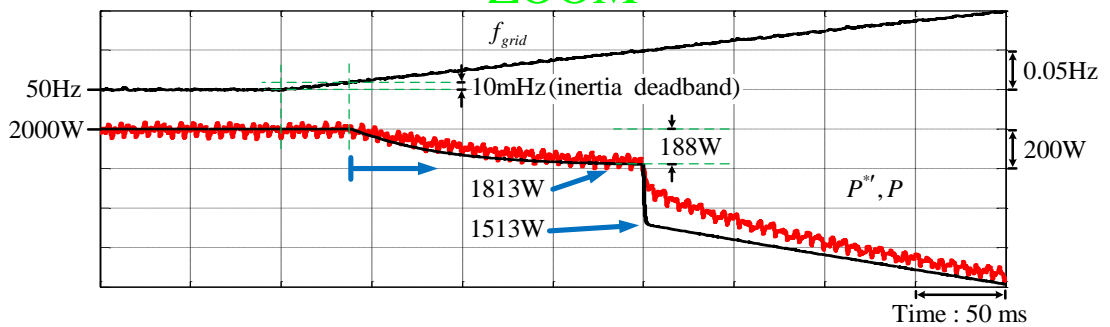
ZOOM



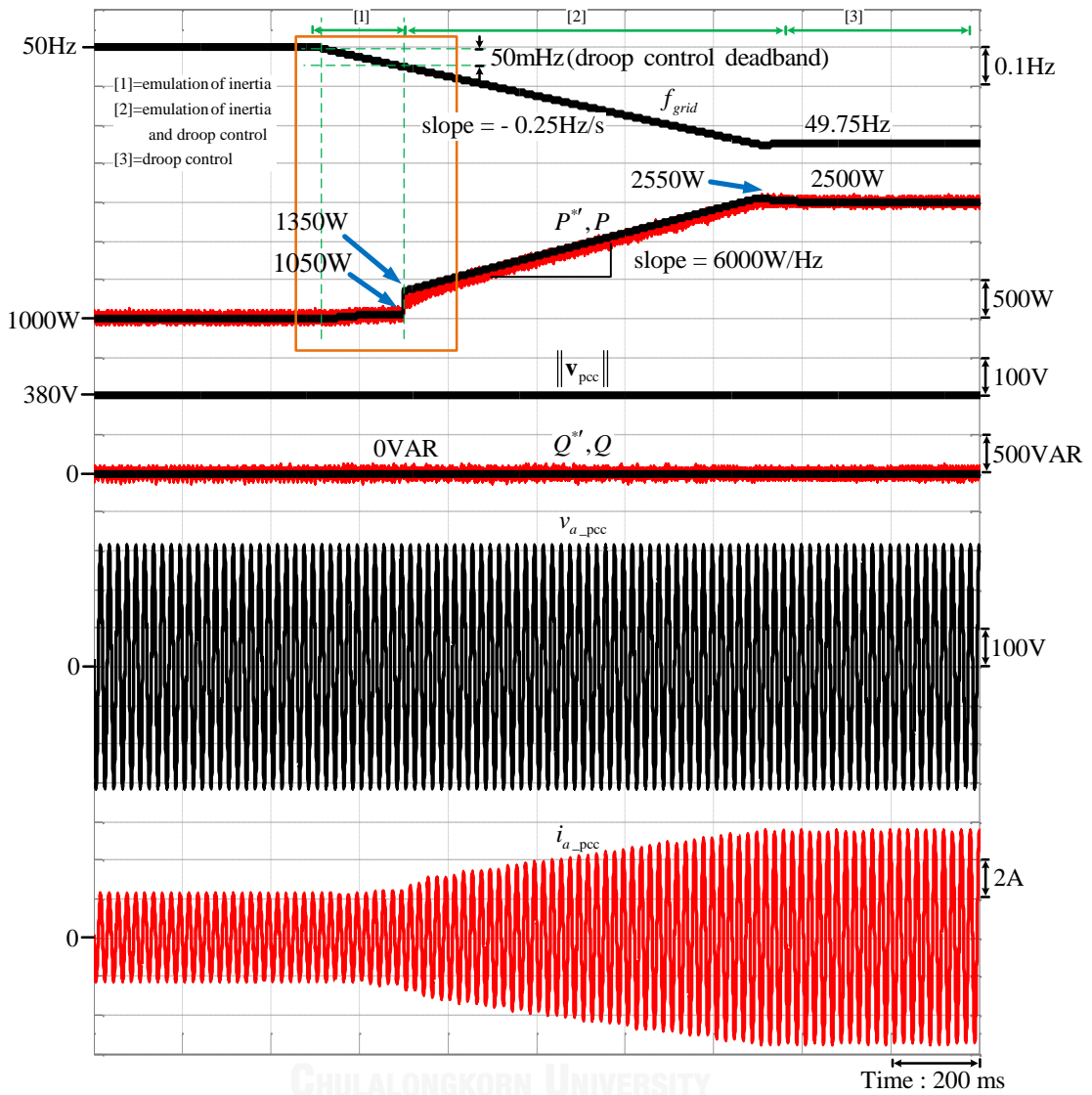
รูปที่ 5.19 ผลการจำลองการทำงานของฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเมื่อความถี่ของโครงข่ายเพิ่มขึ้นด้วยความชัน 0.25Hz/s (กรณีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเสมือน K_d เท่ากับ 15)



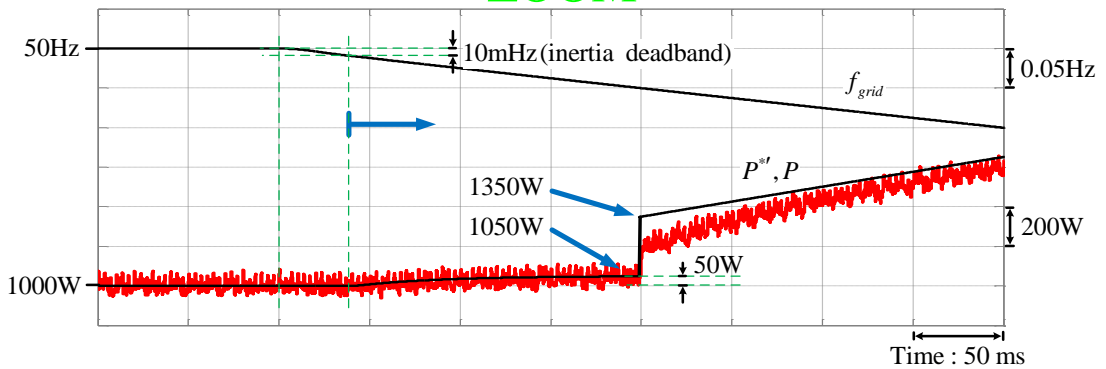
ZOOM



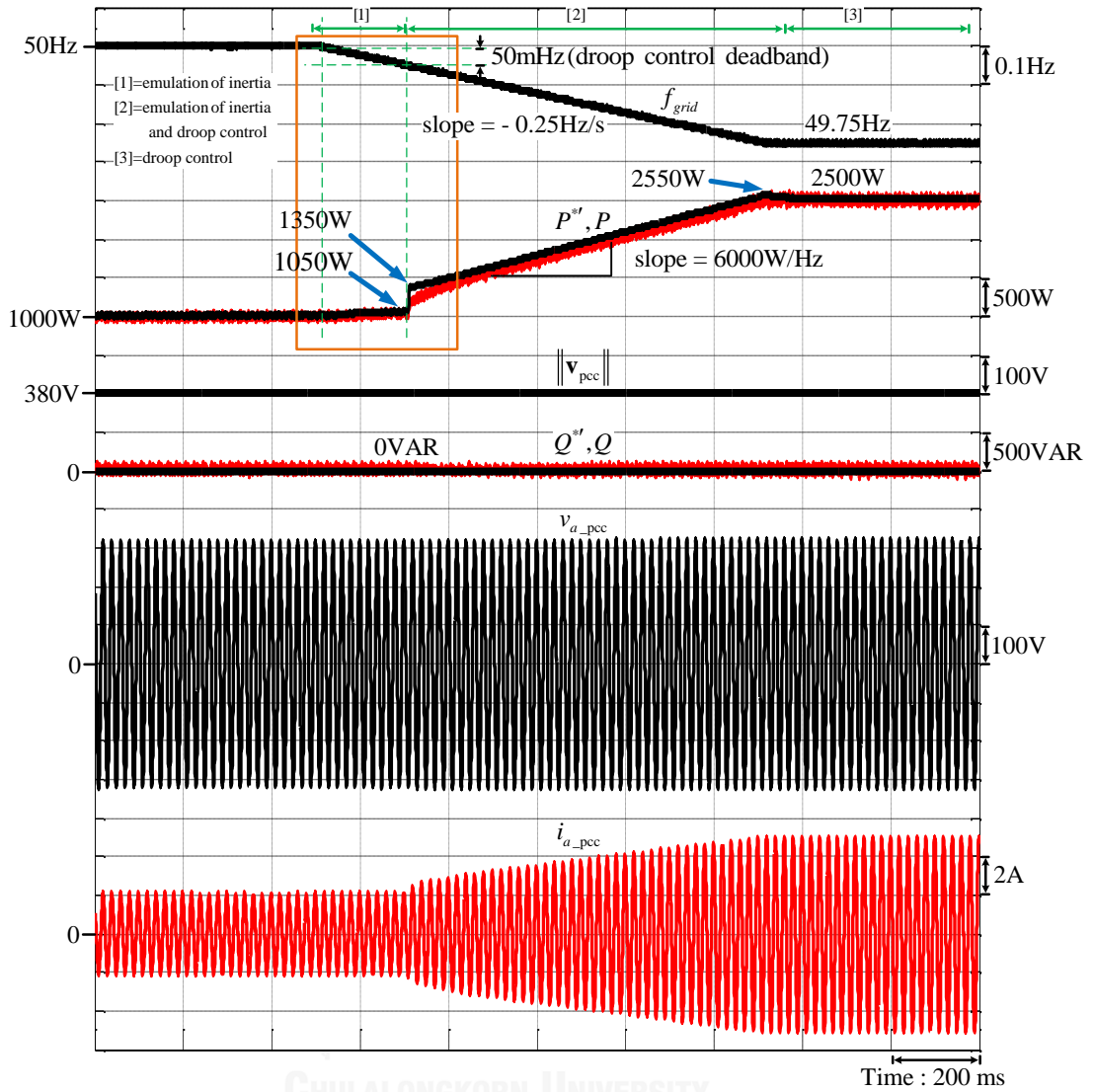
รูปที่ 5.20 ผลการทดลองการทำงานของฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเมื่อความถี่ของโครงข่ายเพิ่มขึ้นด้วยความชัน 0.25Hz/s (กรณีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเสมือน K_d เท่ากับ 15)



ZOOM

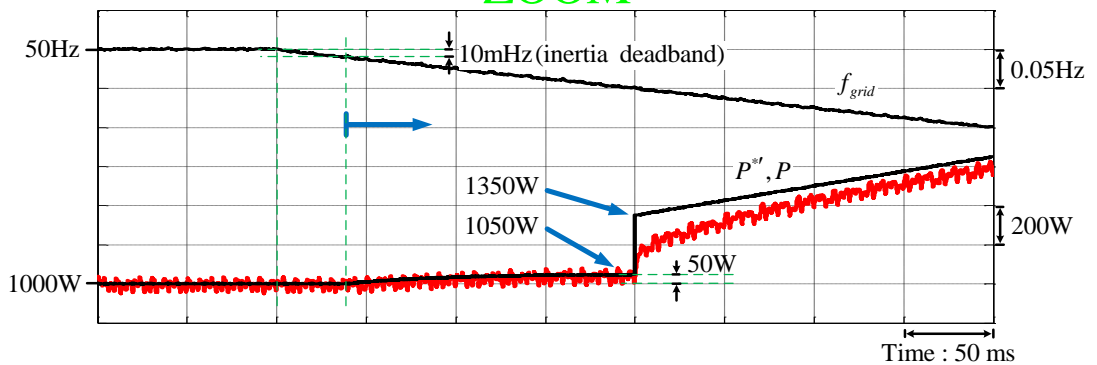


รูปที่ 5.21 ผลการจำลองการทำงานของฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเมื่อความถี่ของโครงข่ายลดลงด้วยความชัน -0.25Hz/s (กรณีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเสมือน K_d เท่ากับ 4)

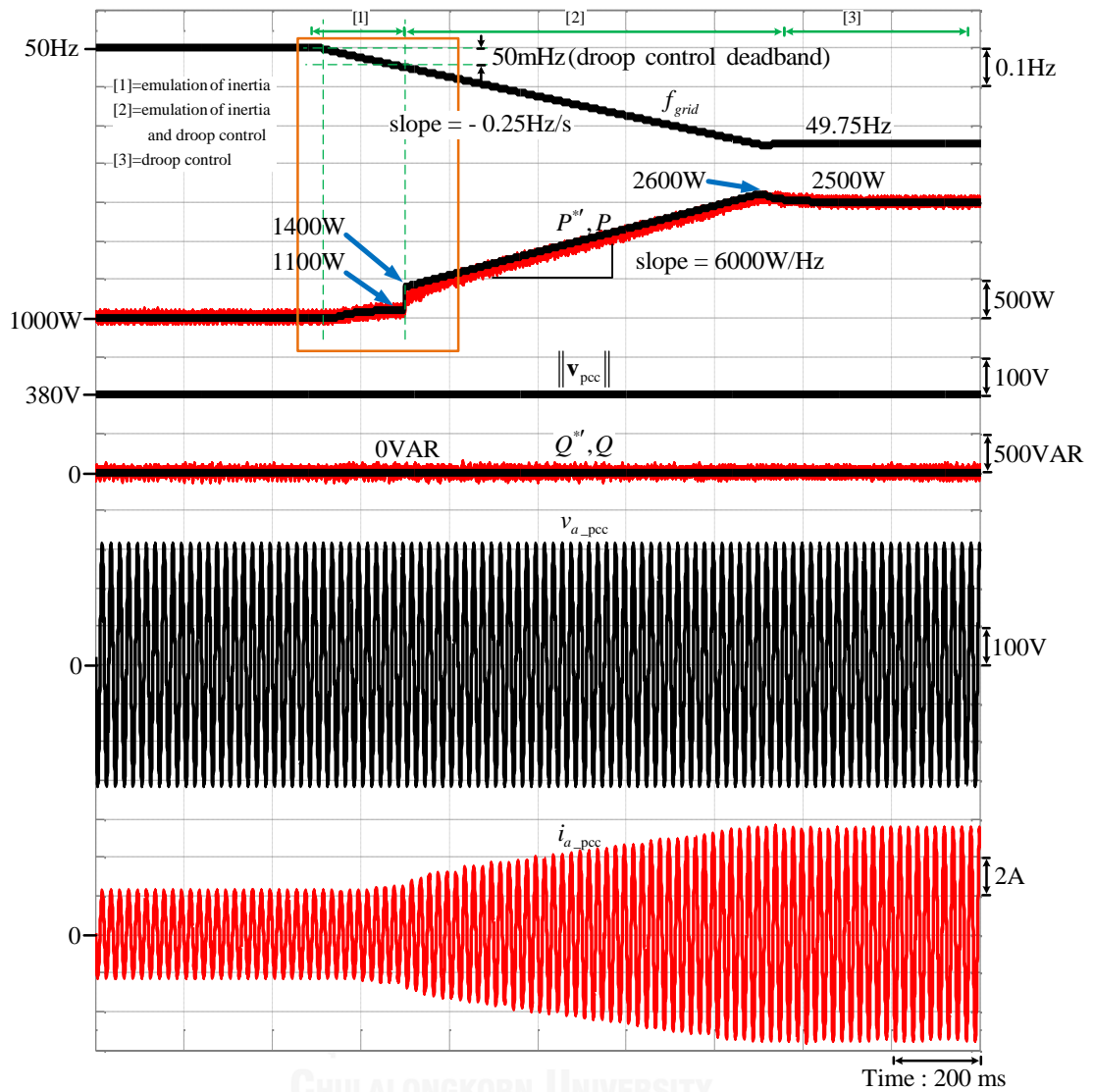


CHULALONGKORN UNIVERSITY

ZOOM

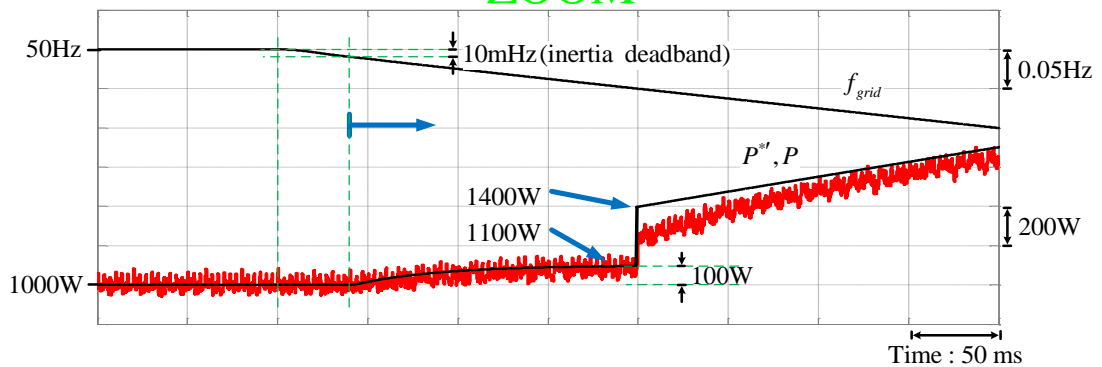


รูปที่ 5.22 ผลการทดลองการทำงานของฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเมื่อความถี่ของโครงข่ายลดลงด้วยความชัน -0.25Hz/s (กรณีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเสมือน K_d เท่ากับ 4)

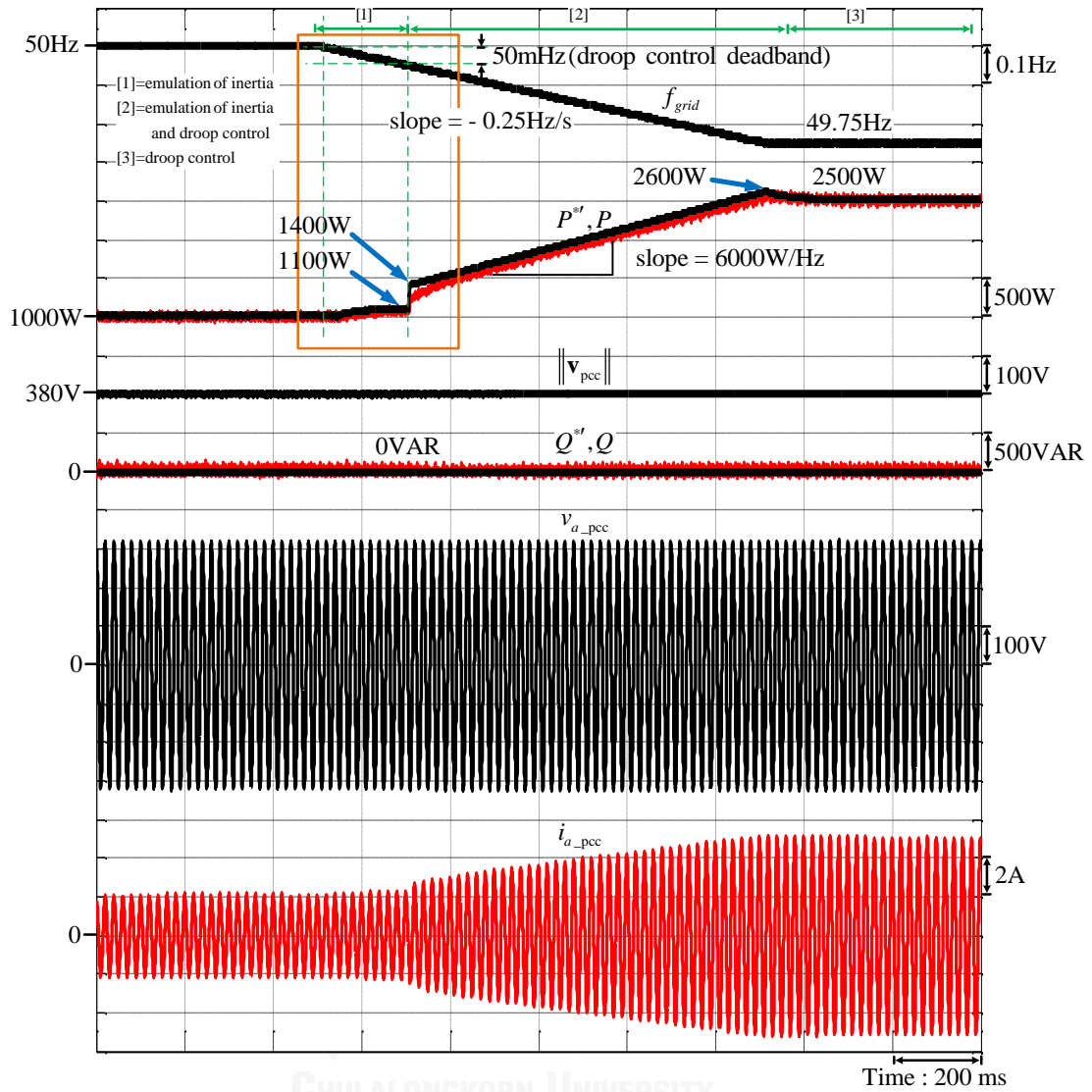


CHULALONGKORN UNIVERSITY

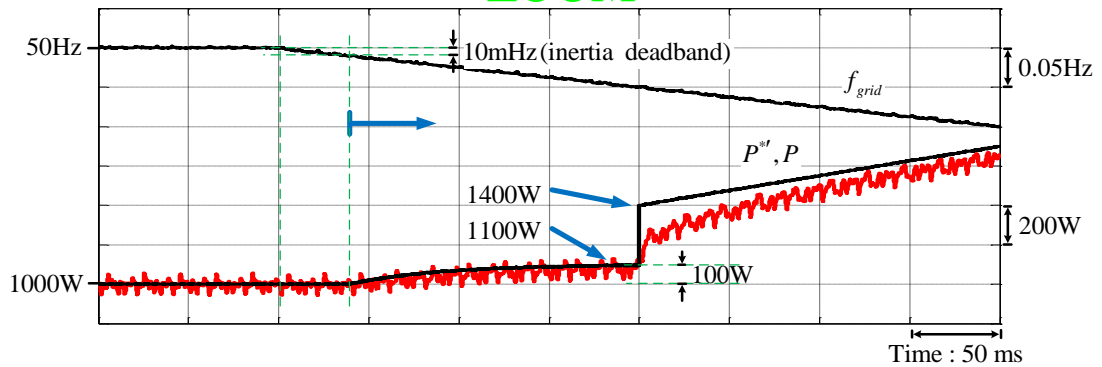
ZOOM



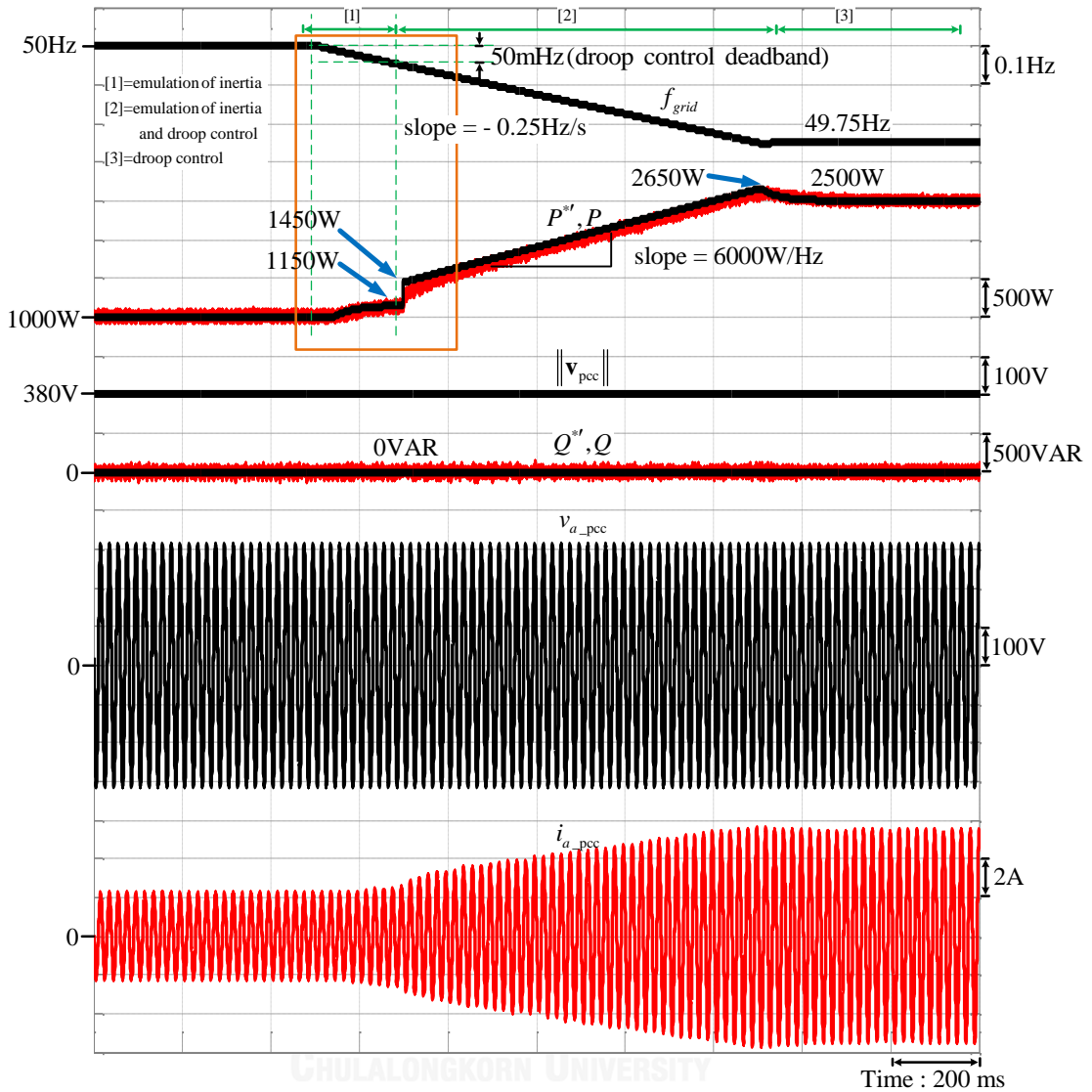
รูปที่ 5.23 ผลการจำลองการทำงานของฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเมื่อความถี่ของโครงข่ายลดลงด้วยความชัน -0.25Hz/s (กรณีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเสมือน K_d เท่ากับ 8)



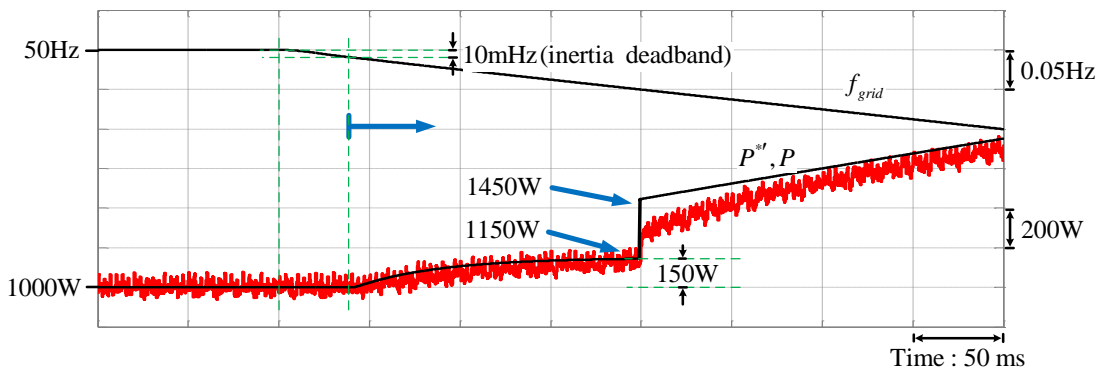
ZOOM



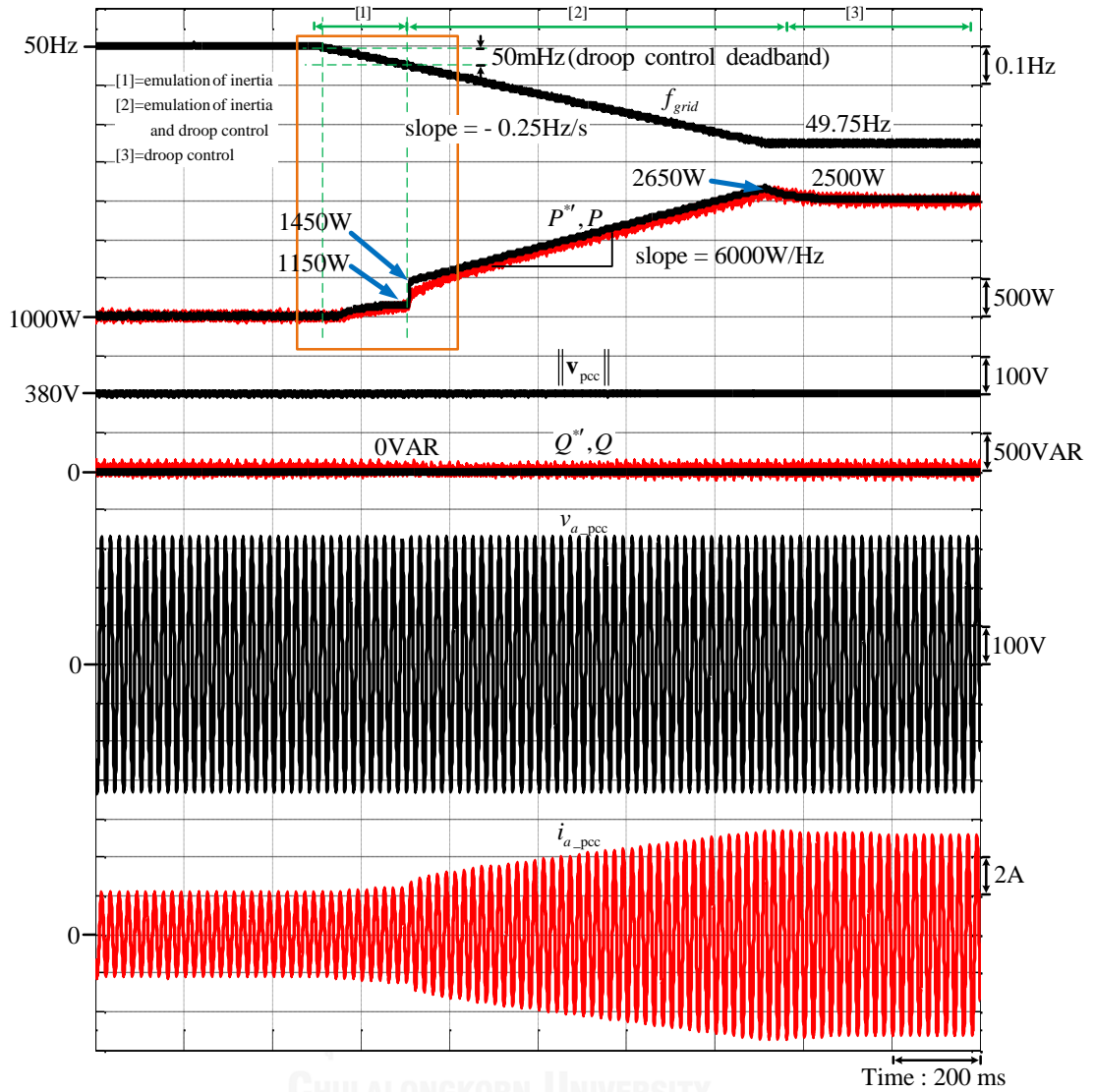
รูปที่ 5.24 ผลการทดลองการทำงานของฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเมื่อความถี่ของโครงข่ายลดลงด้วยความชัน -0.25Hz/s (กรณีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเสมือน K_d เท่ากับ 8)



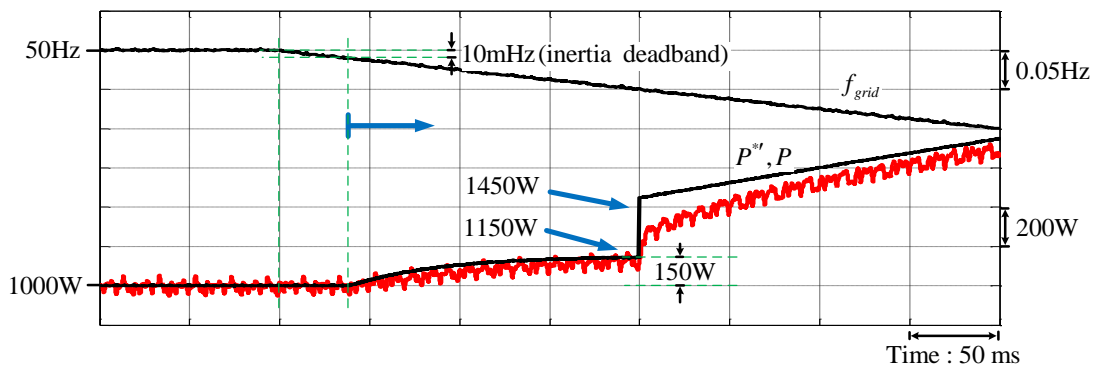
ZOOM



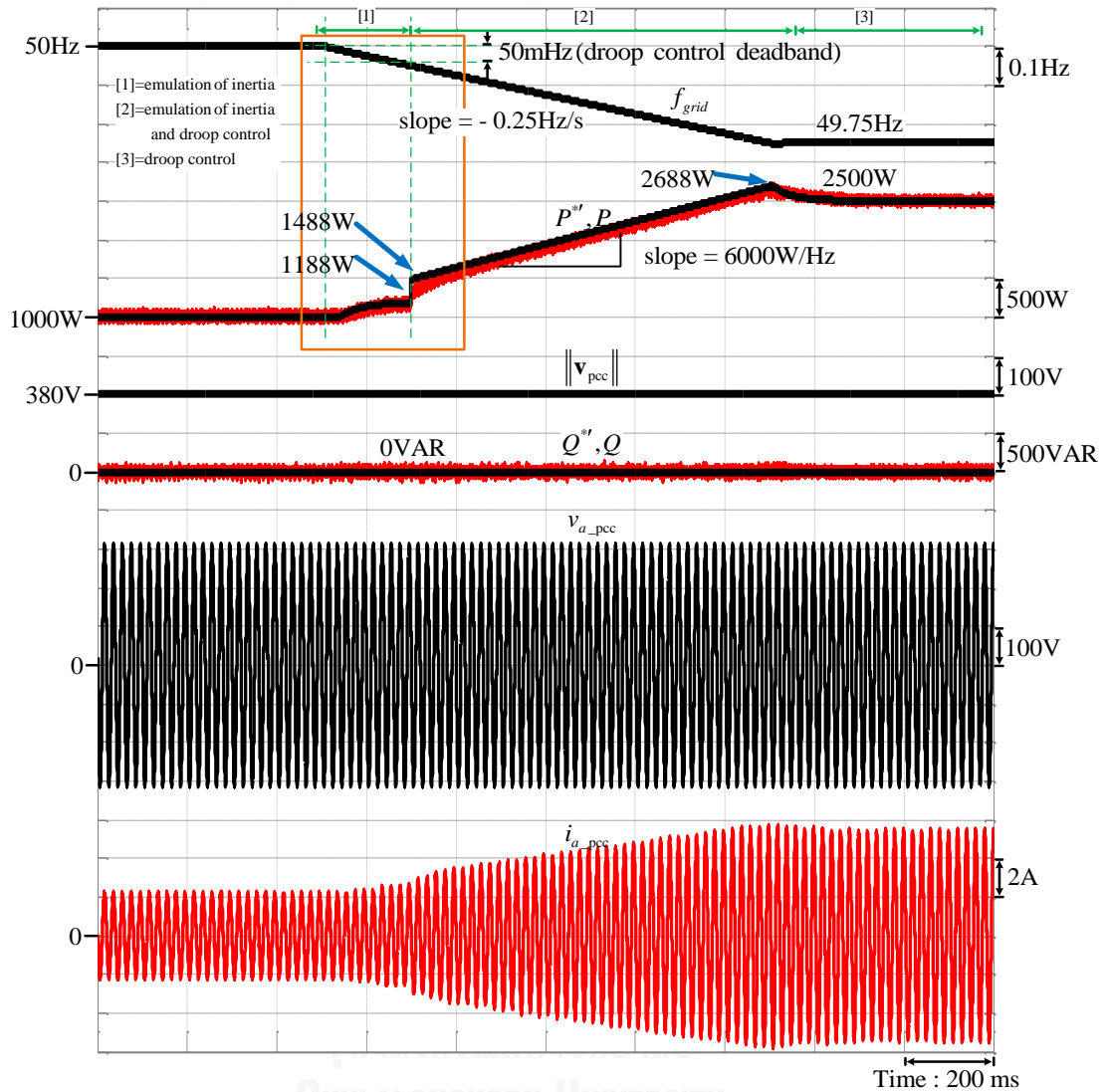
รูปที่ 5.25 ผลการจำลองการทำงานของฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเมื่อความถี่ของโครงข่ายลดลงด้วยความชัน -0.25Hz/s (กรณีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเสมือน K_d เท่ากับ 12)



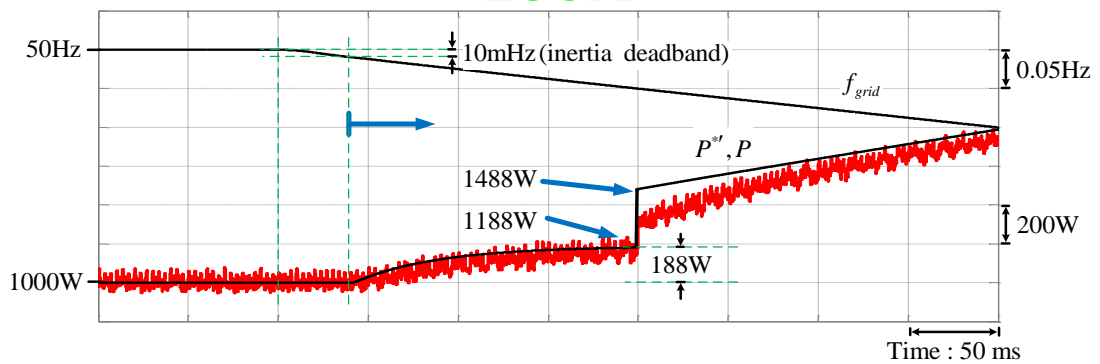
CHULALONGKORN UNIVERSITY
ZOOM



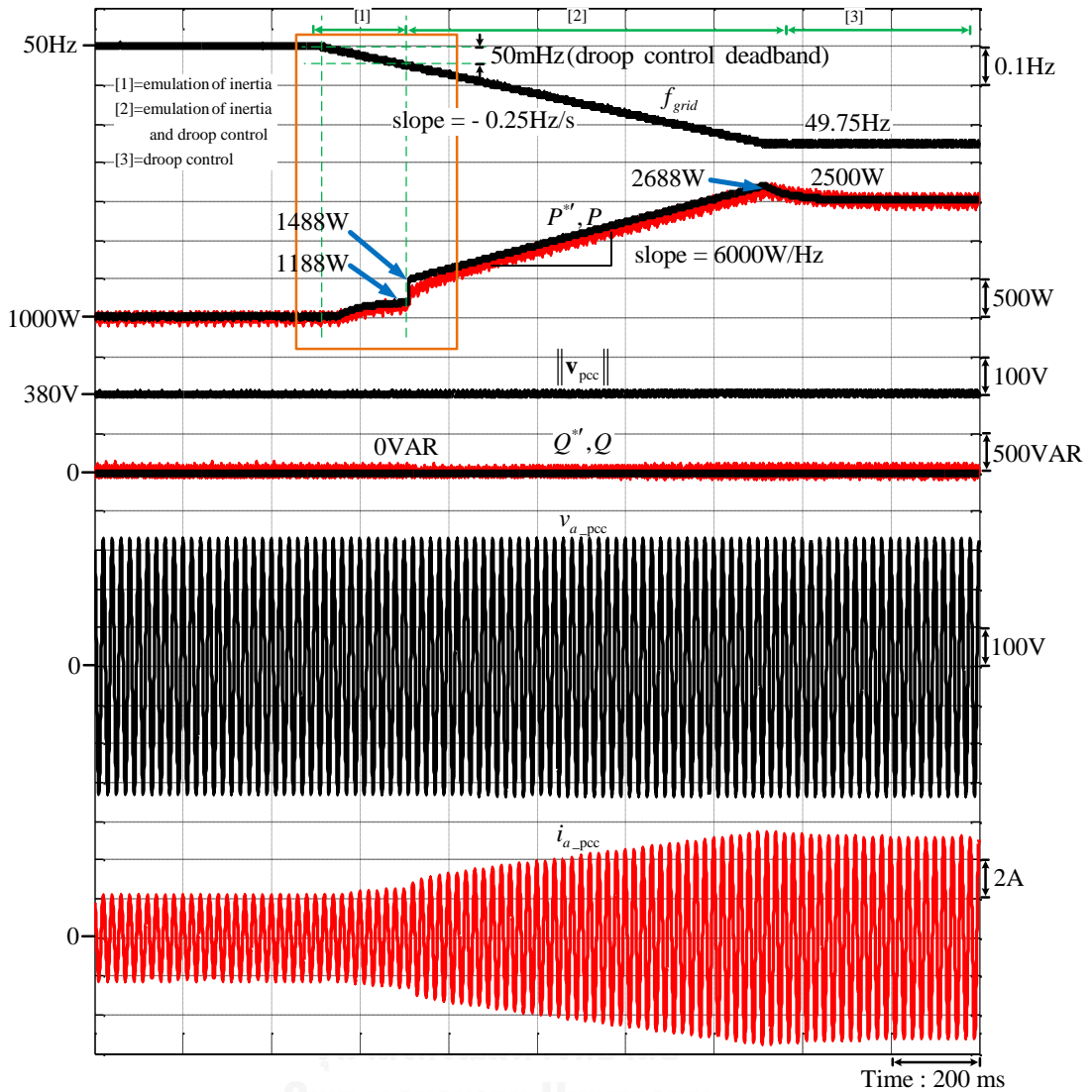
รูปที่ 5.26 ผลการทดลองการทำงานของฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเมื่อความถี่ของโครงข่ายลดลงด้วยความชัน -0.25Hz/s (กรณีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเสมือน K_d เท่ากับ 12)



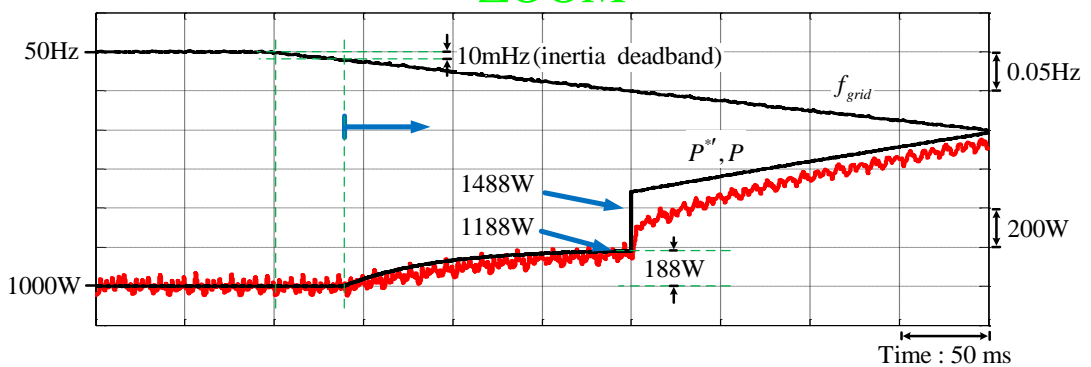
CHULALONGKORN UNIVERSITY
ZOOM



รูปที่ 5.27 ผลการจำลองการทำงานของฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเมื่อความถี่ของโครงข่ายลดลงด้วยความชัน -0.25Hz/s (กรณีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเสมือน K_d เท่ากับ 15)



CHULALONGKORN UNIVERSITY
ZOOM



รูปที่ 5.28 ผลการทดลองการทำงานของฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเมื่อความถี่ของโครงข่ายลดลงด้วยความชัน -0.25Hz/s (กรณีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเสมือน K_d เท่ากับ 15)

5.4. การทดสอบการทำงานสำหรับฟังก์ชันการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์

ผลการจำลองและผลการทดลองในรูปที่ 5.30 ถึงรูปที่ 5.45 แสดงถึงการควบคุมแรงดันด้านออกสำหรับอินเวอร์เตอร์ที่ทำงานในโหมดสร้างโครงข่าย (grid forming inverters) หรือโหมดไม่เชื่อมต่อโครงข่าย (standalone inverters) เมื่อมีการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ L_s ซึ่งเปรียบเสมือนความเหนี่ยวนำเชิงครอนส์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงครอนส์ โดยมีเงื่อนไขการทดสอบการทำงานที่สำคัญได้แก่ 1.) การเปลี่ยนโหมดจากสถานะที่ไม่มีฟังก์ชันการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์เป็นสถานะที่มีการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์ 2.) การจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์เมื่อระบบเข้าสู่สถานะอยู่ตัวและ 3.) การพิจารณาการเลื่อนเฟสระหว่างแรงดันคำสั่งปฐมภูมิกับแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์

รูปที่ 5.30 ถึงรูปที่ 5.33 เป็นผลการจำลองการทำงานเปรียบเทียบกับผลการทดลองเมื่อมีการเปลี่ยนโหมดจากสถานะที่ไม่มีฟังก์ชันการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์เป็นสถานะที่มีการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์ โดยมีเงื่อนไขตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 5.4 พบว่าแรงดันด้านออกในสถานะที่มีการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์จะมีค่าลดลงจากสถานะไม่มีการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์เนื่องจากแรงดันคำสั่งปฐมภูมิถูกหักลบด้วยค่าแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์เสมือนที่จำลองขึ้นสอดคล้องตามสมการที่ (2.16) (สังเกตได้จาก v_{dropL_s} เส้นสีม่วง) โดยขนาดของแรงดันด้านออกที่ลดลงจะขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัยได้แก่ 1.) ขนาดของค่าความเหนี่ยวนำเสมือน L_s ที่จำลองขึ้นและ 2.) กระแสที่ไหลผ่านอิมพีแดนซ์เสมือน i_{pcc} (หรือกระแสไหลตนเอง) ซึ่งเป็นไปตามกลไกการทำงานที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อ 2.2.3 ค่าขนาดของแรงดันด้านออกที่ลดลงตามกลไกการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์จะแสดงให้เห็นถึงการรักษาระดับแรงดัน (voltage regulation) ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ สำหรับทุกเงื่อนไขการทดสอบในตารางที่ 5.4 พบว่าการรักษาระดับแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์มีค่าลดลงไม่เกิน 5% ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้ในอุตสาหกรรมทั่วไป นอกจากขนาดของแรงดันด้านออกที่ลดลงแล้ว การลดลงของกำลังจริงที่จุด A และการเพิ่มขึ้นของกำลังรีแอกทีฟที่จุด A (ตำแหน่งของจุด A แสดงไว้ในรูปที่ 5.29) ยังแสดงให้เห็นถึงลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำที่จำลองขึ้นได้อย่างชัดเจน โดยปริมาณการเพิ่มขึ้นของกำลังรีแอกทีฟจะสอดคล้องกับค่าความเหนี่ยวนำที่จำลองขึ้นซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ในสมการที่(1.3) ส่วนปริมาณการลดลงของกำลังจริงจะสอดคล้องกับผลรวมของอิมพีแดนซ์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กระแสไหลไปยังโหลดน้อยลงนั่นเอง เมื่อระบบเข้าสู่สถานะอยู่ตัวแล้วอินเวอร์เตอร์สามารถควบคุมแรงดันด้านออกทั้งในแนวแกน d และแนวแกน q ตามค่าคำสั่งทั้งในภาวะที่ไม่มีฟังก์ชันการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์และสถานะที่มีการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์ได้อย่าง

ถูกต้อง โดยมีค่าความผิดพลาดใกล้เคียงศูนย์และมีค่าระลอกอยู่ในช่วง 0 – 10V (คิดเป็น 0 – 2.63% ของพิกัดแรงดันของอินเวอร์เตอร์)

รูปที่ 5.36 ถึงรูปที่ 5.39 เป็นผลการจำลองการทำงานเปรียบเทียบกับผลการทดลองของฟังก์ชันการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว โดยมีเงื่อนไขตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 5.4 พบว่าอินเวอร์เตอร์สามารถจำลองลักษณะสมบัติของตัวเหนี่ยวนำได้อย่างถูกต้อง โดยพิจารณาจากเวกเตอร์ของแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์เสมือนที่จำลองขึ้นบนกรอบอ้างอิงอยู่กับที่ (stationary reference frame, $\alpha\beta$) มีเฟสหน้าหน้ากระแสที่ไหลไปยังโหลด (คือกระแสเดียวกับกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเสมือนที่จำลองขึ้น) อยู่ 90 องศา และขนาดของแรงดันระหว่างสายที่จุดเชื่อมต่อจะมีขนาดต่ำกว่าแรงดันคำสั่งปฐมภูมิตามค่าแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์เสมือนที่จำลองขึ้นสอดคล้องตามสมการที่ (2.16) ผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองพบว่าอินเวอร์เตอร์ที่ทำงานในฟังก์ชันการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์สามารถควบคุมแรงดันคร่อมโหลดให้มีความใกล้เคียงสัญญาณไซน์ได้อย่างน่าพึงพอใจ โดยที่สัญญาณกระแสจะล่าหลังสัญญาณแรงดันสอดคล้องตามเงื่อนไขอิมพีแดนซ์ของโหลด

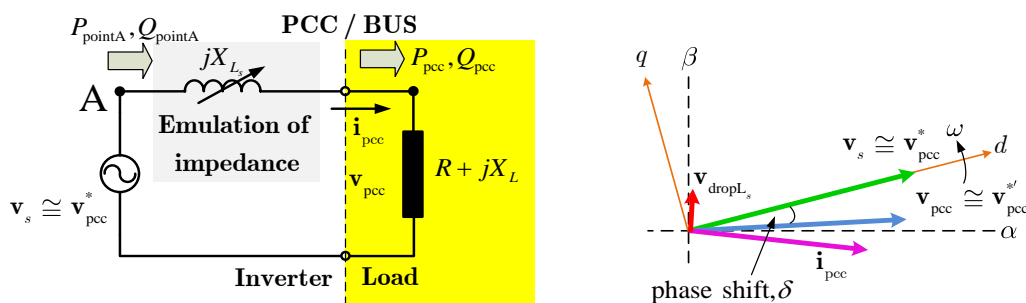
รูปที่ 5.40 ถึงรูปที่ 5.45 เป็นผลการจำลองเปรียบเทียบกับผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงการเลื่อนเฟสของแรงดันเฟสเนื่องจากการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ จะเห็นได้ว่าแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ (v_{a_pcc}) (ในสภาวะมีการจำลองอิมพีแดนซ์) มีเฟสล่าหลังแรงดันคำสั่งปฐมภูมิ ($v_{a_pcc}^*$) (ในสภาวะไม่มีการจำลองอิมพีแดนซ์) โดยขนาดของมุมเฟสล่าหลังจะแปรผันตามค่าขนาดของอิมพีแดนซ์เสมือนที่จำลองขึ้น สำหรับกรณีค่าความเหนี่ยวนำเสมือนเท่ากับ 8.73mH จะทำให้เกิดมุมเฟสล่าหลังเพียง 2.97 องศาคิดเป็นช่วงเวลาประมาณ 165 μs สำหรับกรณีค่าความเหนี่ยวนำเสมือนเท่ากับ 17.46mH จะทำให้เกิดมุมเฟสล่าหลังเพียง 5.86 องศาคิดเป็นช่วงเวลาประมาณ 325 μs ทั้งนี้ค่าความเหนี่ยวนำเสมือนทั้งสองกรณีดังกล่าวจะมีมุมเฟสล่าหลังเพียงเล็กน้อยซึ่งทำให้ตรวจวัดได้ยากในทางปฏิบัติ เนื่องจากตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลมีความละเอียดในการซิกตัวอย่าง (sampling) ข้อมูลด้วยความถี่ 10 kHz หรือทุกๆช่วงเวลา 100 μs อีกทั้งค่าแรงดันคำสั่งและแรงดันที่เกิดขึ้นจริงจะมีช่วงเวลาประวิง (delay time) จากการอัปเดตสัญญาณผ่านวงจรแปลงผันสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (digital to analog converters) ประมาณ 1 sampling ดังนั้นสำหรับมุมเฟสล่าหลังที่มีค่าค่อนข้างน้อยดังกล่าวจะทำให้การวัดและการตีความความหมายจากข้อมูลผลการทดลองอาจจะเกิดความผิดพลาดได้ง่าย ดังนั้นผู้ทดลองจึงได้ทดลองจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์ด้วยค่าความเหนี่ยวนำเสมือนที่มีค่ามากเพียงพอที่ทำให้ช่วงเวลาประวิง (delay time) ไม่มีนัยสำคัญคือ ค่าความเหนี่ยวนำเสมือนเท่ากับ 87.3mH หรือประมาณ 5 เท่าของค่าที่ได้ออกแบบไว้เพื่อเป็นการยืนยันว่าฟังก์ชันการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์นั้น

ทำงานได้อย่างถูกต้องพบว่าเกิดมมเฟสล่าหลัง 22.35 องศาคิดเป็นช่วงเวลาประมาณ 1.40 ms ผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองในรูปที่ 5.44 และรูปที่ 5.45 แสดงให้เห็นว่าการทำงานของฟังก์ชันการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์สามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง ในทางปฏิบัติการจำลองลักษณะสมบัติของตัวเหนี่ยวนำค่าสูงจะช่วยเสริมสมรรถนะการควบคุมรูปของกำลังจริงกับความถี่ เนื่องจากการทำให้ค่าความเหนี่ยวนำรวมในระบบมีค่าสูงกว่าค่าความต้านทาน

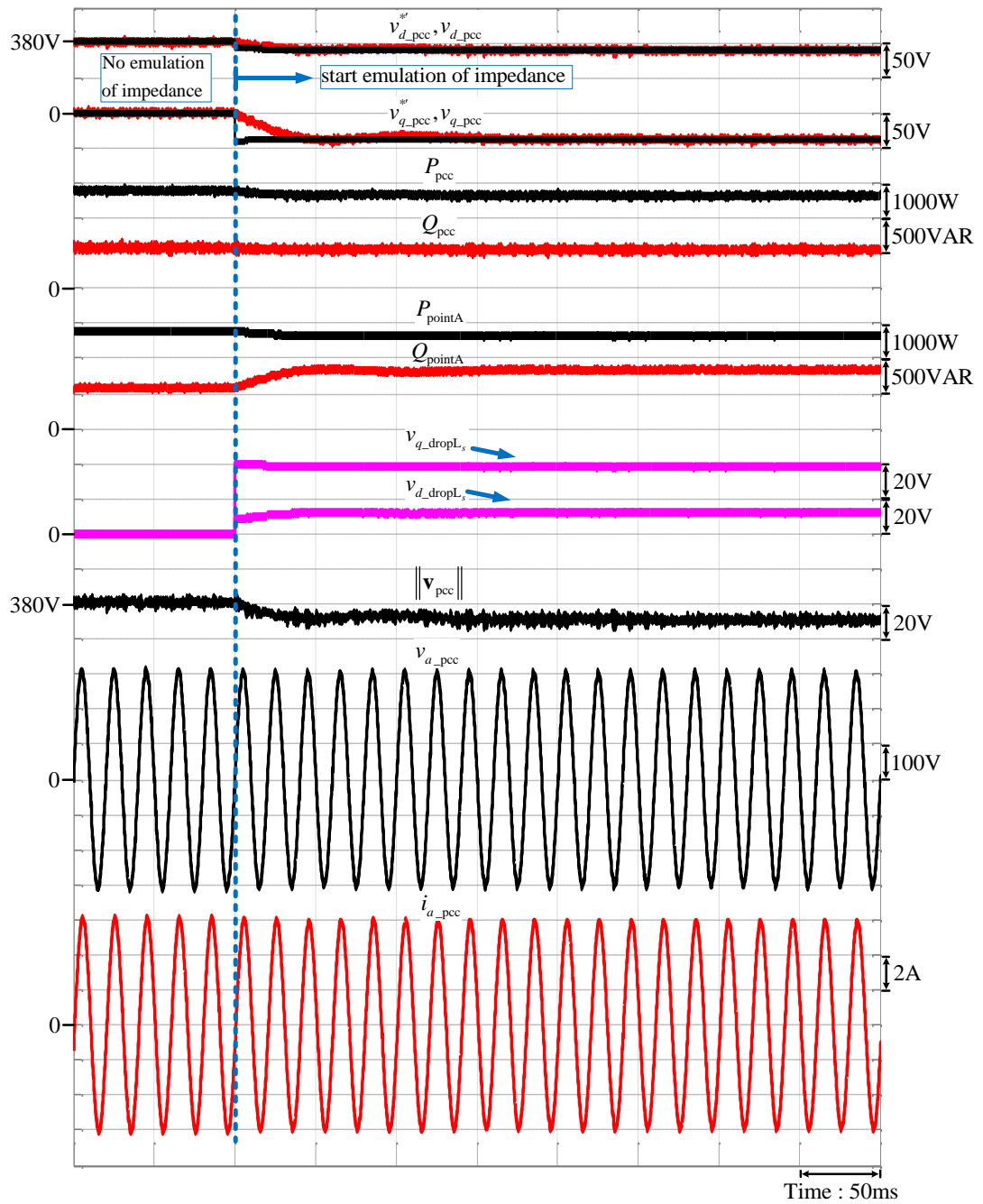
ตารางที่ 5.4 เงื่อนไขการทดสอบการทำงานสำหรับฟังก์ชันการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์เมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดสร้างโครงข่าย

การทดสอบ	เงื่อนไขตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบ			Phase shift	ผลการจำลอง	ผลการทดลอง
	L_s (mH)	$[v_d^*, v_q^*]$	โหลด (Ω)			
Change mode	17.46	[380,0]	$50 + j10.41\Omega$	5.86	รูปที่ 5.30	รูปที่ 5.31
	8.73	[380,0]	$50 + j10.41\Omega$	2.97	รูปที่ 5.32	รูปที่ 5.33
	17.46	[380,0]	$100 + j20.8\Omega$	2.97	รูปที่ 5.34	รูปที่ 5.35
Steady state	17.46	[380,0]	$50 + j10.41\Omega$	5.86	รูปที่ 5.36	รูปที่ 5.37
	8.73	[380,0]	$50 + j10.41\Omega$	2.97	รูปที่ 5.38	รูปที่ 5.39
Phase shift	17.46	[380,0]	$50 + j10.41\Omega$	5.86	รูปที่ 5.40	รูปที่ 5.41
	8.73	[380,0]	$50 + j10.41\Omega$	2.97	รูปที่ 5.42	รูปที่ 5.43
	87.3	[380,0]	$50 + j10.41\Omega$	25.4	รูปที่ 5.44	รูปที่ 5.45

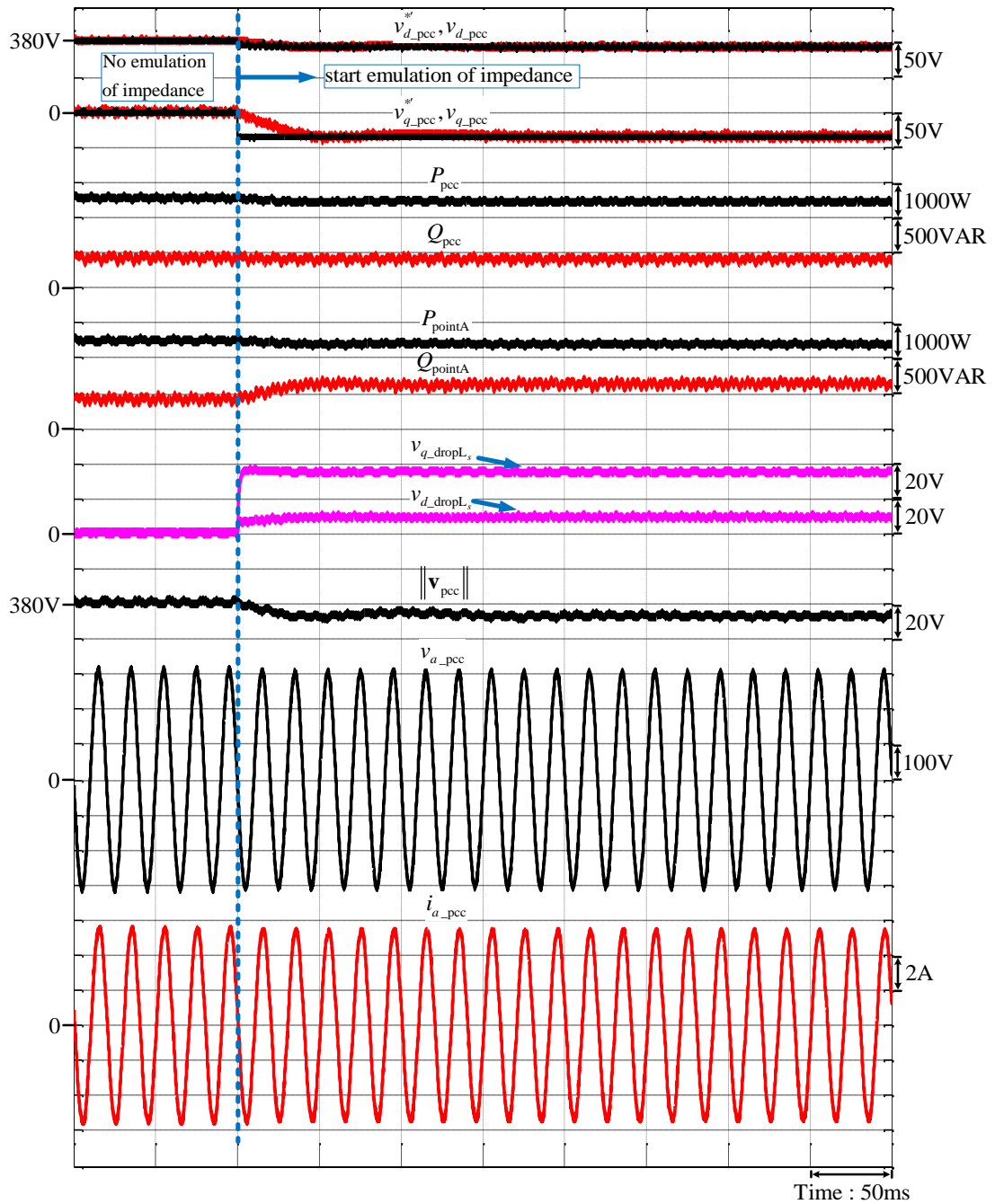
- ที่แรงดัน 380V โหลด $50 + j10.41\Omega$ และ $100 + j20.8\Omega$ จะได้กำลัง 2838 VA และ 1400 VA คิดเป็น 94.6% และ 46.6% ของพิกัดกำลังอินเวอร์เตอร์ ตามลำดับ
- L_s เท่ากับ 8.73 mH คิดเป็น 0.057 pu. (หรือครึ่งหนึ่งของที่ออกแบบไว้)
- L_s เท่ากับ 87.3 mH คิดเป็น 0.57 pu. (หรือ 5 เท่าของที่ออกแบบไว้)



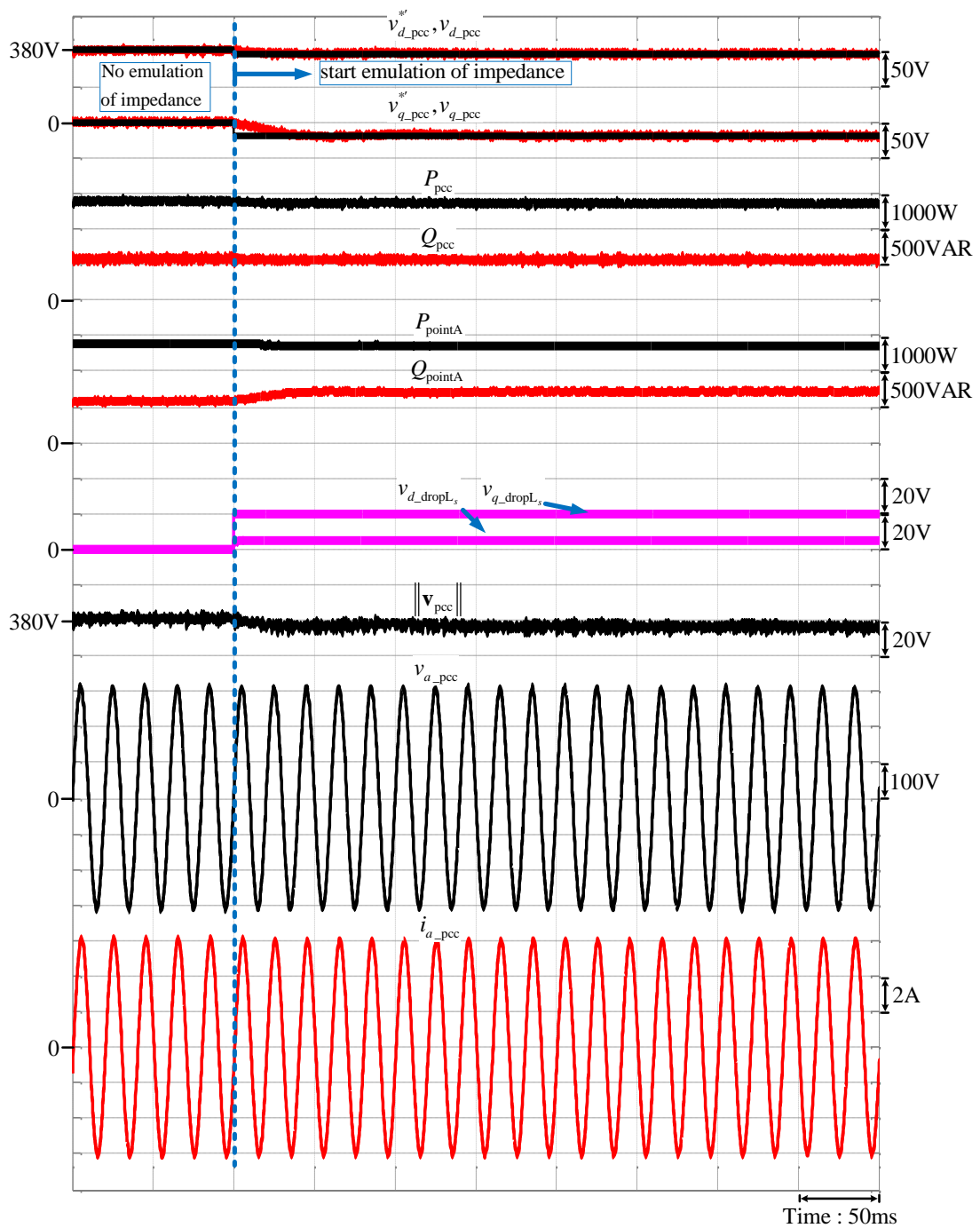
รูปที่ 5.29 การจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์ (ซ้าย) วงจรสมมูล (ขวา) เวกเตอร์ไดอะแกรม แสดงการเลื่อนเฟส



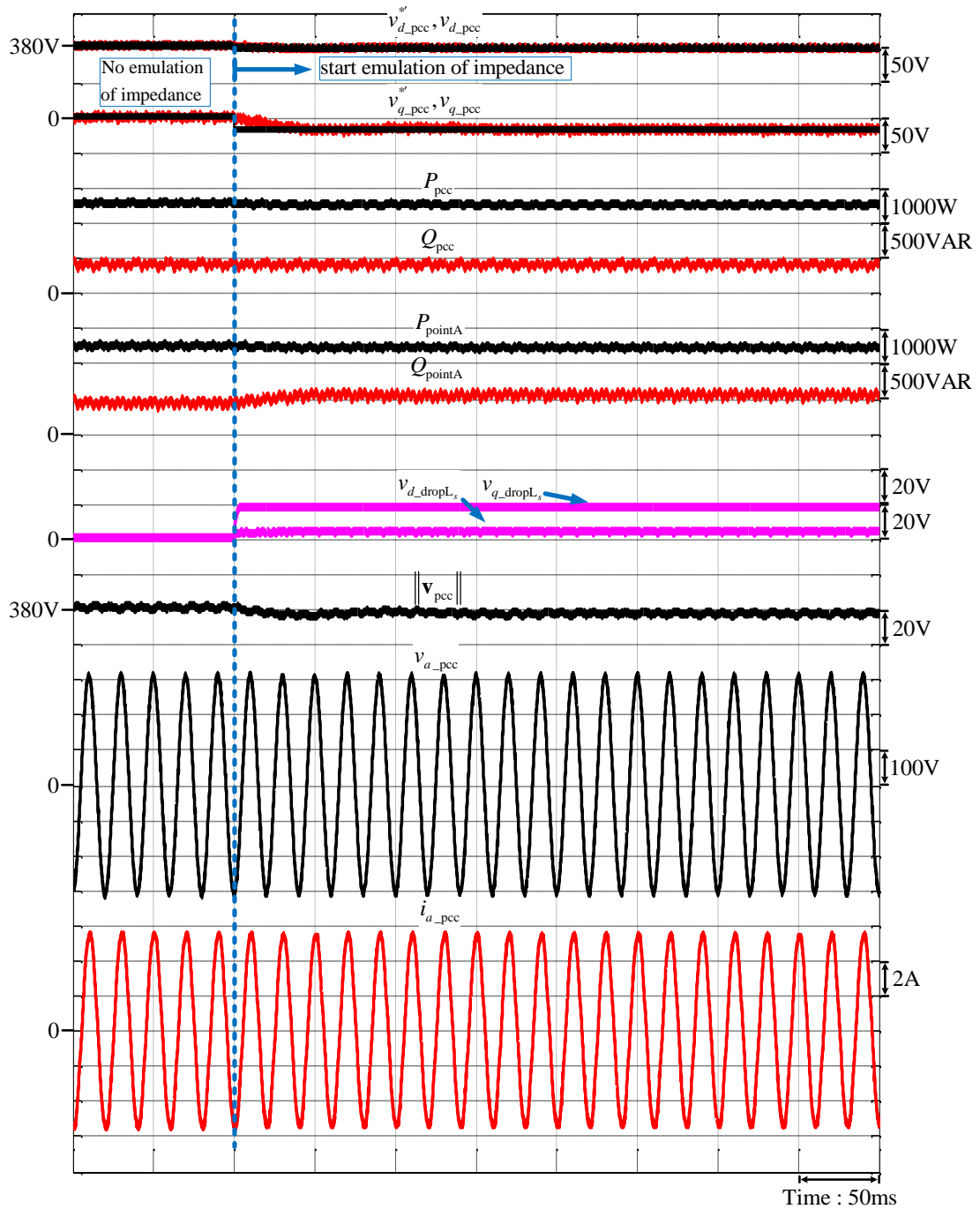
รูปที่ 5.30 ผลการจำลองการทำงานการควบคุมแรงดันด้านออกเมื่อเปลี่ยนโหมดจากกรณีไม่มีการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์เป็นกรณีมีการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์ $L_s = 17.46\text{mH}$ กรณีจ่ายโหลด $Z_L(s) = 50 + j10.41\Omega$



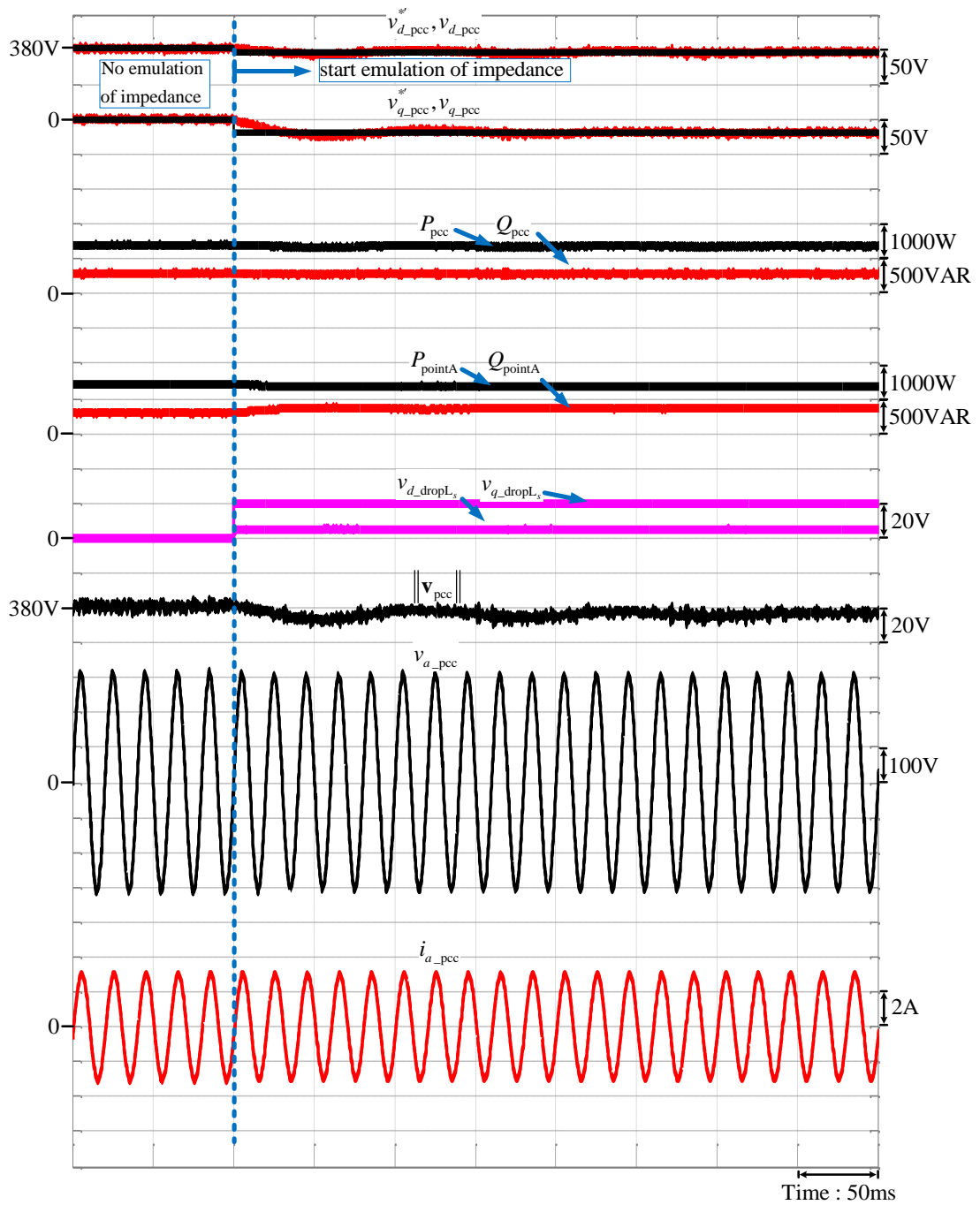
รูปที่ 5.31 ผลการทดลองการควบคุมแรงดันด้านออกเมื่อเปลี่ยนโหมดจากกรณีไม่มีการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์เป็นกรณีมีการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์ $L_s = 17.46\text{mH}$ กรณีจ่ายโหลด $Z_L(s) = 50 + j10.41\Omega$



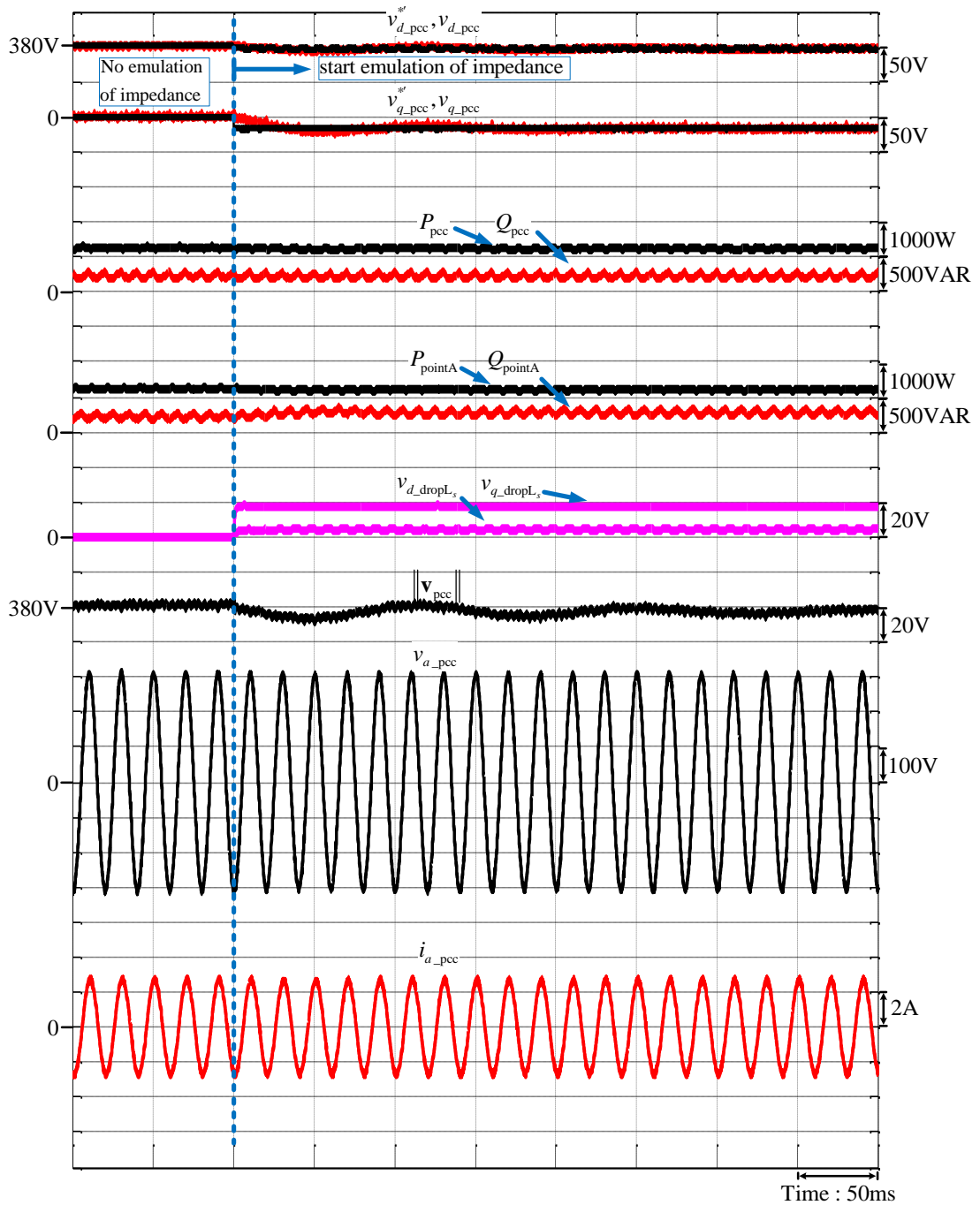
รูปที่ 5.32 ผลการจำลองการทำงานการควบคุมแรงดันด้านออกเมื่อเปลี่ยนโหมดจากกรณีไม่มีการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์เป็นกรณีมีการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์ $L_s = 8.73\text{mH}$ กรณีจ่ายโหลด $Z_L(s) = 50 + j10.41\Omega$



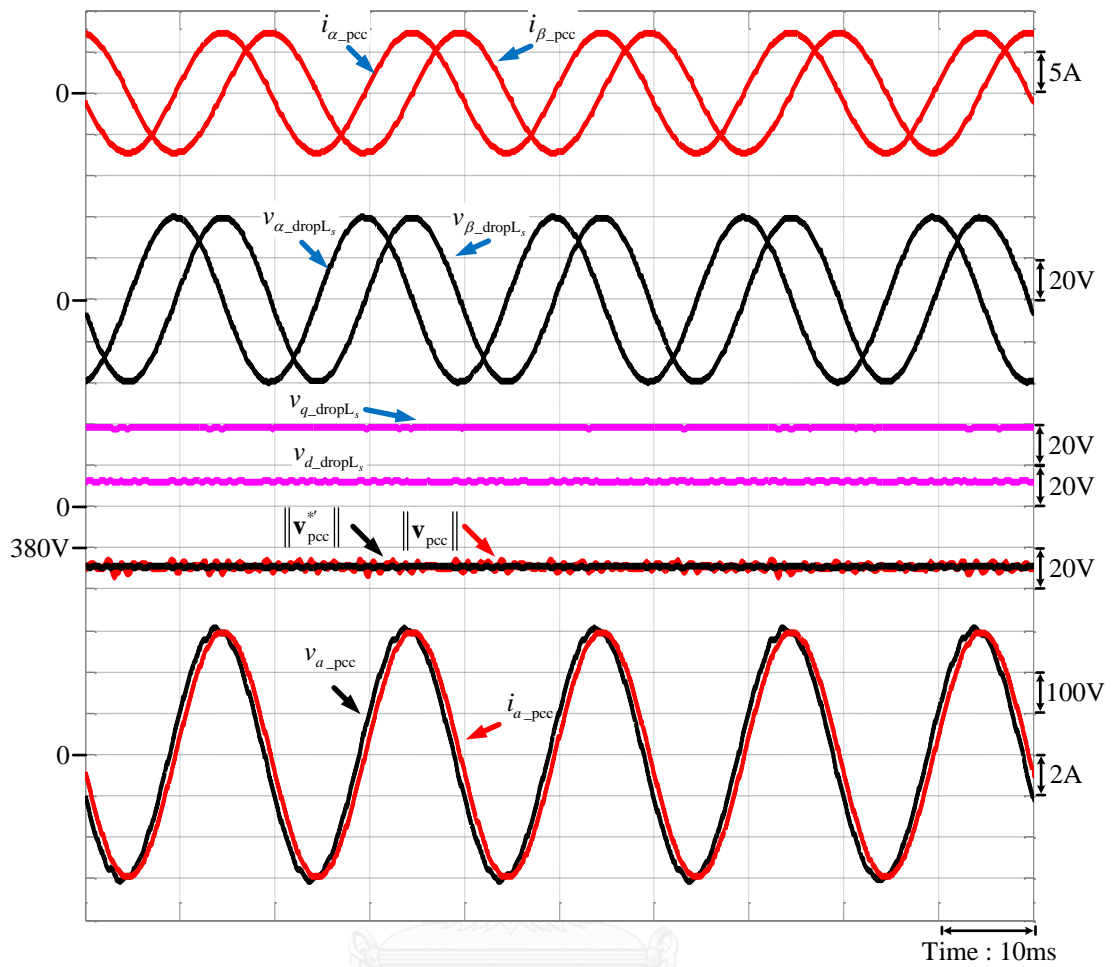
รูปที่ 5.33 ผลการทดลองการควบคุมแรงดันด้านออกเมื่อเปลี่ยนโหมดจากกรณีไม่มีการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์เป็นกรณีที่มีการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์ $L_s = 8.73\text{mH}$ กรณีจ่ายโหลด $Z_L(s) = 50 + j10.41\Omega$



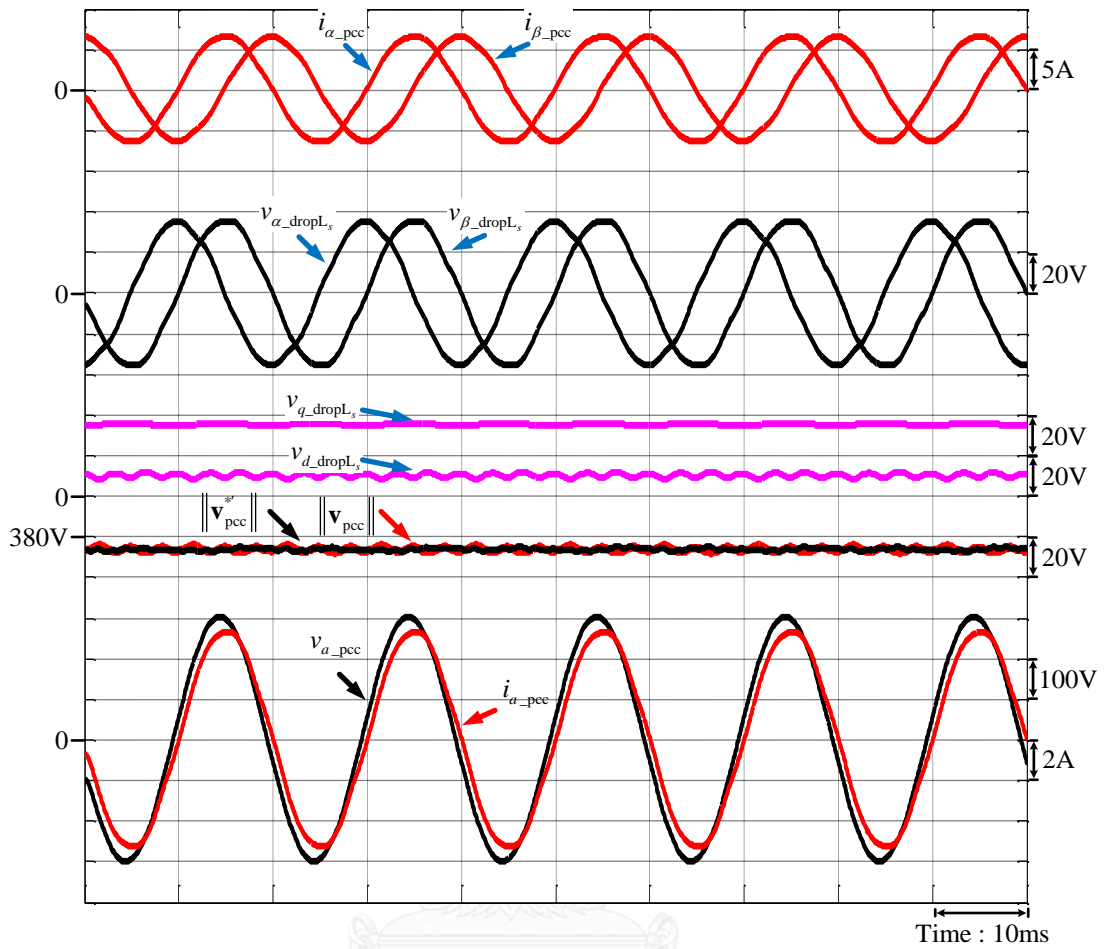
รูปที่ 5.34 ผลการจำลองการทำงานแสดงการควบคุมแรงดันด้านออกเมื่อเปลี่ยนโหมดจากกรณีไม่มีการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์เป็นกรณีมีการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์ $L_s = 17.46\text{mH}$ กรณีจ่ายโหลด $Z_L(s) = 100 + j20.82\Omega$



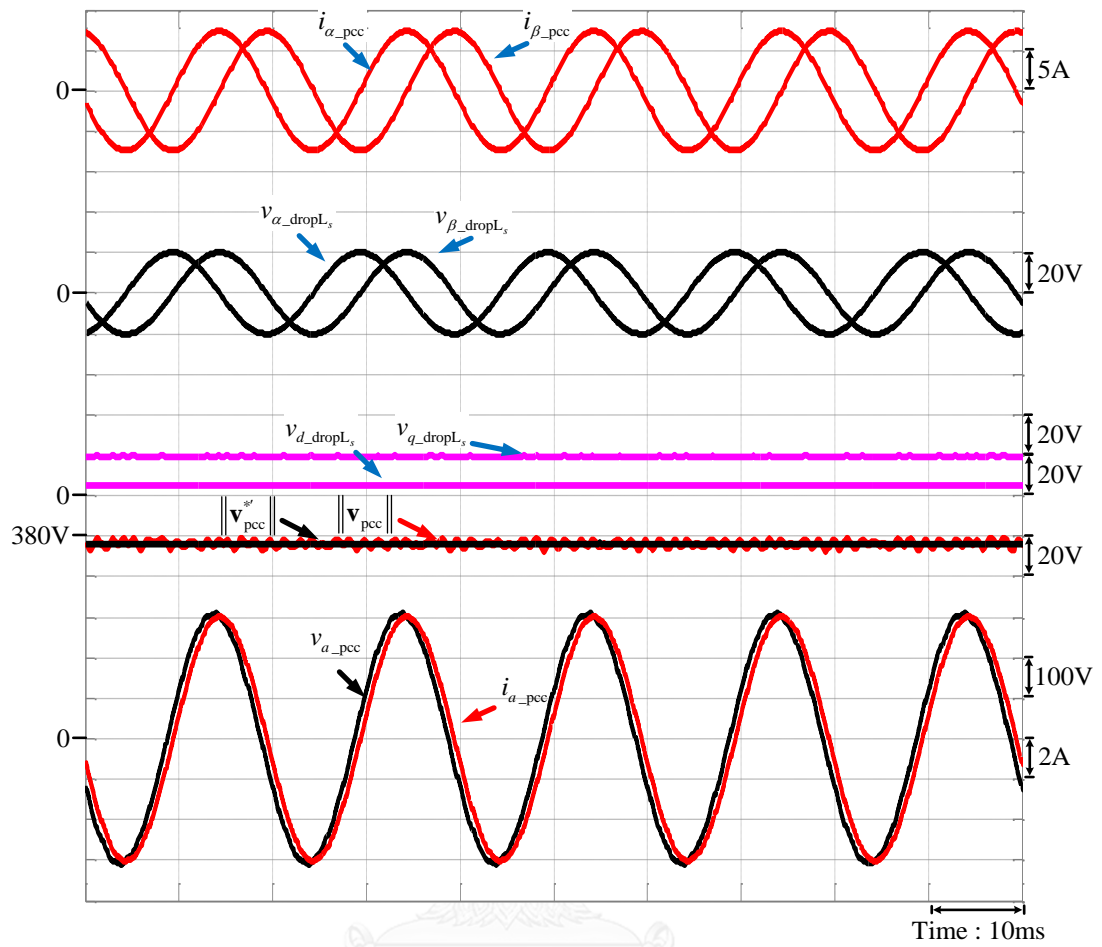
รูปที่ 5.35 ผลการทดลองแสดงการควบคุมแรงดันด้านออกเมื่อเปลี่ยนโหมตจากกรณีไม่มีการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์เป็นกรณีมีการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์ $L_s = 17.46\text{mH}$ กรณีจ่ายโหลด $Z_L(s) = 100 + j20.82\Omega$



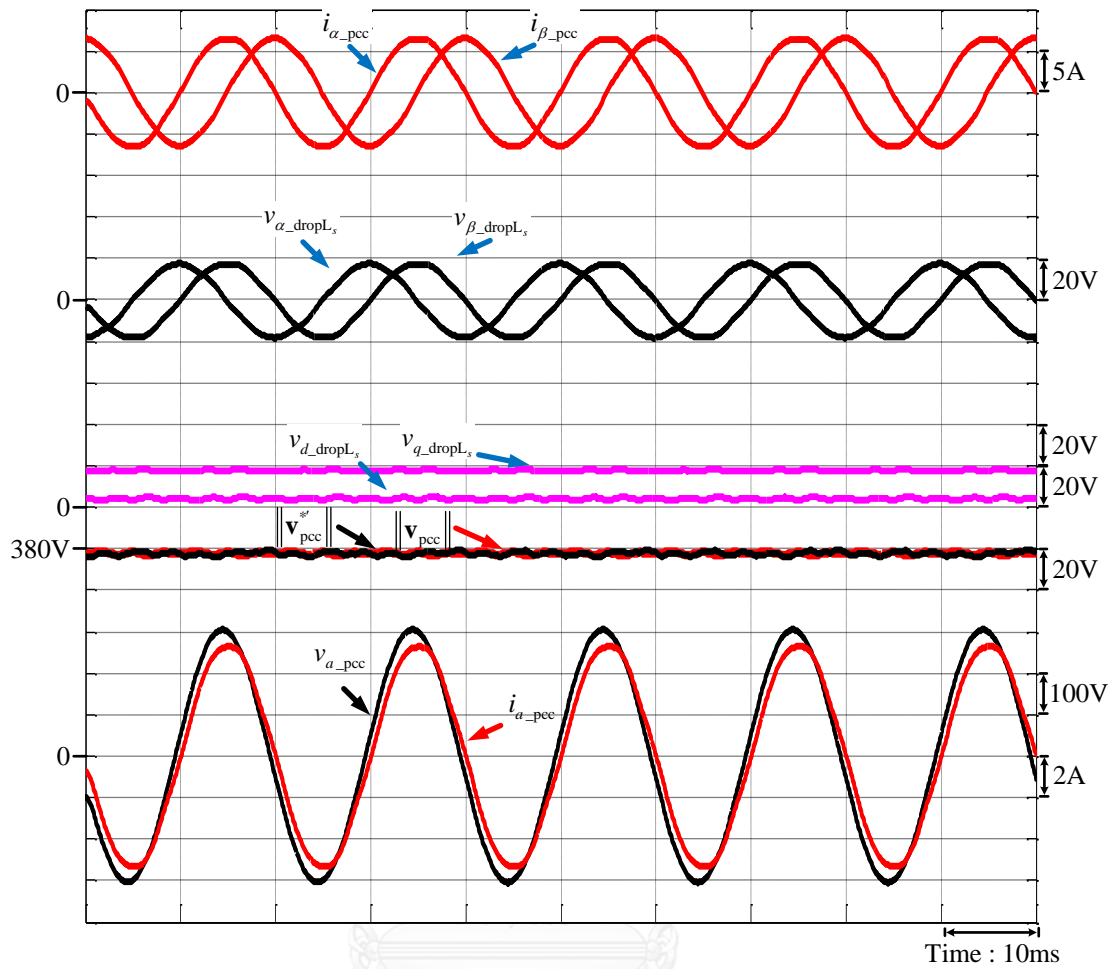
รูปที่ 5.36 ผลการจำลองการทำงานแสดงแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์เสมือนเมื่อมีการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์ $L_s = 17.46\text{mH}$ กรณีจ่ายโหลด $Z_L(s) = 50 + j10.41\Omega$



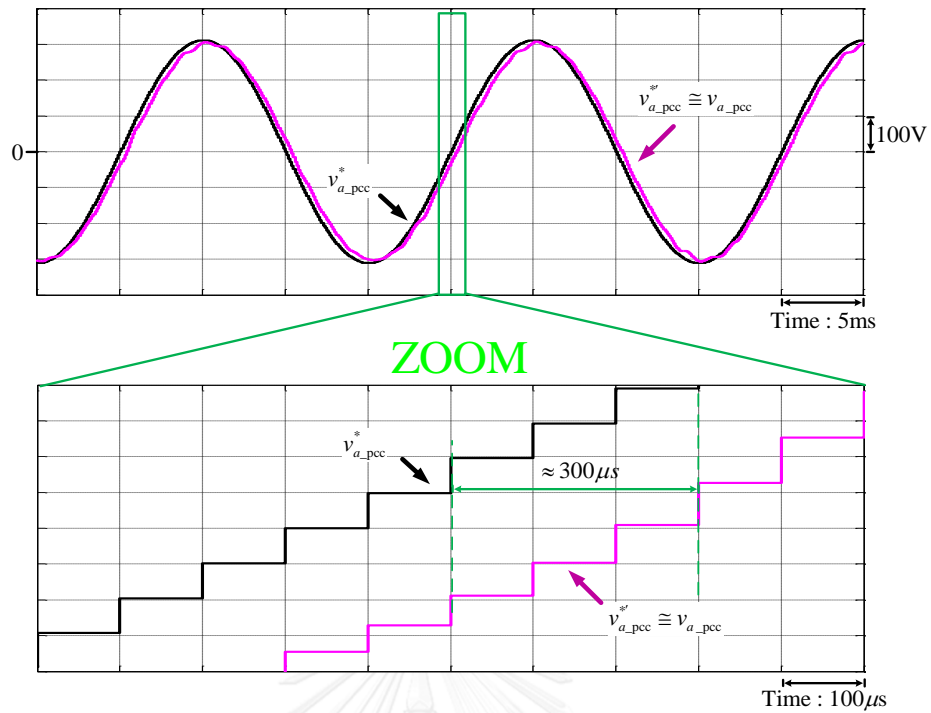
รูปที่ 5.37 ผลการทดลองแสดงแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์เสมือนเมื่อมีการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์ $L_s = 17.46\text{mH}$ กรณีจ่ายโหลด $Z_L(s) = 50 + j10.41\Omega$



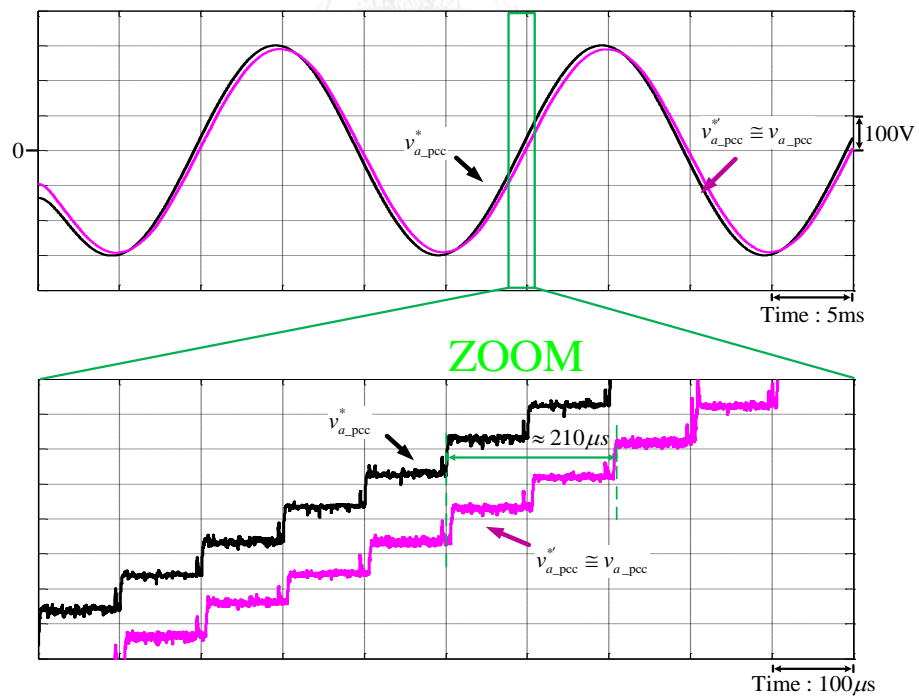
รูปที่ 5.38 ผลการจำลองการทำงานแสดงแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์เสมือนเมื่อมีการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์ $L_s = 8.73\text{mH}$ กรณีจ่ายโหลด $Z_L(s) = 50 + j10.41\Omega$



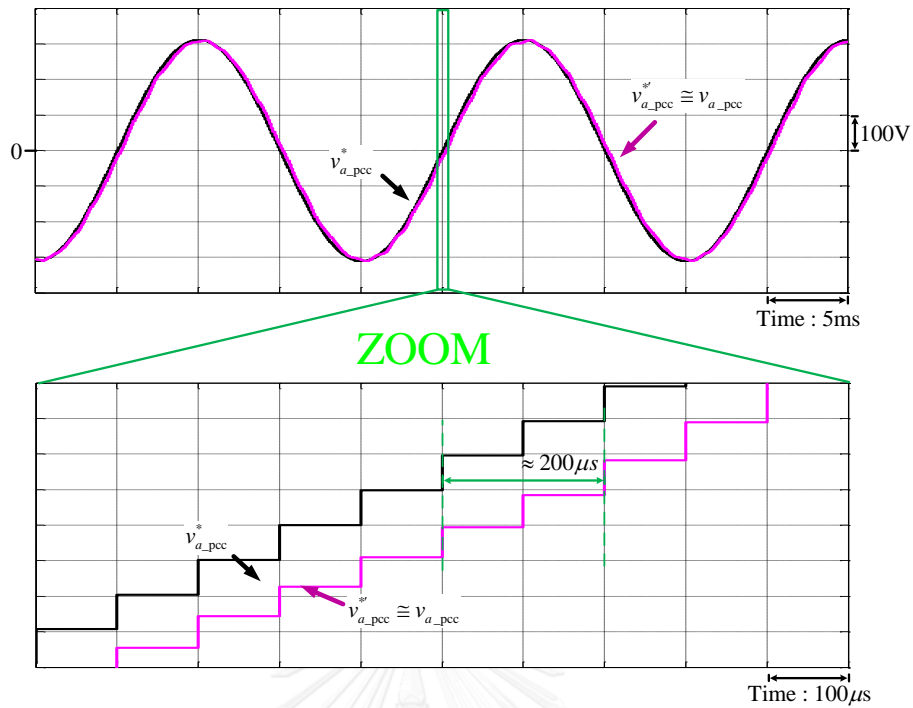
รูปที่ 5.39 ผลการทดลองแสดงแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์เสมือนเมื่อมีการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์ $L_s = 8.73\text{mH}$ กรณีจ่ายโหลด $Z_L(s) = 50 + j10.41\Omega$



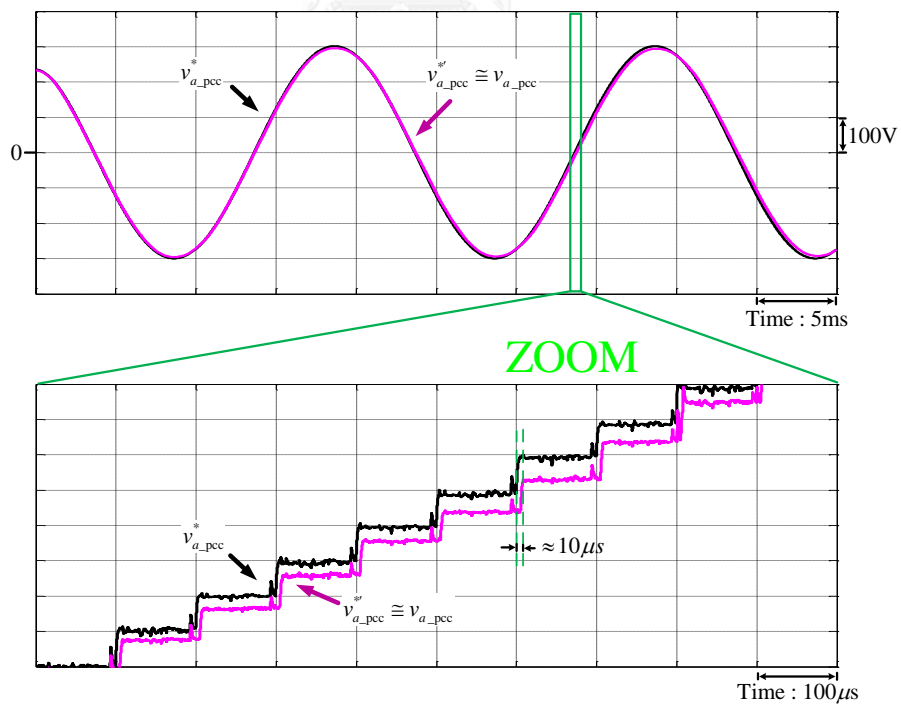
รูปที่ 5.40 ผลการจำลองการทำงานแสดงการเลื่อนเฟสของแรงดันเฟสเนื่องจากลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์เสมือน (ตัวเหนี่ยวนำ $L_s = 17.46\text{mH}$) กรณีจ่ายโหลด $Z_L(s) = 50 + j10.41\Omega$



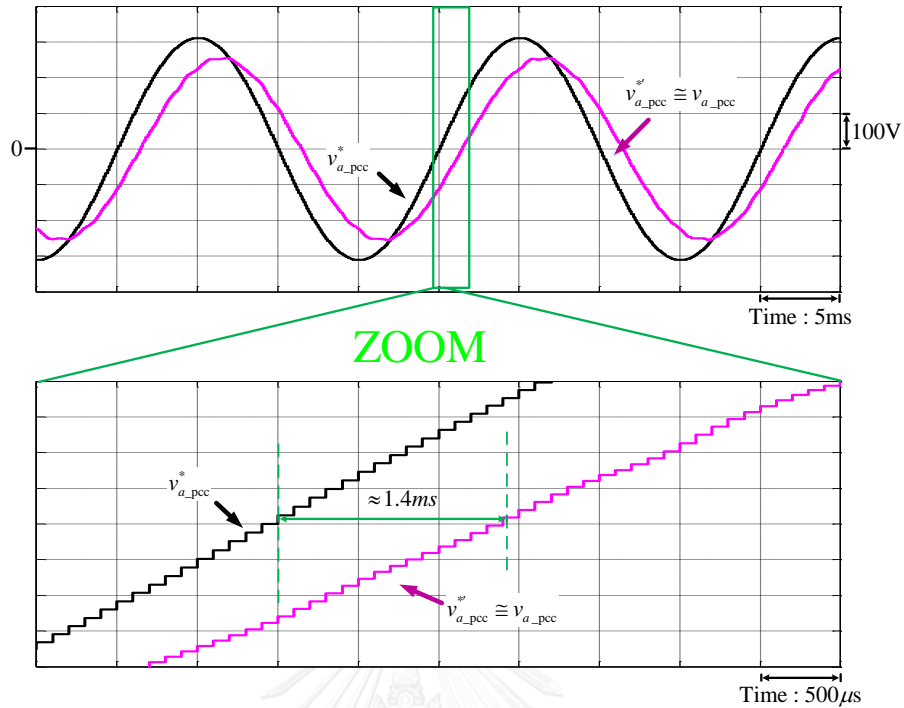
รูปที่ 5.41 ผลการทดลองแสดงการเลื่อนเฟสของแรงดันเฟสเนื่องจากลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์เสมือน (ตัวเหนี่ยวนำ $L_s = 17.46\text{mH}$) กรณีจ่ายโหลด $Z_L(s) = 50 + j10.41\Omega$



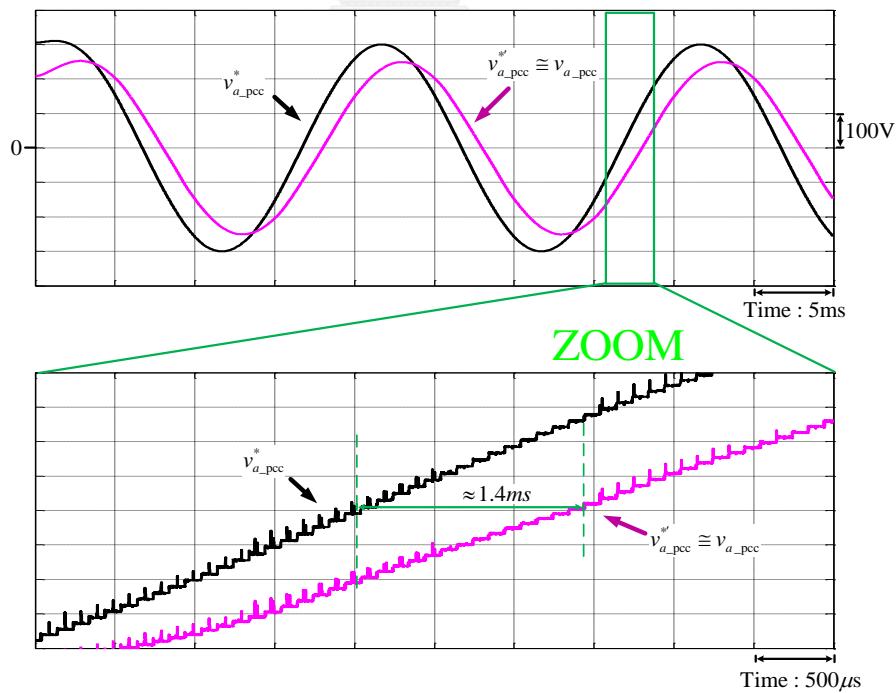
รูปที่ 5.42 ผลการจำลองการทำงานแสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเฟสเนื่องจากลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์เสมือน (ตัวเหนี่ยวนำ $L_s = 8.73\text{mH}$) กรณีจ่ายโหลด $Z_L(s) = 50 + j10.41\Omega$



รูปที่ 5.43 ผลการทดลองแสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเฟสเนื่องจากลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์เสมือน (ตัวเหนี่ยวนำ $L_s = 8.73\text{mH}$) กรณีจ่ายโหลด $Z_L(s) = 50 + j10.41\Omega$



รูปที่ 5.44 ผลการจำลองการทำงานแสดงการเลื่อนเฟสของแรงดันเฟสเนื่องจากลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์เสมือน (ตัวเหนี่ยวนำ $L_s = 87.3\text{mH}$) กรณีจ่ายโหลด $Z_L(s) = 50 + j10.41\Omega$



รูปที่ 5.45 ผลการทดลองแสดงการเลื่อนเฟสของแรงดันเฟสเนื่องจากลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์เสมือน (ตัวเหนี่ยวนำ $L_s = 87.3\text{mH}$) กรณีจ่ายโหลด $Z_L(s) = 50 + j10.41\Omega$

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1. บทสรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้พัฒนาอินเวอร์เตอร์ยุคใหม่ที่มีฟังก์ชันการจำลองลักษณะสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสในแบบดั้งเดิมทั้งลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลที่สามารถช่วยสนับสนุนเสถียรภาพของความถี่และแรงดันของโครงข่ายไฟฟ้า ฟังก์ชันที่พัฒนาขึ้นได้แก่ ฟังก์ชันการควบคุมรูป ฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลและฟังก์ชันการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์

1. ฟังก์ชันการควบคุมรูป จะอาศัยการปรับเพิ่ม/ลดการจ่ายกำลังจริงเข้าที่จุดเชื่อมต่อเมื่อความถี่ของโครงข่ายเปลี่ยนแปลงจากค่าปกติและจะอาศัยการปรับเพิ่ม/ลดการจ่ายกำลังรีแอกทีฟเข้าที่จุดเชื่อมต่อเมื่อขนาดแรงดันของโครงข่ายเปลี่ยนแปลงจากค่าปกติ โดยปริมาณการปรับเปลี่ยนจะถูกกำหนดโดยค่าสัมประสิทธิ์ความชัน $1/k_p, 1/k_q$ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าปริมาณการปรับเพิ่ม/ลดการจ่ายกำลังจริง/กำลังรีแอกทีฟจากฟังก์ชันการควบคุมรูปจะช่วยทำให้ความถี่และแรงดันของโครงข่ายเปลี่ยนแปลงจากค่าปกติไปไม่มากนัก ดังนั้นอินเวอร์เตอร์ที่มีฟังก์ชันการควบคุมรูปจะมีส่วนช่วยสนับสนุนเสถียรภาพของโครงข่ายทั้งในแง่ของความถี่และแรงดันของโครงข่ายในสภาวะอยู่ตัว (frequency and voltage regulation for steady state operations)
2. ฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกล จะอาศัยการปรับเพิ่ม/ลดการจ่ายกำลังจริงเข้าที่จุดเชื่อมต่อเมื่อเกิดอัตราการเปลี่ยนแปลงของความถี่ของโครงข่าย (df/dt) โดยปริมาณการปรับเพิ่ม/ลดการจ่ายกำลังจริงจะถูกกำหนดโดยค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลเสมือน K_d จะเห็นได้ว่าปริมาณการปรับเพิ่ม/ลดการจ่ายกำลังจริงจากฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลจะช่วยตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของความถี่เนื่องจากความไม่สมดุลระหว่างกำลังงานจากการผลิตและกำลังงานจากโหลดซึ่งแสดงถึงการทำหน้าที่ปลดปล่อยและกักเก็บพลังงานจลน์ของความเฉื่อยทางกล ดังนั้นอินเวอร์เตอร์ที่มีฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลจะมีส่วนช่วยสนับสนุนเสถียรภาพโครงข่ายด้านความถี่ในสภาวะชั่วคราว (frequency regulation for transient operations) และสามารถรองรับต่อข้อกำหนดการเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้าที่มีการกำหนดอัตราแรมป์ (ramp rate) ซึ่งอาจจะมีผลบังคับใช้ในอนาคตได้

3. ฟังก์ชันการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์ จะแสดงให้เห็นถึงอินเวอร์เตอร์มีลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์เหมือนกับค่าความเหนี่ยวนำซิงโครนัส (synchronous inductance, L_s) ส่งผลให้โครงสร้างอิมพีแดนซ์ของโครงข่ายมีรีแอคแตนซ์มากกว่าความต้านทาน ($X \gg R$) ลักษณะสมบัติของตัวเหนี่ยวนำดังกล่าวจะช่วยเสริมสมรรถนะการควบคุมรูประหว่างกำลังจริงและความถี่และการควบคุมรูประหว่างกำลังรีแอคทีฟและขนาดของแรงดันให้ไปในทิศทางที่ถูกต้อง ผลต่างระหว่างแรงดันคำสั่งปฐมภูมิกับแรงดันด้านออกจากอิมพีแดนซ์เสมือนที่จำลองขึ้นทำให้เกิดการไหลของกำลังรีแอคทีฟไปยังจุดเชื่อมต่อได้อินเวอร์เตอร์ที่มีฟังก์ชันการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์ จะมีส่วนช่วยในการสนับสนุนเสถียรภาพของแรงดันทั้งในสภาวะอยู่ตัวและสภาวะชั่วคราว (voltage regulation for steady state and transient operations)

การจำลองลักษณะสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสสำหรับอินเวอร์เตอร์โฟลตอลเทอีกใน 3 ประเด็นดังกล่าวข้างต้น จะทำให้อินเวอร์เตอร์สามารถสนับสนุนโครงข่ายไฟฟ้าในการช่วยรักษาการเปลี่ยนแปลงของความถี่และแรงดันครอบคลุมทั้งในสภาวะอยู่ตัวและสภาวะชั่วคราวได้ เช่นเดียวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส และการวิเคราะห์และการออกแบบวงรอบควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 แสดงให้เห็นว่าอินเวอร์เตอร์ที่มีฟังก์ชันการจำลองลักษณะสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสมีสมรรถนะในการช่วยสนับสนุนโครงข่ายสำหรับทุกเงื่อนไขค่าคำสั่งกำลังจริงและกำลังรีแอคทีฟ อีกทั้งยังสามารถทำงานในโหมดสร้างโครงข่ายทุกเงื่อนไขค่าคำสั่งแรงดันด้านออกและโหลดที่นำมาเชื่อมต่อ

6.2. ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

แม้ว่าแนวคิดการจำลองลักษณะสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสสำหรับอินเวอร์เตอร์โฟโตโวลเทอิกที่ได้นำเสนอไว้ สามารถทำงานได้อย่างถูกต้องตามวิธีการทดสอบแล้วก็ตาม แต่ก็ยังมีประเด็นที่สามารถศึกษาเพิ่มเติมเพื่อทำให้สมรรถนะของอินเวอร์เตอร์ดียิ่งขึ้นได้แก่

1. เนื่องจากอินเวอร์เตอร์โฟโตโวลเทอิกที่นำเสนอเป็นอินเวอร์เตอร์แบบจ่ายกำลังงานเข้าสู่โครงข่ายทิศทางเดียวทำให้ในบางเงื่อนไขของค่าคำสั่งกำลังจริงปฐมภูมิ อินเวอร์เตอร์จะไม่สามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ ตัวอย่างเช่น อินเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดการติดตามกำลังงานสูงสุด (Maximum Power Point Tracking, MPPT) แล้วเกิดปรากฏการณ์ความถี่ของโครงข่ายลดลง ฟังก์ชันการควบคุมรูปของกำลังจริงและฟังก์ชันการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลจะต้องปรับเพิ่มการจ่ายกำลังจริงเข้าสู่โครงข่าย แต่อินเวอร์เตอร์ไม่สามารถจ่ายกำลังงานเพิ่มได้อีกแล้ว ดังนั้น อินเวอร์เตอร์ควรมีระบบสะสมพลังงาน (energy storage systems) หรือเทคโนโลยีอื่นๆ เพื่อที่จะตอบสนองต่อการเพิ่ม/ลดการจ่ายกำลังจริงจากฟังก์ชันการทำงานดังกล่าวด้วยการสั่งอัดประจุ (charge) หรือคายประจุ (discharge) ทั้งนี้ขนาดของแบตเตอรี่จะขึ้นอยู่กับพิกัดกำลังของอินเวอร์เตอร์และสถานการณ์อัดประจุ (state of charge) เป็นต้น
2. เนื่องจากอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดสอบสามารถควบคุมการจ่ายกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟในสภาวะอยู่ตัวได้อย่างอิสระต่อกันดังนั้นสำหรับจุดทำงานที่อินเวอร์เตอร์จ่ายกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟในปริมาณมากอาจจะทำให้เกิดการจ่ายกำลังเกินพิกัดกำลังของอินเวอร์เตอร์ (apparent power) ดังนั้นวงรอบการควบคุมควรมีเงื่อนไขเกี่ยวกับการจัดการคำสั่งกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟเพื่อไม่ให้เกิดกรณีคำสั่งรวมเกินพิกัดกำลังของอินเวอร์เตอร์
3. ประยุกต์ใช้ฟังก์ชันการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์ในโหมดสนับสนุนโครงข่าย (grid supporting inverters) หรือโหมดเชื่อมต่อโครงข่าย (grid connected inverters)
4. เราสามารถประยุกต์การทดสอบสำหรับการเปลี่ยนโหมดการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่มีฟังก์ชันการจำลองลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์จากโหมดเชื่อมต่อโครงข่ายเป็นโหมดไม่เชื่อมต่อโครงข่ายเพื่อให้เห็นถึงลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

- [1] H. Alatrash, A. Mensah, E. Mark, G. Haddad, and J. Enslin, "Generator Emulation Controls for Photovoltaic Inverters," *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. 3, pp. 996 - 1011, 11 May 2012.
- [2] การไฟฟ้านครหลวง, "ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.)," in เอกสารแนบท้ายประกาศหมายเลข ๗.๑, ed. กรุงเทพมหานคร: การไฟฟ้านครหลวง.
- [3] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, "ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค," in เอกสารแนบท้ายประกาศหมายเลข ๖.๒, ed. กรุงเทพมหานคร: การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.
- [4] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, "ร่างระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าเพิ่มเติม พ.ศ. 2555 สำหรับผู้ผลิตไฟฟ้าประเภทที่ใช้อินเวอร์เตอร์," ed. กรุงเทพมหานคร, 2555.
- [5] S. J. Chapman, "Synchronous Generators," in *Electric Machinery Fundamentals*, 4 ed Singapore: McGraw Hill, 2005, pp. 276,290.
- [6] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg, and P. R. Iiguez, "Control of Power Converters in AC Microgrids," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 27, pp. 4734 - 4749, 15 May 2012.
- [7] H. Li, Y. Xu, S. Adhikari, D. T. Rizy, F. Li, and P. Irminger, "Real and reactive power control of a three-phase single-stage PV system and PV voltage stability," in *Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE*, San Diego, CA, 2010, pp. 1 - 8.
- [8] G. XiaoYun, C. JinMei, and L. QiHui, "Real-time and grid-connected control of PV power system," in *Advanced Power System Automation and Protection (APAP), 2011 International Conference on*, Beijing, 2011, pp. 923 - 928.
- [9] ศ. ชัยฤกษ์, "การควบคุมกำลังรีแอกทีฟของอินเวอร์เตอร์สามเฟสเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าสำหรับการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์," *วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*, 2557.

- [10] A. Engler and N. Sultani, "Droop control in LV-Grids," in *Future Power Systems, 2005 International Conference on*, Amsterdam, 2005.
- [11] H. Bevrani and S. Shokoochi, "An Intelligent Droop Control for Simultaneous Voltage and Frequency Regulation in Islanded Microgrids," *Smart Grid, IEEE Transactions on* vol. 4, pp. 1505 - 1513, 01 May 2013.
- [12] K. D. Brabandere, B. Bolsens, J. V. d. Keybus, A. Woyte, J. Driesen, and R. Belmans, "A Voltage and Frequency Droop Control Method for Parallel Inverters," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 22, pp. 1107 - 1115, July 2007 2007.
- [13] Y. Tang, P. C. Loh, P. Wang, F. H. Choo, and F. Gao, "Exploring Inherent Damping Characteristic of LCL-Filters for Three-Phase Grid-Connected Voltage Source Inverters," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 IEEE*, Atlanta, GA, 2010, pp. 312 - 319.
- [14] P. Standards Coordinating Committee 21 on Fuel Cells, Dispersed Generation, and Energy Storage, "1547 IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems," in *Response to Area EPS abnormal conditions*, ed: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA, 2003, p. 9.
- [15] R. Teodorescu, M. Liserre, and P. Rodriguez, "Grid Requirements for WT systems," in *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*, 1 ed Singapore: Wiley-IEEE Press, 2011, pp. 165-166,231-234.
- [16] R. Doherty, A. Mullane, G. L. Nolan, D. J. Burke, A. Bryson, and M. O'Malley, "An Assessment of the Impact of Wind Generation on System Frequency Control," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 25, pp. 452 - 460, 2010.
- [17] อ. แสงสีทอง, "วิธีการมอดูเลตแบบใหม่สำหรับการปรับสมดุลแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุของอินเวอร์เตอร์สามระดับแบบตริงจุดนิวทรัลโดยใช้ทฤษฎีของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์," *ปริญาโท, วิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*, 2551.
- [18] A. Saengseethong and S. Sangwongwanich, "A New Modulation Strategy for Capacitor Voltage Balancing in Three-Level NPC Inverters Based on Matrix Converter Theory," in *Power Electronics Conference (IPEC), 2010 International*, Sapporo, 2010, pp. 2358 - 2365.



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกิตติศักดิ์ อุดมโชค เกิดเมื่อวันที่ 30 มกราคม พ.ศ. 2531 ที่อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรสงคราม สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (อิเล็กทรอนิกส์กำลัง) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2552 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (อิเล็กทรอนิกส์กำลัง) ณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในภาคการศึกษาปลาย ปีการศึกษา 2554

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

1. กิตติศักดิ์ อุดมโชค และ สุรพงศ์ สุวรรณกวิน, "การจำลองลักษณะสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสสำหรับอินเวอร์เตอร์โฟโตโวลเทอิก, An Emulation of Synchronous Generator's Characteristics for Photovoltaic Inverters," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 36 (EECON 36), เล่ม 1, หน้า 423-426, 2556.