

วงจรรองด้านออกแบบไฮบริดชนิดใหม่สำหรับลดทอนผลกระทบจากแรงดันโหมตร่วมความถี่สูง
ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม



นางสาว เพ็ญนภา ไพโรจน์อมรชัย

ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A NOVEL HYBRID OUTPUT FILTER FOR MITIGATING ADVERSE EFFECTS OF
HIGH-FREQUENCY COMMON-MODE VOLTAGES IN
PWM INVERTER-FED MOTOR DRIVE SYSTEMS



Miss Pennapa Pairodamonchai

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Philosophy Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

วงจรกรองด้านออกแบบไฮบริดชนิดใหม่สำหรับลดทอนผลกระทบจากแรงดันใหม่คร่อมความถี่สูงในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์แบบพีดับเบิ้ลยูเอ็ม

โดย

นางสาว เพ็ญภา ไพโรจน์อมรชัย

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร.สมบุญ แสงวงศ์วานิชย์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพงศ์ สุวรรณภวิน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาตรีบัณฑิต

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุธนา กุลวิทิต)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ ดร.สมบุญ แสงวงศ์วานิชย์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพงศ์ สุวรรณภวิน)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนรรณี จีรวงศ์ศรี)

กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ ชินแซก)

กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิระเชษฐ์ ชินเงิน)

เพ็ญญา ไพโรจน์อมรชัย : วงจรกรองด้านออกแบบไฮบริดชนิดใหม่สำหรับลดทอนผลกระทบจากแรงดันโหมดร่วมความถี่สูงในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม. (A NOVEL HYBRID OUTPUT FILTER FOR MITIGATING ADVERSE EFFECTS OF HIGH-FREQUENCY COMMON-MODE VOLTAGES IN PWM INVERTER-FED MOTOR DRIVE SYSTEMS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อ.ดร.สมบุญ แสงวงศ์ วาณิชย์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ผศ.ดร.สุรพงศ์ สุวรรณกวิน, 206 หน้า.

งานวิทยานิพนธ์นี้ศึกษาปัญหาที่เกิดจากแรงดันโหมดร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ และเสนอวงจรกรองชนิดใหม่สำหรับแก้ปัญหาดังกล่าวด้วย ในด้านปัญหาของแรงดันโหมดร่วมนั้น วิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอการวิเคราะห์ปรากฏการณ์การอัดประจุสไฟตรงซึ่งเป็นปรากฏการณ์ใหม่ที่ยังไม่มีการอธิบายเกี่ยวกับกลไกการเกิดปรากฏการณ์มาก่อน ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้ด้วยการวิเคราะห์ทางจลนศาสตร์โหมดร่วมและโหมดผลต่างที่แม่นยำของอินเวอร์เตอร์โดยพิจารณาพฤติกรรมการนำกระแสของวงจรเรียงกระแสและวงจรอินเวอร์เตอร์ด้านหลังพร้อมกัน วงจรสมมูลที่วิเคราะห์ได้นอกจากจะสามารถใช้อธิบายการเกิดปรากฏการณ์การอัดประจุสไฟตรงได้แล้ว ยังแสดงให้เห็นว่า การสวิตช์ของวงจรเรียงกระแสและอินเวอร์เตอร์ด้านหลังทำให้เกิดการเชื่อมร่วมกันระหว่างสัญญาณโหมดร่วมและโหมดผลต่างในระบบ และยังพบว่ากระแสโหมดร่วมและการอัดประจุสไฟตรงจะมีพฤติกรรมที่แตกต่างกันตามย่านการทำงานของวงจรเรียงกระแส

ในด้านการแก้ปัญหาที่เกิดจากแรงดันโหมดร่วมนั้น วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวงจรกรองด้านออกแบบไฮบริดชนิดใหม่ที่มีขนาดเล็กและมีแบนด์วิดท์การลดทอนแรงดันโหมดร่วมที่กว้าง วงจรกรองที่เสนอมีองค์ประกอบหลัก 3 ส่วนได้แก่ 1) วงจรกรองแอกทีฟที่เป็นอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ 1 ขา 2) หม้อแปลงเชื่อมต่อบนโหมดร่วม และ 3) วงจรกรองพาสซีฟขนาดเล็ก วงจรกรองแอกทีฟที่เป็นอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับสามารถสร้างแรงดันชดเชยแรงดันโหมดร่วมได้ดี อีกทั้งยังสามารถใช้ได้กับระบบขับเคลื่อนที่มีพิกัดแรงดันสูงได้ วิทยานิพนธ์นี้ยังเสนอแนวคิดใหม่ในการกำจัดแรงดันโหมดร่วม โดยแยกพิจารณาองค์ประกอบของแรงดันโหมดร่วม และเลือกชดเชยเฉพาะองค์ประกอบที่มีความถี่สูงกว่าความถี่การสวิตช์ขึ้นไปที่เป็นสาเหตุของปัญหาต่างๆ ทำให้หม้อแปลงเชื่อมร่วมมีขนาดเล็กลงถึง 1/10 เท่าเมื่อเทียบกับกรณีวงจรกรองแอกทีฟแบบเดิมที่ชดเชยองค์ประกอบของแรงดันโหมดร่วมทั้งหมด นอกจากนี้วงจรกรองพาสซีฟขนาดเล็กที่เพิ่มขึ้นมาจะช่วยลดทอนแรงดันโหมดร่วมในย่านความถี่ที่สูงเกินกว่าแบนด์วิดท์ของวงจรแอกทีฟ

ผลการจำลองและผลการทดลองยืนยันความถูกต้องของการวิเคราะห์ทางทฤษฎีเกี่ยวกับปรากฏการณ์การอัดประจุสไฟตรง และประสิทธิภาพของวงจรกรองด้านออกแบบไฮบริดในการแก้ปัญหาจากแรงดันโหมดร่วม

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....

ปีการศึกษา...2552

ลายมือชื่อนิสิต..... *เกษม ไพโรจน์อมรชัย*.....

ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก..... *สมบุญ*.....

ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม..... *สุรพงศ์*.....

4871870121 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : HYBRID OUTPUT FILTER / COMMON-MODE VOLTAEG / DIFFERENTIAL-MODE VOLTAEG / COMMON-MODE CURRENT / DC BUS CHARGING PHENOMENON

PENNAPA PAIRODAMONCHAI : A NOVEL HYBRID OUTPUT FILTER FOR MITIGATING ADVERSE EFFECTS OF HIGH-FREQUENCY COMMON-MODE VOLTAGES IN PWM INVERTER-FED MOTOR DRIVE SYSTEMS. THESIS ADVISOR : SOMBOON SANGWONGWANICH, D.Eng., THESIS CO-ADVISOR : ASST. PROF. SURAPONG SUWANKAWIN, Ph.D., 206 pp.

This thesis studies the problems caused by the common-mode voltage at the output of the PWM inverter and proposes a new hybrid output filter for solving these problems. With regard to the common-mode voltage problems, an overvoltage trip due to DC bus charging is recognized as a new common-mode phenomenon whose mechanism has not yet been clearly explained. This dc bus charging phenomenon is analyzed using precise common-mode and differential-mode equivalent circuits of the PWM inverter, which are derived by taking the switching behaviors of the rectifier and the inverter circuits into account. It is revealed that the conduction of diodes in the rectifier and the power switches in the inverter circuit are the source of the coupling between the common-mode and differential-mode circuits. It has also been found that the behaviors of the common-mode current and the dc bus charging phenomenon depend on the operating mode of the rectifier.

As a remedy to the problems caused by the common-mode voltage, this thesis proposes a new hybrid output filter which is smaller and has a wider filtering bandwidth of the common-mode voltage than the conventional active filters. Its structure is composed of 1) a single-leg four-level active filter 2) a common-mode coupling transformer and 3) a small passive filter. The single-leg four-level active filter provides good common-mode voltage compensation and is applicable to high voltage motor drive systems. In particular, this thesis introduces a new concept of common-mode voltage compensation. The idea is to extract and compensate only the common-mode voltage in the frequency range higher than the switching frequency, which are the main cause of all common-mode voltage problems. Owing to this concept of compensation, the size of the coupling transformer can be reduced to about 1/10 as compared with that of the pure active filters which compensate every components of the common-mode voltage. An additional small passive LC filter incorporated in the hybrid filter helps to enhance the suppression of the common-mode voltage in the high-frequency range.

Simulation and experiment confirm the validity of the theoretical results regarding the dc bus charging phenomenon and the effectiveness of the proposed hybrid filter in mitigating the common-mode voltage problems.

Department : Electrical Engineering

Student's Signature

Field of Study : Electrical Engineering

Advisor's Signature

Academic Year : 2009

Co-Advisor's Signature

INNUM YINISOUKUNDE
Som
Sang

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่งจากอาจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์ และ ผศ. ดร.สุรพงษ์ สุวรรณภวิน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่ให้ความรู้ คำแนะนำและความช่วยเหลือด้านต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่งตลอดมา และได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจาก “ทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย” กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช และโครงการศิษย์ก้นกุฏิ ขอขอบคุณ บริษัท เอ.พี.วาย.เอ็นจิเนียริง จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านเทคนิคและอุปกรณ์ในการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติพี่น้องผู้ซึ่งให้โอกาสทางการศึกษาและเป็นกำลังใจอันยิ่งใหญ่แก่ข้าพเจ้าตลอดมา



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	บ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 แรงดันโหมตร่วมที่เกิดจากอินเวอร์เตอร์แบบพีดีบีเอ็ม (PWM).....	1
1.2 ปัญหาที่เกิดจากแรงดันโหมตร่วม.....	4
1.2.1 ปัญหาการแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการนำและความล้มเหลวของตัวชี้บอก ความผิดพร่องลงดิน.....	4
1.2.2 การเกิดแรงดันเพลาและความเสียหายของตลับลูกปืนเนื่องจากการไหลของกระแส ตลับลูกปืน.....	6
1.2.3 อันตรายจากกระแสสัมผัสหรือไฟฟ้าดูดในกรณีที่โครงภายนอกของมอเตอร์ไม่ได้ต่อลง ดิน.....	11
1.2.4 ปฏิกิริยาการอัดประจุสไฟตรง.....	12
1.3 การแก้ปัญหาจากแรงดันโหมตร่วมด้วยวงจรกรองแบบต่าง ๆ.....	13
1.3.1 วงจรกรองพาสซีฟ.....	14
1.3.2 วงจรกรองแอคทีฟ.....	15
1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	17
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	17
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	17
1.7 วิธีดำเนินการวิจัย.....	18
2 ปัญหาปรากฏการณ์การอัดประจุสไฟตรงโดยกระแสโหมตร่วม.....	19
2.1 ลักษณะการเกิดปรากฏการณ์การอัดประจุสไฟตรง.....	19
2.2 การไหลของกระแสโหมตร่วมในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์.....	23
2.2.1 การไหลของกระแสโหมตร่วมเมื่อวงจรเรียงกระแสทำงานในย่านนำกระแส.....	24
2.2.2 การไหลของกระแสโหมตร่วมเมื่อวงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส.....	26

บทที่	หน้า
2.3 กลไกการอัดประจุสัฟไฟตรงโดยกระแสไหลร่วม.....	27
2.3.1 กระแสไหลร่วมที่ไหลผ่านบัลไฟตรงเมื่อวงจรเรียงกระแสทำงานในย่านนำกระแส.....	27
2.3.2 กระแสไหลร่วมที่ไหลผ่านบัลไฟตรงเมื่อวงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส....	30
3 วงจรสมมูลไหลร่วมและโหมดผลต่างของอินเวอร์เตอร์ที่พิจารณาวงจรเรียงกระแสด้านหน้าร่วมด้วย.....	34
3.1 การเชื่อมร่วมระหว่างโหมดและการแปลงโหมดที่เกิดจากการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแสและวงจรอินเวอร์เตอร์.....	34
3.2 แนวทางการวิเคราะห์วงจรสมมูล.....	38
3.3 สมการแรงดันและกระแสไหลร่วมและโหมดผลต่างของแต่ละองค์ประกอบย่อย.....	40
3.3.1 สมการของวงจรเรียงกระแสด้านหน้า.....	40
3.3.1.1 กรณีที่วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านนำกระแส.....	40
3.3.1.2 กรณีที่วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส.....	46
3.3.2 สมการของวงจรอินเวอร์เตอร์.....	52
3.3.3 สมการของวงจรส่วนแหล่งจ่ายไฟสายกำลัง 3 เฟส.....	55
3.3.4 สมการสัญญาณโหมดของวงจรไหลที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์.....	58
3.3.5 สมการของวงจรบัลไฟตรง.....	60
3.4 วงจรสมมูลไหลร่วมและโหมดผลต่างที่แม่นยำของอินเวอร์เตอร์.....	64
3.4.1 วงจรสมมูลในกรณีที่วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านนำกระแส.....	64
3.4.1.1 วงจรสมมูลไหลร่วมในกรณีที่วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านนำกระแส.....	64
3.4.1.2 สมมูลโหมดผลต่างในกรณีที่วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านนำกระแส.....	66
3.4.2 วงจรสมมูลเมื่อวงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส.....	69
3.4.2.1 วงจรสมมูลไหลร่วมในกรณีที่วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส.....	69
3.4.2.2 วงจรสมมูลโหมดผลต่างในกรณีที่วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส.....	72
3.5 การวิเคราะห์ปรากฏการณ์การชาร์จประจุที่บัลไฟตรงโดยกระแสไหลร่วมด้วยวงจรสมมูล.....	74
3.5.1 พฤติกรรมของกระแสไหลร่วมในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม.....	74
3.5.2 การวิเคราะห์ปรากฏการณ์การอัดประจุสัฟไฟตรงจากวงจรสมมูลโหมดผลต่าง.....	80
4 ผลจำลองและผลทดลองการเกิดปรากฏการณ์การอัดประจุสัฟไฟตรงโดยกระแสไหลร่วม.....	85
4.1 ผลจำลองและผลทดลองระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ในภาวะไร้โหลดที่มีสายเคเบิลด้านออกยาวมาก.....	86
4.1.1 พฤติกรรมของกระแสไหลร่วมของอินเวอร์เตอร์ที่ยังไม่ติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟ.....	86

บทที่	หน้า
4.1.2 การอัดประจุบัลไฟตรงโดยกระแสไหลมุดร่วม.....	95
4.2 ผลจำลองและผลทดลองระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ในภาวะไร้โหลดที่มีสายเคเบิลด้านออกยาว มากและมีการติดตั้งวงจรรองพาสซีฟแบบ LC.....	103
4.2.1 พฤติกรรมของกระแสไหลมุดร่วมของอินเวอร์เตอร์ที่ติดตั้งวงจรรองพาสซีฟ.....	103
4.2.2 การอัดประจุบัลไฟตรงจนเกิดแรงดันเกิน.....	110
4.3 แนวทางการแก้ปัญหาแรงดันเกินเนื่องจากปรากฏการณ์การอัดประจุบัลไฟตรงโดยกระแส ไหลมุดร่วม.....	118
4.4 สรุปผลจำลองและผลทดลอง.....	124
5 วงจรกรองด้านออกแบบไฮบริดชนิดใหม่สำหรับลดทอนผลกระทบจากแรงดันไหลมุดร่วมในระบบ ขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์แบบพีดีบีลิยูเอ็ม.....	125
5.1 โครงสร้างของวงจรกรองด้านออกแบบไฮบริดชนิดใหม่สำหรับลดทอนผลกระทบจากแรงดัน ไหลมุดร่วมในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์.....	126
5.1.1 วงจรกรองแอกทีฟ.....	128
5.1.2 วงจรกรองพาสซีฟ.....	128
5.2 แนวคิดหลักของวงจรกรองด้านออกแบบไฮบริดชนิดใหม่สำหรับลดทอนผลกระทบจาก แรงดันไหลมุดร่วมในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์.....	129
5.2.1 การลดขนาดหม้อแปลงเชื่อมร่วมด้วยการเลือกชดเชยแรงดันไหลมุดร่วมเฉพาะที่ องค์ประกอบที่สูงกว่าความถี่การสวิตซ์ขึ้นไป.....	129
5.2.2 การลดข้อจำกัดของสวิตซ์กำลังที่ใช้สร้างแรงดันชดเชยโดยการใช้อินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ 1 ขา.....	132
5.2.3 การลดข้อจำกัดด้านแบนด์วิดท์จากผลเวลาประวิงของวงจรตรวจจับแรงดันไหลมุดร่วม..	134
5.2.4 การเพิ่มสมรรถนะการกรองแรงดันไหลมุดร่วมในย่านความถี่ที่สูงกว่าแบนด์วิดท์ของวงจร กรองแอกทีฟ.....	137
6 การออกแบบและวิเคราะห์วงจรกรองด้านออกแบบไฮบริดชนิดใหม่.....	138
6.1 การออกแบบหม้อแปลงเชื่อมร่วม.....	139
6.1.1 เส้นใยการออกแบบหม้อแปลงเชื่อมร่วม.....	139
6.1.2 ขั้นตอนการออกแบบหม้อแปลงเชื่อมร่วม.....	141
6.2 การออกแบบตัวเก็บประจุแยกการเชื่อมร่วม.....	145
6.3 การออกแบบวงจรตรวจจับแรงดันไหลมุดร่วมและวงจรมีขั้วนำเกตของอินเวอร์เตอร์.....	146
6.3.1 วงจรตรวจจับการสวิตซ์ของแรงดันเฟสที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์.....	147

บทที่	หน้า
6.3.2 วงจรตรรกะสำหรับสร้างสัญญาณขับนำเกิดโดยอาศัยสัญญาณการสวิตช์ของแรงดันเฟส.....	149
6.3.3 วงจรขับนำสวิตช์กำลังของอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ 1 ขา.....	151
6.4 การออกแบบอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ 1 ขา.....	152
6.5 การออกแบบวงจรกรองส่วนพาสซีฟ LC ขนาดเล็ก.....	154
6.6 สมรรถนะการลดทอนแรงดันโหมดร่วมของวงจรกรองแบบไฮบริด.....	155
7 ผลการทดลองแสดงสมรรถนะการแก้ปัญหาจากแรงดันโหมดร่วมของวงจรกรองด้านออกแบบไฮบริดชนิดใหม่.....	159
7.1 ผลของการเพิ่มวงจรกรองพาสซีฟขนาดเล็กในวงจรไฮบริดที่มีต่อการลดทอนแรงดันโหมดร่วมและกระแสรั่ว.....	160
7.2 ผลการทดลองแสดงสมรรถนะการตรวจจับและคุณลักษณะการชดเชยแรงดันโหมดร่วมของวงจรกรองแบบไฮบริดที่นำเสนอ.....	167
7.3 คุณสมบัติของวงจรกรองแบบไฮบริดในการลดทอนแรงดันโหมดร่วมที่ขั้วมอเตอร์และกระแสรั่ว.....	175
7.4 สมรรถนะการลดทอนแรงดันเพลาและกระแสตัดล้นลูกปืนของวงจรกรองแบบไฮบริด.....	182
7.5 คุณสมบัติการลดทอนกระแสสัมผัสของวงจรกรองแบบไฮบริด.....	186
8 บทสรุป.....	190
รายการอ้างอิง.....	192
ภาคผนวก.....	195
ภาคผนวก ก การดัดแปลงมอเตอร์เพื่อการตรวจวัดแรงดันเพลาและกระแสตัดล้นลูกปืน.....	196
ภาคผนวก ข การทดลองและจำลองระบบแสดงการเกิดปรากฏการณ์การอัดประจุบัลไฟตรง.....	199
ภาคผนวก ค การทดลองระบบแสดงสมรรถนะของวงจรกรองด้านออกแบบไฮบริดชนิดใหม่.....	204
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	206

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	ความสัมพันธ์ระหว่างสถานะการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์กับและแรงดันโหมดร่วม $v_{mv,C}$	2
2.1	ลักษณะการอัดประจุสไฟตรงโดยกระแสโหมดร่วมเมื่อวงจรรีจกกระแสทำงานในย่านนำกระแส (สำหรับเซกเตอร์แรงดันที่ 1).....	29
2.2	การอัดประจุสไฟตรงโดยกระแสโหมดร่วมเมื่อวงจรรีจกกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส (สำหรับเซกเตอร์แรงดันที่ 1).....	31
3.1	สมการสัญญาณโหมดร่วมและโหมดผลต่างของแต่ละองค์ประกอบย่อยของอินเวอร์เตอร์..	62
5.1	ความสัมพันธ์ระหว่างสถานะการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์แบบ PWM, สถานะการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ 1 ขา และแรงดันโหมดร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์.....	133
6.1	ตัวอย่างแกนเฟอร์ไรท์สำหรับหม้อแปลงเชื่อมร่วมเมื่อรองรับแรงดันเฉพาะองค์ประกอบที่ความถี่การสวิตช์ของแรงดันโหมดร่วม.....	144
6.2	ตัวอย่างแกนเฟอร์ไรท์สำหรับหม้อแปลงเชื่อมร่วมเมื่อรองรับทั้งองค์ประกอบที่ความถี่การสวิตช์และองค์ประกอบที่ความถี่ 3k เท่าของความถี่หลักมูล.....	145
8.1	การเปรียบเทียบคุณลักษณะของวงจรรองด้านออกแบบต่าง ๆ.....	191

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1.1	การวัดแรงดันโหมตร่วมในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์.....	1
1.2	แรงดันโหมตร่วม v_{NE} ที่เกิดจากวงจรเรียงกระแส, v_{cm} ที่เกิดจากวงจรอินเวอร์เตอร์และ $v_{o,c}$ ที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับกราวด์ (ที่ความถี่ทำงาน 75 Hz และความถี่การสวิตช์ 10 kHz).....	3
1.3	ทางเดินของกระแสรั่วในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์แบบพีดีบีเบิลยูเอ็ม.....	5
1.4	ตัวอย่างสัญญาณแรงดันโหมตร่วม $v_{o,c}$ และกระแสรั่ว i_{cm} ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์แบบพีดีบีเบิลยูเอ็ม (ความถี่การสวิตช์เท่ากับ 10 kHz).....	6
1.5	การวัดแรงดันเพลาและกระแสตลับลูกปืน.....	7
1.6	แรงดันเพลาและกระแสตลับลูกปืนที่ปลายเพลาทั้ง 2 ด้าน.....	7
1.7	วงรอบของกระแสหมุนวนผ่านตลับลูกปืน.....	8
1.8	แบบจำลองโหมตร่วมต่อเฟสของมอเตอร์และวงรอบของกระแสโหมตรวมการนำของตลับลูกปืน.....	9
1.9	แบบจำลองโหมตร่วมต่อเฟสของมอเตอร์และวงรอบของกระแสคายเทประจุผ่านตลับลูกปืน.....	10
1.10	รูปขยายทางแกนเวลา (จากรูปที่ 1.6) ของแรงดันเพลาและกระแสตลับลูกปืนที่ปลายเพลาทั้ง 2 ด้าน.....	10
1.11	วงจรสำหรับตรวจวัดกระแสสัมผัสหรือแรงดันที่โครงมอเตอร์ตามมาตรฐาน IEC 60335.....	11
1.12	โหมตร่วม $v_{o,c}$ และแรงดันที่ขั้ว 1-2 (v_{12}) ของวงจรตรวจวัดกระแสสัมผัส.....	11
1.13	ปรากฏการณ์การอัดประจุสัฟไฟตรงและการตัดการทำงานของอินเวอร์เตอร์เมื่อเกิดแรงดันเกินที่บัลไฟตรง.....	12
1.14	โครงสร้างของวงจรถอบแบบพาสซีฟที่มีความถี่ตัดต่ำกว่าความถี่การสวิตช์.....	14
2.1	ระบบขับเคลื่อนในโรงงานสิ่งทอซึ่งใช้อินเวอร์เตอร์ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำขนานกันหลายชุดและมีสายเคเบิลด้านออกที่ยาว.....	20
2.2	กระแสอัดประจุระหว่างสายก่อนติดตั้งวงจรถอบพาสซีฟแบบ LC ที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์.....	20
2.3	กระแสรั่ว i_{cm} ในระบบขับเคลื่อนของโรงงานสิ่งทอ.....	20
2.4	กระแสอัดประจุระหว่างสายหลังติดตั้งวงจรถอบพาสซีฟแบบ LC ที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์.....	21
2.5	ปรากฏการณ์การอัดประจุสัฟไฟตรงและการตัดการทำงานของอินเวอร์เตอร์เมื่อเกิดแรงดันเกินที่บัลไฟตรง.....	22
2.6	วงรอบการไหลของกระแสโหมตร่วมในระบบขับเคลื่อนที่มีสายเคเบิลยาว.....	23

ภาพที่	หน้า
2.7	การนำกระแสของวงจรไดโอดเรียงกระแสส่วนหน้า..... 23
2.8	ตัวอย่างการไหลของกระแสไหลตรงรวม $i_{o,C}$ ในช่วงที่ไดโอดนำกระแสตามภาวะการทำงานปกติของวงจรเรียงกระแส ($e_R > e_S > e_T$)..... 25
2.9	ผลการจำลองกระแสไหลตรงรวมที่ไหลลงกราวด์ $3i_{o,C}$ และกระแสเฟส i_R, i_T ในช่วงที่ไดโอดนำกระแส ตามภาวะการทำงานปกติของวงจรเรียงกระแส ($e_R > e_S > e_T$)..... 25
2.10	ตัวอย่างการไหลของกระแสไหลตรงรวม $i_{o,C}$ ในช่วงที่ไดโอดไม่นำกระแสตามภาวะการทำงานปกติ ของวงจรเรียงกระแส ($e_R > e_S > e_T$)..... 26
2.11	ผลการจำลองกระแสไหลตรงรวมที่ไหลลงกราวด์ $3i_{o,C}$ และกระแสเฟส i_R, i_T ในช่วงที่ไดโอดไม่นำกระแส ($e_R > e_S > e_T$)..... 27
2.12	ตัวอย่างวงรอบการไหลของกระแสไหลตรงรวมเมื่อวงจรเรียงกระแสทำงานในย่านนำกระแส.. 28
2.13	รูปภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไหลตรงรวม $v_{o,C}$, กระแสไหลตรงรวม $3i_{o,C}$ และกระแสไหลตรงรวมที่อัดประจุสัฟไฟตรง $i_{BUS,C}$ ในย่านนำกระแสของวงจรเรียงกระแส..... 30
2.14	ตัวอย่างวงรอบการไหลของกระแสไหลตรงรวมเมื่อวงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส ($i_{o,C} > 0$)..... 31
2.15	รูปภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไหลตรงรวม $v_{o,C}$, กระแสไหลตรงรวม $3i_{o,C}$ และกระแสไหลตรงรวมที่อัดประจุสัฟไฟตรง $i_{BUS,C}$ ในย่านไม่นำกระแสของวงจรเรียงกระแส..... 32
3.1	โครงสร้างของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์..... 36
3.2	แผนภาพแสดงการเชื่อมโยงระหว่างสัญญาณไหลตรงรวมและไหลตรงผลต่างของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์..... 37
3.3	องค์ประกอบย่อยของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์วงจรสมมูล..... 39
3.4	ตัวอย่างวงจรส่วนแหล่งจ่าย 3 เฟสและไดโอดเรียงกระแสในย่านนำกระแสเมื่อ $S_{rec} = [1 \ 0 \ -1]^T$ ($e_R > e_S > e_T$)..... 41
3.5	ตัวอย่างวงจรส่วนแหล่งจ่าย 3 เฟสและไดโอดเรียงกระแสในย่านไม่นำกระแส ($e_R > e_S > e_T$)..... 46
3.6	วงจรอินเวอร์เตอร์ด้านหลังแสดงตัวอย่างเมื่อ $S_{inv} = [1 \ 0 \ 0]$ 53
3.7	วงจรส่วนแหล่งจ่ายสายกำลัง 3 เฟสและอิมพีแดนซ์ด้านหน้า..... 55
3.8	ส่วนวงจรไหลที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์..... 58
3.9	การแบ่งไหลของกระแสภายในวงจรที่บัสไฟตรง..... 60
3.10	วงจรสมมูลไหลตรงรวมของอินเวอร์เตอร์ในกรณีที่วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านนำกระแส... 65
3.11	แรงดันไหลตรงรวมที่ด้านเข้า $v_{rec,C}$ เมื่อวงจรเรียงกระแสทำงานในย่านนำกระแส (คำนวณจากสมการที่ (3.94) เมื่อ $C_x = 0$ ทำให้ $v_{rec,C} = \frac{v_d}{2} + \frac{1}{2} med(e_R, e_S, e_T)$) 65
3.12	แรงดันไหลตรงรวมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ $v_{inv,C}$ คำนวณจากสมการที่ (3.96)..... 66

ภาพที่	หน้า
3.13	วงจรมุมผลต่างของอินเวอร์เตอร์ในกรณีที่วงจรวางกระแสทำงานในย่านนำกระแส..... 68
3.14	วงจรมุมผลต่างของอินเวอร์เตอร์ในกรณีที่วงจรวางกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส..... 70
3.15	แรงดันโหมตร่วมที่ด้านเข้า $v_{rec,C}$ จากการคำนวณ ($C_x = 0$) เมื่อวงจรวางกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส..... 71
3.16	วงจรมุมผลต่างของอินเวอร์เตอร์ในกรณีที่วงจรวางกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส..... 73
3.17	วงจรมุมผลต่างของอินเวอร์เตอร์เมื่อละเลยผลจากการทำงานของวงจรวางกระแสด้านหน้า..... 74
3.18	การจำลองวงจรมุมผลต่างของอินเวอร์เตอร์และวงจรมุมผลต่างสำหรับวิเคราะห์พฤติกรรมของกระแสและแรงดันโหมตร่วม..... 76
3.19	ผลจำลองแรงดันโหมตร่วมในวงจรมุมผลต่างของอินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 3.18..... 77
3.20	ผลจำลองแรงดันโหมตร่วม $v_{inv,C} - v_{rec,C}$ และกระแสโหมตร่วมในวงจรมุมผลต่างของอินเวอร์เตอร์เมื่อวงจรวางกระแสทำงานในย่านนำกระแส..... 78
3.21	ผลจำลองแรงดันโหมตร่วม $v_{inv,C} - v_{rec,C}$ และกระแสโหมตร่วมในวงจรมุมผลต่างของอินเวอร์เตอร์เมื่อวงจรวางกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส..... 79
3.22	กระแสโหมตร่วม $i_{i,C}$ และกระแสเฟสที่ด้านเข้าของวงจรวางกระแส i'_r, i'_s, i'_t 82
3.23	กระแสโหมตร่วม $i_{i,C}$ และกระแสโหมตร่วมผลต่างที่ด้านเข้าของวงจรวางกระแส $i'_{r,D}, i'_{s,D}, i'_{t,D}$ 82
3.24	กระแสโหมตร่วม $i_{i,C}$ และกระแสโหมตร่วมผลต่างที่บัสไฟตรง $i_{p,D}$ 83
4.1	ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ทดสอบแสดงการเกิดปรากฏการณ์การอัดประจุบัสไฟตรงจนเกิดแรงดันเกิด..... 86
4.2	ผลจำลองแรงดันโหมตร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์และกระแสโหมตร่วมที่ไหลผ่านส่วนต่างๆ ของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์..... 88
4.3	ผลจำลองแรงดันโหมตร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์และกระแสโหมตร่วมที่ไหลผ่านส่วนต่างๆ ของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์..... 88
4.4	ผลจำลองแรงดันและกระแสโหมตร่วมที่ด้านหน้าของอินเวอร์เตอร์ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์..... 89
4.5	ผลจำลองแรงดันและกระแสโหมตร่วมที่ด้านหน้าของอินเวอร์เตอร์ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์ในช่วงที่วงจรวางกระแสทำงานในย่านนำกระแส..... 89

ภาพที่	หน้า
4.23	ผลทดลองแสดงการอัดประจุสไฟตรงโดยกระแสไหลรวม..... 99
4.24	ผลจำลองแสดงกระแสที่ด้านนอกของอินเวอร์เตอร์ที่ทำให้เกิดการคายประจุสไฟตรงใน สเกลเวลา ของความถี่หลักมูล..... 100
4.25	ผลจำลองแสดงกระแสที่ด้านนอกของอินเวอร์เตอร์ที่ทำให้เกิดการคายประจุสไฟตรงใน สเกลเวลา ของความถี่การสวิตซ์..... 100
4.26	ผลทดลองแสดงกระแสที่ด้านนอกของอินเวอร์เตอร์ที่ทำให้เกิดการคายประจุสไฟตรงใน สเกลเวลา ของความถี่หลักมูล..... 101
4.27	ผลทดลองแสดงกระแสที่ด้านนอกของอินเวอร์เตอร์ที่ทำให้เกิดการคายประจุสไฟตรงใน สเกลเวลา ของความถี่การสวิตซ์..... 101
4.28	ผลจำลองแสดงระดับแรงดันบัสไฟตรง..... 102
4.29	ผลทดลองแสดงระดับแรงดันบัสไฟตรง..... 102
4.30	ผลจำลองแรงดันไหลรวมที่ด้านนอกของอินเวอร์เตอร์และกระแสไหลรวมที่ไหลผ่านส่วน ต่างๆ ของ ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เมื่อติดตั้งวงจรพาสซีฟแบบ LC ในสเกลเวลาของ ความถี่การสวิตซ์..... 105
4.31	ผลทดลองแรงดันไหลรวมที่ด้านนอกของอินเวอร์เตอร์และกระแสไหลรวมที่ไหลผ่าน ส่วนต่างๆ ของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เมื่อติดตั้งวงจรพาสซีฟแบบ LC ในสเกลเวลา ของความถี่การสวิตซ์..... 105
4.32	ผลจำลองแรงดันและกระแสไหลรวมที่ด้านหน้าของอินเวอร์เตอร์เมื่อติดตั้งวงจร พาสซีฟแบบ LC ในสเกลเวลาของความถี่หลักมูล..... 106
4.33	ผลจำลองแรงดันและกระแสไหลรวมที่ด้านหน้าของอินเวอร์เตอร์เมื่อติดตั้งวงจร พาสซีฟแบบ LC ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตซ์ (วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่ นำกระแส)..... 106
4.34	ผลทดลองแรงดันและกระแสไหลรวมที่ด้านหน้าของอินเวอร์เตอร์เมื่อติดตั้งวงจร พาสซีฟแบบ LC ในสเกลเวลาของความถี่หลักมูล..... 107
4.35	ผลทดลองแรงดันและกระแสไหลรวมที่ด้านหน้าของอินเวอร์เตอร์เมื่อติดตั้งวงจร พาสซีฟแบบ LC ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตซ์ (วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่ นำกระแส)..... 107
4.36	ผลจำลองแรงดันและกระแสไหลรวมที่ด้านนอกของอินเวอร์เตอร์เมื่อติดตั้งวงจร พาสซีฟแบบ LC ในสเกลเวลาของความถี่หลักมูล..... 108
4.37	ผลจำลองแรงดันและกระแสไหลรวมที่ด้านนอกของอินเวอร์เตอร์เมื่อติดตั้งวงจร พาสซีฟแบบ LC ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตซ์ (วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่ นำกระแส)..... 108

ภาพที่	หน้า
4.38	ผลทดลองแรงดันและกระแสไหลพร้อมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์เมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ในสเกลเวลาของความถี่หลักมูล..... 109
4.39	ผลทดลองแรงดันและกระแสไหลพร้อมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์เมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์ (วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส)..... 109
4.40	ผลจำลองสัญญาณกระแสไหลพร้อม $i_{i,C}$ และกระแสเฟส i_R, i_S, i_T เมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ในสเกลเวลาของความถี่หลักมูล..... 111
4.41	ผลจำลองสัญญาณกระแสไหลพร้อม $i_{i,C}$ และกระแสเฟส i_R และ i_T เมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์และ $e_R > e_S > e_T$ (วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส)..... 111
4.42	ผลทดลองสัญญาณกระแสไหลพร้อม $i_{i,C}$ และกระแสเฟส i_R, i_S, i_T เมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ในสเกลเวลาของความถี่หลักมูล..... 112
4.43	ผลทดลองสัญญาณกระแสไหลพร้อม $i_{i,C}$ และกระแสเฟส i_R และ i_T เมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์และ $e_R > e_S > e_T$ (วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส)..... 112
4.44	ผลจำลองแสดงการอัดประจุสไฟตรงโดยกระแสไหลพร้อมเมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC 113
4.45	ผลทดลองแสดงการอัดประจุสไฟตรงโดยกระแสไหลพร้อมเมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC 113
4.46	ผลจำลองแสดงกระแสที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ที่ทำให้เกิดการคายประจุสไฟตรงเมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ในสเกลเวลาของความถี่หลักมูล..... 114
4.47	ผลจำลองแสดงกระแสที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ที่ทำให้เกิดการคายประจุสไฟตรงเมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์..... 114
4.48	ผลทดลองแสดงกระแสที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ที่ทำให้เกิดการคายประจุสไฟตรงเมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ในสเกลเวลาของความถี่หลักมูล..... 115
4.49	ผลทดลองแสดงกระแสที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ที่ทำให้เกิดการคายประจุสไฟตรงเมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์..... 115
4.50	ผลจำลองแสดงการเพิ่มขึ้นของระดับแรงดันบัสไฟตรงเมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ที่ความถี่การสวิตช์ 10 kHz..... 116
4.51	ผลจำลองแสดงการเพิ่มขึ้นของระดับแรงดันบัสไฟตรงเมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ที่ความถี่การสวิตช์ 5 kHz..... 116
4.52	ผลทดลองแสดงการเพิ่มขึ้นของระดับแรงดันบัสไฟตรงเมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ที่ความถี่การสวิตช์ 10 kHz..... 117

ภาพที่	หน้า	
4.53	ผลทดลองแสดงการเพิ่มขึ้นของระดับแรงดันบัลไฟตรงเมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ที่ความถี่การสวิตช์ 5 kHz.....	117
4.54	วงจรกรองด้านออกแบบพาสซีฟ LC ชนิด 3 เฟส 4 สาย สำหรับลดทอนกระแสอัดประจุระหว่างสายและกระแสไหลร่วม.....	118
4.55	ผลจำลองแสดงกระแสไหลผลต่างและกระแสเฟสที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์เมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ชนิด 3 เฟส 4 สาย ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์.....	120
4.56	ผลทดลองแสดงกระแสไหลผลต่างและกระแสเฟสที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์เมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ชนิด 3 เฟส 4 สาย ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์.....	120
4.57	ผลจำลองแสดงกระแสไหลผลรวมเมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ชนิด 3 เฟส 4 สายในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์.....	121
4.58	ผลทดลองแสดงกระแสไหลผลรวมเมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ชนิด 3 เฟส 4 สายในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์.....	121
4.59	ผลจำลองแสดงกระแสที่ด้านเข้าของวงจรเรียงกระแสเมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ชนิด 3 เฟส 4 สาย ในสเกลเวลาของความถี่หลักมูล.....	122
4.60	ผลทดลองแสดงกระแสที่ด้านเข้าของวงจรเรียงกระแสเมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ชนิด 3 เฟส 4 สาย ในสเกลเวลาของความถี่หลักมูล.....	122
4.61	ผลจำลองแสดงระดับแรงดันบัลไฟตรงเมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ชนิด 3 เฟส 4 สาย.....	123
4.62	ผลทดลองแสดงระดับแรงดันบัลไฟตรงเมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ชนิด 3 เฟส 4 สาย.....	123
5.1	ผลกระทบที่เกิดจากแรงดันไหลร่วมความถี่สูงในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์.....	125
5.2	การใช้งานวงจรกรองด้านออกแบบไฮบริดชนิดใหม่.....	127
5.3	โครงสร้างของวงจรกรองชนิดไฮบริดแบบใหม่.....	127
5.4	แรงดันไหลร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับกึ่งกลางบัลไฟตรง v_{cm} (ที่ความถี่ทำงาน 50 Hz และความถี่การสวิตช์ 10 kHz).....	130
5.5	แรงดันไหลร่วมที่ความถี่การสวิตช์และกระแสสร้างสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงเชื่อมร่วมที่ค่าดรรชนีการมอดูเลตเท่ากับศูนย์.....	131
5.6	องค์ประกอบของแรงดันไหลร่วมที่ความถี่ฮาร์โมนิกที่ 3 (v_{third}) ในกรณีที่มีอินเวอร์เตอร์มีการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์.....	132
5.7	โครงสร้างของวงจรอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ 1 ขา.....	133
5.8	การสร้างสัญญาณขับนำจากการตรวจจับแรงดันไหลร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์.....	135
5.9	ลักษณะการผิดเพี้ยนของแรงดันชดเชยจากวิธีตรวจจับแรงดันไหลร่วมด้วยวงจรถ่ายแบบแยกโดด.....	135

ภาพที่	หน้า	
5.10	ลักษณะการผิดเพี้ยนของแรงดันชดเชยจากวิธีการสร้างสัญญาณขับนำจากสัญญาณ PWM ของอินเวอร์เตอร์.....	136
6.1	โครงสร้างของวงจรกรองด้านออกแบบไฮบริดชนิดใหม่.....	138
6.2	แรงดันโหมคร่วมที่ความถี่การสวิตช์และกระแสสร้างสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงเชื่อมร่วมที่ค่าดรรชนีการมอดูเลตต่ำ.....	140
6.3	แผนภาพแสดงขั้นตอนการออกแบบหม้อแปลงเชื่อมร่วม.....	143
6.4	การเปรียบเทียบระหว่างแรงดันโหมคร่วม v_{cm} ที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์และแรงดันชดเชย v_{com} ที่สร้างโดยอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ.....	146
6.5	วงจรตรวจจ็ับการสวิตช์ของแรงดันเฟสมีด้านออกของอินเวอร์เตอร์.....	147
6.6	วงจรภายในและตารางการทำงานของตัวแยกโคตทางแสงเบอร์ 6N137.....	148
6.7	การต่อวงจรตรวจจ็ับการสวิตช์ของแรงดันเฟสด้วยตัวแยกโคตทางแสงเบอร์ 6N137.....	148
6.8	ผลการทดลองแสดงการตรวจจ็ับการสวิตช์ของแรงดันเฟสด้วยวงจรตรวจจ็ับแบบตัวแยกโคตทางแสง.....	149
6.9	วงจรตรรกะสร้างสัญญาณขับนำจากแรงดันเฟส.....	150
6.10	สัญญาณขับนำสวิตช์กำลัง $S1$ และ $\overline{S1}$ ของอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ 1 ขาที่มีช่วงแสดงเวลาไร้ผลสนอง.....	150
6.11	วงจรขับนำสวิตช์กำลังของอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ 1 ขา.....	151
6.12	สัญญาณที่ได้จากการทดสอบการทำงานของวงจรขับนำสวิตช์กำลังของอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ.....	151
6.13	โครงสร้างของวงจรอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ 1 ขา.....	153
6.14	วงจรกรองพาสซีฟในวงจรกรองแบบไฮบริดชนิดใหม่.....	154
6.15	วงจรสมมูลโหมคร่วมของระบบ (พิจารณาที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์) ในกรณีที่ไม่มีวงจรกรอง.....	156
6.16	วงจรสมมูลโหมคร่วมของระบบ (พิจารณาที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์) เมื่อติดตั้งเฉพาะวงจรกรองแยกที่ฟ.....	156
6.17	วงจรสมมูลโหมคร่วมของระบบ (พิจารณาที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์) เมื่อติดตั้งวงจรกรองแบบไฮบริด.....	157
6.18	การเปรียบเทียบคุณสมบัติการกรองแรงดันโหมคร่วมระหว่าง 1) กรณีที่ไม่มีวงจรกรอง, 2) กรณีที่ติดตั้งเฉพาะวงจรกรองแยกที่ฟ และ 3) กรณีที่ติดตั้งวงจรกรองแบบไฮบริด.....	158
7.1	โครงสร้างของระบบขับเคลื่อนที่ใช้ทดสอบสมรรถนะของวงจรกรองแบบไฮบริดที่นำเสนอ.....	160
7.2	รูปคลื่นแรงดันโหมคร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ v_{cm} , กระแส i_{cm} และแรงดันชดเชย v_{com} ขณะเกิดการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์.....	162

ภาพที่	หน้า	
7.3	รูปคลื่นแรงดันโหมดร่วมที่ขั้วมอเตอร์ v_{mot} ในกรณีที่ 1) ไม่มีวงจรรอง, 2) ติดตั้งวงจรรอง แยกที่ฟ และ 3) ติดตั้งวงจรรองแบบไฮบริด.....	163
7.4	สเปกตรัมของแรงดันโหมดร่วมที่ขั้วมอเตอร์ v_{mot} ในกรณีที่ 1) ไม่มีวงจรรอง, 2) ติดตั้ง วงจรรองแยกที่ฟและ 3) ติดตั้งวงจรรองแบบไฮบริด.....	164
7.5	รูปคลื่นกระแสรั่ว i_{cm} ในกรณีที่ 1) ไม่มีวงจรรอง, 2) ติดตั้งวงจรรองแยกที่ฟและ 3) ติดตั้ง วงจรรองแบบไฮบริด.....	165
7.6	สเปกตรัมของกระแสรั่ว i_{cm} ในกรณีที่ 1) ไม่มีวงจรรอง, 2) ติดตั้งวงจรรองแยกที่ฟและ 3) ติดตั้งวงจรรองแบบไฮบริด.....	166
7.7	แรงดันโหมดร่วมที่จุดต่างๆ ในระบบที่ติดตั้งวงจรรองแบบไฮบริดในสเกลความถี่การ สวิตซ์ ($f_{sw} = 10\text{kHz}$, $f_o = 50\text{Hz}$).....	169
7.8	แรงดันโหมดร่วมที่จุดต่างๆ ในระบบที่ติดตั้งวงจรรองแบบไฮบริดในสเกลความถี่หลักมูล ($f_{sw} = 10\text{kHz}$, $f_o = 50\text{Hz}$).....	169
7.9	สเปกตรัมแสดงเฉพาะองค์ประกอบในย่านความถี่ต่ำของแรงดันโหมดร่วมที่จุดต่างๆ ใน ระบบที่ติดตั้งวงจรรองแบบไฮบริด ($f_{sw} = 10\text{kHz}$, $f_o = 50\text{Hz}$).....	170
7.10	แรงดันโหมดร่วมที่จุดต่างๆ ในระบบที่ติดตั้งวงจรรองแบบไฮบริดในสเกลความถี่การ สวิตซ์ ($f_{sw} = 10\text{kHz}$, $f_o = 75\text{Hz}$).....	171
7.11	แรงดันโหมดร่วมที่จุดต่างๆ ในระบบที่ติดตั้งวงจรรองแบบไฮบริดในสเกลความถี่หลักมูล ($f_{sw} = 10\text{kHz}$, $f_o = 75\text{Hz}$).....	171
7.12	สเปกตรัมแสดงเฉพาะองค์ประกอบในย่านความถี่ต่ำของแรงดันโหมดร่วมที่จุดต่างๆ ใน ระบบที่ติดตั้งวงจรรองแบบไฮบริด ($f_{sw} = 10\text{kHz}$, $f_o = 75\text{Hz}$).....	172
7.13	แรงดันโหมดร่วมที่จุดต่างๆ ในระบบที่ติดตั้งวงจรรองแบบไฮบริดในสเกลความถี่การ สวิตซ์ ($f_{sw} = 5\text{kHz}$, $f_o = 50\text{Hz}$).....	173
7.14	แรงดันโหมดร่วมที่จุดต่างๆ ในระบบที่ติดตั้งวงจรรองแบบไฮบริดในสเกลความถี่หลักมูล ($f_{sw} = 5\text{kHz}$, $f_o = 50\text{Hz}$).....	173
7.15	สเปกตรัมแสดงเฉพาะองค์ประกอบในย่านความถี่ต่ำของแรงดันโหมดร่วมที่จุดต่างๆ ใน ระบบที่ติดตั้งวงจรรองแบบไฮบริด ($f_{sw} = 5\text{kHz}$, $f_o = 50\text{Hz}$).....	174
7.16	แรงดันโหมดร่วมที่ขั้วมอเตอร์ v_{mot} ในกรณีที่ ก) ไม่มีวงจรรอง และ ข) ติดตั้งวงจรรอง แบบไฮบริด ($f_{sw} = 10\text{kHz}$ และ $f_o = 50\text{Hz}$).....	176
7.17	กระแสรั่ว i_{cm} ในกรณีที่ ก) ไม่มีวงจรรอง และ ข) ติดตั้งวงจรรองแบบไฮบริด ($f_{sw} = 10\text{kHz}$ และ $f_o = 50\text{Hz}$).....	177
7.18	แรงดันโหมดร่วมที่ขั้วมอเตอร์ v_{mot} ในกรณีที่ ก) ไม่มีวงจรรอง และ ข) ติดตั้งวงจรรอง แบบไฮบริด ($f_{sw} = 10\text{kHz}$ และ $f_o = 75\text{Hz}$).....	178

ภาพที่	หน้า	
7.19	กระแสรั่ว i_{cm} ในกรณีที ก) ไม่มีวงจรรอง และ ข) ติดตั้งวงจรรองแบบไฮบริด ($f_{sw} = 10\text{kHz}$ และ $f_o = 75\text{Hz}$).....	179
7.20	แรงดันโหมตร่วมที่ขั้วมอเตอร์ v_{mot} ในกรณีที ก) ไม่มีวงจรรอง และ ข) ติดตั้งวงจรรองแบบไฮบริด ($f_{sw} = 5\text{kHz}$ และ $f_o = 50\text{Hz}$).....	180
7.21	กระแสรั่ว i_{cm} ในกรณีที ก) ไม่มีวงจรรอง และ ข) ติดตั้งวงจรรองแบบไฮบริด ($f_{sw} = 5\text{kHz}$ และ $f_o = 50\text{Hz}$).....	181
7.22	การวัดแรงดันเพลลา v_{sh} และกระแสตลับลูกปืนแต่ละด้าน i_{BA}, i_{BB}	182
7.23	รูปคลื่นแรงดันเพลลา v_{sh} และกระแสตลับลูกปืนแต่ละด้าน i_{BA}, i_{BB} ในกรณีที ก) ไม่มีวงจรรองและ ข) ติดตั้งวงจรรองแบบไฮบริด ($f_{sw} = 10\text{kHz}$ และ $f_o = 50\text{Hz}$).....	183
7.24	รูปคลื่นแรงดันเพลลา v_{sh} และกระแสตลับลูกปืนแต่ละด้าน i_{BA}, i_{BB} ในกรณีที ก) ไม่มีวงจรรองและ ข) ติดตั้งวงจรรองแบบไฮบริด ($f_{sw} = 10\text{kHz}$ และ $f_o = 75\text{Hz}$).....	184
7.25	รูปคลื่นแรงดันเพลลา v_{sh} และกระแสตลับลูกปืนแต่ละด้าน i_{BA}, i_{BB} ในกรณีที ก) ไม่มีวงจรรองและ ข) ติดตั้งวงจรรองแบบไฮบริด ($f_{sw} = 5\text{kHz}$ และ $f_o = 50\text{Hz}$).....	185
7.26	วงจรรสำหรับตรวจวัดกระแสสัมผัสในรูปของค่าแรงดัน v_{12} ตกคร่อมโครงข่ายตามมาตรฐาน IEC 60335.....	186
7.27	รูปคลื่นแรงดันที่ขั้วมอเตอร์ v_{mot} และแรงดันที่ขั้ว 1-2 (v_{12}) ของวงจรถรวจวัดกระแสสัมผัสในกรณีที ก) ไม่มีวงจรรอง และ ข) ติดตั้งวงจรรองแบบไฮบริด ($f_{sw} = 10\text{kHz}$ และ $f_o = 50\text{Hz}$).....	187
7.28	รูปคลื่นแรงดันที่ขั้วมอเตอร์ v_{mot} และแรงดันที่ขั้ว 1-2 (v_{12}) ของวงจรถรวจวัดกระแสสัมผัสในกรณีที ก) ไม่มีวงจรรอง และ ข) ติดตั้งวงจรรองแบบไฮบริด ($f_{sw} = 10\text{kHz}$ และ $f_o = 75\text{Hz}$).....	188
7.29	รูปคลื่นแรงดันที่ขั้วมอเตอร์ v_{mot} และแรงดันที่ขั้ว 1-2 (v_{12}) ของวงจรถรวจวัดกระแสสัมผัสในกรณีที ก) ไม่มีวงจรรอง และ ข) ติดตั้งวงจรรองแบบไฮบริด ($f_{sw} = 5\text{kHz}$ และ $f_o = 50\text{Hz}$).....	189
ก.1	การวัดแรงดันเพลลา (v_{sh}) และกระแสตลับลูกปืน (i_{BA}, i_{BB}).....	196
ก.2	ภาพแสดงโรเตอร์, เพลลา และตลับลูกปืนของมอเตอร์.....	197
ก.3	การสัมผัสกันระหว่างตลับลูกปืนกับโครงมอเตอร์ส่วนที่เป็นฝาครอบ.....	197
ก.4	ฝาโครงมอเตอร์ทั้งสองด้านเมื่อแทรกฉนวนฟิล์มเทฟลอน.....	197
ก.5	การเชื่อมต่อตัวนำที่วางด้านนอกของตลับลูกปืน.....	198
ก.6	ลักษณะลวดตัวนำเมื่อสวมฝาโครงมอเตอร์เข้ากับตลับลูกปืน.....	198
ข.1	ระบบที่ใช้ทดลองแสดงการเกิดปรากฏการณ์การอัดประจุสไฟตรง.....	199
ข.2	การจำลองระบบระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ในภาวะไร้อโหลดที่มีสายเคเบิลด้านออกยาวมาก (แสดงผลจำลองในหัวข้อที่ 4.1).....	201

ภาพที่		หน้า
ข.3	การจำลองระบบระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ในภาวะไร้โหลดที่มีสายเคเบิลด้านออกยาวมาก และมีการติดตั้งวงจรรองพาสซีฟแบบ LC ชนิด 3 เฟส 3 สาย (แสดงผลจำลองในหัวข้อที่ 4.2).....	202
ข.4	การจำลองระบบระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ในภาวะไร้โหลดที่มีสายเคเบิลด้านออกยาวมาก และมีการติดตั้งวงจรรองพาสซีฟแบบ LC ชนิด 3 เฟส 4 สาย (แสดงผลจำลองในหัวข้อที่ 4.3).....	203
ค.1	วงจรกรองด้านออกแบบไฮบริดชนิดใหม่.....	204
ค. 2	การติดตั้งระบบเพื่อใช้ทดสอบสมรรถนะของวงจรกรองแบบไฮบริด.....	205



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- ϕ_{\max} : ค่าฟลักซ์สูงสุดที่เกิดจากแรงดันโหมตร่วมคร่อมหม้อแปลงเชื่อมร่วม
- ϕ_S : ค่าฟลักซ์อิมิตัวของแกน
- ϕ_{sw} : ฟลักซ์ที่เกิดจากองค์ประกอบของแรงดันโหมตร่วมที่ความถี่การสวิตช์
- ϕ_{third} : ฟลักซ์ที่เกิดจากองค์ประกอบของแรงดันโหมตร่วมที่ความถี่ฮาร์โมนิกที่ 3
- $\Delta \max$: ค่าจำกัดของค่ายอดของระลอกแรงดันชดเชยแรงดันโหมตร่วม
- Δv_{com} : ระลอกในแรงดันชดเชยแรงดันโหมตร่วม
- A_C : พื้นที่หน้าตัดของแกนสำหรับพื้นที่หม้อแปลง
- A_L : สัมประสิทธิ์ค่าความเหนี่ยวนำตัวแปรค่าความเหนี่ยวนำของแกน
- A_w : พื้นที่หน้าตัดของแกนสำหรับพื้นที่หม้อแปลงเชื่อมร่วม
- a_{w1}, a_{w2} : พื้นที่หน้าตัดของสายตัวนำที่ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงเชื่อมร่วม
- B_S : ความหนาแน่นฟลักซ์อิมิตัวของแกน
- C_B : ตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่บัสไฟตรง
- C_{cf} : ตัวเก็บประจุไฟฟ้าโหมตร่วมของวงจรรอง
- C_F : ตัวเก็บประจุไฟฟ้าของวงจรรอง
- C_h : ค่าความจุไฟฟ้าแอบแฝงระหว่างอุปกรณ์สวิตช์กำลังและขิงที่ระบายความร้อน
- C_{mf} : ตัวเก็บประจุไฟฟ้าโหมตร่วมปกติของวงจรรอง
- C_O : ค่าความจุไฟฟ้าแอบแฝงระหว่างขดลวดและโครงของมอเตอร์
- C_{RF} : ค่าความจุไฟฟ้าแอบแฝงระหว่างเพลากับโครงมอเตอร์
- C_S : ค่าความจุไฟฟ้าแอบแฝงระหว่างสายกับกราวด์
- C_{Series} : ตัวเก็บประจุไฟฟ้าแยกการเชื่อมร่วมของวงจรรองแบบไฮบริด
- C_{SF} : ค่าความจุไฟฟ้าแอบแฝงระหว่างสเตเตอร์กับโครงมอเตอร์
- C_{SR} : ค่าความจุไฟฟ้าแอบแฝงระหว่างสเตเตอร์กับเพล
- C_X, C_Y : วงจรกรองตัวเก็บประจุที่ด้านหน้าของวงจรเรียงกระแส
- e_R, e_S, e_T : แรงดันแหล่งจ่ายสายกำลังเฟส R, S, T
- f_{CO} : ความถี่เรโซแนนซ์ระหว่างความเหนี่ยวนำ L_O และค่าความจุไฟฟ้าแอบแฝง C_O ของมอเตอร์
- f_{C1} : ความถี่เรโซแนนซ์ระหว่างความเหนี่ยวนำ L_{cm} และตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_{Series}
- f_{C2} : ความถี่เรโซแนนซ์ระหว่างความเหนี่ยวนำรั้วของหม้อแปลงเชื่อมร่วม L_s, L_p และค่าความจุไฟฟ้าแอบแฝง C_O ของมอเตอร์
- f_{C3} : ความถี่ตัดข้ามของวงจรกรองพาสซีฟในวงจรรองแบบไฮบริด
- f_{sw} : ความถี่การสวิตช์
- f_O : ความถี่หลักมูล
- i_{BA}, i_{BB} : กระแสตลับลูกปืนที่ปลายเพลาทัง 2 ด้าน
- $i_{BUS,C}$: กระแสโหมตร่วมที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_h

- $i_{BUS,D}$: กระแสโหมตผลต่างที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_B
 i_{cm} : กระแสรั่ว
 $i_{e,C}$: กระแสโหมตร่วมที่ไหลผ่านแหล่งจ่ายไฟ 3 เฟส
 $i_{O,C}$: กระแสโหมตร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์
 $i_{e,D} = [i_{R,D} \ i_{S,D} \ i_{T,D}]^T$: กระแสโหมตผลต่างของแหล่งจ่ายสายกำลังเฟส R, S, T
 $i_{i,C}$: กระแสโหมตร่วมที่ด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส
 $i_{i,D} = [i'_{R,D} \ i'_{S,D} \ i'_{T,D}]^T$: กระแสโหมตผลต่างที่ด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส
 i_{K1}, i_{K2}, i_{K3} คือกระแสเฟสที่ไหลผ่านค่าความจุไฟฟ้าแบบแฝง C_S ที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์
 i_N, i'_N : กระแสบัลไฟตรงที่ขั้วลบของบัลไฟตรงก่อนและหลังตัวเก็บประจุ
 $i_{O,C}$: กระแสโหมตร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์
 $i_{O,D} = [i_{u,D} \ i_{v,D} \ i_{w,D}]^T$: กระแสโหมตผลต่างที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์
 $i'_{O,D} = [i'_{u,D} \ i'_{v,D} \ i'_{w,D}]^T$: กระแสโหมตผลต่างที่ไหลเข้าขดลวดของมอเตอร์
 i_p, i'_p : กระแสบัลไฟตรงที่ขั้วบวกของบัลไฟตรงก่อนและหลังตัวเก็บประจุ
 $i_{p,C}, i_{N,C}$: กระแสโหมตร่วมที่บัลไฟตรงก่อนตัวเก็บประจุ ($i_{p,C} = i_{N,C}$)
 $i'_{p,C}, i'_{N,C}$: กระแสโหมตผลต่างที่บัลไฟตรงหลังตัวเก็บประจุ ($i'_{p,C} = -i'_{N,C}$)
 $i_{p,D}, i_{N,D}$: กระแสโหมตผลต่างที่บัลไฟตรงก่อนตัวเก็บประจุ ($i_{p,D} = -i_{N,D}$)
 $i'_{p,D}, i'_{N,D}$: กระแสโหมตผลต่างที่บัลไฟตรงหลังตัวเก็บประจุ ($i'_{p,D} = -i'_{N,D}$)
 i_{pmax} : ค่าจำกัดของค่ายอดของกระแสขดลวดปฐมภูมิ
 i_R, i_S, i_T : กระแสเฟสของแหล่งจ่ายสายกำลังเฟส R, S, T
 i'_R, i'_S, i'_T : กระแสเฟสที่ด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส
 i_{shA}, i_{shB} : กระแสตลับลูกปืน
 i_u, i_v, i_w : กระแสเฟสที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์
 i'_u, i'_v, i'_w : กระแสเฟสที่ไหลเข้าขดลวดของมอเตอร์
 i_{X1}, i_{X2}, i_{X3} : กระแสเฟสของตัวเก็บประจุ C_X ที่ด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส
 $i_{X,D} = [i_{X1,D} \ i_{X2,D} \ i_{X3,D}]^T$: กระแสโหมตผลต่างของตัวเก็บประจุ C_X ที่ด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส
 i_y : กระแสโหมตร่วมที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_X และ C_Y ที่ด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส
 k_w : ตัวประกอบการพันขดลวด
 L_{cf} : ตัวเหนี่ยวนำโหมตร่วมของวงจรกรอง
 L_{cm} : ค่าความเหนี่ยวนำสร้างสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงเชื่อมร่วม
 L_F : ตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองพาสซีฟ
 L_{fp}, L_{fs} : ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลที่ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงเชื่อมร่วม
 L_m, R_m : พารามิเตอร์ความต้านทานและความเหนี่ยวนำของขดลวดมอเตอร์
 L_{nf} : ตัวเหนี่ยวนำโหมตปกติของวงจรกรอง

N_{Lmin} : จำนวนรอบน้อยที่สุดที่จำเป็นตามเงื่อนไขการจำกัดค่ากระแสของหม้อแปลงเชื่อมรวม

N_{max} : จำนวนรอบสูงสุดของขดลวดที่พันหม้อแปลงเชื่อมรวม

R_p, R_s : ค่าความต้านทานขดลวดที่ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงเชื่อมรวม

R_o, L_o : พารามิเตอร์ความต้านทานและความเหนี่ยวนำของสายเคเบิลด้านออก

SIG : สัญญาณขั้วนำจากวงจรตระกะในวงจรสร้างสัญญาณขั้วนำวิตซ์ของอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ

$S_{inv} = [s_R \ s_S \ s_T]^T$: ฟังก์ชันการสวิตซ์ของวงจรอินเวอร์เตอร์

$S_{rec} = [s_u \ s_v \ s_w]^T$: ฟังก์ชันการสวิตซ์ของวงจรเรียงกระแส

$\tilde{S}_{rec} = [\tilde{s}_R \ \tilde{s}_S \ \tilde{s}_T]^T$: ฟังก์ชันการสวิตซ์ของวงจรเรียงกระแส

$T_{1\phi}$: เมตริกซ์การแปลงปริมาณเฟสให้เป็นสัญญาณโหมตร่วมและโหมตผลต่างสำหรับวงจร 1 เฟส

$T_{3\phi}$: เมตริกซ์การแปลงปริมาณเฟสให้เป็นสัญญาณโหมตร่วมและโหมตผลต่างสำหรับวงจร 3 เฟส

v_{12} : แรงดันที่ขั้ว 1-2 ของวงจรสำหรับตรวจวัดกระแสสัมผัสตามมาตรฐาน IEC 60335

$v_{BUS,C}$: แรงดันโหมตร่วมที่บัสไฟตรง

$v_{BUS,D}$: แรงดันโหมตผลต่างที่บัสไฟตรง

v_{cm} : แรงดันโหมตร่วมด้านออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับจุดกึ่งกลางบัสไฟตรง

v_{com} : แรงดันชดเชยแรงดันโหมตร่วมที่สร้างจากอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ 1 ขา

v_d : แรงดันบัสไฟตรง

v_{GS} : สัญญาณขั้วนำสวิตซ์กำลังของอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ 1 ขา

$v_{i,C}$: แรงดันโหมตร่วมที่ด้านเข้าของวงจรเรียงกระแสเทียบกราวด์

$v_{i,D} = [v_{R,D} \ v_{S,D} \ v_{T,D}]^T$: แรงดันโหมตผลต่างที่ด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส

$v_{inv,C}$: แรงดันโหมตร่วมด้านออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับขั้วลบของบัสไฟตรง

v_{mot} : แรงดันโหมตร่วมที่ขั้วมอเตอร์เทียบกราวด์

v_{NE} : แรงดันที่วัดจากขั้วลบของบัสไฟตรงเทียบกับกราวด์

$v_{O,C}$: แรงดันโหมตร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับกราวด์

$v_{O,D} = [v_{u,D} \ v_{v,D} \ v_{w,D}]^T$: แรงดันโหมตผลต่างที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์

v_{OHF} : สัญญาณด้านออกของตัวแยกโคจรทางไฟฟ้าด้วยเส้นใยแก้วนำแสงในวงจรสร้างสัญญาณขั้วนำวิตซ์ของอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ

v_{PE} : แรงดันที่วัดจากขั้วบวกของบัสไฟตรงเทียบกับกราวด์

$v_{rec,C}$: แรงดันโหมตร่วมที่เกิดจากการสวิตซ์ของวงจรเรียงกระแส

v_{RE}, v_{SE}, v_{TE} : แรงดันเฟสที่ด้านเข้าของวงจรเรียงกระแสเทียบกราวด์

v_{sh} : แรงดันเพลลาเทียบกับโครงมอเตอร์หรือกราวด์

v_{sw} : องค์ประกอบของแรงดันโหมตร่วมที่ความถี่การสวิตซ์

v_{third} : องค์ประกอบของแรงดันโหมตร่วมที่ความถี่ฮาร์โมนิกที่ 3

v_{uE}, v_{vE}, v_{wE} : แรงดันเฟสที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกราวด์

X_c : สัญญาณโหมมรวม

X_j : ปริมาณเฟส

$X_{j,D}$: สัญญาณโหมมผลต่างในแต่ละเฟส

Z_B : ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุที่บัสไฟตรง

Z_i : ค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายไฟ 3 เฟส (e_R, e_S, e_T)

Z_g : ค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างแหล่งจ่ายไฟ 3 เฟสกับกราวด์ของระบบ

Z_h : ค่าอิมพีแดนซ์ของความจุไฟฟ้าแบบแบ่งระหว่างอุปกรณ์สวิตซ์กำลังและซิงก์ระบายความร้อน

Z_m : ค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดมอเตอร์

Z_o : ค่าอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลด้านออก

Z_s : ค่าอิมพีแดนซ์ของความจุไฟฟ้าแบบแบ่งระหว่างสายกับกราวด์

$Z_{TH,D}, Z_{O,D}$: อิมพีแดนซ์สมมูลโหมมรวมที่ด้านแหล่งจ่ายและที่ด้านโหลด

$Z_{TH,C}, Z_{O,C}$: อิมพีแดนซ์สมมูลโหมมรวมที่ด้านแหล่งจ่ายและที่ด้าน

Z_x, Z_y : ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุที่ด้านหน้าของวงจรเรียงกระแส



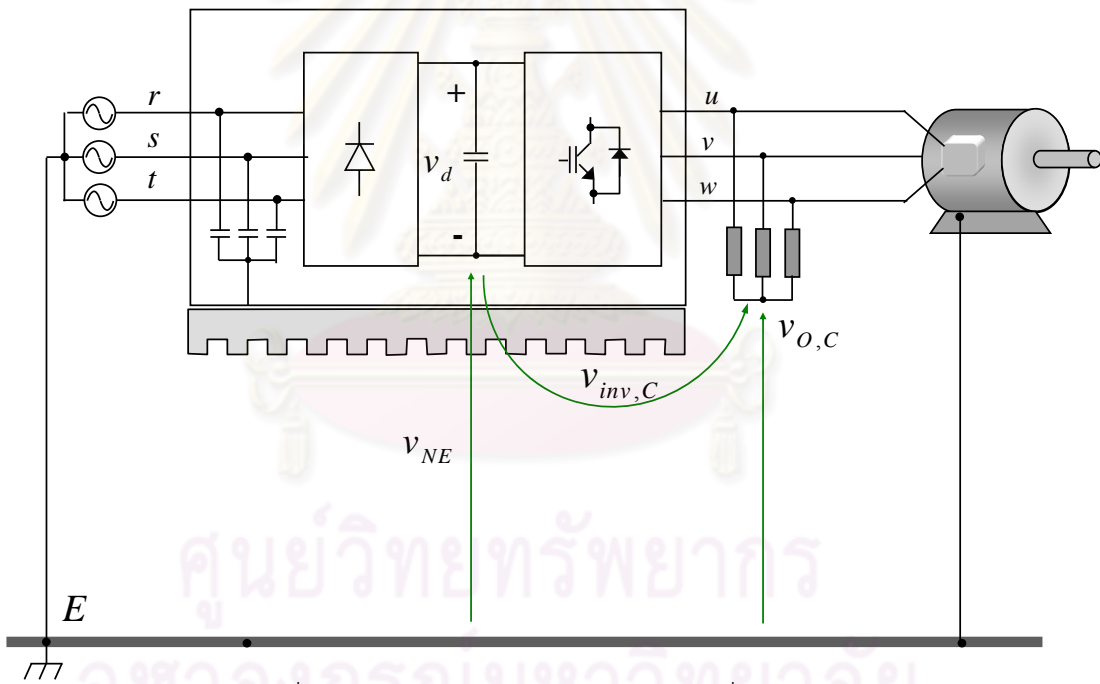
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 แรงดันโหมตรง่วมที่เกิดจากอินเวอร์เตอร์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM)

การประยุกต์ใช้อินเวอร์เตอร์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม(PWM) ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ในอุตสาหกรรม ทำให้เราสามารถเพิ่มสมรรถนะในการควบคุมแรงบิดและปรับเปลี่ยนความเร็วรอบมอเตอร์ได้ดียิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามอินเวอร์เตอร์แบบพีดับเบิลยูเอ็มทำให้เกิดแรงดันโหมตรง่วม (Common-mode voltage) ที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับกราวด์ ($v_{o,c}$) ซึ่งสามารถตรวจวัดได้โดยใช้วงจรความต้านทานดังรูปที่ 1.1 และมีลักษณะสัญญาณที่วัดได้จากการทดลองกับระบบจริงดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.1 การวัดแรงดันโหมตรง่วมในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์

เราสามารถแยกพิจารณาองค์ประกอบของแรงดันโหมตรง่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ($v_{o,c}$) ได้เป็น 2 ส่วนดังสมการที่ (1.1)

$$v_{o,c} = v_{NE} + v_{inv,C} \quad (1.1)$$

- I) v_{NE} เป็นองค์ประกอบแรงดันโหมตร่วมที่เกิดจากการนำกระแสของไดโอดในส่วนวงจรเรียงกระแส มีลักษณะเป็นแรงดันที่มีรูปคลื่นรอยคาบที่ความถี่หลักมูล 150 Hz (สำหรับระบบไฟสายกำลัง 50 Hz) และมีค่าในขณะหนึ่งโดยประมาณเท่ากับค่าต่ำสุดของแรงดันเฟสด้านเข้าตามสมการที่ (1.2)

$$v_{NE} \cong \min(e_R, e_S, e_T) \quad (1.2)$$

เมื่อ e_R, e_S, e_T คือ แรงดันเฟสด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส

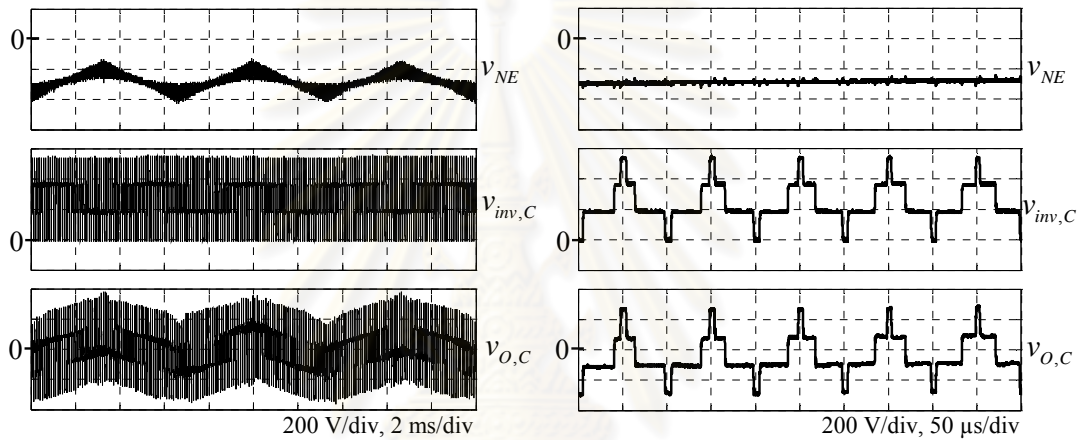
- II) $v_{inv,C}$ เป็นองค์ประกอบแรงดันโหมตร่วมที่เกิดจากการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์วัดเทียบกับบัลลอปของวงจรเชื่อมโยงไฟตรง และมีการเปลี่ยนแปลงตามสถานะการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ดังตารางที่ 1.1 เมื่อนิยามสัญลักษณ์ให้ "1" หมายถึง การนำกระแสของสวิตช์ตัวบน และ "0" หมายถึง การนำกระแสของสวิตช์ตัวล่าง $v_{inv,C}$ จะมีลักษณะและความถี่ขึ้นอยู่กับวิธีการมอดูเลตของอินเวอร์เตอร์ ในกรณีที่ใช้การมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป เราสามารถแบ่งแรงดันโหมตร่วม $v_{inv,C}$ ตามความถี่ได้เป็น 2 ส่วนคือ

- ก) องค์ประกอบแรงดันลำดับศูนย์ที่ความถี่ฮาร์โมนิก 3n เท่าของความถี่หลักมูลของแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบความถี่ที่รบกวนความถี่ทำงาน
- ข) องค์ประกอบแรงดันที่ความถี่การสวิตช์และแถบข้าง (Sidebands) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ความถี่สูงที่เกิดจากการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์

ตารางที่ 1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสถานะการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์กับและแรงดันโหมตร่วม $v_{inv,C}$

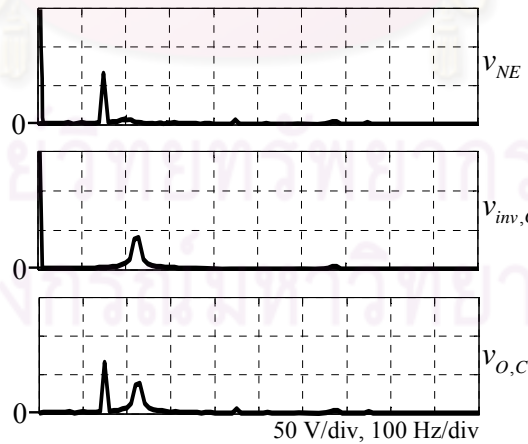
สถานะการสวิตช์ของ PWM อินเวอร์เตอร์			$v_{inv,C}$, แรงดันโหมตร่วมที่ด้านออก เมื่อเทียบกับบัลลอปของวงจรเชื่อมโยงไฟตรง
S_u	S_v	S_w	
0	0	0	0
0	0	1	$v_d / 3$
0	1	1	$2v_d / 3$
0	1	0	$v_d / 3$
1	1	0	$2v_d / 3$
1	0	0	$v_d / 3$
1	0	1	$2v_d / 3$
1	1	1	v_d

ในขณะที่องค์ประกอบของแรงดันโหมตร่วมในข้อ I) และ II-ก) เป็นองค์ประกอบที่มีความถี่ต่ำ (150 Hz) และที่ความถี่ฮาร์มอนิกของความถี่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ซึ่งโดยปกติมีค่าอยู่ในย่าน 0-200 Hz ตามลำดับ องค์ประกอบแรงดันอีกส่วนหนึ่งในข้อ II-ข) จะมีลักษณะเป็นแบบขั้นบันไดที่เปลี่ยนแปลงตามรูปแบบของการสวิตช์ องค์ประกอบส่วนนี้จะมีค่าครอบคลุมตั้งแต่ความถี่การสวิตช์ (1-10 kHz) จนถึงความถี่แถบข้างซึ่งอยู่ในย่าน MHz จากตัวอย่างในรูปที่ 1.2 องค์ประกอบของแรงดันโหมตร่วมในข้อ I) และ II-ก) ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้จากลักษณะสัญญาณในรูปที่ 1.2 ก) และ รูปที่ 1.2 ค) จะมีความถี่ตรงกับความถี่ 150 Hz และ 225 Hz ตามลำดับ ส่วนองค์ประกอบในข้อ II-ข) จะเห็นได้อย่างชัดเจนในรูปที่ 1.2 ข)



ก) ในสเกลเวลาของความถี่หลักมูล (75Hz)

ข) ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์ (10 kHz)



ค) สเปกตรัมของสัญญาณแสดงเฉพาะองค์ประกอบในย่านความถี่ต่ำ

รูปที่ 1.2 แรงดันโหมตร่วม v_{NE} ที่เกิดจากวงจรเรียงกระแส, v_{cm} ที่เกิดจากวงจรอินเวอร์เตอร์และ $v_{o,C}$ ที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับกราวด์ (ที่ความถี่ทำงาน 75 Hz และความถี่การสวิตช์ 10 kHz)

1.2 ปัญหาที่เกิดจากแรงดันโหมคร่วม

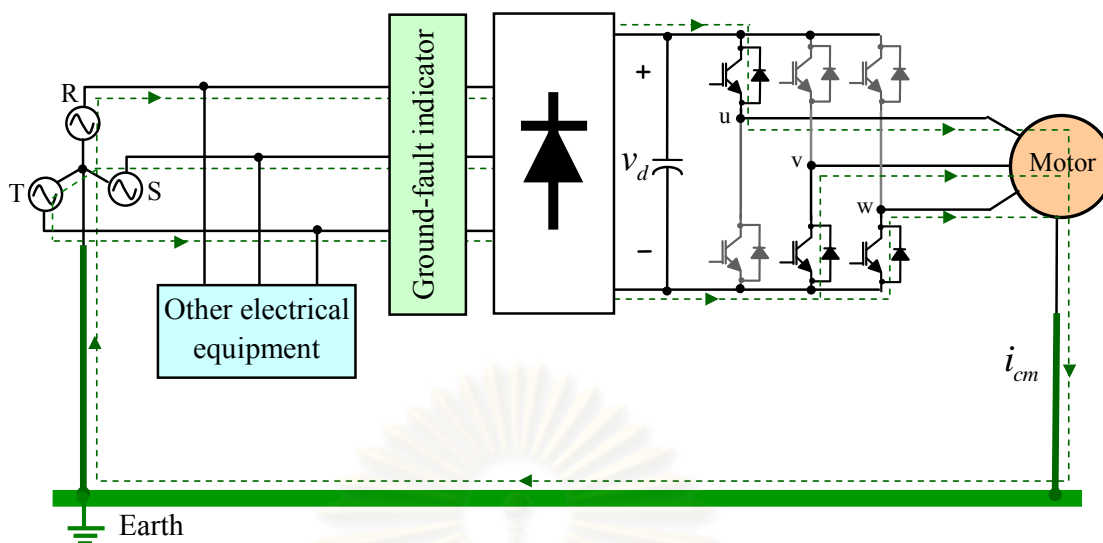
แรงดันโหมคร่วมในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์ในรูปแบบที่ 1.2 ข) มีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดที่มีค่า dv/dt สูงจึงสามารถกระตุ้นองค์ประกอบปรสิต (Parasitic components) ภายในระบบโดยเฉพาะที่มอเตอร์และส่งผลให้เกิดปัญหาผลกระทบต่อตัวอินเวอร์เตอร์เองและต่อมอเตอร์ในระบบขับเคลื่อนรวมทั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ ที่ติดตั้งอยู่รอบๆ ได้ บทความวิจัยก่อนหน้านี้ [1]-[9] ได้มีการกล่าวถึงปัญหาที่เกิดจากแรงดันโหมคร่วมโดยมีการจำแนกเป็นประเภทต่างๆ ได้แก่

- 1) การแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการนำ (Conducted electromagnetic interference: EMI) และความล้มเหลวของตัวชี้บอกความผิดปกติของดิน (Ground-fault indicator failure)
- 2) การเกิดแรงดันเพลลา (Shaft voltage) และความเสียหายของตลับลูกปืนเนื่องจากการไหลของกระแสตลับลูกปืน (Bearing current)
- 3) อันตรายจากกระแสสัมผัสหรือไฟฟ้าดูด (Touch current or electric shock) ในกรณีที่โครงภายนอกของมอเตอร์ไม่ได้ต่อลงดิน

เนื้อหาหัวข้อต่อไปนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดเกี่ยวกับพฤติกรรมและสาเหตุของปัญหา 1)-3) และชี้ให้เห็นว่าปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดจากแรงดันโหมคร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์นั้นเป็นผลจากองค์ประกอบที่มีความถี่สูงเป็นหลัก ส่วนองค์ประกอบความถี่ต่ำนั้นมีผลน้อยมากและสามารถขจัดได้ ซึ่งการพิจารณาแยกแยะและองค์ประกอบของแรงดันโหมคร่วมเฉพาะส่วนที่เป็นสาเหตุของปัญหาต่างๆ นี้จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบวงจรกรองให้มีความเหมาะสมกว่าวงจรแบบดั้งเดิมที่ใช้อยู่ในปัจจุบันได้

1.2.1 ปัญหาการแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการนำและความล้มเหลวของตัวชี้บอกความผิดปกติของดิน

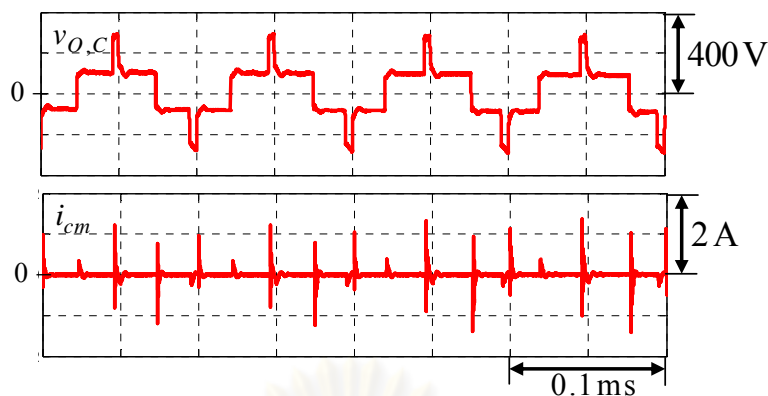
อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่อยู่รอบอินเวอร์เตอร์อาจทำงานผิดพลาดได้เนื่องจากการรบกวนของกระแสรั่ว i_{cm} (Leakage current) ซึ่งมีวงรอบการไหลจากอินเวอร์เตอร์ผ่านความจุไฟฟ้าแฉงของมอเตอร์ (stray capacitance) ลงกราวด์และจากกราวด์ผ่านแหล่งจ่ายไฟฟ้ากลับเข้าสู่อินเวอร์เตอร์ดังรูปที่ 1.3 [1]-[5] เนื่องจากกระแสรั่วเป็นสัญญาณที่มีแบนด์วิดท์ (Bandwidth) กว้างครอบคลุมตั้งแต่ความถี่การสวิตช์ (1-10 kHz) ไปจนถึงย่านที่เป็นการแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการนำ (150 kHz-30MHz) ปัญหาการรบกวนจากกระแสรั่ว i_{cm} จึงมีได้หลากหลายรูปแบบ กระแสรั่วที่มีขนาดใหญ่สามารถรบกวนการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ตรวจสอบความผิดปกติของดินได้ เช่น ตัวชี้บอกความผิดปกติของดิน และอุปกรณ์ตัดวงจรรั่วลงดิน (Earth-leakage circuit breaker) ในขณะเดียวกันกระแสโหมคร่วมในย่านความถี่สูง (150 kHz-30MHz) จะก่อให้เกิดการแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการนำส่งผลกระทบต่อเครื่องมือทางอิเล็กทรอนิกส์ อาทิเช่น PLC เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ตรวจจับต่าง ๆ ทำงานผิดพลาดได้



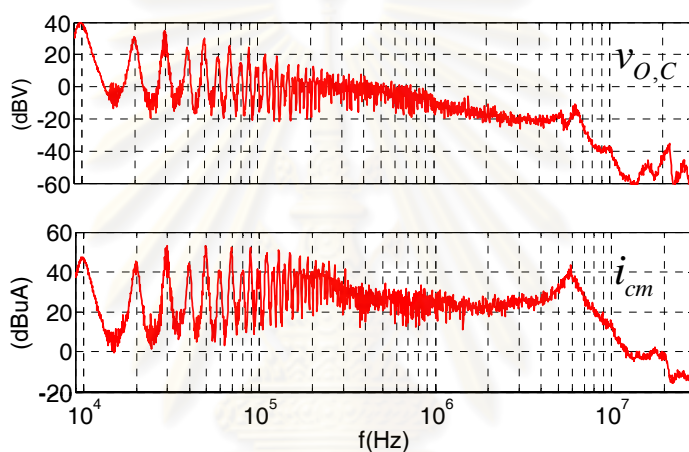
รูปที่ 1.3 ทางเดินของกระแสรั่ว i_{cm} ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม

กลไกการเกิดกระแสรั่ว i_{cm} ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม โดยทั่วไปสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ แรงดันโหมตรวมที่อินเวอร์เตอร์สร้างขึ้นจะตกคร่อมค่าความจุไฟฟ้าแบบแฝงระหว่างขดลวดและโครงเหล็กของมอเตอร์ ในกรณีที่มีการต่อโครงเหล็กของมอเตอร์ลงดินเพื่อป้องกันอันตรายจากการสัมผัสโครงมอเตอร์ จะพบว่าเมื่อแรงดันโหมตรวมมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเฉียบพลัน คือมีค่า dv/dt สูงก็ จะทำให้เกิดการเก็บและคายประจุของควมจุไฟฟ้าแบบแฝงระหว่างขดลวดและโครงเหล็กของมอเตอร์ กลายเป็นกระแสโหมตรวม $i_{o,c}$ (Common-mode current) ไหลแต่ละเฟสและรวมกันลงสู่กราวด์กลายเป็น กระแสรั่ว i_{cm} ($i_{cm} = 3i_{o,c}$) กระแสรั่วที่ไหลลงกราวด์จะไหลกลับเข้าสู่อินเวอร์เตอร์และมอเตอร์เป็นวงรอบดังรูป ที่ 1.3 กระแสโหมตรวมหรือกระแสรั่วเป็นสัญญาณพัลส์ (pulse) ความถี่สูงซึ่งเกิดขึ้นตามจังหวะการ เปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดของแรงดันโหมตรวม ดังตัวอย่างในรูปที่ 1.4 ก) ซึ่งจะเห็นว่ากระแสรั่วมีค่ายอดสูง ถึงประมาณ 1 A จึงอาจรบกวนการทำงานของอุปกรณ์ตัดวงจรรั่วลงดินที่มีค่ากระแสตัดวงจรสูงสุดที่ 30 mA ได้ ในขณะที่เดียวกันตัวอย่างสเปกตรัมของกระแสรั่วในรูปที่ 1.4 ข) แสดงให้เห็นว่ากระแสรั่วมีขนาดสเปกตรัม ค่อนข้างสูงในย่านความถี่ในช่วง 100 kHz-10 MHz รวมทั้งมีปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ที่ความถี่ประมาณ 6 MHz ด้วย จึงก่อให้เกิดการแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการนำซึ่งอยู่ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 150 kHz-30 MHz ได้

จากกลไกการเกิดกระแสรั่วจากการกระตุ้นตามการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดของแรงดัน โหมตรวมซึ่งเป็นความถี่สูง จึงสรุปได้ว่าองค์ประกอบความถี่สูงของแรงดันโหมตรวมเท่านั้นที่ทำให้เกิดกระแสรั่ว ที่เป็นปัญหา



ก) รูปคลื่นของสัญญาณ



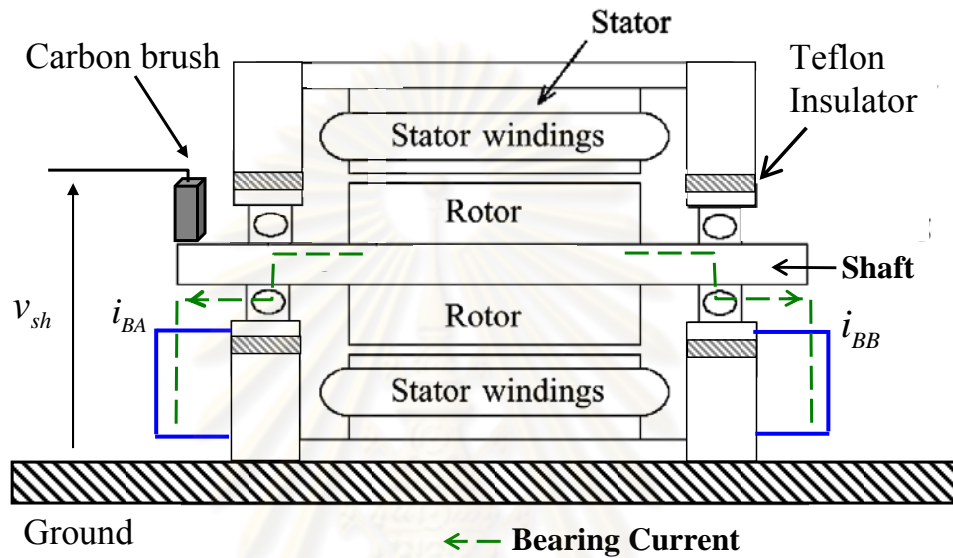
ข) สเปกตรัมของสัญญาณ

รูปที่ 1.4 ตัวอย่างสัญญาณแรงดันโหมตรงร่วม $v_{o,c}$ และกระแสร่วม i_{cm} ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์แบบพีดีบีลยูเอ็ม (ความถี่การสวิตช์เท่ากับ 10 kHz)

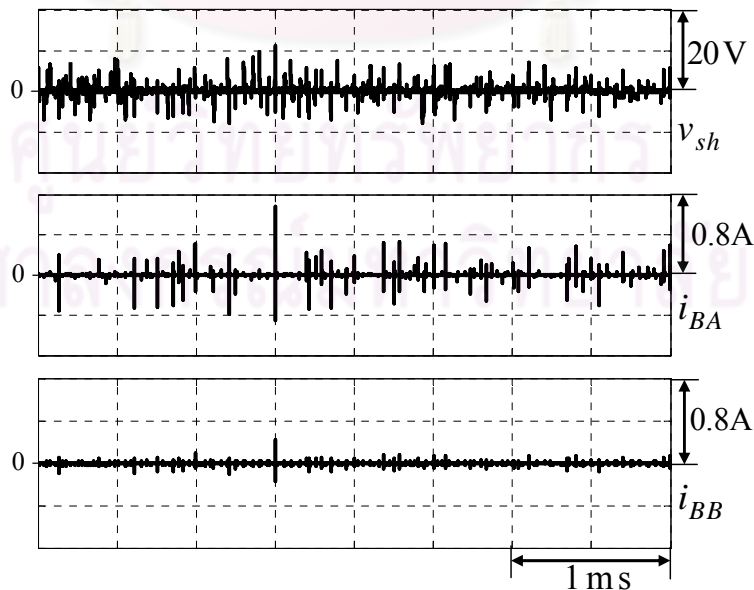
1.2.2 การเกิดแรงดันเพลาและความเสียหายของตลับลูกปืนเนื่องจากการไหลของกระแสตลับลูกปืน

ปัญหาความเสียหายของตลับลูกปืนก่อนเวลาอันควรเป็นปัญหาหนึ่งที่พบได้บ่อยในงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับงานซึ่งเป็นระบบที่ขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์ [5]-[8] มูลค่าความเสียหายจากปัญหาดังกล่าวนี้อาจเป็นมูลค่าที่สูงมากเมื่อประเมินจากค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงและความเสียหายจากการหยุดชะงักของกระบวนการผลิต ดังนั้นความเสียหายของตลับลูกปืนจึงเป็นปัญหาที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากทั้งในแง่ของการแก้ปัญหา เช่น การใช้ตลับลูกปืนแบบมีฉนวนภายใน เป็นต้น และการวิเคราะห์ศึกษาถึงสาเหตุการเกิดความเสียหายดังกล่าว ซึ่งงานวิจัยในหลายบทความ [6]-[8] ได้ชี้ให้เห็นว่าความเสียหายของตลับลูกปืนที่มีลักษณะเป็นร่องลึกที่ผิววงลูกปืนมีสาเหตุจากการถูกกัดกร่อนโดยกระแสตลับลูกปืนค่าสูง

แรงดันเฟลาเป็นสาเหตุสำคัญของกระแสตลับลูกปืนซึ่งจะไหลจากเฟลาของมอเตอร์ผ่านตลับลูกปืนไปสู่โครงเหล็กของมอเตอร์ เราสามารถตรวจวัดกระแสตลับลูกปืนและแรงดันเฟลาได้ตามการติดตั้งในรูปที่ 1.5 ซึ่งมีการแทรกฉนวนฟิล์มเทฟลอน (Teflon film) ระหว่างตลับลูกปืนกับโครงมอเตอร์ รูปที่ 1.6 แสดงรูปคลื่นแรงดันเฟลา v_{sh} เทียบกับโครงมอเตอร์หรือกราวด์ (วัดผ่านแปรงถ่านที่สัมผัสอยู่กับปลายเฟลา) และรูปคลื่นกระแสตลับลูกปืน i_{BA} , i_{BB} ที่วัดจากกระแสในสายตัวนำลัดวงจรระหว่างตลับลูกปืนกับโครงมอเตอร์



รูปที่ 1.5 การวัดแรงดันเฟลา (v_{sh}) และกระแสตลับลูกปืน (i_{BA} , i_{BB})

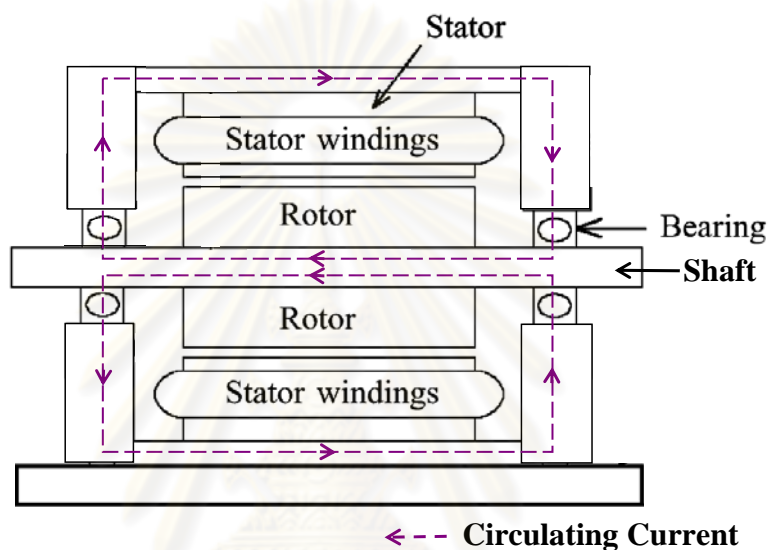


รูปที่ 1.6 แรงดันเฟลา (v_{sh}) และกระแสตลับลูกปืนที่ปลายเฟลาทั้ง 2 ด้าน (i_{BA} , i_{BB})

กระแสตลับลูกปืนที่เกิดจากการใช้อินเวอร์เตอร์ขับเคลื่อนมอเตอร์ เกิดขึ้นได้ใน 3 ลักษณะ ได้แก่

1) กระแสหมุนวนความถี่สูง (High frequency circulating currents)

ความไม่สมมาตรทางโครงสร้างของตัวมอเตอร์และแรงดันลำดับศูนย์จากแหล่งจ่ายไฟ 3 เฟส สามารถทำให้เกิดฟลักซ์ค้ำของโรเตอร์และเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสหมุนวนผ่านโรเตอร์ ซึ่งกระแสนี้จะไหลจากปลายเฟลาและตลับลูกปืนด้านหนึ่งไปสู่ปลายเฟลาและตลับลูกปืนอีกด้านหนึ่งดังทิศทางในรูปที่ 1.7



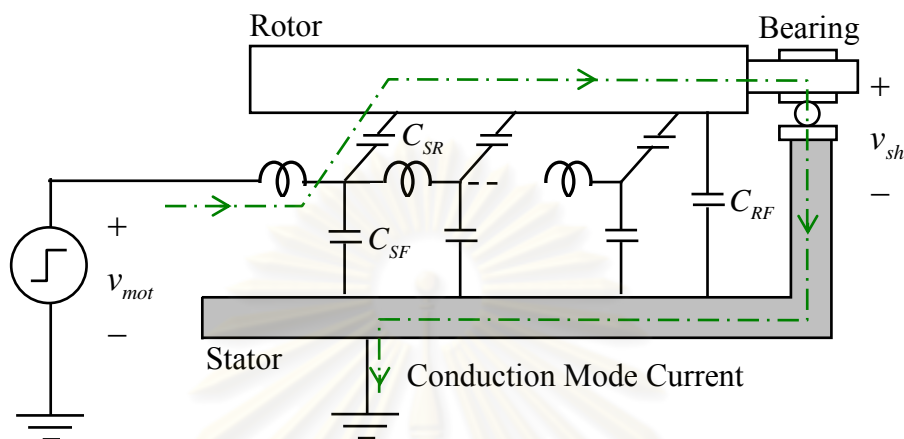
รูปที่ 1.7 วงรอบของกระแสหมุนวนผ่านตลับลูกปืน

จากเส้นทางการไหลผ่านตลับลูกปืนทั้งสองด้าน กระแสหมุนวนที่วัดได้ที่เฟลาทั้งสองด้านจะมีขนาดเท่ากันแต่มีทิศทางตรงกันข้าม งานวิจัยในบทความ [5]–[6] ได้นำเสนอว่าการใช้อินเวอร์เตอร์ขับเคลื่อนมอเตอร์จะทำให้เกิดกระแสหมุนวนมากขึ้นกว่าในอดีตที่ใช้แหล่งจ่ายไฟจากการไฟฟ้าในการขับเคลื่อนมอเตอร์ โดยกระแสหมุนวนในกรณีที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์จะมีลักษณะเป็นกระแสที่มีความถี่สูงที่เกิดจากการกระตุ้นของแรงดันโหมตร่วมที่มีความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งแตกต่างจากในอดีตที่เป็นกระแสหมุนวนความถี่ต่ำ

2) กระแสโหมตร่วมการนำของตลับลูกปืน (Conduction mode currents)

การเกิดกระแสโหมตร่วมการนำของตลับลูกปืนสามารถอธิบายได้โดยใช้แบบจำลองโหมตร่วมต่อเฟสของมอเตอร์ดังรูปที่ 1.8 เมื่อ v_{mot} คือแรงดันโหมตร่วมที่ขั้วมอเตอร์ซึ่งตกคร่อมระหว่างขั้วมอเตอร์กับกราวด์, v_{sh} คือแรงดันเฟลาของมอเตอร์ที่วัดเทียบกับโครงของมอเตอร์ที่ต่ออยู่กับกราวด์, C_{SF} คือค่าความจุไฟฟ้าแอมแปงระหว่างสเตเตอร์กับโครงมอเตอร์, C_{SR} คือค่าความจุไฟฟ้าแอมแปงระหว่างสเตเตอร์กับเฟลา และ C_{RF} คือค่าความจุไฟฟ้าแอมแปงระหว่างเฟลากับโครงมอเตอร์ ในช่วงเวลาที่ลูกปืนสัมผัสกับรางลูกปืนนั้น ตลับลูกปืนจะแสดงพฤติกรรมเป็นตัวนำที่นำกระแสอย่างต่อเนื่องโดยแรงดันเฟลาในขณะนั้นจะมีค่าเป็นศูนย์ ส่วนหนึ่งของกระแสโหมตร่วมจึงสามารถไหลผ่านตลับลูกปืนได้โดยมีเส้นทางการไหลจากขั้วมอเตอร์ผ่าน C_{SR} ไปที่เฟลาและ

ตลับลูกปืนก่อนลงสู่กราวด์ดังรูปที่ 1.8 เนื่องจากกระแสไหลมอดกรนำของตลับลูกปืนเกิดขึ้นจากการกระตุ้นโดยแรงดันโหมคร่วมดังนั้นกระแสส่วนนี้จึงเกิดขึ้นตามจังหวะการเปลี่ยนแปลงแรงดัน (dv/dt) โหมคร่วม



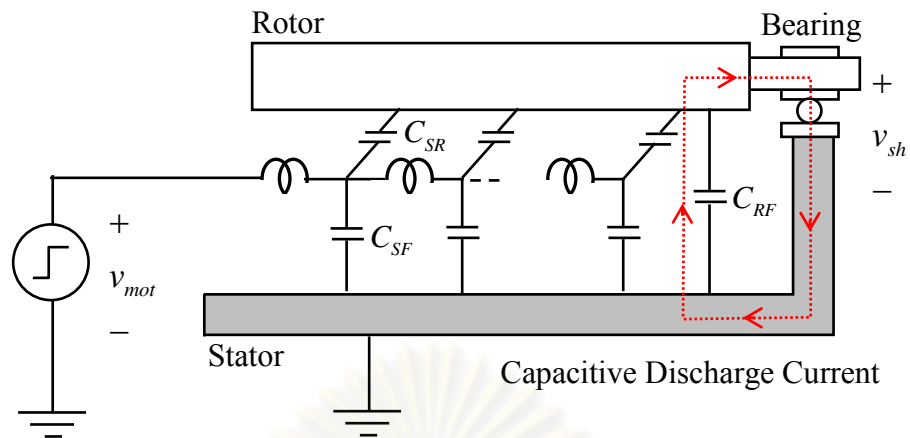
รูปที่ 1.8 แบบจำลองโหมคร่วมต่อเฟสของมอเตอร์และวงรอบของกระแสไหลมอดกรนำของตลับลูกปืน

3) กระแสคายประจุ (Capacitive discharge currents)

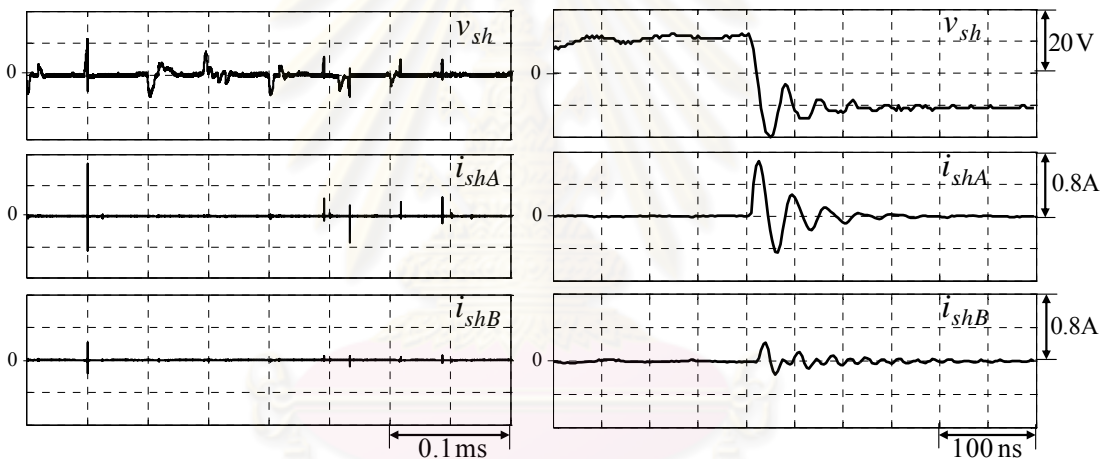
กระแสคายประจุที่ไหลผ่านตลับลูกปืนจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่ลูกปืนลอยอยู่บนชั้นฟิล์มโดยไม่สัมผัสกับรางลูกปืน ตลับลูกปืนจึงแสดงพฤติกรรมเป็นฉนวน กระแสคายประจุจะเกิดจาก 2 องค์ประกอบ คือ

- 1) แรงดันที่เพลามอเตอร์ v_{sh} ซึ่งมีค่าแปรตามแรงดันโหมคร่วมที่ขั้วมอเตอร์ v_{mot} และขึ้นอยู่กับสัดส่วนระหว่างค่า C_{SR} และ C_{RF} ดังรูปที่ 1.9
- 2) ชั้นฟิล์มบางของสารหล่อลื่นในตลับลูกปืนที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนระหว่างเพลากับโครงของมอเตอร์

แรงดันเพลาคือกระตุ้นให้เกิดการอัดหรือคายประจุผ่านชั้นฟิล์มบางของสารหล่อลื่น ทำให้เกิดเป็นกระแสคายประจุไหลผ่านตลับลูกปืนที่มีเส้นทางการไหลตามรูปที่ 1.9 และหากลูกปืนมีการสัมผัสกับรางลูกปืนแบบทันทีทันใดหรือแรงดันเพลามอเตอร์ v_{sh} มีค่ายอดสูงกว่าค่าแรงดันเสียหายฉับพลัน (Breakdown voltage) ของชั้นฟิล์มบางของสารหล่อลื่น ความเป็นฉนวนของชั้นฟิล์มบางของสารหล่อลื่นในตลับลูกปืนจะเกิดการเสียหายฉับพลันทำให้เกิดกระแสคายประจุกัดกร่อน (Electric discharge machining (EDM) current) ความถี่สูงไหลผ่านตลับลูกปืนได้ [7],[8] เนื่องจากกระแสในส่วนนี้เกิดในลักษณะการคายประจุอย่างเฉียบพลันและมักจะมีค่าสูง จึงทำให้เกิดการกัดกร่อนของโลหะและก่อให้เกิดความเสียหายต่อตลับลูกปืนได้มากที่สุด โดยทั่วไปสารหล่อลื่นในตลับลูกปืนจะมีค่าแรงดันเสียหายฉับพลันประมาณ $15 \text{ V}/\mu\text{m}$ และมีความหนาอยู่ในช่วง $0.2\text{-}2 \mu\text{m}$ ดังนั้นค่าแรงดันเสียหายฉับพลันของชั้นฟิล์มบางของสารหล่อลื่นในตลับลูกปืนจะมีค่าอยู่ในช่วง $3\text{-}30 \text{ V}$



รูปที่ 1.9 แบบจำลองโหมมตร่วมต่อเฟสของมอเตอร์และวงรอบของกระแสคายประจุผ่านดัลบูลึกเป็น

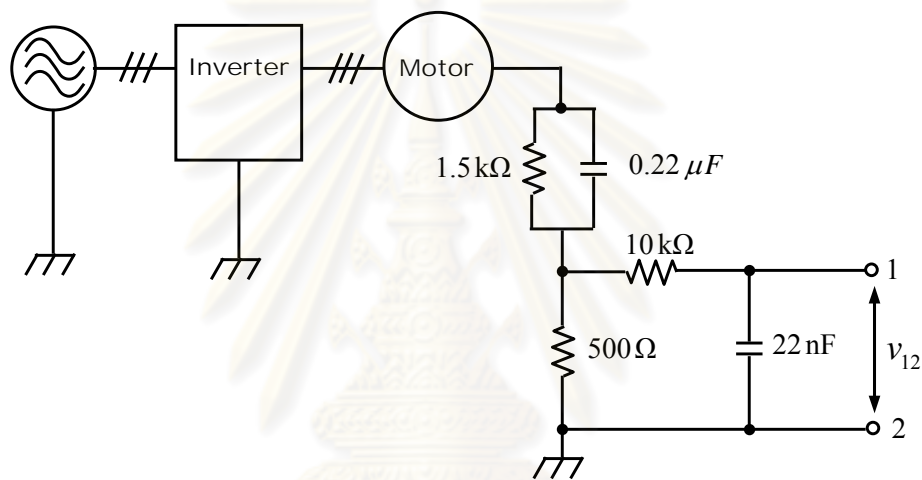


รูปที่ 1.10 รูปขยายทางแกนเวลา (จากรูปที่ 1.6) ของแรงดันเพลลาและกระแสดัลบูลึกที่ปลายเพลลาทั้ง 2 ด้าน

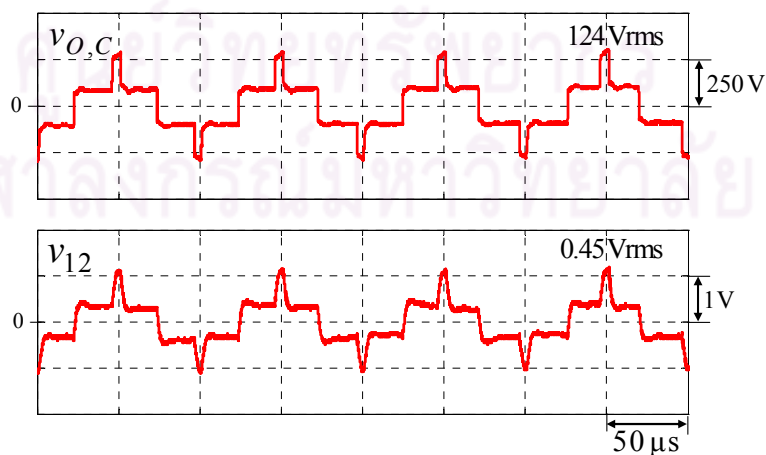
จากรูปที่ 1.10 กระแสดัลบูลึกที่วัดได้จากระบบขับเคลื่อนที่ใช้ทดลองมีลักษณะที่เกิดขึ้นเมื่อความเป็นฉนวนของชั้นฟิล์มบางของสารหล่อลื่นในดัลบูลึกเป็นจะเกิดการเสียหายยับยั้งคือ แรงดันเพลลา v_{sh} ลดลงเป็นศูนย์อย่างทันทีทันใด ดังนั้นกระแสดัลบูลึกที่วัดได้จึงเป็นกระแสคายประจุที่กวัดกรอนโดยส่วนใหญ่อะไรก็ตามเนื่องจากกระแสดัลบูลึกเป็นเกิดขึ้นทั้ง 3 ลักษณะล้วนแล้วแต่เป็นผลจากแรงดันโหมมตร่วมที่ความถี่สูง การแก้ปัญหาความเสียหายของดัลบูลึกเป็นจึงสามารถทำได้โดยการกำจัลดแรงดันโหมมตร่วมโดยเฉพาะในย่านความถี่สูงซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดกระแสดัลบูลึกเป็น

1.2.3 อันตรายจากกระแสสัมผัสหรือไฟฟ้าดูดในกรณีที่โครงภายนอกของมอเตอร์ไม่ได้ต่อดิน

เมื่อมีการใช้งานในสภาวะที่โครงของมอเตอร์ไม่ได้ถูกต่อลงกราวด์ จะมีแรงดันโหมคร่วมค่าสูง ตกคร่อมระหว่างโครงของมอเตอร์และกราวด์และสามารถก่อให้เกิดอันตรายจากกระแสสัมผัสหรือไฟฟ้าดูดเมื่อสัมผัสถูกโครงของมอเตอร์ได้ ตามมาตรฐาน IEC 60335 [9] อันตรายจากกระแสสัมผัสที่โครงของมอเตอร์จะวัดเป็นค่าแรงดันเมื่อกระแสสัมผัสไหลผ่านอิมพีแดนซ์มาตรฐานที่ต่อระหว่างโครงมอเตอร์และกราวด์ดังแสดงในวงจรรูปที่ 1.11 (อิมพีแดนซ์ดังกล่าวทำหน้าที่จำลองค่าอิมพีแดนซ์ของร่างกายคนที่ความถี่ต่างๆ) มาตรฐานกำหนดให้ แรงดัน v_{12} ที่ขั้ว 1-2 ของอิมพีแดนซ์ต้องมีค่าไม่เกิน 0.25 Vrms จึงจะถือได้ว่าโครงของมอเตอร์มีระดับแรงดันที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายจากการสัมผัส



รูปที่ 1.11 วงจรสำหรับตรวจวัดกระแสสัมผัสหรือแรงดันที่โครงมอเตอร์ตามมาตรฐาน IEC 60335

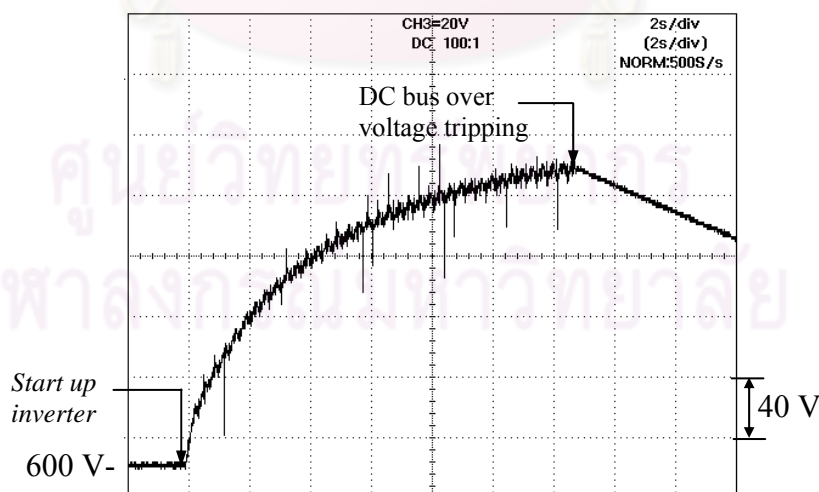


รูปที่ 1.12 แรงดันโหมคร่วม $v_{O,C}$ และแรงดันที่ขั้ว 1-2 (v_{12}) ของวงจรตรวจวัดกระแสสัมผัส

จากการตรวจวัดแรงดัน v_{12} ในระบบขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ดังแสดงในรูปที่ 1.12 จะเห็นได้ว่าแรงดัน v_{12} เป็นแรงดันที่เกิดจากแรงดันโหมดรวม $v_{o,c}$ ที่มาจากวงจรอินเวอร์เตอร์โดยสัญญาณแรงดันทั้งสองมีลักษณะรูปคลื่นที่สอดคล้องกัน ในกรณีนี้แรงดัน v_{12} มีค่า rms ประมาณ 0.45 V ซึ่งสูงกว่าค่าที่มาตรฐานกำหนด เป็นข้อบ่งชี้ว่าแรงดันโหมดรวมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ที่มีค่าสูงสามารถก่อให้เกิดอันตรายจากกระแสสัมผัสได้ การลดทอนแรงดันโหมดรวมจึงมีนัยสำคัญเพื่อความปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน และเมื่อพิจารณาลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์มาตรฐานจะพบว่า มีลักษณะเป็นวงจรกรองผ่านสูง ซึ่งหมายความว่ามีการให้น้ำหนักต่อองค์ประกอบที่ความถี่สูงมากกว่าความถี่ต่ำ ดังนั้นการลดทอนแรงดันออก v_{12} ของอิมพีแดนซ์มาตรฐานให้อยู่ในขอบเขตของมาตรฐาน จะต้องเน้นที่การลดทอนองค์ประกอบความถี่สูงของแรงดันโหมดรวม $v_{o,c}$ ที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์เป็นหลัก

1.2.4 ปฏิกิริยาการอัดประจุสไฟตรง

นอกจากปัญหา 1)- 3) ซึ่งเป็นปัญหาที่มีการศึกษามาก่อนแล้ว จากการศึกษาผลเสียหายที่เกิดขึ้นกับอินเวอร์เตอร์ในอุตสาหกรรมในประเทศพบว่ามีปรากฏการณ์ใหม่ที่เกิดจากแรงดันโหมดรวมกล่าวคือ หากมีการใช้อินเวอร์เตอร์ในสภาวะไร้อโหลดหรือโหลดเบาในกรณีที่ความจุไฟฟ้าแบบแฝงทางด้านออกมีค่าสูงมาก เช่นในกรณีที่สายเคเบิลของมอเตอร์มีความยาวมาก ภายใต้เงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่ตัวเก็บประจุของบัสไฟตรงถูกประจุจนกระทั่งแรงดันบัสไฟตรงมีค่าเพิ่มสูงเกินกว่าค่าจำกัด ดังแสดงตัวอย่างปรากฏการณ์การเพิ่มของแรงดันบัสไฟตรงได้ดังรูปที่ 1.13 โดยที่ปรากฏการณ์ดังกล่าวไม่ได้เกิดจากการคืนพลังงานโดยมอเตอร์ที่ทำงานในย่านคืนพลังงาน (regenerative) ขณะเบรกดังเช่นที่เกิดขึ้นโดยทั่วไป



รูปที่ 1.13 ปรากฏการณ์การอัดประจุบัสไฟตรงและการตัดการทำงานของอินเวอร์เตอร์เมื่อเกิดแรงดันเกินที่บัสไฟตรง

ในที่นี้เราจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์การอัดประจุสไฟตรง (DC bus charging phenomenon) [10], [11] ซึ่งเมื่อเกิดปรากฏการณ์นี้แล้วอินเวอร์เตอร์จะป้องกันความเสียหายจากแรงดันเกิน โดยเข้าสู่โหมดการตัดแรงดันเกิน (Over-voltage trip) ถึงแม้อินเวอร์เตอร์จะไม่เกิดความเสียหายแต่มีผลกระทบทำให้ระบบต้องหยุดทำงานหรือไม่สามารถทำงานได้ตามปกติ เนื่องจากปรากฏการณ์อัดประจุสไฟตรงเป็นปรากฏการณ์ใหม่ที่ยังขาดความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมและสาเหตุการเกิดอย่างชัดเจน วิทยานิพนธ์นี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะวิเคราะห์กลไกของปรากฏการณ์การอัดประจุสไฟตรงเพื่อให้เกิดความรู้ใหม่ที่จะเป็นแนวทางในการแก้ปัญหาต่อไป โดยเนื้อหาดังกล่าวนี้จะได้กล่าวถึงในบทที่ 2 - 4

1.3 การแก้ปัญหาจากแรงดันโหมตร่วมด้วยวงจรกรองแบบต่าง ๆ

จากปัญหาที่เกิดจากแรงดันโหมตร่วมที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 1.2 เป้าหมายหลักของงานวิทยานิพนธ์นี้จึงเน้นที่การแก้ปัญหาต่างๆ จากแรงดันโหมตร่วม งานวิจัยก่อนหน้านี้ส่วนหนึ่งได้ใช้วิธีหลีกเลี่ยงการสร้างแรงดันโหมตร่วมด้วยการใช้อินเวอร์เตอร์ที่มีโครงสร้างหรือรูปแบบการมอดูเลตที่แตกต่างออกไปจากอินเวอร์เตอร์แบบพีดับเบิลยูเอ็มที่ใช้งานโดยทั่วไป [12]-[14] บทความ [12] และ [13] เสนอการใช้อินเวอร์เตอร์ 4 ขา (four-leg inverter) แต่อินเวอร์เตอร์ชนิดนี้ก็มีข้อเสียคือค่าดัชนีการมอดูเลตสูงสุดจะมีค่าต่ำกว่าอินเวอร์เตอร์แบบพีดับเบิลยูเอ็มที่ใช้งานกันอยู่โดยทั่วไป ในขณะที่การใช้อินเวอร์เตอร์ที่มีโครงสร้างแบบบริดจ์สองตัว (dual-bridge inverter) ในบทความ [14] สามารถใช้เพื่อกำจัดแรงดันโหมตร่วมได้เฉพาะกับมอดูเลตที่มีขดลวดสองขด (dual windings) เท่านั้น จึงไม่สามารถนำไปใช้กับมอดูเลตทั่วไปได้

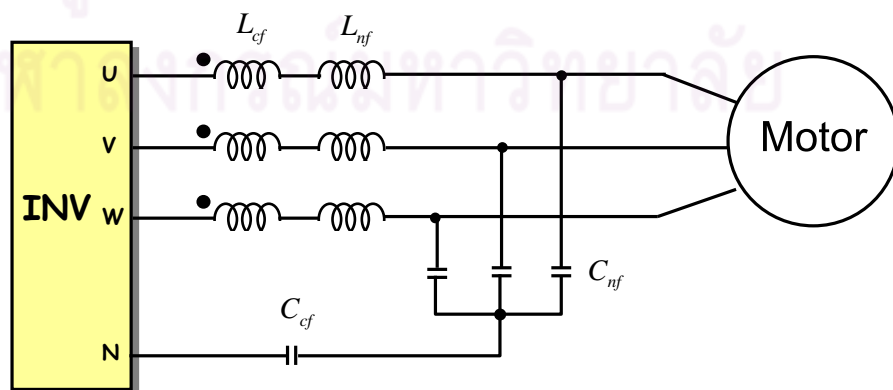
ในอีกด้านหนึ่งการแก้ปัญหาด้วยการใช้วงจรกรองแบบต่าง ๆ ตามรูปแบบของปัญหาเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง ปัญหาการแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้าและความล้มเหลวของตัวขับเคลื่อนความผิดพลาดลงดินนั้นส่วนใหญ่เป็นปัญหาทางด้านแหล่งจ่ายหรือด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ (ยกเว้นกรณีที่พิจารณาปัญหาการแทรกสอดทางแม่เหล็กที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์) จึงนิยมแก้ไขโดยการติดตั้งวงจรกรองทางด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ เพื่อให้กระแสโหมตร่วมที่เกิดจากแรงดันโหมตร่วมด้านออกไหลวนอยู่ในตัวอินเวอร์เตอร์เอง ถึงแม้ว่าการติดตั้งวงจรกรองทางด้านออกก็สามารถแก้ปัญหานี้ได้เช่นกัน แต่การออกแบบวงจรกรองด้านเข้า ทำได้ง่ายกว่าวงจรกรองด้านออกมาก เนื่องจากทางด้านเข้ามีเพียงแรงดันจากการไฟฟ้าที่ความถี่ต่ำ (50 Hz) และวงจรกรองก็ทำหน้าที่เพียงสร้างทางเบี่ยงให้กระแสไม่ไหลกลับไปยังแหล่งจ่ายเท่านั้นโดยไม่ได้ลดทอนกระแสโหมตร่วมที่เกิดขึ้น ในขณะที่หากติดตั้งวงจรกรองทางด้านออก ตัววงจรกรองจะต้องทำหน้าที่เป็นอิมพีแดนซ์ขนาดใหญ่กีดกันแรงดันโหมตร่วมที่เกิดจากแรงดันพีดับเบิลยูเอ็มที่สวิตช์ด้วยความถี่สูงมาก (ประมาณ 10 kHz) ตามความถี่การสวิตช์ที่ใช้งาน เพื่อลดทอนกระแสโหมตร่วมให้มีค่าจำกัดตามต้องการ วงจรกรองด้านออกจึงมีขนาดใหญ่ ราคาแพง และอาจถูกกระตุ้นให้เกิดภาวะเรโซแนนซ์ได้ง่าย แต่สำหรับปัญหาการเกิดแรงดันเพลาและความเสียหายของตลับลูกปืนเนื่องจากกระแสตลับลูกปืนและปัญหาอันตรายจากกระแสสัมผัสหรือไฟฟ้านั้นเป็นปัญหาที่ตัวมอดูเลต จึงไม่สามารถแก้ได้ด้วยวงจรกรองทางด้านเข้าแต่จำเป็นที่จะต้องใช้อินเวอร์เตอร์ที่ออกแบบมาเพื่อลดทอนแรงดันโหมตร่วมที่เป็นสาเหตุของปัญหาโดยตรง

นอกจากปัญหาการแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้าและความล้มเหลวของตัวขับเคลื่อนความผิดพลาดของดินแล้ว ปัญหาที่เป็นผลกระทบจากแรงดันโหมดร่วมทั้งหมดจะต้องแก้ด้วยการใช้วงจรกรองทางด้านออก ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จะให้ความสนใจที่การใช้วงจรกรองทางด้านออกซึ่งเป็นวิธีที่สามารถแก้ปัญหาต่าง ๆ ได้โดยครอบคลุมทุกปัญหารวมทั้งปัญหาการแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้าและความล้มเหลวของตัวขับเคลื่อนความผิดพลาดของดินด้วย จากการสืบค้นงานวิจัยที่ผ่านมา [4], [15]-[29] เราสามารถจำแนกวงจรกรองด้านออกที่ใช้สำหรับแก้ปัญหาผลกระทบจากแรงดันโหมดร่วมออกเป็น 2 ชนิด คือ วงจรกรองพาสซีฟและวงจรกรองแอกทีฟ

1.3.1 วงจรกรองพาสซีฟ

งานวิจัยที่ผ่านมาได้นำเสนอวงจรกรองพาสซีฟรูปแบบต่าง ๆ เพื่อลดทอนแรงดันโหมดร่วม เช่น บทความ [4], [15], [16] ใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบโหมดร่วมและ [17]-[19] ใช้วงจรกรองพาสซีฟแบบ LC เพื่อลด dv/dt หลักการของวงจรกรองทั้ง 2 แบบนี้จะทำหน้าที่กรององค์ประกอบของแรงดันโหมดร่วมที่มีความถี่สูงกว่าความถี่การสวิตซ์ซึ่งทำให้วงจรกรองมีขนาดเล็ก วงจรกรองชนิดนี้มีคุณสมบัติการกรองที่ดีเฉพาะในย่านความถี่สูงมาก ๆ (>10 เท่าของความถี่การสวิตซ์) เนื่องจากต้องออกแบบให้ความถี่ตัดข้ามของวงจรกรอง (Cut-off frequency) อยู่ห่างจากความถี่การสวิตซ์มาก ๆ เพื่อหลีกเลี่ยงการถูกกระตุ้นจากเรโซแนนซ์ ทำให้สามารถแก้ไขผลกระทบจากแรงดันโหมดร่วมเฉพาะในประเด็นที่เกี่ยวข้องกับปัญหา EMI และความล้มเหลวของตัวขับเคลื่อนความผิดพลาดของดินเท่านั้น แต่จะไม่สามารถแก้ปัญหาอื่น ๆ ได้เนื่องจากองค์ประกอบที่ความถี่การสวิตซ์ของแรงดันโหมดร่วมซึ่งไม่ได้ถูกกรองออกไปยังสามารถกระตุ้นให้เกิดปัญหาที่เหลือได้

วงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ที่ทำหน้าที่กรองแรงดันโหมดร่วมทั้งองค์ประกอบความถี่สูงและองค์ประกอบความถี่การสวิตซ์สามารถทำได้โดยออกแบบให้วงจรกรองมีความถี่ตัดข้ามต่ำกว่าความถี่การสวิตซ์ วงจรกรองชนิดนี้เป็นที่รู้จักกันดีและใช้กันมานานตั้งแต่อดีต [10]-[23] เพราะมีโครงสร้างที่ง่ายดังแสดงในรูปที่ 1.14 และเนื่องจากองค์ประกอบทั้งหมดของวงจรเป็นองค์ประกอบเฉื่อยงาน วงจรกรองจึงมีแบนด์วิดท์ที่กว้างครอบคลุมความถี่การสวิตซ์จนถึงย่านความถี่การแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการนำ



รูปที่ 1.14 โครงสร้างของวงจรกรองแบบพาสซีฟที่มีความถี่ตัดข้ามต่ำกว่าความถี่การสวิตซ์

ถึงแม้ว่าวงจรกรองชนิดนี้จะสามารถลดทอนแรงดันโหมดร่วมได้เป็นอย่างดีและสามารถแก้ปัญหาผลกระทบจากแรงดันโหมดร่วมได้ครอบคลุมทุกประเด็น แต่ข้อด้อยคือการออกแบบวงจรกรองจะทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากในด้านหนึ่งผู้ออกแบบจะต้องออกแบบวงจรกรองเพื่อลดทอนองค์ประกอบที่ความถี่การสวิตช์ของแรงดันโหมดร่วม กล่าวคือจะวางความถี่ตัดข้ามให้ต่ำที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ แต่ในขณะเดียวกันจะต้องหลีกเลี่ยงไม่ให้วงจรกรองถูกกระตุ้นจากแรงดันลำดับศูนย์ที่ความถี่ $3n$ เท่าของความถี่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ที่เกิดจากวิธีการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ ซึ่งหมายถึงว่าจะต้องวางความถี่ตัดข้ามให้สูงกว่าความถี่ฮาร์โมนิกของความถี่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ความต้องการที่ขัดแย้งกันนี้อาจทำให้ไม่สามารถออกแบบวงจรกรองที่มีสมรรถนะที่ต้องการได้ ปัญหาดังกล่าวอาจหลีกเลี่ยงได้หากจำกัดวิธีการมอดูเลตเป็นแบบคลื่นรูปไซน์ (Sinusoidal PWM) เพราะจะไม่มีการฉีดแรงดันลำดับศูนย์ แต่จะทำให้สมรรถนะการสร้างแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ด้อยลงซึ่งเป็นปัญหาในการใช้งานที่ยอมรับได้ยากเช่นกัน นอกจากนี้ โครงสร้างของวงจรกรองที่มีตัวเก็บประจุต่อขนานที่ด้านออกอินเวอร์เตอร์ C_{rf} จะส่งผลให้เกิดกระแสโหมดผลต่างค่าสูงได้ ดังนั้นวงจรกรองชนิดนี้ต้องใช้งานร่วมกับตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง (Differential-mode choke) L_{rf} เสมอเพื่อจำกัดกระแสโหมดผลต่างไม่ว่าจะมีความจำเป็นที่จะต้องลดทอนแรงดันโหมดผลต่าง (Differential-mode voltage) หรือไม่ก็ตาม ยังผลทำให้วงจรกรองมีราคาแพงและมีขนาดโดยรวมใหญ่มาก

1.3.2 วงจรกรองแอกทีฟ

การใช้วงจรกรองแบบพาสซีฟชนิดต่างๆ มีข้อจำกัดที่สำคัญจากปัญหาเรโซแนนซ์ การแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยการใช้วงจรกรองแอกทีฟจึงได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง วงจรกรอง EMI ชนิดแอกทีฟแบบขนานที่นำเสนอโดย Takahashi [24] เป็นวงจรกรองขนาดเล็กที่สามารถแก้ปัญหา EMI และความล้มเหลวของตัวรีบ็อกความผิดพลาดลงดินได้เป็นอย่างดี แต่เนื่องจากวงจรกรองชนิดนี้ไม่ได้ทำหน้าที่กรองแรงดันโหมดร่วม เป็นเพียงแค่การเบี่ยงทางไหลของกระแสโหมดร่วมไม่ให้ลงกราวด์เท่านั้น ดังนั้นจึงไม่สามารถนำไปใช้เพื่อแก้ปัญหาที่เป็นผลกระทบจากแรงดันโหมดร่วมในประเด็นอื่นๆได้ นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดคือสามารถนำไปใช้งานได้เฉพาะกับอินเวอร์เตอร์ที่มีระดับแรงดันต่ำ ๆ และมีกระแสโหมดร่วมขนาดเล็ก ทั้งนี้เนื่องจากขีดจำกัดทางพิกัดแรงดันและกระแสของทรานซิสเตอร์ในวงจรขยายแบบพุ่มพูล

วงจรกรองแอกทีฟแบบอนุกรมสำหรับชดเชยแรงดันโหมดร่วม [25]-[29] เป็นวงจรกรองที่สามารถกำจัดแรงดันโหมดร่วมได้เป็นอย่างดี แต่ก็มีข้อจำกัดทางด้านพิกัดแรงดันและกระแสของทรานซิสเตอร์ในวงจรขยายแบบพุ่มพูลที่ใช้สร้างแรงดันชดเชย เมื่อนำไปประยุกต์เพื่อใช้งานจริงในระบบที่มีแรงดันบัลไฟตรงสูงเกินกว่า 500 V Xiang [30] เสนอ Active common-mode-voltage compensator (ACCom) ที่จะชดเชยแรงดันโหมดร่วมด้วยอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ 1 ขา (Single-leg 4-level inverter) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เหมาะสมกับการใช้งานกับระบบขับเคลื่อนแรงดันสูง อย่างไรก็ตามแนวทางที่ Xiang นำเสนอนี้จะให้วงจรกรองชดเชยองค์ประกอบของแรงดันโหมดร่วมในทุกย่านความถี่ตั้งแต่ที่ความถี่ต่ำ ทำให้หม้อแปลงเชื่อมร่วม (Coupling transformer) มีขนาดใหญ่ไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานจริงได้ ทั้งๆที่องค์ประกอบของแรงดันโหมดร่วมที่ความถี่สูงเท่านั้นที่เป็นต้นเหตุของปัญหาต่างๆที่ได้กล่าวข้างต้น นอกจากนี้ยังเป็นเพียงการยืนยันแนวคิดด้วย

การจำลองการทำงานของระบบ โดยยังขาดรายละเอียดการออกแบบสำหรับการสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ 1 ขาเพื่อนำไปใช้งานในทางปฏิบัติได้จริง

โดยสรุปแล้วจะเห็นได้ว่าวงจรกรองแอกทีฟแบบอนุกรมมีข้อดีหลายอย่างเมื่อเทียบกับวงจรกรองแบบพาสซีฟโดยเฉพาะในเรื่องปัญหาเรโซแนนซ์ที่ทำให้เกิดข้อจำกัดในการใช้งาน ดังนั้นการใช้วงจรกรองแอกทีฟเพื่อลดทอนแรงดันโหมดร่วมจึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้งานจริง แต่มีปัญหาบางประการที่ต้องการการแก้ไขหรือพัฒนาเพื่อนำไปสู่เป้าหมายการนำไปใช้จริงในทางปฏิบัติดังนี้คือ

- 1) จากการศึกษาวงจรกรองแอกทีฟที่นำเสนอในบทความ [25]-[30] พบว่าถึงแม้วงจรกรองแอกทีฟจะมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับวงจรกรองแบบพาสซีฟ แต่การชดเชยแรงดันโหมดร่วมตลอดย่านความถี่รวมทั้งที่ความถี่ฮาร์มอนิกของความถี่ด้านออกด้วย ทำให้หม้อแปลงเชื่อมร่วมมีขนาดใหญ่เกินความจำเป็น และเนื่องจากหม้อแปลงเป็นองค์ประกอบหลักที่กำหนดขนาดของวงจรกรองแอกทีฟ จึงจำเป็นที่จะต้องหาวิธีการลดขนาดของหม้อแปลงที่ใช้ในวงจรกรองแอกทีฟ
- 2) ปัญหาข้อจำกัดของอุปกรณ์สวิตซ์กำลังที่ใช้สร้างแรงดันชดเชย ทำให้โครงสร้างของวงจรมักกำลังแบบพุกพุลไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ และวงจรอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับที่ทำงานในลักษณะสวิตซ์มีความเหมาะสมมากกว่า แต่ก็ยังต้องพิจารณาปัญหาข้อจำกัดในเรื่องเวลาหน่วง (Delay time) ในส่วนการสร้างแรงดันโหมดร่วมในลักษณะการสวิตซ์ที่ทำให้มีข้อจำกัดในการชดเชยในย่านความถี่สูง ซึ่งเป็นประเด็นที่เกี่ยวข้องกับวิธีการตรวจจับแรงดันโหมดร่วม

เป้าหมายหลักของงานวิทยานิพนธ์นี้คือประเด็นหนึ่งที่ต้องการแก้ปัญหาจากแรงดันโหมดร่วมด้วยการลดทอนองค์ประกอบของแรงดันโหมดร่วมที่ความถี่การสวิตซ์และแถบข้างมีเป้าหมายที่จะพัฒนาให้สามารถนำวงจรกรองแอกทีฟไปใช้ได้จริงในทางปฏิบัติโดย

- 1) ทำให้วงจรมีขนาดเล็ก ด้วยการเลือกกรองแรงดันโหมดร่วมเฉพาะส่วนที่เป็นสาเหตุของปัญหาต่างๆ คือองค์ประกอบที่ความถี่การสวิตซ์ขึ้นไปเพื่อให้หม้อแปลงมีขนาดเล็กลง
- 2) ลดข้อจำกัดด้านสวิตซ์กำลังด้วยการใช้อินเวอร์เตอร์แบบ 4 ระดับ 1 ขา สำหรับสร้างแรงดันชดเชยแรงดันโหมดร่วม
- 3) ลดข้อจำกัดด้านแบนด์วิดท์จากผลการหน่วงเวลาโดยใช้การตรวจจับแรงดันพีคเบิยูเอ็มที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์โดยตรง แทนวิธีของ Xiang ที่ใช้สัญญาณพีคเบิยูเอ็มจากสัญญาณชั้บเกตที่จะมีผลการหน่วงเวลาสูง
- 4) ใช้วงจพาสซีฟขนาดเล็กช่วยกำจัดแรงดันโหมดร่วมในย่านความถี่ที่สูงเกินกว่าแบนด์วิดท์ของวงจรกรองแอกทีฟ (>1 MHz) เพื่อใช้วงจรกรองทำงานได้ดีตลอดย่านความถี่ที่เป็นสาเหตุของปัญหาต่าง ๆ

ดังนั้นวงจรกรองที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นวงจรกรองด้านออกแบบไฮบริดชนิดใหม่ที่เกิดจากการนำวงจรกรองแอกทีฟที่ใช้อินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ 1 ขาและวงจรกรองพาสซีฟ LC ขนาดเล็กมารวมเข้าด้วยกัน วงจรที่นำเสนอจะมีข้อดีคือ เป็นวงจรกรองที่มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับวงจรกรองแอกทีฟแบบเดิมและยังมีสมรรถนะการกรองแรงดันโหมดร่วมที่ดีครอบคลุมตลอดย่านความถี่ที่เป็นสาเหตุให้เกิดผลกระทบต่าง ๆ (ความถี่การสวิตซ์จนถึงที่ความถี่ 30 MHz) อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในทางปฏิบัติได้ โดยไม่เกิด

ปัญหาการออกแบบที่จำเป็นต้องวางตำแหน่งความถี่ตัดข้ามของวงจรกรองให้อยู่ห่างจากทั้งความถี่ฮาร์โมนิกของความถี่ด้านออกและความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาเรโซแนนซ์ดังเช่นการใช้วงจรกรองแบบพาสซีฟ

1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. นำเสนอวงจรกรองด้านออกแบบไฮบริดชนิดใหม่ที่มีโครงสร้างผสมระหว่างวงจรกรองแบบแอคทีฟและแบบพาสซีฟ โดยมีเป้าหมายสำหรับการลดทอนแรงดันโหมดร่วมในย่านความถี่สูงโดยเฉพาะรวมถึงเสนอการวิเคราะห์และหาแนวทางการออกแบบวงจรกรองแบบไฮบริดชนิดใหม่ด้วย
2. ศึกษาคุณสมบัติการใช้วงจรกรองแบบไฮบริดในการแก้ไขผลกระทบที่เกิดจากแรงดันโหมดร่วมในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม ที่เกี่ยวข้องกับแรงดันเพลลา กระแสตลับลูกปืน กระแสรั่ว และกระแสสัมผัส รวมทั้งนำเสนอปัญหาใหม่เกี่ยวกับปรากฏการณ์การอัดประจุสไฟตรงที่เกิดจากกระแสโหมดร่วมพร้อมการวิเคราะห์และแนวทางการแก้ไข

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบในย่านความถี่สูงของแรงดันโหมดร่วมด้านออกในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม กับปัญหาที่เกี่ยวข้องกับแรงดันเพลลา กระแสตลับลูกปืน กระแสรั่ว และกระแสสัมผัส
2. นำเสนอปัญหาใหม่เกี่ยวกับปรากฏการณ์การอัดประจุสไฟตรงที่เกิดจากแรงดันและกระแสโหมดร่วม พร้อมการวิเคราะห์กลไกการเกิดปรากฏการณ์และแนวทางการแก้ไขปัญหาแรงดันบัลไฟตรงเกินที่เกิดจากปรากฏการณ์ดังกล่าว
3. นำเสนอวงจรกรองด้านออกแบบไฮบริดชนิดใหม่เพื่อลดทอนแรงดันโหมดร่วมในย่านความถี่สูง พร้อมการวิเคราะห์การทำงานของวงจรและการออกแบบขององค์ประกอบต่าง ๆ ของวงจรกรองเพื่อการใช้งานจริง รวมถึงการสร้างวงจรจริงเพื่อทดสอบสมรรถนะการลดทอนผลกระทบจากแรงดันโหมดร่วมและยืนยันความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้งาน

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เกิดการพัฒนาวงจรกรองใหม่แบบไฮบริดที่เป็นการผสมคุณสมบัติที่ดีของวงจรกรองพาสซีฟและแอคทีฟ ที่สามารถนำไปใช้ได้จริงในทางปฏิบัติกับอินเวอร์เตอร์ทั่วไป โดยไม่มีข้อจำกัดในเรื่องความถี่การสวิตช์หรือวิธีการมอดูเลต
2. เกิดความเข้าใจในเรื่องการแก้ปัญหาแรงดันโหมดร่วมด้านออกของอินเวอร์เตอร์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม ที่ช่วยให้สามารถลดขนาดหม้อแปลงลงได้ถึง 1/10 เท่า โดยอาศัยแนวคิดการแยกแยะและ

เลือกชุดเซยแรงดันโหมดรว่มเฉพาะองค์ประกอบที่ย่านความถี่สูง ทำให้งจรกรองมีขนาดเล็กและนำไปติดตั้งร่วมกับอินเวอร์เตอร์ทั่วไปได้ง่ายขึ้น

3. เกิดความเข้าใจในปรากฏการณ์การอัดประจุสไฟตรงจากกระแสโหมดรว่ม ทำให้เข้าใจถึงแนวทางในการแก้ปัญหาแรงดันเกินที่สไฟตรงในอินเวอร์เตอร์ที่เกิดขึ้นจริงในอุตสาหกรรมได้

1.7 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาเกี่ยวกับลักษณะสมบัติของแรงดันโหมดรว่มในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม รวมทั้งศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบจากแรงดันดังกล่าวและวิธีการแก้ไขด้วยวงจรกรองแบบต่าง ๆ
2. วิเคราะห์ปรากฏการณ์การอัดประจุสไฟตรงจากกระแสโหมดรว่ม และหาแนวทางการแก้ไข
3. ศึกษาแนวทางการแก้ปัญหาที่เป็นผลกระทบจากแรงดันโหมดรว่มด้วยวงจรกรองแบบไฮบริด
4. จำลองการทำงานของวงจรกรองด้านออกแบบไฮบริดชนิดใหม่เพื่อทดสอบแนวคิด
5. วิเคราะห์ออกแบบและสร้างวงจรกรองด้านออกแบบไฮบริดชนิดใหม่
6. ทดสอบสมรรถนะของวงจรกรองไฮบริดในการลดทอนแรงดันโหมดรว่มและการแก้ปัญหาที่เกิดจากแรงดันโหมดรว่ม
7. เก็บข้อมูล ประเมินผล และสรุปผล
8. เขียนวิทยานิพนธ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

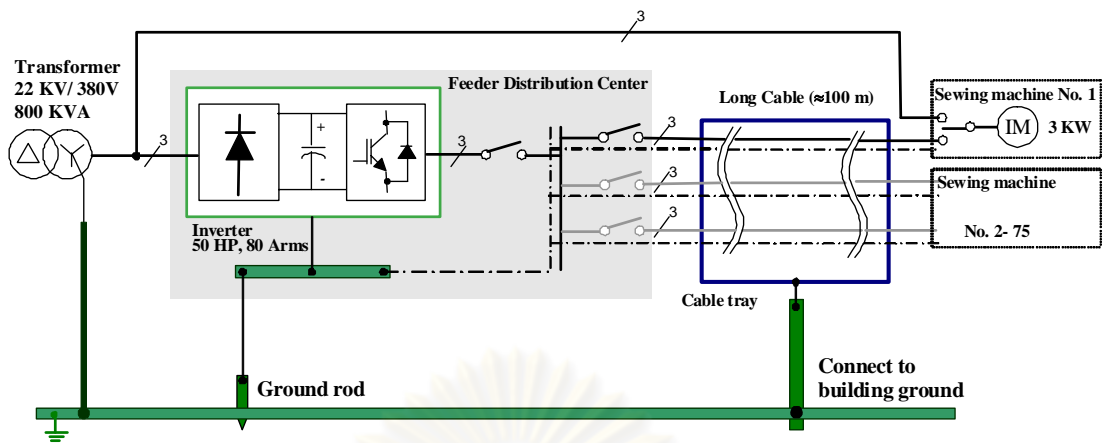
ปัญหาปรากฏการณ์การอัดประจุบัสไฟตรงโดยกระแสไหลร่วม

ในบรรดาปัญหาผลเสียหายที่เกิดกับอินเวอร์เตอร์ในอุตสาหกรรมซึ่งเกิดจากแรงดันไหลร่วม ปรากฏการณ์การอัดประจุบัสไฟตรงโดยกระแสไหลร่วมถือได้ว่าเป็นปัญหาใหม่ที่ไม่รวมอยู่ในกลุ่มปัญหาที่ได้กล่าวรายละเอียดไว้ในบทที่ 1 ปรากฏการณ์การอัดประจุบัสไฟตรงโดยกระแสไหลร่วมเกิดขึ้นได้เมื่อมีการใช้อินเวอร์เตอร์ในสภาวะไร้โหลดหรือโหลดเบาโดยที่ตัวเก็บประจุแอบแฝงทางด้านออกมีค่าสูงมาก เช่นในกรณีที่สายเคเบิลของมอเตอร์มีความยาวมาก ปรากฏการณ์นี้ถึงแม้ว่าจะเกิดขึ้นในกรณีที่สายเคเบิลของมอเตอร์มีความยาวมากเหมือนกันแต่ก็เป็นคนละปัญหากับการเกิดแรงดันเกินที่ขั้วมอเตอร์ซึ่งเป็นปัญหาที่รู้จักกันดี [18], [19],[31],[32] เพราะนอกจากจะเป็นปัญหาแรงดันเกินที่เกิดขึ้นคนละจุดแล้ว ปัญหาทั้ง 2 ยังมีกลไกการเกิดที่แตกต่างกันด้วย ในขณะที่ปัญหาการเกิดแรงดันเกินที่ขั้วมอเตอร์เป็นภาวะแรงดันเกินชั่วคราว (transient overvoltage) ที่เกิดขึ้นเมื่อแรงดันที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด แต่สำหรับปรากฏการณ์การอัดประจุบัสไฟตรงเป็นภาวะที่บัสไฟตรงเกิดการสะสมพลังงานจนทำให้มีระดับแรงดันเพิ่มสูงขึ้น และเนื่องจากปรากฏการณ์การอัดประจุบัสไฟตรงเกิดขึ้นในขณะที่อินเวอร์เตอร์ทำงานในสภาวะไร้โหลด ดังนั้นพลังงานที่เข้ามาสะสมที่บัสไฟตรงจนทำให้มีระดับแรงดันเพิ่มขึ้นนี้จึงไม่ได้มีที่มาจากเครื่องกำเนิดพลังงานโดยมอเตอร์ที่ทำงานในย่านคืนพลังงานขณะเบรกดังเช่นที่เกิดขึ้นโดยทั่วไป

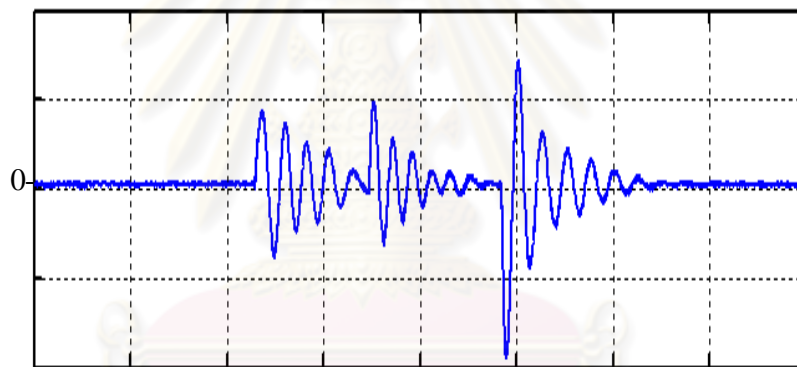
เนื่องจากปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้เป็นประเด็นใหม่ที่เกิดขึ้นจริงในงานอุตสาหกรรมแต่ทว่ายังขาดความเข้าใจเกี่ยวกับสาเหตุของปรากฏการณ์ ดังนั้นเป้าหมายอีกข้อหนึ่งของงานวิทยานิพนธ์นี้คือการศึกษาวิเคราะห์เพื่อให้เกิดความเข้าใจในกลไกการอัดประจุบัสไฟตรงซึ่งมีผลให้เกิดแรงดันเกินที่บัสไฟตรง และความเข้าใจต่อกลไกการเกิดปรากฏการณ์จะนำไปสู่แนวทางการแก้ไขปัญหาได้

2.1 ลักษณะการเกิดปรากฏการณ์การอัดประจุบัสไฟตรง

ปัญหาปรากฏการณ์การอัดประจุบัสไฟตรงเป็นกรณีศึกษาที่พบในอุตสาหกรรมสิ่งทอในประเทศ [10]-[11] ระบบขับเคลื่อนในโรงงานสิ่งทอนี้จะเป็นดังรูปที่ 2.1 กล่าวคือมีการใช้อินเวอร์เตอร์ 1 ตัวจ่ายไฟ 3 เฟส เพื่อควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำของเครื่องทอทั้งหมด 75 ตัว (มอเตอร์แต่ละตัวมีขนาดกำลัง 3 kW) โดยที่อินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่เป็นเสมือนแหล่งจ่ายแรงดันความถี่ 12 Hz มอเตอร์แต่ละตัวมีการทำงานใน 2 โหมดคือ 1) ช่วงเวลาที่เดินเครื่องทอ มอเตอร์จะรับไฟ 50 Hz จากแหล่งจ่ายโดยตรงไม่ผ่านอินเวอร์เตอร์ และ 2) ช่วงเวลาที่เปลี่ยนม้วนด้าย ซึ่งขณะเริ่มเดินเครื่องใหม่มอเตอร์จะเปลี่ยนมารับไฟจากอินเวอร์เตอร์ ซึ่งหลังจากกระบวนการเริ่มเดินเครื่องเสร็จสิ้นแล้วมอเตอร์ก็จะกลับไปต่อกับแหล่งจ่ายเพื่อรับไฟ 50 Hz ต่อไป เนื่องจากมอเตอร์ของเครื่องทอจะทำงานในโหมดเดินเครื่องเกือบตลอดเวลา และกระบวนการเริ่มเดินเครื่องใหม่เมื่อเปลี่ยนม้วนด้ายจะใช้เวลาเพียงช่วงสั้นๆ เท่านั้น ดังนั้นอินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมมอเตอร์จะทำงานในสภาวะไร้โหลดเป็นส่วนใหญ่ สำหรับการเดินสายเคเบิลของระบบนั้นพบว่า อินเวอร์เตอร์และมอเตอร์เหนี่ยวนำแต่ละตัวมีระยะห่างกันไม่น้อยกว่า 100 เมตร โดยสายเคเบิลที่ต่อกับมอเตอร์ทั้ง 75 ชุดจะวางสายรวมกันบนถาดรองสายเคเบิล (cable tray) เดียวกัน โดยที่ถาดรองสายเคเบิลจะติดอยู่กับโครงสร้างของอาคารเสมือนกับต่อลงกราวด์

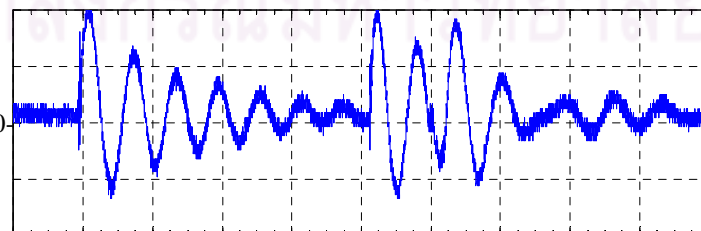


รูปที่ 2.1 ระบบขับเคลื่อนในโรงงานสิ่งทอซึ่งใช้อินเวอร์เตอร์ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดกันหลายชุด และมีสายเคเบิลด้านออกที่ยาว



100 A/div, Time: 50 μ s/div

รูปที่ 2.2 กระแสอัดประจวบระหว่างสายก่อนติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์

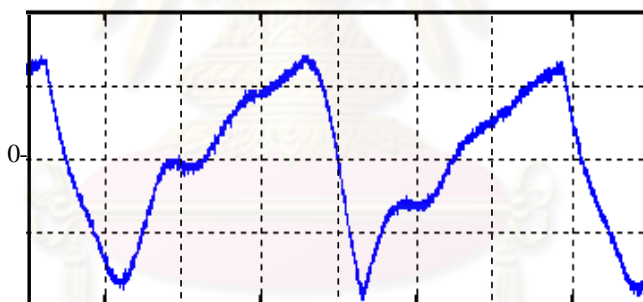


50 A/div, Time: 50 μ s/div

รูปที่ 2.3 กระแสรั่ว i_{cm} ในระบบขับเคลื่อนของโรงงานสิ่งทอ

จากลักษณะของระบบที่มีสายเคเบิลยาวมากกว่า 100 เมตรขนานกันหลายชุด วางรวมกันอยู่ บนอาคารเดียวกัน ค่าความจุแอมแปร์ระหว่างสายรวมทั้งค่าความจุแอมแปร์ระหว่างสายเคเบิลกับกราวด์จึงมีค่าสูงมาก และทำให้เกิดกระแสอัดประจุระหว่างสายเนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าแอมแปร์ระหว่างสายดังรูปที่ 2.2 ในขณะเดียวกันก็ทำให้เกิดกระแสรั่ว i_{cm} ซึ่งเป็นผลรวมของกระแสไหลรวมในแต่ละ $i_{c,o}$ ($i_{cm} = 3i_{o,c}$) ไหลลงกราวด์ค่าสูงดังรูปที่ 2.3

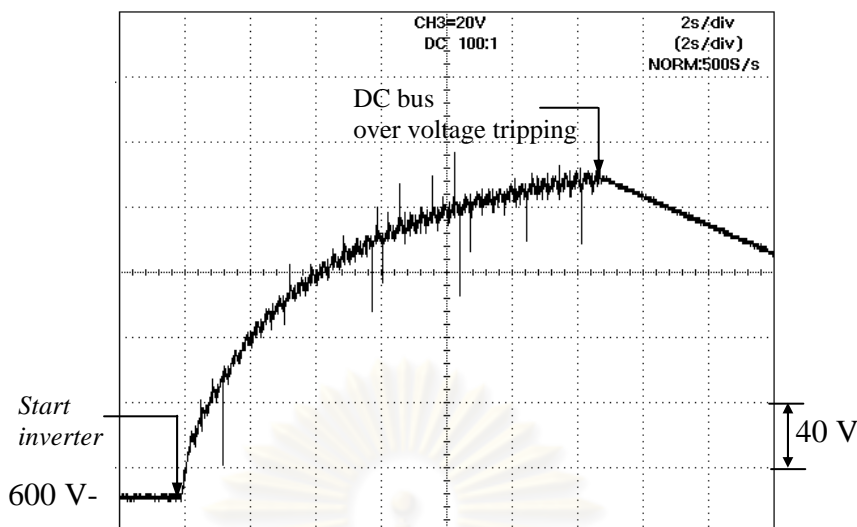
จากรูปที่ 2.2 กระแสอัดประจุระหว่างสายมีค่ายอดสูงถึง 200 Apeak ทำให้เกิดความเสียหายต่ออินเวอร์เตอร์ ในกรณีศึกษาที่มีการแก้ปัญหากระแสอัดประจุระหว่างสายด้วยการติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ชนิด 3 เฟส 3 สายที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ โดยมุ่งเน้นเฉพาะที่การลดทอนกระแสอัดประจุระหว่างสายเป็นหลักและโดยไม่ได้พิจารณาถึงการลดทอนกระแสรั่ว i_{cm} การติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC สามารถลดทอนกระแสอัดประจุได้เป็นอย่างดี คือลดลงจาก 200 Apeak เหลือเพียง 20 Apeak ดังแสดงในรูปที่ 2.4 อย่างไรก็ตามถึงแม้จะสามารถป้องกันความเสียหายของอินเวอร์เตอร์จากกระแสอัดประจุระหว่างสายได้ แต่ก็ทำให้เกิดปรากฏการณ์การอัดประจุสไฟตรงในขณะที่ยินเวอร์เตอร์เดินเครื่องตัวเปล่าโดยไม่ได้ต่อกับมอเตอร์ดังรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าแรงดันที่บัสไฟตรงซึ่งมีระดับปกติอยู่ที่ 600 V จะเพิ่มขึ้นเมื่ออินเวอร์เตอร์เริ่มเดินเครื่อง จนในที่สุดจะมีค่าสูงถึง 800 V ก่อนที่ยินเวอร์เตอร์จะตัดการทำงานเพื่อป้องกันความเสียหาย



10 A/div, Time: 50 μ s/div

รูปที่ 2.4 กระแสอัดประจุระหว่างสายหลังติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์

ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาการอัดประจุสไฟตรงและการตัดการทำงานของอินเวอร์เตอร์เมื่อเกิดแรงดันเกินที่บัสไฟตรง

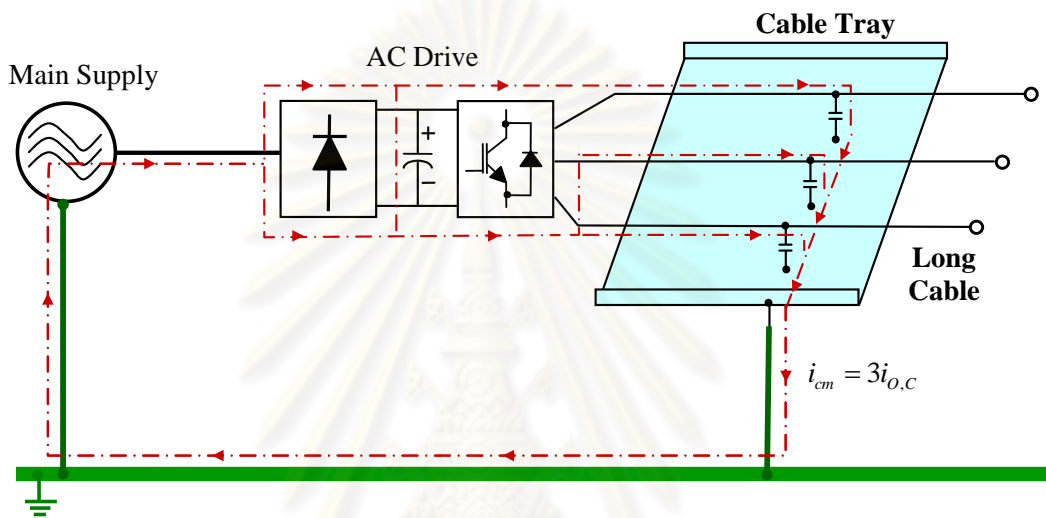
จากลักษณะของระบบที่เป็นกรณีศึกษาสามารถสรุปได้ว่าปรากฏการณ์การอัดประจุสไฟตรงมีโอกาสที่จะเกิดขึ้นกับระบบที่มีสายเคเบิลที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ยาวมาก และมีการใช้งานอินเวอร์เตอร์ในสภาวะไร้โหลดหรือโหลดเบา รวมถึงการติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ก็เป็นองค์ประกอบหนึ่งซึ่งส่งผลต่อการเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้

การศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้จะแสดงให้เห็นว่า ปรากฏการณ์การอัดประจุสไฟตรงนี้เป็นประเด็นใหม่ที่มีกระแสหรือกระแสไหลย้อนกลับที่เกิดจากแรงดันโหมตรงด้านออกของอินเวอร์เตอร์เป็นสาเหตุหลัก โดยมีปัจจัยที่สำคัญ 3 ประการคือ 1) ระบบที่มีสายเคเบิลด้านออกยาวมากจะทำให้เกิดกระแสไหลย้อนกลับค่าสูงกว่ากรณีที่มีสายเคเบิลสั้น 2) การใช้งานอินเวอร์เตอร์ในสภาวะไร้โหลดมีบทบาทสำคัญต่อการกำหนดทิศทางของกระแสไหลย้อนกลับซึ่งทำให้เกิดกลไกการอัดประจุสไฟตรง และ 3) ปริมาณพลังงานที่ดึงออกจากบัสไฟตรง ที่มีค่าน้อยในสภาวะไร้โหลด รวมทั้งการติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ยังเป็นปัจจัยเสริมที่ทำให้พลังงานที่ดึงออกจากบัสไฟตรงมีค่าน้อยลงอีก

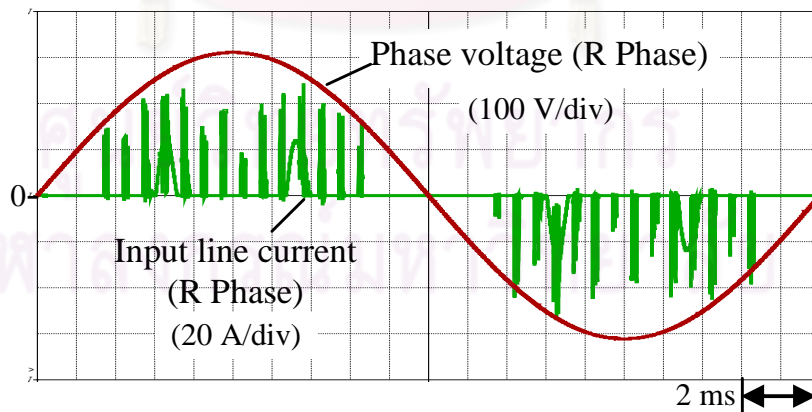
ในการศึกษาและวิเคราะห์ถึงกลไกของปรากฏการณ์การอัดประจุสไฟตรงที่เกิดจากกระแสไหลย้อนกลับนั้นจะต้องพิจารณาการนำกระแสของไดโอดในวงจรเรียงกระแสที่ด้านเข้าพร้อมๆ กับการนำกระแสของสวิตช์กำลังของอินเวอร์เตอร์ที่ด้านออก บทความวิจัยในอดีตโดยส่วนใหญ่ยังไม่มีการพิจารณาถึงการไหลของกระแสไหลย้อนกลับในลักษณะดังกล่าว จึงไม่สามารถวิเคราะห์สาเหตุของปัญหานี้ได้ และถึงแม้ว่า Shen [35] จะศึกษาการไหลของกระแสไหลย้อนกลับในวงจรเรียงกระแส 3 เฟสสำหรับแหล่งจ่ายไฟตรงแบบสวิตช์ แต่ก็ยังเป็นเพียงการวิเคราะห์ที่เกี่ยวข้องกับวงจรเรียงกระแสเท่านั้น ทำให้ไม่สามารถประยุกต์ใช้ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวอธิบายกลไกการอัดประจุสไฟตรงโดยกระแสไหลย้อนกลับกับระบบอินเวอร์เตอร์แบบพีดับเบิลยูเอ็มที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ได้

2.2 การไหลของกระแสโหมตร่วมในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์

ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์แบบที่ดัดเบิกลูเอ็มเมื่อมีสายเคเบิลที่ด้านออกยาวมากจะมีความจุไฟฟ้าแบบแฝงทางด้านออกค่าสูง เมื่อค่าความจุไฟฟ้าแบบแฝงนี้ถูกกระตุ้นจากแรงดันโหมตร่วมความถี่สูงจึงทำให้เกิดกระแสโหมตร่วม $i_{c,o}$ ไหลลงกราวด์ในรูปแบบของกระแสรั่ว $i_{cm} = 3i_{o,c}$ ดังรูปที่ 2.6 วงรอบการไหลของกระแสโหมตร่วมจะไหลออกจากอินเวอร์เตอร์ที่ด้านออกและไหลลงสู่กราวด์ของระบบย้อนกลับไปที่สายกำลัง และไหลกลับเข้าบัสไฟตรงผ่านไดโอดของวงจรเรียงกระแสที่ด้านเข้า

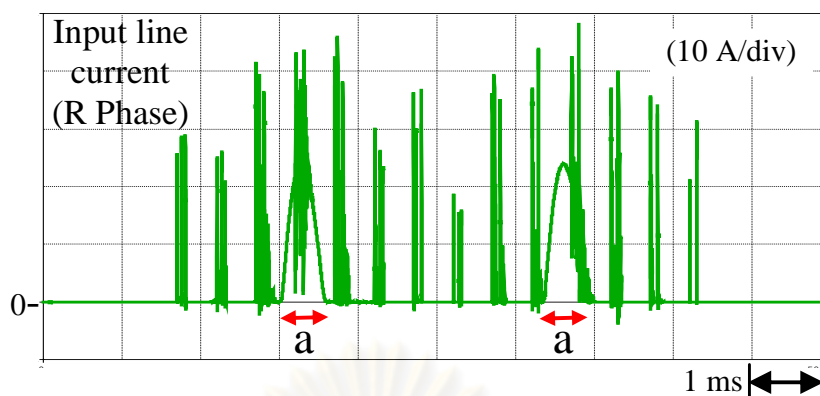


รูปที่ 2.6 วงรอบการไหลของกระแสโหมตร่วมในระบบขับเคลื่อนที่มีสายเคเบิลยาว



ก) สัญญาณกระแสในสายเปรียบเทียบกับแรงดันเฟส

รูปที่ 2.7 การนำกระแสของวงจรไดโอดเรียงกระแสส่วนหน้า



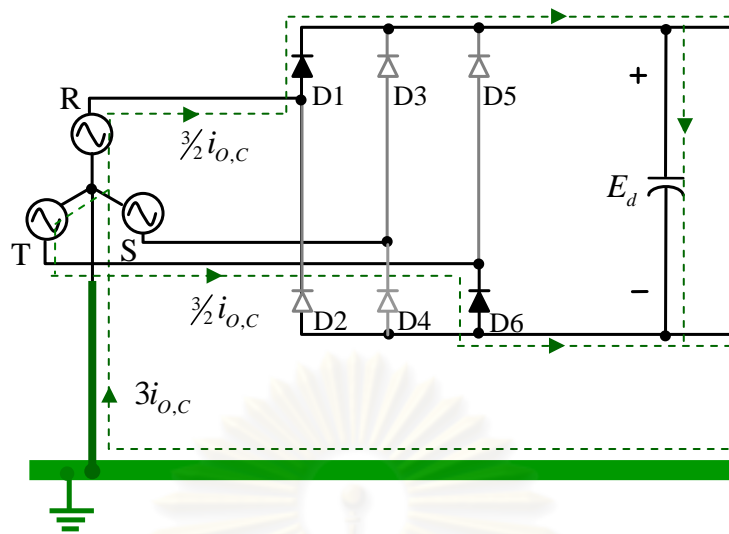
ข) รูปขยายของกระแสในสาย

รูปที่ 2.7 (ต่อ) การนำกระแสของวงจรไดโอดเรียงกระแสส่วนหน้า

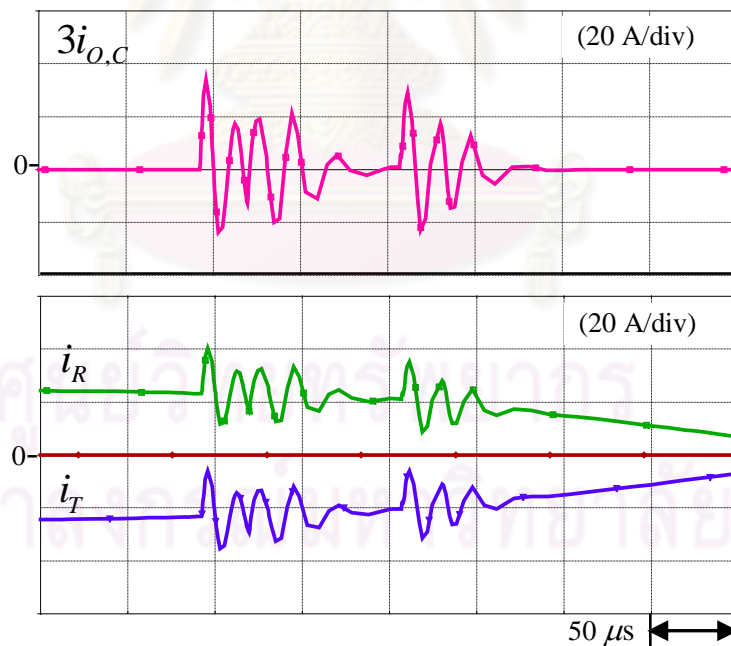
กระแสไหลรวมที่ไหลผ่านวงจรอินเวอร์เตอร์ด้านหลังและวงจรเรียงกระแสด้านหน้าจะมีทิศทางการไหลขึ้นอยู่กับรูปแบบการสวิตช์ (หรือฟังก์ชันการสวิตช์) ของวงจรอินเวอร์เตอร์และวงจรเรียงกระแส กระแสไหลรวมจะแบ่งไหลในสายเคเบิลแต่ละเฟสเท่าๆ กัน ผ่านสวิตช์กำลังของอินเวอร์เตอร์ที่ขณะนั้นกำลังนำกระแสตามฟังก์ชันการสวิตช์ จากนั้นกระแสไหลรวมที่ด้านออกทั้ง 3 เฟสจะไหลรวมกันลงสู่กราวด์ และเมื่อกระแสไหลรวมไหลกลับขึ้นจากกราวด์ผ่านแหล่งจ่ายไฟ 3 เฟสเข้าสู่วงจรเรียงกระแสด้านหน้าจะทำให้ไดโอดของวงจรเรียงกระแส นำกระแสได้ทั้งในช่วงที่ไดโอดนำกระแสและไม่นำกระแสตามภาวะการทำงานปกติของวงจรเรียงกระแส ดังรูปที่ 2.7 (สัญลักษณ์ "a" แทนช่วงเวลาที่ได้โอดนำกระแสและไม่นำกระแสจะแตกต่างกัน ดังนั้นจะต้องพิจารณาทั้ง 2 กรณีแยกกันดังนี้

2.2.1 การไหลของกระแสไหลรวมเมื่อวงจรเรียงกระแสทำงานในย่านนำกระแส

พิจารณาจากรูปที่ 2.7 ในช่วงเวลา "a" จะเห็นได้ว่าในกรณีนี้กระแสที่ไหลผ่านวงจรเรียงกระแสจะมี 2 ส่วนรวมกันได้แก่ 1) กระแสความถี่ต่ำ 50 Hz ซึ่งเป็นกระแสอัดประจุสไฟตรงจากแหล่งจ่าย 3 เฟสเมื่อแรงดันแหล่งมีค่ามากกว่าแรงดันบัสไฟตรง และ 2) กระแสความถี่สูงซึ่งเป็นกระแสไหลรวมที่ไหลย้อนกลับเข้ามายังอินเวอร์เตอร์จากทางด้านแหล่งจ่าย กระแสความถี่ต่ำ 50 Hz จะไหลผ่านไดโอดตัวบนที่ต่ออยู่กับเฟสที่แรงดันมีค่าสูงสุดและไดโอดตัวล่างที่ต่ออยู่กับเฟสที่แรงดันมีค่าต่ำสุดนำกระแส ดังนั้นกระแสไหลรวมความถี่สูงจึงสามารถไหลผ่านไดโอดทั้งสองตัวที่นำกระแสอยู่แล้วได้ โดยแบ่งไหลในเฟสที่ไดโอดนำกระแสอยู่ในปริมาณเท่าๆ กันและมีทิศทางเดียวกัน ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีที่ $e_r < e_s < e_t$ ทิศทางการไหลของกระแสไหลรวมเป็นดังรูปที่ 2.8 ในกรณีนี้กระแสไหลรวมจะแบ่งไหลผ่านไดโอด D1 และ D6 ของเฟส R และ T ในทิศทางเดียวกันและมีปริมาณเท่าๆ กัน จากผลการจำลองสัญญาณกระแสในรูปที่ 2.9 จะเห็นว่าถึงแม้ว่ากระแสไหลรวมที่ไหลผ่านไดโอดของวงจรเรียงกระแสในบางช่วงเวลามีทิศทางย้อนกลับ (reverse) แต่จะไม่มีผลทำให้ไดโอดหยุดนำกระแส เนื่องจากกระแสโดยรวมที่ผ่านไดโอดซึ่งมีทั้งกระแสไหลรวมและกระแสความถี่ต่ำ 50 Hz ยังคงมีทิศทางไปหน้า (forward) ทำให้ไดโอดยังคงนำกระแสอยู่ได้



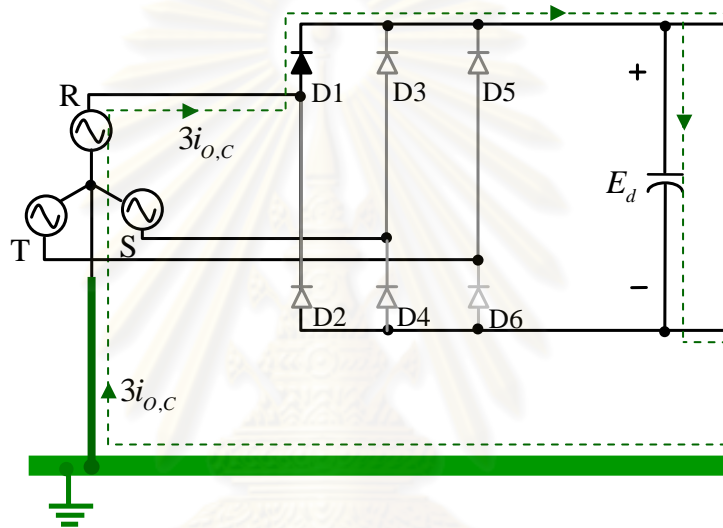
รูปที่ 2.8 ตัวอย่างการไหลของกระแสไหลรวม $i_{o,c}$ ในช่วงที่ไดโอดนำกระแสตามภาวะการทำงานปกติของวงจรเรียงกระแส ($e_R > e_S > e_T$)



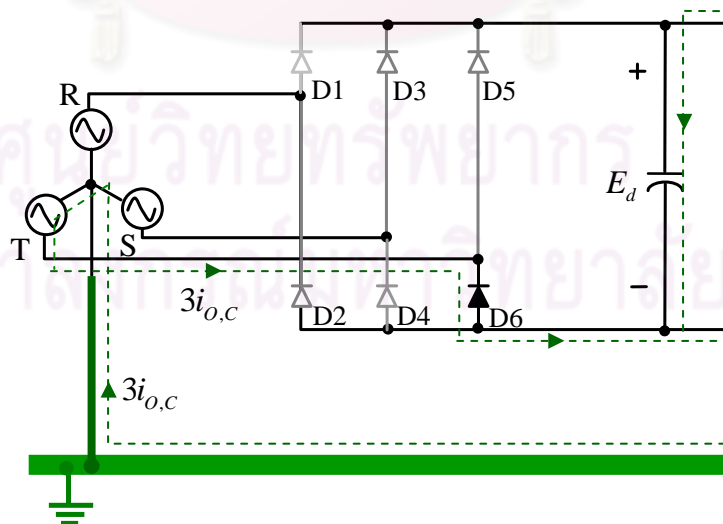
รูปที่ 2.9 ผลการจำลองกระแสไหลรวมที่ไหลลงกราวด์ $3i_{o,c}$ และกระแสเฟส i_R, i_T ในช่วงที่ไดโอดนำกระแสตามภาวะการทำงานปกติของวงจรเรียงกระแส ($e_R > e_S > e_T$)

2.2.2 การไหลของกระแสไหลตรงเมื่อวงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส

จากรูปที่ 2.7 ในช่วงเวลานี้จะมีเพียงกระแสไหลตรงความถี่สูงเท่านั้นที่ไหล จะไม่มีการดึงกระแสจากแหล่งจ่าย เนื่องจากแรงดันแหล่งจ่ายมีค่าน้อยกว่าแรงดันบัลไฟตรง กระแสไหลตรงสามารถทำให้เกิดการนำกระแสของวงจรเรียงกระแสได้ดังอธิบายต่อไปนี้ จากกรณีที่ไดโอดในแต่ละเฟสได้รับแรงดันจากแหล่งจ่ายเฟส R, S และ T ตามลำดับ การนำกระแสของไดโอดเพื่อให้กระแสไหลตรงผ่านได้จึงเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะคือ ในกรณี $i_{o,c} > 0$ ไดโอดตัวบนในเฟสที่แรงดันสายกำลังมีค่าสูงสุดจะนำกระแสดังตัวอย่างในรูปที่ 2.10 ก) ที่กระแสไหลตรงซึ่งมีค่าเป็นบวกไหลผ่านไดโอด D1 และในทางกลับกัน ในกรณี $i_{o,c} < 0$ ไดโอดตัวล่างในเฟสที่แรงดันมีค่าต่ำสุดจะนำกระแสแทน ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.10 ข)

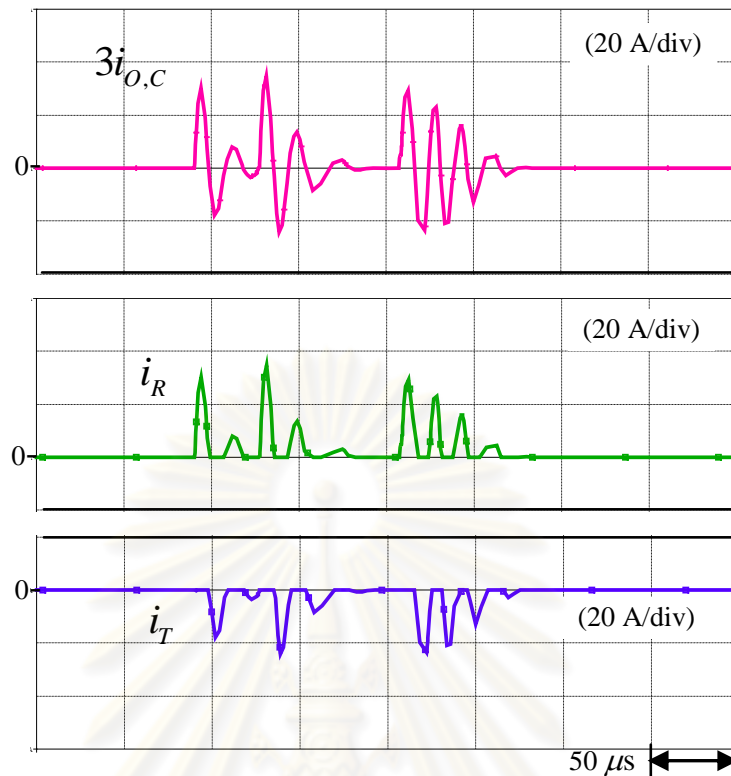


ก) เมื่อ $i_{o,c} > 0$



ข) เมื่อ $i_{o,c} < 0$

รูปที่ 2.10 ตัวอย่างการไหลของกระแสไหลตรง $i_{o,c}$ ในช่วงที่ไดโอดไม่นำกระแสตามภาวะการทำงานปกติของวงจรเรียงกระแส ($e_R > e_S > e_T$)



รูปที่ 2.11 ผลการจำลองกระแสไหลรวมที่ไหลลงกราวด์ $3i_{o,c}$ และกระแสเฟส i_R, i_T ในช่วงที่ไดโอดไม่นำกระแส ($e_R > e_S > e_T$)

จากผลการจำลองในรูปที่ 2.11 ทิศทางการไหลของกระแสไหลรวมจะไหลสลับไปมาระหว่างเฟส R และ T ซึ่งเป็นเฟสที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุดในขณะนั้นตามเครื่องหมายของกระแสไหลรวม โดยเมื่อกระแสไหลรวมมีค่าบวกก็จะไหลผ่านเฟส R และเมื่อกระแสไหลรวมมีค่าลบก็จะไหลผ่านเฟส T แทน

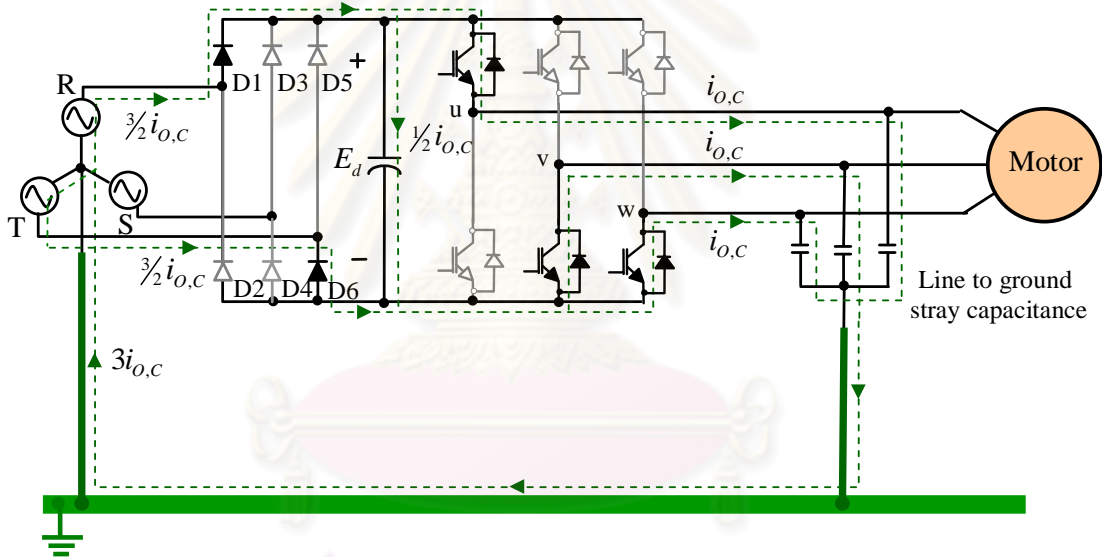
2.3 กลไกการอัดประจุสไฟตรงโดยกระแสไหลรวม

การอัดประจุสไฟตรงจากกระแสไหลรวมเกิดขึ้นเมื่อมีกระแสไหลรวมส่วนหนึ่งไหลผ่านตัวเก็บประจุที่สไฟตรง ปริมาณของกระแสไหลรวมที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุที่สไฟตรง ณ ขณะหนึ่ง จะขึ้นกับลักษณะการนำกระแสของทั้งไดโอดเรียงกระแสและสวิตช์กำลังของวงจรอินเวอร์เตอร์ เพราะเป็นตัวกำหนดกระแสที่ไหลเข้าและออกจากสไฟตรง เนื่องจากพฤติกรรมของวงจรเรียงกระแสจะแตกต่างกันตามย่านการนำกระแส ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้ จึงจำเป็นต้องแยกพิจารณากระแสไหลรวมที่สไฟตรงตามย่านการนำกระแสของวงจรเรียงกระแสเป็น 2 กรณีดังนี้

2.3.1 กระแสไหลรวมที่ไหลผ่านสไฟตรงเมื่อวงจรเรียงกระแสทำงานในย่านนำกระแส

ในการพิจารณากระแสไหลรวมที่ไหลผ่านสไฟตรง เราจะนิยามให้กระแสที่ไหลมาจากวงจรเรียงกระแสด้านหน้าเป็นกระแสเข้าสไฟตรง และให้กระแสที่ไหลไปยังวงจรอินเวอร์เตอร์เป็นกระแสออก

จากบัสไฟตรง เมื่อวงจรเรียงกระแสทำงานในย่านนำกระแสไดโอดจะนำกระแสพร้อมกันสองเฟส ทำให้กระแสไหลรวม $3i_{o,c}$ แบ่งไหลเข้าที่ขั้วบวกและลบของตัวเก็บประจุที่บัสไฟตรงเท่าๆ กัน โดยมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{2}i_{o,c}$ ในขณะเดียวกันที่ด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ กระแสไหลรวมก็จะแบ่งไหลไปที่เฟส u, v และ w เท่าๆ กันคือ $i_{o,c}$ แต่กระแสที่ออกจากขั้วบวกและลบของบัสไฟตรงจะไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับสถานะการสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ในขณะนั้น ดังเช่นตัวอย่างในรูปที่ 2.12 ที่มีสถานะการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์เป็น 100 (สัญลักษณ์ "1" หมายถึง การนำกระแสของสวิตช์ตัวบน และ "0" หมายถึงการนำกระแสของสวิตช์ตัวล่าง) จากรูปที่ 2.12 เฟส u จะต่ออยู่กับขั้วบวกของบัสไฟตรง ส่วนเฟส v และ w จะต่ออยู่กับขั้วลบของบัสไฟตรง ดังนั้นกระแสไหลรวมที่ไหลออกจากขั้วบวกและลบของบัสไฟตรงจึงเท่ากับ $i_{o,c}$ และ $2i_{o,c}$ ตามลำดับ จากข้อมูลของกระแสไหลรวมที่ไหลเข้าและออกจากบัสไฟตรง จะสามารถคำนวณปริมาณกระแสไหลรวมที่อัดประจุที่บัสไฟตรงได้เท่ากับ $\frac{1}{2}i_{o,c}$



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างวงรอบการไหลของกระแสไหลรวมเมื่อวงจรเรียงกระแสทำงานในย่านนำกระแส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

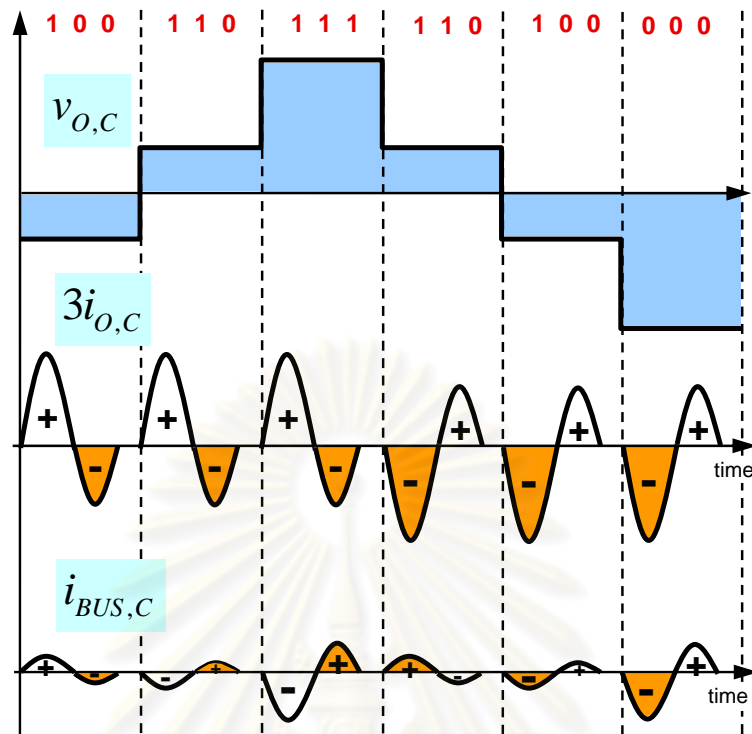
ตารางที่ 2.1 แสดงปริมาณกระแสไหลรวมที่อัดประจุที่บัสไฟตรงในย่านนำกระแสของวงจรเรียงกระแส ตามสถานะการสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ในหนึ่งคาบการสวิตช์ โดยแสดงเฉพาะกรณีการสร้างเวกเตอร์แรงดันในเซกเตอร์ที่ 1 เมื่อพิจารณากระแสอัดประจุบัสไฟตรงในหนึ่งคาบการสวิตช์ดังรูปที่ 2.13 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการกระตุ้นจากการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไหลรวมแบบขั้นบันไดก็จะเกิดกระแสไหลรวมความถี่สูงขึ้น ในที่นี้เราจะพิจารณาให้กระแสไหลรวมที่เกิดในแต่ละครั้งของการสวิตช์มีขนาดเท่ากัน กระแสดังกล่าวนี้เมื่อไหลผ่านบัสไฟตรงก็จะส่งผลให้มีกระแสอัดประจุที่บัสไฟตรงดังรูปสัญญาณด้านล่างสุด ขนาดของกระแสอัดประจุที่บัสไฟตรงจะขึ้นอยู่กับสถานะการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ตามตารางที่ 2.1 ในย่านนำกระแสนี้ค่าเฉลี่ยของกระแสอัดประจุที่บัสไฟตรงมีค่าน้อยกว่าศูนย์ แสดงว่าไม่เกิดการอัดประจุที่บัสไฟตรงเนื่องจากกระแสไหลรวม

แต่กลับเป็นไปในทางตรงกันข้ามคือ มีการดึงพลังงานออกจากบัสไฟตรง ดังนั้นกรณีนี้จึงไม่ทำให้เกิดปรากฏการณ์การอัดประจุบัสไฟตรงจนเกิดแรงดันเกินได้ สรุปได้ว่าภายใต้เงื่อนไขที่วงจรรีจกกระแสของอินเวอร์เตอร์ทำงานในย่านนำกระแสตลอดเวลา เช่นมีการจ่ายกระแสไหลดค่าสูง จะไม่เกิดการอัดประจุบัสไฟตรงโดยกระแสไหลดรวม บัสไฟตรงจะรักษาระดับแรงดันไว้ที่ระดับสมดุลพลังงานระหว่างแหล่งจ่ายด้านหน้าและโหลดที่ด้านออก

ตารางที่ 2.1 ลักษณะการอัดประจุบัสไฟตรงโดยกระแสไหลดรวมเมื่อวงจรรีจกกระแสทำงานในย่านนำกระแส (สำหรับเซกเตอร์แรงดันที่ 1)

สถานะการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์	กระแสไหลดรวมที่อัดประจุบัสไฟตรง	สถานะการอัดประจุบัสไฟตรง	กำลังไฟฟ้าที่บัสไฟตรง
$i_{o,c} > 0$			
0 0 0	$\frac{3}{2} i_{o,c} $	Charge	$\frac{3}{2} i_{o,c} \cdot v_d$
1 0 0	$\frac{1}{2} i_{o,c} $	Charge	$\frac{1}{2} i_{o,c} \cdot v_d$
1 1 0	$-\frac{1}{2} i_{o,c} $	Discharge	$-\frac{1}{2} i_{o,c} \cdot v_d$
1 1 1	$-\frac{3}{2} i_{o,c} $	Discharge	$-\frac{3}{2} i_{o,c} \cdot v_d$
$i_{o,c} < 0$			
1 1 1	$\frac{3}{2} i_{o,c} $	Charge	$\frac{3}{2} i_{o,c} \cdot v_d$
1 1 0	$\frac{1}{2} i_{o,c} $	Charge	$\frac{1}{2} i_{o,c} \cdot v_d$
1 0 0	$-\frac{1}{2} i_{o,c} $	Discharge	$-\frac{1}{2} i_{o,c} \cdot v_d$
0 0 0	$\frac{3}{2} i_{o,c} $	Charge	$\frac{3}{2} i_{o,c} \cdot v_d$

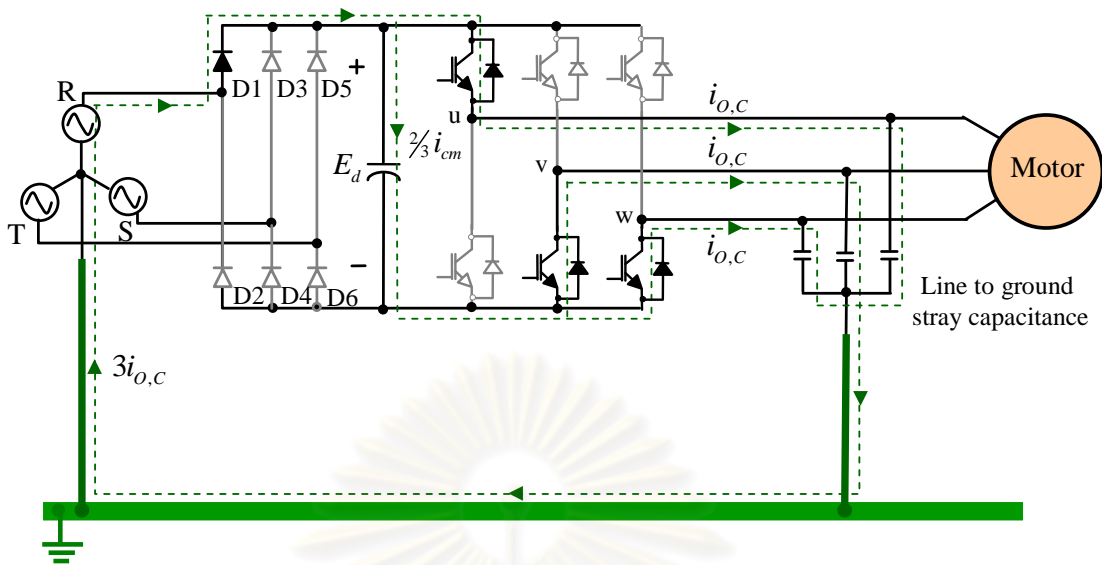
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.13 รูปภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันโหมดร่วม $v_{o,c}$, กระแสโหมดร่วม $3i_{o,c}$ และกระแสโหมดร่วมที่อัดประจุบัสไฟตรง $i_{BUS,c}$ ในย่านนำกระแสของวงจรเรียงกระแส

2.3.2 กระแสโหมดร่วมที่ไหลผ่านบัสไฟตรงเมื่อวงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส

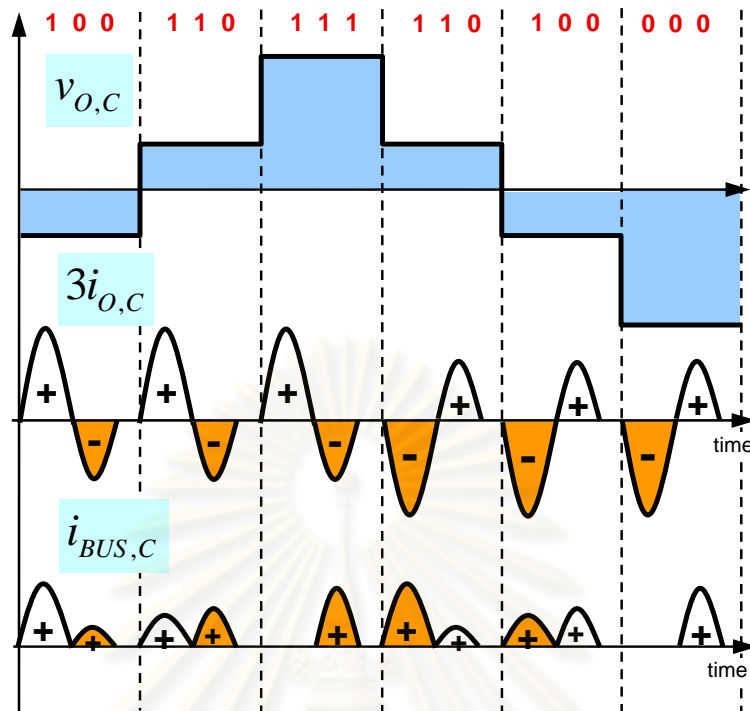
เมื่อวงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส กระแสโหมดร่วมจะทำให้ไดโอดเฟสใดเฟสหนึ่งนำกระแสตามเครื่องหมายของกระแสโหมดร่วมดังได้อธิบายในหัวข้อ 2.2.2 กระแสโหมดร่วม $3i_{o,c}$ จึงไหลเข้าขั้วบวกหรือลบของตัวเก็บประจุที่บัสไฟตรงสลับกันตามจังหวะการแกว่งของกระแสโหมดร่วม รูปที่ 2.14 แสดงตัวอย่างเมื่อ $i_{o,c} > 0$ และสถานะการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์เป็น "100" กระแสโหมดร่วม $3i_{o,c}$ จะไหลเข้าบัสไฟตรงผ่านไดโอด D1 และแยกไหลผ่านวงจรอินเวอร์เตอร์และตัวเก็บประจุเท่ากับ $i_{o,c}$ และ $2i_{o,c}$ ตามลำดับ ดังนั้นปริมาณกระแสโหมดร่วมที่อัดประจุบัสไฟตรงจะมีค่าเท่ากับ $2i_{o,c}$ สำหรับที่สถานะการสวิตช์อื่น ๆ ของอินเวอร์เตอร์ ปริมาณกระแสโหมดร่วมที่ชาร์จประจุที่บัสไฟตรงในย่านไม่นำกระแสสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.14 ตัวอย่างวงรอบการไหลของกระแสไหลร่วมเมื่อวงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส ($i_{o,c} > 0$)

ตารางที่ 2.2 การอัดประจุบัสไฟตรงโดยกระแสไหลร่วมเมื่อวงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส (สำหรับเซกเตอร์แรงดันที่ 1)

สถานะการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์	กระแสไหลร่วมที่อัดประจุบัสไฟตรง	สถานะการอัดประจุบัสไฟตรง	กำลังไฟฟ้าที่บัสไฟตรง
$i_{o,c} > 0$			
0 0 0	$3 i_{o,c} $	Charge	$3 i_{o,c} \cdot v_d$
1 0 0	$3 i_{o,c} $	Charge	$3 i_{o,c} \cdot v_d$
1 1 0	$ i_{o,c} $	Charge	$ i_{o,c} \cdot v_d$
1 1 1	0	-	0
$i_{o,c} < 0$			
1 1 1	$3 i_{o,c} $	Charge	$3 i_{o,c} \cdot v_d$
1 1 0	$2 i_{o,c} $	Charge	$2 i_{o,c} \cdot v_d$
1 0 0	$ i_{o,c} $	Charge	$ i_{o,c} \cdot v_d$
0 0 0	0	-	0



รูปที่ 2.15 รูปภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันโหมดร่วม $v_{o,c}$, กระแสโหมดร่วม $3i_{o,c}$ และกระแสโหมดร่วมที่อัดประจุสไฟตรง $i_{BUS,C}$ ในย่านไม่นำกระแสของวงจรเรียงกระแส

เมื่อพิจารณากระแสอัดประจุสไฟตรงในหนึ่งคาบการสวิตช์ดังรูปที่ 2.15 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า กระแสโหมดร่วมที่ไหลผ่าน การทำงานของไดโอดจะเรียงกระแสโหมดร่วมให้กลายเป็นกระแสตรง ดังนั้นกระแสโหมดร่วมที่อัดประจุสไฟตรงจึงมีค่าเป็นบวกในทุกๆ สถานะการสวิตช์ รวมถึงมีค่าเฉลี่ยในหนึ่งคาบการสวิตช์เป็นบวกด้วย แสดงว่าในช่วงเวลาที่วงจรเรียงกระแสทำงานอยู่ในย่านไม่นำกระแส กระแสโหมดร่วมสามารถดึงพลังงานจากแหล่งจ่ายเข้ามาสะสมที่บัสไฟตรงได้ ทำให้เกิดการอัดประจุที่บัสไฟตรงโดยกระแสโหมดร่วมอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นเมื่อวงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส จะทำให้เกิดกลไกการอัดประจุสไฟตรงขึ้น อย่างไรก็ตามระดับแรงดันบัสไฟตรงจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากระดับปกติหรือไม่ขึ้นอยู่กับการที่พลังงานที่เข้ามาสะสมที่บัสไฟตรงจะมีค่ามากกว่ากำลังสูญเสียหรือพลังงานที่ดึงออกจากบัสไฟตรงหรือไม่

โดยสรุปแล้วจากการวิเคราะห์การไหลของกระแสโหมดร่วมเมื่อผ่านวงจรเรียงกระแสด้านหน้าควบคู่ไปกับวงจรอินเวอร์เตอร์ด้านหลัง ทำให้พบว่ากระแสโหมดร่วมสามารถส่งผ่านพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟ 3 เฟสไปยังบัสไฟตรงได้ จึงเป็นที่มาของปรากฏการณ์การอัดประจุสไฟตรงในระบบขับเคลื่อนที่มีกระแสโหมดร่วมค่าสูงมาก เช่นเมื่อระบบมีสายเคเบิลที่ด้านออกยาวมาก นอกจากนี้การวิเคราะห์กลไกการอัดประจุสไฟตรงยังสามารถนำไปใช้อธิบายความเชื่อมโยงกันระหว่างการทำงานในสภาวะไร้โหลดหรือโหลดเบาของอินเวอร์เตอร์แบบพีดีบีแอลยูเอ็มกับปรากฏการณ์การอัดประจุสไฟตรงจนเกิดแรงดันเกินได้ กล่าวคือเมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานในสภาวะไร้โหลดหรือโหลดเบาก็จะส่งผลให้วงจรเรียงกระแสของอินเวอร์เตอร์มีช่วงเวลาการ

ทำงานโดยส่วนใหญ่อยู่ในย่านไม่นำกระแสที่ทำให้เกิดการอัดประจุประจุสไฟตรง และยิ่งไปกว่านั้นการที่ไม่มีการดึงพลังงานออกจากบัสไฟตรงเนื่องจากโหลดก็ยิ่งช่วยเสริมให้เกิดการสะสมพลังงานที่บัสไฟตรงมากขึ้น จนทำให้บัสไฟตรงมีแรงดันสูงขึ้นจากระดับปกติและสามารถเห็นปรากฏการณ์ได้ชัดเจน นอกจากนี้การติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์เพื่อลดทอนกระแสอัดประจุระหว่างสายจะทำให้กำลังสูญเสียสายเคเบิลลดลง จึงลดพลังงานที่ดึงออกจากบัสไฟตรงได้ทำให้ปรากฏการณ์การอัดประจุสไฟตรงเกิดขึ้น

การวิเคราะห์การไหลของกระแสไหลรวมเมื่อไหลผ่านวงจรเรียงกระแสด้านหน้าและอินเวอร์เตอร์ด้านหลังควบคู่กัน แสดงให้เห็นว่ากระแสไหลรวมสามารถอัดประจุที่บัสไฟตรงได้ และทำให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับปรากฏการณ์มากขึ้น อย่างไรก็ตามยังมีประเด็นสำคัญอีกหลายประเด็นเกี่ยวกับพฤติกรรมของกระแสไหลรวมและปรากฏการณ์การอัดประจุสไฟตรงที่ต้องการการวิเคราะห์เชิงปริมาณ เช่น ความเชื่อมโยงระหว่างวงจรไหลรวมและโหมดผลต่างที่เป็นสาเหตุให้ กระแสไหลรวมความถี่สูงสามารถดึงพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟ 3 เฟสซึ่งมีความถี่ 50 Hz และถือเป็นองค์ประกอบในวงจรโหมดผลต่างได้

ดังนั้นเนื้อในบทต่อไปจะเสนอแนวคิดและการวิเคราะห์หาวงจรสมมูลที่แม่นยำของอินเวอร์เตอร์แบบพีดีบีเอ็มที่สามารถใช้อธิบายพฤติกรรมของกระแสไหลรวมที่ไหลเข้าอินเวอร์เตอร์ผ่านทางวงจรเรียงกระแสด้านเข้าได้อย่างถูกต้องและสามารถใช้วิเคราะห์หาเงื่อนไขการเกิดปรากฏการณ์การอัดประจุสไฟตรงได้ โดยจะแสดงให้เห็นถึงกลไกการแปลงโหมดของกระแสไหลรวมเมื่อผ่านวงจรเรียงกระแส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วงจรสมมูลใหม่คร่อมและโหมดผลต่างของอินเวอร์เตอร์ที่พิจารณาวงจรเรียงกระแส ด้านหน้าร่วมด้วย

งานวิจัยในอดีตโดยทั่วไปจะวิเคราะห์พฤติกรรมของแรงดันและกระแสใหม่คร่อมของอินเวอร์เตอร์เฉพาะในย่านความถี่สูง โดยใช้วงจรสมมูลใหม่คร่อม ซึ่งพิจารณาเพียงผลของการสวิตช์ของสวิตช์กำลังของวงจรอินเวอร์เตอร์เท่านั้น โดยละเลยผลการนำกระแสของไดโอดของวงจรเรียงกระแสด้านเข้า [2]-[4] เนื่องจากเกิดความเข้าใจคลาดเคลื่อนว่าการนำกระแสของไดโอดเรียงกระแสซึ่งมีคาบเวลาตามความถี่สายกำลัง 50 Hz จะไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมของระบบที่ความถี่สูง อย่างไรก็ตามจากการศึกษาทฤษฎีการอัดประจุที่บัลไฟตรงโดยกระแสใหม่คร่อมในบทที่ 2 ได้แสดงให้เห็นแล้วว่า การนำกระแสของไดโอดเรียงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อเส้นทางการไหลของกระแสใหม่คร่อมและกลไกการเกิดปรากฏการณ์การอัดประจุบัลไฟตรง ดังนั้นวงจรสมมูลที่ใช้ในอดีตจึงไม่สมบูรณ์และไม่สามารถใช้อธิบายพฤติกรรมของกระแสใหม่คร่อมที่ไหลเข้าอินเวอร์เตอร์ผ่านวงจรเรียงกระแสด้านหน้าได้ และไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์การอัดประจุบัลไฟตรงของอินเวอร์เตอร์ในสภาวะไร้โหลดได้ด้วย

เนื่องจากวงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์ที่สมบูรณ์แบบและแม่นยำเป็นพื้นฐานสำคัญในการวิเคราะห์ปรากฏการณ์การอัดประจุบัลไฟตรงและปัญหา EMI เนื้อหาวิทยานิพนธ์ในบทนี้จึงเน้นที่การนำเสนอวงจรสมมูลใหม่คร่อมและโหมดผลต่างของอินเวอร์เตอร์ที่มีความถูกต้องแม่นยำกว่าวงจรดั้งเดิมโดยจะพิจารณาการนำกระแสของวงจรเรียงกระแสด้านเข้าควบคู่ไปกับการสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ด้านออก และจะชี้ให้เห็นว่าการนำกระแสของไดโอดของวงจรเรียงกระแสและการสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ทำให้เกิดการเชื่อมร่วม (Coupling) ระหว่างวงจรสมมูลใหม่คร่อมและโหมดผลต่าง วงจรสมมูลที่สมบูรณ์นี้สามารถใช้อธิบายพฤติกรรมของกระแสใหม่คร่อมได้อย่างถูกต้องและใช้วิเคราะห์ปรากฏการณ์การอัดประจุบัลไฟตรงจากกระแสใหม่คร่อมได้ด้วย

3.1 การเชื่อมร่วมระหว่างโหมดและการแปลงโหมดที่เกิดจากการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแสและวงจรอินเวอร์เตอร์

ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์แบบพีดับเบิลยูเอ็มที่ศึกษามีโครงสร้างดังรูปที่ 3.1 โดยมีพารามิเตอร์ดังนี้

C_B คือ ตัวเก็บประจุที่บัลไฟตรง

C_h คือค่าความจุไฟฟ้าแอบแฝงระหว่างอุปกรณ์สวิตช์กำลังและซิงก์ระบายความร้อน (heat sink)

C_S คือค่าความจุไฟฟ้าแอบแฝงระหว่างขดลวดมอเตอร์กับกราวด์

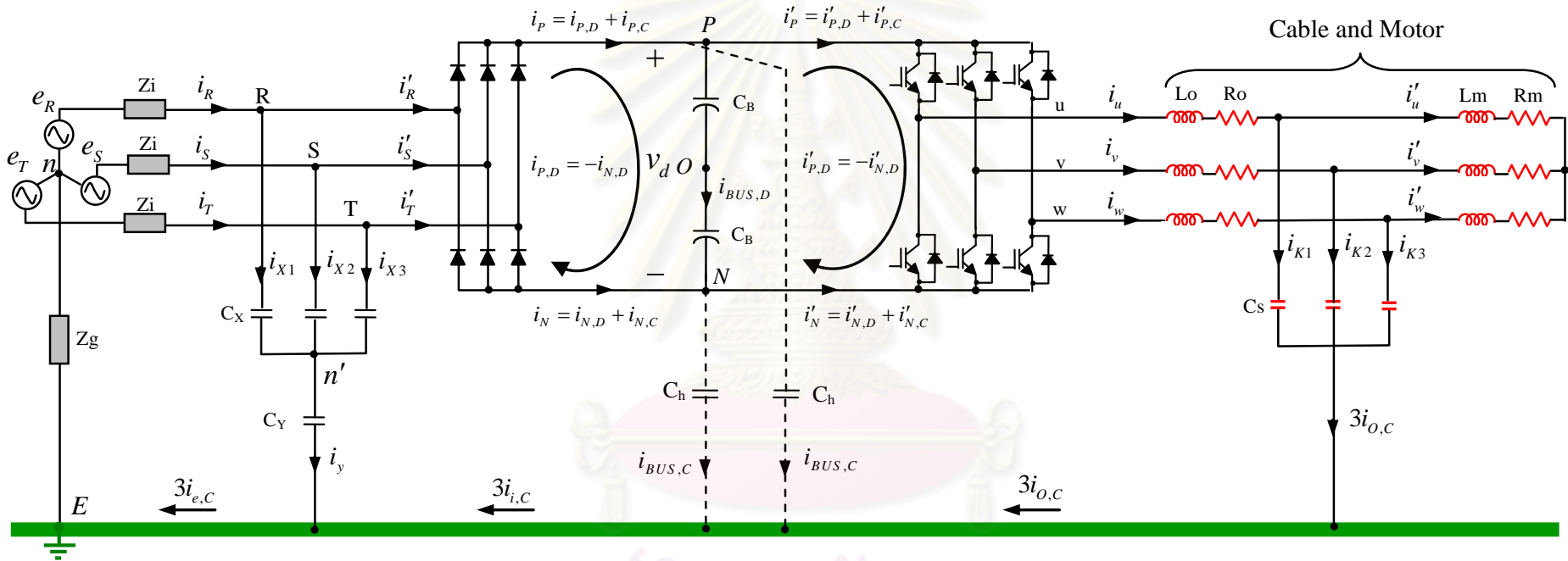
C_X, C_Y คือตัวเก็บประจุวงจรกรองที่ด้านหน้าของวงจรเรียงกระแส

R_m และ L_m คือพารามิเตอร์ความต้านทานและความเหนี่ยวนำของขดลวดมอเตอร์

R_O และ L_O คือพารามิเตอร์ความต้านทานและความเหนี่ยวนำของสายเคเบิลที่วงจรด้านออก

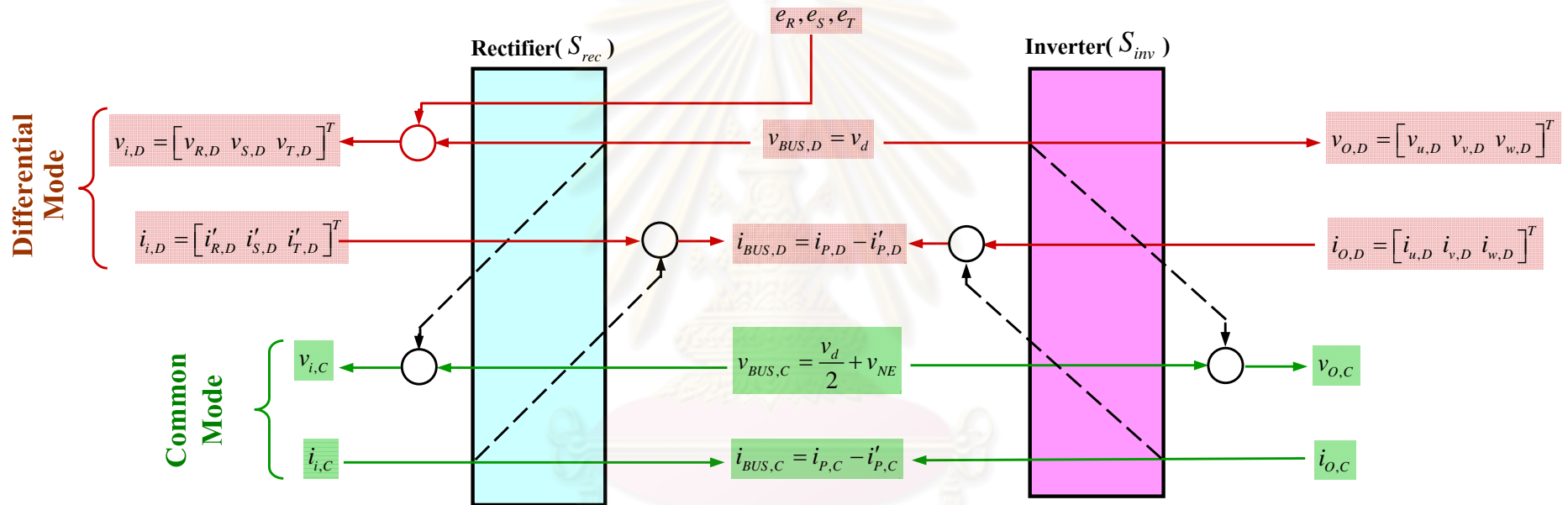
Z_i คือค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายไฟ 3 เฟส (e_R, e_S, e_T)

- Z_g คือค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างแหล่งจ่ายไฟ 3 เฟสกับกราวด์ของระบบ
- $i_{BUS,C}$ ($i_{BUS,C} = i_{P,C} - i'_{P,C} = -(i_{N,C} - i'_{N,C})$) คือกระแสไหลรวมที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_h
- $i_{BUS,D}$ ($i_{BUS,D} = i_{P,D} - i'_{P,D} = -(i_{N,D} - i'_{N,D})$) คือกระแสไหลรวมผลต่างที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_B
- $i_{e,C}$ คือกระแสไหลรวมที่ไหลผ่านแหล่งจ่ายไฟ 3 เฟส
- $i_{e,D} = [i_{R,D} \ i_{S,D} \ i_{T,D}]^T$ คือกระแสไหลรวมผลต่างของแหล่งจ่ายสายกำลังเฟส R, S, T
- $i_{i,C}$ คือกระแสไหลรวมที่ด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส
- $i_{i,D} = [i'_{R,D} \ i'_{S,D} \ i'_{T,D}]^T$ คือกระแสไหลรวมผลต่างที่ด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส
- i_{K1}, i_{K2}, i_{K3} คือกระแสเฟสที่ไหลผ่านค่าความจุไฟฟ้าแบบแฝง C_s ที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์
- i_N, i'_N คือกระแสบัสไฟตรงที่ลบของบัสไฟตรงก่อนและหลังตัวเก็บประจุ
- i_P, i'_P คือกระแสบัสไฟตรงที่ขั้วบวกของบัสไฟตรงก่อนและหลังตัวเก็บประจุ
- $i_{P,C}, i_{N,C}$ ($i_{P,C} = i_{N,C}$) คือกระแสไหลรวมที่บัสไฟตรงก่อนตัวเก็บประจุ
- $i'_{P,C}, i'_{N,C}$ ($i'_{P,C} = -i'_{N,C}$) คือกระแสไหลรวมผลต่างที่บัสไฟตรงหลังตัวเก็บประจุ
- $i_{P,D}, i_{N,D}$ ($i_{P,D} = -i_{N,D}$) คือกระแสไหลรวมผลต่างที่บัสไฟตรงก่อนตัวเก็บประจุ
- $i'_{P,D}, i'_{N,D}$ ($i'_{P,D} = -i'_{N,D}$) คือกระแสไหลรวมผลต่างที่บัสไฟตรงหลังตัวเก็บประจุ
- $i_{O,C}$ คือกระแสไหลรวมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์
- $i_{O,D} = [i_{u,D} \ i_{v,D} \ i_{w,D}]^T$ คือกระแสไหลรวมผลต่างที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์
- $i'_{O,D} = [i'_{u,D} \ i'_{v,D} \ i'_{w,D}]^T$ คือกระแสไหลรวมผลต่างที่ไหลเข้าขดลวดของมอเตอร์
- i_R, i_S, i_T คือกระแสเฟสของแหล่งจ่ายสายกำลังเฟส R, S, T
- i'_R, i'_S, i'_T คือกระแสเฟสที่ด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส
- i_u, i_v, i_w คือกระแสเฟสที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์
- i'_u, i'_v, i'_w คือกระแสเฟสที่ไหลเข้าขดลวดของมอเตอร์
- i_{X1}, i_{X2}, i_{X3} คือกระแสเฟสของตัวเก็บประจุ C_x ที่ด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส
- $i_{X,D} = [i_{X1,D} \ i_{X2,D} \ i_{X3,D}]^T$ คือกระแสไหลรวมผลต่างของตัวเก็บประจุ C_x ที่ด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส
- i_y คือกระแสไหลรวมที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_y ที่ด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส
- $v_{BUS,C} = \frac{1}{2} v_d + v_{NE}$ คือแรงดันไหลรวมที่บัสไฟตรง
- $v_{BUS,D} = v_d$ คือแรงดันไหลรวมผลต่างที่บัสไฟตรง
- $v_{i,D} = [v_{R,D} \ v_{S,D} \ v_{T,D}]^T$ คือแรงดันไหลรวมผลต่างที่ด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส
- $v_{inv,C}$ คือแรงดันไหลรวมที่เกิดจากการสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์
- $v_{O,D} = [v_{u,D} \ v_{v,D} \ v_{w,D}]^T$ คือแรงดันไหลรวมผลต่างที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์
- $v_{rec,C}$ คือแรงดันไหลรวมที่เกิดจากการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแส
- v_{RE}, v_{SE}, v_{TE} คือแรงดันเฟสที่ด้านเข้าของวงจรเรียงกระแสเทียบกราวด์
- v_{uE}, v_{vE}, v_{wE} คือแรงดันเฟสที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกราวด์
- $Z_{TH,D}, Z_{O,D}$ คืออิมพีแดนซ์สมมูลไหลรวมที่ด้านแหล่งจ่ายและที่ด้านโหลด
- $Z_{TH,C}, Z_{O,C}$ คืออิมพีแดนซ์สมมูลไหลรวมที่ด้านแหล่งจ่ายและที่ด้าน



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงการเชื่อมโยงระหว่างสัญญาณโหมดร่วมและโหมดผลต่างของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การหาวงจรมุมของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์นั้นแต่เดิมจะอาศัยแนวคิดที่ว่า สำหรับระบบ 3 เฟสสมมูล วงจรมุมรวมและโหมดผลต่างจะเป็นอิสระต่อกันและสามารถแยกพิจารณาทีละโหมดได้ แต่ในความเป็นจริง แม้จะเป็นระบบสมมูลที่มีอิมพีแดนซ์ในแต่ละเฟสเท่ากันก็ตาม แต่การตัดต่อวงจรของสวิตช์กำลังก็สามารถทำให้เกิดความไม่สมมาตรของวงจรแต่ละเฟสได้ ดังเช่นที่ บทความ [33]-[35] ได้แสดงให้เห็นว่าการตัดต่อของสวิตช์กำลังของแหล่งจ่ายกำลังและวงจรเรียงกระแสจะทำให้เกิดกระแสโหมดผลต่างจากความไม่สมดุลของกระแสโหมดรวมในแต่ละเฟสได้ โดยให้นิยามว่าเป็น “non-intrinsic differential-mode noise” หรือ “mixed-mode noise” วิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาหาวงจรมุมรวมและโหมดผลต่างของอินเวอร์เตอร์โดยมีแนวคิดว่าการสวิตช์ของไดโอดวงจรเรียงกระแสด้านเข้าและสวิตช์กำลังของอินเวอร์เตอร์ด้านออกจะส่งผลให้เกิดการแปลงโหมดที่นำไปสู่การเชื่อมร่วมระหว่างสัญญาณโหมดรวมและโหมดผลต่างได้ ดังแสดงด้วยแผนภาพการเชื่อมร่วมระหว่างโหมดสัญญาณในรูปที่ 3.2

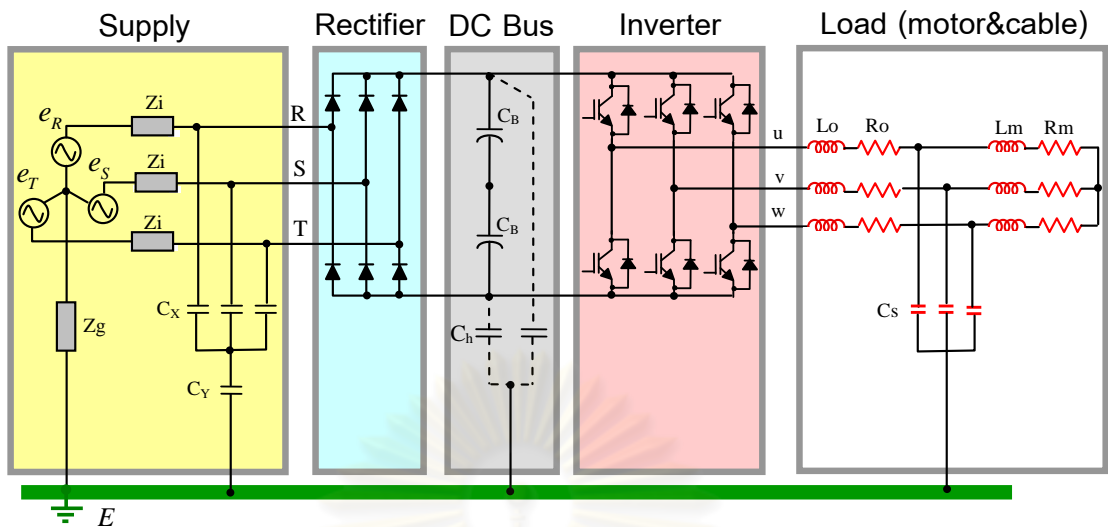
เมื่อพิจารณาที่วงจรอินเวอร์เตอร์ด้านหลังในรูปที่ 3.2 จะพบว่ามีการแปลงโหมดสัญญาณซึ่งเป็นที่คุ้นเคยกันดีเกิดขึ้น กล่าวคือการสวิตช์ของสวิตช์กำลังผ่านฟังก์ชันการสวิตช์ S_{inv} ทำให้แรงดันที่บัสไฟตรง (v_d) ซึ่งถือเป็นแรงดันโหมดผลต่างแปลงไปเป็นแรงดันไฟสลับที่ด้านออกที่มีทั้งส่วนที่เป็นโหมดผลต่าง ($v_{o,D}$) และโหมดรวม ($v_{o,C}$) ในขณะที่เดียวกันกระแสโหมดรวมที่ด้านออก ($i_{o,C}$) ก็ถูกแปลงไปเป็นกระแสที่บัสไฟตรงทั้งในส่วนที่เป็นโหมดรวม ($i_{BUS,C}$) และโหมดผลต่าง ($i_{BUS,D}$) เช่นกัน

ในทำนองเดียวกัน ที่วงจรด้านเข้าก็มีการแปลงโหมดสัญญาณเนื่องจากการนำกระแสของไดโอดของวงจรเรียงกระแสผ่านฟังก์ชันการสวิตช์ S_{rec} ทำให้แรงดันโหมดผลต่างได้แก่ แรงดันสายกำลัง (e_R, e_S, e_T) และแรงดันบัสไฟตรง (v_d) ถูกแปลงไปเป็นแรงดันไฟสลับที่ด้านเข้าที่มีทั้งส่วนที่เป็นโหมดผลต่าง ($v_{i,D}$) และโหมดรวม ($v_{i,C}$) ในขณะที่กระแสโหมดรวมด้านเข้า ($i_{i,C}$) จะถูกแปลงไปเป็นกระแสที่บัสไฟตรงที่มีองค์ประกอบที่เป็นโหมดรวม ($i_{BUS,C}$) และโหมดผลต่าง ($i_{BUS,D}$)

การเชื่อมร่วมระหว่างโหมดสัญญาณเป็นแนวคิดหลักที่ใช้การวิเคราะห์ห้วงจรมุมของอินเวอร์เตอร์ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการหาวงจรมุมของอินเวอร์เตอร์จะต้องวิเคราะห์ทั้งวงจรมุมรวมและโหมดผลต่างควบคู่กัน และปัจจัยที่ทำให้เกิดการเชื่อมร่วมของสัญญาณก็คือรูปแบบการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแสและวงจรอินเวอร์เตอร์ด้านหลัง

3.2 แนวทางการวิเคราะห์ห้วงจรมุม

การวิเคราะห์ห้วงจรมุมที่นำเสนอจะใช้กรอบความคิดที่จะแยกพิจารณาส่วนต่างๆ ของระบบที่ต่อเรียงกันดังในรูปที่ 3.3 ซึ่งในที่นี้สามารถแบ่งออกเป็น 5 ส่วน ได้แก่ วงจรด้านแหล่งจ่าย, วงจรเรียงกระแส, วงจรบัสไฟตรง, วงจรอินเวอร์เตอร์ และวงจรด้านโหลด สมการสัญญาณโหมดรวมและโหมดผลต่างของวงจรแต่ละส่วนสามารถนำมาเขียนเป็นวงจรมุมรวมและโหมดผลต่างของวงจรได้ สมการแรงดันและกระแสที่ด้านเข้าและด้านออกของวงจรแต่ละส่วนเป็นตัวแปรที่แสดงให้เห็นถึงการเชื่อมต่อกันระหว่างวงจรแต่ละส่วน การสร้างสมการสัญญาณโหมดสามารถแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอนคือ



รูปที่ 3.3 องค์ประกอบย่อยของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์วงจรสมมูล

[1] สร้างสมการแรงดันเฟสเทียบกับกราวด์และกระแสเฟสของวงจรแต่ละส่วนในรูปของสมการเมทริกซ์ สำหรับวงจรเรียงกระแสและอินเวอร์เตอร์ด้านหลัง จะแสดงสมการด้วยความสัมพันธ์ของสัญญาณระหว่างที่ด้านเข้ากับด้านออก ซึ่งอยู่ในเทอมของฟังก์ชันการสวิตช์ S_{rec} และ S_{inv} ตามลำดับ ส่วนองค์ประกอบอื่นคือ วงจรด้านแหล่งจ่าย วงจรบัสไฟตรง และวงจรโหลด จะแสดงสมการด้วยความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสของวงจร ซึ่งเชื่อมโยงกันด้วยอิมพีแดนซ์ของวงจร

[2] แปลงสมการจากขั้นตอนที่ [1] ซึ่งอยู่ในรูปปริมาณเฟส (X_j) ให้อยู่ในรูปสมการสัญญาณโหมดร่วมและโหมดผลต่าง โดยกำหนดให้สัญญาณโหมดร่วม (X_c) และโหมดผลต่างในแต่ละเฟส ($X_{j,D}$) มีนิยามตามสมการที่ (3.1) และ (3.2) ตามลำดับ

$$X_c \triangleq \sum_{j=1}^p X_j / p \tag{3.1}$$

$$X_{j,D} \triangleq X_j - X_c \quad \text{โดยที่} \quad \sum_{j=1}^p X_{j,D} = 0 \tag{3.2}$$

เมื่อ p แทนจำนวนสายหรือเฟสโดย $p=3$ สำหรับวงจรด้านเข้าและด้านออกซึ่งเป็นวงจร 3 เฟสและ $p=2$ สำหรับบัสไฟตรงซึ่งเป็นวงจร 1 เฟส

จากนิยามในสมการที่ (3.1) และ (3.2) ปริมาณเฟสสามารถแปลงเป็นสัญญาณโหมดร่วมและโหมดผลต่างผ่านเมทริกซ์การแปลง $T_{1\phi}$ และ $T_{3\phi}$ ได้ดังสมการที่ (3.3) และ (3.4) ตามลำดับ

$$\begin{bmatrix} X_{1,D} \\ X_{2,D} \\ X_c \end{bmatrix} = T_{1\phi} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} \quad \text{เมื่อ} \quad T_{1\phi} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.3}$$

$$\begin{bmatrix} X_{1,D} \\ X_{2,D} \\ \frac{X_{3,D}}{X_C} \end{bmatrix} = T_{3\phi} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} \quad \text{เมื่อ} \quad T_{3\phi} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \\ \hline 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

3.3 สมการแรงดันและกระแสในโหมดร่วมและโหมดผลต่างของแต่ละองค์ประกอบย่อย

การวิเคราะห์สร้างสมการสัญญาณโหมดร่วมและโหมดผลต่างของวงจรส่วนต่างๆ จะมีขั้นตอนดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.3.1 สมการของวงจรเรียงกระแสด้านหน้า

หน้าที่ของวงจรเรียงกระแสด้านหน้าคือการเปลี่ยนสัญญาณโวลต์ลบด้านหน้าไปเป็นสัญญาณกระแสตรงที่บัสไฟตรง พฤติกรรมดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้โดยอาศัยการนำกระแสของคูไดโอดตามฟังก์ชันการสวิตช์ซึ่งมีนิยามคือ

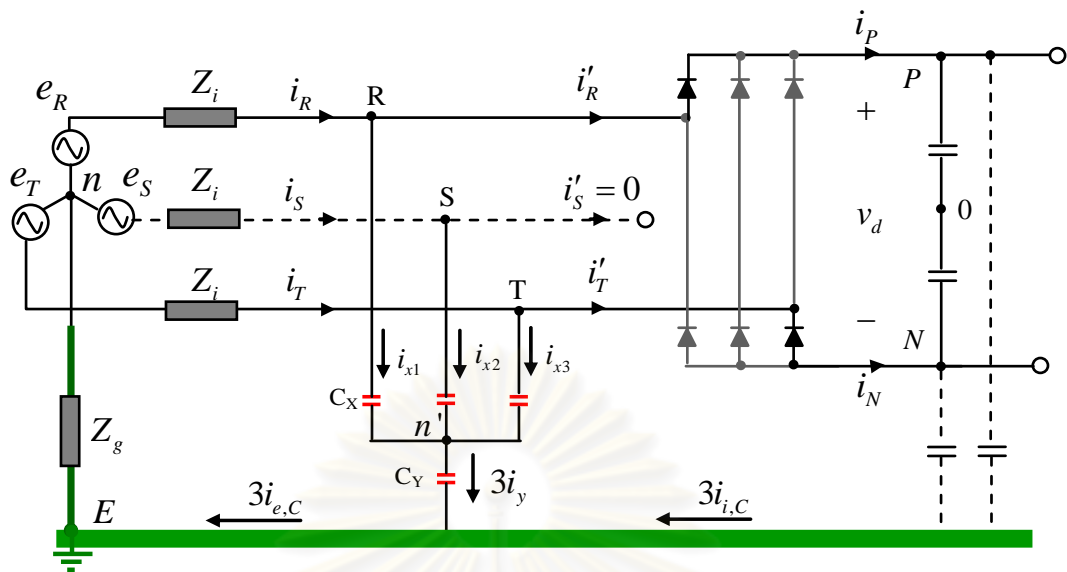
$$S_{rec} = [s_R \quad s_S \quad s_T]^T; \quad s_R, s_S, s_T = \begin{cases} "1" & \text{upper diode = on} \\ "-1" & \text{lower diode = on} \\ "0" & \text{upper and lower diode = off} \end{cases} \quad (3.5)$$

$$\tilde{S}_{rec} = [\tilde{s}_R \quad \tilde{s}_S \quad \tilde{s}_T]^T; \quad \begin{aligned} \tilde{s}_R &= 1 - |s_R| \\ \tilde{s}_S &= 1 - |s_S| \\ \tilde{s}_T &= 1 - |s_T| \end{aligned} \quad (3.6)$$

ฟังก์ชันการสวิตช์ของไดโอดเรียงกระแส S_{rec} และ \tilde{S}_{rec} เป็นตัวแปรสำคัญที่ควบคุมค่าแรงดันเฟสเทียบกราวด์ $[v_{RE} \quad v_{SE} \quad v_{TE}]^T$ และกระแสที่ขั้วบวกและลบของบัสไฟตรง $[i_p \quad i_n]$ ซึ่งการสร้างสมการสัญญาณเฟส $[v_{RE} \quad v_{SE} \quad v_{TE}]^T$ และ $[i_p \quad i_n]$ รวมทั้งสัญญาณโหมดร่วมและโหมดผลต่างของวงจรเรียงกระแส นั้นสามารถที่จะแยกพิจารณาได้เป็น 2 กรณีตามการทำงานของวงจรเรียงกระแสคือ เมื่อวงจรเรียงกระแสทำงานในย่านนำกระแสและในย่านไม่นำกระแส

3.3.1.1 กรณีที่วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านนำกระแส

ในย่านนำกระแสไดโอดตัวบนที่ต่ออยู่กับเฟสที่แรงดันมีค่าสูงสุดและไดโอดตัวล่างที่ต่ออยู่กับเฟสที่แรงดันมีค่าต่ำสุดจะนำกระแสพร้อมกัน ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.4 เมื่อ $e_R > e_S > e_T$ จึงทำให้ไดโอดตัวบนของเฟส R และไดโอดตัวล่างของเฟส T นำกระแส ส่วนเฟส S จะไม่มีการนำกระแสของไดโอดทั้งตัวบนและตัวล่าง ในตัวอย่างนี้จึงมีฟังก์ชันการสวิตช์ $S_{rec} = [1 \quad 0 \quad -1]^T$ การสร้างสมการแรงดันและกระแสที่เชื่อมโยงกันระหว่างที่ด้านเข้าและที่ด้านออกของวงจรเรียงกระแส จะพิจารณาจากรูปลักษณะของวงจรตามการทำงานของไดโอดที่เวลาใดๆ โดยมีขั้นตอนและรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างวงจรส่วนแหล่งจ่าย 3 เฟสและไดโอดเรียงกระแสในย่านนำกระแสเมื่อ

$$S_{rec} = [1 \ 0 \ -1]^T (e_R > e_S > e_T)$$

สมการแรงดันโหมตรง่วมและโหมดผลต่างในย่านนำกระแส

จากรูปที่ 3.4 เมื่อพิจารณาแรงดันเฟสที่ด้านหน้าของวงจรเรียงกระแส v_{RE} , v_{SE} และ v_{TE} จะเห็นได้ว่าการนำกระแสของไดโอด ทำให้เฟส R และ T ต่ออยู่กับขั้วบวกและลบของบัสไฟตรง ดังนั้น v_{RE} และ v_{TE} จะมีค่าเท่ากับ v_{PE} และ v_{NE} ตามลำดับ ส่วนเฟส S ซึ่งไม่มีการนำกระแสของไดโอดจึงเสมือนกับเปิดวงจรอยู่โดยไม่มีการต่อกับบัสไฟตรงดังนั้นแรงดัน v_{SE} จึงมีค่าเท่ากับ $e_S + v_{nE}$ ความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (3.7)

$$\begin{aligned} v_{RE} &= v_{PE} \\ v_{SE} &= e_S - i_S Z_i + v_{nE} \\ v_{TE} &= v_{NE} \end{aligned} \tag{3.7}$$

จากสมการที่ (3.7) เทอม v_{nE} เป็นเทอมที่ต้องกำจัดออกโดยการเปลี่ยนรูปให้อยู่ในเทอมของแหล่งจ่ายและแรงดันบัสไฟตรง ซึ่งจากรูปที่ 3.4 เมื่อพิจารณาจากทางเดินของวงจรจากจุด n ผ่านเฟส R และขั้วบวกของบัสไฟตรงไปที่กราวด์ E จะสามารถคำนวณค่า v_{nE} ได้ตามสมการที่ (3.8) และ เมื่อพิจารณาจากทางเดินของวงจรจากจุด n ผ่านเฟส T และขั้วลบของบัสไฟตรงไปที่กราวด์ E จะได้ตามสมการที่ (3.9)

$$v_{nE} = -e_R + i_R Z_i + v_{PE} \tag{3.8}$$

$$v_{nE} = -e_T + i_T Z_i + v_{NE} \tag{3.9}$$

จากผลรวมของสมการที่ (3.8), (3.9) และเงื่อนไข $e_R + e_S + e_T = 0$ และ $i_R + i_S + i_T = 3i_{e,C}$ สามารถหา v_{NE} ดังสมการที่ (3.10)

$$v_{NE} = \frac{1}{2}(e_S - i_S Z_i + 3i_{e,C} Z_i + v_{PE} + v_{NE}) \quad (3.10)$$

เมื่อแทนสมการที่ (3.10) ลงในสมการที่ (3.7) จะได้สมการแรงดันเฟสที่ด้านเข้าของวงจรเรียงกระแสที่จัดรูปใหม่ตามสมการที่ (3.11) และเขียนในรูปแบบเมทริกซ์ได้ตามสมการที่ (3.12)

$$\begin{aligned} v_{RE} &= v_{PE} \\ v_{SE} &= \frac{1}{2}(v_{PE} + v_{NE} + 3e_S - 3i_S Z_i + 3i_{e,C} Z_i) \\ v_{TE} &= v_{NE} \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\begin{bmatrix} v_{RE} \\ v_{SE} \\ v_{TE} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 1 & 1 \\ 0 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{PE} \\ v_{NE} \end{bmatrix} + \frac{3}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_R \\ e_S \\ e_T \end{bmatrix} - Z_i \frac{3}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_R \\ i_S \\ i_T \end{bmatrix} + Z_i \frac{3}{2} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} i_{e,C} \quad (3.12)$$

เทอมแรงดันที่บัลไฟตรง $\begin{bmatrix} v_{PE} \\ v_{NE} \end{bmatrix}$ ในสมการที่ (3.12) สามารถแปลงให้อยู่ในรูปสัญญาณโหมดร่วมและโหมดผลต่างได้ดังสมการที่ (3.13) ดังนั้นสมการที่ (3.12) จึงสามารถจัดรูปใหม่อีกครั้งได้ดังสมการที่ (3.14)

$$\begin{bmatrix} v_{PE} \\ v_{NE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/2 & -1/2 & | & 1 \\ -1/2 & 1/2 & | & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{P,D} \\ \frac{v_{N,D}}{v_{BUS,C}} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$\begin{bmatrix} v_{RE} \\ v_{SE} \\ v_{TE} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 & | & 2 \\ 0 & 0 & | & 2 \\ -1 & 1 & | & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{P,D} \\ \frac{v_{N,D}}{v_{BUS,C}} \end{bmatrix} + \frac{3}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_R \\ e_S \\ e_T \end{bmatrix} - Z_i \frac{3}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_R \\ i_S \\ i_T \end{bmatrix} + Z_i \frac{3}{2} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} i_{e,C} \quad (3.14)$$

เมื่อคูณสมการที่ (3.14) ด้วยเมทริกซ์การแปลง $T_{3\phi}$ สมการที่ (3.14) จะถูกแปลงให้เป็นสมการแรงดันโหมดร่วมและโหมดผลต่างดังสมการที่ (3.15)

$$\begin{bmatrix} v_{R,D} \\ v_{S,D} \\ v_{T,D} \\ v_{i,C} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 & | & 0 \\ 0 & 0 & | & 0 \\ -1 & 1 & | & 0 \\ 0 & 0 & | & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{P,D} \\ \frac{v_{N,D}}{v_{BUS,C}} \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_R \\ e_S \\ e_T \end{bmatrix} - \frac{Z_i}{2} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_R \\ i_S \\ i_T \end{bmatrix} + \frac{Z_i}{2} \begin{bmatrix} -1 \\ 2 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix} i_{e,C} \quad (3.15)$$

จากสมการที่ (3.15) สามารถเขียนสมการทั่วไปในเทอมของฟังก์ชันการสวิตช์ S_{rec} และ \tilde{S}_{rec} ของวงจรเรียงกระแสคือ

$$\begin{bmatrix} v_{R,D} \\ v_{S,D} \\ v_{T,D} \\ v_{i,C} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} s_R & -s_R & 0 \\ s_S & -s_S & 0 \\ s_T & -s_T & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{P,D} \\ v_{N,D} \\ v_{BUS,C} \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 2\tilde{s}_R & -\tilde{s}_S & -\tilde{s}_T \\ -\tilde{s}_R & 2\tilde{s}_S & -\tilde{s}_T \\ -\tilde{s}_R & -\tilde{s}_S & 2\tilde{s}_T \\ \tilde{s}_R & \tilde{s}_S & \tilde{s}_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_R \\ e_S \\ e_T \end{bmatrix} - \frac{Z_i}{2} \begin{bmatrix} 2\tilde{s}_R & -\tilde{s}_S & -\tilde{s}_T \\ -\tilde{s}_R & 2\tilde{s}_S & -\tilde{s}_T \\ -\tilde{s}_R & -\tilde{s}_S & 2\tilde{s}_T \\ \tilde{s}_R & \tilde{s}_S & \tilde{s}_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_R \\ i_S \\ i_T \end{bmatrix} + \frac{Z_i}{2} \begin{bmatrix} 3\tilde{s}_R - 1 \\ 3\tilde{s}_S - 1 \\ 3\tilde{s}_T - 1 \\ 1 \end{bmatrix} i_{e,C} \quad (3.16)$$

ในขั้นตอนนี้เราสามารถเขียนสมการแรงดันโหนดร่วมและโหนดผลต่างได้แล้ว แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากเทอม $[i_R \ i_S \ i_T]^T$ ในสมการที่ (3.16) เป็นเทอมที่ยังไม่ทราบค่า จึงทำให้สมการที่ (3.16) ขาดความสมบูรณ์ ในขั้นตอนนี้ไปจึงจำเป็นที่จะต้องสร้างสมการ $[i_R \ i_S \ i_T]^T$ เพื่อนำมาแทนค่าลงในสมการที่ (3.16) จากวงจรในรูปที่ 3.4 กระแสด้านแหล่งจ่ายมีความสัมพันธ์กันตามสมการที่ (3.15) โดยสามารถเขียนในรูปของเมทริกซ์ที่อยู่ในเทอมของฟังก์ชันการสวิตช์ได้ดังสมการที่ (3.18)

$$\begin{aligned} i_R &= i'_R + i_{X1} \\ i_S &= i_{X2} \\ i_T &= i'_T + i_{X3} \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$\begin{bmatrix} i_R \\ i_S \\ i_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\tilde{s}_R & 0 & 0 \\ 0 & 1-\tilde{s}_S & 0 \\ 0 & 0 & 1-\tilde{s}_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_R \\ i'_S \\ i'_T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{X1} \\ i_{X2} \\ i_{X3} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

จากวงจรในรูปที่ 3.4 สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ระหว่าง $[v_{R,D} \ v_{S,D} \ v_{T,D} \ | \ v_{i,C}]^T$ อิมพีแดนซ์ของ C_X, C_Y (Z_X, Z_Y) และ $[i_{X1} \ i_{X2} \ i_{X3}]^T$ ตามขั้นตอนเดียวกับการเขียนสมการที่ (3.16) ได้ดังสมการที่ (3.19)

$$\begin{bmatrix} v_{R,D} \\ v_{S,D} \\ v_{T,D} \\ v_{i,C} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} s_R & -s_R & 0 \\ s_S & -s_S & 0 \\ s_T & -s_T & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{P,D} \\ v_{N,D} \\ v_{BUS,C} \end{bmatrix} + \frac{Z_X}{2} \begin{bmatrix} 2\tilde{s}_R & -\tilde{s}_S & -\tilde{s}_T \\ -\tilde{s}_R & 2\tilde{s}_S & -\tilde{s}_T \\ -\tilde{s}_R & -\tilde{s}_S & 2\tilde{s}_T \\ \tilde{s}_R & \tilde{s}_S & \tilde{s}_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{X1} \\ i_{X2} \\ i_{X3} \end{bmatrix} - \frac{Z_X}{2} \begin{bmatrix} 3\tilde{s}_R - 1 \\ 3\tilde{s}_S - 1 \\ 3\tilde{s}_T - 1 \\ 1 \end{bmatrix} i_y \quad (3.19)$$

เมื่อแทนเทอม $[i_R \ i_S \ i_T]^T$ ในสมการที่ (3.16) ด้วยสมการที่ (3.18) และ (3.19) จะได้ผลตามสมการที่ (3.21) เมื่อเทอม $[i'_R \ i'_S \ i'_T]^T$ เป็นไปตามเงื่อนไขในสมการที่ (3.20)

$$\begin{bmatrix} 2\tilde{s}_R & -\tilde{s}_S & -\tilde{s}_T \\ -\tilde{s}_R & 2\tilde{s}_S & -\tilde{s}_T \\ -\tilde{s}_R & -\tilde{s}_S & 2\tilde{s}_T \\ \hline \tilde{s}_R & \tilde{s}_S & \tilde{s}_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1-\tilde{s}_R & 0 & 0 \\ 0 & 1-\tilde{s}_S & 0 \\ 0 & 0 & 1-\tilde{s}_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_R \\ i'_S \\ i'_T \end{bmatrix} = 0 \quad (3.20)$$

$$\begin{bmatrix} v_{R,D} \\ v_{S,D} \\ v_{T,D} \\ v_{i,C} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} s_R & -s_R & 0 \\ s_S & -s_S & 0 \\ s_T & -s_T & 0 \\ \hline 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{P,D} \\ v_{N,D} \\ v_{BUS,C} \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \frac{Z_X}{Z_i + Z_X} \begin{bmatrix} 2\tilde{s}_R & -\tilde{s}_S & -\tilde{s}_T \\ -\tilde{s}_R & 2\tilde{s}_S & -\tilde{s}_T \\ -\tilde{s}_R & -\tilde{s}_S & 2\tilde{s}_T \\ \hline \tilde{s}_R & \tilde{s}_S & \tilde{s}_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_R \\ e_S \\ e_T \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$+ \frac{1}{2} \frac{Z_i Z_X}{Z_i + Z_X} \begin{bmatrix} 3\tilde{s}_R - 1 \\ 3\tilde{s}_S - 1 \\ 3\tilde{s}_T - 1 \\ \hline 1 \end{bmatrix} (i_{e,C} - i_y)$$

เนื่องจากความสัมพันธ์ของกระแสไหลรวมที่ด้านหน้าคือ $i_{i,C} = i_{e,C} - i_y$ ดังนั้นสมการที่ (3.21) จึงสามารถเขียนได้ใหม่เป็นสมการที่ (3.22) ซึ่งเป็นสมการแรงดันโหมดที่ด้านเข้าที่สมบูรณ์แล้วสามารถนำไปใช้ประกอบเพื่อเขียนวงจรสมมูลได้คือ

$$\begin{bmatrix} v_{R,D} \\ v_{S,D} \\ v_{T,D} \\ v_{i,C} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} s_R & -s_R & 0 \\ s_S & -s_S & 0 \\ s_T & -s_T & 0 \\ \hline 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{P,D} \\ v_{N,D} \\ v_{BUS,C} \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \frac{Z_X}{Z_i + Z_X} \begin{bmatrix} 2\tilde{s}_R & -\tilde{s}_S & -\tilde{s}_T \\ -\tilde{s}_R & 2\tilde{s}_S & -\tilde{s}_T \\ -\tilde{s}_R & -\tilde{s}_S & 2\tilde{s}_T \\ \hline \tilde{s}_R & \tilde{s}_S & \tilde{s}_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_R \\ e_S \\ e_T \end{bmatrix} + \frac{1}{2} Z_{TH,D} \begin{bmatrix} 3\tilde{s}_R - 1 \\ 3\tilde{s}_S - 1 \\ 3\tilde{s}_T - 1 \\ \hline 1 \end{bmatrix} i_{i,C} \quad (3.22)$$

เมื่ออิมพีแดนซ์สมมูลเทเวนิน $Z_{TH,D} = Z_i Z_X / (Z_i + Z_X)$

สมการกระแสไหลรวมและโหมดผลต่างในย่านนำกระแส

จากตัวอย่างในรูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ด้านเข้าของวงจรเรียงกระแสและที่บัสไฟตรงจะเป็นไปตามสมการที่ (3.23)

$$\begin{aligned} i_P &= i'_R \\ i_N &= i'_T \end{aligned} \quad (3.23)$$

และเมื่อ $i'_R + i'_S + i'_T = 3i_{i,C}$ ในขณะที่ $i'_S = 0$ ทำให้ i'_R และ i'_T มีความสัมพันธ์กันคือ $i'_R = 3i_{i,C} - i'_T$ สมการที่ (3.23) จึงสามารถเขียนเป็นอีกรูปแบบหนึ่งได้ดังสมการที่ (3.24) และสมการที่ (3.25)

$$\begin{aligned} i_P &= \frac{1}{2}(i'_R - i'_T + 3i_{i,C}) \\ i_N &= \frac{1}{2}(-i'_R + i'_T + 3i_{i,C}) \end{aligned} \quad (3.24)$$

$$\begin{bmatrix} i_P \\ i_N \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_R \\ i'_S \\ i'_T \end{bmatrix} + \frac{3}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} i_{i,C} \quad (3.25)$$

เมื่อแปลงกระแสด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส $[i'_R \ i'_S \ i'_T]^T$ ให้อยู่ในรูปกระแสโหมตร่วมและโหมตผลต่างด้วยสมการที่ (3.26) ทำให้สามารถจัดรูปสมการที่ (3.25) ได้ดังสมการที่ (3.27)

$$\begin{bmatrix} i'_R \\ i'_S \\ i'_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & | & 1 \\ 0 & 1 & 0 & | & 1 \\ 0 & 0 & 1 & | & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_{R,D} \\ i'_{S,D} \\ i'_{T,D} \\ i_{i,C} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$\begin{bmatrix} i_P \\ i_N \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & | & 3 \\ -1 & 0 & 1 & | & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_{R,D} \\ i'_{S,D} \\ i'_{T,D} \\ i_{i,C} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

เมื่อคูณสมการที่ (3.27) ด้วยเมทริกซ์การแปลงโหมต $T_{1\phi}$ สมการที่ (3.27) จะถูกแปลงให้เป็นสมการกระแสโหมตร่วมและโหมตผลต่างดังสมการที่ (3.28)

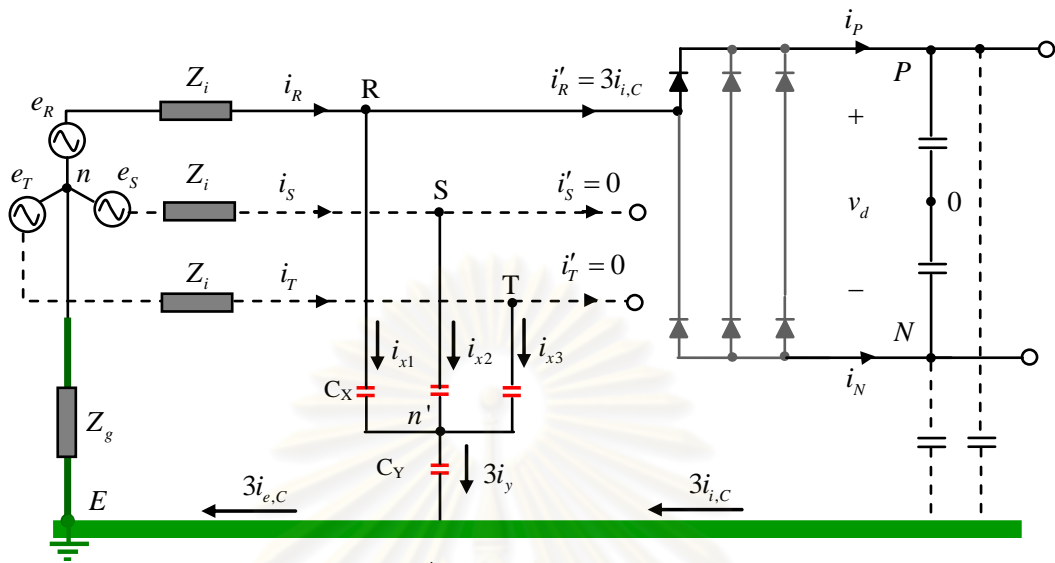
$$\begin{bmatrix} i_{P,D} \\ i_{N,D} \\ i_{P,C} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & | & 0 \\ -1 & 0 & 1 & | & 0 \\ 0 & 0 & 0 & | & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_{R,D} \\ i'_{S,D} \\ i'_{T,D} \\ i_{i,C} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

สมการที่ (3.28) สามารถเขียนสมการในรูปทั่วไปในเทอมของฟังก์ชันการสวิตช์ S_{rec} ของวงจรเรียงกระแสได้เป็น

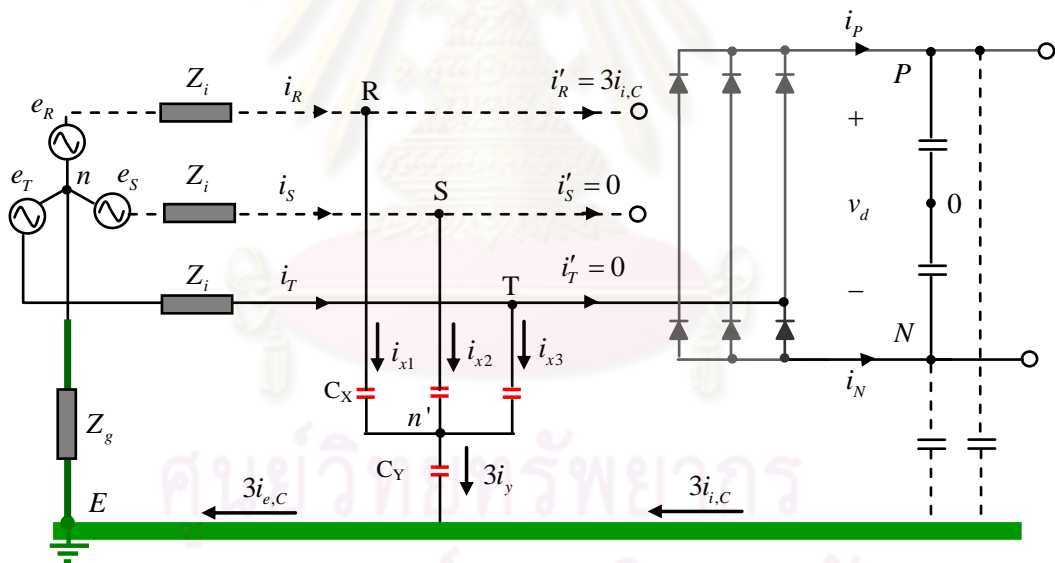
$$\begin{bmatrix} i_{P,D} \\ i_{N,D} \\ i_{P,C} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} s_R & s_S & s_T & | & 0 \\ -s_R & -s_S & -s_T & | & 0 \\ 0 & 0 & 0 & | & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_{R,D} \\ i'_{S,D} \\ i'_{T,D} \\ i_{i,C} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

โดยสรุปแล้วจะได้ว่าสัญญาณโหมตร่วมและโหมตผลต่างของวงจรเรียงกระแสด้านหน้ามีความสัมพันธ์กันดังสมการแรงดันที่ (3.22) และสมการกระแสที่ (3.29)

3.3.1.2 กรณีที่วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส



ก) เมื่อ $i_{i,C} > 0$, $S_{rec} = [1 \ 0 \ 0]^T$



ข) เมื่อ $i_{i,C} < 0$, $S_{rec} = [0 \ 0 \ -1]^T$

รูปที่ 3.5 ตัวอย่างวงจรสวิตช์แรงจ่าย 3 เฟสและไดโอดเรียงกระแสในย่านไม่นำกระแส ($e_R > e_S > e_T$)

การนำกระแสของไดโอดเมื่อวงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส นั้น ไดโอดตัวหนึ่งที่ต่ออยู่กับเฟสที่แรงดันมีค่าสูงสุดหรือไดโอดตัวกลางที่ต่ออยู่กับเฟสที่แรงดันมีค่าต่ำสุดตัวใดตัวหนึ่งจะนำกระแส เมื่อ $i_{i,C} > 0$ หรือ $i_{i,C} < 0$ ตามลำดับ ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.5 เมื่อ $e_R > e_S > e_T$ จะสังเกตได้ว่า ในกรณีที่ $i_{i,C} > 0$ (รูปที่ 3.5 ก) ไดโอดตัวบนของเฟส R จะนำกระแสเพียงแค่ว่าเฟสเดียวเท่านั้นส่วนอีกสองเฟสจะไม่มีการนำกระแสและเปิดวงจรอยู่ และในกรณีที่ $i_{i,C} < 0$ (รูปที่ 3.5 ข) ไดโอดตัวบนของเฟส T จะนำกระแสเพียงแค่ว่า

เฟสเดียวเท่านั้น ส่วนเฟส R และ S จะเสมือนกับเปิดวงจรอยู่ การสร้างสมการแรงดันและกระแสที่เชื่อมโยง ปริมาณด้านเข้าและด้านออกของวงจรเรียงกระแสในย่านไม่นำกระแสนี้จะพิจารณาทั้งกรณีที่มี $i_{i,C} > 0$ และ $i_{i,C} < 0$ ควบคู่กัน โดยมีขั้นตอนและรายละเอียดดังที่แสดงต่อไปนี้

สมการแรงดันโหมตร่วมและโหมตผลต่างในย่านไม่นำกระแส

ในกรณีที่ $i_{i,C} > 0$ และ $S_{rec} = [1 \ 0 \ 0]^T$

จากรูปที่ 3.5 ก) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเฟสที่ด้านหน้าของวงจรเรียงกระแส v_{RE} , v_{SE} , v_{TE} และแรงดันบัสไฟตรงสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (3.30) และสำหรับ v_{nE} จะคำนวณโดยพิจารณาจากทางเดินของวงจรจากจุด n ผ่านเฟส R และขั้วบวกของบัสไฟตรงไปที่กราวด์ E ดังสมการที่ (3.31)

$$\begin{aligned} v_{RE} &= v_{PE} \\ v_{SE} &= e_S - i_S Z_i + v_{nE} \\ v_{TE} &= e_T - i_T Z_i + v_{nE} \end{aligned} \quad (3.30)$$

$$v_{nE} = -e_R + i_R Z_i + v_{PE} \quad (3.31)$$

เมื่อแทนสมการที่ (3.31) ลงในสมการที่ (3.30) เพื่อกำจัดเทอม v_{nE} จะได้สมการแรงดันเฟสที่ด้านเข้าของวงจรเรียงกระแสที่จัดรูปใหม่ดังสมการที่ (3.32) และ (3.33)

$$\begin{aligned} v_{RE} &= v_{PE} \\ v_{SE} &= v_{PE} - e_R + e_S + i_R Z_i - i_S Z_i \\ v_{TE} &= v_{PE} - e_R + e_T + i_R Z_i - i_T Z_i \end{aligned} \quad (3.32)$$

$$\begin{bmatrix} v_{RE} \\ v_{SE} \\ v_{TE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{PE} \\ v_{NE} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_R \\ e_S \\ e_T \end{bmatrix} - Z_i \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_R \\ i_S \\ i_T \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

เมื่อแปลงเทอมแรงดันที่บัสไฟตรง $\begin{bmatrix} v_{PE} \\ v_{NE} \end{bmatrix}$ ให้อยู่ในรูปสัญญาณโหมตร่วมและโหมตผลต่าง สมการที่ (3.33) จะเขียนได้ใหม่เป็น

$$\begin{bmatrix} v_{RE} \\ v_{SE} \\ v_{TE} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 2 \\ 1 & -1 & 2 \\ 1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{P,D} \\ v_{N,D} \\ v_{BUS,C} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_R \\ e_S \\ e_T \end{bmatrix} - Z_i \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_R \\ i_S \\ i_T \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

เมื่อคูณสมการที่ (3.34) ด้วยเมทริกซ์การแปลงโหมต $T_{3\phi}$ สมการที่ (3.34) จะถูกแปลงให้เป็นสมการแรงดันโหมตร่วมและโหมตผลต่างดังสมการที่ (3.35) เมื่อ $e_R + e_S + e_T = 0$ และ $i_R + i_S + i_T = 3i_{e,C}$

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} v_{R,D} \\ v_{S,D} \\ v_{T,D} \\ v_{i,C} \end{bmatrix} &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{P,D} \\ v_{N,D} \\ v_{BUS,C} \end{bmatrix} + \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \\ -2 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_R \\ e_S \\ e_T \end{bmatrix} - \frac{Z_i}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \\ -2 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_R \\ i_S \\ i_T \end{bmatrix} \\
&= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{P,D} \\ v_{N,D} \\ v_{BUS,C} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_R \\ e_S \\ e_T \end{bmatrix} - Z_i \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_R \\ i_S \\ i_T \end{bmatrix} + Z_i \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix} i_{e,C}
\end{aligned} \tag{3.35}$$

ในกรณีที่ $i_{i,C} < 0$ และ $S_{rec} = [0 \ 0 \ -1]^T$

จากรูปที่ 3.5 ข) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเฟสที่ด้านหน้าของวงจรเรียงกระแส v_{RE} , v_{SE} , v_{TE} และแรงดันบัสไฟตรงสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (3.36) และสำหรับ v_{nE} จะคำนวณจากทางเดินของวงจรจากจุด n ผ่านเฟส T และขั้วบวกของบัสไฟตรงไปที่กราวด์ E ดังสมการที่ (3.37)

$$\begin{aligned}
v_{RE} &= e_R - i_R Z_i + v_{nE} \\
v_{SE} &= e_S - i_S Z_i + v_{nE}
\end{aligned} \tag{3.36}$$

$$\begin{aligned}
v_{TE} &= v_{NE} \\
v_{nE} &= -e_T + i_T Z_i + v_{NE}
\end{aligned} \tag{3.37}$$

เมื่อแทนสมการที่ (3.37) ลงในสมการที่ (3.36) เพื่อกำจัดเทอม v_{nE} จะได้สมการแรงดันเฟสที่ด้านเข้าของวงจรเรียงกระแสที่จัดรูปใหม่ดังสมการที่ (3.38) และ (3.39)

$$\begin{aligned}
v_{RE} &= v_{NE} + e_R - e_T - i_R Z_i + i_T Z_i \\
v_{SE} &= v_{NE} + e_S - e_T - i_S Z_i + i_T Z_i \\
v_{TE} &= v_{NE}
\end{aligned} \tag{3.38}$$

$$\begin{bmatrix} v_{RE} \\ v_{SE} \\ v_{TE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{PE} \\ v_{NE} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_R \\ e_S \\ e_T \end{bmatrix} - Z_i \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_R \\ i_S \\ i_T \end{bmatrix} \tag{3.39}$$

เมื่อแปลงเทอมแรงดันที่บัสไฟตรง $\begin{bmatrix} v_{PE} \\ v_{NE} \end{bmatrix}$ ให้อยู่ในรูปสัญกรณ์โหมดสมการที่ (3.40) จะเขียนได้ใหม่เป็น

$$\begin{bmatrix} v_{RE} \\ v_{SE} \\ v_{TE} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -1 & 1 & 2 \\ -1 & 1 & 2 \\ -1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{P,D} \\ v_{N,D} \\ v_{BUS,C} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_R \\ e_S \\ e_T \end{bmatrix} - Z_i \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_R \\ i_S \\ i_T \end{bmatrix} \tag{3.40}$$

สมการที่ (3.40) เมื่อนำมาคูณด้วยเมทริกซ์การแปลง $T_{3\phi}$ จะถูกแปลงให้เป็นสมการแรงดัน โหมดร่วมและโหมดผลต่างดังสมการที่ (3.41) เมื่อ $e_R + e_S + e_T = 0$ และ $i_R + i_S + i_T = 3i_{e,C}$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} v_{R,D} \\ v_{S,D} \\ v_{T,D} \\ v_{i,C} \end{bmatrix} &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{P,D} \\ v_{N,D} \\ v_{BUS,C} \end{bmatrix} + \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_R \\ e_S \\ e_T \end{bmatrix} - Z_i \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_R \\ i_S \\ i_T \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{P,D} \\ v_{N,D} \\ v_{BUS,C} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_R \\ e_S \\ e_T \end{bmatrix} - Z_i \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_R \\ i_S \\ i_T \end{bmatrix} + Z_i \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix} i_{e,C} \end{aligned} \quad (3.41)$$

สมการแรงดันโหมดร่วมและโหมดผลต่างในสมการที่ (3.35) และ (3.41) ซึ่งเป็นกรณีนี้ที่ $i_{i,C} > 0$ และ $i_{i,C} < 0$ ตามลำดับ สามารถเขียนเป็นสมการทั่วไปในเทอมของฟังก์ชันการสวิตช์ S_{rec} และ \tilde{S}_{rec} ของวงจรเรียงกระแสได้ดังสมการที่ (3.42)

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} v_{R,D} \\ v_{S,D} \\ v_{T,D} \\ v_C \end{bmatrix} &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \sum_{m=R,S,T} s_m & - \sum_{m=R,S,T} \tilde{s}_m & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{P,D} \\ v_{N,D} \\ v_{BUS,C} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \tilde{s}_R - 1 & \tilde{s}_S - 1 & \tilde{s}_T - 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_R \\ e_S \\ e_T \end{bmatrix} \\ &\quad - Z_i \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \tilde{s}_R - 1 & \tilde{s}_S - 1 & \tilde{s}_T - 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_R \\ i_S \\ i_T \end{bmatrix} + Z_i \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix} i_{e,C} \end{aligned} \quad (3.42)$$

ในขั้นตอนต่อไปจะเป็นการคำนวณหาสมการ $[i_R \ i_S \ i_T]^T$ เพื่อนำมาแทนค่าลงในสมการที่ (3.42) ซึ่งจากวงจรในรูปที่ 3.5 ก) และ 3.5 ข) ความสัมพันธ์ของกระแสด้านแหล่งจ่ายของทั้ง 2 กรณีสามารถเขียนเป็นสมการในรูปของเมทริกซ์ที่อยู่ในเทอมของฟังก์ชันการสวิตช์ได้ดังสมการที่ (3.43)

$$\begin{bmatrix} i_R \\ i_S \\ i_T \end{bmatrix} = 3 \begin{bmatrix} s_R \\ s_S \\ s_T \end{bmatrix} i_{i,C} + \begin{bmatrix} i_{X1} \\ i_{X2} \\ i_{X3} \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

ในขณะเดียวกันสมการความสัมพันธ์ระหว่าง $[v_{R,D} \ v_{S,D} \ v_{T,D} \ | \ v_{i,C}]^T$, อิมพีแดนซ์ของ $C_X, C_Y (Z_X, Z_Y)$ และ $[i_{X1} \ i_{X2} \ i_{X3}]^T$ สามารถเขียนได้ดังนี้คือ

$$\begin{bmatrix} v_{R,D} \\ v_{S,D} \\ \frac{v_{T,D}}{v_C} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left[\begin{array}{cc|c} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \hline \sum_{m=R,S,T} s_m & -\sum_{m=R,S,T} s_m & 2 \end{array} \right] \begin{bmatrix} v_{P,D} \\ v_{N,D} \\ v_{BUS,C} \end{bmatrix} + Z_X \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \hline \tilde{s}_R - 1 & \tilde{s}_S - 1 & \tilde{s}_T - 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{X1} \\ i_{X2} \\ i_{X3} \end{bmatrix} - Z_X \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix} i_y \quad (3.44)$$

เมื่อแทนเทอม $[i_R \ i_S \ i_T]^T$ ในสมการที่ (3.42) ด้วยสมการที่ (3.43) และจากสมการที่ (3.44) จะได้ผลดังสมการที่ (3.45)

$$\begin{bmatrix} v_{R,D} \\ v_{S,D} \\ \frac{v_{T,D}}{v_C} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left[\begin{array}{cc|c} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \hline \sum_{m=R,S,T} s_m & -\sum_{m=R,S,T} s_m & 2 \end{array} \right] \begin{bmatrix} v_{P,D} \\ v_{N,D} \\ v_{BUS,C} \end{bmatrix} + \frac{Z_X}{Z_i + Z_X} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \hline \tilde{s}_R - 1 & \tilde{s}_S - 1 & \tilde{s}_T - 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_R \\ e_S \\ e_T \end{bmatrix} + \frac{Z_i Z_X}{Z_i + Z_X} \left(\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix} i_{e,C} - \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix} i_y - \begin{bmatrix} 3|s_R| \\ 3|s_S| \\ 3|s_T| \\ -3 \end{bmatrix} i_{i,C} \right) \quad (3.45)$$

เนื่องจากความสัมพันธ์ของกระแสไหลรวมที่ด้านหน้าคือ $i_{i,C} = i_{e,C} - i_y$ และ $\tilde{s}_R = 1 - |s_R|$, $\tilde{s}_S = 1 - |s_S|$ และ $\tilde{s}_T = 1 - |s_T|$ ดังนั้นสมการที่ (3.45) จึงสามารถเขียนได้ใหม่เป็นสมการที่ (3.46) ซึ่งเป็นสมการแรงดันที่ด้านเข้าแยกตามโหมดที่สมบูรณ์แล้วและสามารถนำไปใช้เขียนวงจรสมมูลได้ทั้งในกรณีที่ $i_{i,C} > 0$ และ $i_{i,C} < 0$

$$\begin{bmatrix} v_{R,D} \\ v_{S,D} \\ \frac{v_{T,D}}{v_C} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left[\begin{array}{cc|c} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \hline \sum_{m=R,S,T} s_m & -\sum_{m=R,S,T} s_m & 2 \end{array} \right] \begin{bmatrix} v_{P,D} \\ v_{N,D} \\ v_{BUS,C} \end{bmatrix} + \frac{Z_X}{Z_i + Z_X} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \hline \tilde{s}_R - 1 & \tilde{s}_S - 1 & \tilde{s}_T - 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_R \\ e_S \\ e_T \end{bmatrix} + \frac{Z_i Z_X}{Z_i + Z_X} \begin{bmatrix} 3\tilde{s}_R - 2 \\ 3\tilde{s}_S - 2 \\ 3\tilde{s}_T - 2 \\ -2 \end{bmatrix} i_{i,C} \quad (3.46)$$

สมการกระแสไหลรวมและไหลผลต่างในย่านไม่นำกระแส

ในกรณีที่ $i_{i,C} > 0$ และ $S_{rec} = [1 \ 0 \ 0]^T$

จากรูปที่ 3.5 ก) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ด้านเข้าของวงจรเรียงกระแสและที่บัสไฟตรงจะเป็นไปตามสมการที่ (3.47) และเขียนในรูปเมทริกซ์ได้ดังสมการที่ (3.48)

$$\begin{aligned} i_p &= i'_r \\ i_N &= 0 \end{aligned} \quad (3.47)$$

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_r \\ i'_s \\ i'_t \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right] \begin{bmatrix} i'_{r,D} \\ i'_{s,D} \\ i'_{t,D} \\ i_{i,C} \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

เมื่อคูณสมการที่ (3.48) ด้วยเมทริกซ์การแปลงโหมด $T_{1\phi}$ จะได้ผลเป็นสมการกระแสไหลรวมและไหลผลต่างดังสมการที่ (3.49)

$$\begin{bmatrix} i_{p,D} \\ i_{N,D} \\ i_{p,C} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \begin{bmatrix} i'_{r,D} \\ i'_{s,D} \\ i'_{t,D} \\ i_{i,C} \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

ในกรณีที่ $i_{i,C} < 0$ และ $S_{rec} = [0 \ 0 \ -1]^T$

จากรูปที่ 3.5 ข) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ด้านเข้าของวงจรเรียงกระแสและที่บัสไฟตรงจะเขียนได้ดังสมการที่ (3.50) และเขียนในรูปเมทริกซ์ได้ดังสมการที่ (3.51)

$$\begin{aligned} i_p &= 0 \\ i_N &= i'_t \end{aligned} \quad (3.50)$$

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_r \\ i'_s \\ i'_t \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{ccc|c} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{array} \right] \begin{bmatrix} i'_{r,D} \\ i'_{s,D} \\ i'_{t,D} \\ i_{i,C} \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

เมื่อคูณสมการที่ (3.51) ด้วยเมทริกซ์การแปลงโหมด $T_{1\phi}$ จะได้ผลเป็นสมการกระแสไหลรวมและไหลผลต่างดังสมการที่ (3.52)

$$\begin{bmatrix} i_{p,D} \\ i_{N,D} \\ i_{p,C} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left[\begin{array}{ccc|c} 0 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{array} \right] \begin{bmatrix} i'_{r,D} \\ i'_{s,D} \\ i'_{t,D} \\ i_{i,C} \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

จากสมการที่ (3.49) และ (3.52) จะได้ว่า $i_{P,D}$ และ $i_{N,D}$ เป็นเทอมที่ขึ้นกับฟังก์ชันการสวิตช์ S_{rec} ส่วน $i_{P,C}$ เป็นเทอมที่ขึ้นกับ $i_{i,C}$ แต่ไม่ขึ้นอยู่กับ S_{rec} สำหรับกรณีที่ $i_{i,C} > 0$ $i_{P,C} = i'_{T,D} + i_{i,C} = i'_T = \frac{3}{2}i_{i,C}$ และสำหรับกรณีที่ $i_{i,C} < 0$ $i_{BUS,C} = i'_{R,D} + i_{i,C} = i'_R = \frac{3}{2}i_{i,C}$ ดังนั้นจะสามารถเขียนสมการกระแสที่บัสไฟตรงแยกตามโหมดในเทอมของฟังก์ชันการสวิตช์ S_{rec} ทั้งกรณีที่ $i_{i,C} > 0$ และ $i_{i,C} < 0$ ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} i_{P,D} \\ i_{N,D} \\ i_{P,C} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left[\begin{array}{ccc|c} s_R & s_S & s_T & \sum_{m=R,S,T} s_m \\ -s_R & -s_S & -s_T & -\sum_{m=R,S,T} s_m \\ \hline 0 & 0 & 0 & 3 \end{array} \right] \begin{bmatrix} i'_{R,D} \\ i'_{S,D} \\ i'_{T,D} \\ i_{i,C} \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

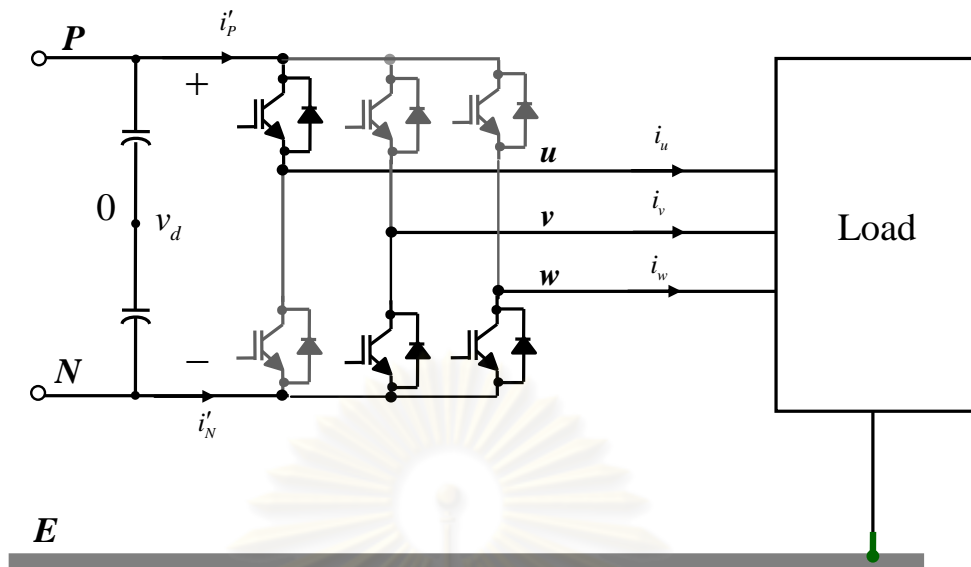
โดยสรุปแล้วจะได้ว่าสัญญาณโหมตร่วมและโหมตผลต่างของวงจรเรียงกระแสด้านหน้ามีความสัมพันธ์กันดังสมการแรงดันที่ (3.46) และสมการกระแสที่ (3.53)

3.3.2 สมการของวงจรอินเวอร์เตอร์

วงจรอินเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณกระแสตรงที่บัสไฟตรงให้เป็นสัญญาณไฟสลับ โดยอาศัยการตัดต่อวงจรของคู่สวิตช์กำลังในแต่ละเฟส ซึ่งมีฟังก์ชันการสวิตช์เป็น

$$S_{inv} = [s_u \quad s_v \quad s_w]^T; \quad s_u, s_v, s_w = \begin{cases} 1 & \text{upper switch = on} \\ 0 & \text{lower switch = on} \end{cases} \quad (3.54)$$

ฟังก์ชันการสวิตช์อินเวอร์เตอร์ S_{inv} จะเป็นไปตามการมอดูเลตเพื่อสร้างแรงดันจึงเป็นตัวแปรสำคัญที่จะสะท้อนถึงแรงดันที่สร้างจากอินเวอร์เตอร์ ดังเช่นตัวอย่างในรูปที่ 3.6 เมื่ออินเวอร์เตอร์มีสถานะการสวิตช์ $S_{inv} = [1 \ 0 \ 0]$ แรงดันเฟสที่สร้างจากอินเวอร์เตอร์เมื่อเทียบกับจุดกึ่งกลางบัสไฟตรงจะมีค่าเป็น $[v_{u0} \ v_{v0} \ v_{w0}]^T = \frac{1}{2}[v_d \ -v_d \ -v_d]^T$ และสำหรับการหาสมการแรงดันและกระแสที่เชื่อมโยงปริมาณที่ด้านเข้าและที่ด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ จะพิจารณาโดยมีขั้นตอนดังรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.6 วงจรอินเวอร์เตอร์ด้านหลังแสดงตัวอย่างเมื่อ $S_{inv} = [1 \ 0 \ 0]$

สมการแรงดันโหนดร่วมและโหนดผลต่างของวงจรถ่ายอินเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 3.6 แรงดันเฟสเทียบกราวด์ที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์มีความสัมพันธ์กับแรงดันที่บัสไฟตรงดังสมการที่ (3.55) และเขียนในรูปเมทริกซ์ได้ดังสมการที่ (3.56)

$$\begin{aligned} v_{uE} &= v_{PE} \\ v_{vE} &= v_{NE} \\ v_{wE} &= v_{NE} \end{aligned} \tag{3.55}$$

$$\begin{bmatrix} v_{uE} \\ v_{vE} \\ v_{wE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{PE} \\ v_{NE} \end{bmatrix} \tag{3.56}$$

สมการที่ (3.56) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปในเทอมของฟังก์ชันการสวิตช์ S_{inv} ได้ดังสมการที่ (3.57) และ (3.58)

$$\begin{bmatrix} v_{uE} \\ v_{vE} \\ v_{wE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_u & 1-s_u \\ s_v & 1-s_v \\ s_w & 1-s_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{PE} \\ v_{NE} \end{bmatrix} \tag{3.57}$$

$$\begin{bmatrix} v_{uE} \\ v_{vE} \\ v_{wE} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 2s_u - 1 & -(2s_u - 1) \\ 2s_v - 1 & -(2s_v - 1) \\ 2s_w - 1 & -(2s_w - 1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{P,D} \\ v_{N,D} \\ v_{BUS,C} \end{bmatrix} \tag{3.58}$$

เมื่อคูณสมการที่ (3.58) ด้วยเมทริกซ์การแปลง $T_{3\phi}$ จะได้สมการแรงดันโหมดร่วมและโหมดผลต่างที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ดังสมการที่ (3.59)

$$\begin{bmatrix} v_{u,D} \\ v_{v,D} \\ \frac{v_{w,D}}{v_{O,C}} \end{bmatrix} = \begin{array}{c|c} \begin{matrix} s_u - \sum_{n=u,v,w} s_n / 3 & - \left(s_u - \sum_{n=u,v,w} s_n / 3 \right) \\ s_v - \sum_{n=u,v,w} s_n / 3 & - \left(s_v - \sum_{n=u,v,w} s_n / 3 \right) \\ s_w - \sum_{n=u,v,w} s_n / 3 & - \left(s_w - \sum_{n=u,v,w} s_n / 3 \right) \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} \\ \hline \begin{matrix} \sum_{n=u,v,w} s_n / 3 - \frac{1}{2} & - \left(\sum_{n=u,v,w} s_n / 3 - \frac{1}{2} \right) \end{matrix} & 1 \end{array} \begin{bmatrix} v_{P,D} \\ v_{N,D} \\ v_{BUS,C} \end{bmatrix} \quad (3.59)$$

สมการกระแสโหมดร่วมและโหมดผลต่างของวงจรอินเวอร์เตอร์

จากตัวอย่างในรูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่บัสไฟตรงหลังตัวเก็บประจุ i'_p, i'_N และกระแสที่ด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3.60) ซึ่งเขียนในรูปเมทริกซ์ได้ดังสมการที่ (3.61)

$$\begin{aligned} i'_p &= i_u \\ i'_N &= i_v + i_w \end{aligned} \quad (3.60)$$

$$\begin{bmatrix} i'_p \\ i'_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} \quad (3.61)$$

สมการที่ (3.61) สามารถเขียนในรูปของฟังก์ชันการสวิตช์ดังได้ตามสมการที่ (3.62)

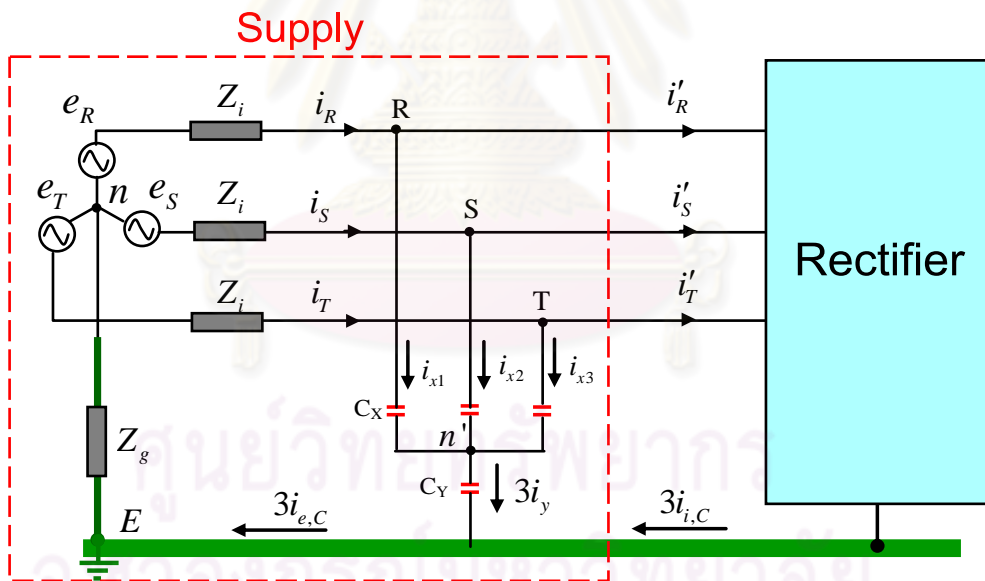
$$\begin{bmatrix} i'_p \\ i'_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_u & s_v & s_w \\ 1-s_u & 1-s_v & 1-s_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} = \begin{array}{c|c} \begin{matrix} s_u & s_v & s_w \\ 1-s_u & 1-s_v & 1-s_w \end{matrix} & \begin{matrix} \sum_{n=u,v,w} s_n \\ 3 - \sum_{n=u,v,w} s_n \end{matrix} \\ \hline & \begin{matrix} i_{u,D} \\ i_{v,D} \\ i_{w,D} \\ i_{O,C} \end{matrix} \end{array} \quad (3.62)$$

เมื่อแปลงสมการที่ (3.62) โดยคูณด้วยเมทริกซ์การแปลง $T_{1\phi}$ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่บัสไฟตรงและกระแสที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์แยกตามโหมดได้ดังสมการที่ (3.63)

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} i'_{p,D} \\ i'_{N,D} \\ i'_{p,C} \end{bmatrix} &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 2s_u - 1 & 2s_v - 1 & 2s_w - 1 & | & 2 \sum_{n=u,v,w} s_n - 3 \\ -(2s_u - 1) & -(2s_v - 1) & -(2s_w - 1) & | & -\left(2 \sum_{n=u,v,w} s_n - 3\right) \\ \hline 1 & 1 & 1 & | & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{u,D} \\ i_{v,D} \\ i_{w,D} \\ i_{o,C} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} s_u & s_v & s_w & | & \sum_{n=u,v,w} s_n - 3/2 \\ -s_u & -s_v & -s_w & | & -\left(\sum_{n=u,v,w} s_n - 3/2\right) \\ \hline 0 & 0 & 0 & | & 3/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{u,D} \\ i_{v,D} \\ i_{w,D} \\ i_{o,C} \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{3.63}$$

โดยสรุปจะได้ว่าสัญญาณใหม่ตรงรวมและใหม่ผลต่างของวงจรอินเวอร์เตอร์มีความสัมพันธ์ดังสมการแรงดันที่ (3.59) และสมการกระแสที่ (3.63)

3.3.3 สมการของวงจรส่วนแหล่งจ่ายไฟสายกำลัง 3 เฟส



รูปที่ 3.7 วงจรส่วนแหล่งจ่ายสายกำลัง 3 เฟสและอิมพีแดนซ์ด้านหน้า

พฤติกรรมของวงจรแหล่งจ่ายด้านหน้าแสดงได้ด้วยความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของวงจรผ่านอิมพีแดนซ์ภายในวงจร โดยมีรายละเอียดดังนี้

จากวงจรในรูปที่ 3.7 กระแสแต่ละส่วนของวงจรด้านแหล่งจ่ายสัมพันธ์กันตามสมการที่ (3.64) ในที่นี้จะแยกพิจารณาเทอมกระแส $[i_R \ i_S \ i_T]^T$ และ $[i_{x1} \ i_{x2} \ i_{x3}]^T$ ที่ละส่วนแล้วจึงนำมาคำนวณผลต่างเพื่อหาค่า $[i'_R \ i'_S \ i'_T]^T$ ในขั้นตอนสุดท้าย

$$\begin{bmatrix} i'_R \\ i'_S \\ i'_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_R \\ i_S \\ i_T \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{X1} \\ i_{X2} \\ i_{X3} \end{bmatrix} \quad (3.64)$$

จากรูปที่ 3.7 สมการของกระแสแหล่งจ่าย i_R, i_S, i_T จะเขียนได้ดังสมการที่ (3.65) และเขียนในรูปเมทริกซ์ได้ดังสมการที่ (3.66)

$$\begin{aligned} i_R &= \frac{1}{Z_i} (e_R - v_{RE} - 3i_{e,C} Z_g) \\ i_S &= \frac{1}{Z_i} (e_S - v_{SE} - 3i_{e,C} Z_g) \\ i_T &= \frac{1}{Z_i} (e_T - v_{TE} - 3i_{e,C} Z_g) \end{aligned} \quad (3.65)$$

$$\begin{bmatrix} i_R \\ i_S \\ i_T \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_i} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_R \\ e_S \\ e_T \end{bmatrix} - \frac{1}{Z_i} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{RE} \\ v_{SE} \\ v_{TE} \end{bmatrix} - 3 \frac{Z_g}{Z_i} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} i_{e,C} \quad (3.66)$$

เมื่อแปลงสมการที่ (3.66) แยกตามโหนดโดยการคูณด้วยเมทริกซ์การแปลง $T_{3\phi}$ จะได้ผลดังสมการที่ (3.67)

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} i_{R,D} \\ i_{S,D} \\ i_{T,D} \\ i_{e,C} \end{bmatrix} &= \frac{1}{Z_i} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_R \\ e_S \\ e_T \end{bmatrix} - \frac{1}{Z_i} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & | & 0 \\ 0 & 1 & 0 & | & 0 \\ 0 & 0 & 1 & | & 0 \\ 0 & 0 & 0 & | & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{R,D} \\ v_{S,D} \\ v_{T,D} \\ v_{i,C} \end{bmatrix} - 3 \frac{Z_g}{Z_i} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} i_{e,C} \\ &= \frac{1}{Z_i} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_R \\ e_S \\ e_T \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1/Z_i & 0 & 0 & | & 0 \\ 0 & 1/Z_i & 0 & | & 0 \\ 0 & 0 & 1/Z_i & | & 0 \\ 0 & 0 & 0 & | & 1/(Z_i + 3Z_g) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{R,D} \\ v_{S,D} \\ v_{T,D} \\ v_{i,C} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.67)$$

ในการทำงานเดียวกันสมการกระแส i_{X1}, i_{X2}, i_{X3} จะเขียนได้ดังสมการที่ (3.68) และเขียนในรูปเมทริกซ์ได้ดังสมการที่ (3.69)

$$\begin{aligned} i_{X1} &= \frac{1}{Z_X} (v_{RE} - 3i_Y Z_Y) \\ i_{X2} &= \frac{1}{Z_X} (v_{SE} - 3i_Y Z_Y) \\ i_{X3} &= \frac{1}{Z_X} (v_{TE} - 3i_Y Z_Y) \end{aligned} \quad (3.68)$$

$$\begin{bmatrix} i_{X1} \\ i_{X2} \\ i_{X3} \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_X} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{RE} \\ v_{SE} \\ v_{TE} \end{bmatrix} - 3 \frac{Z_Y}{Z_X} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} i_Y \quad (3.69)$$

เมื่อแปลงสมการที่ (3.66) แยกตามโหนดโดยการคูณด้วยเมทริกซ์การแปลง $T_{3\phi}$ จะได้ผลดังสมการที่ (3.70)

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} i_{X1,D} \\ i_{X2,D} \\ i_{X3,D} \\ i_Y \end{bmatrix} &= \frac{1}{Z_X} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{R,D} \\ v_{S,D} \\ v_{T,D} \\ v_{i,C} \end{bmatrix} - 3 \frac{Z_Y}{Z_X} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} i_Y \\ &= \begin{bmatrix} 1/Z_X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/Z_X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/Z_X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/(Z_X + 3Z_Y) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{R,D} \\ v_{S,D} \\ v_{T,D} \\ v_{i,C} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.70)$$

เมื่อนำสมการที่ (3.67) และ (3.70) แทนลงในสมการที่ (3.64) จะสามารถแสดงสมการกระแส $[i'_R \ i'_S \ i'_T]^T$ แยกเป็นโหนดร่วมและโหนดผลต่างได้เป็น

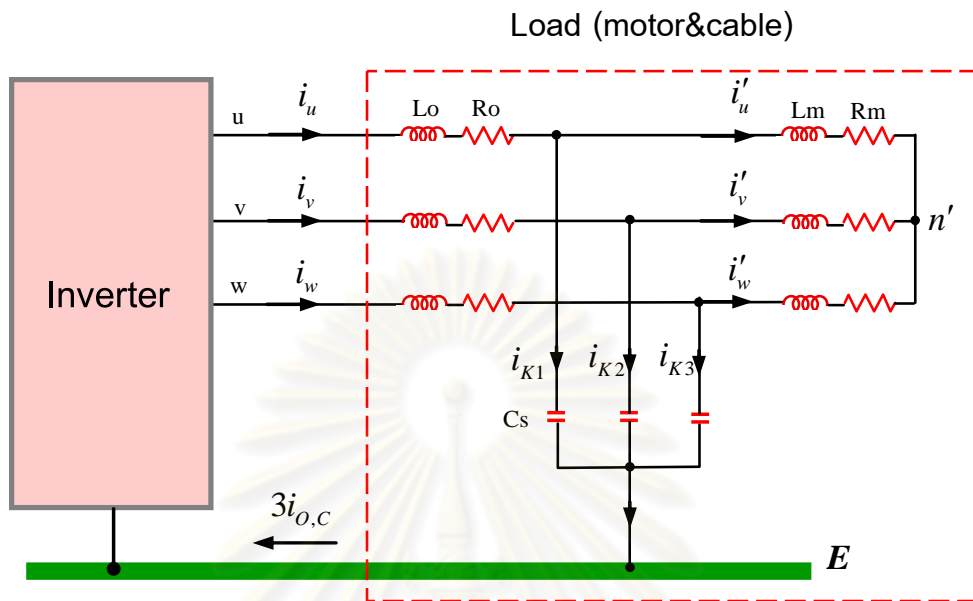
$$\begin{bmatrix} i'_{R,D} \\ i'_{S,D} \\ i'_{T,D} \\ i_{i,C} \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_i} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_R \\ e_S \\ e_T \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1/Z_{TH,D} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/Z_{TH,D} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/Z_{TH,D} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/Z_{TH,C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{R,D} \\ v_{S,D} \\ v_{T,D} \\ v_{i,C} \end{bmatrix} \quad (3.71)$$

$$\text{เมื่อ } Z_{TH,C} = \frac{(Z_i + 3Z_g)(Z_X + 3Z_Y)}{Z_i + 3Z_g + Z_X + 3Z_Y}$$

สังเกตได้ว่าวงจรด้านแหล่งจ่ายอธิบายได้ด้วยสมการที่ (3.71) ซึ่งก็คือสมการของวงจรสมมูลเทเวนิน (Thevenin) ของแหล่งจ่ายมองจากจุด R, S, T

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.4 สมการสัญญาณใหม่ของวงจรโหลดที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.8 ส่วนวงจรโหลดที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์

วงจรโหลดที่ด้านออกซึ่งประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลและมอเตอร์ดังรูปที่ 3.8 อธิบายได้ด้วยสมการความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่ด้านเข้าของวงจร โดยความสัมพันธ์ของกระแสภายในวงจรเป็นดังสมการที่ (3.72)

$$\begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i'_u \\ i'_v \\ i'_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{K1} \\ i_{K2} \\ i_{K3} \end{bmatrix} \tag{3.72}$$

จากรูปที่ 3.8 สมการกระแสของมอเตอร์ i'_u, i'_v, i'_w เขียนได้ดังสมการที่ (3.73) และเขียนในในรูปเมทริกซ์ได้ดังสมการที่ (3.74) เมื่อ Z_o คืออิมพีแดนซ์ของสายเคเบิล R_o, L_o และ Z_m คืออิมพีแดนซ์ของขดลวดมอเตอร์ R_m, L_m

$$\begin{aligned} i'_u &= \frac{1}{Z_m} (v_{uE} - i_u Z_o - v'_{nE}) \\ i'_v &= \frac{1}{Z_m} (v_{vE} - i_v Z_o - v'_{nE}) \\ i'_w &= \frac{1}{Z_m} (v_{wE} - i_w Z_o - v'_{nE}) \end{aligned} \tag{3.73}$$

$$\begin{bmatrix} i'_u \\ i'_v \\ i'_w \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_m} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{uE} \\ v_{vE} \\ v_{wE} \end{bmatrix} - \frac{Z_o}{Z_m} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} - \frac{1}{Z_m} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} v'_{nE} \tag{3.74}$$

เมื่อแปลงสมการที่ (3.74) แยกตามโหนดโดยการคูณด้วยเมทริกซ์การแปลง $T_{3\phi}$ จะได้ผลดังสมการที่ (3.75) เมื่อ $i'_u + i'_v + i'_w = 0$ และ $v'_{nE} = v_{o,c} - Z_o i_{o,c}$ ตามวงจรมุมที่ 3.8

$$\begin{bmatrix} i'_{u,D} \\ i'_{v,D} \\ i'_{w,D} \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_m} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & | & 0 \\ 0 & 1 & 0 & | & 0 \\ 0 & 0 & 1 & | & 0 \\ 0 & 0 & 0 & | & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{u,D} \\ v_{v,D} \\ v_{w,D} \\ v_{o,c} \end{bmatrix} - \frac{Z_o}{Z_m} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & | & 0 \\ 0 & 1 & 0 & | & 0 \\ 0 & 0 & 1 & | & 0 \\ 0 & 0 & 0 & | & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{u,D} \\ i_{v,D} \\ i_{w,D} \\ i_{o,c} \end{bmatrix} \quad (3.75)$$

สมการกระแส i_{K1}, i_{K2}, i_{K3} จะเขียนได้ดังสมการที่ (3.76) และเขียนในรูปแบบเมทริกซ์ได้ดังสมการที่ (3.77) เมื่อ Z_s คืออิมพีแดนซ์ของความจุไฟฟ้าแบบแบ่งระหว่างสายเคเบิลกับกราวด์

$$\begin{aligned} i_{K1} &= \frac{1}{Z_s} (v_{uE} - i_u Z_o) \\ i_{K2} &= \frac{1}{Z_s} (v_{vE} - i_v Z_o) \\ i_{K3} &= \frac{1}{Z_s} (v_{wE} - i_w Z_o) \end{aligned} \quad (3.76)$$

$$\begin{bmatrix} i_{K1} \\ i_{K2} \\ i_{K3} \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_s} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{uE} \\ v_{vE} \\ v_{wE} \end{bmatrix} - \frac{Z_o}{Z_s} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} \quad (3.77)$$

เมื่อแปลงสมการที่ (3.77) แยกตามโหนดโดยการคูณด้วยเมทริกซ์การแปลง $T_{3\phi}$ จะได้ผลดังสมการที่ (3.78)

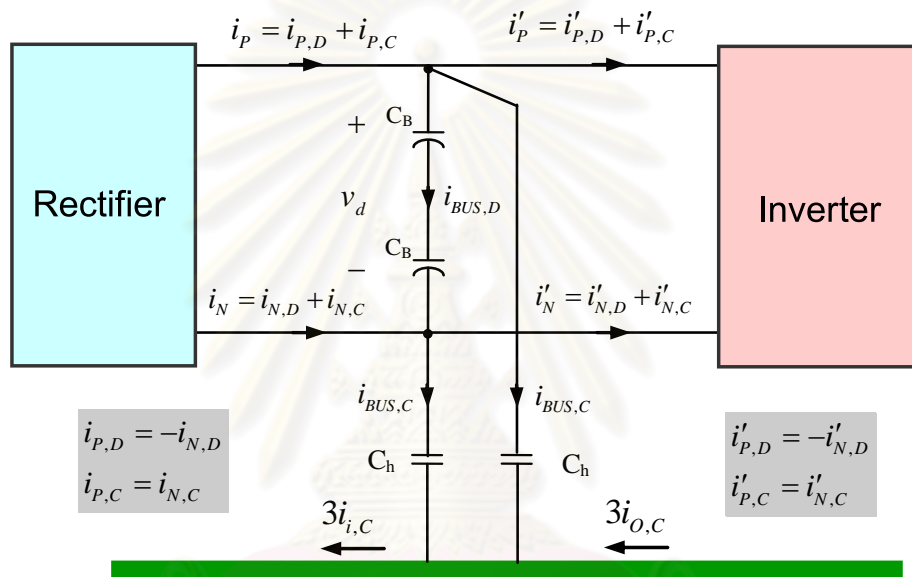
$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} i_{K1,D} \\ i_{K2,D} \\ i_{K3,D} \\ i_{o,c} \end{bmatrix} &= \frac{1}{Z_s} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & | & 0 \\ 0 & 1 & 0 & | & 0 \\ 0 & 0 & 1 & | & 0 \\ 0 & 0 & 0 & | & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{u,D} \\ v_{v,D} \\ v_{w,D} \\ v_{o,c} \end{bmatrix} - \frac{Z_o}{Z_s} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & | & 0 \\ 0 & 1 & 0 & | & 0 \\ 0 & 0 & 1 & | & 0 \\ 0 & 0 & 0 & | & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{u,D} \\ i_{v,D} \\ i_{w,D} \\ i_{o,c} \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{Z_s} \begin{bmatrix} 1/Z_s & 0 & 0 & | & 0 \\ 0 & 1/Z_s & 0 & | & 0 \\ 0 & 0 & 1/Z_s & | & 0 \\ 0 & 0 & 0 & | & 1/(Z_o + Z_s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{u,D} \\ v_{v,D} \\ v_{w,D} \\ v_{o,c} \end{bmatrix} - \frac{Z_o}{Z_s} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & | & 0 \\ 0 & 1 & 0 & | & 0 \\ 0 & 0 & 1 & | & 0 \\ 0 & 0 & 0 & | & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{u,D} \\ i_{v,D} \\ i_{w,D} \\ i_{o,c} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.78)$$

เมื่อนำสมการที่ (3.75) และ (3.78) แทนลงในสมการที่ (3.72) จะสามารถแสดงสมการกระแสที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ $[i_u \ i_v \ i_w]^T$ แยกเป็นโหนดร่วมและโหนดผลต่างได้เป็น

$$\begin{bmatrix} i_{u,D} \\ i_{v,D} \\ i_{w,D} \\ i_{o,C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/Z_{O,D} & 0 & 0 & | & 0 \\ 0 & 1/Z_{O,D} & 0 & | & 0 \\ 0 & 0 & 1/Z_{O,D} & | & 0 \\ 0 & 0 & 0 & | & 1/Z_{i,D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{u,D} \\ v_{v,D} \\ v_{w,D} \\ v_{o,C} \end{bmatrix} \quad (3.79)$$

เมื่อ $Z_{O,D} = Z_O + \frac{Z_S Z_m}{Z_S + Z_m}$ และ $Z_{O,C} = Z_O + Z_S$

3.3.5 สมการของวงจรบัสไฟตรง



รูปที่ 3.9 การแบ่งไหลของกระแสภายในวงจรที่บัสไฟตรง

จากวงจรในรูปที่ 3.9 กระแสที่ไหลเข้าออกขั้วบวกและลบของบัสไฟตรงประกอบด้วยส่วนที่เป็นโหมตร่วมและโหมตผลต่าง กระแสโหมตผลต่างซึ่งเป็นกระแสระหว่างสายจะไหลจากขั้วบวกของบัสไฟตรงผ่านตัวเก็บประจุ C_B ไปที่ขั้วลบของบัสไฟตรงหรือกลับกัน ดังนั้นจะได้ว่า $i_{P,D} = -i_{N,D}$ และ $i'_{P,D} = -i'_{N,D}$ กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_B จะมีค่าดังสมการที่ (3.80) ในขณะที่กระแสโหมตร่วมที่ไหลลงกราวด์โดยผ่านความจุไฟฟ้าแอบแฝง C_h คำนวณค่าได้ดังสมการที่ (3.81)

$$i_{BUS,D} = i_{P,D} - i'_{P,D} = -(i_{N,D} - i'_{N,D}) \quad (3.80)$$

$$i_{BUS,C} = i_{P,C} - i'_{P,C} = i_{N,C} - i'_{N,C} \quad (3.81)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสที่บัสไฟตรงแยกตามโหมตคำนวณได้ดังต่อไปนี้ จากรูปที่ 3.9 จะเขียนสมการแรงดันที่บัสไฟตรงได้ดังสมการที่ (3.82) และ (3.83)

$$\begin{aligned} v_{PE} &= v_d + v_{NE} \\ v_{NE} &= v_{NE} \end{aligned} \quad (3.82)$$

$$\begin{bmatrix} v_{PE} \\ v_{NE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} v_d + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} v_{NE} \quad (3.83)$$

เมื่อคูณสมการที่ (3.83) ด้วยเมตริกต์การแปลงโหนด $T_{1\phi}$ จะแสดงสมการแรงดันโหนดร่วมและโหนดผลต่างที่บัสไฟตรงดังสมการที่ (3.84)

$$\begin{bmatrix} v_{P,D} \\ v_{N,D} \\ v_{BUS,C} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix} v_d + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} v_{NE} \quad (3.84)$$

เมื่อ Z_B และ Z_h คืออิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ C_B และความจุไฟฟ้าแบบแฝง C_h ตามลำดับ จากรูปที่ 3.9 $v_d = Z_B i_{BUS,D}$ และในขณะที $v_{NE} = Z_h i_{BUS,C}$ ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสที่บัสไฟตรงแยกตามโหนดจะแสดงได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} v_{P,D} \\ v_{N,D} \\ v_{BUS,C} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left[\begin{array}{cc|c} Z_B & -Z_B & 0 \\ -Z_B & Z_B & 0 \\ \hline Z_B & -Z_B & 2Z_h \end{array} \right] \begin{bmatrix} i_{BUS,D} \\ -i_{BUS,D} \\ i_{BUS,C} \end{bmatrix} \quad (3.85)$$

โดยสรุปแล้วระบบขั้วเคลื่อนมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์สามารถที่จะแสดงพฤติกรรมสัญญาณแรงดันและกระแสของส่วนต่างๆ ในระบบแยกตามโหนดได้ดังตารางที่ 3.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.1 สมการสัญญาณโหมคร่วมและโหมคผลต่างของแต่ละองค์ประกอบย่อยของอินเวอร์เตอร์

		สมการสัญญาณโหมคร่วมและโหมคผลต่าง	
แหล่งจ่าย		$\begin{bmatrix} i'_{R,D} \\ i'_{S,D} \\ i'_{T,D} \\ i_{i,C} \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_i} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_R \\ e_S \\ e_T \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1/Z_{TH,D} & 0 & 0 & & 0 \\ 0 & 1/Z_{TH,D} & 0 & & 0 \\ 0 & 0 & 1/Z_{TH,D} & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & & 1/Z_{TH,C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{R,D} \\ v_{S,D} \\ v_{T,D} \\ v_{i,C} \end{bmatrix} \quad (3.86)$ $Z_{TH,D} = \frac{Z_i Z_X}{Z_i + Z_X}, \quad Z_{TH,C} = \frac{(Z_i + 3Z_g)(Z_X + 3Z_Y)}{Z_i + 3Z_g + Z_X + 3Z_Y}$	
	ในกรณีที่ทำงานในย่านนำกระแส		$\begin{bmatrix} v_{R,D} \\ v_{S,D} \\ v_{T,D} \\ v_{i,C} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} s_R & -s_R & 0 \\ s_S & -s_S & 0 \\ s_T & -s_T & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{P,D} \\ v_{N,D} \\ v_{BUS,C} \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \frac{Z_X}{Z_i + Z_X} \begin{bmatrix} 2\tilde{s}_R & -\tilde{s}_S & -\tilde{s}_T \\ -\tilde{s}_R & 2\tilde{s}_S & -\tilde{s}_T \\ -\tilde{s}_R & -\tilde{s}_S & 2\tilde{s}_T \\ \tilde{s}_R & \tilde{s}_S & \tilde{s}_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_R \\ e_S \\ e_T \end{bmatrix} \quad (3.87)$ $+ \frac{1}{2} Z_{TH,D} \begin{bmatrix} 3\tilde{s}_R - 1 \\ 3\tilde{s}_S - 1 \\ 3\tilde{s}_T - 1 \\ 1 \end{bmatrix} i_{i,C}$
		$\begin{bmatrix} i_{P,D} \\ i_{N,D} \\ i_{P,C} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} s_R & s_S & s_T & & 0 \\ -s_R & -s_S & -s_T & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_{R,D} \\ i'_{S,D} \\ i'_{T,D} \\ i_{i,C} \end{bmatrix} \quad (3.88)$	
วงจรเรียงกระแส		ในกรณีที่ทำงานไม่นำกระแส	$\begin{bmatrix} v_{R,D} \\ v_{S,D} \\ v_{T,D} \\ v_{i,C} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \sum_{m=R,S,T} s_m & -\sum_{m=R,S,T} s_m & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{P,D} \\ v_{N,D} \\ v_{BUS,C} \end{bmatrix} \quad (3.89)$ $+ \frac{Z_X}{Z_i + Z_X} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \tilde{s}_R - 1 & \tilde{s}_S - 1 & \tilde{s}_T - 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_R \\ e_S \\ e_T \end{bmatrix} + Z_{TH,D} \begin{bmatrix} 3\tilde{s}_R - 2 \\ 3\tilde{s}_S - 2 \\ 3\tilde{s}_T - 2 \\ -2 \end{bmatrix} i_{i,C}$
			$\begin{bmatrix} i_{P,D} \\ i_{N,D} \\ i_{P,C} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} s_R & s_S & s_T & & \sum_{m=R,S,T} s_m \\ -s_R & -s_S & -s_T & & -\sum_{m=R,S,T} s_m \\ 0 & 0 & 0 & & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_{R,D} \\ i'_{S,D} \\ i'_{T,D} \\ i_{i,C} \end{bmatrix} \quad (3.90)$

ตารางที่ 3.1 (ต่อ) สมการสัญญาณใหม่พร้อมและใหม่ผลต่างของแต่ละองค์ประกอบย่อยของอินเวอร์เตอร์

สมการสัญญาณใหม่พร้อมและใหม่ผลต่าง	
บัสไฟตรง	$\begin{bmatrix} v_{P,D} \\ v_{N,D} \\ v_{BUS,C} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} Z_B & -Z_B & 0 \\ -Z_B & Z_B & 0 \\ Z_B & -Z_B & 2Z_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{BUS,D} \\ -i_{BUS,D} \\ i_{BUS,C} \end{bmatrix} \quad (3.91)$ $i_{BUS,C} = i_{P,C} - i'_{P,C}, \quad i_{BUS,D} = i_{P,D} - i'_{P,D}$
วงจรอินเวอร์เตอร์	$\begin{bmatrix} v_{u,D} \\ v_{v,D} \\ v_{w,D} \\ v_{O,C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_u - \sum_{n=u,v,w} s_n / 3 & -\left(s_u - \sum_{n=u,v,w} s_n / 3\right) \\ s_v - \sum_{n=u,v,w} s_n / 3 & -\left(s_v - \sum_{n=u,v,w} s_n / 3\right) \\ s_w - \sum_{n=u,v,w} s_n / 3 & -\left(s_w - \sum_{n=u,v,w} s_n / 3\right) \\ \sum_{n=u,v,w} s_n / 3 - 1/2 & -\left(\sum_{n=u,v,w} s_n / 3 - 1/2\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{P,D} \\ v_{N,D} \\ v_{BUS,C} \end{bmatrix} \quad (3.92)$
	$\begin{bmatrix} i'_{P,D} \\ i'_{N,D} \\ i'_{P,C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_u & s_v & s_w & \sum_{n=u,v,w} s_n - 3/2 \\ -s_u & -s_v & -s_w & -\left(\sum_{n=u,v,w} s_n - 3/2\right) \\ 0 & 0 & 0 & 3/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{u,D} \\ i_{v,D} \\ i_{w,D} \\ i_{O,C} \end{bmatrix} \quad (3.93)$
โหลดที่ด้านออก	$\begin{bmatrix} i_{u,D} \\ i_{v,D} \\ i_{w,D} \\ i_{O,C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/Z_{O,D} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/Z_{O,D} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/Z_{O,D} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/Z_{O,C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{u,D} \\ v_{v,D} \\ v_{w,D} \\ v_{O,C} \end{bmatrix} \quad (3.94)$ $Z_{O,D} = Z_O + \frac{Z_S Z_m}{Z_S + Z_m}, \quad Z_{O,C} = Z_O + Z_S$

3.4 วงจรสมมูลใหม่พร้อมและใหม่ผลต่างที่แม่นยำของอินเวอร์เตอร์

สมการแรงดันและกระแสของขององค์ประกอบย่อยของอินเวอร์เตอร์ที่สรุปดังตารางที่ 3.1 สามารถนำมาเขียนเป็นวงจรสมมูลใหม่พร้อมและใหม่ผลต่างได้โดยแยกออกเป็น 2 กรณีตามย่านการทำงาน ของวงจรเรียงกระแสซึ่งมีสมการต่างกันคือ เมื่อวงจรเรียงกระแสทำงานในย่านนำกระแส และเมื่อวงจรเรียง กระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส

3.4.1 วงจรสมมูลในกรณีที่วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านนำกระแส

3.4.1.1 วงจรสมมูลใหม่พร้อมในกรณีที่วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านนำกระแส

การสร้างวงจรสมมูลใหม่พร้อมจากสมการในตารางที่ 3.1 ในลำดับแรกจำเป็นต้องนำสมการ แรงดันที่ด้านเข้าของวงจรเรียงกระแสและสมการแรงดันที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์เฉพาะส่วนที่เป็นแรงดัน ใหม่พร้อมมาพิจารณาและจัดรูปเพื่อให้เหมาะสมสำหรับการสร้างวงจรสมมูล จากสมการที่ (3.87) แรงดันใหม่ พร้อมที่ด้านเข้า $v_{i,C}$ จะมีสมการคือ

$$v_{i,C} = v_{BUS,C} + \frac{1}{2} \frac{Z_X}{Z_i + Z_X} (\tilde{s}_R e_R + \tilde{s}_S e_S + \tilde{s}_T e_T) + \frac{1}{2} Z_{TH,D} i_{i,C} \quad (3.95)$$

$v_{BUS,C}$ มีค่าเท่ากับ $\frac{v_d}{2} + v_{NE}$ ส่วนเทอม $\tilde{s}_R e_R + \tilde{s}_S e_S + \tilde{s}_T e_T$ ในสมการที่ (3.95) จะมีค่า เท่ากับแรงดันเฟสที่เป็นค่ามัธยฐาน ยกตัวอย่างเช่นกรณีที่ $e_R > e_S > e_T$ เมื่อวงจรเรียงกระแสทำงานในย่าน นำกระแสจะมีค่าฟังก์ชันการสวิตช์คือ $S_{rec} = [1 \ 0 \ -1]$ และ $\tilde{s}_{rec} = [0 \ 1 \ 0]$ จึงทำให้ $\tilde{s}_R e_R + \tilde{s}_S e_S + \tilde{s}_T e_T$ มีค่าเท่ากับ e_S ซึ่งเป็นค่ามัธยฐานของแรงดันทั้ง 3 เฟสในขณะนั้น ดังนั้นสมการที่ (3.95) จะสามารถเขียนได้ ใหม่ดังสมการที่ (3.96)

$$\begin{aligned} v_{i,C} &= v_{NE} + \frac{v_d}{2} + \frac{1}{2} \frac{Z_X}{Z_i + Z_X} \text{med}(e_R, e_S, e_T) + \frac{1}{2} Z_{TH,D} i_{i,C} \\ &= v_{NE} + v_{rec,C} + \frac{1}{2} Z_{TH,D} i_{i,C} \end{aligned} \quad (3.96)$$

โดยที่ $\text{med}(e_R, e_S, e_T)$ แทนฟังก์ชันค่ามัธยฐาน และนิยามให้ $v_{rec,C} = \frac{v_d}{2} + \frac{1}{2} \frac{Z_X}{Z_i + Z_X} \text{med}(e_R, e_S, e_T)$ จากสมการที่ (3.92) แรงดันใหม่พร้อมที่ด้านออก $v_{o,C}$ จะมีสมการคือ

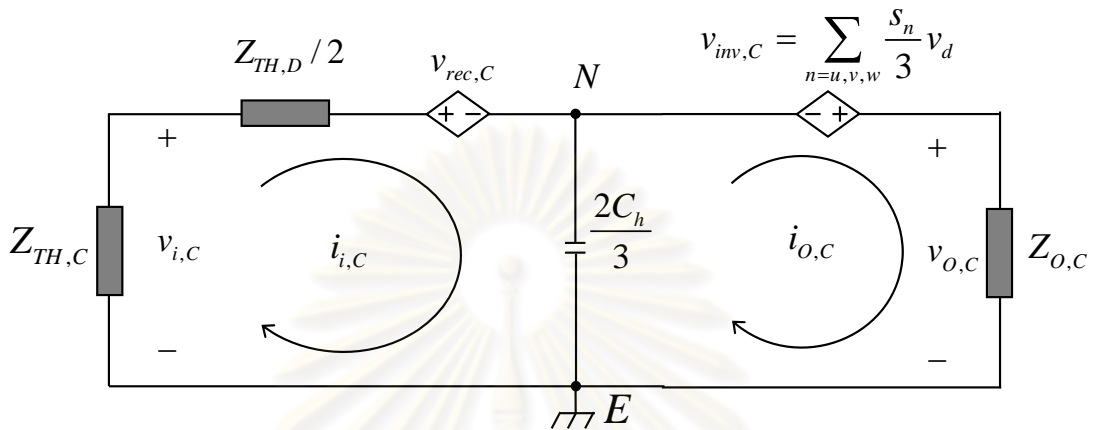
$$v_{o,C} = \left(\sum_{n=u,v,w} s_n / 3 - \frac{1}{2} \right) v_{P,D} - \left(\sum_{n=u,v,w} s_n / 3 - \frac{1}{2} \right) v_{N,D} + v_{BUS,C} \quad (3.97)$$

เนื่องจาก $v_{P,D} = -v_{N,D} = v_d / 2$ สมการที่ (3.97) จึงสามารถเขียนได้ใหม่ดังสมการที่ (3.98)

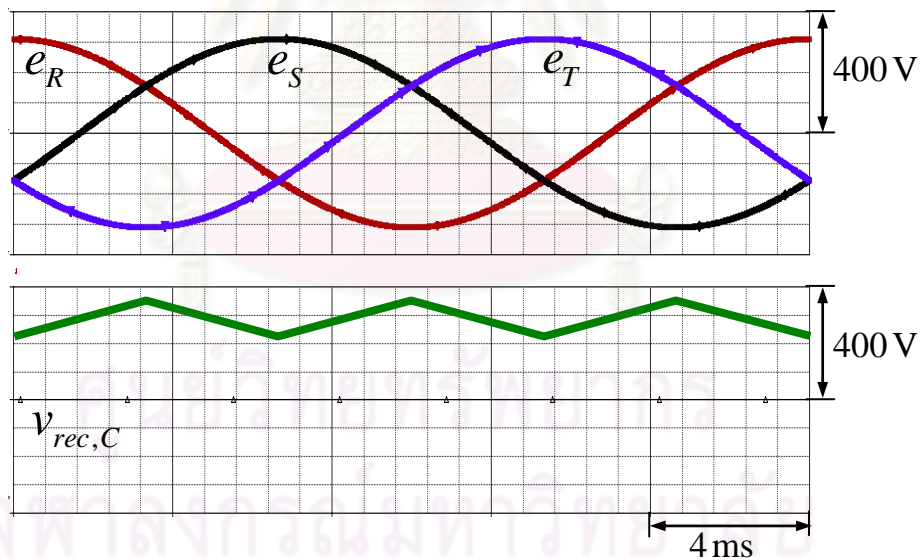
$$v_{o,C} = v_{NE} + \sum_{n=u,v,w} (s_n / 3) v_d = v_{NE} + v_{inv,C} \quad (3.98)$$

เมื่อนิยามให้ $v_{inv,C} = \sum_{n=u,v,w} (s_n / 3) v_d$

เมื่อนำสมการที่ (3.96) และ (3.98) ไปประกอบกับสมการสัญญาณโหมตร่วมส่วนอื่นๆ ในตารางที่ 3.1 จะสามารถสร้างเป็นวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 วงจรสมมูลโหมตร่วมของอินเวอร์เตอร์ในกรณีที่มีวงจรเรียงกระแสทำงานในย่านนำกระแส

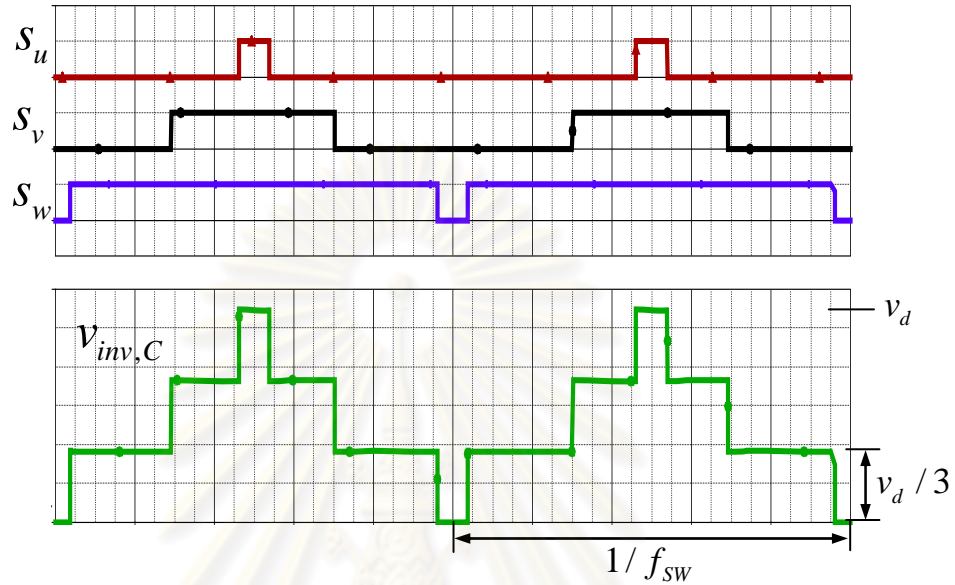


รูปที่ 3.11 แรงดันโหมตร่วมที่ด้านเข้า $v_{rec,C}$ เมื่อวงจรเรียงกระแสทำงานในย่านนำกระแส (คำนวณจากสมการ

$$\text{ที่ (3.96) เมื่อ } C_x = 0 \text{ ทำให้ } v_{rec,C} = \frac{v_d}{2} + \frac{1}{2} \text{med}(e_R, e_S, e_T))$$

วงจรสมมูลโหมตร่วมในรูปที่ 3.10 แสดงให้เห็นว่ามีการเชื่อมโยงระหว่างโหมตเกิดขึ้นเนื่องจาก e_R, e_S, e_T และ v_d ซึ่งเป็นแรงดันโหมตผลต่างถูกแปลงให้เป็นแรงดันโหมตร่วม $v_{rec,C}$ และ $v_{inv,C}$ เมื่อมองเข้ามาจากด้านแหล่งจ่ายจะมีแรงดันโหมตร่วมที่เกิดจากการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแส $v_{rec,C}$ ปรากฏอยู่ โดยแรงดันดังกล่าวประกอบด้วยแรงดันบัสไฟตรง v_d และแรงดันค่ามัธยฐานของแรงดันแหล่งจ่าย 3 เฟส

e_R, e_S, e_T ซึ่งมีความถี่หลักมูลเท่ากับ 150 Hz ตามจังหวะการสลับเปลี่ยนของแรงดันเฟส e_R, e_S, e_T ดังรูปที่ 3.11 และที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์จะมีแรงดันโหมตร่วมที่เกิดจากการสวิตช์ของซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตามจังหวะการสวิตช์ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แรงดันโหมตร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ $v_{inv,C}$ คำนวณจากสมการที่ (3.98)

3.4.1.2 วงจรสมมูลโหมตร่วมในกรณีนี้ที่วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านนำกระแส

จากสมการที่ (3.87) เนื่องจาก $v_{P,D} = -v_{N,D} = v_d / 2$ ดังนั้นจะสามารถเขียนแรงดันโหมตร่วมต่างที่ด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส $v_{R,D}, v_{S,D}, v_{T,D}$ ได้ดังสมการที่ (3.99) และเมื่อนิยามเทอมแรงดันที่เกิดจากแรงดันบัสไฟตรง v_d และแหล่งจ่าย e_R, e_S, e_T ดังสมการที่ (3.100) สมการที่ (3.99) จะเขียนได้ใหม่ดังสมการที่ (3.101)

$$\begin{aligned} v_{R,D} &= s_R \frac{v_d}{2} + \frac{3}{2} \frac{Z_X}{Z_i + Z_X} \tilde{s}_R e_R - \frac{1}{2} \frac{Z_X}{Z_i + Z_X} \text{med}(e_R, e_S, e_T) + Z_{TH,D} \frac{(3\tilde{s}_R - 1)}{2} i_{i,C} \\ v_{S,D} &= s_S \frac{v_d}{2} + \frac{3}{2} \frac{Z_X}{Z_i + Z_X} \tilde{s}_S e_S - \frac{1}{2} \frac{Z_X}{Z_i + Z_X} \text{med}(e_R, e_S, e_T) + Z_{TH,D} \frac{(3\tilde{s}_S - 1)}{2} i_{i,C} \\ v_{T,D} &= s_T \frac{v_d}{2} + \frac{3}{2} \frac{Z_X}{Z_i + Z_X} \tilde{s}_T e_T - \frac{1}{2} \frac{Z_X}{Z_i + Z_X} \text{med}(e_R, e_S, e_T) + Z_{TH,D} \frac{(3\tilde{s}_T - 1)}{2} i_{i,C} \end{aligned} \quad (3.99)$$

$$\begin{aligned} v_{R,D}^* &= s_R \frac{v_d}{2} + \frac{3}{2} \frac{Z_X}{Z_i + Z_X} \tilde{s}_R e_R - \frac{1}{2} \frac{Z_X}{Z_i + Z_X} \text{med}(e_R, e_S, e_T) \\ v_{S,D}^* &= s_S \frac{v_d}{2} + \frac{3}{2} \frac{Z_X}{Z_i + Z_X} \tilde{s}_S e_S - \frac{1}{2} \frac{Z_X}{Z_i + Z_X} \text{med}(e_R, e_S, e_T) \\ v_{T,D}^* &= s_T \frac{v_d}{2} + \frac{3}{2} \frac{Z_X}{Z_i + Z_X} \tilde{s}_T e_T - \frac{1}{2} \frac{Z_X}{Z_i + Z_X} \text{med}(e_R, e_S, e_T) \end{aligned} \quad (3.100)$$

$$\begin{aligned}
v_{R,D} &= v_{R,D}^* + Z_{TH,D} \frac{(3\tilde{s}_R - 1)}{2} i_{i,C} \\
v_{S,D} &= v_{S,D}^* + Z_{TH,D} \frac{(3\tilde{s}_S - 1)}{2} i_{i,C} \\
v_{T,D} &= v_{T,D}^* + Z_{TH,D} \frac{(3\tilde{s}_T - 1)}{2} i_{i,C}
\end{aligned} \tag{3.101}$$

จากสมการที่ (3.92) สามารถเขียนสมการแรงดันโหมดผลต่างที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ $v_{u,D}, v_{v,D}, v_{w,D}$ ได้ดังสมการที่ (3.102)

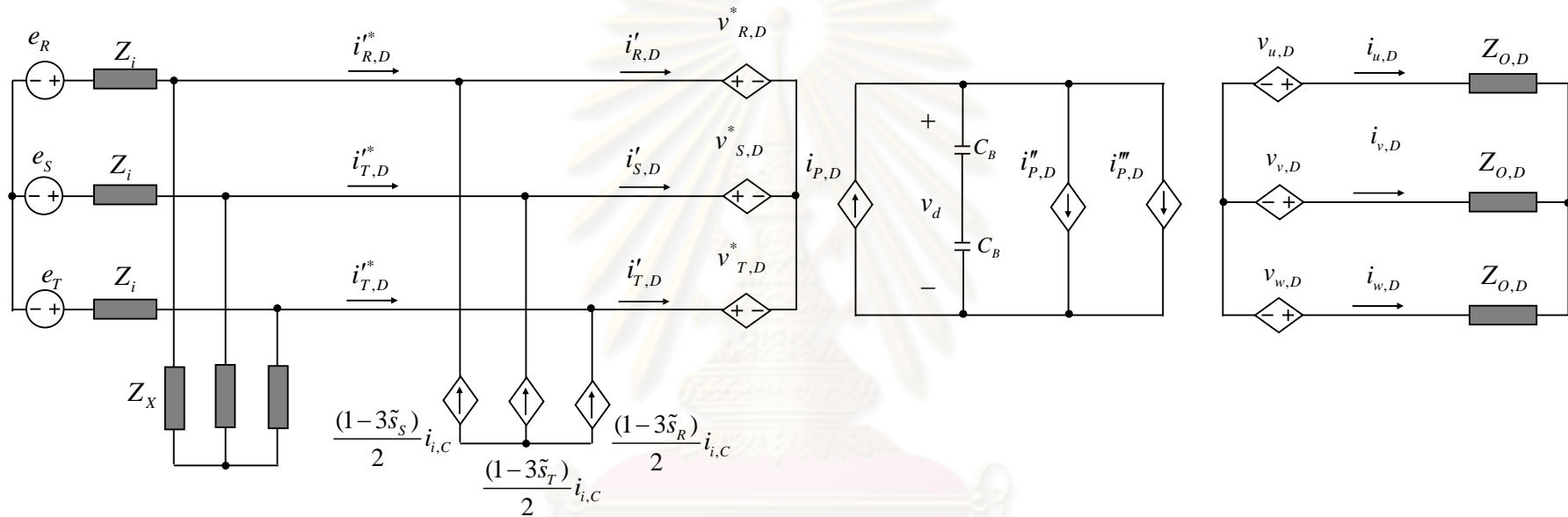
$$\begin{aligned}
v_{u,D} &= \left(s_u - \sum_{n=u,v,w} s_n / 3 \right) v_d \\
v_{v,D} &= \left(s_v - \sum_{n=u,v,w} s_n / 3 \right) v_d \\
v_{w,D} &= \left(s_w - \sum_{n=u,v,w} s_n / 3 \right) v_d
\end{aligned} \tag{3.102}$$

เมื่อนำสมการที่ (3.99) และ (3.100) ไปประกอบกับสมการสัญญาณโหมดร่วมส่วนอื่นๆ ในตารางที่ 3.1 จะสามารถเขียนเป็นวงจรมุมูลได้ดังรูปที่ 3.13 เมื่อ

$$\begin{aligned}
i_{R,D}^* &= i'_{R,D} - \frac{(1-3\tilde{s}_R)}{2} i_{i,C} \\
i_{S,D}^* &= i'_{S,D} + \frac{(3\tilde{s}_S - 1)}{2} i_{i,C} \\
i_{T,D}^* &= i'_{T,D} + \frac{(3\tilde{s}_T - 1)}{2} i_{i,C}
\end{aligned} \tag{3.103}$$

$$\begin{aligned}
i_{P,D} &= \sum_{m=R,S,T} (s_m \cdot i_{m,D}^*) / 2 = \sum_{m=R,S,T} (s_m \cdot i'_{m,D}) / 2 + \left(\frac{1}{4} \sum_{m=R,S,T} s_m (3\tilde{s}_m - 1) \right) i_{i,C} \\
&= \sum_{m=R,S,T} (s_m \cdot i_{m,D}^*) / 2
\end{aligned} \tag{3.104}$$

$$\begin{aligned}
i_{P,D}^m &= \sum_{n=u,v,w} (s_n \cdot i_{n,D}) \\
i_{P,D}^m &= \left(\sum_{n=u,v,w} s_n - 3/2 \right) \cdot i_{O,C}
\end{aligned} \tag{3.105}$$



รูปที่ 3.13 วงจรสมมูลใหม่ผลต่างของอินเวอร์เตอร์ในกรณีที่วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านนำกระแส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วงจรสมมูลใหม่รวมในรูปที่ 3.13 แสดงให้เห็นว่ามีการเชื่อมโยงระหว่างโหมดเกิดขึ้น กระแสโหมดผลต่างในวงจรส่วนหนึ่งจะเกิดขึ้นจากการแปลงโหมดของกระแสโหมดรวม $i_{i,C}$ หรือ $i_{o,C}$ ซึ่งเมื่อพิจารณาที่วงจรด้านหน้าจะเห็นว่าการไหลวนของกระแสโหมดผลต่าง $\frac{1}{2}[1-3\tilde{s}_R \ 1-3\tilde{s}_S \ 1-3\tilde{s}_T]^T i_{i,C}$ ที่เกิดจากการแปลงโหมดของกระแสโหมดรวม $i_{i,C}$ เมื่อพิจารณาที่วงจรบัสไฟตรงจะเห็นว่า ในขณะที่การแปลงโหมดของกระแสโหมดรวม $i_{o,C}$ ทำให้เกิดกระแสบัสไฟตรง $i_{p,D}''$ ดังสมการที่ (3.105) แต่ $i_{i,C}$ ไม่มีผลต่อกระแสบัสไฟตรง เนื่องจากกระแสบัสไฟตรงหน้าตัวเก็บประจุ $i_{p,D}$ มีเฉพาะส่วนที่เกิดจากกระแสโหมดผลต่างเท่านั้น และส่วนที่เกิดจากกระแสโหมดรวม $\left(\frac{1}{4} \sum_{m=R,S,T} s_m (3\tilde{s}_m - 1)\right) i_{i,C}$ มีค่าเป็นศูนย์

3.4.2 วงจรสมมูลเมื่อวงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส

3.4.2.1 วงจรสมมูลใหม่รวมในกรณีที่วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส

สมการแรงดันด้านเข้าของวงจรเรียงกระแสในกรณีนี้มีค่าแตกต่างจากในกรณีที่วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านนำกระแส จากสมการที่ (3.89) แรงดันใหม่รวมที่ด้านเข้า $v_{i,C}$ จะเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$v_{i,C} = \frac{1}{2} \left(\sum_{m=R,S,T} s_m \right) v_d + v_{BUS,C} + \frac{Z_X}{Z_i + Z_X} \sum_{m=R,S,T} (\tilde{s}_m - 1) e_m + 2Z_{TH,D} i_{i,C} \quad (3.106)$$

เครื่องหมายของกระแสโหมดรวม $i_{i,C}$ เป็นตัวแปรที่กำหนดฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแส S_{rec} และ \tilde{S}_{rec} ตัวอย่างเช่นเมื่อ $e_R > e_S > e_T$ และ $i_{i,C} > 0$ จะทำให้ $S_{rec} = [1 \ 0 \ 0]$ และ $\tilde{S}_{rec} = [0 \ 1 \ 1]$ หรือในกรณีที่ $i_{i,C} < 0$ จะทำให้ $S_{rec} = [0 \ 0 \ -1]$ และ $\tilde{S}_{rec} = [1 \ 1 \ 0]$ เป็นต้น ในกรณีที่ $i_{i,C} > 0$ สามารถสรุปได้ว่า $\sum_{m=R,S,T} s_m = 1$ และ $\sum_{m=R,S,T} (\tilde{s}_m - 1) e_m = -\max(e_R, e_S, e_T)$ ส่วนในกรณีที่ $i_{i,C} < 0$ จะได้ว่า $\sum_{m=R,S,T} s_m = -1$ และ $\sum_{m=R,S,T} (\tilde{s}_m - 1) e_m = -\min(e_R, e_S, e_T)$ ดังนั้นสมการที่ (3.106) จึงสามารถเขียนให้พิจารณาได้ง่ายขึ้นดังสมการ

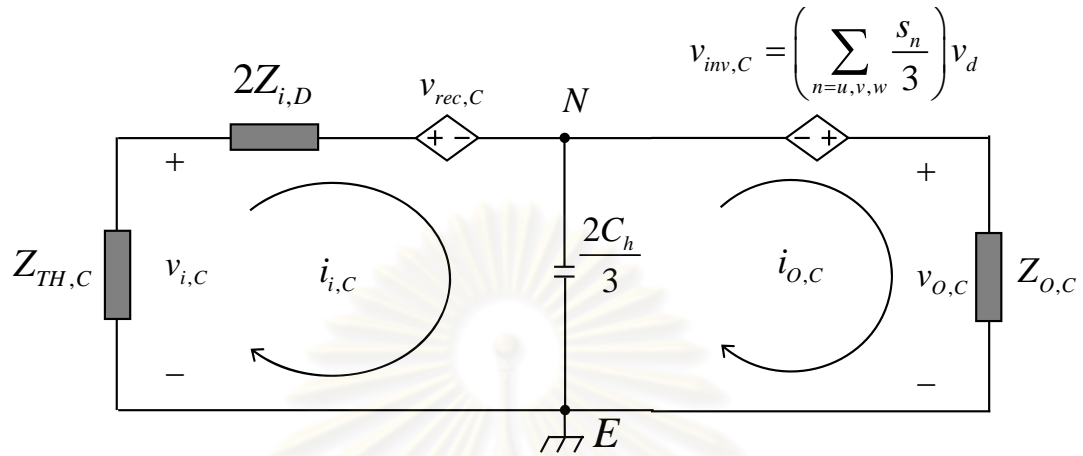
$$v_{i,C} = \begin{cases} v_d + v_{NE} - \frac{Z_X}{Z_i + Z_X} \max(e_R, e_S, e_T) + 2Z_{TH,D} i_{i,C} & (i_{i,C} > 0) \\ v_{NE} - \frac{Z_X}{Z_i + Z_X} \min(e_R, e_S, e_T) + 2Z_{TH,D} i_{i,C} & (i_{i,C} < 0) \end{cases} \quad (3.107)$$

$$= v_{rec,C} + v_{NE} + 2Z_{TH,D} i_{i,C}$$

เมื่อนิยามให้

$$v_{rec,C} = \begin{cases} v_d - \frac{Z_X}{Z_i + Z_X} \max(e_R, e_S, e_T) & (i_{i,C} > 0) \\ -\frac{Z_X}{Z_i + Z_X} \min(e_R, e_S, e_T) & (i_{i,C} < 0) \end{cases} \quad (3.108)$$

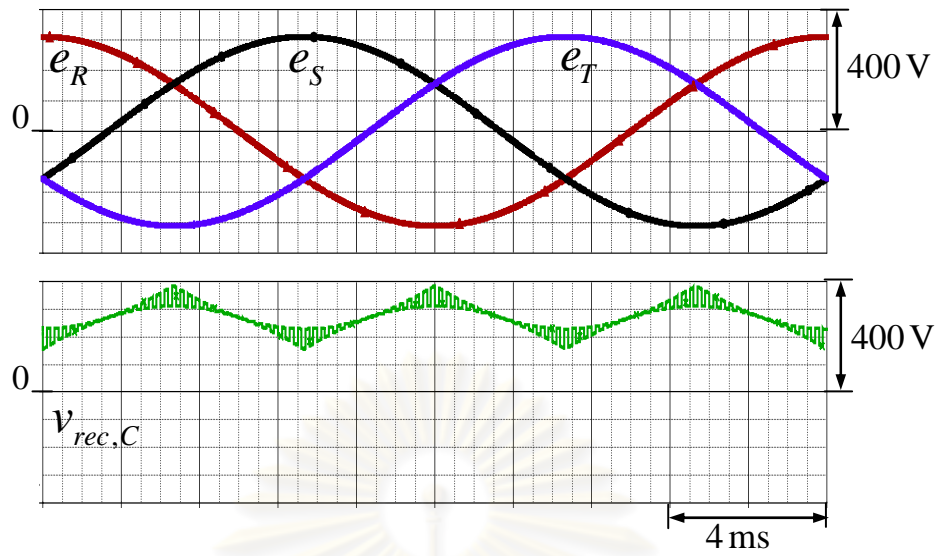
เมื่อนำสมการที่ (3.107) ไปพิจารณาร่วมกับสมการอื่นๆ ในตารางที่ 3.1 จะสามารถเขียน วงจรสมมูลใหม่รวมได้ดังรูปที่ 3.14



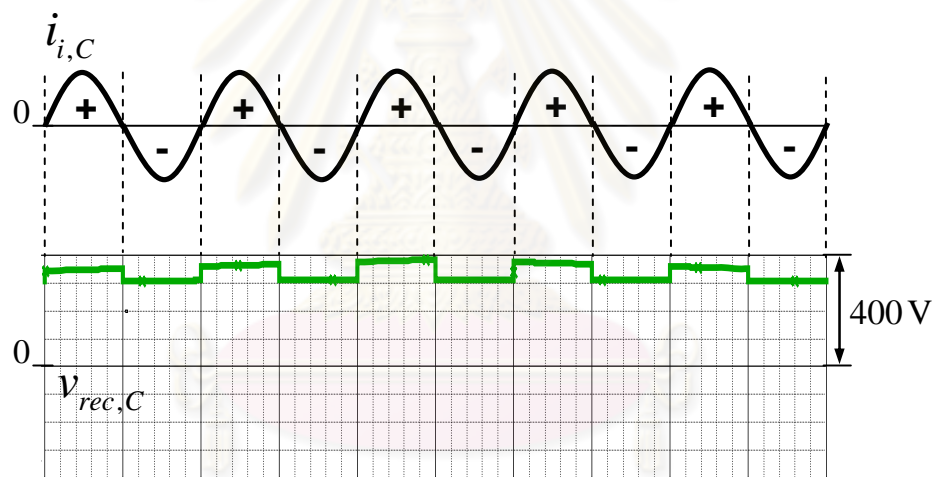
รูปที่ 3.14 วงจรสมมูลใหม่รวมของอินเวอร์เตอร์ในกรณีที่วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส

วงจรสมมูลใหม่รวมในย่านนำกระแส (รูปที่ 3.10) กับย่านไม่นำกระแส (รูปที่ 3.14) มีความคล้ายคลึงกันมาก แต่มีความแตกต่างในค่าอิมพีแดนซ์สมมูลด้านแหล่งจ่าย และแรงดันใหม่รวม $v_{rec,C}$ ที่เกิดจากการสวิตช์ของไดโอด แรงดันใหม่รวมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ $v_{inv,C}$ ในกรณีที่วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแสมีลักษณะเช่นเดียวกับในย่านนำกระแส กล่าวคือ มีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดตามจังหวะการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ดังรูปที่ 3.12 แต่แรงดันใหม่รวมที่ด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส $v_{i,C}$ ในย่านไม่นำกระแสจะแตกต่างจากค่าในย่านนำกระแสจากสมการที่ (3.107) $v_{rec,C}$ มีการเปลี่ยนแปลงตามเครื่องหมายของกระแสใหม่รวม $i_{i,C}$ ซึ่งโดยทั่วไปจะแกว่งด้วยความถี่สูงมากกว่าความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ดังรูปที่ 3.15

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก) ในสเกลเวลาของความถี่สายกำลัง 50 Hz



ข) ภาพขยายทางแกนเวลาเพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงของ $v_{rec,C}$ ตามเครื่องหมายของกระแสไหลรวม

รูปที่ 3.15 แรงดันโหมตรวมที่ด้านเข้า $v_{rec,C}$ จากการคำนวณ ($C_X = 0$) เมื่อวงจรเรียงกระแสทำงาน
ในย่านไม่นำกระแส

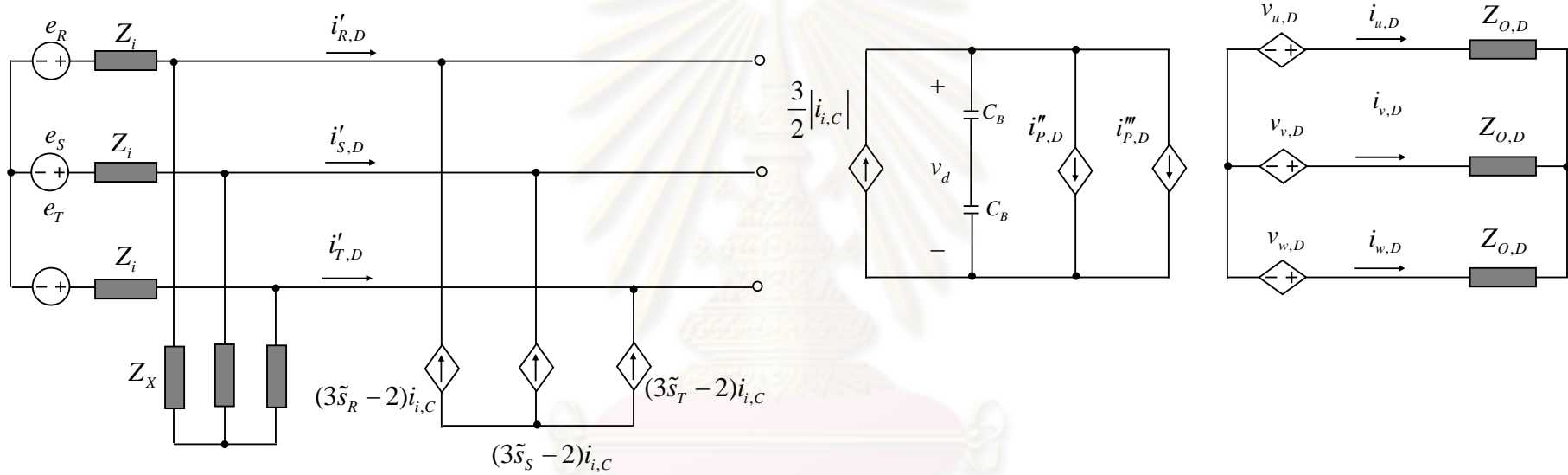
3.4.2.2 วงจรสมมูลใหม่ผลต่างในกรณีที่วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส

เมื่อพิจารณาสมการที่ (3.89) ซึ่งเป็นสมการแรงดันโหมดที่ด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส และสมการที่ (3.86) จะได้ว่า เมื่อวงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส วงจรด้านแหล่งจ่ายจะเสมือนกับเปิดวงจรอยู่โดยไม่มีการเชื่อมต่อกับวงจรเรียงกระแสดังวงจรสมมูลในรูปที่ 3.16 ในกรณีนี้กระแสโหมดผลต่างที่ไหลผ่านแหล่งจ่ายเข้าสู่วงจรเรียงกระแส $[i'_{R,D} \ i'_{S,D} \ i'_{T,D}]^T$ จะมีเพียงกระแสส่วนที่เกิดจากการแปลงโหมดของกระแสโหมดรวมคือ $[3i_{R'} - 2 \ 3i_{S'} - 2 \ 3i_{T'} - 2]^T i_{i,C}$ เท่านั้น แรงดันโหมดผลต่างที่ด้านเข้าของวงจรเรียงกระแสจะเป็นไปตามแหล่งจ่าย e_R, e_S, e_T และอิมพีแดนซ์ Z_i, Z_x แต่จะไม่ขึ้นอยู่กับแรงดันบัลไฟตรง

วงจรสมมูลใหม่ผลต่างในรูปที่ 3.13 และ 3.16 แสดงให้เห็นว่าการแปลงโหมดของกระแสโหมดรวม $i_{o,C}$ ทำให้เกิดกระแสโหมดผลต่างที่บัลไฟตรง $i''_{p,D}$ เหมือนกัน แต่มีความแตกต่างกันตรงที่ในย่านไม่นำกระแสที่กระแสโหมดรวมด้านเข้า $i_{i,C}$ จะถูกแปลงให้เป็นกระแสโหมดผลต่างที่บัลไฟตรงในลักษณะเรียงกระแสด้วย ทำให้เกิดการอัดประจุบัลไฟตรงโดยกระแสโหมดรวม $i_{i,C}$ ตลอดเวลา

วงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ได้จากการพิจารณาทั้งวงจรเรียงกระแสด้านเข้าและวงจรอินเวอร์เตอร์ด้านหลังควบคู่กัน และได้จากผลการวิเคราะห์ในเชิงสมการที่แสดงปริมาณสัญญาณในแต่ละโหมดของแรงดันและกระแสขณะหนึ่ง วงจรสมมูลที่ได้นี้จึงเป็นวงจรสมมูลที่แม่นยำไม่มีการประมาณหรือละเลยผลจากการทำงานขององค์ประกอบต่างๆ ภายในอินเวอร์เตอร์ นอกจากนี้ยังสามารถอธิบายพฤติกรรมของอินเวอร์เตอร์ได้ครอบคลุมทุกความถี่สัญญาณ โดยไม่มีการจำกัดเฉพาะสำหรับความถี่ต่ำหรือความถี่สูงเพียงอย่างเดียว วงจรสมมูลที่นำเสนอนี้จึงสามารถนำไปใช้วิเคราะห์พฤติกรรมของกระแสโหมดรวมเมื่อไหลผ่านวงจรเรียงกระแสด้านหน้าได้เป็นอย่างดี และนำไปสู่การอธิบายกลไกของปรากฏการณ์การอัดประจุบัลไฟตรงโดยกระแสโหมดรวมได้

ศูนย์วิทยพัชกร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.16 วงจรสมมูลใหม่ผลต่างของอินเวอร์เตอร์ในกรณีที่วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

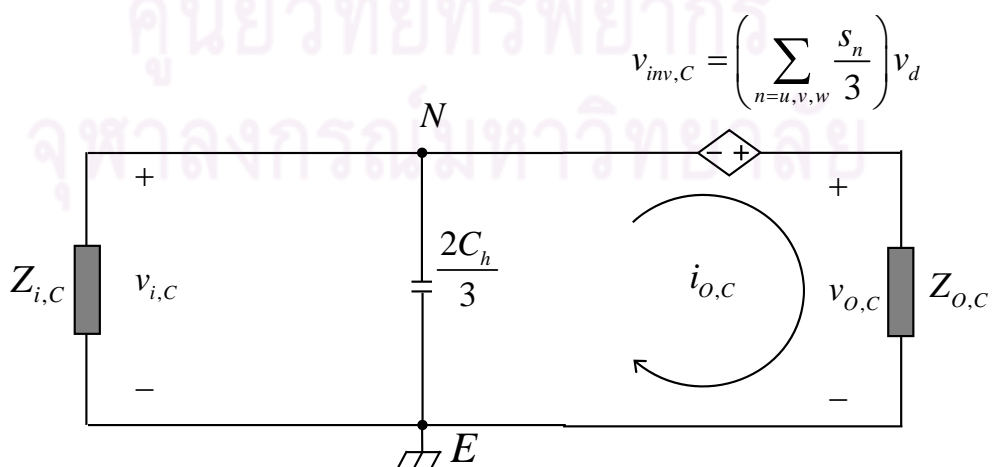
3.5 การวิเคราะห์ปรากฏการณ์การอัดประจุที่บัสไฟตรงโดยกระแสไหลมุดร่วมด้วยวงจรมุม

การวิเคราะห์พฤติกรรมของอินเวอร์เตอร์ที่ส่งผลต่อการเกิดปรากฏการณ์การอัดประจุที่บัสไฟตรงจะสามารถแยกได้เป็น 2 ส่วนได้แก่ 1) พฤติกรรมของกระแสไหลมุดร่วมซึ่งเป็นสาเหตุของปรากฏการณ์โดยพฤติกรรมดังกล่าวนี้จะวิเคราะห์ได้จากลักษณะแรงดันและอิมพีแดนซ์ในวงจรมุมไหลมุดร่วม 2) กลไกการเกิดปรากฏการณ์การอัดประจุที่บัสไฟตรง ซึ่งอธิบายได้จากกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุที่บัสไฟตรงในวงจรมุมไหลมุดผลต่าง

3.5.1 พฤติกรรมของกระแสไหลมุดร่วมในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม

งานวิจัยในอดีต [1]-[4] วิเคราะห์พฤติกรรมของกระแสไหลมุดร่วมที่เกิดขึ้นจากอินเวอร์เตอร์โดยละเอียดผลของวงจรมุมกระแสด้านหน้าและพิจารณาเฉพาะที่ย่านความถี่สูง ภายใต้เงื่อนไขดังกล่าววงจรมุมไหลมุดร่วมของอินเวอร์เตอร์แสดงได้ดังรูปที่ 3.17 ดังนั้นพฤติกรรมของกระแสไหลมุดร่วมตามที่เข้าใจในอดีตจะอธิบายว่ากระแสไหลมุดร่วมเกิดขึ้นจากการกระตุ้นโดยแรงดันไหลมุดร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ $v_{inv,C}$ กลายเป็นกระแส $i_{o,C}$ ไหลผ่านโหลด $Z_{o,C}$ และแบ่งไหลไปที่บัสไฟตรงและวงจรมุมด้านหลังจ่ายผ่านความจุไฟฟ้าแอบแฝงระหว่างสวิตช์กำลังกับซิงก์ระบายความร้อน $2C_h/3$ และอิมพีแดนซ์ด้านหลังจ่าย $Z_{i,C}$ ตามลำดับจากลักษณะของแรงดันไหลมุดร่วม $v_{inv,C}$ ที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบซึ้นบันไดด้วยขนาดคงที่เท่ากับ $v_d/3$ จึงทำให้กระแสไหลมุดร่วมเกิดขึ้นตามจังหวะการเปลี่ยนแปลงแบบซึ้นบันไดของ $v_{inv,C}$ โดยมีขนาดค่ายอดคงที่เท่ากันเสมอ

อย่างไรก็ตามวงจรมุมไหลมุดร่วมของอินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 3.10 และ 3.14 แสดงให้เห็นว่ากระแสไหลมุดร่วมที่ไหลในวงจรมุมจะมีพฤติกรรมต่างกันขึ้นกับสภาวะการทำงานของวงจรมุมกระแสในขณะนั้น โดยจะมีแรงดันไหลมุดร่วมที่เกิดจากวงจรมุมกระแสต่างกัน รวมทั้งมีค่าอิมพีแดนซ์ด้านหลังจ่ายที่ต่างกันด้วย



รูปที่ 3.17 วงจรมุมไหลมุดร่วมของอินเวอร์เตอร์เมื่อละเลยผลจากการทำงานของวงจรมุมกระแสด้านหน้า

[1] ย่านที่วงจรวีจกรเรียงกระแสนำกระแส

ในช่วงที่วงจรวีจกรเรียงกระแสทำงานในย่านนำกระแสดังรูปที่ 3.10 ฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรวีจกรเรียงกระแสจะไม่มีเปลี่ยนแปลงตามเครื่องหมายของกระแสไหลร่วมเหมือนในกรณีรูปที่ 3.14 แรงดันไหลร่วมทางด้านเข้า $v_{rec,C}$ จะถือได้ว่ามีค่าคงที่ตลอดคาบการสวิตช์หนึ่งๆ จึงไม่มีผลต่อพฤติกรรมของกระแสไหลร่วมในย่านความถี่สูง ดังนั้นทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะการสวิตช์ของวงจรวีจกรอินเวอร์เตอร์จะทำให้เกิดกระแสไหลร่วมความถี่สูงที่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงเป็นแบบขั้นของแรงดันไหลร่วม $v_{inv,C}$ จากวงจรวีจกรอินเวอร์เตอร์เป็นหลัก

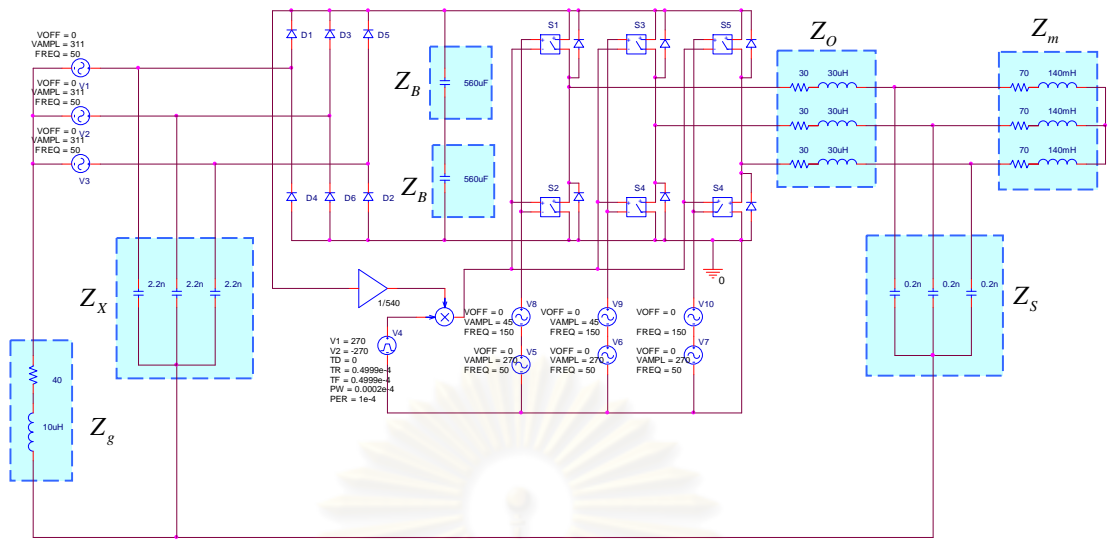
[2] ย่านที่วงจรวีจกรเรียงกระแสไม่นำกระแส

ในช่วงที่วงจรวีจกรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแสดังรูปที่ 3.14 แรงดันไหลร่วมทางด้านเข้า $v_{rec,C}$ จะเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรวีจกรเรียงกระแส เนื่องจากการแกว่งของกระแสไหลร่วมโดยทั่วไปจะมีความถี่สูงและเกิดในช่วงเวลาสั้น ๆ ในขณะที่วงจรวีจกรอินเวอร์เตอร์อยู่ในสถานะการสวิตช์หนึ่ง ดังนั้นในการพิจารณาพฤติกรรมของกระแสไหลร่วมที่ความถี่สูง แรงดันไหลร่วมที่เกิดจากวงจรวีจกรอินเวอร์เตอร์ $v_{inv,C}$ จะถือได้ว่ามีค่าคงที่แต่แรงดันไหลร่วมด้านเข้า $v_{rec,C}$ จะมีการแกว่งตามเครื่องหมายของกระแสไหลร่วมด้านเข้า $i_{i,C}$ ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.15 ข) เมื่อพิจารณาจากทิศทางของแรงดันจะพบว่าแรงดันไหลร่วมด้านเข้า $v_{rec,C}$ จะมีพฤติกรรมคล้ายความต้านทานที่แปรผันกับค่ากระแสไหลร่วมส่งผลให้เกิดการหน่วงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีที่วงจรวีจกรเรียงกระแสทำงานในย่านนำกระแส นอกจากนี้แรงดันไหลร่วมด้านเข้า $v_{rec,C}$ ยังมีทิศทางที่หักล้างกับแรงดันไหลร่วมที่เกิดจากวงจรวีจกรอินเวอร์เตอร์ $v_{inv,C}$ จึงมีทำให้นขนาดการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดของแรงดันไหลร่วมโดยรวมลดลงเหลือต่ำกว่าค่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงเวลาที่ $v_{rec,C}$ มีค่ายอดถึงยอดสูง โดยสรุปแล้วผลจาก $v_{rec,C}$ ที่เกิดในช่วงเวลาที่วงจรวีจกรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส คือกระแสไหลร่วมมีขนาดค่ายอดของการแกว่งลดลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดของแรงดันไหลร่วมโดยรวมของวงจรมีขนาดลดลง มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงในวงจรมีเพิ่มขึ้น

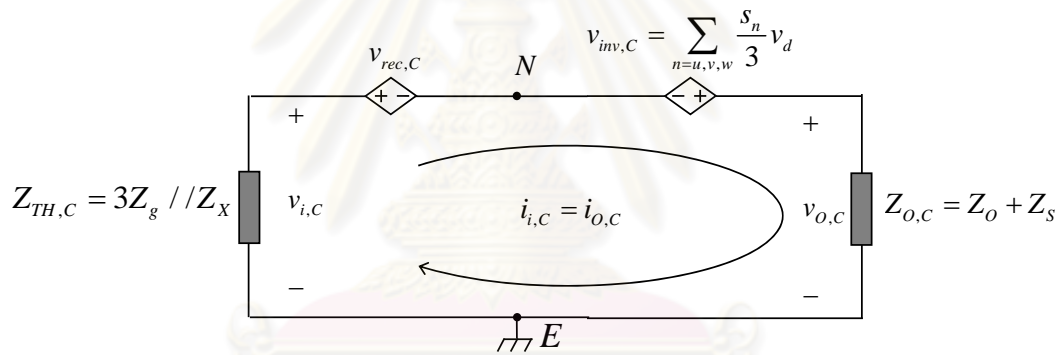
การวิเคราะห์ข้างต้นสามารถยืนยันได้ด้วยการผลจำลองจากวงจรวีจกรอินเวอร์เตอร์รูปที่ 3.18 ซึ่งอิมพีแดนซ์ของวงจรส่วนต่างๆ มีค่าดังนี้

$$Z_g : R_g = 40\Omega, L_g = 10\mu\text{H}, Z_x : C_x = 2.2\text{nF}, Z_B : C_B = 560\mu\text{F}, Z_h : C_h = 0, \\ Z_o : R_o = 30\Omega, L_o = 30\mu\text{H}, Z_m : R_m = 70\Omega, L_m = 140\text{mH} \text{ และ } Z_s : C_s = 0.2\mu\text{F}$$

การกำหนดให้ $Z_y = 0$ และ $Z_h = \infty$ ($C_h = 0$) มีจุดประสงค์เพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบพฤติกรรมของระบบระหว่างกรณีที่วงจรวีจกรเรียงกระแสทำงานในย่านนำกระแสและไม่นำกระแส เงื่อนไขที่ทำให้ $Z_y = 0$ จะทำให้อิมพีแดนซ์สมมูลของวงจรด้านแหล่งจ่ายของทั้งสองกรณีเหมือนกัน ส่วนการกำหนดให้ $Z_h = \infty$ ($C_h = 0$) จะช่วยให้เห็นผลของ $v_{rec,C}$ ที่มีต่อลักษณะการหน่วงของวงจรร้อย่างชัดเจน และในกรณีนี้จะได้ว่า $i_{i,C} = i_{o,C}$ สัญญาณแรงดันและกระแสไหลร่วมที่ได้จากการจำลองดังกล่าวนี้จะแสดงดังรูปที่ 3.19-3.21



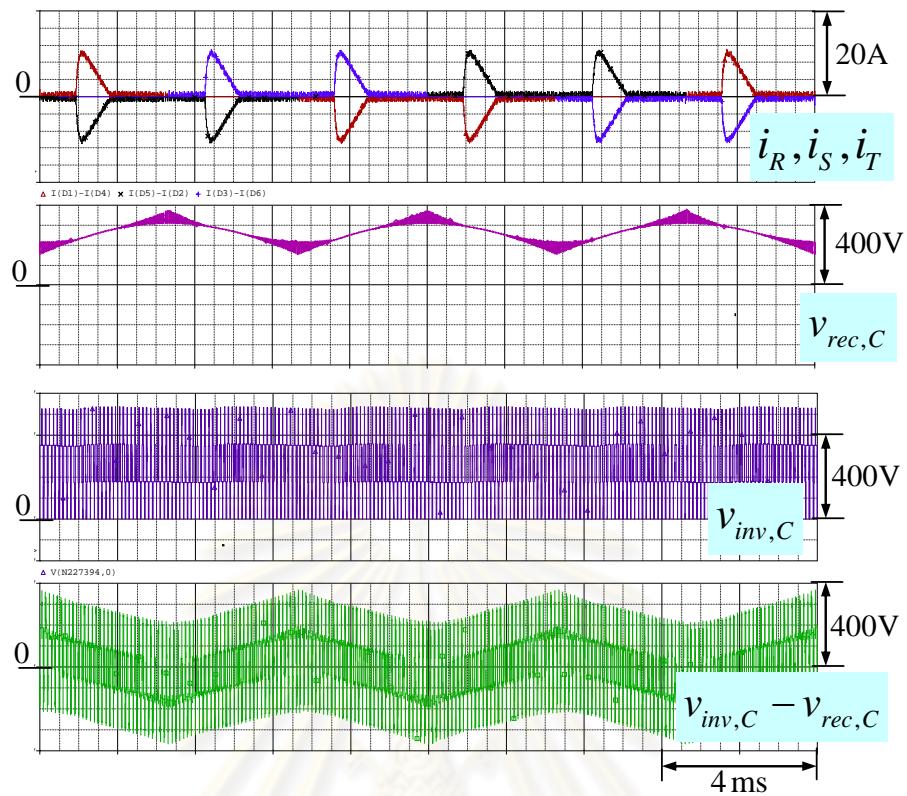
ก) วงจรที่ใช้จำลองระบบ



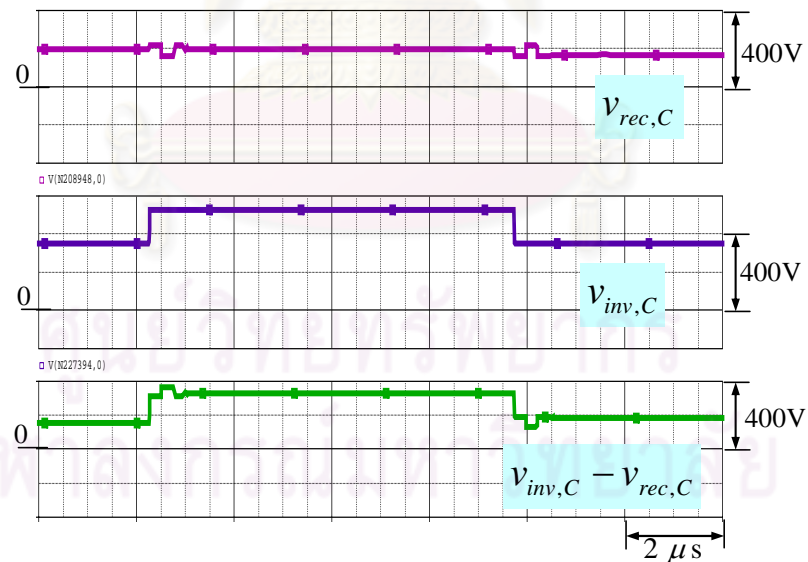
ข) วงจรสมมูลใหม่รวมจากการจำลองระบบ

รูปที่ 3.18 การจำลองวงจรอินเวอร์เตอร์และวงจรสมมูลใหม่รวมสำหรับวิเคราะห์พฤติกรรมของกระแสและแรงดันใหม่รวม

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก) ในสเกลเวลาของความถี่หลักมูล 50 Hz



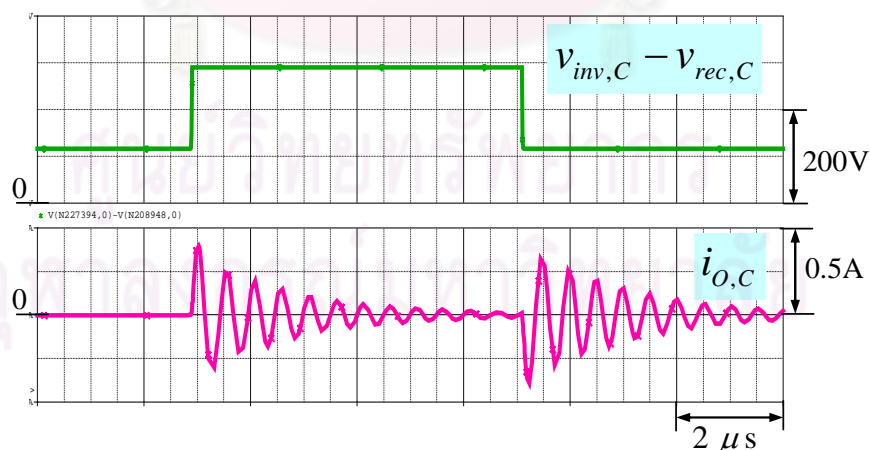
ข) ภาพขยายทางแกนเวลาในช่วงเวลาที่วงจรรีจกกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส

รูปที่ 3.19 ผลจำลองแรงดันโหมตร่วมในวงจรมอเตอร์เวกเตอร์ในรูปที่ 3.18

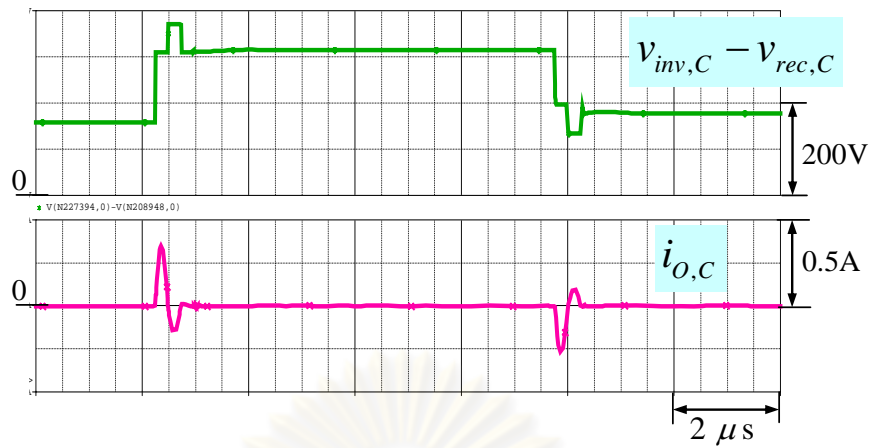
รูปที่ 3.19 ก) ยืนยันว่าสัญญาณแรงดันโหมดร่วมที่เกิดจากการทำงานของวงจรรีจกระแส $v_{rec,C}$ มีลักษณะรูปสัญญาณที่ขึ้นอยู่กับย่านการทำงานของวงจรรีจกระแส ในย่านนำกระแส $v_{rec,C}$ มีการเปลี่ยนแปลงช้าตามรูปคลื่นแรงดันสายกำลัง 50 Hz จึงมีค่าเกือบคงที่เมื่อพิจารณาจากช่วงเวลาสั้นๆ ในคาบการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ แต่ในย่านไม่นำกระแส $v_{rec,C}$ จะแกว่งด้วยความถี่สูง (ตามจังหวะของกระแสโหมดร่วม) ดังรูปที่ 3.19 ข) ดังนั้นแรงดันโหมดร่วมที่กระตุ้นให้เกิดกระแสโหมดร่วม $v_{inv,C} - v_{rec,C}$ จึงมีการเปลี่ยนแปลงด้วยความถี่สูงเมื่ออยู่ในย่านไม่นำกระแสด้วยเช่นกัน

เมื่อคำนวณค่ากระแสโหมดร่วมจากวงจรมุมูลในรูปที่ 3.18 ในกรณีนี้ที่วงจรรีจกระแสทำงานในย่านนำกระแส จะได้ค่ายอดสูงสุดและความถี่การแกว่งคือ $i_{o,C}(peak) = 0.44\text{ A}$ และ $f_C = 2.1\text{ MHz}$ โดยมีค่าเวลาการหน่วงเท่ากับ $\tau_C = 2\mu\text{s}$ ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองในรูปที่ 3.20

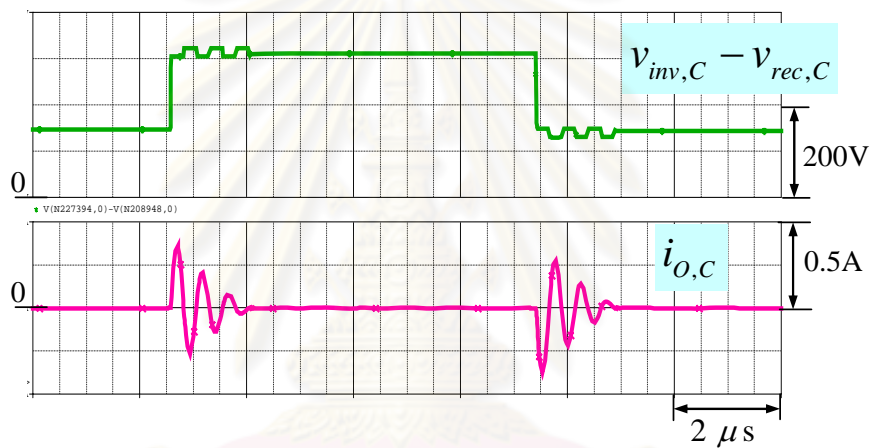
ในกรณีนี้ที่วงจรรีจกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส ผลจำลองที่ได้จะมีตัวอย่างดังรูปที่ 3.21 สังเกตได้ว่ากระแสโหมดร่วมมีค่าเวลาการหน่วงที่สั้นลงเมื่อเทียบกับรูปที่ 3.20 แสดงถึงการหน่วงที่เพิ่มขึ้นของวงจรรันเป็นผลมาจากแรงดันโหมดร่วมจากวงจรรีจกระแสในวงจรที่เปลี่ยนแปลงตามเครื่องหมายของกระแส (สังเกตได้จากรูปคลื่นแรงดันโหมดร่วมที่กระเพื่อมเป็นขั้นขึ้นตามการเปลี่ยนเครื่องหมายของกระแสโหมดร่วม) ค่าการหน่วงที่เพิ่มขึ้นนี้จะนำไปตามขนาดการกระเพื่อมของแรงดันโหมดร่วม ซึ่งขึ้นกับขนาดแรงดันบัลไฟตรงในขณะนั้น ดังจะเห็นได้ว่าในรูปที่ 3.21 ก) ที่มีระดับการกระเพื่อมสูงกว่าก็จะมีกรหน่วงมากกว่าเมื่อเทียบกับรูปที่ 3.21 ข) นอกจากการกระเพื่อมของแรงดันจะทำให้เกิดความหน่วงของวงจรรีจเพิ่มขึ้นแล้วยังทำให้เกิดการหักล้างกันทำให้แรงดันโหมดร่วมมีขนาดลดลง ทำให้ค่ายอดของกระแสโหมดร่วมมีค่าเล็กลงดังเช่นในรูปที่ 3.21 ก)



รูปที่ 3.20 ผลจำลองแรงดันโหมดร่วม $v_{inv,C} - v_{rec,C}$ และกระแสโหมดร่วมในวงจรรันอินเวอร์เตอร์เมื่อวงจรรีจกระแสทำงานในย่านนำกระแส



ก) ช่วงที่ $v_{rec,C}$ มีค่ายอด้ถึงยอด้สูงวงจรจึ่งมีค่าความหน่วงมาก



ข) ช่วงที่ $v_{rec,C}$ มีค่ายอด้ถึงยอด้ต่ำวงจรจึ่งมีค่าความหน่วงน้อย

รูปที่ 3.21 ผลจำลองแรงดันโหมดรวม $v_{inv,C} - v_{rec,C}$ และกระแสโหมดรวมในวงจรอินเวอร์เตอร์

เมื่อดวงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส

สรุปได้ว่าการอธิบายพฤติกรรมของกระแสโหมดรวมที่เกิดขึ้นในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์แบบพีดีบีแอลเอ็มด้วยวงจรสมมูลที่นำเสนอในงานวิจัยนี้จะสอดคล้องกับผลจำลองซึ่งแสดงถึงความถูกต้องของแนวคิด วงจรสมมูลนี้มีความแม่นยำกว่าวงจรสมมูลแบบเดิม [2]-[4] ที่ไม่มีการวิเคราะห์ผลจากการทำงานของวงจรเรียงกระแส การวิเคราะห์จากวงจรสมมูลที่นำเสนอชี้ให้เห็นว่าเมื่อดวงจรเรียงกระแสมีสภาวะการทำงานที่ต่างกันจะมีผลให้กระแสโหมดรวมต่างกันได้ ทั้งนี้วงจรสมมูลแบบเดิม [2]-[4] จะมีความถูกต้องก็ต่อเมื่อพิจารณาภายใต้เงื่อนไขที่วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านนำกระแสซึ่งไม่มีการแกว่งของแรงดันโหมดรวม $v_{rec,C}$ จึงจะสามารถละเลยผลของแรงดันโหมดรวม $v_{rec,C}$ ได้

3.5.2. การวิเคราะห์ปรากฏการณ์การอัดประจุบัสไฟตรงจากวงจรสมมูลใหม่ผลต่าง

กลไกการเกิดปรากฏการณ์การอัดประจุบัสไฟตรงจะพิจารณาจากกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุที่บัสไฟตรง (ซึ่งเป็นกระแสใหม่ผลต่าง) ที่สะท้อนถึงการสะสมพลังงานที่บัสไฟตรง จากวงจรสมมูลใหม่ผลต่างของอินเวอร์เตอร์ทำให้สามารถวิเคราะห์ได้โดยจะแยกพิจารณาเป็น 2 กรณีตามย่านการทำงานของวงจรเรียงกระแสดังนี้

[1] ย่านที่วงจรเรียงกระแสนำกระแส

จากวงจรสมมูลใหม่ผลต่างในรูปที่ 3.13 จะสามารถจำแนกกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุที่บัสไฟตรงเป็น 2 ส่วนได้แก่ 1) กระแสคายประจุของบัสไฟตรง ซึ่งเกิดจากการดึงกำลังงานออกจากบัสไฟตรงโดยวงจรโหลดที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ และ 2) กระแสอัดประจุของบัสไฟตรง ซึ่งเกิดจากการจ่ายกำลังงานโดยแหล่งจ่าย e_r, e_s, e_t ให้กับบัสไฟตรง

กระแสคายประจุของบัสไฟตรง จะมี 2 ส่วนได้แก่ $i_{p,D}'' = \sum_{n=u,v,w} (s_n \cdot i_{n,D})$ ที่เกิดจากกระแสใหม่ผลต่างด้านออก และ $i_{p,D}''' = (\sum_{n=u,v,w} s_n - 3/2) \cdot i_{o,c}$ ที่เกิดจากกระแสใหม่รวมด้านออก กระแสทั้งสองส่วนนี้จะสะท้อนถึงกำลังงานที่จ่ายตามการใช้งานของโหลดและกำลังสูญเสียจากกระแสใหม่รวมตามลำดับ ส่วนกระแสอัดประจุบัสไฟตรง $i_{p,D} = \sum_{m=R,S,T} (s_m \cdot i_{m,D}^*) / 2$ เป็นกระแสที่ไม่ขึ้นอยู่กับการรวมที่ด้านเข้า ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าในกรณีนี้จะไม่มีการอัดประจุบัสไฟตรงเนื่องจากกระแสใหม่รวมด้านเข้า โดยทั่วไปแล้วกระแสอัดประจุบัสไฟตรง $i_{p,D} = \sum_{m=R,S,T} (s_m \cdot i_{m,D}^*) / 2$ จะมีปริมาณที่สอดคล้องกับกำลังงานที่จ่ายให้กับโหลดที่ด้านออก ดังนั้นในช่วงเวลาที่วงจรเรียงกระแสอยู่ในย่านนำกระแสจะไม่ทำให้เกิดปรากฏการณ์การอัดประจุบัสไฟตรงจนเกิดแรงดันเกินได้

[2] ย่านที่วงจรเรียงกระแสไม่นำกระแส

จากวงจรสมมูลใหม่ผลต่างในรูปที่ 3.16 เมื่อพิจารณาที่กระแสคายประจุของบัสไฟตรงจะมีลักษณะเช่นเดียวกับในย่านที่วงจรเรียงกระแส นำกระแส แต่สำหรับกระแสอัดประจุที่บัสไฟตรงนั้นจะแตกต่างออกไป คือมีการอัดประจุโดยกระแสใหม่รวมเกิดขึ้น ซึ่งคำนวณได้ในเทอม $3|i_{i,c}|/2$ พฤติกรรมดังกล่าวนี้อธิบายได้คือ จากวงจรสมมูลที่ด้านสายกำลังจะเห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงใหม่รวมของกระแสใหม่รวม $(3i_r - 2)i_{i,c}, (3i_s - 2)i_{i,c}, (3i_t - 2)i_{i,c}$ ไหลผ่านแหล่งจ่ายกำลัง และจากลักษณะฟังก์ชันการสวิตช์ของไดโอดกระแสแหล่งจ่ายในแต่ละเฟสจะไหลเฉพาะในช่วงที่แรงดันเฟสนั้นมีค่าสูงสุดหรือต่ำสุดเท่านั้นและมีเฟสตรงกันกับแรงดันเฟสด้วย ซึ่งแต่ละช่วงยาวเท่ากับ 60 องศา จึงเกิดปรากฏการณ์ที่กระแสใหม่รวมซึ่งมีความถี่สูงสามารถเปลี่ยนไปเป็นกระแสใหม่ผลต่างความถี่ 50 Hz ได้ กระแสใหม่ผลต่างนี้เมื่อไหลผ่านวงจรเรียงกระแสจะเปลี่ยนเป็นกระแสตรง $3|i_{i,c}|/2$ จึงเกิดการดึงพลังงานจากแหล่งจ่ายสายกำลังไปสะสมที่บัสไฟตรง หากกระแสที่อัดประจุบัสไฟตรงมีค่ามากกว่ากระแสคายประจุของบัสไฟตรง ก็ทำให้แรงดันบัสเพิ่มขึ้นได้

จากการวิเคราะห์ข้างต้น สามารถสรุปได้ว่า กลไกของปรากฏการณ์การอัดประจุบัสไฟตรงเกิดจากการที่บัสไฟตรงถูกอัดประจุโดยกระแสใหม่รวมและจะเกิดขึ้นในช่วงที่วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแสเท่านั้น อย่างไรก็ตามปรากฏการณ์ดังกล่าวจะส่งผลให้เกิดการอัดประจุบัสไฟตรงจนระดับแรงดัน

เพิ่มขึ้นได้หรือไม่ นั่นจะขึ้นอยู่กับพลังงานที่จ่ายออกจากบัสไฟตรงในขณะนั้นด้วย ดังนั้นเงื่อนไขที่เอื้อให้เกิดปรากฏการณ์การอัดประจุบัสไฟตรงจนเกิดแรงดันเกิน คือ

1) กระแสไหลดมีค่าต่ำเมื่อมอเตอร์ทำงานในภาวะไร้ไหลดหรือไหลดเบา ซึ่งจะทำให้เกิดช่วงเวลาที่วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส อีกทั้งยังเอื้อให้กระแสที่อัดประจุบัสไฟตรงมีค่ามากกว่ากระแสคายประจุของบัสไฟตรงได้

2) กระแสไหลดร่วมมีค่าสูง เช่น กรณีที่สายเคเบิลที่ด้านออกยาวมากทำจึงให้กระแสไหลดร่วมที่เข้าไปอัดประจุบัสไฟตรงมีค่าสูง

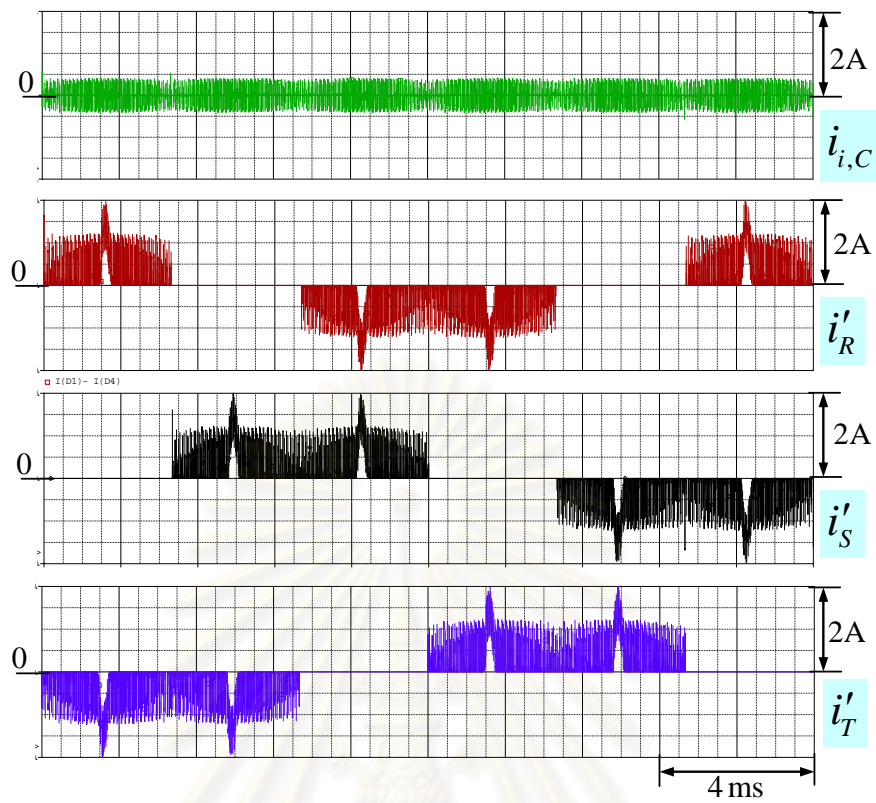
3) ความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ที่มีค่าสูง จะทำให้ช่วงเวลากการอัดประจุโดยรวมนานขึ้นตามจำนวนครั้งการสวิตช์

เงื่อนไขด้านบนนี้มีความเชื่อมโยงที่สอดคล้องกับการพบปรากฏการณ์การอัดประจุบัสไฟตรง [10], [11] ซึ่งพบในงานอุตสาหกรรมสิ่งทอที่ใช้งานอินเวอร์เตอร์โดยมีสายเคเบิลที่ด้านออกยาวมากและมีสภาวะการใช้งานโดยเดินเครื่องอินเวอร์เตอร์แบบไร้ไหลดเกือบตลอดเวลา

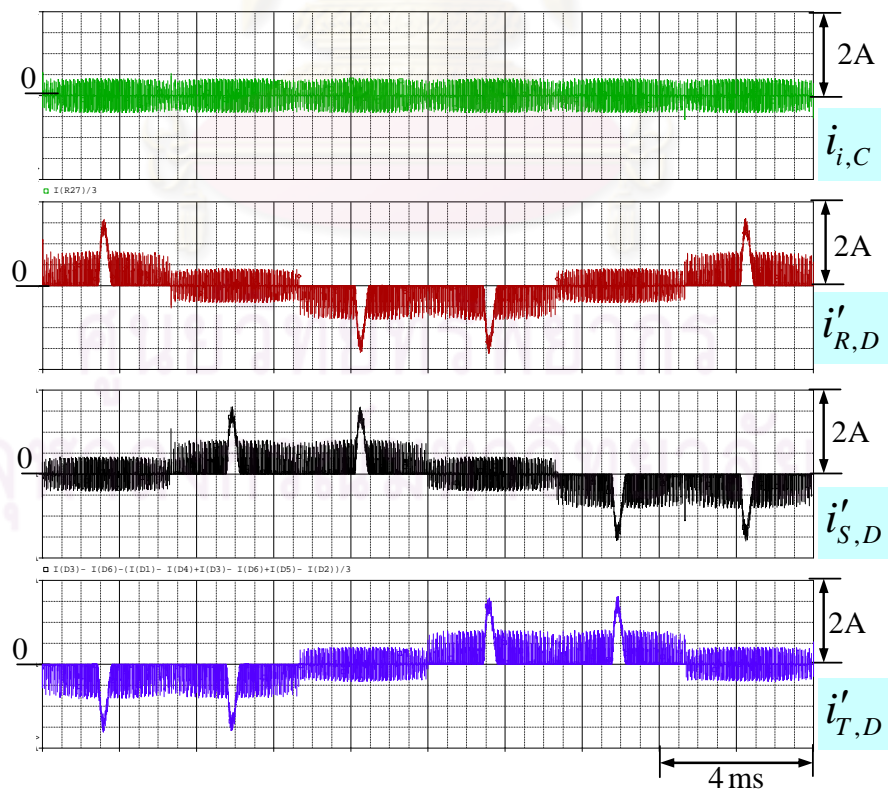
การจำลองวงจรอินเวอร์เตอร์เพื่อยืนยันแนวคิดการวิเคราะห์หลักไภของปรากฏการณ์การอัดประจุบัสไฟตรงจากวงจรสมมูล จะยังคงใช้วงจรจำลองเดียวกันกับในรูปที่ 3.18 ก) แต่จะปรับเปลี่ยนให้ค่า $R_m = 2k\Omega$ เพื่อจำลองภาวะไหลดเบา ในเงื่อนไขนี้ กระแสไหลดผลต่างที่เกิดจากการจ่ายกำลังงานให้ไหลดในย่านนำกระแสจะลดลงและเห็นผลของกระแสไหลดผลต่างที่แปลงไหลดมาจาก $i_{i,c}$ ได้อย่างชัดเจน ดังผลจำลองในรูปที่ 3.22-3.24

รูปที่ 3.22 แสดงสัญญาณกระแสเฟสที่ด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส ซึ่งจะมีลักษณะตามย่านการทำงานของวงจรเรียงกระแสคือ ในช่วงที่วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านนำกระแส กระแสในแต่ละเฟสจะประกอบด้วยกระแสส่วนที่เกิดจากการจ่ายกำลังให้กับไหลดที่ทำให้ไดโอดนำกระแสพร้อมกัน 2 ตัว และกระแสส่วนที่เกิดจากกระแสไหลดร่วม $i_{i,c}$ และสำหรับในช่วงที่วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส จะมีเฉพาะกระแสที่เกิดขึ้นจากการที่มีกระแสไหลดร่วม $i_{i,c}$ ไหลผ่านวงจรด้านแหล่งจ่ายไปที่วงจรเรียงกระแส

เมื่อพิจารณากระแสไหลดผลต่างซึ่งมีค่าเท่ากับกระแสเฟสลบออกด้วยกระแสไหลดร่วม ดังรูปที่ 3.23 จะเห็นว่ายังคงมีส่วนของกระแสไหลดผลต่างที่เกิดจากกระแสไหลดร่วม $i_{i,c}$ เกิดขึ้น แสดงถึงการแปลงไหลดของสัญญาณ และเมื่อพิจารณาตลอดคาบความถี่ 50 Hz จะเห็นอย่างชัดเจนว่า กระแสที่เกิดจากการแปลงไหลดจะเรียงต่อกันกลายเป็นสัญญาณความถี่ 50 Hz แสดงให้เห็นว่านอกจากการแปลงไหลดสัญญาณแล้วยังเกิดการแปลงความถี่ของสัญญาณอีกด้วย กล่าวคือ กระแสไหลดร่วมซึ่งมีความถี่สูงสามารถเปลี่ยนไปเป็นกระแสไหลดผลต่างความถี่ 50 Hz ได้เนื่องจากการทำงานของวงจรเรียงกระแส



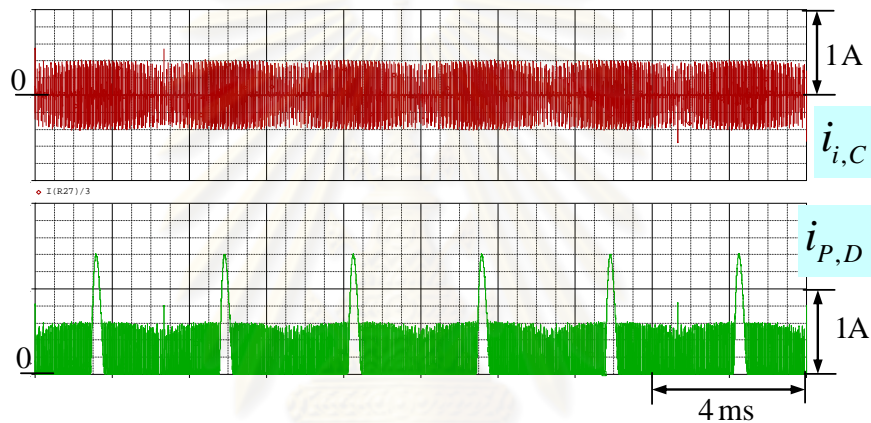
รูปที่ 3.22 กระแสโหมคร่วม $i_{i,C}$ และกระแสเฟสที่ด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส i'_{R} , i'_{S} , i'_{T}



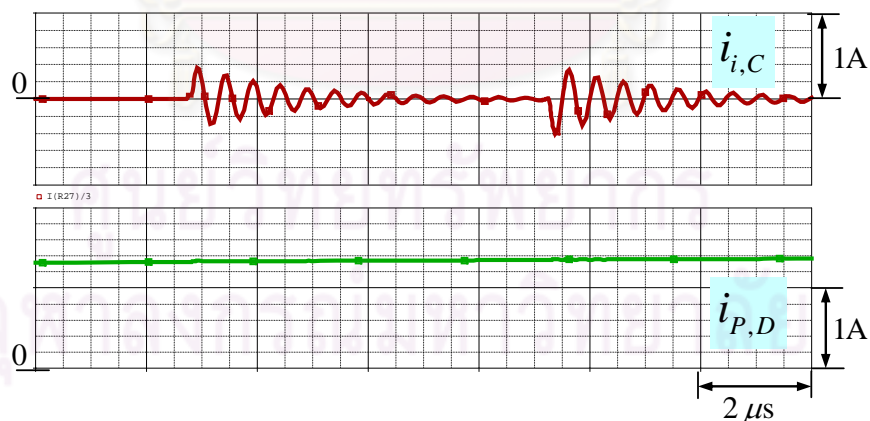
รูปที่ 3.23 กระแสโหมคร่วม $i_{i,C}$ และกระแสโหมคผลต่างที่ด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส $i'_{R,D}$, $i'_{S,D}$, $i'_{T,D}$

กระแสไหลมผลต่างในรูปที่ 3.23 เมื่อไหลผ่านวงจรเรียงกระแสจะเปลี่ยนเป็นกระแสอัดประจุ บัสไฟตรง $i_{P,D}$ ซึ่งเป็นกระแสตรงดังในรูปที่ 3.24 รูปที่ 3.24 ข) แสดงให้เห็นว่า ในช่วงที่วงจรเรียงกระแสทำงาน ในย่านนำกระแส กระแสอัดประจุบัสไฟตรง $i_{P,D}$ จะไม่ขึ้นกับกระแสไหลมรวม $i_{i,C}$ ในกรณีนี้จึงไม่มีการอัดประจุ บัสไฟตรงเนื่องจากกระแสไหลมรวมด้านเข้า $i_{i,C}$

แต่สำหรับในรูปที่ 3.24 ค) ซึ่งเป็นกรณีที่วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส $i_{P,D}$ เป็น กระแสตรงมีค่าเท่ากับ $3|i_{i,C}|/2$ จึงเกิดการดึงพลังงานจากแหล่งจ่ายสายกำลังไปสะสมที่บัสไฟตรงโดยกระแส ไหลมรวมได้ พฤติกรรมดังกล่าวนี้ก็คือกลไกของปรากฏการณ์การอัดประจุบัสไฟตรงที่สามารถทำให้เกิดแรงดัน เกินที่บัสไฟตรงได้เมื่อระบบอยู่ในสภาวะที่เหมาะสม

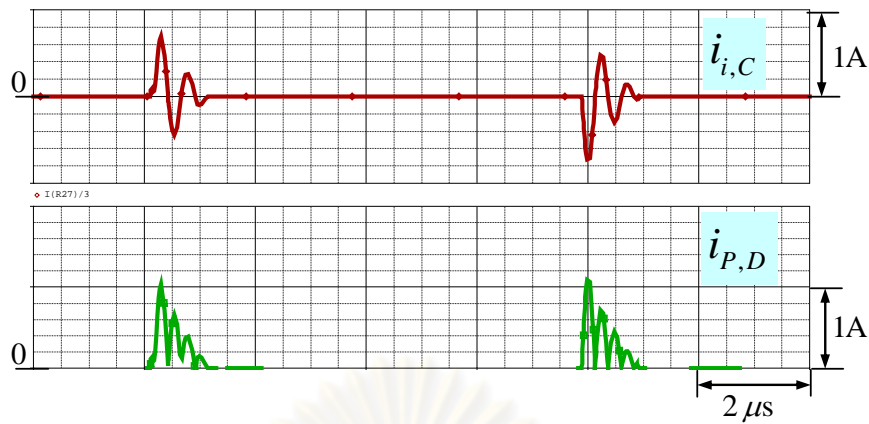


ก) ในสเกลเวลาของความถี่สายกำลัง 50 Hz



ข) ในสเกลเวลาตามความถี่ของกระแสไหลมรวมในช่วงที่วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านนำกระแส

รูปที่ 3.24 กระแสไหลมรวม $i_{i,C}$ และกระแสไหลมผลต่างที่บัสไฟตรง $i_{P,D}$



ค) ในสเกลเวลาตามความถี่ของกระแสไหลรวมในช่วงที่วงจรวจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส

รูปที่ 3.24 (ต่อ) กระแสไหลรวม $i_{i,C}$ และกระแสไหลผลต่างที่บัสไฟตรง $i_{P,D}$

จากผลจำลองสามารถยืนยันได้ว่าวงจรสมมูลที่นำเสนอมีความถูกต้อง และสามารถวิเคราะห์หลักของปรากฏการณ์การอัดประจุสไฟได้เป็นอย่างดี โดยแสดงให้เห็นว่ากระแสไหลรวมสามารถอัดประจุสไฟตรงได้ เมื่อกระแสดังกล่าวไหลผ่านวงจรแหล่งจ่ายกำลัง 3 เฟสเข้าสู่วงจรวจรเรียงกระแสและถูกแปลงให้เป็นกระแสไหลผลต่าง 50 Hz อย่างไรก็ตาม การจำลองวงจรอินเวอร์เตอร์ในหัวข้อนี้จะเป็นเพียงแค่การจำลองเพื่อแสดงกลไกการอัดประจุสไฟตรงโดยกระแสไหลรวมภายใต้เงื่อนไขตามการใช้งานโดยทั่วไปเท่านั้น และยังไม่รวมเงื่อนไขที่เอื้อให้เกิดแรงดันเกิน ดังนั้นระดับแรงดันที่บัสไฟตรงจากผลจำลองในหัวข้อนี้จะมีค่าคงที่ที่ทำให้เกิดสมดุลพลังงานระหว่างแหล่งจ่ายกำลังกับโหลดที่ด้านออก ($= 540V$) เท่านั้น การจำลองและทดลองวงจรอินเวอร์เตอร์ภายใต้เงื่อนไขที่บัสไฟตรงถูกอัดประจุทำให้มีระดับแรงดันเพิ่มสูงขึ้นจนเกิดแรงดันเกินจะแสดงในเนื้อหาบทต่อไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลจำลองและผลทดลองการเกิดปรากฏการณ์การอัดประจุสไฟตรง โดยกระแสไหลร่วม

บทความ [10], [11] ได้พบปรากฏการณ์การอัดประจุสไฟตรงจนเกิดแรงดันเกินในระบบขับเคลื่อนที่มีสายเคเบิลด้านออกยาวมากและทำงานในภาวะไร้โหลด โดยสายเคเบิลด้านออกที่ยาวทำให้ระบบมีกระแสอัดประจุระหว่างสายและกระแสรั่วหรือกระแสไหลร่วมขนาดใหญ่ ปรากฏการณ์การอัดประจุสไฟตรงจะเกิดขึ้นหลังจากที่มีการลดทอนกระแสอัดประจุระหว่างสายด้วยการติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ชนิด 3 เฟส 3 สาย ที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ในบทนี้ เพื่อพิสูจน์ว่ากระแสไหลร่วมสามารถอัดประจุให้สไฟตรงมีระดับสูงเกินกว่าปกติได้ ($v_d > 540 \text{ V}$) และวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ที่ติดตั้งเพิ่มขึ้นมานั้นมีผลต่อการอัดประจุสไฟตรง การจำลองระบบขับเคลื่อนและการทดลองจริงจะทำใน 2 กรณีได้แก่

- 1) ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ในภาวะไร้โหลดที่มีสายเคเบิลด้านออกยาวมาก
- 2) ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ในภาวะไร้โหลดที่มีสายเคเบิลด้านออกยาวมากและมีการติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC

โดยในแต่ละกรณีจะแสดงทั้งผลจำลองและผลทดลองที่อธิบายถึงลักษณะการเกิดกระแสไหลร่วมในระบบขับเคลื่อนและกลไกการอัดประจุสไฟตรง ตามที่อธิบายได้ด้วยวงจรมูลไหลร่วมและโหมดผลต่างในบทที่ 3 ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์ที่จำลองและใช้ทดลองจริงจะมีโครงสร้างวงจรรูปที่ 4.1 อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ทดลองมีโครงเหล็กและซิงก์ระบายความร้อนต่อลงกราวด์ และกำหนดให้อินเวอร์เตอร์มีการทำงานในสภาวะไร้โหลดโดยมีสายเคเบิลด้านออกยาว 100 เมตร องค์ประกอบส่วนต่าง ๆ ของระบบจะมีค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญดังนี้

อินเวอร์เตอร์: พิกัดแรงดัน 380 V (แรงดันบัสไฟตรง 540 V),

ความถี่ด้านออก $f_o = 50 \text{ Hz}$, ความถี่การสวิตช์ $f_{sw} = 1-10 \text{ kHz}$

ตัวเก็บประจุที่บัสไฟตรง $C_B = 560 \mu\text{F}$

ตัวเก็บประจุแบบแผ่นระหว่างบัสไฟตรงกับซิงก์ระบายความร้อน $C_n = 2 \text{ nF}$

กำลังสูญเสียของอินเวอร์เตอร์ประมาณ 65 W

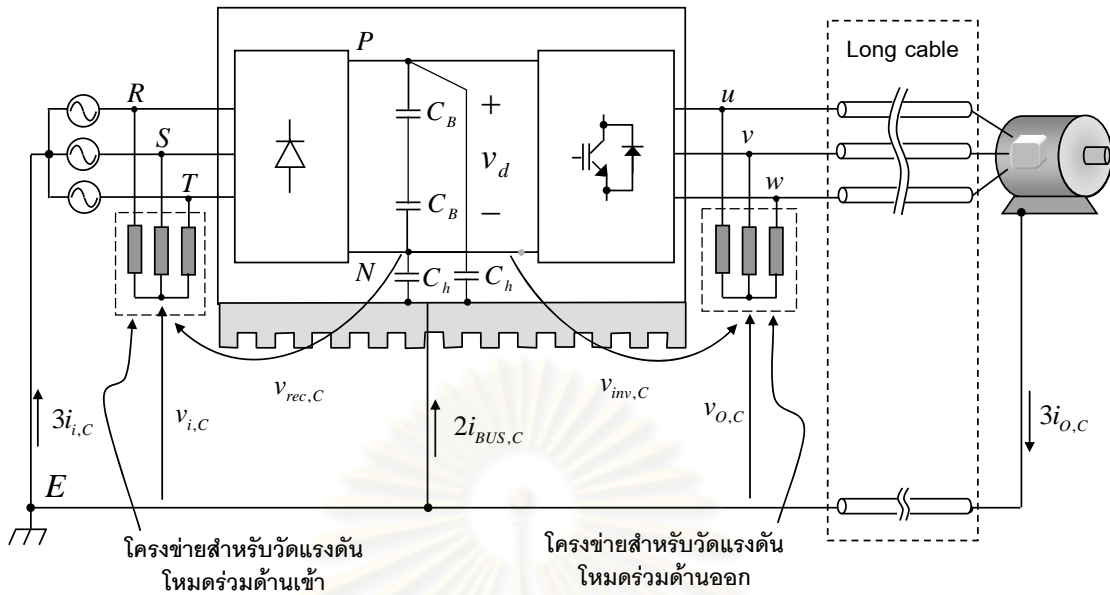
สายเคเบิลที่ด้านออก: ความยาวสาย 100 เมตร

ความจุไฟฟ้าแบบแผ่นระหว่างสายเคเบิลและระหว่างสายเคเบิลกับกราวด์

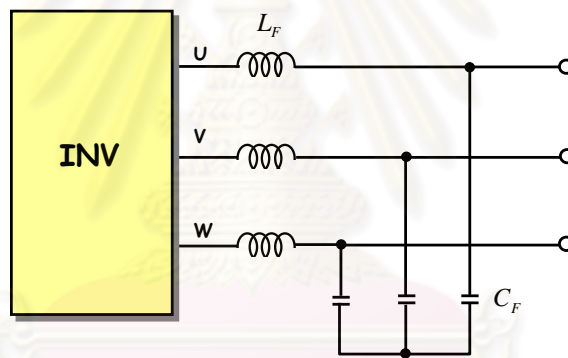
$\sum C_s = 13 \text{ nF/เฟส}$ และความเหนี่ยวนำสายเคเบิล $\sum L_o = 228 \mu\text{H/เฟส}$

มอเตอร์: พิกัด 2Hp, แรงดัน 380 V, กระแส 3.6 A, ความถี่ทำงาน 50 Hz

วงจรกรองด้านออกแบบพาสซีฟ: ตัวเหนี่ยวนำ $L_F = 4 \text{ mH/เฟส}$, ตัวเก็บประจุ $C_F = 3 \mu\text{F/เฟส}$



ก) โครงสร้างของระบบขับเคลื่อนที่มีสายเคเบิลที่ด้านออกยาว (ก่อนติดตั้งวงจรรอง)



ข) วงจรรองด้านออกชนิดพาสซีฟแบบ LC

รูปที่ 4.1 ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ทดสอบแสดงการเกิดปรากฏการณ์การอัดประจุสัไฟฟ้าตรงจนเกิดแรงดันเกิน

4.1 ผลจำลองและผลทดลองระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ในภาวะไร้โหลดที่มีสายเคเบิลด้านออกยาวมาก การจำลองและการทดลองในกรณีนี้ได้กำหนดให้อินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่ด้านออก $f_o = 50\text{Hz}$ และความถี่การสวิตซ์ $f_{sw} = 10\text{kHz}$

4.1.1 พฤติกรรมของกระแสโหมตร่วมของอินเวอร์เตอร์ที่ยังไม่ติดตั้งวงจรรองพาสซีฟ

ในหัวข้อนี้จะศึกษาลักษณะของกระแสโหมตร่วมที่เกิดขึ้นเมื่ออินเวอร์เตอร์ควบคุมมอเตอร์ในภาวะไร้โหลด โดยจะแสดงให้เห็นว่า เมื่อวงจรเรียงกระแสของอินเวอร์เตอร์ทำงานในย่านการนำกระแสในลักษณะที่แตกต่างกัน จะส่งผลให้กระแสโหมตร่วมที่เกิดขึ้นมีพฤติกรรมที่แตกต่างกันได้ตามการวิเคราะห์ด้วยวงจรสมมูลโหมตร่วมในบทที่ 3

แรงดันโหมตร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ $v_{o,C}$ เป็นสาเหตุหลักของการเกิดกระแสโหมตร่วม เนื่องจากองค์ประกอบที่ความถี่สูงของแรงดัน $v_{o,C}$ สามารถกระตุ้นความจุไฟฟ้าแบบแบ่งระหว่างสายเคเบิลกับกราวด์ C_s ทำให้เกิดเป็นกระแสโหมตร่วม $i_{o,C}$ ไหลลงกราวด์ และมีวงรอบการไหลจากกราวด์เพื่อกลับสู่อินเวอร์เตอร์โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่

- 1) $i_{BUS,C}$ ที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุแบบแบ่งระหว่างบัสไฟตรงกับซิงก์ระบายความร้อน C_h
- 2) $i_{i,C}$ ที่ผ่านแหล่งจ่าย 3 เฟส เข้าสู่วงจรเรียงกระแส

ผลการจำลองในรูปที่ 4.2 และผลทดลองในรูปที่ 4.3 จะให้ผลที่สอดคล้องกัน คือ กระแสโหมตร่วมด้านเข้าจะแยกแบ่งไหลตามลักษณะอิมพีแดนซ์ของวงจรโดย $i_{BUS,C}$ จะมีความถี่สูง ($> 1\text{MHz}$) ส่วน $i_{i,C}$ จะมีความถี่ต่ำกว่า ($= 50\text{kHz}$)

แรงดันและกระแสโหมตร่วมของวงจรส่วนหน้าของอินเวอร์เตอร์

ผลจำลองและทดลองในรูปที่ 4.4-4.6 แสดงสัญญาณแรงดันโหมตร่วมที่วงจรด้านหน้า ดังนี้คือ แรงดันโหมตร่วม $v_{rec,C}$ ที่เกิดจากการทำงานของวงจรเรียงกระแสด้านหน้า, แรงดันที่ขั้วลบของบัสไฟตรงเทียบกับกราวด์ v_{NE} , แรงดันโหมตร่วมที่ด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส $v_{i,C}$ ($v_{i,C} = v_{rec,C} + v_{NE}$) และกระแสโหมตร่วม $i_{i,C}$ ที่ไหลเข้าวงจรเรียงกระแสของอินเวอร์เตอร์ โดยกระแสและแรงดันดังกล่าวมีตำแหน่งการตรวจวัดดังรูปที่ 4.1

ผลจำลองในรูปที่ 4.5 และ รูปที่ 4.6 แสดงถึงพฤติกรรมของวงจรที่แตกต่างกัน กล่าวคือ หากพิจารณาในสเกลเวลาของคาบการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ เมื่อวงจรเรียงกระแสอยู่ในย่านนำกระแสดังรูปที่ 4.5 แรงดันโหมตร่วม $v_{rec,C}$ จะมีค่าคงที่ แต่เมื่อวงจรเรียงกระแสอยู่ในย่านไม่นำกระแสดังรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าแรงดันโหมตร่วม $v_{rec,C}$ จะแกว่งตามจังหวะการเปลี่ยนเครื่องหมายของกระแสโหมตร่วมด้านเข้า พฤติกรรมดังกล่าวนี้จะมีผลทำให้วงจรมีการหน่วงเพิ่มขึ้น และทำให้กระแสโหมตร่วม $i_{i,C}$ ที่ไหลผ่านวงจรเรียงกระแสมีค่าเวลาลู่เข้าที่สั้นลงได้

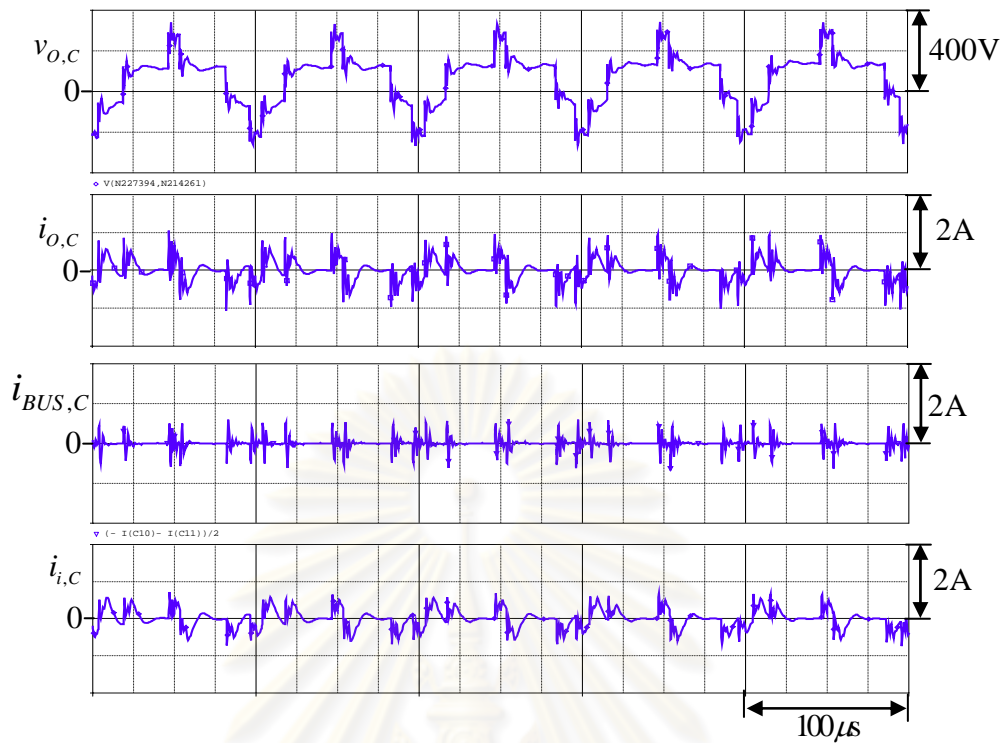
ผลจากการทดลองจริงในรูปที่ 4.7- 4.9 มีลักษณะสัญญาณต่างๆ ที่สอดคล้องกับผลจำลองในรูปที่ 4.5-4.6 และสามารถสังเกตเห็นลักษณะแรงดัน $v_{rec,C}$ และกระแสโหมตร่วม $i_{i,C}$ ที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนระหว่างกรณีที่วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านนำกระแสและไม่นำกระแส

แรงดันและกระแสโหมตร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์

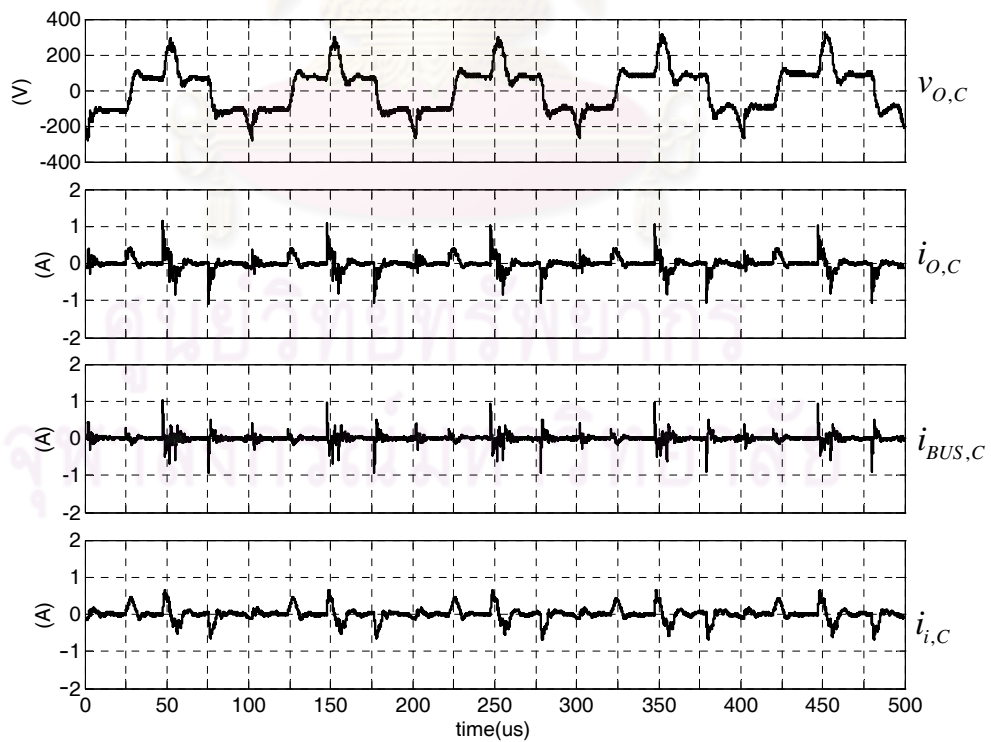
ผลจำลองและผลทดลองในรูปที่ 4.10-4.15 แสดงสัญญาณแรงดันโหมตร่วม $v_{inv,C}$ ที่เกิดจากการทำงานของอินเวอร์เตอร์, แรงดันที่ขั้วลบของบัสไฟตรงเทียบกับกราวด์ v_{NE} , แรงดันโหมตร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ $v_{o,C}$ ($v_{o,C} = v_{inv,C} + v_{NE}$) และกระแสโหมตร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ $i_{o,C}$

เมื่อวงจรเรียงกระแสอยู่ในย่านไม่นำกระแส ค่าการหน่วงของวงจรที่เพิ่มขึ้น จะผลให้องค์ประกอบที่ความถี่ 50kHz ของ $i_{o,C}$ มีค่าเวลาการหน่วงที่สั้นลงด้วยเช่นกัน ดังจะสังเกตได้จากการเปรียบเทียบกันระหว่างผลจำลองในรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12

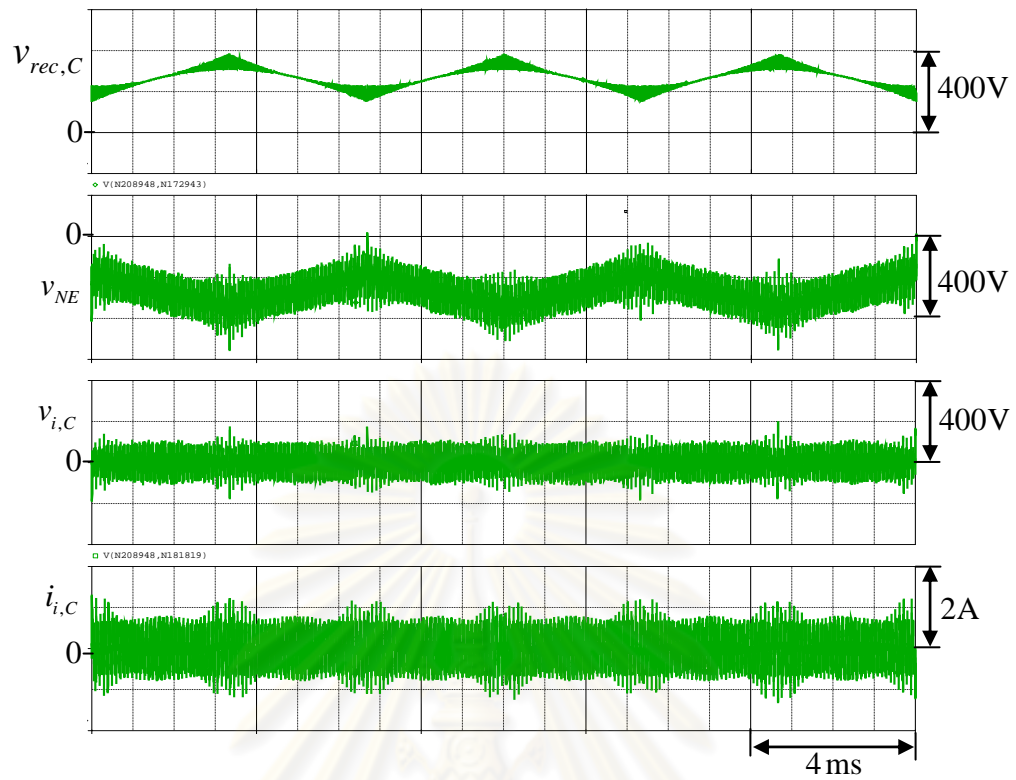
ผลทดลองในรูปที่ 4.13-4.15 สอดคล้องกับผลจำลองในรูปที่ 4.10-4.12 ที่สังเกตได้ว่ากระแสโหมตร่วม $i_{o,C}$ มีค่าเวลาการลู่เข้าที่สั้นลง (ค่าการหน่วงเพิ่มขึ้น) เมื่อวงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส



รูปที่ 4.2 ผลจำลองแรงดันโหมตร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์และกระแสโหมตร่วมที่ไหลผ่านส่วนต่างๆ ของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์



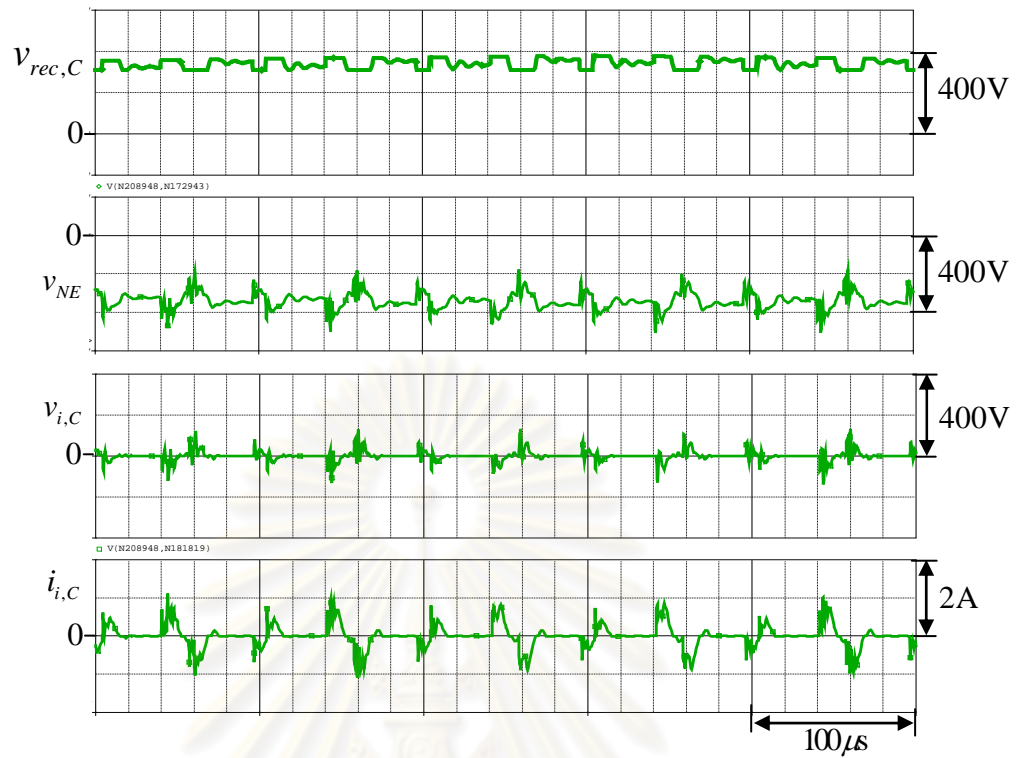
รูปที่ 4.3 ผลทดลองแรงดันโหมตร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์และกระแสโหมตร่วมที่ไหลผ่านส่วนต่างๆ ของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์



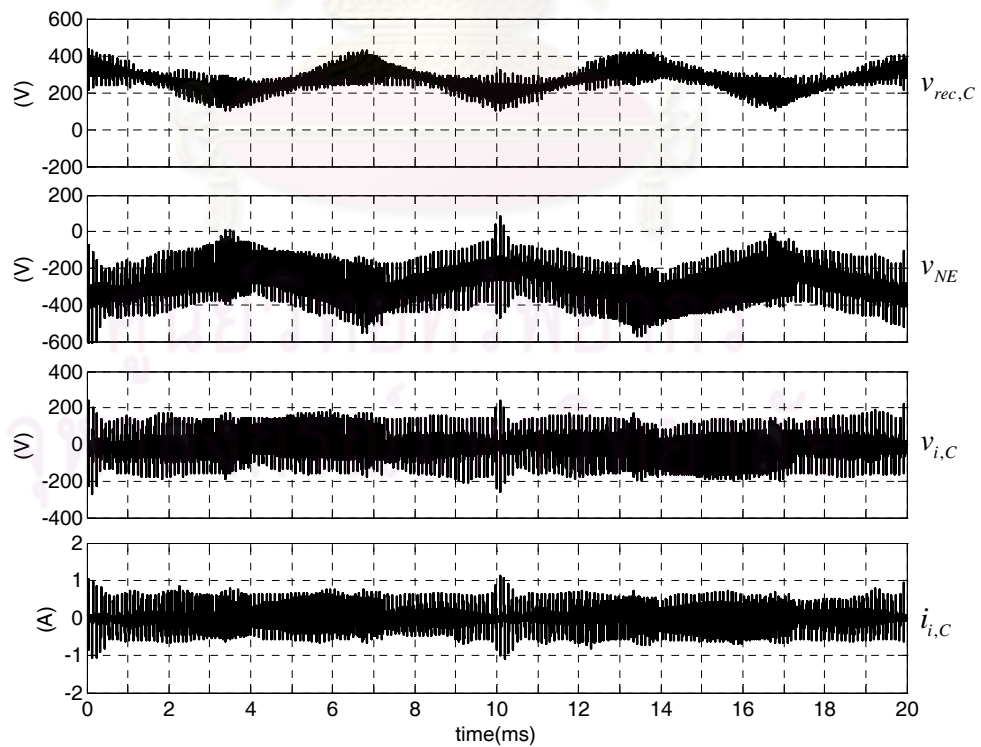
รูปที่ 4.4 ผลจำลองแรงดันและกระแสโหมตรวมที่ด้านหน้าของอินเวอร์เตอร์ในสเกลเวลาของความถี่หลักมูล



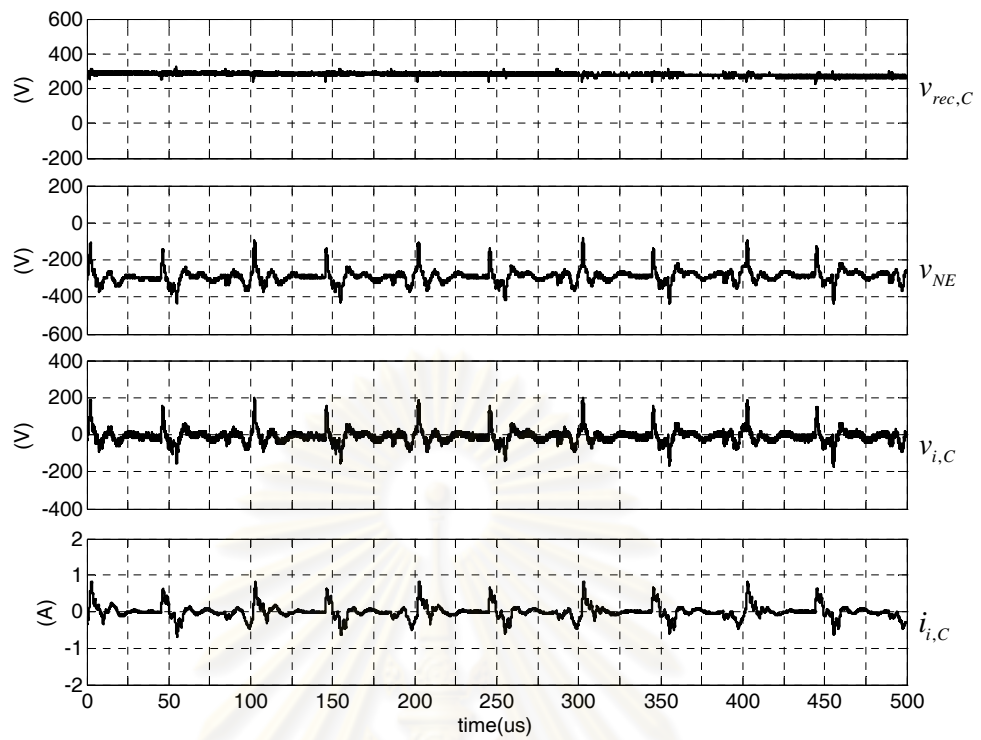
รูปที่ 4.5 ผลจำลองแรงดันและกระแสโหมตรวมที่ด้านหน้าของอินเวอร์เตอร์ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์ ในช่วงที่วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านนำกระแส



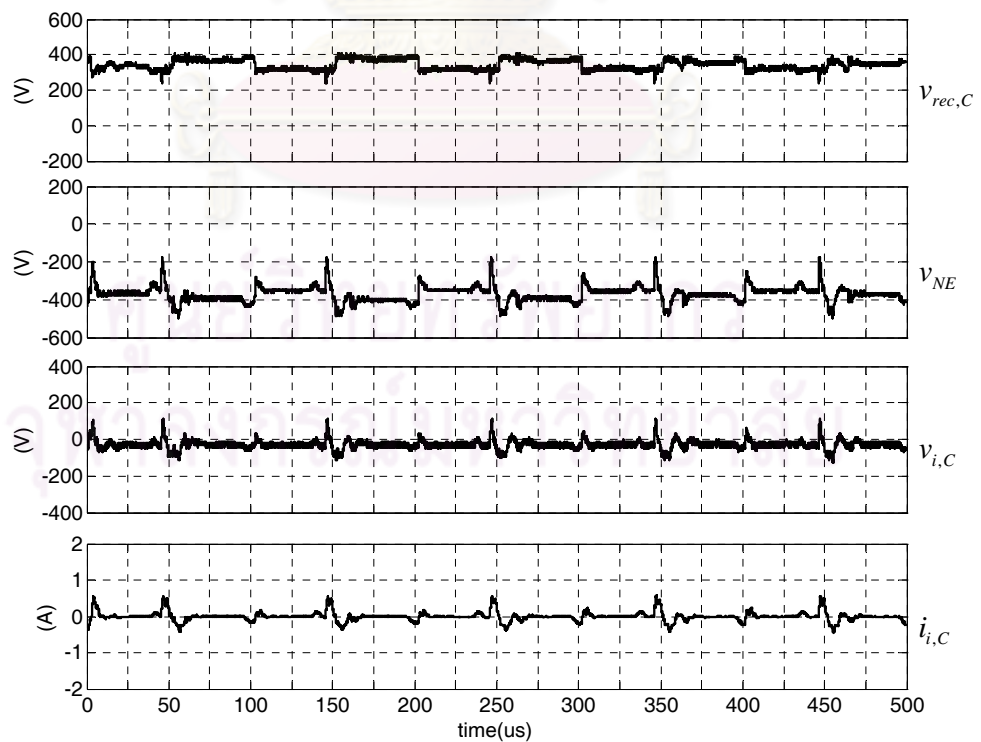
รูปที่ 4.6 ผลจำลองแรงดันและกระแสไหลพร้อมที่ด้านหน้าของอินเวอร์เตอร์ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์ ในช่วงที่วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส



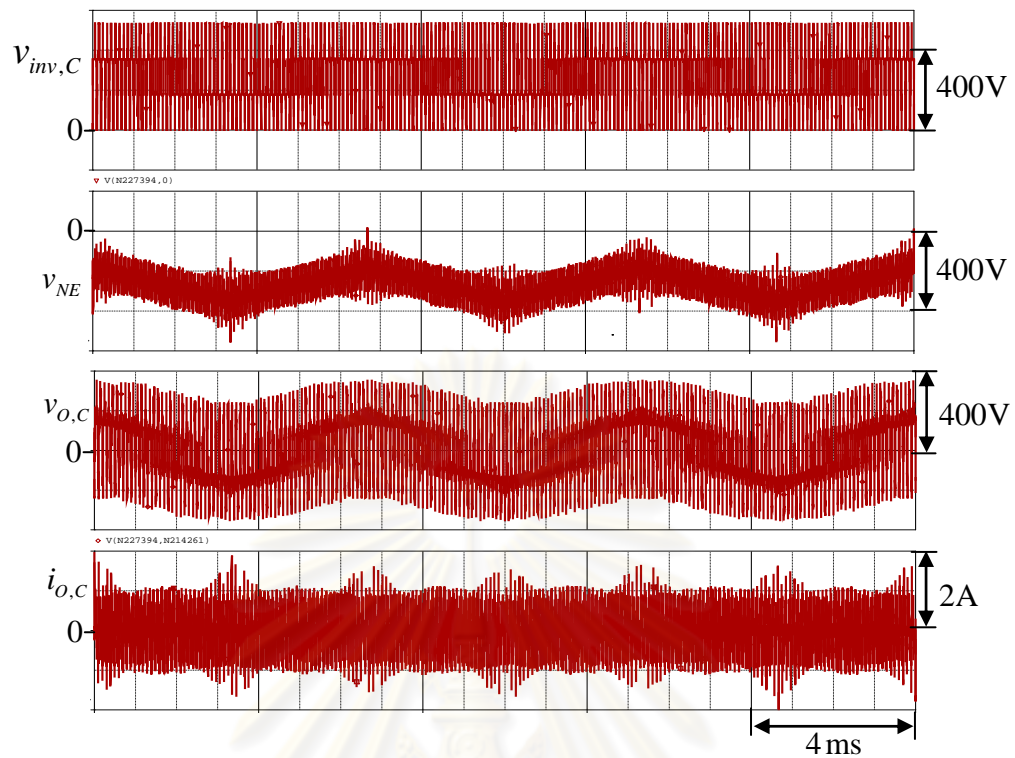
รูปที่ 4.7 ผลทดลองแรงดันและกระแสไหลพร้อมที่ด้านหน้าของอินเวอร์เตอร์ในสเกลเวลาของความถี่ที่ถูกลด



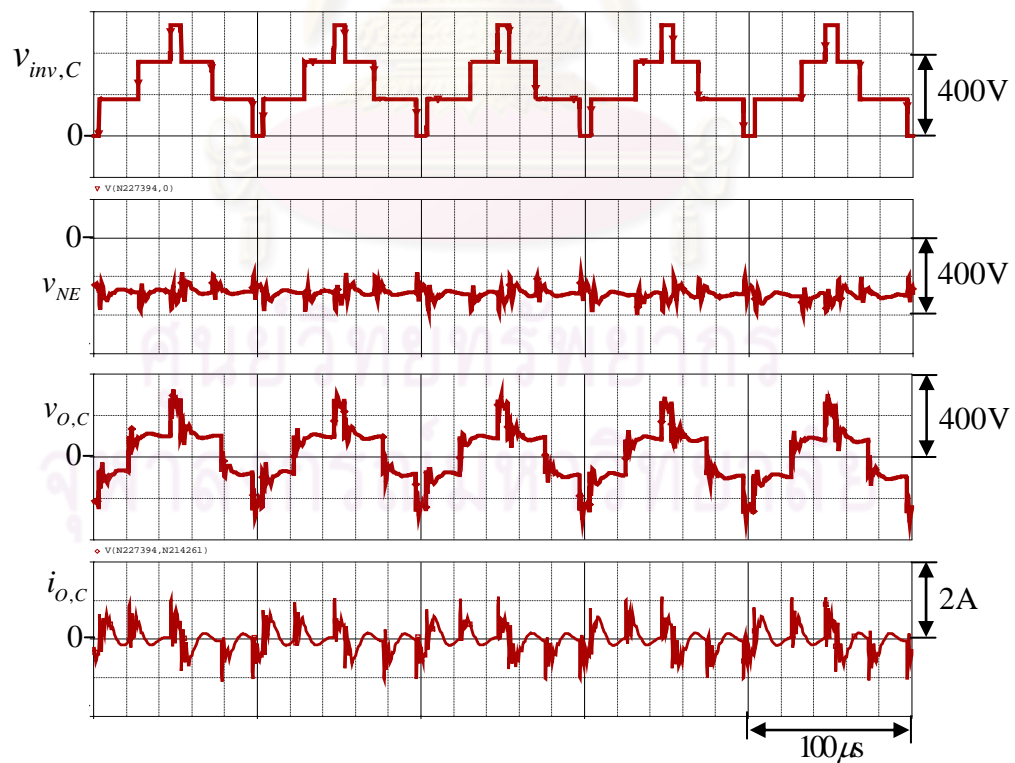
รูปที่ 4.8 ผลทดลองแรงดันและกระแสไหลรวมที่ด้านหน้าของอินเวอร์เตอร์ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์ ในช่วงที่วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านนำกระแส



รูปที่ 4.9 ผลทดลองแรงดันและกระแสไหลรวมที่ด้านหน้าของอินเวอร์เตอร์ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์ ในช่วงที่วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส



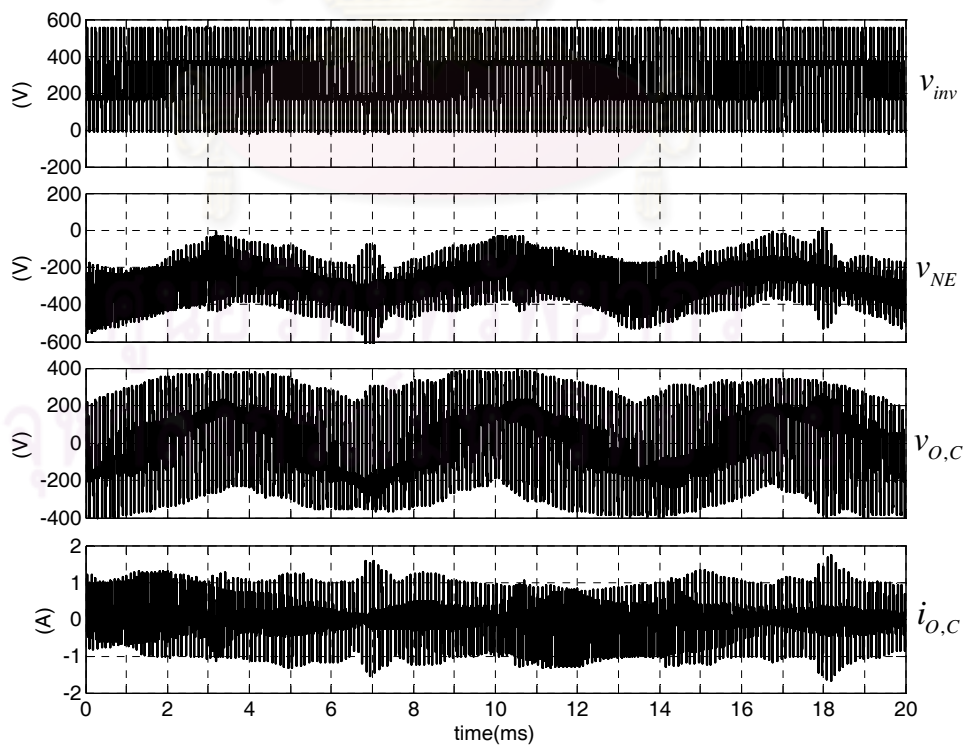
รูปที่ 4.10 ผลจำลองแรงดันและกระแสโหมตรงร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ในสเกลเวลาของความถี่หลักมูล



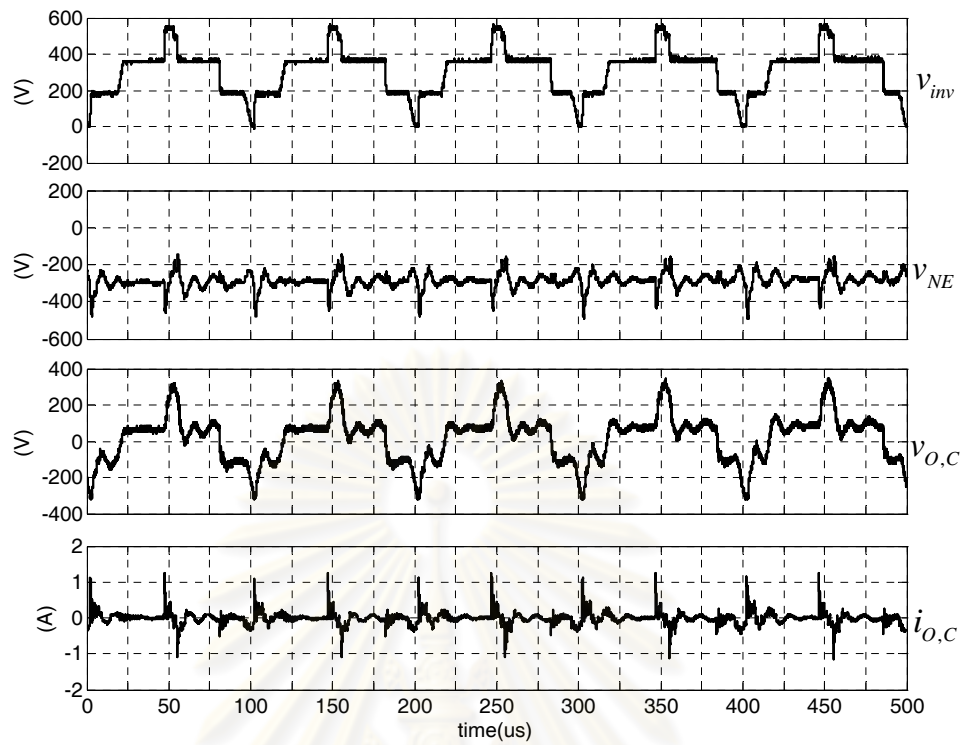
รูปที่ 4.11 ผลจำลองแรงดันและกระแสโหมตรงร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์ ในช่วงที่วงจรวอร์เรียมทำงานในย่านนำกระแส



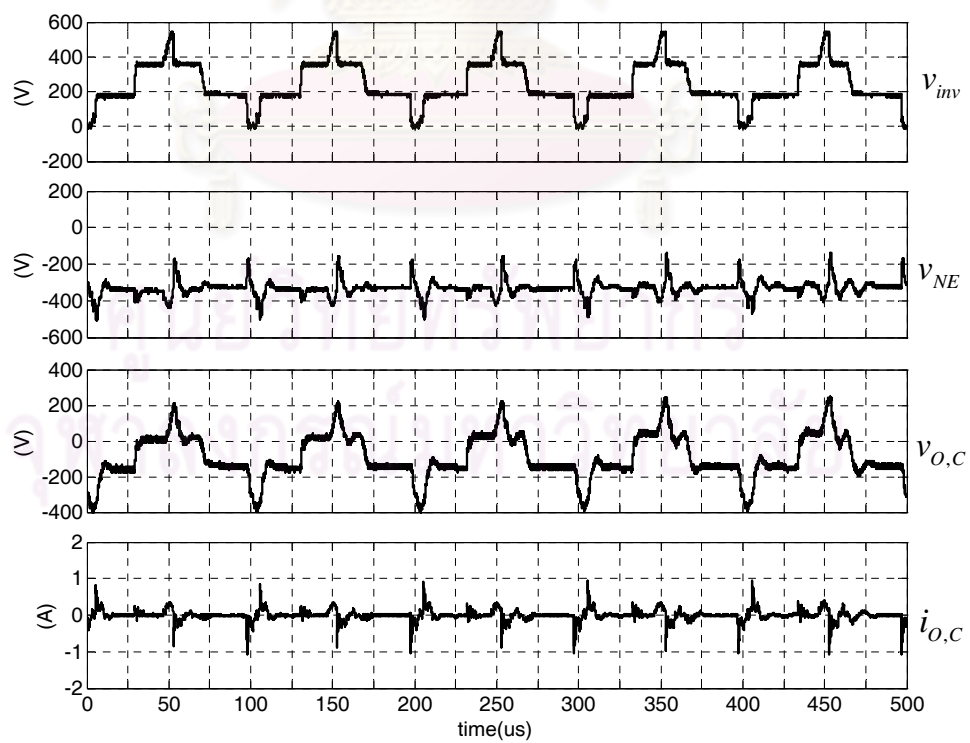
รูปที่ 4.12 ผลจำลองแรงดันและกระแสโหมคร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์ ในช่วงที่วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส



รูปที่ 4.13 ผลทดลองแรงดันและกระแสโหมคร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ในสเกลเวลาของความถี่หลักมูล



รูปที่ 4.14 ผลทดลองแรงดันและกระแสโหมคร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์ ในช่วงที่วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านนำกระแส



รูปที่ 4.15 ผลทดลองแรงดันและกระแสโหมคร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์ ในช่วงที่วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส

4.1.2 การอัดประจุบัสไฟตรงโดยกระแสไหลมุดร่วม

กลไกการอัดประจุบัสไฟตรงโดยกระแสไหลมุดร่วมเกิดขึ้นได้เมื่อ กระแสไหลมุดร่วมความถี่สูง แปลงโหมดไปเป็นกระแสไหลมุดผลต่างความถี่ 50 Hz ดังนั้นกระแสที่แปลงโหมดแล้วจึงสามารถดึงกำลังงานจาก แหล่งจ่าย 3 เฟสไปสะสมที่บัสไฟตรงได้ การจำลองและทดลองในหัวข้อนี้จะแสดงพฤติกรรมของการแปลงโหมดของ กระแสไหลมุดร่วมด้านเข้าและด้านออกของมอเตอร์ซึ่งมีผลต่อการอัดประจุบัสไฟตรง

กระแสเฟสที่ด้านหน้าของวงจรวจรเรียงกระแส

ผลการจำลองและผลทดลองในรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.19 แสดงให้เห็นว่าไดโอดของวงจรวจรเรียง กระแสแต่ละตัวจะนำกระแสสลับกันนาน 120 องศา และในแต่ละช่วงจะมีไดโอดนำกระแสเพียงแค่ 2 เฟส เท่านั้น ส่วนเฟสที่เหลือที่ไม่ได้นำกระแสจะมีค่ากระแสเฟสเป็นศูนย์

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.17 และ 4.20 จะได้ว่า ในกรณีที่วงจรวจรเรียงกระแสอยู่ในย่าน นำกระแส เฟสที่แหล่งจ่ายมีค่าแรงดันสูงสุดและต่ำสุดจะนำกระแสพร้อมกัน แต่สำหรับกรณีที่วงจรวจรเรียงกระแส อยู่ในย่านไม่นำกระแสดังรูปที่ 4.18 และ รูปที่ 4.21 ไดโอดเรียงกระแสยังคงนำกระแสได้ เนื่องจากการไหล ของกระแสไหลมุดร่วม โดยเฟสที่แหล่งจ่ายมีค่าแรงดันสูงสุดและต่ำสุดในขณะนั้นจะนำกระแสสลับกันตาม เครื่องหมายของกระแสไหลมุดร่วม

การอัดประจุบัสไฟตรงโดยกระแสไหลมุดร่วม

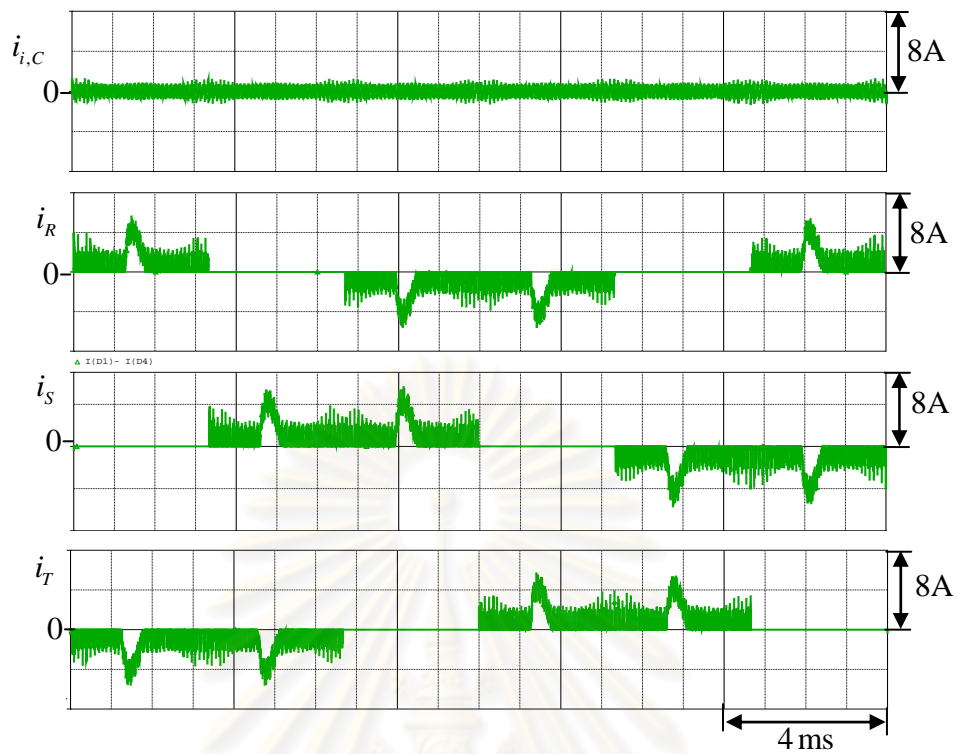
รูปที่ 4.22 และ 4.23 แสดงสัญญาณกระแสไหลมุดผลต่าง $i_{R,D}$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $i_R - i_{i,C}$ จะเห็น ได้ว่า เมื่อกระแสไหลมุดร่วม $i_{i,C}$ ไหลผ่านแหล่งจ่าย 3 เฟสเข้าสู่จรวจรเรียงกระแส $i_{i,C}$ จะถูกแปลงโหมดให้เป็น กระแสไหลมุดผลต่างความถี่ 50 Hz ที่มีมุมเฟสตรงกับแหล่งจ่าย (ทิศไหลออกจากแหล่งจ่าย) ดังนั้นจึงอธิบายได้ ว่า กระแสไหลมุดร่วมสามารถอัดประจุบัสไฟตรงได้โดยดึงพลังงานจากแหล่งจ่าย 3 เฟส ไปสะสมที่บัสไฟตรง ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาในเฟส S และ T ก็จะมีกระแสไหลมุดผลต่าง $i_{S,D}$ และ $i_{T,D}$ ที่มีลักษณะเช่นเดียวกันนี้

กระแสคายประจุบัสไฟตรง

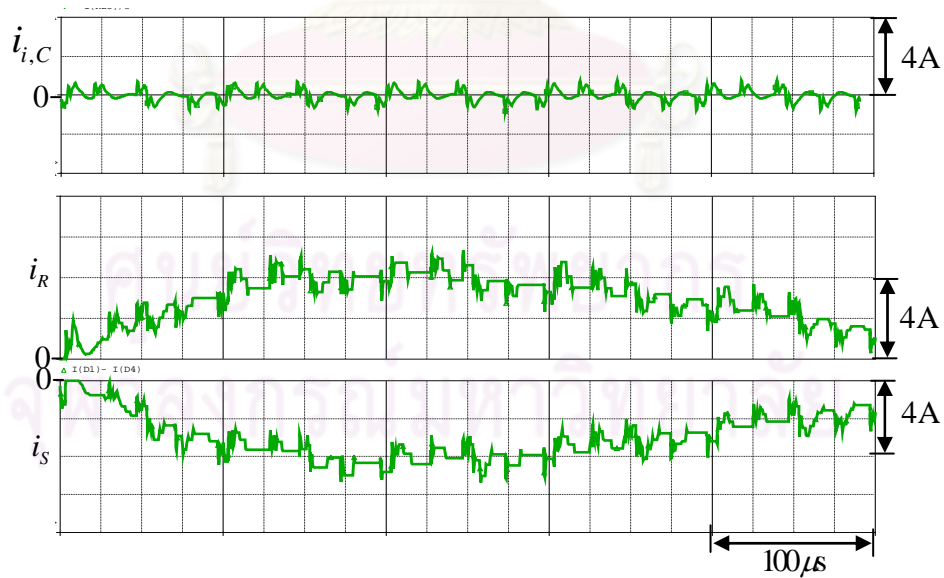
รูปที่ 4.24 - 4.25 แสดงผลจำลองกระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งเป็นกระแสที่ทำให้เกิด การคายประจุบัสไฟตรง จากผลจำลองแม้ว่ากระแสที่จ่ายให้กับโหลดมอเตอร์จะมีค่าน้อยมากเนื่องจากมอเตอร์ ทำงานในภาวะไร้โหลด แต่จะคงมีการคายประจุบัสไฟตรงในปริมาณมาก เนื่องจากกระแสขนาดใหญ่ที่เกิดจาก ความจุแอมแปร์ระหว่างสายเคเบิลที่มีค่าสูง สำหรับผลการทดลองในรูปที่ 4.26 - 4.27 มีผลที่สอดคล้องกับผล จำลองคือกระแสไหลมุดของอินเวอร์เตอร์มีขนาดใหญ่และมีความถี่สูง

ระดับแรงดันบัสไฟตรง

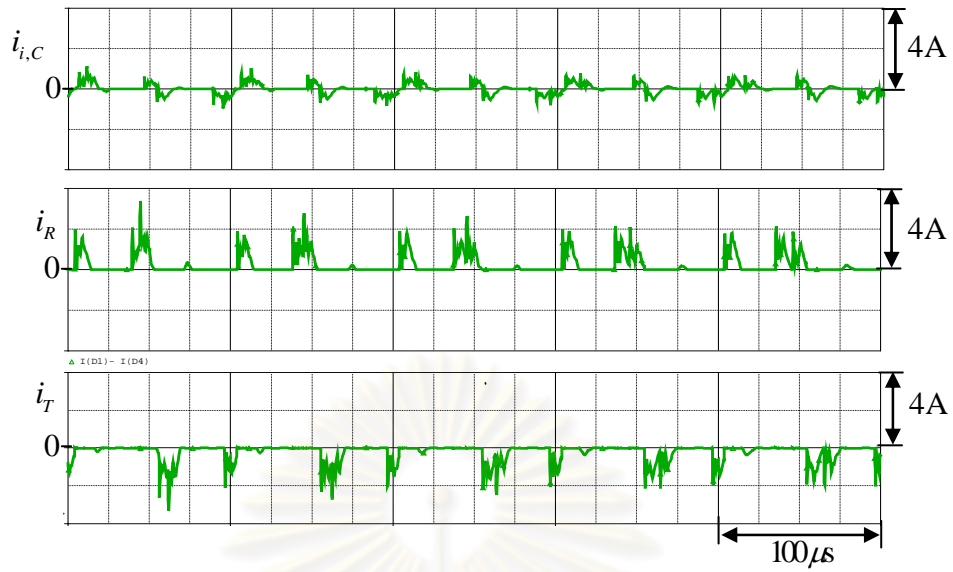
เมื่อเปรียบเทียบกับกระแสด้านอินเวอร์เตอร์ที่ทำให้เกิดการคายประจ้ออกจากบัสไฟตรงใน รูปที่ 4.25 และรูปที่ 4.27 ปริมาณกระแสไหลมุดร่วมซึ่งเป็นกระแสอัดประจุบัสไฟตรงจะมีขนาดเล็กกว่ามาก จึงไม่ เกิดจากสะสมพลังงานที่บัสไฟตรงและเกิดสมดุลของพลังงานด้านเข้าและพลังงานด้านออกของวงจรวจรเรียงกระแส ตามปรกติ ทำให้ระดับแรงดันบัสไฟตรงมีค่าคงที่ที่ระดับปกติประมาณ 540 V ดังแสดงในผลการจำลองและผล การทดลองในรูปที่ 4.28 และ 4.29 ตามลำดับ



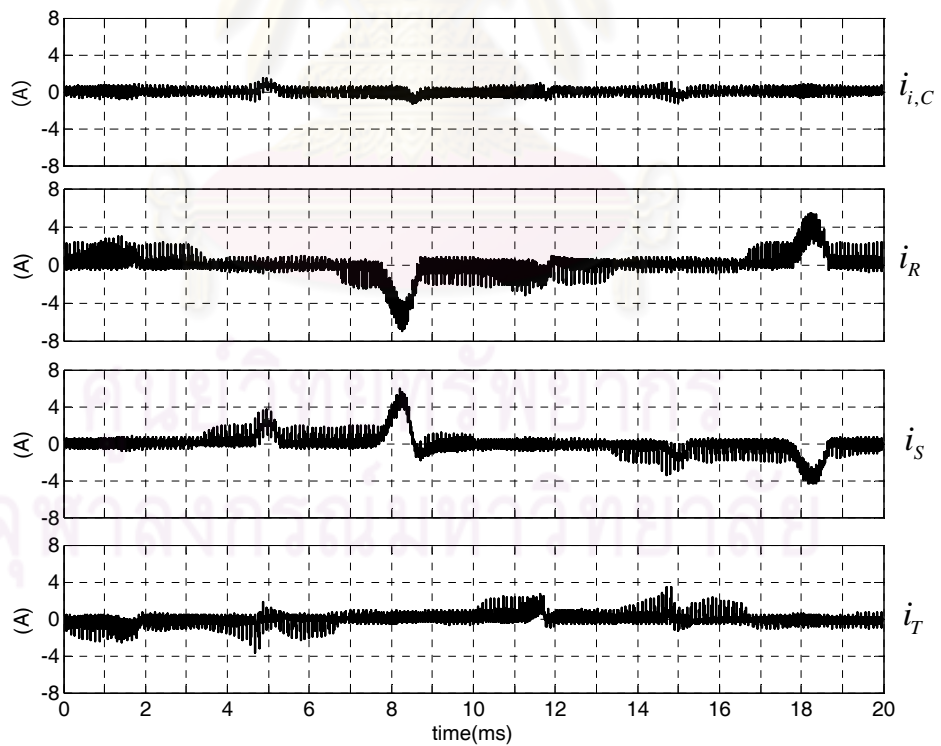
รูปที่ 4.16 ผลจำลองสัญญาณกระแสไหลรวม $i_{i,C}$ และกระแสเฟส i_R, i_S, i_T ในสเกลเวลาของความถี่หลักมูล



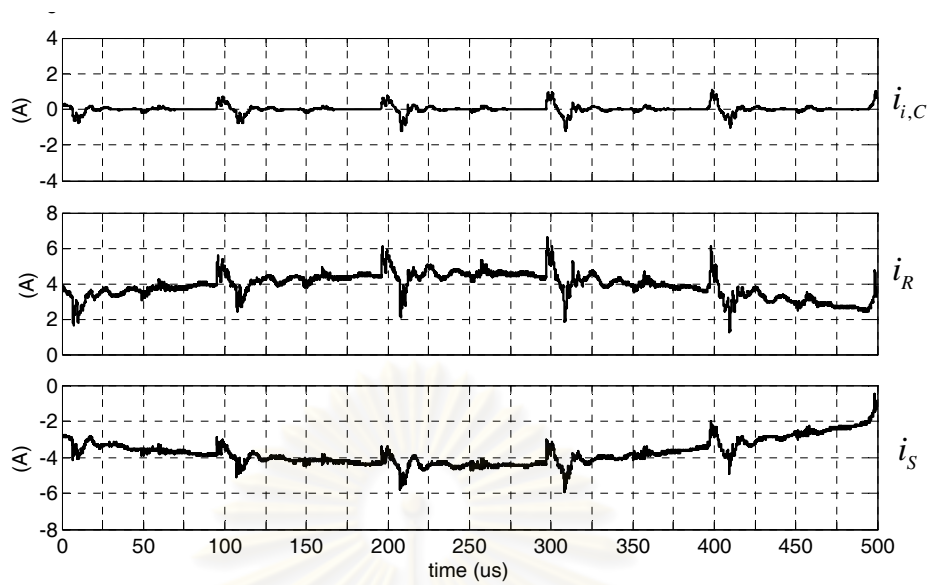
รูปที่ 4.17 ผลจำลองสัญญาณกระแสไหลรวม $i_{i,C}$ และกระแสเฟส i_R และ i_T ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตซ์ ในช่วงที่วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านนำกระแสและ $e_R > e_T > e_S$



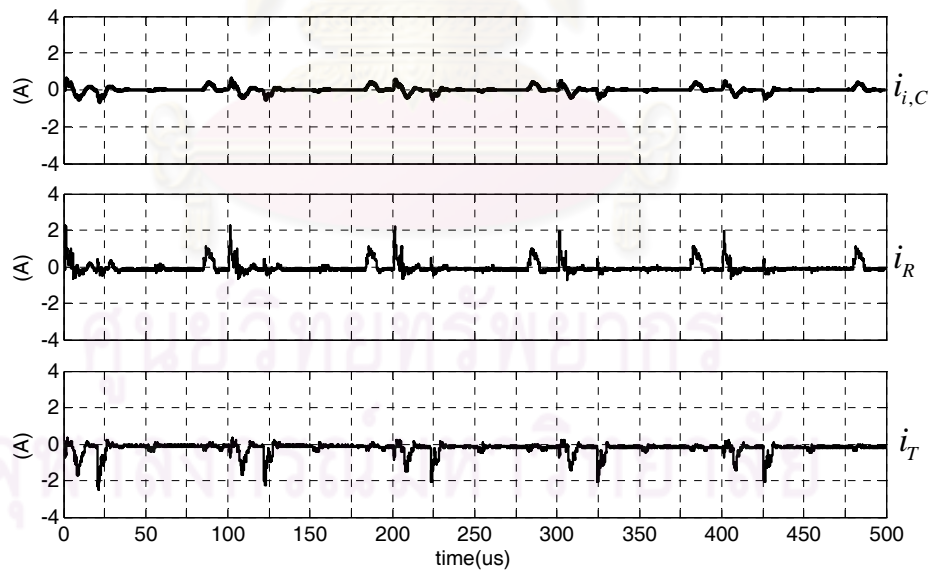
รูปที่ 4.18 ผลจำลองสัญญาณกระแสไหลรวม $i_{i,C}$ และกระแสเฟส i_R และ i_T ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์ ในช่วงที่วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแสและ $e_R > e_S > e_T$



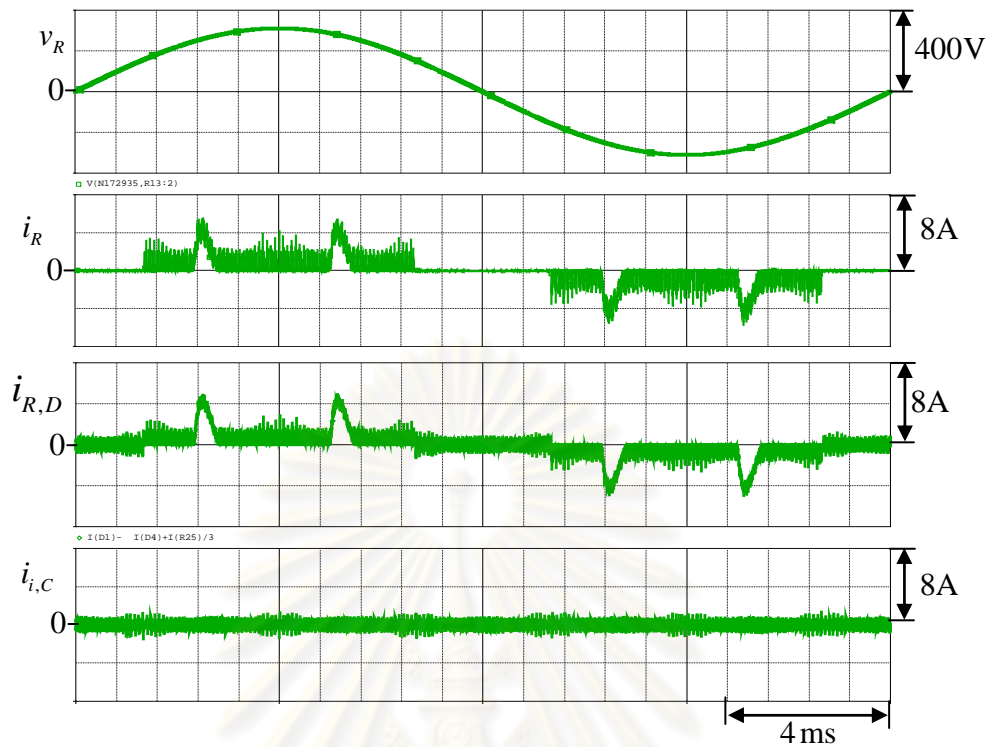
รูปที่ 4.19 ผลทดลองสัญญาณกระแสไหลรวม $i_{i,C}$ และกระแสเฟส i_R, i_S, i_T ในสเกลเวลาของความถี่หลักมูล



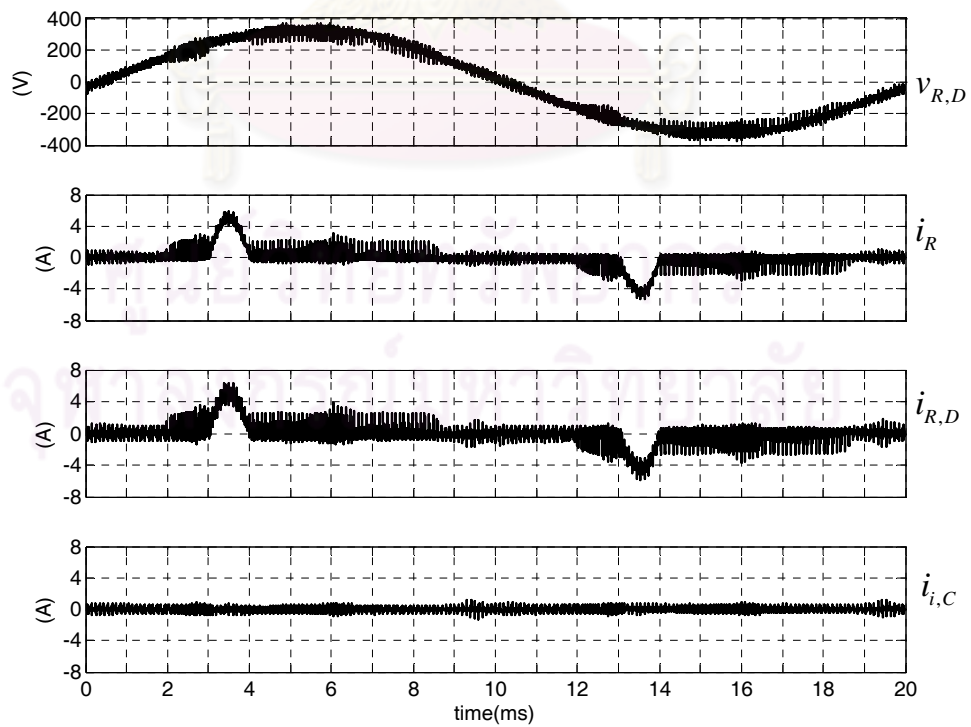
รูปที่ 4.20 ผลทดลองสัญญาณกระแสไหลตรงร่วม $i_{i,C}$ และกระแสเฟส i_R และ i_S ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์ ในช่วงที่วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านนำกระแสและ $e_R > e_T > e_S$



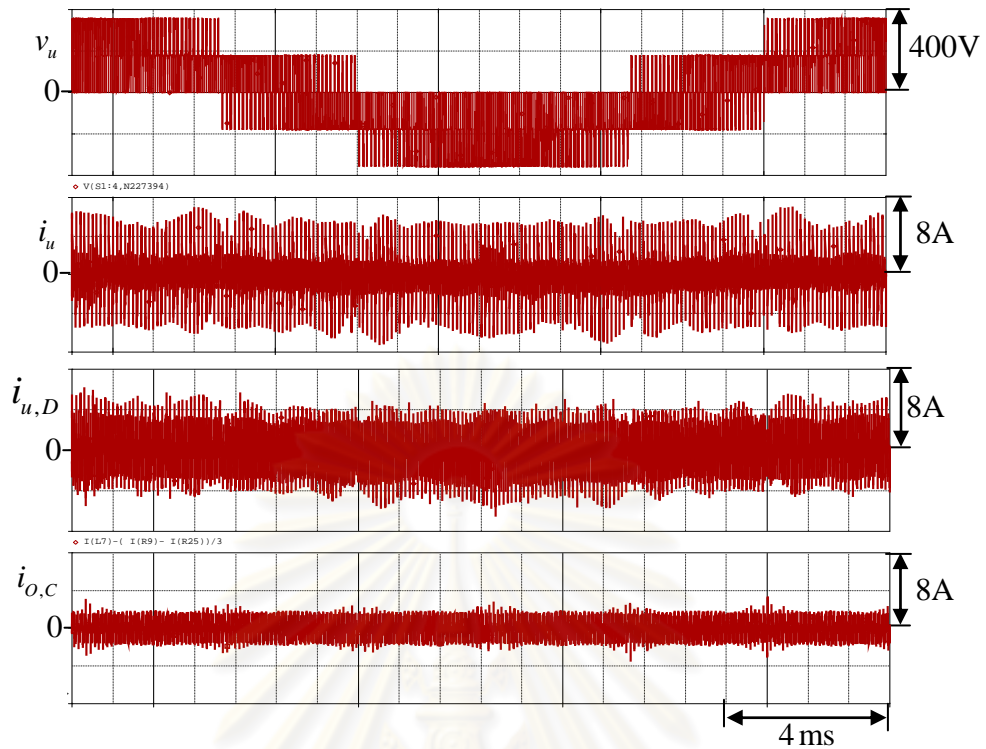
รูปที่ 4.21 ผลทดลองสัญญาณกระแสไหลตรงร่วม $i_{i,C}$ และกระแสเฟส i_R และ i_T ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์ ในช่วงที่วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแสและ $e_R > e_S > e_T$



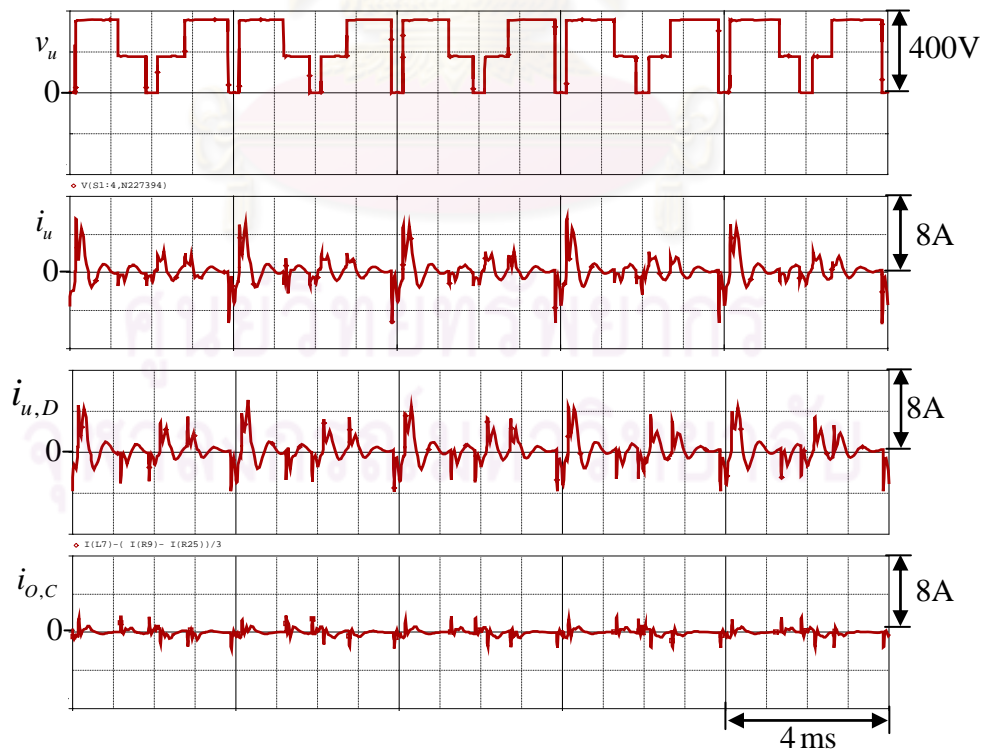
รูปที่ 4.22 ผลจำลองแสดงการอัดประจุสไฟตรงโดยกระแสไหลมรวม



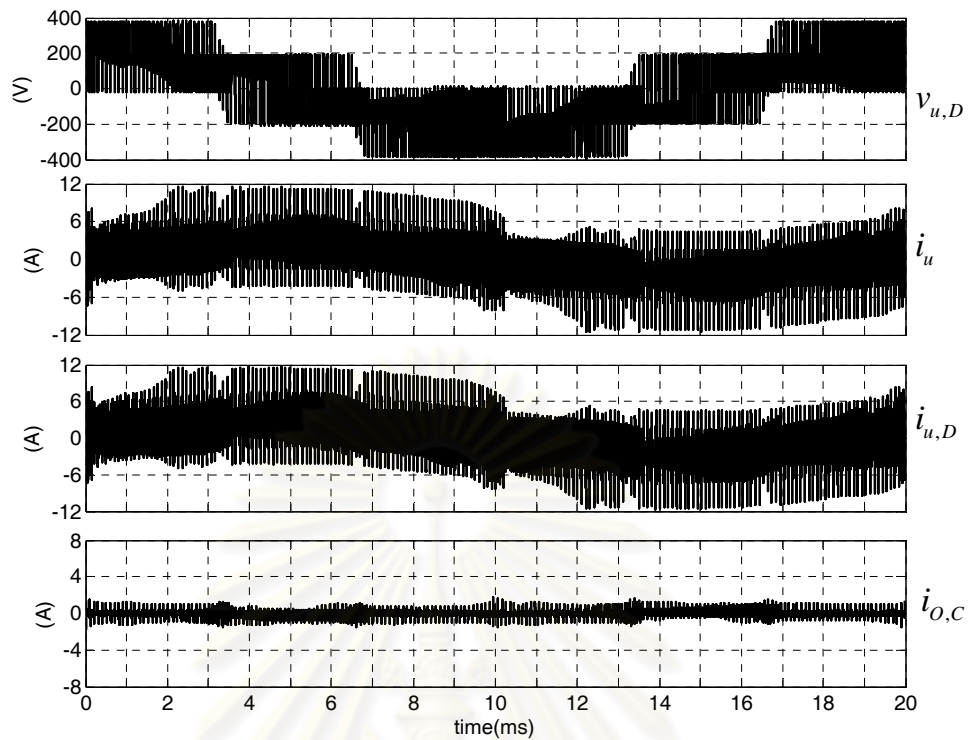
รูปที่ 4.23 ผลทดลองแสดงการอัดประจุสไฟตรงโดยกระแสไหลมรวม



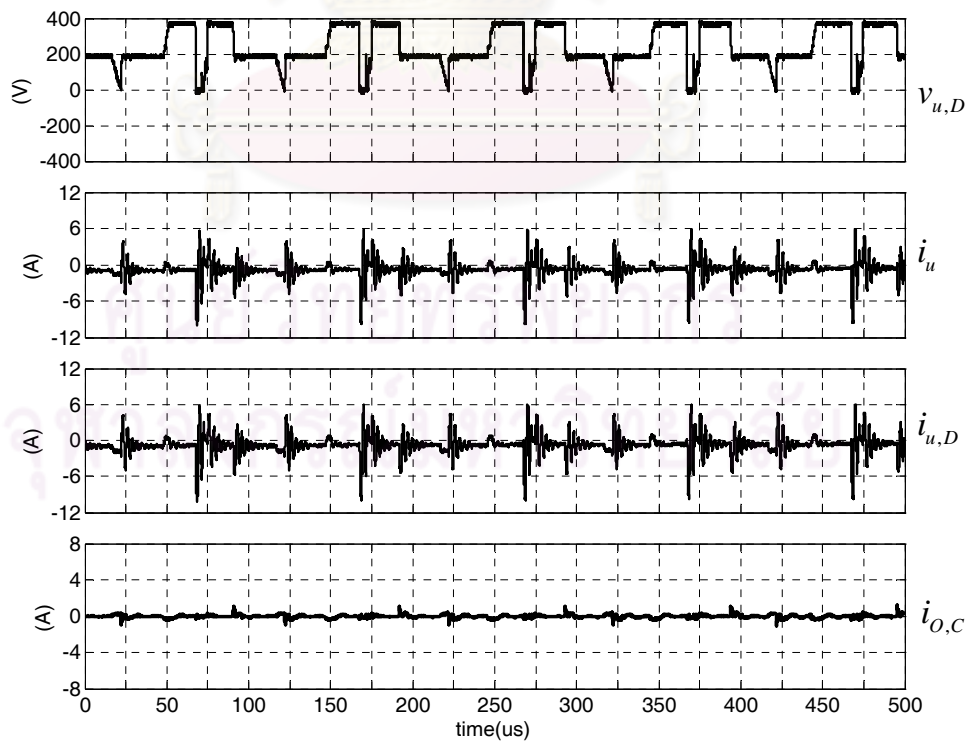
รูปที่ 4.24 ผลจำลองแสดงกระแสที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ที่ทำให้เกิดการคายประจุสัฟไฟตรงในสเกลเวลาของความถี่หลักมูล



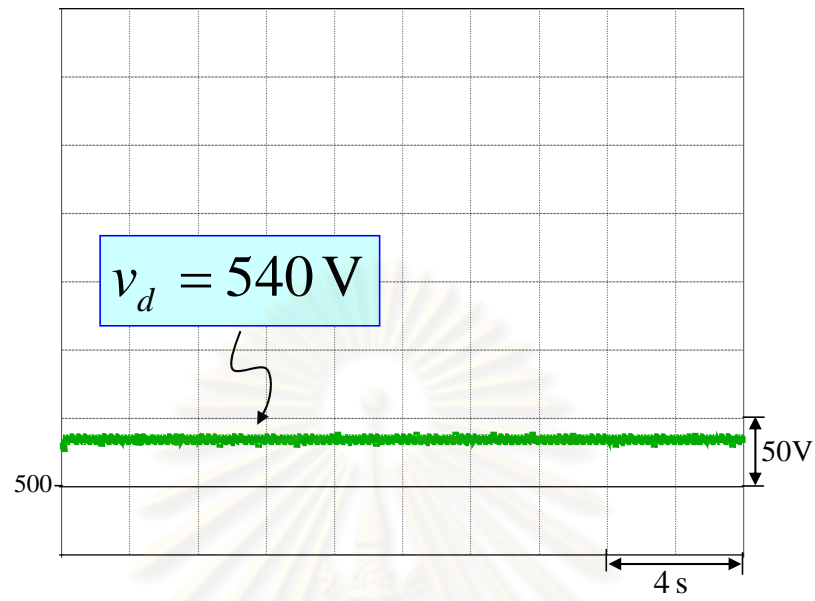
รูปที่ 4.25 ผลจำลองแสดงกระแสที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ที่ทำให้เกิดการคายประจุสัฟไฟตรงในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์



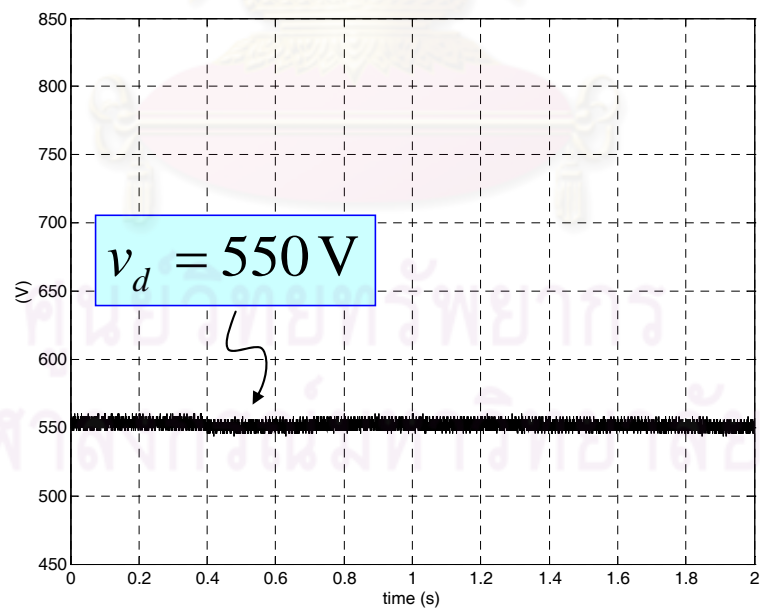
รูปที่ 4.26 ผลทดลองแสดงกระแสที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ที่ทำให้เกิดการคายประจุสไฟตรงในสเกลเวลาของความถี่หลักมูล



รูปที่ 4.27 ผลทดลองแสดงกระแสที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ที่ทำให้เกิดการคายประจุสไฟตรงในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์



รูปที่ 4.28 ผลจำลองแสดงระดับแรงดันบัลไฟตรง



รูปที่ 4.29 ผลทดลองแสดงระดับแรงดันบัลไฟตรง

4.2 ผลจำลองและผลทดลองระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ในภาวะไร้โหลดที่มีสายเคเบิลด้านออกยาวมาก และมีการติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC

เมื่อมีการติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ที่มีโครงสร้างดังรูปที่ 4.1 ข) ในระบบขับเคลื่อนที่มีสายเคเบิลยาวดังในหัวข้อที่ 4.1 จะพบว่าระดับแรงดันบัลไฟตรงของอินเวอร์เตอร์จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนทำให้อินเวอร์เตอร์ต้องตัดการทำงานภายในเวลาไม่ถึง 5 นาทีหลังจากเริ่มทำงาน เพื่อป้องกันตนเองจากความเสียหาย ดังนั้นในหัวข้อนี้จะแสดงผลการจำลองและผลการทดลองเพื่ออธิบายลักษณะกระแสไหลร่วมซึ่งเป็นสาเหตุของการอัดประจุบัลไฟตรง และกลไกการชาร์จบัลไฟตรงภายใต้ภาวะการทำงานดังกล่าว และจะชี้ให้เห็นว่านอกจากเงื่อนไขที่ระบบขับเคลื่อนมีสายเคเบิลด้านออกยาวและทำงานในภาวะไร้โหลดแล้ว การติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ก็ส่งผลกระทบต่อการอัดประจุบัลไฟตรงจนเกิดแรงดันเกินด้วย

เนื่องจากแรงดันเกินที่บัลไฟตรงเกิดขึ้นในช่วงที่อินเวอร์เตอร์เริ่มทำงาน ซึ่งเป็นช่วงที่อินเวอร์เตอร์สร้างแรงดันความถี่ต่ำกว่า 50 Hz เพื่อออกตัวมอเตอร์ การจำลองในกรณีนี้จึงได้กำหนดให้อินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่ด้านออก $f_o = 5 \text{ Hz}$ และความถี่การสวิตช์ $f_{sw} = 10 \text{ kHz}$

4.2.1 พฤติกรรมของกระแสไหลร่วมของอินเวอร์เตอร์ที่ติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟ

เมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ในรูปที่ 4.1 ข) เพิ่มที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ตัวเหนี่ยวนำ L_f จะทำให้วงจรไหลร่วมของระบบมีค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น และทำให้ความถี่การแกว่งของกระแสไหลร่วมลดลงในเวลาเดียวกัน กระแสไหลร่วมในกรณีนี้จะมีพฤติกรรมดังต่อไปนี้

จากผลการจำลองในรูปที่ 4.30 กระแสไหลร่วม $i_{o,c}$ และ $i_{i,c}$ จะมีปริมาณเท่ากัน แสดงว่าเมื่อกระแสไหลร่วม $i_{o,c}$ ไหลออกจากอินเวอร์เตอร์ลงกราวด์แล้ว กระแสทั้งหมดจะไหลกลับสู่อินเวอร์เตอร์โดยผ่านแหล่งจ่ายไฟ 3 เฟสเข้ามาที่วงจรเรียงกระแส แต่ไม่ไหลผ่านความจุไฟฟ้าแบบแฝง C_h ระหว่างบัลไฟตรงกับซิงก์ระบายความร้อน ($i_{BUS,C} = 0$) สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากที่ความถี่ 10-25 kHz ซึ่งเป็นความถี่ของกระแสไหลร่วม อิมพีแดนซ์ของ C_h จะมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับอิมพีแดนซ์ระหว่างแหล่งจ่ายกับกราวด์

สำหรับผลทดลองในรูปที่ 4.31 กระแสไหลร่วมมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับผลจำลองในรูปที่ 4.30 ถึงแม้จะมีความถี่มากกว่าคือเท่ากับ 30 kHz แต่กระแสไหลร่วมยังคงมีพฤติกรรมที่ไหลกลับเข้าอินเวอร์เตอร์โดยผ่านทางแหล่งจ่าย 3 เฟสและไม่ผ่าน C_h เช่นเดียวกับผลจำลอง

แรงดันและกระแสไหลร่วมที่ด้านหน้าของวงจรเรียงกระแส

แรงดันบัลไฟตรงที่สูงขึ้นจนมีขนาดใหญ่กว่าค่ายอดของแรงดันแหล่งจ่าย 3 เฟส ทำให้วงจรเรียงกระแสของอินเวอร์เตอร์อยู่ในย่านไม่นำกระแสตลอดเวลา ดังผลจำลองและผลทดลองในรูปที่ 4.32 และ 4.34 ที่สังเกตได้ว่าแรงดันไหลร่วม $v_{rec,C}$ มีการแกว่งตลอดเวลา

จากผลการจำลองในรูปที่ 4.33 แรงดันไหลร่วม $v_{rec,C}$ จะแกว่งตามจังหวะการเปลี่ยนเครื่องหมายของ $i_{i,c}$ สอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยวงจรมุมมุลในบทที่ 3 ส่วนผลการทดลองในรูปที่ 4.35 แสดงให้เห็นว่าแรงดันไหลร่วม $v_{rec,C}$ มีการแกว่งจริงตามจังหวะการเปลี่ยนเครื่องหมายของ $i_{i,c}$ ตรงกับการวิเคราะห์

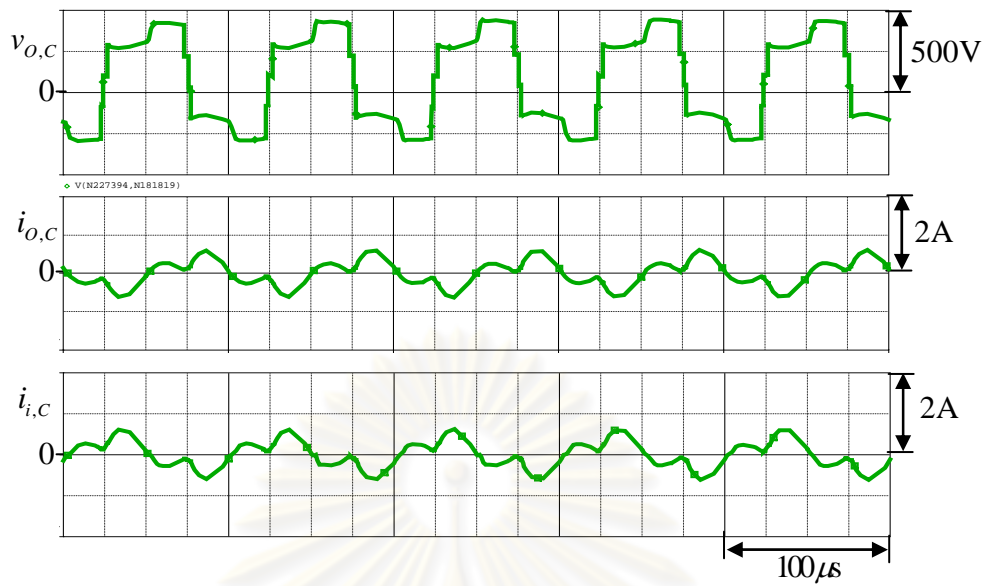
แรงดันและกระแสโหมตร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์

รูปที่ 4.36 และ 4.37 แสดงผลจำลองแรงดันและกระแสโหมตร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ในสเกลเวลาของความถี่หลักมูลและความถี่การสวิตช์ตามลำดับ จากรูปที่ 4.37 จะเห็นว่า ในช่วงเริ่มทำงานที่ อินเวอร์เตอร์สร้างแรงดันด้านออกความถี่ต่ำ แรงดันโหมตร่วม $v_{mv,c}$ จะมีรูปสัญญาณใกล้เคียงกับรูปสี่เหลี่ยม และกระแสโหมตร่วมจะมีองค์ประกอบที่ความถี่ 10 kHz ตรงกับความถี่การสวิตช์ และองค์ประกอบที่ความถี่ 22 kHz ตรงกับความถี่เรโซแนนซ์โหมตร่วม

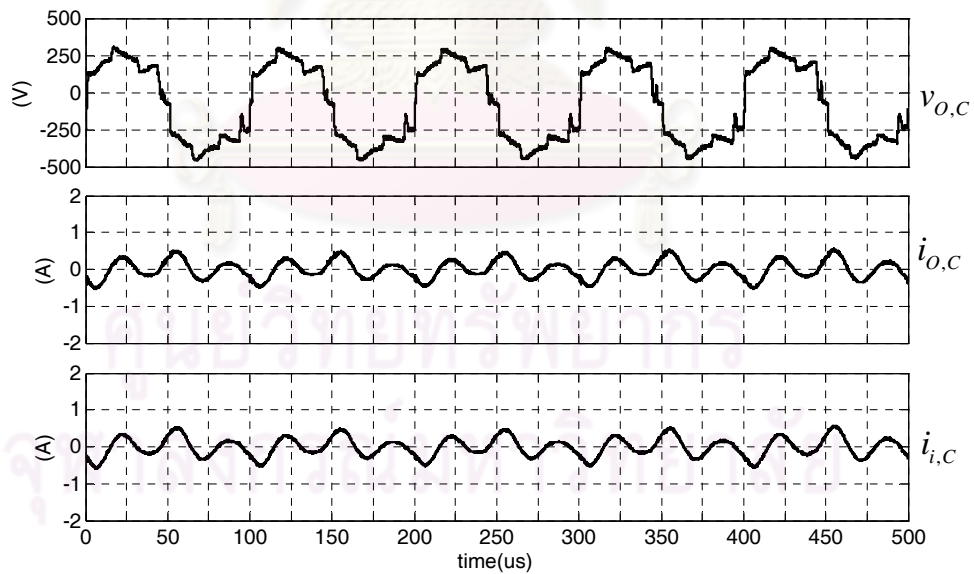
ผลทดลองในรูปที่ 4.38-4.39 มีความสอดคล้องกับผลจำลองเป็นอย่างดี กระแสโหมตร่วมมี องค์ประกอบที่ความถี่ 10 kHz และ 30 kHz ซึ่งแสดงว่าค่าพารามิเตอร์ที่ใช้จำลองระบบอาจมีความ คลาดเคลื่อนจากระบบที่ใช้ทดลองจริงเล็กน้อย



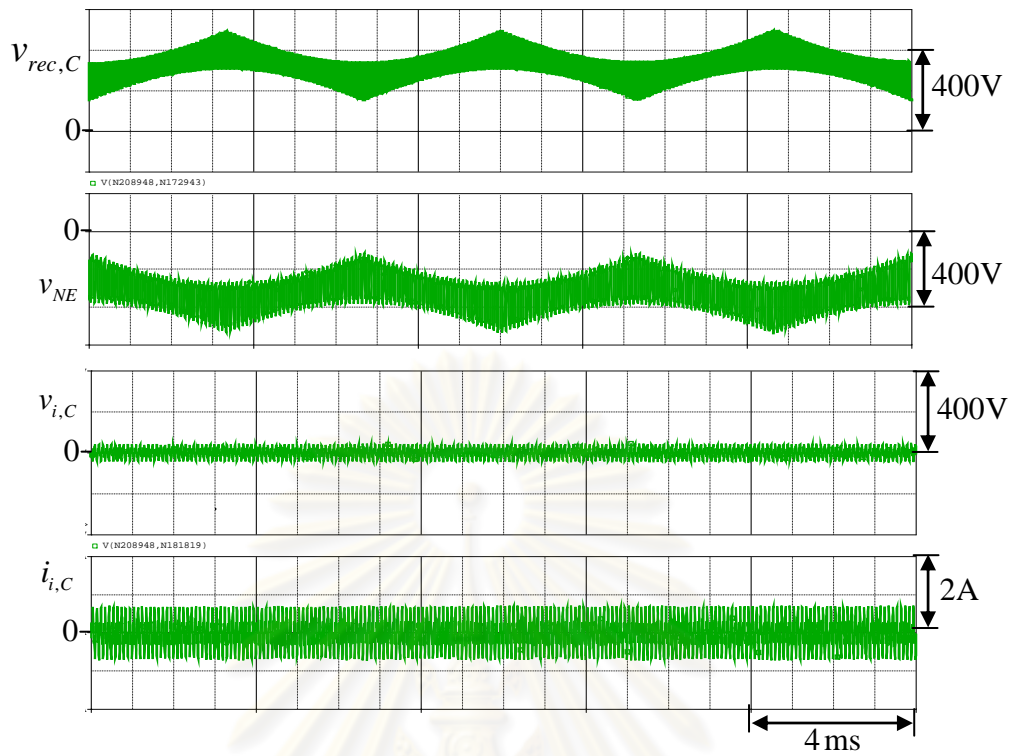
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



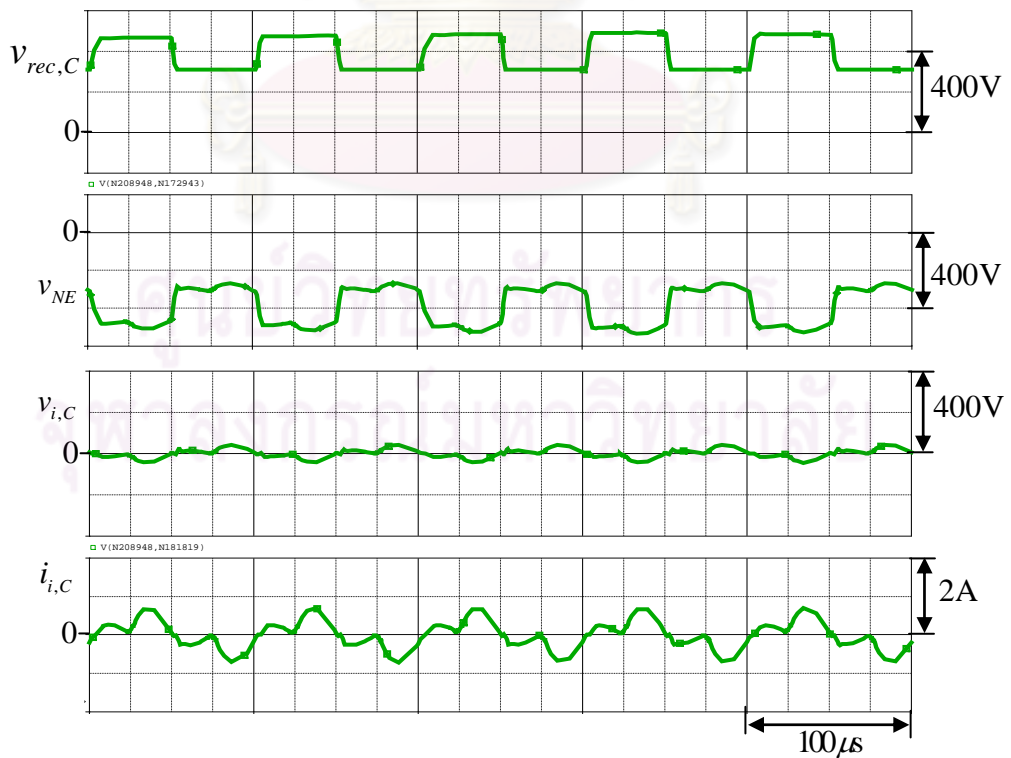
รูปที่ 4.30 ผลจำลองแรงดันโหมตร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์และกระแสโหมตร่วมที่ไหลผ่านส่วนต่างๆ ของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์



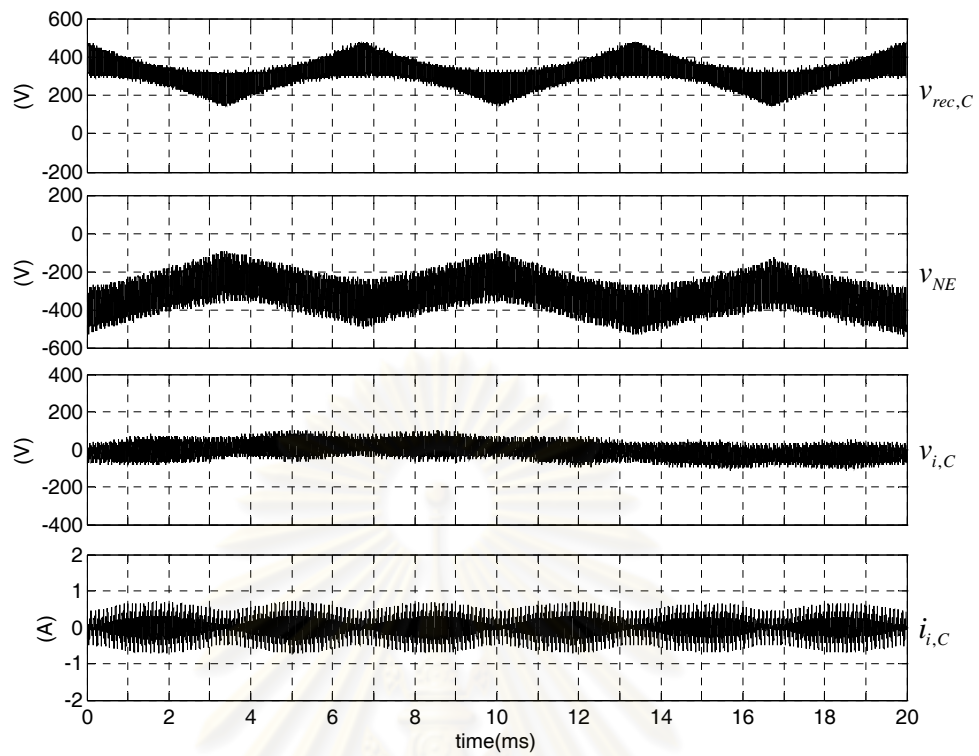
รูปที่ 4.31 ผลทดลองแรงดันโหมตร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์และกระแสโหมตร่วมที่ไหลผ่านส่วนต่างๆ ของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์



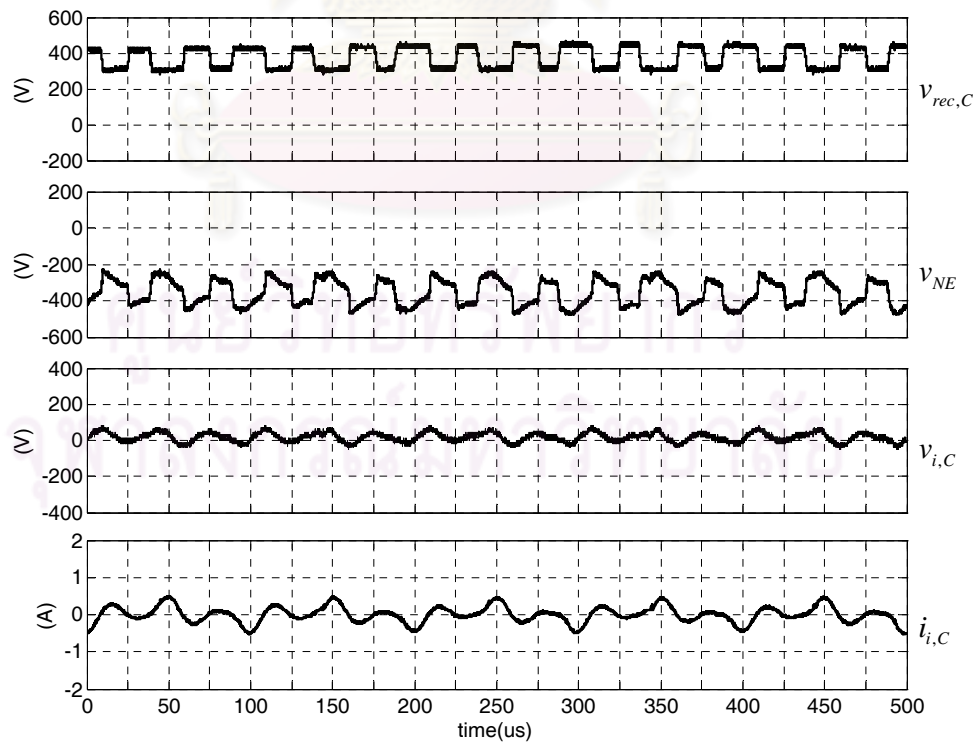
รูปที่ 4.32 ผลจำลองแรงดันและกระแสโหมคร่วมที่ด้านหน้าของอินเวอร์เตอร์เมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ในสเกลเวลาของความถี่หลักมูล



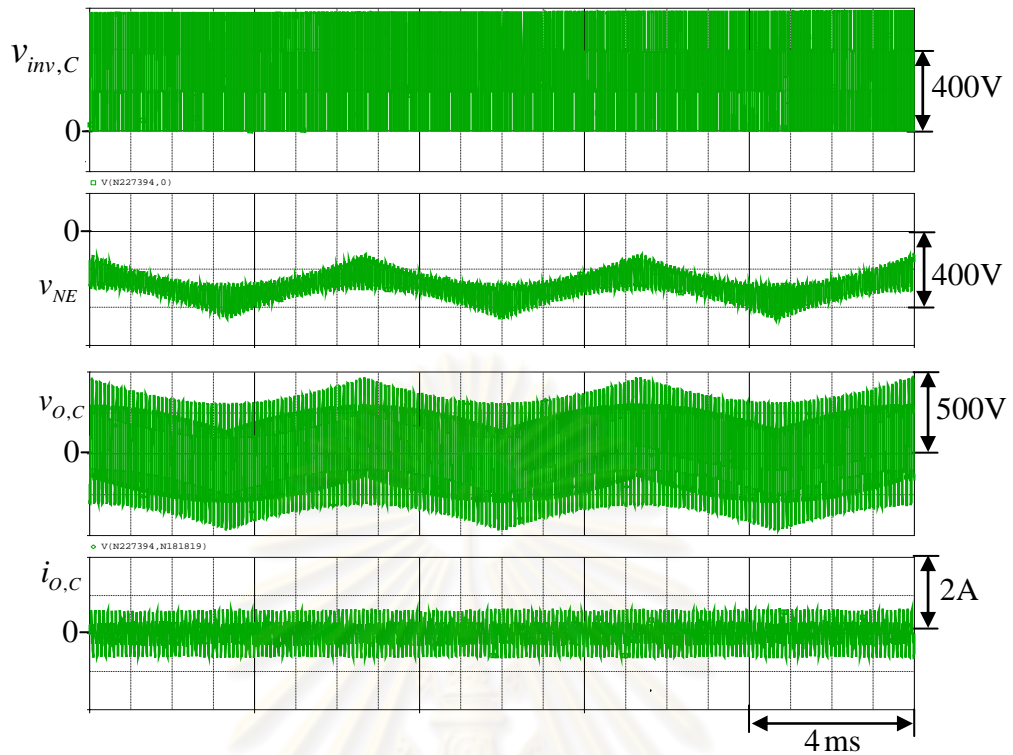
รูปที่ 4.33 ผลจำลองแรงดันและกระแสโหมคร่วมที่ด้านหน้าของอินเวอร์เตอร์เมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตซ์ (วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส)



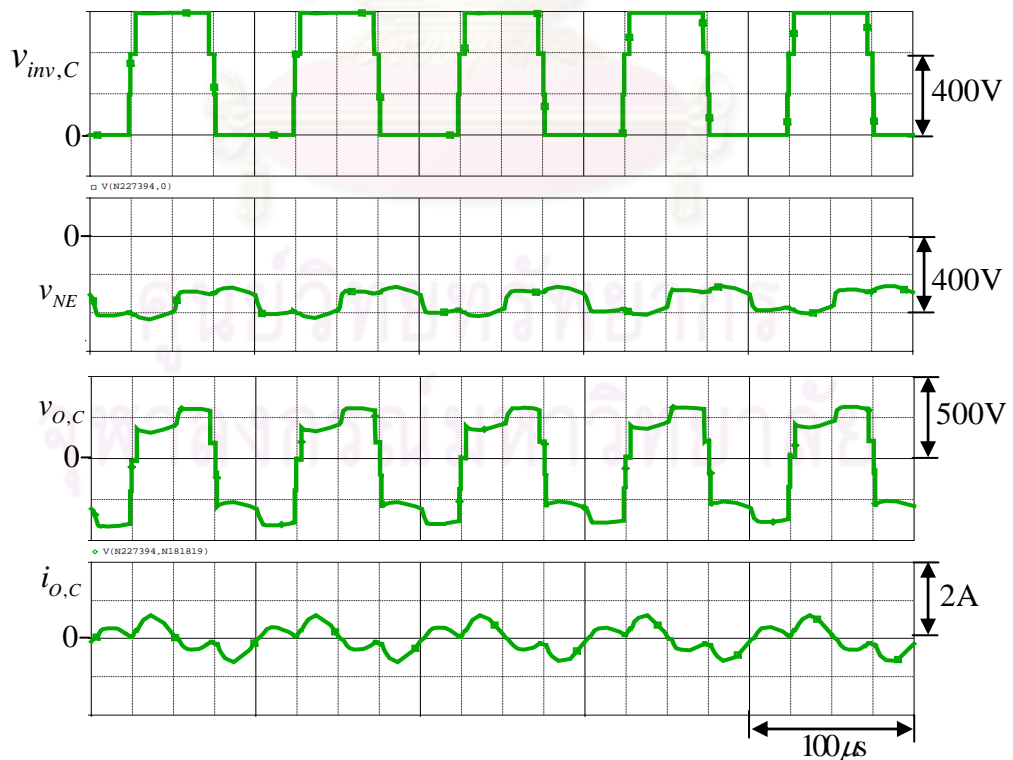
รูปที่ 4.34 ผลทดลองแรงดันและกระแสโหมดร่วมที่ด้านหน้าของอินเวอร์เตอร์เมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ในสเกลเวลาของความถี่หลักมูล



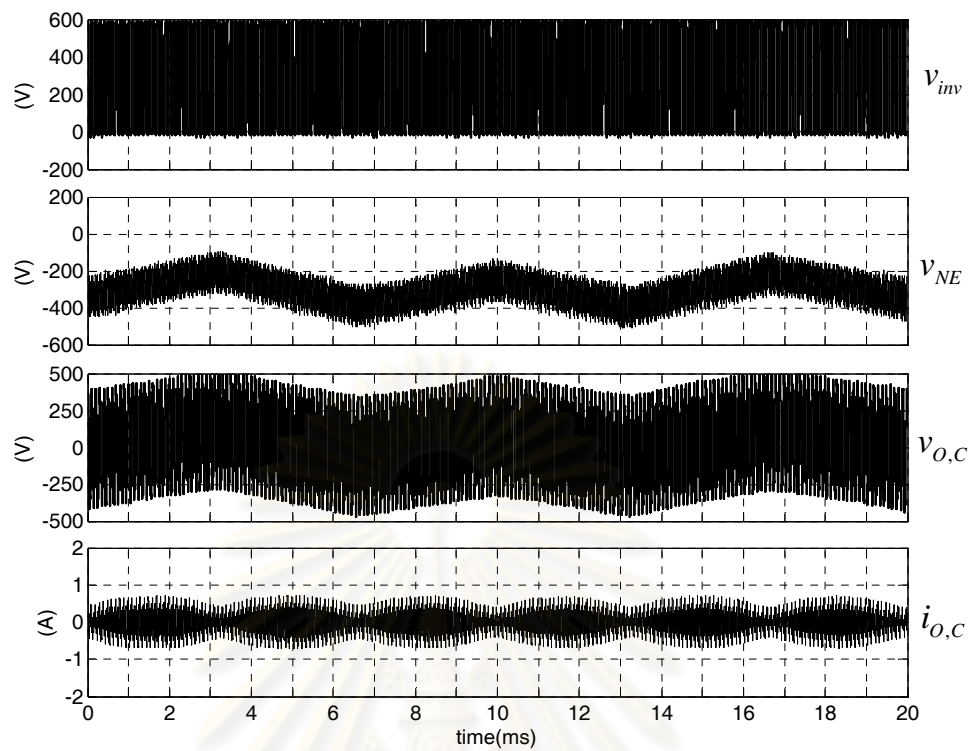
รูปที่ 4.35 ผลทดลองแรงดันและกระแสโหมดร่วมที่ด้านหน้าของอินเวอร์เตอร์เมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์ (วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส)



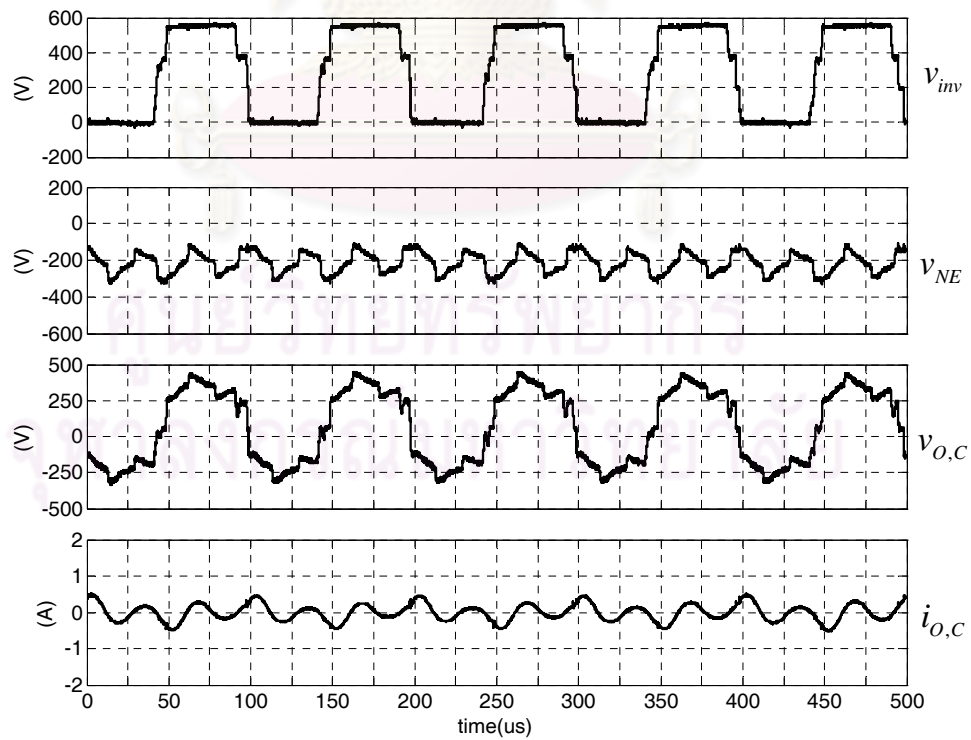
รูปที่ 4.36 ผลจำลองแรงดันและกระแสไหลพร้อมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์เมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ในสเกลเวลาของความถี่หลักมูล



รูปที่ 4.37 ผลจำลองแรงดันและกระแสไหลพร้อมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์เมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์ (วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส)



รูปที่ 4.38 ผลทดลองแรงดันและกระแสโหมคร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์เมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ในสเกลเวลาของความถี่หลักมูล



รูปที่ 4.39 ผลทดลองแรงดันและกระแสโหมคร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์เมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์ (วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส)

4.2.2 การอัดประจุสัฟไฟตรงจนเกิดแรงดันเกิน

กระแสเฟสที่ด้านหน้าของวงจรเรียงกระแส

การที่ไดโอดเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแสตลอดเวลา ทำให้กระแสเฟสของแหล่งจ่ายจะมีเฉพาะกระแสที่เกิดจาก $i_{i,c}$ เท่านั้น ดังรูปที่ 4.40 จากภาพขยายทางแกนเวลาในรูปที่ 4.41 ไดโอดเรียงกระแสของเฟสที่แหล่งจ่ายมีค่าแรงดันสูงสุดและต่ำสุดในขณะนั้นจะนำกระแสสลับกันตามเครื่องหมายของกระแสโหมตร่วม ผลทดลองในรูปที่ 4.42 และ 4.43 ให้ผลที่เหมือนกับผลจำลองในรูปที่ 4.40 และ 4.41 จึงสามารถยืนยันได้ว่าการวิเคราะห์ในเชิงทฤษฎีที่น่าเสนอ มีความสอดคล้องกับพฤติกรรมของระบบจริง

การอัดประจุสัฟไฟตรงโดยกระแสโหมตร่วม

ที่วงจรด้านหน้ากระแสโหมตร่วม $i_{i,c}$ จะถูกแปลงให้เป็นกระแสโหมตผลต่างความถี่ 50 Hz ที่มีมุมเฟสตรงกับแหล่งจ่าย (ทิศไหลออกจากแหล่งจ่าย) ดังผลจำลองและผลทดลองในรูปที่ 4.44 และ 4.45 เมื่อวงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแสตลอดเวลา ดังนั้นจึงเกิดการอัดประจุสัฟไฟตรงโดยกระแสโหมตร่วมตลอดเวลาเช่นกัน

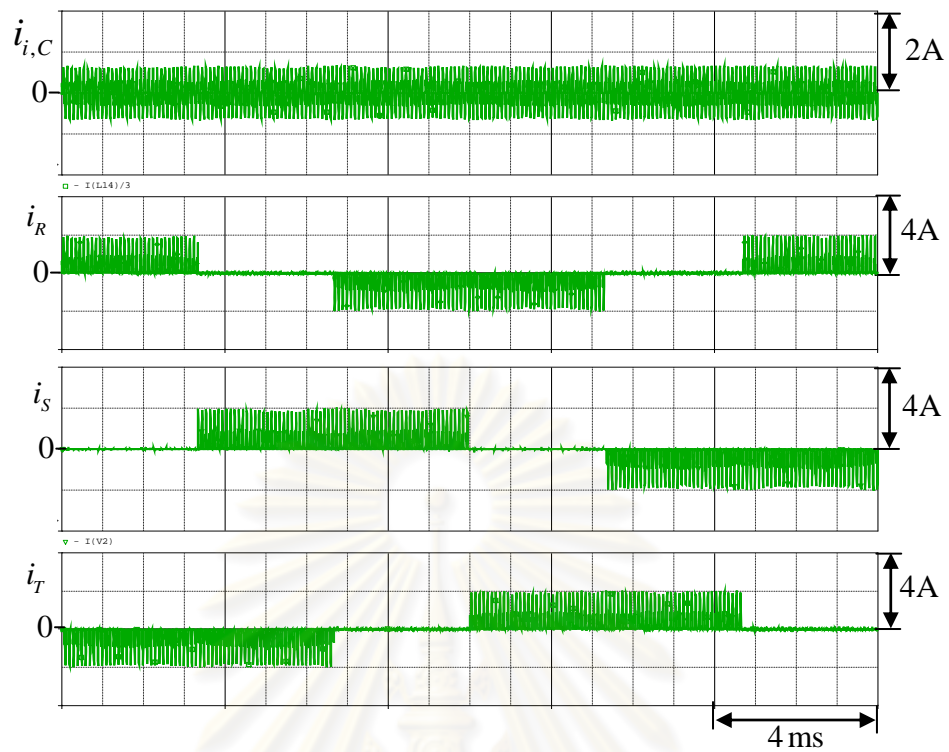
กระแสคายประจุสัฟไฟตรง

ผลจำลองในรูปที่ 4.46 - 4.49 แสดงให้เห็นว่าเมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC แล้วกระแสโหมตผลต่างความถี่สูงจะลดลงจนมีขนาดเล็กมาก ดังนั้นกระแสเฟสและกำลังสูญเสียในสายจึงมีค่าต่ำ การคายประจุออกจากบัสไฟตรงจึงน้อยลงไปด้วย

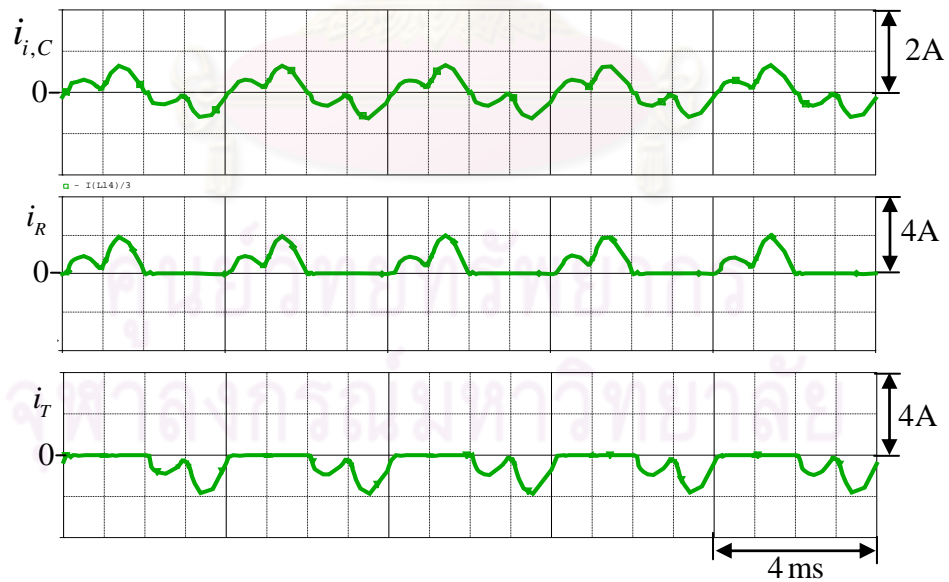
ระดับแรงดันบัสไฟตรงจนเกิดแรงดัน

ในสภาวะที่มีการอัดประจุสัฟไฟตรงโดยกระแสโหมตร่วมอย่างต่อเนื่อง แต่มีการคายประจุออกจากบัสไฟตรงในปริมาณน้อย จึงทำให้เกิดการสะสมพลังงานที่บัสไฟตรง และทำให้ระดับแรงดันที่บัสไฟตรงเพิ่มสูงขึ้นดังผลจำลองในรูปที่ 4.50 และ 4.51 เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างรูปที่ 4.50 และ 4.51 จะเห็นได้ว่าพลังงานสะสมที่บัสไฟตรงจะมีค่ามากขึ้นเมื่อความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์มีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะว่าความถี่การสวิตช์ที่สูงขึ้นจะทำให้ช่วงเวลาการอัดประจุโดยรวมนานขึ้นตามจำนวนครั้งการสวิตช์

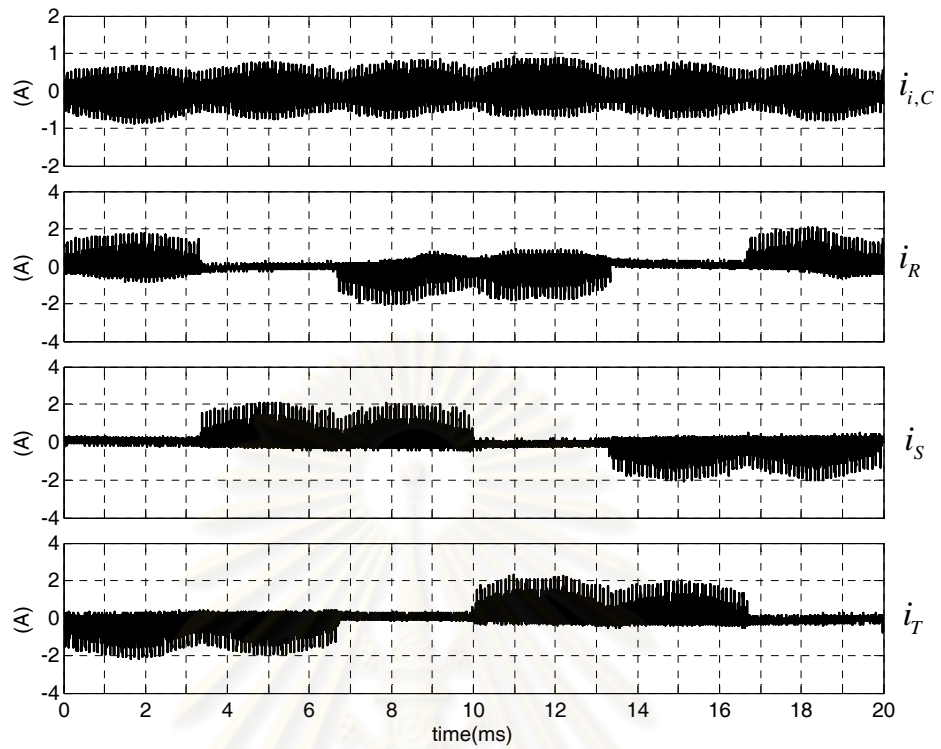
ผลการทดลองในรูปที่ 4.52 และ 4.53 ได้พิสูจน์ให้เห็นว่าปรากฏการณ์การอัดประจุสัฟไฟตรงจนเกิดแรงดันเกินสามารถเกิดขึ้นได้จริง ในรูปที่ 4.52 แรงดันบัสไฟตรงมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากอินเวอร์เตอร์เริ่มทำงาน จนกระทั่งเมื่อแรงดันบัสไฟตรงมีค่าเกือบถึง 800 V อินเวอร์เตอร์จึงต้องตัดการทำงานเพื่อป้องกันความเสียหาย ในรูปที่ 4.53 เป็นผลการทดลองเมื่อลดความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ลงจาก 10 KHz เหลือ 5 KHz ในกรณีนี้แรงดันบัสไฟตรงจะเพิ่มขึ้นจนถึงระดับประมาณ 680 V ซึ่งเป็นจุดที่เกิดสมดุลระหว่างพลังงานอัดประจุสัฟไฟตรงและพลังงานสูญเสียของอินเวอร์เตอร์



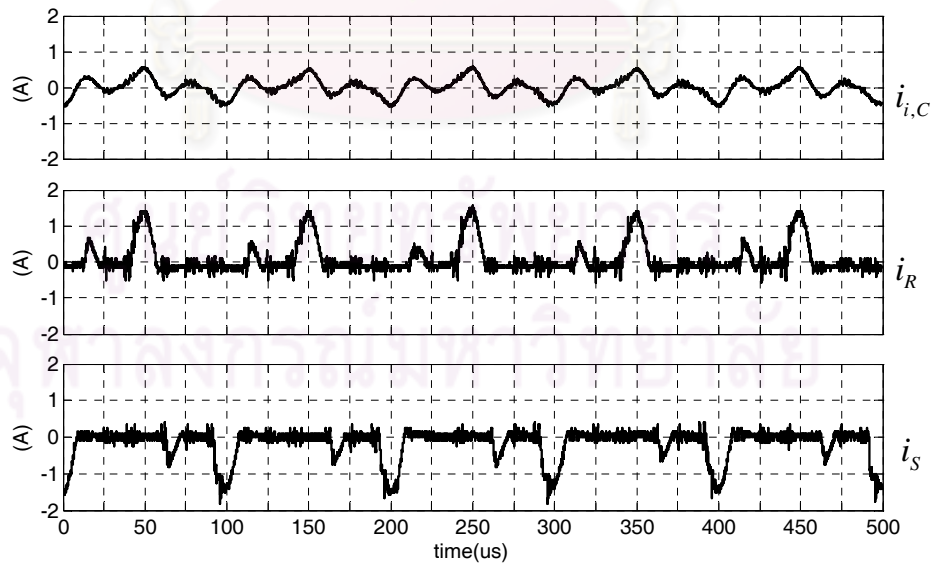
รูปที่ 4.40 ผลจำลองสัญญาณกระแสไหลรวม $i_{i,C}$ และกระแสเฟส i_R, i_S, i_T เมื่อติดตั้งวงจรพาสซีฟแบบ LC ในสเกลเวลาของความถี่หลักมูล



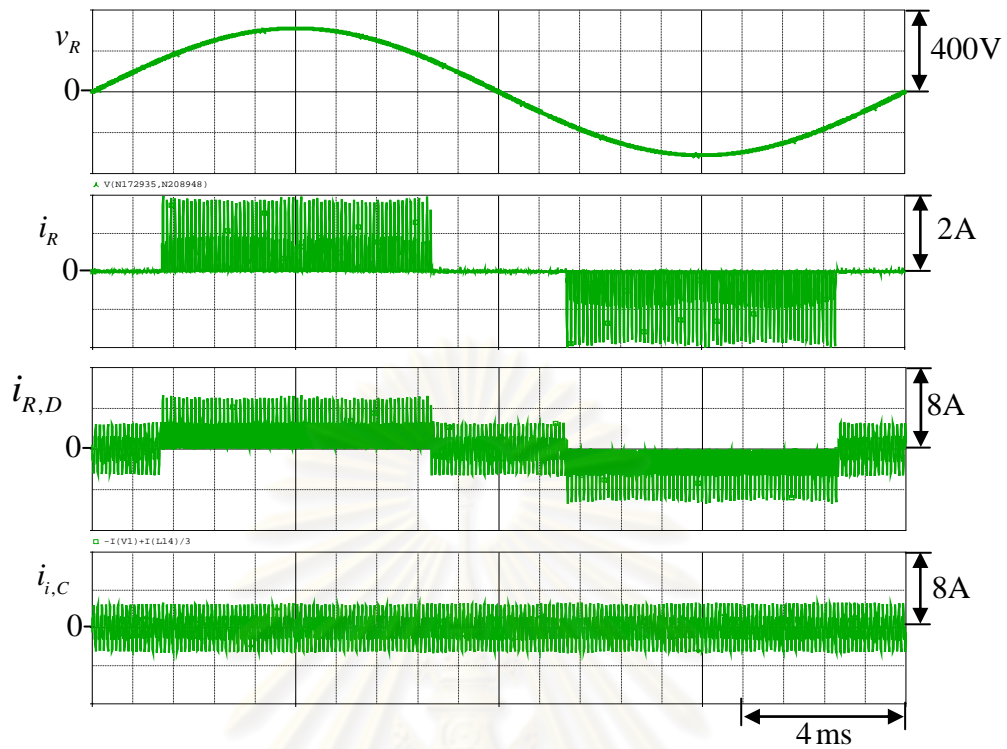
รูปที่ 4.41 ผลจำลองสัญญาณกระแสไหลรวม $i_{i,C}$ และกระแสเฟส i_R และ i_T เมื่อติดตั้งวงจรพาสซีฟแบบ LC ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์และ $e_R > e_S > e_T$ (วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส)



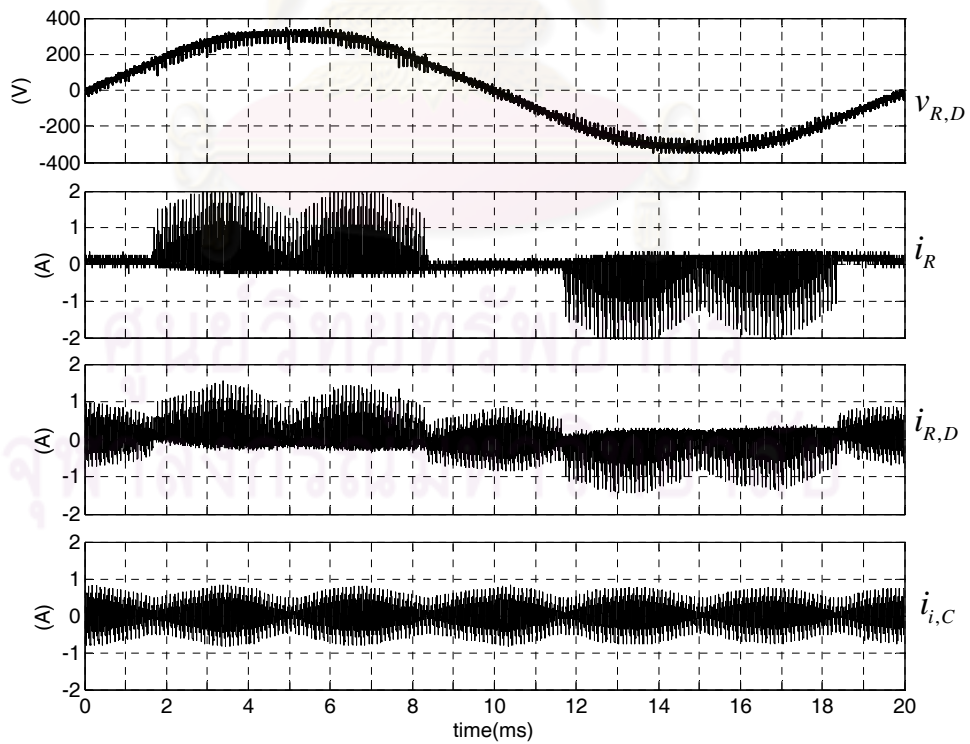
รูปที่ 4.42 ผลทดลองสัญญาณกระแสไหลมั่วรวม $i_{i,C}$ และกระแสเฟส i_R, i_S, i_T เมื่อติดตั้งวงจรองพาสซีฟแบบ LC ในสเกลเวลาของความถี่หลักมูล



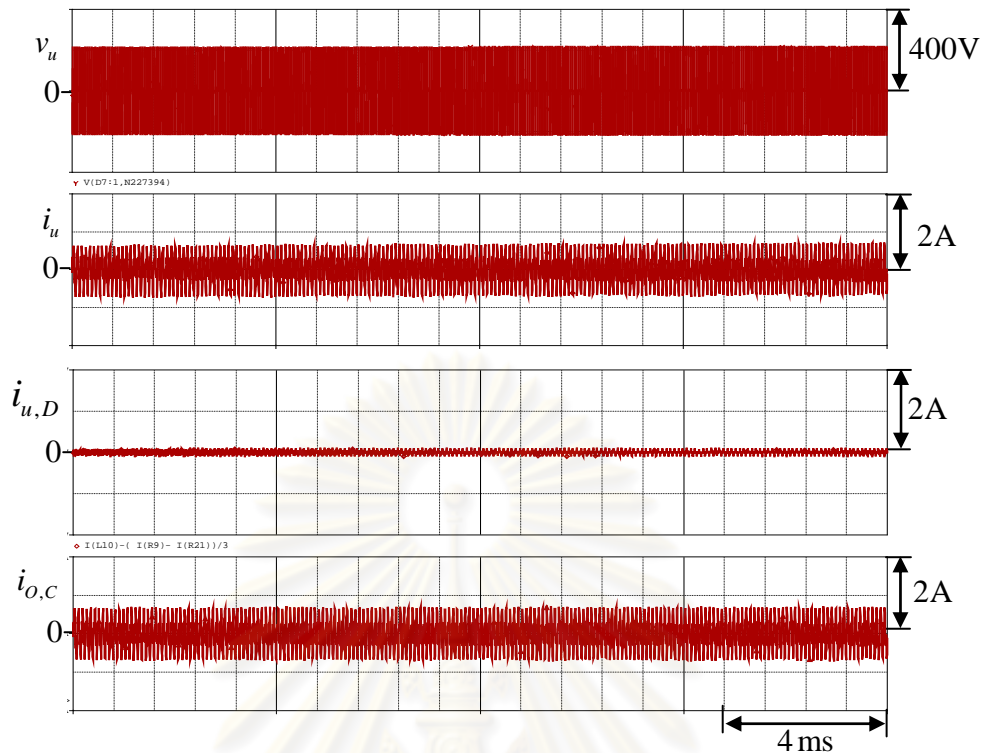
รูปที่ 4.43 ผลทดลองสัญญาณกระแสไหลมั่วรวม $i_{i,C}$ และกระแสเฟส i_R และ i_T เมื่อติดตั้งวงจรองพาสซีฟแบบ LC ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์และ $e_R > e_S > e_T$ (วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส)



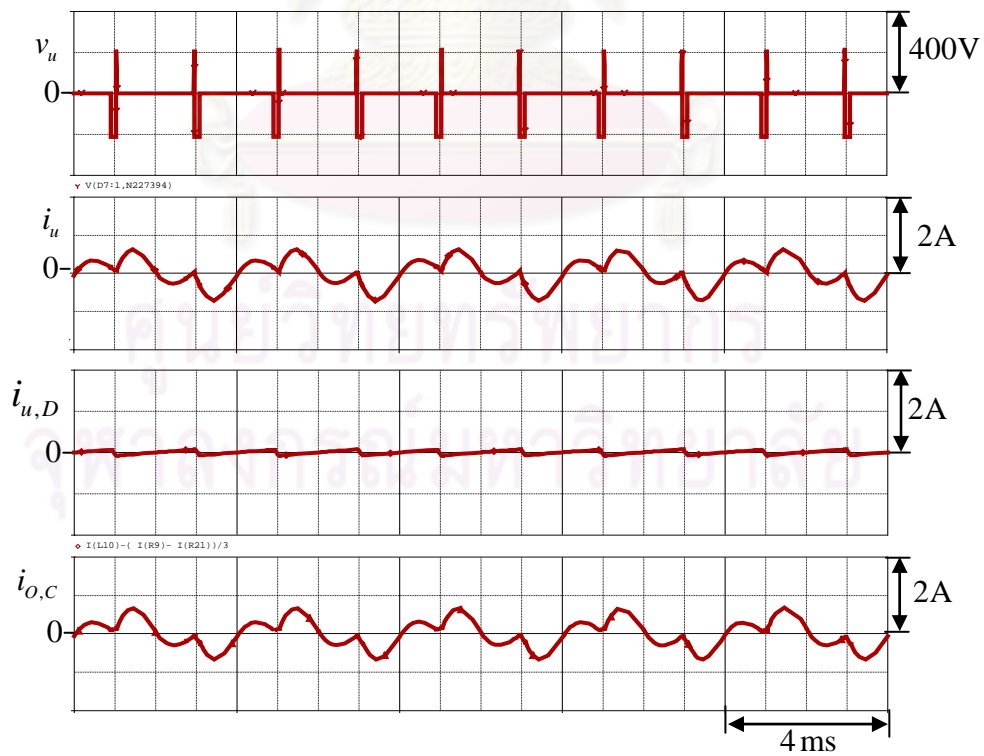
รูปที่ 4.44 ผลจำลองแสดงการอัดประจุไฟฟ้าตรงโดยกระแสไหลตรงเมื่อติดตั้งวงจรพาสซีฟแบบ LC



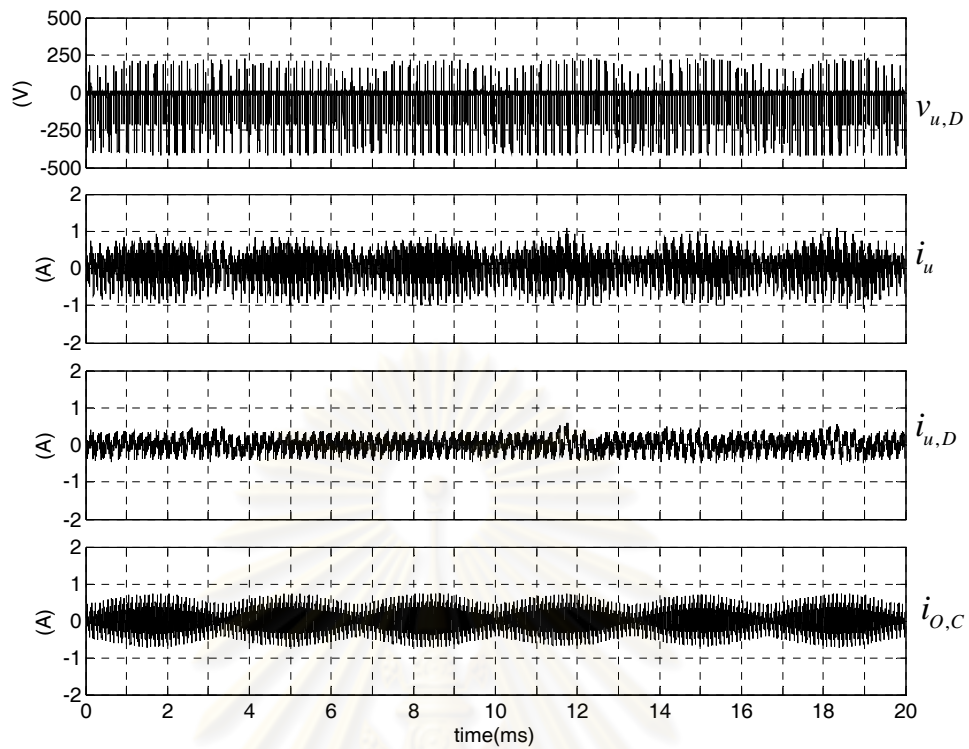
รูปที่ 4.45 ผลทดลองแสดงการอัดประจุไฟฟ้าตรงโดยกระแสไหลตรงเมื่อติดตั้งวงจรพาสซีฟแบบ LC



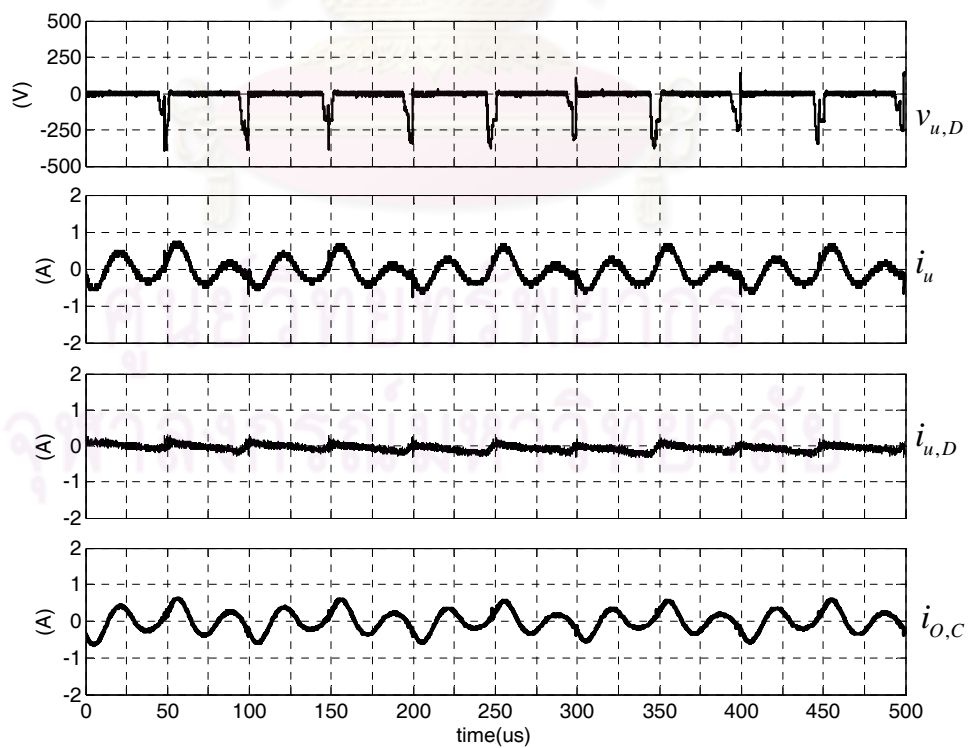
รูปที่ 4.46 ผลจำลองแสดงกระแสที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ที่ทำให้เกิดการคายประจุสไฟตรงเมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ในสเกลเวลาของความถี่หลักมูล



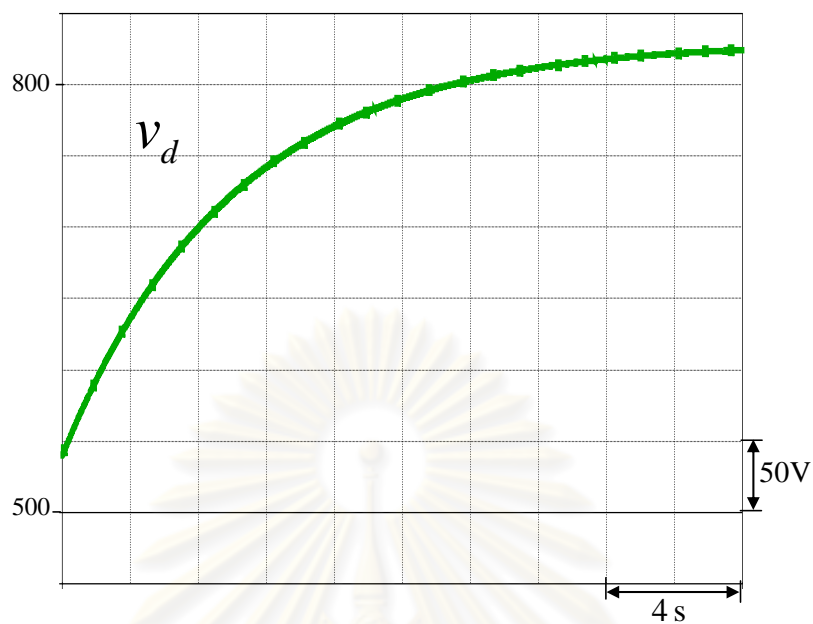
รูปที่ 4.47 ผลจำลองแสดงกระแสที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ที่ทำให้เกิดการคายประจุสไฟตรงเมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์



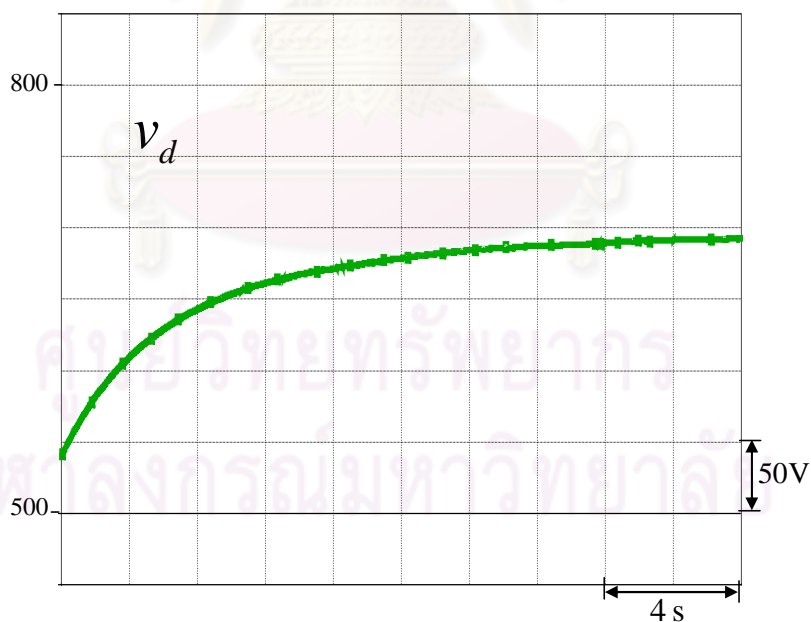
รูปที่ 4.48 ผลทดลองแสดงกระแสที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ที่ทำให้เกิดการคายประจุสไฟตรงเมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ในสเกลเวลาของความถี่หลักมูล



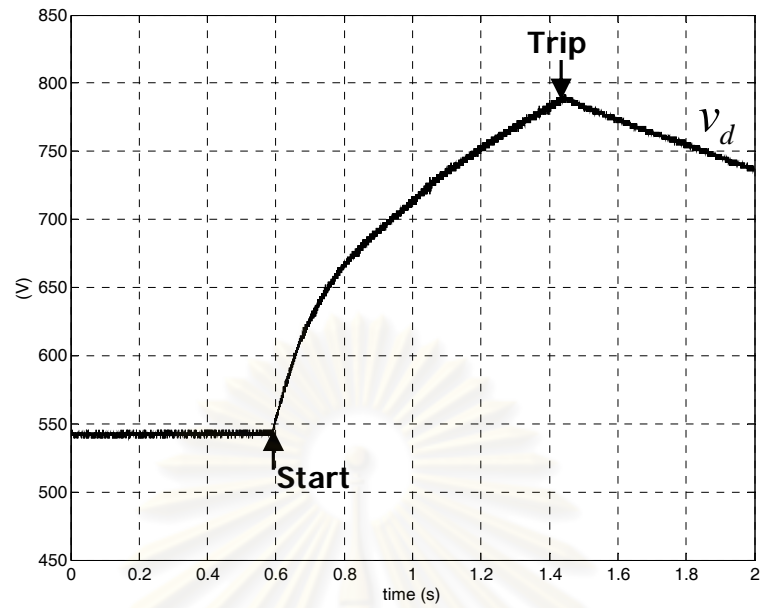
รูปที่ 4.49 ผลทดลองแสดงกระแสที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ที่ทำให้เกิดการคายประจุสไฟตรงเมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์



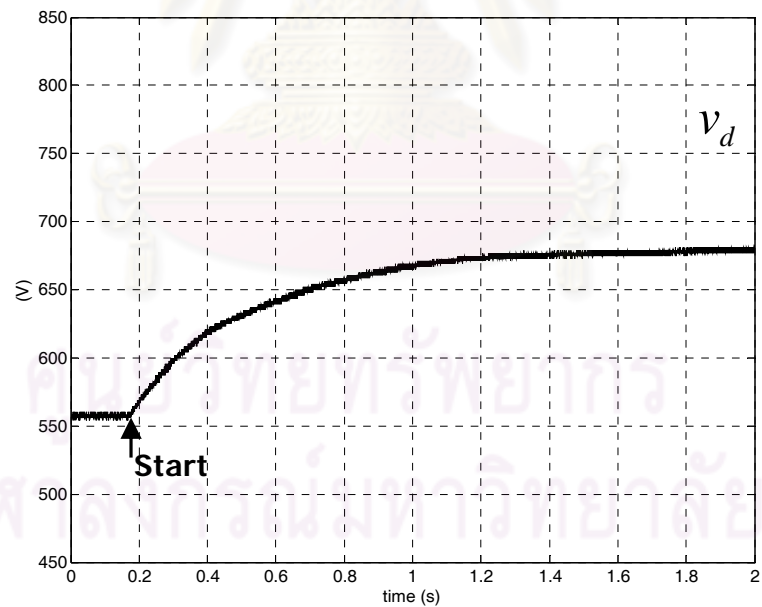
รูปที่ 4.50 ผลจำลองแสดงการเพิ่มขึ้นของระดับแรงดันบัลไฟตรงเมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ที่ความถี่การสวิตช์ 10 kHz



รูปที่ 4.51 ผลจำลองแสดงการเพิ่มขึ้นของระดับแรงดันบัลไฟตรงเมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ที่ความถี่การสวิตช์ 5 kHz



รูปที่ 4.52 ผลทดลองแสดงการเพิ่มขึ้นของระดับแรงดันบัลไฟตรงเมื่อติดตั้งวงจรพาสซีฟแบบ LC ที่ความถี่การสวิตช์ 10 kHz

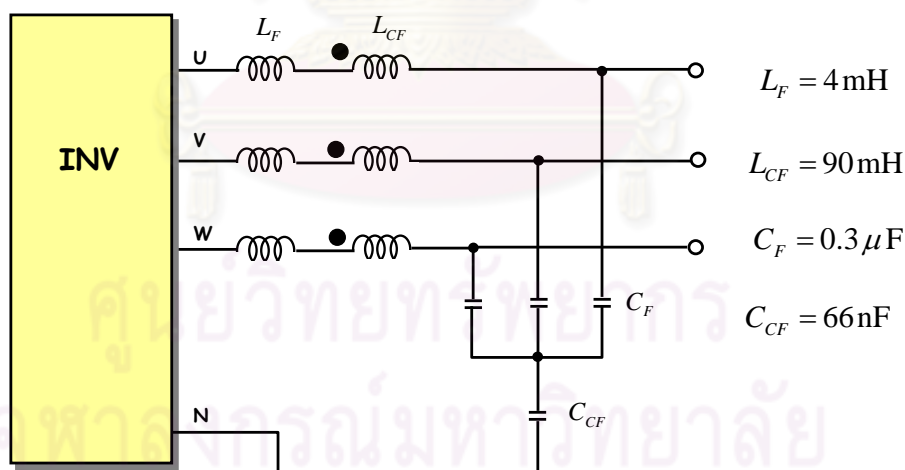


รูปที่ 4.53 ผลทดลองแสดงการเพิ่มขึ้นของระดับแรงดันบัลไฟตรงเมื่อติดตั้งวงจรพาสซีฟแบบ LC ที่ความถี่การสวิตช์ 5 kHz

4.3 แนวทางการแก้ปัญหาแรงดันเกินเนื่องจากปรากฏการณ์การอัดประจุสไฟตรงโดยกระแสไหลมรรวม

โดยทั่วไประบบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่มีสายเคเบิลด้านนอกที่ยาวมาก ในขณะเดียวกันจะเกิดทั้งกระแสอัดประจุระหว่างสายและกระแสรั่ว (หรือกระแสไหลมรรวม) ที่มีขนาดใหญ่มาก ปัญหาทั้งสองประการนี้จำเป็นต้องได้รับการแก้ไขไปพร้อมกัน ดังจะเห็นได้จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.2 ว่าหากมีการติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟชนิด 3 เฟส 3 สาย เพื่อแก้ไขเฉพาะปัญหากระแสอัดประจุระหว่างสายค่าสูงเพียงอย่างเดียว จะทำให้เกิดปัญหาการเกิดแรงดันเกินที่บัสไฟตรง เนื่องจากการอัดประจุสไฟตรงโดยกระแสไหลมรรวมได้ ดังนั้นสำหรับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่มีสายเคเบิลด้านนอกที่ยาวมาก จึงควรใช้เป็นวงจรกรองด้านนอกแบบพาสซีฟชนิด 3 เฟส 4 สาย เพื่อลดทอนทั้งกระแสอัดประจุระหว่างสายและกระแสไหลมรรวมไปพร้อมๆ กัน

การทดลองในหัวข้อนี้จะแสดงผลเมื่อเปลี่ยนจากวงจรกรองพาสซีฟชนิด 3 เฟส 3 สายที่ใช้ทดลองในหัวข้อที่ 4.2 มาเป็นวงจรกรองพาสซีฟชนิด 3 เฟส 4 สาย ที่มีโครงสร้างและพารามิเตอร์ดังรูปที่ 4.54 เพื่อแสดงให้เห็นว่า การติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟชนิด 3 เฟส 4 สาย ที่ทำหน้าที่ลดทอนทั้งกระแสอัดประจุระหว่างสายและกระแสไหลมรรวมพร้อมๆ กัน จะไม่ทำให้เกิดปัญหาแรงดันเกินเนื่องจากปรากฏการณ์การอัดประจุสไฟตรงโดยกระแสไหลมรรวม



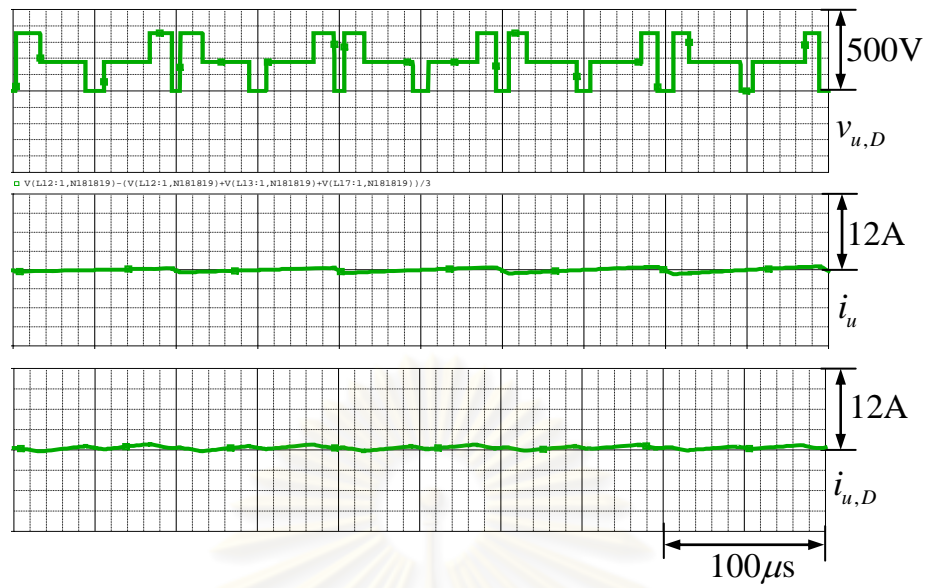
รูปที่ 4.54 วงจรกรองด้านนอกแบบพาสซีฟ LC ชนิด 3 เฟส 4 สาย สำหรับลดทอนกระแสอัดประจุระหว่างสายและกระแสไหลมรรวม

ตัวเหนี่ยวนำ L_F และตัวเก็บประจุ C_F ของวงจรกรองพาสซีฟ จะทำหน้าที่ลดทอนกระแสโหมตผลต่างด้านออกที่ความถี่การสวิตซ์ให้มีขนาดขนาดเล็กมาก และทำให้กระแสเฟสถูกลดทอนลงตามไปด้วย ดังผลจำลองในรูปที่ 4.55 และผลการทดลองในรูปที่ 4.56 ในขณะเดียวกัน ตัวเหนี่ยวนำ L_{CF} และตัวเก็บประจุ C_{CF} ของวงจรกรองพาสซีฟ จะทำให้กระแสโหมตร่วม $i_{o,c}$ ถูกลดทอนให้มีขนาดเล็กมาก จนส่งผลให้ไม่เกิดกระแสโหมตร่วมด้านเข้า $i_{i,c}$ ดังรูปที่ 4.57 และ 4.58

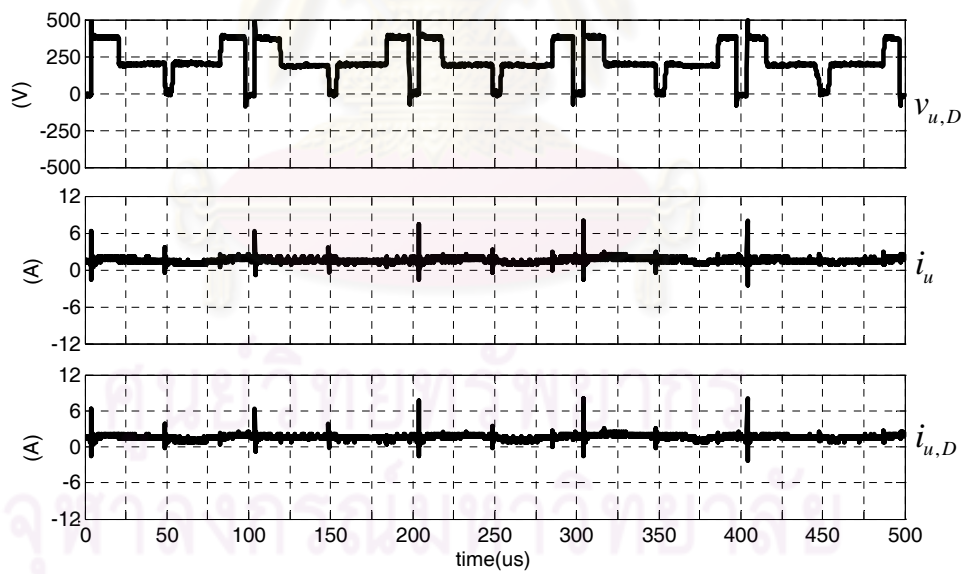
ผลจำลองและผลทดลองในรูปที่ 4.59 และ 4.60 ให้เห็นว่า ถึงแม้ว่าจะมีช่วงเวลาที่วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแสเกิดขึ้น แต่จากการที่ไม่มีกระแสโหมตร่วม $i_{i,c}$ ไหลผ่านแหล่งจ่ายเข้าสู่วงจรเรียงกระแส ดังนั้นจึงไม่มีการอัดประจุบัสไฟตรงโดยกระแสโหมตร่วมเกิดขึ้น ดังนั้นในกรณีนี้จะไม่เกิดจากสะสมพลังงานที่บัสไฟตรง และเกิดสมดุลของพลังงานด้านเข้าและพลังงานด้านออกของวงจรเรียงกระแสตามปรกติ ทำให้ระดับแรงดันบัสไฟตรงมีค่าคงที่ที่ระดับปกติประมาณ 540 V ดังแสดงในผลการจำลองและผลการทดลองในรูปที่ 4.61 และ 4.62 ตามลำดับ



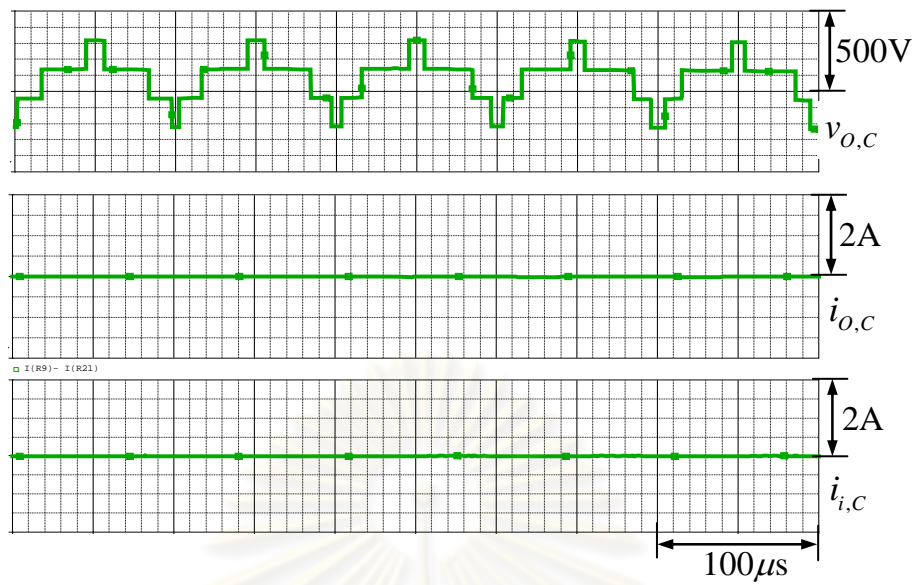
ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



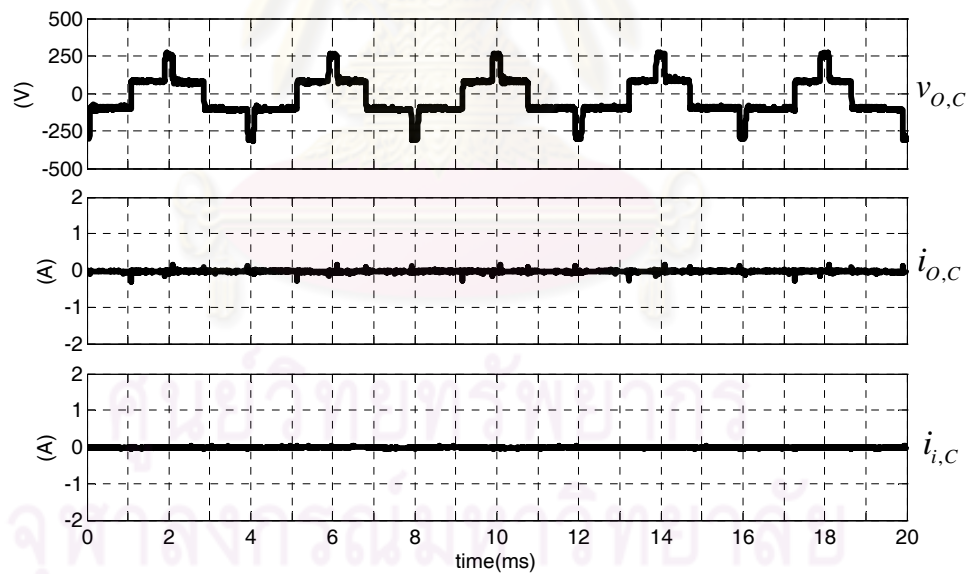
รูปที่ 4.55 ผลจำลองแสดงกระแสโหมดผลต่างและกระแสเฟสที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์เมื่อติดตั้ง วงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ชนิด 3 เฟส 4 สาย ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์



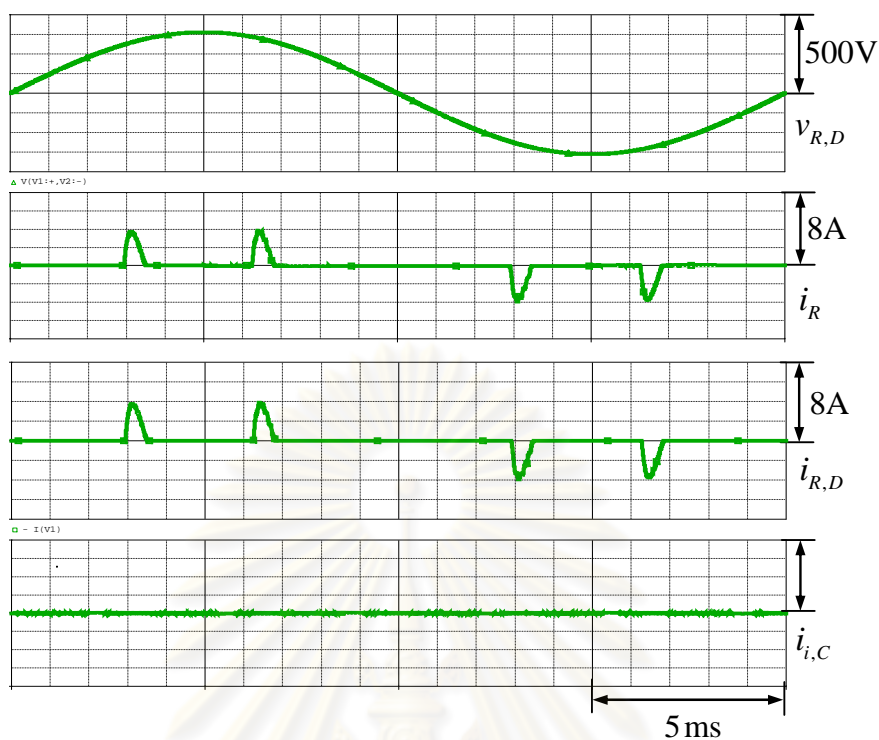
รูปที่ 4.56 ผลทดลองแสดงกระแสโหมดผลต่างและกระแสเฟสที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์เมื่อติดตั้ง วงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ชนิด 3 เฟส 4 สาย ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์



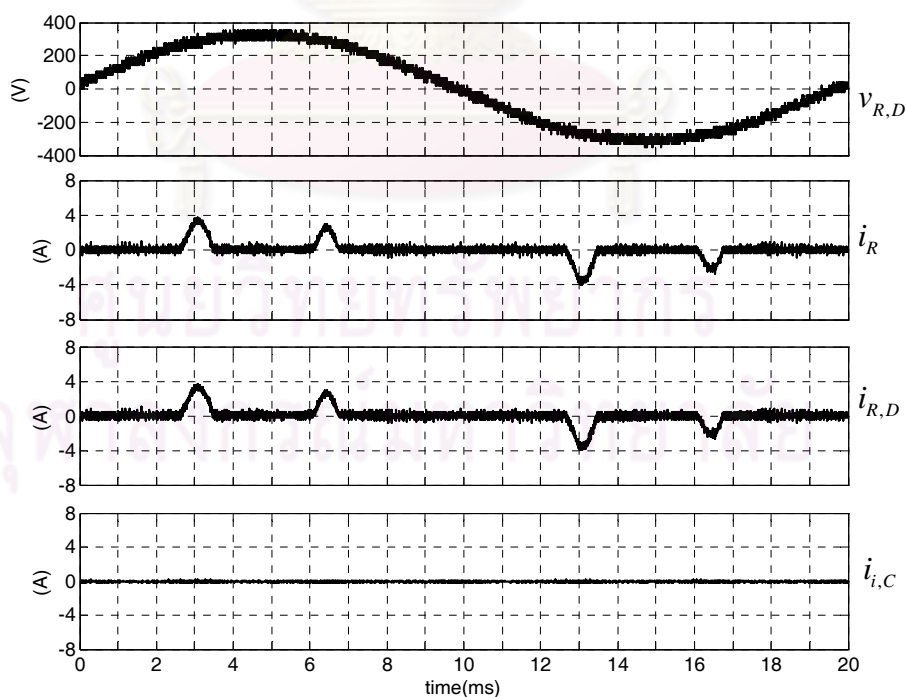
รูปที่ 4.57 ผลจำลองแสดงกระแสโหมดผลรวมเมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ชนิด 3 เฟส 4 สาย
ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์



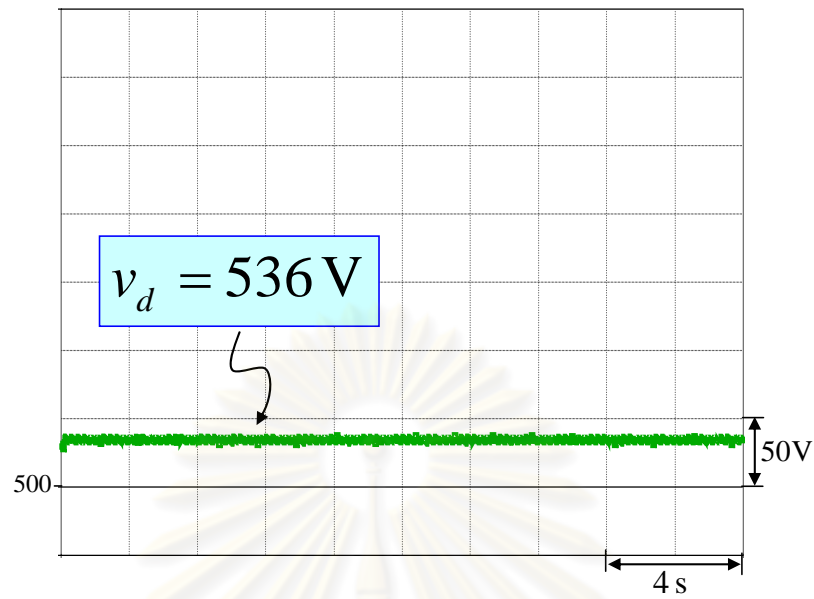
รูปที่ 4.58 ผลทดลองแสดงกระแสโหมดผลรวมเมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ชนิด 3 เฟส 4 สาย
ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์



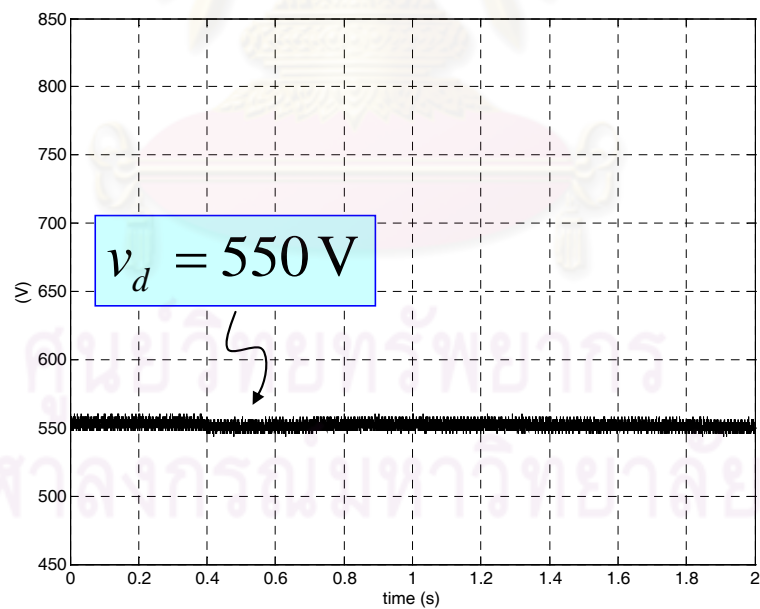
รูปที่ 4.59 ผลจำลองแสดงกระแสที่ด้านเข้าของวงจรเรียงกระแสเมื่อติดตั้งวงจรพาสซีฟแบบ LC ชนิด 3 เฟส 4 สาย ในสเกลเวลาของความถี่หลักมูล



รูปที่ 4.60 ผลทดลองแสดงกระแสที่ด้านเข้าของวงจรเรียงกระแสเมื่อติดตั้งวงจรพาสซีฟแบบ LC ชนิด 3 เฟส 4 สาย ในสเกลเวลาของความถี่หลักมูล



รูปที่ 4.61 ผลจำลองแสดงระดับแรงดันบัลไฟตรงเมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ชนิด 3 เฟส 4 สาย



รูปที่ 4.62 ผลทดลองแสดงระดับแรงดันบัลไฟตรงเมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ชนิด 3 เฟส 4 สาย

4.4 สรุปผลจำลองและผลทดลอง

ปรากฏการณ์การอัดประจุบัสไฟตรงเป็นปรากฏการณ์ใหม่ที่เกิดขึ้นได้จริงในทางปฏิบัติ และมีกลไกการเกิดปรากฏการณ์ที่สอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยวงจรสมมูลใหม่พร้อมและโหมดผลต่างที่เสนอในบทที่ 3 เงื่อนไขที่เอื้อให้เกิดปรากฏการณ์อัดประจุบัสไฟตรงจนเกิดแรงดันเกิน คือเงื่อนไขที่ทำให้พลังงานสะสมจากการอัดประจุโดยกระแสใหม่พร้อมมีค่าสูงกว่าพลังงานที่จ่ายให้กับโหลดที่ด้านออกของบัสไฟตรงซึ่งมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องคือ

- 1) กระแสโหลดที่มีค่าต่ำเมื่อมอเตอร์ทำงานในภาวะไร้โหลดหรือโหลดเบา ซึ่งจะทำให้เกิดช่วงเวลาที่ยังคงเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส อีกทั้งยังเอื้อให้กระแสที่อัดประจุบัสไฟตรงมีค่ามากกว่ากระแสคายประจุของบัสไฟตรงได้
- 2) กระแสใหม่พร้อมที่มีค่าสูง เช่น กรณีที่สายเคเบิลที่ด้านออกยาวมาก
- 3) ความถี่การสวิตซ์ของอินเวอร์เตอร์ที่มีค่าสูง จะทำให้ช่วงเวลาการอัดประจุโดยรวมนานขึ้นตามจำนวนครั้งการสวิตซ์

สาเหตุที่ปรากฏการณ์การอัดประจุบัสไฟตรงโดยกระแสใหม่พร้อมไม่เป็นที่รู้จักอย่างกว้างขวางในงานอุตสาหกรรมนั้น เนื่องจากโดยทั่วไปแล้ว การสะสมของประจุที่บัสไฟตรงจนเกิดแรงดันเกินจะเกิดขึ้นได้ค่อนข้างยาก กล่าวคือ กระแสใหม่พร้อมขนาดใหญ่สามารถเกิดขึ้นได้กับระบบขับเคลื่อนที่มีสายเคเบิลด้านออกที่ยาวมาก แต่ระบบดังกล่าวก็มักจะมีกระแสอัดประจุระหว่างสายขนาดใหญ่เกิดขึ้นควบคู่กันเสมอ (ดังเช่นผลการทดลองในรูปที่ 4.26 และ 4.27) ด้วยเหตุนี้ ถึงแม้ว่าอินเวอร์เตอร์จะทำงานในภาวะที่ไร้โหลด แต่การคายประจุบัสไฟตรงเนื่องจากกระแสอัดประจุระหว่างสายก็ยังคงมีปริมาณสูง และเพียงพอที่จะทำให้แรงดันบัสไฟตรงสามารถรักษาระดับให้คงที่ที่ระดับปกติได้

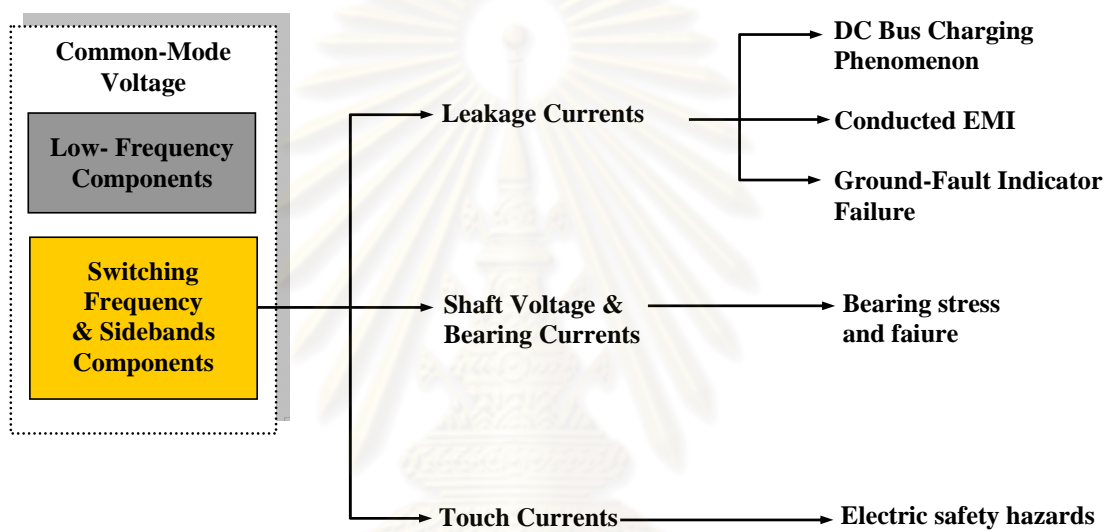
ผลจำลองและผลทดลองในหัวข้อที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่า การติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ เป็นปัจจัยเสริมที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์การอัดประจุบัสไฟตรงจนเกิดแรงดันเกินได้ง่ายขึ้น เนื่องจากวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC จะทำหน้าที่ลดทอนกระแสอัดประจุระหว่างสายให้มีขนาดเล็ก การคายประจุออกจากบัสไฟตรงจึงมีปริมาณน้อยกว่าการอัดประจุบัสไฟตรงโดยกระแสใหม่พร้อม และทำให้ระดับแรงดันมีเพิ่มสูงขึ้น

การแก้ปัญหาแรงดันเกินเนื่องจากปรากฏการณ์การอัดประจุบัสไฟตรง จะพิจารณาได้จากการลดทอนกระแสใหม่พร้อมให้มีขนาดเล็ก แนวทางที่เหมาะสมคือ หากมีการติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟในระบบที่มีสายเคเบิลด้านออกที่ยาว เพื่อลดทอนกระแสอัดประจุระหว่างสาย ควรเลือกใช้วงจรกรองพาสซีฟชนิด 3 เฟส 4 สายที่ทำหน้าที่ลดทอนทั้งกระแสอัดประจุระหว่างสายและกระแสใหม่พร้อมไปพร้อมๆ กันเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการอัดประจุบัสไฟตรงโดยกระแสใหม่พร้อม

บทที่ 5

วงจรกรองด้านออกแบบไฮบริดชนิดใหม่สำหรับลดทอนผลกระทบจากแรงดันโหมดร่วม ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์แบบพีดีบีเบิลยูเอ็ม

จากปัญหาที่เกิดจากแรงดันโหมดร่วมที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 1 และบทที่ 4 สามารถสรุปได้ว่าสาเหตุสำคัญของคือแรงดันโหมดร่วมในส่วนองค์ประกอบที่ความถี่การสวิตช์และแถบข้างดังแผนภาพในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ผลกระทบที่เกิดจากแรงดันโหมดร่วมความถี่สูงในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์

ปรากฏการณ์การอัดประจุสัฟไฟตรงจนเกิดแรงดันเกินโดยกระแสโหมดร่วมเป็นปัญหาที่พบได้ไม่บ่อยนักในทางอุตสาหกรรม เนื่องจากปรากฏการณ์ดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้เฉพาะเมื่อมีปัจจัยประกอบกันทั้ง 3 ส่วนได้แก่ 1) เป็นกรณีที่อินเวอร์เตอร์มีสายเคเบิลที่ด้านออกยาวมาก 2) อินเวอร์เตอร์ทำงานในสภาวะไร้อโหลดหรือโหลดเบา และ 3) มีปัจจัยเสริมที่ทำให้กระแสอัดประจุสัฟไฟตรงสูงกว่ากระแสคายประจุสัฟไฟตรง เช่น การติดตั้งวงจรกรองเพื่อลดทอนกระแสโหมดผลต่างที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์

เนื่องจากระบบขับเคลื่อนที่มีสายเคเบิลด้านออกที่ยาว จะมีทั้งกระแสโหมดร่วมและกระแสอัดประจุค่าสูงเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน เพื่อให้สามารถแก้ปัญหาปรากฏการณ์การอัดประจุสัฟไฟตรงและกระแสอัดประจุระหว่างสายค่าสูงได้ครอบคลุมทั้ง 2 ประเด็น จึงจำเป็นต้องคำนึงถึงการลดทอนแรงดันโหมดร่วมและโหมดผลต่างควบคู่กัน ดังนั้นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาปรากฏการณ์การอัดประจุสัฟไฟตรงเมื่อมีการลดทอนกระแสอัดประจุระหว่างสายค่าสูง คือการเลือกใช้อุปกรณ์กรองพาสซีฟชนิด 3 เฟส 4 สาย ที่สามารถลดทอนทั้งแรงดันโหมดร่วมและโหมดผลต่างได้พร้อมๆ กัน

แต่ในทางกลับกัน ปัญหาอื่นๆ จากแรงดันโหมดร่วมที่นอกเหนือจากปัญหาปรากฏการณ์การอัดประจุสัฟไฟตรงสามารถเกิดขึ้นได้ในระบบขับเคลื่อนทั่วไป จึงถือได้ว่า เป็นปัญหาที่พบได้บ่อยและมี

ผลกระทบเป็นวงกว้างในทางอุตสาหกรรม อีกทั้งยังเป็นปัญหาที่สามารถแก้ไขได้โดยการลดทอนแรงดันโหมคร่วมโดยตรงและไม่เกี่ยวข้องกับการลดทอนแรงดันโหมคร่วมผลต่าง ดังนั้นในส่วนของ การแก้ปัญหาที่เกิดจากแรงดันโหมคร่วม งานวิทยานิพนธ์นี้จะมุ่งเน้นที่การแก้ปัญหาในประเด็นดังนี้

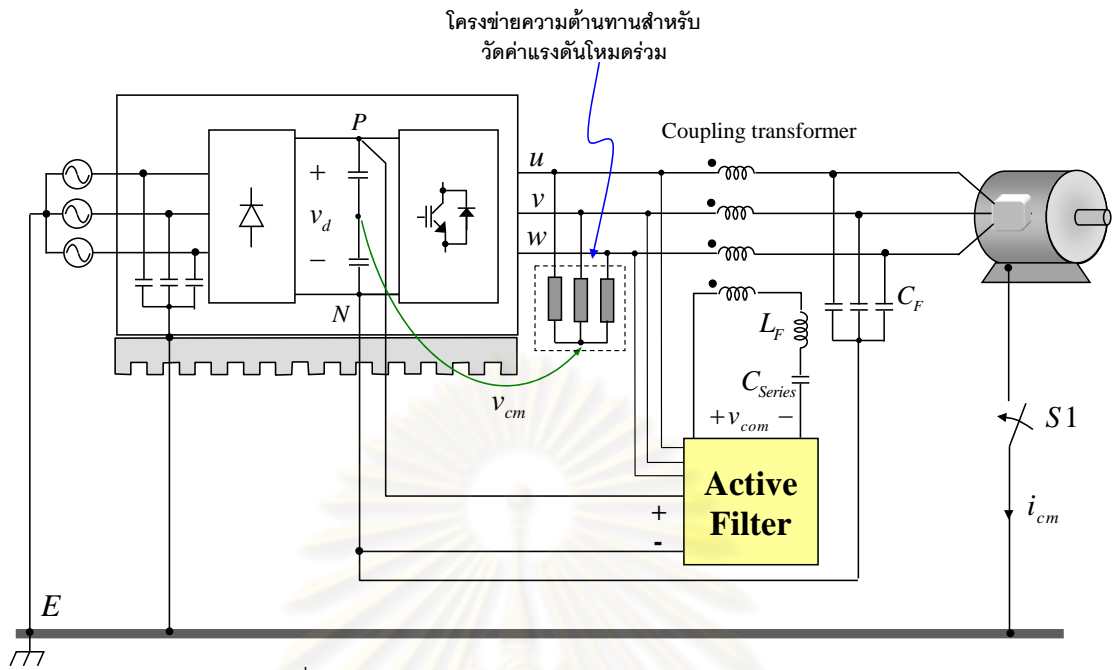
- 1) การแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการนำ และความล้มเหลวของตัวชี้บอกความผิดปกติของลงดิน
- 2) การเกิดแรงดันเพลลาและความเสียหายของตลับลูกปืนเนื่องจากกระแสตลับลูกปืน
- 3) อันตรายจากกระแสสัมผัสหรือไฟฟ้าดูดในกรณีที่โครงภายนอกของมอเตอร์ไม่ได้ต่อลงดิน

เพื่อให้การแก้ปัญหาครอบคลุมปัญหา 1)-3) ในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาวิธีใช้วงจรรองทางด้านออกเพื่อลดทอนแรงดันโหมคร่วมซึ่งเป็นสาเหตุของปัญหาทั้งหมด วงจรรองที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นวงจรรองด้านนอกแบบไฮบริดชนิดใหม่ที่เกิดจากการนำวงจรรองแอกทีฟและวงจรรองพาสซีฟ LC ขนาดเล็กมารวมเข้าด้วยกัน วงจรไฮบริดที่นำเสนอจะมีข้อดีกว่าวงจรรองแอกทีฟแบบดั้งเดิมคือ วงจรรองจะมีขนาดเล็กและมีงานการทำงานเพื่อชดเชยแรงดันโหมคร่วมที่กว้าง นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับวงจรรองพาสซีฟแบบ LC โดยทั่วไปก็จะมีข้อดีกว่าคือ สามารถปรับเปลี่ยนความถี่การสวิตช์และความถี่การทำงานของอินเวอร์เตอร์ได้อย่างอิสระ โดยไม่ทำให้เกิดการกระตุ้นที่ความถี่เรโซแนนซ์ รวมทั้งสามารถใช้อินเวอร์เตอร์ที่มีการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ซึ่งมีการป้อนแรงดันลำดับศูนย์ (ที่ความถี่ฮาร์มอนิกที่ 3) ได้โดยไม่เกิดปัญหาเรโซแนนซ์ด้วยเช่นกัน

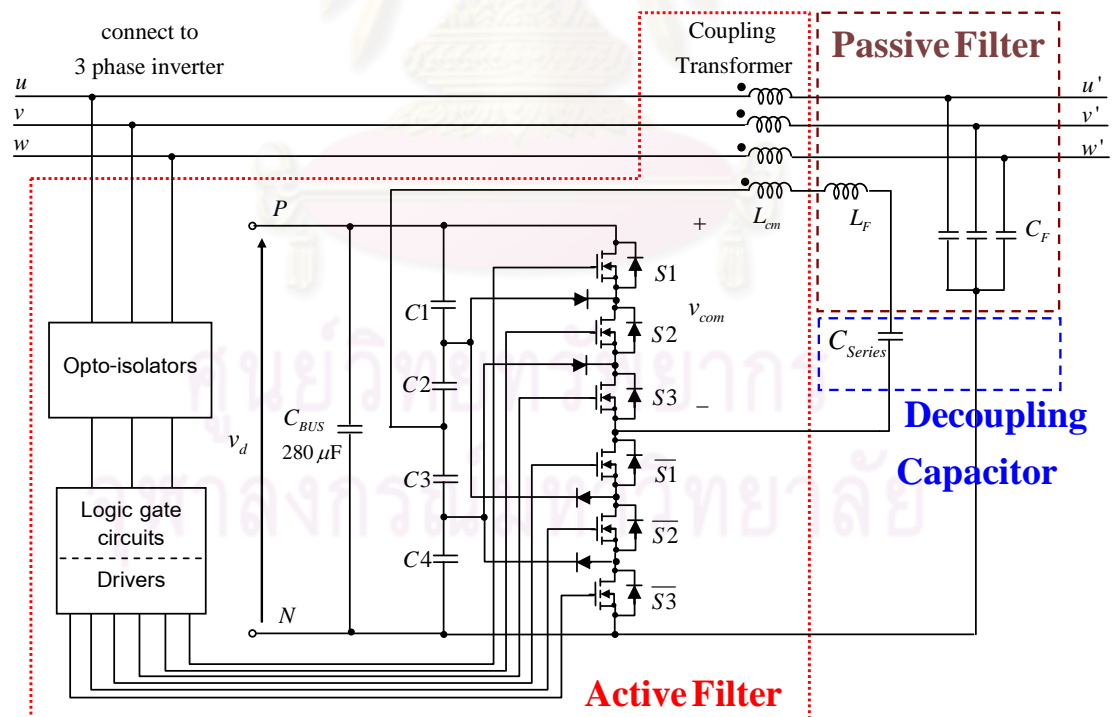
5.1 โครงสร้างของวงจรรองด้านนอกแบบไฮบริดชนิดใหม่สำหรับลดทอนผลกระทบจากแรงดันโหมคร่วมในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์

วงจรรองด้านนอกแบบไฮบริดที่นำเสนอจะมีการติดตั้งใช้งานที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์เพื่อชดเชยแรงดันโหมคร่วมดังรูปที่ 5.2 โดยวงจรรองจะมีโครงสร้างดังรูปที่ 5.3 โครงสร้างของวงจรรองประกอบด้วย วงจรรองแอกทีฟและวงจรรองพาสซีฟ LC ขนาดเล็ก โดยองค์ประกอบแต่ละส่วนของวงจรรองจะมีหน้าที่ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.2 การใช้งานวงจรกรองด้านออกแบบไฮบริดชนิดใหม่



รูปที่ 5.3 โครงสร้างของวงจรกรองชนิดไฮบริดแบบใหม่

5.1.1 วงจรกรองแอกทีฟ

วงจรกรองแอกทีฟมีหน้าที่หลักคือสร้างแรงดันชดเชยแรงดันโหมคร่วม โดยจะเน้นที่การชดเชยองค์ประกอบที่สูงกว่าความถี่การสวิตช์ขึ้นไป องค์ประกอบของวงจรกรองแอกทีฟเรียงลำดับตามการทำงานจะประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

1) วงจรตรวจจับแรงดันโหมคร่วม

วงจรส่วนนี้มีหน้าที่คือ ตรวจจับแรงดันโหมคร่วมเพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลสำหรับสร้างแรงดันชดเชย ในงานวิทยานิพนธ์นี้จะตรวจจับแรงดันโหมคร่วมด้วยการใช้ตัวแยกโคตทางแสง (Opto-isolator) ตรวจจับแรงดันพีดับเบิลยูเอ็มที่ด้านนอกของอินเวอร์เตอร์ จากนั้นจะนำสัญญาณที่ได้จากการตรวจจับมาแปลงสัญญาณด้วยวงจรตรรกะ (Logic gate) ก่อนจะส่งต่อไปกับวงจรขับนำเกตเพื่อควบคุมการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ 1 ขา

2) อินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ 1 ขา

อินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ 1 ขามีหน้าที่สร้างแรงดันชดเชยแรงดันโหมคร่วมที่เกิดจากอินเวอร์เตอร์แรงดันชดเชยที่สร้างจะรูปร่างเหมือนกับแรงดันโหมคร่วมแต่มีทิศตรงกันข้าม เพื่อให้เกิดการหักล้างกันระหว่างแรงดันโหมคร่วมกับแรงดันชดเชย

3) วงจรกรองผ่านสูง

วงจรกรองผ่านสูงจะเกิดจากการทำงานร่วมกันระหว่าง ตัวเก็บประจุแยกการเชื่อมร่วม C_{Series} และค่าความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็ก L_{cm} ของหม้อแปลงเชื่อมร่วม วงจรกรองผ่านสูง (L_{cm}, C_{Series}) จะทำหน้าที่กีดกันองค์ประกอบความถี่ต่ำของแรงดันโหมคร่วมไม่ให้ตกคร่อมหม้อแปลงเชื่อมร่วม เป็นการเลือกลดทอนแรงดันโหมคร่วมเฉพาะที่สูงกว่าความถี่การสวิตช์ขึ้นไป เพื่อช่วยลดภาระของหม้อแปลงเชื่อมร่วมทำให้สามารถใช้หม้อแปลงเชื่อมร่วมที่มีขนาดเล็กได้

4) หม้อแปลงเชื่อมร่วมแบบโหมคร่วม

แรงดันชดเชยที่สร้างจากอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับจะถูกป้อนเข้าสู่ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์โดยการเชื่อมร่วมผ่านหม้อแปลงเชื่อมร่วมเพื่อหักล้างกับแรงดันโหมคร่วมของอินเวอร์เตอร์ หม้อแปลงเชื่อมร่วมที่ใช้จึงต้องมีขดลวด 4 ชุด ด้านปฐมภูมิจะมีขดลวด 1 ชุดต่ออยู่กับอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ และขดลวดด้านทุติยภูมิอีก 3 ชุดจะต่ออยู่ที่ด้านนอกของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

5.1.2 วงจรกรองพาสซีฟ

ส่วนประกอบที่ทำงานร่วมกันกลายเป็นวงจรกรองพาสซีฟได้แก่ ตัวเหนี่ยวนำ L_F , ความเหนี่ยวนำรั่วไหลของหม้อแปลงเชื่อมร่วม และตัวเก็บประจุ C_F วงจรกรองพาสซีฟ LC ขนาดเล็กเป็นส่วนที่เพิ่มขึ้นมาเพื่อช่วยเสริมการทำงานของวงจรกรองแอกทีฟในย่านความถี่สูง โดยเฉพาะในย่านความถี่สูงเกินกว่าแบนด์วิดท์ของวงจรกรองแอกทีฟ

5.2 แนวคิดหลักของวงจรกรองด้านนอกแบบไฮบริดชนิดใหม่สำหรับลดทอนผลกระทบจากแรงดันโหมตร่วมในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์

จากการศึกษาวงจรกรองแอกทีฟที่นำเสนอในบทความ [25]-[30] พบว่ายังมีปัญหาที่ต้องการการแก้ไขหรือพัฒนาเพื่อนำไปสู่เป้าหมายการนำไปใช้จริงในทางปฏิบัติดังนี้คือ

1) หม้อแปลงเชื่อมร่วมที่ใช้ในวงจรกรองแอกทีฟมีขนาดใหญ่เกินความจำเป็น เพราะต้องรองรับแรงดันโหมตร่วมตลอดย่านความถี่รวมทั้งที่ความถี่ฮาร์มอนิกของความถี่ด้านออกด้วย และเนื่องจากหม้อแปลงเป็นองค์ประกอบหลักที่กำหนดขนาดของวงจรกรองแอกทีฟ จึงจำเป็นที่จะต้องหาวิธีการลดขนาดของหม้อแปลงให้เล็กลง

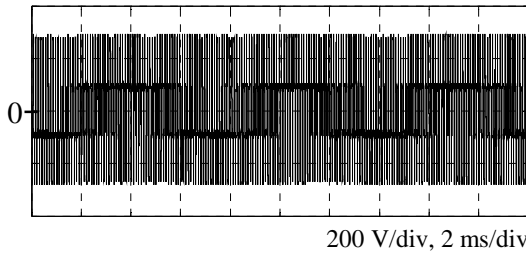
2) ปัญหาข้อจำกัดของอุปกรณ์สวิตซ์กำลังที่ใช้สร้างแรงดันชดเชย

- เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านพิกัดแรงดันและกระแส ทำให้โครงสร้างของวงจรภาคกำลังแบบพุกพูล ไม่สามารถนำมาใช้ได้กับระบบขับเคลื่อนที่มีระดับแรงดันบัลไฟตรงสูงกว่า 500 V
- วงจรอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับสามารถใช้งานได้กับระบบขับเคลื่อนที่มีพิกัดแรงดันสูง แต่ก็ยังต้องพิจารณาปัญหาข้อจำกัดในเรื่องเวลาประวิง (Delay time) ในส่วนการสร้างแรงดันชดเชยที่มีผลต่อการชดเชยแรงดันโหมตร่วมในย่านความถี่สูง ซึ่งเป็นประเด็นที่เกี่ยวข้องกับวิธีการตรวจจับแรงดันโหมตร่วม

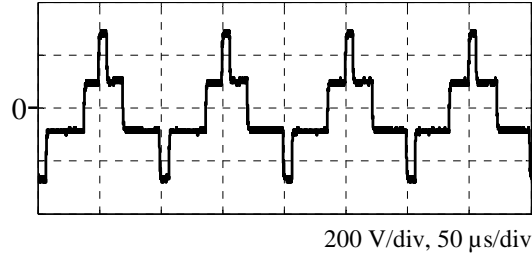
จากข้อจำกัดของวงจรกรองแอกทีฟแบบเดิม งานวิทยานิพนธ์นี้จะเสนอแนวคิดใหม่ เพื่อพัฒนางจรกรองแบบไฮบริดที่นำเสนอให้สามารถนำไปใช้ได้จริงในทางปฏิบัติอย่างมีประสิทธิภาพดังต่อไปนี้

5.2.1 การลดขนาดหม้อแปลงเชื่อมร่วมด้วยการเลือกชดเชยแรงดันโหมตร่วมเฉพาะที่องค์ประกอบที่สูงกว่าความถี่การสวิตซ์ขึ้นไป

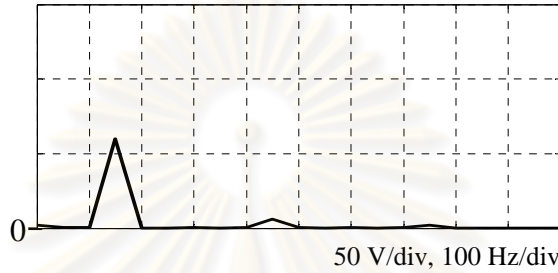
โดยทั่วไปอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในทางอุตสาหกรรมมักจะใช้วิธีการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ การมอดูเลตดังกล่าวนี้จะทำให้แรงดันโหมตร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับกราวด์ (v_{cm}) มีลักษณะสัญญาณดังรูปที่ 5.4 สำหรับในวงจรกรองแอกทีฟแบบเดิม [25]-[30] นั้น หม้อแปลงเชื่อมร่วมจะต้องรองรับแรงดันโหมตร่วม v_{cm} ทั้งหมดรวมทั้งองค์ประกอบที่ความถี่ต่ำด้วย จึงทำให้แกนเฟอร์ไรต์สำหรับหม้อแปลงเชื่อมร่วมมีขนาดใหญ่มาก



ก) รูปคลื่นในสเกลเวลาของความถี่หลักมูล (50 Hz)



ข) รูปคลื่นในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์ (10 kHz)



ค) สเปกตรัมของแรงดันโหมตร่วมแสดงเฉพาะองค์ประกอบในย่านความถี่ต่ำ

รูปที่ 5.4 แรงดันโหมตร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับกึ่งกลางบัสไฟตรง v_{cm} (ที่ความถี่ทำงาน 50 Hz และความถี่การสวิตช์ 10 kHz)

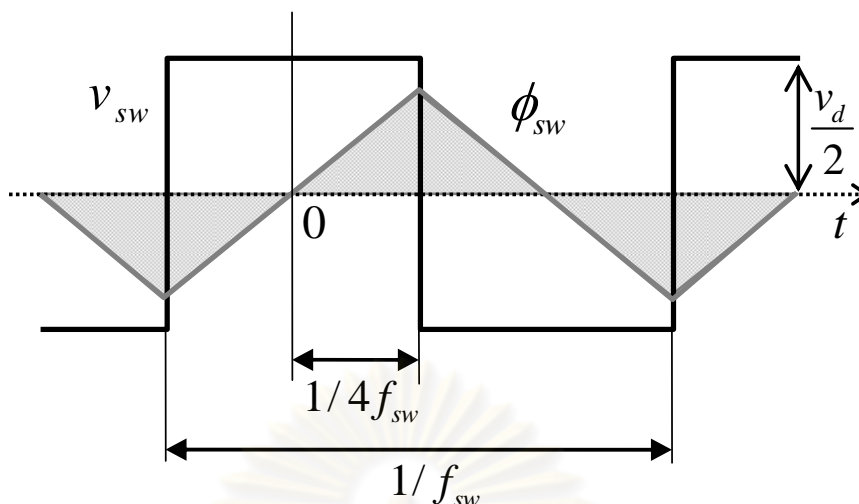
แนวคิดใหม่ที่เสนอในงานวิทยานิพนธ์นี้คือ การพิจารณาองค์ประกอบของแรงดันโหมตร่วมแยกออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ องค์ประกอบที่ความถี่การสวิตช์ (v_{sw}) และ องค์ประกอบที่ความถี่ฮาร์โมนิกที่ 3 (v_{third}) และเลือกกำจัดเฉพาะองค์ประกอบที่ความถี่การสวิตช์ (v_{sw}) ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของปัญหาต่างๆ ตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 1 แนวคิดนี้จะช่วยลดขนาดหม้อแปลงเชื่อมร่วมให้เล็กลงเหลือเพียง 1/10 เท่าเมื่อเทียบกับวงจรรองแยกที่เฟสแบบเดิม การเปรียบเทียบขนาดของหม้อแปลงเชื่อมร่วม จะพิจารณาได้จากปริมาณฟลักซ์ในแกนของหม้อแปลง ซึ่งสามารถแบ่งตามองค์ประกอบของแรงดันโหมตร่วมดังนี้

ก) ฟลักซ์ที่เกิดจากองค์ประกอบของแรงดันโหมตร่วมที่ความถี่การสวิตช์ ϕ_{sw}

ฟลักซ์ในแกนหม้อแปลงที่เกิดจากองค์ประกอบแรงดันโหมตร่วมที่ความถี่การสวิตช์มีค่าสูงสุดเมื่อมีการใช้งานอินเวอร์เตอร์ที่ค่าดรรชนีการมอดูเลตเท่ากับศูนย์ ในภาวะที่มีลักษณะการใช้งานดังกล่าวนี้ แรงดันโหมตร่วมที่ความถี่การสวิตช์จะมีรูปร่างใกล้เคียงสัญญาณสี่เหลี่ยมดังรูปที่ 5.5 เราสามารถคำนวณค่าฟลักซ์สูงสุดในแกน ϕ_{sw} ที่เกิดจากแรงดันส่วนนี้ได้จากสมการที่ (5.1)

$$\phi_{sw} = \frac{1}{N} \int_0^{\frac{1}{4} \cdot \frac{1}{f_{sw}}} v_{sw} dt = \frac{v_d}{8N \cdot f_{sw}} \tag{5.1}$$

เมื่อ f_{sw} คือความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ และ N คือจำนวนรอบของตัวนำต่อขดของหม้อแปลงเชื่อมร่วม



รูปที่ 5.5 แรงดันโหมดร่วมที่ความถี่การสวิตช์และกระแสสร้างสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงเชื่อมร่วม
ที่ค่าดรรชนีการมอดูเลตเท่ากับศูนย์

ข) ฟลักซ์ที่เกิดจากองค์ประกอบของแรงดันโหมดร่วมที่ความถี่ฮาร์โมนิกที่ 3 ϕ_{third}

องค์ประกอบของแรงดันโหมดร่วมที่ความถี่ฮาร์โมนิกที่ 3 (v_{third}) คือแรงดันลำดับศูนย์จากการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ซึ่งจะมีลักษณะดังรูปที่ 5.6 ที่ค่าดรรชนีการมอดูเลตสูงสุด v_{third} จะมีค่ายอดเท่ากับ $v_d / (4\sqrt{3})$ ดังนั้นเราสามารถคำนวณค่าฟลักซ์สูงสุดในแกน ϕ_{third} ที่เกิดจากแรงดันส่วนนี้ได้จากสมการที่ (5.2)

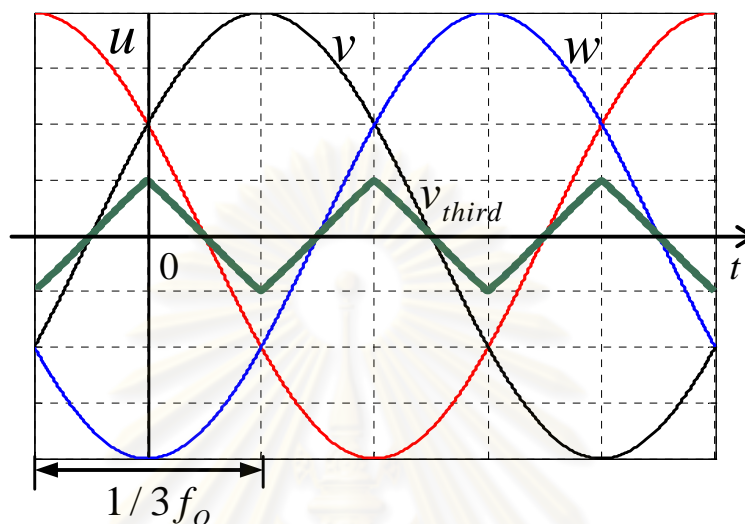
$$\phi_{third} = \frac{1}{N} \int_0^{\frac{1}{4 \cdot 3 f_o}} v_{third} dt \cong \frac{v_d}{96\sqrt{3} \cdot N \cdot f_o} \quad (5.2)$$

เมื่อ f_o คือความถี่หลักมูลของแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์

ในกรณีที่หม้อแปลงเชื่อมร่วมต้องรองรับฟลักซ์ที่เกิดจากแรงดันโหมดร่วมทั้งหมด โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องรองรับฟลักซ์ที่เกิดจากองค์ประกอบที่ความถี่ฮาร์โมนิกที่ 3 (v_{third}) จะทำให้ต้องใช้แกนเฟอร์ไรท์ที่มีขนาดใหญ่มาก แต่ในทางตรงกันข้ามเมื่อเปรียบเทียบปริมาณฟลักซ์จากสมการที่ (5.1) และ (5.2) พบว่าหากทำให้หม้อแปลงไม่ต้องรองรับฟลักซ์จากองค์ประกอบที่ความถี่ฮาร์โมนิกที่ 3 จะช่วยให้สามารถลดขนาดแกนของหม้อแปลงเชื่อมร่วมลงได้จนเหลือเพียง 1/10 เท่า (เมื่อ $f_o = 50\text{Hz}$ และ $f_{sw} = 10\text{kHz}$)

ดังนั้นเพื่อให้สามารถใช้แกนสำหรับหม้อแปลงที่มีขนาดเล็กได้ งานวิทยานิพนธ์นี้จะใช้การแทรกตัวเก็บประจุแยกการเชื่อมร่วม C_{Series} อนุกรมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับเพื่อกีดกันแรงดันโหมดร่วมที่ความถี่ต่ำไม่ให้เกิดคร่อมที่หม้อแปลงเชื่อมร่วม วิธีดังกล่าวนี้เป็นวิธีที่ง่ายและให้ได้ผลเป็นอย่างดี โดยตัวเก็บประจุแยกการเชื่อมร่วม C_{Series} และค่าความเหนี่ยวนำสร้างแม่เหล็กของหม้อแปลงเชื่อมร่วมจะทำงาน

ร่วมกัน กลายเป็นวงจรกรองผ่านสูงที่ยอมให้เฉพาะองค์ประกอบของแรงดันโหมตร่วมที่ความถี่การสวิตช์และสูงขึ้นตกคร่อมที่หม้อแปลงเชื่อมร่วม

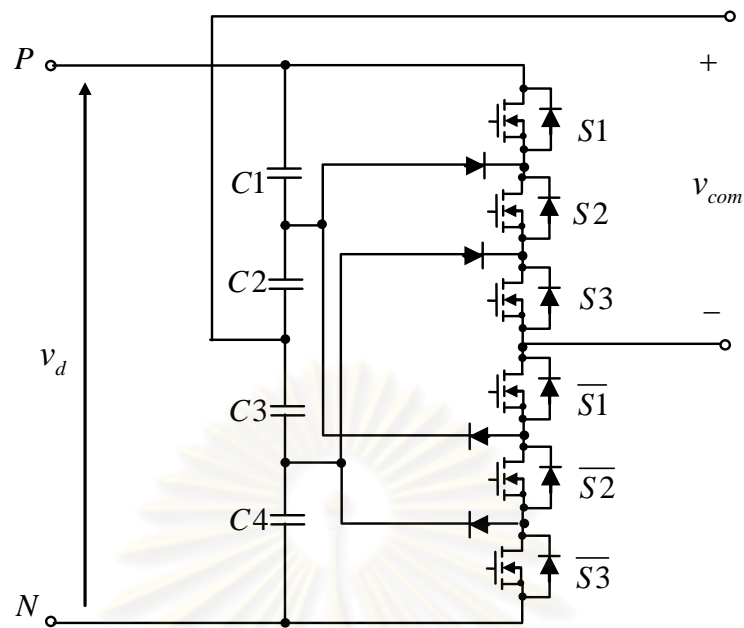


รูปที่ 5.6 องค์ประกอบของแรงดันโหมตร่วมที่ความถี่ฮาร์มอนิกที่ 3 (v_{third}) ในกรณีที่อินเวอร์เตอร์มีการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์

5.2.2 การลดข้อจำกัดด้านพิกัดแรงดันของสวิตช์กำลังที่ใช้สร้างแรงดันชดเชยโดยการใช้อินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ 1 ขา

จากข้อจำกัดด้านพิกัดวงจรแยกที่ไฟที่ใช้วิธีการสร้างแรงดันชดเชยแรงดันโหมตร่วมด้วยวงจรขยายแบบพหุพูล [25-29] จึงเกิดแนวคิดการสร้างแรงดันชดเชยด้วยอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ 1 ขา แทนวงจรขยายแบบพหุพูล เนื่องจากอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับเป็นโครงสร้างที่เหมาะสมกับการใช้งานกับระบบขับเคลื่อนแรงดันสูงและที่สำคัญคือ สามารถแรงดันได้ 4 ระดับสอดคล้องกับรูปร่างสัญญาณของแรงดันโหมตร่วมที่เป็นแรงดัน 4 ระดับเช่นกัน อินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ 1 ขามีโครงสร้างดังรูปที่ 5.7 จะทำหน้าที่สร้างแรงดันชดเชยที่เหมือนกับแรงดันโหมตร่วมจากอินเวอร์เตอร์ (v_{cm}) โดยสถานะการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ 1 ขา จะสัมพันธ์กับแรงดันพีดับเบิลยูเอ็มที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ดังแสดงในตารางที่ 5.1

เนื่องจากอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับทำงานแบบสวิตช์ (Switch mode) จึงสามารถสร้างแรงดันชดเชยแรงดันโหมตร่วมความถี่สูงได้ดีกว่าวงจรกรองแยกที่ไฟแบบเดิมที่ใช้วงจรพหุพูลซึ่งทำงานแบบแอนะล็อก ในย่านไวกาน [25]-[29] นอกจากนี้สวิตช์กำลังแต่ละตัวของอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับจะมีแรงดันตกคร่อมขณะหยุดนำกระแสเพียง 1/3 เท่าของแรงดันบัลไฟตรง v_d ดังนั้นจึงสามารถใช้สวิตช์กำลังที่มีพิกัดแรงดันต่ำซึ่งหาได้ง่ายได้



รูปที่ 5.7 โครงสร้างของวงจรอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ 1 ขา

ตารางที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสถานะการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์แบบ PWM, สถานะการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ 1 ขา และแรงดันโหมคร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์

สถานะการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์แบบ PWM			สถานะการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ 1 ขา			แรงดันโหมคร่วมด้านออกเมื่อเทียบกับจุดกึ่งกลางของบัสไฟตรง
Su	Sv	Sw	S1	S2	S3	
0	0	0	0	0	0	$-v_d / 2$
0	0	1	0	0	1	$-v_d / 6$
0	1	1	0	1	1	$v_d / 6$
0	1	0	0	0	1	$-v_d / 6$
1	1	0	0	1	1	$v_d / 6$
1	0	0	0	0	1	$-v_d / 6$
1	0	1	0	1	1	$v_d / 6$
1	1	1	1	1	1	$v_d / 2$

5.2.3 การลดข้อจำกัดด้านแบนด์วิดท์จากผลเวลาประวิงของวงจรตรวจจับแรงดันโหมตร่วม

ความแม่นยำในการตรวจจับแรงดันโหมตร่วมถือเป็นส่วนสำคัญอีกประเด็นหนึ่งที่มีผลต่อสมรรถนะการชดเชยแรงดันโหมตร่วมของวงจรกรอง ในบทความ [30] ได้เสนอวิธีการตรวจจับแรงดันโหมตร่วมไว้ 2 วิธีคือ

ก) การสร้างสัญญาณขับนำโดยเปรียบเทียบแรงดันโหมตร่วมด้านออกของอินเวอร์เตอร์กับระดับอ้างอิงของแรงดันโหมตร่วม

วิธีนี้จะใช้วงจรความต้านทานที่ต่อแบบ Y และวงจรขยายแบบแยกโดดที่มีพิกัดแรงดันสูง (high-voltage isolation amplifiers) ดังรูปที่ 5.8 แต่วิธีการนี้มีข้อด้อยคือ มีโครงสร้างที่ต้องใช้วงจรขยายแบบแยกโดดที่มีพิกัดแรงดันสูง ทำให้วงจรมีราคาแพงและสร้างได้ยาก

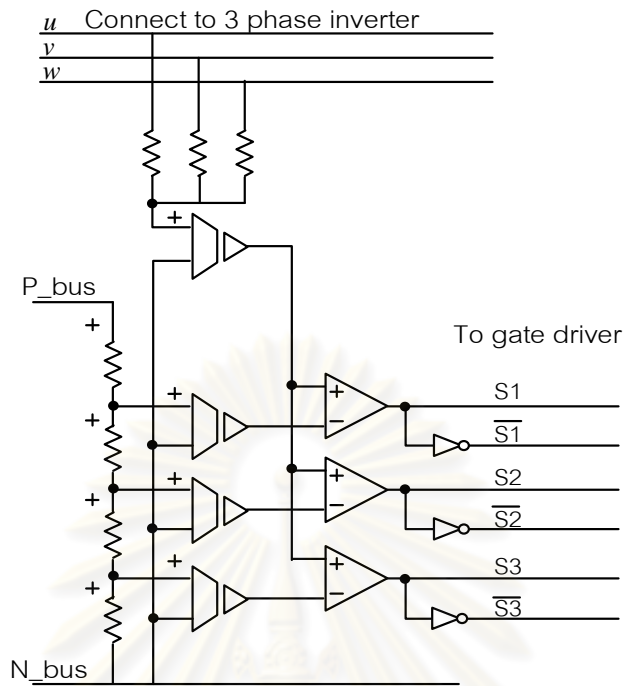
ในแง่ของความแม่นยำในการตรวจจับแรงดันโหมตร่วม การสร้างสัญญาณขับนำจากวิธีนี้จะทำให้เกิดการผิดเพี้ยนของแรงดันชดเชยโดยมีสาเหตุสำคัญ 2 ประการคือ

- เวลาประวิงของสัญญาณที่เกิดจากวงจรขยายแบบแยกโดดและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายในวงจรสร้างสัญญาณขับนำ
- เวลาไร้ผลสนอง (dead time) ของอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ 1 ซา ที่ทำให้เกิดการสร้างแรงดันผิดพลาด

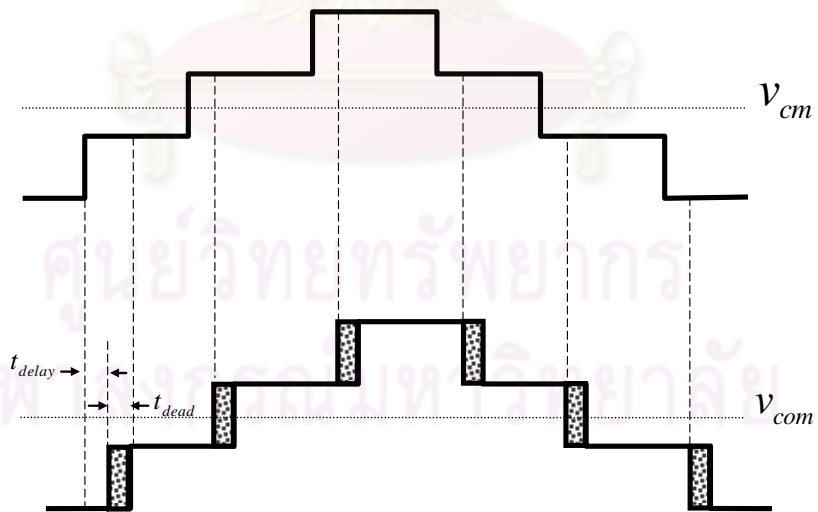
ลักษณะการผิดเพี้ยนของแรงดันชดเชยที่ได้จากวิธีนี้จะแสดงในรูปที่ 5.9 เวลาประวิงที่ค่อนข้างสูงของวงจรขยายแบบแยกโดด มีผลให้แรงดันชดเชย (v_{com}) มีเฟสเลื่อนออกไปจากแรงดันโหมตร่วม (v_{cm}) ในขณะที่บริเวณที่ถูกแรงเงาจะจะมีขนาดแรงดันที่ไม่แน่นอน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับช่วงเวลาไร้ผลสนองของอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ

ข) การสร้างสัญญาณขับนำโดยนำสัญญาณ PWM ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ของอินเวอร์เตอร์มาผ่านวงจรตรรกะ

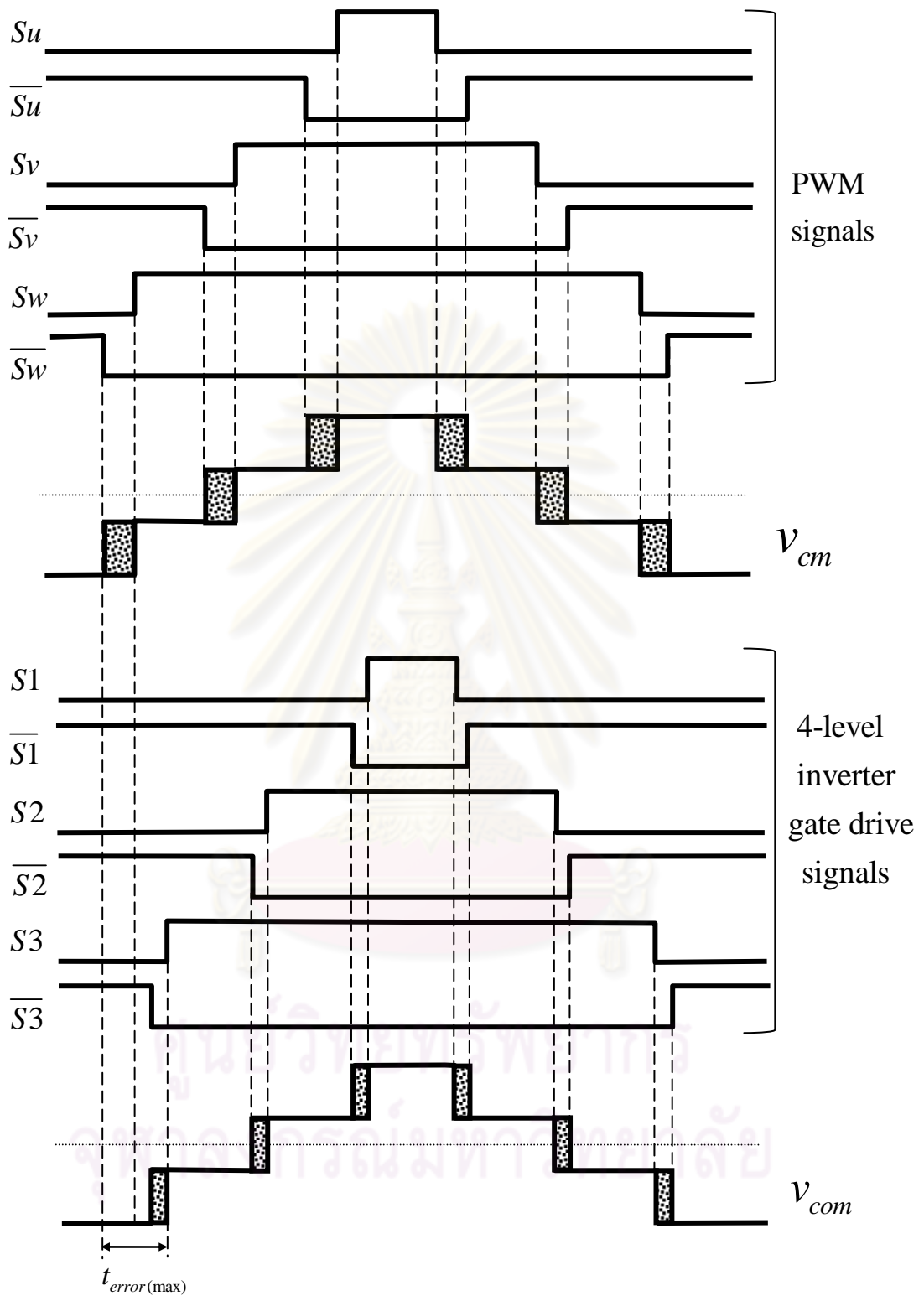
เนื่องจากสัญญาณ PWM เป็นตัวกำหนดการตัดต่อสวิตช์กำลังและขนาดแรงดันโหมตร่วมที่ด้านออกอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นเราจึงสามารถสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์กำลังของอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับจากการนำสัญญาณ PWM มาผ่านวงจรตรรกะ แม้ว่าวิธีนี้จะทำได้ง่ายแต่จะมีการผิดเพี้ยนของแรงดันชดเชยมากกว่าวิธีแรก โดยมีสาเหตุจากความผิดพลาดของข้อมูลแรงดันโหมตร่วมในช่วงเวลาไร้ผลตอบสนองของอินเวอร์เตอร์ซึ่งมีค่าประมาณ 2-4 μs เนื่องจากในช่วงเวลาดังกล่าวสายเฟสที่กำลังจะเปลี่ยนสถานะการสวิตช์จะต่อกับบัสบวกหรือลบตามทิศทางของกระแสไหลในเฟสนั้น ทำให้ขนาดแรงดันโหมตร่วมในช่วงเวลาไร้ผลสนองไม่ขึ้นอยู่กับสัญญาณ PWM แรงดันชดเชย (v_{com}) ที่สร้างจึงผิดเพี้ยนจากแรงดันโหมตร่วม (v_{cm}) ดังรูปที่ 5.10 เมื่อบริเวณที่ถูกแรงเงาเป็นช่วงเวลาไร้ผลสนองของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสที่ขับเคลื่อนมอเตอร์และอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับที่ใช้ในการสร้างแรงดันชดเชย



รูปที่ 5.8 การสร้างสัญญาณขับนำจากการตรวจจับแรงดันโหมดร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 5.9 ลักษณะการผิดเพี้ยนของแรงดันขดเคเบจจากวิธีตรวจจับแรงดันโหมดร่วมด้วยวงจรถายแบบแยกโดด



รูปที่ 5.10 ลักษณะการผิดเพี้ยนของแรงดันขดเคบายจากวิธีการสร้างสัญญาณขับนำจากสัญญาณ PWM ของอินเวอร์เตอร์

วิทยานิพนธ์นี้มีแนวคิดที่จะลดผลเวลาประวิงระหว่างแรงดันโหมตร่วม v_{cm} และ แรงดันชดเชย v_{com} ด้วยการใช้วงจรสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์กำลังของอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับที่มีการปรับปรุงจากวิธีการทั้ง 2 แบบที่กล่าวไว้ในข้างต้นคือ การสร้างวงจรตรวจจับแรงดันเฟสด้านออกของอินเวอร์เตอร์โดยตรงแทนการใช้สัญญาณ PWM และนำสัญญาณแรงดันที่ตรวจจับได้มาผ่านวงจรตรรกะเพื่อสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีเดิม วิธีการที่เสนอนี้จะมีข้อดีคือ

- สามารถหลีกเลี่ยงปัญหาการสร้างแรงดันชดเชยผิดพลาดในช่วงเวลาไร้ผลของของอินเวอร์เตอร์
- การตรวจจับแรงดันเฟสด้านออกของอินเวอร์เตอร์ สามารถใช้ตัวเชื่อมต่อทางแสง (optical coupler) ที่มีความไวสูงและราคาถูกกว่าการใช้วงจรขยายแบบแยกโดด

สรุปได้ว่า วิธีที่ใช้การสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์กำลังของอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับจากการตรวจจับแรงดันเฟสด้านออกของอินเวอร์เตอร์โดยตรง นอกจากจะเป็นวิธีที่ทำได้ง่ายเหมาะสำหรับการประยุกต์งานจริงแล้ว ยังมีสมรรถนะที่ดีกว่าวิธีการสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์กำลังของอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับแบบเดิมอีกด้วย

5.2.4 การเพิ่มสมรรถนะการกรองแรงดันโหมตร่วมในย่านความถี่ที่สูงกว่าแบนด์วิดท์ของวงจรกรองแอกทีฟ

เป็นที่ทราบกันดีว่าแบนด์วิดท์ของอุปกรณ์สวิตช์กำลังเป็นตัวจำกัดขีดความสามารถของวงจรกรองแอกทีฟในย่านความถี่สูง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วแบนด์วิดท์ของสวิตช์กำลังจะมีค่าไม่เกิน 10 MHz และเมื่อพิจารณารวมทั้งเวลาประวิงซึ่งเกิดจากความล่าช้าในการตรวจจับแรงดันโหมตร่วมที่ต้องการชดเชย การใช้วงจรกรองแอกทีฟเพียงอย่างเดียว จึงไม่เพียงพอต่อการลดทอนแรงดันโหมตร่วมในช่วงที่เป็นปัญหาการแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการนำ (150 kHz – 30 MHz)

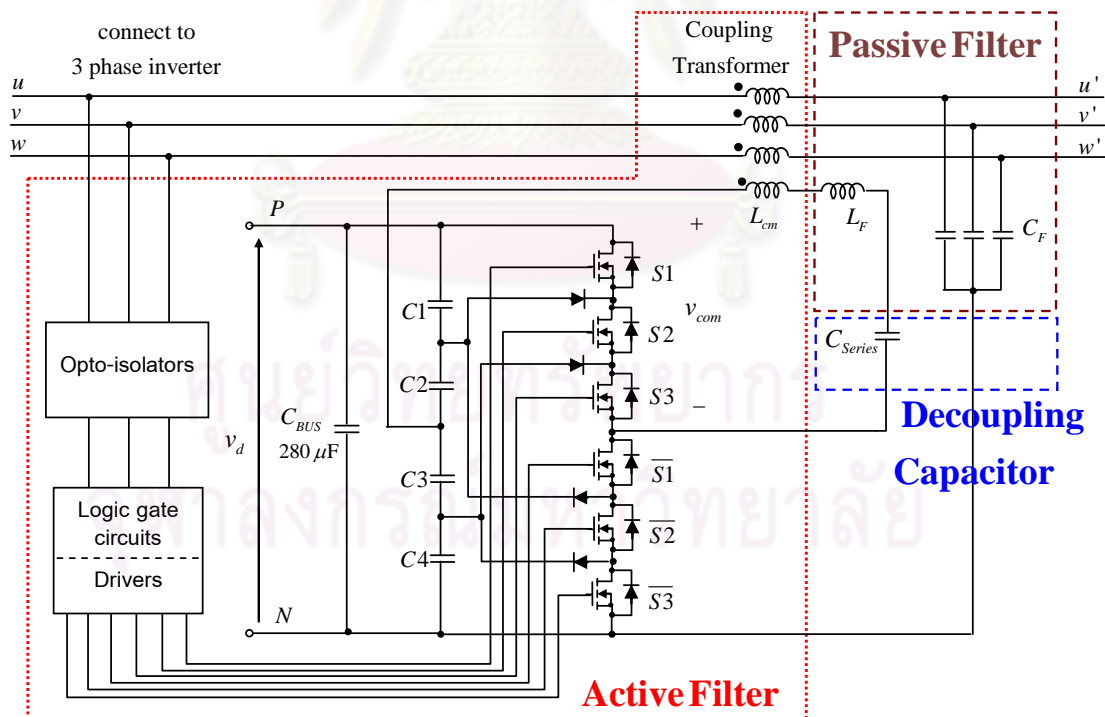
ด้วยเหตุผลข้างต้น งานวิทยานิพนธ์นี้จึงมีแนวคิดที่จะเพิ่มวงจรกรองพาสซีฟขนาดเล็กเข้ามาเพื่อช่วยกำจัดแรงดันโหมตร่วมในย่านความถี่ที่สูงเกินกว่าแบนด์วิดท์ของวงจรกรองแอกทีฟ (>1 MHz) ทำให้วงจรกรองทำงานได้ดีตลอดย่านความถี่ที่เป็นสาเหตุของปัญหาต่างๆ ดังนั้นวงจรกรองที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นวงจรกรองด้านออกแบบไฮบริดชนิดใหม่ที่เกิดจากการนำวงจรกรองแอกทีฟที่ใช้อินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ 1 ขาและวงจรกรองพาสซีฟ LC ขนาดเล็กมารวมเข้าด้วยกัน

บทที่ 6

การออกแบบและวิเคราะห์วงจรกรองด้านออกแบบไฮบริดชนิดใหม่

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงแนวทางการออกแบบวงจรกรองแบบไฮบริดสำหรับการประยุกต์ใช้จริงกับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์ และการวิเคราะห์สมรรถนะการลดทอนแรงดันโหมคร่วมของวงจรกรอง การออกแบบวงจรกรองในทางปฏิบัตินั้น พบว่ามีประเด็นต่างๆ ที่ต้องคำนึงถึงหลายประการ ตัวอย่างเช่น การออกแบบหม้อแปลงเชื่อมร่วมให้สามารถใช้งานได้โดยไม่เกิดปัญหาการอิ่มตัวของแกน การเลือกสวิตช์กำลังและตัวเก็บประจุของวงจรอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับโดยคำนึงถึงพิกัดการทำงานและการจำกัดค่าระลอก (ripple) ของแรงดันขดเซย์ที่สร้างได้ เป็นต้น

แนวทางการออกแบบวงจรกรองแบบไฮบริดที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้จะให้น้ำหนักที่การออกแบบให้ใช้งานได้จริงและการให้สมรรถนะการลดทอนแรงดันโหมคร่วมที่ดีในย่านความถี่ 10 kHz - 30 MHz เป็นสำคัญ จากโครงสร้างของวงจรกรองไฮบริดที่แสดงดังรูปที่ 6.1 องค์ประกอบต่างๆ ของวงจรกรองจะมีรายละเอียดการออกแบบดังต่อไปนี้



รูปที่ 6.1 โครงสร้างของวงจรกรองด้านออกแบบไฮบริดชนิดใหม่

6.1 การออกแบบหม้อแปลงเชื่อมร่วม

โครงสร้างของหม้อแปลงเชื่อมร่วมที่ใช้เชื่อมต่อแรงดันขดเคยเข้าที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ จะมีขดลวด 4 ชุด โดยขดลวด 1 ชุดจะเป็นด้านปฐมภูมิที่ต่ออยู่กับอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ และขดลวดอีก 3 ชุดเป็นด้านทุติยภูมิที่ต่ออยู่ที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส การออกแบบในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้อัตราส่วนระหว่างจำนวนรอบของด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิมีค่าเท่ากับ 1:1

จากแนวคิดการลดขนาดหม้อแปลงเชื่อมร่วมที่ได้เสนอรายละเอียดไว้ในหัวข้อ 5.2.1 ทำให้หม้อแปลงเชื่อมร่วมรับภาระแรงดันลดลง กล่าวคือแรงดันที่ตกคร่อมหม้อแปลงเชื่อมร่วมจะมีเฉพาะองค์ประกอบของแรงดันโหมดร่วมที่ความถี่การสวิตช์ v_{sw} เท่านั้น การออกแบบหม้อแปลงเชื่อมร่วมในกรณีนี้จะพิจารณาจากเงื่อนไขสำคัญดังต่อไปนี้

6.1.1 เงื่อนไขการออกแบบหม้อแปลงเชื่อมร่วม

1) ค่ากระแสสูงสุดของหม้อแปลงเชื่อมร่วม

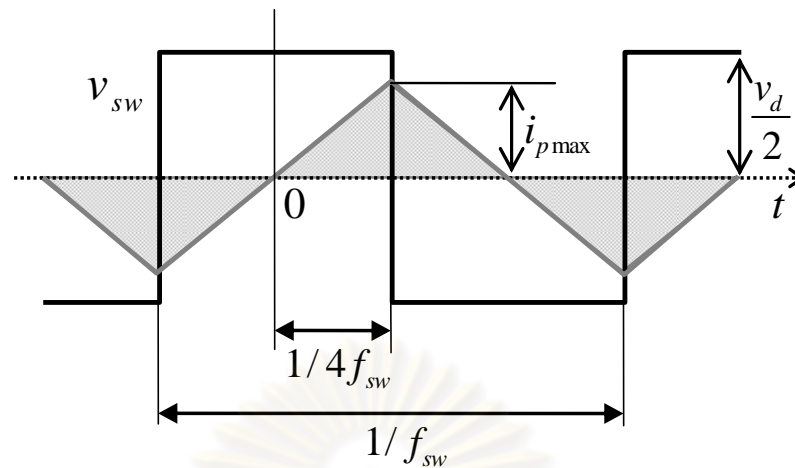
การคำนวณค่ากระแสปฐมภูมิของหม้อแปลงเชื่อมร่วมจะพิจารณาจากแรงดันโหมดร่วมที่ตกคร่อมขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลง ซึ่งมีเฉพาะที่องค์ประกอบที่ความถี่การสวิตช์เท่านั้น เนื่องจากองค์ประกอบที่ความถี่ต่ำจะถูกกีดกันด้วยตัวเก็บประจุแยกการเชื่อมร่วม C_{Series} ค่ายอดของกระแส (i_p) ที่ไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงเชื่อมร่วมจะมีค่ามากที่สุดเมื่อแรงดันโหมดร่วมมีขนาดใหญ่ที่สุดเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมดังรูปที่ 6.2 ดังนั้นเพื่อจำกัดค่ายอดของกระแส (i_p) ค่าความเหนี่ยวนำสร้างสนามแม่เหล็กของหม้อแปลง L_{cm} จะต้องมีค่าสอดคล้องตามเงื่อนไขในสมการที่ (6.1)

$$i_{p\max} = \frac{1}{L_{cm}} \cdot \frac{v_d}{2} \cdot \frac{1}{4f_{sw}}$$

$$i_p < i_{p\max}$$

$$L_{cm} = N^2 A_L$$
(6.1)

เมื่อ $i_{p\max}$ คือค่าจำกัดของค่ายอดของกระแสขดลวดปฐมภูมิ, A_L คือสัมประสิทธิ์ค่าความเหนี่ยวนำตัวแปรค่าความเหนี่ยวนำของแกน (A_L Value)



รูปที่ 6.2 แรงดันโหมดรวมที่ความถี่การสวิตช์และกระแสสร้างสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงเชื่อมรวมที่ค่าดรชนี้การมอดูเลตต่ำ

2) การอิมิตัวของแกนสำหรับหม้อแปลงเชื่อมรวม

การอิมิตัวของแกนที่ใช้พันหม้อแปลงเชื่อมรวมจะขึ้นอยู่กับขนาดและความถี่ของแรงดันโหมดรวมที่ตกคร่อมหม้อแปลง ซึ่งจากรูปที่ 6.2 แรงดันโหมดรวมที่ความถี่การสวิตช์จะเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมมีขนาดเท่ากับ 1/2 เท่าของแรงดันบัสไฟตรง v_d และมีความถี่เท่ากับความถี่การสวิตช์ f_{sw} ดังนั้นเงื่อนไขที่แสดงว่าหม้อแปลงที่ออกแบบสามารถนำไปใช้งานได้โดยไม่เกิดการอิมิตัวจะพิจารณาจากสมการที่ (6.2)

$$\phi_s = A_c B_s > \phi_{max} = \frac{1}{N} \cdot \frac{v_d}{2} \cdot \frac{1}{4f_{sw}} \tag{6.2}$$

เมื่อ A_c คือพื้นที่หน้าตัดของแกนและ ϕ_s, B_s คือค่าฟลักซ์และความหนาแน่นฟลักซ์อิมิตัวของแกน, ϕ_{max} คือค่าฟลักซ์สูงสุดที่เกิดจากแรงดันโหมดรวมคร่อมหม้อแปลง

จากสมการที่ (6.2) จำนวนรอบต่อขดลวดที่น้อยที่สุดที่ต้องใช้ในการพันหม้อแปลงสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (6.3)

$$N_{min} = \frac{v_d}{8B_s \cdot A_c \cdot f_{sw}} \tag{6.3}$$

3) พื้นที่หน้าตัดของแกน

แกนที่ใช้พันหม้อแปลงจะต้องมีพื้นที่เพียงพอสำหรับขดลวดทุกชุด เงื่อนไขดังกล่าวสามารถแสดงเป็นสมการจำนวนรอบสูงสุดของขดลวดแต่ละชุดได้ดังสมการที่ (6.4)

$$N_{max} = \frac{A_w \cdot k_w}{a_{w1} + 3a_{w2}} \tag{6.4}$$

เมื่อ N_{\max} คือจำนวนรอบสูงสุดของขดลวดแต่ละชุด A_w คือพื้นที่หน้าตัดของแกน k_w คือตัวประกอบการพัน (winding factor) a_{w1} และ a_{w2} คือพื้นที่หน้าตัดของสายตัวนำที่ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิตามลำดับ โดยค่า a_{w1} จะขึ้นอยู่กับค่ายอดของกระแส (i_p) ซึ่งไหลผ่านด้านปฐมภูมิ ส่วน a_{w2} จะขึ้นอยู่กับกระแสพิคัดของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งเป็นกระแสที่ไหลผ่านด้านทุติยภูมิ

6.1.2 ขั้นตอนการออกแบบหม้อแปลงเชื่อมร่วม

การออกแบบหม้อแปลงเชื่อมร่วมตามแนวทางซึ่งได้กล่าวไว้ที่ด้านบนจะมีลำดับขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดค่ากระแสสูงสุดของหม้อแปลงเชื่อมร่วมและขนาดสายตัวนำที่พันหม้อแปลง

ขั้นตอนแรกเราจะกำหนดค่ากระแสสูงสุดของหม้อแปลงเชื่อมร่วม i_p และขนาดสายตัวนำ a_{w1} ที่ด้านปฐมภูมิที่ต้องรองรับกระแสของหม้อแปลงดังกล่าว ส่วนขนาดสายตัวนำ a_{w2} ที่ด้านทุติยภูมิจะกำหนดจากกระแสพิคัดของอินเวอร์เตอร์

ขั้นตอนที่ 2 เลือกแกนเฟอร์ไรท์สำหรับหม้อแปลง

จากสมการที่ (6.3) และ (6.4) จะได้เงื่อนไขสำหรับเลือกแกนที่เหมาะสมดังสมการที่ (6.5) สังเกตได้ว่าพารามิเตอร์ที่แสดงลักษณะของระบบขับเคลื่อนในสมการทางด้านขวามือจะเป็นตัวกำหนดค่า A_c , A_w และ B_s ของแกนเฟอร์ไรท์ที่ใช้ได้ ในที่นี้จะเลือกใช้แกนที่มีขนาดเล็กที่สุดที่ยังสอดคล้องตามเงื่อนไข (6.5)

$$A_c \cdot A_w \cdot B_s \geq \frac{v_d}{8 \cdot f_{sw} \cdot k_w} (a_{w1} + 3a_{w2}) \quad (6.5)$$

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่าจำนวนรอบของตัวนำที่พันต่อชุด

กำหนดให้จำนวนรอบของตัวนำต่อชุดมีค่าเท่ากับจำนวนรอบต่ำสุด $N = N_{\min}$ จากสมการที่ (6.3) จะคำนวณค่าดังกล่าวได้เป็น

$$N = N_{\min} = \frac{v_d}{8B_s \cdot A_c \cdot f_{sw}} \quad (6.6)$$

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณค่าความเหนี่ยวนำสร้างสนามแม่เหล็กของหม้อแปลง L_{cm}

จากขั้นตอนที่ 3 เมื่อทราบค่าจำนวนรอบตัวนำที่พันลงบนแกนที่เลือกแล้ว เราก็จะสามารถคำนวณค่าความเหนี่ยวนำของหม้อแปลงได้จากสมการที่ (6.7)

$$L_{cm} = N^2 A_L \quad (6.7)$$

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบเงื่อนไขการจำกัดค่ากระแสสูงสุดของหม้อแปลงเชื่อมร่วม

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการตรวจสอบว่าหม้อแปลงเชื่อมร่วมมีค่าความเหนี่ยวนำเพียงพอที่จะจำกัดกระแสที่ไหลผ่านหรือไม่ โดยพิจารณาจากสมการที่ (6.1) จะได้ว่า

$$L_{cm} > L_{\min} \quad (6.8)$$

$$L_{\min} = \frac{V_d}{8 \cdot i_{p\max} \cdot f_{sw}} = N_{L\min}^2 A_L$$

เมื่อ $N_{L\min}$ คือรอบน้อยที่สุดที่จำเป็นตามเงื่อนไขการจำกัดค่ากระแส

หากการตรวจสอบให้ผลที่สอดคล้องตามเงื่อนไขในสมการที่ (6.8) แสดงว่าเราสามารถออกแบบหม้อแปลงเชื่อมร่วมตามขั้นตอนที่ 1-3 เพื่อนำไปใช้งานได้โดยแกนเฟอร์ไรท์ที่เลือกใช้มีความเหมาะสม แต่หากการตรวจสอบได้ผลไม่สอดคล้องตามเงื่อนไขแสดงว่าจำเป็นต้องมีการแก้ไขปรับเปลี่ยนเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำของหม้อแปลงตามขั้นตอนที่ 6

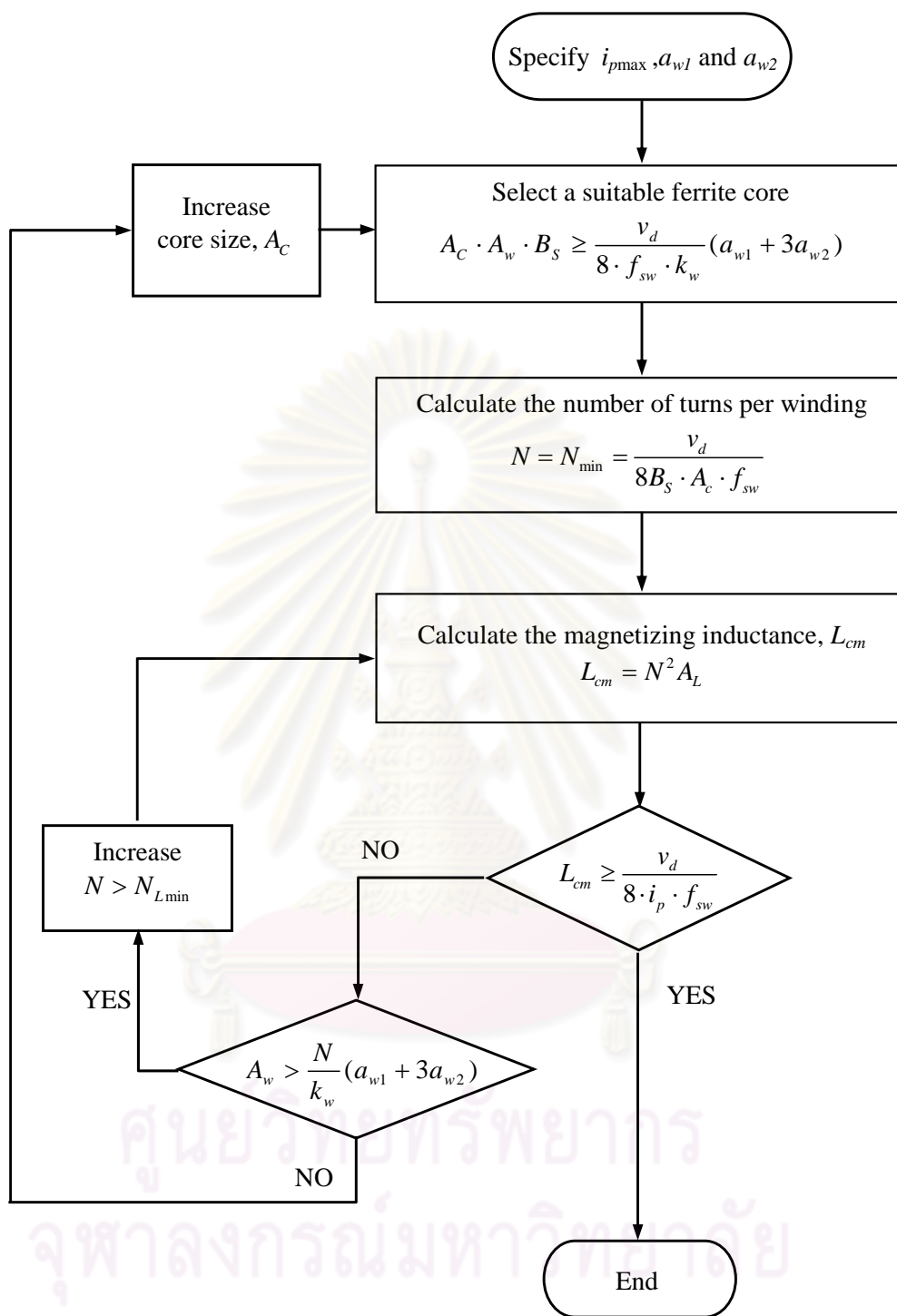
ขั้นตอนที่ 6 การปรับเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำของหม้อแปลง

วิธีที่ง่ายสำหรับการเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำของหม้อแปลงคือ การเพิ่มจำนวนรอบการพันหม้อแปลงให้ $N > N_{L\min}$ แต่ก่อนอื่นจะต้องตรวจสอบว่าแกนเฟอร์ไรท์ที่ใช้ในนั้นสามารถเพิ่มจำนวนรอบเพื่อให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำตามที่ต้องการหรือไม่ การตรวจสอบดังกล่าวจะพิจารณาโดยใช้สมการที่ (6.9)

$$A_w > \frac{N}{k_w} (a_{w1} + 3a_{w2}) \quad (6.9)$$

หากการตรวจสอบได้ผลสอดคล้องตามเงื่อนไขในสมการที่ (6.9) แสดงว่าพื้นที่หน้าต่างแกนมีพื้นที่มากพอที่จะเพิ่มรอบการพันขดลวดได้ แต่หากได้ผลไม่สอดคล้องตามเงื่อนไขแสดงว่าแกนเฟอร์ไรท์ที่ใช้มีพื้นที่หน้าต่างจำกัดและไม่สามารถเพิ่มรอบการพันให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำตามที่ต้องการได้ออกแบบได้ ดังนั้นเราจำเป็นต้องเลือกแกนเฟอร์ไรท์ใหม่ให้มีพื้นที่หน้าต่างมากขึ้น (ซึ่งโดยส่วนใหญ่มักจะเป็นแกนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย) เพื่อให้สามารถเพิ่มรอบการพันขดลวดได้ รวมทั้งจะต้องกลับไปออกแบบในขั้นตอนที่ 2-5 ใหม่อีกครั้ง

ขั้นตอนการออกแบบที่กล่าวมานี้สามารถสรุปเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 แผนภาพแสดงขั้นตอนการออกแบบหม้อแปลงเชื่อมร่วม

ตัวอย่างการออกแบบหม้อแปลงเชื่อมร่วม

สำหรับระบบที่ใช้ทดลองในงานวิทยานิพนธ์นี้จะใช้อินเวอร์เตอร์ขนาดพิกัด 2 Hp, แรงดัน 380 V ($v_d \cong 540$ V), กระแสพิกัด 3.6 A และทำงานที่ความถี่ 50 Hz และความถี่การสวิตช์ $f_{sw} = 5-10$ kHz ดังนั้นเราจะออกแบบหม้อแปลงเชื่อมร่วมสำหรับระบบดังกล่าวโดยมีรายละเอียดดังนี้

ลำดับแรกกำหนดให้ค่าสูงสุดของกระแสของหม้อแปลงเชื่อมร่วม i_p มีค่าไม่เกิน 0.5 A ($i_{p,max}$) และเลือกใช้สายตัวนำสำหรับด้านปฐมภูมิที่มี $a_{w1} = 0.2$ mm² ซึ่งตรงกับสายเบอร์ SWG25 ส่วนสายตัวนำด้านทุติยภูมิที่ต้องรองรับกระแสพิกัดของอินเวอร์เตอร์จะเลือกใช้สายตัวนำที่มี $a_{w2} = 1.6$ mm² ซึ่งตรงกับสายเบอร์ SWG17

จากสายตัวนำที่เลือกใช้กำหนดค่าตัวประกอบการพัน $k_w = 0.4$ เมื่อลองคำนวณแกนเฟอร์ไรท์ที่ต้องใช้ใน 2 กรณีเปรียบเทียบกับกันดังนี้คือ

- (1) ในกรณีที่ออกแบบให้หม้อแปลงรองรับแรงดันโหมตร่วมเฉพาะองค์ประกอบที่ความถี่การสวิตช์เท่านั้น จากสมการที่ 6 สามารถเลือกใช้แกนเฟอร์ไรท์ดังตัวอย่างในตารางที่ 6.1 ได้โดยมีจำนวนรอบการพันขดลวดต่อเฟสเท่ากับ 90 รอบ ซึ่งขนาดของแกนจะมีปริมาตรเท่ากับ 118.5 cm³
- (2) ในกรณีที่ออกแบบโดยให้หม้อแปลงรองรับแรงดันโหมตร่วมทั้งที่องค์ประกอบที่ความถี่การสวิตช์และองค์ประกอบฮาร์มอนิกที่ 3 จะต้องใช้แกนเฟอร์ไรท์ที่มีขนาดใหญ่มาดั่งตัวอย่างในตารางที่ 6.2 (ต้องใช้ 4 ชิ้นประกบกัน) โดยมีจำนวนรอบการพันขดลวดต่อเฟส เท่ากับ 200 รอบซึ่งขนาดของแกนจะมีปริมาตรเท่ากับ 1298.4 cm³

แกนเฟอร์ไรท์ที่เหมาะสมตามเงื่อนไขในสมการที่ (6.5) ซึ่งเป็นกรณีที่หม้อแปลงเชื่อมร่วมรองรับเพียงเฉพาะแคว้นองค์ประกอบที่ความถี่การสวิตช์และแถบความถี่ข้างของแรงดันโหมตร่วมเท่านั้นจะมีขนาดเล็กกว่ากรณีที่หม้อแปลงเชื่อมร่วมต้องรองรับทั้งองค์ประกอบที่ความถี่การสวิตช์และฮาร์มอนิกที่ 3

ตารางที่ 6.1 ตัวอย่างแกนเฟอร์ไรท์สำหรับหม้อแปลงเชื่อมร่วมเมื่อรองรับแรงดันเฉพาะองค์ประกอบที่ความถี่การสวิตช์ของแรงดันโหมตร่วม

core type		N30 R63x38x25
Effective section area	A_e	305.9 mm ²
Effective length of magnetic path	l_e	152.1 mm
Window area	A_w	1,134 mm ²
A_L -value	A_L	10.8 ± 25% μ H/N ²
Saturation magnetic flux density	B_s	380 (at 25° C) mT
		240 (at 100° C) mT
Volume		118.5 cm ³

ตารางที่ 6.2 ตัวอย่างแกนเฟอร์ไรท์สำหรับหม้อแปลงเชื่อมร่วมเมื่อรองรับทั้งองค์ประกอบที่ความถี่การสวิตช์และองค์ประกอบที่ความถี่ 3n เท่าของความถี่หลักมูล

core type		N30 R87x54.3x13.5 (x 4 pieces)	
Effective section area	A_e	220.0 (x4)	mm ²
Effective length of magnetic path	l_e	221.9	mm
Window area	A_w	2,316	mm ²
A_L -value	A_L	5.4 ± 25% (x4)	μH/N ²
Saturation magnetic flux density	B_s	380 (at 25° C)	mT
		240 (at 100° C)	mT
Volume		1298.4	cm ³

จากตัวอย่างข้างต้นนี้ จะเห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรกรองแอกทีฟแบบเดิมที่เสนอในบทความ [25]-[30] วงจรกรองไฮบริดชนิดใหม่ที่น่าเสนอ จะมีขนาดปริมาตรของแกนที่ใช้สำหรับหม้อแปลงเชื่อมร่วมเล็กกว่าถึง 1/10 เท่า

เมื่อเลือกใช้แกนเฟอร์ไรท์ในตารางที่ 6.1 และพันขดลวด 90 รอบต่อเฟส จากการวัดความเหนี่ยวนำของหม้อแปลงเชื่อมร่วมมีค่าเท่ากับ $L_{cm} = 82$ mH และมีค่าความเหนี่ยวนำรั่วทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิคือ $L_p = 0.54$ mH และ $L_s = 0.36$ mH ตามลำดับ เมื่อตรวจสอบเงื่อนไขในสมการที่ (6.8) ก็ได้ผลที่สอดคล้องตามเงื่อนไข โดยคำนวณค่ายอดของกระแส (i_p) ที่เกิดขึ้นจริงเมื่อ $L_{cm} = 82$ mH ที่ความถี่การสวิตช์ $f_{sw} = 5$ kHz ได้เท่ากับ 0.16 A

6.2 การออกแบบตัวเก็บประจุแยกการเชื่อมร่วม

ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้การแทรกตัวเก็บประจุแยกการเชื่อมร่วม C_{Series} อนุกรมกับหม้อแปลงเชื่อมร่วม เพื่อกีดกันองค์ประกอบที่ความถี่ต่ำของแรงดันโหมดรวม และปล่อยให้เฉพาะองค์ประกอบที่ความถี่การสวิตช์ของแรงดันโหมดรวมตกคร่อมที่หม้อแปลงโหมดเชื่อมร่วม ตัวเก็บประจุ C_{Series} และค่าความเหนี่ยวนำสร้างสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงเชื่อมร่วม L_{cm} จะทำงานร่วมกันเป็นวงจรกรองผ่านสูง การกำหนดความถี่ตัดข้าม f_{C1} ของวงจรกรองผ่านสูง ต้องให้มีค่าอยู่ระหว่างความถี่ 3n เท่าของความถี่หลักมูล ($3n f_o$) และความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ (f_{sw}) เพื่อหลีกเลี่ยงการถูกกระตุ้นจากภาวะเรโซแนนซ์ เมื่อเลือกค่าความถี่ตัดข้าม f_{C1} ได้ ก็สามารถคำนวณค่าตัวเก็บประจุที่ต้องใช้ได้ดังสมการที่ (6.10)

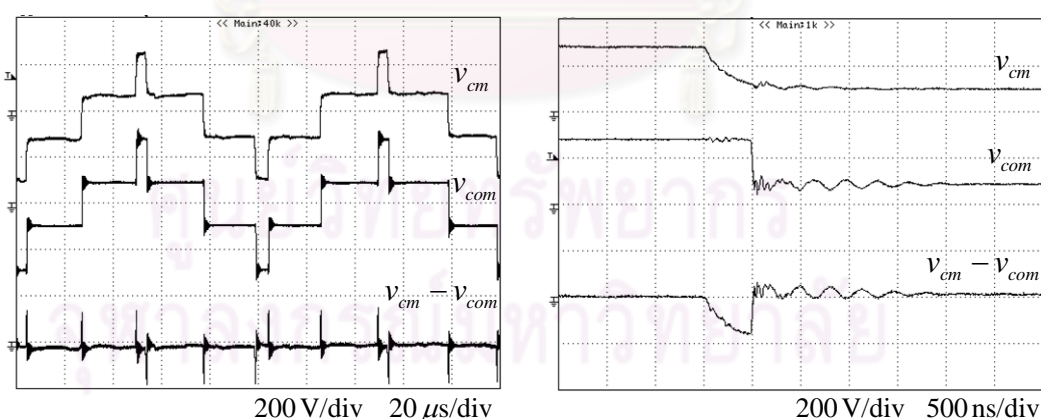
$$C_{Series} = \frac{1}{(2\pi f_{C1})^2 L_{cm}} , \quad 3f_o < f_{C1} < f_{sw} \quad (6.10)$$

วิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบตัวเก็บประจุ C_{Serise} โดยเลือกวางตำแหน่งความถี่ตัดข้าม f_{Cl} ไว้ที่ 1 kHz และจากหัวข้อ 6.1 ค่าความเหนี่ยวนำสร้างสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงเชื่อมร่วม L_{cm} เท่ากับ 82 mH ดังนั้นตัวเก็บประจุ C_{Serise} ที่ออกแบบจะมีค่าเท่ากับ $0.2 \mu F$

6.3 การออกแบบวงจรตรวจจับแรงดันโหมมร่วมและวงจรขับนำเกตของอินเวอร์เตอร์

วิทยานิพนธ์นี้เสนอวิธีการตรวจจับแรงดันโหมมร่วมแบบใหม่ โดยใช้การตรวจจับแรงดันเฟสที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ทั้ง 3 เฟสแทนการใช้สัญญาณ PWM สัญญาณแรงดันเฟสที่ตรวจจับได้จะนำมาผ่านวงจรตรรกะเพื่อสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์กำลังของอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ ผลทดลองในรูปที่ 6.4 แสดงให้เห็นว่าด้วยวิธีการนี้ แรงดันชดเชย v_{com} ที่สร้างได้จะมีความสอดคล้องกับแรงดันโหมมร่วม v_{cm} ที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ โดยเวลาประวิงระหว่างแรงดันโหมมร่วม v_{cm} และแรงดันชดเชยมีค่าเพียง 500 ns (เวลาประวิงนี้เป็นผลรวมของเวลาประวิงของวงจรตรวจจับ วงจรขับนำเกต และเวลาไร้ผลตอบสนองของอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ) ซึ่งถือว่ามีค่าความไวมากกว่าวิธีการแบบเดิมที่เสนอไว้ในบทความ [30] มาก เมื่อเวลาประวิงของอินเวอร์เตอร์แบบ PWM โดยทั่วไปมีค่าประมาณ $2 - 5 \mu s$

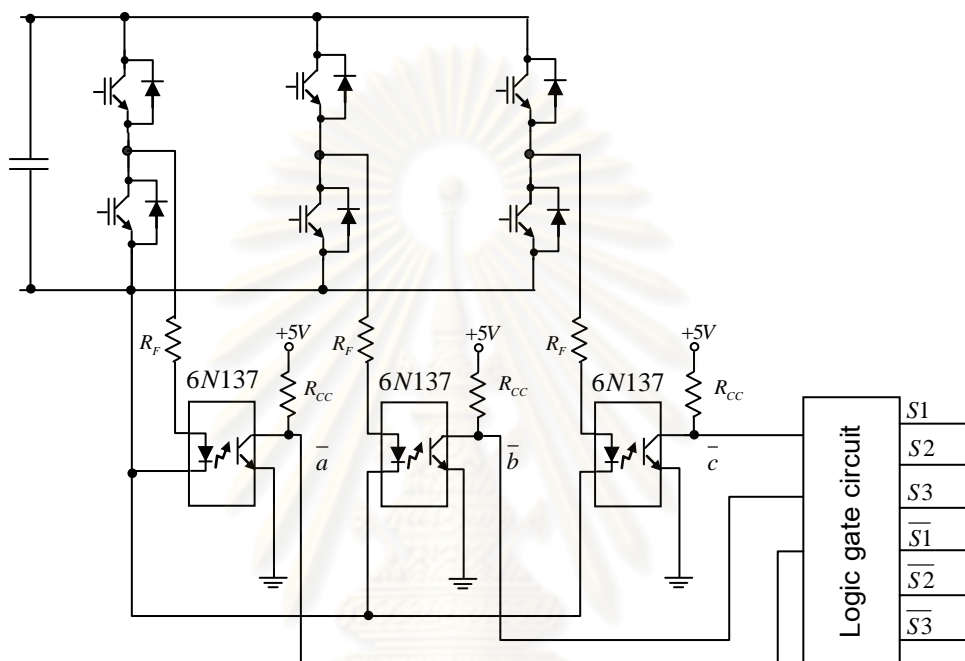
การออกแบบวงจรแต่ละส่วนภายในวงจรตรวจจับแรงดันโหมมร่วมจะมีรายละเอียดดังหัวข้อด้านล่างนี้



รูปที่ 6.4 การเปรียบเทียบระหว่างแรงดันโหมมร่วม v_{cm} ที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์และแรงดันชดเชย v_{com} ที่สร้างโดยอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ

6.3.1 วงจรตรวจจับการสวิตช์ของแรงดันเฟสที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์

การตรวจจับแรงดันเฟสที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์โดยตรงเป็นการหลีกเลี่ยงความผิดพลาดของการตรวจจับการสวิตช์ของแรงดันจากสัญญาณ PWM โดยเฉพาะในช่วงเวลาไร้ผลตอบสนองของอินเวอร์เตอร์ ดังที่ได้แสดงรายละเอียดในหัวข้อ 5.2.3 วิทยานิพนธ์นี้จะใช้วงจรที่ใช้ตรวจจับการสวิตช์ของแรงดันเฟสที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ดังรูปที่ 6.5



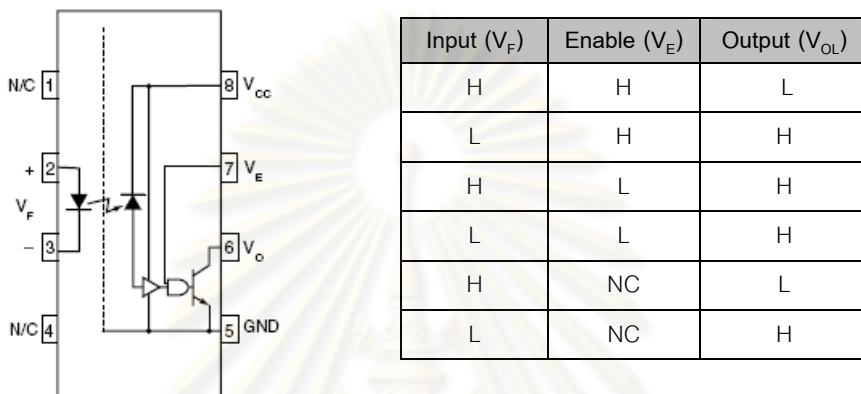
รูปที่ 6.5 วงจรตรวจจับการสวิตช์ของแรงดันเฟสที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์

การตรวจจับการสวิตช์ของแรงดันเฟสที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ด้วยตัวแยกโดดทางแสง ซึ่งมีความไวสูงจะช่วยลดเวลาประวิงของการตรวจจับได้ วิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้ตัวแยกโดดทางแสงที่เป็นวงจรตรรกะชนิด TTL เบอร์ 6N137 เนื่องจากมีความไวสูงและราคาถูก ซึ่งตัวแยกโดดทางแสงดังกล่าวนี้จะมีวงจรและการทำงานดังรูปที่ 6.6 การต่อวงจรเพื่อตรวจจับแรงดันที่เฟสใด ๆ ของอินเวอร์เตอร์เป็นดังรูปที่ 6.7 โดยการออกแบบค่า R_F และ R_{CC} ในวงจรสามารถพิจารณาได้ดังนี้

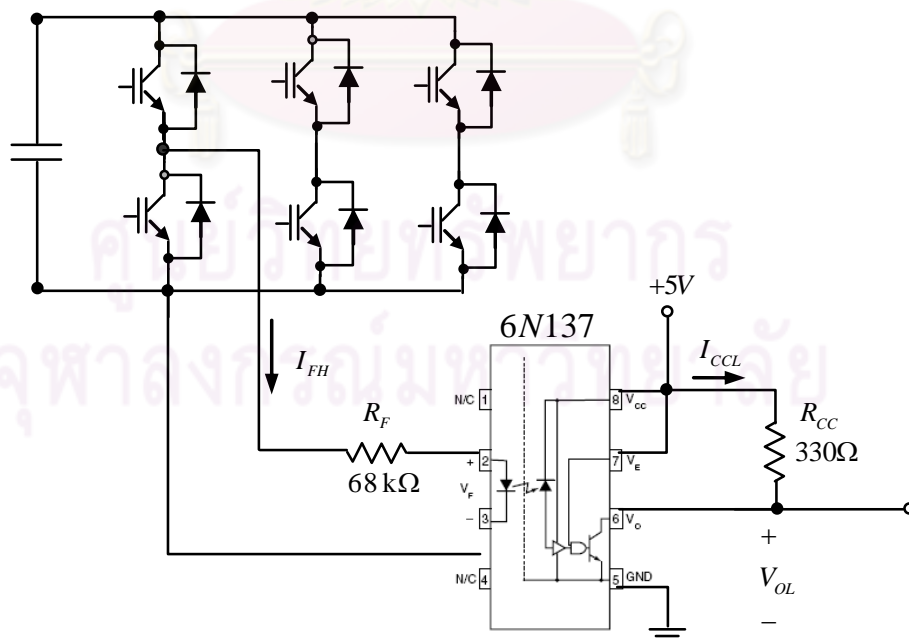
เอกสารประกอบการใช้งานได้ระบุการทำงานที่เหมาะสมของตัวแยกโดดทางแสงเบอร์ 6N137 ไว้ที่ $I_{FH} = 6.3 - 15 \text{ mA}$ ดังนั้นการออกแบบจะพิจารณาสมภาวะที่แรงดันเฟสมีขนาดเท่ากับ 540 V (ตามแรงดันบัลไฟตรง) เป็นแรงดันด้านเข้าของตัวแยกโดดทางแสง และเลือกใช้ $R_F = 68 \text{ k}\Omega$ (5W) ซึ่งสามารถคำนวณค่ากระแสผ่านไดโอด I_{FH} ได้เท่ากับ 7.94 mA สอดคล้องตามข้อแนะนำในเอกสารประกอบการใช้งาน

ตัวแยกโดดทางแสงเบอร์ 6N137 มีพิกัดกระแสและแรงดันด้านออก $I_{CC} = 14 - 21 \text{ mA}$ และ $V_{OL} = 0.35 \text{ V}$ ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อกำหนดให้ $I_{CC} = 14 \text{ mA}$ จะสามารถคำนวณค่าความต้านทาน R_{CC} ได้เท่ากับ $R_{CC} = \frac{V_{CC} - V_{OL}}{I_{CCL}} = \frac{5 - 0.35}{14 \text{ mA}} \approx 330 \Omega$

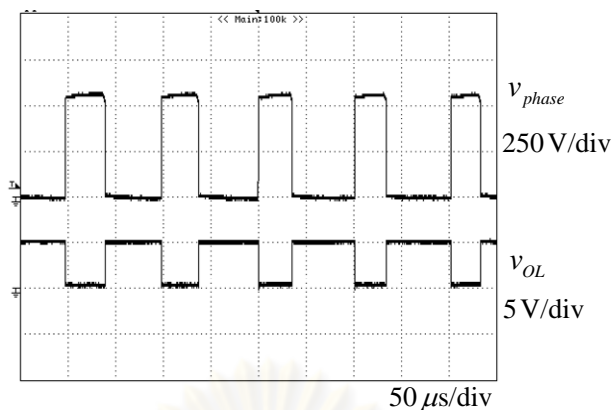
ผลทดลองในรูปที่ 6.8 แสดงผลการตรวจจับการสวิตช์ของแรงดันเฟส v_{phase} ด้วยวงจรตรวจจับแรงดันที่ใช้ตัวแยกโอดทางแสงเบอร์ 6N137 จากรูปจะเห็นว่า วิธีการตรวจจับแรงดันที่นำเสนอนี้มีความสอดคล้องกับลักษณะแรงดันเฟสที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าระหว่าง 0-540 V และเวลาประวิงของวงจรตรวจจับจะมีค่าเพียง 50 ns



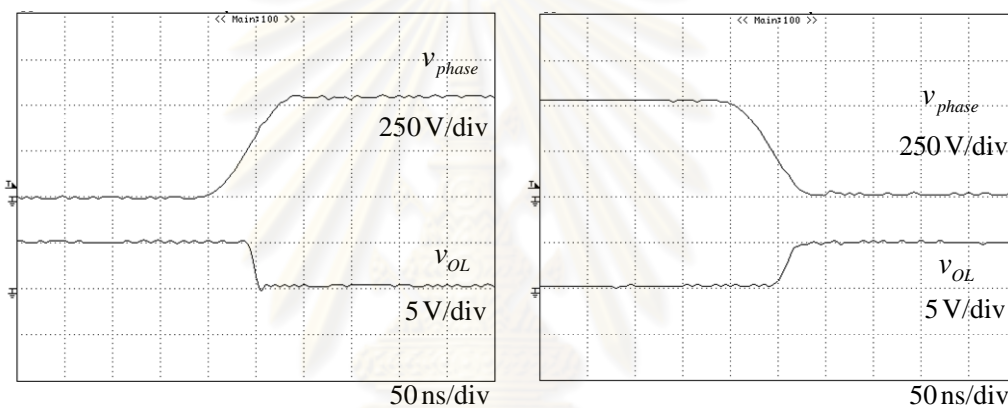
รูปที่ 6.6 วงจรภายในและตารางการทำงานของตัวแยกโอดทางแสงเบอร์ 6N137



รูปที่ 6.7 การต่อวงจรตรวจจับการสวิตช์ของแรงดันเฟสด้วยตัวแยกโอดทางแสงเบอร์ 6N137



ก) รูปคลื่นแรงดันเฟสและสัญญาณการสวิตช์ที่ตรวจจับได้



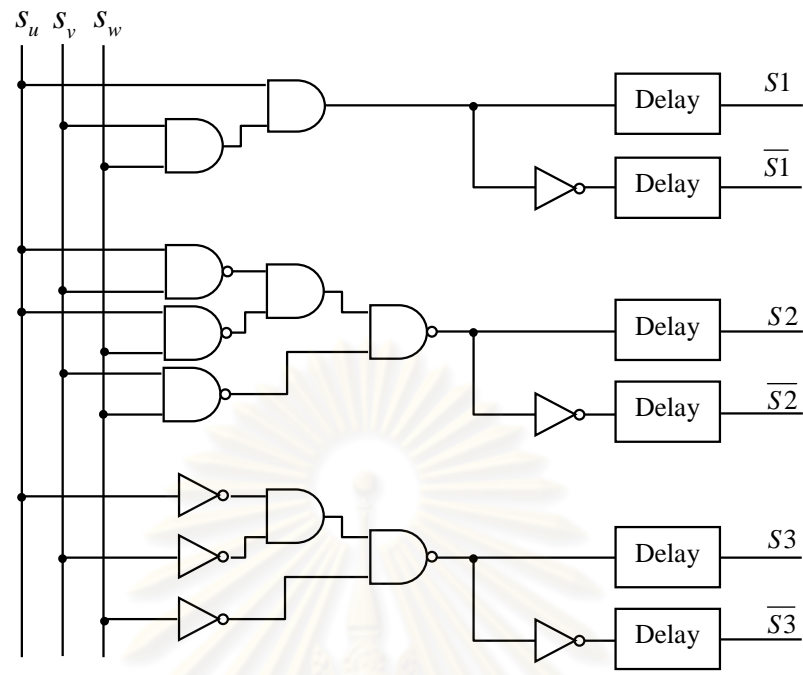
ข) ภาพขยายทางแกนเวลาแสดงเวลาประวิงของวงจรตรวจจับ

รูปที่ 6.8 ผลการทดลองแสดงการตรวจจับการสวิตช์ของแรงดันเฟสด้วยวงจรตรวจจับแบบตัวแยกโดดทางแสง

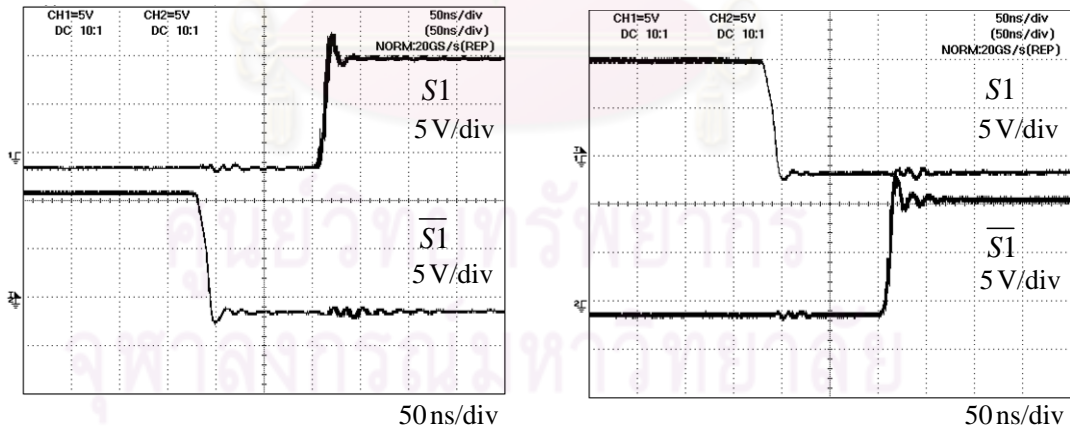
6.3.2 วงจรตรรกะสำหรับสร้างสัญญาณขั้วนำเกิดโดยอาศัยสัญญาณการสวิตช์ของแรงดันเฟส

วงจรสร้างสัญญาณขั้วนำสวิตช์กำลังของอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับโดยใช้สัญญาณการสวิตช์ของแรงดันเฟส (s_u, s_v, s_w) ที่ได้จากวงจรตรวจจับแรงดันเฟสที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ดังรูปที่ 6.9 วงจรนี้จะมีองค์ประกอบ 2 ส่วนได้แก่

- 1) วงจรตรรกะซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณการสวิตช์ของแรงดันเฟสเป็นสัญญาณขั้วนำสวิตช์กำลังของอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับตาม ความสัมพันธ์ในตารางที่ 5.1
- 2) วงจรประวิงเวลาซึ่งทำหน้าที่สร้างช่วงเวลาไร้ผลสนองเพื่อป้องกันการลัดวงจรของอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ การออกแบบในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้เวลาไร้ผลสนองของอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับมีค่าประมาณ 100 ns ดังรูปที่ 6.10



รูปที่ 6.9 วงจรตรรกะสร้างสัญญาณขั้วนำจากแรงดันเฟส



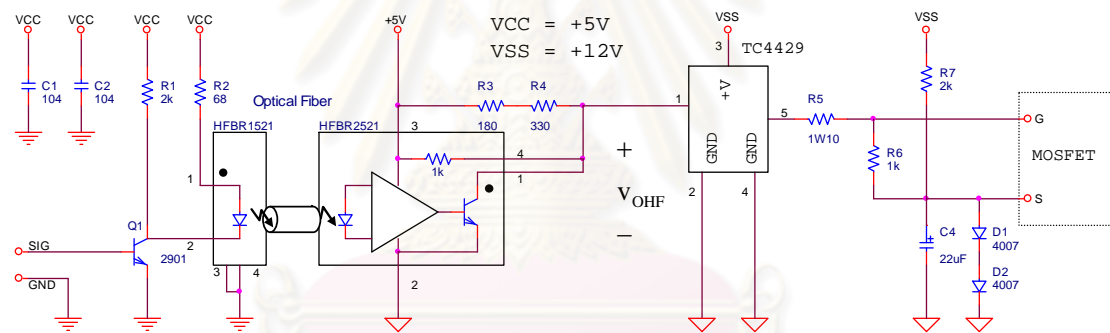
รูปที่ 6.10 สัญญาณขั้วนำสวิตช์กำลัง $S1$ และ $\bar{S1}$ ของอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ 1 ขาที่มีช่วงแสดงเวลาไร้ผลสนอง

6.3.3 วงจรขับนำสวิตช์กำลังของอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ 1 ขา

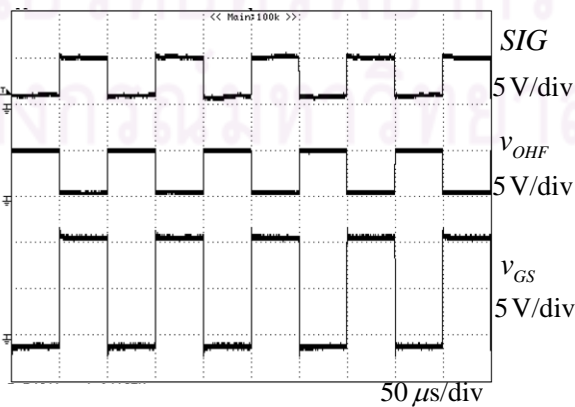
วงจรขับนำสวิตช์ที่ออกแบบและใช้งานในวิทยานิพนธ์นี้เป็นดังรูปที่ 6.11 วงจรแต่ละส่วนจะมีความทำงานดังนี้

- 1) ตัวแยกโหนดทางไฟฟ้าด้วยเส้นใยแก้วนำแสงทำหน้าที่แยกการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าระหว่างวงจรภาคควบคุมและวงจรภาคกำลัง ตัววงจรประกอบด้วย HFBR 1521 และ HFBR 2521 เป็นตัวรับและตัวส่งตามลำดับ
- 2) วงจรขับนำสวิตช์กำลังที่มีไอซีขับนำเกต TC4429 เป็นอุปกรณ์หลัก

ผลการทดลองในรูปที่ 6.12 แสดงการทำงานและเวลาประวิงของวงจรขับนำสวิตช์ เมื่อ SIG คือ สัญญาณขับนำจากวงจรตรรกะ, v_{OHF} คือสัญญาณด้านออกของตัวแยกโหนดทางไฟฟ้าด้วยเส้นใยแก้วนำแสง และ v_{GS} คือสัญญาณขับนำสวิตช์กำลังของอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ 1 ขา เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่าง SIG และ v_{GS} จะเห็นได้ว่าเวลาประวิงในช่วงขอบขาขึ้นและขอบขาลงมีค่าประมาณ 100 ns และ 200 ns ตามลำดับ

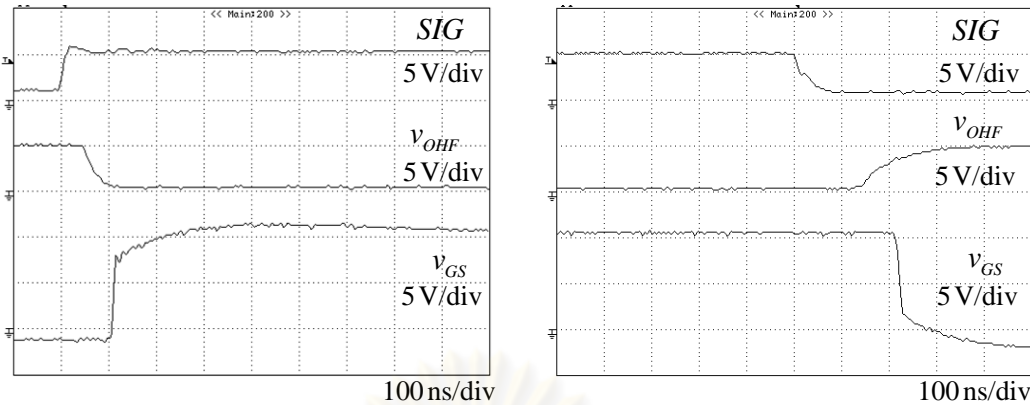


รูปที่ 6.11 วงจรขับนำสวิตช์กำลังของอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ 1 ขา



ก) การทำงานของวงจรขับนำสวิตช์กำลังของอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ

รูปที่ 6.12 สัญญาณที่ได้จากการทดสอบการทำงานของวงจรขับนำสวิตช์กำลังของอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ



ข) ภาพขยายทางแกนเวลาแสดงเวลาประวิงของวงจรถวายจับ

รูปที่ 6.12 (ต่อ) สัญญาณที่ได้จากการทดสอบการทำงานของวงจรถวายจับนำสวิตซ์กำลังของอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ

6.4 การออกแบบอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ 1 ขา

อินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ 1 ขา ซึ่งมีโครงสร้างดังรูปที่ 5.10 จะทำหน้าที่สร้างแรงดันชดเชยที่เท่ากับแรงดันโหมคร่วมของอินเวอร์เตอร์ v_{cm} สถานะการสวิตซ์ของอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ 1 ขา จะสัมพันธ์กับแรงดันโหมคร่วมที่ด้านออกหรือสถานะการสวิตซ์ของอินเวอร์เตอร์ ดังแสดงในตารางที่ 5.1

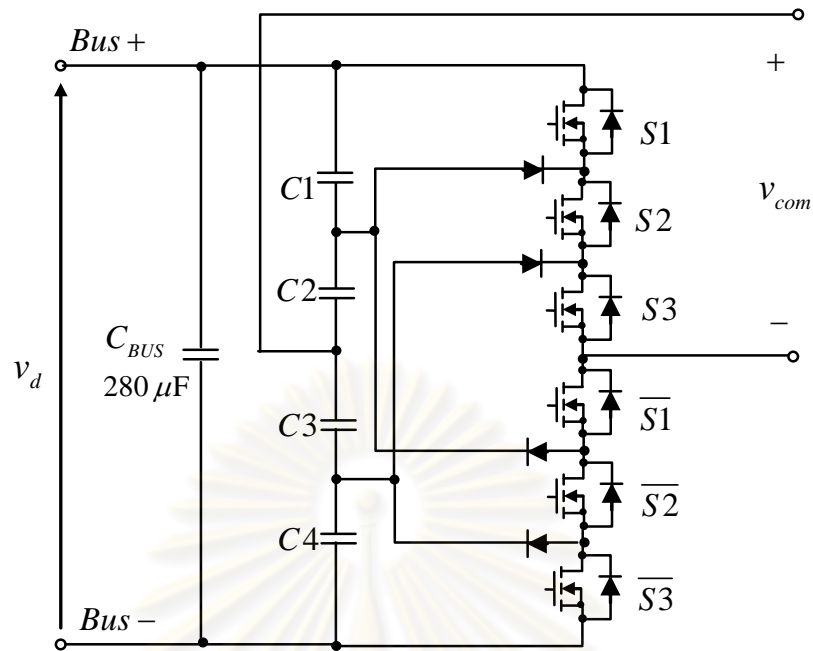
สวิตซ์กำลังแต่ละตัวของอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับจะมีแรงดันตกคร่อมขณะหยุดนำกระแสเพียง $1/3$ เท่าของแรงดันบัสไฟตรง v_d ดังนั้นเราจึงสามารถใช้สวิตซ์กำลังที่มีพิกัดแรงดันต่ำซึ่งหาได้ง่าย ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้โมสเฟตกำลังเบอร์ IRF730 ซึ่งมีขนาดเล็กและมีความไวสูง ซึ่งหมายถึงว่าต้องการเวลาไร้มลตบสนองสั้นด้วย

โดยทั่วไปการใช้งานวงจรถวายจับอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ มักจะมีปัญหาที่ต้องแก้ไขคือ ปัญหาความไม่สมดุลของแรงดันบัสไฟตรง (dc-bus voltage imbalance) สาเหตุของปัญหาดังกล่าวนี้คือ การใช้งานที่ทำให้กระแสของตัวเก็บประจุที่บัสไฟตรง $C1-C4$ มีค่าเฉลี่ยไม่เท่ากัน ซึ่งจะเกิดในกรณีที่มีการจ่ายกำลังไปที่โหลดที่ขนาดแรงดันขนาด $\pm v_d / 6$

อย่างไรก็ตาม สำหรับการใช้งานในวงจรถวายจับแบบไฮบริด วงจรถวายจับอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับที่ใช้สร้างแรงดันชดเชยจะจ่ายเฉพาะกระแสสร้างแม่เหล็กของหม้อแปลงเชื่อมร่วมเท่านั้นและไม่มีการจ่ายกำลังจริง ดังนั้นกระแสของตัวเก็บประจุที่บัสไฟตรง $C1-C4$ จะมีค่าเฉลี่ยต่อคาบการสวิตซ์เท่ากับศูนย์และสามารถละเลยปัญหาความไม่สมดุลของแรงดันบัสไฟตรงได้

เพื่อให้อินเวอร์เตอร์ 4 ระดับสามารถสร้างแรงดันชดเชยที่มีระดับแรงดันตามต้องการได้ จะต้องมีการออกแบบตัวเก็บประจุที่บัสไฟตรง $C1-C4$ ของวงจรถวายจับอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับที่เหมาะสม โดยตัวเก็บประจุ $C1-C4$ จะมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (6.11)

$$C1 = \frac{1}{2}C2 = \frac{1}{2}C3 = C4 \tag{6.11}$$



รูปที่ 6.13 โครงสร้างของวงจรอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ 1 ขา

ค่า $C1-C4$ สามารถคำนวณได้จากค่าจำกัดของระลอกในแรงดันชดเชย (Δv_{com}) ที่ยอมรับได้ Δv_{com} จะมีค่าสูงสุดเมื่อแรงดันชดเชย v_{com} เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมและมีกระแสสร้างสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงเชื่อมร่วมดังรูปที่ 6.2 กรณีนี้เป็นช่วงที่สถานะการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับเป็น 111 หรือ 000 สลับกัน เมื่อแรงดันชดเชย v_{com} เป็นบวกหรือลบตามลำดับ จากวงจรในรูปที่ 6.13 ที่สถานะการสวิตช์ 111 และ 000 ครั้งหนึ่งของกระแสสร้างสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงเชื่อมร่วมจะไหลผ่าน $C1$ และ $C2$ ส่วนอีกครึ่งหนึ่งจะไหลผ่าน $C3$ และ $C4$ ดังนั้นจึงคำนวณได้ว่าค่ายอดของกระแสอัดหรือคายประจุผ่านตัวเก็บประจุ $C1-C4$ I_C มีค่าเท่ากับ $1/2$ เท่าของค่ายอดของกระแสสร้างสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงเชื่อมร่วมดังสมการที่ (6.12)

$$I_C = \frac{i_p}{2} = \frac{v_d}{16L_{cm} \cdot f_{sw}} \quad (6.12)$$

เนื่องจากช่วงเวลาการอัดประจุตัวเก็บประจุ $C1$ และ $C2$ มีค่าเท่ากับ $1/(4f_{sw})$ และอาศัยความสัมพันธ์ตามสมการที่ (6.11) จะสามารถคำนวณได้ว่ากระแสอัดหรือคายประจุผ่านตัวเก็บประจุทำให้เกิดค่ายอดของระลอกแรงดันชดเชย Δv_{com} ตกคร่อมที่ตัวเก็บประจุ $C1$ และ $C2$ มีค่าเท่ากับ

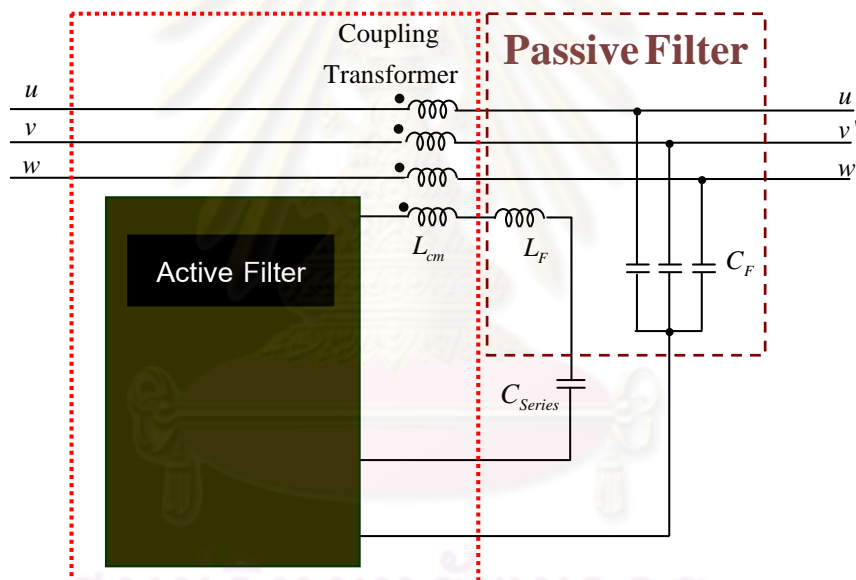
$$\Delta v_{com} = \left(\frac{3}{2}\right) \frac{1}{C1} \cdot \frac{i_p}{2} \cdot \frac{1}{4f_{sw}} \quad (6.13)$$

ดังนั้นจากค่าจำกัดของค่ายอดของระลอกแรงดันชดเชย Δv_{com} จะสามารถกำหนดค่าตัวเก็บประจุ $C1$ ได้จากสมการที่ (6.14) ส่วนตัวเก็บประจุ $C2-C4$ จะคำนวณค่าได้ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (6.11)

$$C1 = \frac{3v_d}{128 \cdot \Delta \max \cdot L_{cm} \cdot f_{sw}^2} \quad (6.14)$$

การออกแบบอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับในวิทยานิพนธ์นี้จะกำหนดให้ค่ายอดของระลอกแรงดันชดเชย Δv_{com} มีค่าไม่เกิน 1% ของขนาดแรงดันชดเชยซึ่งเท่ากับ $v_d / 2$ จะได้ $\Delta \max = 2.70 \text{ V}$ จากพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์คือ $v_d = 540 \text{ V}$ และความถี่การสวิตช์ต่ำสุด 5 kHz และจากความเหนี่ยวนำของหม้อแปลงเชื่อมร่วมที่มีค่าเท่ากับ 82 mH สามารถคำนวณค่าตัวเก็บประจุที่บัสไฟตรงของอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับได้มีค่าเท่ากับ $C1 = C4 = 3.3 \mu\text{F}$ และ $C2 = C3 = 6.6 \mu\text{F}$

6.5 การออกแบบวงจรกรองส่วนพาสซีฟ LC ขนาดเล็ก



รูปที่ 6.14 วงจรกรองพาสซีฟในวงจรกรองแบบไฮบริดชนิดใหม่

วงจรกรองพาสซีฟมีหน้าที่กำจัดแรงดันโหมดรวมในย่านความถี่ที่สูงเกินกว่าแบนด์วิดท์ของวงจรกรองแอกทีฟ (>1 MHz) ช่วยให้วงจรกรองโดยรวมทำงานได้ดีตลอดย่านความถี่ที่เป็นสาเหตุของปัญหาต่างๆ เนื่องจากการใช้งานเพียงเพื่อกรองแรงดันโหมดรวมที่ความถี่สูงเท่านั้น ตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองพาสซีฟที่ใช้จึงมีขนาดเล็กและค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากวงจรส่วนนี้จะมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

วงจรกรองพาสซีฟขนาดเล็กซึ่งเพิ่มเข้ามานี้จะได้จากการต่อตัวเก็บประจุ C_F และตัวเหนี่ยวนำ L_F ทางด้านปฐมภูมิ (ด้านอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ) ของหม้อแปลงเชื่อมร่วมตามตำแหน่งในรูปที่ 6.14 การติดตั้งตัวเหนี่ยวนำ L_F ไว้ที่ตำแหน่งดังกล่าวนี้จะมีข้อดีกว่าการติดตั้งไว้ที่ฝั่งทุติยภูมิ (ด้านอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส) เนื่องจาก

- 1) ทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงเชื่อมร่วมจะมีเฉพาะองค์ประกอบของกระแสไหลผ่าน ในขณะที่ทางทุติยภูมิของหม้อแปลงเชื่อมร่วมนอกจากจะมีกระแสไหลผ่านแล้วยังจะมีองค์ประกอบของกระแสไหลมอดผลต่างขนาดใหญ่ด้วย การติดตั้งตัวเหนี่ยวนำ L_F ทางฝั่งปฐมภูมิดังในรูปที่ 6.14 จึงสามารถใช้ขดลวดตัวนำที่มีพื้นที่หน้าตัดขนาดเล็กได้
- 2) ตัวเหนี่ยวนำ L_F ซึ่งเป็นตัวเหนี่ยวนำโหมคร่วม หากออกแบบโดยติดตั้งที่ฝั่งทุติยภูมิของหม้อแปลงเชื่อมร่วม จะต้องมีขดลวดถึง 3 ชุดต่ออยู่ที่ด้านนอกของหม้อแปลงเชื่อมร่วม ต่างจากเมื่อติดตั้งที่ฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงเชื่อมร่วมที่ใช้ขดลวดเพียงแค่ 1 ชุด

ข้อดีทั้ง 2 ประการนี้ยังผลให้เราสามารถเลือกใช้แกนของตัวเหนี่ยวนำ L_F ที่มีพื้นที่หน้าตัดขนาดเล็กได้ ซึ่งทำให้วงจรกรองพาสซีฟโดยรวมมีขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีติดตั้งตัวเหนี่ยวนำ L_F ไว้ที่ฝั่งทุติยภูมิ

คุณลักษณะการกรองของวงจรกรองพาสซีฟจะเกิดจากการทำงานร่วมกันของตัวเก็บประจุ C_F ผลรวมของค่าความเหนี่ยวนำรั่วของหม้อแปลงเชื่อมร่วม ($L_p + L_s$) และค่าความเหนี่ยวนำ L_F โอนย้ายมาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเชื่อมร่วมแล้ว ดังนั้นความถี่ตัดข้ามของวงจรกรองพาสซีฟ f_{c3} จะมีค่าเท่ากับ

$$f_{c3} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_F + L_p + L_s)C_F}} \quad (6.15)$$

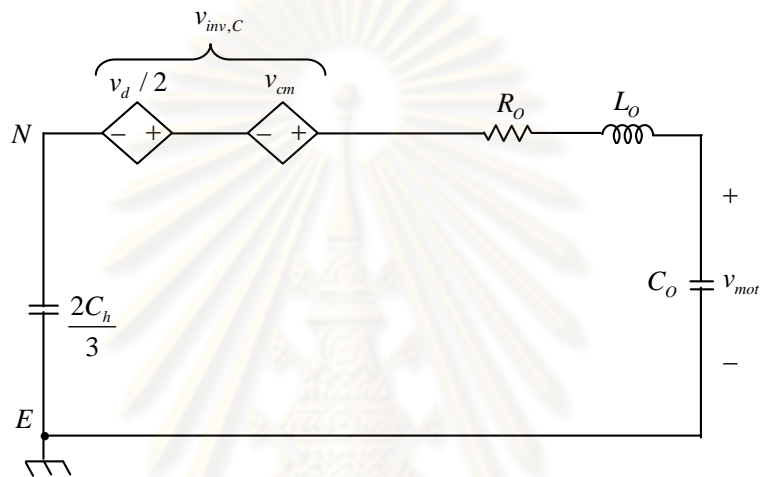
ในการออกแบบวงจรกรองส่วนพาสซีฟจะพิจารณาจากอัตราการลดทอนแรงดันโหมคร่วมของวงจรกรองพาสซีฟซึ่งจะกำหนดจากความถี่ตัดข้ามของวงจรกรอง โดยเราจะให้ความถี่ตัดข้ามของวงจรกรองพาสซีฟ f_{c3} มีค่าต่ำกว่า 150 kHz ซึ่งเป็นย่านของการแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการนำ เนื่องจากในย่านดังกล่าวนี้วงจรกรองส่วนแยกที่ไฟไม่สามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ จึงต้องมีวงจรกรองพาสซีฟเข้ามาช่วยเสริม ส่วนสาเหตุที่ทำให้วงจรกรองส่วนแยกที่ไฟทำงานด้อยลงนั้นจะกล่าวถึงในหัวข้อสมรรถนะของวงจรซึ่งเป็นหัวข้อถัดไป

ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ความถี่ตัดข้ามของวงจรกรองพาสซีฟ f_{c3} อยู่ที่ความถี่ประมาณ 100 kHz และออกแบบให้ $C_F = 0.3 \text{ nF}$ ซึ่งการที่เลือกให้ C_F มีค่าต่ำก็เพื่อจำกัดค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_F และป้องกันไม่ให้เกิดกระแสค่าสูงในวงจรโหมคร่วมผลต่าง จากความถี่ตัดข้ามที่กำหนดค่า C_F สามารถคำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำ $L_F = 2.9 \text{ mH}$ (เมื่อ $L_p = 0.54 \text{ mH}$ และ $L_s = 0.36 \text{ mH}$)

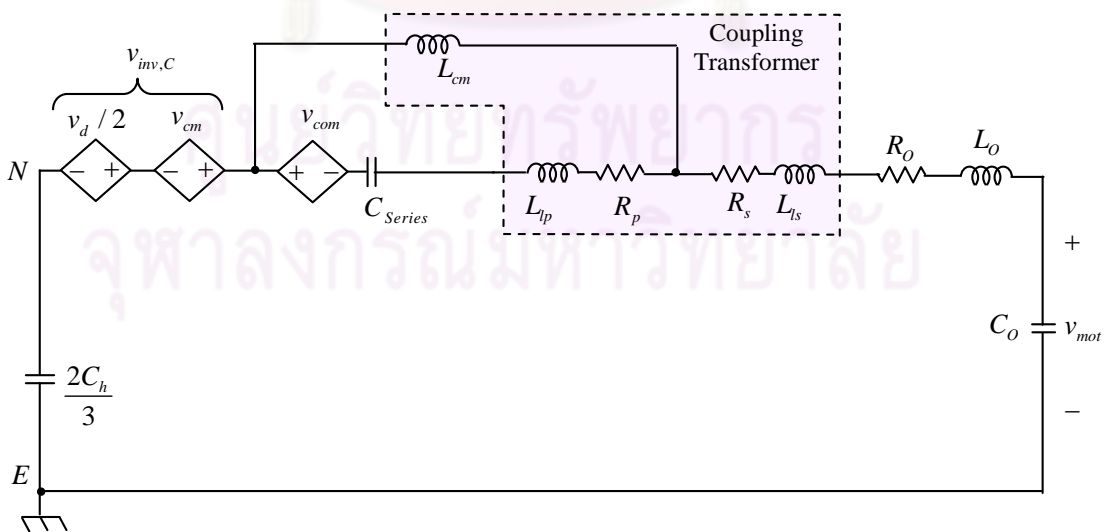
6.6 สมรรถนะการลดทอนแรงดันโหมคร่วมของวงจรกรองแบบไฮบริด

การวิเคราะห์สมรรถนะของวงจรกรองในการลดทอนแรงดันโหมคร่วมในส่วนองค์ประกอบที่ความถี่สูงกว่าการสวิตช์ขึ้นไป จะพิจารณาจากวงจรสมมูลโหมคร่วมของระบบขับเคลื่อน วงจรสมมูลของระบบที่จะใช้วิเคราะห์สมรรถนะของวงจรกรองก่อนใส่วงจรกรองจะเป็นดังรูปที่ 6.15 เมื่อ v_{cm} คือ แรงดันโหมคร่วมที่

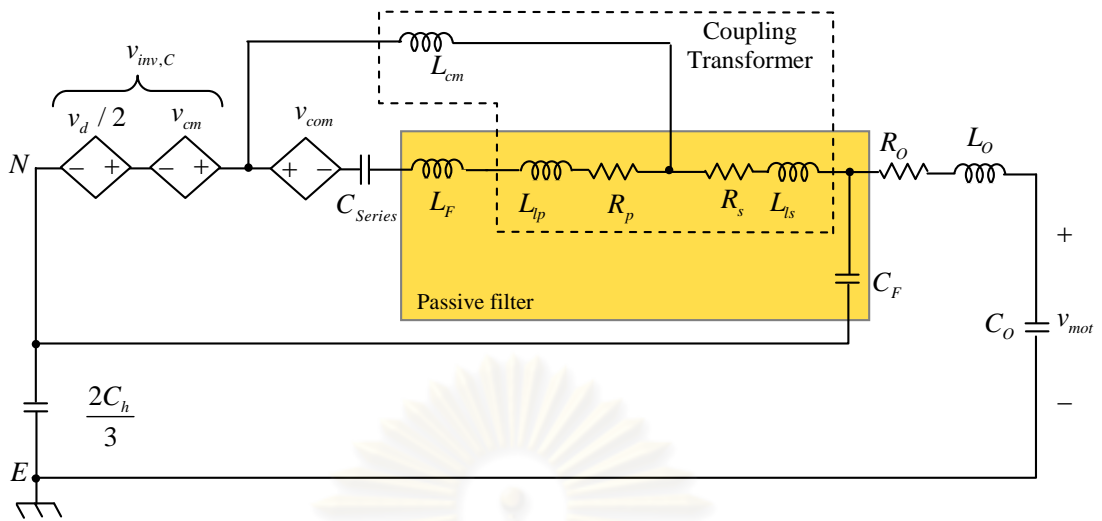
ด้านออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับกึ่งกลางบัสไฟตรง, v_{mot} คือแรงดันโหมตร่วมที่ขั้วมอเตอร์เทียบกับกราวด์ อิมพีแดนซ์โหมตร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ประกอบด้วย C_o คือค่าความจุไฟฟ้าแบบแผ่ระหว่างขดลวดและโครงของมอเตอร์ R_o และ L_o คือผลรวมของค่าความต้านทานและความเหนี่ยวนำของมอเตอร์และสายเคเบิล ในขณะที่รูปที่ 6.16 และ 6.17 จะแสดงวงจรสมมูลโหมตร่วมของระบบเมื่อติดตั้งเฉพาะวงจรกรองส่วนแอกทีฟและเมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟเพิ่มเติมเป็นวงจรกรองแบบไฮบริดตามลำดับ



รูปที่ 6.15 วงจรสมมูลโหมตร่วมของระบบ (พิจารณาที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์) ในกรณีที่ไม่มีวงจรกรอง



รูปที่ 6.16 วงจรสมมูลโหมตร่วมของระบบ (พิจารณาที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์) เมื่อติดตั้งเฉพาะวงจรกรองแอกทีฟ



รูปที่ 6.17 วงจรสมมูลใหม่โดยรวมของระบบ (พิจารณาที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์) เมื่อติดตั้งวงจรกรองแบบไฮบริด

การวิเคราะห์สมรรถนะการกรองแรงดันใหม่โดยรวมของวงจรกรองจะพิจารณาจากการเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่ของ v_{mot} / v_{cm} จากวงจรสมมูลในรูปที่ 6.15 ซึ่งเป็นกรณีที่ระบบไม่มีวงจรกรองใดๆ ติดตั้งอยู่ สามารถแสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของ v_{mot} / v_{cm} ได้ดังกราฟเส้นจุดไข่ปลา ในรูปที่ 6.18 ในกรณีนี้ ความจุแอมแปง C_o ของมอเตอร์และความเหนี่ยวนำ L_o ของสายเคเบิลจะทำให้เกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ f_{c0} ดังสมการที่ (6.16)

$$f_{c0} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_o C_o}} \tag{6.16}$$

จากระบบที่ใช้ทดลองสามารถวัดค่าพารามิเตอร์ $C_o = 0.17 \text{ nF}$ และ $L_o = 26 \mu\text{H}$ ดังนั้นความถี่เรโซแนนซ์ f_{c0} จึงมีค่าเท่ากับ 2.4 MHz

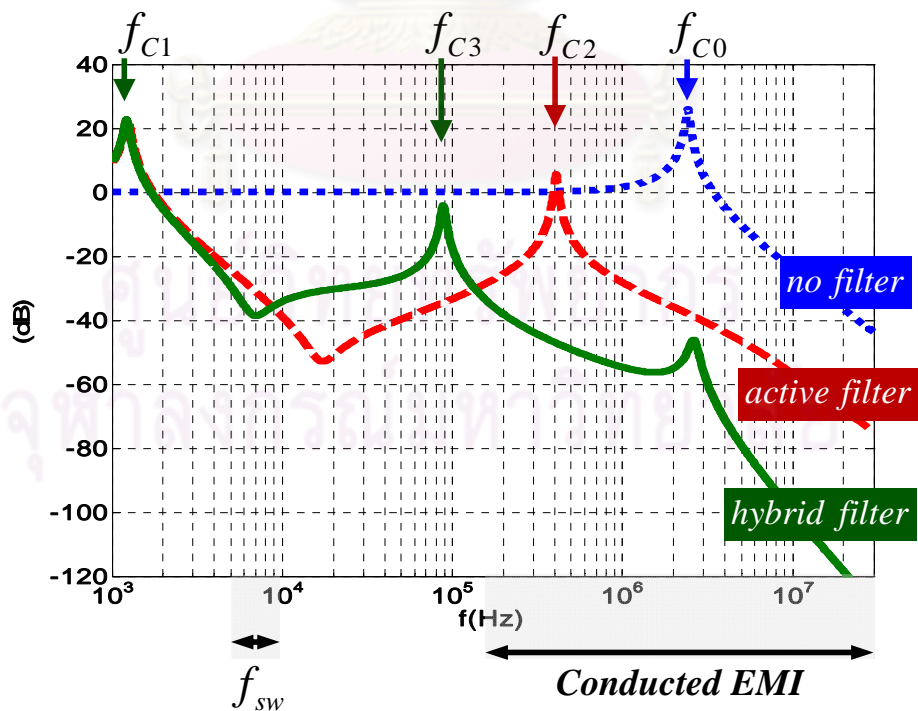
เมื่อมีการติดตั้งวงจรกรองส่วนแยกที่ฟ (โดยยังไม่มีวงจรกรองพาสซีฟ $L_F C_F$) แรงดัน v_{cm} ที่วงจรกรองแยกที่ฟสร้างขึ้นจะทำให้แรงดันใหม่โดยรวมที่ขั้วมอเตอร์ลดลง ในทางอุดมคติวงจรกรองแยกที่ฟจะสามารถลดทอนแรงดันใหม่โดยรวมได้ดีตลอดย่านตั้งแต่ที่ความถี่ตัดข้ามของ L_{cm} และ C_{Series} (f_{c1}) ซึ่งเกิดขึ้นจากการใช้ความเหนี่ยวนำ L_{cm} ของหม้อแปลงเชื่อมร่วมและตัวเก็บประจุ C_{Series} ทำงานร่วมกันเป็นวงจรกรองผ่านสูงที่กีดกันแรงดันที่มีความถี่ต่ำกว่า f_{c1} ไม่ให้ตกคร่อมที่หม้อแปลงเชื่อมร่วม ในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้ $f_{c1} = 1 \text{ kHz}$

$$f_{c1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{cm} C_{Series}}} \tag{6.17}$$

อย่างไรก็ตามสำหรับในทางปฏิบัติแล้ว สมรรถนะของวงจรกรองแอกทีฟจะดีกว่าในทางอุดมคติ เนื่องจากสาเหตุหลัก 2 ประการได้แก่

- 1) เวลาประวิงระหว่างแรงดันซดเซยกับแรงดันโหมดรวมซึ่งจะมีผลกระทบต่อการซดเซยแรงดันโหมดรวมที่ความถี่สูง ซึ่งวงจรกรองที่สร้างจะมีเวลาประวิงนี้เท่ากับ 500 ns
- 2) ความเหนี่ยวนำร่วของหม้อแปลงเชื่อมรวม L_s และ L_p จะทำให้เกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ $f_{c2} = 1/(2\pi\sqrt{(L_p + L_s)C_o})$ ซึ่งมีค่าประมาณ 400 kHz วงจรกรองแอกทีฟจึงไม่สามารถลดทอนแรงดันโหมดรวมที่บริเวณความถี่นี้ได้

จากการทำงานของวงจรกรองแอกทีฟดังกล่าวที่แสดงกราฟเส้นประ - - - - ในรูปที่ 6.18 แม้โดยภาพรวมจะทำงานได้ดีครอบคลุมที่ความถี่ตั้งแต่ 2 kHz จนถึง 30 MHz แต่วงจรกรองนี้ก็ยังมีข้อจำกัดที่ความถี่สูงโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความถี่ 400 kHz ซึ่งอยู่ในย่านความถี่ที่เป็นสาเหตุของปัญหาการแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้า (150 kHz-30MHz) ดังนั้นการเพิ่มวงจรพาสซีฟขนาดเล็ก $L_F C_F$ โดยออกแบบให้ความถี่ตัดข้ามของวงจรกรอง $f_{c3} = 1/(2\pi\sqrt{(L_F + L_p + L_s)C_F})$ อยู่ที่ความถี่ต่ำกว่า 150 kHz จะช่วยให้วงจรกรองโดยรวมมีสมรรถนะในการแก้ปัญหาการแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ดีขึ้นได้ ซึ่งการออกแบบในหัวข้อก่อนหน้านี้ได้กำหนดให้ f_{c3} อยู่ที่ความถี่ 90 kHz สมรรถนะการกรองเมื่อเพิ่มวงจรพาสซีฟเข้ามาเป็นวงจรกรองแบบไฮบริดสามารถแสดงได้กราฟเส้นทึบ _____ ในรูปที่ 6.18 เมื่อเปรียบเทียบกับวงจรกรองที่มีเฉพาะส่วนแอกทีฟเพียงอย่างเดียว วงจรกรองไฮบริดจะมีสมรรถนะการลดทอนแรงดันโหมดรวมที่ดีกว่าในย่าน 150 kHz - 30 MHz



รูปที่ 6.18 การเปรียบเทียบคุณสมบัติการกรองแรงดันโหมดรวมระหว่าง 1) กรณีที่ไม่มีวงจรกรอง, 2) กรณีที่ติดตั้งเฉพาะวงจรกรองแอกทีฟ และ 3) กรณีที่ติดตั้งวงจรกรองแบบไฮบริด

บทที่ 7

ผลการทดลองแสดงสมรรถนะการแก้ปัญหาจากแรงดันโหมคร่วมของวงจรกรองด้าน ออกแบบไฮบริดชนิดใหม่

ในบทนี้จะกล่าวถึงสมรรถนะการลดทอนแรงดันโหมคร่วมของวงจรกรองแบบไฮบริดที่ออกแบบดังรายละเอียดในบทที่ 6 และผลทดสอบเมื่อนำวงจรกรองไปใช้แก้ปัญหาที่เกิดจากแรงดันโหมคร่วมดังต่อไปนี้

- 1) ปัญหาการแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการนำ และความล้มเหลวของตัวขับออกความผิดพลาดลงดิน
- 2) ปัญหาการเกิดแรงดันเพลลาและความเสียหายของตัวขับลูกปืนเนื่องจากกระแสตัวขับลูกปืน
- 3) อันตรายจากกระแสสัมผัสหรือไฟฟ้าดูดในกรณีที่โครงภายนอกของมอเตอร์ไม่ได้ต่อลงดิน

ซึ่งระบบที่ใช้ทดสอบจะมีโครงสร้างดังรูปที่ 7.1 โดยพารามิเตอร์ที่สำคัญของวงจรกรองชนิดแบบไฮบริดองค์ประกอบส่วนต่างๆ ของระบบจะมีดังนี้

วงจรกรองด้านออกแบบไฮบริด:

หม้อแปลงเชื่อมร่วม: ความเหนี่ยวนำสร้างสนามแม่เหล็ก $L_{cm} = 82 \text{ mH}$

ความเหนี่ยวนำรั่วที่ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ $L_{lp} = 0.54 \text{ mH}$, $L_s = 0.36 \text{ mH}$

ตัวเก็บประจุแยกการเชื่อมร่วม $C_{Series} = 0.2 \mu\text{F}$

วงจรกรองพาสซีฟ: ตัวเหนี่ยวนำ $L_F = 2.9 \text{ mH / เฟส}$, ตัวเก็บประจุ $C_F = 0.3 \text{ nF / เฟส}$

อินเวอร์เตอร์: พิกัดแรงดัน 380 V, แรงดันบัลไฟตรง 540 V

ความถี่ด้านออก $f_o = 0 - 300 \text{ Hz}$, ความถี่การสวิตช์ $f_{sw} = 1 - 10 \text{ kHz}$

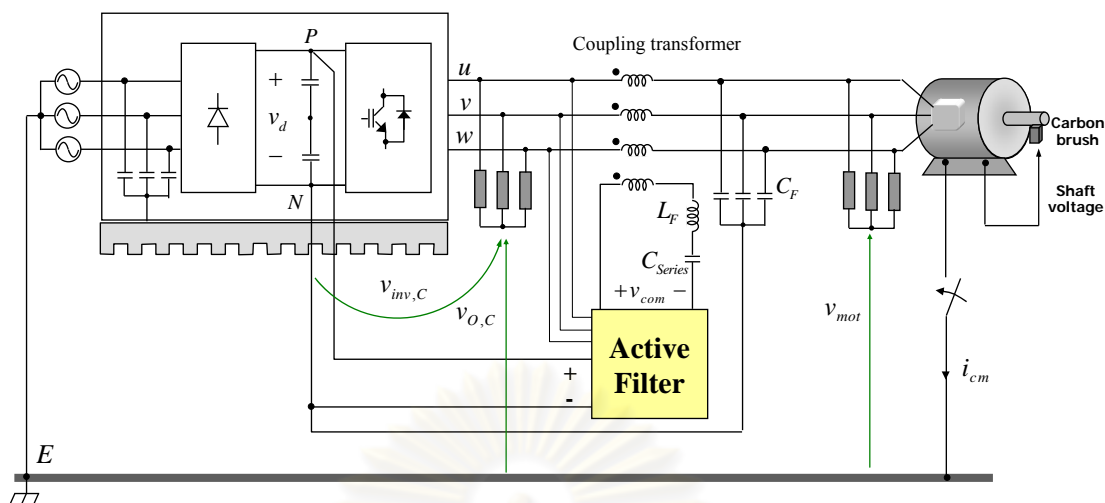
สายเคเบิลที่ด้านออก: เป็นสายเคเบิลสั้นที่มีค่าความจุไฟฟ้าแอบแฝงระหว่างสายเคเบิลและระหว่างสายเคเบิล

กับกราวด์น้อยมาก, ความเหนี่ยวนำสายเคเบิล $L_o = 26 \mu\text{H / เฟส}$

มอเตอร์: พิกัด 2Hp, พิกัดแรงดัน 380 V, พิกัดกระแส 3.6 A, ความถี่ 50 Hz,

ค่าความจุไฟฟ้าแอบแฝงระหว่างขดลวดและโครงมอเตอร์ $C_o = 0.17 \text{ nF / เฟส}$

นอกจากนี้ที่มอเตอร์จะมีการตัดแปลงสำหรับการวัดกระแสตัวขับลูกปืน โดยจะแทรกคณวนระหว่างเพลากับโครงมอเตอร์ [6] และใช้แปรงถ่านสำหรับวัดแรงดันเพลลา



รูปที่ 7.1 โครงสร้างของระบบขับเคลื่อนที่ใช้ทดสอบสมรรถนะของวงจรแบบไฮบริดที่นำเสนองาน

7.1 ผลของการเพิ่มวงจรพาสซีฟขนาดเล็กในวงจรแบบไฮบริดที่มีต่อการลดทอนแรงดันโหมตร่วมและกระแสรั่ว

การวิเคราะห์สมรรถนะของวงจรในหัวข้อที่ 6.6 ได้ชี้ให้เห็นว่าการใช้งานวงจรแยกที่ฟเพียงลำพัง จะเกิดข้อจำกัดในโหลดทอนแรงดันโหมตร่วมที่มีความถี่สูงโดยเฉพาะในย่านการแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้า จึงทำให้ต้องมีการเพิ่มวงจรพาสซีฟขนาดเล็กเข้ามาเพื่อลดข้อจำกัดดังกล่าว เพื่อทดสอบแนวคิดดังกล่าว ผลทดลองในหัวข้อนี้จะแสดงผลกระทบที่เกิดจากการใช้วงจรแยกที่ฟเพียงลำพัง และเปรียบเทียบผลระหว่างเมื่อใช้วงจรแบบแยกที่ฟและแบบไฮบริดซึ่งได้จากการเพิ่มวงจรพาสซีฟขนาดเล็ก โดยกำหนดให้อินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่ $f_o = 50\text{ Hz}$ และความถี่การสวิตช์ $f_{sw} = 10\text{ kHz}$

การลดผลกระทบจากเวลาประวิงระหว่างแรงดันชดเชยกับแรงดันโหมตร่วม

รูปที่ 7.2 เป็นผลการวัดแรงดันโหมตร่วมและกระแสรั่วที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ รวมทั้งแรงดันชดเชยที่วงจรสร้าง โดยแสดงรูปคลื่นในขณะที่เกิดการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 7.2 ก) และ รูปที่ 7.2 ข) จะเห็นได้ว่าค่าความเหนี่ยวนำสร้างสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงเชื่อมร่วมจะช่วยลดทอนให้กระแสรั่วซึ่งมีความถี่สูง ในขณะที่ผลการทดลองเมื่อวงจรแยกที่ฟทำงานดังรูปที่ 7.2 ค) แสดงให้เห็นว่า เวลาประวิงระหว่างแรงดันชดเชย v_{com} กับแรงดันโหมตร่วมซึ่งมีค่าเท่ากับ 500 ns สามารถกระตุ้นให้กระแสรั่วแกว่งมากขึ้นเมื่อเทียบกับรูปที่ 7.2 ข) รูปที่ 7.2 ง) แสดงให้เห็นว่าในกรณีที่ติดตั้งวงจรแบบไฮบริดวงจรพาสซีฟขนาดเล็กที่เพิ่มเข้ามาจะช่วยลดผลกระทบจากเวลาประวิงของวงจรแยกที่ฟและทำให้การแกว่งของกระแสรั่วลดลง

เนื่องจากกระแสรั่วเกิดจากการกระตุ้นของแรงดันโหมตร่วม ดังนั้นการเพิ่มขึ้นและลดลงของกระแสรั่วดังผลทดลองในรูปที่ 7.2 จึงสะท้อนให้เห็นว่า เวลาประวิงของวงจรแยกที่ฟจะทำให้สมรรถนะการชดเชยแรงดันโหมตร่วมที่มีความถี่สูงด้อยลง ดังนั้นวงจรแบบไฮบริดจะมีสมรรถนะการลดทอนแรงดันโหมตร่วม

ร่วมที่ความถี่สูงได้ดีกว่าวงจรกรองแอกทีฟ เนื่องจากวงจรกรองพาสซีฟขนาดเล็กที่เพิ่มเข้ามาจะช่วยลดทอนผลจากแรงดันโหมดร่วมที่ชดเชยไม่สมบูรณ์ ซึ่งจะมีลักษณะเป็นพัลส์ที่ความถี่สูงและมีช่วงเวลาประมาณเท่ากับเวลาประวิง

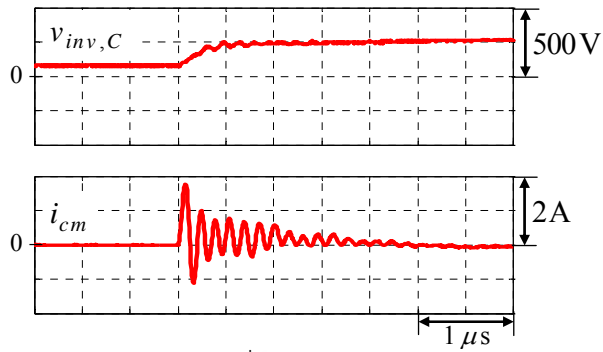
การลดผลกระทบจากเรโซแนนซ์ระหว่างความเหนี่ยวนำร้าวของหม้อแปลงเชื่อมร่วมกับค่าความจุแอมแปงระหว่างขดลวดและโครงเหล็กของมอเตอร์

ผลทดลองในรูปที่ 7.3 และ รูปที่ 7.4 แสดงการเปรียบเทียบแรงดันโหมดร่วมที่ขั้วมอเตอร์ v_{mot} ในกรณีที่ใช้วงจรกรองแบบต่างๆ ได้แก่ กรณีที่ไม่มีวงจรกรอง, วงจรกรองแอกทีฟ และวงจรกรองแบบไฮบริด จากรูปที่ 7.3 จะเห็นว่า การทำงานของวงจรกรองพาสซีฟขนาดเล็กทำให้วงจรกรองแบบไฮบริดจะมีคุณสมบัติการกรองที่ดีกว่าวงจรกรองแอกทีฟ สเปกตรัมของแรงดันโหมดร่วมในรูปที่ 7.4 แสดงให้เห็นว่า เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีวงจรกรอง วงจรกรองแอกทีฟจะกรองแรงดันโหมดร่วมได้ดีครอบคลุมย่านความถี่ตั้งแต่ 10 kHz จนถึง 10 MHz โดยมีอัตราการลดทอน (Attenuation) ไม่น้อยกว่า -20 dB ยกเว้นบริเวณความถี่ 100 kHz-700 kHz ซึ่งเป็นความถี่เรโซแนนซ์ระหว่างความเหนี่ยวนำร้าวของหม้อแปลงเชื่อมร่วมกับค่าความจุแอมแปงระหว่างขดลวดและโครงเหล็กของมอเตอร์ อย่างไรก็ตาม การใช้วงจรกรองแบบไฮบริดจะช่วยปรับปรุงให้คุณสมบัติการกรองของวงจรกรองแอกทีฟที่ด้อยในความถี่บริเวณนี้ดีขึ้น โดยจะลดทอนแรงดันโหมดร่วมให้ลดลงอีกประมาณ -20 dB ที่บริเวณความถี่ 100 kHz และ 500 kHz คล้องกับผลการวิเคราะห์สมรรถนะของวงจรกรองในรูปที่ 6.19

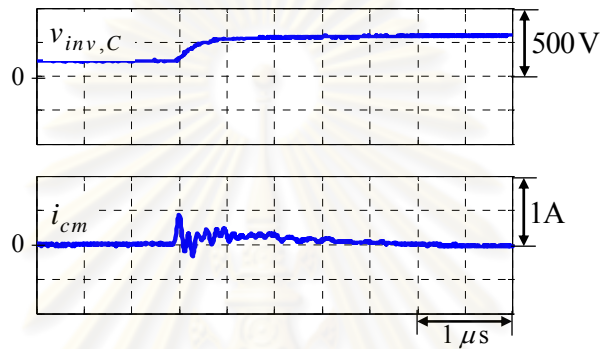
ผลทดลองในรูปที่ 7.5 และ รูปที่ 7.6 แสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนกระแสรั่ว i_{cm} จะเห็นว่า สมรรถนะการกรองกระแสรั่วของวงจรกรองแอกทีฟและวงจรกรองแบบไฮบริดที่ได้จากการทดลองมีความสอดคล้องกันการกรองแรงดันโหมดร่วม

อย่างไรก็ตามสมรรถนะของวงจรกรองจากผลทดลองที่ด้อยลงกว่าผลการวิเคราะห์ในช่วงความถี่ที่สูงกว่า 10 MHz มีสาเหตุจากข้อจำกัดที่สำคัญคือ 1) เวลาประวิงของแรงดันชดเชยที่สร้างโดยวงจรกรอง และ 2) ข้อจำกัดทางแบนด์วิดท์ของหม้อแปลงเชื่อมร่วมและตัวเหนี่ยวนำ L_F เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าแอมแปงระหว่างขดลวด

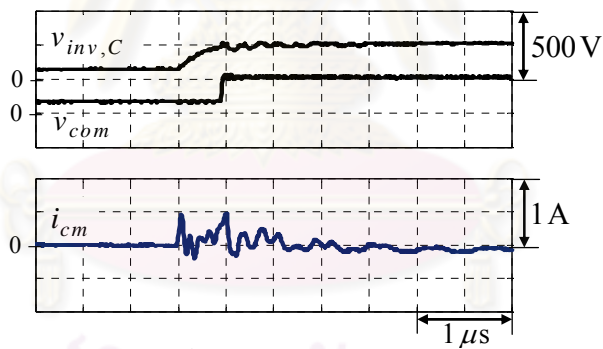
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



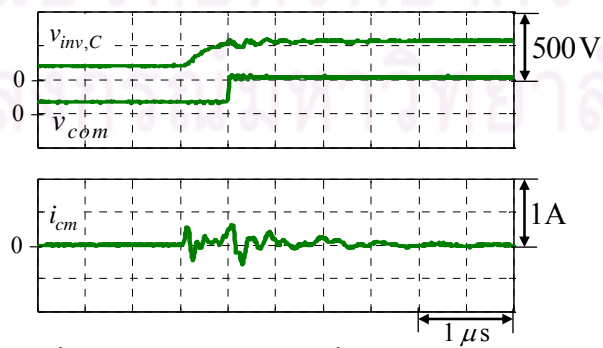
ก) เมื่อไม่มีวงจรรอง



ข) เมื่อมีเฉพาะหม้อแปลงเชื่อมร่วม

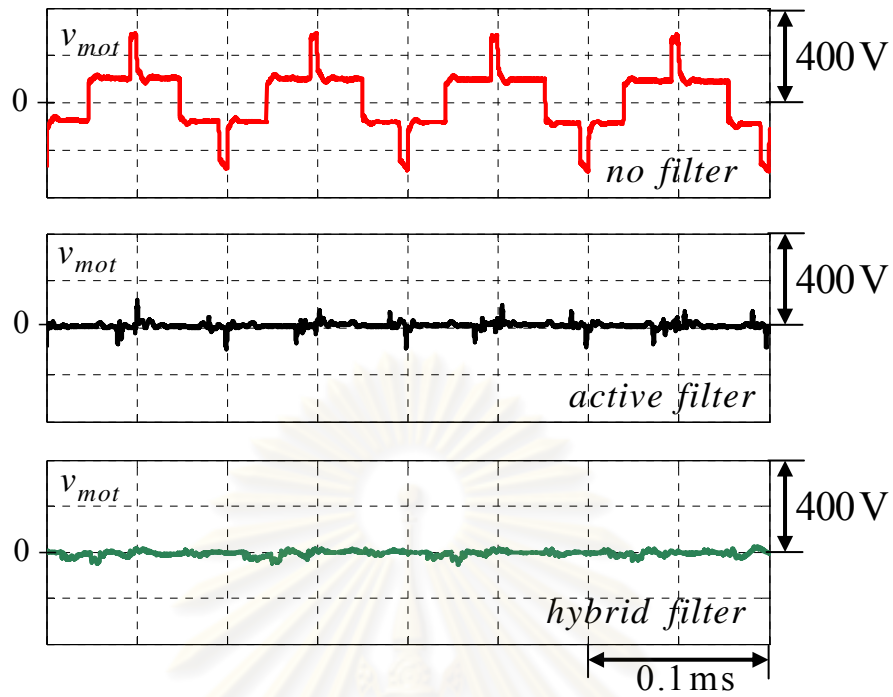


ค) เมื่อมีเฉพาะวงจรรองแยกทีฟ

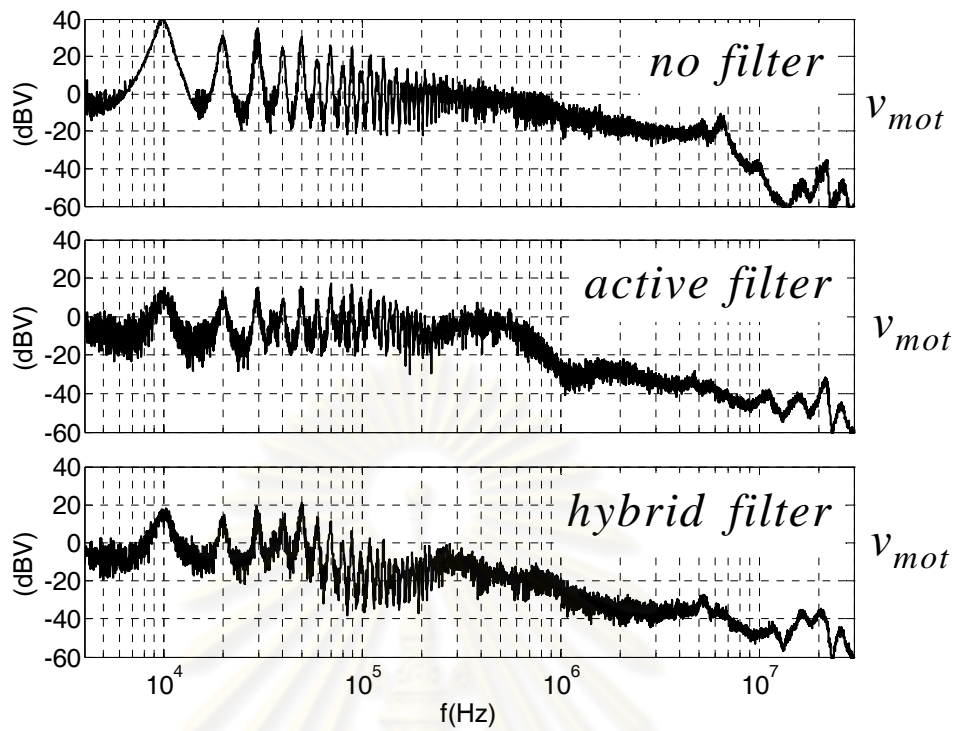


ง) เมื่อติดตั้งวงจรรองแบบไฮบริดที่มีทั้งวงจรรองแยกทีฟและพาสซีฟ

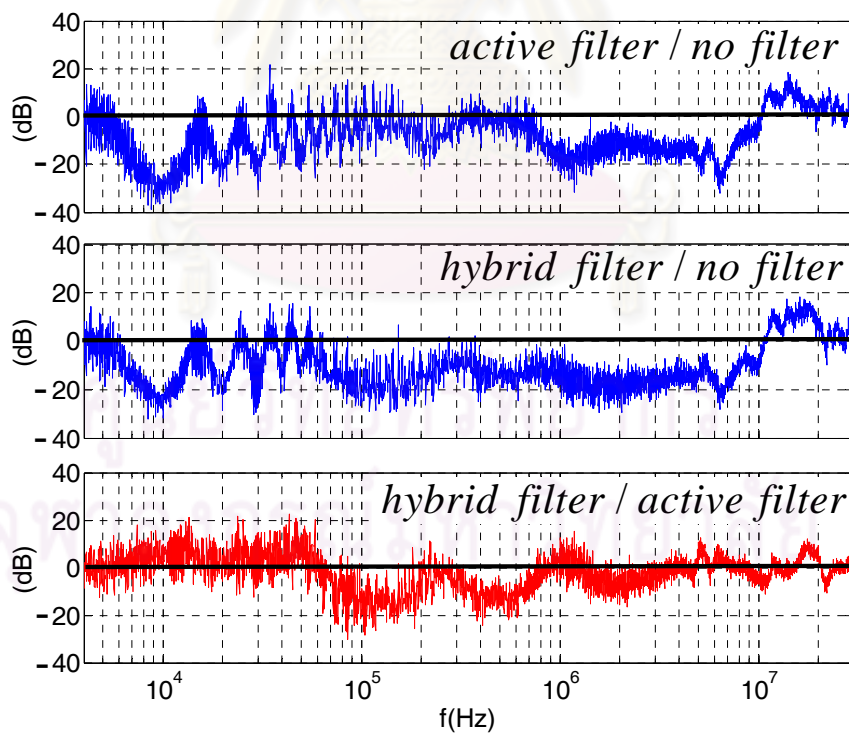
รูปที่ 7.2 รูปคลื่นแรงดันโหมตร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ v_{cm} , กระแสรั่ว i_{cm} และแรงดันชดเชย v_{com} ขณะเกิดการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 7.3 รูปคลื่นแรงดันโหมตร่วมที่ขั้วมอเตอร์ v_{mot} ในกรณีนี้ที่ 1) ไม่มีวงจรรอง, 2) ติดตั้งวงจรรองแอกทีฟ และ 3) ติดตั้งวงจรรองแบบไฮบริด

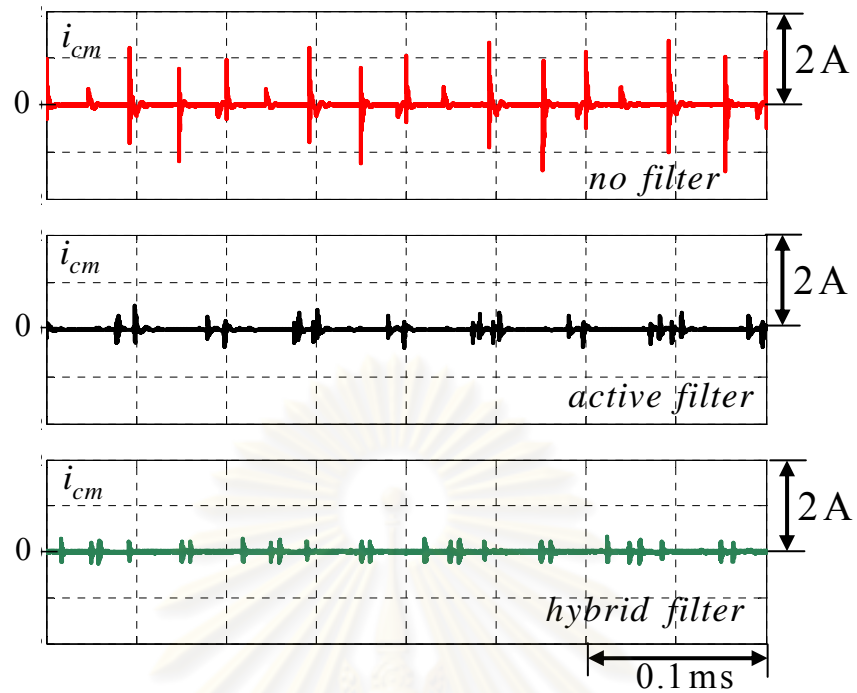


ก) สเปกตรัมสัญญาณ



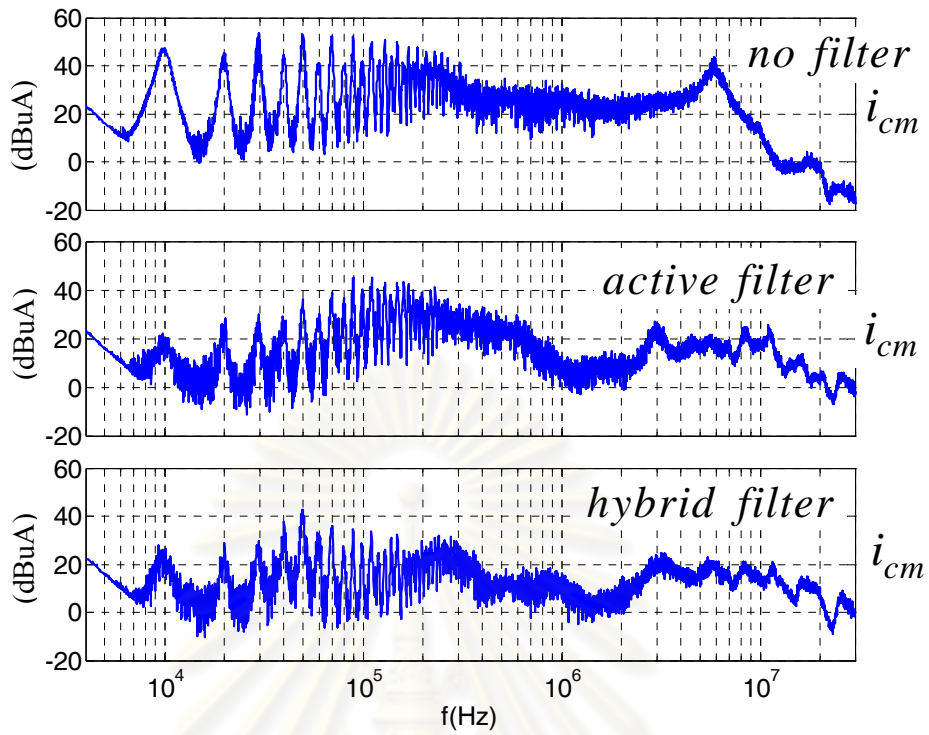
ข) อัตราการลดทอนของวงจรจากการเปรียบเทียบสเปกตรัมของแรงดันโหมดรวม

รูปที่ 7.4 สเปกตรัมของแรงดันโหมดรวมที่ขั้วมอเตอร์ v_{mot} ในกรณีที่ 1) ไม่มีวงจรกรอง, 2) ติดตั้งวงจรกรอง แอ็กทีฟและ 3) ติดตั้งวงจรกรองแบบไฮบริด

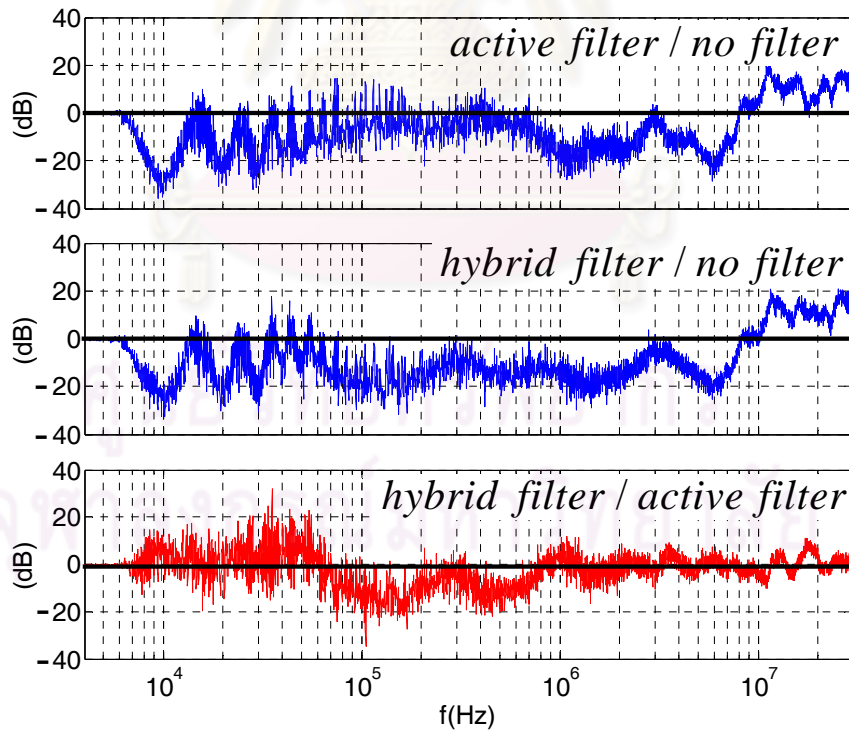


รูปที่ 7.5 รูปคลื่นกระแสรั่ว i_{cm} ในกรณีที่ 1) ไม่มีวงจรกรอง, 2) ติดตั้งวงจรกรองแอกทีฟและ 3) ติดตั้งวงจรกรองแบบไฮบริด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก) สเปกตรัมสัญญาณ



ข) อัตราการลดทอนของวงจรรองจากการเปรียบเทียบสเปกตรัมของกระแสรั่ว

รูปที่ 7.6 สเปกตรัมของกระแสรั่ว i_{cm} ในกรณีนี้ที่ 1) ไม่มีวงจรกรอง, 2) ติดตั้งวงจรกรองแอกทีฟและ 3) ติดตั้งวงจรกรองแบบไฮบริด

7.2 ผลการทดลองแสดงสมรรถนะการตรวจจับและคุณลักษณะการชดเชยแรงดันโหมดร่วมของวงจรกรองแบบไฮบริดที่นำเสนอ

เพื่อตรวจสอบถูกต้องของการตรวจจับและสร้างแรงดันโหมดร่วมของวงจรกรอง ในหัวข้อนี้จะแสดงผลการทดลองในภาวะการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่มีการปรับเปลี่ยนความถี่ทำงาน f_o และ ความถี่การสวิตช์ f_{sw} โดยจะแสดงสัญญาณแรงดันโหมดร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ในจุดต่างๆ ได้แก่ แรงดันโหมดร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกราวด์ $v_{o,c}$, แรงดันโหมดร่วมที่เกิดจากการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ $v_{inv,c}$ ซึ่งเป็นสัญญาณเข้าของวงจรตรวจจับการสวิตช์ของแรงดันเฟสของวงจรกรอง, แรงดันชดเชยแรงดันโหมดร่วม v_{com} ที่สร้างโดยอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ และแรงดันโหมดร่วมที่ขั้วมอเตอร์เทียบกราวด์ v_{mot}

กรณีที่อินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่ $f_{sw} = 10\text{ kHz}$ และ $f_o = 50\text{ Hz}$

ผลทดลองในรูปที่ 7.7 แสดงให้เห็นว่าวงจรตรวจจับและสร้างแรงดันโหมดร่วมของวงจรกรองสามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง โดยยืนยันได้จากลักษณะสัญญาณที่เหมือนกันระหว่าง แรงดันโหมดร่วมที่ตรวจจับ $v_{inv,c}$ กับแรงดันโหมดร่วมที่สร้างจากอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ v_{com} เมื่อแรงดันโหมดร่วม v_{com} เชื่อมต่อกับระบบที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ผ่านหม้อแปลงเชื่อมร่วมก็จะทำให้เกิดการหักล้างกันระหว่างแรงดันและทำให้องค์ประกอบที่ความถี่การสวิตช์ของแรงดันโหมดร่วมที่ขั้วมอเตอร์ v_{mot} ถูกกำจัดออกไป

ผลทดลองในรูปที่ 7.8 และ 7.9 แสดงให้เห็นว่าการชดเชยแรงดันโหมดร่วมโดยวงจรกรองแบบไฮบริดที่นำเสนอจะเกิดขึ้นเฉพาะกับองค์ประกอบที่ความถี่การสวิตช์และที่ความถี่สูงขึ้นไป แต่สำหรับองค์ประกอบฮาร์มอนิกที่ 3 ซึ่งเกิดจากการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ของอินเวอร์เตอร์และการทำงานของวงจรเรียงกระแสจะยังคงปรากฏอยู่ที่ขั้วมอเตอร์ ซึ่งในกรณีนี้องค์ประกอบฮาร์มอนิกที่ 3 ทั้งสองส่วนจะมีความถี่เท่ากันคือ 150 Hz

จากผลการทดลองที่ได้นี้ ถือได้ว่าวงจรกรองแบบไฮบริดที่นำเสนอมารถทำงานได้อย่างถูกต้องตามที่ออกแบบ โดยลดทอนเฉพาะแรงดันโหมดร่วมที่ความถี่การสวิตช์และที่ความถี่สูง ซึ่งเป็นสาเหตุของปัญหาต่างๆ และชดเชยลดภาระของหม้อแปลงเชื่อมร่วมจากการรองรับแรงดันโหมดร่วมที่ความถี่ต่ำ

กรณีที่อินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่ $f_{sw} = 10\text{ kHz}$ และ $f_o = 75\text{ Hz}$

ผลทดลองในรูปที่ 7.10 แสดงให้เห็นว่าภายใต้สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ทำงานของอินเวอร์เตอร์ f_o โดยการเพิ่มความถี่ให้มีค่าเท่ากับ 75 Hz วงจรกรองแบบไฮบริดยังคงสามารถตรวจจับและสร้างแรงดันโหมดร่วมได้อย่างถูกต้อง กล่าวคือตรวจจับแรงดันโหมดร่วมได้ที่ความถี่ 225 Hz และวงจรกรองสามารถกำจัดองค์ประกอบที่ความถี่การสวิตช์ของแรงดันโหมดร่วมที่ขั้วมอเตอร์ v_{mot} ได้เป็นอย่างดี

จากผลทดลองในรูปที่ 7.11 และ 7.12 แรงดันโหมดร่วม $v_{o,c}$ จะมีองค์ประกอบฮาร์มอนิกที่ 3 ที่เกิดจากวงจรเรียงกระแสจะยังคงมีความถี่เท่ากับ 150 Hz ในขณะที่ส่วนที่เกิดจากการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ ($v_{inv,c}$) จะมีความถี่เพิ่มขึ้นเป็น 225 Hz สอดคล้องตามความถี่ $f_o = 75\text{ Hz}$ ถึงแม้ว่าแรงดันโหมดร่วมจะ

มีองค์ประกอบฮาร์มอนิกที่ 3 ที่มีความถี่เพิ่มขึ้น แต่สภาวะดังกล่าวไม่ทำให้เกิดผลกระทบต่อการทำงานของ วงจรกรองแบบไฮบริด วงจรกรองยังคงทำงานได้ตามปกติโดยยังคงเลือกกำจัดแรงดันโหมดร่วมความถี่สูงและไม่ ชดเชยแรงดันโหมดร่วมที่ความถี่ต่ำ

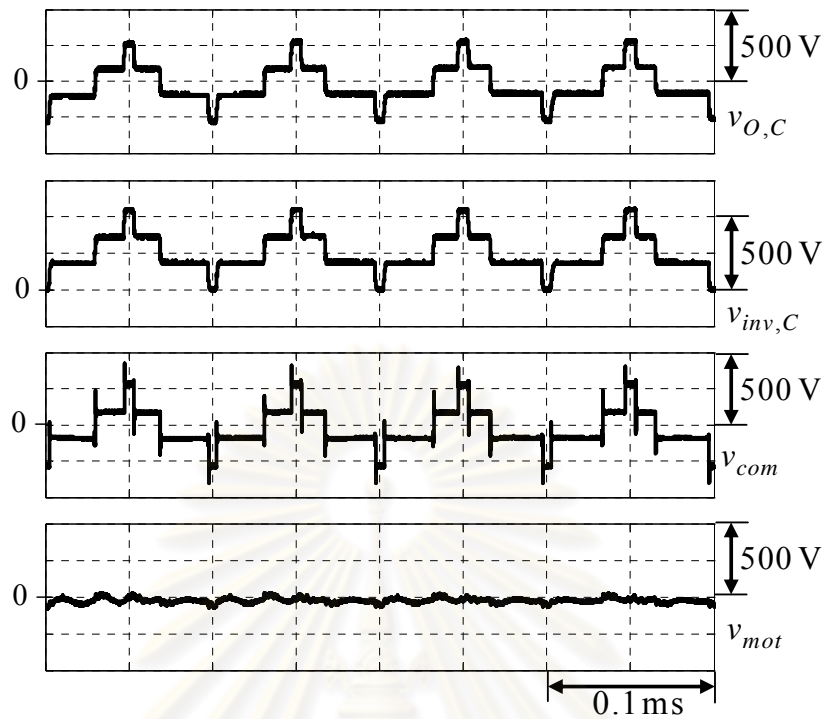
กรณีที่อินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่ $f_{sw} = 5\text{ kHz}$ และ $f_o = 50\text{ Hz}$

ผลทดลองในรูปที่ 7.13-7.15 แสดงให้เห็นว่าแม้จะมีการลดความถี่การสวิตช์ลงให้มีค่า เท่ากับ 5 kHz วงจรกรองแบบไฮบริดยังคงสามารถตรวจจับและสร้างแรงดันโหมดร่วมได้อย่างถูกต้อง รวมถึงมี สมรรถนะที่ดีในการกำจัดองค์ประกอบที่ความถี่การสวิตช์ของแรงดันโหมดร่วมที่ขั้วมอเตอร์ v_{mot} อย่างไรก็ตาม แม้การลดความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์จะไม่มีผลกระทบต่อการทำงานของตรวจจับและสร้างแรงดันชดเชยของวงจร กรอง แต่ก็ยังมีข้อพิงระวังเกี่ยวกับการอิมิตัวของหม้อแปลงเชื่อมร่วมด้วย

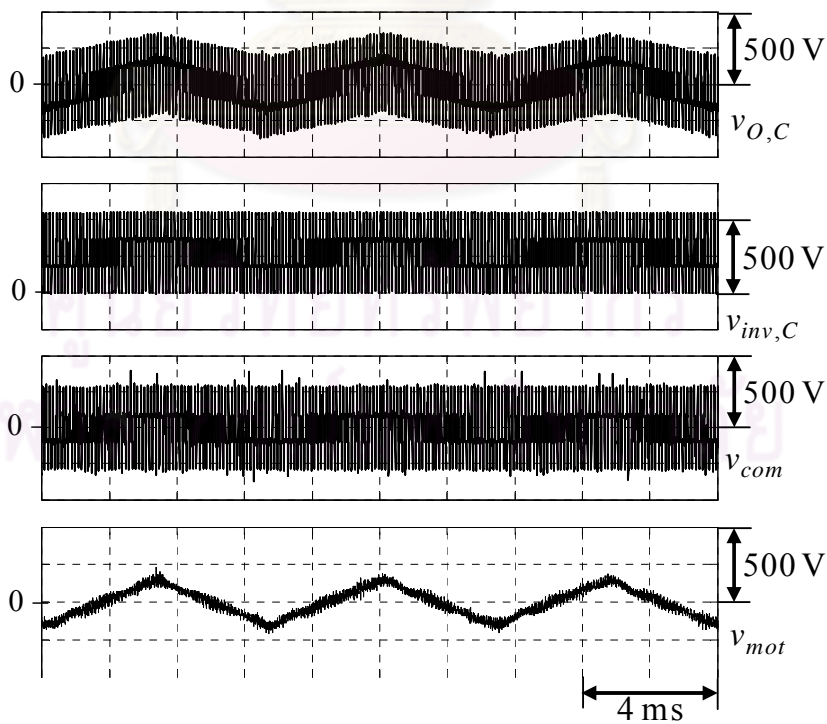
โดยสรุปแล้ว พฤติกรรมของวงจรกรองที่ชดเชยเฉพาะองค์ประกอบของแรงดันโหมดร่วมที่ ความถี่การสวิตช์และที่ความถี่สูงขึ้นไปนั้น ชี้ให้เห็นว่าอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับสามารถสร้างแรงดัน v_{com} ที่ เหมือนกับแรงดันโหมดร่วม $v_{inv,C}$ ที่ตรวจจับมา (ซึ่งมีทั้งองค์ประกอบที่ความถี่การสวิตช์และองค์ประกอบที่ ความถี่ฮาร์มอนิกที่ 3 ของแรงดันด้านออก) อย่างไรก็ตามองค์ประกอบที่ความถี่ต่ำจะถูกกีดกันโดย C_{Series} และมีเพียงองค์ประกอบแรงดันที่ความถี่สูงกว่า 1 kHz เท่านั้นที่สามารถส่งผ่านไปให้หม้อแปลงโหมดร่วมไป หักล้างกับแรงดันโหมดร่วมของอินเวอร์เตอร์ หมายความว่าวงจรกรองแบบไฮบริดที่นำเสนอสามารถทำงานได้ อย่างถูกต้องตามการออกแบบ

การปรับเปลี่ยนความถี่ทำงาน f_o และความถี่การสวิตช์ f_{sw} ของอินเวอร์เตอร์แสดงให้เห็น ว่า วงจรกรองแบบไฮบริดที่นำเสนอสามารถทำงานได้ดีแม้ในสภาวะที่ความถี่การสวิตช์อยู่ใกล้กับความถี่ฮาร์มอ นิกที่ 3 ของแรงดันด้านออกและแรงดันแหล่งจ่าย ทำให้วงจรกรองแบบไฮบริดมีข้อดีเหนือกว่าวงจรกรองพาส ซีฟ ในประเด็นที่ว่า วงจรกรองพาสซีฟมักจะได้รับผลกระทบจากภาวะเรโซแนนซ์เมื่อมีการปรับเปลี่ยนความถี่ การทำงานและความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ รวมถึงการออกแบบทำได้ยากหากความถี่การสวิตช์และ ความถี่ฮาร์มอนิกที่ 3 ของแรงดันด้านออกอยู่ใกล้กัน

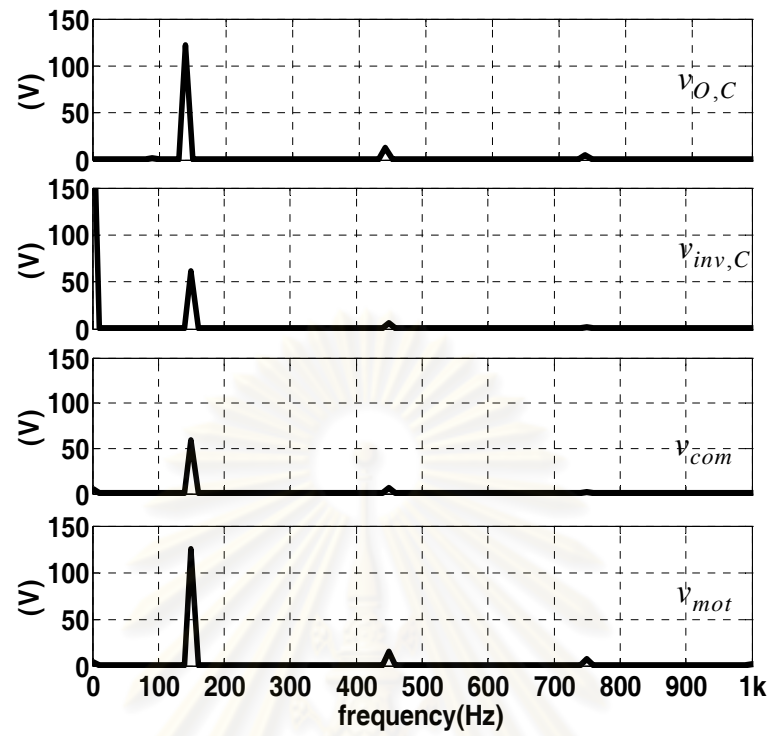
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



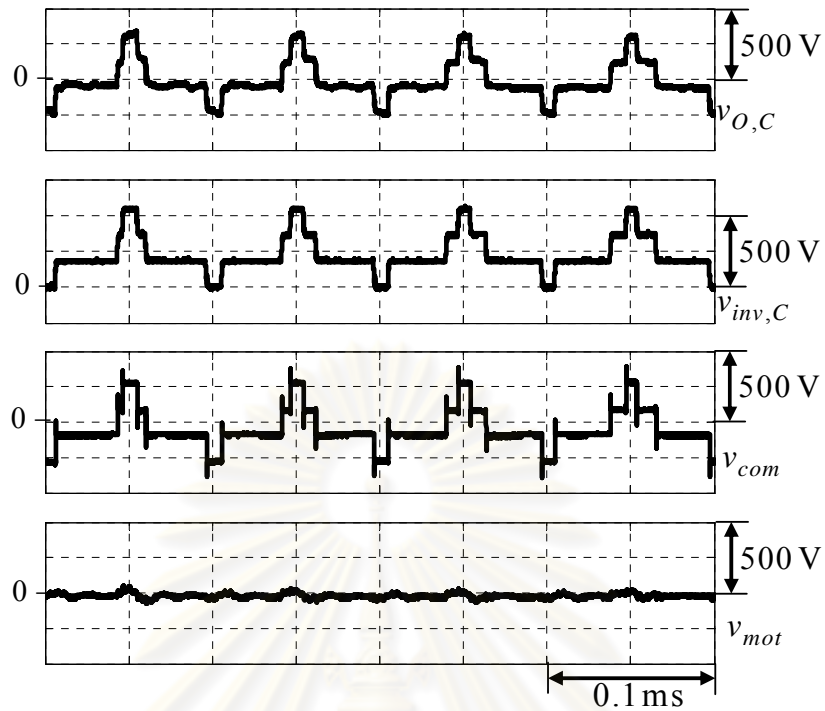
รูปที่ 7.7 แรงดันโหมดร่วมที่จุดต่างๆ ในระบบที่ติดตั้งวงจรกรองแบบไฮบริดในสเกลความถี่การสวิตช์
 ($f_{sw} = 10\text{kHz}$, $f_o = 50\text{Hz}$)



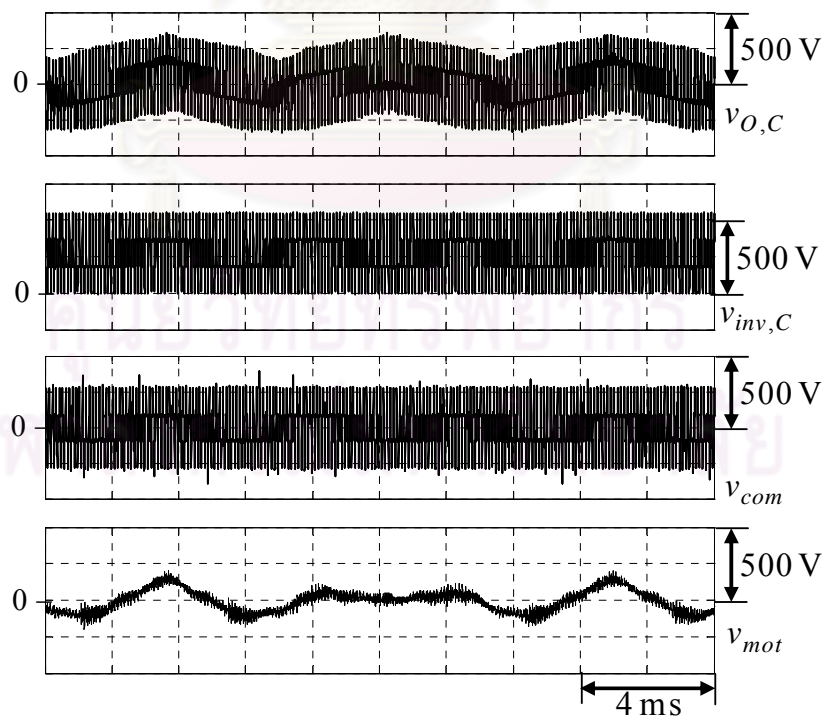
รูปที่ 7.8 แรงดันโหมดร่วมที่จุดต่างๆ ในระบบที่ติดตั้งวงจรกรองแบบไฮบริดในสเกลความถี่หลักมูล
 ($f_{sw} = 10\text{kHz}$, $f_o = 50\text{Hz}$)



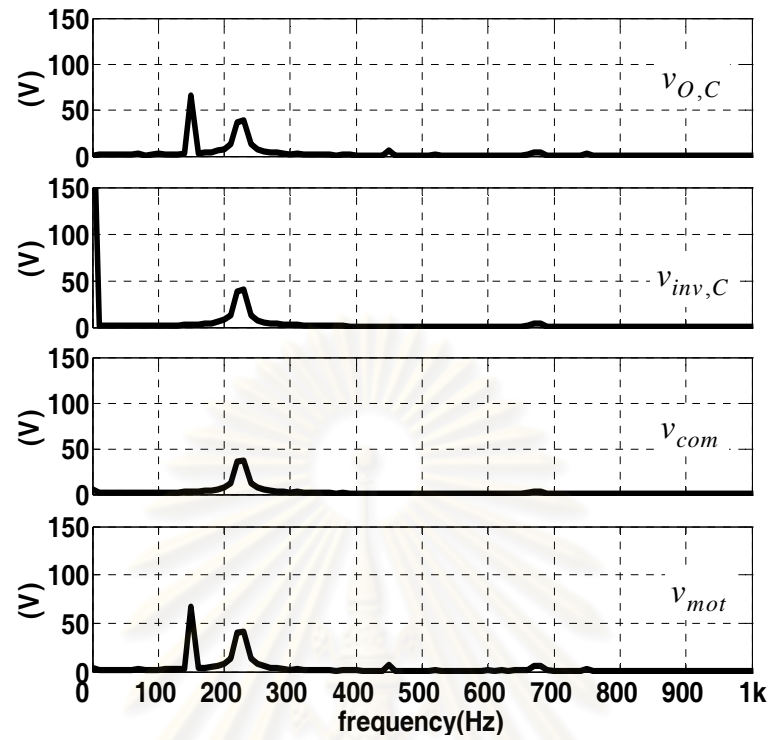
รูปที่ 7.9 สเปกตรัมแสดงเฉพาะองค์ประกอบในย่านความถี่ต่ำของแรงดันโหนดร่วมที่จุดต่างๆ ในระบบที่ติดตั้ง วงจรกรองแบบไฮบริด ($f_{sw} = 10\text{kHz}$, $f_o = 50\text{Hz}$)



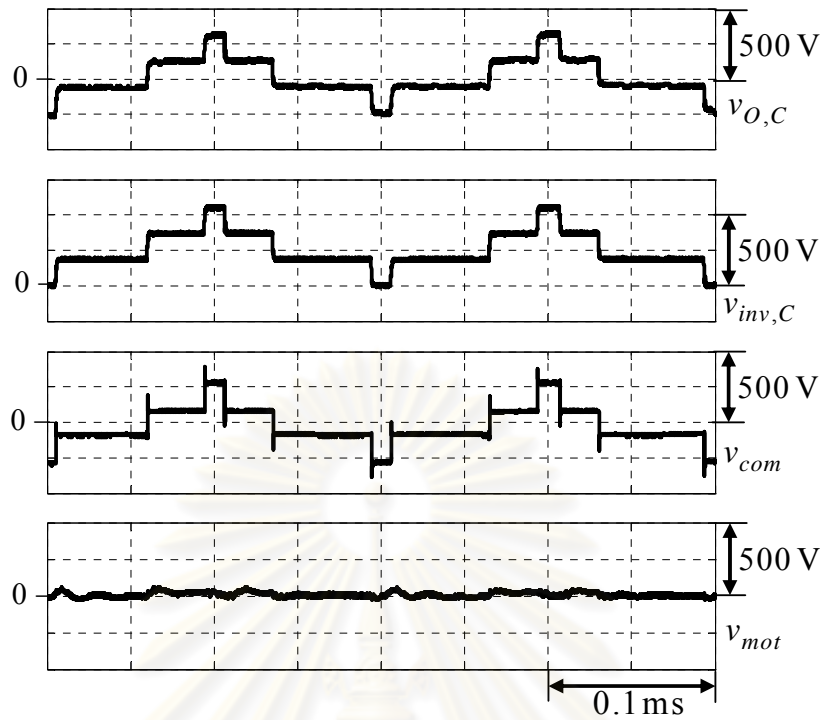
รูปที่ 7.10 แรงดันโหมคร่วมที่จุดต่างๆ ในระบบที่ติดตั้งวงจรรองแบบไฮบริดในสเกลความถี่การสวิตช์
 ($f_{sw} = 10\text{kHz}$, $f_o = 75\text{Hz}$)



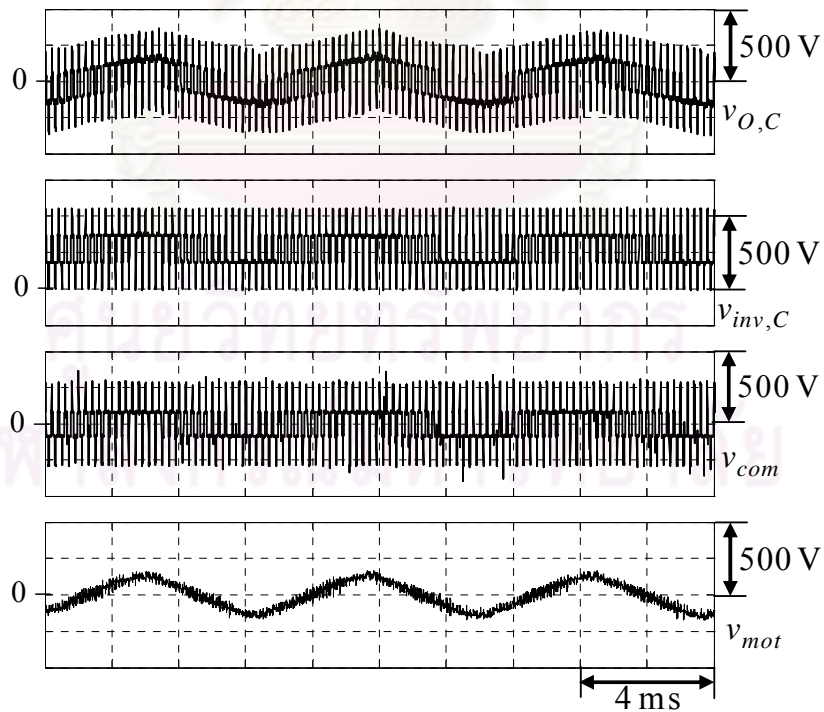
รูปที่ 7.11 แรงดันโหมคร่วมที่จุดต่างๆ ในระบบที่ติดตั้งวงจรรองแบบไฮบริดในสเกลความถี่หลักมูล
 ($f_{sw} = 10\text{kHz}$, $f_o = 75\text{Hz}$)



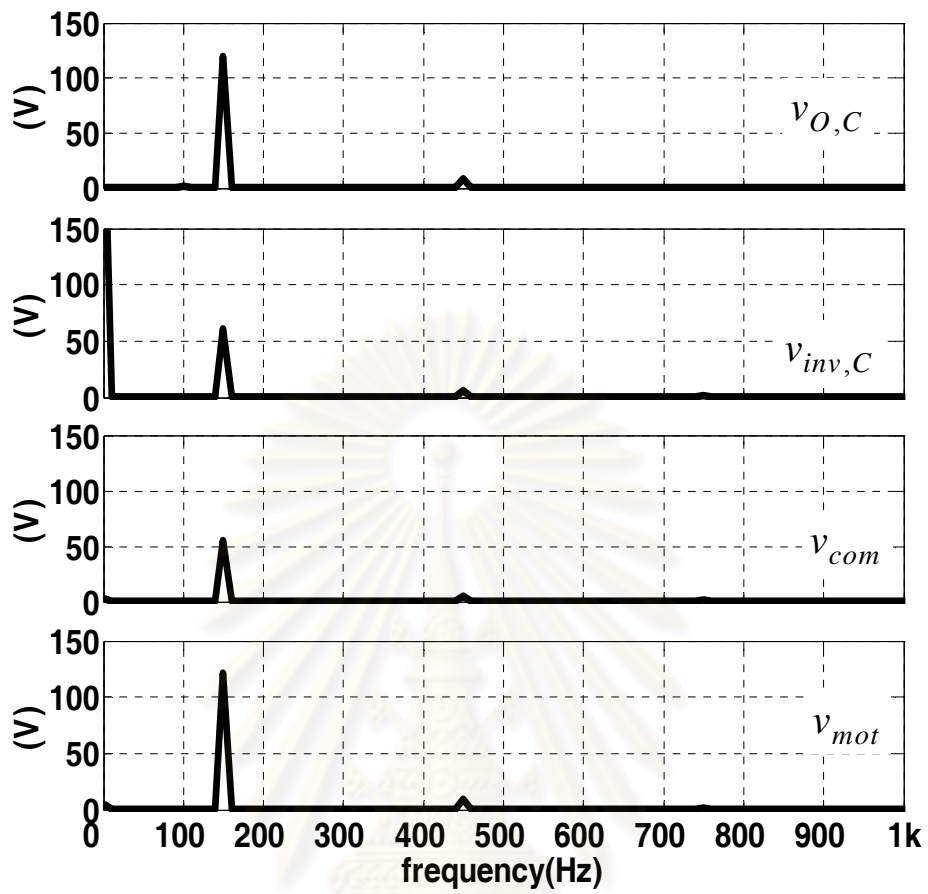
รูปที่ 7.12 สเปกตรัมแสดงเฉพาะองค์ประกอบในย่านความถี่ต่ำของแรงดันโหนดร่วมที่จุดต่างๆ ในระบบที่ติดตั้ง วงจรกรองแบบไฮบริด ($f_{sw} = 10\text{kHz}$, $f_o = 75\text{Hz}$)



รูปที่ 7.13 แรงดันโหมตร่วมที่จุดต่างๆ ในระบบที่ติดตั้งวงจรรองแบบไฮบริดในสเกลความถี่การสวิตช์
 ($f_{sw} = 5 \text{ kHz}$, $f_o = 50 \text{ Hz}$)



รูปที่ 7.14 แรงดันโหมตร่วมที่จุดต่างๆ ในระบบที่ติดตั้งวงจรรองแบบไฮบริดในสเกลความถี่หลักมูล
 ($f_{sw} = 5 \text{ kHz}$, $f_o = 50 \text{ Hz}$)



รูปที่ 7.15 สเปกตรัมแสดงเฉพาะองค์ประกอบในย่านความถี่ต่ำของแรงดันโหมตร่วมที่จุดต่างๆ ในระบบที่ติดตั้ง วงจรกรองแบบไฮบริด ($f_{sw} = 5 \text{ kHz}$, $f_o = 50 \text{ Hz}$)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

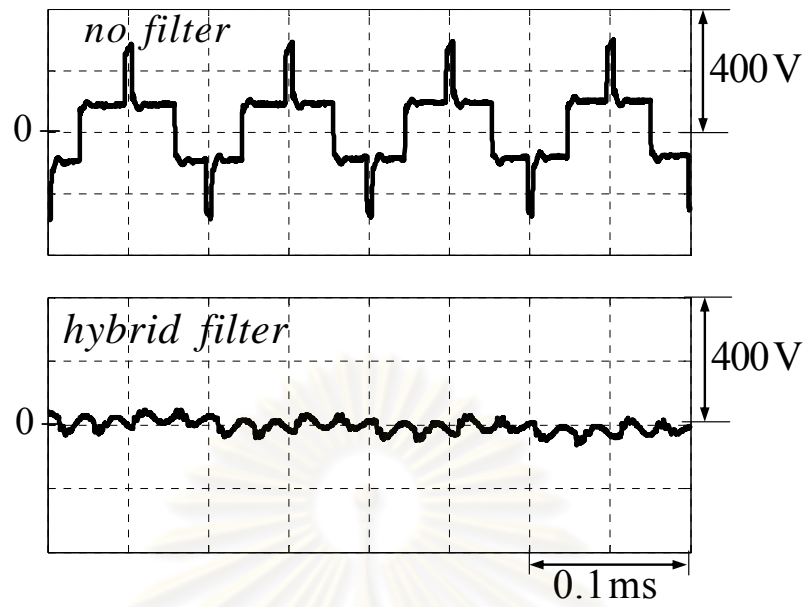
7.3 คุณสมบัติของวงจรกรองแบบไฮบริดในการลดทอนแรงดันโหมตร่วมที่ขั้วมอเตอร์และกระแสรั่ว

ผลทดลองในรูปที่ 7.16 และ 7.17 แสดงสมรรถนะของวงจรกรองแบบไฮบริดในการลดทอนแรงดันโหมตร่วมที่ขั้วมอเตอร์ v_{mot} และกระแสรั่ว i_{cm} ในกรณีที่ $f_{sw} = 10\text{kHz}$ และ $f_o = 50\text{Hz}$ ซึ่งเป็นสภาวะเดียวกับผลทดลองรูปที่ 7.3-7.6 ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าวงจรกรองแบบไฮบริดลดทอนทั้งแรงดันโหมตร่วมประมาณ 20-30 dB (1/10-1/30 เท่า) ตลอดย่านความถี่ 10 kHz-10MHz ส่วนกระแสรั่วหลังการติดตั้งวงจรกรองแบบไฮบริดจะถูกลดทอนลงสอดคล้องตามการลดทอนของแรงดันโหมตร่วม

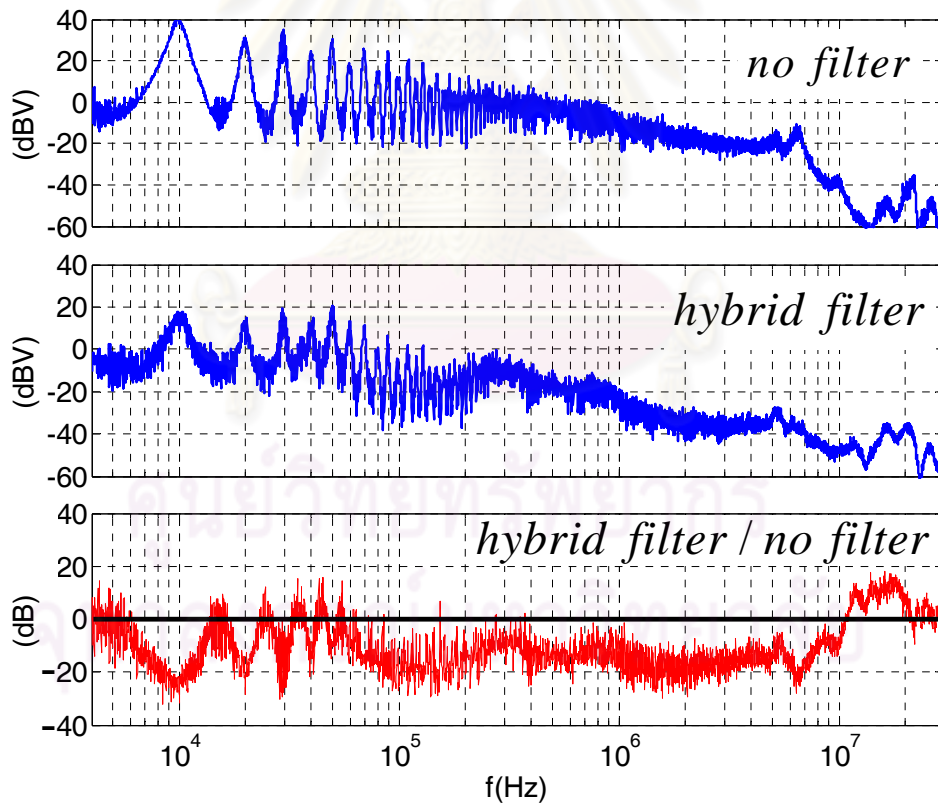
ผลทดลองรูปที่ 7.18 และ 7.19 แสดงให้เห็นว่าแม้จะมีการปรับเปลี่ยนความถี่ด้านออก f_o ให้สูงขึ้นเป็น 75 Hz วงจรกรองยังคงสามารถลดทอนองค์ประกอบที่ความถี่สูงกว่าความถี่การสวิตซ์ของแรงดันโหมตร่วมและกระแสรั่วได้ คล้ายกันกับในรูปที่ 7.16 และ 7.17 แสดงให้เห็นว่า ความถี่ด้านออกไม่มีผลทำให้คุณลักษณะการกรองด้อยลงหรือเกิดภาวะเรโซแนนซ์

ในทำนองเดียวกัน เมื่อเปลี่ยนความถี่สวิตซ์ให้มีค่าต่ำลงเป็น 5 kHz จะให้คุณสมบัติการลดทอนแรงดันโหมตร่วมและกระแสรั่วดังรูปที่ 7.20 และ 7.21 ซึ่งอัตราการลดทอนในย่านความถี่ 10 kHz-10 MHz ยังคงดีเหมือนในรูปที่ 7.16-7.19

กล่าวโดยสรุปได้ว่าวงจรกรองแบบไฮบริดที่นำเสนอสามารถลดทอนแรงดันโหมตร่วม ทำให้กระแสรั่วที่เป็นสาเหตุของปัญหาการแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการนำ และความล้มเหลวของตัวขับเคลื่อนความผิดพลาดลงดินลดลงเหลือเพียงประมาณ 1/10 เท่า ในทุกภาวะการทำงาน

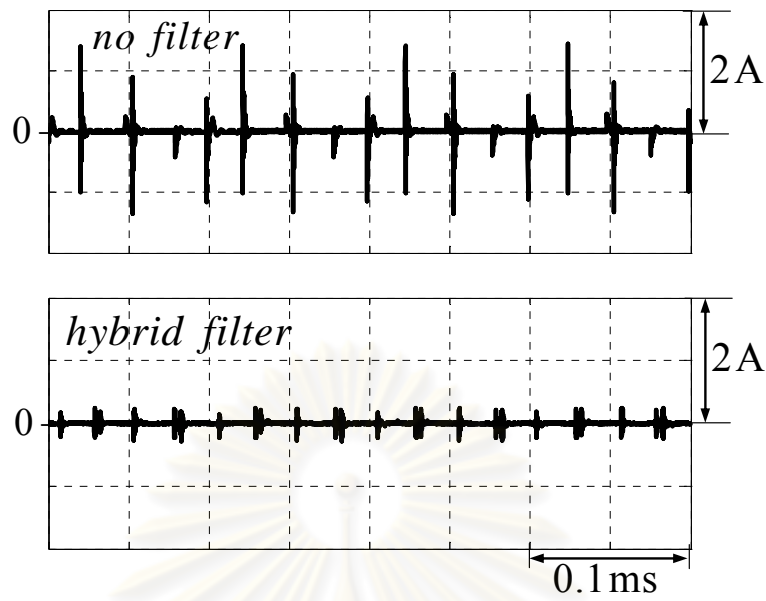


ก) รูปคลื่นแรงดันโหมดรวมที่ขั้วมอเตอร์ v_{mot}

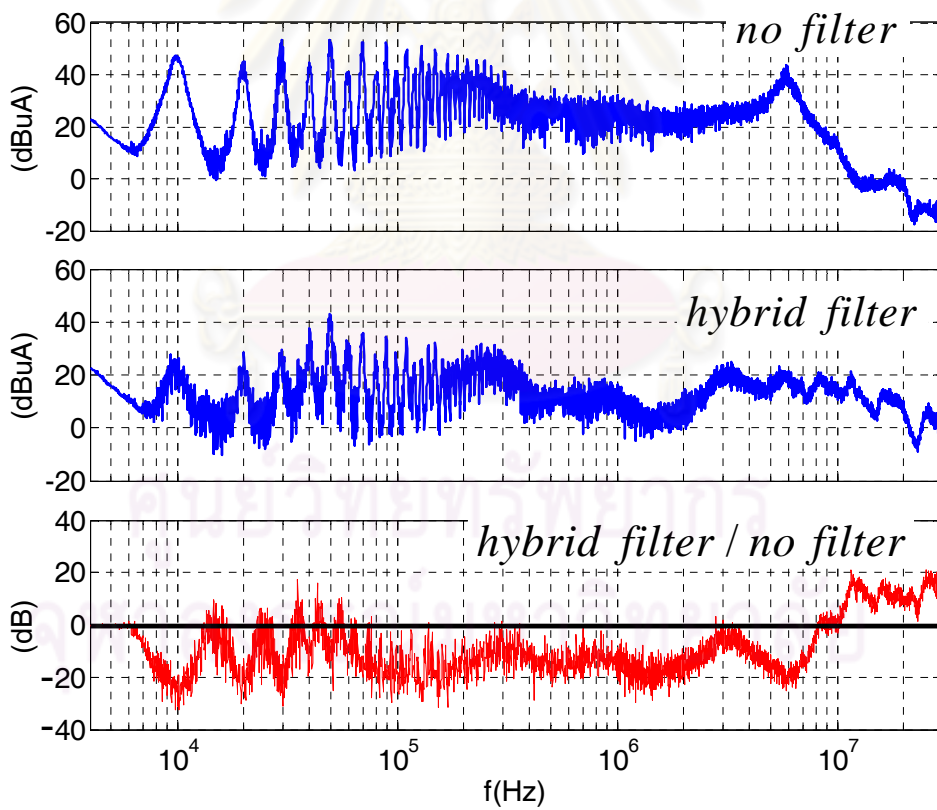


ข) สเปกตรัมของแรงดันโหมดรวมที่ขั้วมอเตอร์ v_{mot}

รูปที่ 7.16 แรงดันโหมดรวมที่ขั้วมอเตอร์ v_{mot} ในกรณีที่ไม่มีการกรอง และ ข) ติดตั้งวงจรกรองแบบไฮบริด ($f_{sw} = 10\text{kHz}$ และ $f_o = 50\text{Hz}$)

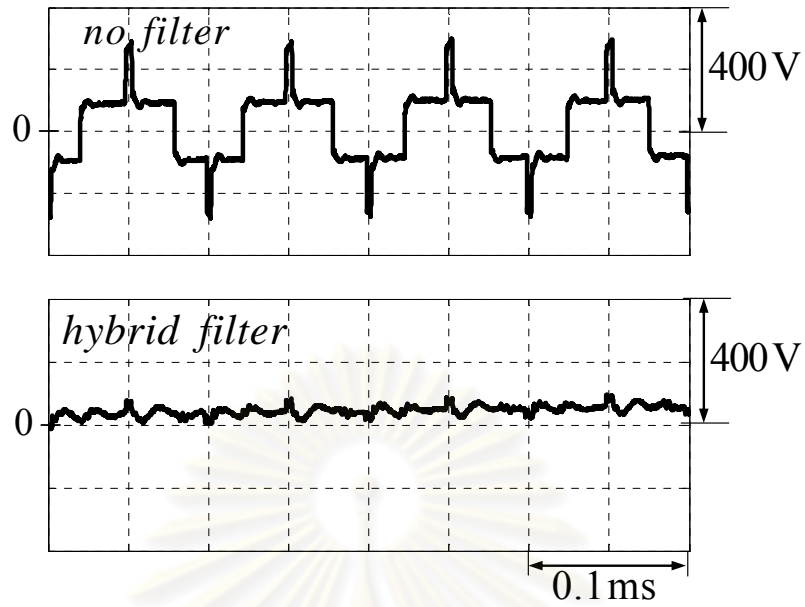


ก) รูปคลื่นกระแสรั่ว i_{cm}

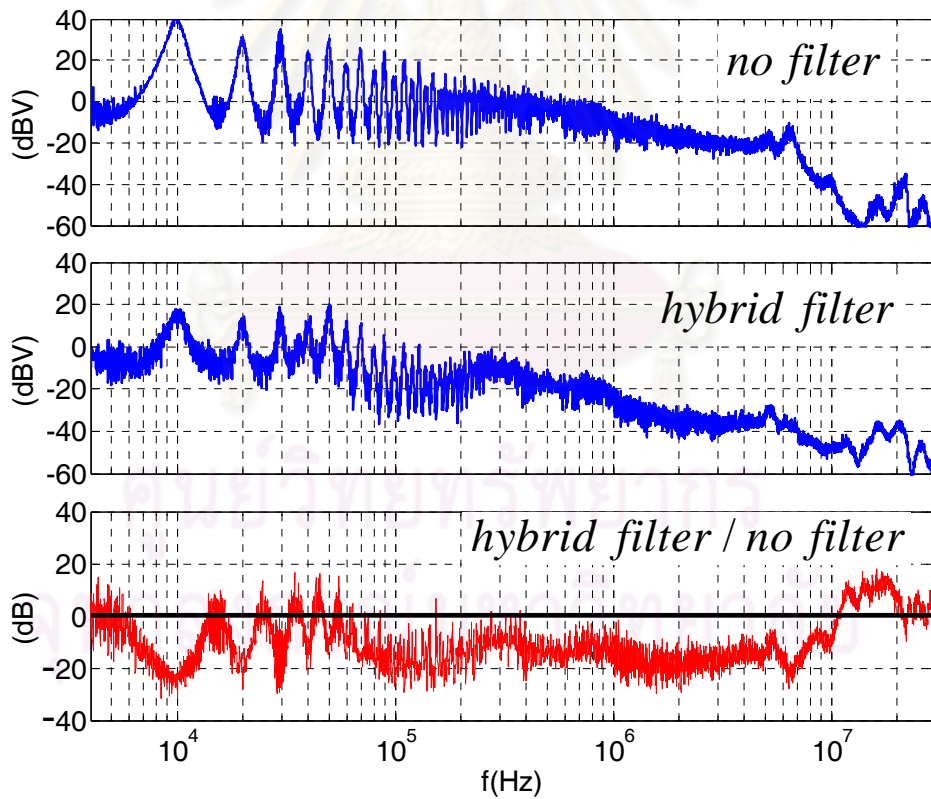


ข) สเปกตรัมของกระแสรั่ว i_{cm}

รูปที่ 7.17 กระแสรั่ว i_{cm} ในกรณีที่ไม่มีการกรอง และ ข) ติดตั้งวงจรกรองแบบไฮบริด ($f_{sw} = 10\text{ kHz}$ และ $f_o = 50\text{ Hz}$)

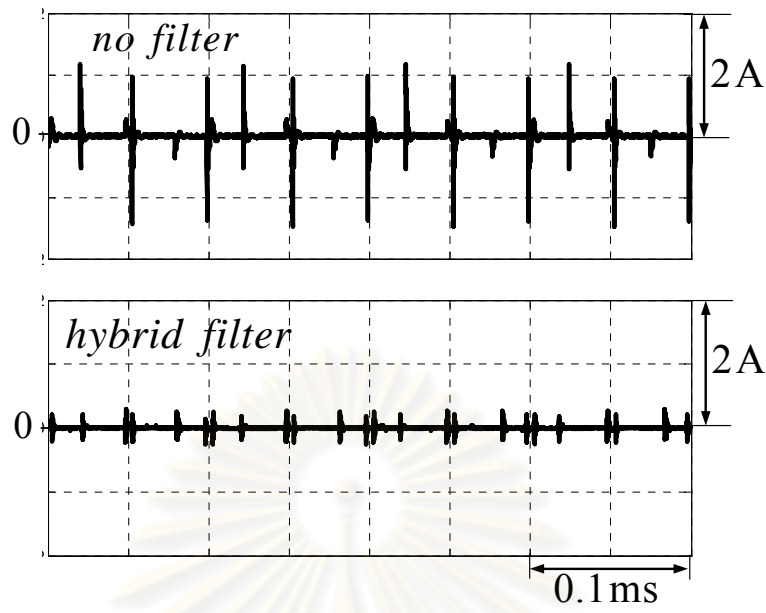


ก) รูปคลื่นแรงดันโหมตร่วมที่ขั้วมอเตอร์ v_{mot}

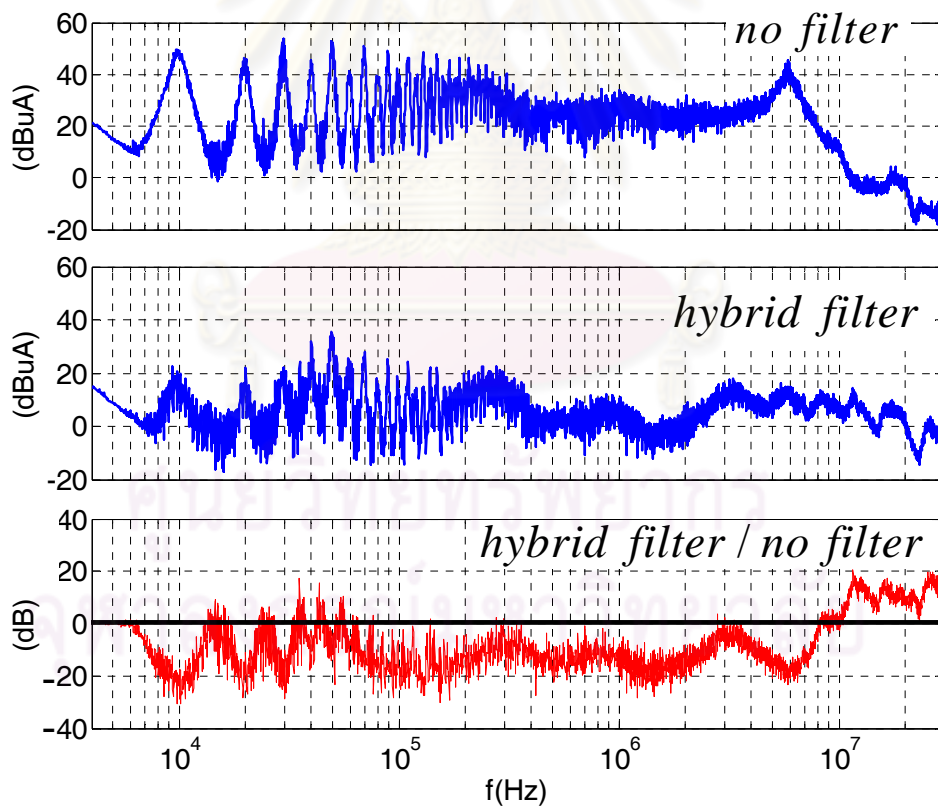


ข) สเปกตรัมของแรงดันโหมตร่วมที่ขั้วมอเตอร์ v_{mot}

รูปที่ 7.18 แรงดันโหมตร่วมที่ขั้วมอเตอร์ v_{mot} ในกรณีที่ ก) ไม่มีวงจรกรอง และ ข) ติดตั้งวงจรกรองแบบไฮบริด ($f_{sw} = 10\text{kHz}$ และ $f_o = 75\text{Hz}$)



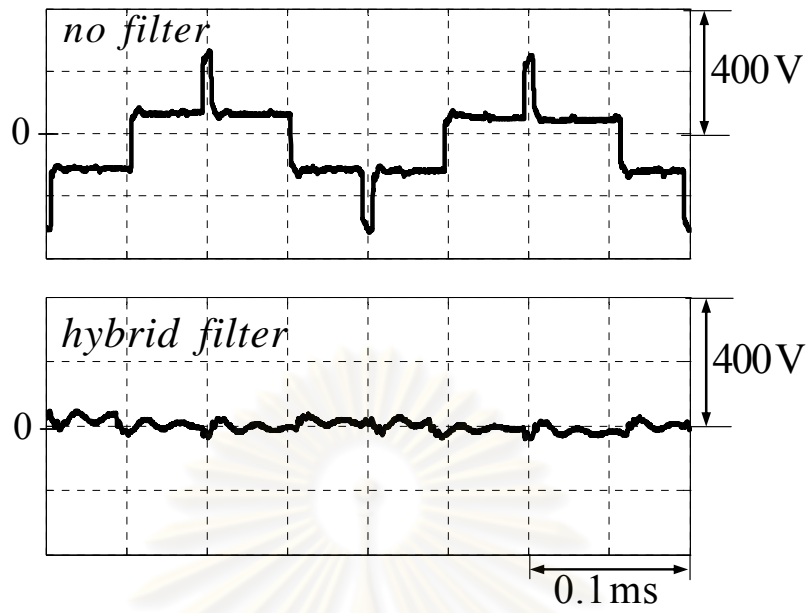
ก) รูปคลื่นกระแสรั่ว i_{cm}



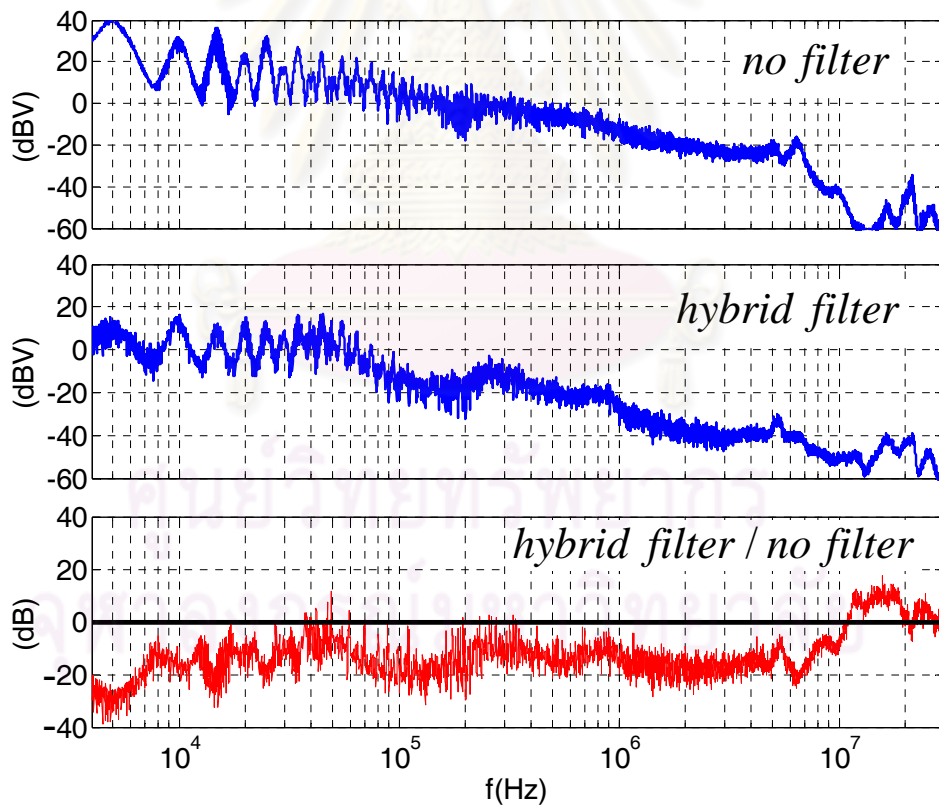
ข) สเปกตรัมของกระแสรั่ว i_{cm}

รูปที่ 7.19 กระแสรั่ว i_{cm} ในกรณีนี้ที่ ก) ไม่มีวงจรถอด และ ข) ติดตั้งวงจรถอดแบบไฮบริด

($f_{sw} = 10\text{kHz}$ และ $f_o = 75\text{Hz}$)

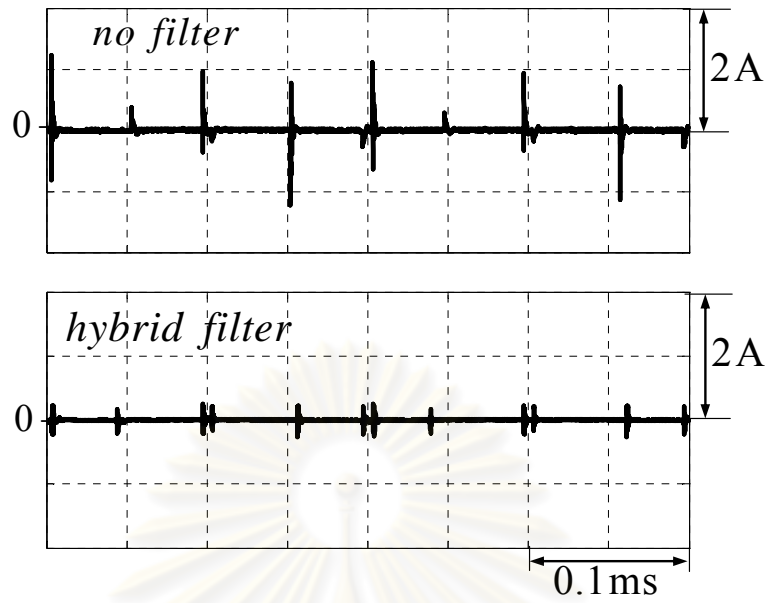


ก) รูปคลื่นแรงดันโหมตรวมที่ขั้วมอเตอร์ v_{mot}

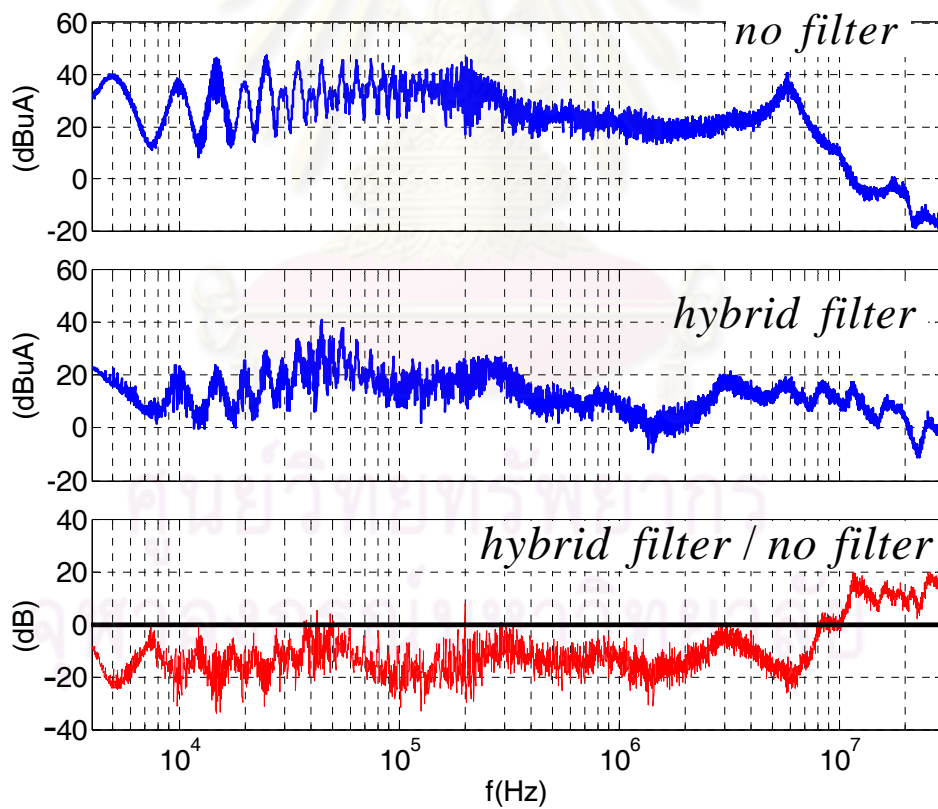


ข) สเปกตรัมของแรงดันโหมตรวมที่ขั้วมอเตอร์ v_{mot}

รูปที่ 7.20 แรงดันโหมตรวมที่ขั้วมอเตอร์ v_{mot} ในกรณีที่ไม่มียังจกรรอง และ ข) ติดตั้งวงจรรองแบบไฮบริด ($f_{sw} = 5\text{ kHz}$ และ $f_o = 50\text{ Hz}$)



ก) รูปคลื่นกระแสรั่ว i_{cm}



ข) สเปกตรัมของกระแสรั่ว i_{cm}

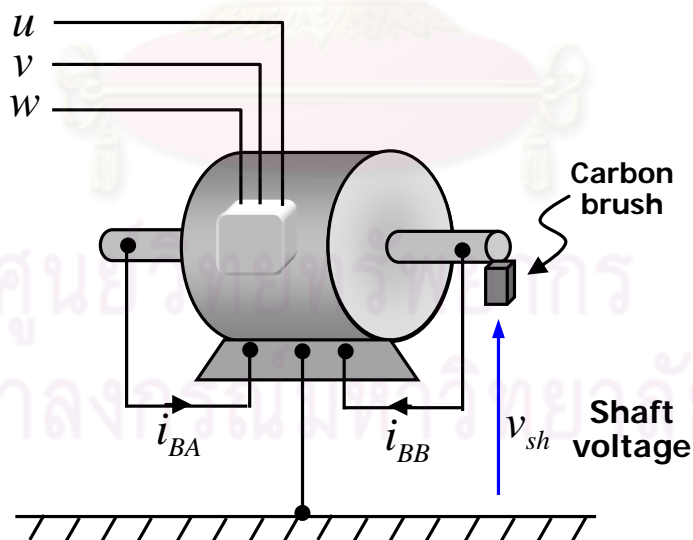
รูปที่ 7.21 กระแสรั่ว i_{cm} ในกรณีนี้ที่ ก) ไม่มีวงจรถอด และ ข) ติดตั้งวงจรถอดแบบไฮบริด ($f_{sw} = 5 \text{ kHz}$ และ $f_o = 50 \text{ Hz}$)

7.4 สมรรถนะการลดทอนแรงดันเพลลาและกระแสตลับลูกปืนของวงจรกรองแบบไฮบริด

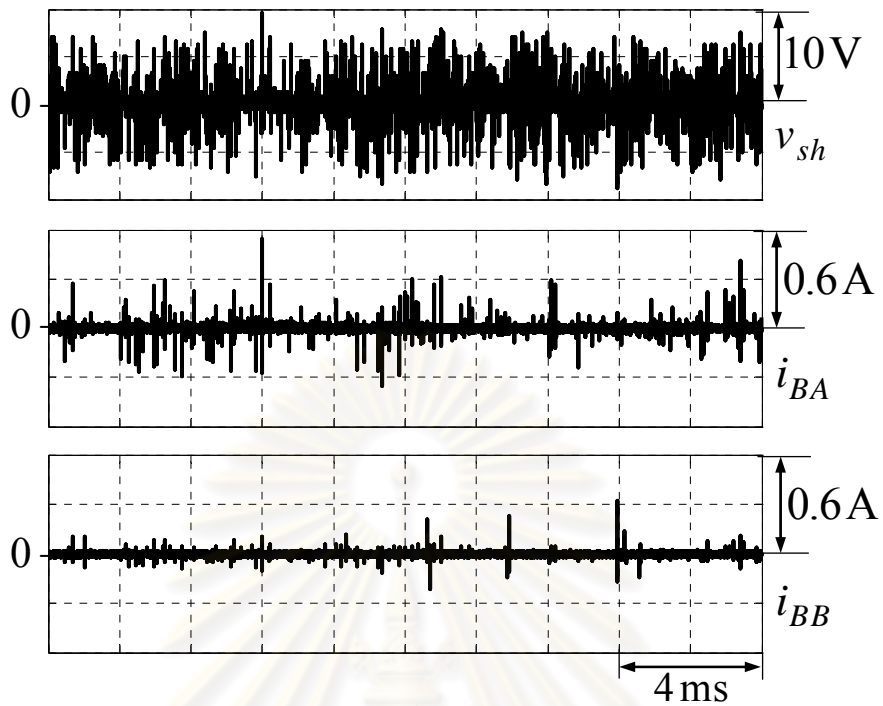
แรงดันเพลลาและกระแสตลับลูกปืนของมอเตอร์สามารถวัดได้ดังรูปที่ 7.22 โดยแทรกฉนวนฟิล์มเทฟลอนระหว่างตลับลูกปืนกับโครงมอเตอร์ เพื่อบังคับให้กระแสตลับลูกปืนไหลผ่านสายตัวนำที่เชื่อมระหว่างโรเตอร์กับโครงมอเตอร์แทน จากผลทดลองในรูปที่ 7.23 ก) จะเห็นว่าก่อนการติดตั้งวงจรกรอง แรงดันเพลลาที่มีค่าสูงสุดประมาณ 10 V และเกิดกระแสตลับลูกปืนเป็นยอดแหลมค่าสูง การติดตั้งวงจรกรองแบบไฮบริดทำให้แรงดันเพลลาถูกลดทอนลงโดยเฉพาะที่ความถี่สูงทำให้การสูญเสียความเป็นฉนวนของฟิล์มจาระบีในตัวตลับลูกปืนเกิดได้ยากขึ้น กระแสตลับลูกปืนที่เป็นยอดแหลมไหลผ่านตลับลูกปืนที่เกิดในจังหวะการสูญเสียสภาพฉนวนจึงหายไปดังผลทดลองในรูปที่ 7.23 ข) ผลการทดลองยังยืนยันด้วยว่าแรงดันเพลลาที่มีความถี่ต่ำ ($3n$ เท่าของ f_o) ที่หลงเหลืออยู่ไม่ได้ก่อให้เกิดปัญหากระแสตลับลูกปืนแต่อย่างใด

รูปที่ 7.24 แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเปลี่ยนความถี่ทำงาน f_o ของอินเวอร์เตอร์ ก่อนใส่วงจรกรอง แรงดันเพลลาและกระแสตลับลูกปืนที่เป็นยอดแหลมจะเกิดขึ้นด้วยอัตราการเกิดที่ถี่กว่าในรูปที่ 7.23 อย่างไรก็ตามวงจรกรองแบบไฮบริดยังคงสามารถกำจัดกระแสตลับลูกปืนได้ดีเยี่ยมไม่ต่างจากรูปที่ 7.23

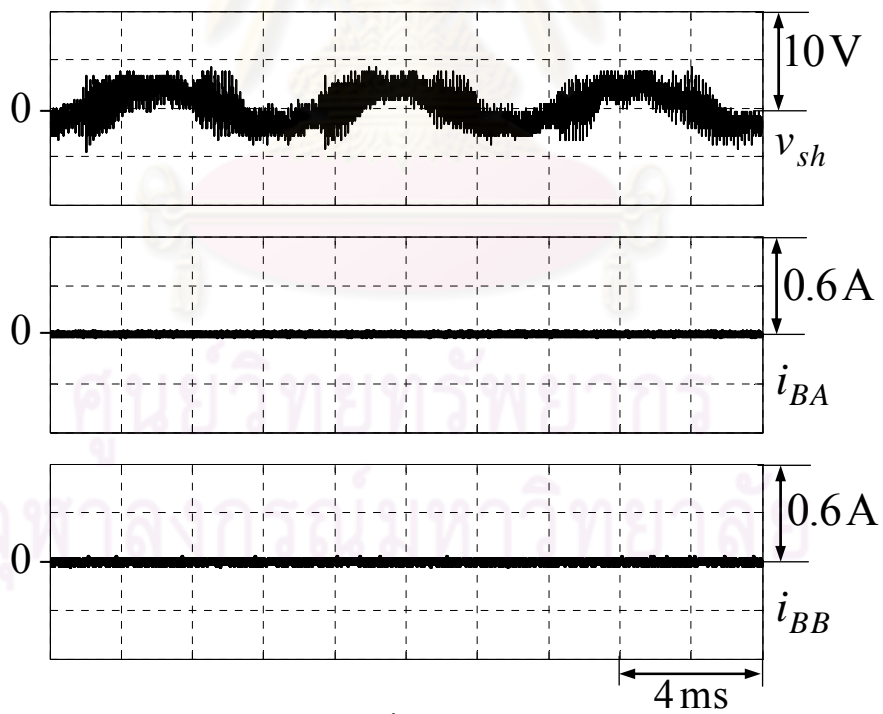
ในทำนองเดียวกันกับรูปที่ 7.23 และ 7.24 วงจรกรองแบบไฮบริดสามารถที่จะลดทอนแรงดันเพลลาที่มีความถี่สูงและกระแสตลับลูกปืนได้เป็นอย่างดี แม้ในกรณีที่มีการเปลี่ยนความถี่การสวิตช์ f_{sw} ของอินเวอร์เตอร์ดังแสดงในรูปที่ 7.25



รูปที่ 7.22 การวัดแรงดันเพลลา v_{sh} และกระแสตลับลูกปืนแต่ละด้าน i_{BA} , i_{BB}

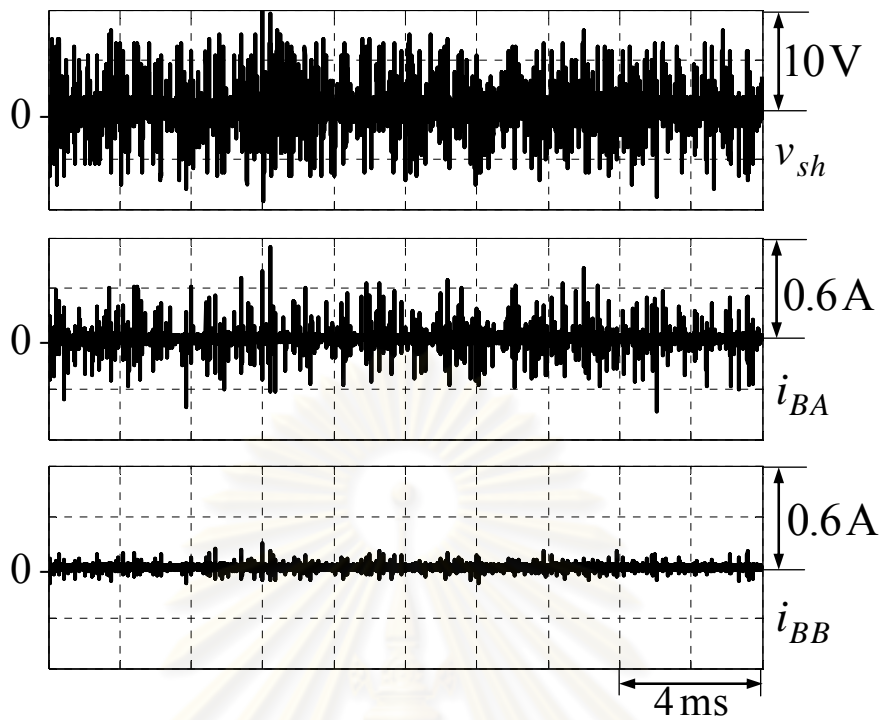


ก) กรณีที่ไม่มีวงจรรอง

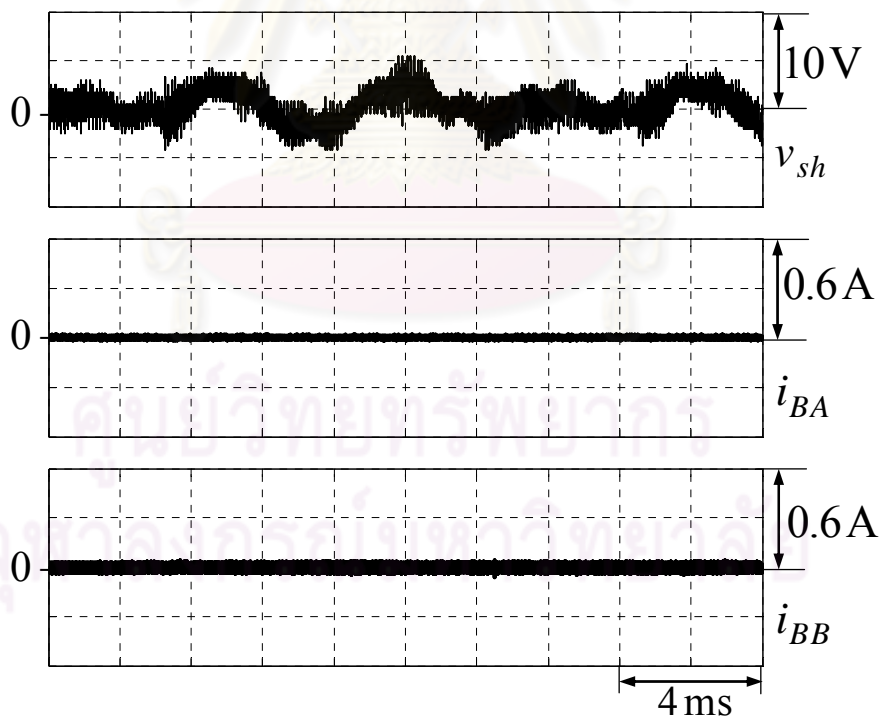


ข) กรณีที่ติดตั้งวงจรรองแบบไฮบริด

รูปที่ 7.23 รูปคลื่นแรงดันเพลา v_{sh} และกระแสลัดปลุกปืนแต่ละด้าน i_{BA} , i_{BB} ในกรณี ก) ไม่มีวงจรรอง และ ข) ติดตั้งวงจรรองแบบไฮบริด ($f_{sw} = 10 \text{ kHz}$ และ $f_o = 50 \text{ Hz}$)

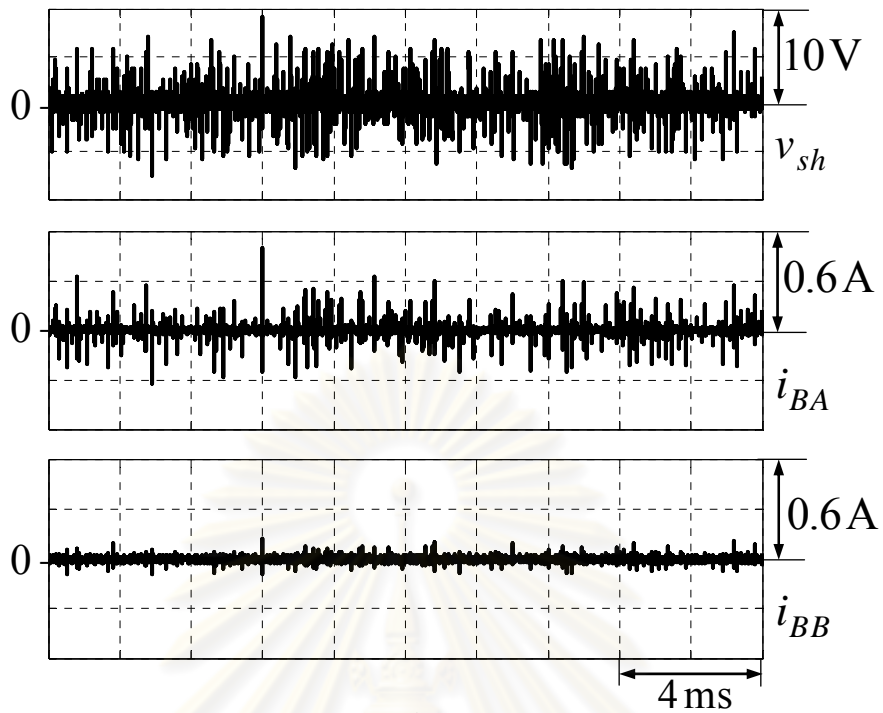


ก) กรณีที่ไม่มีวงจรรอง

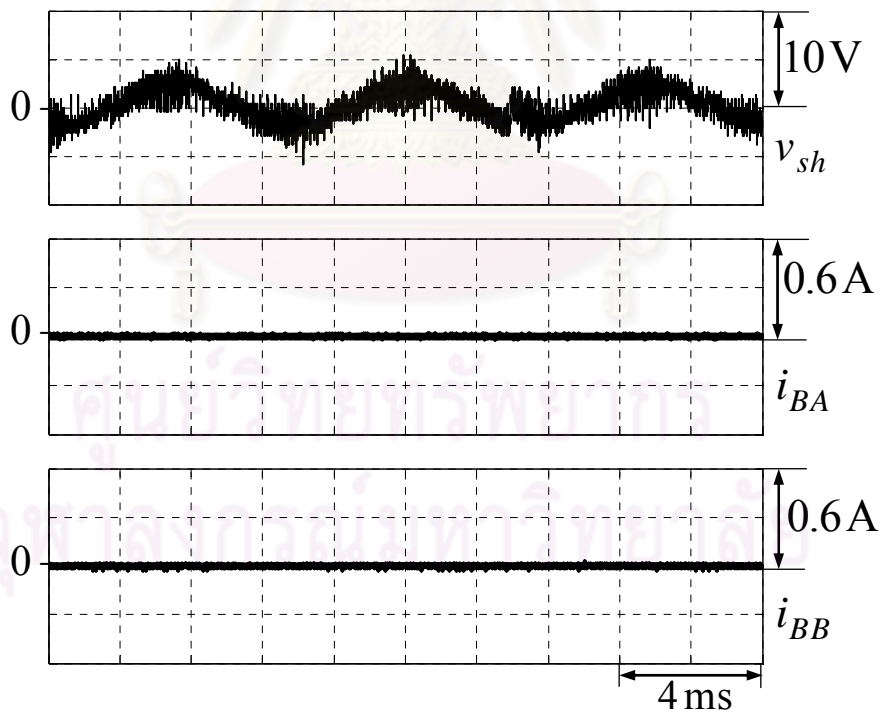


ข) กรณีที่ติดตั้งวงจรรองแบบไฮบริด

รูปที่ 7.24 รูปคลื่นแรงดันเพลา v_{sh} และกระแสตัวลูปป้อนแต่ละด้าน i_{BA} , i_{BB} ในกรณีที่ ก) ไม่มีวงจรรอง และ ข) ติดตั้งวงจรรองแบบไฮบริด ($f_{sw} = 10\text{kHz}$ และ $f_o = 75\text{Hz}$)



ก) กรณีที่ไม่มีวงจรรอง



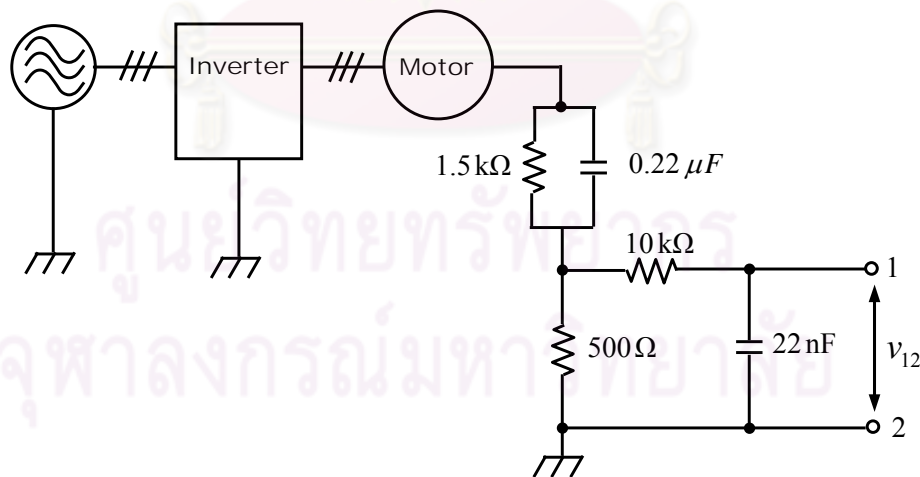
ข) กรณีที่ติดตั้งวงจรรองแบบไฮบริด

รูปที่ 7.25 รูปคลื่นแรงดันเพลา v_{sh} และกระแสลบลูกปืนแต่ละด้าน i_{BA} , i_{BB} ในกรณี ก) ไม่มีวงจรรอง และ ข) ติดตั้งวงจรรองแบบไฮบริด ($f_{sw} = 5 \text{ kHz}$ และ $f_o = 50 \text{ Hz}$)

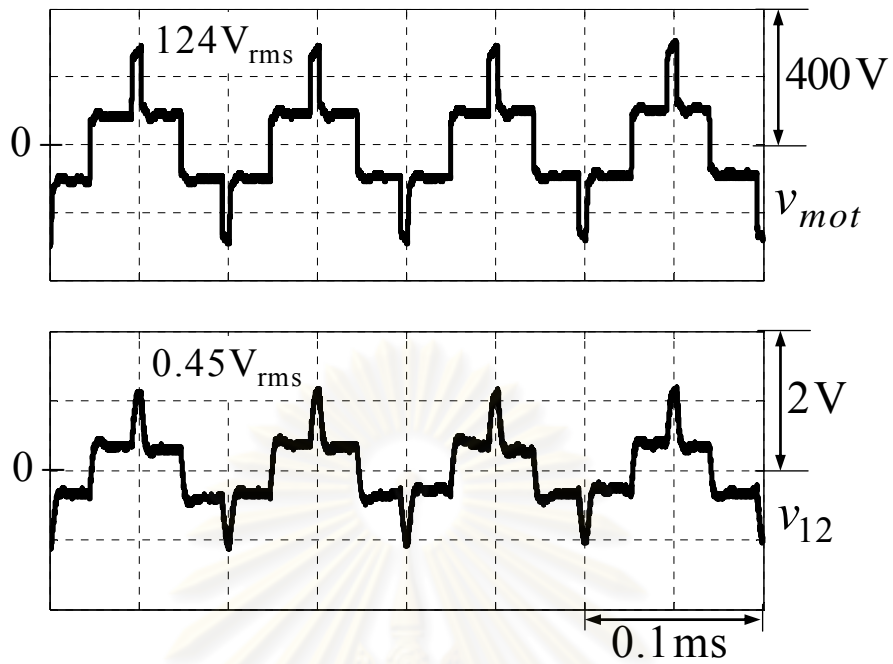
7.5 คุณสมบัติการลดทอนกระแสสัมผัสของวงจรกรองแบบไฮบริด

การใช้งานอินเวอร์เตอร์ในสถานะที่ไม่มีการต่อโครงมอเตอร์ลงกราวด์สามารถก่อให้เกิดอันตรายจากไฟฟ้าดูดได้เนื่องจากกระแสสัมผัสที่เกิดจากแรงดันที่โครงมอเตอร์ เพื่อตรวจสอบอันตรายจากไฟฟ้าดูดของแรงดันที่โครงมอเตอร์ มาตรฐานทางไฟฟ้า IEC 60335 กำหนดให้วัดแรงดันที่โครงมอเตอร์โดยใช้วงจรตามรูปที่ 7.26 และเพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐาน IEC60335 แรงดัน v_{12} ที่วัดจากวงจรจะต้องมีค่าไม่เกิน $0.25 V_{rms}$ เนื่องจากวงจรตรวจจับในรูปที่ 7.26 เป็นวงจรกรองผ่านสูงที่ให้น้ำหนักต่อองค์ประกอบที่ความถี่สูงมากกว่าความถี่ต่ำ ดังนั้นผลการทดลองในหัวข้อนี้จะเน้นที่แสดงผลการลดทอนแรงดันโหมมร่วม v_{mot} และแรงดันที่ขั้ว 1-2 ของวงจรตรวจวัด (v_{12}) ที่องค์ประกอบความถี่สูงกว่าการสวิตช์ขึ้นไป

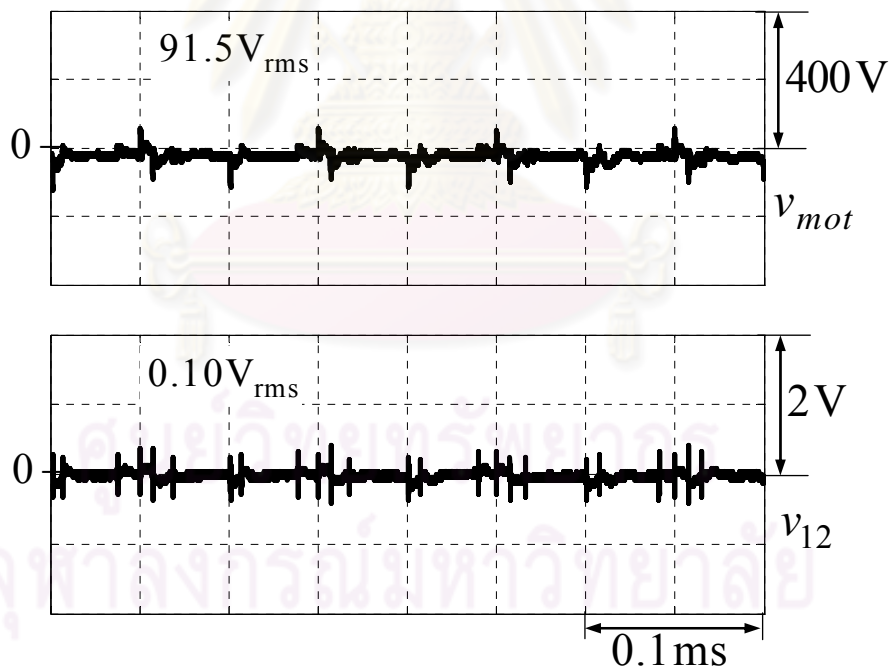
ผลทดลองในรูปที่ 7.27-7.29 จะให้ผลที่เหมือนกันในทุกสภาวะการทำงานที่ทำการทดลองคือในกรณีที่ไม่มีวงจรกรอง แรงดัน v_{12} ที่วัดได้มีค่า rms ประมาณ 0.45-0.48 V สูงกว่าที่มาตรฐานกำหนด แต่หลังจากติดตั้งวงจรกรองแบบไฮบริดแรงดัน v_{12} จะถูกลดทอนลง และถึงแม้ว่าจะยังคงมีส่วนที่เป็นความถี่สูงหลงเหลืออยู่บ้าง แต่แรงดัน v_{12} ที่วัดได้มีค่า rms เพียง 0.10 V เท่านั้นและอยู่ต่ำกว่าค่ากำหนดของมาตรฐาน อีกทั้งการปรับเปลี่ยนความถี่ด้านนอกหรือการปรับเปลี่ยนความถี่การสวิตช์ก็มิได้มีผลอย่างใดต่อคุณลักษณะการลดทอนกระแสสัมผัสที่วัดในรูปแรงดัน v_{12} ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าวงจรกรองแบบไฮบริดสามารถนำไปใช้เพื่อป้องกันอันตรายจากไฟฟ้าดูดในระบบขับเคลื่อนในสถานะที่ไม่ได้ต่อมอเตอร์ลงกราวด์ได้



รูปที่ 7.26 วงจรสำหรับตรวจวัดกระแสสัมผัสในรูปของค่าแรงดัน v_{12} ตกคร่อมโครงข่ายตามมาตรฐาน IEC 60335

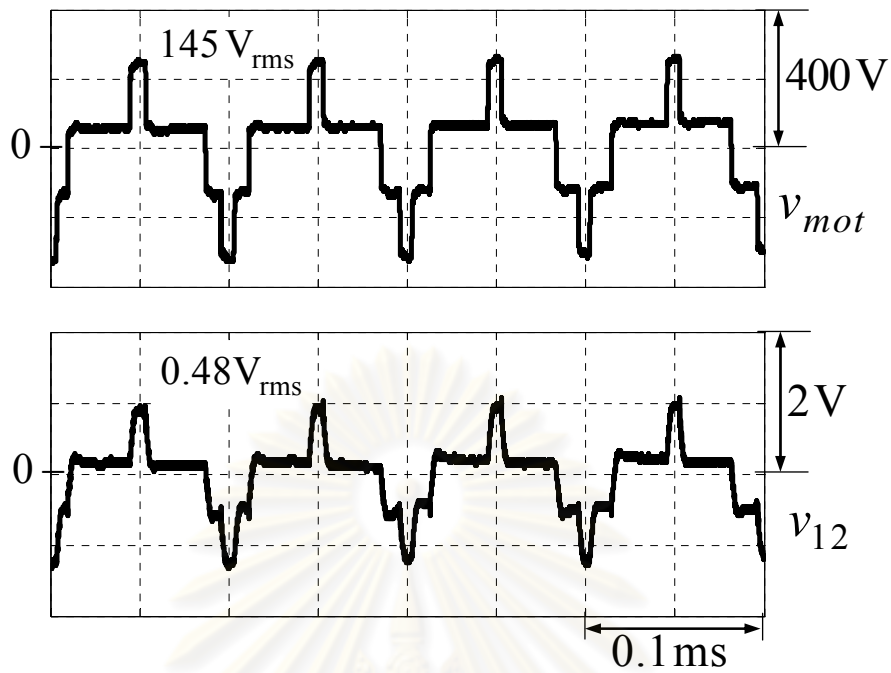


ก) กรณีที่ไม่มีวงจรรอง

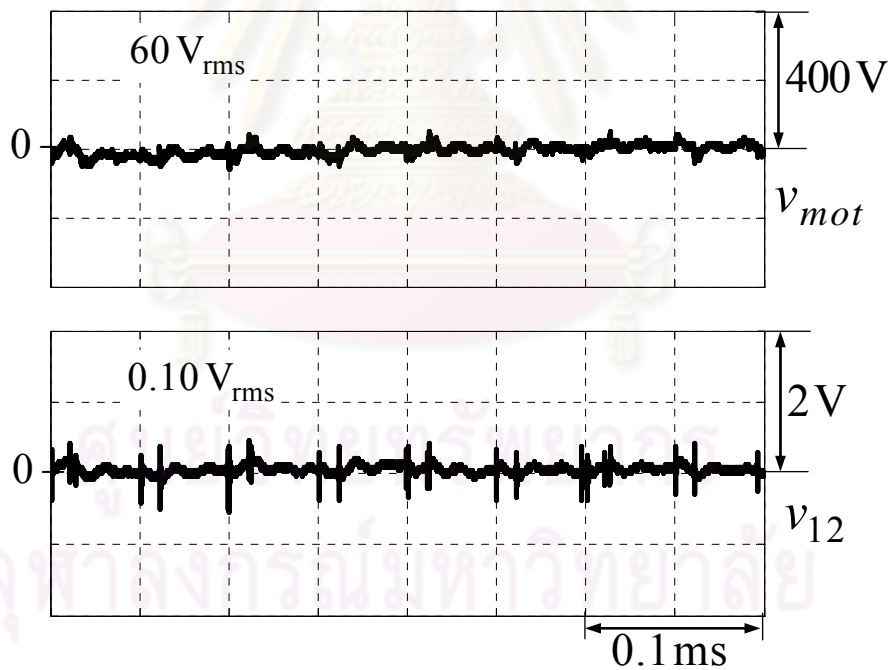


ข) กรณีที่ติดตั้งวงจรรองแบบไฮบริด

รูปที่ 7.27 รูปคลื่นแรงดันที่ขั้วมอเตอร์ v_{mot} และแรงดันที่ขั้ว 1-2 (v_{12}) ของวงจรตรวจวัดกระแสสัมผัส ในกรณีที่
 ก) ไม่มีวงจรรอง และ ข) ติดตั้งวงจรรองแบบไฮบริด ($f_{sw} = 10\text{kHz}$ และ $f_o = 50\text{Hz}$)

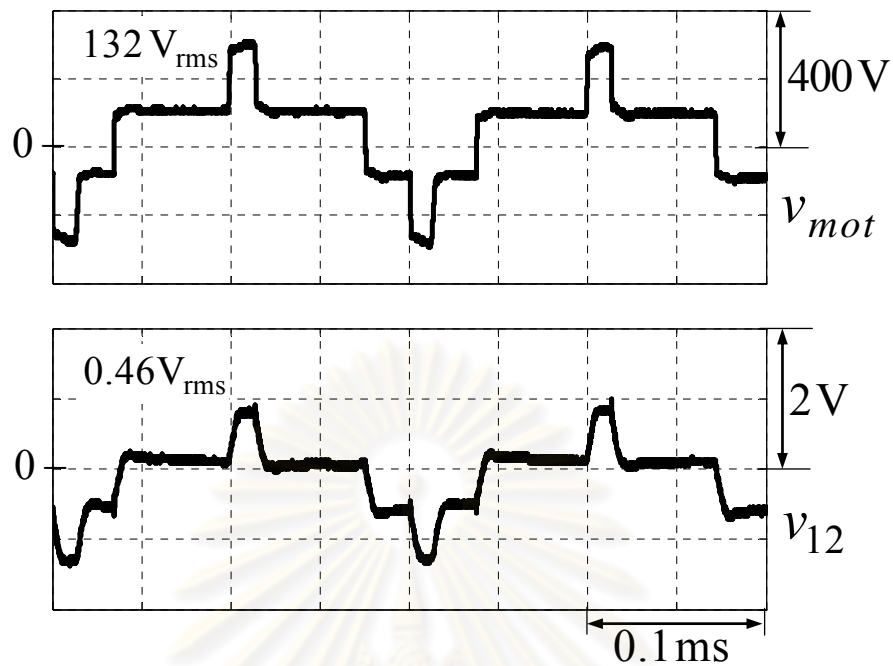


ก) กรณีที่ไม่มีวงจรรอง

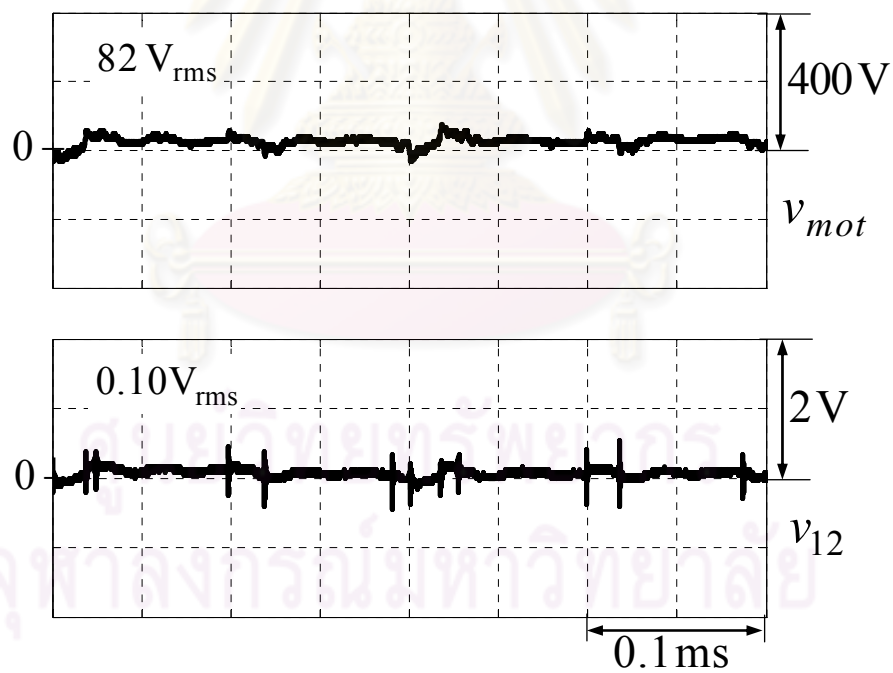


ข) กรณีที่ติดตั้งวงจรรองแบบไฮบริดที่นำเสนอ

รูปที่ 7.28 รูปคลื่นแรงดันที่ขั้วมอเตอร์ v_{mot} และแรงดันที่ขั้ว 1-2 (v_{12}) ของวงจรตรวจวัดกระแสสัมพัทธ์ ในกรณีที่
 ก) ไม่มีวงจรรอง และ ข) ติดตั้งวงจรรองแบบไฮบริด ($f_{sw} = 10\text{kHz}$ และ $f_o = 75\text{Hz}$)



ก) กรณีที่ไม่มีวงจรรอง



ข) กรณีที่ติดตั้งวงจรรองแบบไฮบริดที่นำเสนอ

รูปที่ 7.29 รูปคลื่นแรงดันที่ขั้วมอเตอร์ v_{mot} และแรงดันที่ขั้ว 1-2 (v_{12}) ของวงจรตรวจวัดกระแสสัมผัส ในกรณีที่
 ก) ไม่มีวงจรรอง และ ข) ติดตั้งวงจรรองแบบไฮบริด ($f_{sw} = 5\text{ kHz}$ และ $f_o = 50\text{ Hz}$)

บทที่ 8

บทสรุป

งานวิทยานิพนธ์ได้ศึกษาปัญหาที่เกิดจากแรงดันโหมดร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ และเสนอวงจรกรองชนิดใหม่สำหรับแก้ปัญหาดังกล่าวด้วย ในด้านปัญหาจากแรงดันโหมดร่วมนั้น วิทยานิพนธ์นี้ได้อธิบายเกี่ยวกับกลไกการเกิดปรากฏการณ์การอัดประจุสัฟไฟตรงด้วยการวิเคราะห์ห้วงจรสมมูลโหมดร่วมและโหมดผลต่างที่สมบุรณ์ของอินเวอร์เตอร์แบบพีดีบีเบิลยูเอ็ม วงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์ที่นำเสนอสามารถใช้วิเคราะห์ปรากฏการณ์การอัดประจุสัฟไฟตรงโดยกระแสโหมดร่วมได้ในเชิงปริมาณ โดยแสดงให้เห็นว่า การสวิตซ์ของวงจรเรียงกระแสและวงจรอินเวอร์เตอร์ทำให้เกิดความเชื่อมโยงระหว่างวงจรโหมดร่วมและโหมดผลต่าง ซึ่งความเชื่อมโยงระหว่างโหมดนี้เองที่เป็นสาเหตุให้กระแสโหมดร่วมความถี่สูงสามารถดึงพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟ 3 เฟสไปอัดประจุสัฟไฟตรงได้ การวิเคราะห์วงจรสมมูลโดยแยกพิจารณาตามการทำงานของวงจรเรียงกระแสทำให้ได้ข้อสรุปว่าปรากฏการณ์การอัดประจุสัฟไฟตรงจะเกิดขึ้นในช่วงที่วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแสเท่านั้น อย่างไรก็ตามปรากฏการณ์ดังกล่าวจะส่งผลให้เกิดการอัดประจุสัฟไฟตรงจนระดับแรงดันเพิ่มขึ้นได้หรือไม่นั้นจะขึ้นอยู่กับพลังงานที่จ่ายออกจากบัสไฟตรงในขณะนั้นด้วย เงื่อนไขที่เอื้อให้ปรากฏการณ์การอัดประจุสัฟไฟตรงนำไปสู่การเกิดแรงดันเกินที่บัสไฟตรงคือ

- 1) กระแสไหลดมีค่าต่ำเมื่อมอเตอร์ทำงานในภาวะไร้โหลดหรือโหลดเบา ซึ่งจะทำให้เกิดช่วงเวลายาวนานที่วงจรเรียงกระแสทำงานในย่านไม่นำกระแส อีกทั้งยังเอื้อให้กระแสที่อัดประจุสัฟไฟตรงมีค่ามากกว่ากระแสคายประจุของบัสไฟตรงได้
- 2) กระแสโหมดร่วมมีค่าสูง เช่น กรณีที่สายเคเบิลด้านออกยาวมากทำให้กระแสโหมดร่วมที่เข้าไปอัดประจุสัฟไฟตรงมีค่าสูงกว่ากรณีที่สายเคเบิลสั้น
- 3) ความถี่การสวิตซ์ของอินเวอร์เตอร์ที่มีค่าสูง จะทำให้ช่วงเวลาการอัดประจุโดยรวมนานขึ้นตามจำนวนครั้งการสวิตซ์
- 4) ปัจจัยเสริมที่ทำให้กำลังสูญเสียในระบบลดลงเช่น การติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ชนิด 3 เฟส 3 สาย ที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ที่เป็นการลดทอนกระแสโหมดผลต่างระหว่างสาย

ในด้านการแก้ปัญหาที่เกิดจากแรงดันโหมดร่วมนั้น วิทยานิพนธ์นี้เสนอวงจรกรองด้านออกแบบไฮบริดชนิดใหม่ที่มีขนาดเล็กและมีแบนด์วิดท์การลดทอนแรงดันโหมดร่วมที่กว้าง คุณสมบัติของวงจรกรองแบบไฮบริดเปรียบเทียบกับวงจรกรองแบบอื่น ๆ แสดงได้ดังตารางที่ 8.1 วงจรกรองแบบไฮบริดที่นำเสนอมีคุณสมบัติที่ดีดังนี้คือ

1. มีคุณสมบัติการกรองที่ดีของวงจรกรองแยกที่ฟคือไม่มีปัญหาเรโซแนนซ์เหมือนวงจรกรองพาสซีฟ
2. หม้อแปลงเชื่อมร่วมของวงจรกรองแบบไฮบริดมีขนาดเล็กกว่าของวงจรกรองแยกที่ฟแบบเดิมถึง 1/10 เท่า เพราะเลือกขดเซยเฉพาะองค์ประกอบของแรงดันโหมดร่วมในย่านความถี่ที่สูงกว่าความถี่การสวิตซ์
3. วงจรกรองแยกที่ฟที่เป็นอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ 1 ขาสามารถใช้งานได้กับระบบขับเคลื่อนที่มีพิกัดแรงดันบัสไฟตรงสูง เพราะไม่จำเป็นต้องใช้คู่ทรานซิสเตอร์แบบพุกพุกที่มีข้อจำกัดในด้านพิกัดแรงดัน

4. วิธีการตรวจจัการสวิตซ์ของแรงดันเฟสด้านออกของอินเวอร์เตอร์โดยตรง ทำให้การตรวจจัมีความไวสูงและสามารถหลีกเลี่ยงปัญหาการสร้างแรงดันชดเชยผิดพลาดในช่วงเวลาไร้ผลตอบสนองของอินเวอร์เตอร์ได้

5. วงจรกรองพาสซีฟขนาดเล็กในวงจรกรองแบบไฮบริดช่วยลดทอนแรงดันโหมดร่วมในย่านความถี่สูงที่วงจรกรองแอคทีฟไม่สามารถทำงานได้ดี ทำให้วงจรกรองโดยรวมมีสมรรถนะการกรองที่ดีครอบคลุมตั้งแต่ย่านความถี่การสวิตซ์ ไปจนถึงความถี่ที่เกิดการแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการนำ

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า วงจรกรองแบบไฮบริดที่นำเสนอสมาารถลดทอนองค์ประกอบในย่านความถี่การสวิตซ์และแถบความถี่ข้างของแรงดันโหมดร่วมที่เป็นสาเหตุสำคัญของปัญหาต่างๆ ได้เป็นอย่างดี โดยแรงดันโหมดร่วมจะถูกลดทอนลงประมาณ 20 dB ในย่านตั้งแต่ความถี่การสวิตซ์ 10 kHz จนถึง 10 MHz ซึ่งครอบคลุมย่านความถี่ของการแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการนำ นอกจากนี้วงจรกรองแบบไฮบริดยังสามารถลดทอนให้กระแสรั่ว, แรงดันที่เพลา, กระแสลัดลูปปืน และกระแสสัมผัสที่โครงมอเตอร์ให้มีขนาดอยู่ในระดับที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ใช้อินเวอร์เตอร์และอุปกรณ์ในระบบขับเคลื่อนได้เป็นอย่างดี

ตาราง 8.1 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของวงจรกรองด้านออกแบบต่าง ๆ

	วงจรกรองแบบไฮบริดที่นำเสนอ	วงจรกรองแบบแอคทีฟ		วงจรกรองแบบพาสซีฟ
		Xiang	Ogasawara	
คุณสมบัติการกรอง				
$f_{sw} - 1\text{MHz}$	ดี	ดี	ดี	ไม่ดี
1MHz-30MHz	ดี	ไม่ดี	ไม่ดี	ดี
ขนาด	เล็กมาก	เล็ก	เล็ก	ใหญ่
ราคา	ถูก	ปานกลาง	ถูก	แพง
ปัญหาเรโซแนนซ์	ไม่เกิด	ไม่เกิด	ไม่เกิด	เกิด
การออกแบบ	ง่าย	ง่าย	ง่าย	ยาก
การสร้างวงจรกรอง	ง่าย	ง่าย	ยาก	ง่าย

รายการอ้างอิง

- [1] G. L. Skibinski, R. J. Kerkman and D. Schlegel. EMI emissions of modern PWM AC drives. IEEE IAS Magazine 5, 6 (1999) : 47-80.
- [2] A. Kempinski, R. Smolenski and R. Strzelecki. Common mode current paths and their modeling in PWM inverter-fed drives. Conf. Rec. of IEEE-PESC 3 (2002) : 1551–1556.
- [3] S. Ogasawara and H. Akagi. Modeling and damping of high frequency leakage currents in PWM inverter-fed ac motor drive system. IEEE Trans. Ind. Appl. 32, 5 (1996) : 1105-1114.
- [4] N. Mutoh, M. Kanesaki, J. Nakashima and M. Ogata. A new method to control common mode currents focusing on common mode current paths produced in motor drive systems. Conf. Rec. of IEEE-IAS. 1 (2003) : 459-466.
- [5] S. Barker. Avoiding premature bearing failure with inverter fed induction motors. IET Power Engineering Journal 14, 4 (2000) : 182 -189.
- [6] S. Chen and T. A. Lipo. Circulating type motor bearing current in inverter drives. IEEE Magazine. Ind. Appl. 4, 1 (1998) : 32-38.
- [7] S. Chen, T. A. Lipo and D. Fitzgerald. Modeling of motor bearing currents in PWM inverter drives. IEEE Trans. Ind. Appl. 32, 5 (1996) : 1365-1370.
- [8] D. Busse, J. Erdman, R. Kerkman, D. Schlegel and G. Skibinski. Characteristics of shaft voltage and bearing currents. IEEE Magazine. Ind. Appl. 3, 6 (1997) : 21-32.
- [9] International Standard for Household and similar electrical appliances –Safety -Part 1: General requirements (IEC 60335-1).
- [10] เพ็ญญา ไพโรจน์อมรชัย, ชมพู สุขภาพ, สุรพงศ์ สุวรรณภิน, วรวิทย์ เตียวัฒนรัฐติกาล และ สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์. ปราบปรามการรบกวนการชาร์จแบตเตอรี่ไฟตรงจากกระแสโหมตร่วมในอินเวอร์เตอร์แบบ PWM ที่ขับเคลื่อนมอเตอร์หลายตัวผ่านสายเคเบิลยาว. การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 28 1 (2548) : 209-212.
- [11] S. Suwankawin, P. Pairodamonchai, S. Sangwongwanich, C. Sukhapap and W. Tearwattananattikal. Destruction by charge current and its solution for PWM inverter feeding multiple motors through long cables. Conf. Rec. of IEEE-IAS. 2 (2005) : 1382-1389.
- [12] A. L. Julian, G. Oriti and T. A. Lipo. Elimination of common-mode voltage in three-phase sinusoidal power converters. IEEE Trans. Power Electronics 14 (1999) : 982-989.
- [13] G. Oriti, A. L. Julian and T. A. Lipo. A new space vector modulation strategy for common mode voltage reduction. Conf. Rec. of PESC' 97 2 (1997) : 1541-1546.
- [14] A. von jouanne and Haoran Zhang. A dual-bridge inverter approach to eliminating common mode voltages and bearing and leakage currents. Conf. Rec. of PESC 2 (1997) : 1276-1280.

- [15] C. Mei, J. C. Balda, W. P. Waite and K. Carr. Analyzing common-mode chokes for induction motor drives. Conf. Rec. of IEEE-PESC. 3 (2002) : 1557–1562.
- [16] A. Muetze. Scaling issues for common mode chokes to mitigate ground currents in inverter-based drive systems. Conf. Rec. of IEEE-IAS. 3 (2005) : 1860-1867.
- [17] Rendusara, D. and Enjeti, P. New inverter output filter configuration reduces common mode and differential mode dv/dt at the motor terminals in PWM drive systems. Conf. Rec. of IEEE-PESC 2 (1997) : 1269-1275.
- [18] A. Von Jouanne, D. Rendusara, P. Enjeti and W. Gray. Filtering techniques to minimize the effect of long motor leads on PWM inverter-fed AC motor drive systems. IEEE Trans. Ind. Appl. 32, 4 (1996) : 919-926.
- [19] A. Von Jouanne and P. Enjeti. Design considerations for an inverter output filter to mitigate the effects of long motor leads in ASD applications. IEEE Trans. Ind. Appl. 33, 5 (1997) : 1138-1145.
- [20] J. K. Steinke. Use of an LC filter to achieve a motor-friendly performance of the PWM voltage source inverter. IEEE Trans. Energy Conversion vol.14, 3 (1999) : 649-654.
- [21] H. Akagi, H. Hasegawa and T. Doumoto. Design and performance of a passive EMI filter for use with a voltage-source PWM inverter having sinusoidal output voltage and zero common-mode voltage. IEEE Trans. Power Electronic 19, 4 (2004) : 1069-1076.
- [22] H. Akagi and T. Doumoto. An approach to eliminating high-frequency shaft voltage and ground leakage current from an inverter-driven motor. IEEE Trans. Ind. Appl. 40, 4 (2004) : 1162-1169.
- [23] H. Akagi and S. Tamura. A Passive EMI Filter for Eliminating Both Bearing Current and Ground Leakage Current From an Inverter-Driven Motor. IEEE Trans. Power Electronics 21, 5 (2006) : 1459-1469.
- [24] I. Takahashi, A. Ogata, H. Kanazawa and A. Hirumi. Active EMI filter for switching noise of high frequency inverters. PCC Conference Proceedings 1 (1997) : 331-334.
- [25] S. Ogasawara, H. Ayano and H. Akagi. An active circuit for cancellation of common-mode voltage generated by a PWM inverter. IEEE Trans. Power Electronics 13, 5 (1998) : 835 – 841.
- [26] S. Ogasawara and H. Akagi. Suppression of common-mode voltage in a PWM rectifier/inverter system. Conf. Rec. of IEEE-IAS. 3 (2001) : 2015-2021.
- [27] J. Yanshu, X. Dianguo and C. Xiyu. Analysis and design of a feed-forward-type active filter to eliminate common-mode voltage generated by a PWM inverter. Conf. Rec. of IEEE-IECON 1 (2002) : 771-775.

- [28] Y. -C. Son and S. -K. Sul. A new active common mode EMI filter for PWM inverter. IEEE Trans. Power Electronics 18, 6 (2003) : 1309-1314.
- [29] A. Kempster, R. Smolenski, E. Kot and Z. Fedyczak. Active and passive series compensation of common mode voltage in adjustable speed drive system. Conf. Rec. of IEEE-IAS. 4 (2004) : 2665-2671.
- [30] Y. Q. Xiang. A novel Active Common-mode-voltage Compensator (ACCom) for bearing current reduction of PWM VSI-fed induction motors. APEC Conference Proceedings 2 (1998) : 1003-1009.
- [31] A. Von Jouanne, P. Enjeti and W. Gray. The effect of long motor leads on PWM inverter fed AC motor drive systems. in Proc. 10th Annu. Appl. Power Electron. Conf. Expo 2 (1995) : 592-597.
- [32] A. F. Moreira, T. A. Lipo, G. Venkataramanan, and S. Bernet. High-frequency modeling for cable and induction motor overvoltage studies in long cable drives. IEEE Trans. Ind. Appl. 38, 5 (Sep./Oct. 2002) : 1297–1306.
- [33] W. Shen, F. Wang and D. Boroyevich. Conducted EMI characteristic and its implications to filter design in 3-phase diode front-end converters. Conf. Rec. of IEEE-IAS. 3 (2004) : 1840-1846.
- [34] S. Qu and D. Chen. Mixed-mode EMI noise and its implications to filter design in off line switching power supplies. IEEE Trans. Power Electronics 17, 4 (2002) : 502 –507.
- [35] D. Zhang and D. Y. Chen. Non-intrinsic differential mode noise in switching power supplies. Conf. Rec. of IEEE-PESC (1998).



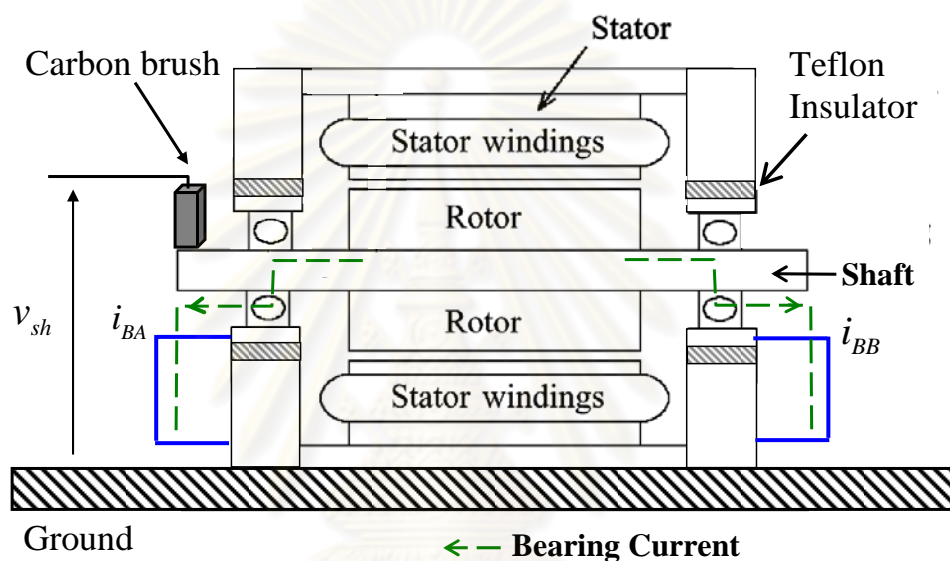
ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การตัดแปลงมอเตอร์เพื่อการตรวจวัดแรงดันเพลลาและกระแสตลับลูกปืน

กระแสตลับลูกปืนและแรงดันเพลลาสามารถตรวจวัดได้ตามการติดตั้งในรูปที่ ก.1 ซึ่งมีการแทรกฉนวนฟิล์มเทฟลอนระหว่างตลับลูกปืนกับโครงมอเตอร์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการตัดแปลงมอเตอร์เพื่อแทรกฉนวนสำหรับวัดกระแสตลับลูกปืน

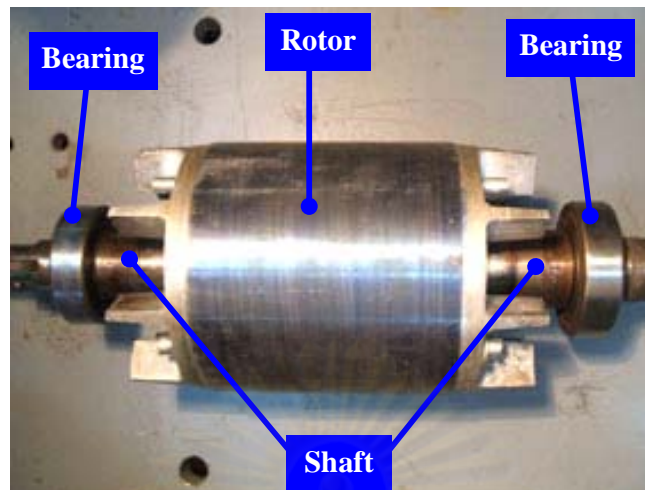


รูปที่ ก.1 การวัดแรงดันเพลลา (v_{sh}) และกระแสตลับลูกปืน (i_{BA}, i_{BB})

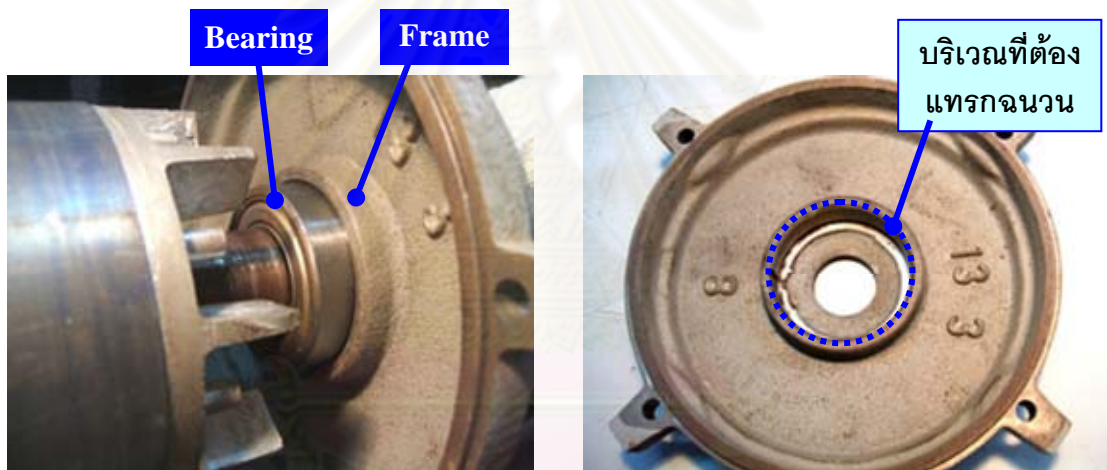
การแทรกฉนวนฉนวนระหว่างตลับลูกปืนและโครงมอเตอร์

ที่ปลายเพลลาของมอเตอร์จะมีตลับลูกปืนติดอยู่ทั้งสองด้าน ดังรูปที่ ก. 2 การสัมผัสกันระหว่างตลับลูกปืนและโครงมอเตอร์ส่วนที่เป็นฝาครอบจะเกิดขึ้นเมื่อ ฝาครอบของมอเตอร์ถูกสวมเข้ากับตลับลูกปืนดังแสดงในรูปที่ ก.3 ก) ดังนั้นเพื่อให้องค์ประกอบของมอเตอร์ทั้ง 2 ส่วนแยกออกจากกันทางไฟฟ้า จะต้องแทรกฉนวนเพื่อแยกพื้นผิวส่วนที่สัมผัสกันทั้งหมดตามแนวพื้นที่ภายในวงกลมตามเส้นประดังรูปที่ ก.3 ข)

งานวิทยานิพนธ์นี้จะแทรกฉนวนระหว่างตลับลูกปืนกับโครงมอเตอร์ โดยใช้แผ่นฉนวนฟิล์มเทฟลอนซึ่งมีความหนา 1.0 mm ดังนั้นจะต้องมีการกลึงเนื้อโลหะของฝาโครงมอเตอร์ออกหนาเท่ากับ 1.0 mm (ในบริเวณพื้นผิวที่ตลับลูกปืนสัมผัสกับโครงมอเตอร์ดังรูปที่ ก.3 ข)) เพื่อให้เมื่อแทรกฉนวนแล้วช่องของฝาโครงมอเตอร์ยังคงมีขนาดเท่าเดิมและสามารถรองรับเพลลาได้พอดี ลักษณะของฝาโครงมอเตอร์เมื่อแทรกฉนวนแล้วแสดงได้ดังรูปที่ ก.4



รูปที่ ก.2 ภาพแสดงโรเตอร์, เฟลา และตลับลูกปืนของมอเตอร์



ก) การสวมฝาครอบของมอเตอร์เข้ากับตลับลูกปืน

ข) บริเวณพื้นผิวที่ตลับลูกปืนสัมผัสกับโครงมอเตอร์

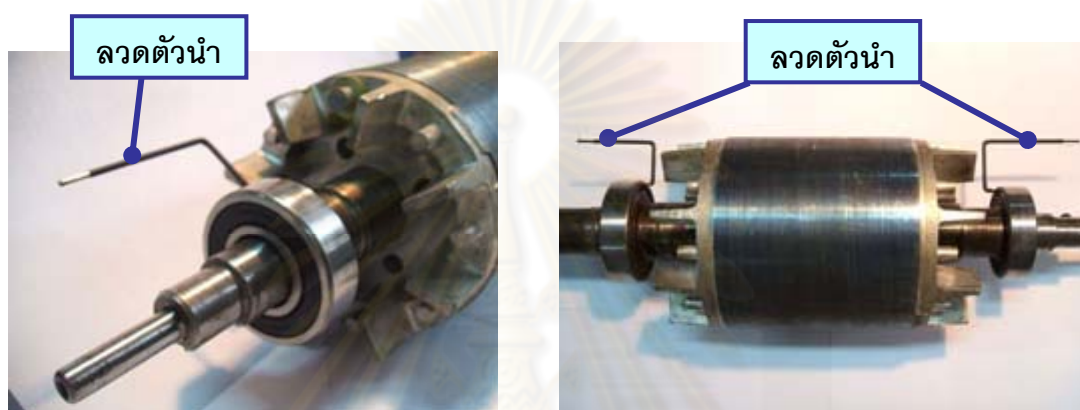
รูปที่ ก.3 การสัมผัสกันระหว่างตลับลูกปืนกับโครงมอเตอร์ส่วนที่เป็นฝาครอบ



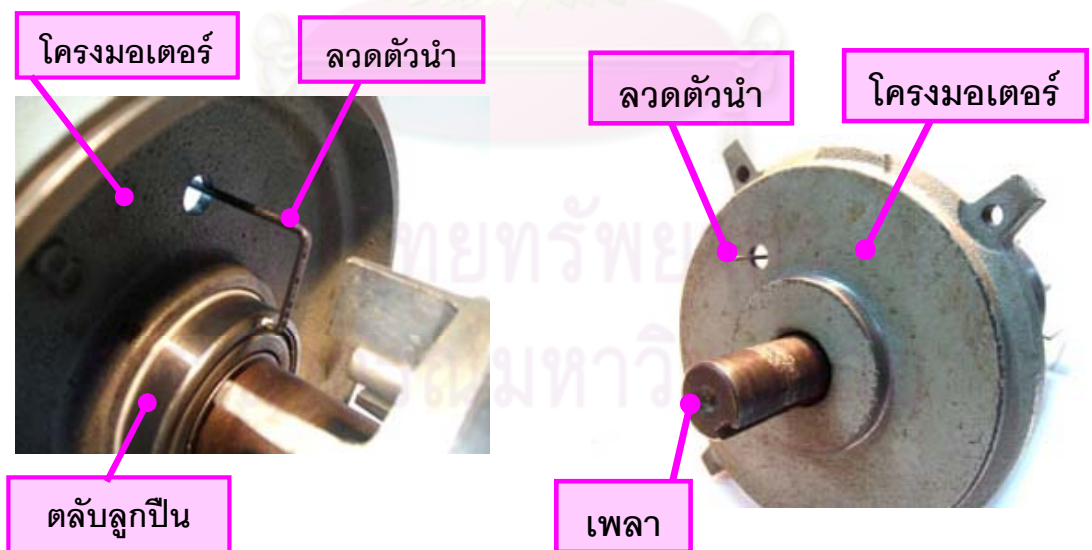
รูปที่ ก.4 ฝาโครงมอเตอร์ทั้งสองด้านเมื่อแทรกฉนวนฟิล์มเทฟลอน

การเชื่อมลวดตัวนำระหว่างตลับลูกปืนกับโครงมอเตอร์เพื่อวัดกระแสตลับลูกปืน

เมื่อแทรกจนวนระหว่างตลับลูกปืนและโครงมอเตอร์แล้ว จะสามารถวัดกระแสตลับลูกปืนได้จากกระแสที่ไหลผ่านตัวนำซึ่งเชื่อมต่อระหว่างรางด้านนอกของตลับลูกปืนกับโครงมอเตอร์ วิทยานิพนธ์นี้จะเชื่อมลวดตัวนำไว้ที่รางด้านนอกของตลับลูกปืนและต่อยื่นออกมาที่ด้านนอกของโครงมอเตอร์ผ่านช่องที่เจาะไว้ ลักษณะการเชื่อมตัวนำไว้ที่รางด้านนอกของตลับลูกปืนจะแสดงดังรูปที่ ก.5 และ ก.6



ก) ลักษณะลวดตัวนำที่เชื่อมติดกับรางตลับลูกปืน ข) ลักษณะปลายเพลลาทั้งสองด้านเมื่อเชื่อมลวดตัวนำ
รูปที่ ก.5 การเชื่อมตัวนำที่รางด้านนอกของตลับลูกปืน

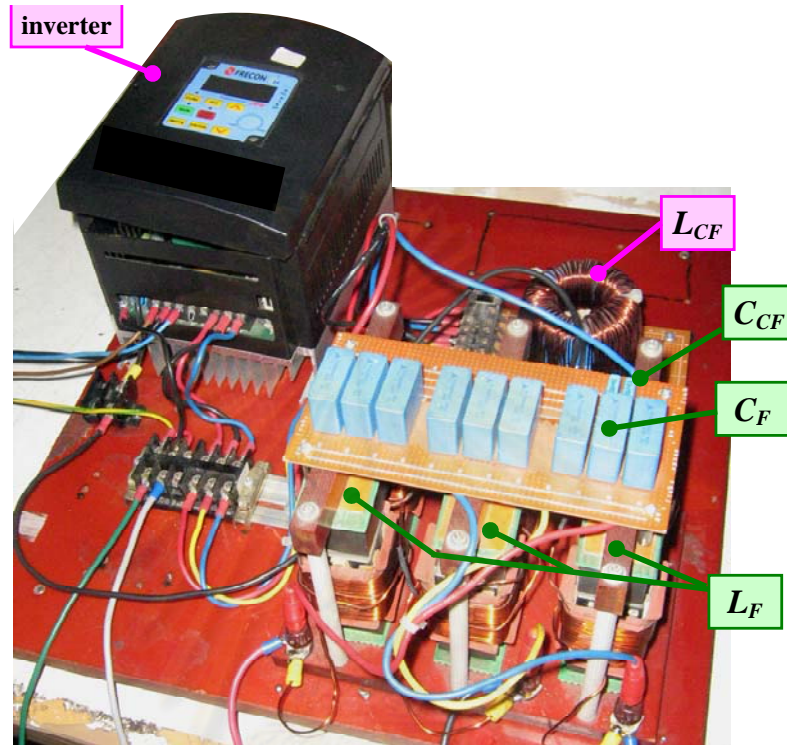


ก) การสวมฝาโครงมอเตอร์เข้ากับตลับลูกปืน ข) ภาพด้านนอกเมื่อสวมฝาโครงมอเตอร์เข้ากับตลับลูกปืน

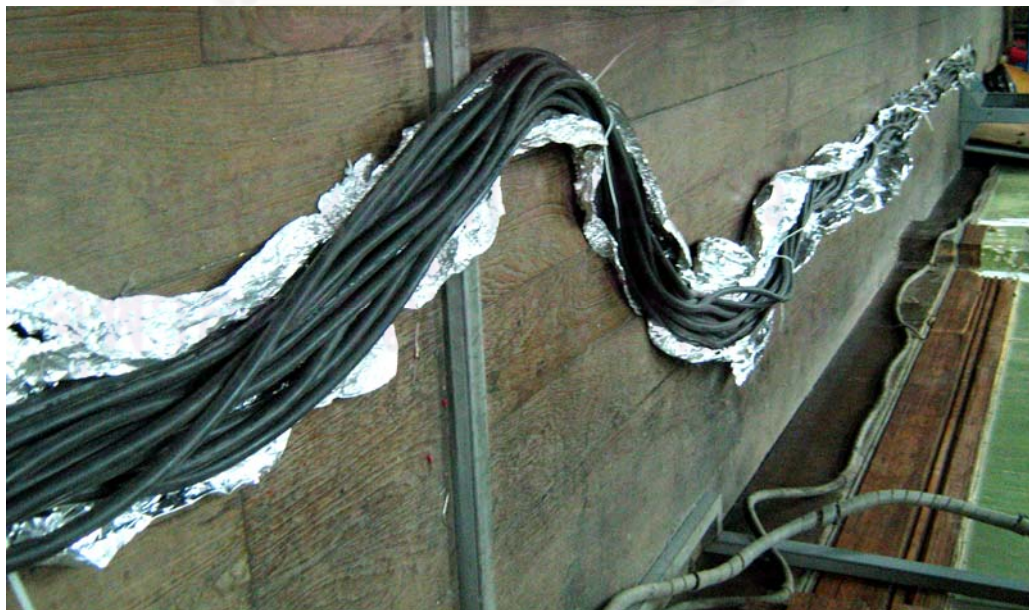
รูปที่ ก.6 ลักษณะลวดตัวนำเมื่อสวมฝาโครงมอเตอร์เข้ากับตลับลูกปืน

ภาคผนวก ข

การทดลองและจำลองระบบแสดงการเกิดปรากฏการณ์การอัดประจุสไฟตรง



ก) อินเวอร์เตอร์และวงจรกรองพาสซีฟ



ข) สายเคเบิลด้านออก

รูปที่ ข.1 ระบบที่ใช้ทดลองแสดงการเกิดปรากฏการณ์การอัดประจุสไฟตรง

ระบบที่ใช้ทดลองแสดงการเกิดปรากฏการณ์การอัดประจุบัสไฟตรงจะแสดงดังรูปที่ ข.1
องค์ประกอบส่วนต่าง ๆ ของระบบจะมีค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญดังนี้

อินเวอร์เตอร์: พิกัดแรงดัน 380 V (แรงดันบัสไฟตรง 540 V)

ความถี่ด้านออก $f_o = 50\text{ Hz}$, ความถี่การสวิตช์ $f_{sw} = 1-10\text{ kHz}$

ตัวเก็บประจุบัสไฟตรง $280\ \mu\text{F}$

ตัวเก็บประจุแบบแผ่ระหว่างบัสไฟตรงกับซึ่งกระจายความร้อน $C_h = 2\text{ nF}$

กำลังสูญเสียของอินเวอร์เตอร์ประมาณ 65 W

สายเคเบิลที่ด้านออก: สายหุ้มฉนวน PVC ยาว 100 เมตร

ความจุไฟฟ้าแบบแผ่ระหว่างสายเคเบิลและระหว่างสายเคเบิลกับกราวด์

$\sum C_s = 13\text{ nF/เฟส}$ และความเหนี่ยวนำสายเคเบิล $\sum L_o = 228\ \mu\text{H/เฟส}$

มอเตอร์: พิกัด 2Hp, แรงดัน 380 V , กระแส 3.6 A, ความถี่ทำงาน 50 Hz

วงจรกรองด้านออกแบบพาสซีฟ:

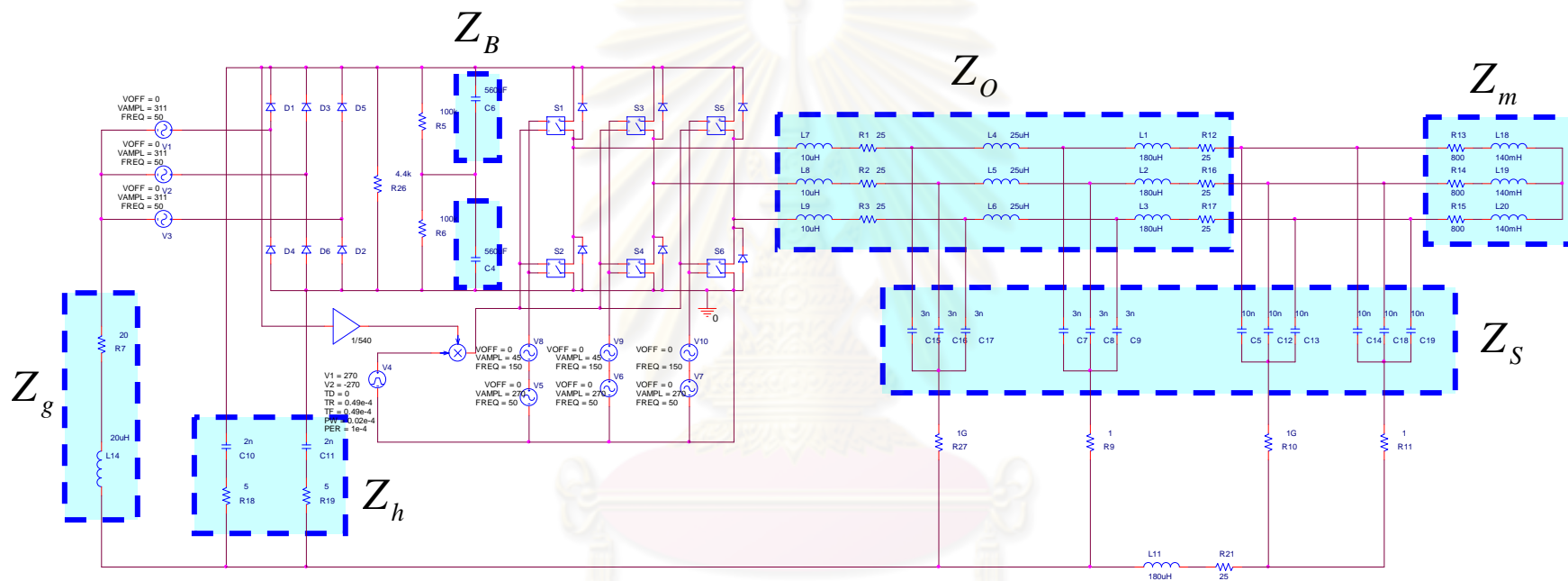
- กรณีที่เป็นชนิด 3 เฟส 3 สาย: ตัวเหนี่ยวนำ $L_F = 4\text{ mH/เฟส}$, ตัวเก็บประจุ $C_F = 3\ \mu\text{F/เฟส}$
- กรณีที่เป็นชนิด 3 เฟส 4 สาย: ตัวเหนี่ยวนำ $L_F = 4\text{ mH/เฟส}$, ตัวเก็บประจุ $C_F = 3\ \mu\text{F/เฟส}$
ตัวเหนี่ยวนำโหมคร่วม $L_{CF} = 4\text{ mH}$,
ตัวเก็บประจุ $C_{CF} = 3\ \mu\text{F/เฟส}$

การผลจำลองระบบเพื่อทดสอบในกรณีต่างๆ จะแสดงได้ดังรูปที่ ข.2 - ข.4 และมีอิมพีแดนซ์
ของวงจรส่วนต่างๆ ที่อ้างอิงจากระบบที่ใช้ทดลองจริงคือ

ระบบขับเคลื่อน $Z_g : R_g = 20\ \Omega$, $L_g = 20\ \mu\text{H}$, $Z_B : C_B = 560\ \mu\text{F}$, $Z_h : C_h = 2\text{ nF}$,

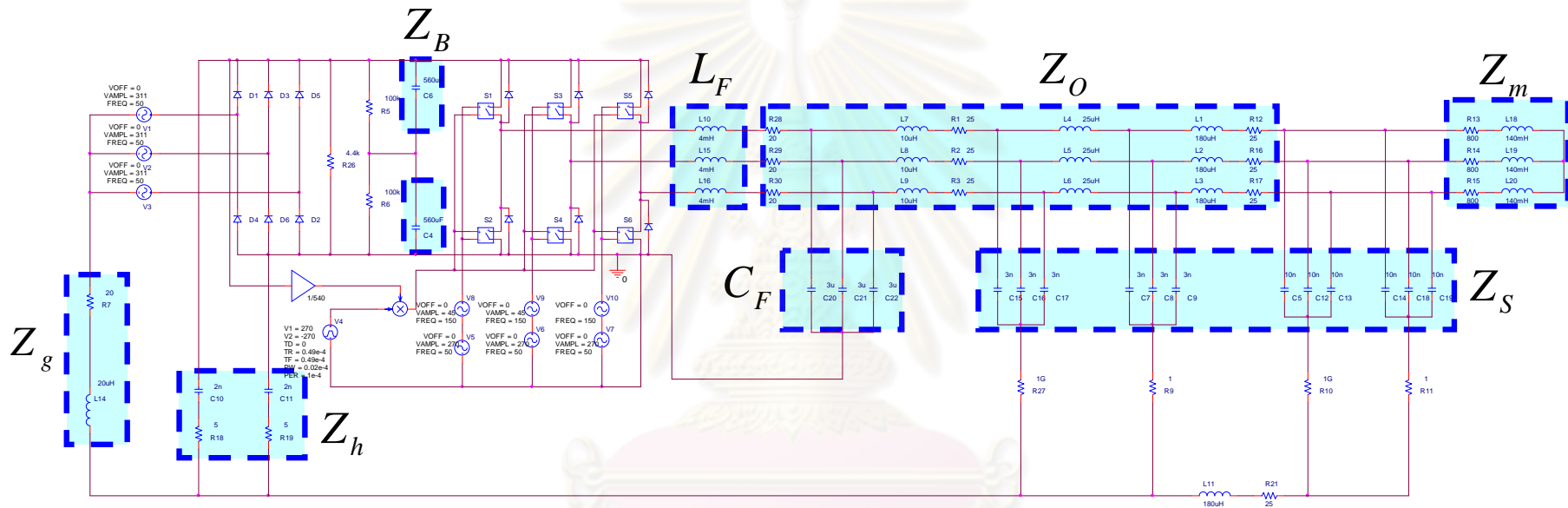
$Z_o : R_o = 50\ \Omega$, $L_o = 228\ \mu\text{H}$, $Z_m : R_m = 2\text{ k}\Omega$, $L_m = 140\text{ mH}$ และ $Z_s : C_s = 0.2\ \mu\text{F}$

วงจรกรองด้านออกแบบพาสซีฟ: $L_F = 4\text{ mH}$, $C_F = 3\ \mu\text{F}$, $L_{CF} = 90\text{ mH}$, $C_{CF} = 22\text{ nF}$



รูปที่ ๓.2 การจำลองระบบระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ในภาวะไร้อโหลดที่มีสายเคเบิลด้านออกยาวมาก (แสดงผลจำลองในหัวข้อที่ 4.1)

ศูนย์วิจัยทรัพยากรทาง
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



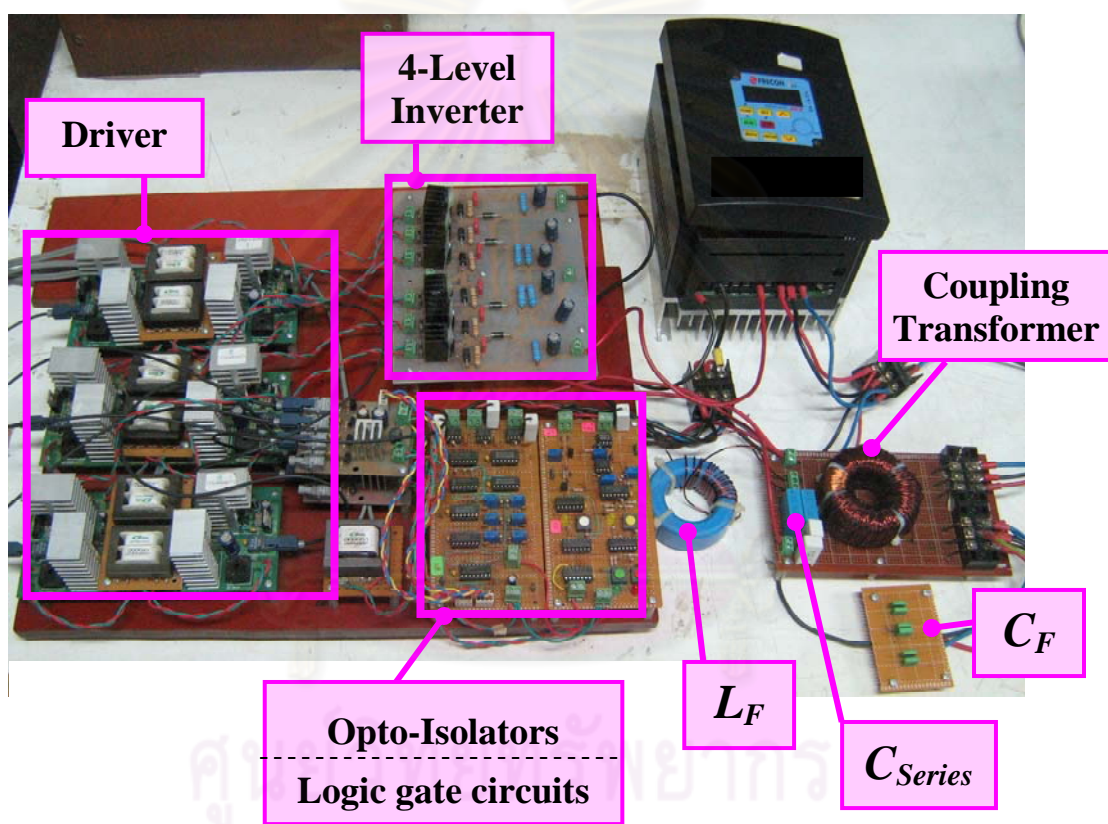
รูปที่ ข.3 การจำลองระบบระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ในภาวะไร้โหลดที่มีสายเคเบิลด้านออกยาวมากและมีการติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ชนิด 3 เฟส 3 สาย (แสดงผลจำลองในหัวข้อที่ 4.2)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

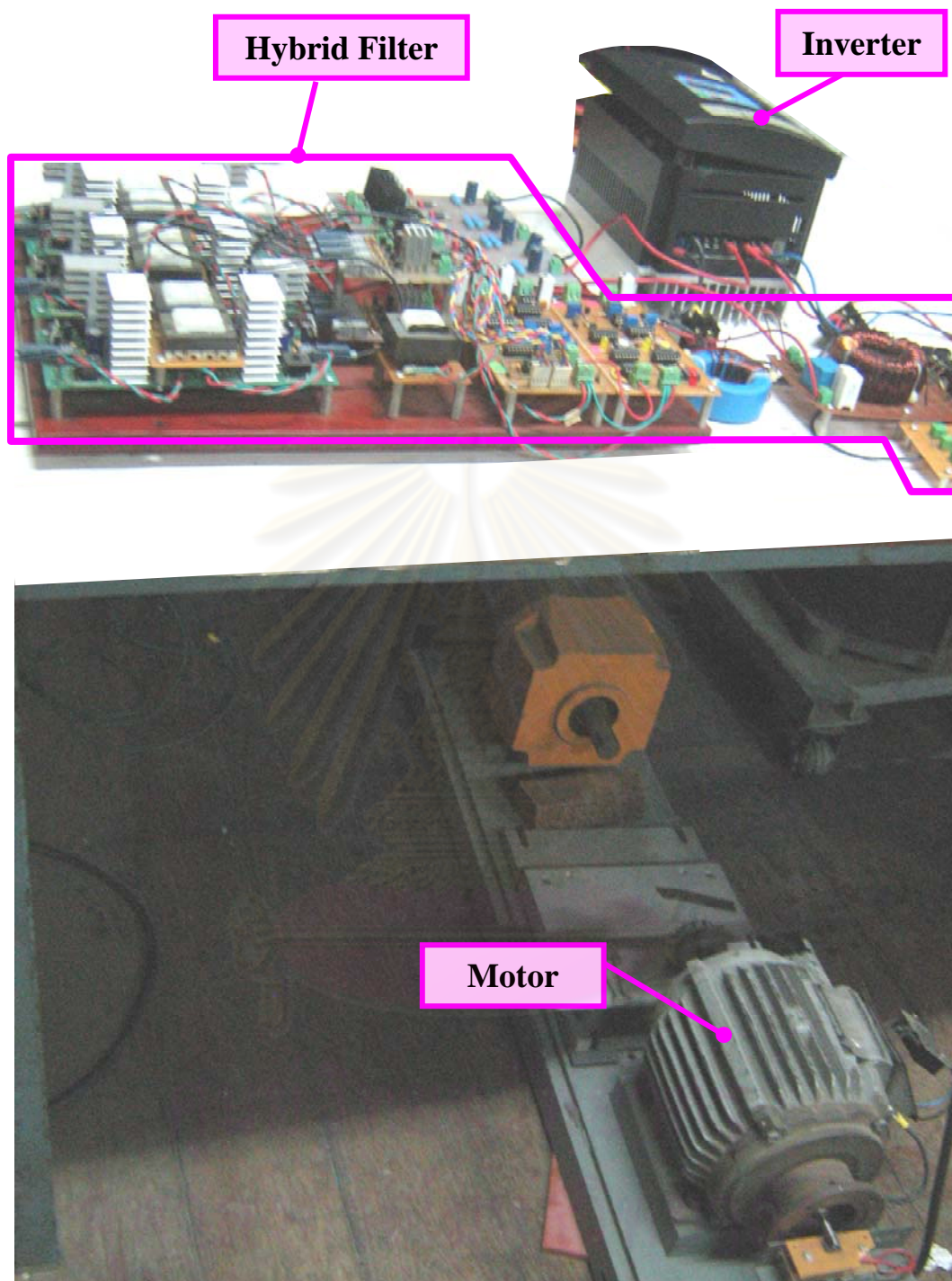
ภาคผนวก ค

การทดลองระบบแสดงสมรรถนะของวงจรกรองด้านออกแบบไฮบริดชนิดใหม่

วงจรกรองด้านออกแบบไฮบริดที่นำเสนอจะมีวงจรมีดังรูปที่ ข.1 และการติดตั้งระบบเพื่อใช้ทดลองแสดงสมรรถนะของวงจรกรองจะแสดงดังรูปที่ ข. 2



รูปที่ ค.1 วงจรกรองด้านออกแบบไฮบริดชนิดใหม่



รูปที่ ค. 2 การติดตั้งระบบเพื่อใช้ทดลองสมรรถนะของวงจรกรองแบบไฮบริด

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว เพ็ญนภา ไพโรจน์อมรชัย เกิดเมื่อวันที่ 9 ตุลาคม พ.ศ.2522 สำเร็จการศึกษา
ระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอม
เกล้าพระนครเหนือในปี พ.ศ. 2545 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปี พ.ศ. 2548 และได้เข้าศึกษาต่อใน
หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2548



ศูนย์วิทยพัชร์พยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย