

การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบสัญญาณขนาดเล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
พลังงานลมและการแทรกซ้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของ
คอนเวอร์เตอร์แบบตัวซดเซย

SMALL SIGNAL STABILITY ANALYSIS OF WIND GENERATORS
AND EMI OF THE COMPENSATING CONVERTERS

นิमित บุญภิรมย์
NIMIT BOONPIROM

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

KMITL-2007-EN-D-018-132

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบสัญญาณขนาดเล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
พลังงานลมและการแทรกซ้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของ
คอนเวอร์เตอร์ที่เป็นตัวชดเชย

SMALL SIGNAL STABILITY ANALYSIS OF WIND GENERATORS
AND EMI OF THE COMPENSATING CONVERTERS



นิमित บุญภิรมย์

NIMIT BOONPIROM

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 77955
วัน,เดือน,ปี 12 ก.พ. 2551

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2550

KMITL-2007-EN-D-018-132

**SMALL SIGNAL STABILITY ANALYSIS OF WIND GENERATORS
AND EMI OF THE COMPENSATING CONVERTERS**

NIMIT BOONPIROM

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2007

KMITL-2007-EN-D-018-132

COPYRIGHT2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบสัญญาณขนาดเล็กของ
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมและการแทรกซ้อนของ
คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นตัวชดเชย

นักศึกษา

นายนิมิต บุญภิรมย์

รหัสนักศึกษา

43060019

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

พ.ศ.

2550

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.กิตติ ไพบูลย์วัฒนกิจ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

รศ.ดร.โยธิน เปรมปราณิรัชต์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการศึกษาการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบสัญญาณขนาดเล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมและการแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นตัวชดเชยเพื่อรักษาเสถียรภาพ โดยจะนำเสนอแบบจำลองพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่เชื่อมโยงระบบกริด หาค่าตัวแปรเริ่มต้นที่ไม่ทราบค่าด้วยการคำนวณการไหลของไหลในกรณีที่กำลังไฟฟารีแอกทีฟไม่คงที่ ศึกษาเสถียรภาพแบบสัญญาณขนาดเล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะที่ยังไม่มีตัวชดเชยด้วยวิธีวิเคราะห์ค่าไอเกน ที่สายส่งกำลังไฟฟ้าความยาวตั้งแต่ 10 กิโลเมตร ถึง 50 กิโลเมตร เพิ่มระยะครั้งละ 5 กิโลเมตร หาคความยาวสูงสุดของสายส่งกำลังไฟฟ้าก่อนเสถียรภาพ และศึกษาการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อขนานกัน ศึกษาผลกระทบของการแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นตัวชดเชยเสถียรภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม ปรับปรุงเพื่อลดการแทรกซ้อนของแม่เหล็กในสายส่งกำลังไฟฟ้า โดยลดสัญญาณรบกวนโหมคร่วม ด้วยการปรับความสมดุลให้กับคอนเวอร์เตอร์ ศึกษาสาเหตุของความไม่สมดุลของคอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์เดี่ยวแบ่งประเภทของความไม่สมดุล และปรับความสมดุลในคอนเวอร์เตอร์ 5 แบบ คือ คอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์เดี่ยว คอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์คู่ คอนเวอร์เตอร์แบบ 4 สวิทช์ คอนเวอร์เตอร์แบบ 6 สวิทช์ และคอนเวอร์เตอร์แบบ วี เอส ซี ประเมินผลความสมดุลโดยใช้อัตราส่วนคอมมอนโหมครีเจกชัน และวัดสัญญาณของสัญญาณรบกวนโหมคร่วมในกรณีก่อนและหลังการปรับความสมดุลทั้งในโดเมนเวลา และโดเมนความถี่ ตามลำดับ

Thesis Title	Small Signal Stability Analysis of Wind Generator s and EMI of the Compensating Converters
Student	Mr. Nimit Boonpirom
Student ID.	43060019
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2007
Thesis Advisor	Assoc.Prof. Dr.Kitti Paithoonwattanakij
Thesis Co-advisor	Assoc.Prof. Dr.Yothin Prempraneerach

ABSTRACT

This thesis focuses on the small signal stability analysis of wind generator and EMI of the compensating converter. First, the mathematical model of wind turbine fixed-speed induction generator with grid connection is proposed. For the small signal stability analysis of induction generator without compensation, the eigen-value analysis and load flow computation for the fixed-speed induction generator in case of 10 to 50 km transmission line variation length are employed for investigating the critical stability margin of transmission line distance. Also, the active power distribution and reactive power absorption of induction generator for generator group variation are obtained. Second, the conducted EMI emission of converter compensator which is included in fixed-speed wind farm induction generator system is investigated by studying the system imbalance effect. Moreover, the imbalance structures of converter are classified, and specially improved by double-switch converter and hybrid balance based on system balance improvement. As the results, this common mode noise reduction technique can significantly improve single-switch converter, four-switches converter, six-switches converter and voltage source converter (VSC) respectively. The experimental results illustrate the wave form of balance common mode noise voltage and the spectrum of common mode noise voltage in case of double-switch converter, hybrid balance converter, six-switches converter and voltage source converter (VSC). Furthermore, the degree of system balance is evaluated by common mode rejection ratio.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยคำปรึกษา และได้รับประสิทธิประสาทวิชาความรู้จาก รศ.ดร.กิตติ ไพฑูรย์วัฒนกิจ รศ.ดร.โยธิน เปรมปราณีรัชต์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.พิชัย อารีย์ ผศ.พนาฤทธิ์ เศรษฐกุล และ ดร.ไกรสร อัญชลีวรพันธุ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา และชี้แนะการแก้ปัญหาต่าง ๆ ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ดร. รัชนิพร พุคยาภรณ์ พุกกะมาน อธิการบดี มหาวิทยาลัยศรีปทุมเป็นอย่างสูง ที่ให้ความเอื้อเพื่อโอกาสและสนับสนุนทุนการศึกษา ตลอดหลักสูตร

ขอขอบคุณศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (ศทอ.) ศูนย์นวัตกรรมไทย-ฝรั่งเศส สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ได้สนับสนุนเครื่องมือทดสอบเป็นอย่างดี และขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่สนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

คุณประโยชน์ใด ๆ อันพึงประโยชน์จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผู้จัดทำขออุทิศให้แก่ บิดา มารดา บุรพคณาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

นิमित บุญภิรมย์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	XIV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	4
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	5
1.4 ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	6
1.5 ขอบเขตของการศึกษา.....	7
1.6 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์โดยสังเขป.....	7
บทที่ 2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม.....	11
2.1 ประสิทธิภาพของการขับเคลื่อนด้วยพลังงานลม.....	11
2.2 การส่งผ่านกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม.....	13
2.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม.....	16
2.3.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่.....	16
2.3.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบปรับความเร็ว.....	16
2.3.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส.....	17
2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ.....	18
2.4.1 สมการแรงดันที่ตัวอยู่กับที่และแรงดันที่ตัวหมุน.....	19
2.4.2 สมการเส้นแรงแม่เหล็กเชื่อมโยง.....	20
2.4.3 สมการแรงดันตัวอยู่กับที่และตัวหมุนในรูปสมการหนึ่งหน่วย.....	21
2.4.4 สมการพีชคณิตของแรงดันไฟฟ้าที่ตัวอยู่กับที่.....	21
2.4.5 สมการพลวัตของแรงดันไฟฟ้าที่ตัวอยู่กับที่.....	22
2.4.6 สมการแรงบิด.....	22

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5	สมการเชิงเส้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่.....	23
บทที่ 3	การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบสัญญาณขนาดเล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า พลังงานลมต่อเชื่อมกับกริด.....	26
3.1	ขั้นตอนการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบสัญญาณขนาดเล็ก.....	26
3.2	สมการเชิงเส้นของสมการสายส่งกำลังไฟฟ้าต่อเชื่อมกับกริด.....	26
3.3	การหาสมการเชิงเส้นของกำลังไฟฟ้า.....	31
3.4	การหาค่าเริ่มต้นของการศึกษาด้วยการคำนวณการไหลของโหลด.....	32
3.5	การศึกษาค่าเสถียรภาพแบบสัญญาณขนาดเล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม ด้วยการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	34
3.5.1	การกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ศึกษา.....	35
3.5.2	คำนวณหาค่าเริ่มต้นของแบบจำลองด้วยวิธีการคำนวณการไหลของโหลด.....	35
3.5.3	การศึกษาเพื่อหาการแปรเปลี่ยนของค่าไอเกน เมื่อระยะเวลาความยาว ของสายส่งกำลัง เปลี่ยนแปลง.....	36
3.5.4	การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบสัญญาณขนาดเล็ก เมื่อจำนวนเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง.....	40
3.6	สรุปการศึกษาเสถียรภาพแบบสัญญาณขนาดเล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า พลังงานลมด้วย การจำลอง.....	43
บทที่ 4	การแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นตัวขดเชยในเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าพลังงานลม.....	45
4.1	การแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าจากคอนเวอร์เตอร์ของตัวขดเชย.....	46
4.2	นิยามพื้นฐานของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	47
4.3	กลไกการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าบนอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์.....	48
4.4	การเกิดการแทรกซ้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	49
4.4.1	การแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านตัวนำ.....	50
4.4.2	การแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศ.....	50
4.4.3	การแพร่กระจายจากสัญญาณรบกวนโหมดต่าง.....	51
4.4.4	การแพร่กระจายจากสัญญาณรบกวนโหมดร่วม.....	53

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5 การทดสอบการแทรกซ้อนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	56
4.5.1 มาตรฐานด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	56
4.5.2 การทดสอบการแทรกซ้อนแม่เหล็กไฟฟ้าทางตัวนำไฟฟ้า.....	57
4.6 แนวคิดของความสมดุลและไม่สมดุลของวงจรคอนเวอร์เตอร์.....	58
4.6.1 การป้องกันและการขจัดกระแสรบกวนโหมคร่วม.....	58
4.6.2 แนวคิดและการปรับความไม่สมดุลของวงจรคอนเวอร์เตอร์.....	58
4.7 ความไม่สมดุลของวงจรคอนเวอร์เตอร์ชนิดสวิตช์เดี่ยว.....	61
4.7.1 ส่วนประกอบสำคัญของความไม่สมดุลวงจรคอนเวอร์เตอร์ชนิดสวิตช์เดี่ยว.....	61
4.7.2 ความไม่สมดุลในสถานะสวิตช์นำกระแส.....	63
4.7.3 ความไม่สมดุลในสถานะปิด.....	65
4.8 การความสมดุลแบบแอกทีฟของวงจรคอนเวอร์เตอร์โดยใช้ตัวสวิตช์ชนิดคู่.....	66
4.8.1 ความสมดุลของคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์คู่ ในสถานะสวิตช์นำกระแส.....	67
4.8.2 ความสมดุลของคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์คู่ ในสถานะสวิตช์หยุดนำ กระแส.....	68
4.9 การปรับความสมดุลของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์คู่ โดยใช้การปรับสมดุล แบบไฮบริดจ์.....	68
4.9.1 ความสมดุลของคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์คู่โดยใช้การปรับความสมดุล แบบไฮบริดจ์เมื่อสวิตช์นำกระแส.....	69
4.9.2 ความสมดุลของคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์คู่โดยใช้การปรับความสมดุล เมื่อสวิตช์หยุดนำกระแส.....	71
4.10 การแพร่ของสัญญาณรบกวนโหมคร่วมของวงจร 4 สวิตช์ หรือแบบฟูลบริดจ์.....	71
4.11 การแพร่ของสัญญาณรบกวนโหมคร่วมของวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ใน เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม.....	73
4.11.1 การแพร่กระจายของสัญญาณรบกวนโหมคร่วมในวงจรอินเวอร์เตอร์.....	74
4.11.2 การแพร่กระจายของสัญญาณรบกวนโหมคร่วมในวงจรคอนเวอร์เตอร์ แบบ VSC.....	77

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง.....	80
5.1 การวัดเพื่อเปรียบเทียบรูปคลื่นแรงดันและกระแสเอาท์พุทที่โหลดระหว่าง วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดี่ยวและวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์คู่.....	80
5.1.1 การเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง.....	81
5.1.2 การทดลองที่ 1 การวัดค่ารูปคลื่นของแรงดันเอาท์พุทที่ขั้วโหลด และกระแสที่โหลด.....	81
5.1.3 การทดลองที่ 2 การวัดแรงดันเอาท์พุทที่ขั้วโหลดและแรงดันระหว่าง ตกรวมตัวสวิตช์.....	83
5.2 การทดลองวัดแรงดันรบกวนโหมคร่วมที่ขั้วโหลดของคอนเวอร์เตอร์ แบบสวิตช์เดี่ยว แบบสวิตช์คู่และแบบปรับความสมดุลไฮบริดจ์.....	87
5.3 การประเมินผลความสมดุลของวงจรด้วยวิธี CMRR.....	89
5.3.1 การประเมินค่า CMRR ของคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดี่ยว.....	90
5.3.2 การประเมินค่า CMRR ของคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์คู่.....	90
5.3.3 การประเมินค่า CMRR ของคอนเวอร์เตอร์แบบปรับสมดุลไฮบริดจ์.....	90
5.4 การทดลองวัดค่าการตอบสนองเชิงความถี่คลื่นสัญญาณรบกวนโหมคร่วม.....	91
5.5 การทดลองวัดสัญญาณรบกวนโหมคร่วมของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 4 สวิตช์ หรือแบบฟลูบริดจ์.....	94
5.6 การทดลองการลดสัญญาณรบกวนโหมคร่วมโดยใช้หลักการปรับความสมดุล ของวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสและคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบ VSC.....	95
5.6.1 การลดสัญญาณรบกวนโหมคร่วมของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส เมื่อจ่ายแรงดันอินพุท 1 เฟส.....	96
5.6.2 การลดสัญญาณรบกวนโหมคร่วมของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส เมื่อจ่ายแรงดันอินพุท 3 เฟส.....	105
5.6.3 การทดลองการลดสัญญาณรบกวนโหมคร่วมของวงจรคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ VSC โดยใช้วิธีการปรับความสมดุลของเวอร์เตอร์.....	110
5.7 สรุปผลการทดลอง.....	116
บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	119

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม.....	121
ภาคผนวก.....	125
ภาคผนวก ก. การคำนวณแบบจำลองพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	126
ภาคผนวก ข. การแปลงระบบเชิงเส้น (Linearization).....	133
ภาคผนวก ค. วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสมดุคที่นำเสนอวิทยานิพนธ์.....	138
ประวัติผู้เขียน.....	144

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้ในการจำลอง.....	35
3.2 ค่าพารามิเตอร์ของสายส่ง XLPE.....	35
3.3 กลุ่มของค่าไอเกนที่เปลี่ยนแปลงตามระยะความยาวของสายส่งกำลังไฟฟ้า ที่เปลี่ยนแปลง.....	37
3.4 กลุ่มของค่าไอเกนที่เปลี่ยนแปลงตามจำนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	42
5.1 รายละเอียดของการทดลองการวัดเพื่อเปรียบเทียบรูปคลื่นแรงดันและกระแสเอาท์พุท ที่โหลด ระหว่างวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตซ์เดี่ยวและวงจรคอนเวอร์เตอร์ แบบสวิตซ์คู่.....	80
5.2 แสดงขนาดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในการทดลอง.....	81
5.3 แสดงค่าแรงดันและกระแสที่วัดได้จากการทดลอง.....	116
5.4 แสดงค่าแรงดันและกระแสที่วัดได้จากการทดลอง.....	118

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	ขั้นตอนของการศึกษาในวิทยานิพนธ์.....10
2.1	แผนภูมิแบบจำลองและส่วนประกอบโดยทั่วไปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม.....11
2.2	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังลมของใบพัดชนิดต่างๆ.....12
2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดของใบพัดชนิดต่างๆ.....12
2.4	ค่าแรงบิดของมวลขนาดต่างๆ ในแนวแกนเพลลา.....14
2.5	การส่งผ่านกำลังงานกลระหว่างส่วนประกอบทางกล และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....15
2.6	การส่งผ่านกำลังงานกลเมื่อมีเกียร์ลดทอนอัตราส่วน.....15
2.7	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมชนิดต่าง ๆ.....17
2.8	วงจรไฟฟ้าของตัวอยู่กับที่และตัวหมุน.....19
2.9	วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในพิกัด dq0.....20
2.10	ฟังก์ชันการถ่ายโอนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ25
3.1	การเชื่อมโยงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับสายกริด.....27
3.2	วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....33
3.3	การเข้าสู่ค่าคอบของค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟจากการคำนวณการไหลของโหลด.....36
3.4	การเปลี่ยนแปลงของค่าไอเกน เมื่อระยะของสายส่งเปลี่ยนแปลง.....38
3.5	การเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนการแคมป์ เมื่อระยะของสายส่งเปลี่ยนแปลง.....38
3.6	การเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่แคมป์ เมื่อระยะของสายส่งเปลี่ยนแปลง.....39
3.7	การเปลี่ยนแปลงของค่าไอเกนจากตารางที่ 3.3 เมื่อจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง..41
3.8	การเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อจำนวนเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง.....43
3.9	การเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....43
4.1	การใช้คอนเวอร์เตอร์ VSC. ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ DFIG.....46
4.2	โครงสร้างของคอนเวอร์เตอร์แบบ VSC และทิศทางการไหลของกระแสบกววนโหมคร่วม..47
4.3	การเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนในลักษณะต่างๆ.....49
4.4	เส้นทางการเดินของกระแสบกววนโหมคต่าง.....51
4.5	การส่งผ่านสนามแม่เหล็กของกระแสบกววนโหมคต่าง.....52
4.6	เส้นทางการเดินของกระแสในการเชื่อมต่อสัญญาณแบบโหมคร่วม.....53
4.7	วงจรสมมูลของแหล่งจ่ายและสมมูลโหลด.....55

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8	ทิศทางการไหลของกระแสรบกวนโหมคร่วม ของวงจรไม่สมดุล.....56
4.9	วิธีการวัดสัญญาณการแทรกซ้อนผ่านตัวนำโดยใช้ LISN.....57
4.10	โครงสร้างของ LISN ที่ใช้วัดระดับสัญญาณรบกวนในสายตัวนำ.....57
4.11	แนวคิดของความสมดุลและไม่สมดุลของวงจรคอนเวอร์เตอร์.....59
4.12	คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดี่ยว.....62
4.13	วงจรสมมูลของความไม่สมดุลของวงจรคอนเวอร์เตอร์ แบบสวิตช์เดี่ยว.....63
4.14	วงจรสมมูลของความสมดุลของวงจรคอนเวอร์เตอร์ แบบสวิตช์คู่.....66
4.15	โครงสร้างของคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์คู่.....67
4.16	โครงสร้างของคอนเวอร์เตอร์ที่มีการปรับความสมดุลแบบไฮบริดจ์.....69
4.17	โครงสร้างของคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์คู่ที่ใช้การปรับความสมดุลแบบไฮบริดจ์.....70
4.18	วงจรสมมูลของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์.....72
4.19	วงจรสมมูลของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ขณะ Q_1 และ Q_2 นำกระแส.....73
4.20	วงจรสมมูลของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ขณะ Q_3 และ Q_4 นำกระแส.....73
4.21	แสดงโครงสร้างของคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....74
4.22	แสดงโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ที่จ่ายแรงดัน 1 เฟส.....74
4.23	วงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์ที่ยังไม่สมดุล.....75
4.24	ทิศทางการไหลของกระแสรบกวนโหมคร่วมและโหมคต่างขณะยังไม่สมดุล.....76
4.25	วงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์หลังปรับสมดุล.....76
4.26	อินเวอร์เตอร์ที่จ่ายแรงดันอินพุท 3 เฟสที่ไม่สมดุล.....77
4.27	อินเวอร์เตอร์ 3 เฟสที่หลังปรับความสมดุล.....77
4.28	คอนเวอร์เตอร์แบบ VSC หลังปรับความสมดุล.....78
4.29	การไหลของกระแสโหมคร่วมหลังปรับความสมดุล.....78
5.1	วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....82
5.2	สัญญาณแรงดันที่ขั้วของมอเตอร์และกระแสที่ไหลในอาร์เมเจอร์ในสภาวะเปิด.....83
5.3	สัญญาณแรงดันที่ขั้วโพลและกระแสที่ไหลในอาร์เมเจอร์ในสภาวะปิด.....83
5.4	สัญญาณแรงดันที่ขั้วโพลและแรงดันที่ตกคร่อมเดรนซอสของมอสเฟตขณะสวิตช์ นำกระแส.....84

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.6 สัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมสวิทช์และกระแสที่ไหลผ่านตัวสวิทช์	85
5.7 รูปขยายสัญญาณแรงดันตกคร่อมสวิทช์และ กระแสที่ไหลผ่านสวิทช์ขณะที่สวิทช์.....	85
5.8 รูปขยายสัญญาณแรงดันตกคร่อมสวิทช์และ กระแสที่ไหลผ่านสวิทช์ขณะที่สวิทช์หยุด นำกระแส.....	86
5.9 รูปสัญญาณแรงดันรบกวนโหมคร่วมที่ขั้วโหลด (V_{AFG} , V_{BFG}) และผลรวมของ ทั้งสองแรงดัน (V_{SUM}) ของคอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์เดี่ยว.....	88
5.10 รูปสัญญาณแรงดันรบกวนโหมคร่วมที่ขั้วโหลด (V_{AFG} , V_{BFG}) และ ผลรวมของ ทั้งสองแรงดัน (V_{SUM}) ของคอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์คู่.....	88
5.11 รูปสัญญาณแรงดันรบกวนโหมคร่วมที่ขั้วโหลด (V_{AFG} , V_{BFG}) และผลรวมของ ทั้งสองแรงดัน (V_{SUM}) ของคอนเวอร์เตอร์แบบปรับความสมดุลไฮบริดจ์.....	89
5.12 โครงสร้างของการวัดคลื่นสัญญาณรบกวนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวนำ.....	92
5.13 เครื่องมือวัดคลื่นสัญญาณรบกวนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวนำ.....	92
5.14 ค่าสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนโหมคร่วมในตัวนำของ คอนเวอร์เตอร์.....	93
5.15 ค่าสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนโหมคร่วมในตัวนำของคอนเวอร์เตอร์.....	93
5.16 วงจรการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์.....	96
5.17 ค่าสเปกตรัมของแรงดันที่วัดได้จากวงจรคอนเวอร์เตอร์ปรับความสมดุลแบบฟูลบริดจ์.....	96
5.18 วงจรทดลองความไม่สมดุลของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสที่มี โหลดต่อแบบวาย.....	97
5.19 สัญญาณแรงดันรบกวนโหมคร่วมที่สายเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงกับเฟรมกราวด์ก่อน ปรับความสมดุล.....	97
5.20 ภาพขยายแรงดันรบกวนโหมคร่วมที่สายป้อนแรงดันกระแสตรงกับเฟรมกราวด์ ก่อนปรับความสมดุล.....	98
5.21 การปรับความสมดุลทั้ง 3 ส่วน.....	99
5.22 สัญญาณแรงดันรบกวนโหมคร่วมที่วัดระหว่างสายส่งกับสายกลับของสายป้อนแรงดันไฟฟ้า กระแสตรงกับเฟรมกราวด์หลังปรับความสมดุล (V_{AFG} , V_{BFG}).....	100
5.23 ภาพขยายสัญญาณแรงดันรบกวนโหมคร่วมและแรงดันรวมจากรูป 5.22.....	100
5.24 วงจรทดลองความ ไม่สมดุลของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบเคลด้า.....	101
5.25 วงจรสมดุลของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบสมดุลส่วนที่ 1 และส่วนที่ 2	101
5.27 แรงดันรบกวนโหมคร่วมในสภาวะไม่สมดุล.....	102

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.28 แรงดันรบกวนโหมคร่วมหลังปรับความสมดุล เมื่อต่อโหลดแบบเดลต้า.....	103
5.29 ภาพขยายของแรงดันรบกวนโหมคร่วมจากผลการปรับความสมดุล.....	103
5.30 แรงดันเอาต์พุตที่จ่ายให้โหลดมอเตอร์ของวงจรสมดุลของอินเวอร์เตอร์.....	103
5.31 สเปกตรัมของแรงดันรบกวนโหมคร่วมของวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส.....	104
5.32 สเปกตรัมของแรงดันรบกวนโหมคร่วมเมื่อปรับความสมดุลส่วนที่ 1 และ 2.....	105
5.33 สเปกตรัมของแรงดันรบกวนโหมคร่วมเมื่อปรับความสมดุล 3 ส่วน.....	105
5.34 วงจรทดลองความไม่สมดุลของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสที่จ่ายแรงดัน 3 เฟสต่อแบบวาย.....	106
5.35 แรงดันรบกวนโหมคร่วมที่วัดระหว่างสายส่งและสายกลับของสายเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรง กับเฟรมกราวด์ (V_{AFG} , V_{AFG}) ตามลำดับ.....	107
5.36 วงจรทดลองปรับความสมดุลของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส เมื่อปรับความสมดุลส่วนที่ 1 และส่วนที่ 2.....	108
5.37 การทดลองวงจรสมดุลของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส เมื่อปรับความสมดุล 3 ส่วน.....	108
5.38 แรงดันรบกวนโหมคร่วมของอินเวอร์เตอร์เมื่อปรับสมดุลทั้ง 3 ส่วน.....	108
5.39 สเปกตรัมของแรงดันรบกวนโหมคร่วมระหว่างวงจรอินเวอร์เตอร์ไม่สมดุล และอินเวอร์เตอร์ ที่ปรับสมดุลทั้งสองแบบ.....	109
5.40 โครงสร้างของวงจรกรองแอกทีฟ ที่มีโครงสร้างเป็นคอนเวอร์เตอร์แบบ VSC.....	111
5.41 สัญญาณรบกวนโหมคร่วมที่วัดที่สายเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงกับเฟรมกราวด์.....	112
5.42 วงจรกรองแอกทีฟ ปรับสมดุลที่แหล่งจ่ายและเอาต์พุตไฟฟ้ากระแสตรง.....	112
5.43 สัญญาณรบกวนโหมคร่วมที่วัดระหว่างขั้วบวกของแรงดันเอาต์พุตกับเฟรมกราวด์ และขั้วลบ ของแรงดันเอาต์พุตกับเฟรมกราวด์หลังปรับความสมดุล.....	113
5.44 สเปกตรัมของแรงดันรบกวนโหมคร่วมระหว่างวงจรอินเวอร์เตอร์ไม่สมดุลและ อินเวอร์เตอร์ ที่สมดุลทั้งสองชนิด.....	114
5.45 รูปคลื่นของกระแส โหลดและกระแสที่ออกจากคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นตัวกรองแอกทีฟ.....	114
5.46 รูปคลื่นของกระแส โหลดและกระแสที่ออกจากคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นตัวกรองแอกทีฟ.....	115

คำอธิบายสัญลักษณ์

λ_i	ค่าไอเกนในโหมด i
ζ_i	ค่าอัตราส่วนความหน่วง
ω_n, ω_d	ความเร็วเชิงมุมธรรมชาติ และความเร็วเชิงมุมหน่วง
$\lambda_{i,i+1}$	ค่าไอเกนที่โหมด i
δ_w, δ_G	ค่ามุมของตัวหมุนทางกลและมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตามลำดับ
ω_w, ω_G	ความเร็วเชิงมุมทางกลและความเร็วเชิงมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตามลำดับ
c_p	สัมประสิทธิ์การรับกำลังลม
P_m	กำลังงานกลจากลมที่รับที่กังหัน
P_{wind}	กำลังงานกลจากลม
v_1	ความเร็วลมด้านก่อนปะทะกังหัน
v_2	ความเร็วลมด้านออกจากกังหัน
α	อัตราส่วนความเร็วลมที่ปลายโรเตอร์กังหัน (Tip Speed Ratio)
R_w	รัศมีของโรเตอร์กังหัน
v_{as}, v_{bs}, v_{cs}	แรงดันไฟฟ้าชั่วขณะ ของตัวอยู่กับที่ เฟส a, b, c ตามลำดับ
v_{ar}, v_{br}, v_{cr}	แรงดันไฟฟ้าชั่วขณะ ของตัวหมุน เฟส a, b, c ตามลำดับ
$\varphi_{as}, \varphi_{bs}, \varphi_{cs}$	เส้นแรงแม่เหล็กเชื่อมโยง (Flux Linkage) ที่ตัวอยู่กับที่ เฟส a, b, c ตามลำดับ
$\varphi_{ar}, \varphi_{br}, \varphi_{cr}$	เส้นแรงแม่เหล็กเชื่อมโยงที่ตัวหมุน
$L_{asas}, L_{asbs}, L_{ascs}$	ค่าเหนี่ยวนำที่ขดลวดแต่ละขด ของตัวอยู่กับที่ (Self-Inductance of Stator Winding)
$L_{asbs}, L_{ascs}, L_{bscs}$	ค่าเหนี่ยวนำเชื่อมโยงระหว่างขดลวดของตัวอยู่กับที่
$L_{asar}, L_{bsbr}, L_{cscr}$	ค่าเหนี่ยวนำเชื่อมโยงระหว่างขดลวดของตัวอยู่กับที่ และขดลวดของตัวหมุน
$L_{arar}, L_{brbr}, L_{cr cr}$	ค่าเหนี่ยวนำที่แต่ละขดลวดของตัวหมุน
$L_{arbr}, L_{br cr}, L_{ar cr}$	ค่าเหนี่ยวนำเชื่อมโยงระหว่างขดลวดของตัวหมุน
L_{ms}, L_{mr}, L_{sr}	ค่าเหนี่ยวนำเชื่อมโยงระหว่างขดลวดของตัวอยู่กับที่ ค่าเหนี่ยวนำเชื่อมโยงของตัวหมุน และค่าเหนี่ยวนำเชื่อมโยงระหว่างตัวอยู่กับที่กับตัวหมุน
$K_s(\theta)$	ฟังก์ชันการแปลงของปาร์ค (Park's Transformation) ที่มุม θ

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

$K_s^{-1}(\theta)$	ฟังก์ชันการแปลงผกผันของปาร์ค(Inverse Park's Transformation) ที่มุม θ
v_{ds}, v_{qs}	แรงดันไฟฟ้าชั่วขณะของตัวอยู่กับที่ในแนวพิกัด d และ q ตามลำดับ
v_{dr}, v_{qr}	แรงดันไฟฟ้าชั่วขณะของตัวหมุนในแนวพิกัด d และ q ตามลำดับ (แกน d และ q ใช้ในค่าใน สภาวะชั่วขณะ)
E'_D, E'_Q	แรงดันสถานะคงตัวในแนวแกน D และ Q ตามลำดับ (แกน D และ Q ใช้ในค่าใน สภาวะคงตัว)
\tilde{I}_G	ค่าเฟสเซอร์ของกระแสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
\tilde{V}_t	แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
\tilde{V}_∞	แรงดันที่กริดในที่นี้กำหนดให้เป็นบัสอนันต์
R_t, X_t	ค่าความต้านทานและค่าเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้า
V_D, V_Q	ค่าแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดในแนวแกน d และ q ตามลำดับ
I_D, I_Q	ค่ากระแสจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในแนวแกน d และ q ตามลำดับ

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในการติดตั้งโรงจักรไฟฟ้าพลังงานลมเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้านั้น สิ่งสำคัญลำดับแรกคือจะต้องมีพลังงานลมเพียงพอและต่อเนื่องที่จะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ กลุ่มประเทศที่มีแหล่งพลังงานจากลมจำนวนมากจึงนิยมในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานประเภทนี้ ประเทศแถบตะวันตกเช่น ยุโรปและอเมริกา จะมีพื้นที่ประกอบด้วยเทือกเขาและชายฝั่งทะเลจำนวนมาก ปริมาณของการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานลมจึงเป็นที่นิยม และยังมีแนวโน้มที่จะขยายการผลิตเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนจากธรรมชาติที่พอเพียงและยังเป็นพลังงานที่สะอาด ปราศจากมลพิษต่ออากาศ

ตำแหน่งและพื้นที่แหล่งกำเนิดลมเป็นตัวแปรสำคัญในการผลิตพลังงานไฟฟ้านี้ ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะอยู่บริเวณเทือกเขาหรือชายฝั่งทะเล จึงจะพบว่า ระยะความยาวของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมจะอยู่ไกลจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก หรือระบบกริดมาก และถ้าจำนวนกังหันลมมีจำนวนมาก ประกอบกับจำนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นกลุ่มใหญ่ ปัญหาเรื่องระยะทางการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปสู่ระบบกริด หรือจ่ายไปหาโหลดผู้ใช้จึงเป็นปัญหาที่ต้องคำนึงถึง สายส่งกำลังไฟฟ้าไม่ว่าจะเป็นสายเคเบิลบนอากาศหรือในทะเลที่มีระยะความยาวมาก เป็นเหตุให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งกำลังไฟฟ้าและเกิดปัญหาต่อการไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ นอกจากนี้ยังมีผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อเกิดการรบกวนไม่ว่าจะเป็น การรบกวนรุนแรงที่เกิดชั่วคราว หรือการรบกวนจากการเปลี่ยนแปลงของโหลด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมส่วนใหญ่จะนิยมใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เนื่องจากมีขนาดเล็ก ทนทาน และสะดวกในการติดตั้งโดยตรงกับกังหันลม แต่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำไม่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้า รีแอกทีฟได้ด้วยตัวเองเช่นเดียวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ดังนั้น ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจำเป็นต้องรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจากภายนอก ซึ่งประสิทธิภาพของการส่งกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จึงขึ้นกับขนาดและความยาวของสายส่งกำลังไฟฟ้าเป็นสำคัญ ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมนี้ต่อเชื่อมโยงกับกริดที่อ่อนแอ (weak grid) หรือกริดที่ไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้อย่างพอเพียงจากสาเหตุของการเพิ่มขึ้นของโหลด หรือเกิดจากระยะความยาวของสายส่งกำลังไฟฟ้ายาวเกินไปจะมีผลต่อเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ [1] การแก้ปัญหานี้จำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าอยู่ไกลกับระบบกริด

โดยทั่วไป การติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่มีหลายวิธี เช่น การใช้ตัวประจุ [2][3] การใช้ อุปกรณ์ คอนเวอร์เตอร์ประเภท FACTS [4][5][6] เช่น SVC, STATCOM, TCSC เป็นต้น หรือการใช้ VSC กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่ [7] และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ DFIG [8][9][10] การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟด้วย FACTS นี้ให้ประสิทธิภาพสูงในด้านการรักษาระดับแรงดัน การส่งผ่านกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ซึ่งมีผลในด้านการรักษาเสถียรภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และระบบไฟฟ้าได้ดี แต่ปัญหาที่ตามมาไม่ว่าจะเป็นปัญหาด้านราคาติดตั้งสูง ปัญหาจากการเกิดฮาร์โมนิกในระบบส่งกำลังไฟฟ้าแล้ว ปัญหาอีกประการหนึ่งคือ การแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าในสายส่งกำลังไฟฟ้า [11] จากผลการใช้ความถี่สูงในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังหรือการใช้สัญญาณ PWM มีผลทำให้เกิดการแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวสายส่งกำลังไฟฟ้า เกิดการรบกวนกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่บริเวณข้างเคียง อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในระบบป้องกันไฟฟ้าหรือรีเลย์ในสถานีไฟฟ้าย่อย [12] การแทรกซ้อนนี้ยังสามารถแพร่กระจายไปในอากาศรบกวนระบบสื่อสาร [13]

การแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าในสายส่งกำลังไฟฟ้าหรือในตัวนำ ที่เกิดจากคอนเวอร์เตอร์หรืออินเวอร์เตอร์ที่ใช้เป็นตัวชดเชย มักจะมีสาเหตุมาจากการแพร่กระจายจากสัญญาณรบกวนโหมคร่วมและสัญญาณรบกวนโหมคต่างที่เกิดจากการเปิดปิดของตัวสวิตช์ในคอนเวอร์เตอร์ด้วยความถี่สูง วิธีการขจัดทำได้หลายวิธีเช่น การกรองด้วยตัวกรอง EMI [14][15] [16] การใช้ Common Mode Choke [17] แต่การใช้ตัวกรองที่เป็นอุปกรณ์พาสซีฟ [18][19] เช่นตัวเหนี่ยวนำและตัวประจุที่มีขนาดใหญ่จะเกิดปัญหาด้านขนาดของการติดตั้ง การเกิดสภาวะรีโซแนนซ์หรือ Insection loss [20] และอาจทำให้การแพร่กระจายของสัญญาณรบกวนจากตัวเหนี่ยวนำมากขึ้นกว่าเดิมได้เช่นกัน นอกจากนี้ ยังมี การใช้วิธีลดการแพร่กระจายของสัญญาณรบกวนโหมคร่วมโดยใช้ปรับความสมดุลของวงจรคอนเวอร์เตอร์ เช่นในวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบรูส [21] ซึ่งการปรับความสมดุลนี้ จะใช้อุปกรณ์พาสซีฟ เช่นตัวเหนี่ยวนำ และตัวประจุ แต่ยังมีได้จัดความสมดุลแบบแอกทีฟ ซึ่งเป็นความสมดุลของการทำงานของตัวสวิตช์ในการเปลี่ยนแปลงทุกจังหวะ

สรุปปัญหาสำคัญของการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้คือ

- ปัญหาจากการสูญเสียเสถียรภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่และไม่มีตัวชดเชย จากการส่งผ่านกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟไม่เพียงพอจากกริดในกรณีที่ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมอยู่ห่างจากระบบกริดมาก ซึ่งมีระยะความยาวของสายส่งกำลังไฟฟ้ามาก
- ปัญหาในด้านการคำนวณหาค่าเริ่มต้นจากการคำนวณไหลของไหลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเปลี่ยนแปลงตามค่าสลิป

- ปัญหาจากการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อรักษาเสถียรภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งทำให้เกิดการแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านไปในสายส่งกำลังไฟฟ้า
- ปัญหาของการลดการแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้า โดยใช้วงจรกรองสัญญาณแทรกซ้อนแม่เหล็กไฟฟ้า

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีผู้ศึกษาการวิเคราะห์เสถียรภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมและการใช้ตัวชดเชยด้วยคอนเวอร์เตอร์ อาทิเช่น

Frengquan Zhou และ Gaza Joos [22] ได้เสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม ที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่ต่อเชื่อมโยงกับระบบกริด วัตถุประสงค์ของการศึกษาเพื่อผลของระยะความยาวสายส่งกำลังไฟฟ้าที่มีผลต่อการส่งผ่านกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ โดยพิจารณาจากอัตราส่วนพารามิเตอร์ของค่าเหนี่ยวนำในสายส่งกำลังไฟฟ้า กับค่าความต้านทานของสายส่งกำลังไฟฟ้า $\frac{X}{R}$ ถ้าอัตราส่วนของ $\frac{X}{R}$ มีค่ามากขึ้นจะมีผลให้แรงดันตกคร่อมในสายส่งกำลังไฟฟ้ามีมากขึ้น

Sung-Chun Kuo, Li Wang [23] ได้ศึกษาวิเคราะห์เสถียรภาพและศึกษาพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่ โดยวิเคราะห์ด้วยวิธีค่าไอเกน เพื่อทำนายหาขนาดของตัวประจุที่ใช้ชดเชยขนาดเล็กที่สุดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะผลิตแรงดันได้และทำนายความเร็วลมที่เล็กที่สุด

Ahmadreza Tabesh และ Reza Travani [24] ได้เสนอแบบจำลองพลวัตแบบสัญญาณขนาดเล็ก (Small Signal Dynamic Model) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่ โดยศึกษาพลวัตของกลไกทางกลที่เชื่อมโยงระหว่าง เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับกังหันลม วิเคราะห์สมรรถนะ และความไว ในโหมด Torsional โดยการวิเคราะห์เชิงความถี่

Bhaskara Palle, M. Godoy Simoes and Felix A. Farret [25] ได้เสนอแบบจำลองการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่ โดยศึกษาสมรรถนะและพฤติกรรมของการตอบสนองชั่วคราวเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนานกัน และศึกษาการส่งผ่านกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำหลายชุด

Eduard Muljadi, Fesus Sallan Mariano Sanz and Charles P. Butterfield [26] ได้เสนอการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่ โดยใช้ตัวประจุแบบอนุกรมและแบบขนาน และการใช้อินเวอร์เตอร์ในกรณีที่ต้องการการปรับความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อพลังงานลมเปลี่ยนแปลง

Lie Xu, Liangzhong Yao, Christian Sasse [27] ได้เสนอการใช้ SVC และ STATCOM เป็นตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ในกรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมติดตั้งห่างจากกริดเป็นระยะทางไกล ทำให้สายส่งกำลังไฟฟ้าไม่สามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟได้เนื่องจากเกิดการ

สูญเสียจากค่าเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังทำให้เกิดการสูญเสียเสถียรภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม ดังนั้นการส่งกำลังไฟฟ้าด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรงสามารถแก้ปัญหาเรื่องค่าตัวเหนี่ยวนำสายส่งตัวนำ นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่คอนเวอร์เตอร์ได้อีกด้วย

Wei Qiao, Ronald G. Harley and Ganesh K [28] ได้เสนอการใช้ FACTS เพื่อแก้ปัญหาเรื่องการควบคุมแรงดันไฟฟ้า การปรับปรุงเสถียรภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมเมื่อเกิดการสูญเสียเสถียรภาพชั่วคราว และปรับปรุงขีดจำกัดของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า

Chai Chompoo-inwai, Chitra Yingvivanapon, Kittipong Methaprayoon, and Wei-Jen Lee [29] ได้เสนอการเปรียบเทียบระหว่างการใช้ SVC และ ตัวประจุ เพื่อนำมาชดเชยการส่งผ่านกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม เพื่อเป็นการแก้ปัญหาการสูญเสียเสถียรภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในค่าตัวประกอบกำลังค่าต่าง ๆ

W.H. Siew, Martin G. Stewart, Keith Walker, Chris Piner [11] ได้เสนอการเกิดปัญหาการแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าหรือ EMI ในสายส่งกำลังไฟฟ้า ตู้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ใกล้เคียง และยังมีการแพร่กระจายผ่านอากาศ จากอุปกรณ์ FACTS ที่ติดตั้งในระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟและการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ได้แก่ SVC และ STATCOM โดยการวัดเปรียบเทียบระหว่าง FACTS ทั้งสองชนิด ในจำนวน 5 สถานีไฟฟ้าย่อย เพื่อเปรียบเทียบให้สอดคล้องกับมาตรฐาน IEC61000-4-6 ซึ่งเป็นมาตรฐานความคงทนต่อการแทรกซ้อนของ EMI ในระบบไฟฟ้ากำลัง พบว่ามีการแทรกซ้อนสูงในย่าน 100 kHz.-10MHz. โดย SVC จะมีการแทรกซ้อนมากกว่า STATCOM

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการศึกษาเสถียรภาพแบบสัญญาณขนาดเล็กลงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่ และไม่ติดตั้งตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ โดยรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจากระบบกริดที่อยู่ใกล้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และพิจารณาหาระยะความยาวสูงสุดของสายส่งกำลังไฟฟ้าก่อนที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเสถียรภาพจากการรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจากระบบกริดไม่เพียงพออันเนื่องมาจากสายส่งยาวเกินกำหนด จากนั้นศึกษาผลของการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ที่เกิดจากการแทรกซ้อนด้วยวิธีปรับความสมดุลในคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์ 5 แบบ ที่เป็นโครงสร้างสมมูลของคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม โดยมีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

1.2.1 สร้างแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่และไม่ติดตั้งตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

1.2.2 วิเคราะห์เสถียรภาพแบบสัญญาณขนาดเล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่ เมื่อต่อเชื่อมโยงกับกริด ที่ความยาวของสายส่งกำลังไฟฟ้าระยะต่างๆ

1.2.3 กำหนดการไหลของโหลดที่มีกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟไม่คงที่ ใช้กับการคำนวณกำลังไฟฟ้าระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับระบบกริด

1.2.4 วิเคราะห์เสถียรภาพแบบสัญญาณขนาดเล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยวิธีค่าไอเกน เพื่อหาขีดจำกัดของความยาวสายส่งกำลังไฟฟ้า

1.2.5 ศึกษาผลกระทบของการแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าในสายส่งกำลังไฟฟ้าจากการใช้ คอนเวอร์เตอร์มาชดเชย

1.2.6 วิเคราะห์การแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าจากผลของสัญญาณรบกวนโหมคร่วมในวงจรคอนเวอร์เตอร์ จากสาเหตุความไม่สมดุลของวงจร

1.2.7 ปรับปรุงการลดการแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าโดยปรับความสมดุลในวงจรคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์ 5 แบบ ที่เป็นโครงสร้างของคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1.3.1 ระยะความยาวของสายส่งกำลังไฟฟ้าที่เชื่อมโยงระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่ในกรณีที่ไม่ติดตั้งตัวชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ โดยที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบตัวหมุนกรงกระรอก หรือแบบความเร็วคงที่ จะต้องดูดซับกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟจากระบบกริด และเกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ จากค่าเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้าจากระยะความยาวของสายส่ง

1.3.2 ผลของความไม่เพียงพอของกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟอันเนื่องมาจากระยะความยาวของสายส่งกำลังไฟฟ้าจะมีผลกับเสถียรภาพแบบสัญญาณขนาดเล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่

1.3.3 การเพิ่มจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีผลต่อเสถียรภาพแบบสัญญาณขนาดเล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่

1.3.4 ผลกระทบของการชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟด้วยคอนเวอร์เตอร์ ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมจะทำให้เกิดการแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้าสู่ระบบไฟฟ้าได้

1.3.5 การปรับความสมดุลของวงจรคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์ เป็นการแก้ปัญหาการลดการแพร่กระจายของสัญญาณรบกวนโหมคร่วม ซึ่งจะเป็นลดการการแทรกซ้อนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านไปในสายส่งกำลังไฟฟ้าจากคอนเวอร์เตอร์โดยเป็นการแก้ปัญหาที่ต้นเหตุได้

1.4 ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

1.4.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ มีความสะดวกในการติดตั้งเพราะมีโครงสร้างขนาดเล็กน้ำหนักเบา และมีความทนทาน แต่ไม่สามารถสร้างกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟได้ด้วยตัวเอง จำเป็นต้องรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟกับภายนอก เช่น รับจากตัวชดเชย หรือจากระบบกริด เป็นต้น กรณีที่รับจากระบบกริด ความยาวของสายส่งกำลังไฟฟ้าระหว่างกริดกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีความสำคัญต่อการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า เพราะถ้าระยะความยาวของสายส่งมากเกินไป เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะไม่สามารถรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟได้เพียงพอ ดังนั้น การหาระยะความยาวสูงสุดของสายส่งกำลังไฟฟ้าที่เชื่อมโยงระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบกริด จะช่วยป้องกันการสูญเสียเสถียรภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้

1.4.2 การศึกษาเสถียรภาพแบบสัญญาณขนาดเล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมโดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่ที่ไม่มีชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ โดยการสร้างแบบจำลองพลวัตแปลงในรูปเชิงเส้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และระบบส่งกำลังไฟฟ้าที่เชื่อมโยงกับระบบกริด สามารถวิเคราะห์ได้โดยการวิเคราะห์ค่าไอเกนในระยะความยาวของสายส่งกำลังไฟฟ้าระยะต่างๆ

1.4.3 การแก้ปัญหาข้อบกพร่องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในการรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจากภายนอกเพื่อสร้างแรงดันไฟฟ้านั้น จะนิยมใช้อุปกรณ์คอนเวอร์เตอร์จำพวก FACTS หรือ VSC แทนการรับกำลังไฟฟ้าจากระบบกริดที่มีระยะทางไกล นอกจากนี้คอนเวอร์เตอร์ยังช่วยรักษาเสถียรภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม ในกรณีเกิดการเปลี่ยนแปลงของโหลดกระทันหันหรือเกิดฟลัทท์ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

1.4.4 การแก้ปัญหาจากการใช้คอนเวอร์เตอร์ นอกจากจะเกิดปัญหาด้านฮาร์มอนิกแล้วจะเกิดการแทรกซ้อนแม่เหล็กไฟฟ้าจาก คอนเวอร์เตอร์ที่ประกอบอยู่ใน FACTS ทำให้เกิดการแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านไปสายส่งกำลังไฟฟ้า และรบกวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ข้างเคียง เช่น อุปกรณ์ป้องกันไฟฟ้า หรือ ระบบคอมพิวเตอร์ เป็นต้น

1.4.5 หลักการลดการแทรกซ้อนแม่เหล็ก มีหลายวิธี แต่จากสาเหตุของการเกิดการแทรกซ้อนแม่เหล็กไฟฟ้า จะเกิดจากการแพร่กระจายของสัญญาณรบกวนโหมคร่วม จากสาเหตุความไม่สมดุลของวงจรคอนเวอร์เตอร์เมื่อเทียบกับเฟรมกราวด์ ในการสวิตช์ที่ความถี่สูง การปรับความสมดุลของวงจรโดยการชดเชยแบบพาสซีฟ และแบบแอกทีฟ จะทำให้สามารถลดการเกิดการแทรกซ้อนแม่เหล็กได้ โดยแนวคิดจะทำการแยกปัญหาของความไม่สมดุลของคอนเวอร์เตอร์แบบพื้นฐานไปจนถึงคอนเวอร์เตอร์แบบ VSC

1.5 ขอบเขตของการศึกษา

การศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะนำเสนอการศึกษาเสถียรภาพแบบสัญญาณขนาดเล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีตัวหมุนกรงกระรอกหรือแบบความเร็วคงที่ที่ไม่ติดตั้งตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ และการศึกษาการแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากตัวคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ชดเชยเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพ ในกรณีของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟระหว่างกริดกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่เพียงพอ จากผลของระยะความยาวสายส่งกำลังไฟฟ้า มีระยะความยาวเกินขอบเขตที่จะส่งกำลังไฟฟ้าได้ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.5.1 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมโดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำเพื่อคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์

1.5.2 การศึกษาเสถียรภาพแบบสัญญาณแบบขนาดเล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่ โดยใช้วิธีวิเคราะห์ค่าไอเกน หาค่าแพลกเตอร์ความสัมพัทธ์ เพื่อหาระยะความยาวสูงสุดของสายส่งกำลังไฟฟ้าที่ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีเสถียรภาพ และในกรณีที่ขนาดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกลุ่มเปลี่ยนแปลง

1.5.3 กำหนดการไหลของกำลังไฟฟ้าและหาค่าเริ่มต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่ ที่กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ และสลิปไม่คงที่

1.5.4 การศึกษาการแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวนำจากคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่

1.5.5 ศึกษาและปรับปรุงเพื่อลดการแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าในสายส่งกำลังไฟฟ้า โดยการลดการแพร่กระจายของสัญญาณรบกวนโหมคร่วม โดยการวิเคราะห์ความไม่สมดุลของคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดี่ยว ปรับปรุงโดยใช้คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์คู่และปรับความสมดุลของคอนเวอร์เตอร์แบบไฮบริดจ์

1.5.6 ประยุกต์หลักการของการปรับความสมดุลในวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 4 สวิตช์หรือแบบฟูลบริดจ์ และในวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 สวิตช์ หรือวงจรอินเวอร์เตอร์ และวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ VSC ซึ่งเป็นโครงสร้างของตัวชดเชยในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม

1.6 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์โดยสังเขป

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมุติฐานการศึกษา ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในการศึกษา ขอบเขตของการศึกษา ขั้นตอนการศึกษาของวิทยานิพนธ์โดยสังเขป

บทที่ 2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม กล่าวถึง ประสิทธิภาพของการขับเคลื่อนด้วยพลังงานลม การส่งผ่านกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ การแปลงพิกัดจาก พิกัด abc เป็นพิกัด dqo สมการหนึ่งหน่วย สมการพีชคณิตของแรงดันไฟฟ้าที่ตัวอยู่กับที่ การหาแบบจำลองของสมการพลวัตของแรงดันไฟฟ้าที่ตัวอยู่กับที่ ค่าเสถียรภาพแบบสัญญาณขนาดเล็ก

บทที่ 3 การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบสัญญาณขนาดเล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ต่อเชื่อมกับกริด กล่าวถึง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่ต่อเชื่อมกับกริด สมการเชิงเส้นของ สายส่งกำลังไฟฟ้า สมการเชิงเส้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ การหาสมการกำลังไฟฟ้า การศึกษาเพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพแบบสัญญาณขนาดเล็กโดยการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เมื่อระยะความยาวของสายส่งกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 10 กิโลเมตร ถึง 50 กิโลเมตร โดยเพิ่มครั้งละ 5 กิโลเมตร และ เพิ่มจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การหาผลเฉลยของการคำนวณการไหลของโหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

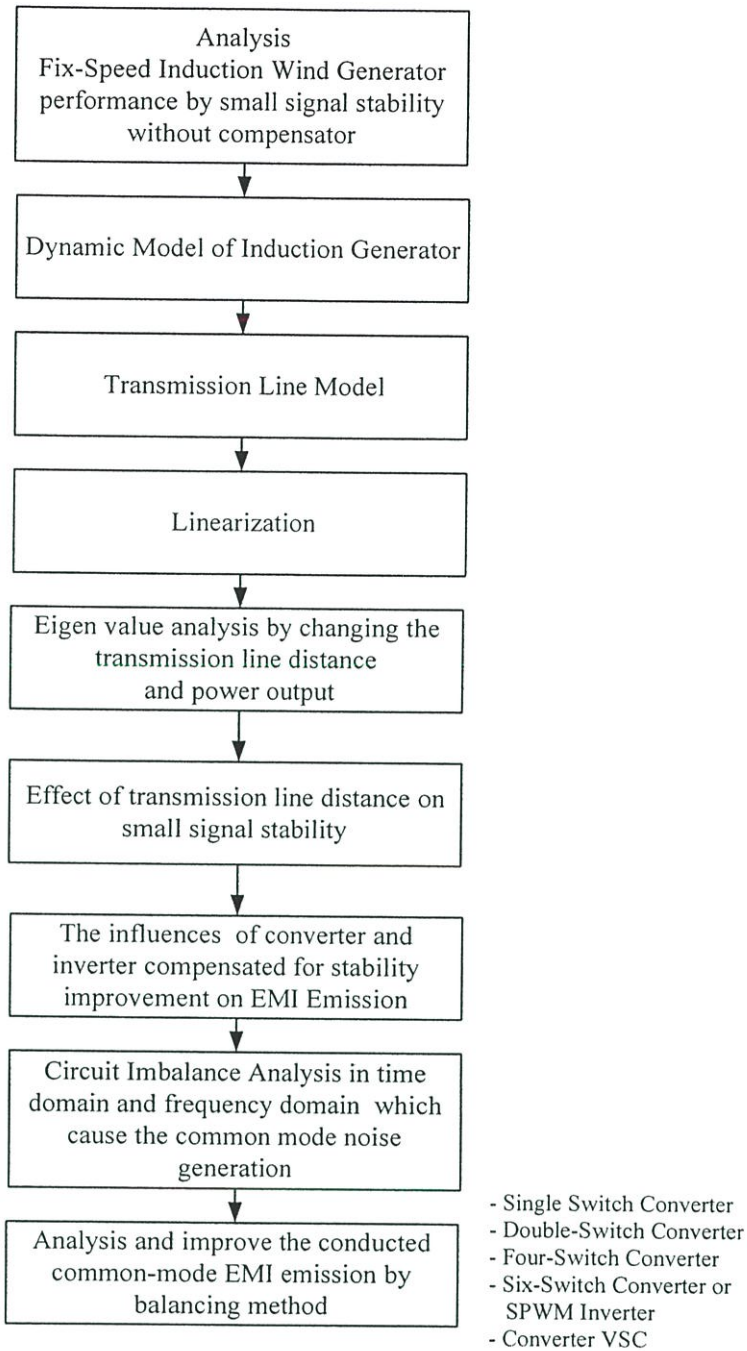
บทที่ 4 การแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นตัวขับเคลื่อนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม กล่าวถึงสาเหตุของการแทรกซ้อนเกิดจากการแพร่กระจายของสัญญาณรบกวนโหมคร่วม นิยามพื้นฐานของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า กลไกการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าบนอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ การเกิดการแพร่ของสัญญาณรบกวนโหมคร่วม การทดลองการรบกวนของสัญญาณรบกวนโหมคร่วม แนวคิดของความสมดุลและไม่สมดุลของวงจรคอนเวอร์เตอร์ ความไม่สมดุลของวงจรคอนเวอร์เตอร์ชนิดสวิทช์เดี่ยว การปรับความสมดุลแบบแอกทีฟของวงจรคอนเวอร์เตอร์โดยใช้ตัวสวิทช์ชนิดคู่ การปรับความสมดุลของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์คู่โดยใช้การสมดุลแบบไฮบริดจ์ ประยุกต์ใช้หลักการสมดุลในวงจร 4 สวิทช์ หรือแบบฟูลบริดจ์ วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส และ วงจรคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ VSC. ตามลำดับ

บทที่ 5 การทดลองผลการปรับความสมดุลของวงจรคอนเวอร์เตอร์เพื่อขจัดสัญญาณรบกวนโหมคร่วม โดยวัดรูปคลื่นแรงดันและกระแสเอาท์พุทที่โหลดเปรียบเทียบกับระหว่างวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์เดี่ยวและวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์คู่ วัดรูปคลื่นแรงดันรบกวนในโหมคร่วมที่ขั้วโหลดที่คอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์เดี่ยว คอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์คู่ และคอนเวอร์เตอร์แบบปรับความสมดุลไฮบริดจ์ การประเมินผลความสมดุลของวงจรโดยใช้อัตราส่วนคอมมอนโหมครีเจกชัน (Common Mode Rejection Ratio: CMRR) การทดลองวัดสเปกตรัมการตอบสนองต่อความถี่ของสัญญาณรบกวนโหมคร่วมในคอนเวอร์เตอร์ทุกแบบดังที่ได้นำเสนอในบทที่ 4

บทที่ 6 เป็นสรุปผลการทดลองและสรุปวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ปรับสมดุลทั้ง 5 แบบดังที่กล่าวมาแล้ว สรุปอัตราการลดลงของสัญญาณรบกวนโหมคร่วมในคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 5 แบบหลังการปรับความสมดุลเปรียบเทียบกับก่อนการปรับสมดุล และ ข้อเสนอแนะ

จากรูปที่ 1 ได้แสดงถึงขั้นตอนของการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ โดยประกอบด้วยการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบสัญญาณขนาดเล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่ที่ไม่มีตัวขับเคลื่อน

จากแบบจำลองพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเชื่อมโยงกับระบบกริด การแปลงระบบเป็นเชิงเส้นและคำนวณหาค่าเริ่มต้นหรือตัวแปรไม่ทราบค่าจากการคำนวณการไหลของโหลดแบบค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟไม่คงที่ วิเคราะห์ค่าไอเกน ที่ความยาวของสายส่งกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 10 กิโลเมตร ถึง 50 กิโลเมตร โดยเพิ่มระยะครั้งละ 5 กิโลเมตร เพื่อหาระยะความยาวสูงสุดที่ทำให้เครื่องกำเนิดเสถียรภาพ ศึกษาการจ่ายกำลังไฟฟ้าและรับกำลังไฟฟารีแอกทีฟจากการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ศึกษาการแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้เป็นตัวขับเคลื่อน วิเคราะห์สาเหตุของการเกิดการแทรกซ้อนแม่เหล็กจากผลของการแพร่กระจายของสัญญาณรบกวน โหมดร่วมและปรับความสมดุลเพื่อลดสัญญาณรบกวนโหมดร่วมในคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดี่ยว การปรับความสมดุลด้วยคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์คู่ ปรับความสมดุลแบบไฮบริดจ์ ปรับความสมดุลของคอนเวอร์เตอร์แบบ 4 สวิตช์ คอนเวอร์เตอร์แบบ 6 สวิตช์ และคอนเวอร์เตอร์แบบ VSC ที่ใช้เป็นคอนเวอร์เตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม



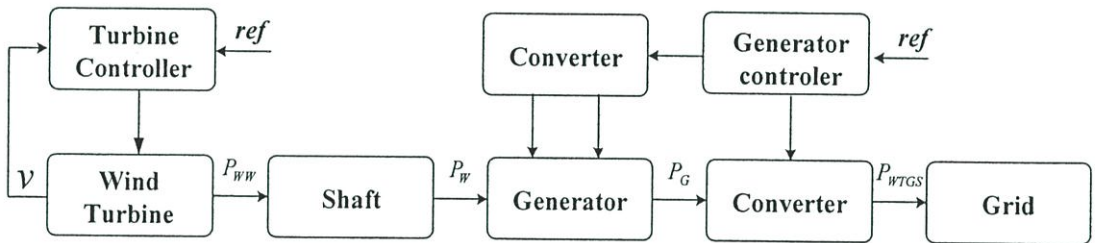
รูปที่ 1.1 ขั้นตอนของการศึกษาในวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม

ในบทนี้จะกล่าวถึง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม ซึ่งจะประกอบด้วยโครงสร้างหลักๆ 2 ส่วน คือ ส่วนกลไกทางกล (Mechanical Mechanism) และกลไกทางไฟฟ้า (Electrical Mechanism) [30] โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะนำเสนอในรูปของสมการทางพลวัต ของกลไกทางกลและทางไฟฟ้า การแสดงสถานะด้วย สเตตสเปซ จะสามารถจำลองคุณสมบัติของระบบ ในการศึกษาระบบไฟฟ้ากำลัง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถเป็นตัวแทน ที่จะสะท้อนถึงพฤติกรรมของระบบในสถานการณ์ต่างๆ ได้ ซึ่งจะมีประโยชน์ในเชิงของการศึกษา การทำนาย การออกแบบระบบป้องกัน และปรับปรุงให้มีเสถียรภาพ ขณะที่เกิดการรบกวน หรือเปลี่ยนแปลงต่างๆ ได้

จากรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงแผนภูมิของระบบโดยรวมโดยทั่วไปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม ซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนใหญ่ คือ กลไกทางกล และกลไกทางไฟฟ้า ซึ่งกลไกทางกลและกลไกทางไฟฟ้า จะประกอบด้วยใบกังหัน ตัวควบคุมกังหัน ทำหน้าที่ควบคุมใบพัดให้เปิดรับกำลังลม ตามองศาของการปรับ นอกจากนี้ยังประกอบด้วยชุดเกียร์ทดรอบ เชื่อมโยงกันผ่านเพลาส่งกำลังงานกล ไปสู่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และเชื่อมโยงกับระบบกริดต่อไป

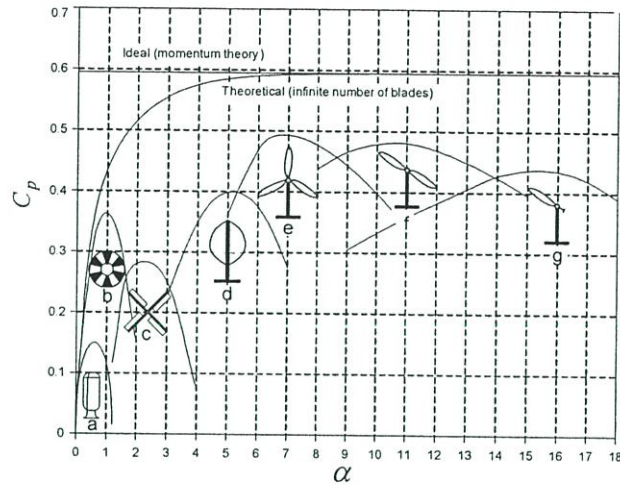


รูปที่ 2.1 แผนภูมิแบบจำลองและส่วนประกอบโดยทั่วไปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม

2.1 ประสิทธิภาพของการขับเคลื่อนด้วยพลังงานลม

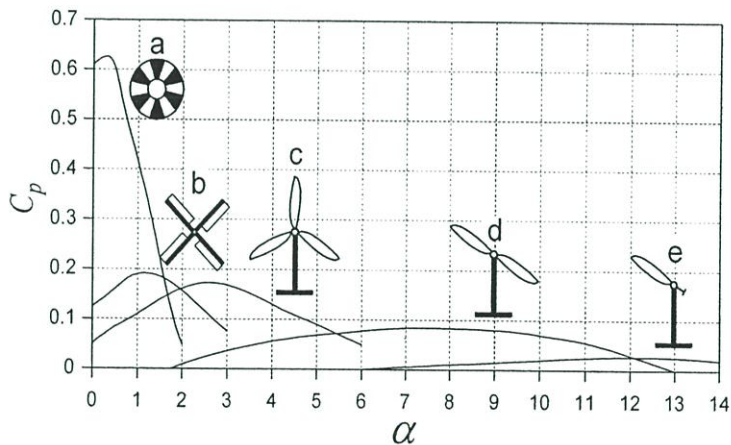
ส่วนหนึ่งของการได้รับกำลังลมจะขึ้นอยู่กับชนิดและลักษณะของกังหัน ในรูปที่ 2.2 แสดงถึงกราฟคุณสมบัติระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การรับกำลังลม C_p กับอัตราส่วนระหว่างความเร็วลมก่อนและหลังปะทะใบกังหัน (v_1, v_2) ที่กังหันชนิดต่างๆ จะเห็นได้ว่าอัตราความเร็วลมที่ปลายกังหัน (α) ของกังหันแบบที่ใช้ใบพัดเดี่ยว (One-bladed Rotor) จะมีความเร็วที่ปลายกังหันสูงที่สุด นั่นหมายถึงความเร็วกังหันจะเข้าใกล้ความเร็วลมมาก ซึ่งจะเกิดผลดีต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้า และ

ประสิทธิภาพการรับกำลังงาน (C_p) จะสูงกว่าแบบ a,b แต่ข้อเสียคือค่อนข้างจะยุ่งยากในการสร้าง หอคอย เพราะการหมุนใบเดียวจะเกิดความไม่สมดุลของแรง ที่ถ่ายทอดมายังโครงสร้าง ในรูปแบบ ที่มีจำนวนใบพัดมาก จะมีข้อดีส่วนในเรื่องของแรงบิด ของกังหันจะแสดงดังรูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นถึงชนิดของใบกังหันที่ทำให้เกิดแรงบิด จะเป็นกังหันที่มีจำนวนใบพัดมาก ในที่นี้จะเป็นชนิด a หรือ American Wind Turbine



(a. Savonius rotor, b. American Wind Turbine , c. Dutch Einmill , d. Darrieus Rotor, e. Three-bladed Rotor , f. Two-bladed Rotor , g. One-bladed Rotor) [30]

รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังลมของใบพัดชนิดต่างๆ



(a. American Wind Turbine, b. Dutch Einmill, c. Three-bladed Rotor, d. Two-bladed Rotor Darrieus Rotor, e. One-bladed Rotor)

รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดของใบพัดชนิดต่างๆ

จะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพของกำลังงานที่จะได้รับจะขึ้นกับชนิดของจำนวนใบพัด จากกราฟ ในรูปที่ 2.1 เราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกล กับพลังงานลมที่กระทำกับใบกังหัน ได้ดังสมการที่ (2.1)

$$C_p = \frac{P_m}{P_{wind}} \quad (2.1)$$

$$C_p = \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right] \left[1 + \frac{v_2}{v_1} \right]$$

โดยที่

- C_p = สัมประสิทธิ์ของกำลังงานลม (Power Coefficient)
 v_2, v_1 = ความเร็วลมก่อนปะทะกังหันและหลังปะทะกังหันตามลำดับ
 P_{wind}, P_m = กำลังงานจากลมและกำลังงานที่กังหันได้รับ ตามลำดับ

นอกจากนี้ ประสิทธิภาพการรับกำลังงานลมยังขึ้นอยู่กับลักษณะของใบพัด และมุมการรับลม ของใบพัด และจำนวนใบพัดด้วย จากสมการที่(2.2)

$$\alpha = \frac{u}{v_1} = \frac{\omega \cdot R}{v_1} \quad (2.2)$$

โดยที่

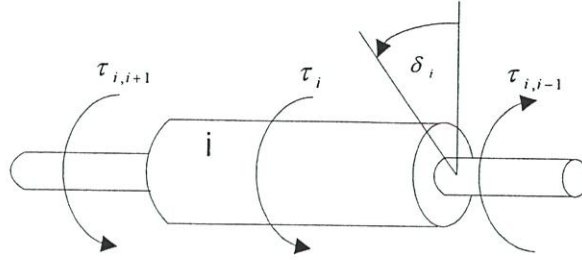
- α = อัตราส่วนความเร็วลมที่ปลายกังหัน
 ω = ความเร็วเชิงมุมของตัวหมุนของกังหัน
 R = รัศมีของตัวหมุนของกังหัน
 u = ความเร็วพุ่งขึ้นของใบกังหัน

จากรูปที่ 2.2 จะแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของกังหันและจำนวนใบพัดที่มีผลต่อประสิทธิภาพ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการรับกำลังงาน จะเห็นได้ว่า ที่จำนวนใบพัดน้อย จะมีผลทำให้ค่า C_p มีค่ามากกว่า

2.2 การส่งผ่านกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม

การส่งผ่านพลังงานกล ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมจะส่งผ่านเพลลา ซึ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเพลลา เทียบกับขนาดของมวลในแต่ละจุด อาจแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 ขนาดของมุมที่ตัวหมุน และแรงบิดที่เกิดขึ้น สามารถเขียนในรูปของสเตตสเปซ ดังสมการที่ (2.3) เมื่อแปลงเป็น

รูปอย่างง่าย จะประกอบด้วย มวล 2 ส่วน คือมวลของกลไกกึ่งหันรวมกับเพลลา และมวลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ต่อเชื่อมกันด้วยของค้ประกอบของแรงเสียดทาน (K) และความหน่วง (Damping: D) ดังรูปที่ 2.5 และรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.4 ค่าแรงบิดของมวลขนาดต่างๆในแนวแกนเพลลา

การเขียนสมการสเตตสเปซในรูปทั่วไป

โดยกำหนดให้

$\lambda_{i,i+1}$ = ค่าไอเกนที่โหนด i

ζ_i = ค่าอัตราส่วนการหน่วงที่โหนด i

$\omega_{ni}, j\omega_{di}$ = ค่าความเร็วเชิงมุมธรรมชาติ และความเร็วเชิงมุมเนื่องจากการหน่วง

δ_w, δ_G = ค่ามุมของตัวหมุนทางกลและมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตามลำดับ

ω_w, ω_G = ความเร็วเชิงมุมทางกลและความเร็วเชิงมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ตามลำดับ

สมการสเตตสเปซสามารถแสดงได้เป็น

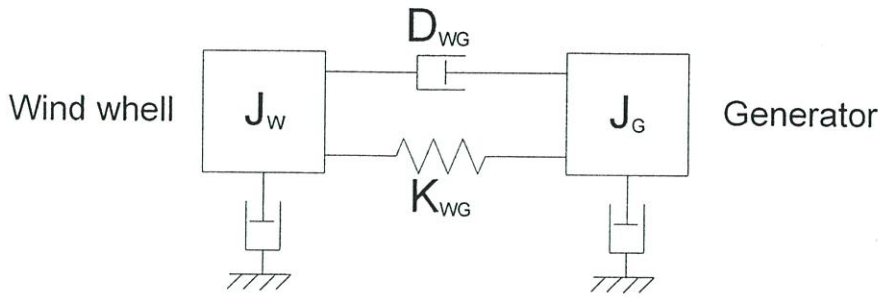
$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu},$$

$$\mathbf{x}^T = [\delta_1 \dots \delta_i \dots \delta_N | \Delta \omega_1 \dots \omega_i \dots \omega_N]$$

$$\mathbf{u}^T = [\tau_1 \dots \tau_i \dots \tau_N]$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ K & D \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix},$$

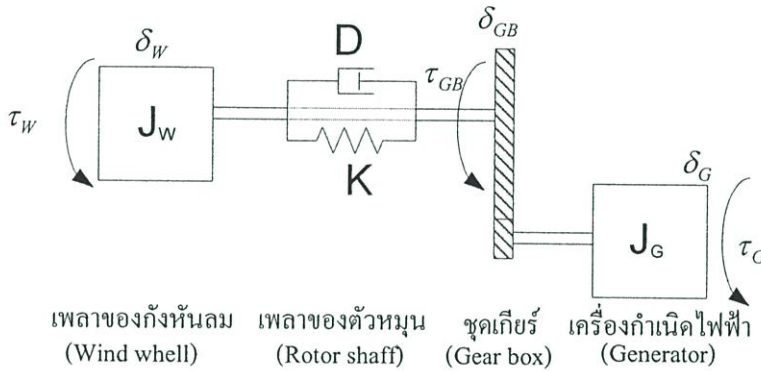
$$\lambda_{i,i+1} = -\zeta_i \omega_{ni} \pm j\omega_{di}$$



รูปที่ 2.5 การส่งผ่านกำลังงานกลระหว่างส่วนประกอบทางกล และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$\frac{d\delta_w}{dt} = \omega_w - \omega_s = \Delta\omega_w$$

$$\frac{d\delta_G}{dt} = \omega_G - \omega_s = \Delta\omega_G$$



รูปที่ 2.6 การส่งผ่านกำลังงานกลเมื่อมีเกียร์ลดทอนอัตราส่วน

$$\frac{d\delta_w}{dt} = \omega_w - \omega_{w0} = \Delta\omega_w$$

$$\frac{d\delta_G}{dt} = \omega_G - \omega_{G0} = \Delta\omega_G$$

$$J_W \frac{d\Delta\omega_w}{dt} = \tau_w - K \left(\Delta\delta_w - \frac{\Delta\delta_G}{v} \right) - D \left(\Delta\omega_w - \frac{\Delta\omega_G}{v} \right) \quad (2.3)$$

$$J_G \frac{d\Delta\omega_G}{dt} = \tau_G + \frac{K \left(\delta_w - \frac{\delta_G}{v} \right) + D \left(\Delta\omega_w - \frac{\Delta\omega_G}{v} \right)}{v} \quad (2.4)$$

จากการแปลงค่าเป็นเชิงเส้นเพื่อนำไปศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเราอาจได้สมการพลวัตของระบบทางกลดังแสดงในสมการที่ (2.3) และ (2.4)

2.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมจะติดตั้งโดยตรงกับระบบกลไกของกังหันลม ดังนั้นความคงทนที่ต้องทนต่อสภาพอากาศในที่อยู่กลางแจ้งจึงเป็นสิ่งสำคัญ อีกทั้งจำเป็นต้องมีน้ำหนักเบาและรูปร่างกระทัดรัด เพื่อสามารถติดตั้งในที่สูงได้ดี ดังนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจึงเป็นทางเลือกที่สำคัญในการประยุกต์ใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม เนื่องจากความกระทัดรัด และมีน้ำหนักเบา ต้องการการบำรุงรักษาต่ำเมื่อเทียบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส แต่จุดด้อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในการผลิตแรงดันไฟฟ้า จำเป็นต้องรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจากภายนอก โดยที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำไม่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟได้เหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ดังนั้นการศึกษาในด้านของเสถียรภาพและการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงอย่างยิ่ง อีกประการหนึ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมจะมีการเปลี่ยนแปลงของลมที่ไม่แน่นอน ทำให้มีผลต่อพลังงานกลที่ได้รับจากกังหันลมจะถูกควบคุมจากกลไกทางกลของการควบคุมใบกังหันหรือระบบเกียร์ นอกจากนี้ในด้านการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะนิยมใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จำพวกคอนเวอร์เตอร์ เป็นตัวช่วยในด้านตัวควบคุมความเร็ว แรงดันไฟฟ้า หรือการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า และยังช่วยปรับปรุงเสถียรภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อถูกรบกวนชั่วคราว ชนิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมจะแบ่งได้ดังนี้ [31][32]

2.3.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดนี้ จะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดตัวหมุนทรงกระบอก หรือแบบความเร็วคงที่ (Fixed-Speed Induction Generator) [31] เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาดเล็กนิยมใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมที่อยู่บนทะเล หรือที่อยู่ตามชายฝั่ง เนื่องจากมีขนาดเล็กมีความคงทน และต้องการการดูแลรักษาน้อย การควบคุมความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมที่เป็นชนิดนี้จะใช้การควบคุมทางกลจากการควบคุมมุมของใบกังหันหรือการควบคุมระบบเกียร์ทดรอบ(Gear Box) การทำงานของเครื่องกำเนิดจะต่อเชื่อมโยงกับระบบกริดมีค่าสลิปอยู่ประมาณ 1-5% เหนือความเร็วซิงโครนัส จึงถือว่ามี การเปลี่ยนแปลงความเร็วน้อย การกระตุ้นสนามแม่เหล็ก จะรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจากระบบกริด หรือจะรับจากตัวประจุที่ต่อขนานกับขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ก.

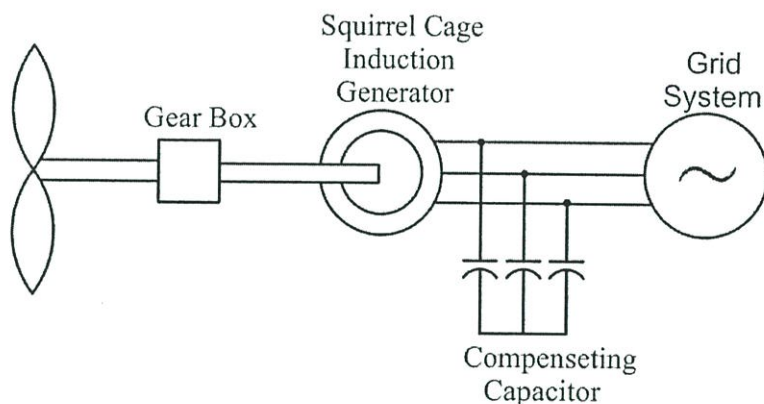
2.3.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบปรับความเร็ว

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดนี้ จะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีโรเตอร์แบบวาล์ว หรือเรียกอีกชื่อว่า Doubly fed Induction Generator (DFIG) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ข. จะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่กว่าแบบแรก ใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมที่มีการผลิตกำลังไฟฟ้าขนาดใหญ่ โครงสร้างจะประกอบด้วยคอนเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน(VSC) 2 ชุด คอนเวอร์เตอร์ตัวที่ 1 จะต่อกับตัวหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ คอนเวอร์เตอร์ตัวที่ 2 จะต่อกับสายส่ง

กำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงกับกริด มีคุณสมบัติในการส่งและรับกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบกริดได้ และยังสามารถควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ทั้งสองชุด นอกจากนี้ถ้าความเร็วรอบของลมมากเกินไปจนขีดจำกัดกังหันลมยังสามารถจำกัดมุมของการปรับใบกังหันได้อีกด้วย

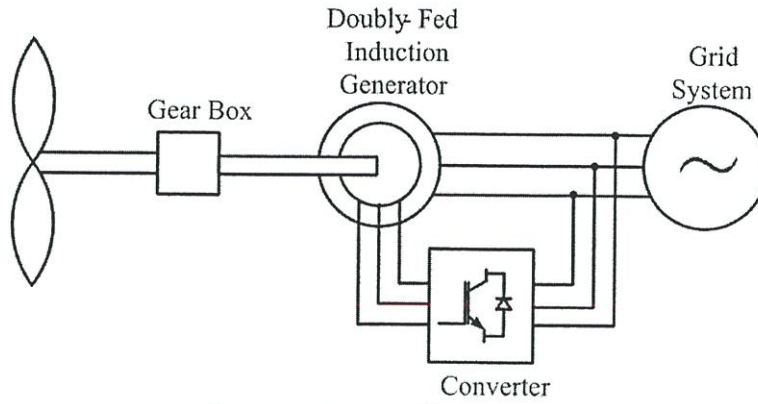
2.3.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมยังสามารถใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสได้ ซึ่งลักษณะอาจจะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีขั้วแม่เหล็กจำนวนมากเพื่อให้สามารถขับเคลื่อนด้วยความเร็วรอบต่ำต่อเชื่อมโยงกับระบบเกียร์ทดรอบ เนื่องจากความเร็วรอบของกังหันจะมีความเร็วไม่เพียงพอต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ดังแสดงในรูปที่ 2.7ค นอกจากนี้ในระบบที่ต่อเชื่อมโยงกับกริดจะต่อเชื่อมด้วยคอนเวอร์เตอร์แบบ VSC คล้ายกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบที่ 2 ด้วยวัตถุประสงค์ในการปรับแรงดันและความถี่ให้สอดคล้องกับกริด ในกรณีที่ความเร็วลมเกิดการเปลี่ยนแปลง และยังช่วยปรับปรุงเสถียรภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในกรณีที่มีการรบกวนชั่วคราว



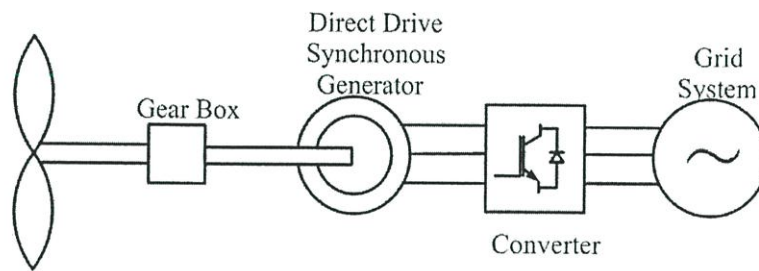
ก. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่
(Fix-Speed Induction Generator)

รูปที่ 2.7 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมชนิดต่าง ๆ



ข. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ DFIG

(Doubly fed Induction Generator)



ค. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส

(Synchronous Generator)

รูปที่ 2.7 (ต่อ)

2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ

ในหัวข้อนี้ จะขอกล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ โดยแบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองทางโครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งสามารถใช้ได้ทั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่ หรือแบบตัวหมุนกรงกระรอก และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบปรับความเร็วหรือ DFIG โดยสามารถจ่ายแรงดันให้สมการตัวหมุนได้ หรือจะลดวงจรตัวหมุนก็ได้ สมการจะประกอบด้วยสมการแรงดันไฟฟ้าในตัวยุคหนึ่ง (Stator) และตัวหมุน (Rotor) และแบบสมการให้อยู่ในพิกัด d, q โดยจะกำหนดให้ แกน q นำหน้าแกน d 90 องศา จากวงจรสมมูล เราจะกำหนดให้กระแสไหลออกจาก stator ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ และกระแสไหลเข้าในส่วนของตัวหมุน ดังนั้นเครื่องหมายแสดงทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก ในส่วนของกระแสตัวอยู่กับที่ไหลออก จะแสดงเป็นเครื่องหมายลบและกระแส ตัวหมุนไหลเข้าเป็นบวก ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์ได้ทั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ได้ทั้งสองชนิด [33]

2.4.1 สมการแรงดันที่ตัวอยู่กับที่ และแรงดันที่ตัวหมุน

จากรูปที่ 2.8 แสดงวงจรสมมูลของตัวอยู่กับที่ และตัวหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยกำหนดให้ กระแสไหลออกจากตัวอยู่กับที่ และกระแสไฟฟ้าไหลเข้าตัวหมุน ซึ่งสามารถหาค่าสมการแรงดันได้ดังสมการที่ (2.5)-(2.7) และสมการแรงดันของตัวหมุน ดังสมการที่ (2.8)-(2.10)

$$v_{as} = p\psi_{as} - R_s i_{as} \quad (2.5)$$

$$v_{bs} = p\psi_{bs} - R_s i_{bs} \quad (2.6)$$

$$v_{cs} = p\psi_{cs} - R_s i_{cs} \quad (2.7)$$

$$v_{ar} = p\psi_{ar} + R_r i_{ar} \quad (2.8)$$

$$v_{br} = p\psi_{br} + R_r i_{br} \quad (2.9)$$

$$v_{cr} = p\psi_{cr} + R_r i_{cr} \quad (2.10)$$

กำหนดให้

v_{as}, v_{bs}, v_{cs} = แรงดันไฟฟ้าชั่วขณะของตัวอยู่กับที่ เฟส a, b, c ตามลำดับ

v_{ar}, v_{br}, v_{cr} = แรงดันไฟฟ้าชั่วขณะของตัวหมุน เฟส a, b, c ตามลำดับ

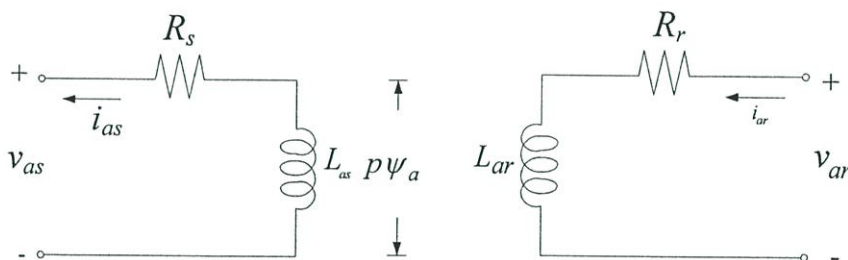
i_{as}, i_{bs}, i_{cs} = กระแสไฟฟ้าชั่วขณะของตัวอยู่กับที่ เฟส a, b, c ตามลำดับ

i_{ar}, i_{br}, i_{cr} = กระแสไฟฟ้าชั่วขณะของตัวหมุน เฟส a, b, c ตามลำดับ

$\varphi_{as}, \varphi_{bs}, \varphi_{cs}$ = เส้นแรงแม่เหล็กเชื่อมโยง (Flux Linkage) ที่ตัวอยู่กับที่เฟส a, b, c ตามลำดับ

$\varphi_{ar}, \varphi_{br}, \varphi_{cr}$ = เส้นแรงแม่เหล็กเชื่อมโยง (Flux Linkage) ที่ตัวหมุน

p = แสดงแทนอนุพันธ์ ($p = \frac{d}{dt}$)



รูปที่ 2.8 วงจรไฟฟ้าของตัวอยู่กับที่และตัวหมุน

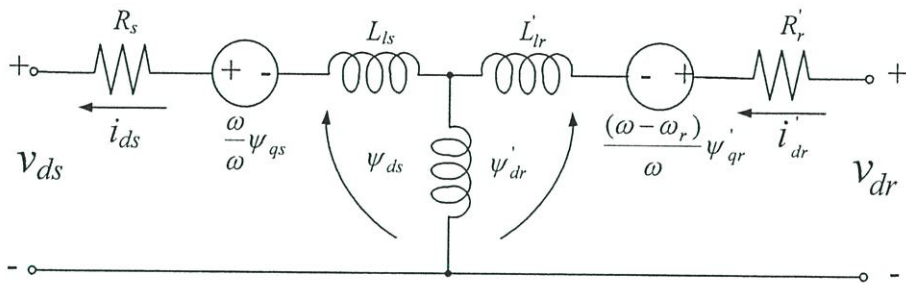
จากสมการแรงดันไฟฟ้าที่ตัวอยู่กับที่ ดังสมการที่ (2.5)-(2.7) และแรงดันไฟฟ้าที่ตัวหมุน ดังสมการที่ (2.8)-(2.10) เราสามารถแปลงสมการแรงดันให้อยู่ในพิกัด $dq0$ ได้ดังสมการที่ (2.11) และสมการที่ (2.12) และที่ตัวหมุน ดังสมการที่ (2.13)-(2.14) ตามลำดับ โดยพิจารณาในสภาวะสมดุล จึงแสดงเฉพาะพิกัด d และ q เท่านั้น จะไม่แสดงในพิกัด 0

$$v_{ds} = p\psi_{ds} + \frac{\omega}{\omega_b}\psi_{qs} - R_s i_{ds} \quad (2.11)$$

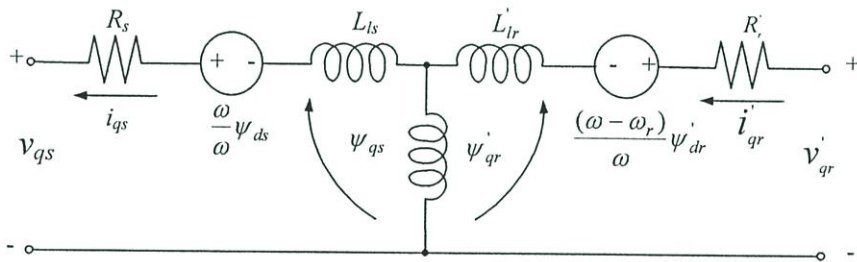
$$v_{qs} = p\psi_{qs} + \frac{\omega}{\omega_b}\psi_{ds} - R_s i_{qs} \quad (2.12)$$

$$v_{dr} = p\psi_{dr} + \frac{(\omega - \omega_r)}{\omega_b}\psi_{qr} + R_r i_{dr} \quad (2.13)$$

$$v_{qr} = p\psi_{qr} - \frac{(\omega - \omega_r)}{\omega_b}\psi_{dr} + R_r i_{qr} \quad (2.14)$$



ก. Direct Axis (d)



ข. Quadrature Axis (q)

รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในพิกัด dq0

2.4.2 สมการเส้นแรงแม่เหล็กเชื่อมโยง

ค่าเส้นแรงแม่เหล็กเชื่อมโยงของตัวอยู่กับที่ หลังจากแปลงพิกัด dq0 แล้วจะแสดงดังสมการที่ (2.28) และเส้นแรงแม่เหล็กที่ตัวหมุนจะแสดงได้ดังสมการที่(2.29) (ภาคผนวก ก.)

$$\left. \begin{aligned} \psi_{ds} &= -L_{ss}i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \psi_{qs} &= -L_{ss}i_{qs} + L_m i_{qr} \end{aligned} \right\} \quad (2.28)$$

$$\left. \begin{aligned} \psi_{dr} &= -L_{rr}i_{dr} + L_m i_{ds} \\ \psi_{qr} &= -L_{rr}i_{qr} + L_m i_{qs} \end{aligned} \right\} \quad (2.29)$$

2.4.3 สมการแรงดันตัวอยู่กับที่ และตัวหมุนในรูปสมการหนึ่งหน่วย

จากสมการแรงดันของตัวอยู่กับที่และตัวหมุน จะสามารถทำให้อยู่ในรูปสมการหนึ่งหน่วย (\bar{u}) ได้ดังสมการที่ (2.30) - (2.33) (ภาคผนวก ก.)

$$\bar{v}_{ds} = p\bar{\psi}_{ds} + \frac{\omega}{\omega_b}\bar{\psi}_{qs} - \bar{R}_s\bar{i}_{ds} \quad (2.30)$$

$$\bar{v}_{qs} = p\bar{\psi}_{qs} - \frac{\omega}{\omega_b}\bar{\psi}_{ds} - \bar{R}_s\bar{i}_{qs} \quad (2.31)$$

$$\bar{v}_{dr} = p\bar{\psi}_{dr} + \frac{(\omega - \omega_r)}{\omega_b}\bar{\psi}_{qr} - \bar{R}_r\bar{i}_{dr} \quad (2.32)$$

$$\bar{v}_{qr} = p\bar{\psi}_{qr} + \frac{(\omega - \omega_r)}{\omega_b}\bar{\psi}_{dr} - \bar{R}_r\bar{i}_{qr} \quad (2.33)$$

2.4.4 สมการพีชคณิตของแรงดันไฟฟ้าที่ตัวอยู่กับที่

จากสมการแรงดันชั่วขณะของตัวอยู่กับที่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เราสามารถหาค่าสมการแรงดันในสภาวะคงตัว (Steady State) หนึ่งหน่วย ในรูปพีชคณิต (Algebraic Equation) ได้โดยให้ $p\bar{\varphi}_{ds} = \frac{d}{dt}\bar{\varphi}_{ds} = 0$ ค่าสมการที่ชั่วของตัวอยู่กับที่ในแนวแกน d และแกน q จะแสดงดังสมการที่ (2.34) และ (2.35)

$$\bar{V}_{DS} = \bar{E}'_D - \bar{X}'\bar{I}_{QS} - \bar{R}_S\bar{I}_{DS} \quad (2.34)$$

$$\bar{V}_{QS} = \bar{E}'_Q + \bar{X}'\bar{I}_{DS} - \bar{R}_S\bar{I}_{QS} \quad (2.35)$$

กำหนดให้

$\bar{V}_{DS}, \bar{V}_{QS}$ = แรงดันในรูปหนึ่งหน่วยที่ชั่วของตัวอยู่กับที่สภาวะคงตัว ในแนวพิกัด d และ q

\bar{E}'_D, \bar{E}'_Q = แรงดันภายในชั่วครู่ (Transient) ในรูปหนึ่งหน่วยที่สร้างขึ้นที่ตัวอยู่กับที่ในสภาวะคงตัวในแนวพิกัด d และ q ซึ่ง $\bar{E}'_D = \frac{\bar{\omega}_s \bar{L}_m}{\bar{\omega}_b \bar{L}_{rr}} \bar{\psi}_{qr}$ และ

$\bar{E}'_Q = \frac{\bar{\omega}_s \bar{L}_m}{\bar{\omega}_b \bar{L}_{rr}} \bar{\psi}_{dr}$ ตามลำดับ

$\bar{I}_{DS}, \bar{I}_{QS}$ = กระแสหนึ่งหน่วยของตัวอยู่กับที่ในสภาวะคงตัว ในแนวแกน d และ q

\bar{R}_S, \bar{X}' = ค่าความต้านทานและค่าเหนี่ยวนำหนึ่งหน่วยของตัวอยู่กับที่

โดยที่ $\bar{X}' = \bar{\omega}_s \left[\bar{L}_{ss} - \frac{\bar{L}_m^2}{\bar{L}_{rr}} \right]$

2.4.5 สมการพลวัตของแรงดันไฟฟ้าที่ตัวอยู่กับที่

จากสมการแรงดันที่ตัวอยู่กับที่ในหัวข้อที่ 2.4.1 สามารถหาค่าสมการพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ ในสมการที่ (2.36) และ (2.37) โดยสมการที่แสดงในรูปพิกัด d และ q ถือเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สำคัญของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ค่า T_0 ที่ปรากฏในสมการทั้งสองเป็นคาบเวลาคงที่ของการเปลี่ยนแปลงในสภาวะชั่วคราวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งสมการทั้งสองนี้เราจะนำไปแปลงเป็นเชิงเส้นเพื่อนำไปวิเคราะห์

$$p\bar{E}'_D = \frac{\bar{\omega}_s \bar{L}_m}{\bar{L}_{rr}} \cdot \bar{v}_{qr} - s\omega_s \bar{E}'_Q - \frac{1}{T_0} [\bar{E}'_D - (\bar{X}_s - \bar{X}') \cdot \bar{I}_{QS}] \quad (2.36)$$

$$p\bar{E}'_Q = -\frac{\bar{\omega}_s \bar{L}_m}{\bar{L}_{rr}} \cdot \bar{v}_{dr} + s\omega_s \bar{E}'_D - \frac{1}{T_0} [\bar{E}'_Q + (\bar{X}_s - \bar{X}') \cdot \bar{I}_{DS}] \quad (2.37)$$

2.4.6 สมการแรงบิด

การหาสมการแรงบิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับผลคูณของเส้นแรงแม่เหล็กและกระแสในแนวแกนเดียวกัน จะหาได้ดังสมการที่ (2.38)

$$\begin{aligned} \bar{T}_e &= \bar{\varphi}_{qr} \cdot \bar{i}_{dr} - \bar{\varphi}_{dr} \cdot \bar{i}_{qr} \\ p\bar{\omega} &= \frac{1}{2H} (\bar{T}_m - \bar{T}_e) \end{aligned} \quad (2.38)$$

หรือค่าอนุพันธ์ของค่าสลิปจะแสดงดังสมการ

$$ps = \frac{1}{2H} (\bar{T}_m - \bar{T}_e) \quad (2.39)$$

กำหนดให้

$$\begin{aligned} \bar{P} &= \text{ค่ากำลังไฟฟ้าออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ(หนึ่งหน่วย)} \\ \bar{H} &= \text{ค่าคงที่ของโมเมนต์แรงเฉื่อยของตัวหมุน(หนึ่งหน่วย)} \\ \bar{T}_e &= \text{แรงบิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (หนึ่งหน่วย)} \end{aligned}$$

ดังนั้นค่ากำลังไฟฟ้าหาค่าได้ดังสมการที่ (2.40) และค่าสมการอนุพันธ์ของสลิปดังสมการที่ (2.41)

$$\bar{P} = \bar{E}_D \bar{I}_{DS} + \bar{E}_Q \bar{I}_{QS} \quad (2.40)$$

$$\begin{aligned} \bar{P} &= \bar{T}_e \bar{\omega}_s \\ \therefore \bar{T}_e &= \frac{\bar{E}_D \bar{I}_{DS} + \bar{E}_Q \bar{I}_{QS}}{\bar{\omega}_s} \end{aligned}$$

$$ps = \frac{1}{2H} \left(\bar{T}_m - \frac{\bar{E}_D \bar{I}_{DS} + \bar{E}_Q \bar{I}_{QS}}{\bar{\omega}_s} \right) \quad (2.41)$$

2.5 สมการเชิงเส้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่

เนื่องจากระบบส่งกำลังไฟฟ้านี้เป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Systems) ดังนั้น การศึกษาเสถียรภาพแบบสัญญาณขนาดเล็กถือว่ามี การเปลี่ยนแปลงระดับเล็ก ๆ รอบจุดสมดุล ดังนั้น เราจะพิจารณาระบบให้ มีการเปลี่ยนแปลงที่เป็นเชิงเส้น โดยจะทำการแปลงระบบเป็นเชิงเส้น (Linearization) เพื่อนำไปวิเคราะห์โดยวิธีหาค่าไอเกน (Eigen-value) และเวกเตอร์ไอเกน (Eigen vector) จากนั้นจะหาค่าแฟกเตอร์ความมีส่วนร่วม (Participation factor) เพื่อหาความมีส่วนร่วมของ โหมด และตัวแปรสถานะที่แสดงผล เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะความยาวสายส่งกำลังไฟฟ้า และ จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จากสมการพลวัตของแรงดันเครื่องกำเนิดไฟฟ้างดสมการที่ (2.36), (2.37) และ (2.41) สามารถแปลงเชิงเส้น ได้ดังสมการที่ (2.42) และ (2.43) และ (2.44) ตามลำดับดังนี้ (รายละเอียดคัง ภาคผนวก ข)

$$p(E'_{Q0} + \Delta E'_Q) = \frac{\partial}{\partial V_{dr}} \left(\frac{\omega_s L_m}{L_{rr}} \cdot V_{DR} \right) \Delta V_{dr} + \frac{\partial}{\partial s} (s \omega_s E'_D) \Delta s + \frac{\partial}{\partial E'_D} (s \omega_s E'_D) \Delta E'_D - \frac{\partial}{\partial E'_Q} \left(\frac{E'_Q}{T_0} \right) \Delta E'_Q - \frac{\partial}{\partial I_{DS}} \left[\frac{(X_s - X')}{T_0} \cdot I_{DS} \right] \Delta I_{DS}$$

$$p \Delta E'_Q = \left(\frac{\omega_s L_m}{L_{rr}} \right) \Delta V_{dr} + (\omega_s E'_D) \Delta s + (s \omega_s) \Delta E'_D - \left(\frac{1}{T_0} \right) \Delta E'_Q - \frac{(X_s - X')}{T_0} \cdot \Delta I_{DS} \quad (2.42)$$

$$p \Delta E'_D = - \left(\frac{\omega_s L_m}{L_{rr}} \right) \Delta V_{qr} - (\omega_s E'_Q) \Delta s - (s \omega_s) \Delta E'_Q - \left(\frac{1}{T_0} \right) \Delta E'_D + \frac{(X_s - X')}{T_0} \cdot \Delta I_{QS} \quad (2.43)$$

$$p(s_0 + \Delta s) = \frac{1}{2H} \left[\Delta T_m - \frac{\partial}{\partial E'_D} \left(\frac{E'_D I_{DS}}{\omega_s} \right) \cdot \Delta E'_D - \frac{\partial}{\partial I_{DS}} \left(\frac{E'_D I_{DS}}{\omega_s} \right) \Delta I_{DS} - \frac{\partial}{\partial E'_Q} \left(\frac{E'_Q I_{QS}}{\omega_s} \right) \cdot \Delta E'_Q - \frac{\partial}{\partial I_{QS}} \left(\frac{E'_Q I_{QS}}{\omega_s} \right) \Delta I_{QS} \right]$$

$$p \Delta s = \frac{1}{2H} \left[\Delta T_m - \left(\frac{I_{DS}}{\omega_s} \right) \cdot \Delta E'_D - \left(\frac{E'_D}{\omega_s} \right) \Delta I_{DS} - \left(\frac{I_{QS}}{\omega_s} \right) \cdot \Delta E'_Q - \left(\frac{E'_Q}{\omega_s} \right) \Delta I_{QS} \right] \quad (2.44)$$

ดังนั้นค่าสมการพลวัตเชิงเส้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะเขียนในรูปของเมตริกเชิงเส้น ได้ดังสมการที่ (2.45) เพื่อให้คำนวณได้สะดวก จะพิจารณาตัวแปรในรูปหนึ่งหน่วย

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \Delta \dot{E}'_Q \\ \Delta \dot{E}'_D \\ \Delta \dot{s} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_0} & s\omega_s & \omega_s E'_D \\ -s\omega_s & -\frac{1}{T_0} & -\omega_s E'_Q \\ -\frac{I_{QS}}{2H\omega_s} & -\frac{I_{DS}}{2H\omega_s} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E'_Q \\ \Delta E'_D \\ \Delta s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\omega_s L_m}{L_{rr}} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\omega_s L_m}{L_{rr}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2H} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{DR} \\ \Delta V_{QR} \\ \Delta T_m \end{bmatrix} \\
&+ \begin{bmatrix} -\frac{(X_s - X')}{T_0} & 0 \\ 0 & \frac{(X_s - X')}{T_0} \\ -\frac{\Delta E'_D}{2H\omega} & -\frac{\Delta E'_Q}{2H\omega} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_{DS} \\ \Delta I_{QS} \end{bmatrix} \quad (2.45)
\end{aligned}$$

นอกจากนี้เรายังสามารถเขียนในแบบจำลองนี้ในรูปของฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยทำการแปลงลาปลาซของสมการแรงดันในแนวแกน Q และแนวแกน D และค่าของสลิปได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
\Delta \dot{E}'_D &= -\frac{1}{T_0} \Delta E'_D - s\omega_s \Delta E'_Q - \omega_s E'_Q \Delta s + \frac{\omega_s L_m}{L_{rr}} \Delta V_{DR} \\
s \Delta E'_D &= K_1 \Delta E'_D + K_2 \Delta E'_Q + K_3 \Delta s + K_4 \Delta V_{QR} \\
(s - K_1) \Delta E'_D &= K_2 \Delta E'_Q + K_3 \Delta s + K_4 \Delta V_{qr} \\
(T_d s + 1) \Delta E'_D &= \frac{K_2}{-K_1} \Delta E'_Q + \frac{K_3}{-K_1} \Delta s + \frac{K_4}{-K_1} \Delta V_{qr} \quad (2.46)
\end{aligned}$$

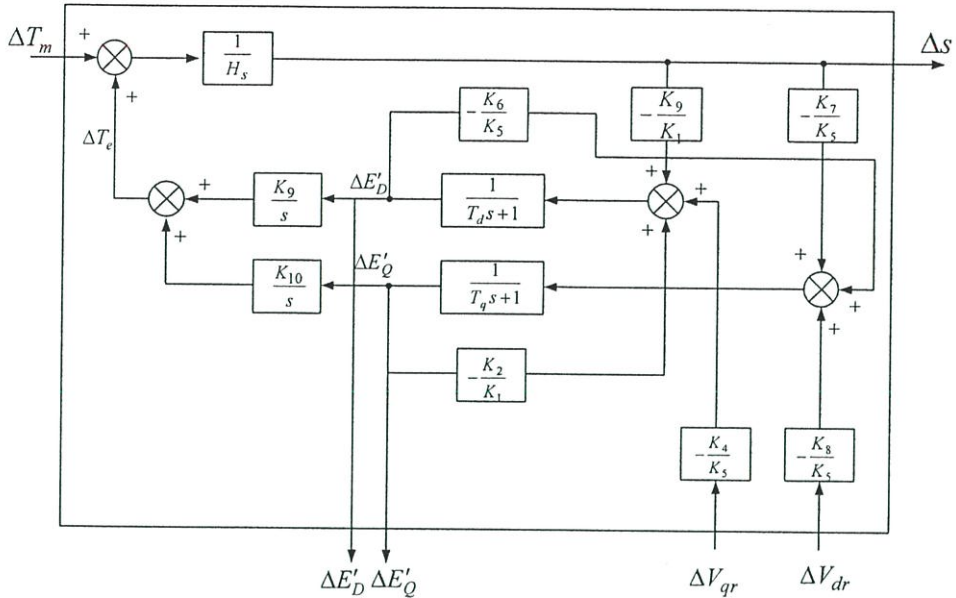
$$\begin{aligned}
(T_q s + 1) \Delta E'_Q &= \frac{K_6}{-K_5} \Delta E'_D + \frac{K_7}{-K_5} \Delta s + \frac{K_8}{-K_5} \Delta V_{dr} \\
\Delta \dot{E}'_Q &= s\omega_s \Delta E'_D - \frac{1}{T_0} \Delta E'_Q + \omega_s E'_D \Delta s - \frac{\omega_s L_m}{L_{rr}} \cdot \Delta V_{dr} \quad (2.47)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Delta \dot{s} &= -\frac{I_{DS}}{2H\omega_s} \cdot \Delta E'_D - \frac{I_{QS}}{2H\omega_s} \cdot \Delta E'_Q + \frac{\Delta T_m}{2H} \\
s \Delta s &= -K_9 \cdot \Delta E'_D - K_{10} \cdot \Delta E'_Q + \frac{\Delta T_m}{2H} \quad (2.48)
\end{aligned}$$

โดยที่

$$\begin{aligned}
K_1 &= -\frac{1}{T_0}, \quad K_2 = -s\omega_s, \quad K_3 = -\omega_s E'_Q, \quad K_4 = \frac{\omega_s L_m}{L_{rr}}, \\
K_5 &= s\omega_s, \quad K_6 = -\frac{1}{T_0} = K_1, \quad K_7 = \omega_s E'_D, \quad K_8 = -K_4, \quad K_9 = -\frac{I_{DS}}{2H\omega_s}
\end{aligned}$$

จากฟังก์ชันการถ่ายโอนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากสมการที่ (2.46)-(2.48) สามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งประโยชน์ของฟังก์ชันการถ่ายโอนสามารถนำไป วิเคราะห์ด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น วิธีทางเดินราก หรือ ไดอะแกรมโบด เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบตัวควบคุมป้อนกลับ ได้ต่อไป



รูปที่ 2.10 ฟังก์ชันการถ่ายโอนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

จากเนื้อหาที่กล่าวมาในบทนี้ ได้กล่าวถึงการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยแสดงถึงสมการพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในรูปของสมการเชิงเส้น (Linearization) ดังแสดงในสมการที่ 2.48 และสามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 2.10 จากสมการที่หาได้นี้จะนำไปสร้างแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกหรือแบบความเร็วคงที่ต่อเชื่อมกับระบบกริด เพื่อทำไปวิเคราะห์เสถียรภาพแบบสัญญาณขนาดเล็ก ด้วยวิธีวิเคราะห์ค่าไอเกน ในระยะความยาวสายส่งกำลังไฟฟ้าระยะต่าง ๆ เพื่อหาความยาวสูงสุด ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมนี้ ยังมีเสถียรภาพ โดยไม่มีการชดเชยจากตัวประจุภายนอก และปรับเปลี่ยนค่ากำลังไฟฟ้า โดยเพิ่มจำนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกลุ่มเดียวกันเพื่อทดสอบจำนวนเครื่องกำเนิดที่ทำให้ระบบเสถียรภาพ

บทที่ 3

การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบสัญญาณขนาดเล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมต่อเชื่อมกับกริด

จากแบบจำลองพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในรูปของสมการเชิงเส้นที่หาได้ในบทที่ 2 จะนำมาสร้างแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อเชื่อมโยงกับกริดผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาเสถียรภาพแบบสัญญาณขนาดเล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกหรือแบบความเร็วคงที่ที่ไม่ติดตั้งตัวชดเชย เพื่อจะหาค่าระยะความยาวสูงสุดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจากกริดได้ โดยที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ายังไม่สูญเสียเสถียรภาพแบบสัญญาณขนาดเล็ก และหาจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อขนานกัน ในเงื่อนไขการทำงานเดียวกันที่ยังทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีเสถียรภาพ

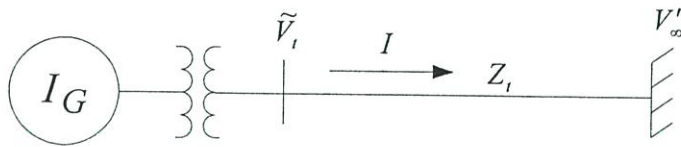
3.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบสัญญาณขนาดเล็ก

จากวัตถุประสงค์ในการศึกษาที่กล่าวแล้ว สามารถเขียนเป็นขั้นตอนของการศึกษา เพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพแบบสัญญาณขนาดเล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่ที่ต่อเชื่อมกับกริด โดยวิธีวิเคราะห์ค่าไอเกน จากสมการเชิงเส้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อเชื่อมกับกริด ในเงื่อนไขของความยาวของสายส่งกำลังไฟฟ้าระยะความยาวต่าง ๆ เพื่อหาระยะวิกฤตที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีเสถียรภาพได้จากความไม่เพียงพอของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ได้รับจากกริด โดยขั้นตอนการศึกษามีดังนี้

- สร้างแบบจำลองพลวัตในรูปเชิงเส้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อร่วมกับสายส่งกำลังไฟฟ้าและระบบกริด โดยไม่มีการชดเชยด้วยตัวประจุ
- คำนวณหาตัวแปรไม่ทราบค่าหรือค่าเริ่มต้น เช่น กำลังไฟฟ้าจริง ค่าสลิป ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ แรงดันที่ขั้ว เป็นต้น จากการคำนวณการไหล (Load Flow Computation) ในกรณีที่กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟไม่คงที่
- คำนวณหาค่าไอเกน โดยเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของสายส่งกำลังไฟฟ้า ตามระยะความยาวของสายส่งกำลังไฟฟ้าระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบกริด เพื่อหาระยะความยาวสูงสุดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะยังมีเสถียรภาพ
- คำนวณหาค่าไอเกน โดยการเพิ่มจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อขนานกัน พิจารณาการทำงานในเงื่อนไขเดียวกัน

3.2 สมการเชิงเส้นของสมการสายส่งกำลังไฟฟ้าต่อเชื่อมกับกริด

จากรูปที่ 3.1 แสดงวงจรเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่ เชื่อมโยงกับระบบกริด (Grid Line System) เพื่อเป็นการส่งกำลังไฟฟ้าจริงให้กับระบบกริด แต่จะรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจากระบบกริดเพื่อผลิตแรงดันไฟฟ้า การเชื่อมโยงจะเชื่อมโยงผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า กำหนดค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งและหม้อแปลงไฟฟ้า ให้มีค่าเท่ากับ Z_t ซึ่งถือเป็นอิมพีแดนซ์สมมูลของสายส่งกำลังไฟฟ้า สามารถเขียนสมการกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากเครื่องกำเนิดไปสู่กริด จะแสดงดังสมการที่ (3.1)



รูปที่ 3.1 การเชื่อมโยงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับสายกริด

โดยกำหนดให้

- \tilde{I}_G = ค่าเฟสเซอร์ของกระแสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- \tilde{V}_t = แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
- \tilde{V}_∞ = แรงดันที่กริดในที่นี้กำหนดให้เป็นบัสอนันต์
- R_t, X_t = ค่าความต้านทานและค่าเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้า
- V_D, V_Q = ค่าแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดในแนวแกน d และ q ตามลำดับ
- I_D, I_Q = ค่ากระแสจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในแนวแกน d และ q ตามลำดับ
- Z_t = ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งกำลังไฟฟ้า

เขียนสมการกระแสได้ดังนี้

$$\tilde{I}_G = \frac{\tilde{V}_t - \tilde{V}_\infty}{\tilde{Z}_t} \quad (3.1)$$

$$\tilde{V}_t = -\tilde{V}_\infty + \tilde{I}_G \tilde{Z}_t$$

$$V_Q + jV_D = (I_Q + jI_D)(R_t + jX_t) + V_\infty$$

$$V_Q = R_t I_Q - X_t I_D + V_\infty$$

$$V_D = R_t I_D + X_t I_Q$$

จาก สมการที่ (3.1) เราจะได้แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และแยกองค์ประกอบในแนวแกน Q และแนวแกน D จากนั้นนำมาแปลงเป็นเชิงเส้นได้ดังสมการที่ (3.2) และ (3.3)

$$\Delta V_Q = R_t \Delta I_Q - X_t \Delta I_D \quad (3.2)$$

$$\Delta V_D = R_t \Delta I_D + X_t \Delta I_Q \quad (3.3)$$

จากสมการที่ (3.4) และ (3.5) เราจะนำไปเขียนในรูปสมการสายส่งกำลังไฟฟ้าเพื่อไปแทนค่าในสมการพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อไปดังแสดงในสมการที่ (3.6)

$$\Delta V_Q = R_t \Delta I_Q + X_t \Delta I_D \quad (3.4)$$

$$\Delta V_D = R_t \Delta I_D - X_t \Delta I_Q \quad (3.5)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta V_Q \\ \Delta V_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_t & -X_t \\ X_t & R_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_Q \\ \Delta I_D \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

จากสมการที่ชคณิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสมการที่ (3.7) นำไปแทนค่าในสมการของสายส่งกำลังไฟฟ้าจะได้ค่าเชิงเส้นของกระแสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในแนวแกน Q และแกน D ดังสมการที่ (3.8)

$$\begin{aligned} V_{QS} &= E'_Q + X' I_{DS} - R_s I_{QS} \\ V_{DS} &= E'_D - X' I_{QS} - R_s I_{DS} \\ \begin{bmatrix} \Delta E_Q \\ \Delta E_D \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_Q \\ \Delta V_D \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s & -X' \\ X' & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_{QS} \\ \Delta I_{DS} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.7)$$

นำค่าจาก สมการสายส่งกำลังไฟฟ้า มาแทนค่า

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta E_Q \\ \Delta E_D \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_t & -X_t \\ X_t & R_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_Q \\ \Delta I_D \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s & -X' \\ X' & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_Q \\ \Delta I_D \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \Delta I_Q \\ \Delta I_D \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} (R_t + R_s) & -(X_t + X') \\ (X_t + X') & (R_t + R_s) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta E_Q \\ \Delta E_D \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$[B] = \begin{bmatrix} B_1 & B_2 \\ B_3 & B_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_t + R_s) & -(X_t + X') \\ (X_t + X') & (R_t + R_s) \end{bmatrix}^{-1} \quad (3.9)$$

จากสมการที่ (3.9) จะได้สัมประสิทธิ์ของเมตริก B เพื่อนำไปใช้ใน สมการสแตกสเปซ จากนั้นนำค่ากระแสไปแทนค่าสมการพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อลดรูปเป็นสแตกสเปซของการวิเคราะห์ค่าเสถียรภาพแบบสัญญาณขนาดเล็ก

จากสมการที่ (3.8) และ (3.9) จะได้ค่าสมการเชิงเส้นของกระแสในสายส่งกำลังไฟฟ้าเมื่อนำไปแทนค่าในสมการพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังสมการที่ (3.10) ที่หาได้จากบทที่ 2 เราจะได้สมการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ดังสมการที่ (3.12)

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta \dot{E}'_Q \\ \Delta \dot{E}'_D \\ \Delta \dot{s} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_0} & s\omega_s & \omega_s E'_D \\ -s\omega_s & -\frac{1}{T_0} & -\omega_s E'_Q \\ -\frac{I_{QS}}{2H\omega_s} & -\frac{I_{DS}}{2H\omega_s} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E'_Q \\ \Delta E'_D \\ \Delta s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\omega_s L_m}{L_{rr}} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\omega_s L_m}{L_{rr}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2H} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{DR} \\ \Delta V_{QR} \\ \Delta T_m \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} 0 & -(X_s - X') \\ \frac{(X_s - X')}{T_0} & \frac{E'_Q}{2H\omega_s} \\ \frac{E'_D}{-2H\omega_s} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_Q \\ \Delta I_D \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta \dot{E}'_Q \\ \Delta \dot{E}'_D \\ \Delta \dot{s} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_0} & s\omega_s & \omega_s E'_D \\ -s\omega_s & -\frac{1}{T_0} & -\omega_s E'_Q \\ -\frac{I_{QS}}{2H\omega_s} & -\frac{I_{DS}}{2H\omega_s} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E'_Q \\ \Delta E'_D \\ \Delta s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\omega_s L_m}{L_{rr}} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\omega_s L_m}{L_{rr}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2H} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{DR} \\ \Delta V_{QR} \\ \Delta T_m \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} 0 & -(X_s - X') \\ \frac{(X_s - X')}{T_0} & \frac{E'_Q}{2H\omega_s} \\ \frac{E'_D}{-2H\omega_s} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_s & -(X_t + X') \\ \frac{R_s^2 + (X_t + X')^2}{(X_t + X')} & \frac{R_s^2 + (X_t + X')^2}{R_s} \\ \frac{(X_t + X')}{R_s^2 + (X_t + X')^2} & \frac{R_s}{R_s^2 + (X_t + X')^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E'_Q \\ \Delta E'_D \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.11)$$

จากสมการที่ (3.11) เราสามารถหาค่าประกอบของเมตริก **A** ได้ เพื่อให้การแสดงง่ายขึ้น จะแทนค่าเป็นค่าคงที่ K_1 - K_9 และเมตริก **B** แสดงในสมการที่ (3.13) และสมการที่ (3.14)

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \quad (3.12)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} K_1 & K_2 & K_3 \\ K_4 & K_5 & K_6 \\ K_7 & K_8 & K_9 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

โดยที่

$$\begin{aligned}
 K_1 &= \frac{-(X_s - X')(X_t + X')}{T_0 \left[(R_s + R_t)^2 + (X_t - X')^2 \right]} - \frac{1}{T_0} \\
 K_2 &= -s\omega_s - \frac{(R_s + R_t)(X_s - X')}{T_0 \left[(R_s + R_t)^2 + (X_t - X')^2 \right]} \\
 K_3 &= -\omega_s E'_Q \\
 K_4 &= \frac{(R_s + R_t)(X_s - X')}{T_0 \left[(R_s + R_t)^2 + (X_t + X')^2 \right]} + s\omega_s \\
 K_5 &= \frac{-(X_s - X')(X_t + X')}{T_0 \left[(R_s + R_t)^2 + (X_t + X')^2 \right]} - \frac{1}{T_0} \\
 K_6 &= \omega_s E'_D \\
 K_7 &= \frac{-E'_D(R_s + R_t) - E'_Q(X_t + X')}{2H \left[(R_s + R_t)^2 + (X_t + X')^2 \right]} - \frac{I_Q}{2H} \\
 K_8 &= \frac{-E'_Q(R_s + R_t) + E'_D(X_t + X')}{2H \left[(R_s + R_t)^2 + (X_t + X')^2 \right]} - \frac{I_Q}{2H} \\
 K_9 &= 0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= \begin{bmatrix} \Delta \dot{E}'_Q \\ \Delta \dot{E}'_D \\ \Delta \dot{s} \end{bmatrix} & x &= \begin{bmatrix} \Delta E'_Q \\ \Delta E'_D \\ \Delta s \end{bmatrix} & u &= \begin{bmatrix} \Delta V_{DR} \\ \Delta V_{QR} \\ \Delta T_m \end{bmatrix} \\
 B &= \begin{bmatrix} \frac{\omega_s L_m}{L_{rr}} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\omega_s L_m}{L_{rr}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2H} \end{bmatrix} & & & & & (3.14)
 \end{aligned}$$

ค่าสเททสเปซ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อเชื่อมผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงกับระบบกริด สามารถหาได้ดังสมการที่ (3.15) โดยมีค่า x เป็นตัวแปรสถานะ u เป็นตัวแปรอินพุทและค่าของ y เป็นตัวแปรเอาต์พุท ซึ่งในที่นี้ตัวแปรเอาต์พุทจะแสดงเป็นค่ากำลังไฟฟ้างแสดงในหัวข้อที่ 3.3

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{E}'_Q \\ \Delta \dot{E}'_D \\ \Delta \dot{s} \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} \Delta E'_Q \\ \Delta E'_D \\ \Delta s \end{bmatrix} + [B] \begin{bmatrix} \Delta V_{DR} \\ \Delta V_{QR} \\ \Delta T_m \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

3.3 การหาสมการเชิงเส้นของกำลังไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.1 เราจะหาสมการเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในที่นี้เราจะกำหนดให้กำลังไฟฟ้าเป็นเอาต์พุตของระบบ โดยเอาต์พุตนี้จะจ่ายให้กับระบบหลักหรือจ่ายให้กับกริด ดังนั้นจะพิจารณาจากสมการกำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent power: S) เพื่อจะนำไปแปลงเป็นเชิงเส้นและประกอบใน สเตตสเปซ ของการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบสัญญาณขนาดเล็ก ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟ จะแสดงดังสมการที่ (3.16) และ (3.17)

$$\begin{aligned}\tilde{S} &= \tilde{V} \cdot \tilde{I}^* \\ &= (V_Q + jV_D)(I_Q - jI_D) \\ &= (V_Q I_Q + V_D I_D) + j(V_D I_Q - V_Q I_D)\end{aligned}\quad (3.16)$$

$$\left. \begin{aligned}P &= V_Q I_Q + V_D I_D \\ Q &= V_D I_Q - V_Q I_D\end{aligned}\right\} \quad (3.17)$$

จากสมการพีชคณิตของแรงดัน

$$\left. \begin{aligned}V_{QS} &= E'_Q + XI_D - R_s I_Q \\ V_D &= E'_D - XI_Q - R_s I_D\end{aligned}\right\} \quad (3.18)$$

แทนค่า V_Q, V_D

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_Q & I_D \\ -I_D & I_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E'_Q \\ \Delta E'_D \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ a_3 & a_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_Q \\ \Delta I_D \end{bmatrix}$$

$$a_1 = E'_Q + 2R_s I_Q$$

$$a_2 = E'_D + 2R_s I_D$$

$$a_3 = E'_D + 2X I_Q$$

$$a_4 = -E'_Q + 2X I_D$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_Q & I_D \\ -I_D & I_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E'_Q \\ \Delta E'_D \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ a_3 & a_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 & b_2 \\ b_3 & b_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E'_Q \\ \Delta E'_D \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [KII] \begin{bmatrix} \Delta E'_Q \\ \Delta E'_D \\ \Delta s \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$[KII] = \begin{bmatrix} I_D & I_Q \\ -I_D & I_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_Q & I_D \\ -I_D & I_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_s & -X' \\ X' & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 & B_2 \\ B_3 & B_4 \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} V_Q & V_D \\ V_D & V_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 & B_2 \\ B_3 & B_4 \end{bmatrix}$$

$$\therefore \begin{bmatrix} \Delta \dot{E}'_Q \\ \Delta \dot{E}'_D \\ \Delta \dot{s} \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} \Delta E'_Q \\ \Delta E'_D \\ \Delta s \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ 3.18 จะได้สมการเอทพุท ในที่นี้เราจะพิจารณาเป็นค่าของกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่จ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้กับกริด

3.4 การหาค่าเริ่มต้นของการศึกษาด้วยการคำนวณการไหลของโหลด

การหาผลเฉลยของการคำนวณการไหลของโหลด ในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าเริ่มต้น หรือตัวแปรไม่ทราบค่าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่ที่ต่อเชื่อมอยู่กับระบบกริด ในการคำนวณค่าการไหลของโหลด (Load Flow Calculation for Induction Generator) ในกรณีนี้ เพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้า มุมของแรงดันไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟ และค่าสลิปเพื่อใช้ในการคำนวณ สมการพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม โดยจะกำหนดให้ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) ที่ได้ส่งผ่านจากเพลา มีค่าคงที่ เนื่องจากการไหลทางกลมีการควบคุม การปรับเปลี่ยนระยะพิท (pitch) ของใบกังหัน เพื่อให้ค่ากำลังไฟฟ้าไม่ปรับเปลี่ยนตามความเร็วลม จากนั้น จะใช้การคำนวณการไหล ของโหลดด้วยวิธี นิวตันร่าฟสัน

การคำนวณการไหลของโหลด ตามวิธีดั้งเดิมกำลังไฟฟ้าจริง กับกำลังไฟฟารีแอกทีฟจะถูกกำหนดให้คงที่ ดังนั้นค่ากำลังไฟฟ้าทั้งสองจะไม่ขึ้นอยู่กับแรงดันที่ขั้วหรือแรงดันที่บัส แต่ในการคำนวณการไหลของโหลดที่เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงมักถูกกำหนดให้คงที่การเปลี่ยนแปลงของกำลังงานรีแอกทีฟจะไวต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ขั้ว ดังนั้นค่ากำลังงานไฟฟารีแอกทีฟ และสลิป จะถูกเปลี่ยนแปลงทุกรอบของการคำนวณการไหลของโหลด จะสรุปได้ดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 อ่านข้อมูลจากบัสอิมพีแดนซ์ ของสายส่ง อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า พิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
- ขั้นตอนที่ 2 กำหนดค่าเริ่มต้นของแรงดันและมุมที่บัส ทุกบัส
- ขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่า Admittance

ขั้นตอนที่ 4 กำหนดรอบการคำนวณ ($k=0$)

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณหาค่าสลิป และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

ขั้นตอนที่ 6 หาค่าการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้า

$$\Delta P^{(k)} = P_{(schadue)} - P_{(calculate)}$$

$$\Delta Q^{(k)} = Q_{(schadue)} - Q_{(calculate)}$$

ขั้นตอนที่ 7 ปรับปรุงค่า จาโกเบียนเมตริก

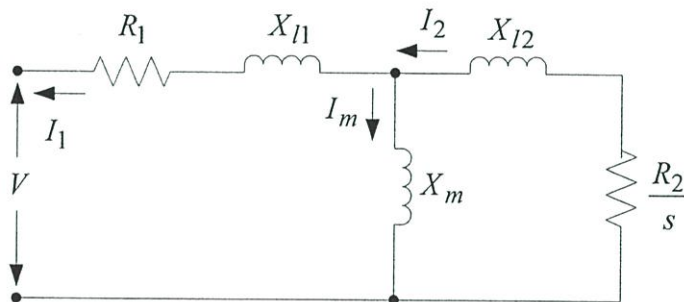
ขั้นตอนที่ 8 คำนวณหาค่าแรงดันและมุมที่แรงดัน

ขั้นตอนที่ 9 ปรับปรุงค่าแรงดันและมุมใหม่

ขั้นตอนที่ 10 ตรวจสอบค่ากำลังไฟฟ้า Mismatch ว่าอยู่ในเกณฑ์หรือไม่ ถ้าได้ให้หยุดการทำงาน

ขั้นตอนที่ 11 เพิ่มจำนวนรอบ $K=K+1$ แล้วกลับไปทำตามขั้นตอนที่ 5 ใหม่

จากรูปที่ 3.2 ได้แสดงวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำอย่างพื้นฐานเพื่อนำไปคำนวณหาสูตรการคำนวณการไหลของโหลดเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อกับบัสภายนอก ที่ใช้การวิเคราะห์วงจรสมมูลนี้ ทำให้เราได้รับสมการในการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าเหนี่ยวนำค่าสลิป และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังสมการที่ (3.20) – (3.22) ตามลำดับ



รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

$$P_e = \frac{[R_1(R_2^2 + s^2(X_m + X_{l1})^2) + sR_2X_m^2]|V|^2}{[R_2R_1 + s(X_{l2}^2 - (X_m + X_{l2})(X_m + X_{l1}))]^2 + [R_2(X_m + X_{l1}) + sR_1(X_m + X_{l2})]^2} \quad (3.20)$$

$$a = P_e R_1^2 (X_{l2} + X_m)^2 + P_e (X_m X_{l2} + X_{l1} (X_{l2} + X_m))^2 - |V|^2 R_1 (X_{l2} + X_m)^2$$

$$b = 2P_e R_1 R_2 X_m^2 - |V|^2 R_2 X_m^2$$

$$c = P_e R_2^2 (X_{l1} + X_m)^2 + P_e (R_2 R_1)^2 - |V|^2 R_1 R_2^2$$

$$s = \min \left| \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \right| \quad (3.21)$$

$$Q_e = \frac{[X_m X_{I2} s^2 ((X_m + X_{I2})) X_{I1} s^2 (X_m + X_{I2})^2 + R_2^2 ((X_m + X_{I1}))] |V|^2}{[R_2 R_1 + s (X_m^2 - (X_m + X_{I2})(X_m + X_{I1}))]^2 + [R_2 (X_m + X_{I1}) + s R_1 (X_m + X_{I2})]^2} \quad (3.22)$$

- โดยที่ P_e = กำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่าย
 Q_e = กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่คำนวณได้
 R_1, R_2 = ความต้านทานของขดลวดตัวอยู่กับที่และตัวหมุนตามลำดับ
 X_{I1}, X_{I2} = ค่าเหนี่ยวนำของขดลวดตัวอยู่กับที่และตัวหมุนตามลำดับ
 X_m = ค่าเหนี่ยวนำส่งผ่านระหว่างตัวอยู่กับที่และตัวหมุน
 s = ค่าสลลิปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

การเปลี่ยนแปลงของค่าสลลิปทุกรอบของการคำนวณ จะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นเมื่อผลลัพธ์เข้าสู่ศูนย์ ตามการคำนวณในขั้นตอนที่ 5 ถึงขั้นตอนที่ 11 สมบูรณ์จะได้ค่ากำลังไฟฟ้า แรงดัน และค่าสลลิป เพื่อนำไปแทนค่าในสมการที่ 3.16 ต่อไป การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ ที่ได้แสดงในหัวข้อต่อไป เป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมที่นำเสนอมาต่อเชื่อมกับกริด จำนวนการไหลของไหลเพื่อหาค่าเริ่มต้นของสมการสถานะเพื่อนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพแบบสัญญาณขนาดเล็กในเงื่อนไขต่าง ๆ ตามขอบเขตของวิทยานิพนธ์

3.5 การศึกษาค่าเสถียรภาพแบบสัญญาณขนาดเล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมด้วยการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การศึกษาค่าเสถียรภาพแบบสัญญาณขนาดเล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมต่อเชื่อมกับสายกริดดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ 3.12 ถึงสมการที่ 3.14 วัตถุประสงค์ของการศึกษาเพื่อหาค่าไอเกน เมื่อระยะเวลาความยาวของสายส่งกำลังไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป เพื่อหาค่าระยะเวลาความยาวสูงสุดของสายส่งที่มีผลต่อเสถียรภาพแบบสัญญาณขนาดเล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่ ในกรณีที่ถูกติดตั้งอยู่ไกลจากสายกริด โดยหัวข้อนี้การศึกษาจะแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ

- การศึกษาการแปรเปลี่ยนแปลงของค่าไอเกนของแบบจำลอง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาความยาวของสายส่งกำลังไฟฟ้าที่เชื่อมโยงกับกริด เพื่อหาระยะทางสูงสุดที่ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีเสถียรภาพ

- การศึกษาเพื่อหาจำนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่วางไว้เป็นกลุ่มหรือต่อขนานกันที่มีผลต่อการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ
- หาค่าแฟกเตอร์ความสัมพันธ์ ของตัวแปรสถานะของแบบจำลอง เพื่อให้ทราบถึงตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเสถียรภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

3.5.1 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ศึกษา

ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในรูปของค่าหนึ่งหน่วย ตามตารางที่ 3.1 และค่าพารามิเตอร์ของสายส่งกำลังที่ใช้ต่อเชื่อม โยงกับกริดจะกำหนดได้ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้ในการจำลอง

MVA Base	Prated (MW)	V_{rated} (kV)	R_s (pu)	R_r (pu)	X_{l1} (pu)	X_l (pu)	X_m (pu)	ns (rpm)	H (s)	f (Hz)
100	1	0.69	0.00227	0.0022	0.025	0.046	1.38	1500	3.5	50

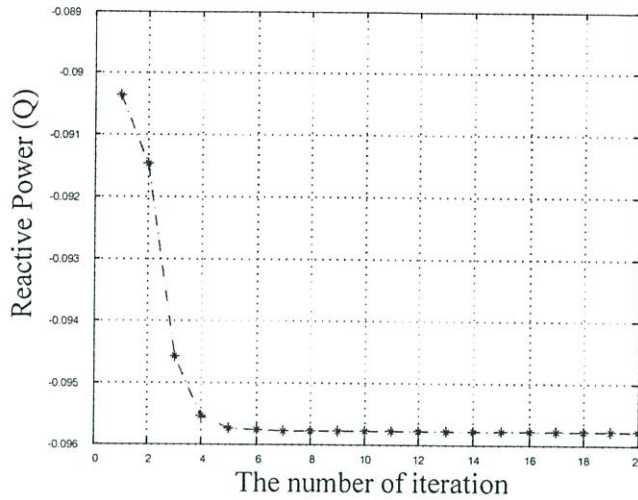
ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ของสายส่ง XLPE

Transmission line	
R (Ω /km)	0.24
X (Ω /km)	0.36
B (μ s/km)	2.8

3.5.2 คำนวณหาค่าเริ่มต้นของแบบจำลองด้วยวิธีการคำนวณการไหลของโหลด

จากแบบจำลองเชิงเส้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และสายส่งกำลังไฟฟ้าที่ต่อกับกริด ดังแสดงในสมการสแตทสเปทในสมการที่ 3.12 และค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและสายส่งกำลังไฟฟ้าตามตารางที่ 3.1 และ 3.2 นั้น จะต้องหาค่าเริ่มต้นของตัวแปรต่าง ๆ โดยวิธีการคำนวณการไหลของโหลดในกรณีที่มีโหลดบัสมีกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟไม่คงที่ และมีค่าสลิปไม่คงที่ ตามหัวข้อที่ 3.3 โดยคำนวณหาค่าเริ่มต้นของตัวแปรไม่ทราบค่าต่าง ๆ โดยเริ่มจากการกำหนดค่ากำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เท่ากับ 1 เมกกะวัตต์ คำนวณการไหลโดยกำหนดให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็น P,Q บัสหรือโหลดบัส จากนั้นคำนวณหาค่าสลิป และนำค่าสลิปมาคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้รับจากกริดผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า หาค่าแรงดันไฟฟ้า และมุมของแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและที่กริด โดยกำหนดกริดเป็นบัสอ้างอิง และบันทึกผลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ได้จากการคำนวณ แสดงได้ดังรูปที่ 3.3

จะเห็นว่าจากรอบการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจะลู่เข้าหาค่าตอบจาก -0.89 ถึง -0.096 pu. มีรอบการลู่เข้าสู่ค่าตอบประมาณ 5 รอบการคำนวณ



รูปที่ 3.3 การลู่เข้าสู่ค่าตอบของค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจากการคำนวณการไหลของโหลด

3.5.3 การศึกษาเพื่อหาการแปรเปลี่ยนของค่าไอเกน เมื่อระยะความยาวของสายส่งกำลังเปลี่ยนแปลง

การหาค่าไอเกนจากผลของการหาค่าเริ่มต้นที่กล่าวมาแล้ว เราจะหาค่าไอเกนของแบบจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ โดยหาค่าไอเกนจากเมตริก A ตามสมการที่ 3.12 เราจะหาค่าไอเกนเพื่อวิเคราะห์ตำแหน่งของค่าไอเกนเมื่อระยะทางของสายส่งกำลังไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง จากสมการการหาค่าไอเกนดังสมการที่ 3.23 (ภาคผนวก ข.2)

$$A\phi = \lambda\phi \quad (3.23)$$

โดยที่

- A = เมตริกขนาด 3×3
- ϕ = เวกเตอร์ขนาด $n \times 1$
- λ = ค่าไอเกน
- ω_d, ω_n = ค่าความถี่แดมป์และความถี่ธรรมชาติ ตามลำดับ

การหาค่าไอเกนจะหาได้

$$(A - \lambda I)\phi = 0 \quad (3.24)$$

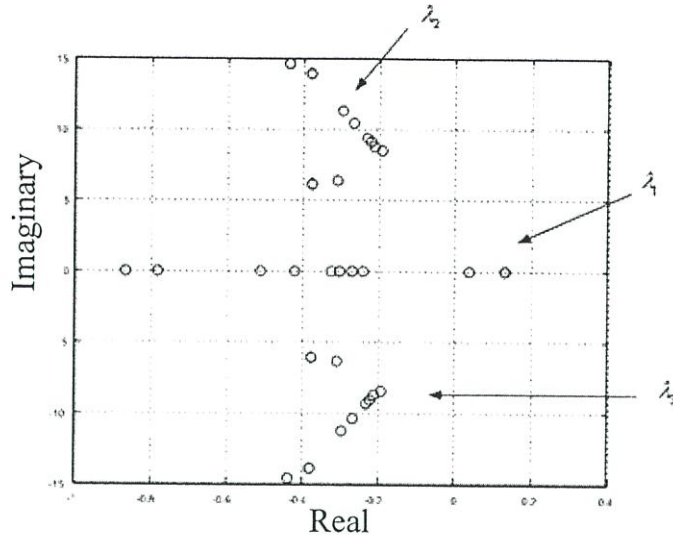
การหารากจากสมการที่(3.24) จะได้ค่าไอเกนดังสมการที่ (3.25)

$$\begin{aligned}\lambda_1, \lambda_2 &= -\zeta\omega_n \pm \omega_n \sqrt{1-\zeta^2} \\ \omega d &= \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}\end{aligned}\quad (3.25)$$

1. ทดลองปรับค่าระยะความยาวของสายส่งกำลังไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งเปลี่ยนแปลงไป จากการที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำไม่มีตัวชดเชย ทำให้ต้องรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจากระบบกริด เมื่อระยะทางของสายส่งมากขึ้น ผลจะทำให้สายส่งกำลังไฟฟ้าซึ่มซับค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟไว้จากผลของค่าเหนี่ยวนำของสายส่งที่แปรค่าตามระยะทาง จากนั้นปรับค่าตามตารางที่ 3.3 และบันทึกค่าไอเกนทั้งสามตัว ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$) ดังรูปที่ 3.4 จากผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอนพิวเตอร์ จะเห็นได้ว่าในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 1 เมกกะวัตต์ ระยะทางที่สามารถจ่ายกำลังได้ขณะที่ไม่มีตัวชดเชยคือ 40 กิโลเมตรค่าไอเกนจะเปลี่ยนจากลบเป็นบวก นั้นหมายถึงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะสูญเสียเสถียรภาพ จากค่าไอเกนในตัวที่ 1 ซึ่งเป็นค่าจำนวนจริง เป็นตัวที่เสียเสถียรภาพก่อน ส่วนค่า ไอเกนในตัวที่ 2 และตัวที่ 3 พบว่าจะอยู่ในรูปเชิงซ้อน นั่นคือค่าองค์ประกอบในแกนจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพ มีค่าสัดส่วนการแดมป์(damping ratio) ต่ำมาก เนื่องมาจากที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่มีการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ จะเริ่มเกิดออสซิลเลตตั้งแต่ 10 กิโลเมตร แต่ในที่นี้ต้องการพิจารณาการซึ่มซับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ยังคงมีเสถียรภาพอยู่ ในกรณีที่ไม่มีตัวชดเชยที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเลย

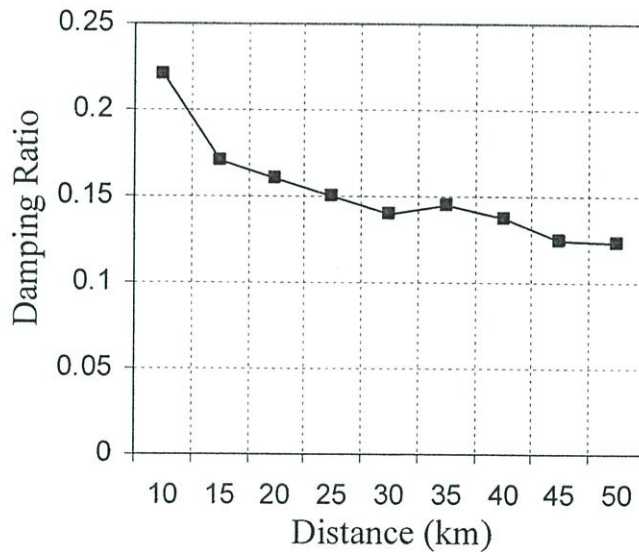
ตารางที่ 3.3 กลุ่มของค่าไอเกนที่เปลี่ยนแปลงตามระยะความยาวของสายส่งกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง

km	λ_1	λ_2	λ_3	ζ	ωd (Hz)
10	-0.7816	-0.3803 +13.8903i	-0.3803 -13.8903i	0.22	2.21
15	-0.5106	-0.2937 +11.2954i	-0.2937 -11.2954i	0.17	1.79
20	-0.4219	-0.2653 +10.3579i	-0.2653 -10.3579i	0.16	1.64
25	-0.3248	-0.2308 + 9.3263i	-0.2308 - 9.3263i	0.15	1.485
30	-0.3014	-0.2213 + 9.0785i	-0.2213 - 9.0785i	0.14	1.445
35	-0.2678	-0.2100 + 8.7189i	-0.2100 - 8.7189i	0.145	1.38
40	-0.2407	-0.1913 + 8.4280i	-0.1913 - 8.4280i	0.137	1.35
45	0.0383	-0.3065+6.3341i	-0.3065+6.3341i	0.124	1
50	0.1302	-0.3769 + 6.0584i	-0.3769 + 6.0584i	0.123	0.95

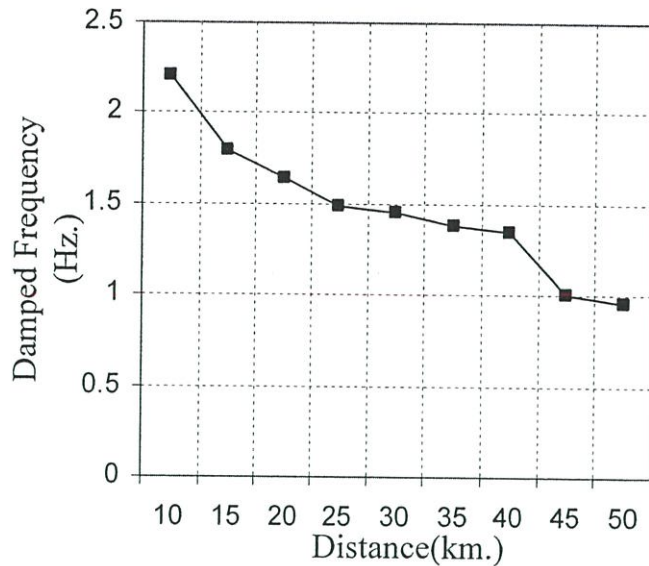


รูปที่ 3.4 การเปลี่ยนแปลงของค่าไอเกน เมื่อระยะของสายส่งเปลี่ยนแปลง

2. จากหัวข้อที่ 1 นำค่าไอเกนที่ได้จากตารางที่ 3.3 มาบันทึกค่า สัดส่วนการแดมป์เทียบกับระยะทางของสายส่งกำลังไฟฟ้าจะเห็นว่าสัดส่วนการแดมป์ลดลง เนื่องจากไม่สามารถชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และความถี่ของการหน่วงก็ลดลงเช่นกันดังแสดงในรูปที่ 3.6 จะเห็นได้ว่าหลังจากระยะทางของสายส่งกำลังไฟฟ้าเกิน 40 กิโลเมตร ค่าไอเกนไม่เปลี่ยนแปลงมาก ซึ่งก็ไม่มีผลอะไรเนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้เสียเสถียรภาพไปแล้วที่ 40 กิโลเมตร



รูปที่ 3.5 การเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนการแดมป์ เมื่อระยะของสายส่งเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 3.6 การเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่แอมป์ เมื่อระยะของสายส่งเปลี่ยนแปลง

3. จากการที่ค่าไอเกนในตัวแรกหรือตัวที่ 1 มีผลที่ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเสียเสถียรภาพก่อน เพื่อให้ทราบถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรสถานะที่มีอิทธิพลหรือมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงเสถียรภาพของสัญญาณขนาดเล็ก เราจะหาค่าไอเกน และเวกเตอร์ของค่าไอเกนเพื่อให้ทราบแฟกเตอร์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าไอเกนกับตัวแปรสถานะ เพื่อประโยชน์ในการสร้างตัวควบคุมป้อนกลับ หรือประโยชน์ในการศึกษาสมรรถนะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อไป

4. หาค่าแฟกเตอร์ความสัมพันธ์ ระหว่างค่าไอเกนและตัวแปรสถานะ มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสถานะกับของค่าไอเกน โดยการพิจารณาความสัมพันธ์ค่าเวกเตอร์ไอเกนขวาและเวกเตอร์ไอเกนซ้าย เพื่อพิจารณาค่าความสัมพันธ์มากที่สุดจะมีค่าสูงสุดในแถวของเมตริกนั้น ดังแสดงค่าแฟกเตอร์ความสัมพันธ์ (รายละเอียดใน ภาคผนวก ก.) ได้ดังนี้

$$P = [p_1 \quad p_2 \quad p_3 \quad \dots \quad p_n]$$

$$P_i = \begin{bmatrix} p_{1i} \\ p_{2i} \\ \cdot \\ \cdot \\ p_{ni} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{1i}\psi_{1i} \\ \phi_{2i}\psi_{2i} \\ \cdot \\ \cdot \\ \phi_{ni}\psi_{ni} \end{bmatrix}$$

$$P = \begin{bmatrix} \phi_{11}\psi_{11} & \phi_{12}\psi_{21} & \phi_{13}\psi_{31} \\ \phi_{21}\psi_{12} & \phi_{22}\psi_{22} & \phi_{31}\psi_{13} \\ \phi_{31}\psi_{13} & \phi_{32}\psi_{23} & \phi_{33}\psi_{33} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$P = \begin{bmatrix} 1.0000 & -0.1507 + 0.0101i & -0.1507 - 0.0101i \\ -0.1505 - 0.0000i & 1.0000 + 0.0000i & 1.0000 \\ 0.0002 - 0.0000i & 0.8463 + 0.0668i & 0.8463 - 0.0668i \end{bmatrix} \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{matrix}$$

$$\lambda_1 \qquad \qquad \lambda_2 \qquad \qquad \lambda_3$$

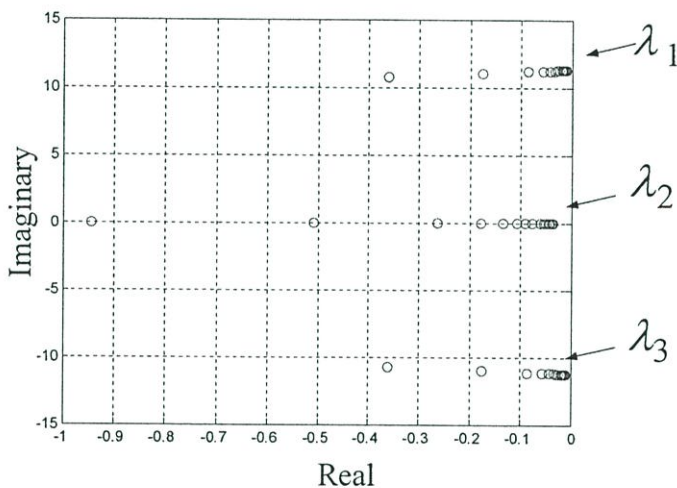
จากการหาค่าแฟกเตอร์ความสัมพันธ์เพื่อหาความสัมพันธ์เชื่อมโยงระหว่างตัวแปรสถานะกับค่าไอเกนดังสมการที่ 3.26 จากการจำลองตามหัวข้อที่ 3.5.3 พบว่าค่าไอเกนที่มีอิทธิพลต่อการสูญเสียเสถียรภาพตัวแรกก็คือค่าการเปลี่ยนแปลงของ แรงดันในพิกัด Q หรือค่า $\Delta E'_Q$ นั่นเอง ซึ่งจากการจำลอง ตัวที่ 1 จะมีค่าเป็นบวกที่ระยะทางของสายส่งกำลังไฟฟ้ามากกว่า 45 กิโลเมตรจากประโยชน์ข้อนี้ทำให้เราสามารถออกแบบตัวควบคุมป้องกันเพื่อควบคุมแรงดันในพิกัดนี้ในการรักษาเสถียรภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่หรือสร้างตัวควบคุมที่ใช้กับตัวชดเชย เป็นต้น

3.5.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบสัญญาณขนาดเล็ก เมื่อจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง

ในการศึกษาในหัวข้อนี้ทำการศึกษาตามรูปที่ 3.5.3 โดยที่ตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นกลุ่ม มีหลายชุดต่อขนานกัน การพิจารณาในที่นี้พิจารณาในกรณีที่ไม่คิดค่าพารามิเตอร์ของสายส่งไฟฟ้าระหว่างเครื่องกำเนิดแต่ละตัว ซึ่งตามปกติแล้วในการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยพลังงานลม เราจะไม่ใช่เครื่องกำเนิดขนาดใหญ่ เพียงจำนวนน้อยจากเหตุผลของข้อจำกัดหลายประการด้านการติดตั้งและด้านเสถียรภาพของการต่อเชื่อมเป็นกลุ่ม ดังนั้นการเพิ่มลดกำลังไฟฟ้าส่ง จะเปรียบเป็นการทำงานของจำนวนชุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยพิจารณาถึงการดูดซับของกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่ได้รับจากสายกริด หรือแหล่งชดเชยจากภายนอกเป็นแนวทางในการจำกัดจำนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่มีโอกาสในการทำงานพร้อมกัน โดยการจำลองจะทำดังนี้

1. ทำการทดลองแบบจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เช่นเดียวกันกับหัวข้อ 3.5.3 โดยวิเคราะห์ค่าไอเกนจากจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อขนานกัน โดยแต่ละเครื่องทำงานเครื่องละ 1 เมกวัตต์ ในระยะความยาวของสายส่งกำลังไฟฟ้า 20 กิโลเมตร บันทึกผลของค่าไอเกนและบันทึกลงในตารางที่ 3.4 นำค่าไอเกนมาเขียนกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าไอเกนโดยแสดงในรูปที่ 3.7 จากผลการจำลองพบว่า ค่าไอเกนมีแนวโน้มที่จะเข้าสู่แกนจินตภาพเมื่อจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นโดยค่าไอเกนในตัวที่ 1 และตัวที่ 3 จะมีแนวโน้มที่จะเสถียรภาพเป็นลำดับแรก แสดงให้เห็นถึงความไม่เพียงพอของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้รับจากกริดเมื่อจำนวนเครื่องกำเนิดเพิ่มมากขึ้น

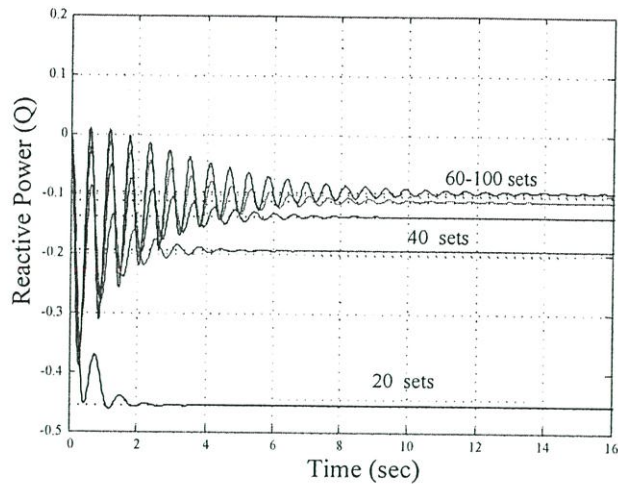
2. ทดลองหาค่าการตอบสนองของกำลังไฟฟ้าจากสมการที่ 3.18 ในเงื่อนไขเดียวกันกับการทดลองในข้อที่ 1 ผลการตอบสนองเมื่ออินพุตเป็น Step Function จะแสดงการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟารีแอกทีฟและกำลังไฟฟ้าจริง ได้ดังรูปที่ 3.8 และรูปที่ 3.9 จากการเปลี่ยนแปลงในรูปที่ 3.8 พบว่าเมื่อจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นจะมีผลต่อการลดลงของกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่รับเข้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในที่นี้กำหนดเครื่องหมายของกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่จ่ายให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นค่าลบ ดังนั้นในจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่เกิน 20 ชุดค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟจะรับอยู่ประมาณ 0.45 pu. แต่เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอัตราของกำลังไฟฟารีแอกทีฟจะลดลงจนเหลือประมาณ 0.1 pu และจะเกิดการออสซิลเลต ทั้งการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟารีแอกทีฟและกำลังไฟฟ้าจริง แรงดันไฟฟ้าจะลดลงถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้รับกำลังไฟฟารีแอกทีฟน้อยลง ซึ่งในการคำนวณในที่นี้ใช้กำลังไฟฟ้าฐานที่ 100 เมกกะวัตต์ เมื่อแรงดันลดลงจึงไม่เกิดผลต่อการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า วัตถุประสงค์ต้องการดูการลดลงของการรับกำลังไฟฟารีแอกทีฟ ซึ่งจะมีผลน้อยกว่าในกรณีแรกที่ระยะทางของสายส่งกำลังไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง



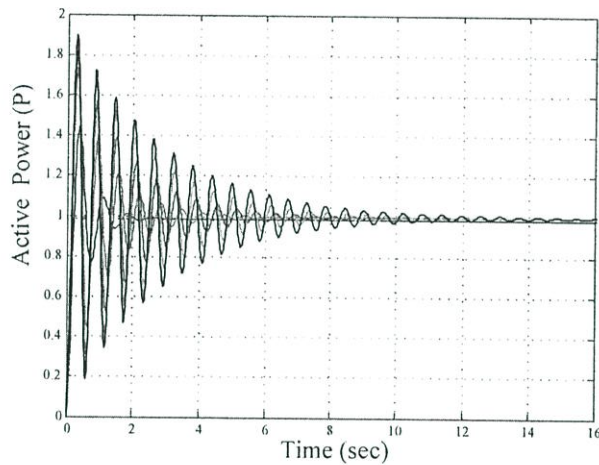
รูปที่ 3.7 การเปลี่ยนแปลงของค่าไอเกนจากตารางที่ 3.3 เมื่อจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 3.4 กลุ่มของค่าไอเกนที่เปลี่ยนแปลงตามจำนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จำนวนเครื่องกำเนิด	λ_1	λ_2	λ_3
5	-0.9442	-0.3609 +10.7836i	-0.3609 -10.7836i
10	-0.5072	-0.1755 +11.0317i	-0.1755 -11.0317i
20	-0.263	-0.0862 +11.1525i	-0.0862 -11.1525i
30	-0.134	-0.0426 +11.2120i	-0.0426 -11.2120i
40	-0.1076	-0.0340 +11.2239i	-0.0340 -11.2239i
50	-0.0899	-0.0340 +11.2239i	-0.0283 -11.2318i
60	-0.0772	-0.0283 +11.2318i	-0.0243 -11.2374i
70	-0.0602	-0.0243 +11.2374i	-0.0188 -11.2449i
80	-0.0542	-0.0188 +11.2449i	-0.0169 -11.2475i
90	-0.0493	-0.0169 +11.2475i	-0.0154 -11.2497i
100	-0.0452	-0.0154 +11.2497i	-0.0141 -11.2514i



รูปที่ 3.8 การเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังไฟฟัรแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 3.9 การเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง

3.6 สรุปการศึกษาเสถียรภาพแบบสัญญาณขนาดเล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมด้วยการจำลอง

จากการศึกษาที่นำเสนอในบทนี้ เป็นการศึกษาเสถียรภาพแบบสัญญาณขนาดเล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่โดยไม่มีตัวชดเชยกำลังไฟฟัรแอกทีฟ โดยนำเสนอแบบจำลองเชิงเส้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่ต่อเชื่อมกับกริดด้วยการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ การหาค่าเริ่มต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เหนี่ยวนำด้วยการคำนวณการไหลของโหลดที่มีค่าสลิปและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟไม่คงที่ จากนั้นได้ศึกษาในกรณีที่ 1 (หัวข้อ 3.5.3) การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าไอเกนที่ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีเสถียรภาพ เมื่อระยะความยาวของสายส่งกำลังไฟฟ้ามีระยะมากขึ้น จะพบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะยังมีเสถียรภาพในระยะความยาวของสายส่งกำลังไฟฟ้าไม่เกิน 45 กิโลเมตร จากการพิจารณาแฟคเตอร์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าไอเกนและตัวแปรสถานะทั้ง 3 ตัว คือ $\Delta E'_O$, $\Delta E'_D$ และ ค่า Δs ค่าตัวแปรสถานะที่มีอิทธิพลต่อการเสถียรภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ระหว่างค่าไอเกนตัวที่ 1 และตัวแปรสถานะทั้ง 3 ตัวคือค่า $\Delta E'_O$ จะมีอิทธิพลมากที่สุด จากประโยชน์นี้ช่วยเป็นข้อมูลในการสร้างตัวควบคุมป้อนกลับให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในโหมดของแรงดันไฟฟ้าภายในในแนวแกน Q ซึ่งมีอิทธิพลและความไวต่อเสถียรภาพมากที่สุด

การศึกษกรณีที่ 2 (หัวข้อ 3.5.4) ได้จำลองการเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยการต่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 เมกะวัตต์ ตั้งแต่ 5 เครื่องจนถึง 100 เครื่อง เพื่อจะศึกษาผลกระทบของจำนวนกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นที่มีผลต่อการรับค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจากระบบกริด เช่นเดียวกันกับการทดลองที่ผ่านมา ครั้งที่ 1 ต่อขนานกันจำนวน 5 เครื่อง ครั้งที่ 2 จำนวน 10 เครื่อง จากนั้นจะเพิ่มจำนวนที่ขนานครั้งละ 10 เครื่อง จนถึง 100 เครื่อง โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมดจะต่อเชื่อมกับกริดระยะทาง 20 กิโลเมตร หาค่าไอเกนจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ขนานกัน 5 เครื่องจนถึง 100 เครื่อง ค่าไอเกนตัวที่ 1 มีค่าจาก -0.944 ถึง -0.0452 ค่าไอเกนตัวที่ 2 และ ตัวที่ 3 มีค่าเท่ากันจาก $-0.3609+10.7836i$ ถึง $-0.0154+11.2497i$ จะพบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถรับค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 20 เครื่อง ต่อจากนั้น จำนวนของการรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจะน้อยลง ซึ่งจะมีผลต่อการสร้างแรงดันไฟฟ้า และการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสู่ระบบกริด ทำให้เกิดการออสซิลเลต ทั้งค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ และ กำลังไฟฟ้าจริงจำนวนมาก ผลการศึกษานี้เป็นการศึกษาการรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจาก ระบบกริดแทนการติดตั้งตัวชดเชย การใช้คอนเวอร์เตอร์เป็นตัวชดเชย จะเกิดปัญหาของการแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านไปในสายส่งกำลังไฟฟ้า ซึ่งวิธีการลดการแทรกซ้อนวิธีหนึ่งคือการปรับความสมดุลจะได้นำเสนอในบทต่อไป

บทที่ 4

การแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์ ที่เป็นตัวชดเชยในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม

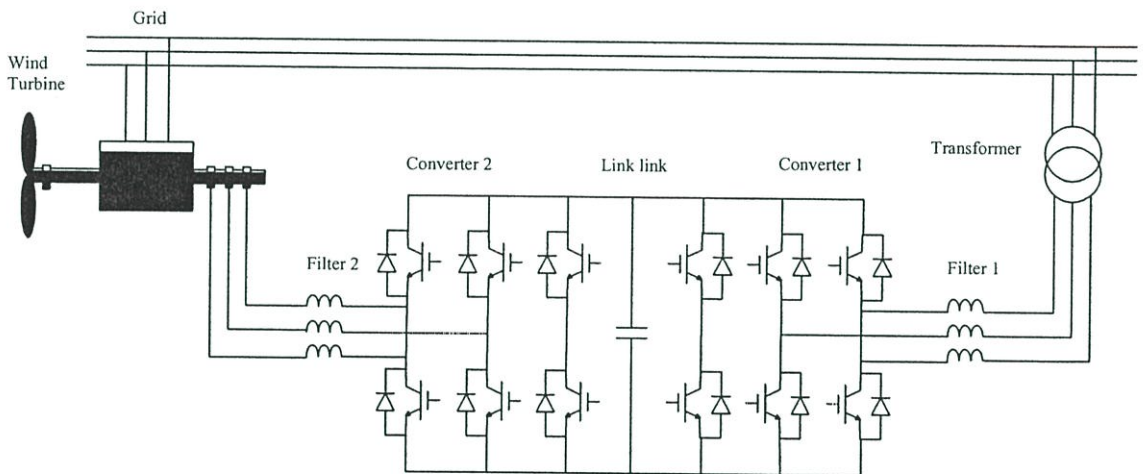
จากข้อจำกัดของการออกแบบโรงจักรไฟฟ้าพลังงานลม ในการที่จะติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานให้สอดคล้องกับแหล่งลมตามผลสำรวจทางธรณีวิทยาเพื่อให้ได้พลังงานลมสูงสุด และการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมทำให้ระยะทางของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีแนวโน้มที่จะอยู่ไกลกับระบบกริดที่จะต่อเชื่อมโยง เช่น การติดตั้งตามหุบเขาหรือในทะเล ทำให้ปัญหาที่สำคัญที่กล่าวแล้วในบทที่ 3 คือความไม่เพียงพอของการส่งกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ที่ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเสถียรภาพ เนื่องมาจากระยะความยาวของสายส่งกำลังไฟฟ้ามีข้อจำกัดในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ การแก้ปัญหาต้องติดตั้งตัวชดเชย เช่น ตัวประจุ [23][26] แต่ตัวประจุจะมีการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟคงที่ ถ้ามีการรบกวนรุนแรงหรือเกิดการฟลัดขึ้น ตัวประจุก็ไม่สามารถรักษาเสถียรภาพได้เช่นกัน

ดังนั้น จึงนิยมติดตั้งคอนเวอร์เตอร์หรือติดตั้งอุปกรณ์ปรับค่ากำลังไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (FACTS) เช่น SVC หรือ STATCOM [27][28] เพื่อเป็นตัวชดเชยที่ได้ผลดีในการรักษาเสถียรภาพทั้งเสถียรภาพชั่วคราว หรือเสถียรภาพแบบสัญญาณขนาดเล็ก หรืออีกทางหนึ่ง อาจจะใช้คอนเวอร์เตอร์ในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงหรือ HVDC จากผลของการประยุกต์ใช้คอนเวอร์เตอร์ในวัตถุประสงค์ที่กล่าวมาแล้ว กลับทำให้เกิดผลกระทบกับระบบไฟฟ้ากำลัง เช่นการเกิดฮาร์มอนิกขึ้น เทคนิคหนึ่งในการที่จะลดการเกิดฮาร์มอนิกในระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังคือการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ด้วยสัญญาณ PWM [4] ด้วยการเปิดปิดสวิตช์ด้วยความถี่สูงแทนการใช้ไทรสเตอร์แบบดั้งเดิม ผลกระทบที่ตามมาของการใช้ความถี่สูงจะเกิดการแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าจากผลของการสวิตช์สัญญาณแทรกซ้อนนี้จะแพร่กระจายผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้าไปสู่โหลดหรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ข้างเคียง โดยเฉพาะปัจจุบันนิยมใช้รีเลย์ในระบบไฟฟ้ากำลังเป็นระบบอิเล็กทรอนิกส์ และการสื่อสารในโครงข่ายของสถานีไฟฟ้าย่อย นอกจากนี้ยังสามารถแพร่กระจายผ่านอากาศไปในระบบสื่อสารอีกด้วย ได้มีงานวิจัยพบว่าผลของการใช้ SVC และ STATCOM จะเกิดการแทรกซ้อนแม่เหล็กไฟฟ้าจำนวนมากในสถานีไฟฟ้าย่อย [11][12][13] การแก้ปัญหาการแทรกซ้อนนี้ มีวิธีหลายวิธีในการป้องกันและขจัด ไม่ว่าจะเป็นการใช้ตัวกรอง หรือการขจัด ก็นับว่าเป็นการแก้ปัญหาที่ปลายเหตุทั้งสิ้น การแก้ปัญหาที่ต้นเหตุคือการพิจารณาที่มาของการเกิดสัญญาณแทรกซ้อนหรือ EMI และปรับปรุงเพื่อลดปัญหาดังกล่าว จะช่วยทำให้ลดการสูญเสียของอุปกรณ์ และยังลดปัญหาที่ตามมาของการใช้ตัวกรองดังที่กล่าวไปแล้ว นอกจากนี้ในระบบกำลังไฟฟ้าสูงๆ จะช่วยลดปัญหาต่าง ๆ ที่ตามมาได้ดี

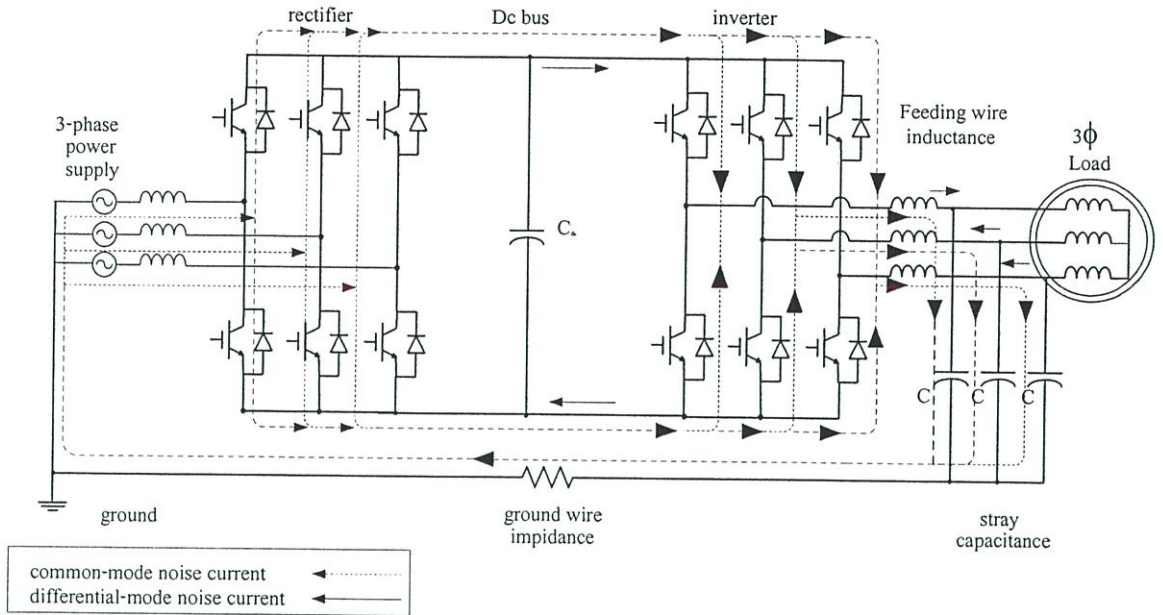
4.1 การแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าจากคอนเวอร์เตอร์ของตัวชดเชย

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการเกิดการแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าจากคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้เป็นตัวชดเชย ดังที่กล่าวมาแล้วถึงความจำเป็นของการใช้ตัวชดเชย เพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟและรักษาเสถียรภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำอาจจะมีการชดเชยด้วยกันหลายวิธี ไม่ว่าจะเป็นการใช้ FACTS หรือคอนเวอร์เตอร์แบบ VSC ก็ดี ส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างเป็นคอนเวอร์เตอร์แบบ VSC ดังนั้น ในหัวข้อนี้จะได้แสดงการเกิดการรบกวนโหมคร่วมและโหมคต่าง ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดการแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 เป็นตัวอย่างหนึ่งของคอนเวอร์เตอร์แบบควบคุมแรงดันแหล่งจ่ายหรือ VSC ที่ใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ DFIG จะประกอบด้วยคอนเวอร์เตอร์ 2 ชุด ชุดแรกจะต่อเชื่อมโยงกับสายส่งกำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงกับกริด และอีกชุดหนึ่งต่อเชื่อมกับตัวหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบวาล์วหรือแบบDFIG จากผลของการสวิตช์ด้วยสัญญาณ PWM จะเกิดการรบกวนโหมคร่วมโหมคต่างโหมคสูงเฟรมกราวด์ และโหมคกลับย้อนมาที่แหล่งจ่ายหรือกลับไปเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในรูปที่ 4.3 แสดงสมมูลของโหมคซึ่งอาจจะเชื่อมโยงกับหม้อแปลงไฟฟ้า หรือกลับไปในระบบกริด นอกจากนี้ได้แสดงทิศทางการไหลของกระแสบวกรวมโหมคต่าง ซึ่งมีทิศทางการไหล ทิศทางกันกับกระแสที่บัสกระแสตรงที่เชื่อมโยงระหว่างคอนเวอร์เตอร์ทั้งสอง



รูปที่ 4.1 การใช้คอนเวอร์เตอร์ VSC. ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ DFIG



รูปที่ 4.2 โครงสร้างของคอนเวอร์เตอร์แบบ VSC และทิศทางการไหลของกระแสรบกวน โหมดร่วม

ก่อนที่จะนำเสนอถึงการลดการแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์แบบต่าง ๆ จะกล่าวถึง เนื้อเรื่องพื้นฐานของการศึกษาการแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้า การเกิดสัญญาณรบกวน โหมดต่างและโหมดร่วม และมาตรฐานการรับรองการแทรกซ้อนแม่เหล็กไฟฟ้าต่อไป

4.2 นิยามพื้นฐานของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

ในการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าหรืออิเล็กทรอนิกส์ ผลกระทบของความถี่สูงที่เกิดขึ้นจะมีผลทำให้เกิดการแทรกซ้อนแม่เหล็กไฟฟ้าออกสู่ภายในวงจร และออกสู่ภายนอกอุปกรณ์ใกล้เคียง อาจจะแพร่ได้ในวิธีการต่าง ๆ เมื่ออุปกรณ์ใกล้เคียงที่มีค่าความไวในการรับสูง หรือมีความอ่อนแอต่อการต้านสัญญาณรบกวน ก็จะทำให้การความผิดพลาดของการทำงานของอุปกรณ์เหล่านั้น ตัวอย่าง เช่น การทำงานของเครื่องมือแพทย์ ต้องการความแม่นยำในการทำงานสูง ถ้าเครื่องมือชิ้นนั้นไม่สามารถต้านการรบกวนได้ ก็จะทำให้เกิดอันตรายอย่างยิ่ง ถ้าเครื่องมือชิ้นนั้นได้รับสัญญาณรบกวนและทำงานผิดพลาดในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึง คำศัพท์ที่สำคัญของการศึกษาด้าน EMC โดยมีรายละเอียดดังนี้ [35][36][37]

- ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็ก (Electromagnetic Compatibility: EMC) หมายถึง ความสามารถของอุปกรณ์ไฟฟ้าหรืออิเล็กทรอนิกส์ ในการรับผลกระทบของการรบกวนคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยทำงานได้อย่างปกติ

- การแทรกซ้อนแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference: EMI) หมายถึง การแทรกซ้อนแม่เหล็กไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดของสัญญาณรบกวน โดยอาจมีการแพร่ผ่านตัวนำ (Conducted Emission) หรือแพร่ผ่านอากาศ (Radiated Emission)
- ความสามารถในการต้านทานการรบกวนคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Susceptibility หรือ Electromagnetic Immunity: EMS)

ลักษณะของการแทรกซ้อนแม่เหล็กไฟฟ้า หรือ EMI จะมีลักษณะการแพร่ 2 ทาง คือ การแทรกซ้อนผ่านสายตัวนำ (Conducted Emission) อาจกล่าวได้ว่า การแทรกซ้อนผ่านสายตัวนำนี้จะเป็นการแทรกซ้อน จากต้นเหตุของการรบกวนไหลของกระแสรบกวนโหมคร่วม (Common mode noise current) และกระแสรบกวนโหมคต่าง (Differential mode current) ย้อนกลับเข้าไปในแหล่งจ่ายหลักของระบบ และส่งผลไปสู่บริเวณใกล้เคียงที่ใช้แหล่งจ่ายนี้ จากการเกิดในตัวนำ ถ้ากล่าวอย่างกว้าง ๆ จะเห็นได้ว่าทางเดินของสัญญาณรบกวนในตัวนำผ่านตัวนำ ถ้าเกิดลูปขึ้นและซึ่งเปรียบตัวนำจะทำหน้าที่เป็นเสาอากาศ เพื่อแพร่สัญญาณรบกวน สัญญาณรบกวนนี้ก็จะแปรสภาพเป็นสัญญาณรบกวนผ่านอากาศด้วย ความถี่ของสัญญาณรบกวนคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวนำจะมีย่านอยู่ระหว่าง 9 kHz - 30 MHz และสัญญาณรบกวนในอากาศจะอยู่ในย่าน 30 MHz - 1 GHz

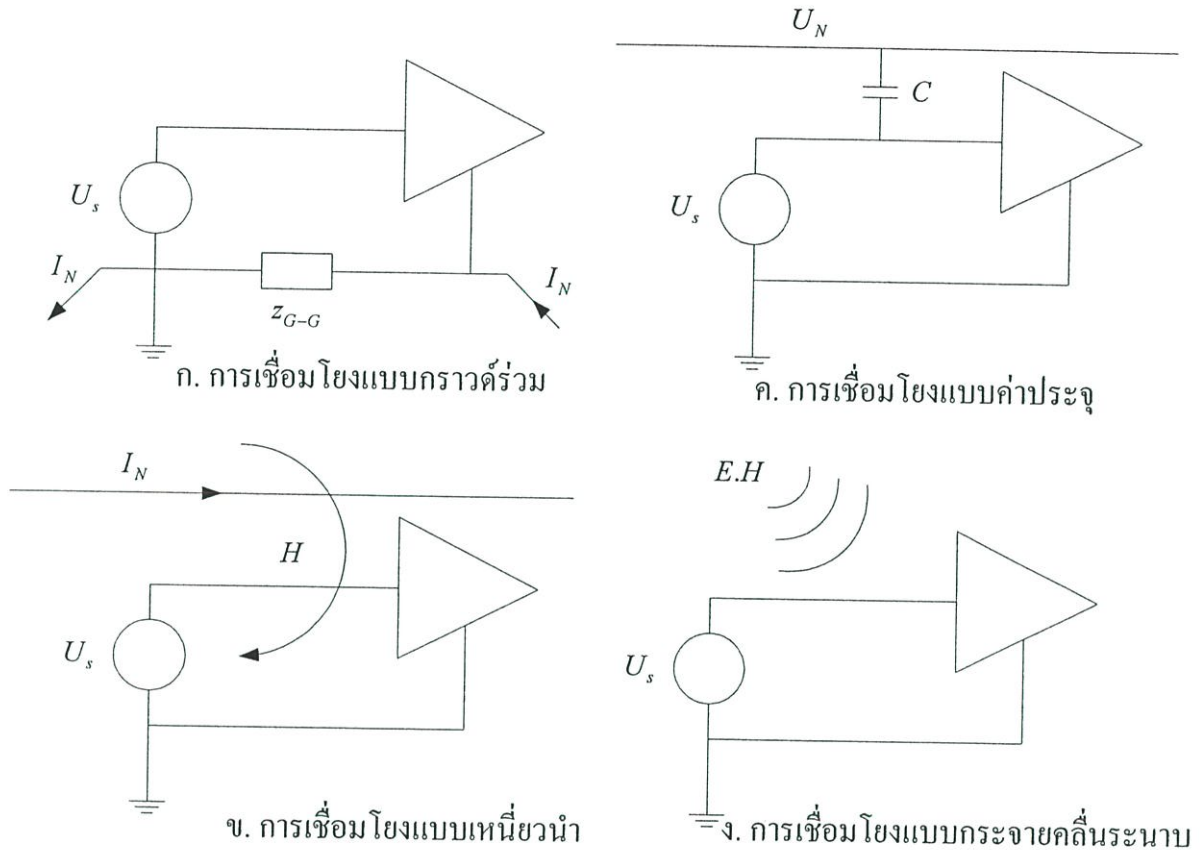
4.3 กลไกการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าบนอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

กลไกการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าบนอุปกรณ์สามารถแบ่งแยกออกเป็น 4 แบบใหญ่ๆ ได้ดังนี้

1. การรบกวนอันมีสาเหตุจากความต่างศักย์ระหว่างกราวด์ของระบบ โดยปกติแล้วระบบหลายระบบที่นำมาต่อกันเพื่อทำงานร่วมกันจะใช้ระบบกราวด์ของตน การแยกหรือการใช้งานกราวด์คนละระบบ เมื่อนำมาต่อเชื่อมกันจะทำให้เกิดความต่างศักย์ตกคร่อมระหว่างกราวด์ ขึ้น ผลของความต่างศักย์นี้ จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กและเกิดการรบกวนทางแม่เหล็กขึ้น เราเรียกการรบกวนในโหมคนี้ว่า Common Ground Impedance Coupling ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ก
2. การรบกวนซึ่งมีสาเหตุมาจากกระแสไฟฟ้าสูงๆ ไหลผ่านตัวนำ และเหนี่ยวนำทำให้เกิดสนามแม่เหล็กคล้องล้อมรอบตัวนำ ตามแนวรัศมี และมีผลในการส่งเส้นแรงแม่เหล็กเชื่อมโยง (Mutual Coupling) ไปเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ตัวนำใกล้เคียง เราเรียกการรบกวนนี้ว่า Inductive Coupling ดังแสดงในรูป 4.3 ข.
3. การรบกวนอันมีสาเหตุมาจากแรงดันที่อยู่ใกล้เคียง เมื่อนำแหล่งกำเนิดที่มีแรงดันสูง ๆ มาวางใกล้กับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ จะทำให้มีความซึมซาบ แม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งอยู่ระหว่างแหล่งกำเนิดและวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะมีพฤติกรรม คล้ายกับตัวประจุที่มีอากาศเป็นไดอิเล็กตริก สามารถส่ง

สัญญาณรบกวนจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ามายังอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ เราเรียกการรบกวนนี้ว่า Capacitive Coupling ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ค.

4. การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า ชนิดนี้มีสาเหตุมาจากคลื่นระนาบ (Plane Wave) ซึ่งมีองค์ประกอบด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เคลื่อนที่ไปรบกวนการทำงานของวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ข้างเคียง ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ง. เราเรียกการรบกวนนี้ว่า Radiated Field Coupling



รูปที่ 4.3 การเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนในลักษณะต่าง ๆ

4.4 การเกิดการแทรกซ้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

การเกิดจากการแทรกซ้อนแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference: EMI) จากการเปลี่ยนแปลงสถานะของแรงดัน และกระแสในวงจร ซึ่งมีผลมาจากแหล่งจ่ายความถี่สูง แบบสวิตชิ่ง หรือการกำเนิดสัญญาณพิกษาของวงจร ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ผลจากการเปลี่ยนแปลงสถานะนี้ จะเกิดการเชื่อมโยงของสายตัวนำในรูปแบบต่างๆ ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.3 ถ้ามีการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กหรือเชื่อมโยงแบบเหนี่ยวนำ ก็จะทำให้เกิดการรบกวนสัญญาณรบกวนใหม่คร่อม ถ้าเกิดการเชื่อมโยงแบบตัวประจุกระทำกับเฟรมกราวด์ จะเป็นการ

รบกวนแบบโหมดต่าง ซึ่งจะได้นำเสนอในหัวข้อต่อไป ผลของการแทรกซ้อนนี้จะส่งไปหาวงจรหรืออุปกรณ์ใกล้เคียงได้ 2 ทาง

- การแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านตัวนำ (Conducted Emission)
- การแทรกซ้อน ของแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศ (Radiated Emission)

4.4.1 การแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านตัวนำ

จะเป็นการแทรกซ้อนผ่านไปยังแหล่งจ่ายหลัก และย้อนกลับเข้าไปในโครงข่ายของระบบระบบส่งกำลังจะเป็นสัญญาณไซน์ คลื่นความถี่สูงนี้จะผสมเข้าไปในสัญญาณ ไซน์ และไปรบกวนอุปกรณ์อื่น เช่นคอมพิวเตอร์ หรืออุปกรณ์ป้องกันต่างๆ ทำให้อุปกรณ์ป้องกันนั้นไม่สามารถทำงานได้ตรงตามเป้าหมาย

ในการแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าจากคอนเวอร์เตอร์ ที่ใช้ในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดกำลังไฟฟ้าขนาดใหญ่ เช่นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม ผลของการแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีขนาดแปรผันตามขนาดกำลังไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าหลักของระบบด้วย ซึ่งแหล่งกำเนิดสัญญาณแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าในกรณีนี้จะแปรผันตามการเปลี่ยนแปลงของอุปกรณ์สวิตชิงแรงดันสูงที่ทำงานตามจังหวะของสัญญาณ PWM ที่นำไปกระตุ้น

กระแสรบกวนที่มีบทบาทสำคัญของการกำเนิดสัญญาณแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้า นี้จะเป็นสัญญาณรบกวนในโหมดร่วม (Common Mode Noise) เนื่องจาก การเปลี่ยนแปลงของสวิตชิงจะเกิดการเชื่อมโยงกับ เฟรมกราวด์ ตัวประจุแฝง ผ่านตัวระบายความร้อน ไหลลงสู่เฟรมกราวด์ นอกจากนี้ กระแสรบกวนโหมดร่วม นี้จะแปรสภาพไปเป็นกระแสรบกวนโหมดต่างอีกด้วย

การจัดสัญญาณรบกวนในโหมดร่วมนี้ จะกระทำได้หลายวิธี เช่นการติดตั้งตัวเหนี่ยวนำหรือไอ้ค เป็นตัวกรองสัญญาณ ซึ่งจะมีผลเสียในการเกิด Inspection Loss และอาจเกิดการรีโซแนนซ์ จากความถี่รีโซแนนซ์ ผ่านตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่ติดตั้งได้ ซึ่งวิธีนี้ เป็นที่นิยมโดยทั่วไป

4.4.2 การแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศ

จากสาเหตุของการสร้างสัญญาณ แทรกซ้อนแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านตัวนำ นอกจากจะมีผลจากการแพร่กลับไปในระบบแล้ว การผ่านสายตัวนำยังมีผลทำให้เกิดการแทรกซ้อนในรูปคลื่นผ่านอากาศโดยตัวนำหรือตัวระบายความร้อน จะมีหน้าที่เป็นเสาอากาศ ส่งคลื่นแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่สูงตั้งแต่ 30 MHz – 2 GHz เมื่อมีตัวนำไฟฟ้า ของอุปกรณ์ใกล้เคียง ก็จะทำหน้าที่เป็นเครื่องรับ สัญญาณแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าและเกิดการรบกวนเช่นเดียวกับกรณีแรก

ในการคิดค้นวิธีการลดทอน การแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้า มีด้วยกันหลายวิธี สรุปได้ดังต่อไปนี้

- การสร้างวัตถุปกปิด (Shielding)
- การต่อสายดิน (Grounding)

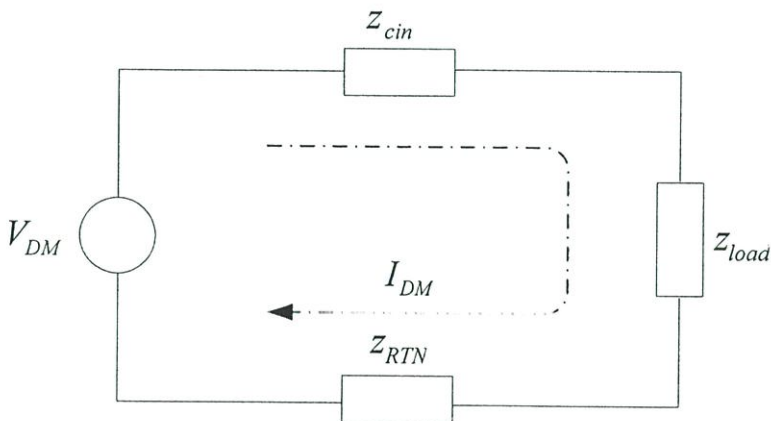
- การสร้างสมดุล (Balancing)
- การกรองสัญญาณ (Filtering)
- การแยกส่วนวงจร (Isolation)
- การออกแบบสายตัวนำ (Cable design)
- เทคนิคการขจัดสัญญาณรบกวน (Cancellation Technique)

อย่างไรก็ตาม การลดทอน การแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยวิธีการที่สรุปมาทั้งหมด มิได้หมายถึงการสามารถกำจัดได้หมดสิ้น เป็นเพียงแต่การลดทอนสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ให้มีค่าต่ำลงจนถึงจุดที่ยอมรับได้หรือถึงจุดที่ไม่เกิดการรบกวน (Interference) กันเกิดขึ้นนั่นเอง และนอกจากนั้น การที่จะทำให้สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้างดงกล่าวลดลงจนถึงจุดที่ยอมรับได้นั้น อาจจะต้องทำหลายวิธีประกอบกัน

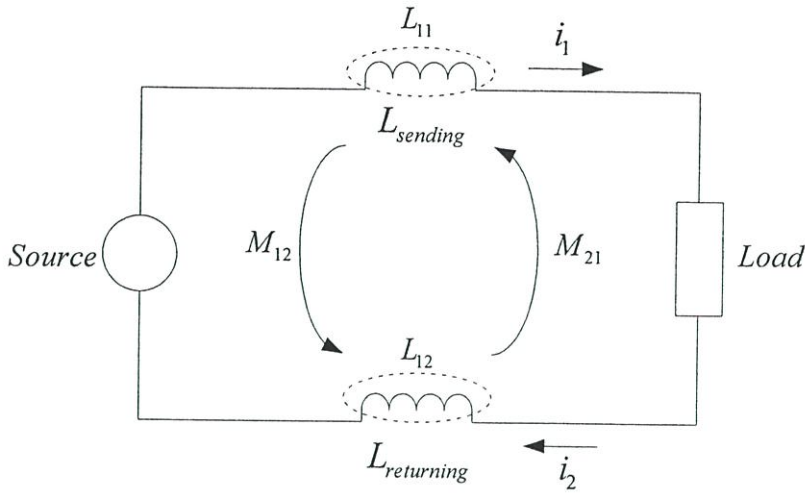
4.4.3 การแพร่กระจายจากสัญญาณรบกวนโหมดต่าง

การเกิดสัญญาณรบกวนประเภทนี้จะเกิดขึ้นที่ตัวนำของสายส่งระหว่างตัวนำส่ง (Sending Line) และตัวนำรับ (Returning Line) ทางเดินของการเกิดสัญญาณรบกวน จะมีลักษณะเป็นวงจรปิด หรือ เป็นลูป เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำจะเกิดสนามแม่เหล็กคดโค้งและเชื่อมโยงไปสู่วงจรใกล้เคียง การเชื่อมโยงชนิดนี้จะเป็นการเชื่อมโยงแบบการเหนี่ยวนำ (Inductive Coupling) แหล่งการกำเนิดสัญญาณจะเกิดจากสัญญาณหลักของวงจร การเปลี่ยนแปลงแรงดันของสัญญาณนาฬิกา หรือ สัญญาณ PWM เป็นต้น จากรูปที่ 4.4 แสดงถึง ทางเดินของกระแสรบกวนโหมดต่าง (I_{DM}) ที่ไหลอยู่ในลูป ระหว่างแหล่งจ่ายหลักและโหลด การลดสัญญาณรบกวน ประเภทนี้ อาจจะลดได้ด้วยการลด พื้นที่ของ หรือ จำนวนลูปที่เกิดขึ้น

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าการเชื่อมโยงของสนามแม่เหล็กของตัวเหนี่ยวนำจากตัวนำ จะเกิดตัวเหนี่ยวนำเชื่อมโยง (Mutual Inductance: M)



รูปที่ 4.4 เส้นทางเดินของกระแสรบกวนโหมดต่าง



รูปที่ 4.5 การส่งผ่านสนามแม่เหล็กของกระแสบริเวณทอมคต่าง

กำหนดให้

- M_{12} = ตัวเหนี่ยวนำเชื่อมโยงของตัวนำส่ง (เฮนรี)
- M_{21} = ตัวเหนี่ยวนำเชื่อมโยงของตัวนำรับ (เฮนรี)
- ψ_1 = เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่ตัวนำส่ง (เวเบอร์)
- ψ_2 = เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่ตัวนำรับ (เวเบอร์)
- ϕ = เส้นแรงแม่เหล็กต่อหนึ่งตัวนำ (เวเบอร์)
- N = จำนวนตัวนำที่เกิดสนามแม่เหล็ก
- L = ตัวเหนี่ยวนำที่สายตัวนำ

$$L = N \frac{\phi}{i}$$

$$\psi_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{21} \frac{di_2}{dt}$$

$$\psi_2 = L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{12} \frac{di_1}{dt}$$

จากกฎของฟาราเดย์ แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจากเส้นแรงแม่เหล็กแต่ละตัวนำสามารถพิจารณาได้ในเชิงของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) ที่ผิวปิด พื้นที่ A

$$V_N = -\frac{d}{dt} \int \bar{B} \cdot d\bar{A} \quad (4.1)$$

ถ้าเส้นแรงแม่เหล็กอยู่ในรูปของไซน์ จะสามารถพิจารณาได้

$$V_N = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

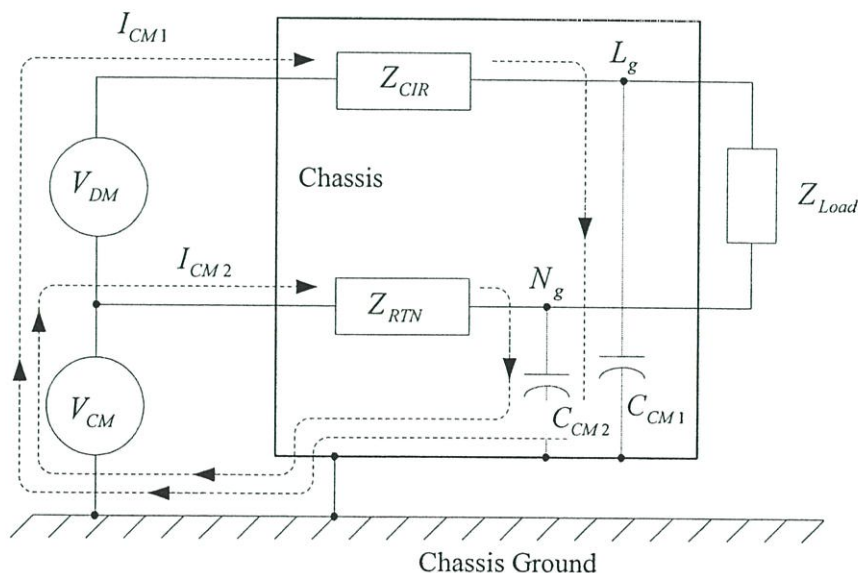
ดังนั้น จะเห็นได้ว่าตัวแปรสำคัญที่จะลดสัญญาณรบกวนในโหมดต่างนี้คือ การลดพื้นที่ผิวปิด A หรือลดค่า B โดยการลดค่ากระแสรบกวนโหมดต่าง หรือลดอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแส $\left(\frac{di}{dt}\right)$

4.4.4 การแพร่กระจายจากสัญญาณรบกวนโหมดร่วม

การเกิดสัญญาณรบกวนในโหมดร่วม เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของจังหวะการสวิตช์ ของสัญญาณแม่เหล็ก เช่นสถานะการ เปิด และปิดของสัญญาณ PWM จะทำให้เกิดการรบกวนไหลผ่านค่าประจุแฝง (Parasite Capacitance) ของ อุปกรณ์สวิตซ์ซึ่ง ลงสู่เฟรมกราวด์ หรือจะเป็นประจุแฝงที่ตำแหน่งอื่นๆของวงจร เช่น ที่ขั้วของโพลดเป็นต้น

ดังนั้นการเชื่อมโยงของสัญญาณประเภทนี้ จะเป็นการเชื่อมโยงผ่านตัวประจุ เกิดการเก็บ และการคายประจุเกิดขึ้น

จากรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นถึงทางเดินของกระแสรบกวนโหมดร่วม (I_{CM1} , I_{CM2}) ที่ไหลสู่เฟรมกราวด์ ทั้งจากสายตัวนำส่ง (Sending line) และสายตัวนำกลับ (Returning line) การรบกวนไหลนี้เกิดจากการเชื่อมโยงตัวค่าประจุแฝง (Parasitic) ของตัวสวิตซ์ใน คอนเวอร์เตอร์ หรือในอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ถูกเปลี่ยนแปลงด้วยความถี่ของกระแสหรือแรงดันในระดับสูง เช่น สัญญาณ PWM เป็นต้น ทางเดินหรือกิ่งของกระแสรบกวนโหมดร่วมนี้ จะประกอบด้วยค่าอิมพีแดนซ์ ระหว่างกิ่งนั้นกับเฟรมกราวด์ ทำให้



รูปที่ 4.6 เส้นทางเดินของกระแสในการเชื่อมต่อสัญญาณแบบโหมดร่วม

เกิดรูปของกระแสขึ้น แต่เมื่อกระแสไหลผ่านเฟรมกราวด์กลับไปแหล่งจ่าย จะเกิดความต่างศักย์ขึ้นด้วยอิทธิพลของค่าอิมพีแดนซ์ของเฟรมกราวด์ขึ้น แรงดันเหนี่ยวนำนี้เราจะเรียกว่าแรงดันรบกวนโหมคร่วม (V_{cm}) สมการพื้นฐานของการเกิด กระแสรบกวน โหมคร่วม จะได้จากสมการพื้นฐาน

$$i_{cm} = c \frac{dv}{dt}$$

โดยที่

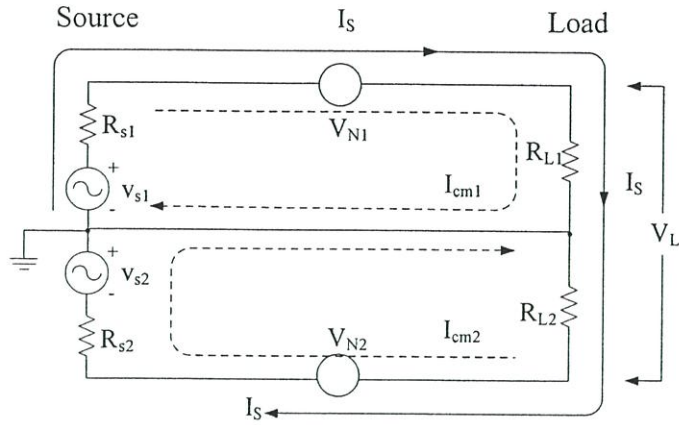
c = ค่าประจุแฝง

v = แรงดันของแหล่งจ่ายที่ถูกเปลี่ยนแปลงจาก PWM

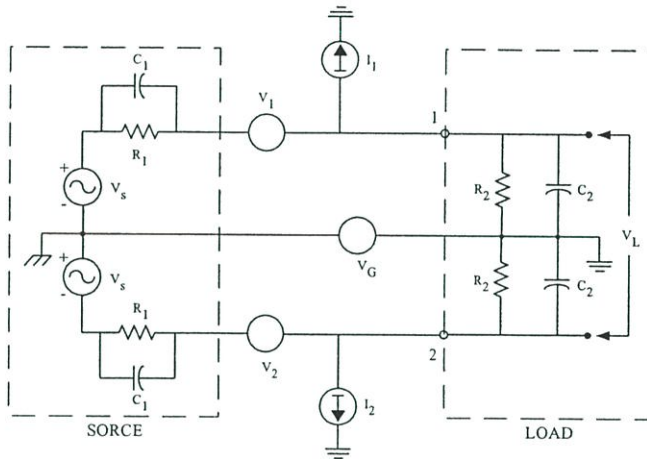
ถ้าพิจารณาจากสภาวะคงตัว

$$I_{cm-total} = I_{cm1} + I_{cm2}$$

เมื่อพิจารณาจากรูปของการไหลของกระแสรบกวนโหมคร่วมจะเห็นได้ว่า กระแสทั้งสองจะมีเฟสที่ตรงกันข้าม ถ้ากระแสรบกวนโหมคร่วมทั้งสองส่วนนี้มีค่าปริมาณที่เท่ากัน จะเกิดการหักล้างกันที่เฟรมกราวด์ ดังนั้นตัวแปรสำคัญที่จะทำให้กระแสทั้งสองหักล้างกัน ก็คือ อิมพีแดนซ์ของรูปกระแสรบกวนโหมคร่วมระหว่างสายตัวนำส่งและสายตัวนำกลับ จะต้องมีความเท่ากัน การที่รูปทั้งสองมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากันนี้ เราจะเรียกว่าวงจรสมดุล ผลจากความสมดุลนี้จะสามารถลดทอนค่ากระแสรบกวนโหมคร่วมได้ด้วยตัวเอง โดยที่ กระแสทั้งสองสามารถหักล้างกันได้ ทำให้ผลรวมของ $I_{cm-total} \rightarrow 0$ นอกจากนี้ การเกิดความไม่สมดุลของวงจรจึงถือเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดกระแสรบกวนโหมคร่วม และค่าที่ไม่เท่ากันของกระแสรบกวนโหมคร่วม ยังเป็นผลไปสู่การเกิดแรงดันรบกวนโหมคร่วมต่างอีกด้วย ดังนั้นถือได้ว่าต้นเหตุที่สำคัญ ของการเกิดสัญญาณรบกวน จะเริ่มต้นมาจาก สัญญาณรบกวนโหมคร่วม การขจัดสัญญาณรบกวนโหมคร่วมนี้ทำได้หลายวิธี ซึ่งจะนำเสนอต่อไป



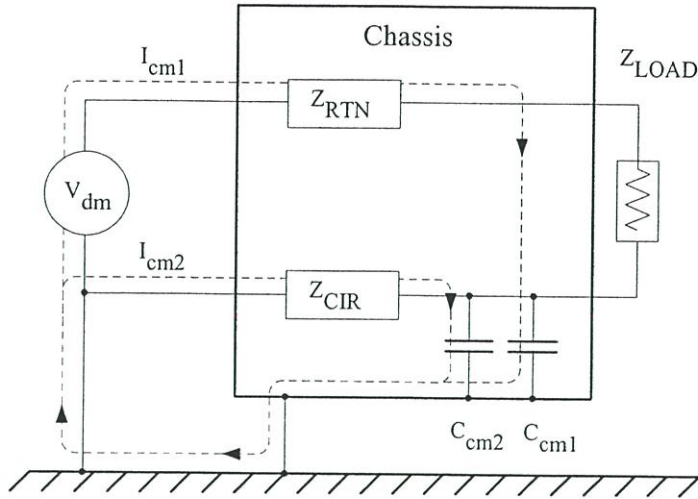
ก. การไหลของกระแสรวมโหมคร่วม



ข. การสมดุลแหล่งจ่ายไฟฟ้าและสมดุลโหลด

รูปที่ 4.7 วงจรสมดุลของแหล่งจ่ายและสมดุลโหลด

จากรูปที่ 4.7 จะแสดงให้เห็นถึง วงจรที่มีความสมดุล โดยความสมดุลจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือความสมดุลที่แหล่งจ่ายและความสมดุลที่โหลด เมื่อวงจรมีความสมดุลค่าอิมพีแดนซ์ซึ่งในที่นี้คือค่าอิมพีแดนซ์ภายในของแหล่งจ่าย (R_{s1} , R_{s2}) และความต้านทานที่โหลด (R_{L1} , R_{L2}) จะเห็นได้ว่าลูปทางเดินของการแสรบวงรวมโหมคร่วม เมื่อกิ่งของกระแสรวมโหมคร่วม มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากัน กระแสรวมโหมคร่วมทั้งสองก็จะหักล้างกันที่เฟรมกราวด์ แรงดันรวมโหมคร่วม (V_{cm}) ก็จะลดลง จนเข้าใกล้ศูนย์ ดังแสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ทิศทางการไหลของกระแสรบกวนโหมคร่วม ของวงจรไม่สมดุล

4.5 การทดสอบการแทรกซ้อนแม่เหล็กไฟฟ้า

4.5.1 มาตรฐานด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

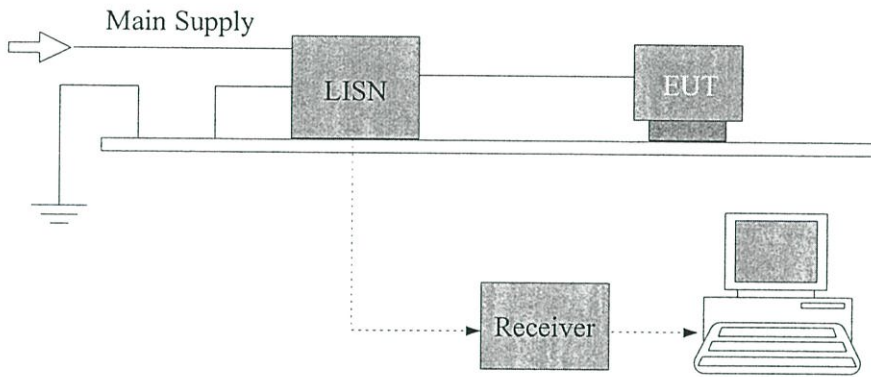
จากมาตรฐานด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งในระดับสากลและระดับภูมิภาคต่าง ๆ นั้นได้กำหนดค่าระดับความแรงของสัญญาณรบกวนที่ยอมรับได้ไว้ ซึ่งอุปกรณ์หรือผลิตภัณฑ์ไฟฟ้า จะได้รับรองตามมาตรฐานด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า ต้องไม่สร้างสัญญาณรบกวนออกมา เกิดขีดจำกัดที่มาตรฐานทางแม่เหล็กไฟฟ้าเรื่องการทดสอบการแทรกซ้อน ของคลื่นได้แก่ CISPR11, CISPR 14, CISPR15, CISPR22 และ FCC เป็นต้น รายละเอียดของมาตรฐานต่างๆ สามารถสรุปได้ดังนี้

- มาตรฐาน CISPR11 เป็นมาตรฐานที่ใช้รับรองอุปกรณ์ประเภทเครื่องมือวิทยาศาสตร์ เครื่องมือทางการแพทย์และอุตสาหกรรม
- มาตรฐาน CISPR14 ใช้เป็นมาตรฐานกับผลิตภัณฑ์หรืออุปกรณ์ประเภทเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้านหรือภายในอาคาร เช่น เครื่องซักผ้า ตู้เย็น เป็นต้น
- มาตรฐาน CISPR15 บังคับใช้กับอุปกรณ์ส่องสว่าง เช่น หลอดไฟฟ้า หลอดฟลูออเรสเซนต์ หลอดประหยัดไฟ เป็นต้น
- มาตรฐาน CISPR22 .ใช้กับอุปกรณ์ประเภท อุปกรณ์สารสนเทศ เช่น คอมพิวเตอร์ โมเด็ม แฟกซ์ เครื่องพิมพ์ และอุปกรณ์เสริมของคอมพิวเตอร์ต่าง ๆ เป็นต้น

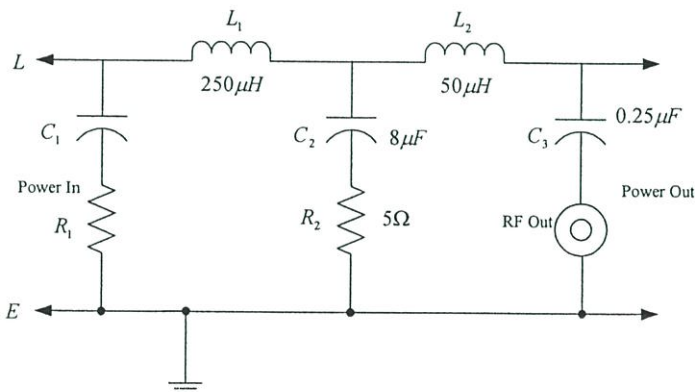
นอกจากมาตรฐานที่กล่าวมาแล้ว ยังมีมาตรฐานระดับชาติอื่น ๆ เช่น FCC part 15 บังคับใช้กับอุปกรณ์ประเภทคอมพิวเตอร์ของประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นต้น

4.5.2 การทดสอบการแทรกซ้อนแม่เหล็กไฟฟ้าทางตัวนำไฟฟ้า

วัตถุประสงค์ของการทดสอบเพื่อจะหาระดับของสัญญาณรบกวนที่แพร่ออกมาตามสายตัวนำและย้อนกลับเข้าไปในแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลัก โดยสายตัวนำเป็นตัวกลางในการส่งผ่าน (Coupling) การทดสอบจะใช้อุปกรณ์ โครงข่ายอิมพีแดนซ์ (Line Impedance Stabilize Network: LISN) ต่อร่วมเพื่อทำหน้าที่ปิดกั้นสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่ออกจากอุปกรณ์ เข้าสู่ระบบแหล่งจ่าย และทำหน้าที่ผ่านสัญญาณรบกวนไปสู่เครื่องรับสัญญาณ โดยทั่วไป ค่าอิมพีแดนซ์ของ LISN จะกำหนดให้คงที่ที่ 50 โอห์มต่อ 50 ไมโครเฮนรี่ โดยวงจรของ LISN จะแสดงดังรูปที่ 4.8 นอกเหนือขอบเขตเข้ามารบกวน อุปกรณ์ทุกอย่างจะอยู่ในห้องปิดกั้นคลื่น (Shielded Room) วัดค่าสัญญาณรบกวนด้วยเครื่องวัดสัญญาณรบกวน (EMI Receiver) ผลการวัดจะเปรียบเทียบกับเส้นจำกัดหรือเทียบกับระดับจำกัดตามมาตรฐาน ดังแสดงโครงสร้างของการวัด ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 วิธีการวัดสัญญาณการแทรกซ้อนผ่านตัวนำโดยใช้ LISN



รูปที่ 4.10 โครงสร้างของ LISN ที่ใช้วัดระดับสัญญาณรบกวนในสายตัวนำ

4.6 แนวคิดของความสมดุลและไม่สมดุลของวงจรคอนเวอร์เตอร์

4.6.1 การป้องกันและการจัดการกระแสรบกวนโหมคร่วม

ดังที่กล่าวมาแล้วถึงความสำคัญ ของการแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวนำ และการเกิดกระแสรบกวนโหมคร่วม การขจัดและการป้องกันกระแสรบกวนโหมคร่วมได้มีการวิจัยไว้มากมายหลายวิธี ดังสามารถแบ่งเป็นข้อย่อย ๆ ได้ดังนี้

- การใช้ตัวกรองด้วยขดลวดตัวนำ หรือ โซ้ค ซึ่งวิธีนี้จะเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย และปัญหาประการหนึ่งของการใช้วิธีนี้คือการเกิด Insection loss

- การใช้วงจร snubber จะเป็นวิธีที่สะดวก เพื่อ snubber เป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นอย่างยิ่งของการป้องกันตัวสวิตซ์ซึ่ง ในการป้องกัน dv/dt หรือ di/dt ซึ่งจะต้องติดตั้งอย่างแล้ว ผลที่ได้รับจากวงจร snubber ในการป้องกันการแทรกซ้อน จะช่วยในการลดสัญญาณ ริงกิ้ง ระหว่างการเปิดปิดของตัวสวิตซ์ แต่สามารถลดการแทรกซ้อนสัญญาณรบกวนใน โหมคร่วม ได้เพียงระดับความถี่ต่ำเท่านั้น

- การใช้ขดลวดขจัดเฟส เป็นการเสริมอุปกรณ์ขดลวดเพื่อให้สร้างสนามแม่เหล็กรบกวนที่เฟสตรงข้าม เพื่อขจัดสัญญาณรบกวนให้มีค่าน้อยลง

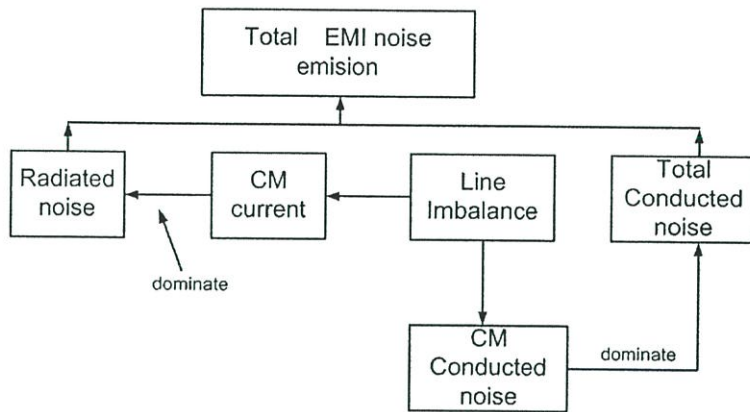
- การใช้วิธีปรับความสมดุลของวงจรคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งเป็นวิธีที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ [34] วิธีนี้ จะเป็นการปรับในระดับการออกแบบเพื่อแก้ไขที่ต้นเหตุของการเกิดการรบกวน ซึ่งการรบกวนจากผลของกระแสรบกวนโหมคร่วม จะเกิดจากการที่ไหลของกระแสรบกวนผ่านวงจรที่มีค่าอิมพีแดนซ์ไม่เท่ากัน

4.6.2 แนวคิดและการปรับความไม่สมดุลของวงจรคอนเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 4.11 ก ได้แสดงถึงวงจรการเชื่อมโยง จากความสำคัญของความไม่สมดุลของวงจรที่เป็นสาเหตุหลักในการที่จะเกิดการแทรกซ้อนแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งทางตัวนำและทางอากาศ จากความไม่สมดุลเป็นเหตุให้เกิดความต่างศักย์ในโหมคร่วมหรือแรงดันรบกวนโหมคร่วม จากผลของกระแสรบกวนโหมคร่วมในแต่ละลูปมีค่าไม่เท่ากัน ความต่างศักย์นี้จะเกิดแรงดันรบกวนโหมคร่วมขึ้นและส่งผลไปสู่แรงดันรบกวนโหมคร่วมต่าง และกระแสรบกวนโหมคร่วมต่าง กระแสรบกวนทั้งสองส่วนนี้จะย้อนกลับไปสู่แหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักที่จ่ายให้กับระบบ เกิดความเชื่อมโยงทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดการแทรกซ้อนสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าไปสู่อากาศได้ ดังนั้นความสัมพันธ์ของการแทรกซ้อนที่เกิดขึ้นจึงมีสาเหตุที่เชื่อมโยงกัน เมื่อปรับความสมดุลก็จะเปรียบเสมือนการแก้ไขสาเหตุที่ต้นเหตุ

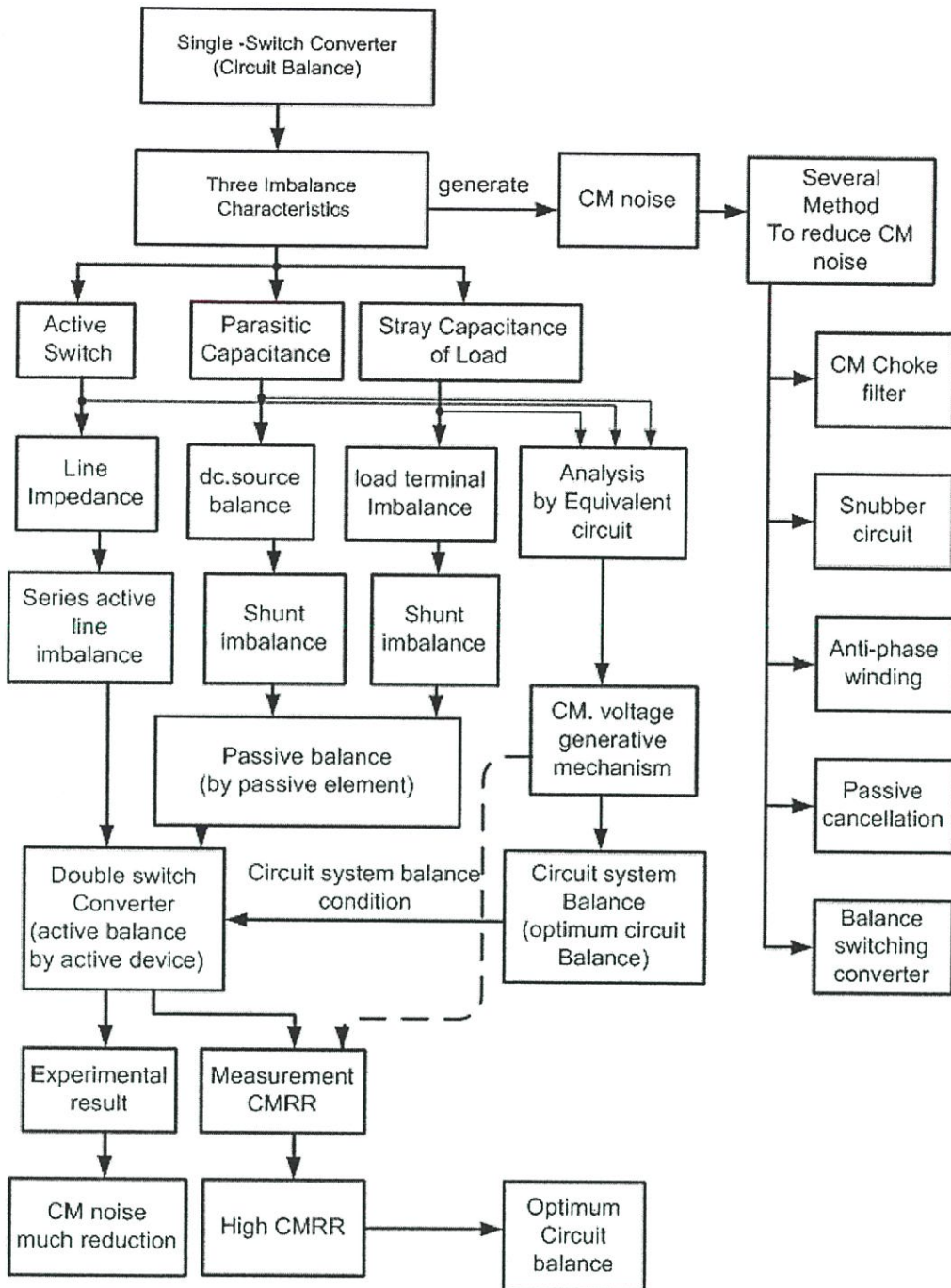
ในรูปที่ 4.11 ข. ได้นำเสนอโครงสร้างของการปรับความสมดุลของวงจรคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งจะแบ่งตามสาเหตุของความไม่สมดุลได้ดังนี้

- ความไม่สมดุลจากตำแหน่งและจำนวนของตัวสวิตซ์ ซึ่งจะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายตัวนำส่ง เปลี่ยนแปลงตามสถานการณ์เปลี่ยนแปลงของสัญญาณ PWM ในกรณีที่มีจำนวนสวิตซ์เป็นคี่ หรือการตัดต่อวงจรระหว่างสายตัวนำส่งและสายตัวนำรับไม่เท่ากันจะทำให้อิมพีแดนซ์ระหว่างสายตัวนำส่งและสายตัวนำกลับในจังหวะที่มีการเปลี่ยนแปลงของ PWM ช่วงเปิดและปิดวงจรไม่เท่ากัน เป็นสาเหตุให้กระแสรบกวนโหมคร่วมที่เกิดขึ้นทั้งสองสายตัวนำไม่เท่ากัน ก็ถือว่าเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดความไม่สมดุลของวงจร ในที่นี้จะนำเสนอในรูปแบบคอนเวอร์เตอร์ที่มีตัวสวิตซ์ตัวเดี่ยวและตัวสวิตซ์คู่ ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป



ก. วงจรการเชื่อมโยงระหว่างเกิดการรบกวนจากสาเหตุของความไม่สมดุล

รูปที่ 4.11 แนวคิดของความสมดุลและไม่สมดุลของวงจรคอนเวอร์เตอร์



ข. แนวทางในการปรับความสมดุลที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์

รูปที่ 4.11 (ต่อ)

• ความไม่สมดุลจากตำแหน่งและค่าจำนวนของค่าประจุแฝง (Parasitic) ระหว่างตัวสวิตช์กับเฟรมกราวด์ ซึ่งเป็นทางเดินของกระแสรบกวนโหมคร่วมไหลลงสู่เฟรมกราวด์ ตัวประจุแฝงนี้อาจจะมีทุก ๆ ที่ของทางเดินวงจรไฟฟ้าไม่ว่าในสายตัวนำ ขั้วโหลด หรือ ลายวงจรบนแผ่นพิมพ์ แต่สำหรับในวงจรคอนเวอร์เตอร์ ค่าประจุแฝงที่มีความสำคัญและเป็นทางเดินสำคัญของกระแส

รบกวนโหมคร่วมก็คือประจุแฝงที่อยู่ระหว่างขั้วเดินของตัวสวิทช์ (ในกรณีที่ตัวสวิทช์เป็นมอสเฟตกำลัง) ผ่านแผ่นระบายความร้อนลงสู่เฟรมกราวด์ ซึ่งจะค่าอยู่ประมาณ 50 pF.

- ความไม่สมดุลจากค่าตัวประจุระหว่างขั้วของโหลดกับเฟรมกราวด์ (Stray capacitor) ในกรณีที่โหลดเป็นแบบพลวัต เช่น มอเตอร์ไฟฟ้า การรั่วไหลของกระแสรบกวนโหมคร่วมจะเกิดขึ้นโดยมีการต่อเชื่อมโยงด้วยตัวประจุ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสจากการส่งผ่านกำลังงานกลของมอเตอร์ในสถานะชั่วขณะ และการเหนี่ยวนำของแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในในขณะที่โหลดมีค่าเหนี่ยวนำจำนวนมาก จะเป็นสาเหตุของการรั่วไหลของกระแสรบกวนโหมคร่วมผ่านไปเฟรมกราวด์ในระยะทางที่ใกล้ จึงถือว่าการรั่วไหลสมมูลของตัวประจุ ซึ่งในขดลวดมอเตอร์ที่ตัวหมุนกันตัวอยู่กับที่จะมีการรั่วไหลลงสู่เฟรมของตัวอยู่กับที่ที่ต่อกับเฟรมกราวด์เช่นกัน

การแก้ปัญหาต่าง ๆ ดังกล่าวมาแล้วนั้น ได้มีการแก้ไข เพื่อขจัดสัญญาณรบกวนโหมคร่วมโดยวิธีต่าง ๆ มากมายดังได้กล่าวไปแล้ว ได้เน้นถึงการแก้ปัญหาในการสร้างความสมดุลของวงจร เช่น การปรับความสมดุลแบบพาสซีฟ และการปรับความสมดุลแบบแอคทีฟ

- การปรับความสมดุล แบบ พาสซีฟ หมายถึงการปรับโดยการชดเชยความสมดุลจากความไม่สมดุลของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและความไม่สมดุลอันเนื่องมาจากการเชื่อมโยงด้วยค่าประจุ เช่น การเชื่อมโยงระหว่างค่าประจุแฝงที่ตำแหน่งสวิทช์ และการเชื่อมโยงจากค่าประจุที่ขั้วของโหลด การแก้ไข จำเป็นจะต้องชดเชยค่าประจุเพื่อให้กิ่งของทางเดินของกระแสไฟฟ้ารบกวนโหมคร่วมมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากัน

- การปรับความสมดุลแบบแอคทีฟ หมายถึง การปรับโดยการชดเชยตัวสวิทช์ที่ตัดต่อวงจรระหว่างสายตัวนำส่งและสายตัวนำกลับ ให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของสายตัวนำทั้งสองสอดคล้องกับจังหวะการทำงานของตัวสวิทช์ เพื่อให้กิ่งทางเดินของกระแสรบกวนโหมคร่วมมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากันทุกสถานการณ์

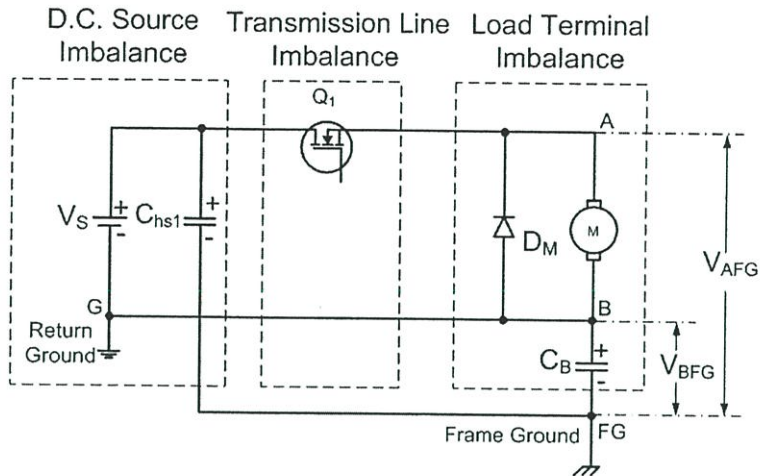
จากแนวคิดที่ได้นำเสนอ นั้น จะเริ่มทำการศึกษาความไม่สมดุลของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์เดี่ยว ที่เป็นวงจรพื้นฐานของวงจรคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์หลายชนิด ความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นจะมีผลจากความไม่สมดุลพาสซีฟและความไม่สมดุลแอคทีฟ การปรับความสมดุลจะทำได้โดยการใช้ตัวสวิทช์แบบคู่และการปรับสมดุลแบบไฮบริดจ์ ซึ่งจะได้นำเสนอในหัวข้อต่อไป [34]

4.7 ความไม่สมดุลของวงจรคอนเวอร์เตอร์ชนิดสวิทช์เดี่ยว

4.7.1 ส่วนประกอบสำคัญของความไม่สมดุลวงจรคอนเวอร์เตอร์ชนิดสวิทช์เดี่ยว

ในหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงองค์ประกอบของคอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์เดี่ยว เมื่อพิจารณาในสาเหตุของการเกิด กระแสรบกวนโหมคร่วมรั่วไหล ลงไปสู่เฟรมกราวด์ เกิดจากความไม่สมดุลของวงจรคอนเวอร์เตอร์ชนิดสวิทช์เดี่ยว เมื่อวิเคราะห์จากลูปของ กระแสรบกวนโหมคร่วมที่ไหลผ่านค่าประจุแฝงลงสู่เฟรมกราวด์ จะสามารถแบ่งส่วนประกอบได้ 3 ส่วน คือ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไม่สมดุล

สายส่งไฟฟ้าหรือทางเดินไฟฟ้าสมดุล และ โหลดไม่สมดุล เหตุผลของการจำแนกดังกล่าวนี้ จะพิจารณาความไม่สมดุลของวงจร ตามวงจรการรั่วไหลของ กระแสบกวนโหมคร่วมที่ไหลผ่านค่าประจุแฝง (Parasitic Capacitance) ที่อยู่ภายในของอุปกรณ์สวิทซ์ ซึ่งในที่นี้ใช้ มอสเฟตกำลัง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.12 โดยที่ค่า C_{hs1} และ C_B เป็นค่าประจุแฝงระหว่างขาเดรนและตัวระบายความร้อนของตัวสวิทซ์ ต่อกับเฟรมกราวด์ และ ค่าประจุแฝงที่ขั้วของโหลดมอเตอร์ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 คอนเวอร์เตอร์แบบสวิทซ์เดี่ยว

ส่วนประกอบสำคัญของคอนเวอร์เตอร์แบบสวิทซ์เดี่ยว จะแบ่งเป็นภาคใหญ่ได้ 3 ส่วน

- แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ไม่สมดุล (D.C. Source Imbalance)
- สายส่งไม่สมดุลหรือตัวนำส่งไม่สมดุล (Transmission Line Imbalance)
- โหลดไม่สมดุล (Load Terminal Imbalance)

ก. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ไม่สมดุล เป็นการพิจารณา แหล่งจ่ายกระแสตรงจะเกิดความไม่สมดุล ถ้าเปรียบเทียบกับ เฟรมกราวด์ เสมือนเฟรมกราวด์ เป็นทางเดินไฟฟ้าหรือสายส่งไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอีกสายหนึ่ง ซึ่งความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นระหว่างสายส่งด้านบวก (Sending Line) และสายส่งกลับด้านล่าง (Returning Line) จะขึ้นอยู่กับแรงดันรวมจากผลของ กระแสบกวนโหมคร่วมกับค่าอิมพีแดนซ์ของทางเดินไฟฟ้าที่ กระแสบกวนโหมคร่วมไหลผ่านทั้งหมด

ข. สายส่งไม่สมดุลหรือทางเดินไฟฟ้าไม่สมดุล (Transmission Line Imbalance) ซึ่งความไม่สมดุลของสายส่งถือว่าเป็นสาเหตุสำคัญที่สุดของการเกิดการไหลของ กระแสบกวนโหมคร่วม สายส่งไม่สมดุลหมายถึงตัวนำที่ส่งผ่านค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไปสู่โหลด หรือตัวนำไฟฟ้าที่เชื่อมระหว่างแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง กับ โหลด ในที่นี้ความไม่สมดุลจะเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ระหว่าง สายด้านส่งด้านบวก และสายส่งกลับด้านล่าง เมื่ออุปกรณ์สวิทซ์นำกระแสและหยุดนำกระแส ตามความถี่ สวิทซ์ หรือความถี่ พี ดับเบิลยู เอ็ม

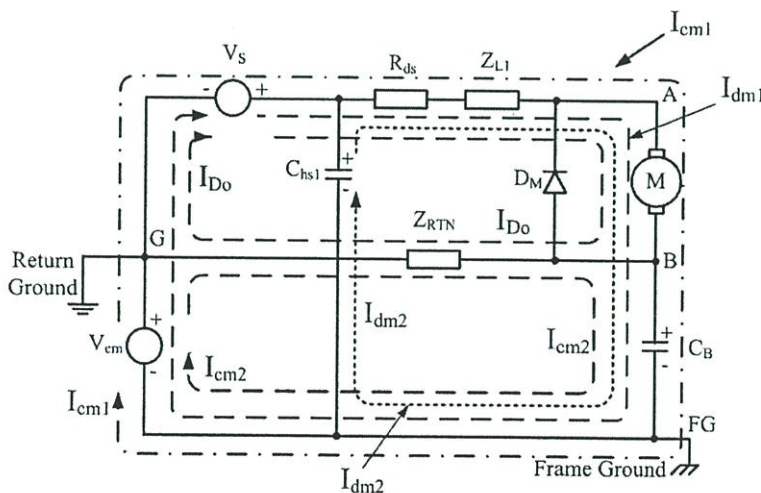
เป็นเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันและกระแส ที่รอยต่อระหว่างเดรนและซอส เกิดการไหลของกระแสรบกวนโหมคร่วมผ่านมอสเฟต และผ่านตัวระบายความร้อนของมอสเฟต ลงไปสู่เฟรมกราวด์ ซึ่งทางเดินลูปของ กระแสรบกวนโหมคร่วมจะได้อธิบายต่อไป

ก. ความไม่สมดุลของโหนดในที่นี่ ได้พิจารณาเช่นเดียวกับความไม่สมดุลของกรณีอื่นๆ เมื่อโหนดได้รับแรงดันที่มีความถี่สูง จะเกิดการรั่วไหลของค่าประจุ ที่อยู่ที่ขั้วของโหนด ซึ่งในที่นี่ เราได้ประยุกต์คอนเวอร์เตอร์ใช้กับโหนดมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.12 จะเห็นว่าค่าตัวประจุแฝงที่ขั้วของโหนดกับเฟรมกราวด์ (C_B) จะไม่สมดุล

จากความไม่สมดุลทั้งสามส่วน อาจแยกตามลักษณะของวงจรไฟฟ้าแบ่งได้ 2 แบบ คือ ความไม่สมดุลแบบอนุกรม (Series Imbalance) เป็นความไม่สมดุลจากสายส่งไม่สมดุล และ ความไม่สมดุลแบบขนาน (Parallel Imbalance) เป็นความไม่สมดุลจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไม่สมดุล และขั้วโหนดไม่สมดุล

4.7.2 ความไม่สมดุลในสถานะสวิตช์นำกระแส

จากการวิเคราะห์สถานะของวงจรคอนเวอร์เตอร์ขณะสวิตช์นำกระแส เมื่อตัวสวิตช์หรือในที่นี่คือมอสเฟตนำกระแสตามสถานะของสัญญาณ PWM จะเกิด กระแสรบกวนโหมคร่วม ไหลผ่านค่าประจุแฝง จะเห็นได้ว่า ค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างสายส่งด้านบวกและอิมพีแดนซ์ของสายส่งด้านลบจะไม่เท่ากัน เนื่องจากสายส่งด้านบวกจะรวมค่าความต้านทานระหว่างเดรนและซอสของมอสเฟตด้วย ทำให้เกิดการไหลของ กระแสรบกวนโหมคร่วมต่างและ กระแสรบกวนโหมคร่วมไหลในวงจรรั่วไหล จากผลของการเกิดกระแสทั้งสองนี้ จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำ แรงดันรบกวนโหมคร่วม (V_{cm}) ขึ้น ระหว่างสายส่งด้านลบและเฟรมกราวด์ ดังแสดงดังรูปที่ 4.13 กระแสรบกวนโหมคร่วมจะไหลผ่านเฟรมกราวด์ และกลับไปแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสมการของ แรงดันรบกวนโหมคร่วมจะแสดงดังสมการที่ 4.2 และสมการที่ 4.3 ตามลำดับ



ก. สวิตช์นำกระแส

รูปที่ 4.13 วงจรสมมูลของความไม่สมดุลของวงจรคอนเวอร์เตอร์ แบบสวิตช์เดี่ยว

ซึ่งค่าของแรงดันที่แหล่งจ่ายจะมีค่า ดังสมการที่ (4.6)

$$\frac{V_s}{2} = \frac{1}{2} [Z_{CIR} (I_{dm1} + I_{dm2} + I_{cm1}) + Z_{RTN} I_{cm2}] \quad (4.6)$$

$$Z_{CIR} = R_{ds} + Z_{L1} \quad (4.7)$$

$$Z_{RTN} = Z_{L2} \quad (4.8)$$

$$I_{DO} = \frac{V_s}{Z_{CIR} + Z_m + Z_{RTN}} \quad (4.9)$$

$$I_{cm1} = \frac{V_s}{Z_{CIR}} (V_{cm} + V_s - V_{AFG}) - (I_{DO} + I_{dm1} + I_{dm2})$$

$$I_{cm1} = \frac{V_s}{Z_{CIR}} (V_{cm} - V_{DM}) - (I_{DO} + I_{dm1} + I_{dm2}) \quad (4.10)$$

$$I_{cm2} = \frac{V_s}{Z_{CIR}} (V_{cm} - V_{BFG}) + I_{DO}$$

$$I_{cm2} = \frac{V_s}{Z_{CIR}} (V_{DM}) - I_{DO} \quad (4.11)$$

$$\left. \begin{array}{l} Z_{CIR} > Z_{RTN} \\ I_{cm2} > I_{cm1} \\ V_{AFG} > I_{BFG} \end{array} \right\} \quad (4.12)$$

จากคุณสมบัติของความไม่สมดุล กระแสบริเวณโหมคร่วมจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าโหมคต่างขึ้น โดยแรงดันนี้จะตกคร่อมระหว่างขั้วของโหมคกับเฟรมกราวด์ ดังแสดงในสมการที่ (4.13)

$$V_{dm} = V_{AFG} - V_{BFG} \quad (4.13)$$

4.7.3 ความไม่สมดุลในสภาวะปิด

จากรูปที่ 4.13 ข เมื่อมอเตอร์หยุดทำงาน ค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างขาเดรนและซอส จะสูงมาก (เข้าสู่อนันต์) จะมีผลทำให้เกิดความไม่สมดุลระหว่างอิมพีแดนซ์ของสายส่งด้านบวกและสายส่งด้านลบ เช่นเดียวกันกับในสภาวะสวิทช์นำกระแส คุณสมบัติของความไม่สมดุลแสดงให้เห็นในสมการที่ (4.14)

$$\left. \begin{array}{l} Z_{CIR} = \infty \gg Z_{RTN} = Z_{L2} \\ I_{cm2} \gg I_{cm1} = 0 \\ V_{AFG} \cong V_{BFG} \end{array} \right\} \quad (4.14)$$

โดยที่

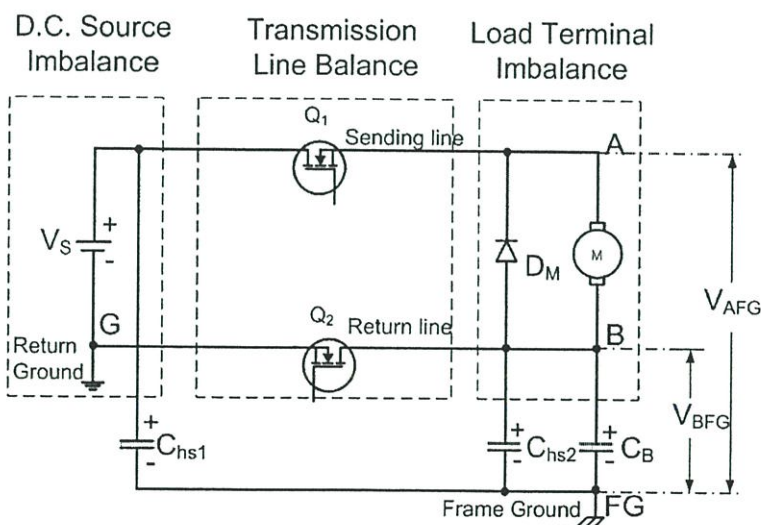
$$V_{BFG} = V_{cm} - I_{cm2} Z_{L2} \cong 0$$

$$V_{AFG} = V_{BFG} - V_{AB} \cong 0$$

4.8 การความสมดุลแบบแอกทีฟของวงจรคอนเวอร์เตอร์โดยใช้ตัวสวิตช์ซิงชนิดคู่

จากหัวข้อที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่าสาเหตุสำคัญของความไม่สมดุล จะเกิดจากความไม่สมดุลของสายส่งมากกว่า ความไม่สมดุลในส่วนอื่นๆ เนื่องจากการเปิดและปิดของสวิตช์ที่ใช้มอสเฟตตามจังหวะหรือรูปคลื่นสัญญาณของPWM ทำให้อิมพีแดนซ์ระหว่างสายส่งด้านบวก และด้านลบไม่สมดุลกัน วิธีที่จะแก้ปัญหานี้ จะทำได้โดยเพิ่มตัวสวิตช์อีกหนึ่งตัว ที่สายส่งด้านลบ ทำให้วงจรคอนเวอร์เตอร์จะประกอบด้วยตัวสวิตช์ 2 ตัว ซึ่งทั้งสองสวิตช์นี้จะทำงานพร้อมกันที่จังหวะเดียวกัน เราเรียกคอนเวอร์เตอร์ชนิดนี้ว่า คอนเวอร์เตอร์ชนิดสวิตช์คู่ (Double-Switch Converter) ดังแสดงโครงสร้างให้เห็นดังรูปที่ 4.14

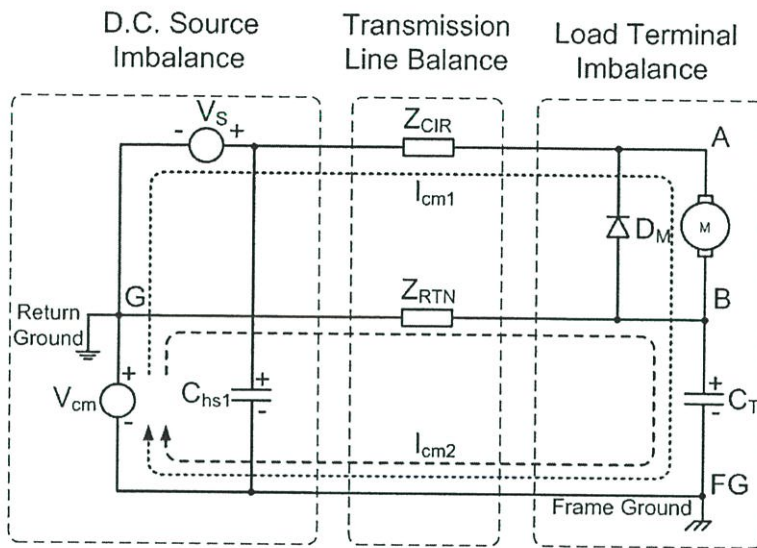
จากรูปที่ 4.14 จะเห็นโครงสร้างของคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์คู่ และค่าประจุแฝงที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วแคโทดและขอส ของตัวสวิตช์ทั้งสองตัว คือ C_{hs1} และ C_{hs2} ตามลำดับ จากเหตุผลที่ต้องการปรับค่าอิมพีแดนซ์ ของสายส่ง จะทำให้ กระแสรวมทอโมครวมที่ไหลจากตัวสวิตช์ ลงสู่เฟรมกราวด์ มีค่าใกล้เคียงกัน เพราะผ่านค่าอิมพีแดนซ์ที่มีขนาดใกล้เคียงกัน และจะหักล้างกันที่เฟรมกราวด์ ทำให้เป็นแนวทางหนึ่งในการที่จะลดค่า กระแสรวมทอโมครวมได้ ซึ่งต่อไปจะแสดงคุณสมบัติของความสมดุลของสายส่ง โดยทำการวิเคราะห์ในสภาวะตัวสวิตช์นำกระแส และสวิตช์หยุดนำกระแส เช่นเดียวกับกับหัวข้อที่นำเสนอไปแล้ว



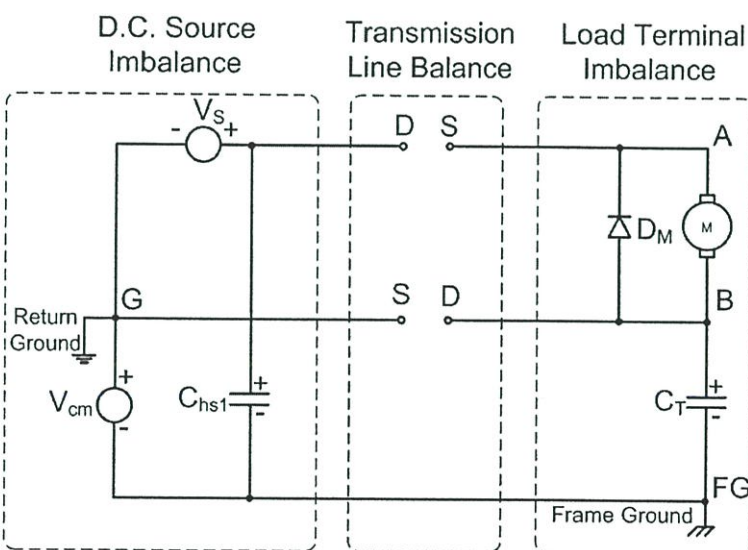
รูปที่ 4.14 วงจรสมดุลของความสมดุลของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์คู่

4.8.1 ความสมดุลของคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์คู่ในสถานะสวิตช์นำกระแส

จากรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นถึงวงจรสมมูลของคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์คู่ เมื่อสวิตช์ทั้งสอง ถูกตั้งให้ต่อวงจรหรือสภาวะเปิด สามารถเห็นความสมดุลของค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างสายส่งด้านบวก และสายส่งด้านลบ จากเหตุผลของการทำงานพร้อมกัน และพารามิเตอร์ของสวิตช์ทั้งสองมีค่า ใกล้เคียงกัน ดังนั้นรูปของ กระแสรบกวน โหมดรวมทั้งสองรูปจะมียุคประกอบของวงจร ใกล้เคียงกัน จะต่างกันเล็กน้อยจากความไม่สมดุลของโหลด คือที่ขั้วโหลดจะมีค่าประจุแฝง ที่บริเวณขั้วต่อด้านลบ กับเฟรมกราวด์ เท่านั้น และอีกส่วนหนึ่งคือความไม่สมดุลของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง โดยที่ ความไม่สมดุลทั้งสองนี้จะเป็นความไม่สมดุลจากวงจรขนาน ในทางการปรับ เราจะทำให้อุปกรณ์พาสซีฟ เป็นตัวปรับ ซึ่งจะได้ทำปรับอย่างสมบูรณ์ในหัวข้อต่อไป



ก. สวิตช์นำกระแส



ข. สวิตช์หยุดนำกระแส

รูปที่ 4.15 โครงสร้างของคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์คู่

เมื่อเกิดความสมดุลค่า อิมพีแดนซ์ของสายส่งด้านบวก และสายส่งด้านลบ และความต้านทานของเดรนชอซของมอสเฟต ที่ใช้เป็นสวิทช์ทั้งสองตัวมีค่าเท่ากัน ค่าแรงดันรบกวนโหมคร่วมจะแสดงได้ดังสมการที่ (4.15)

$$\begin{aligned}
 V_{cm} &= -V_s + I_{cm1} Z_{CIR} + V_{AB} + V_{BFG} \\
 |V_s| &\approx |V_{AB}| \\
 I_{cm1} &\cong \frac{V_{cm} - V_{BFG}}{Z_{CIR}} = \frac{V_{cm} - V_{BFG}}{Z_{CIR}} \cong I_{cm2} \\
 \left. \begin{aligned}
 Z_{CIR} &= Z_{RTN} \\
 I_{cm2} &\cong I_{CM1} \\
 V_{AFG} &\cong I_{BFG}
 \end{aligned} \right\} \quad (4.15)
 \end{aligned}$$

โดยที่

$$\begin{aligned}
 Z_{CIR} &= Z_{L1} + R_{ds1} \\
 Z_{RTN} &= Z_{L2} + R_{ds2}
 \end{aligned}$$

4.8.2 ความสมดุลของคอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์คู่ในสถานะสวิทช์ปิด

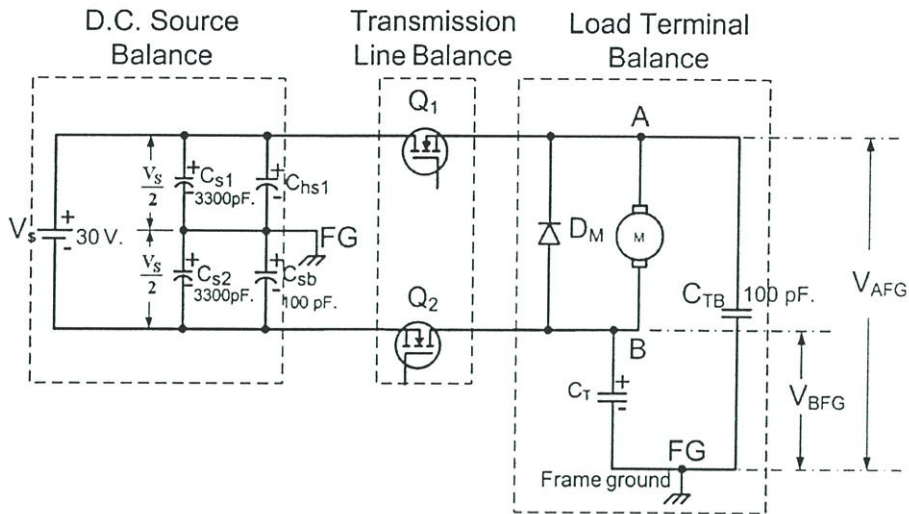
ในสถานะที่สวิทช์ทั้งสองปิด ก็เช่นกัน วงจรจะถูกตัดขาดจากแหล่งจ่ายทั้งสายส่งด้านบวกและสายส่งด้านลบ ค่าอิมพีแดนซ์ที่สวิทช์ทั้งสอง จะมีค่าเข้าใกล้อนันต์ทำให้ไม่เกิดรูปการไหลของ กระแสรบกวนโหมคร่วม ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ข ค่าสมการอิมพีแดนซ์ของตัวสวิทช์ทั้งสองจะแสดงได้ดังสมการที่ (4.16)

$$\left. \begin{aligned}
 Z_{CIR} &= Z_{RTN} = \infty \\
 I_{cm2} &\cong I_{cm1} = 0 \\
 V_{AFG} &\cong I_{BFG} = 0
 \end{aligned} \right\} \quad (4.16)$$

4.9 การปรับความสมดุลของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์คู่โดยใช้การปรับสมดุลแบบไฮบริดจ์

จากหัวข้อที่ผ่านมา ได้กล่าวแล้วถึงการไม่สมดุลของวงจรคอนเวอร์เตอร์ จากสาเหตุทั้ง 3 ส่วนของวงจร และได้ปรับความสมดุลในส่วนของความไม่สมดุลแบบอนุกรม ซึ่งเป็นความไม่สมดุลจากสายส่งหรือตัวนำไฟฟ้าที่ส่งกำลังจากแหล่งจ่ายมายังโหลด จากการที่มีอุปกรณ์สวิทช์เพียงหนึ่งตัวทำให้อิมพีแดนซ์ระหว่างสายส่งด้านบวกและสายส่งด้านลบไม่สมดุลกันขณะที่สวิทช์ทำงานทั้งสองสถานะ เมื่อเทียบกับเฟรมกราวด์ ยังมีความไม่สมดุลแบบขนานอีก 2 ส่วนที่เป็นสาเหตุของการเกิดกระแสในโหมคร่วมเช่นกันคือ ความไม่สมดุลของแหล่งจ่าย และ ความไม่สมดุลที่ขั้วโหลด เพื่อให้การแก้ไขความสมดุลสมบูรณ์ยิ่งขึ้น เราจะปรับความสมดุล ทั้งสองชนิด คือ ความสมดุลแอกทีฟ โดยการใช้อุปกรณ์สวิทช์แบบคู่ แก้ความไม่สมดุลแบบอนุกรมและความสมดุลแบบพาสซีฟโดยการให้ตัวประจุแก้ไขความไม่สมดุลแบบขนาน เราเรียกความสมดุลนี้ว่า การปรับสมดุลแบบไฮบริดจ์

โครงสร้างของการปรับสมดุลแบบไฮบริดจ์ จะปรับทั้งสายส่ง แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง และ ขั้วโหลด โดยการใช้ตัวสวิตช์แบบคู่ที่สายส่ง การต่อตัวประจุเพิ่มที่แหล่งจ่าย และที่ขั้วโหลด ตามลำดับ ดังแสดงโครงสร้างของคอนเวอร์เตอร์ที่มีการปรับความสมดุลแบบไฮบริดจ์ในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 โครงสร้างของคอนเวอร์เตอร์ที่มีการปรับความสมดุลแบบไฮบริดจ์

จากรูปที่ 4.16 แสดงให้เห็นถึงการปรับความสมดุลแบบไฮบริดจ์ทั้ง 3 ส่วน

ส่วนที่ 1 การปรับความสมดุลของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงโดยการต่อตัวประจุ C_{s1} และ C_{s2} ขนานกับแหล่งจ่าย ไฟฟ้ากระแสตรงลงสู่เฟรมกราวด์ และการใช้ C_{sb} เพื่อจะสมดุลของค่าประจุแฝงของตัว มอสเฟตด้านสายส่งบวก การกำหนดค่าตัวประจุเพื่อชดเชยตัวประจุแฝงไม่ควรเกิน $1 \mu F$

จะใช้ใกล้เคียงกับค่าประจุแฝงของมอสเฟตคือประมาณ 100-600 pF. ค่าตัวประจุที่แหล่งจ่าย จะใช้ตั้งแต่ $0.5 - 3 \mu F$ ไม่ควรสูงกว่านี้เพื่อป้องกันค่าอิมพีแดนซ์จะต่ำเมื่อความถี่สูงขึ้น

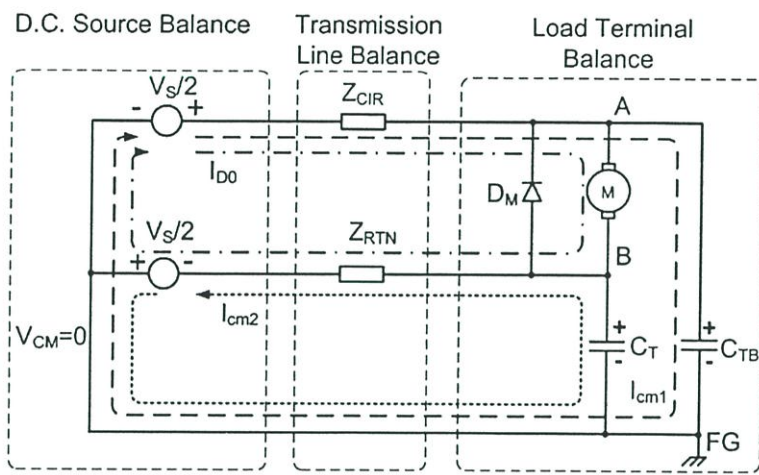
ส่วนที่ 2 การใช้ตัวสวิตช์แบบคู่ โดยใช้มอสเฟตควบคุมการเปิดปิดวงจรทั้งสายส่งด้านบวก และสายส่งด้านลบ

ส่วนที่ 3 การใช้ตัวประจุต่อขนานที่ขั้วของโหลด เพื่อให้อิมพีแดนซ์ที่ขั้วโหลดสมดุลเทียบกับเฟรมกราวด์ คือค่า C_{TB} ซึ่งความสมดุลของวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่เกิดขึ้น จะสามารถวิเคราะห์ โดยพิจารณาสถานะตัวสวิตช์นำกระแสและปิดเช่นเดียวกันกับหัวข้อที่ผ่านมา

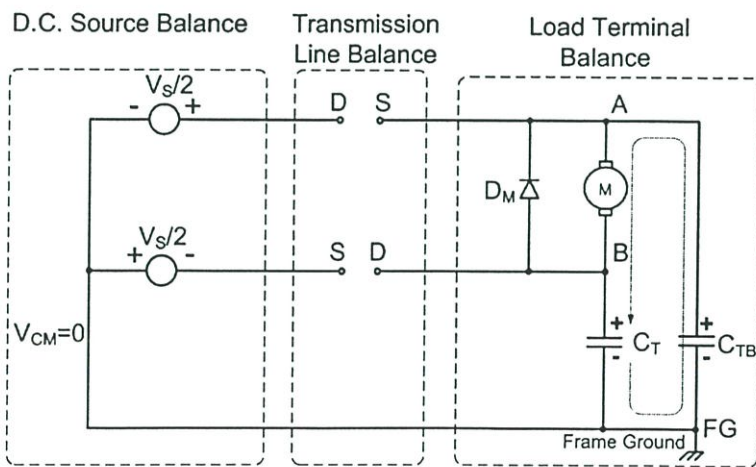
4.9.1 ความสมดุลของคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์คู่โดยใช้การปรับความสมดุลแบบไฮบริดจ์เมื่อ สวิตช์นำกระแส

เมื่อทำการชดเชยเพื่อให้เกิดความสมดุลทุก ๆ ส่วน โดยใช้การปรับความสมดุลแบบไฮบริดจ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.16 นั้น ถ้าพิจารณาสถานะ การทำงานของสวิตช์ทั้งสองสถานะจะแสดงทิศทาง

รูปการไหลของกระแสรวมโหมคร่วม (I_{cm1} , I_{cm2}) ทั้งสองรูป ซึ่งจะนำไปพิจารณาค่าแรงดันรบกวนโหมคร่วมที่เกิดขึ้นได้ จากรูปที่ 4.17 ก ในสถานะที่สวิตช์ทั้งสองเปิดหรือต่อวงจรให้วงจรคอนเวอร์เตอร์ เมื่อวงจรได้รับการปรับที่สมบูรณ์ จะเห็นได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งทั้งสอง คือ Z_{CIR} และ Z_{RTN} จะมีค่าเท่ากัน นอกจากนี้ แรงดันที่แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเทียบกับเฟรมกราวด์ จะถูกแบ่งออกเป็นครึ่งหนึ่งแรงดันที่แหล่งจ่ายเดิม ($V_S/2$) ด้วยผลของการเพิ่มตัวประจุสมดุลที่แหล่งจ่าย จากผลของการสมดุลนี้จะทำให้ กระแสรวมโหมคร่วม (I_{CM1} , I_{CM2}) ที่เกิดขึ้นจะหักล้างกันที่เฟรมกราวด์ มีผลทำให้ค่าแรงดันรบกวนโหมคร่วมจะเท่ากับศูนย์ การที่สามารถจัดกระแสรวมโหมคร่วมให้ลดลงนั้นจะมีผลไปสู่กระแสรวมโหมคร่วมด้วยเช่นเดียวกันและจะเป็นผลให้การแทรกซ้อนของแม่เหล็กที่เกิดขึ้นลดลงตามไปด้วย



ก. สวิตช์นำกระแส



ข. สวิตช์หยุดนำกระแส

รูปที่ 4.17 โครงสร้างของคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตซ์คู่โดยใช้การปรับความสมดุลแบบไฮบริดจ์

$$\frac{V_s}{2} - Z_{CIR}(I_{DO} + I_{cm1}) - V_{AFG} = 0$$

$$V_{AFG} = \frac{V_s}{2} - Z_{CIR}(I_{DO} + I_{cm1}) \quad (4.17)$$

$$\frac{V_s}{2} - Z_{RTN}(I_{DO} + I_{cm2}) - V_{BFG} = 0$$

$$V_{BFG} = \frac{V_s}{2} - Z_{RTN}(I_{DO} + I_{cm2}) \quad (4.18)$$

$$V_{dm} = V_{AFG} - V_{BFG} = 0 \quad (4.19)$$

โดยที่

$$Z_{CIR} = Z_{RTN}$$

$$I_{DO} = \frac{V_s/2 + V_s/2}{Z_m + Z_{CIR} + Z_{RTN}}$$

$$I_{cm1} = I_{cm2}$$

$$Z_{CT} = Z_{CTB}$$

Z_{CT}, Z_{CTB} = ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวประจุที่ขั้วโพลด (C_T) และตัวประจุชดเชย (C_{TB}) ตามลำดับ

$$\left. \begin{aligned} Z_{CIR} &= Z_{RTN} \\ I_{cm2} &= I_{cm1} \\ V_{AFG} &= V_{BFG} \end{aligned} \right\} \quad (4.20)$$

4.9.2 ความสมดุลของคอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์คู่โดยใช้การปรับความสมดุลเมื่อสวิทช์

หยุดนำกระแส

ในสภาวะสวิทช์หยุดนำกระแสก็เช่นเดียวกับคอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์คู่ในหัวข้อที่ 3 ค่าอิมพีแดนซ์ของสวิทช์ทั้งสองจะเข้าสู่นันต์เช่นเดียวกัน ดังนั้นจะไม่มีค่า กระแสรบกวนโหมคร่วมในสภาวะนี้ ดังแสดงค่าของอิมพีแดนซ์ กระแสรบกวนโหมคร่วม และแรงดันที่ขั้วโพลด ดังสมการที่ (4.21)

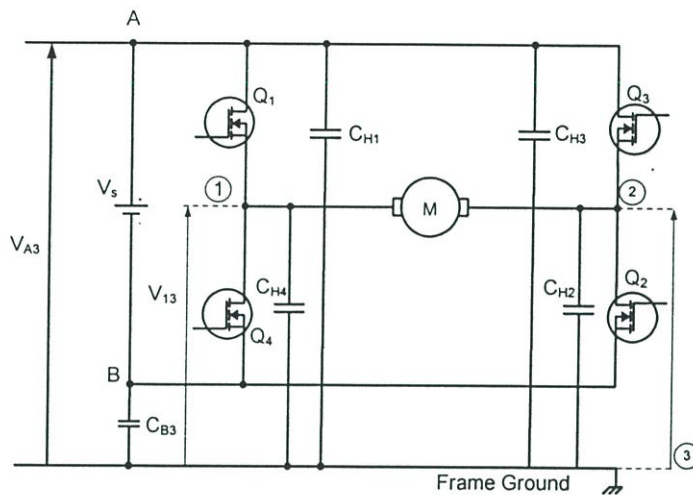
$$\left. \begin{aligned} Z_{CIR} &= Z_{RTN} = \infty \\ I_{cm2} &= I_{cm1} = 0 \\ V_{AFG} &= V_{BFG} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.21)$$

4.10 การแพร่ของสัญญาณรบกวนโหมคร่วมของวงจร 4 สวิทช์ หรือแบบฟูลบริดจ์

จากหลักการของคอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์คู่ที่กล่าวมาแล้วนั้น เราสามารถนำมาประกอบการวิเคราะห์ของคอนเวอร์เตอร์แบบ 4 สวิทช์ ซึ่งจากลำดับการทำงานของแต่ละสวิทช์ จะเห็นได้ว่าการทำงานของสวิทช์จะทำทีละคู่ เช่น ถ้าสวิทช์ตัวที่ 1 และตัวที่ 3 ซึ่งในที่นี่ใช้มอสเฟตเป็น

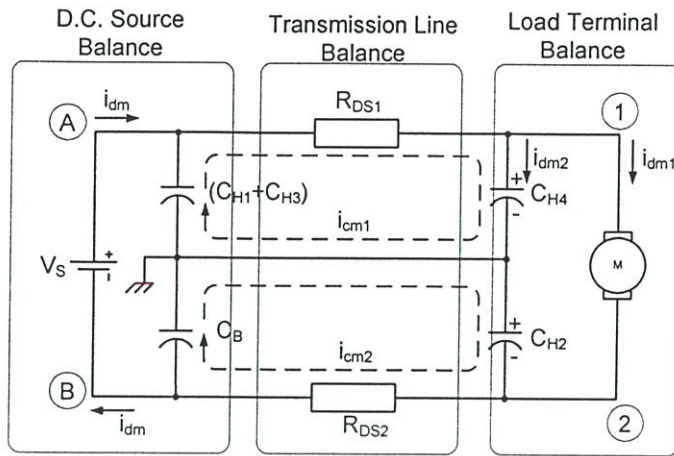
สวิตช์ ถ้า Q_1 และ Q_2 ทำงานหรือเปิด มอสเฟต Q_3 และ Q_4 จะหยุดทำงาน การเปิดแต่ละคู่เป็นการทำให้สายตัวนำส่งและสายตัวนำกลับมีความสมดุลทุกจังหวะการทำงานของการสวิตช์ จากรูปที่ 4.18 แสดงตำแหน่งของตัวประจุแฝงระหว่างขาเดรนของมอสเฟตแต่ละตัวเชื่อมโยงลงสู่เฟรมกราวด์ผ่านตัวระบายความร้อน นอกจากความสมดุลของสายตัวนำส่งและสายตัวนำรับแล้ว จากรูป 4.19 จะเห็นว่าแหล่งจ่ายปรับความสมดุลได้ด้วย $(C_{H1}+C_{H2})$ และ C_B

$$\left. \begin{aligned} V_{A3} &= V_{(C_{H1}+C_{H3})} \\ V_{3B} &= -V_{B3} = V_{CB3} \\ |V_{A3}| &= |V_{B3}| \\ V_{cm} &= V_{A3} + V_{B3} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.22)$$

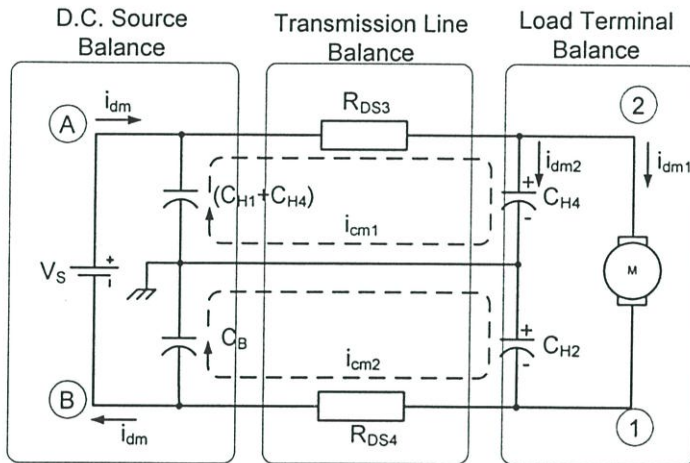


รูปที่ 4.18 วงจรสมมูลของวงจรคอนเวอเตอร์แบบฟูลบริดจ์

จากรูปที่ 4.19 จะเห็นว่าเมื่อลูปของกระแสบวกรวมที่ไหลลงสู่เฟรมกราวด์จากตัวนำส่ง และกระแสบวกรวมที่ไหลในตัวนำกลับ มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากัน ดังนั้นกระแสบวกรวมทั้งสอง คือ I_{CM1} และ I_{CM2} จะมีค่าเท่ากันและมีทิศทางไหลสวนทางกัน จะทำให้เกิดการหักล้างกันที่เฟรมกราวด์ นอกจากนี้จะเห็นได้ว่า นอกจากสายตัวนำส่งสมดุล แหล่งจ่ายถูกจัดให้สมดุลแล้ว โหลดยังมีแนวโน้มถึงความสมดุลจากค่าประจุแฝง C_{H4} และ C_{H2} ในทำนองเดียวกันเมื่อการทำงานเปลี่ยนสถานะ จากค่าสวิตช์ Q_1 และ Q_2 ปิด ค่าสวิตช์ Q_3 และ Q_4 ก็จะมาทำงาน เกิดเป็นการไหลของกระแสบวกรวมในวงจรสมมูลเช่นเดียวกับในสถานะที่ผ่านมาดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.20



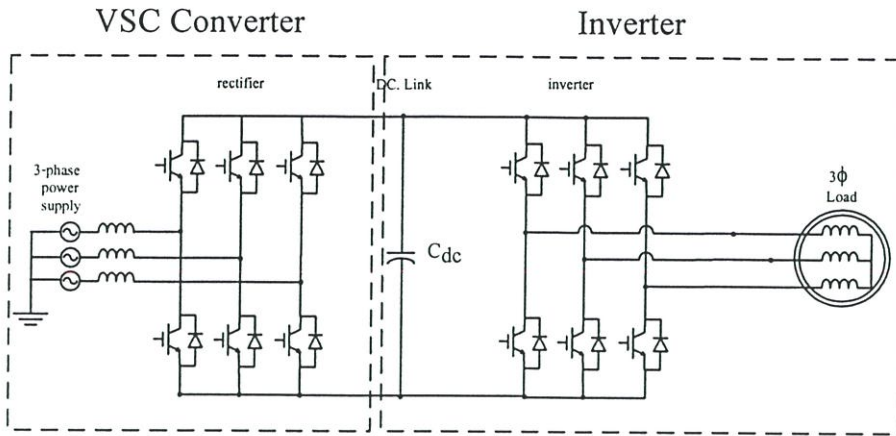
รูปที่ 4.19 วงจรสมมูลของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ขณะ Q_1 และ Q_2 นำกระแส



รูปที่ 4.20 วงจรสมมูลของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ขณะ Q_3 และ Q_4 นำกระแส

4.11 การแพร่ของสัญญาณรบกวนโหมคร่วมของวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม

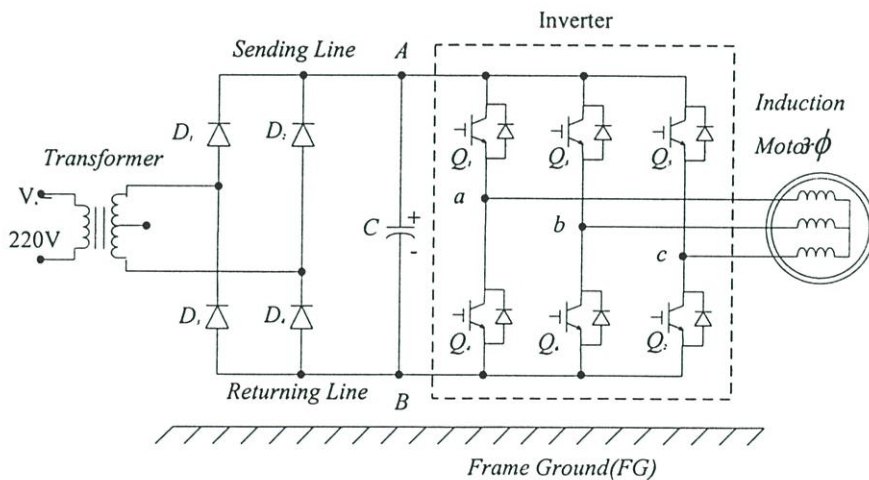
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ความไม่สมดุลของคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมดังได้กล่าวแล้วในหัวข้อที่ 4.1 โดยในการทดลองจะแบ่งส่วนของคอนเวอร์เตอร์ออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของคอนเวอร์เตอร์ด้านโวลต์ในกรณีที่ทำหน้าที่เป็นอินเวอร์เตอร์แปลงกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจากสายเชื่อมต่อไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ และอีกส่วนหนึ่งคือคอนเวอร์เตอร์แบบ VSC ที่ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบ SPWM ดังแสดงในรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 แสดงโครงสร้างของคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

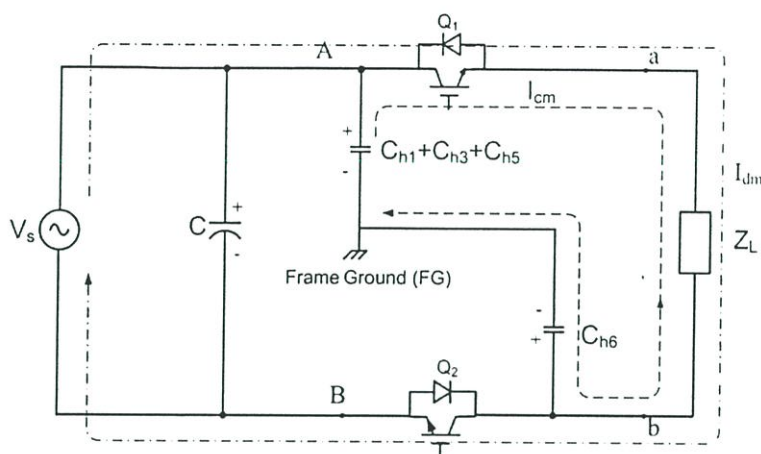
4.11.1 การแพร่กระจายของสัญญาณรบกวนโหมคร่วมในวงจรอินเวอร์เตอร์

โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์จะมีการทำงานด้วยคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 สวิตช์โดยสวิตช์แต่ละเฟสจะทำงานเป็นคู่ ดังนั้นจะถือได้ว่ามีโครงสร้างคล้ายกับแบบฟูลบริดจ์ทุกประการ เพียงแต่มีเฟสเพิ่มมากขึ้น เมื่อพิจารณาถึงความไม่สมดุลของอินเวอร์เตอร์จะเกิดขึ้น 3 ส่วนคือความไม่สมดุลจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับทั้งในส่วนของไฟฟ้ากระแสสลับอินพุตทั้งแบบ 1 เฟสและแบบ 3 เฟส ความไม่สมดุลจากสายเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรง และความไม่สมดุลจากโหลด ในรูปที่ 4.22 แสดงให้เห็นอินเวอร์เตอร์ที่ใช้แรงดันอินพุตเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟสที่ต่อเชื่อมด้วยหม้อแปลง เราจะสามารถพิจารณาการไหลของกระแสแต่ละเฟสโดยพิจารณาจากจุด A-B ไปถึงโหลดได้ดังรูปที่ 4.23



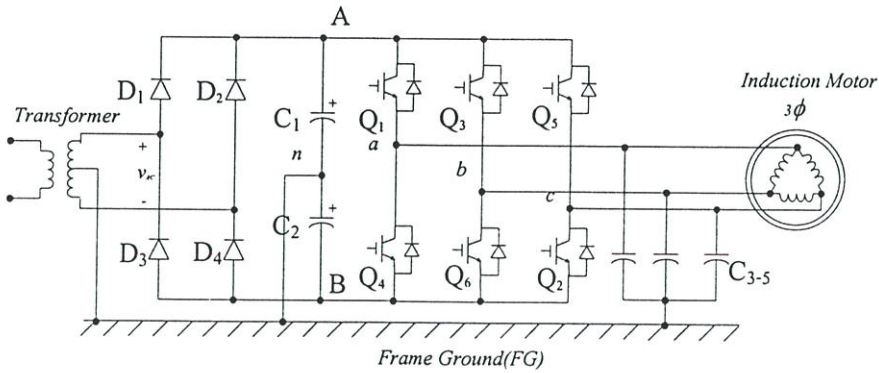
รูปที่ 4.22 แสดงโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ที่จ่ายแรงดัน 1 เฟส

จากรูปที่ 4.22 ได้แสดงถึงโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสขับเคลื่อนมอเตอร์ โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส ในวงจรนี้เมื่อเกิดการดำเนินงานของตัวสวิตช์ จะเกิดการรั่วไหลของกระแสรบกวนโหมคร่วมผ่านตัวระบายความร้อน โดยผ่านตัวประจุแฝงทั้งสองค่าในระหว่างทำงานระหว่างเฟส a และเฟส b ในรูปที่ 4.23 แสดงวงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์ที่ยังไม่สมดุล เมื่อสวิตช์ Q₁ และ Q₆ ทำงานจะเกิดการไหลของกระแสรบกวนโหมคร่วมที่ไม่สมดุล โดย C_{h1}, C_{h3}, C_{h5}, C_{h6} เป็นค่าประจุแฝงของสวิตช์ตัวที่ 1, 3, 5 และ 6 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังแสดงทิศทางการไหลของกระแสรบกวนโหมคร่วมที่ไหลในทิศทางเดียวกันกับกระแสไหล

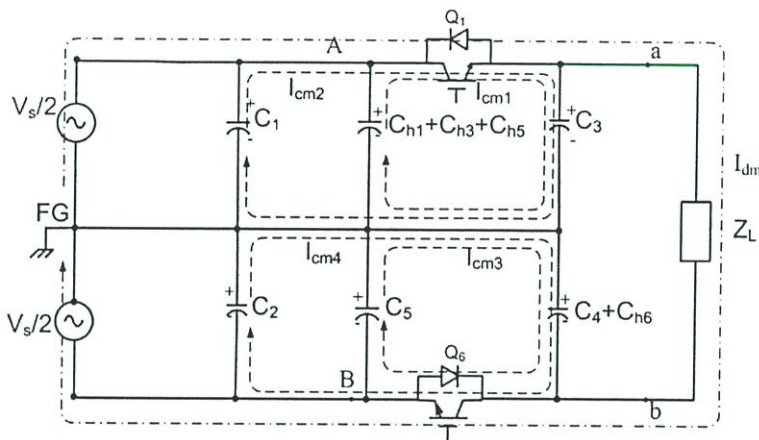


รูปที่ 4.23 วงจรสมมูลของ อินเวอร์เตอร์ที่ยังไม่สมดุล

จากนั้นจะปรับความสมดุลของวงจรโดยต่อตัวประจุระหว่างสายเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงคือ C₁, C₂ และต่อตัวประจุเพื่อปรับความสมดุลที่โหมคร่วมคือ C₃-C₆ และเชื่อมตัวประจุทุกตัวที่เฟรมกราวด์และต่อเชื่อมกับ center tap ของหม้อแปลงไฟฟ้าดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.24 และจากรูปที่ 4.25 จะแสดงวงจรอินเวอร์เตอร์หลังการปรับสมดุลโดยค่าประจุ C₁-C₅ เป็นการสมดุลแบบพาสซีฟที่ชดเชยเพื่อปรับความสมดุลของวงจร ในรูปที่ทำการปรับความสมดุลแล้ว จะเห็นได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์แต่ละลูบมีค่าใกล้เคียงกัน จากผลของความสมดุลของอิมพีแดนซ์นี้จะทำให้กระแสรบกวนโหมคร่วมเกิดการหักล้างกัน ที่เฟรมกราวด์เช่นเดียวกันกับหลักการของคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์คู่และการปรับสมดุลแบบไฮบริดจ์ ส่วนหนึ่งที่สำคัญของการปรับความสมดุลคือหม้อแปลงไฟฟ้าที่มี center tap จะทำให้แรงดันระหว่างขั้วทั้งสองด้านของขดลวดทุติยภูมิมีเฟสตรงข้ามกัน 180 องศา ดังนั้นเฟสของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับในรูปที่ 4.25 จึงแทนแรงดันที่จ่ายจากหม้อแปลง

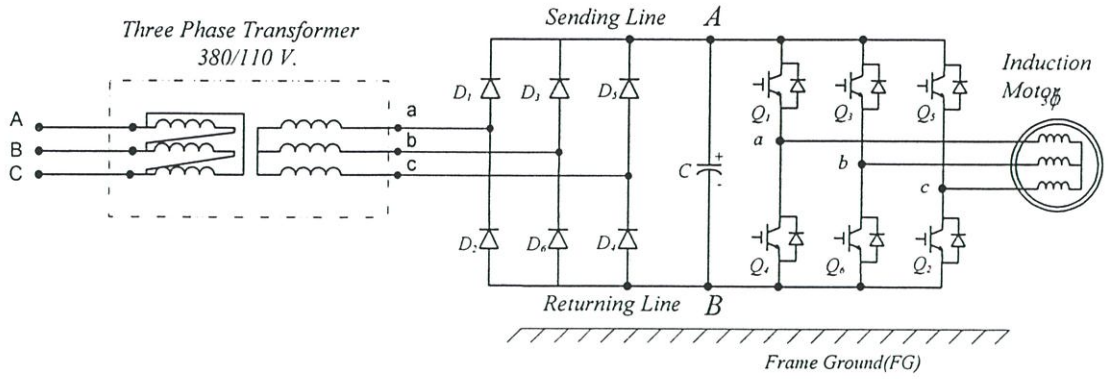


รูปที่ 4.24 ทิศทางการไหลของกระแสบริเวณ โหมคร่วมและ โหมคต่างขณะยังไม่สมดุล

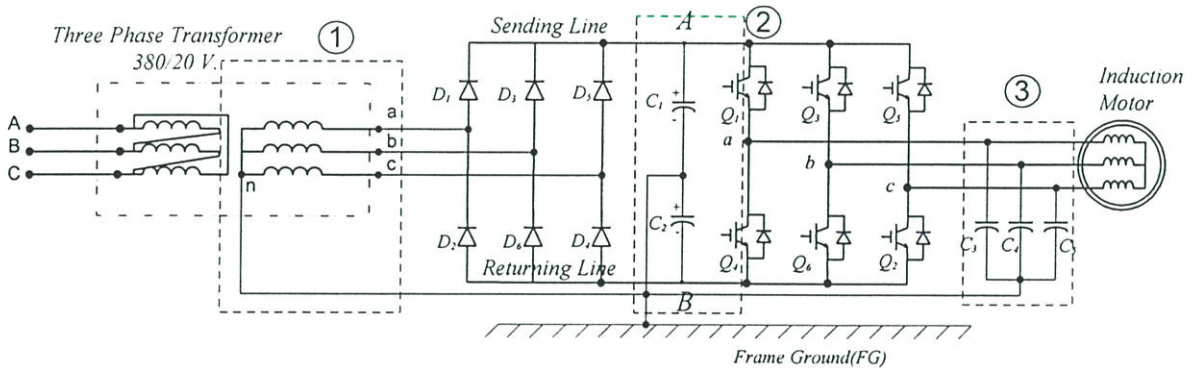


รูปที่ 4.25 วงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์หลังการปรับสมดุล

ในส่วนของอินเวอร์เตอร์ที่จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสดังรูปที่ 4.26 ก็เช่นเดียวกันกับการปรับสมดุลจะทำได้เช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.24 แตกต่างในด้านแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับโดยในที่นี้จะใช้หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟสต่อแบบวาย และทุกส่วนของการปรับความสมดุลจะต่อเชื่อมลงกราวด์ ในการสมดุลนี้จะอาศัยหลักการสมดุลของระบบ 3 เฟสแม้ว่าลักษณะจำนวนลำดับของการเรียงกระแสจะมีมากกว่าแบบ 1 เฟส แต่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะเรียกว่าในแบบที่ 1 และผลของการวิเคราะห์การรั่วไหลของกระแสบริเวณโหมคร่วมจะเกิดเช่นเดียวกันกับกรณีที่แรงดันอินพุทเป็นแรงดัน 1 เฟส จะแตกต่างกันในระดับของการจ่ายโหลดเท่านั้น แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจะดีกว่าในขนาดกำลังไฟฟ้าและจำนวนริปเปิลที่เกิดขึ้น การปรับความสมดุลจะแสดงดังรูปที่ 4.27



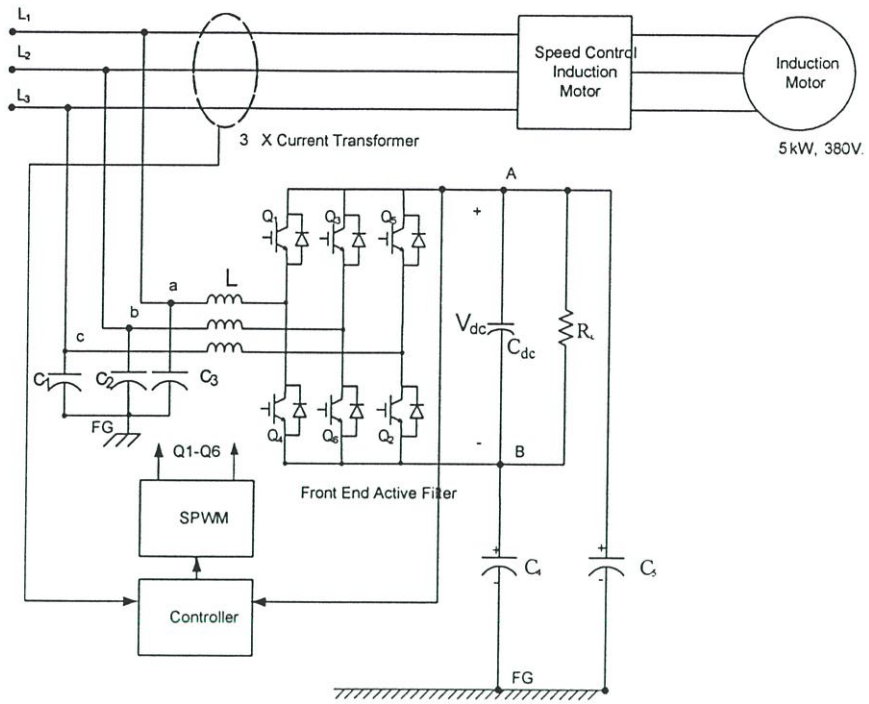
รูปที่ 4.26 อินเวอร์เตอร์ที่จ่ายแรงดันอินพุต 3 เฟสที่ไม่สมดุล



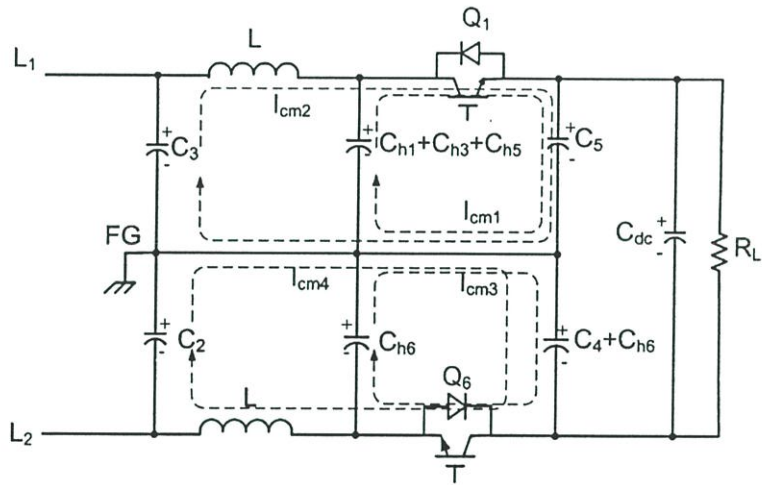
รูปที่ 4.27 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟสที่หลังปรับความสมดุล

4.11.2 การแพร่กระจายของสัญญาณรบกวนโหมคร่วมในวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ VSC

การจัดการความสมดุลของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ VSC จะทำเช่นเดียวกันกับอินเวอร์เตอร์ โดยปัญหาของความไม่สมดุลส่วนใหญ่จะเกิดที่สายเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งในที่นี้เป็นภาคเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ที่ต่อกับตัวประจุ จากรูปที่ 4.28 แสดงคอนเวอร์เตอร์แบบ VSC ที่ใช้ในตัวกรองแอกทีฟ หลังที่ได้ปรับความสมดุลด้วยวิธีพาสซีส คือต่อตัวประจุ C_1 , C_2 และ C_3 ขนาดตัวละ 100 pF ที่อินพุตของตัวกรอง และต่อตัวประจุ C_4 และ C_5 ขนาด 1 μF ที่เอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ที่ขั้วของตัวประจุหลัก และปรับความสมดุลที่อินพุตไฟฟ้ากระแสสลับ โดยเชื่อมทั้งสองส่วนที่เฟรมกราวด์ จากผลของการกระทำนี้จะทำให้กระแสรบกวนโหมคร่วมที่เกิดขึ้นเกิดการหักล้างกันที่เฟรมกราวด์ เช่นเดียวกันกับ การปรับความสมดุลในอินเวอร์เตอร์ ดังแสดงทิศทางการไหลของกระแสรบกวนโหมคร่วมในรูปที่ 4.29 แสดงให้เห็นค่าประจุแฝง $C_{n1}-C_{n6}$ เป็นประจุแฝงของสวิตช์แต่ละตัว หลังปรับสมดุลจะเห็นวงจรขนานของตัวประจุและกระแสรบกวนโหมคร่วมไหลในลูปบนผ่านตัวเหนี่ยวนำ และตัวประจุเช่นเดียวกันกับกระแสที่อยู่ในลูปล่าง



รูปที่ 4.28 คอนเวอร์เตอร์แบบ VSC หลังปรับความสมดุล



รูปที่ 4.29 การไหลของกระแสโหมคร่วมหลังปรับความสมดุล

จากรายละเอียดที่ได้นำเสนอมาในบทนี้ สามารถสรุปได้ถึงสาเหตุของความไม่สมดุลของวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวสวิตช์ตัวเดียว จะเกิดความไม่สมดุล 3 ส่วนคือความไม่สมดุลของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ความไม่สมดุลของสายส่ง และความไม่สมดุลที่ขั้วของโหลด โดยเฉพาะอย่างยิ่งความไม่สมดุลที่มีผลกระทบกับการเกิดกระแสโหมคร่วมแรงดันรบกวนโหมคร่วมกระแสไฟฟ้าโหมคร่วม ซึ่งเป็นผลให้เกิดสัญญาณรบกวนในตัวนำเป็นอย่างมาก การปรับความสมดุลเพื่อลดสัญญาณรบกวนนี้ เป็นวิธีโดยการปรับให้วงจรเกิดความสมดุล โดยใช้คอนเวอร์เตอร์แบบตัวสวิตช์คู่ ซึ่งเป็นการ

ปรับความไม่สมดุลแบบอนุกรม โดยใช้การชดเชยการสมดุลแบบแอกทีฟ และการใช้คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์คู่ปรับความสมดุลแบบไฮบริดจ์ ด้วยการปรับความไม่สมดุลแบบอนุกรมและขนาน จากผลของความไม่สมดุลแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ความไม่สมดุลของสายส่งไฟฟ้า และความไม่สมดุลของขั้วโหลด โดยวิธีแอกทีฟ และวิธีพาสซีฟ การปรับความสมดุลคอนเวอร์เตอร์แบบ 4 สวิตช์ คอนเวอร์เตอร์แบบ 6 สวิตช์ และคอนเวอร์เตอร์แบบ VSC

ในบทต่อไปจะกล่าวถึงการทดลองเพื่อวิเคราะห์ความสมดุล ในโดเมนเวลา การวัดค่ารูปคลื่นของแรงดันในส่วนต่างๆ การคำนวณการสูญเสียจากการเปิดปิด การคำนวณหา CMRR และการวัดค่าสเปคตรัมของ กระแสรบกวนโหมคร่วมในโดเมนความถี่ตามลำดับ นอกจากนี้ได้นำหลักการปรับความสมดุลมาปรับคอนเวอร์เตอร์แบบแบบ 6 สวิตช์หรืออินเวอร์เตอร์ คอนเวอร์เตอร์แบบ VSC ตามลำดับ

บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดลองการลดการแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้า โดยใช้หลักการลดสัญญาณรบกวนโหมคร่วมโดยหลักการสมดุล ซึ่งจะมีการปรับความสมดุลทั้งในส่วนของพาสซีฟและแอคทีฟ ดังที่กล่าวมาแล้วว่า จะทำการทดลองกับคอนเวอร์เตอร์ 5 แบบ คือ คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดี่ยว คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์คู่ คอนเวอร์เตอร์แบบ 4 สวิตช์ คอนเวอร์เตอร์แบบ 6 สวิตช์และคอนเวอร์เตอร์แบบ VSC ตามลำดับ โดยจะวัดรูปคลื่นของสัญญาณรบกวนโหมคร่วมทั้งก่อนและหลังการปรับสมดุล ประเมินค่าความสมดุลด้วยวิธี CMRR และวัดค่าสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนโหมคร่วมทั้งก่อนและหลังการปรับสมดุล ที่คอนเวอร์เตอร์ทุกแบบที่กล่าวแล้ว

5.1 การวัดเพื่อเปรียบเทียบรูปคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่โหลดระหว่างวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดี่ยวและวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์คู่

ในหัวข้อนี้จะเป็นการทดลองเพื่อวัดค่าแรงดันและกระแสเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดี่ยว และคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์คู่ โดยมีรายละเอียดการทดลอง ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 รายละเอียดการทดลองการวัดเพื่อเปรียบเทียบรูปคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่โหลดระหว่างวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดี่ยวและวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์คู่

การทดลอง	หัวข้อการทดลอง	วัตถุประสงค์การทดลอง
1	การวัดค่ารูปคลื่นของแรงดันเอาต์พุตที่ขั้วโหลดและกระแสที่โหลด .	วัดการเกิดแรงดันกระดิ่งหรือการแกว่งของแรงดันและกระแสเอาต์พุต
2	การวัดค่ารูปคลื่นของแรงดันเอาต์พุตที่ขั้วโหลดและแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์.	วัดขนาดของแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์ในสถานะเปิดและปิด
3	การวัดเวลาการเปิดปิดของแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์ และแรงดันเอาต์พุตที่ขั้วโหลด	เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าสูญเสียกำลังงานขณะที่สวิตช์เปลี่ยนสถานะ
4	วัดแรงดันที่ขั้วโหลดเทียบกับเฟรมกราวด์ทั้งขั้วบวกและขั้วลบ	เพื่อคำนวณหาค่าเฉลี่ยของแรงดันรบกวนโหมคร่วมและแรงดันรบกวนโหมคต่าง.

5.1.1 การเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง

- D.C. shunt wound motor separately excited

ขนาดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในการทดลองจะมีพิกัดตามตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 แสดงขนาดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในการทดลอง

แรงดันพิกัด	30	Volt
กำลังไฟฟ้าพิกัด	200	Watt
กระแสพิกัด	6.2	Amp.
ความเร็วรอบ	1250	r.p.m.

- เครื่องจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง (D.C. power supply)

-D.C. power supply ขนาด 500 W.,0-60 Volt จำนวน 2 ชุด ใช้ขับเคลื่อนวงจรอาร์เมเจอร์และวงจรสนามแม่เหล็ก

- เครื่องมือวัดไฟฟ้า

-D.C. volt meter 0 - 60 volt. 2 ตัว

-D.C. amp meter 0 - 10 amp. 2 ตัว

-Digital Storage Oscilloscope(DSO) 150 MHz.

(Yogogawa รุ่น DL1540C) พร้อมอุปกรณ์วัดรูปคลื่นกระแส (Current Sensor

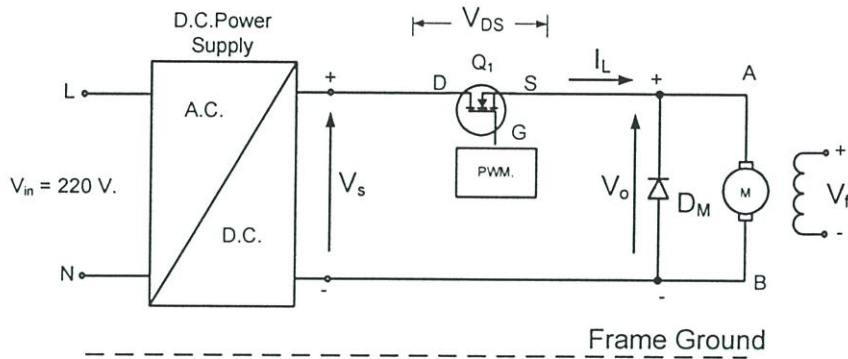
Prob.) 1:1 A/V

5.1.2 การทดลองที่ 1 การวัดค่ารูปคลื่นของแรงดันเอาต์พุตที่ขั้วโหลด และกระแสที่โหลด

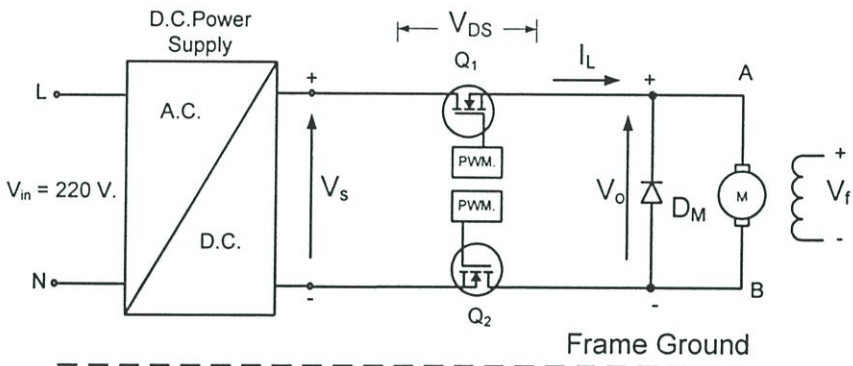
1. ต่อวงจรการทดลองดังรูปที่ 5.1 ก. ข. โดยจ่ายแรงดันให้มอเตอร์เท่ากับพิกัดปรับความถี่ของพี ดับเบิลยูเอ็ม เท่ากับ 10 kHz คิวดีไซเคิล 80 เปอร์เซนต์

2. วัดค่าแรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ระหว่างจุด A-B และวัดกระแสมอเตอร์ด้วย Current Prob และดิจิตอลออสซิลอสโคป ดังแสดงในรูปที่ 5.2 จะเห็นได้ว่าในช่วงที่สวิตช์เปลี่ยนสถานะเปิดแรงดันขั้วของแรงดันที่ขั้วโหลด จะเกิดการออสซิลเลชันเป็นแรงดันกระดิ่ง (Ringing) จำนวนมากในคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดี่ยว ทำให้ปรากฏ ที่กระแสมอเตอร์ด้วย ผลของการเกิดแรงดันกระดิ่ง จะทำให้เกิดการรั่วไหลของกระแสรบกวนในโหมคร่วม ผ่านตัวระบายความร้อนของมอเตอร์ ไหลลงสู่เฟรมกราวด์ แต่ค่าแรงดันที่ขั้วโหลด เมื่อใช้คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์คู่จะมีแรงดันกระดิ่งน้อยกว่า ส่วนด้านล่างของรูปจะเป็นการขยายแรงดันและกระแส 250 เท่า

3. ในรูปที่ 5.3 จะเห็นได้ว่าในช่วงที่สวิตช์เปลี่ยนสถานะปิด เมื่อสวิตช์ตัดวงจรออก การเปลี่ยนแปลงแรงดันก็จะเกิดขึ้นเช่นเดียวกันกับหัวข้อ.2 จะเกิดแรงดันกระดิ่ง (Ringing) ระหว่างหยุดทำงาน ในคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดี่ยว จะไม่แตกต่างจาก คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์คู่มากนัก

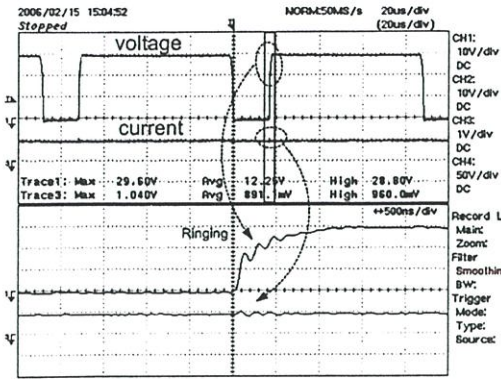


ก. แบบสวิตช์เดี่ยว

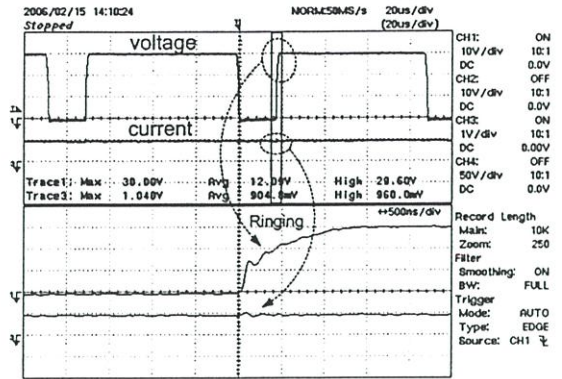


ข. แบบสวิตช์คู่

รูปที่ 5.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

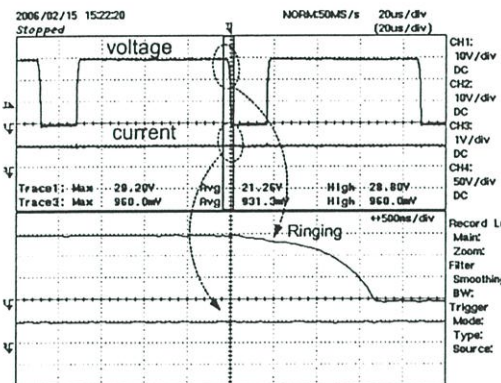


ก. คอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์เดี่ยว

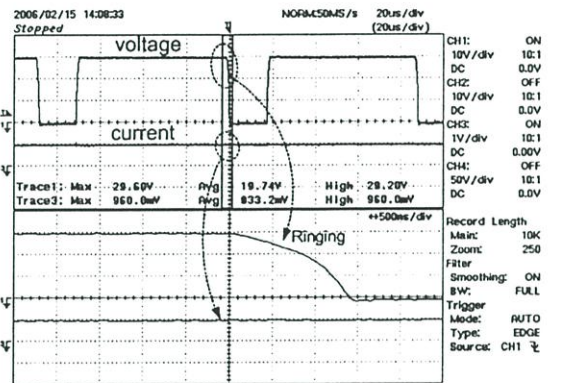


ข. คอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์คู่

รูปที่ 5.2 สัญญาณแรงดันที่ขั้วของมอเตอร์และกระแสที่ไหลในอาร์มเจอร์ในสภาวะเปิด



ก. คอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์เดี่ยว



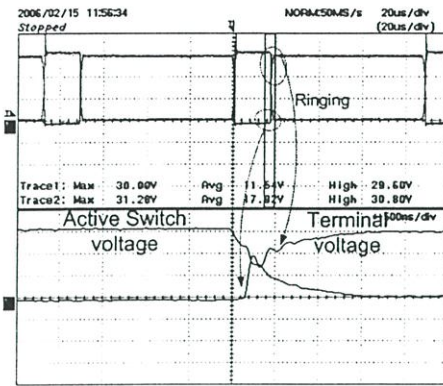
ข. คอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์คู่

รูปที่ 5.3 สัญญาณแรงดันที่ขั้วโหลดและกระแสที่ไหลในอาร์มเจอร์ในสภาวะปิด

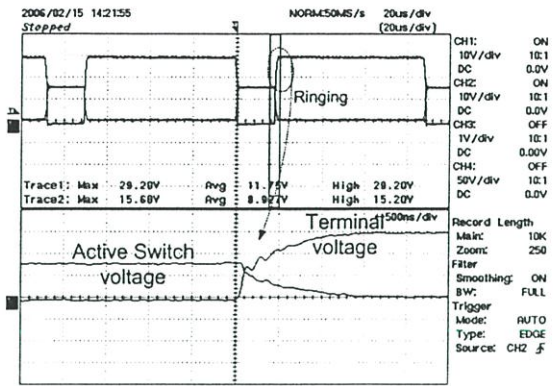
5.1.3 การทดลองที่ 2 การวัดแรงดันเอาต์พุตที่ขั้วโหลดและแรงดันระหว่างตกรวมตัวสวิทช์

1. ปรับค่าเริ่มต้นการทดลองเช่นเดียวกันกับการทดลองที่ 1 วัดแรงดันที่ขั้วของโหลดและแรงดันที่ตกรวมขาตรนของมอเตอร์ (Stress Voltage) เพื่อวัดค่าแรงดันชั่วขณะเมื่อมีการเปลี่ยนสถานะจากเปิดและปิด ในคอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์เดี่ยวและคอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์คู่ จะเห็นได้ว่า ขนาดแรงดันสูงสุดของ Stress Voltage ในคอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์เดี่ยวจะมีขนาดเท่ากับแรงดันที่ขั้วโหลด หรือเท่ากับแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง แต่ในคอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์คู่แรงดันจะประมาณครึ่งหนึ่งของแรงดันที่แหล่งจ่าย หรือแรงดันที่ขั้วโหลด ซึ่งผลของการที่ค่า Stress Voltage น้อยกว่าแรงดันเอาต์พุตนี้ จะเป็นผลทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะที่

สวิตช์ ปิด ที่มอสเฟตหรือที่สวิตช์แต่ละตัว ของคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์คู่ น้อยกว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดี่ยว ทำให้ขนาดของแรงดันของตัวสวิตช์ก็จะน้อยไปด้วย นอกจากนี้ขนาดของแรงดันกระดิ่ง ของคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์คู่ จะน้อยกว่าคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดี่ยวเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.4 และรูปที่ 5.5

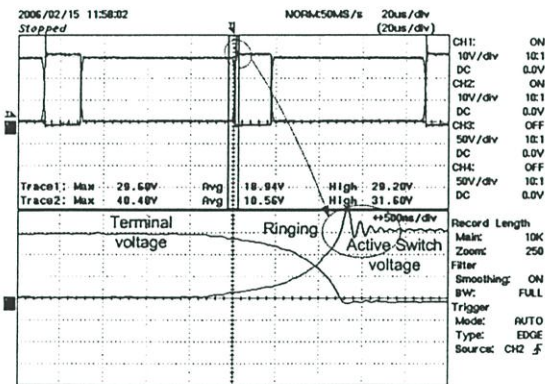


ก. คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดี่ยว

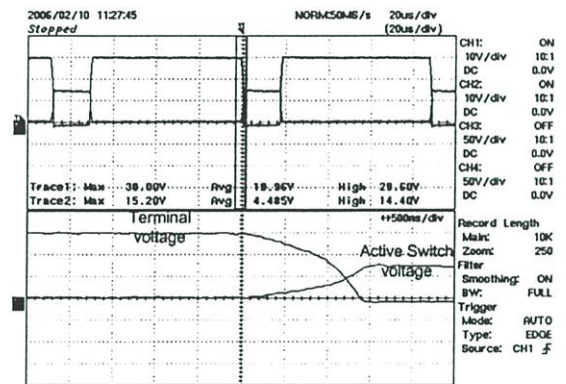


ข. คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์คู่

รูปที่ 5.4 สัญญาณแรงดันที่ขั้วโหลดและแรงดันที่ตกคร่อมทรานซอสของมอสเฟต ขณะสวิตช์นำกระแส



ก. คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดี่ยว

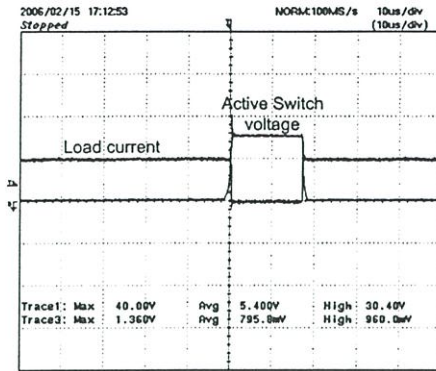


ข. คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์คู่

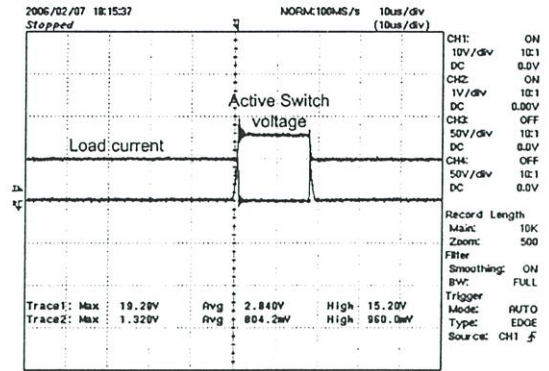
รูปที่ 5.5 สัญญาณแรงดันที่ขั้วโหลดและแรงดันที่ตกคร่อมทรานซอสของมอสเฟตขณะสวิตช์หยุดนำกระแส

จากผลของการใช้คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์คู่จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์จะมีค่าน้อยกว่าแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์ของคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดี่ยว จากผลดีส่วนนี้จะทำให้สามารถลด ค่าแรงดันเค้น (Stress Voltage) ที่ตัวสวิตช์ทำให้มีผลกับขนาดของตัวสวิตช์และกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะสวิตช์

2. ในหัวข้อนี้จะทำการวัดแรงดันตกคร่อมสวิตช์และค่ากระแสเพื่อหาค่าเวลาการเปลี่ยนแปลงสถานะของสวิตช์ในช่วงเปิดและปิด เพื่อจะนำไปคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะที่สวิตช์นำกระแสและสวิตช์หยุดนำกระแส ดังแสดงในรูปที่ 5.6



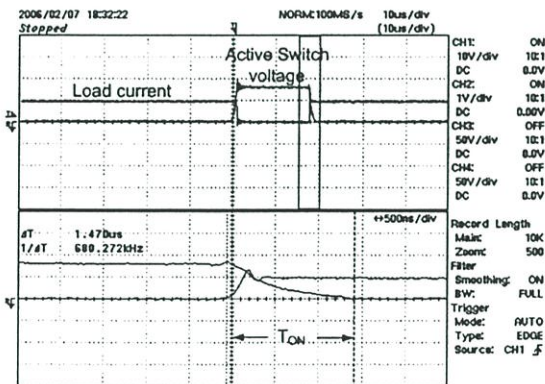
ก. คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดี่ยว



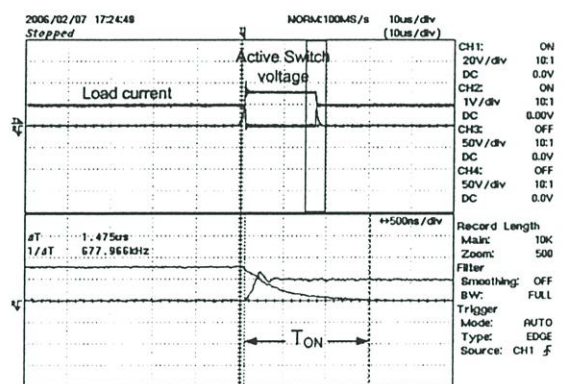
ข. คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์คู่

รูปที่ 5.6 สัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์และกระแสที่ไหลผ่านตัวสวิตช์

3. การคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการสวิตช์ที่ความถี่สวิตช์ซึ่งของคอนเวอร์เตอร์ทั้งสองแบบ จะพิจารณาจากคาบเวลาเปลี่ยนแปลงของแรงดันตกคร่อมสวิตช์ และกระแสในขณะสวิตช์นำกระแส และปิด ดังแสดงในรูปที่ 5.7 และ 5.8 ผลลัพธ์แสดงในตารางที่ 5.3 นำค่ามาคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจากสวิตช์นำกระแสและสวิตช์หยุดนำกระแส ตามสมการที่ 5.1

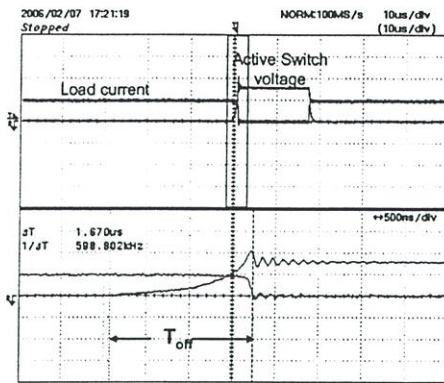


ก. คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดี่ยว

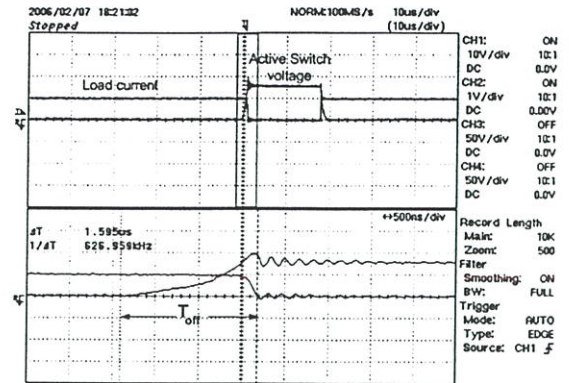


ข. คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์คู่

รูปที่ 5.7 รูปขยายสัญญาณแรงดันตกคร่อมสวิตช์และ กระแสที่ไหลผ่านสวิตช์ขณะที่สวิตช์นำกระแส



ก. คอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์เดี่ยว



ข. คอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์คู่

รูปที่ 5.8 รูปขยายสัญญาณแรงดันตกรวมสวิทช์และกระแสที่ไหลผ่านสวิทช์ขณะที่สวิทช์หยุดนำกระแส

ตารางที่ 5.3 แสดงค่าแรงดันและกระแสที่วัดได้จากการทดลอง

	Single-Switch	Double-Switch	
V_{DS}	30.04	15.20	V.
I_L	960	960	mA.
f_{sw}	10	10	kHz.
T_{on}	1.47×10^{-6}	1.47×10^{-6}	sec.
T_{off}	1.67×10^{-6}	1.59×10^{-6}	sec.

V_{DS} = แรงดันตกรวมสวิทช์ (Drain-Source Voltage)

I_L = กระแสอินพุทซึ่งเท่ากับกระแสที่ไหลผ่านสวิทช์

f_{sw} = ความถี่ในการสวิทช์

T_{on}, T_{off} = เวลาการเปิดและปิดของสวิทช์

$$P_{diss} = \frac{1}{2} V_{ST} I_L f_{sw} (T_{on} + T_{off}) \quad (5.1)$$

โดยที่

P_{diss} = กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการทำงานของสวิทช์

ผลการคำนวณจากผลลัพธ์ตามตารางที่ 5.3

$V_{DS} = 30.04V$, $I_L = 960mA$, $f_{sw} = 10kHz$, $T_{on} = 1.47 \mu sec$, $T_{off} = 1.67 \mu sec$

ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ตัวสวิทช์ของคอนเวอร์เตอร์สวิทช์เดี่ยวดังนี้

$$P_{diss} = \frac{1}{2} \cdot (30.04) \cdot (960 \times 10^{-3}) \cdot (10 \times 10^3) \cdot (1.47 \times 10^{-6} + 1.67 \times 10^{-6})$$

$$= 0.45 \text{ W}$$

$V_{DS} = 15.20V$, $I_L = 960mA$, $f_{sw} = 10kHz$, $T_{on} = 1.47\mu\text{sec}$, $T_{off} = 1.59\mu\text{sec}$
ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ตัวสวิตช์ของคอนเวอร์เตอร์สวิตช์เดี่ยวดังนี้

$$P_{diss} = 2 \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot (15.20) \cdot (960 \times 10^{-3}) \cdot (10 \times 10^3) \cdot (1.47 \times 10^{-6} + 1.59 \times 10^{-6}) \right]$$

$$= 0.45 \text{ W}$$

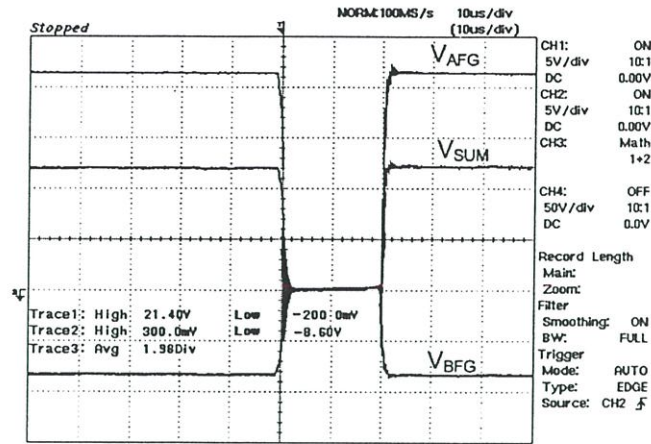
(หมายเหตุ สวิตช์มี 2 ตัว ต้องคูณ 2 ที่สมการกำลัง)

จากผลการคำนวณจะพบว่า กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่สวิตช์ของคอนเวอร์เตอร์ทั้งสองแบบจะมีค่าเท่ากัน ดังนั้นการใช้คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์คู่จะไม่มีผลต่อค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่สวิตช์ของวงจรแต่อย่างใด

5.2 การทดลองวัดแรงดันรบกวนโหมคร่วมที่ขั้วโหลดของคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดี่ยว แบบสวิตช์คู่และแบบปรับความสมดุลไฮบริดจ์

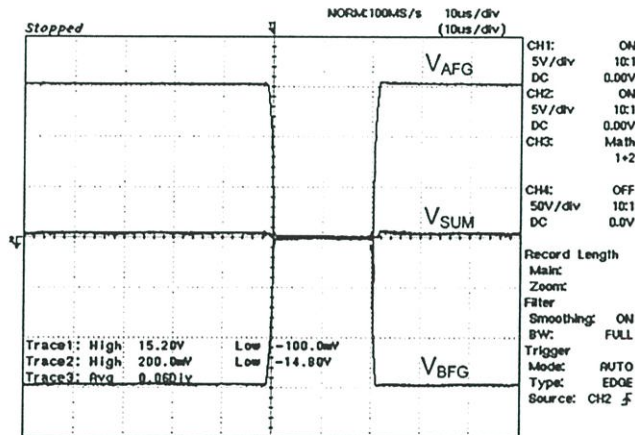
การทดลองในหัวข้อนี้ จะเป็นการวัดแรงดันรบกวนโหมคร่วม เพื่อเป็นการตรวจสอบความสมดุลของวงจร เมื่อวงจรมีความสมดุลขนาดและเฟสของแรงดันรบกวน โหมคร่วมจะมีค่าขนาดใกล้เคียงกันและมีเฟสตรงข้ามกัน ซึ่งจะทำให้ผลลัพธ์ของแรงดันรบกวนโหมคร่วม เมื่อเทียบกับเฟรมกราวด์มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ จะมีผลทำให้กระแสรบกวนโหมคร่วมมีค่าลดลง และมีค่าน้อยมาก การเกิดกระแสรบกวนโหมคร่วมจะแปรค่าตามความต่างศักย์ระหว่างสายส่งหรือตัวนำด้านส่ง (Sending Line) กับสายส่งด้านกลับหรือตัวนำด้านกลับ (Returning Line) ดังนั้น ถ้าแรงดันล้น้น้อยลง ก็หมายถึงกระแสรบกวนโหมคร่วมทั้งสองสายเกิดการหักล้างกัน

การทดลองในหัวข้อนี้ จะทำการวัดแรงดันระหว่างขั้วโหลดด้านสายส่ง (ขั้ว AG) และสายด้านกลับ (ขั้ว BG) เทียบกับ เฟรมกราวด์ จะได้แรงดัน V_{AFG} และ V_{BFG} ของคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดี่ยว คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์คู่และคอนเวอร์เตอร์ปรับความสมดุลแบบไฮบริดจ์ ดังแสดงในรูปที่ 5.9 – รูปที่ 5.11



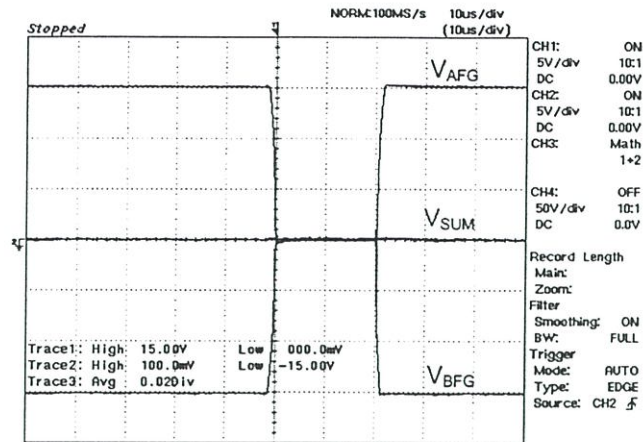
รูปที่ 5.9 รูปสัญญาณแรงดันรบกวนโหมคร่วมที่ชั่วโหลด (VAFG, VBFG) และผลรวมของ ทั้งสองแรงดัน (VSUM) ของคอนเวอร์เตอร์แบบสวิทซ์เดี่ยว

$$(V_{sum} = V_{AFG} + V_{BFG}, \text{ Trace 1: } V_{AFG} = 21.40 \text{ V}, \text{ Trace 2: } V_{BFG} = -8.60 \text{ V}, \\ \text{Trace 3: } V_{sum_avg} = V_{SUM} \times V/Div = 1.98 \times 5 = 9.9 \text{ V})$$



รูปที่ 5.10 รูปสัญญาณแรงดันรบกวนโหมคร่วมที่ชั่วโหลด (VAFG, VBFG) และ ผลรวมของ ทั้งสองแรงดัน (VSUM) ของคอนเวอร์เตอร์แบบสวิทซ์คู่

$$(\text{Trace 1: } V_{AFG} = 15.20 \text{ V}, \text{ Trace 2: } V_{BFG} = -14.80 \text{ V}, \text{ Trace 3: } V_{sum_avg} = 0.06 \times 5 = 0.3 \text{ V})$$



รูปที่ 5.11 รูปสัญญาณแรงดันรบกวนโหมคร่วมที่ชั่วโหลด (V_{AFG} , V_{BFG}) และ ผลรวมของทั้งสองแรงดัน (V_{SUM}) ของคอนเวอร์เตอร์แบบปรับความสมดุลไฮบริดจ์

(Trace 1: $V_{AFG} = 15.00 \text{ V}$., Trace 2: $V_{BFG} = -15.00 \text{ V}$, Trace 3: $V_{sum_avg} = 0.02 \times 5 = 0.1 \text{ V}$)

5.3 การประเมินผลความสมดุลของวงจรด้วยวิธี CMRR

ในการปรับความสมดุลของคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตซ์เดี่ยว โดยใช้คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตซ์คู่ และแบบปรับความสมดุลไฮบริดจ์ การทดลองที่ผ่านมา จะสามารถวัดค่าแรงดันรบกวนโหมคร่วมที่ชั่วของโหลดเพื่อเป็นการยืนยันความสมดุลที่ถูกปรับให้ดีขึ้นจากคอนเวอร์เตอร์ทั้งสองแบบ การที่กระแสรบกวนโหมคร่วมถูกทำให้น้อยลง นอกจากจะลดคลื่นสัญญาณรบกวนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมคร่วมแล้ว ยังส่งผลให้ลดกระแสรบกวนโหมคร่วมต่างอีกด้วย เนื่องจากกระแสรบกวนโหมคร่วมถูกหักล้างให้น้อยลงเข้าใกล้ศูนย์ คลื่นสัญญาณรบกวนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมคร่วมต่างจะลดลงตามไปด้วย ในหัวข้อนี้จะเสนอการประเมินระดับความสมดุลหรืออาจเรียกว่าดีกรีความสมดุล โดยใช้การประเมินด้วยวิธี Common Mode Rejection Ratio [7] ดังแสดงในสมการ (5.2)

$$CMRR = 20 \log \frac{V_{CM}}{V_{DM}} \quad (5.2)$$

โดย

V_{CM} = แรงดันรบกวน โหมคร่วม

V_{DM} = แรงดันรบกวน โหมคร่วมต่าง

V_{CMavg} = แรงดันรบกวน โหมคร่วมเฉลี่ย

V_{DMavg} = แรงดันรบกวน โหมคร่วมต่างเฉลี่ย

$V_{DMavg}(\text{mea})$ = แรงดันรบกวน โหมคร่วมต่างเฉลี่ยที่ได้จากการวัด

$V_{DMavg}(\text{cal})$ = แรงดันรบกวน โหมคร่วมต่างเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณ

5.3.1 การประเมินค่า CMRR ของคอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์เดี่ยว

จากรูปที่ 5.9 จะเห็นได้ว่าแรงดัน V_{AFG} จะมากกว่า V_{BFG} เราสามารถนำผลลัพธ์นี้มาหาค่าแรงดันรบกวนโหมคร่วมและแรงดันรบกวนโหมคต่างได้ และนำไปคำนวณหาค่า CMRR ได้ดังนี้

$$V_{CM} = \frac{|V_{AFG}| + |V_{BFG}|}{2} = \frac{21.40 + 8.60}{2} = 15V = \frac{V_S}{2}$$

$$V_{CM_{avg}} = 15 \times 0.8 = 12V$$

$$V_{DM} = |V_{AFG}| - |V_{BFG}| = 21.40 - 8.60 = 12.8V$$

$$V_{DM_{avg}}(cal) = (duty\ cycle)(V_{DM}) = 0.8 \times 12.8 = 10.24V$$

$$V_{DM_{avg}}(mea) = V_{sum_avg} = 9.9V$$

$$CMRR = 20 \log \frac{V_{CM_{avg}}}{V_{DM_{avg}}} = 20 \log \left(\frac{12}{9.9} \right) = 1.67dB$$

5.3.2 การประเมินค่า CMRR ของคอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์คู่

จากรูปที่ 5.9 จะเห็นได้ว่าแรงดัน V_{AFG} จะมีค่าใกล้ V_{BFG} แต่มีเฟสตรงข้ามกัน แรงดันรบกวนโหมคร่วมและแรงดันรบกวนโหมคต่างได้ และนำไปคำนวณหาค่า CMRR ได้ดังนี้

$$V_{CM} = \frac{|V_{AFG}| + |V_{BFG}|}{2} = \frac{15.2 + 14.8}{2} = 15V$$

$$V_{CM_{avg}} = 15 \times 0.8 = 12V$$

$$V_{DM} = |V_{AFG}| - |V_{BFG}| = 15.2 - 14.8 = 0.4V$$

$$V_{DM_{avg}}(cal) = 0.8 \times 0.4 = 0.324V$$

$$V_{DM_{avg}}(mea) = V_{sum_avg} = 0.3V$$

$$CMRR = 20 \log \frac{V_{CM_{avg}}}{V_{DM_{avg}}} = 32.04dB$$

ค่า CMRR มีค่ามากกว่าในหัวข้อที่ 5.3.1 แสดงให้เห็นถึงความสมดุลของวงจรมีมากขึ้น จะเห็นได้จากแรงดันรบกวนโหมคต่างจะน้อยลง ในขณะที่แรงดันรบกวนโหมคร่วมมีค่าใกล้เคียงค่าเดิม เป็นผลจากการปรับสมดุลแบบแอกทิฟของคอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์คู่

5.3.3 การประเมินค่า CMRR ของคอนเวอร์เตอร์แบบปรับสมดุลไฮบริดจ์

ต่อจากนั้น หาค่า CMRR ของการปรับสมดุลแบบไฮบริดจ์ ซึ่งจะทำเช่นเดียวกันกับหัวข้อย่อยที่ผ่านมา เป็นการปรับทั้งในส่วนพาสซีฟและแอกทิฟ จะได้ผลการคำนวณดังนี้

$$V_{CM} = \frac{|V_{AFG}| + |V_{BFG}|}{2} = \frac{15 + 15}{2} = 15V$$

$$V_{CM_{avg}} = 15 \times 0.8 = 12V$$

$$V_{DM} = |V_{AFG}| - |V_{BFG}| = 0V$$

$$V_{DM_{avg}}(cal) = 0.8 \times 0.4 = 0.324V$$

$$V_{DM_{avg}}(mea) = V_{sum_avg} = 0.1V$$

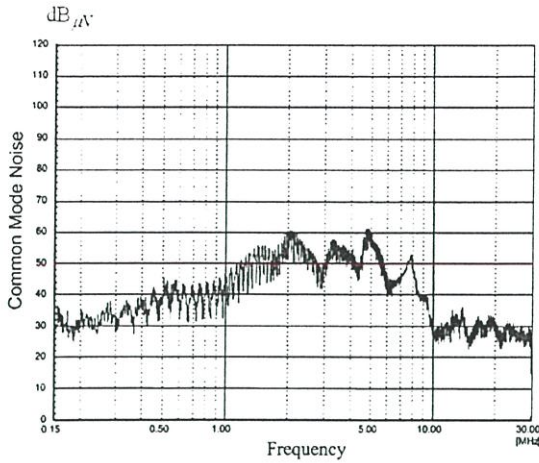
$$CMRR = 20 \log \frac{V_{CM_{avg}}}{V_{DM_{avg}}} = 41.6dB$$

จากผลการประเมินค่า CMRR ในคอนเวอร์เตอร์ทั้งสามแบบ จะเห็นได้ว่า ค่า CMRR จากคอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์เดี่ยว มีค่า 1.67 dB ในขณะที่คอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์คู่และแบบสมดุลไฮบริดจ์ มีค่าเพิ่มขึ้นมาก คือ 32.04 dB และ 41.6dB ตามลำดับ แสดงถึงดีกรีความสมดุลที่เกิดขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในคอนเวอร์เตอร์แบบปรับความสมดุลไฮบริดจ์ มีค่าความสมดุลมาก สอดคล้องกับการทดลองในหัวข้อที่ 5.2 ปรับความสมดุลแบบไฮบริดจ์ เป็นการปรับความสมดุลให้สมบูรณ์ขึ้นทั้งแบบพาสซีฟและแบบแอคทีฟ ค่าความสมดุลแบบพาสซีฟจะทำให้ค่า CMRR เพิ่มขึ้นมากกว่าแบบสมดุลแอคทีฟจาก ค่า 32.04 dB เป็น 41.5 dB ซึ่งถือว่าน้อยเมื่อเทียบกับ ความสมดุลแอคทีฟที่เปลี่ยนจาก 1.67 dB เป็น 32.04 dB ในลำดับต่อไป จะทำการทดลองผลของความสมดุลของคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 3 แบบ โดยทดลองในโดเมนความถี่ เพื่อวัดค่าสเปคตรัมของการเกิดคลื่น สัญญาณรบกวนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวนำ

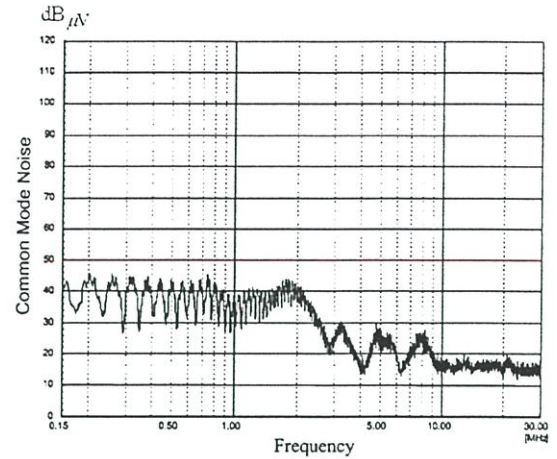
5.4 การทดลองวัดค่าการตอบสนองเชิงความถี่คลื่นสัญญาณรบกวนโหมคร่วม

การทดลองจะทำการเดินเครื่องการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระดับค่าแรงดันและการปรับแต่งคอนเวอร์เตอร์เช่นเดียวกัน โดยทดลองกับคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 3 แบบ คือ คอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์เดี่ยว คอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์คู่และคอนเวอร์เตอร์ปรับความสมดุลแบบไฮบริดจ์ ดังวงจรรูปที่ 5.12. และ รูปที่ 5.13.

จากรูปที่ 5.14 ก. และ รูปที่ 5.14 ข. แสดงค่าสเปคตรัมของแรงดันรบกวนโหมคร่วมในตัวนำที่วัดได้จากคอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์เดี่ยวและแบบสวิทช์คู่ตามลำดับ

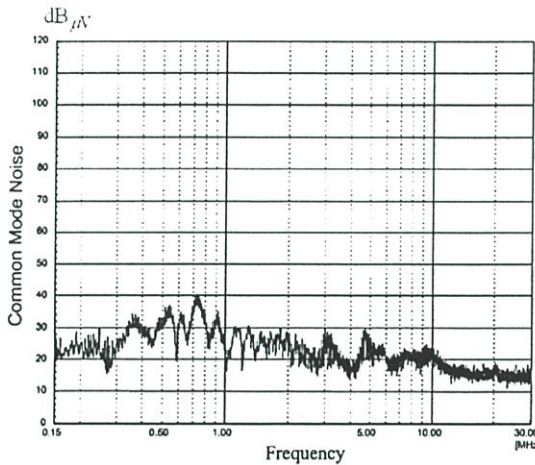


ก. คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดี่ยว

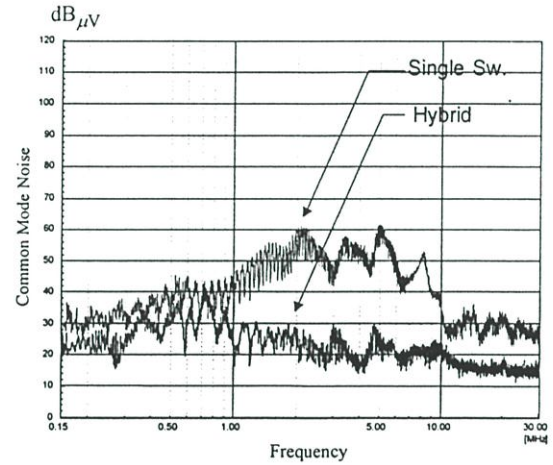


ข. คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์คู่

รูปที่ 5.14 ค่าสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนโหมดร่วมในตัวของ คอนเวอร์เตอร์



ก. คอนเวอร์เตอร์แบบปรับความสมดุลไฮบริด



ข. การเปรียบเทียบระหว่างคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดี่ยวและแบบปรับความสมดุลไฮบริด

รูปที่ 5.15 ค่าสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนโหมดร่วมในตัวของคอนเวอร์เตอร์

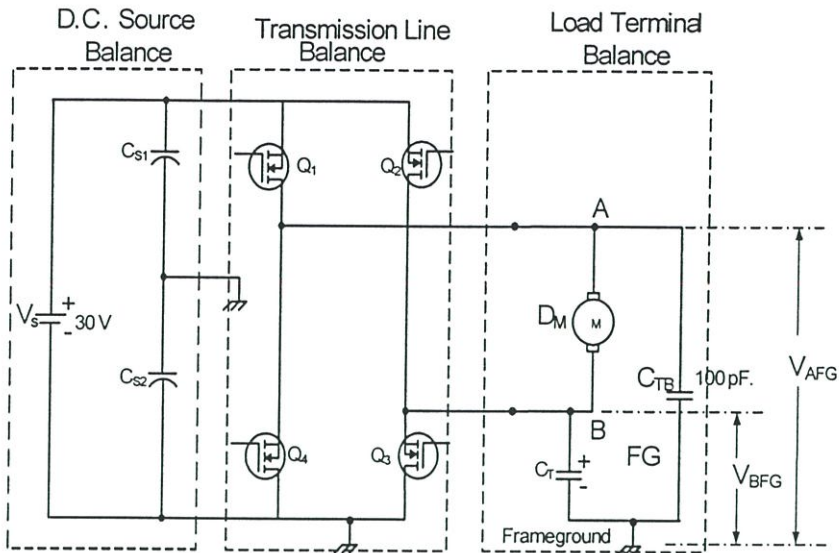
จากการพิจารณาผลของการตอบสนองเชิงความถี่ของคอนเวอร์เตอร์ทั้งสองแบบจะเห็นว่า คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์คู่สามารถลดการแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้า ในย่านความถี่สูง ตั้งแต่ 4 MHz. จนถึง 30 MHz. โดยที่คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์คู่มีการตอบสนองทางค่าความถี่ตั้งแต่ 10 MHz. ต่ำกว่า 20 dB เป็นผลจากการปรับความไม่สมดุลของสายตัวนำที่เป็นความไม่สมดุลแบบแอกทิฟ โดยการใช้ตัวสวิตช์แบบคู่ แสดงให้เห็นมาแล้วด้วยจากการใช้การคำนวณ CMRR ในหัวข้อที่ 5.3 จากนั้นเปลี่ยนคอนเวอร์เตอร์เป็นแบบปรับความสมดุลไฮบริด ซึ่งมีการปรับความสมดุลทั้งแบบ

แอกทีฟ และ แบบพาสซีฟ จะแสดงผลการทดลองได้ดังรูปที่ 5.15 ก. การค่าสเปคตรัมของการปรับความสมดุลไฮบริดจ์จะลดลงทั้งในย่านความถี่ต่ำคือระหว่าง 1 MHz. จนถึง 5 MHz. และทำการเปรียบเทียบค่าสเปคตรัมที่ได้จากคอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์เดี่ยวและคอนเวอร์เตอร์แบบปรับสมดุลไฮบริดจ์ ดังแสดงในรูปที่ 5.15 ข สามารถเห็นได้ชัดเจนของการลดลงของแรงดันรบกวนโหมคร่วม จากผลของความสมดุลของวงจรคอนเวอร์เตอร์

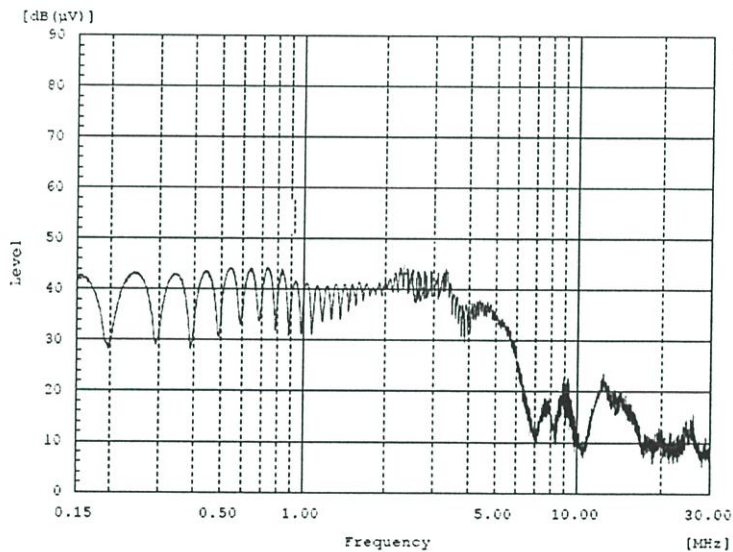
จากผลการทดลองวัดค่าสเปคตรัมของสัญญาณรบกวนโหมคร่วมของคอนเวอร์เตอร์ แบบปรับความสมดุลไฮบริดจ์ เปรียบเทียบกับคอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์เดี่ยว ผลของสัญญาณรบกวนโหมคร่วมลดลงจากแนวคิดของการปรับความสมดุลเราสามารถสรุปส่วนประกอบของความสมดุลได้เป็น 3 คือ ความสมดุลของแหล่งจ่าย (Balance source) ความสมดุลของสายตัวนำ (Balance transmission line) ความสมดุลของโหลด (Load terminal balance) ซึ่งในหัวข้อต่อไปจะได้อธิบายถึงการนำหลักการสมดุลเพื่อลดสัญญาณรบกวนโหมคร่วมใน วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส จ่ายโหลดมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และ วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ VSC ตามลำดับ

5.5 การทดลองวัดสัญญาณรบกวนโหมคร่วมของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 4 สวิทช์ หรือแบบฟูลบริดจ์

ในหัวข้อนี้จะเป็นการทดลองการปรับความสมดุลของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 4 สวิทช์ หรือแบบฟูลบริดจ์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 ถึงการวิเคราะห์ความสมดุลของวงจรฟูลบริดจ์ และผลของการแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าโหมคร่วม หัวข้อนี้จะทำการทดลองวงจร ซึ่งการทดลองวงจรมีให้เงื่อนไขและอุปกรณ์เช่นเดียวกันกับการทดลองคอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์เดี่ยว และสวิทช์คู่ ตามที่ได้กล่าวไปแล้ว เงื่อนไขการทดลอง จะทดลองวัดผลการตอบสนองของความถี่ของสัญญาณรบกวนในโหมคร่วม ที่ยังมีวงจรฟูลบริดจ์ แต่โครงสร้างหลักของวงจรมีการทำงานเป็นแบบสวิทช์คู่อยู่แล้วดังนั้นเพื่อให้เกิดความสมบูรณ์จะเพิ่มความสมดุลแบบพาสซีฟ ซึ่งจะเป็นการสมดุลรวมทั้งสิ้นเป็นแบบปรับสมดุลไฮบริดจ์ดังแสดงในรูปที่ 5.16 และจากการวัดค่าสเปคตรัมของการปรับความสมดุลของแบบ ไฮบริดจ์จะมีความถี่ในย่านความถี่สูงลดลงเช่นเดียวกันกับแบบสวิทช์คู่ ดังแสดงในรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.16 วงจรการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์



รูปที่ 5.17 ค่าสเปกตรัมของแรงดันที่วัดได้จากวงจรคอนเวอร์เตอร์ปรับความสมดุลแบบฟูลบริดจ์

5.6 การทดลองการลดสัญญาณรบกวนโหมคร่วมโดยใช้หลักการปรับความสมดุลของ วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสและคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบ VSC

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 ได้แสดงถึงโครงสร้างของคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ซัดเซชชนิดหนึ่งใน เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จากการทดลองปรับความสมดุล จะทำการแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนในลักษณะของการทำงาน คือในรูปของอินเวอร์เตอร์และ คอนเวอร์เตอร์ เพื่อที่จะลดการแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้า จากผลของการสวิตช์ด้วยสัญญาณ PWM

แบบ SPWM ที่ทำให้เกิดการสัญญาณรบกวนโหมคร่วมจากจังหวะการสวิตช์ ดังนั้นจะทำการลดการรบกวนสัญญาณรบกวนโหมคร่วม โดยใช้หลักการปรับความสมดุลแบบไฮบริดจ์ตามที่ได้นำเสนอไปแล้ว โดยจะแบ่งหัวข้อการทดลองเป็นหัวข้อย่อยดังนี้

- การลดสัญญาณรบกวนโหมคร่วมของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสเมื่อจ่ายแรงดันอินพุท 1 เฟส
- การลดสัญญาณรบกวนโหมคร่วมของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสเมื่อจ่ายแรงดันอินพุท 3 เฟส
- การลดสัญญาณรบกวนโหมคร่วมของคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ VSC

5.6.1 การลดสัญญาณรบกวนโหมคร่วมของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส เมื่อจ่ายแรงดันอินพุท

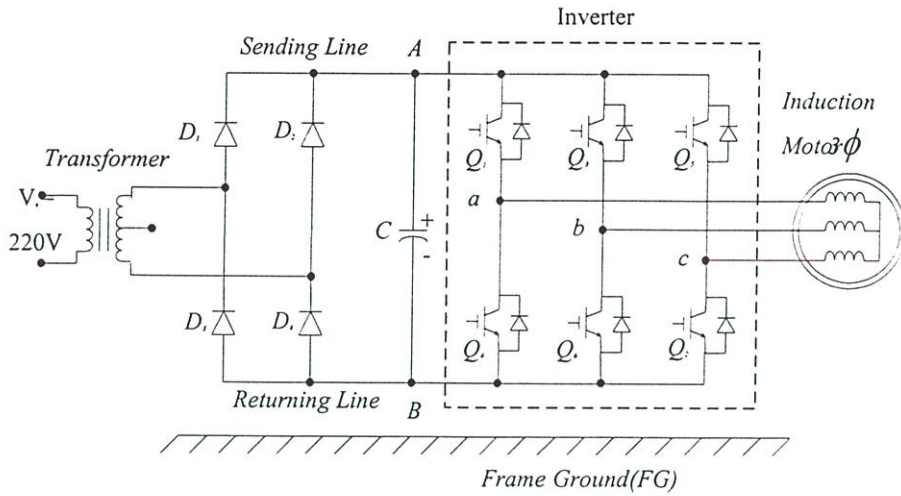
1 เฟส การเตรียมอุปกรณ์การทดลอง

หัวข้อในการทดลองนี้ เราจะทดลองการใช้อินเวอร์เตอร์ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยต่อวงจรโหลดมอเตอร์เป็น 2 ระบบ คือ แบบ วาย (Y) และแบบ เดลต้า (Δ) จากรูปที่ 5.16 แสดงถึงวงจรการทดลองซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์สำคัญ ๆ ดังนี้

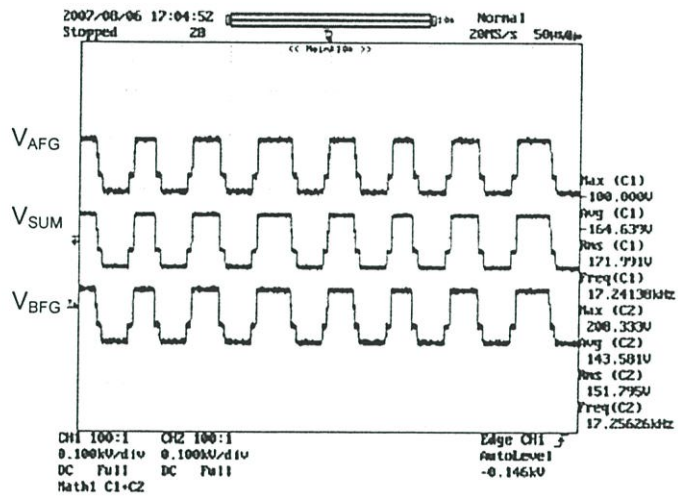
- มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด $\frac{1}{2}$ HP. แรงดัน 380/660 V. 4 pole, $f = 50$ Hz. ความเร็วรอบ 1480 rpm.
- หม้อแปลงไฟฟ้า เฟสเดียว ขนาด 600 W. 220/220 + Center Tap
- อินเวอร์เตอร์ แบบ SPWM ขนาด 500 W. สวิตช์ด้วย IGBT
- ดิจิตอล ออสซิลโลสโคป 150 MHz.

- การทดลอง

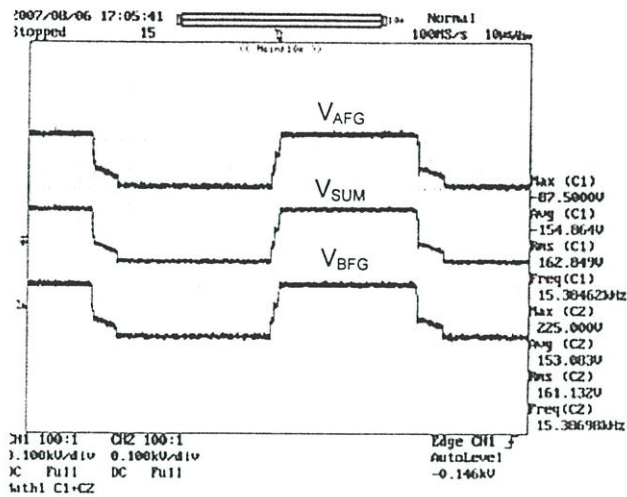
1. การทดลองการต่อมอเตอร์ด้วย วงจรแบบวาย เริ่มจ่ายแรงดันไฟฟ้า ให้กับวงจร โดยปรับอินเวอร์เตอร์ เพื่อควบคุมความเร็วมอเตอร์ ที่ 80 % ในสถานะ No load วัดแรงดันสัญญาณรบกวน โหมคร่วม (Common mode voltage : V_{CM}) ที่สายเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรง ที่สายตัวนำส่ง (sending line) และสายตัวกลับ (returning line) เทียบกับเฟรมกราวด์ (A_{FG} , B_{FG}) ดังแสดงในรูปที่ 5.18 ได้ผลการทดลองจะแสดงดังรูปที่ 5.19 และรูปที่ 5.20 จะเห็นได้ว่า สัญญาณพัลส์ ของแรงดันรบกวนโหมคร่วม ระหว่างสายตัวนำส่งและสายตัวนำกลับ จะปรากฏที่ สายเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรง (D.C. link) ชัดเจน เมื่อนำมาสัญญาณทั้งสองมารวมกัน จะมีขนาดมากขึ้น แสดงถึงความไม่สมดุลของวงจรอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 5.18 วงจรทดลองความไม่สมดุลของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสที่มีโหลดต่อแบบวาย



รูปที่ 5.19 สัญญาณแรงดันรบกวนโหมคร่วมที่สายเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงกับเฟรมกราวด์ก่อนปรับความสมดุล



รูปที่ 5.20 ภาพขยายแรงดันรบกวนโหมคร่วมที่สายป้อนแรงดันกระแสตรงกับเฟรมกราวด์ก่อนปรับความสมดุล

จากรูปที่ 5.19 แสดงถึงแรงดันระหว่างสายตัวนำส่ง (VAFG) และสายตัวนำกลับ (VBFG) เมื่อวัดเทียบกับเฟรมกราวด์ จะปรากฏแรงดันรบกวนโหมคร่วม และผลรวมของแรงดันทั้งสอง (VSUM) ค่าขนาดและเฟสของแรงดันรบกวนทั้งสองส่วนจะมีค่าใกล้เคียงกัน การรบกวนของกระแสรบกวนโหมคร่วมที่เกิดขึ้นจะเกิดจากการรบกวนของกระแสรบกวนโหมคร่วมที่ผ่านค่าประจุแฝงของตัวสวิตช์ทั้ง 6 ตัวโดยได้อธิบายแล้ว เมื่อทำการขยายคาบเวลารูปคลื่นแรงดันดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูป 5.20 สาเหตุที่สำคัญของการเกิดแรงดันรบกวนโหมคร่วม จะเกิดจากการรบกวนของกระแสรบกวนโหมคร่วม ตามจังหวะของการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ PWM เมื่อวงจรขาดความสมดุล ก็จะมีการรบกวนจากอิมพีแดนซ์ที่มีค่าไม่เท่ากัน ถ้าสามารถจัดความสมดุลของวงจรได้ แรงดันดังกล่าวก็จะหักล้างกันที่เฟรมกราวด์

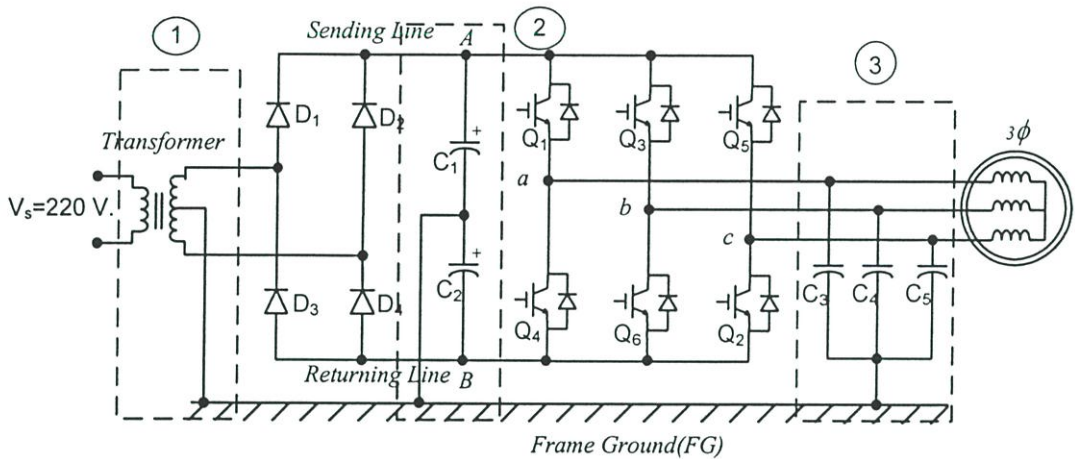
2. จากการทดลองในหัวข้อ 1 ทำการทดลองเช่นเดียวกัน แต่ปรับความสมดุลของวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยทำการปรับความสมดุลจะปรับความสมดุล 3 ส่วน

ในส่วนที่ 1 การปรับความสมดุลที่แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่จ่ายจากหม้อแปลงไฟฟ้า โดยต่อ Center Tap ลงเฟรมกราวด์

ส่วนที่ 2 การปรับความสมดุลของสายเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงโดยต่อค่า C1 ที่สายส่งของสายเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงกับเฟรมกราวด์และต่อ C2 ที่สายกลับของสายเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงกับเฟรมกราวด์เช่นกัน โดย C1 และ C2 มีค่าเท่ากัน 1 ไมโครฟาราด

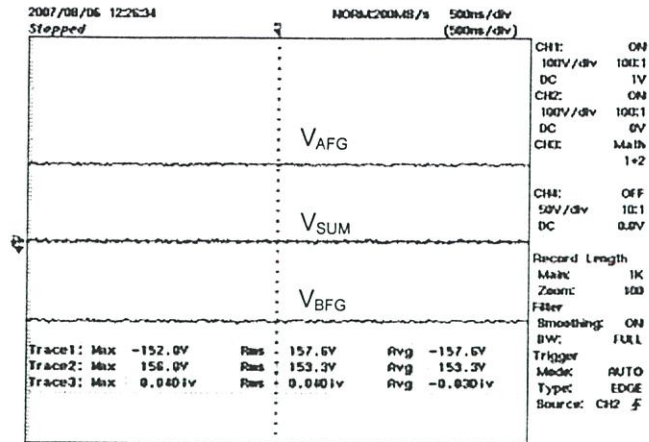
ส่วนที่ 3 การปรับความสมดุลของโหลด โดยต่อตัวประจุ ขนาด 100 pF 3 ชุดที่ขั้วโหลด (C₃-C₃) ลงสู่เฟรมกราวด์

จากผลของการต่อประจุทั้ง 3 ส่วนจะทำให้กระแสรบกวนโหมคร่วมที่ไหลลงแต่ละเฟสลงสู่เฟรมกราวด์ที่มีขนาดที่ไม่เท่ากัน จะไหลไปบรรจุที่เฟรมกราวด์และหักล้างกันภายใน ลูปที่เกิดขึ้นจากผลของแหล่งจ่ายที่ได้จากหม้อแปลงที่มี center tap ทำให้เกิดแรงดันต่างเฟสกัน 180 องศา นอกจากนี้ที่สายเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงยังเกิดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากผลของตัวประจุที่ต่อระหว่างสายตัวนำส่งและสายตัวนำกลับทำให้เกิดความสมดุลเช่นกัน ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 5.21 และเมื่อวัดแรงดันรบกวนโหมคร่วมระหว่างสายส่งที่จุด a กับสายกลับที่จุด B จะพบว่าแรงดันทั้งสองจะมีขนาดใกล้เคียงกันและมีเฟสตรงข้ามกันเมื่อนำมารวมกันจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ จากผลดังกล่าวนี้ จะทำให้สัญญาณรบกวนโหมคร่วมลดลงดังจะแสดงจากค่าของสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนโหมคร่วมต่อไป

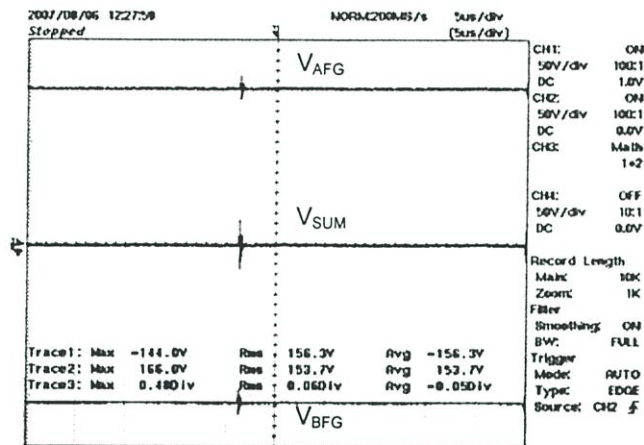


- ส่วนที่ ① ปรับปรุงความสมดุลของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ
 ส่วนที่ ② ปรับปรุงความสมดุลของสายเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรง
 ส่วนที่ ③ ปรับปรุงความสมดุลที่โหลด

รูปที่ 5.21 การปรับปรุงความสมดุลทั้ง 3 ส่วน



รูปที่ 5.22 สัญญาณแรงดันรบกวน โหมครวมที่วัดระหว่างสายส่งกับสายกลับของสายป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงกับเฟรมกราวด์หลังปรับความสมดุล (VAFG,VBFG)

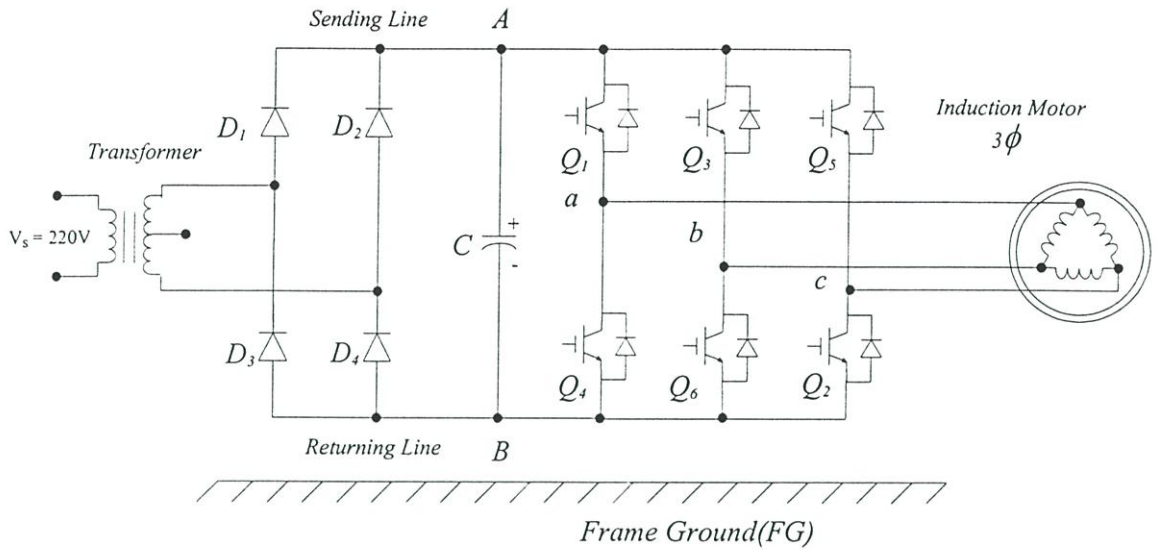


รูปที่ 5.23 ภาพขยายสัญญาณแรงดันรบกวน โหมครวมและแรงดันรวมจากรูป 5.22

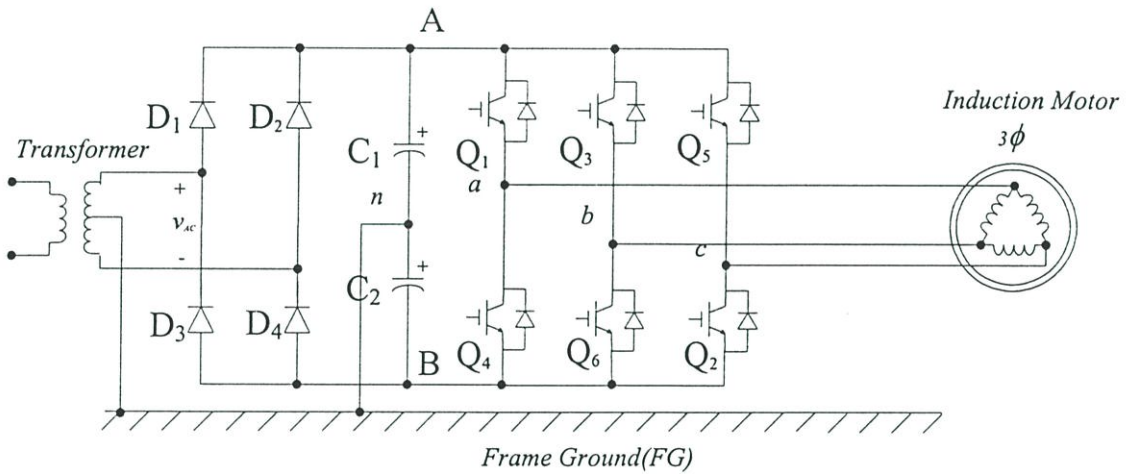
จากการพิจารณา เนื่องจากรูปของการทำงานแต่ละรูปเกิดจากตัวสวิทช์จะทำงานครั้งละ 2 ตัวจะเป็นการทำงานคล้ายกันคอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์คู่หรือคล้ายกับคอนเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ ดังนั้นการปรับความสมดุล เราจะปรับในส่วนของความไม่สมดุลแบบพาสซีฟ ในส่วนของความไม่สมดุลของแหล่งจ่าย และความไม่สมดุลของโหลด การปรับความสมดุลจะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 5.21 จากผลการทดลองจะเห็นถึงการหักล้างของสัญญาณรบกวน โหมครวมจากการวัดที่สายเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรง ดังรูปที่ 5.22 จะเหลือแต่สัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้จากการรวมสัญญาณทั้งสอง (V_{sum}) ที่ขยายจากเดิม ดังแสดงในรูปที่ 5.23

3. เปลี่ยนการต่อของโหลดเป็นแบบเดลต้า ดังรูปที่ 5.24 แสดงถึงโครงสร้างของการอินเวอร์เตอร์ขณะที่ยังไม่สมดุล การปรับความสมดุลจะกระทำ 2 ส่วนคือส่วนที่ 1 คือแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ และส่วนที่ 2 ปรับสมดุลระหว่างสายเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรง โดยการต่อตัวประจุที่ขั้วสายเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรง เฟรมกราวด์ ทั้งสองตำแหน่งของสายตัวนำส่งและตัวนำกลับ ต่อเชื่อม

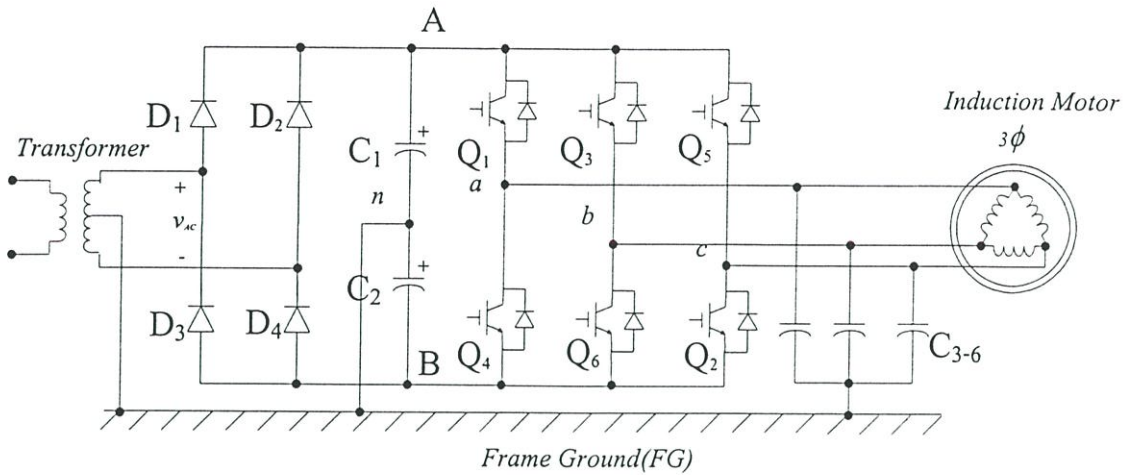
กับเฟรมกราวด์ ดังเช่นหัวข้อที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 5.25 และทำการปรับความสมดุลทั้ง 3 ส่วน คือเพิ่มการปรับความสมดุลที่โหลด ดังแสดงในรูปที่ 5.26



รูปที่ 5.24 วงจรทดลองความไม่สมดุลของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบเคลด้า

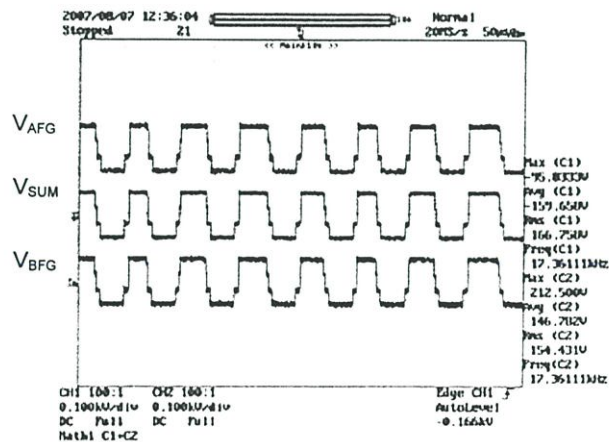


รูปที่ 5.25 วงจรสมดุลของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบสมดุลส่วนที่ 1 และส่วนที่ 2

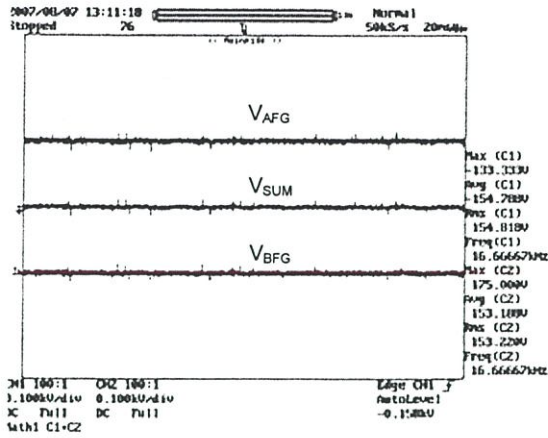


รูปที่ 5.26 วงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบสมมูล 3 ส่วน

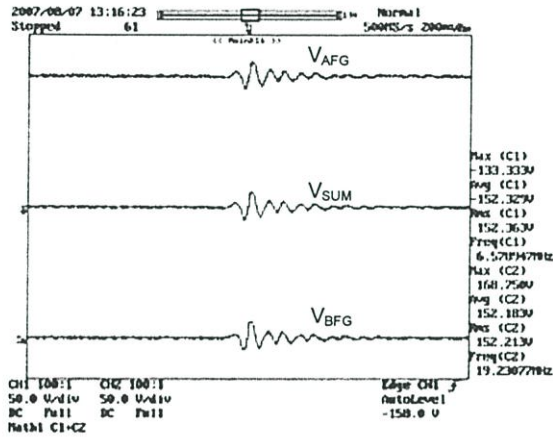
4. วัดค่าแรงดันรบกวนโหมคร่วมระหว่างสายส่งและสายกลับของสายเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรง เทียบกับเฟรมกราวด์ (V_{AF} , V_{BF}) ดังแสดงในรูปที่ 5.27 จะเห็นได้ว่าจะเกิดความไม่สมดุลของแรงดันรบกวนโหมคร่วมในวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ยังไม่มีการปรับความสมดุลเช่นเดียวกันกับหัวข้อที่ผ่านมา และเมื่อปรับความสมดุล แบบที่หนึ่ง คือสมดุลที่สายเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงกับสมดุลแหล่งจ่าย อินพุท และแบบที่สอง คือปรับความสมดุลแบบไฮบริดจ์และทำการวัดแรงดันรบกวนโหมคร่วม จากผลของสัญญาณแรงดันรบกวนโหมคร่วมทั้งสองแบบมีค่าความสมดุลเพิ่มมากขึ้น และรูปคลื่น ไม่แตกต่างกัน จะนำมาแสดงให้เห็นในแบบเดียว ซึ่งผลความสมดุลจะสอดคล้องเช่นเดียวกันกับการต่อโหลดแบบวายเช่นกัน คือ สัญญาณรบกวนโหมคร่วมจะหักล้างกันจนผลลัพธ์เข้าใกล้ศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 5.28 และ ภาพขยาย แสดงในรูปที่ 5.29 ทดสอบวัดสัญญาณแรงดันเอาท์พุทที่จ่าย ให้โหลดมอเตอร์ แสดงดังรูปที่ 5.30



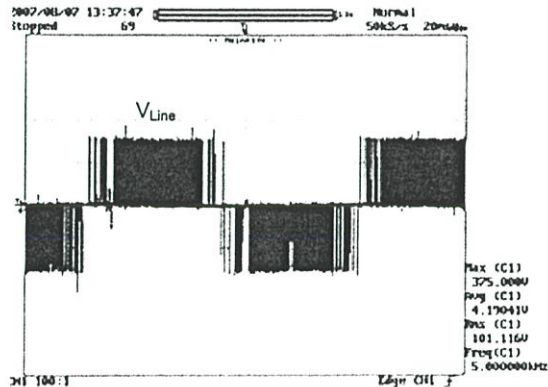
รูปที่ 5.27 แรงดันรบกวนโหมคร่วมในสถานะไม่สมดุล



รูปที่ 5.28 แรงดันรบกวนโหมคร่วมหลังปรับความสมดุล เมื่อต่อโหลดแบบเดคต้า

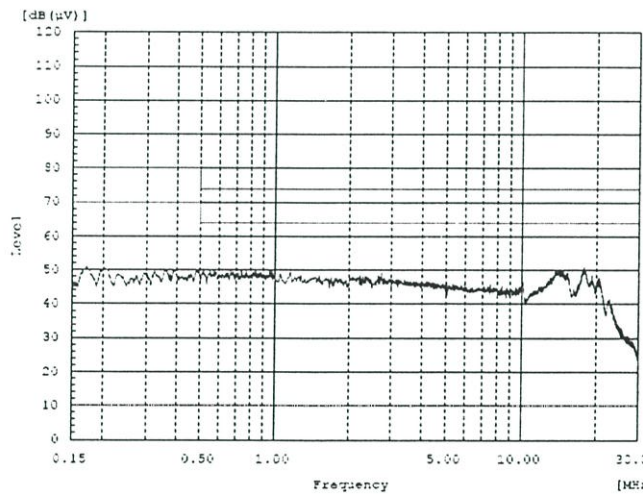


รูปที่ 5.29 ภาพขยายของแรงดันรบกวนโหมคร่วมจากผลการปรับความสมดุล

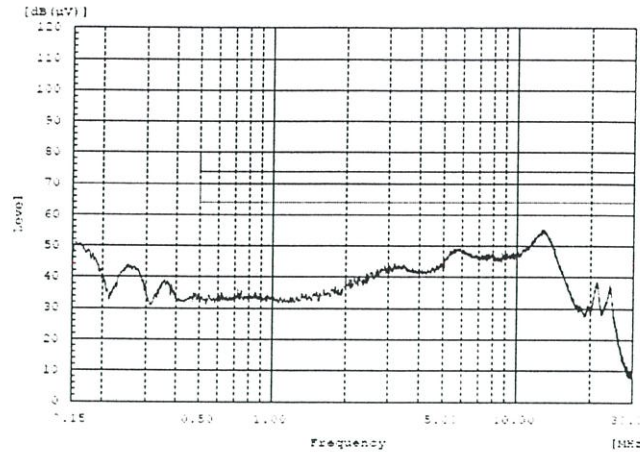


รูปที่ 5.30 แรงดันเอาต์พุตที่จ่ายให้โหลดมอเตอร์ของวงจรสมดุลของอินเวอร์เตอร์

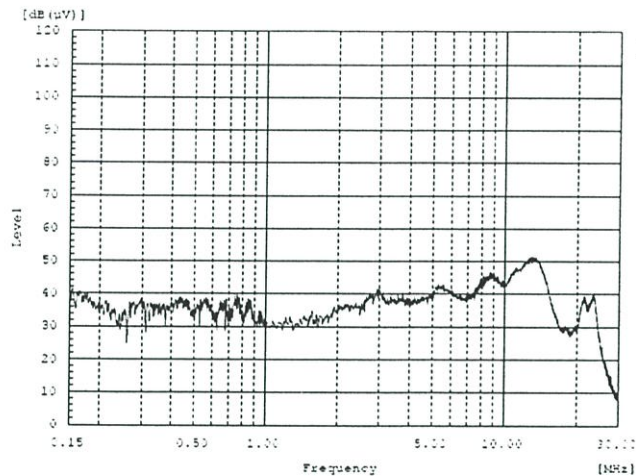
5. ทำการทดลองวัดค่าสเปกตรัม ของแรงดันรบกวนโหมคร่วม เช่นเดียวกันกับการทดลองที่ผ่านมา โดยทำการวัดในโดเมนความถี่ของสัญญาณแพร่กระจายที่แพร่กลับเข้าไปในสายตัวนำกลับไปสู่แหล่งจ่าย จากรูปที่ 5.31 เป็นสเปกตรัมที่วัดจากอินเวอร์เตอร์ที่ยังไม่ได้ปรับความสมดุล จะมีค่าเฉลี่ยโดยประมาณระหว่างย่านความถี่ 150 kHz – 10MHz. ประมาณ 50 dB แต่เมื่อทำการปรับความสมดุล ในแบบที่หนึ่ง สมดุลสายเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงและสมดุลแหล่งจ่ายอินพุท แสดงผลการวัดได้ดังรูปที่ 5.32 จะเห็นได้จากผลการทดลองว่า ระดับของสเปกตรัมในย่าน 500 kHz. – 2 MHz. มีค่าเฉลี่ยประมาณ 35 dB ซึ่งลดลงเกิน 10 dB และในย่านจาก 2 MHz.- 10 MHz จะมีค่าประมาณ 50dB แต่ในย่านความถี่ต่ำยังคงมีค่าสูงเท่าเดิม คือประมาณ 50 dB. ในแบบที่สองคือ ปรับสมดุลแบบไฮบริดจ์หรือเป็นการสมดุลทุกส่วน ทั้งสมดุลสายเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรง สมดุลแหล่งจ่ายอินพุท และสมดุลที่โหลด แสดงผลการวัดได้ดังรูปที่ 5.33 จะเห็นได้จากผลการทดลองว่า ในย่านความถี่ต่ำ สามารถลดลงได้มากกว่าแบบที่หนึ่ง ระดับของสเปกตรัมในย่าน 500 kHz. – 2 MHz. มีค่าเฉลี่ยประมาณ 35 dB ซึ่งลดลงเกิน 10 dB และในย่านจาก 2 MHz.- 10 MHz จะมีค่าประมาณ 50dB



รูปที่ 5.31 สเปกตรัมของแรงดันรบกวนโหมคร่วมของวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส
ที่ไม่สมดุลต่อโหลดแบบเคลด้า



รูปที่ 5.32 สเปกตรัมของแรงดันรบกวนโหมคร่วมเมื่อปรับความสมดุลส่วนที่ 1 และ 2



รูปที่ 5.33 สเปกตรัมของแรงดันรบกวนโหมคร่วมเมื่อปรับความสมดุล 3 ส่วน

5.6.2 การลดสัญญาณรบกวนโหมคร่วมของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสเมื่อจ่ายแรงดันอินพุท 3 เฟส

จากหัวข้อ 5.6.1 ได้ทำการทดลองการลดการแทรกซ้อนของสัญญาณรบกวนโหมคร่วมโดยใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ต่อเข้ากับระบบไฟฟ้า 1 เฟส โดยหลักการจะให้กระแสรบกวนโหมคร่วมที่ไหลในวงจรจากค่าความไม่สมดุลของแรงดันรบกวนโหมคร่วมไปหักล้างกันที่เฟรมกราวด์ และอาศัยความต่างเฟสของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มี center tap ซึ่งมีแรงดันต่างเฟสกัน ในหัวข้อนี้จะอาศัยหลักการเดียวกัน โดยทดลองกับแรงดันแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส โดยกำหนดให้หม้อแปลง 3 เฟสต่อแบบขานำสายที่เชื่อมเฟรมกราวด์ไปครบวงจรที่สายนิวทรัลของหม้อแปลงไฟฟ้า เนื่องจากอินเวอร์เตอร์มีพิกัด 220 โวลต์ ดังนั้นจึงใช้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีพิกัดแรงดันทุติยภูมิ 110 โวลต์มาต่อแบบขานำเพื่อให้มีสายนิวทรัลเชื่อมกับเฟรมกราวด์ ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- การเตรียมอุปกรณ์การทดลอง

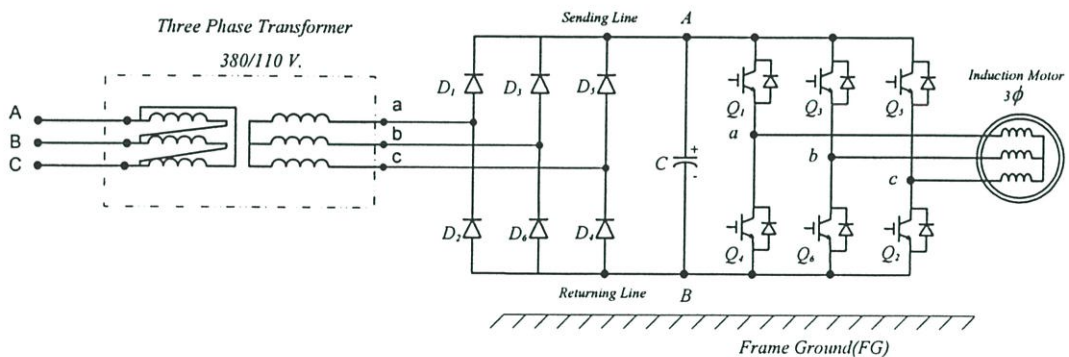
หัวข้อในการทดลองนี้ เราจะทดลองการใช้อินเวอร์เตอร์ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยต่อวงจรโหลดมอเตอร์เป็นแบบวาย(Y) จากรูปที่ 5.34 แสดงถึงวงจรการทดลองซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์สำคัญ ๆ ดังนี้

- มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด $\frac{1}{2}$ HP. แรงดัน 380/660 V. 4 pole, $f = 50$ Hz. ความเร็วรอบ 1480 rpm.

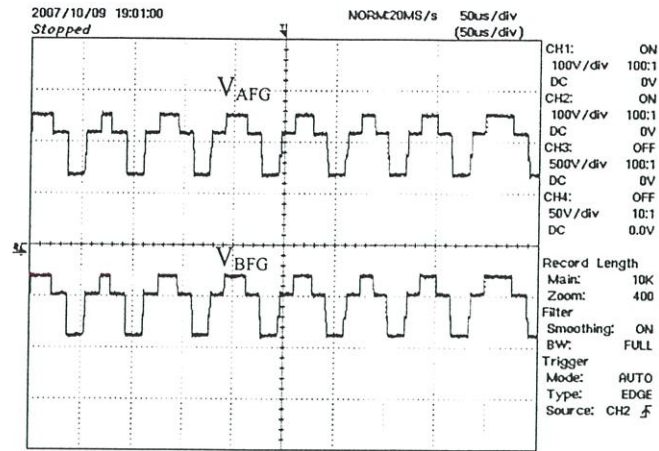
- หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ขนาด 1000 W. 380/110 V.
- อินเวอร์เตอร์ แบบ SPWM ขนาด 500 W. 220 V. สวิตช์ด้วย IGBT
- ดิจิตอล ออสซิลโลสโคป 150 MHz.

- การทดลอง

1. การทดลองขับเคลื่อนมอเตอร์ 3 เฟสด้วยอินเวอร์เตอร์โดยจ่ายแรงดัน 3 เฟสให้กับอินเวอร์เตอร์ ทำการทดลองเช่นเดียวกันกับหัวข้อที่ 5.6.2 ซึ่งในขณะนี้ อินเวอร์เตอร์ยังอยู่ในสถานะที่ไม่สมดุล โดยแสดงรูปการทดลองดังรูปที่ 5.34 บันทึกค่าแรงดันรบกวนโหมคร่วมโดยวัดแรงดันระหว่างขั้ว A ของสายตัวนำเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรง กับเฟรมกราวด์ และสายตัวนำด้านกลับของตัวนำเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรงเทียบกับเฟรมกราวด์ จะได้ผลของสัญญาณแรงดันรบกวนโหมคร่วมดังรูปที่ 5.35 จะเห็นได้ว่าสัญญาณทั้งสายตัวนำส่งและสายตัวนำกลับไม่สมดุลกัน

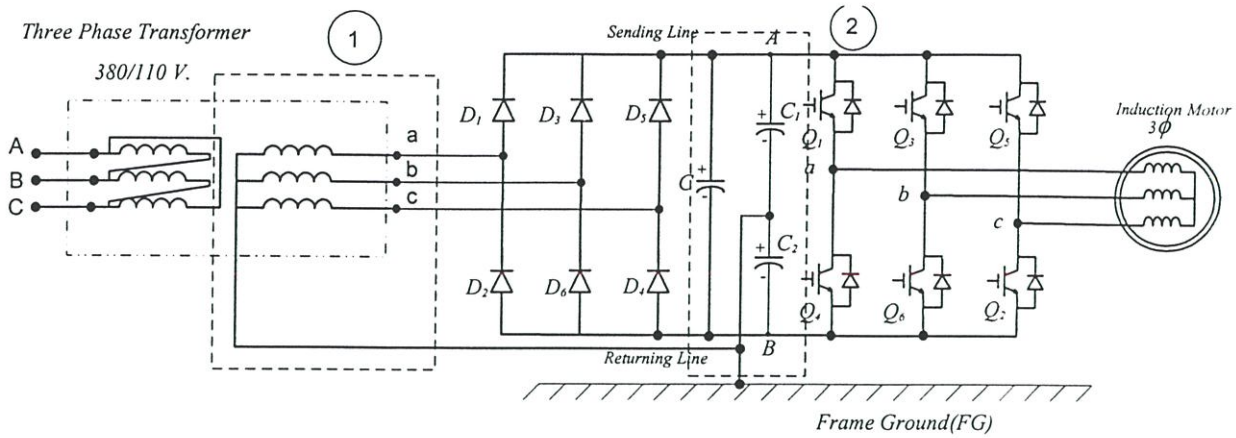


รูปที่ 5.34 วงจรทดลองความไม่สมดุลของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสที่จ่ายแรงดัน 3 เฟสต่อแบบวาย

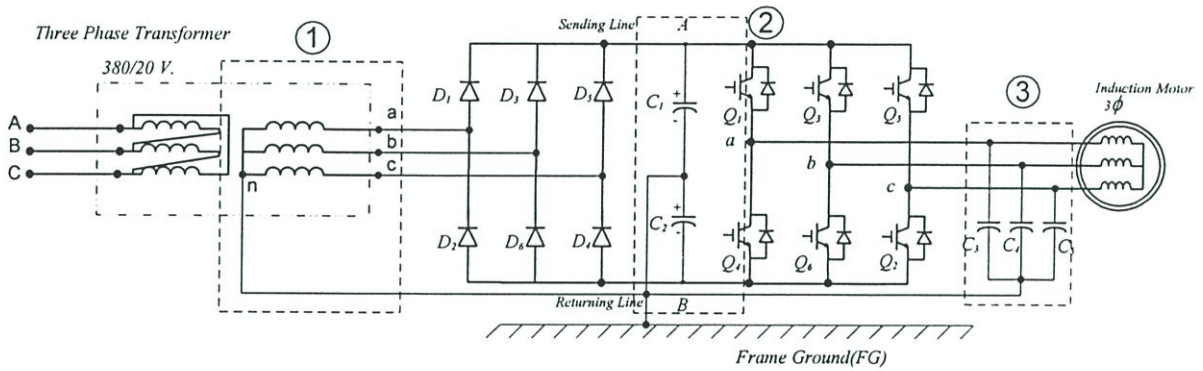


รูปที่ 5.35 แรงดันรบกวนโหมคร่วมที่วัดระหว่างสายส่งและสายกลับของสายเชื่อมไฟฟ้า กระแสตรงกับ เฟรมกราวด์ (V_{AFG} , V_{BFG}) ตามลำดับ

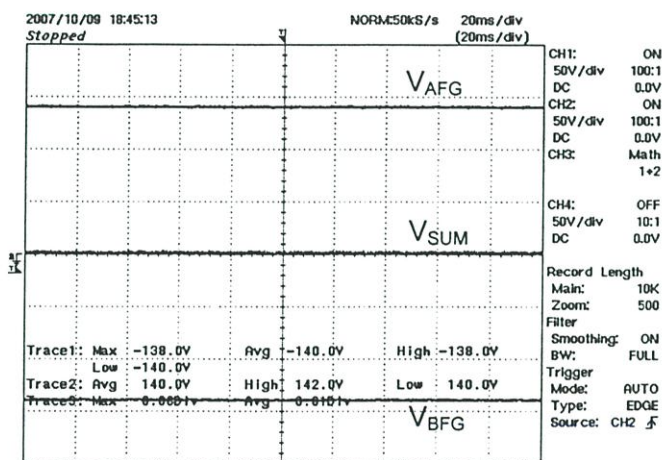
2. ปรับความสมดุลของอินเวอร์เตอร์จากหัวข้อที่ 1 โดยการปรับความสมดุลในส่วนที่ 1 ต่อค่าประจุ C1 และ C2 ขนาดตัวละ $1 \mu\text{F}$. แรงดัน 450 V. และต่อเชื่อมโยงกับขั้วนิวตรอลของหม้อแปลงไฟฟ้า และต่อเชื่อมกับเฟรมกราวด์ และ ปรับความสมดุลในส่วนที่ 2 โดยปรับความสมดุลที่สายเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรง ทำการทดลองเช่นเดียวกันกับหัวข้อที่ 1 บันทึกค่าแรงดันรบกวนโหมคร่วมระหว่างจุด A และจุด B เทียบกับเฟรมกราวด์ จะเห็นได้ว่าแรงดันรบกวนโหมคร่วมมีความสมดุลดังแสดงในรูปที่ 5.36 จากนั้นปรับความสมดุลในส่วนที่ 3 โดยต่อตัวประจุขนาด 100 pF จากขั้วโพลลลงสู่เฟรมกราวด์ และต่อเชื่อมกับจุดนิวตรอล (จุด n) ของหม้อแปลงอินพุทที่ต่อแบบวาย ดังแสดงในรูปที่ 5.37 ซึ่งได้ผลของสัญญาณแรงดันรบกวนโหมคร่วมทั้งสองแบบจะมีความใกล้เคียงกันในเชิงรูปสัญญาณจึงแสดงให้เห็นในกรณี การปรับ 3 ส่วนในรูป 3.38 จะแสดงผลของความสมดุลจากผลรวมของแรงดันทั้งสองจะประมาณศูนย์ ซึ่งแสดงว่าแรงดันรบกวนโหมคร่วมจะถูกหักล้างกันหมดไป จะมีผลทำให้สัญญาณรบกวนโหมคร่วม ที่เป็นต้นเหตุของลดการแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าลงเช่นกัน



รูปที่ 5.36 วงจรทดลองปรับความสมดุลของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส เมื่อปรับความสมดุลส่วนที่ 1 และส่วนที่ 2



รูปที่ 5.37 การทดลองวงจรสมดุลของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส เมื่อปรับความสมดุล 3 ส่วน



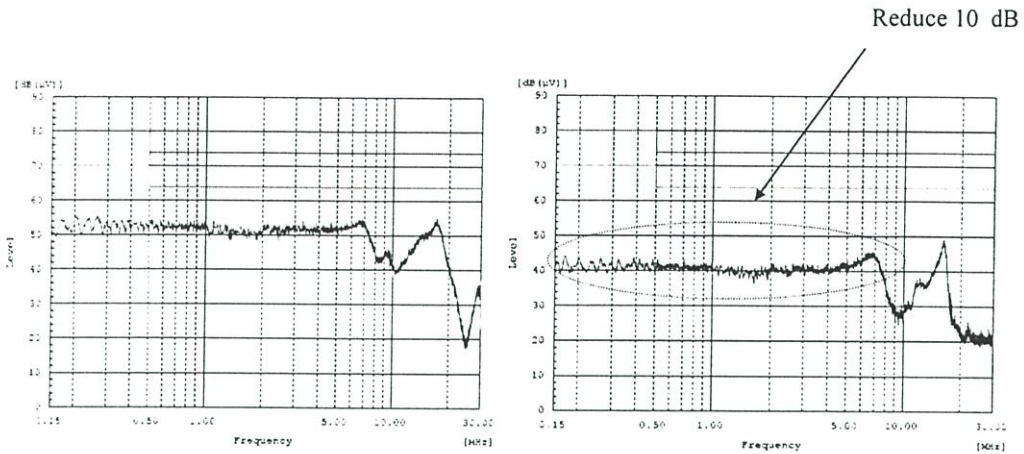
V_{AFG} = แรงดันระหว่างสายเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงด้านส่ง(บน)กับเฟรมกราวด์

V_{BFG} = แรงดันระหว่างสายเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงด้านกลับ(ล่าง)กับเฟรมกราวด์

V_{SUM} = ผลรวมของแรงดันระหว่าง V_{AFG} และ V_{BFG}

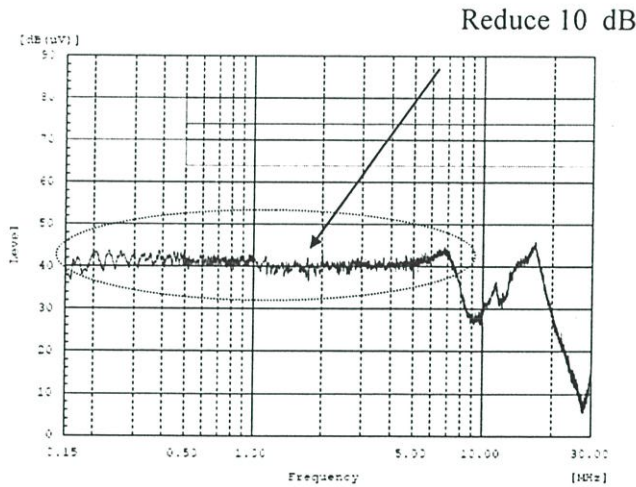
รูปที่ 5.38 แรงดันรบกวนโหมคร่วมของอินเวอร์เตอร์เมื่อปรับสมดุลทั้ง 3 ส่วน

3. วัดค่าสเปกตรัมของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ไม่สมดุล เปรียบเทียบกับค่าสเปกตรัมของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่สมดุล ทั้งสองวิธีที่ทำการสมดุลดังหัวข้อ 1-2 ที่ผ่านมาแสดงดังรูปที่ 5.39



ก. อินเวอร์เตอร์ 3 เฟสไม่สมดุล

ข. อินเวอร์เตอร์สมดุลแหล่งจ่ายอินพุท 3 เฟส และสมดุลสายเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรง



ค. อินเวอร์เตอร์ 3 เฟสสมดุล 3 ส่วน

รูปที่ 5.39 สเปกตรัมของแรงดันรบกวนโหมคร่วมระหว่างวงจรอินเวอร์เตอร์ไม่สมดุลและอินเวอร์เตอร์ที่ปรับสมดุลทั้งสองแบบ

จากรูปที่ 5.39 จะเห็นได้ว่าค่าสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนโหมคร่วมของอินเวอร์เตอร์ขณะที่ยังไม่สมดุลกับที่ปรับความสมดุลแล้วจะได้ว่าสามารถลดสัญญาณรบกวนโหมคร่วมได้ในย่านที่กว้างจากผลของการปรับความสมดุลทั้ง 3 ส่วน สามารถลดได้ประมาณ 10 dB. ในย่าน 150 kHz- 8 MHz. ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการแก้ปัญหาจากต้นเหตุเพียงเล็กน้อย ก็สามารถลดค่าการแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.6.3 การทดลองการลดสัญญาณรบกวนโหมคร่วมของวงจรคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ VSC โดยใช้วิธีการปรับความสมดุลของคอนเวอร์เตอร์

จากการทดลองวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ผ่านมา จะเห็นว่าการปรับความสมดุลสามารถลดการแทรกซ้อนของสัญญาณรบกวนโหมคร่วม ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวนำ ซึ่งเป็นการทดลองในด้านของคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ชดเชย ค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังนั้นเพื่อเป็นการยืนยันถึงหลักการสมดุลในหัวข้อนี้ได้ทดลองกับคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบ VSC โดยประยุกต์การทดลองในวงจรกรองแบบแอกทีฟ ที่มีโครงสร้างอยู่ในรูปของ VSC แบบ Front End ดังแสดงในรูปที่ 5.41

การเตรียมอุปกรณ์การทดลอง

การทดลองนี้ประยุกต์การทำงานของวงจรกรองแบบแอกทีฟ ต่อเชื่อมกับวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งเป็นโหลดไม่เป็นเชิงเส้น ตัวกรองจะทำงานในขณะที่โหลดในวงจรสายป้อนมีฮาร์มอนิกเกิดขึ้น เพื่อจำลองการทำงานวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ VSC ประกอบด้วยอุปกรณ์ที่ใช้ทดลองดังนี้

- มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด 5 HP. แรงดัน 380/660 V. 4 pole , $f = 50$ Hz.

ความเร็วรอบ 1480 rpm.

- อินเวอร์เตอร์ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5.5 kW.
- ตัวกรองแอกทีฟ ขนาด 20 A. 400 V. พร้อมหม้อแปลงกระแส และ ระบบควบคุม

ป้อนกลับ

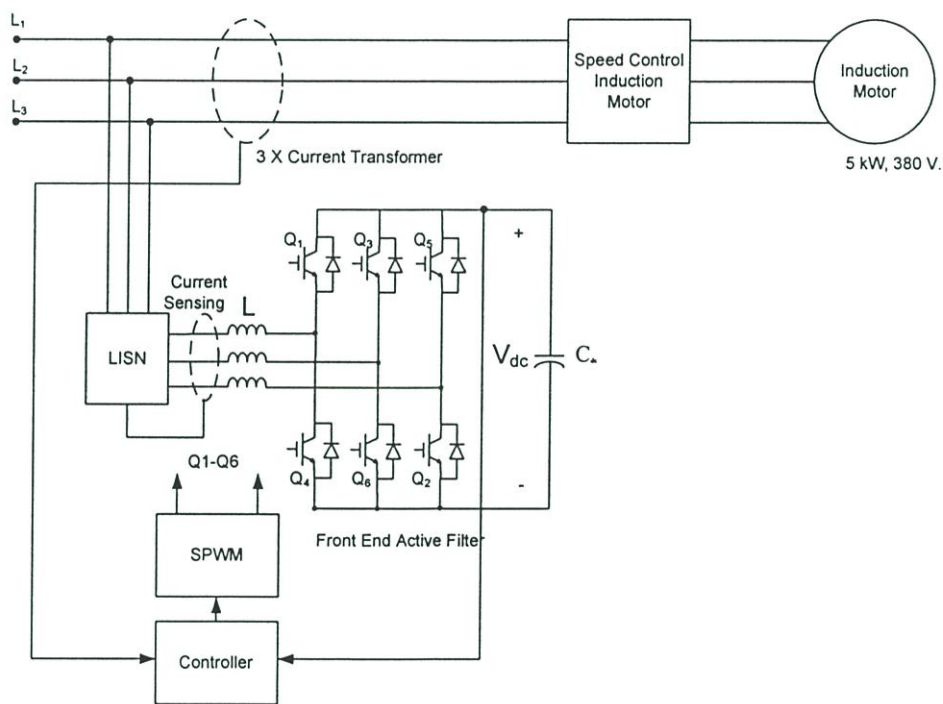
- คิจิตอล ออสซิลโลสโคป 150 MHz
- หม้อแปลงกระแส(Current Prob) 0.2 A: 1 Volt
- หม้อแปลงแรงดัน(Voltage Isolate Prob) 1:100 Volt
- คิจิตอล โวลท์มิเตอร์และคิจิตอลแอมมิเตอร์

การทดลอง

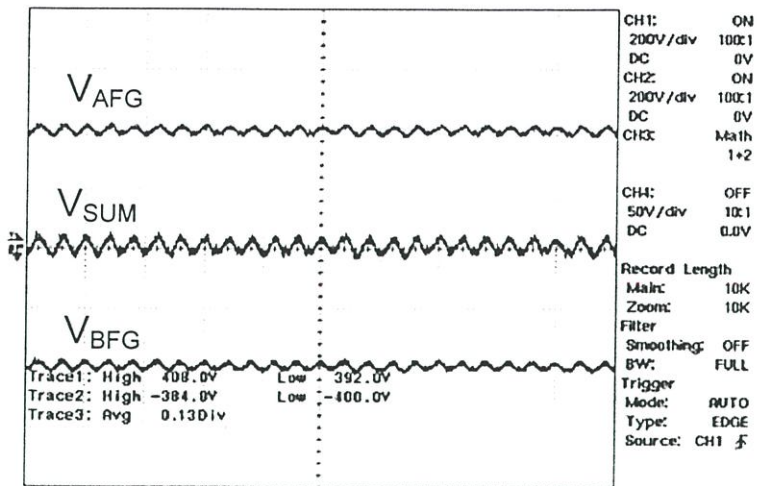
วัตถุประสงค์ของการทดลองเพื่อวัดแรงดันรบกวนโหมคร่วมที่แพร่กระจายของคอนเวอร์เตอร์แบบ VSC ในขณะที่ยังไม่มีกรปรับการสมดุลเช่นเดียวกันกับการทดลองในวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส โดยในที่นี้คอนเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่เป็นตัวกรองแบบแอกทีฟ จากรูปที่ 5.40 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างในการทดลองให้ตัวกรองทำงานในขณะที่ต่อร่วมกันวงจรการจ่ายโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นในที่นี้เป็นการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสขนาด 5 แรงม้าในสภาวะไร้อะโหลด ผลจากการขับเคลื่อนจะเกิดฮาร์มอนิกที่วงจรสายป้อน ตัวกรองแอกทีฟจะทำหน้าที่กรองฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากการทำงานของตัวกรอง คอนเวอร์เตอร์จะส่งผ่านกำลังไฟฟารีแอกทีฟและจะเกิดการรั่วไหลของสัญญาณรบกวนโหมคร่วมเช่นเดียวกัน ด้วยอินเวอร์เตอร์ปรับความเร็วของมอเตอร์

1. ทำการทดลองขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ และบันทึกสัญญาณแรงดันรบกวนโหมคร่วม ที่ขั้วเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นขั้วแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ต่อไปยังตัวประจุ ระหว่างขั้วบวกกับเฟรมกราวด์และขั้วลบกับเฟรมกราวด์ดังแสดงในรูปที่ 5.41 จะเห็นได้ว่าเกิดแรงดันรบกวนโหมคร่วมผสมอยู่ในรูปสัญญาณแรงดันที่วัดได้

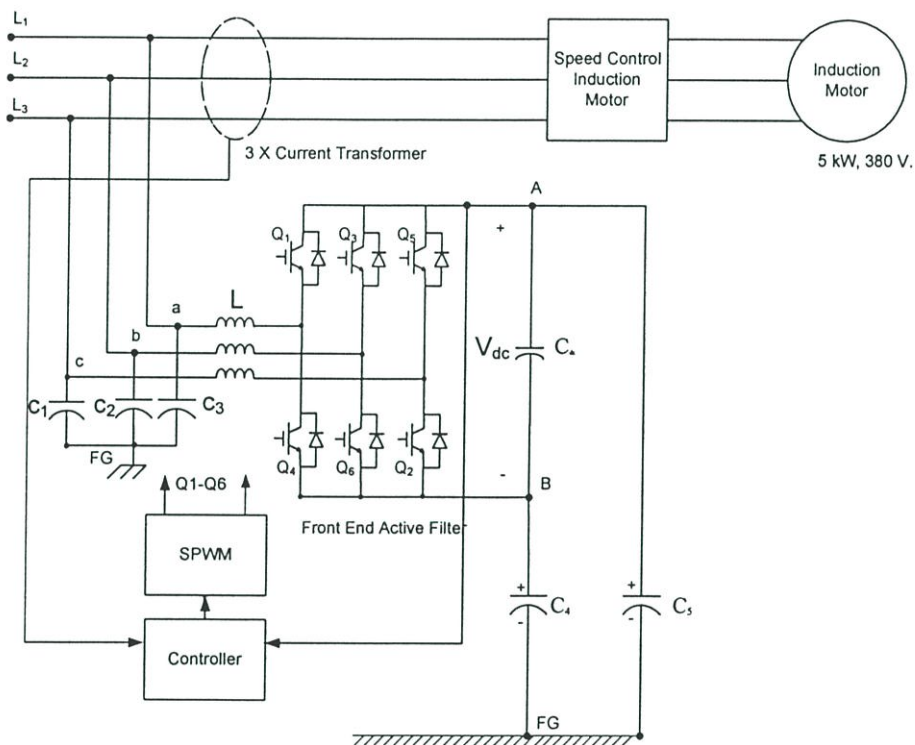
2. จากนั้นทำการปรับความสมดุลของตัวกรองแอกทีฟ โดยต่อตัวประจุที่ขั้วทั้งสองของเอาต์พุตไฟฟ้ากระแสตรงพร้อมตัวประจุ และต่อตัวประจุที่ขั้วของแรงดันอินพุต 3 เฟสที่ก่อนเข้าตัวเหนี่ยวนำของตัวกรอง เชื่อมระหว่างตัวประจุทั้งสองด้าน และ ต่อลงเฟรมกราวด์ ดังแสดงในรูปที่ 5.42 เหตุผลในการสมดุลลักษณะนี้จะเชื่อมระหว่างกระแสรบกวนโหมคร่วมที่เกิดขึ้นให้หักล้างกันเอง ภายในวงจรผลของความสมดุลจะทำให้แรงดันรบกวนโหมคร่วมมีค่าเข้าใกล้ศูนย์บันทึกค่าคลื่นสัญญาณแรงดันรบกวนโหมคร่วมเช่นเดียวกับข้อ 1 แสดงให้เห็นดังรูปที่ 5.43 จะเห็นได้ว่าสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจะหักล้างกันทำให้ผลรวมของแรงดันที่ขั้วบวกและขั้วลบของแรงดันเอาต์พุตมีค่าเป็นเข้าใกล้ศูนย์



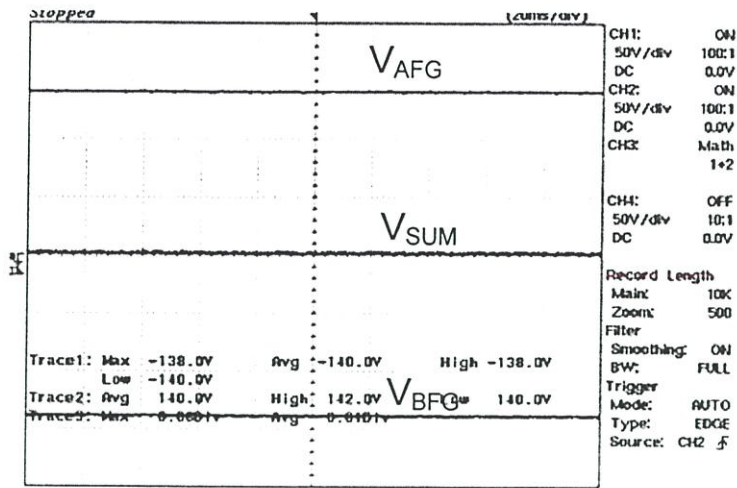
รูปที่ 5.40 โครงสร้างของวงจรกรองแอกทีฟ ที่มีโครงสร้างเป็นคอนเวอร์เตอร์แบบ VSC



รูปที่ 5.41 สัญญาณรบกวนในมอเตอร์ร่วมที่วัดที่สายเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงกับเฟรมกราวด์

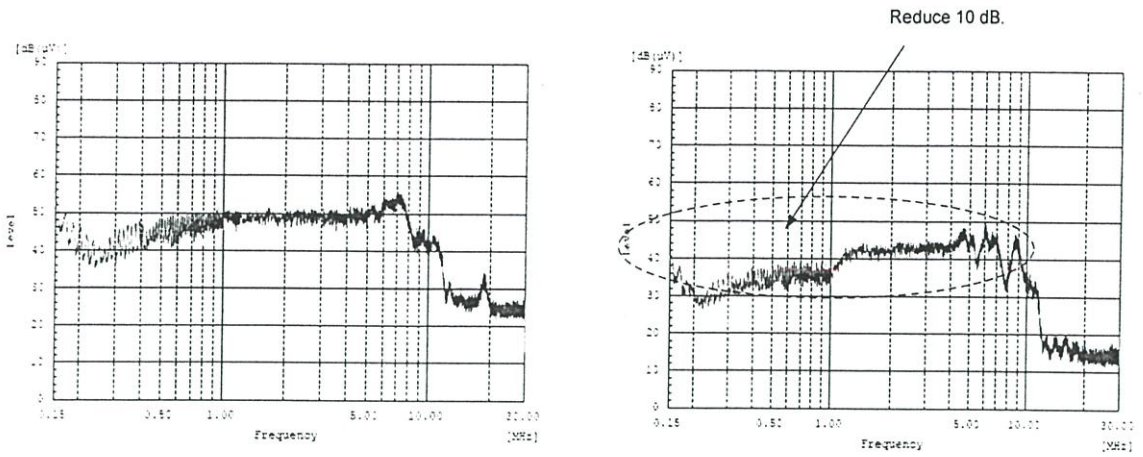


รูปที่ 5.42 วงจรกรองแอดทีฟ ปรับสมดุลที่แหล่งจ่ายและเอาท์พุทไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 5.43 สัญญาณรบกวนโหมคร่วมที่วัดระหว่างขั้วบวกของแรงดันเอาต์พุตกับเฟรมกราวด์และขั้วลบของแรงดันเอาต์พุตกับเฟรมกราวด์หลังปรับความสมดุล

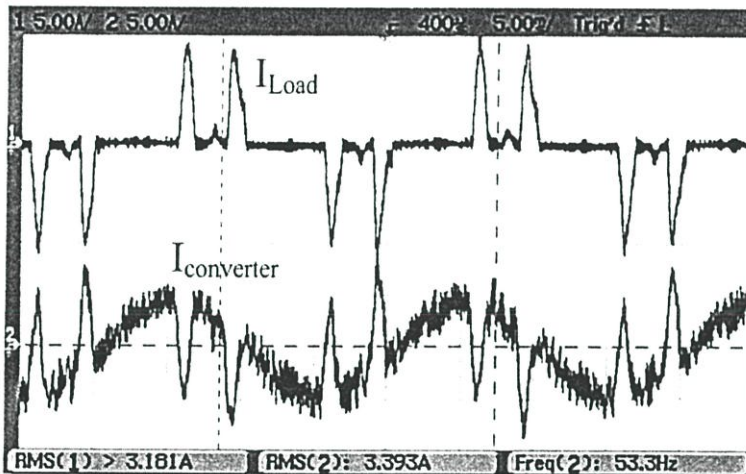
3. วัดค่าสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนโหมคร่วม ด้วยวิธีเดียวกันกับการทดลองที่ผ่านมา จากรูปที่ 5.44 ก. และ ข. จะเห็นได้ว่า ระดับของสัญญาณรบกวนในกรณีที่ปรับความสมดุลแล้ว จะลดลงเฉลี่ยประมาณ 10 dB. ในย่านความถี่ 150 kHz – 30 MHz. แสดงให้เห็นว่าการปรับความสมดุลสามารถลดระดับของสัญญาณรบกวนโหมคร่วมได้เช่นเดียวกันกับในวงจรรีจิสเตอร์ที่ผ่านมา ซึ่งจากผลการลดสัญญาณนี้ จะทำให้การแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าในตู้หน้า หรือผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้าลดลงไปด้วย ในรูปที่ 5.45 แสดงรูปคลื่นกระแสไหลคและกระแสจากคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นตัวกรองแบบแอคทีฟ ได้แสดงให้เห็นถึงฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นเมื่อจ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้น ในที่นี้ก็คืออินเวอร์เตอร์ที่ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และแสดงการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกจากตัวกรอง ซึ่งในที่นี้แสดงให้เห็นถึงการวัดสัญญาณรบกวนโหมคร่วมในสถานะที่คอนเวอร์เตอร์ทำงานเป็นตัวกรองแบบแอคทีฟและรูปที่ 5.46 แสดงแรงดันอินพุตและกระแสไหลคที่จ่ายให้อินเวอร์เตอร์



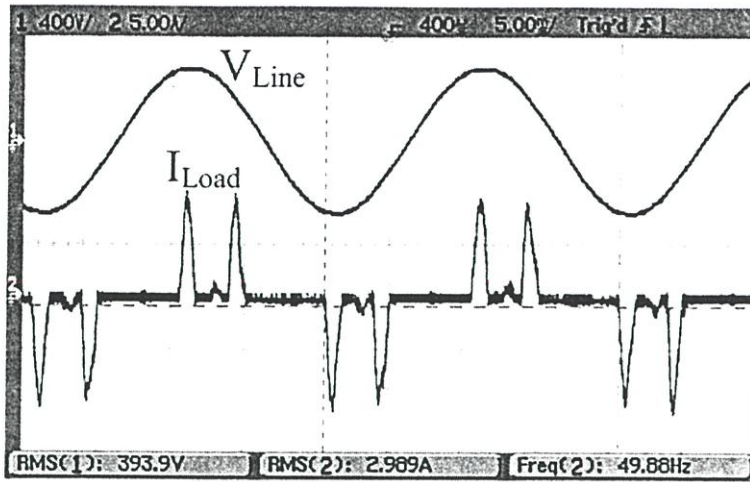
ก. วงจรคอนเวอร์เตอร์ VSC ที่ยังไม่สมดุล

ข. วงจรคอนเวอร์เตอร์ VSC ที่ สมดุล

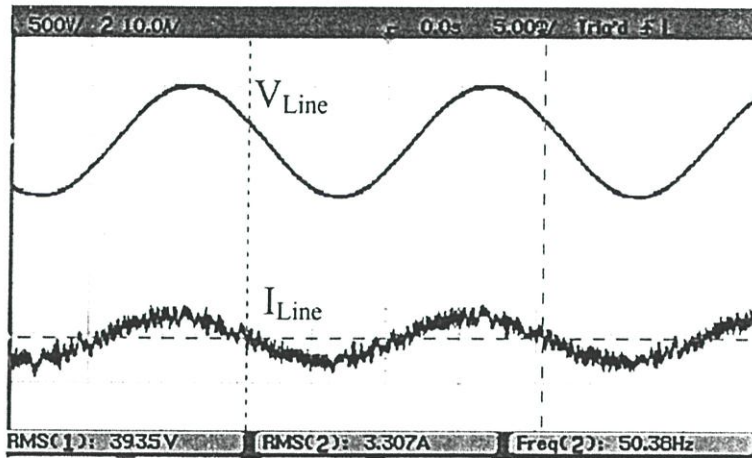
รูปที่ 5.44 สเปกตรัมของแรงดันรบกวนโหมคร่วมระหว่างวงจรมอเตอร์ไม่สมดุลและอินเวอร์เตอร์ที่สมดุลทั้งสองชนิด



รูปที่ 5.45 รูปคลื่นของกระแสโหลดและกระแสที่ออกจากคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นตัวกรองแอกทีฟ



ก. รูปคลื่นแรงดันระหว่างสายกับกระแสโหลด



ข. รูปคลื่นแรงดันระหว่างสายกับกระแสอินพุท

รูปที่ 5.46 รูปคลื่นของกระแสโหลดและกระแสที่ออกจากคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นตัวกรองแอกทีฟ

ในรูปที่ 5.46 ก. จะเห็นได้ว่า กระแสที่โหลดในที่นี่คืออินเวอร์เตอร์ที่ขับเคลื่อนมอเตอร์จะเกิดฮาร์มอนิกที่กระแจากความไม่เป็นเชิงเส้นของโหลด โดยตัวกรองจะสร้างกระแสขึ้นมาชดเชยเพื่อให้กระแสอินพุทมีค่าใกล้เคียงค่าแรงดันไซน์มากที่สุด ดังแสดงกระแสอินพุทดังรูป 5.46 ข. การชดเชยของคอนเวอร์เตอร์จะแสดงค่ากระแสที่มีฮาร์มอนิกปะปน ดังนั้นผลรวมของกระแสอินพุทจะต้องมีฮาร์มอนิกรวมอยู่ด้วย และผลการวัดค่าแรงดันและกระแสจากโวลท์มิเตอร์และแอมมิเตอร์แสดงได้ดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 แสดงค่าแรงดันและกระแสที่วัดได้จากการทดลอง

V_{Line}	394	V
V_{phase}	227	V
$I_{\text{Load (rms)}}$	3	A.

5.7 สรุปผลการทดลอง

จากรายละเอียดของการทดลองในบทนี้ ได้ทดลองลดการแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์ โดยการปรับความสมดุลของวงจรคอนเวอร์เตอร์ จากผลของการปรับความสมดุลของคอนเวอร์เตอร์จะทำให้สัญญาณรบกวนโหมคร่วมลดลง เนื่องจากเกิดการหักล้างของกระแสรบกวนโหมคร่วมในเฟรมกราวด์ การทดลองนี้ จะช่วยลดการแทรกซ้อนแม่เหล็กไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์ การศึกษาเริ่มจากการวิเคราะห์ความไม่สมดุลของคอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์เดี่ยว โดยการแยกความไม่สมดุลเป็น 3 ส่วน คือไม่สมดุลจากสายตัวนำส่งและตัวนำกลับ ความไม่สมดุลจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง และความไม่สมดุลจากโหลด จากนั้นปรับความสมดุลโดยใช้คอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์คู่ โดยการปรับความสมดุลแบบแอกทีฟ ความสมดุลแบบพาสซีฟ และความสมดุลแบบไฮบริดจ์ซึ่งเป็นการรวมความสมดุลทั้งสองแบบเข้าด้วยกัน ดังแสดงในตารางที่ 5.5 จากนั้นประเมินผลความสมดุลด้วยวิธี CMRR ได้ผลการปรับค่าสมดุลก่อนปรับความสมดุลและหลังปรับความสมดุลเท่ากับ 1.67 และ 41.5 dB ตามลำดับ จากนั้นได้นำวิธีปรับความสมดุลนี้ไปใช้ปรับความสมดุลของคอนเวอร์เตอร์แบบ 4 สวิทช์ คอนเวอร์เตอร์แบบ 6 สวิทช์ หรือ อินเวอร์เตอร์ และคอนเวอร์เตอร์ แบบ VSC จากการศึกษาพบว่า คอนเวอร์เตอร์แบบ 4 สวิทช์และ 6 สวิทช์และคอนเวอร์เตอร์แบบ VSC นั้นมีการทำงานเป็นสวิทช์คู่ซึ่งมีความสมดุลที่สายตัวนำส่งและสายตัวนำกลับอยู่แล้ว ดังนั้น การปรับความสมดุลจะปรับแบบพาสซีฟ โดยการจัดความสมดุลด้วยตัวประจุ ที่เป็นการชดเชยแบบพาสซีฟ ดังที่ได้นำเสนอไปแล้ว จากผลการปรับความสมดุล ได้ทดลองวัดแรงดันรบกวนโหมคร่วมด้วยออกซิลโลสโคปของคอนเวอร์เตอร์ทุกแบบ พบว่าแรงดันรบกวนโหมคร่วมหักล้างกัน จะเป็นผลให้กระแสรบกวนโหมคร่วมลดลง ต่อจากนั้นทำการวัดค่าสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนโหมคร่วมในแต่ละแบบ ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 5.6 ผลของการสมดุลในคอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์คู่ที่ใช้การปรับแบบไฮบริดจ์จะมีค่าสัญญาณรบกวนลดลงถึง 30 dB ส่วนในการปรับความสมดุลของคอนเวอร์เตอร์แบบ 4 สวิทช์ 6 สวิทช์และคอนเวอร์เตอร์แบบ VSC จะมีค่าสัญญาณรบกวนลดลงเฉลี่ย 10 dB ในย่านความถี่ตั้งแต่ 0.15 MHz. – 8 MHz.

ตารางที่ 5.5 สรุปสาเหตุของความไม่สมดุลและวิธีการปรับความสมดุลในแบบต่าง ๆ

Circuit Imbalance in Single-Switch Converter	Causes of Imbalance	Improvement Method of Imbalance	The name of Improvement Converter	Result (for example)
Transmission Line Imbalance on Active Switch	Series Active on Single-Switch (Q_1)	Active Balance by two active switches (Q_1, Q_2)	1. Double-Switches Converter with Two Active Switches (no passive balance) 2. Double-Switches Converter with Hybrid Balance (with all of the improvement method)	CMRR Single-Switch Converter : 1.67 dB Double-Switches with two switches converter : 32.04 dB. Double-Switches with hybrid balance converter : 41.5 dB.
	Series Passive on line impedance. (Z_{L1} and R_{ds})	Passive Balance by LC circuit (not written in this paper)		
	Shunt Active on Boost Converter			
	Shunt Passive on heat sink of active switch and free wheeling diode (C_{hs1}, D_M)			Common Mode Noise Evaluation by the frequency domain
D.C. Source Imbalance	Shunt Passive by capacitance from active switch (C_{hs1})	Passive Balance by capacitor (C_{s1}, C_{s2}, C_{sb}) Transformer with center tap (not written in this paper)		
Load Terminal Imbalance	Shunt Passive by capacitor (C_B)	Passive Balance by capacitor (C_{TB})		

หมายเหตุ

Q_1, Q_2 = ตัวสวิตช์ของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์คู่ (รูปที่ 4.14)

C_{hs1} = ค่าประจุแฝงระหว่างตัวสวิตช์และตัวระบายความร้อนเทียบกับเฟรมกราวด์

C_B = ค่าประจุแฝงที่ขั้วของโหลด

C_{s1}, C_{s2}, C_{sb} = ตัวประจุที่นำไปชดเชยเพื่อปรับความสมดุลของแหล่งจ่าย (รูปที่ 4.16)

ตารางที่ 5.6 แสดงผลการปรับความสมดุลและอัตราการลดของสัญญาณรบกวนโหมคร่วมของคอนเวอร์เตอร์ทุกแบบที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์

No.	Type of Converter	Frequency Spectrum of CM noise	Circuit Balance validation
			CM noise Improvement
1	Single-Switch Converter	$60dB_{\mu V}$	Unbalance
2	Double-Switch Converter	$50dB_{\mu V}$	$10dB_{\mu V}$
3	Double-Switch Converter with Hybrid Balance	$30dB_{\mu V}$	$30dB_{\mu V}$
4	Four-Switch Converter	$60dB_{\mu V}$	$60dB_{\mu V}$
5	Four Switch Converter with Hybrid Balance		
6	Conventional Single Phase to Three Phase Inverter	$50dB_{\mu V}$	Transmission Line balance
7	Single Phase to Three Phase Inverter with Hybrid Balance	$40dB_{\mu V}$ (0.15 - 1 MHz.) $30dB_{\mu V}$ (1 - 3 MHz.)	$10dB_{\mu V}$ $20dB_{\mu V}$
8	Conventional Three Phase to Three Phase Inverter	$55dB_{\mu V}$ (0.15-6MHz.) $55dB_{\mu V}$ (18 MHz.)	Transmission Line balance
9	Three Phase to Three Phase Inverter with Hybrid Balance	$44dB_{\mu V}$ (0.15-6MHz.) $46dB_{\mu V}$ (18 MHz.)	$11dB_{\mu V}$ (0.15-6MHz.) $9dB_{\mu V}$ (18 MHz.)
10	Conventional Three Phase Voltage Source Converter (VSC)	$45dB_{\mu V}$ (0.15-1MHz.) $55dB_{\mu V}$ (8 MHz.)	Transmission Line balance
11	Three Phase Voltage Source Converter Hybrid Balance	$35dB_{\mu V}$ (0.15-1MHz.) $46dB_{\mu V}$ (8 MHz.)	$10dB_{\mu V}$ (0.15-1MHz.) $9dB_{\mu V}$ (8 MHz.)

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาเสถียรภาพแบบสัญญาณขนาดเล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่ที่ติดตั้งไกลจากระบบกริด จะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่สามารถรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ส่งมาจากระบบกริดได้เพียงพอที่จะผลิตแรงดันไฟฟ้า ซึ่งเป็นต้นเหตุให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเสถียรภาพ จากการทดลองส่วนที่ 1 เป็นการวิเคราะห์ค่าไอเกนของแบบจำลองเชิงเส้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 เมกกะวัตต์ที่ต่อเชื่อมกับกริด โดยเปลี่ยนระยะความยาวของสายส่งกำลังไฟฟ้าช่วงละ 5 กิโลเมตร จากระยะความยาว 10 กิโลเมตรถึง 50 กิโลเมตร จากค่าสูญเสียกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในสายส่งกำลังไฟฟ้าเนื่องจากระยะทางไกล ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีเสถียรภาพที่ระยะความยาวของสายส่งยาวที่สุดที่ 40 กิโลเมตร และจะเริ่มเสถียรภาพตั้งแต่ 45 กิโลเมตรเป็นต้นไป จากนั้นหาค่าแฟคเตอร์ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าไอเกนและตัวแปรสถานะ 3 ค่า คือ อัตราเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันในแกน Q ($\Delta E'_Q$) อัตราเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันในแกน D ($\Delta E'_D$) และอัตราเปลี่ยนแปลงค่าสลิป (Δs) เป็นตัวแปรสถานะตัวที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ เพื่อต้องการหาค่าตัวแปรสถานะที่มีอิทธิพลต่อการเสถียรภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากผลของค่าแฟคเตอร์ความสัมพันธ์ พบว่า ค่าไอเกนตัวที่ 1 สัมพันธ์กับตัวแปรสถานะตัวที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 1.00, $-0.1507 + 0.0101i$ และ $-0.1507 + 0.0101i$ ตามลำดับ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าไอเกนตัวที่ 1 กับ ตัวแปรสถานะตัวที่ 1 จะมีค่าสูงสุด ดังนั้นค่า $\Delta E'_Q$ จะมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าไอเกนตัวที่ 1 ที่เป็นจำนวนจริง โดยค่าไอเกนจะเปลี่ยนจากเครื่องหมายลบเป็นเครื่องหมายบวกตั้งแต่ระยะความยาวของสายส่งที่ 45 กิโลเมตรเป็นต้นไป การที่ค่าไอเกนมีเครื่องหมายบวกแสดงถึงสูญเสียเสถียรภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ต่อจากนั้นทำการทดลองส่วนที่ 2 โดยจะเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยการต่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 เมกกะวัตต์ ตั้งแต่ 5 เครื่องจนถึง 100 เครื่อง ครั้งที่ 1 ต่อขนานกันจำนวน 5 เครื่อง ครั้งที่ 2 จำนวน 10 เครื่อง จากนั้นจะเพิ่มจำนวนที่ขนานครั้งละ 10 เครื่อง จนถึง 100 เครื่อง โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมดจะต่อเชื่อมกับกริดระยะทาง 20 กิโลเมตร หาค่าไอเกนจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ขนานกัน 5 เครื่องจนถึง 100 เครื่อง ค่าไอเกนตัวที่ 1 มีค่าจาก -0.944 ถึง -0.0452 ค่าไอเกนตัวที่ 2 และตัวที่ 3 มีค่าเท่ากันจาก $-0.3609 + 10.7836i$ ถึง $-0.0154 + 11.2497i$ พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า พบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะรับค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟได้น้อยลงจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 20 เครื่อง ถึง 60 เครื่อง และจะมีค่าคงที่ประมาณ 0.1 p.u. ตั้งแต่ 60 -100 เครื่อง จากการลดลงของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟนี้จะมีผลทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีการออสซิลเลทมาก และมีแนวโน้มที่จะเสถียรภาพเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1

ปัญหาการเสียดีรภาพแบบสัญญาณขนาดเล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่ โดยส่วนใหญ่จะนิยมแก้ไขปัญหาคำยติดตั้งคอนเวอร์เตอร์เพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแทนการรับกำลังไฟฟ้าจากระบบกริด แต่ผลของการใช้คอนเวอร์เตอร์จะทำให้เกิดการแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านไปในสายส่งกำลังไฟฟ้า ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้ได้ลดการแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์ด้วยวิธีปรับความสมดุล โดยวิธีปรับสมดุลพาสซีส ปรับสมดุลแอกทีฟ และปรับสมดุลแบบไฮบริดจ์ จากการทดลองได้ทดลองปรับความสมดุลของคอนเวอร์เตอร์ 5 ชนิดคือคอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์เดี่ยว คอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์คู่ คอนเวอร์เตอร์แบบ 4 สวิทช์ คอนเวอร์เตอร์แบบ 6 สวิทช์ และคอนเวอร์เตอร์แบบวี เอส ซี ตามลำดับ จากผลการปรับความสมดุลจะทำให้แรงดันรบกวนโหมคร่วมและการแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าลดลง ดังค่าสเปคตรัมของสัญญาณรบกวนโหมคร่วมในคอนเวอร์เตอร์แต่ละแบบ แสดงในตารางที่ 5.4 ค่าสเปคตรัมหลังการปรับสมดุลของคอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์คู่ที่ใช้การปรับสมดุลไฮบริดจ์จะลดลงถึง $30 \text{ dB}_{\mu V}$ ในส่วนของการปรับความสมดุลของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 สวิทช์ และวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ VSC จะลดลงเฉลี่ยประมาณ $10 \text{ dB}_{\mu V}$ นอกจากนี้การประเมินความสมดุลของคอนเวอร์เตอร์ด้วยวิธี CMRR ในตารางที่ 5.5 ค่า CMRR จะสูงขึ้น ถ้าวจรคอนเวอร์เตอร์มีความสมดุลมากขึ้น วงจรสรุปในคอนเวอร์เตอร์แต่ละแบบในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอในภาคผนวก ค

ข้อเสนอแนะของการศึกษาเสียดีรภาพแบบสัญญาณขนาดเล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะมีความสำคัญในเรื่องของความเที่ยงตรงของโปรแกรมในการหาค่าเริ่มต้นจากคำนวณการไหลของโหลด เพราะค่าสลิปมักจะไม่คงที่ ความผิดพลาดจากการคำนวณซ้ำจะแก้ไขได้โดยการเพิ่มจำนวนรอบวนซ้ำ จะทำให้ได้ค่าตัวแปรที่แน่นอน ส่วนในด้านการวัดการแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้า จะต้องปรับตั้งค่าเริ่มต้นของเครื่องมือวัดในห้องปฏิบัติการให้ตรงตามมาตรฐานการวัดและเลือกใช้โพรวัดกระแสให้มีย่านที่เหมาะสม ประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ใช้สามารถนำไปประกอบการออกแบบคอนเวอร์เตอร์ เพื่อลดขนาดของตัวกรองสัญญาณรบกวนลงได้

บรรณานุกรม

- [1] Fengquan Zhou, Geza joos and Chad Abbey, "Voltage Stability in Weak Connection Wind Farm," *Power Engineering Society General Meeting*, vol. 2, pp. 1483- 1488, 2005.
- [2] Sung-Chun Kuo, Li Wang, "Dynamic Eigenvalue Analysis of Self-Excited Induction Generator Feeding an Induction Motor," *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, vol 3, pp.1393 – 1397, 2001.
- [3] Zhou, F Joos, G. Abbey, C. Jiao, L. Ooi, B.T., "Use of large capacity SMES to improve the power quality and stability of wind farms," *Power Engineering Society General Meeting*, vol.2, pp. 2025- 2030, 2005.
- [4] Foster, S.; Xu, L.; Fox, B., "Grid Integration of Wind Farms Using SVC and STATCOM," UPEC apos;06. *Proceedings of the 41st International*, vol. 1, issue , 6-8, pp.:157-161, 2006.
- [5] Joshi, N.N. Mohan, "Application of TCSC in wind farm application," *Power Electronics, Electrical Drives*, 23rd - 26th May, pp.1196-1200, 2006.
- [6] Wei Qiao, Ronald G. Harley, Ganesh K. Venayagamoorthy, "Effects of FACTS Devices on a Power System Which Includes a Large Wind Farm," *PSCE2006*, pp.2070-2076, 2006.
- [7] Luiz A.C.Lopes, Rogerio G. Almeida, Wind-Driven Self-Excited Induction Generator With Voltage and Frequency Regulated by a Reduced-Rating Voltage Source Converter," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 21, no.2 June, 2006.
- [8] Marcus V.A. Nunes, J.A. Pecas Lopes, Ubiratan H. Ubiratan H. Bezerra, Rogerio G. Almeida, " Influence of the Variable-Speed Wind Generators in Transient Stability Margin of the Conventional Generators Integrated in Electrical Grids," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 19, pp. 692-701, Dec. 2004.
- [9] Yazhou Lei, Alan Mullane, Gordon Lightbody and Robert Yacamine, "Modeling of the Wind Turbine with a Double Fed Induction Generator for Grid Integration Studies," *IEEE Trans on Energy Conversion*, pp.1-8, 2005.
- [10] Hughes. F.M.; Anaya-Lara, Jenkins, Strbac.G, "Control of DFIG-based wind generation for power network support," *IEEE. Trans. power system*, vol. 20, issue 4, pp. 1958 – 1966, 2005.

- [11] Martin G. Stewart, W.H. Siew, Qingmin Li, Keith Walker and Chris Piner, "Conducted Emissions From FACTS Equipment Operational Within Substation-PartII," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 20, no. 2 April, 2005.
- [12] Martin G. Stewart, W.H. Siew, Qingmin Li, Keith Walker and Chris Piner, "Measurement of Electromagnetic Emissions From FACTS Equipment Operational Within Substations-PartI," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 20, no. 2 April, 2005.
- [13] .Martin G. Stewart, W.H. Siew, Qingmin Li, Keith Walker and Chris Piner, "Radiated Emissions From FACTS Equipment Operational Within Substation-PartIII," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 20, no. 2 April, 2005.
- [14] Richard Zhang, Xin Wu and Timothy Wang, "Analysis of Common Mode EMI for Three-Phase Voltage Source Converters," *IEEE Power Electronics Specialist Conference*, vol. 4, 15-19 June, pp. 1510-1515, 2003.
- [15] Shikoski.J; Achkoski.R. and Rechkoska, "Electromagnetic interference filters for power quality," *IEEE conf.(MELECON2000)*, vol.3, 31 May pp.932 – 935, 2000.
- [16] J. Mark Nave, *Power Line Filter Design for Switched-Mode Power Supplied*, Van Nostrand Reinhold, pp.193-196, 1991.
- [17] W. Xin, M.H. Pong, Z.Y. Lu and Z.M.Qian, "Novel boost PFC with low common mode EMI: Modeling and design," *IEEE APEC Proc.*, pp. 178-181, 2000.
- [18] H.P. Yee, "An EMI Suppression MOSFET Driver," *Power Electronic Conference and Exposition, APEC'97 Conference Proceeding 1997*, 12th Annual meeting 1997, vol.1, pp. 242-248, 1997.
- [19] D. Cochrane, D.Y. Chen, D. Boroyevic, "Passive Cancellation of Common-Mode Noise in Power Electronic Circuit," *IEEE Trans. on Power Electronics.*, vol.8, no.5, pp.756-763, 2003.
- [20] S. Nitta, T. Shimayama, "Non-Resonating Noise Filter," *IEEE Int. & Symp.on EMC 90*, Washington D.C., U.S.A., pp. 683-687, Aug., 1990.
- [21] S. Masahits, Ge Li, N. Tamotsu, "Balanced Switching Converter to Reduce Common-Mode Conducted Noise," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol.50, no.6, pp. 1095-1099, 2003.
- [22] Fengquan Zhou, G. Joos and C.Abbey, "Voltage Stability in Weak Connection Wind Farms," *IEEE Power Engineering Society*, vol.22, 12-16 June, pp.1483-1488, 2005.

- [23] Sung-Chun Kuo; Li Wang, "Dynamic Eigenvalue Analysis of a Self-Excited Induction Generator Feeding an Induction Motor," *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, vol. 3, pp.1393 – 1397, 2001.
- [24] A.Tabesh, R.Iravani, "Small-Signal Dynamic Model and Analysis of a Fixed-Speed Wind Farm - A Frequency Response Approach," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, Issue 2, pp. 778 – 787, April, 2006.
- [25] B.Palle; M.G. Simoes; F.A.Farret, "Dynamic Simulation and Analysis of Parallel Self-Excited Induction Generator for Islanded Wind Farm Systems," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.41, July-Aug., pp.1099-1106, 2005.
- [26] Eduard Mulfadi, Fesus Sallan, Mariano Sanz an Charles P. Butterfield, "Investigation of Self-Excited Induction Generators for Wind Turbine Application," *IEEE Industrial Application Society*, 3-7 Oct, pp.3-9, 1999.
- [27] Lie Xu Liangzhong Yao Christian Sassc, "Comparison of using SVC and STATCOM for Wind Farm Integration," *IEEE conf. on power system*, pp.1-7, 22-26 Oct, 2006.
- [28] Wei Qiao; Harley, "Effects of FACTS Devices on a Power System Which Includes a Large Wind Farm," *IEEE PES 2006*, vol. 1ss., pp.:2070-2076, 29Oct-1Nov., 2006.
- [29] Chompoo-inwai, C.; Yingvivanapong, C.; Methaprayoon, K.; Wei-Jen Lee, "Reactive compensation techniques to improve the ride-through capability of wind turbine during disturbance," *IEEE Transactions on Industrial App.*, vol. 41pp. 666 – 672, May-June, 2005.
- [30] Z. Lubosny, *Wind Turbine Operation in Electric Power Systems Advanced Modeling*, Springer, 2003.
- [31] J.G. Sloopweg, W.L. Kling, "Modeling of Large Wind Farm in Power System Simulation," *IEEE Power Eng. Society*, vol.1, 25-25 July, pp.:503–508, 2002.
- [32] R.C. Bansal, "Three-Phase Self-Excited Induction Generators: An Overview," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 20, no.2, June, 2005.
- [33] Nimit Boonpirom, Kitti Paithoonwattanakij, "The Small Signal Stability Analysis of Doubly-Fed Induction Motor in Wind Farm System," (AUPEC 2006), 10-13 Dec, Melbourne, Australia, 2006.
- [34] Nimit Boonpirom, Yothin Prempraneerach, Kitti Paithoonwattanakij, Kraison Aunchaleevarapan, Shuichi Nitta, "A Study on the System Imbalance of the Single-Switch Converter for the Conductive Common Mode Noise Reduction," *IEICE Transaction on Communication*, vol.E90-B, no. 8, Aug.2007.

- [35] W. Herry Ott, Noise reduction Techniques in Electronic Systems, John-Wiley & Sons, pp. 119-120, 1989.
- [36] Clayton R. Paul, Introduction to Electromagnetic Compatibility, John Wiley & Sons, 1992.
- [37] John C. Fluke, Controlling Conducted Emission by Design, Van Nostrand Reinhold, 1991.
- [38] Prabha Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, 1994.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

การคำนวณแบบจำลองพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ก.1 สมการแรงดันที่ตัวอยู่กับที่ และแรงดันที่ตัวหมุน

จากสมการแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในสมการที่ ก.1- ก.6 นี้พิจารณาในกรณีที่ตัวหมุนสามารถจ่ายแรงดันได้ ซึ่งสามารถพิจารณาได้ทั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบตัวหมุนกรงกระรอก และตัวหมุนแบบวาวน์ ได้

$$v_{as} = p\psi_{as} - R_s i_{as} \quad (\text{ก.1})$$

$$v_{bs} = p\psi_{bs} - R_s i_{bs} \quad (\text{ก.2})$$

$$v_{cs} = p\psi_{cs} - R_s i_{cs} \quad (\text{ก.3})$$

$$v_{ar} = p\psi_{ar} + R_r i_{ar} \quad (\text{ก.4})$$

$$v_{br} = p\psi_{br} + R_r i_{br} \quad (\text{ก.5})$$

$$v_{cr} = p\psi_{cr} + R_r i_{cr} \quad (\text{ก.6})$$

กำหนดให้

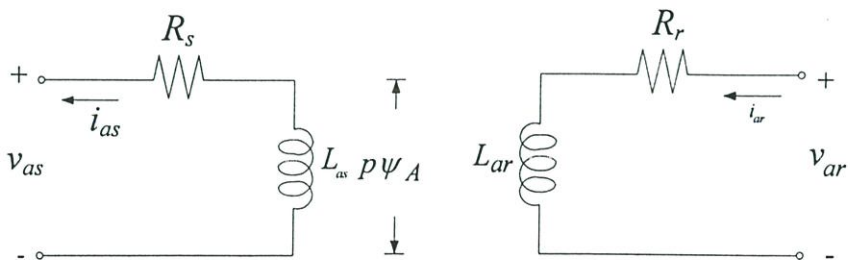
v_{as}, v_{bs}, v_{cs} = แรงดันไฟฟ้าชั่วขณะของตัวอยู่กับที่ เฟส a, b, c ตามลำดับ

v_{ar}, v_{br}, v_{cr} = แรงดันไฟฟ้าชั่วขณะของตัวหมุน เฟส a, b, c ตามลำดับ

$\varphi_{as}, \varphi_{bs}, \varphi_{cs}$ = เส้นแรงแม่เหล็กเชื่อมโยง(Flux Linkage)ที่ตัวอยู่กับที่เฟส A, B, C ตามลำดับ

$\varphi_{ar}, \varphi_{br}, \varphi_{cr}$ = เส้นแรงแม่เหล็กเชื่อมโยง(Flux Linkage)ที่ตัวหมุน

p = แสดงแทนอนุพันธ์ ($p = \frac{d}{dt}$)



ก.2 สมการเส้นแรงแม่เหล็กเชื่อมโยง

จากค่าเส้นแรงแม่เหล็กเชื่อมโยงระหว่างขดลวดของตัวอยู่ที่แต่ละชุด สามารถทำให้เกิดผลรวมของเส้นแรงแม่เหล็กเชื่อมโยงในแต่ละเฟส ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \psi_{as} = & -L_{asas} \cdot i_{as} - L_{asbs} \cdot i_{bs} - L_{asc s} \cdot i_{cs} + L_{asar} \cdot i_{ar} \\ & + L_{asbr} \cdot i_{br} + L_{ascr} \cdot i_{cr} \end{aligned} \quad (ก.7)$$

$$\begin{aligned} \psi_{bs} = & -L_{bsAs} \cdot i_{bs} - L_{bsbs} \cdot i_{bs} - L_{bsCs} \cdot i_{cs} \\ & + L_{bsar} \cdot i_{ar} + L_{bsbr} \cdot i_{br} + L_{bscr} \cdot i_{cr} \end{aligned} \quad (ก.8)$$

$$\begin{aligned} \psi_{cs} = & -L_{csas} \cdot i_{as} - L_{csbs} \cdot i_{bs} - L_{csc s} \cdot i_{cs} \\ & + L_{csar} \cdot i_{ar} + L_{csbr} \cdot i_{br} + L_{cscr} \cdot i_{cr} \end{aligned} \quad (ก.9)$$

- ค่าเหนี่ยวนำที่ตัวอยู่ที่

$$L_{asas} = L_{bsbs} = L_{csc s} = L_{ls} + L_{ms}$$

$$L_{asbs} = L_{asc s} = L_{bscs} = -0.5L_{ms}$$

$$L_{asar} = L_{bsbr} = L_{cscr} = L_{sr} \cos \theta_r$$

$$L_{asbr} = L_{bscr} = L_{csar} = L_{sr} \cos(\theta_r + 120^\circ)$$

$$L_{ascr} = L_{bsar} = L_{csbr} = L_{sr} \cos(\theta_r - 120^\circ)$$

- เส้นแรงแม่เหล็กที่ตัวหมุน

$$\psi_{ar} = L_{arar} \cdot i_{ar} + L_{arbr} \cdot i_{br} + L_{arcr} \cdot i_{cr} - L_{aras} - L_{arbs} - L_{arcs} \quad (ก.10)$$

$$\psi_{br} = L_{brar} \cdot i_{ar} + L_{brbr} \cdot i_{br} + L_{brcr} \cdot i_{cr} - L_{bras} - L_{brbs} - L_{brcs} \quad (ก.11)$$

$$\psi_{cr} = L_{crar} \cdot i_{ar} + L_{crbr} \cdot i_{br} + L_{cr cr} \cdot i_{cr} - L_{cras} - L_{crbs} - L_{cr cs} \quad (ก.12)$$

ค่าเหนี่ยวนำที่ตัวหมุนที่ส่งผ่านสนามแม่เหล็กระหว่างเฟส a, b, c สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (ก.13) และส่งผ่านจากตัวอยู่ที่ที่แสดงได้ดังสมการที่ (ก.14)

- ค่าความเหนี่ยวนำที่ตัวหมุน

$$\left. \begin{aligned} L_{arar} = L_{brbr} = L_{cr cr} &= L_{ls} + L_{mr} \\ L_{arbr} = L_{brcr} = L_{arcr} &= -0.5L_{mr} \\ L_{Asar} = L_{Bsbr} = L_{Cs cr} &= L_{sr} \cos \theta_r \end{aligned} \right\} \quad (ก.13)$$

$$\left. \begin{aligned} L_{Asbr} &= L_{Bscr} = L_{Csar} = L_{sr} \cos(\theta_r + 120^\circ) \\ L_{Ascr} &= L_{Bsar} = L_{Csbr} = L_{sr} \cos(\theta_r - 120^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (\text{ก.14})$$

โดยที่ค่าเหนี่ยวนำอยู่กับที่และค่าเหนี่ยวนำเชื่อมโยงจะมีค่าเท่ากับ

$$L_{ms} = \pi\mu_0 \left(\frac{N_s}{2}\right)^2 \left(\frac{rl}{g}\right) \quad (\text{ก.15})$$

$$L_{sr} = \pi\mu_0 \left(\frac{N_s}{2}\right) \left(\frac{N_r}{2}\right) \left(\frac{rl}{g}\right) \quad (\text{ก.16})$$

$$L_{mr} = \pi\mu_0 \left(\frac{N_r}{2}\right)^2 \left(\frac{rl}{g}\right) \quad (\text{ก.17})$$

สามารถเขียนในรูปทั่วไป ของเส้นแรงแม่เหล็กที่ตัวอยู่กับที่ กับตัวหมุนได้ดังนี้

$$\psi_{abcs} = L_{ss}(\theta) i_{abcs} + L_{sr}(\theta) i_{abcr} \quad (\text{ก.18})$$

$$\psi_{abcr} = L_{sr}(\theta) i_{abcs} + L_{rr}(\theta) i_{abcr} \quad (\text{ก.19})$$

$$L_{ss}(\theta) = \begin{bmatrix} [L_{ls} + L_{ms}] & -0.5L_{ms} & -0.5L_{ms} \\ -0.5L_{ms} & [L_{ls} + L_{ms}] & -0.5L_{ms} \\ -0.5L_{ms} & -0.5L_{ms} & [L_{ls} + L_{ms}] \end{bmatrix}$$

$$L_{rr}(\theta) = \begin{bmatrix} [L_{lr} + L_{mr}] & -0.5L_{mr} & -0.5L_{mr} \\ -0.5L_{mr} & [L_{lr} + L_{mr}] & -0.5L_{mr} \\ -0.5L_{mr} & -0.5L_{mr} & [L_{lr} + L_{mr}] \end{bmatrix}$$

$$L_{sr}(\theta) = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \cos(\theta_r + 120^\circ) & \cos(\theta_r - 120^\circ) \\ \cos(\theta_r - 120^\circ) & \cos\theta_r & \cos(\theta_r + 120^\circ) \\ \cos(\theta_r + 120^\circ) & \cos(\theta_r - 120^\circ) & \cos\theta_r \end{bmatrix}$$

ค่าเส้นแรงแม่เหล็กเชื่อมโยงของตัวอยู่กับที่ หลังจากที่แปลงพิกัด dq0 แล้วจะแสดงดังสมการที่ (ก.20) และเส้นแรงแม่เหล็กที่ตัวหมุนจะแสดงได้ดังสมการที่(ก.21)

$$\left. \begin{aligned} \psi_{ds} &= -L_{ss} i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \psi_{qs} &= -L_{ss} i_{qs} + L_m i_{qr} \end{aligned} \right\} \quad (\text{ก.20})$$

$$\left. \begin{aligned} \psi_{dr} &= -L_{rr} i_{dr} + L_m i_{ds} \\ \psi_{qr} &= -L_{rr} i_{qr} + L_m i_{qs} \end{aligned} \right\} \quad (\text{ก.21})$$

ก.3 การแปลงพิกัดจาก พิกัด abc เป็นพิกัด dq0

ใช้หลักการของ Park's Transform การแปลงพิกัดในวิชานิพนธ์ฉบับนี้จะกำหนดแกนอ้างอิง โดยให้ของ d จะนำหน้า q เท่ากับ 90 องศา โดยที่ฟังก์ชันการแปลงของ Park จะแสดงให้เห็นดังสมการที่ (ก.22) และ (ก.23)

$$K_s(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin \theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{ก.22})$$

$$K_s^{-1}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{ก.23})$$

ก.3.1 สมการแรงดันของวงจรตัวอยู่ที่ในพิกัด dq0

การแปลงพิกัด จากพิกัด abc เป็นพิกัด dq0 สามารถแปลงได้ดังสมการที่ (ก.22) ซึ่งจะได้สมการแรงดันของ ตัวอยู่ที่ใหม่ดังสมการที่ (ก.24) และได้สมการแรงดันของตัวหมุนดังสมการที่ (ก.25) โดยในที่นี้ จะยกเว้นค่าพิกัดที่ 0 ของ dq0 เนื่องจากไม่มีส่วนที่แรงดันที่ลกราวด์ จะแสดงเฉพาะในแกน d และ q

$$v_{abcs} = -R_s i_{abcs} + \frac{d\psi_{abcs}}{dt}$$

$$v_{dq0s} = -K(\theta)R_s K^{-1}(\theta)i_{abcs} + K(\theta)\frac{d}{dt}\{K^{-1}(\theta)\psi_{dq0s}\}$$

$$v_{ds} = p\psi_{ds} + \frac{\omega}{\omega_b}\psi_{qs} - R_s i_{ds}$$

$$v_{qs} = p\psi_{qs} + \frac{\omega}{\omega_b}\psi_{ds} - R_s i_{qs}$$

(ก.24)

ก.3.2 สมการแรงดันของวงจรถั่วหมุน

$$\left. \begin{aligned} v_{dr} &= p\psi_{dr} + \frac{(\omega - \omega_r)}{\omega_b} \psi_{qr} - R_r i_{dr} \\ v_{qr} &= p\psi_{qr} - \frac{(\omega - \omega_r)}{\omega_b} \psi_{dr} - R_r i_{qr} \end{aligned} \right\} \quad (\text{ก.25})$$

ก.4 สมการหนึ่งหน่วย

การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังส่วนใหญ่เราจะพิจารณาค่าหนึ่งหน่วย เพื่อให้การคำนวณที่มีระบบที่มีข่านและสเกลที่แตกต่างกัน ดังนั้นการคำนวณหนึ่งหน่วย จึงสามารถทำให้เกิดความง่ายในการคำนวณที่มีฐานเดียวกัน หลังจากที่ได้สมการของแรงดัน เส้นแรงแม่เหล็กเชื่อม โยงในแนวแกน dq0 แล้ว จะแปรค่าตัวแปรต่างๆ ให้อยู่ในรูปหนึ่งหน่วย (*per-unit*) = $\frac{\text{ปริมาณจริง}}{\text{ปริมาณฐาน}}$ โดยจะแสดงสัญลักษณ์ \bar{x} กำกับตัวแปรต่างๆแสดงค่าหนึ่งหน่วย โดยค่าฐานจะกำหนดได้ดังนี้

ก.4.1 ตัวแปรฐาน

$$\begin{aligned} \omega_{base} &= 2\pi f_{base} && \text{elec} \cdot \text{red} / \text{sec} \\ \omega_{mbase} &= \omega_{base} \left(\frac{2}{pf} \right) && \text{mech} \cdot \text{red} / \text{sec} \\ Z_{sbase} &= \frac{V_{sbase}}{I_{sbase}} && \Omega \\ \varphi_{sbase} &= \frac{Z_{sbase}}{\omega_{base}} && \omega_b - \text{turns} \\ L_{sbase} &= \frac{V_{sbase}}{I_{sbase} \cdot \omega_{base}} && H \\ \text{Tourqe base} &= \frac{3}{2} \left(\frac{pf}{2} \right) \varphi_{sbase} \cdot i_{sbase} && N \cdot m \end{aligned}$$

ก.4.2 สมการแรงดันตัวอยู่กับที่

$$\left. \begin{aligned} \bar{v}_{ds} &= p\bar{\psi}_{ds} + \frac{\omega}{\omega_b} \bar{\psi}_{qs} - \bar{R}_s \bar{i}_{ds} \\ \bar{v}_{qs} &= p\bar{\psi}_{qs} - \frac{\omega}{\omega_b} \bar{\psi}_{ds} - \bar{R}_s \bar{i}_{qs} \end{aligned} \right\} \quad (\text{ก.26})$$

ก.4.3 สมการแรงดันตัวหมุน

$$\left. \begin{aligned} \bar{v}_{dr} &= p\bar{\psi}_{dr} + \frac{(\omega - \omega_r)}{\omega_b} \bar{\psi}_{qr} - \bar{R}_r \bar{i}_{dr} \\ \bar{v}_{qr} &= p\bar{\psi}_{qr} - \frac{(\omega - \omega_r)}{\omega_b} \bar{\psi}_{dr} - \bar{R}_r \bar{i}_{qr} \end{aligned} \right\} \quad (ก.27)$$

ก.4.4 สมการเส้นแรงแม่เหล็กเชื่อมโยง

$$\left. \begin{aligned} \bar{\psi}_{ds} &= -\bar{L}_{ss} \bar{i}_{ds} + \bar{L}_m \bar{i}_{dr} \\ \bar{\psi}_{qs} &= -\bar{L}_{ss} \bar{i}_{qs} + \bar{L}_m \bar{i}_{qr} \end{aligned} \right\} \quad (ก.28)$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{\psi}_{dr} &= \bar{L}_{rr} \bar{i}_{dr} + \bar{L}_m \bar{i}_{ds} \\ \bar{\psi}_{qr} &= \bar{L}_{rr} \bar{i}_{qr} + \bar{L}_m \bar{i}_{qs} \end{aligned} \right\} \quad (ก.29)$$

จากสมการที่(2.33) จะได้ค่ากระแสของตัวหมุนในแกน d ได้

$$\bar{i}_{dr} = \frac{\bar{\psi}_{dr} + \bar{L}_m \bar{i}_{ds}}{\bar{L}_{rr}} \quad (ก.30)$$

แทนค่า \bar{i}_{dr} ที่สมการ (ก.27) จะได้ค่าเส้นแรงแม่เหล็กเชื่อมโยงในฟังก์ชันของกระแสและตัวเหนี่ยวนำ ดังสมการที่ (ก.31)

$$\begin{aligned} \bar{\psi}_{ds} &= -\bar{L}_{ss} \bar{i}_{ds} + \bar{L}_m \left(\frac{\bar{\psi}_{dr} + \bar{L}_m \bar{i}_{ds}}{\bar{L}_{rr}} \right) \\ \therefore \bar{\psi}_{ds} &= \left(\frac{\bar{L}_m}{\bar{L}_{rr}} \right) \bar{\psi}_{dr} - \left(\bar{L}_{ss} - \frac{\bar{L}_m^2}{\bar{L}_{rr}} \right) \bar{i}_{ds} \end{aligned} \quad (ก.31)$$

เช่นเดียวกัน จะได้ค่าเส้นแรงแม่เหล็กเชื่อมโยงในแนวพิกัด q ดังสมการที่ (ก.32)

$$\bar{i}_{qr} = \frac{\bar{\psi}_{qr} + \bar{L}_m \bar{i}_{qs}}{\bar{L}_{rr}} \quad (ก.32)$$

แทนค่า

$$\begin{aligned} \bar{\psi}_{qs} &= -\bar{L}_{ss} \bar{i}_{qs} + \bar{L}_m \left[\frac{\bar{\psi}_{qr} + \bar{L}_m \bar{i}_{qs}}{\bar{L}_{rr}} \right] \\ \bar{\psi}_{qs} &= \left[\frac{\bar{L}_m}{\bar{L}_{rr}} \right] \bar{\psi}_{qr} - \left[\bar{L}_{ss} - \frac{\bar{L}_m^2}{\bar{L}_{rr}} \right] \bar{i}_{qs} \end{aligned} \quad (ก.33)$$

ก.5 สมการพีชคณิตของแรงดันไฟฟ้าที่ตัวอยู่กับที่

จากสมการที่อนุพันธ์ฟังก์ชันที่ตัวอยู่กับที่

$$\bar{v}_{ds} = p\bar{\psi}_{ds} + \frac{\omega}{\omega_b}\bar{\psi}_{qs} - \bar{R}_s\bar{i}_{ds}$$

$$\bar{v}_{qs} = p\bar{\psi}_{qs} - \frac{\omega}{\omega_b}\bar{\psi}_{ds} - \bar{R}_s\bar{i}_{qs}$$

เมื่อเราต้องการหาค่าสมการแรงดันในสถานะคงตัว(Steady State) เราจะได้สมการแรงดันรูปพีชคณิต (Algebraic Equation) ได้โดยให้ $p\bar{\psi}_{ds} = \frac{d}{dt}\bar{\psi}_{ds} = 0$ ทำให้หาค่าสมการที่ขั้วของตัวอยู่กับที่ในแนวแกน d และแกน q ได้ดังสมการที่ (ก.34) และสมการ (ก.35)

$$\bar{V}_{DS} = \bar{E}'_D - \bar{X}'\bar{I}_{QS} - \bar{R}_S\bar{I}_{DS} \quad (\text{ก.34})$$

$$\bar{E}'_D = \frac{\bar{\omega}_s\bar{L}_m}{\bar{\omega}_b\bar{L}_{rr}}\bar{\psi}_{qr} \quad ; \quad \bar{X}' = \frac{\bar{\omega}_s}{\bar{\omega}_b}\left[\bar{L}_{ss} - \frac{\bar{L}_m^2}{\bar{L}_{rr}}\right]$$

$$\bar{V}_{QS} = \bar{E}'_Q + \bar{X}'\bar{I}_{DS} - \bar{R}_S\bar{I}_{QS} \quad (\text{ก.35})$$

$$\bar{E}'_Q = \frac{\bar{\omega}_s\bar{L}_m}{\bar{\omega}_b\bar{L}_{rr}}\bar{\psi}_{dr} \quad ; \quad \bar{X}' = \bar{\omega}_s\left[\bar{L}_{ss} - \frac{\bar{L}_m^2}{\bar{L}_{rr}}\right]$$

ภาคผนวก ข.

การแปลงระบบเชิงเส้น (Linearization)

ข.1 การแปลงเป็นระบบเชิงเส้น

การแปลงเป็นระบบเชิงเส้น (Linearization) เป็นการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงระดับเล็กน้อยของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้เราสามารถพิจารณาให้การเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้นได้เพื่อให้ง่ายในการคำนวณและการหาคำตอบ จากสมการที่ (2.45) ถ้า x_0 เป็นเวกเตอร์สถานะ (State vector) และ u_0 เป็นเวกเตอร์อินพุต การหาค่าสมดุล (Equilibrium point) ซึ่งเป็นการหาสมรรถนะ (Performance) จะหาได้ดังต่อไปนี้ [38]

$$x'_0 = f(x_0)u_0 = 0 \quad (\text{ข.1})$$

เมื่อมีการกวนระบบ ค่าสถานะจะเปลี่ยนแปลง

$$\left. \begin{aligned} x &= x_0 + \Delta x \\ u &= u_0 + \Delta u \\ u &= u_0 + \Delta u \end{aligned} \right\} \quad (\text{ข.2})$$

เรากำหนดให้ Δ เป็นการแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \dot{x}_0 + \Delta \dot{x} \\ \therefore \dot{x} &= f[(x_0 + \Delta x), (u_0 + \Delta u)] \end{aligned} \quad (\text{ข.3})$$

การรบกวนเพียงเล็กน้อย ในฟังก์ชันของความไม่เป็นเชิงเส้น ของ $f(x, u)$ สามารถแสดงในรูปของอนุกรมเทเลอร์ ดังสมการที่ (2.48)

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= \dot{x}_{i,0} + \Delta \dot{x}_i = f_i[(x_0 + \Delta x), (u_0 + \Delta u)] \\ \therefore \dot{x}_i &= f_i(x_0, u_0) + \frac{\partial f_i}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial x_n} \Delta x_n + \frac{\partial f_i}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial u_r} \Delta u_r \end{aligned} \quad (\text{ข.4})$$

เมื่อ $\dot{x}_{i_0} = f_i(x_0, u_0)$, เราจะได้รับสมการเชิงเส้นดังสมการที่ (2.49)

$$\Delta \dot{x}_i = \frac{\partial f_i}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial x_n} \Delta x_n + \frac{\partial f_i}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial u_r} \Delta u_r \quad (\text{ข.5})$$

เมื่อจำนวน $i = 1, 2, \dots, n$ และจำนวน $j = 1, 2, \dots, m$

$$\Delta y_j = \frac{\partial g_j}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial g_j}{\partial x_n} \Delta x_n + \frac{\partial g_j}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial g_j}{\partial u_r} \Delta u_r \quad (\text{ข.6})$$

การแสดงสเททสเปซ ของสมการเชิงเส้นในรูปทั่วไป จะได้ดังสมการที่ (2.51)

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{x} &= A\Delta x + B\Delta u \\ \Delta y &= C\Delta x + D\Delta u \end{aligned} \right\} \quad (\text{ข.7})$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial u_r} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial u_r} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial g_m}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_m}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial u_r} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial g_m}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial g_m}{\partial u_r} \end{bmatrix}$$

ในสมการที่ (ข.7)

Δx = เวกเตอร์สถานะในขนาด n

Δy = เวกเตอร์เอาต์พุตในขนาด m

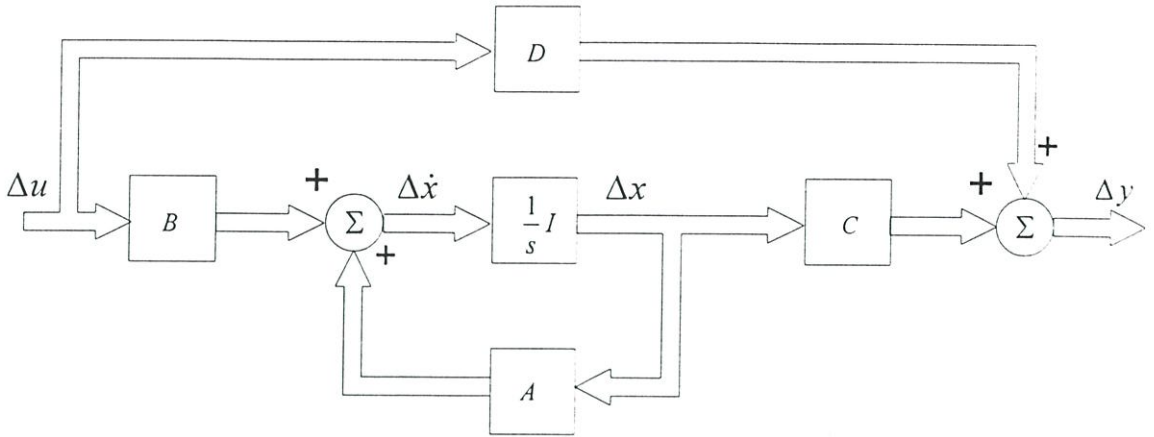
Δu = เวกเตอร์อินพุตในขนาด r

A, B, C, D = เมตริกของสัมประสิทธิ์ของ ตัวแปรสถานะ อินพุตและเอาต์พุต
ตามลำดับ

เมื่อทำการแปลงลาปลาซ ของสมการที่ (ข.7) จะได้รับสมการสถานะในรูปโดเมนความถี่
ดังสมการที่ (ข.8)

$$s\Delta x(s) - \Delta x(0) = A\Delta x(s) + B\Delta u(s) \quad (\text{ข.8})$$

$$\Delta y(s) = C\Delta x(s) + D\Delta u(s) \quad (\text{ข.9})$$



รูปที่ ข.1 โครงสร้างของสเตตสเปซ

จากรูปที่ ข.1 แสดงโครงสร้าง ของ สเตต สเปซ ของระบบในรูปเชิงเส้น และจะไปหาค่าของฟังก์ชันถ่ายโอน โดยกำหนดค่าเริ่มต้น $\Delta x(0)$ มีค่าเท่ากับศูนย์ การแสดงสมการสถานะ เพื่อหาค่า $\Delta X(s)$ และ $\Delta Y(s)$ จะแสดงได้ดังสมการที่ (ข.10)

$$(sI - A)\Delta X(s) = \Delta x(0) + B\Delta U(s)$$

$$\Delta X(s) = (sI - A)^{-1}[\Delta x(0) + B\Delta U(s)]$$

$$\therefore \Delta X(s) = \frac{\text{adj}(sI - A)}{\det(sI - A)}[\Delta x(0) + B\Delta U(s)] \quad (\text{ข.10})$$

ข.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบสัญญาณขนาดเล็ก โดยพิจารณาค่าไอเกน

การหาค่าเสถียรภาพแบบสัญญาณขนาดเล็กของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่แปลงเป็นระบบเชิงเส้น โดยหารากจากสมการคุณสมบัตินี้ ของระบบและหาค่าไอเกน จาก สเตตสเปซ A

$$A\phi = \lambda\phi \quad (\text{ข.11})$$

โดยที่

A = เมตริกขนาด $n \times n$

ϕ = เวกเตอร์ขนาด $n \times 1$

λ = ค่าไอเกน

การหาค่าไอเกนจะหาได้ในรูป

$$\begin{aligned} (A - \lambda I)\phi &= 0 \\ \det(A - \lambda I)\phi &= 0 \end{aligned} \tag{ข.12}$$

ค่าของไอเกนเวกเตอร์ของเมตริก A จะแสดงเป็น $\lambda = \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ ค่าไอเกน จะแสดงได้ ทั้งค่าจริงและค่าเชิงซ้อน ถ้าเป็นค่าเชิงซ้อน จะอยู่ในรูปของคู่ คอนจูเกต

- การหาค่าไอเกนเวกเตอร์ตัวขวา (Right-Eigen Vector)

$$A\phi_i = \lambda_i\phi_i \quad i = 1, 2, \dots, n$$

กำหนดให้

ϕ = ไอเกนเวกเตอร์ตัวขวา

ψ = ไอเกนเวกเตอร์ตัวซ้าย

$$\phi_i = \begin{bmatrix} \phi_{1i} \\ \phi_{2i} \\ \vdots \\ \phi_{ni} \end{bmatrix}$$

- การหาค่าไอเกนเวกเตอร์ตัวซ้าย (Left-Eigen Vector)

$$\psi_i A = \lambda_i\psi_i \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$\phi_j\phi_i = 0$$

$$\phi_i\phi_i = C_i$$

$$\phi_i\phi_i = 1$$

$$\psi = \phi_i^{-1}$$

ข.3 การหาค่าแฟกเตอร์ความสัมพันธ์ (Participation Factor)

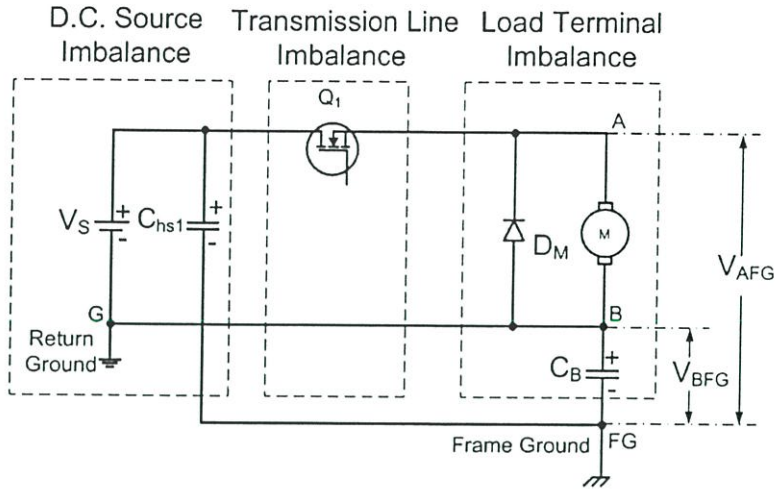
เป็นแฟกเตอร์ที่ใช้หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสถานะกับโหมดของค่าไอเกน โดยการ จัดคู่ค่าเวกเตอร์ไอเกนขวาและเวกเตอร์ไอเกนซ้าย เพื่อพิจารณาค่าความสัมพันธ์มากที่สุดจะมีค่าสูงสุดในแถวของเมตริกนั้น ดังแสดงค่า participation factor [38] ได้ดังนี้

$$P = [p_1 \quad p_2 \quad p_3 \quad \dots \quad p_n]$$

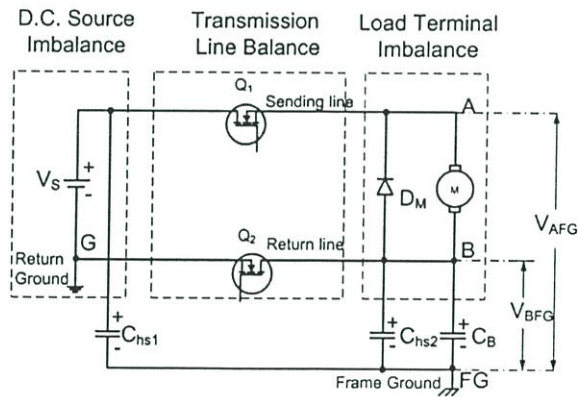
$$P_i = \begin{bmatrix} p_{1i} \\ p_{2i} \\ \cdot \\ \cdot \\ p_{ni} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{1i}\psi_{1i} \\ \phi_{2i}\psi_{2i} \\ \cdot \\ \cdot \\ \phi_{ni}\psi_{ni} \end{bmatrix}$$

ภาคผนวก ก.

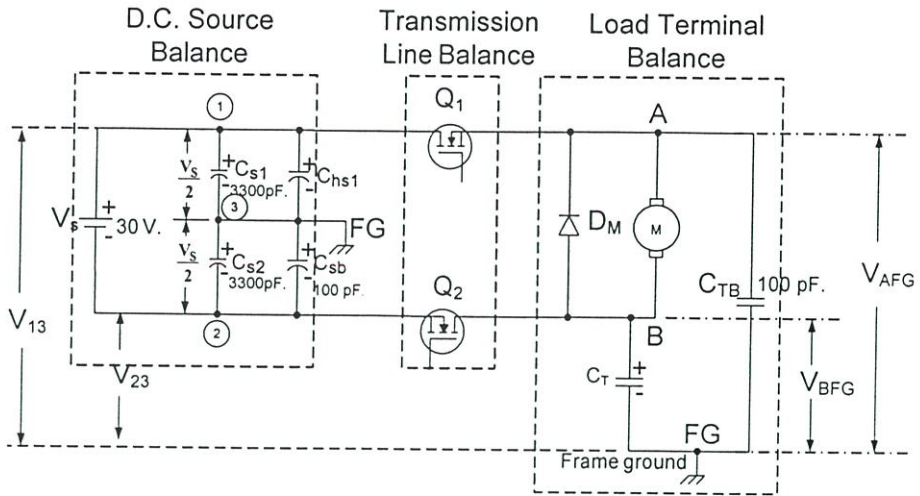
วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสมมูลที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์



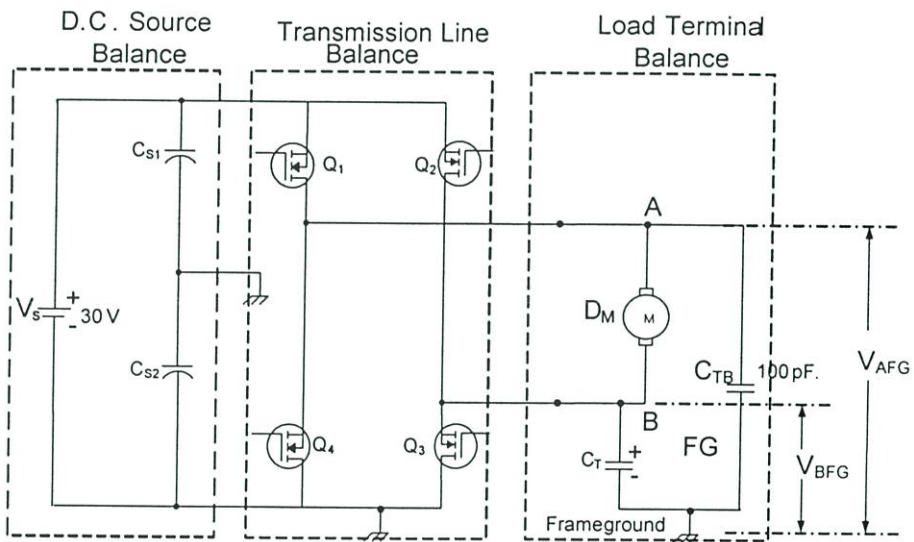
รูปที่ ก.1 คอนเวอร์เตอร์แบบสวิทซ์เดี่ยวไม่สมดุล



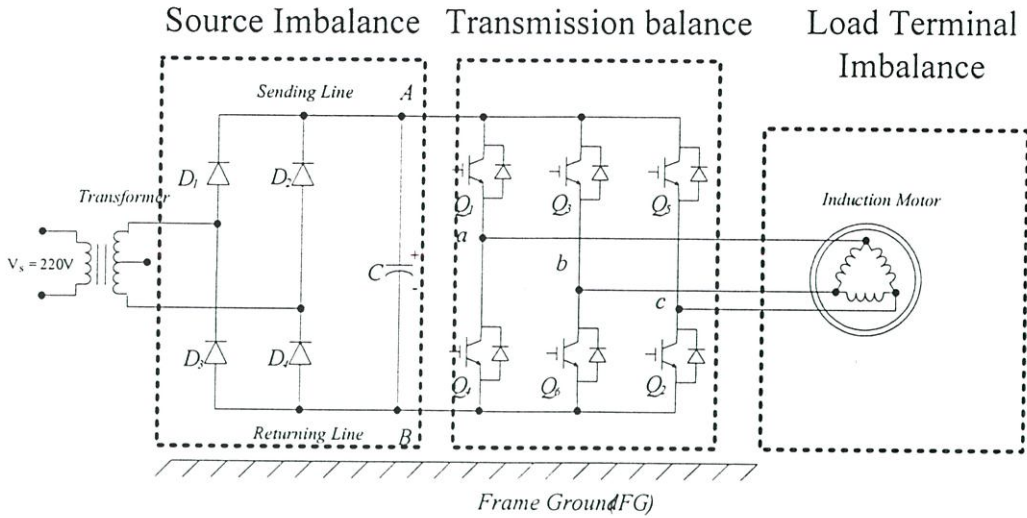
รูปที่ ก.2 คอนเวอร์เตอร์แบบสวิทซ์คู่แบบสมดุลแอกทีฟ



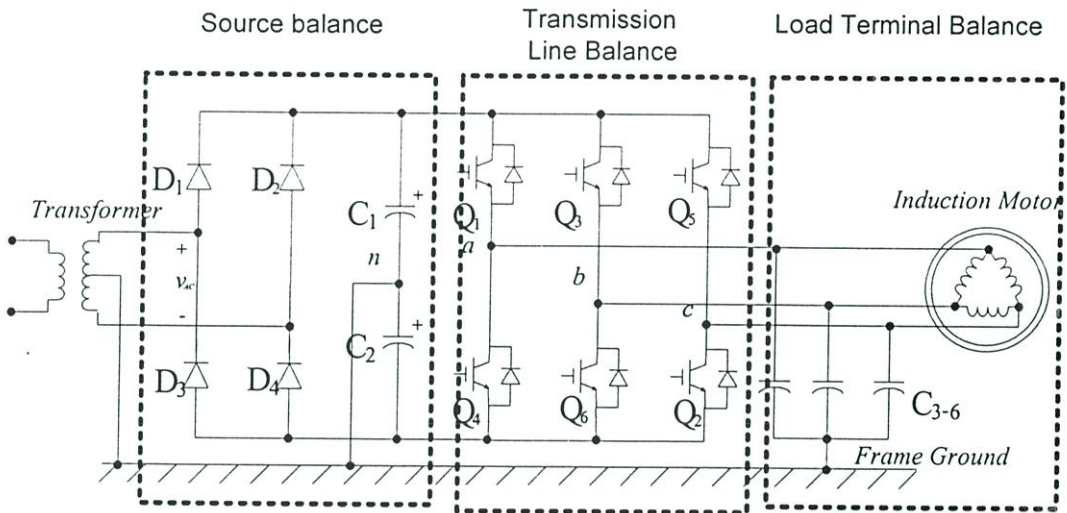
รูปที่ ค.3 คอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์คู่ปรับความสมดุลไฮบริดจ์



รูปที่ ค.4 คอนเวอร์เตอร์แบบสี่สวิทช์แบบปรับความสมดุลไฮบริดจ์

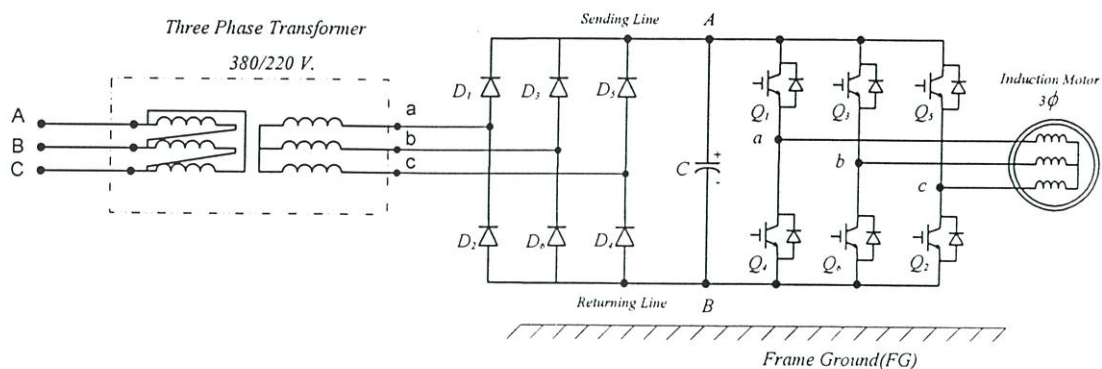


รูปที่ ค.5 คอนเวอร์เตอร์แบบ 6 สวิตช์ 1 เฟสอินพุท แบบไม่สมดุล

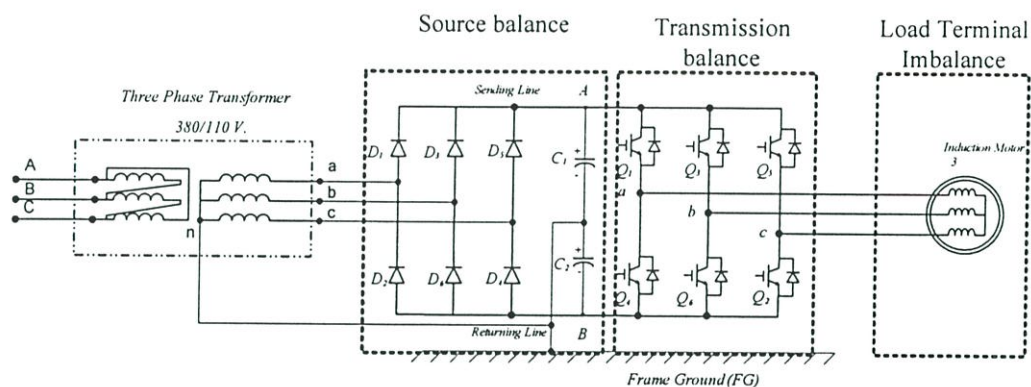


รูปที่ ค.6 คอนเวอร์เตอร์แบบ 6 สวิตช์ 1 เฟสอินพุท

แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ สมดุลสายเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรง และสมดุลโหลด

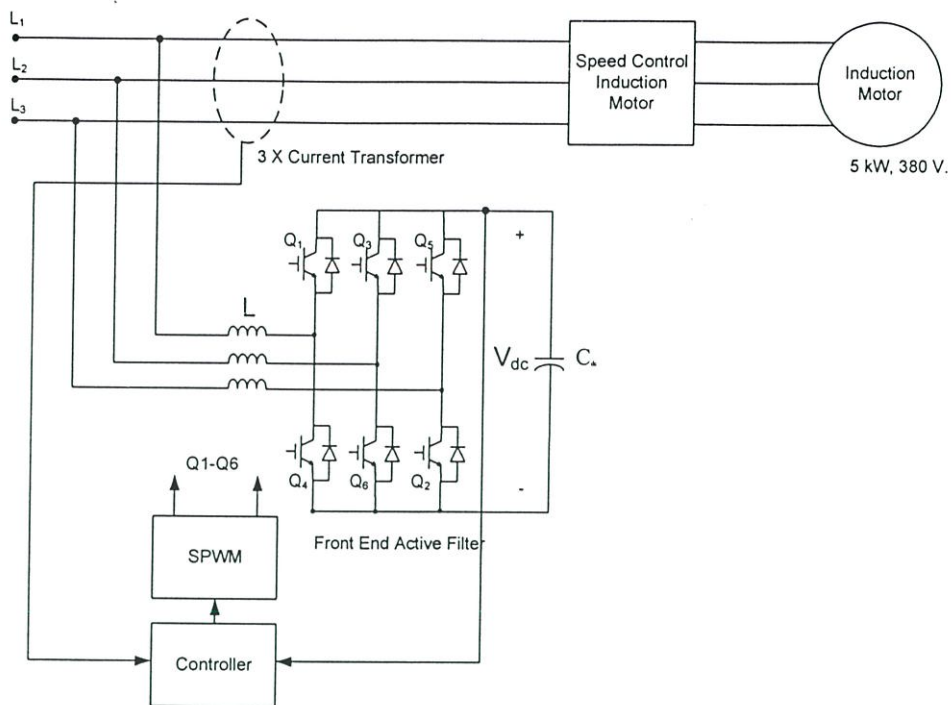


รูปที่ ค6 คอนเวอร์เตอร์แบบ 6 สวิตช์หรืออินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบไม่สมดุล

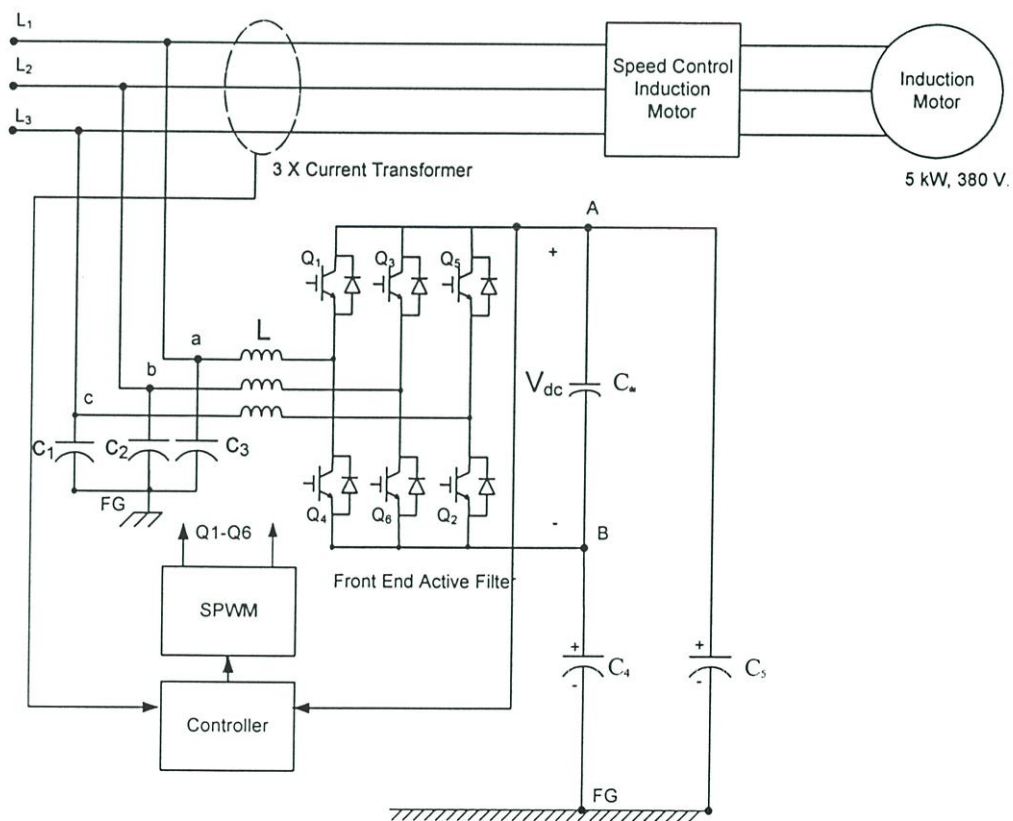


รูปที่ ค.7 คอนเวอร์เตอร์แบบ 6 สวิตช์หรืออินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบปรับสมดุล

แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ สมดุลสายเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรง และสมดุลโหลด



รูปที่ ค.8 คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบ VSC แบบไม่สมดุล



ปที่ ค.9 คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบ VSC แบบปรับสมดุลแหล่งจ่ายและสมดุลโหลด

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

1. Nimit Boonpirom, Kitti Paithoonwattanakij, "Static Voltage Stability Enhancement using FACTS," IPEC 2006 conference, vol.2, pp.711-715, 29 Nov-2 Dec., Singapore, 2005.
2. Nimit Boonpirom, Sathit Intajag, Kaison Aunchaleevarapan, Yothin Prempraneerach, and Shuichi Nitta, Reducing, "EMI in DC Motor Driver Circuit with RCD Snubber," ICEM2005, 27-29th July, Thailand, 2005.
3. Nimit Boonpirom, Kitti Paithoonwattanakij, "Power System Stabilizer Using Self-Tuning Fuzzy Controller," IASTED Energy, Thailand, 2006.
4. Nimit Boonpirom, Kitti Paithoonwattanakij, "Scale Factor self tuning Fuzzy controller," IASTED Energy, Spain, 2006.
5. Nimit Boonpirom, Kitti Paithoonwattanakij, "The Small Signal Stability Analysis of Doubly-Fed Induction Motor in Wind Farm System," (AUPEC 2006), 10th-13th Dec, Melbourne, Australia, 2006.
6. Nimit Boonpirom, Kitti Paithoonwattanakij, "Wind Farm Generator Control using Self-Tuning Fuzzy Controller," proc. of ICECE2006 (IEEE), pp.221- 224, 18th-21st Dec, Bangladesh, 2006.
7. Nimit Boonpirom, Yothin Prempraneerach, Kitti Paithoonwattanakij, Kraison Aunchaleevarapan, Shuichi Nitta, "A Study on the System Imbalance of the Single-Switch Converter for the Conductive Common Mode Noise Reduction," IEICE Transaction on Communication, vol.E90-B , no. 8, Aug.2007.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายนิมิต บุญภิรมย์
วัน เดือน ปีเกิด	8 ตุลาคม 2498 กรุงเทพมหานคร
ที่อยู่	42/19 หมู่ 3 ต. บ้านใหม่ อ. ปากเกร็ด จ. นนทบุรี
ประวัติการศึกษา	พ.ศ.2530 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตเทเวศน์ พ.ศ.2540 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ความชำนาญเฉพาะด้าน

- 1) ระบบไฟฟ้ากำลัง
- 2) อิเล็กทรอนิกส์กำลังและการแทรกซ้อนของแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวนำ
- 3) การควบคุมด้วยตัวควบคุมพีซี

ประวัติการทำงาน

พ.ศ.2520-พ.ศ.2532	รับราชการสังกัดกรมช่างโยธาทหารอากาศ
พ.ศ.2532-พ.ศ.2540	อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม
พ.ศ.2541-พ.ศ.2542	หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม
พ.ศ.2543-พ.ศ.2545	ผู้ช่วยคณบดีฝ่ายกิจการนักศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม
พ.ศ.2546-พ.ศ.2550	อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม