

การเปรียบเทียบวิธีการควบคุมความถี่และการควบคุมจำนวนพัลส์
ในเครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำความถี่สูง

COMPARISON OF FREQUENCY CONTROL AND PULSE
DENSITY MODULATION CONTROL IN HIGH FREQUENCY
INDUCTION MELTER

อาณัติ ถึงสาคร
ANAT THUNGSAKON

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-593-6

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

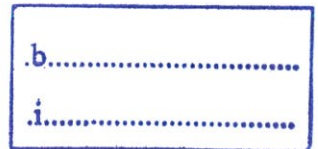
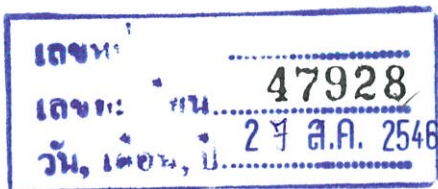
การเปรียบเทียบวิธีการควบคุมความถี่และการควบคุมจำนวนพัลส์
ในเครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำความถี่สูง

COMPARISON OF FREQUENCY CONTROL AND PULSE
DENSITY MODULATION CONTROL IN HIGH FREQUENCY
INDUCTION MELTER



อาณัติ ถึงสาคร

ANAT THUNGSAKON



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2546

ISBN 974-324-593-6

**COMPARISON OF FREQUENCY CONTROL AND PULSE
DENSITY MODULATION CONTROL IN HIGH FREQUENCY
INDUCTION MELTER**

ANAT THUNGSAKON

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

2003

ISBN 974-324-593-6

COPYRIGHT 2003

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRANG

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเปรียบเทียบวิธีการควบคุมความถี่และการควบคุมจำนวนพัลส์ในเครื่อง
หลอมโลหะเหนี่ยวนำความถี่สูง
COMPARISON OF FREQUENCY CONTROL AND PULSE DENSITY
MODULATION CONTROL IN HIGH FREQUENCY INDUCTION
MELTER

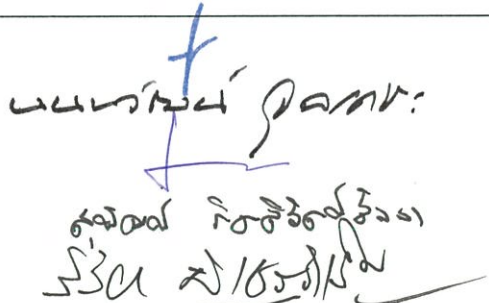
ชื่อนักศึกษา นายอานัต ถึงสาคร

รหัสประจำตัว 41061098

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิริยะ พิเชษฐจำเริญ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ร.อ.ดร.วิระเชษฐ ชั้นเงิน	
ดร.นนทวัฒน์ จุลเดชะ	
ผศ.ดร.ชรินทร์ บุญลักษณะสรณ์	
ดร.สุพัฒน์ กิตติรัตนัสัจจา	
รศ.ดร.วิริยะ พิเชษฐจำเริญ	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 21 พฤษภาคม 2546 เวลา 14.00เป็นต้นไป
สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-301)



วันที่.....30.....เดือน.....พฤษภาคม.....พ.ศ.....๒๕๔๖.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเปรียบเทียบวิธีการควบคุมความถี่และการควบคุมจำนวนพัลส์ในเครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำความถี่สูง	
นักศึกษา	นายอานัต	ถึงสาคร
รหัสประจำตัว	41061098	
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	
พ.ศ.	2546	
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. วิริยะ	พิเชษฐจำเริญ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการเปรียบเทียบ วิธีการควบคุม 2 ลักษณะ คือ วิธีการควบคุมด้วยการปรับความถี่ (FC) และวิธีการควบคุมด้วยการปรับจำนวนพัลส์ (PDM) ซึ่งทั้ง 2 วิธีได้ใช้ในการควบคุมค่ากำลังไฟฟ้าเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรม ในวงจรเครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำความถี่สูง รายละเอียดจะแบ่งออกเป็นส่วนๆ คือ ในบทที่ 2 จะกล่าวถึงหลักการเกิดความร้อนโดยใช้อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรม ส่วนในบทที่ 3 และ 4 จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ค่าตัวแปรต่าง ๆ ในวงจรหลอมโลหะ และหลักการทำงานของวงจร จากนั้นจะกล่าวถึงหลักการควบคุมด้วยการปรับจำนวนพัลส์ (PDM) ชนิดที่มีการกระจายพัลส์ออก และชนิดที่มีการรวมตัวของพัลส์เป็นกลุ่ม ตลอดจนกล่าวถึงหลักการควบคุมด้วยการปรับความถี่ (FC) เพื่อวัตถุประสงค์ในการเปรียบเทียบซึ่งกันและกัน นอกจากนี้ในบทที่ 8 ยังได้ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองของวิธีการควบคุมในแต่ละแบบ เช่น กำลังไฟฟ้าเอาท์พุท และประสิทธิภาพ เป็นต้น โดยใช้เครื่องทดสอบต้นแบบที่มีขนาด กำลังไฟฟ้า 3.3 kW ความถี่สวิตซ์ของอินเวอร์เตอร์ 70-80 kHz ซึ่งปรากฏว่าทั้งผลทางทฤษฎี และทางปฏิบัติ จะมีความสอดคล้องกัน โดยที่วงจรเครื่องหลอมโลหะสามารถทำงานได้ดี

Thesis Title	Comparison of Frequency Control and Pulse Density Modulation Control in High Frequency Induction Melter
Student	Mr. Anat Thungsakon
Student ID.	41061098
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2003
Thesis Advisor	Assoc.Prof. Dr. Viriya Phichetjamroen

ABSTRACT

This thesis presents the comparison of two kinds of control methods ; namely , Frequency Control (FC) and Pulse Density Modulation Control (PDM) which are both used to control the output power of the high-frequency series-resonant inverter in the induction melter circuit. The details are divided into various parts as follows : The principle of heat generation using high- frequency series resonant inverter is first analysed in chapter 2. The analysis of various circuit parameters and principle of circuit operation are also described in chapters 3 and 4. The principles of the Pulse Density Modulations (PDM) with distributed pulses and with concentrated pulses are described in chapters 5 and 6 , and the principle of frequency control are also explained in chapter 7 for comparison purpose. Moreover , in chapter 8 , the experimental results for each control method of the induction melter ; such as , output power and efficiency are shown compared to each other using the test prototype with a maximum power level of 3.3 kW , inverter switching frequency of 70-80 kHz and both the theoretical and experimental results presented in the thesis are in good agreement and the circuit can operate successfully.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาเกี่ยวกับการดำเนินการศึกษาและวิจัยจาก รศ.ดร.วิริยะ พิเชฐจำเริญ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในการอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ คุณ ชนนวรรณ ห้าวหาญ และ คุณ ศักดา พรหมเหมือน ที่ให้ความช่วยเหลือในการจัดทำวิทยานิพนธ์ และเพื่อนๆ พี่น้องๆ ทุกคนที่ไม่ได้กล่าวนามในที่นี้ที่ได้ช่วยเหลือทั้งร่างกายแรงใจจนงานวิจัยนี้สำเร็จไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และญาติพี่น้องที่เป็นผู้สนับสนุน และให้กำลังใจที่ตีมาตลอดเวลาจนสำเร็จสมความตั้งใจ

คุณค่าประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผู้วิจัยขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

อาณัติ ถึงสาคร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	XI
สารบัญรูป	XIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์	1
1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย	2
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 หลักการพื้นฐานการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำความถี่สูง ที่ใช้ในการหลอมโลหะ	5
2.1 บทนำ	5
2.2 หลักการพื้นฐานการเกิดความร้อน โดยการเหนี่ยวนำความถี่สูง	5
2.3 การวิเคราะห์วงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน	7
2.4 หลักการสร้างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าความถี่สูงเพื่อใช้ในการเหนี่ยวนำ ให้เกิดความร้อน	11
2.4.1 ภาคแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง	12
2.4.2 ภาคแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง	13
2.4.3 ภาคหม้อแปลงความถี่สูง	13
2.4.4 ชุดโหลดเบ้าหลอม	14
2.5 สรุป	15

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 หลักการพื้นฐานของวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมที่ใช้กับวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์.....	16
3.1 บทนำ	16
3.2 การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆในวงจรเรโซแนนซ์อนุกรม	16
3.3 การวิเคราะห์แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรม	20
3.4 การคำนวณหาค่าความต้านทานและอินดักแตนซ์สมมูลของวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรม	24
3.5 สรุป	28
บทที่ 4 การวิเคราะห์หลักการการทำงานของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ขณะขับโหลดเรโซแนนซ์อนุกรมที่มีการควบคุมด้วยหลักการปรับจำนวนพัลส์ PDM ในเครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำความถี่สูง	29
4.1 บทนำ	29
4.2 หลักการทำงาน	29
4.3 การวิเคราะห์แรงดัน กระแส และ กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต	32
4.4 สรุป	39
บทที่ 5 หลักการปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยวิธีการปรับจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจาย	40
5.1 บทนำ	40
5.2 หลักการปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยวิธีการปรับจำนวนพัลส์ PDM	
5.3 หลักการปรับควบคุมจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายสำหรับกรณีจำนวนไซเคิลต่อคาบเวลาเท่ากับ 1/16	42
5.3.1 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 1/16)	42
5.3.2 ค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในช่วง 1 คาบเวลา(กรณี 1/16).....	42
5.3.3 ลำดับขั้นตอนการทำงานของวงจร (Circuit Flow Diagram) ในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 1/16)	45

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

5.3.4 การเปรียบเทียบลักษณะคลื่นแรงดัน กระแส แลปสเปกตรัม จากการวัดและซิมูเลต(กรณี 1/16)	45
5.4 หลักการปรับควบคุมจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจาย สำหรับกรณีจำนวน ไชเกิดต่อคาบเวลาเท่ากับ 4/16.....	48
5.4.1 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 4/16)	48
5.4.2 ค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในช่วง 1 คาบเวลา(กรณี 4/16)	49
5.4.3 ลำดับขั้นตอนการทำงานของวงจร (Circuit Flow Diagram) ในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 4/16)	52
5.4.4 การเปรียบเทียบลักษณะคลื่นแรงดัน กระแส แลปสเปกตรัม จากการวัดและซิมูเลต (กรณี 4/16)	52
5.5 หลักการปรับควบคุมจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจาย สำหรับกรณีจำนวน ไชเกิดต่อคาบเวลาเท่ากับ 7/16	55
5.5.1 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ในช่วง 1 คาบเวลา(กรณี 7/16)	55
5.5.2 ค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 7/16)	55
5.5.3 ลำดับขั้นตอนการทำงานของวงจร (Circuit Flow Diagram) ในช่วง 1 คาบเวลา(กรณี 7/16).....	55
5.5.4 การเปรียบเทียบลักษณะคลื่นแรงดัน กระแส แลปสเปกตรัม จากการวัดและซิมูเลต (กรณี 7/16)	55
5.6 หลักการปรับควบคุมจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจาย สำหรับกรณีจำนวน ไชเกิดต่อคาบเวลา เท่ากับ 10/16	60
5.6.1 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 10/16)	60
5.6.2 ค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 10/16)	60
5.6.3 ลำดับขั้นตอนการทำงานของวงจร (Circuit Flow Diagram) ในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 10/16)	60
5.6.4 การเปรียบเทียบลักษณะคลื่นแรงดัน กระแส แลปสเปกตรัม จากการวัดและซิมูเลต (กรณี 10/16)	60

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

5.7	หลักการปรับควบคุมจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจาย	
	สำหรับกรณีจำนวนไซเคิลต่อคาบเวลา เท่ากับ 13/16	65
5.7.1	ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ	
	ในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 13/16)	65
5.7.2	ค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 13/16)	65
5.7.3	ลำดับขั้นตอนการทำงานของวงจร (Circuit Flow Diagram)	
	ในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 13/16)	65
5.7.4	การเปรียบเทียบลักษณะคลื่นแรงดัน กระแส แดบสเปกตรัม	
	จากการวัดและซิมูเลต (กรณี 13/16)	65
5.8	หลักการปรับควบคุมจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจาย	
	สำหรับกรณีจำนวนไซเคิลต่อคาบเวลา เท่ากับ 16/16	70
5.8.1	ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ	
	ในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 16/16)	70
5.8.2	ค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในช่วง 1 คาบเวลา(กรณี 16/16)	70
5.8.3	ลำดับขั้นตอนการทำงานของวงจร (Circuit Flow Diagram)	
	ในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 16/16)	70
5.8.4	การเปรียบเทียบลักษณะคลื่นแรงดัน กระแส แดบสเปกตรัม	
	จากการวัดและซิมูเลต (กรณี 16/16)	70
5.9	สรุป	75
บทที่ 6	หลักการปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยวิธีการปรับจำนวนพัลส์ PDM	
	ในรูปแบบการรวมตัวเป็นกลุ่ม.....	76
6.1	บทนำ	76
6.2	หลักการปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยวิธีการปรับจำนวนพัลส์ PDM	
	ในรูปแบบการรวมตัวเป็นกลุ่ม.....	76
6.3	หลักการปรับควบคุมจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมตัวเป็นกลุ่ม	
	สำหรับกรณีจำนวนไซเคิลต่อคาบเวลา เท่ากับ 1/16	78

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

6.3.1	ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ	
	ในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 1/16)	78
6.3.2	ค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 1/16)	78
6.3.3	ลำดับขั้นตอนการทำงานของวงจร (Circuit Flow Diagram)	
	ในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 1/16)	78
6.3.4	การเปรียบเทียบลักษณะคลื่นแรงดัน กระแส แลปสเปกตรัม	
	จากการวัดและซิมูเลต (กรณี 1/16)	78
6.4	หลักการปรับควบคุมจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมตัวเป็นกลุ่ม	
	สำหรับกรณีจำนวน ไซเกิลต่อคาบเวลา เท่ากับ 4/16	83
6.4.1	ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ	
	ในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 4/16)	83
6.4.2	ค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 4/16)	83
6.4.3	ลำดับขั้นตอนการทำงานของวงจร (Circuit Flow Diagram)	
	ในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 4/16)	84
6.4.4	การเปรียบเทียบลักษณะคลื่นแรงดัน กระแส แลปสเปกตรัม	
	จากการวัดและซิมูเลต (กรณี 4/16)	84
6.5	หลักการปรับควบคุมจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมตัวเป็นกลุ่ม	
	สำหรับกรณีจำนวน ไซเกิลต่อคาบเวลา เท่ากับ 7/16	89
6.5.1	ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ	
	ในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 7/16)	89
6.5.2	ค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 7/16)	89
6.5.3	ลำดับขั้นตอนการทำงานของวงจร (Circuit Flow Diagram)	
	ในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 7/16)	89
6.5.4	การเปรียบเทียบลักษณะคลื่นแรงดัน กระแส แลปสเปกตรัม	
	จากการวัดและซิมูเลต (กรณี 7/16)	89
6.6	หลักการปรับควบคุมจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมตัวเป็นกลุ่ม	
	สำหรับกรณีจำนวน ไซเกิลต่อคาบเวลา เท่ากับ 10/16	94
6.6.1	ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ	
	ในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 10/16)	94

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

6.6.2	ค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 10/16)	94
6.6.3	ลำดับขั้นตอนการทำงานของวงจร (Circuit Flow Diagram) ในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 10/16)	94
6.6.4	การเปรียบเทียบลักษณะคลื่นแรงดัน กระแส แอมป์สเปกตรัม จากการวัดและซิมูเลต (กรณี 10/16)	94
6.7	หลักการปรับควบคุมจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมตัวเป็นกลุ่ม สำหรับกรณีจำนวนไซเคิลต่อคาบเวลา เท่ากับ 13/16	99
6.7.1	ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 13/16)	99
6.7.2	ค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 13/16)	99
6.7.3	ลำดับขั้นตอนการทำงานของวงจร (Circuit Flow Diagram) ในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 13/16)	99
6.7.4	การเปรียบเทียบลักษณะคลื่นแรงดัน กระแส แอมป์สเปกตรัม จากการวัดและซิมูเลต (กรณี 13/16)	99
6.8	หลักการปรับควบคุมจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายรวมตัวเป็นกลุ่ม สำหรับกรณีจำนวนไซเคิลต่อคาบเวลา เท่ากับ 16/16	104
6.8.1	ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 16/16)	104
6.8.2	ค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 16/16)	104
6.8.3	ลำดับขั้นตอนการทำงานของวงจร (Circuit Flow Diagram) ในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 16/16)	104
6.8.4	การเปรียบเทียบลักษณะคลื่นแรงดัน กระแส แอมป์สเปกตรัม จากการวัดและซิมูเลต (กรณี 16/16)	104
6.9	สรุป	109
บทที่ 7	การวิเคราะห์หลักการการทำงานของวงจรฟลูบรีดจันอินเวอร์เตอร์ขณะขับโหลด เรโซแนนซ์อนุกรมที่มีการควบคุมด้วยหลักการปรับความถี่ FC ใน เครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำความถี่สูง.....	110
7.1	บทนำ	110

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
7.2 หลักการทำงาน	110
7.3 การวิเคราะห์ แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต	113
7.4 หลักการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยวิธีการปรับความถี่	118
7.5 สรุป	122
บทที่ 8 การทดสอบเครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำความถี่สูง.....	123
8.1 บทนำ	123
8.2 การทดสอบเครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำที่มีการควบคุม ด้วยวิธีการปรับจำนวนพัลส์ PDM	123
8.3 การทดสอบเครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำที่มีการควบคุม ด้วยวิธีการปรับความถี่ FC	126
8.4 สรุป	130
บทที่ 9 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	131
เอกสารอ้างอิง	132
ภาคผนวก	133
ประวัติผู้เขียน	155

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติต่าง ๆ ทางไฟฟ้าของวัสดุประเภทเหล็ก เงิน อลูมิเนียม และตะกั่วที่ความถี่ 70 kHz	11
5.1 ค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆเฉพาะในช่วง 1 คาบเวลาสำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายในกรณี 1/16 ไซเคิลต่อคาบเวลา	44
5.2 ค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆเฉพาะในช่วง 1 คาบเวลาสำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายในกรณี 4/16 ไซเคิลต่อคาบเวลา	51
5.3 ค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆเฉพาะในช่วง 1 คาบเวลาสำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายในกรณี 7/16 ไซเคิลต่อคาบเวลา	57
5.4 ค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆเฉพาะในช่วง 1 คาบเวลาสำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายในกรณี 10/16 ไซเคิลต่อคาบเวลา	62
5.5 ค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆเฉพาะในช่วง 1 คาบเวลาสำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายในกรณี 13/16 ไซเคิลต่อคาบเวลา	67
5.6 ค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆเฉพาะในช่วง 1 คาบเวลาสำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายในกรณี 16/16 ไซเคิลต่อคาบเวลา	72
6.1 ค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆเฉพาะในช่วง 1 คาบเวลาสำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมตัวเป็นกลุ่มในกรณี 1/16 ไซเคิลต่อคาบเวลา	80
6.2 ค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆเฉพาะในช่วง 1 คาบเวลาสำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมตัวเป็นกลุ่มในกรณี 4/16 ไซเคิลต่อคาบเวลา	86
6.3 ค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆเฉพาะในช่วง 1 คาบเวลาสำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมตัวเป็นกลุ่มในกรณี 7/16 ไซเคิลต่อคาบเวลา	91
6.4 ค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆเฉพาะในช่วง 1 คาบเวลาสำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมตัวเป็นกลุ่มในกรณี 10/16 ไซเคิลต่อคาบเวลา	96
6.5 ค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆเฉพาะในช่วง 1 คาบเวลาสำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมตัวเป็นกลุ่มในกรณี 13/16 ไซเคิลต่อคาบเวลา	101
6.6 ค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆเฉพาะในช่วง 1 คาบเวลาสำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมตัวเป็นกลุ่มในกรณี 16/16 ไซเคิลต่อคาบเวลา	106

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
7.1 ค่าแรงดัน $V_o(RMS.)$ กระแส $I_o(RMS.)$ ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า $\cos\theta$ และกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต P_o ที่ความถี่ 70 kHz 75 kHz และ 80 kHz (จากการทดลอง)	122
8.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าจากการควบคุมแบบ PDM และ FC ภายใต้เงื่อนไขกำลังไฟฟ้าอินพุตแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 3,300 วัตต์ และที่ PDM 2/16	129
8.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าจากการควบคุมแบบ PDM และ FC ภายใต้เงื่อนไขกำลังไฟฟ้าอินพุตแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 100 วัตต์ และที่ PDM 15/16	129
8.3 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เมื่อโลหะชิ้นงานต่างชนิดกัน.....	130

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	บล็อกแสดงแนวคิดของระบบ โดยรวมของเครื่องหลอมโลหะความถี่สูง 2
2.1	ลักษณะการไหลวนของกระแสไฟฟ้าสลับและเส้นแรงแม่เหล็กที่ขดลวดและชิ้นงาน 6
2.2	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของกระแสกับระยะความถี่จากผิวของชิ้นงาน 7
2.3	วงจรมุมลวดของขดลวดเหนี่ยวนำซึ่งพันรอบเบ้าหลอมที่ชิ้นงานเมื่อนำมาพิจารณา ในลักษณะเดียวกับหลักการของหม้อแปลงไฟฟ้า 8
2.4	วงจรมุมลวดของขดลวดเหนี่ยวนำที่พันรอบเบ้าหลอมที่บรรจุชิ้นงาน โดยพิจารณา จากด้านปฐมภูมิ 8
2.5	โครงสร้างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าความถี่สูงที่ใช้ในงานหลอมโลหะความถี่สูง 12
2.6	วงจรรภาคแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (Rectifier + DC Filter) 12
2.7	วงจรรภาคแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง (High-Frequency Inverter) 13
2.8	หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงใช้แกนเหล็กเฟอร์ไรท์14
2.9	ชุดเบ้าหลอมโลหะเหนี่ยวนำความถี่สูง14
3.1	โครงสร้างของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรม 17
3.2	ความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized อินพุทอิมพีแดนซ์ของวงจรเรโซแนนซ์อนุกรม กับความถี่ที่เปลี่ยนแปลงที่ค่า Q_L ต่างๆ 19
3.3	ค่ามุมเฟสของอินพุทอิมพีแดนซ์ของวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรม ต่อความถี่ที่เปลี่ยนแปลงที่ค่า Q_L ต่างๆ 19
3.4	วงจรมุมลวดของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรม 20
3.5	คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุทของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรม 20
3.6	Normalized กระแสไหลคของวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรม ต่อความถี่ที่เปลี่ยนแปลงที่ค่า Q_L ต่างๆ 23
3.7	Normalized กำลังไฟฟ้าเอาต์พุทของวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรม ต่อความถี่ที่เปลี่ยนแปลงที่ค่า Q_L ต่างๆ 24
3.8	เฟสเซอร์ไดอะแกรมของเรโซแนนซ์อนุกรม 25
3.9	ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาต์พุท V_o, I_o ที่ได้จากการทดลอง 26
3.10	ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาต์พุท V_o, I_o ที่ได้จากการซิมูเลต ..27
4.1	วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรมของเครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำความถี่สูง .. 29
4.2	โหมดการทำงานของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมด้วยการปรับลดจำนวนพัลส์ 30

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 คลื่นแรงดันและกระแสใน 2 ไชเกิดในกรณีที่มีแรงดันและไม่มีแรงดัน	31
4.4 วงจรสมมูล RLC รีโซแนนท์อนุกรม	32
4.5 วงจรสมมูล RLC รีโซแนนท์อนุกรมของโหมคการทำงานที่ 1 – 2	32
4.6 วงจรสมมูล RLC รีโซแนนท์อนุกรมของโหมคการทำงานที่ 3 – 4	35
4.7 วงจรสมมูล RLC รีโซแนนท์อนุกรมของโหมคการทำงานที่ 5 – 6	37
5.1 ลักษณะพัลส์ PDM แบบการกระจายในแต่ละรูปแบบจากจำนวนรวมทั้งสิ้น 16 รูปแบบ ...	41
5.2 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆเฉพาะในช่วง 1 คาบเวลา สำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายในกรณี 1/16 ไชเกิดต่อคาบเวลา	43
5.3 ลำดับขั้นตอนการทำงานของวงจร (Circuit Flow Diagram) ในช่วง 1 คาบเวลา สำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายในกรณี 1/16 ไชเกิดต่อคาบเวลา	46
5.4 ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและ การทดลองสำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายในกรณี 1/16 ไชเกิดต่อคาบเวลา	47
5.5 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆเฉพาะในช่วง 1 คาบเวลา สำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายในกรณี 4/16 ไชเกิดต่อคาบเวลา	50
5.6 ลำดับขั้นตอนการทำงานของวงจรในช่วง 1 คาบเวลา สำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายในกรณี 4/16 ไชเกิดต่อคาบเวลา	53
5.7 ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและ การทดลองสำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายในกรณี 4/16 ไชเกิดต่อคาบเวลา	54
5.8 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆเฉพาะในช่วง 1 คาบเวลา สำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายในกรณี 7/16 ไชเกิดต่อคาบเวลา.....	56
5.9 ลำดับขั้นตอนการทำงานของวงจรในช่วง 1 คาบเวลา สำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายในกรณี 7/16 ไชเกิดต่อคาบเวลา	58
5.10 ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและ การทดลองสำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายในกรณี 7/16 ไชเกิดต่อคาบเวลา	59
5.11 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆเฉพาะในช่วง 1 คาบเวลา สำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายในกรณี 10/16 ไชเกิดต่อคาบเวลา	61
5.12 ลำดับขั้นตอนการทำงานของวงจรในช่วง 1 คาบเวลา สำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายในกรณี 10/16 ไชเกิดต่อคาบเวลา	63

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.13 ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลองสำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายในกรณี 10/16 ไซเกิลต่อคาบเวลา.....	64
5.14 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆเฉพาะในช่วง 1 คาบเวลา สำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายในกรณี 13/16 ไซเกิลต่อคาบเวลา	66
5.15 ลำดับขั้นตอนการทำงานของวงจรในช่วง 1 คาบเวลา สำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายในกรณี 13/16 ไซเกิลต่อคาบเวลา	68
5.16 ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลองสำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายในกรณี 13/16 ไซเกิลต่อคาบเวลา....	69
5.17 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆเฉพาะในช่วง 1 คาบเวลา สำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายในกรณี 16/16 ไซเกิลต่อคาบเวลา	71
5.18 ลำดับขั้นตอนการทำงานของวงจรในช่วง 1 คาบเวลา สำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายในกรณี 16/16 ไซเกิลต่อคาบเวลา	73
5.19 ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลองสำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายในกรณี 16/16 ไซเกิลต่อคาบเวลา	74
6.1 ลักษณะพัลส์ PDM แบบการรวมเป็นกลุ่มในแต่ละรูปแบบ จากจำนวนรวมทั้งสิ้น 16 รูปแบบ	77
6.2 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆเฉพาะในช่วง 1 คาบเวลา สำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมเป็นกลุ่มในกรณี 1/16 ไซเกิลต่อคาบเวลา	79
6.3 ลำดับขั้นตอนการทำงานของวงจร (Circuit Flow Diagram) ในช่วง 1 คาบเวลา สำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมเป็นกลุ่มในกรณี 1/16 ไซเกิลต่อคาบเวลา	81
6.4 ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลองสำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมเป็นกลุ่มในกรณี 1/16 ไซเกิลต่อคาบเวลา	82
6.5 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆเฉพาะในช่วง 1 คาบเวลา สำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมเป็นกลุ่มในกรณี 4/16 ไซเกิลต่อคาบเวลา	85
6.6 ลำดับขั้นตอนการทำงานของวงจรในช่วง 1 คาบเวลา สำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมเป็นกลุ่มในกรณี 4/16 ไซเกิลต่อคาบเวลา	87
6.7 ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลองสำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมเป็นกลุ่มในกรณี 4/16 ไซเกิลต่อคาบเวลา	88

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.8 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆเฉพาะในช่วง 1 คาบเวลา สำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมเป็นกลุ่มในกรณี 7/16 ไซเกิลต่อคาบเวลา	90
6.9 ลำดับขั้นตอนการทำงานของวงจรในช่วง 1 คาบเวลา สำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมเป็นกลุ่มในกรณี 7/16 ไซเกิลต่อคาบเวลา	92
6.10 ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการ ทดลองสำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมเป็นกลุ่มในกรณี 7/16 ไซเกิลต่อคาบเวลา.....	93
6.11 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆเฉพาะในช่วง 1 คาบเวลา สำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมเป็นกลุ่มในกรณี 10/16 ไซเกิลต่อคาบเวลา	95
6.12 ลำดับขั้นตอนการทำงานของวงจรในช่วง 1 คาบเวลา สำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมเป็นกลุ่มในกรณี 10/16 ไซเกิลต่อคาบเวลา	97
6.13 ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการ ทดลองสำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมเป็นกลุ่มในกรณี 10/16 ไซเกิลต่อคาบเวลา	98
6.14 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆเฉพาะในช่วง 1 คาบเวลา สำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมเป็นกลุ่มในกรณี 13/16 ไซเกิลต่อคาบเวลา	100
6.15 ลำดับขั้นตอนการทำงานของวงจรในช่วง 1 คาบเวลา สำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมเป็นกลุ่มในกรณี 13/16 ไซเกิลต่อคาบเวลา	102
6.16 ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการ ทดลองสำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมเป็นกลุ่มในกรณี 13/16 ไซเกิลต่อคาบเวลา...	103
6.17 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆเฉพาะในช่วง 1 คาบเวลา สำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมเป็นกลุ่มในกรณี 16/16 ไซเกิลต่อคาบเวลา	105
6.18 ลำดับขั้นตอนการทำงานของวงจรในช่วง 1 คาบเวลา สำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมเป็นกลุ่มในกรณี 16/16 ไซเกิลต่อคาบเวลา	107
6.19 ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการ ทดลองสำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมเป็นกลุ่มในกรณี 16/16 ไซเกิลต่อคาบเวลา...	108
7.1 วงจรฟลูบริดจ์อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรมของเครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำความถี่สูง..	110
7.2 โหมมการทำงานของวงจรฟลูบริดจ์อินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมด้วยการปรับความถี่	111
7.3 คลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ใน 2 ไซเกิลของอินเวอร์เตอร์ ที่มีการควบคุมด้วยการปรับความถี่	112

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.4 วงจรสมมูล RLC เรโซแนนซ์อนุกรม	113
7.5 วงจรสมมูล RLC เรโซแนนซ์อนุกรมของโหมคการทำงานที่ 1-2	114
7.6 วงจรสมมูล RLC เรโซแนนซ์อนุกรมของโหมคการทำงานที่ 3-4	116
7.7 ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลต และการทดลองเมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่สวิทช์ 70 kHz	119
7.8 ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลต และการทดลองเมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่สวิทช์ 75 kHz	120
7.9 ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลต และการทดลองเมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่สวิทช์ 80 kHz	121
8.1 เครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำต้นแบบที่ใช้ในการทดสอบ	123
8.2 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ขณะปรับพัลส์แบบกระจาย	124
8.3 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ขณะปรับพัลส์แบบรวมเป็นกลุ่ม	124
8.4 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าอินพุตด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้าขณะปรับพัลส์ ในกรณีของ PDM แบบกระจายและแบบรวมกลุ่ม	125
8.5 ประสิทธิภาพเรกติไฟเออร์ – อินเวอร์เตอร์ขณะปรับพัลส์ในกรณี PDM แบบกระจายและแบบรวมกลุ่ม	125
8.6 กำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ในกรณีปรับความถี่ตั้งแต่ 70-80 kHz	127
8.7 กำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้าในกรณีปรับความถี่ตั้งแต่ 70-80 kHz ...	127
8.8 ประสิทธิภาพเรกติไฟเออร์ – อินเวอร์เตอร์ในกรณีปรับความถี่ตั้งแต่ 70-80 kHz	128

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในอดีตที่ผ่านมาการหลอมละลายโลหะในเบ้าหลอม โดยทั่วไปจะใช้วิธีการให้ความร้อนที่ตัวเบ้าหลอมด้วยเชื้อเพลิงประเภทน้ำมันเตา ซึ่งก่อให้เกิดมลภาวะในอากาศเป็นอย่างมาก รวมถึงคนงานที่ทำงานในโรงงานหลอมโลหะด้วยเนื่องจากต้องได้รับสารพิษจากสภาพมลภาวะทางอากาศดังกล่าว ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้คิดหาวิธีการหลอมละลายโลหะที่บรรจุอยู่ภายในเบ้าหลอมกราไฟต์ด้วยวิธีการใหม่โดยการป้อนแรงดันและกระแสไฟฟ้าความถี่สูงจากวงจรอินเวอร์เตอร์ไปยังขดลวดที่พันรอบตัวเบ้าหลอมเพื่อให้สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลวนที่ตัวชิ้นงาน โดยตรง จะเห็นว่าวิธีดังกล่าวนี้สามารถแก้ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นกับวิธีการในอดีตได้เป็นอย่างดีก็คือ สามารถลดมลภาวะในอากาศ เพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พลังงานเพื่อการหลอมละลายโลหะได้สูงขึ้น และสามารถหลอมละลายได้ในเวลารวดเร็ว

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

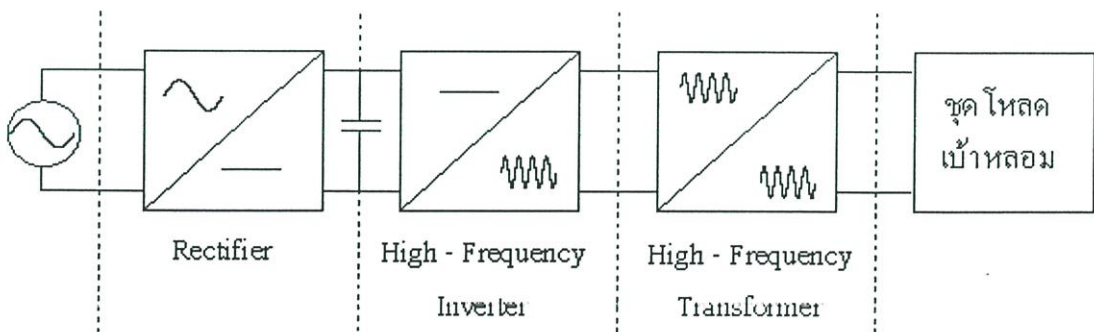
- 1.2.1 เพื่อให้เข้าใจถึงหลักการทำงานของการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง โดยมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากไลน์การไฟฟ้า 50 เฮิร์ตซ์ ผ่านวงจรเรกติไฟร์เออร์ไปยังวงจรอินเวอร์เตอร์เพื่อส่งผ่านหม้อแปลงความถี่สูงไปยังขดลวดของตัวเบ้าหลอมสู่ตัวชิ้นงานที่ต้องการหลอมละลายในที่สุด
- 1.2.2 เพื่อวิเคราะห์และพิจารณาลักษณะการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์อนุกรมความถี่สูงในขณะที่มีการจ่ายแรงดันพัลส์ PDM (Pulse Density Modulation) ในรูปแบบต่างๆซึ่งมีทั้งสิ้นในการนำเสนอทั้งหมด 16 รูปแบบ ในช่วงระหว่างที่มีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดขดเบ้าหลอมภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงต่างๆของวงจร
- 1.2.3 เพื่อวิเคราะห์และพิจารณาลักษณะการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์อนุกรมความถี่สูงในขณะที่มีการปรับความถี่ FC (Frequency Control) ในช่วงระหว่างที่มีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดขดเบ้าหลอมภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงต่างๆของวงจร
- 1.2.4 เพื่อให้สามารถคำนวณหาแถบสเปกตรัมของแรงดันคลื่นสแควร์ทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงเพื่อนำไปคำนวณหากระแส กำลังไฟฟ้า และค่าประสิทธิ

ภาพของวงจรได้ในที่สุด ผลที่ได้จากการคำนวณนี้ยังได้มีการยืนยันความถูกต้องด้วยการนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองอีกด้วย

- 1.2.5 เพื่อเปรียบเทียบคุณลักษณะการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์อนุกรมความถี่สูงที่มีการควบคุมด้วยการปรับจำนวนพัลส์ PDM และการปรับความถี่ FC ในการควบคุมกำลังไฟฟ้า

1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในงานหลอมละลายชิ้นงานที่เป็น โลหะประเภท Non-Ferromagnetic เช่น อลูมิเนียม และ ตะกั่วเป็นต้นนั้น จะต้องอาศัยหลักการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่สูงในระดับหลายสิบกิโลเฮิร์ตซ์ เพื่อให้เกิดกระแสไหลวนในตัวชิ้นงานด้วยระดับความลึกระดับหนึ่ง (Skin Depth) ในปริมาณกระแสที่สูงในขณะที่ต้องการแรงดันความถี่สูงในระดับต่ำนั้น จะต้องสร้างชุดอุปกรณ์ไฟฟ้าที่สามารถกำเนิดกระแสความถี่สูง แรงดันต่ำเพื่อเป็นแหล่งจ่ายป้อนให้กับชุดขดลวดที่พันรอบตัวเบ้าหลอมซึ่งมีชิ้นงานที่ต้องการให้เกิดการหลอมละลายบรรจุอยู่ อุปกรณ์ไฟฟ้างกล่าวมานี้จะประกอบด้วย อินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์ความถี่สูงในระดับ 70 kHz รวมเข้ากับชุดหม้อแปลงแกนเหล็กเฟอร์ไรต์ชนิด Step-down เพื่อจ่ายเอาท์พุทที่มีแรงดัน กระแส และความถี่ในระดับที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น โดยที่แหล่งจ่ายดีซีทางด้านอินพุทของอินเวอร์เตอร์นี้จะได้มาจากวงจร Rectifier Full-Bridge Diode ซึ่งรับแรงดันแหล่งจ่ายทางด้านอินพุทจากไลน์การไฟฟ้า 50 เฮิร์ตซ์ แนวคิดของระบบโดยรวมทั้งหมดสามารถแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมคร่าวๆได้ดังนี้



รูปที่ 1.1 บล็อกแสดงแนวคิดของระบบโดยรวมของเครื่องหลอมโลหะความถี่สูง

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

การวิเคราะห์อินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์ความถี่สูงชนิดแหล่งจ่ายแรงดันเพื่อใช้ในการหลอมโลหะในงานวิจัยนี้สามารถแบ่งเนื้อหาออกได้เป็นส่วนๆดังนี้

บทที่ 1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตงานวิจัย ขั้นตอนการศึกษา และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 จะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานของการเกิดความร้อนโดยการเหนี่ยวนำความถี่สูง และหลักการสร้างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าความถี่สูงเพื่อใช้ในการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อน และวิเคราะห์ในส่วนของวงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน

บทที่ 3 เป็นการวิเคราะห์วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์อนุกรม โดยจะวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และวิเคราะห์แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์อนุกรม

บทที่ 4 เป็นการคำนวณและวิเคราะห์เครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำความถี่สูง และวิเคราะห์การควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบปรับลดจำนวนพัลส์ PDM ในโหมดต่างๆ

บทที่ 5 หลักการปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยวิธีปรับจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจาย โดยจะมีการแสดงลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ใน 1 พีเรียด ของแต่ละโหมด ค่าของแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ใน 1 พีเรียด ของแต่ละโหมด ลำดับขั้นตอนการทำงานของวงจรในแต่ละโหมด และมีการเปรียบเทียบค่ากระแส แรงดันและแถบสเปกตรัมที่ได้จากการวัดจริงกับผลที่ได้จากการซิมูเลตด้วย

บทที่ 6 หลักการปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยวิธีปรับจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมเป็นกลุ่ม โดยจะมีการแสดงลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ใน 1 พีเรียด ของแต่ละโหมด ค่าของแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ใน 1 พีเรียด ของแต่ละโหมด ลำดับขั้นตอนการทำงานของวงจรในแต่ละโหมด และมีการเปรียบเทียบค่ากระแส แรงดันและแถบสเปกตรัมที่ได้จากการวัดจริงกับผลที่ได้จากการซิมูเลตด้วย

บทที่ 7 เป็นการคำนวณและวิเคราะห์เครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำความถี่สูง และวิเคราะห์การควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบปรับความถี่ FC ในโหมดต่างๆ ลำดับขั้นตอนการทำงาน ของวงจรในแต่ละโหมด และมีการเปรียบเทียบค่ากระแส แรงดันและแถบสเปกตรัมที่ได้จากการวัดจริงกับผลที่ได้จากการซิมูเลตด้วย

บทที่ 8 เป็นการทดสอบเครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำความถี่สูงที่มีการควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับลดจำนวนพัลส์ PDM และการปรับความถี่ FC เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของการควบคุมในแต่ละวิธี

บทที่ 9 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

สำหรับเครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำความถี่สูงต้นแบบที่ใช้ในการทดสอบมีพิกัดดังนี้

แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้า	220	โวลต์
ความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้า	50	เฮิรตซ์
กำลังไฟฟ้านำออก	3,300	วัตต์
ความถี่สวิทชิงของอินเวอร์เตอร์	70	กิโลเฮิรตซ์

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

- 1.5.1 ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับเครื่องหลอมโลหะความถี่สูง และ เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ
- 1.5.2 ศึกษาวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบต่างๆที่สามารถนำมาใช้กับเครื่องหลอมโลหะความถี่สูง
- 1.5.3 ออกแบบพัลส์ PDM ในรูปแบบต่างๆทั้งหมด 16 รูปแบบ
- 1.5.4 ทดสอบพร้อมทั้งเก็บข้อมูล เพื่อพัฒนาระบบให้ดีขึ้น
- 1.5.5 เก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผลให้สอดคล้องกับทฤษฎี
- 1.5.6 เขียนและพิมพ์วิทยานิพนธ์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำเครื่องต้นแบบของเครื่องหลอมโลหะ โดยหลักการเหนี่ยวนำด้วยความถี่สูงนี้ไปพัฒนาเพื่อใช้ในวงการอุตสาหกรรมหรือเพื่อการผลิต-จำหน่าย ทั้งภายในประเทศ และ ต่างประเทศ เป็นการสนับสนุนทางด้านอุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับงานหลอมโลหะของประเทศและเพื่อลดการนำเข้าจากต่างประเทศได้อีกทางหนึ่ง

บทที่ 2

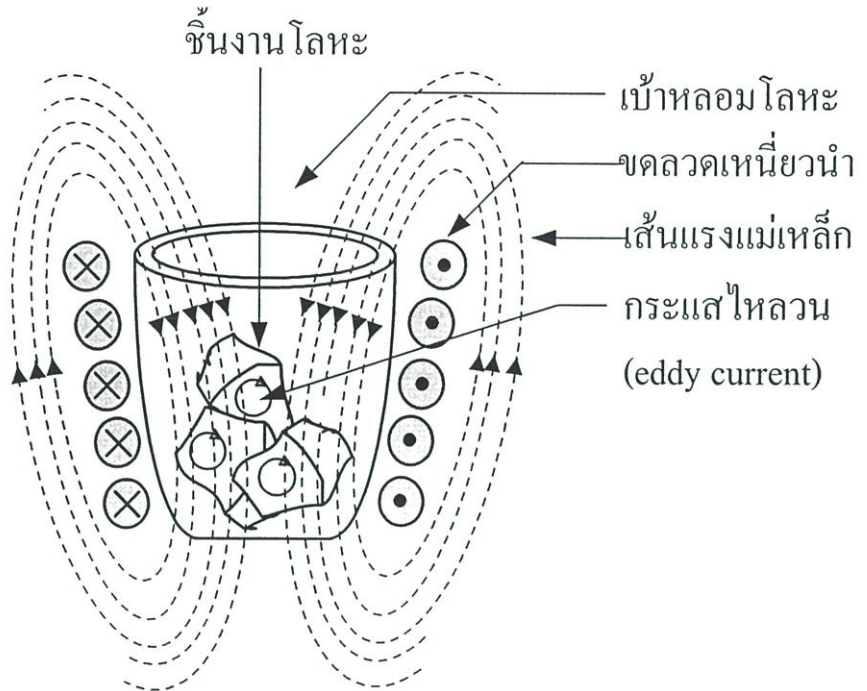
หลักการพื้นฐานการให้ความร้อน โดยการเหนี่ยวนำความถี่สูงที่ใช้ในการหลอมโลหะ

2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานที่จำเป็นต้องเข้าใจในขั้นแรกสุดเกี่ยวกับการเกิดความร้อนที่ตัวชิ้นงานชนิดโลหะที่ต้องการให้เกิดการหลอมละลายโดยอาศัยหลักการการเหนี่ยวนำทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยความถี่สูงในระดับ 70 kHz กระแสและแรงดันที่ใช้ในการหลอมละลายชิ้นงานซึ่งบรรจุในภาชนะเบ้าหลอมกราฟไฟต์อยู่ในระดับ 300 A 15 V โดยเนื้อหาหลักในบทนี้จะเกี่ยวกับการให้ข้อมูลพื้นฐานการเกิดความร้อน โดยการเหนี่ยวนำความถี่สูง การวิเคราะห์วงจรสมมูลและหลักการสร้างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าความถี่สูงเพื่อใช้ในการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนที่ตัวชิ้นงานขณะอยู่ในกระบวนการหลอมละลายซึ่งรายละเอียดต่างๆจะได้นำเสนอในอันดับถัดไปดังนี้

2.2 หลักการพื้นฐานการเกิดความร้อนโดยการเหนี่ยวนำความถี่สูง

การให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำเพื่อใช้ในการหลอมโลหะ[1] คือกระบวนการให้ความร้อนในวัสดุตัวนำไฟฟ้าโดยความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดมาจากการเหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงให้ไหลกลับไปกลับมาภายในตัวชิ้นงานโลหะดังรูป 2.1 ซึ่งมีค่าความต้านทานภายในตัวชิ้นงานทำให้เกิดความร้อนขึ้นในบริเวณที่มีกระแสไหล โดยจะมีหลักการพิจารณาเช่นเดียวกับหม้อแปลง นั่นคือเมื่อป้อนกระแสสลับความถี่สูงให้กับขดลวดเหนี่ยวนำที่พันอยู่รอบเบ้าหลอมที่บรรจุชิ้นงานโลหะ ขดลวดเหนี่ยวนำจะสร้างสนามแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง(Magnetic Flux) กับชิ้นงานโลหะนี้ ซึ่งสนามแม่เหล็กที่เกี่ยวคล้องกับชิ้นงานโลหะจะทำให้เกิดกระแสไหลวน(Eddy Current) โดยกระแสดังกล่าวจะไหลในลักษณะเป็นเส้นทางปิด ทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนเป็นผลให้เกิดความร้อนขึ้นที่ตัวชิ้นงานโลหะ และเนื่องจากเป็นการไหลของไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงดังนั้นจึงเกิดผลของ Skin Effect ซึ่งจะทำให้กระแสไหลเฉพาะบริเวณผิวด้านนอกของชิ้นงานโลหะ โดยความลึกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในตัวชิ้นงานนี้จะขึ้นกับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ไหล ซึ่งจะเป็นความถี่เดียวกับความถี่ที่ป้อนเข้าไปในขดลวดที่พันรอบเบ้าหลอม ดังนั้นปริมาณกระแสที่ไหลในแท่งเหล็กจะเท่ากับปริมาณกระแสในขดลวดเหนี่ยวนำคู่กับจำนวนรอบของขดลวดเดียวกันนี้



รูปที่ 2.1 ลักษณะการไหลวนของกระแสไฟฟ้าสลับและเส้นแรงแม่เหล็กที่ขดลวดและถังงาน

สำหรับองค์ประกอบของการเกิดความร้อนโดยการเหนี่ยวนำที่ความถี่สูงนี้จะประกอบไปด้วยความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ คือ ความถี่ (Frequency : f) สภาพความต้านทานไฟฟ้า (Resistivity : ρ) และ ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability : μ) ซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์กับค่าความลึกผิวของการไหลวนของกระแส (Skin depth : δ) ได้โดยสมการ (2.1) ดังนี้[1]

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu_0 \mu_r f \pi}} \quad (2.1)$$

เมื่อ δ = ค่าความลึกผิว (m)

ρ = สภาพความต้านทานไฟฟ้าของชิ้นงาน ($\Omega \cdot m$)

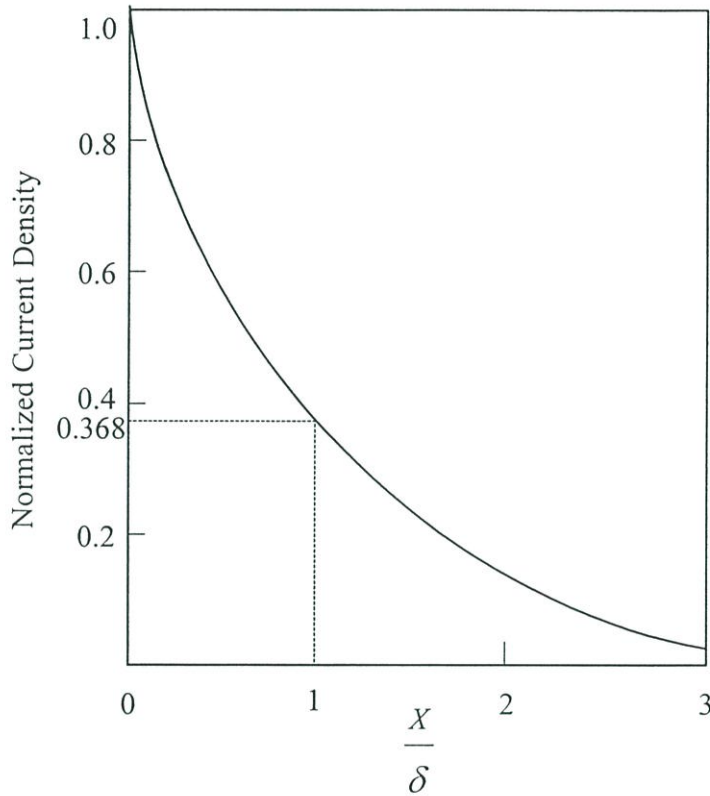
f = ความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับที่ป้อน (Hz)

μ_r = ค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ของชิ้นงาน

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m

จากสมการ (2.1) จะเห็นว่าเมื่อความถี่สูงขึ้นจะส่งผลให้กระแสไหลวนไหลลึกลงไปจากบริเวณผิวชิ้นงานได้น้อยลงทั้งนี้เนื่องจากค่าความลึกของการไหลวนของกระแสไหลวน (Current depth : δ)

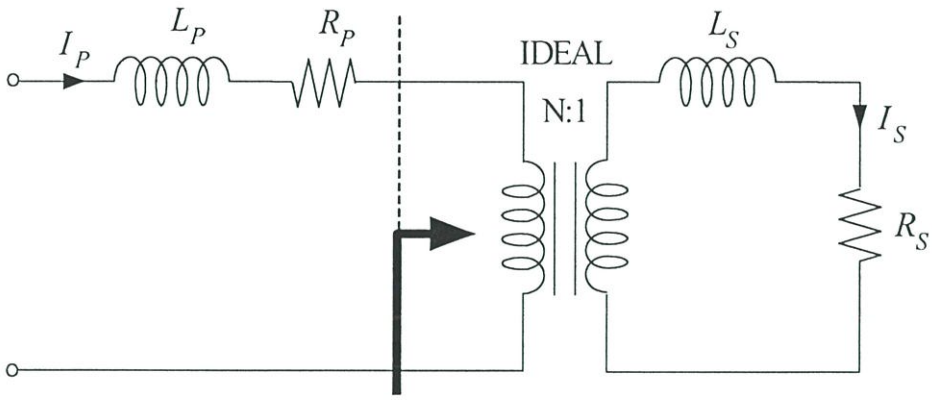
มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความถี่ จากรูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของกระแสที่แปรเปลี่ยนตามระยะความลึกจากผิวของชิ้นงาน ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระแสมีความหนาแน่นสูงสุดที่บริเวณผิวด้านนอกของตัวชิ้นงานและจะมีค่าลดลงเมื่อระยะความลึกจากผิว X ; มีค่าเพิ่มมากขึ้น[1]



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของกระแสกับระยะความลึกจากผิวของชิ้นงาน

2.3 การวิเคราะห์ห้วงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน

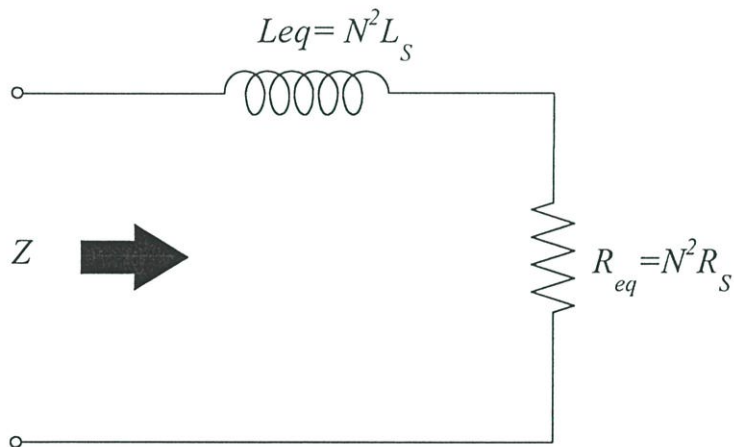
เนื่องจากขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนมีหลักการใกล้เคียงกับหลักการในหม้อแปลงไฟฟ้าโดยมีขดลวดเหนี่ยวนำเป็นขดปฐมภูมิและชิ้นงานซึ่งถูกเกี่ยวข้องกับสายแรงแม่เหล็กจากขดลวดปฐมภูมิจะมีลักษณะเหมือนเป็นขดทุติยภูมิที่มีจำนวนรอบเพียง 1 รอบ โดยมีค่าอินดักแตนซ์ L_S และค่าความต้านทาน R_S เป็นค่าความเหนี่ยวนำและความต้านทานของชิ้นงาน และมีค่าอินดักแตนซ์ L_P และค่าความต้านทาน R_P เป็นค่าความเหนี่ยวนำและค่าความต้านของขดลวดเหนี่ยวนำด้านปฐมภูมิซึ่งเมื่อเขียนแสดงด้วยวงจรจะได้ดังรูปที่ 2.3 โดยที่วงจรสมมูลที่ได้นี้อยู่ภายใต้เงื่อนไขว่ากระแสแมกนีไตซิง I_M ซึ่งไหลผ่านแมกนีไตซิงอินดักแตนซ์ L_M มีค่าน้อยมากจนไม่นำมาพิจารณาในวงจร



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำซึ่งพันรอบเบ้าหลอมที่ขึ้นงานเมื่อนำมาพิจารณาในลักษณะเดียวกับหลักการของหม้อแปลงไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.3 เมื่อย้ายค่าพารามิเตอร์ต่างๆทางด้านทุติยภูมิไปรวมกับทางด้านปฐมภูมิ สามารถเขียนวงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำที่พันรอบเบ้าหลอมที่บรรจุชิ้นงานได้ใหม่ดังรูปที่

2.4



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำที่พันรอบเบ้าหลอมที่บรรจุชิ้นงานโดยพิจารณาจากด้านปฐมภูมิ

จากรูปที่ 2.4 แสดงวงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำที่พันรอบเบ้าหลอมซึ่งบรรจุชิ้นงานซึ่งประกอบด้วย ค่าอินดักแตนซ์สมมูล L_{eq} และค่าความต้านทานสมมูล R_{eq} สามารถหาค่าได้ดังดังนี้

$$R_{eq} = R_p + N^2 R_s \quad (2.2)$$

$$L_{eq} = L_p + N^2 L_s \quad (2.3)$$

แทนค่า $R'_p = N^2 R_s$ และ $L'_p = N^2 L_s$ จะได้

$$R_{eq} = R_p + R'_p \quad (2.4)$$

$$L_{eq} = L_p + L'_p \quad (2.5)$$

เมื่อ N คือ จำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำที่พันรอบเบ้าหลอม

R_p, R_s คือ ความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำและของโหลดชิ้นงานตามลำดับ

L_p, L_s คือ ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลขดลวดเหนี่ยวนำและของโหลดชิ้นงานตามลำดับ

R'_p คือ ความต้านทานของโหลดชิ้นงานซึ่งพิจารณาจากด้านปฐมภูมิ

L'_p คือ ค่าความเหนี่ยวนำของโหลดชิ้นงานซึ่งพิจารณาจากด้านปฐมภูมิ

จากรูปที่ 2.3 จะสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดเหนี่ยวนำได้ดังสมการ

$$P_p = I_p^2 R_p \quad (2.6)$$

ในทำนองเดียวกันก็จะสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นที่โหลดชิ้นงานได้ดังสมการ

$$P_s = I_s^2 R_s \quad (2.7)$$

และเมื่อพิจารณาจากด้านปฐมภูมิโดยที่ $I_s = N I_p$ จะได้

$$P_s = I_p^2 R'_p \quad (2.8)$$

เมื่อ I_p คือ กระแสในขดลวดเหนี่ยวนำ

I_s คือ กระแสในโหลดชิ้นงาน

จากสมการ (2.6) – (2.8) สามารถหาค่าประสิทธิภาพของโหลดชิ้นงานได้ดังนี้

$$\eta = \frac{P_s}{P_s + P_p} \quad (2.9)$$

แทนสมการ (2.6) และ (2.8) ในสมการที่ (2.9) จะได้

$$= \frac{I_p^2 R'_p}{I_p^2 R'_p + I_p^2 R_p} \quad (2.10)$$

$$= \frac{R'_p}{R'_p + R_p} \quad (2.11)$$

$$\eta = \frac{1}{1 + (R_p / R'_p)} \quad (2.12)$$

เนื่องจากผลของ Skin Depth การไหลวนของกระแสจะเกิดเฉพาะที่บริเวณผิวของขดลวดเหนี่ยวนำและที่บริเวณผิวของชิ้นงานดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยมีความลึกเท่ากับ δ ดังนั้นในการหาค่าความต้านทาน R_p และ R_s ที่บริเวณผิวสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$R_p = \frac{\rho_p}{\delta_p} = \sqrt{\rho_p \mu_o \mu_{rp} f \pi} \quad (2.15)$$

และ $R_s = \frac{\rho_s}{\delta_s} = \sqrt{\rho_s \mu_o \mu_{rs} f \pi} \quad (2.16)$

เมื่อ δ_p คือ ความลึกผิวของขดลวดเหนี่ยวนำ

δ_s คือ ความลึกผิวของชิ้นงาน

ρ_p คือ สภาพต้านทานไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำ

ρ_s คือ สภาพต้านทานไฟฟ้าของชิ้นงาน

ดังนั้นจากสมการ (2.16) จะเห็นได้ว่าความต้านทานของชิ้นงาน R_s จะแปรผันโดยตรงกับสภาพความต้านทานทางไฟฟ้า ρ_s ของชิ้นงาน ค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ μ_{rs} และความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับ f ที่ป้อนจากอินเวอร์เตอร์

จากสมการ (2.1) และ (2.16) สามารถนำมาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆทางไฟฟ้าของวัสดุชิ้นงานชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการหลอมได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติต่างๆทางไฟฟ้าของวัสดุประเภทเหล็ก เงิน อลูมิเนียม และตะกั่วที่ความถี่ 70 kHz

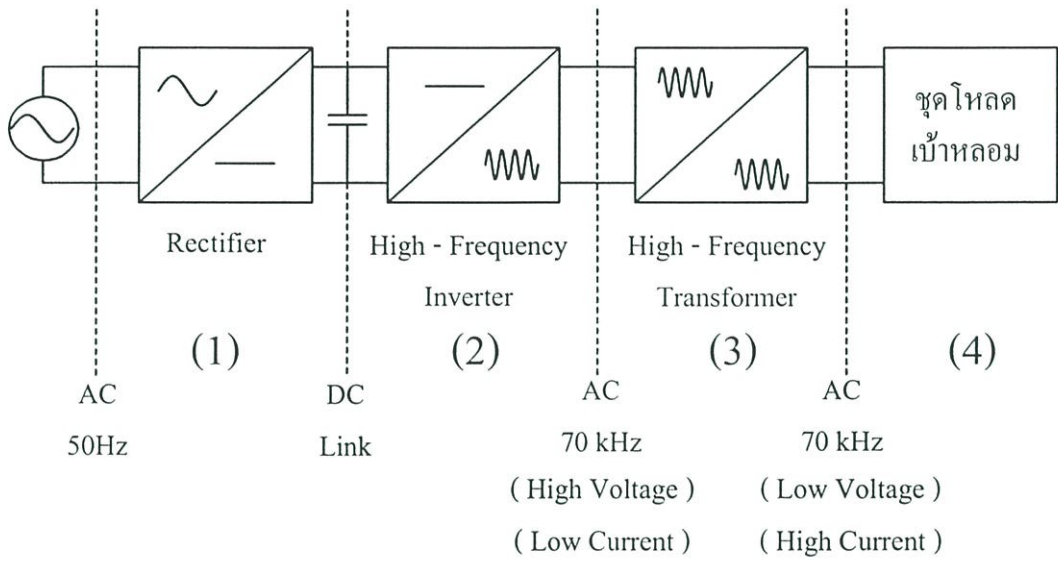
Material	Resistivity ρ_s 20°C [1] (Ωm)	Relative permeability (μ_{rs})	Skin depth δ_s (mm.)	Surface resistivity R_s (Ω)	Melting Point [1] (°C)
Iron	9.71×10^{-8}	100	0.0592	1.6402×10^{-3}	1538
Silver*	1.59×10^{-8}	1	0.2398	0.0663×10^{-3}	962
Aluminium*	2.65×10^{-8}	1	0.3096	0.0856×10^{-3}	660
Lead*	20.65×10^{-8}	1	0.8644	0.2383×10^{-3}	327

*ชนิดโลหะที่ใช้ในการหลอมในโรงงานนี้

2.4 หลักการสร้างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าความถี่สูงเพื่อใช้ในการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อน

ในปัจจุบันการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี และได้มีการพัฒนา มาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน โดยในส่วนของหลักการที่นำเสนอนี้จะอาศัยหลักการเหนี่ยวนำความถี่สูงโดยใช้วงจรรินเวอร์เตอร์ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในการสร้างคลื่นแรงดันและกระแสความถี่สูงเพื่อนำไปใช้ในการเหนี่ยวนำเพื่อทำให้เกิดความร้อน ซึ่งโครงสร้างของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าความถี่สูงเพื่อใช้ในการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.5 โดยจะมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้ คือ

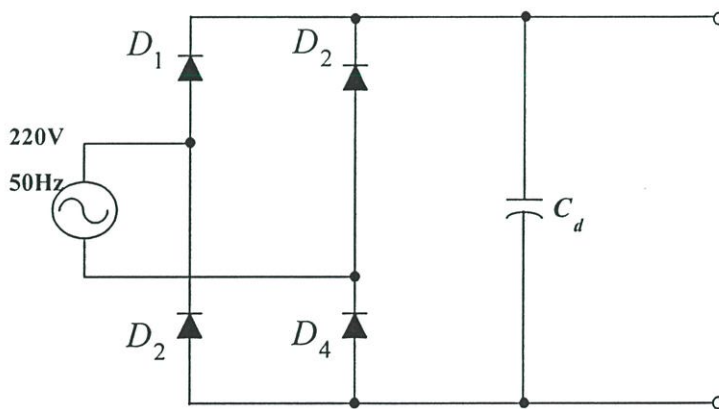
- (1) ภาคแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (Rectifier + DC Filter)
- (2) ภาคแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง (High-Frequency Inverter)
- (3) ภาคหม้อแปลงความถี่สูง (High - Frequency Transformer)
- (4) ภาคชุดโหลดเบ้าหลอม



รูปที่ 2.5 โครงสร้างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าความถี่สูงที่ใช้ในงานหลอมโลหะความถี่สูง

2.4.1 ภาคแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

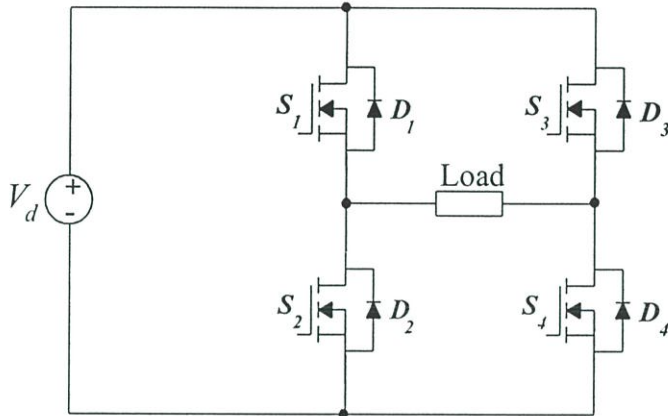
ในส่วนนี้จะเป็นวงจรที่ภาคกำลังความถี่ต่ำซึ่งจะเป็นส่วนแรกของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าความถี่สูงที่ใช้ในการเหนี่ยวนำ โดยจะประกอบด้วยวงจรเรกติไฟเออร์และดีซีฟิลเตอร์โดยจะรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ จากกริดไฟฟ้าและทำการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อป้อนให้กับอินเวอร์เตอร์ ซึ่งมีวงจรมีดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 วงจรภาคแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (Rectifier + DC Filter)

2.4.2 ภาคแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง

ในส่วนนี้ประกอบไปด้วยวงจรรินเวอร์เตอร์และหม้อแปลงความถี่สูงซึ่งมีหน้าที่หลักคือจ่ายกำลังไฟฟ้าความถี่สูงให้แก่โหลดทางด้านเอาต์พุต โดยในวงจรรินเวอร์เตอร์นั้นจะมีด้วยกันอยู่หลายแบบแต่ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะวงจรรินเวอร์เตอร์ชนิดฟูลบริดจ์เท่านั้น เนื่องจากเป็นวงจรที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งมีลักษณะการต่อวงจรดังรูปที่ 2.7

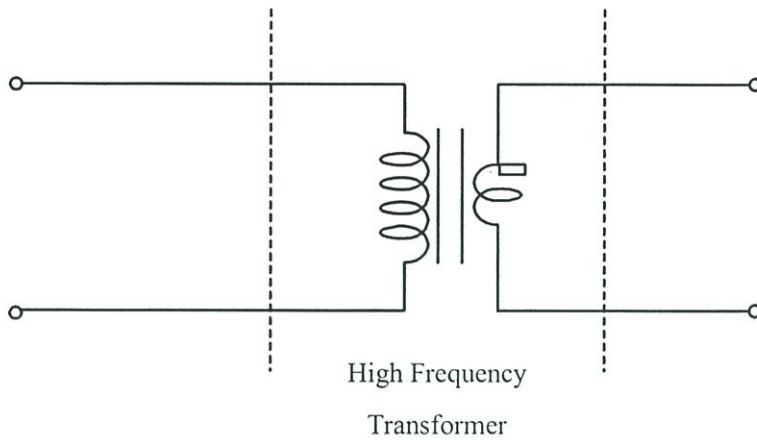


รูปที่ 2.7 วงจรภาคแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง (High-Frequency Inverter)

จากรูปที่ 2.7 จะเห็นได้ว่าวงจรจะประกอบไปด้วยสวิตช์ทั้งหมด 4 ตัว นั่นคือ สวิตช์ S_1 , S_2 , S_3 และ S_4 โดยจะมีลักษณะการทำงานดังนี้คือ คู่สวิตช์ S_1 , S_4 และ S_2 , S_3 จะทำงาน ON-OFF สลับกันไปเพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง

2.4.3 ภาคหม้อแปลงความถี่สูง

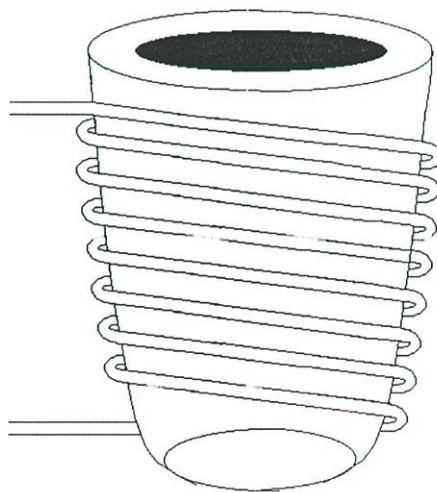
ในส่วนนี้จะเป็นส่วนของวงจรหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงซึ่งประกอบด้วยจำนวนขดลวดทองแดงที่เกลียวทางด้านปฐมภูมิ และขดลวดในลักษณะของท่อทองแดงทางด้านทุติยภูมิ เพื่อให้สามารถระบายความร้อนด้วยน้ำผ่านภายในท่อทองแดง โดยที่ด้านปฐมภูมิจะมีจำนวนรอบของขดลวดสูงกว่าทางด้านทุติยภูมิในอัตราส่วน 20:1 ซึ่งจะทำให้ได้กระแสทางด้านทุติยภูมิประมาณ 300 แอมป์ ในขณะที่กระแสทางด้านปฐมภูมิหรือนั่นก็คือกระแสทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์จะมีขนาดประมาณ 15 แอมป์ หรือที่แรงดันทางด้านทุติยภูมิจะมีค่าประมาณ 15 โวลต์ ในขณะที่แรงดันทางด้านปฐมภูมิประมาณ 300 โวลต์ นั่นก็คือจะได้กำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตที่ใช้ในการหลอมโลหะประมาณ 4500 วัตต์ โดยที่กระแสที่ไหลเข้าทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงจะมีลักษณะรูปคลื่นใกล้เคียงไซน์ ความถี่ประมาณ 70 kHz



รูปที่ 2.8 หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงใช้แกนเหล็กเฟอร์ไรท์

2.4.4 ชุดโหลดเบ้าหลอม

อุปกรณ์ในส่วนนี้จะประกอบด้วยขดลวดในลักษณะท่อทองแดงพันรอบตัวเบ้าหลอม โดยที่ตัวเบ้าหลอมจะทำด้วยวัสดุประเภท กราไฟต์ ซึ่งมีคุณสมบัติทนอุณหภูมิความร้อนได้สูง ภายในท่อทองแดงจะใช้เป็นบริเวณที่มีน้ำไหลวนผ่าน เพื่อเป็นการระบายความร้อนออกจากขดลวดท่อทองแดงอันเนื่องมาจากความร้อนที่แผ่กระจายมาจากตัวเบ้าหลอม ขดลวดท่อทองแดงที่พันรอบตัวเบ้าหลอมนี้จะมีจำนวนเท่ากับ 8 รอบ และตัวเบ้าหลอมสามารถหลอมชิ้นงานที่เป็นโลหะ อลูมิเนียมในปริมาณ 100 กรัม ได้ภายในเวลาประมาณ 4 นาที



รูปที่ 2.9 ชุดโหลดเบ้าหลอมโลหะเหนียวนำความถี่สูง

2.5 สรุป

จากหลักการพื้นฐานการให้ความร้อนเหนี่ยวนำด้วยความถี่สูงเพื่อใช้ในการหลอมโลหะ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นสามารถทำการสรุปเป็นข้อๆได้ดังนี้

1) ในการหลอมโลหะด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของชุดเบ้าหลอมอันได้แก่วัสดุภายในเบ้าหลอมที่ต้องการหลอมละลาย เช่น สภาพความต้านทานไฟฟ้า: ρ ค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์: μ_r ค่าความลึกลับผิว: δ ของเงิน อะลูมิเนียม และตะกั่ว เป็นต้น ตลอดจนจำนวนขดลวดที่ใช้พันรอบเบ้าหลอม และความถี่ที่ป้อนให้ชุดขดลวดนั้นจะมีผลกระทบต่อการกำหนดค่าวงจรสมมูลของชุดเบ้าหลอมซึ่งประกอบด้วย ความต้านทานสมมูล R_{eq} และค่าความเหนี่ยวนำสมมูล L_{eq}

2) ในเครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำความถี่สูงจะมีหลักการทำงานโดย การแปลงกำลังงานไฟฟ้าที่ความถี่ต่ำไปเป็นกำลังงานไฟฟ้าความถี่สูงโดยผ่านดีซีเชื่อมโยง ซึ่งจะมีโครงสร้างของระบบดังนี้

- ภาคแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (Rectifier + DC Filter)
- ภาคแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง (High-Frequency Inverter)
- ภาคหม้อแปลงความถี่สูง (High - Frequency Transformer)
- ภาคชุดโหลดเบ้าหลอม

บทที่ 3

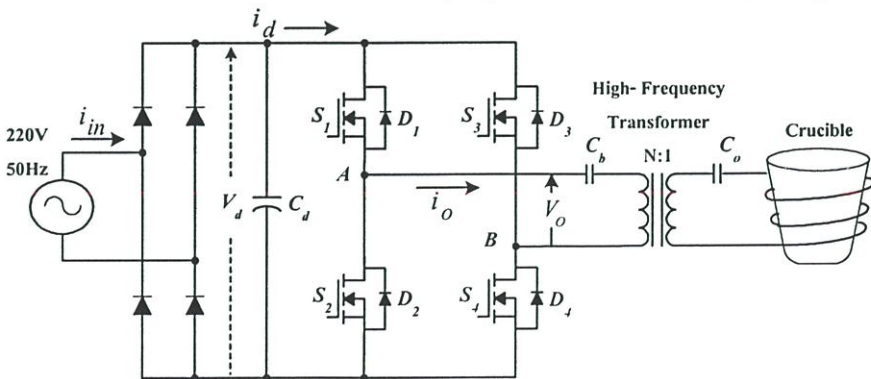
หลักการพื้นฐานของวงจรเรโซแนนซ์อนุกรม ที่ใช้กับวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ซึ่งมีโหลดเอาต์พุตประกอบด้วยชุดหม้อแปลงความถี่สูงและชุดเบ้าหลอมโลหะซึ่งบรรจุชิ้นงานประเภทโลหะ เช่น อลูมิเนียม หรือ ตะกั่วที่ต้องการให้เกิดการหลอมละลายด้วยการเหนี่ยวนำจากคลื่นกระแสความถี่สูงจากเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ผ่านชุดหม้อแปลง ไปยังขดลวดที่พันรอบเบ้าหลอมเพื่อให้เกิดการเหนี่ยวนำกระแสไหลวนความถี่สูงที่ตัวชิ้นงานภายในเบ้าหลอม โดยเนื้อหาที่นำเสนอนี้จะเกี่ยวกับการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในวงจรเรโซแนนซ์ เช่น Normalized อิมพีแดนซ์มุมเฟสระหว่างแรงดันและกระแสในวงจรอินเวอร์เตอร์ขณะทำงานในย่านใกล้เคียงจูลเรโซแนนซ์ ตลอดจนยังได้กล่าวถึง การวิเคราะห์แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรม รวมถึงหลักการคำนวณหาค่าความต้านทานสมมูลและค่าความเหนี่ยวนำสมมูลของวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรมขณะขับกระแสความถี่สูงเพื่อจ่ายผ่านหม้อแปลงความถี่สูงไปยังชิ้นงานภายในเบ้าหลอม

3.2 การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆในวงจรเรโซแนนซ์อนุกรม

ในเครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำความถี่สูงที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้เลือกใช้วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรมเพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าความถี่สูงโดยมีลักษณะวงจรดังรูปที่ 3.1 โดยที่ขดลวดเหนี่ยวนำกับโลหะชิ้นงานสามารถแทนด้วยความต้านทานและอินดักแตนซ์สมมูล ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 โดยที่พิจารณาอยู่ในรูปของวงจร RLC อนุกรม ซึ่งสามารถ



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรม

วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆในการอนุกรม RLC ได้ดังนี้[2]

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_{eq} C_{eq}}} \quad (3.1)$$

$$Z_o = \sqrt{\frac{L_{eq}}{C_{eq}}} = \omega_r L_{eq} = \frac{1}{\omega_r C_{eq}} \quad (3.2)$$

$$Q_L = \frac{\omega_r L_{eq}}{R_{eq}} = \frac{1}{\omega_r R_{eq} C_{eq}} = \frac{Z_o}{R_{eq}} = \frac{1}{R_{eq}} \cdot \sqrt{\frac{L_{eq}}{C_{eq}}} \quad (3.3)$$

โดยที่

- ω_r : Resonant Frequency
- Z_o : Characteristic Impedance
- Q_L : Quality Factor

อินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมคือ

$$\begin{aligned} Z &= R_{eq} + j \left[\omega_s L_{eq} - \frac{1}{\omega_s C_{eq}} \right] \\ &= R_{eq} \left[1 + jQ_L \left[\frac{\omega_s}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega_s} \right] \right] \\ &= Z_o \left[\frac{R_{eq}}{Z_o} + j \left[\frac{\omega_s}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega_s} \right] \right] = Z \angle \theta^\circ = R_{eq} + jX_{eq} \quad (3.4) \end{aligned}$$

ซึ่งจะได้

$$\begin{aligned}
 Z &= R_{eq} \sqrt{1 + Q_L^2 \left[\frac{\omega_s}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega_s} \right]^2} \\
 &= Z_o \sqrt{\frac{1}{Q_L^2} + \left[\frac{\omega_s}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega_s} \right]^2}
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

$$\theta = \arctan \left[Q_L \left[\frac{\omega_s}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega_s} \right] \right] \tag{3.6}$$

$$R_{eq} = Z \cos \theta \tag{3.7}$$

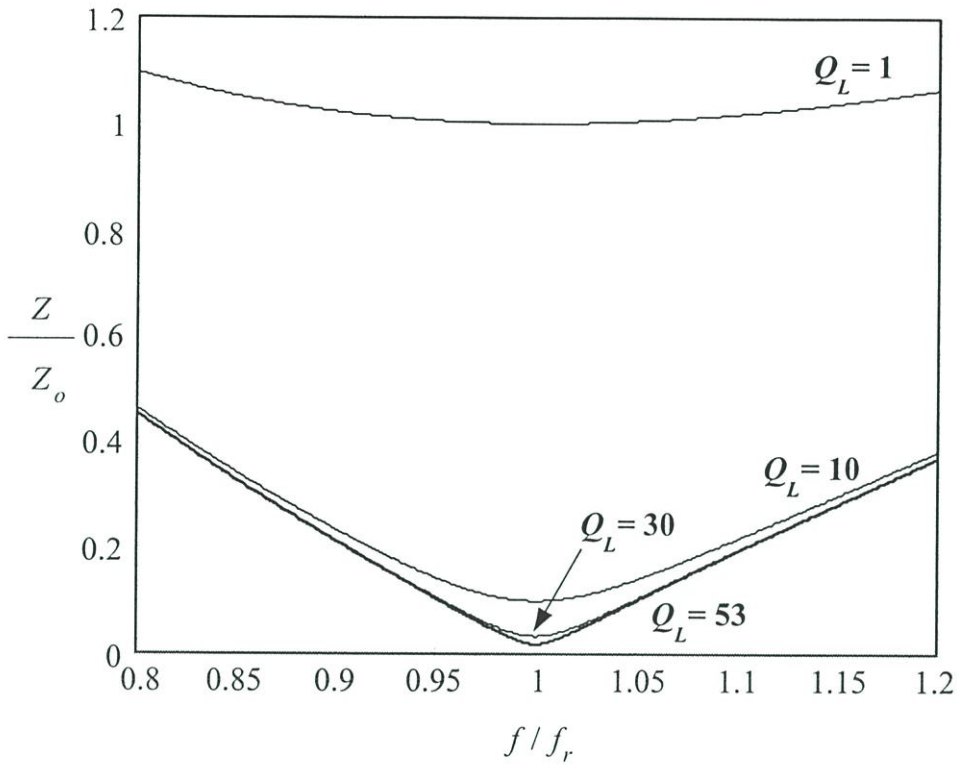
$$X_{eq} = Z \sin \theta \tag{3.8}$$

$$\cos \theta = \frac{R_{eq}}{Z} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q_L^2 \left[\frac{\omega_s}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega_s} \right]^2}} \tag{3.9}$$

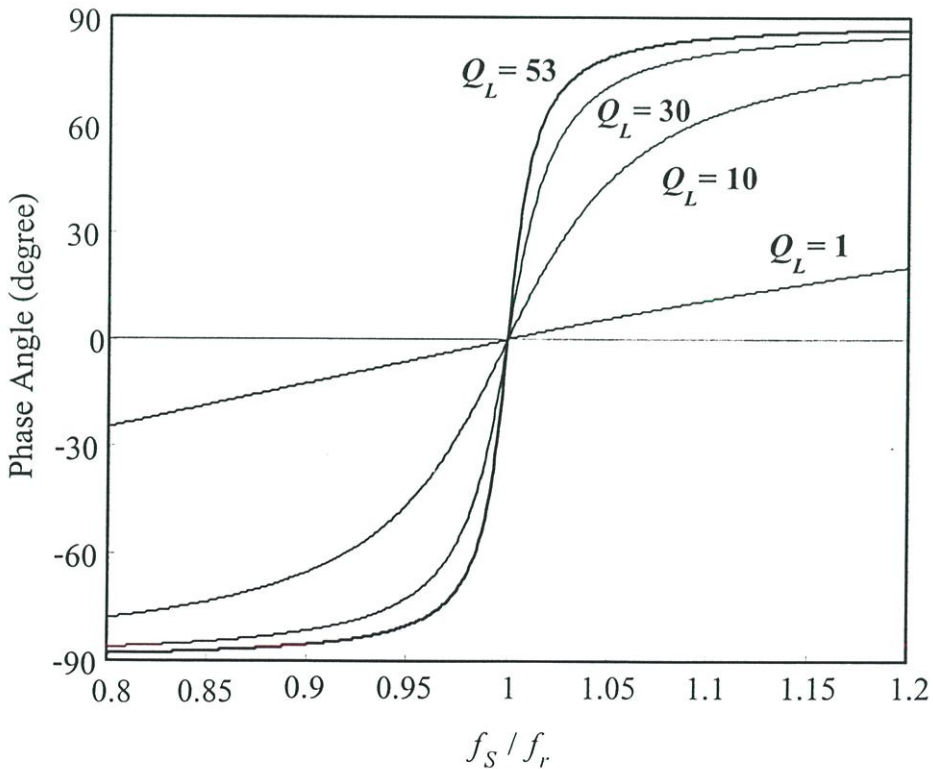
โดยที่

- R_{eq} คือค่าความต้านทานสมมูล
- L_{eq} คืออินดักแตนซ์เรโซแนนท์สมมูล
- C_{eq} คือคาปาซิเตอร์เรโซแนนท์สมมูล
- θ คือมุมต่างเฟสระหว่างแรงดันและกระแส

จากสมการ (3.5) เมื่อนำมาเขียนกราฟในรูป Normalized อินพุทอิมพีแดนซ์ Z/Z_o เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่ค่า Q_L ต่างๆจะได้ดังรูปที่ 3.2 จากรูปจะเห็นว่าที่ความถี่เรโซแนนท์ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์จะมีค่าต่ำสุดและค่าอินพุทอิมพีแดนซ์นี้ยังมีความสัมพันธ์กับค่า Q_L ด้วย นั่นคือเมื่อค่า Q_L มีค่ามากขึ้นค่าอินพุทอิมพีแดนซ์จะมีค่าต่ำลงด้วย สำหรับเครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดลองนี้จะมีค่าประมาณ 53 ซึ่งได้แสดงคุณสมบัติเช่นกันเป็นเส้นกราฟในรูปที่ 3.2 นี้



รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized อินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมกับความถี่ที่เปลี่ยนแปลงที่ค่า Q_L ต่างๆ

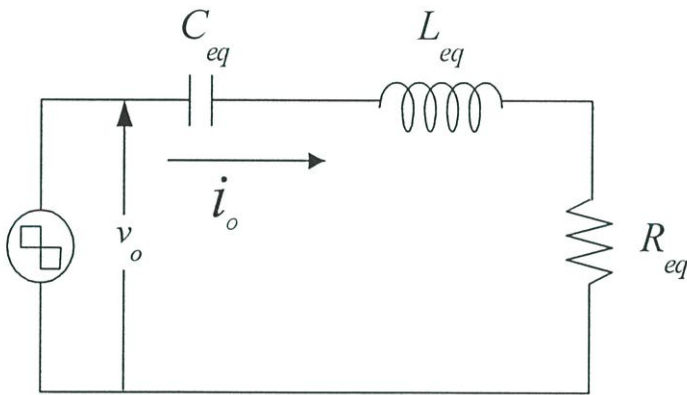


รูปที่ 3.3 ค่ามุมเฟสของอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรมต่อความถี่ที่เปลี่ยนแปลงที่ค่า Q_L ต่างๆ (Phase Angle ค่าบวกแสดงกระแสเอาต์พุต i_o ล้าหลังแรงดันเอาต์พุต v_o)

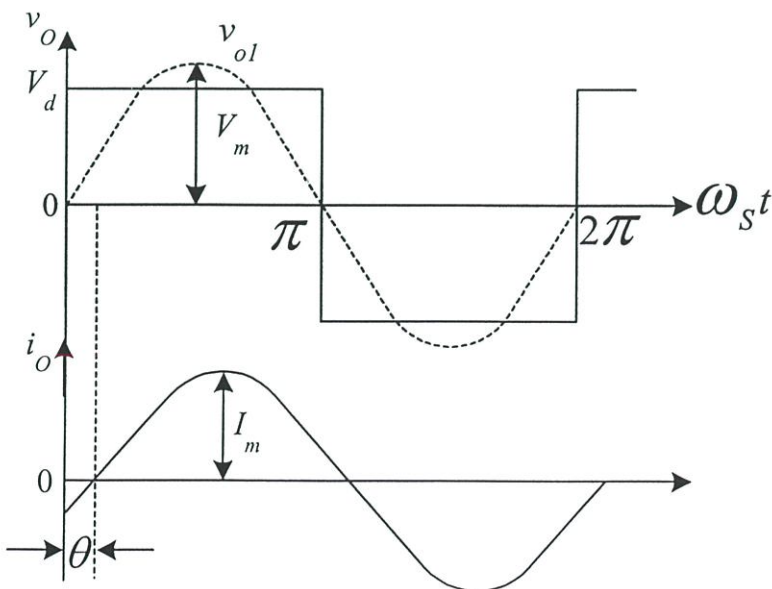
ในรูปที่ 3.3 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเฟสของอินพุตแคว้นของวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์อนุกรมกับความถี่ที่เปลี่ยนแปลงที่ค่า Q_L ต่างๆ ซึ่งได้จากสมการ (3.6) จากรูปกราฟจะเห็นได้ว่าที่จุดเรโซแนนท์ค่ามุมเฟสจะมีค่าเท่ากับศูนย์เสมอไม่ว่าจะเป็นที่ค่า Q_L ใดๆก็ตาม และเมื่อมีการปรับความถี่ค่ามุมเฟสก็จะมีค่าเปลี่ยนแปลงซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงของมุมเฟสจะขึ้นอยู่กับค่า Q_L นั่นคือเมื่อ Q_L มีค่ายิ่งสูงอัตราการเปลี่ยนแปลงของมุมเฟสก็จะยิ่งมากขึ้นตามดังแสดงในรูป

3.3 การวิเคราะห์แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า ของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์อนุกรม

จากรูปที่ 3.1 เพื่อให้สามารถวิเคราะห์วงจรได้ง่ายขึ้น สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 3.4 โดยมีลักษณะคลื่นแรงดันและกระแส v_o และ i_o ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 วงจรสมมูลของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์อนุกรม



รูปที่ 3.5 คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์อนุกรม

จากรูปที่ 3.4 และ 3.5 จะได้แรงดันอินพุทของวงจรเรโซแนนท์อนุกรมดังนี้[2]

$$v_o = \begin{cases} +V_d & \text{เมื่อ } 0 < \omega t \leq \pi \\ -V_d & \text{เมื่อ } \pi < \omega t \leq 2\pi \end{cases} \quad (3.10)$$

เมื่อนำมาทำการหาอนุกรมฟูรีเยร์ในสมการ (3.12) จะได้

$$\begin{aligned} v_o &= \frac{4V_d}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - (-1)^n}{2n} \sin n\omega t \\ &= V_d \left[\frac{4}{\pi} \sin \omega t + \frac{4}{3\pi} \sin 3\omega t + \frac{4}{5\pi} \sin 5\omega t \dots \right] \end{aligned} \quad (3.11)$$

โดยมีค่าแรงดัน Fundamental ของแรงดัน v_o คือ

$$v_{o,1} = V_{\max} \sin \omega t \quad (3.12)$$

โดยจะได้ขนาด Peak มีค่าเป็น

$$V_{\max} = \frac{4V_d}{\pi} \approx 1.273V_d \quad (3.13)$$

และค่า RMS. ของแรงดัน v_o คือ

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\sqrt{2}V_d}{\pi} \approx 0.9V_d \quad (3.14)$$

โดยมีสมการกระแสโหลด i_o คือ

$$i_o = I_m \sin(\omega t - \theta) \quad (3.15)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}
 I_m &= \frac{V_m}{Z} = \frac{4V_d}{\pi Z} = \frac{4V_d \cos\theta}{\pi R} = \frac{4V_d}{\pi R_{eq} \sqrt{1 + Q_L^2 \left[\frac{\omega_s}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega_s} \right]^2}} \\
 &= \frac{4V_d}{\pi Z_o \sqrt{\left[\frac{R_{eq}}{Z_o} \right]^2 + \left[\frac{\omega_s}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega_s} \right]^2}} \quad (3.16)
 \end{aligned}$$

จากสมการที่ (3.18) สามารถหาแรงดันตกคร่อมความต้านทาน R_{eq} อินดักแตนซ์ L_{eq} และ คาปาซิแตนซ์ C_{eq} ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$V_R = I_m R_{eq} \quad (3.17)$$

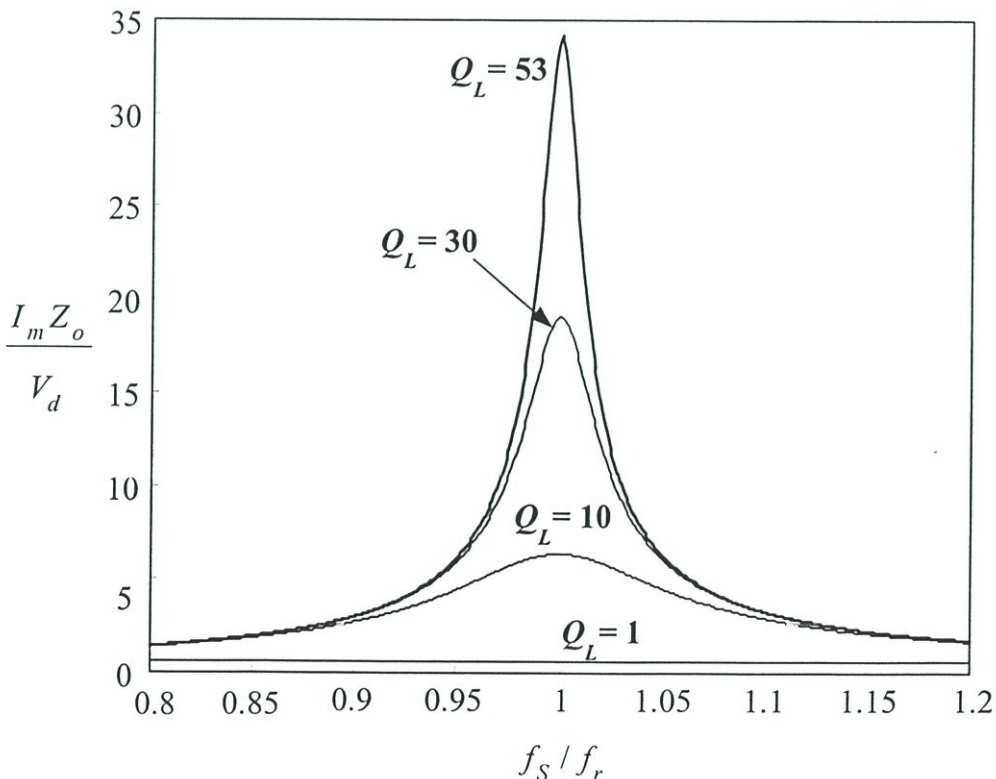
$$V_{C_{eq}} = \frac{I_m}{\omega C_{eq}} = \frac{4V_d}{\pi \left(\frac{\omega_s}{\omega_r} \right) \sqrt{\left(\frac{1}{Q_L} \right)^2 + \left(\frac{\omega_s}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega_s} \right)^2}} \quad (3.18)$$

$$V_{L_{eq}} = I_m \omega L_{eq} = \frac{4V_d \left(\frac{\omega_s}{\omega_r} \right)}{\pi \sqrt{\left(\frac{1}{Q_L} \right)^2 + \left(\frac{\omega_s}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega_s} \right)^2}} \quad (3.19)$$

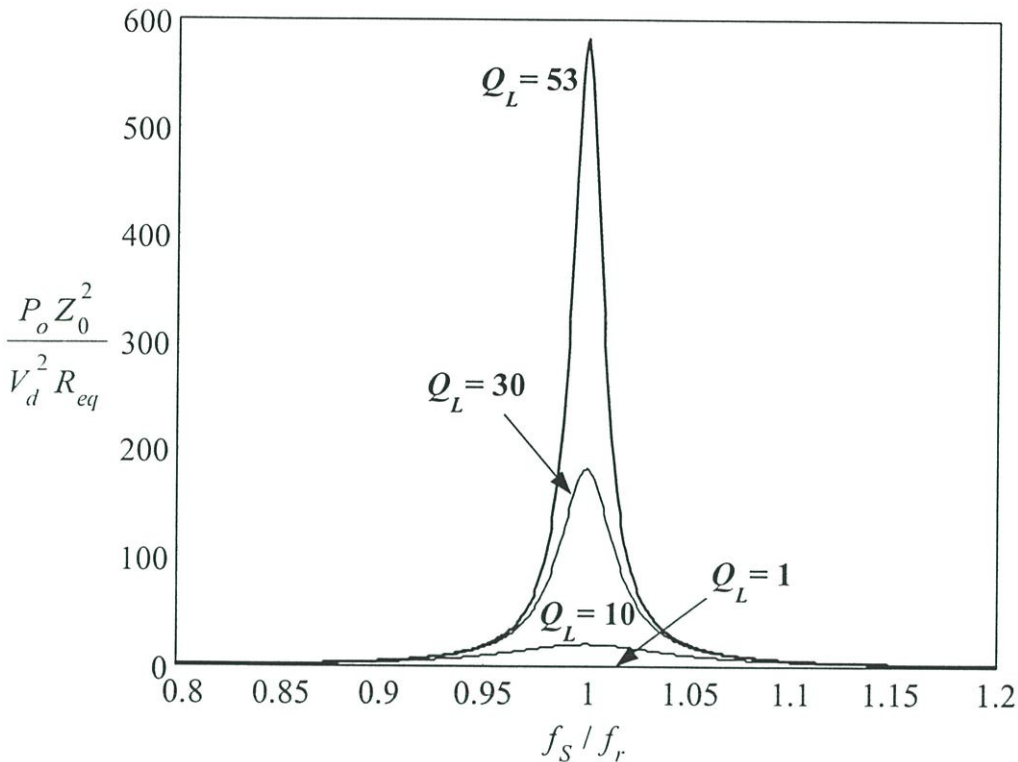
ดังนั้นกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ที่ได้คือ

$$\begin{aligned}
 P_o &= \frac{I_m^2 R_{eq}}{2} = \frac{8V_d^2 R_{eq} \cos^2 \theta}{\pi^2 R_{eq}^2} = \frac{8V_d^2 R_{eq}}{\pi^2 R_{eq}^2 \left[1 + Q_L^2 \left[\frac{\omega_s}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega_s} \right]^2 \right]} \\
 &= \frac{8V_d^2 R_{eq}}{\pi^2 Z_o^2 \left[\left[\frac{R_{eq}}{Z_o} \right]^2 + \left[\frac{\omega_s}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega_s} \right]^2 \right]} \quad (3.20)
 \end{aligned}$$

และจากสมการ (3.18) สามารถนำมาเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 3.6 ซึ่งแสดงค่ากระแสโพลดในรูป Normalized ของวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรมต่อความถี่ที่เปลี่ยนแปลงที่ค่า Q_L ต่างๆ จะเห็นได้ว่าที่จุดเรโซแนนซ์จะให้ค่ากระแสโพลดสูงสุดและจะขึ้นอยู่กับค่า Q_L นั่นคือเมื่อ Q_L มีค่าสูงขึ้นกระแสโพลดก็จะมีค่าสูงตาม เมื่อเทียบกับกระแสโพลดที่มีค่าต่ำลงเมื่อที่ค่า Q_L ต่ำ



รูปที่ 3.6 Normalized กระแสโพลดของวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรมต่อความถี่ที่เปลี่ยนแปลงที่ค่า Q_L ต่างๆ



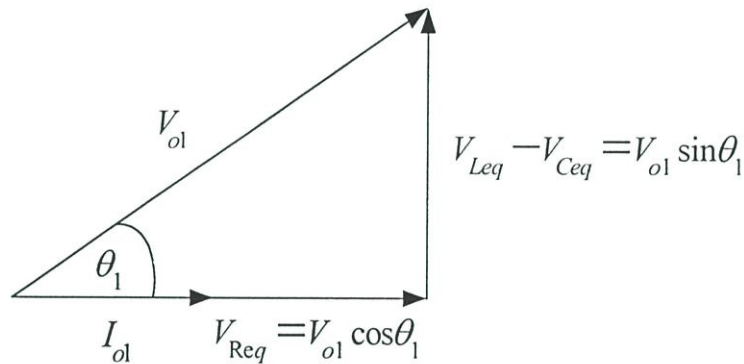
รูปที่ 3.7 Normalized กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรมต่อความถี่ที่เปลี่ยนแปลงที่ค่า Q_L

และจากสมการ (3.20) เมื่อนำมาเขียนกราฟในรูป Normalized ของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของพุทอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรมต่อความถี่ที่เปลี่ยนแปลงที่ค่า Q_L ต่างๆ จะเห็นว่าที่จุดเรโซแนนซ์จะได้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุดและเมื่อความถี่เปลี่ยนไปจากจุดเรโซแนนซ์กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตจะมีค่าลดลงและจะลดลงมากที่ค่า Q_L ต่ำๆ

3.4 การคำนวณหาค่าความต้านทานและอินดักแตนซ์สมมูลของวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์

ในการวิเคราะห์ห้วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรมที่ใช้ในเครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำนั้นจำเป็นต้องหาค่าความต้านทานสมมูล R_{eq} ซึ่งเป็นค่าความต้านทานที่เกิดจากความต้านทานขดลวดตัวนำของหม้อแปลงและความต้านทานที่ขดลวดเหนี่ยวนำที่พันรอบแกนหลอมพร้อมชิ้นงาน และค่าอินดักแตนซ์สมมูล L_{eq} ซึ่งเป็นค่าอินดักแตนซ์ของหม้อแปลงความถี่สูงกับค่าอินดักแตนซ์ที่ขดลวดเหนี่ยวนำในวงจรเสียก่อน ในวิทยานิพนธ์นี้ได้มองโพลของอินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วยหม้อแปลงความถี่สูง ตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ C_o และขดลวดเหนี่ยวนำพร้อมทั้งชิ้นงานในรูปของวงจรสมมูล RLC อนุกรม ประกอบด้วยค่า R_{eq} , L_{eq} และ

C_{eq} ดังรูปที่ 3.4 ซึ่งเป็นค่าตัวแปรที่โอนย้ายจากด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงมายังด้านปฐมภูมิที่ต่ออยู่กับด้านเอาต์พุทของอินเวอร์เตอร์ เมื่อป้อนแรงดันสแควร์ให้กับวงจร RLC ในรูปที่ 3.4 พร้อมกับควบคุมให้อินเวอร์เตอร์ทำงานโดยกระแสจะล่าหลังแรงดันอยู่ดังในรูปที่ 3.5 จะได้ความสัมพันธ์ทางไฟฟ้าของแรงดันและกระแสมูลฐานด้วยมุม θ_1 ในรูปของ $\cos\theta_1$ ซึ่งจะสามารถนำไปวิเคราะห์หาค่าตัวแปร R_{eq} , L_{eq} และ C_{eq} ของวงจรสมมูลย์ได้โดยใช้เวกเตอร์ไคอะแกรมในรูปที่ 3.8 ซึ่งสามารถวิเคราะห์สมการของ R_{eq} และ L_{eq} ได้ในสมการ (3.22) และ (3.25)



รูปที่ 3.8 เฟสเซอร์ไคอะแกรมของเรโซแนนซ์อนุกรม

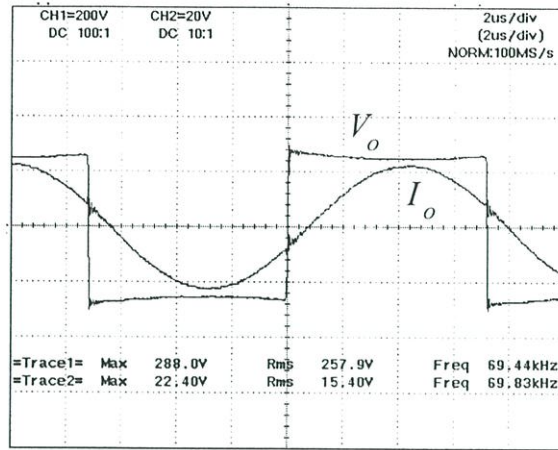
$$\text{โดยที่} \quad R_{eq} = \frac{V_{Req}}{I_{o1}} \quad (3.21)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad R_{eq} = \frac{V_{o1} \cos\theta_1}{I_{o1}} \quad (3.22)$$

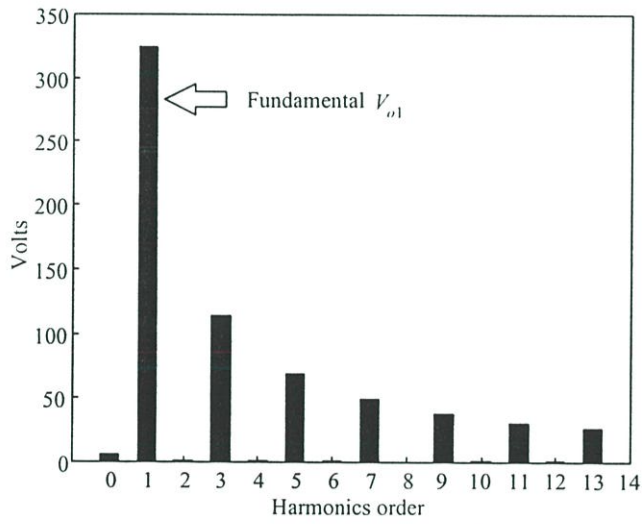
$$\text{โดยที่} \quad \omega_S I_{eq} - \frac{1}{\omega_S C_{eq}} = \frac{V_{Leq} - V_{Ceq}}{I_{o1}} \quad (3.23)$$

$$\omega_S L_{eq} - \frac{1}{\omega_S C_{eq}} = \frac{V_{o1} \sin\theta_1}{I_{o1}} \quad (3.24)$$

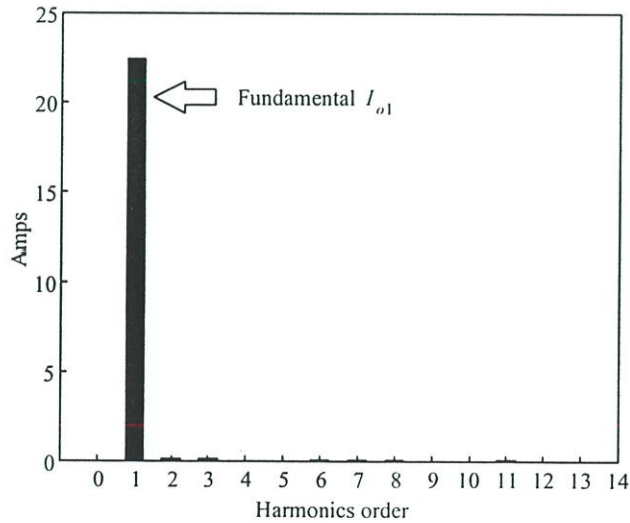
$$\text{ดังนั้น} \quad L_{eq} = \frac{1}{2\pi f_S} \left[\frac{V_{o1} \sin\theta_1}{I_{o1}} + \frac{1}{2\pi f_S C_{eq}} \right] \quad (3.25)$$



a) ลักษณะคลื่นแรงดันเอาต์พุต V_o และกระแสเอาต์พุต I_o ที่ได้จากการทดลอง

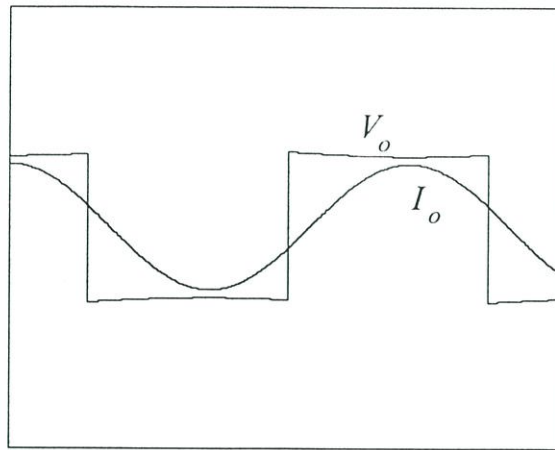


b) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุต V_o ที่ได้จากการทดลอง

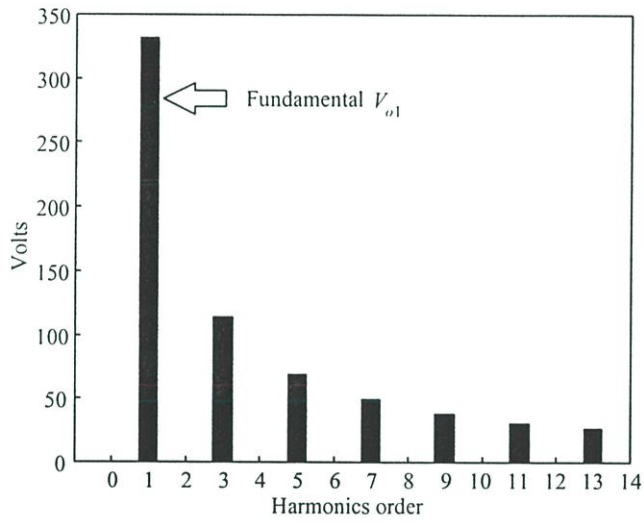


c) ลักษณะสเปกตรัมกระแสเอาต์พุต I_o ที่ได้จากการทดลอง

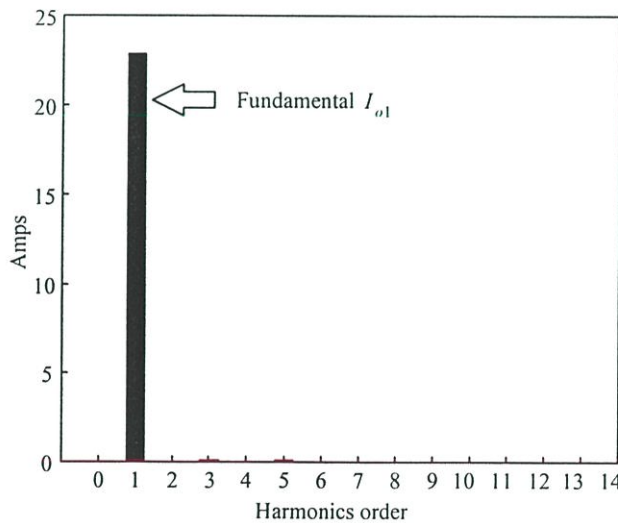
รูปที่ 3.9 ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาต์พุต V_o , I_o ที่ได้จากการทดลอง



a) ลักษณะคลื่นแรงดันเอาต์พุต V_o และกระแสเอาต์พุต I_o ที่ได้จากการซิมูเลต



b) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุต V_o ที่ได้จากการซิมูเลต



c) ลักษณะสเปกตรัมกระแสเอาต์พุต I_o ที่ได้จากการซิมูเลต

รูปที่ 3.10 ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาต์พุต V_o , I_o ที่ได้จากการซิมูเลต

จากสมการ (3.21)–(3.25) ค่า fundamental ของทั้งแรงดัน V_{o1} และ กระแส I_{o1} สามารถคำนวณหาได้จากการนำคลื่นของทั้งแรงดันและกระแสที่ได้จากการทดลองดังรูปที่ 3.9(a) มาหาแถบสเปกตรัมของแรงดันและกระแสโดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการคำนวณ ซึ่งจะได้ ดังรูปที่ 3.9(b) และรูปที่ 3.9(c) ตามลำดับ และเมื่อนำค่า R_{eq} และ L_{eq} ที่ได้นี้มาทำการ ซิมูเลตเพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องของค่า R_{eq} และ L_{eq} จะเห็นได้ว่าผลที่ได้จะมีค่าใกล้เคียง กันดังแสดงในรูปที่ 3.10

3.5 สรุป

จากหลักการพื้นฐานของวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมที่ใช้กับวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ดังที่ ได้กล่าวมาแล้วนั้นสามารถทำการสรุปเป็นข้อๆ ได้ดังนี้

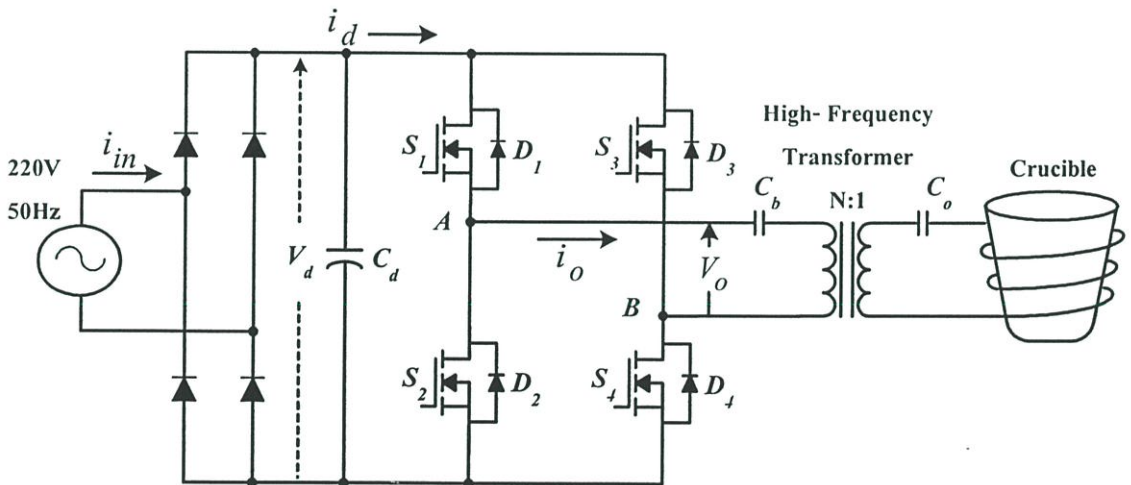
- 1) จากการวิเคราะห์ห้วงจรเรโซแนนซ์อนุกรมจะเห็นได้ว่า ความถี่สวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าต่างๆ เช่น ค่าอิมพีแดนซ์ (Z) ค่า Quality Factor (Q) มุมต่างเฟสระหว่างแรงดันและกระแส (θ) กระแสโหลดเรโซแนนซ์ (I_o) และกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (P_o) นั่นคือ เมื่อความถี่สวิตช์มีค่าสูงกว่าหรือต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์ ค่าอิมพีแดนซ์ (Z) และมุมต่างเฟสระหว่างแรงดันและกระแส (θ) จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่กระแสโหลดเรโซแนนซ์ (I_o) และกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (P_o) จะมีค่าลดลง
- 2) ค่าความต้านทานสมมูล R_{eq} และค่าความเหนี่ยวนำสมมูล L_{eq} สามารถคำนวณในทางคณิตศาสตร์โดยวิธีการตามที่ได้นำเสนอไว้ในสมการ (3.21)–(3.25) ได้อย่างถูกต้อง ซึ่งเมื่อนำไปทำการเปรียบเทียบระหว่างคลื่นแรงดันและกระแสที่ได้จากการทดลองกับคลื่นแรงดันและกระแสที่ได้จากการนำค่า R_{eq} และ L_{eq} ที่คำนวณได้ไปทำการซิมูเลต จะเห็นได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกัน

บทที่ 4

การวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ขณะขับโหลดเรโซแนนท์อนุกรมที่มีการควบคุมด้วยหลักการ ปรับจำนวนพัลส์ PDM ในเครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำความถี่สูง

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะนำเสนอการวิเคราะห์การควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบปรับลดจำนวนพัลส์ในวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์อนุกรม [3], [4] เพื่อนำไปใช้กับเครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำความถี่สูง ซึ่งได้มีการนำเสนอด้วยกัน 2 ลักษณะ คือ กรณีที่มีการปรับลดจำนวนพัลส์แบบกระจายและกรณีที่มีการปรับลดจำนวนพัลส์แบบเป็นกลุ่ม ซึ่งทั้ง 2 กรณี จะมีลักษณะการทำงานที่คล้ายกันเพียงแต่จะแตกต่างกันในช่วง ON – OFF ของวงจรโดยจะทำการวิเคราะห์โดยการพิจารณาโหมดการทำงานต่างๆ ของวงจรในช่วง 1 คาบเวลา(16 ไซเคิล) ในกรณีที่อินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่สวิตช์สูงกว่าความถี่เรโซแนนท์

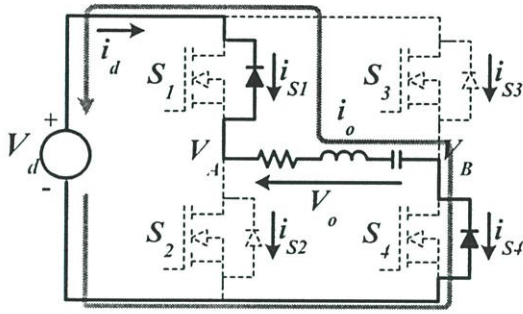


รูปที่ 4.1 วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์อนุกรมของเครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำความถี่สูง

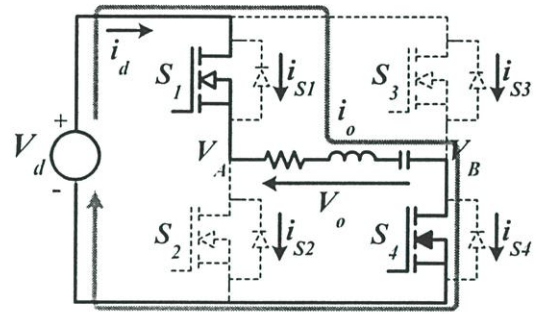
4.2 หลักการทำงาน

จากรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นวงจร Full Bridge Inverter ที่ใช้ในเครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำความถี่สูง แรงดันไฟสลับ 220V 50 Hz จะถูกแปลงเป็นแรงดันไฟตรงด้วย วงจรฟูลบริดจ์เรกติฟายเออร์เพื่อจ่ายให้กับวงจร ฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะทำหน้าที่แปลงเป็นแรงดันไฟสลับความถี่สูงต่อไป โดยมี MOSFET S_1, S_2, S_3, S_4 และฟริววลิ่งไดโอด D_1, D_2, D_3, D_4 ต่อขนานกันตามลำดับภาย

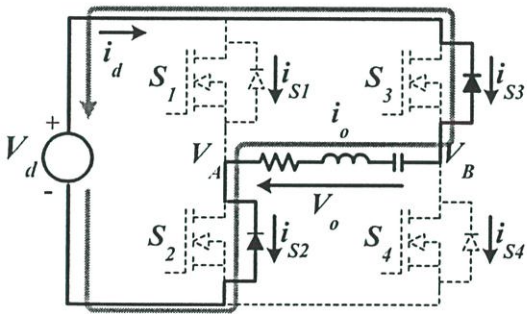
ใน MOSFET ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ สำหรับการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ในกรณีของการควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับลดจำนวนพัลส์ของแรงดันใน 1 คาบเวลาของแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์จะทำให้ได้แรงดันเอาต์พุต 3 สถานะคือ $+V_d$, $-V_d$ และ 0 เมื่อกำหนดให้อินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่ สวิตช์สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์จะสามารถแบ่งการทำงานของวงจรออกได้เป็น 6 โหมดดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยมีลักษณะการทำงานดังนี้



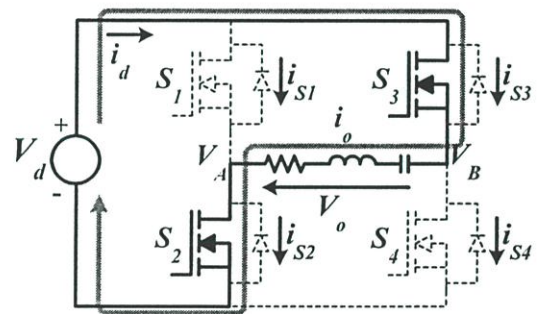
(a) Mode 1



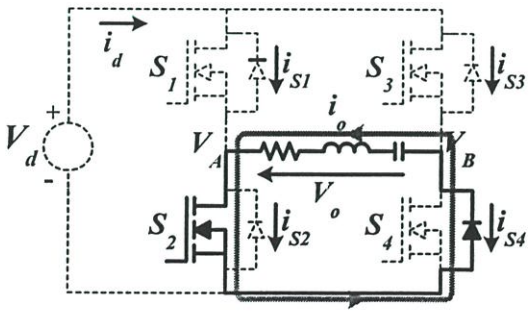
(b) Mode 2



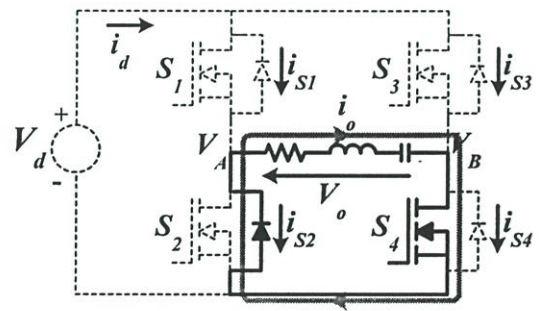
(c) Mode 3



(d) Mode 4



(e) Mode 5



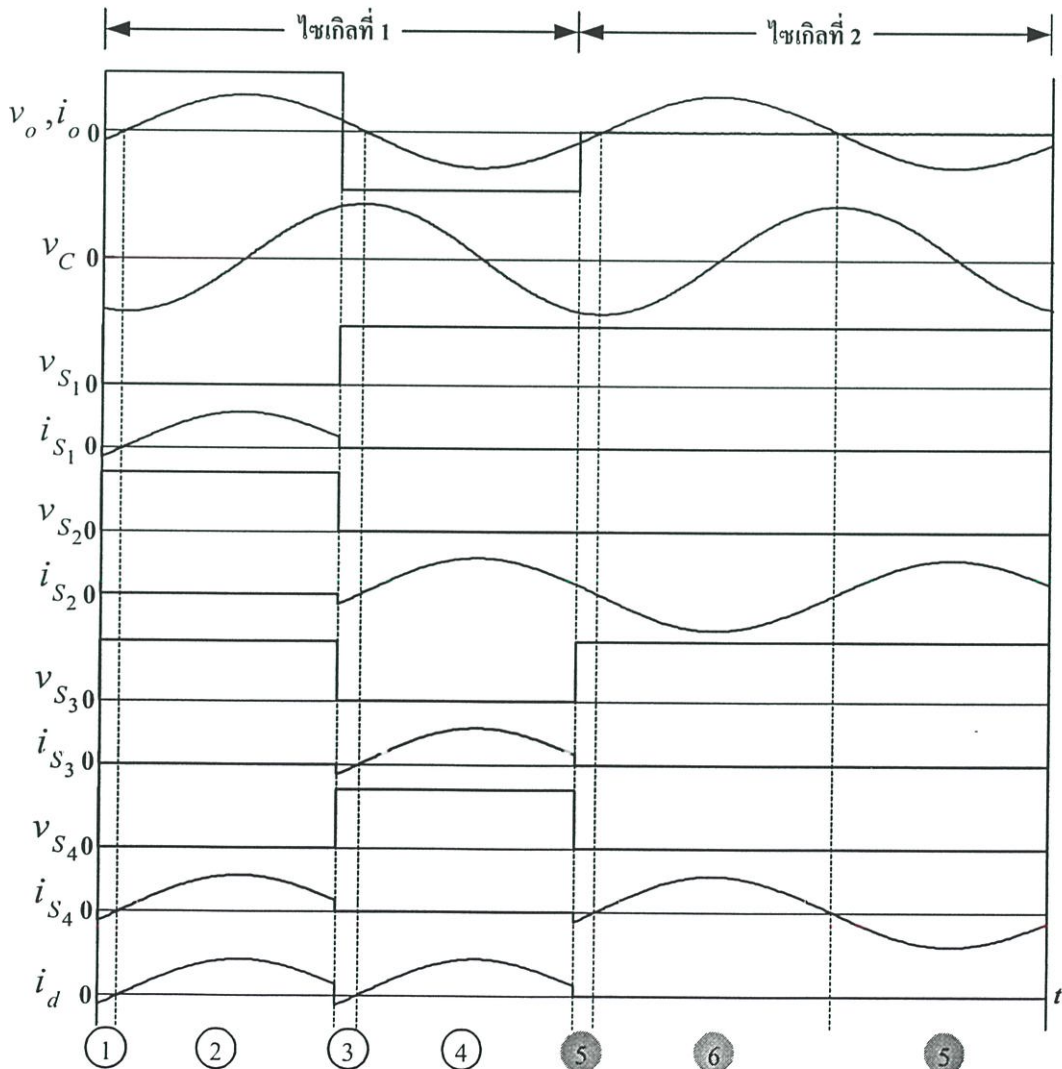
(f) Mode 6

รูปที่ 4.2 โหมดการทำงานของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมด้วยการปรับลดจำนวนพัลส์

โหมด 1,2,3,4 ในโหมดนี้จะให้แรงดันเอาต์พุตเป็น $\pm V_d$ โดย สวิตช์ S_1 และ S_4 จะสลับการทำงานกับ S_2 และ S_3 นั่นคือในโหมด 1 และ 2 เฉพาะสวิตช์ S_1 และ S_4 ON จะได้แรงดัน

เอาท์พุทเป็น $+V_d$ สำหรับทิศทางการไหลของกระแส เนื่องจากในโหมด 1 กระแสมีค่าเป็นลบ ดังนั้นกระแสจะไหลผ่านไดโอดของ S_1 และ S_4 ดังรูปที่ 4.2(a) และเมื่อเข้าสู่โหมด 2 กระแสเริ่มมีค่าเป็นบวกกระแสจะเปลี่ยนมาไหลผ่าน สวิตช์ของ S_1 และ S_4 แทนดังรูปที่ 4.2(b) ส่วนในกรณีของ โหมด 3 และ 4 เฉพาะสวิตช์ S_2 และ S_3 ON แรงดันเอาท์พุทจะเป็น $-V_d$ มีทิศทางการไหลของ กระแสคือในโหมด 3 กระแสจะไหลผ่านไดโอดของ S_2 และ S_3 และเมื่อเข้าสู่โหมด 4 กระแสจะ ไหลผ่านสวิตช์ S_2 และ S_3 แทน ดังแสดงในรูปที่ 4.2(c) และรูปที่ 4.2(d)

โหมด 5,6 ในโหมด 5 และ 6 นี้จะได้แรงดันเอาท์พุทเป็นศูนย์โดยจะมีลักษณะการทำงาน ของสวิตช์ที่แตกต่างจากโหมดอื่นนั่นคือในโหมดทั้ง 2 นี้สวิตช์ S_2 และ S_4 จะทำงานพร้อมกันโดย ในโหมด 5 การไหลของกระแสจะมีทิศทางเป็นลบดังนั้นกระแสจะไหลผ่านสวิตช์ S_2 และไดโอด ของ S_4 ดังรูปที่ 4.2(e) และเมื่อเข้าสู่โหมด 6 การไหลของกระแสจะมีทิศทางเป็นบวกทำให้จาก เดิม

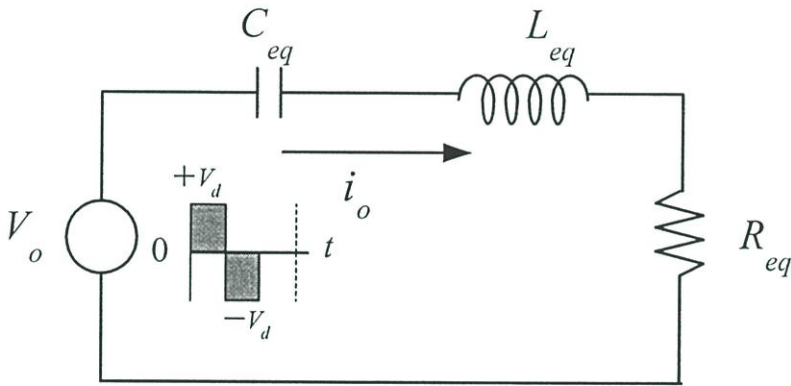


รูปที่ 4.3 คลื่นแรงดันและกระแสใน 2 ไซเกิล ในกรณีที่ไม่มีแรงดันและไม่มีแรงดัน

เดิมกระแสไหลผ่านสวิตช์ S_2 และไดโอดของ S_4 เปลี่ยนมาไหลผ่านไดโอดของ S_2 และสวิตช์ S_4 แทนดังรูปที่ 4.2(f) ซึ่งลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสในโหมคต่างๆสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.3

4.3 การวิเคราะห์ แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต

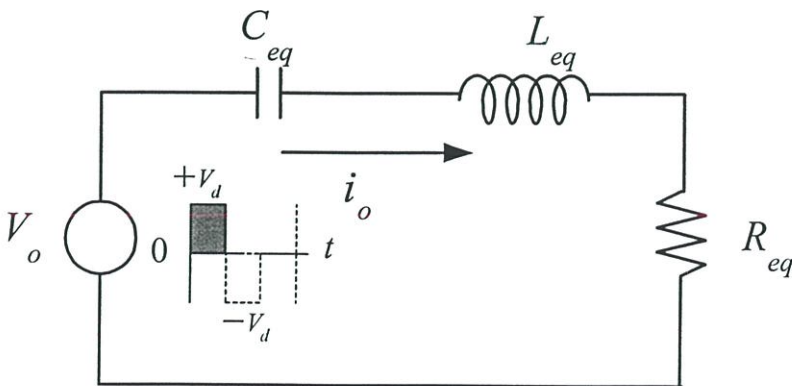
ในการวิเคราะห์ แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์อนุกรมที่ควบคุมด้วยการปรับลดจำนวนพัลส์สำหรับเครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำความถี่สูงนี้ ได้ทำการวิเคราะห์ในลักษณะวงจรสมมูล RLC เรโซแนนท์อนุกรม ซึ่งจากโหมคการทำงานทั้ง 6 โหมคที่แสดงในรูปที่ 4.2 สามารถนำมาแสดงเป็นวงจรสมมูล RLC เรโซแนนท์อนุกรมได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 วงจรสมมูล RLC เรโซแนนท์อนุกรม

จากวงจรสมมูล RLC เรโซแนนท์อนุกรมดังรูปที่ 4.4 สามารถนำมาพิจารณาสมการแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆเป็นโหมคๆ ได้ดังนี้

โหมค 1-2 ในโหมคนี้จะได้แรงดัน V_o มีค่าเป็น $+V_d$ ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการโดยพิจารณาจากรูปที่ 4.5 เป็นดังนี้



รูปที่ 4.5 วงจรสมมูล RLC เรโซแนนท์อนุกรมของโหมคการทำงานที่ 1-2

$$v_R + v_L + v_C = +V_d \quad (4.1)$$

จากสมการ (4.1) เมื่อเขียนเป็นสมการอนุพันธ์ของวงจรถะได้

$$R_{eq} i_o + L_{eq} \frac{di_o}{dt} + \frac{1}{C_{eq}} \int i_o dt = +V_d \quad (4.2)$$

จากสมการ (4.2) เมื่อทำการแก้สมการอนุพันธ์แล้วจะได้กระแสไหลผ่านโหลดดังนี้

$$i_o = e^{-mt} \left[\left(\frac{+V_d - V_{C1} - L_{eq} m I_{o1}}{nL_{eq}} \right) \sin nt + I_{o1} \cos nt \right] \quad (4.3)$$

$$\text{เมื่อ } m = \frac{R_{eq}}{2L_{eq}} \quad \text{และ } n = \sqrt{\left(\frac{R_{eq}}{2L_{eq}} \right)^2 - \frac{1}{L_{eq} C_{eq}}}$$

V_{C1}, I_{o1} = ค่าแรงดันและกระแสเริ่มต้นที่ตกคร่อม C_{eq} และไหลผ่าน L_{eq}

จากสมการกระแส i_o ในสมการ (4.3) สามารถทำการคำนวณหาแรงดันตกคร่อมความต้านทาน R_{eq} ดังนี้

$$v_R = R_{eq} i_o = R_{eq} \cdot e^{-mt} \left[\left(\frac{+V_d - V_{C1} - L_{eq} m I_{o1}}{nL_{eq}} \right) \sin nt + I_{o1} \cos nt \right] \quad (4.4)$$

ทำนองเดียวกันสามารถคำนวณหาแรงดันตกคร่อมรีแอคแตนซ์ X_L ได้ดังนี้

$$v_L = L_{eq} \frac{di_o}{dt} = L_{eq} e^{-mt} \left[\frac{(+V_d - V_{C1} - L_{eq} m I_{o1})}{nL_{eq}} (n \cos nt - m \sin nt) - I_{o1} (n \sin nt + m \cos nt) \right] \quad (4.5)$$

ค่าแรงดันตกคร่อมคาปาซิเตอร์ที่คำนวณหาได้ดังนี้

$$v_C = \frac{1}{C_{eq}} \int i_o dt = \frac{1}{C_{eq} (m^2 + n^2)} \left\{ \left(\frac{+V_d - V_{C1} - L_{eq} m I_{o1}}{n L_{eq}} \right) \right. \\ \left. \left[e^{-mt} (-m \sin nt - n \cos nt) + n \right] \right. \\ \left. + I_{o1} \left[e^{-mt} (-m \cos nt + n \sin nt) + m \right] \right\} + V_{C1} \quad (4.6)$$

และจากสมการ (4.4) และ (4.5) จะได้แรงดันตกคร่อมโหลด RL ดังนี้

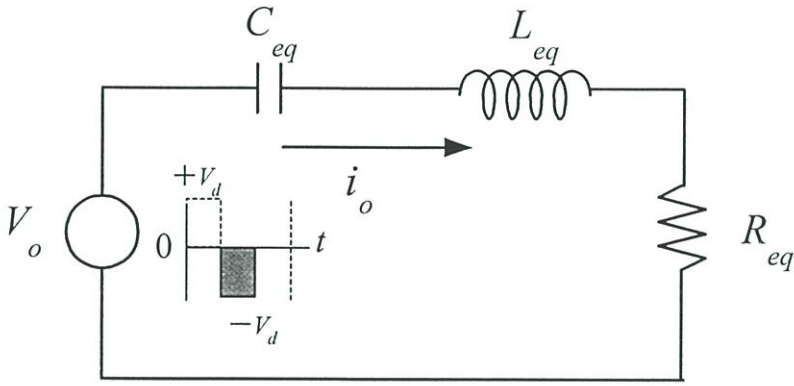
$$v_{RL} = v_R + v_L \\ = R_{eq} \cdot e^{-mt} \left[\left(\frac{+V_d - V_{C1} - L_{eq} m I_{o1}}{n L_{eq}} \right) \sin nt + I_{o1} \cos nt \right] \\ + L_{eq} e^{-mt} \left[\frac{(+V_d - V_{C1} - L_{eq} m I_{o1})}{n L_{eq}} (n \cos nt - m \sin nt) \right. \\ \left. - I_{o1} (n \sin nt + m \cos nt) \right] \quad (4.7)$$

โหมด 3-4 ที่โหมคนี้อจะได้แรงดัน V_o มีค่าเป็น $-V_d$ ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการโดยพิจารณาจากรูปที่ 4.6 เป็นดังนี้

$$v_R + v_L + v_C = -V_d \quad (4.8)$$

จากสมการ (4.8) เมื่อเขียนเป็นสมการอนุพันธ์ของวงจรจะได้

$$R_{eq} i_o + L_{eq} \frac{di_o}{dt} + \frac{1}{C_{eq}} \int i_o dt = -V_d \quad (4.9)$$



รูปที่ 4.6 วงจรสมมูล RLC เรโซแนนซ์ที่อนุกรมของโหมคการทำงานที่ 3-4

จากสมการ (4.9) เมื่อทำการแก้สมการอนุพันธ์แล้วจะได้กระแสไหลผ่านโหมคดังนี้

$$i_o = e^{-mt} \left[\left(\frac{-V_d - V_{C1} - L_{eq} m I_{o1}}{n L_{eq}} \right) \sin nt + I_{o1} \cos nt \right] \quad (4.10)$$

จากสมการกระแส i_o ในสมการ (4.10) สามารถทำการคำนวณหาแรงดันตกคร่อมความต้านทาน R_{eq} ดังนี้

$$v_R = R_{eq} i_o = R_{eq} \cdot e^{-mt} \left[\left(\frac{-V_d - V_{C1} - L_{eq} m I_{o1}}{n L_{eq}} \right) \sin nt + I_{o1} \cos nt \right] \quad (4.11)$$

ในทำนองเดียวกันสามารถคำนวณหาแรงดันตกคร่อมรีแอคแตนซ์ X_L ได้ดังนี้

$$v_L = L_{eq} \frac{di_o}{dt} = L_{eq} e^{-mt} \left[\left(\frac{-V_d - V_{C1} - L_{eq} m I_{o1}}{n L_{eq}} \right) (n \cos nt - m \sin nt) - I_{o1} (n \sin nt + m \cos nt) \right] \quad (4.12)$$

ค่าแรงดันตกคร่อมคาปาซิเตอร์ที่หาได้ดังนี้

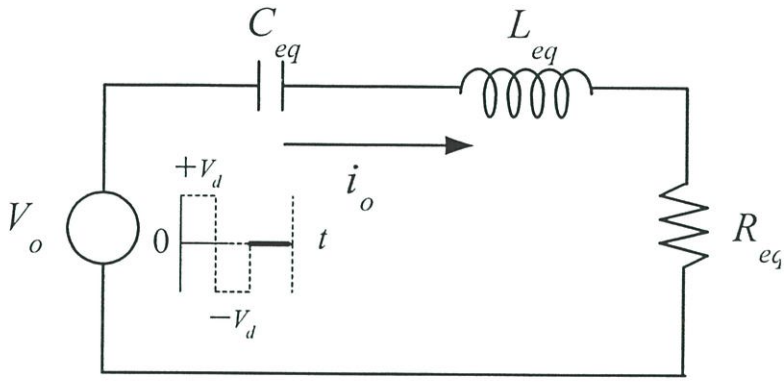
$$v_C = \frac{1}{C_{eq}} \int i_o dt = \frac{1}{C_{eq}(m^2 + n^2)} \left\{ \left(\frac{-V_d - V_{C1} - L_{eq} m I_{o1}}{n L_{eq}} \right) \right. \\ \left. \left[e^{-mt} (-m \sin nt - n \cos nt) + n \right] \right. \\ \left. + I_{o1} \left[e^{-mt} (-m \cos nt + n \sin nt) + m \right] \right\} + V_{C1} \quad (4.13)$$

และจากสมการ (4.11) และ (4.12) จะได้แรงดันตกคร่อมโหลด RL ดังนี้

$$v_{RL} = v_R + v_L \\ = R_{eq} \cdot e^{-mt} \left[\left(\frac{-V_d - V_{C1} - L_{eq} m I_{o1}}{n L_{eq}} \right) \sin nt + I_{o1} \cos nt \right] \\ + L_{eq} e^{-mt} \left[\left(\frac{-V_d - V_{C1} - L_{eq} m I_{o1}}{n L_{eq}} \right) (n \cos nt - m \sin nt) \right. \\ \left. - I_{o1} (n \sin nt + m \cos nt) \right] \quad (4.14)$$

โหมด 5-6 ที่โหมดนี้จะได้แรงดัน V_o มีค่าเป็น 0 ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการโดยพิจารณาจากรูปที่ 4.7 เป็นดังนี้

$$v_R + v_L + v_C = 0 \quad (4.15)$$



รูปที่ 4.7 วงจรสมมูล RLC เรโซแนนซ์อนุกรม ของโหมคการทำงานที่ 5-6

จากสมการ (4.15) เมื่อเขียนเป็นสมการอนุพันธ์ของวงจรจะได้

$$R_{eq} i_o + L_{eq} \frac{di_o}{dt} + \frac{1}{C_{eq}} \int i_o dt = 0 \quad (4.16)$$

จากสมการ (4.16) เมื่อทำการแก้สมการอนุพันธ์แล้วจะได้กระแสไหลผ่าน โหลดดังนี้

$$i_o = e^{-mt} \left[\left(\frac{0 - V_{C1} - L_{eq} m I_{o1}}{n L_{eq}} \right) \sin nt + I_{o1} \cos nt \right] \quad (4.17)$$

จากสมการกระแส i_o ในสมการ (4.17) สามารถทำการคำนวณหาแรงดันตกคร่อมความต้านทาน R_{eq} ดังนี้

$$v_R = R_{eq} i_o = R_{eq} \cdot e^{-mt} \left[\left(\frac{0 - V_{C1} - L_{eq} m I_{o1}}{n L_{eq}} \right) \sin nt + I_{o1} \cos nt \right] \quad (4.18)$$

ทำนองเดียวกันสามารถคำนวณหาแรงดันตกคร่อมรีแอคแตนซ์ X_L ได้ดังนี้

$$v_L = L \frac{di_o}{dt} = L e^{-mt} \left[\frac{(0 - V_{C1} - L_{eq} m I_{o1})}{n L_{eq}} (n \cos nt - m \sin nt) - I_{o1} (n \sin nt + m \cos nt) \right] \quad (4.19)$$

ค่าแรงดันตกคร่อมคาปาซิเตอร์ซึ่งสามารถคำนวณหาได้ดังนี้

$$v_C = \frac{1}{C_{eq}} \int i_o dt = \frac{1}{C_{eq} (m^2 + n^2)} \left\{ \left(\frac{0 - V_{C1} - L_{eq} m I_{o1}}{n L_{eq}} \right) \left[e^{-mt} (-m \sin nt - n \cos nt) + n \right] + I_{o1} \left[e^{-mt} (-m \cos nt + n \sin nt) + m \right] \right\} + V_{C1} \quad (4.20)$$

และจากสมการ (4.18) และ (4.19) จะได้แรงดันตกคร่อมโหลด RL ดังนี้

$$v_{RL} = v_R + v_L = R_{eq} \cdot e^{-mt} \left[\left(\frac{0 - V_{C1} - L_{eq} m I_{o1}}{n L_{eq}} \right) \sin nt + I_{o1} \cos nt \right] + L_{eq} e^{-mt} \left[\frac{(+V_d - V_{C1} - L_{eq} m I_{o1})}{n L_{eq}} (n \cos nt - m \sin nt) - I_{o1} (n \sin nt + m \cos nt) \right] \quad (4.21)$$

จากสมการที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นสามารถนำมาคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมด้วยวิธีการปรับลดจำนวนพัลส์ ได้โดยอาศัยหลักการอนุกรมฟูเรียร์พร้อมทั้งใช้โปรแกรม MATLAB เข้ามาช่วยในการคำนวณ ซึ่งจะได้ดังสมการดังต่อไปนี้[4]

$$v_o = \sum_{n=1}^{\infty} V_{on,\max} \sin(n\omega_o t) \quad (4.22)$$

$$i_o = \sum_{n=1}^{\infty} I_{on,\max} \sin(n\omega_o t + \theta_n) \quad (4.23)$$

$$P_{out} = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{V_{on,\max} I_{on,\max}}{2} \right) \cos \theta_n \quad (4.24)$$

4.4 สรุป

ในวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมด้วยหลักการปรับจำนวนพัลส์ PDM ในเครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำความถี่สูง สามารถแบ่งลักษณะการทำงานได้เป็น 6 โหมดการทำงาน ซึ่งในแต่ละโหมดการทำงานจะให้ลักษณะการทำงานของวงจรและลักษณะรูปคลื่นแรงดันและกระแสที่จุดต่างๆ ที่แตกต่างกัน และจากโหมดการทำงานเหล่านี้สามารถนำไปคำนวณหาค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ในวงจร ซึ่งผลที่ได้นี้สามารถนำไปคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตได้ในที่สุด

บทที่ 5

หลักการปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยวิธี การปรับจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจาย

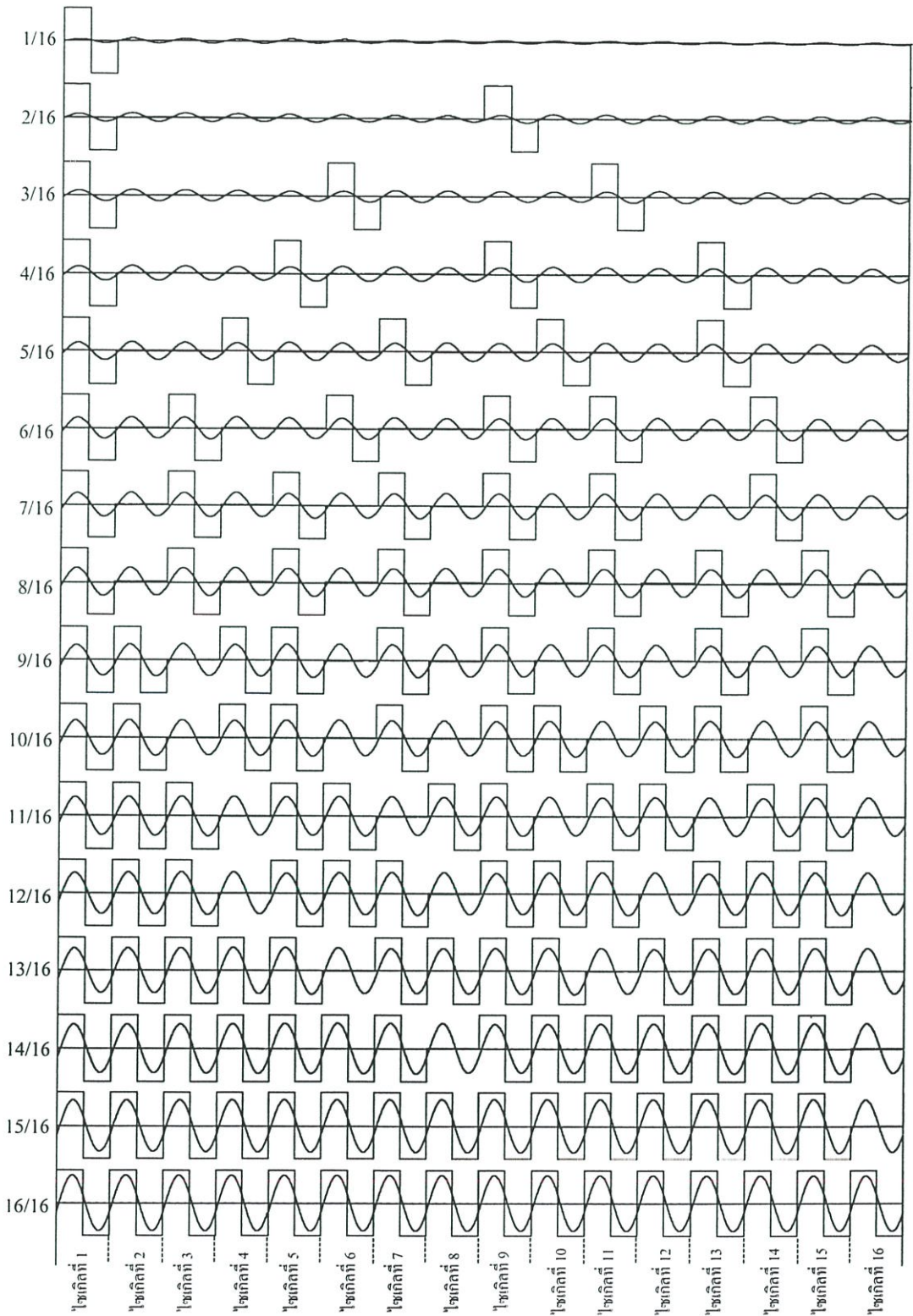
5.1 บทนำ

ในการปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าในวงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์ความถี่สูงสามารถทำได้ 2 ลักษณะ คือ การควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยวิธีการปรับความถี่ (Frequency Control) และการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยวิธีการปรับจำนวนพัลส์ PDM (Pulse Density Modulation) ซึ่งยังสามารถแบ่งแยกออกได้อีกเป็น 2 หลักการ กล่าวคือ หลักการควบคุมโดยวิธีการปรับจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจาย และหลักการควบคุมโดยวิธีการปรับจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบรวมตัวเป็นกลุ่ม การควบคุมกำลังไฟฟ้าทั้งแบบการปรับจำนวนพัลส์ PDM และแบบการปรับความถี่ (Frequency Control) นี้ จะมีวิธีการควบคุมที่แตกต่างกันโดยสิ้นเชิงรวมทั้งมีข้อดี ข้อเสียที่แตกต่างกัน ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงหลักการทั้ง 2 แบบนี้ในเชิงวิเคราะห์แสดงผลและเปรียบเทียบ โดยในบทที่ 5 นี้จะกล่าวถึง หลักการควบคุมโดยวิธีการปรับจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายและในบทที่ 6 จะกล่าวถึงหลักการควบคุมโดยวิธีการปรับจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบรวมตัวเป็นซึ่งรายละเอียดทั้งหมดจะได้อธิบายในอันดับต่อไปดังนี้

5.2 หลักการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยวิธีการปรับจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจาย

ในการปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าในวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเรโซแนนท์โดยวิธีการปรับลดจำนวนพัลส์ PDM นี้จะกำหนดรูปแบบพัลส์ไว้ทั้งหมด 16 รูปแบบ (pattern) โดยพัลส์ในแต่ละรูปแบบจะประกอบด้วยรูปคลื่นพัลส์ในจำนวนไซเคิลต่อคาบเวลาที่แตกต่างกันจากจำนวนไซเคิลเต็มทั้งหมดรวม 16 ไซเคิลต่อคาบเวลา สำหรับในกรณีพัลส์ PDM ในรูปแบบกระจายจะเป็นการจัดรูปแบบในลักษณะให้รูปคลื่นพัลส์มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอในช่วง 1 คาบเวลาในขณะที่มีการปรับกำลังไฟฟ้าโดยการปรับเปลี่ยนจำนวนพัลส์ PDM ซึ่งมีทั้งหมดรวม 16 รูปแบบ ซึ่งสามารถเขียนแสดงได้ดังรูปที่ 5.1 โดยที่เนื้อหาของการนำเสนอในหัวข้อนี้จะอธิบายหลักการทำงานของพัลส์ PDM ในกรณีตัวอย่างที่มีลักษณะรูปแบบการกระจายในจำนวนรวมทั้งสิ้น 6 รูปแบบ จากรูปแบบที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ทั้งหมดรวม 16 รูปแบบเพื่อให้เห็นขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงในขณะที่มีการปรับลดกำลังไฟฟ้า ซึ่งหลักการปรับลดกำลังไฟฟ้าทั้ง 6 รูปแบบที่นำเสนอนี้จะอาศัยหลักการที่เกี่ยวข้องกับหลักการทำงานของโหมดต่างๆทั้ง 6 โหมด กล่าวคือ โหมด 1, 2, 3, ..., 6 ซึ่งได้

กล่าวไว้แล้วในบทที่ 4 รายละเอียดสำหรับพัลส์ PDM จำนวนรวม 16 รูปแบบสามารถแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 5.1 ลักษณะพัลส์ PDM แบบการกระจายในแต่ละรูปแบบจากจำนวนรวมทั้งสิ้น 16 รูปแบบ

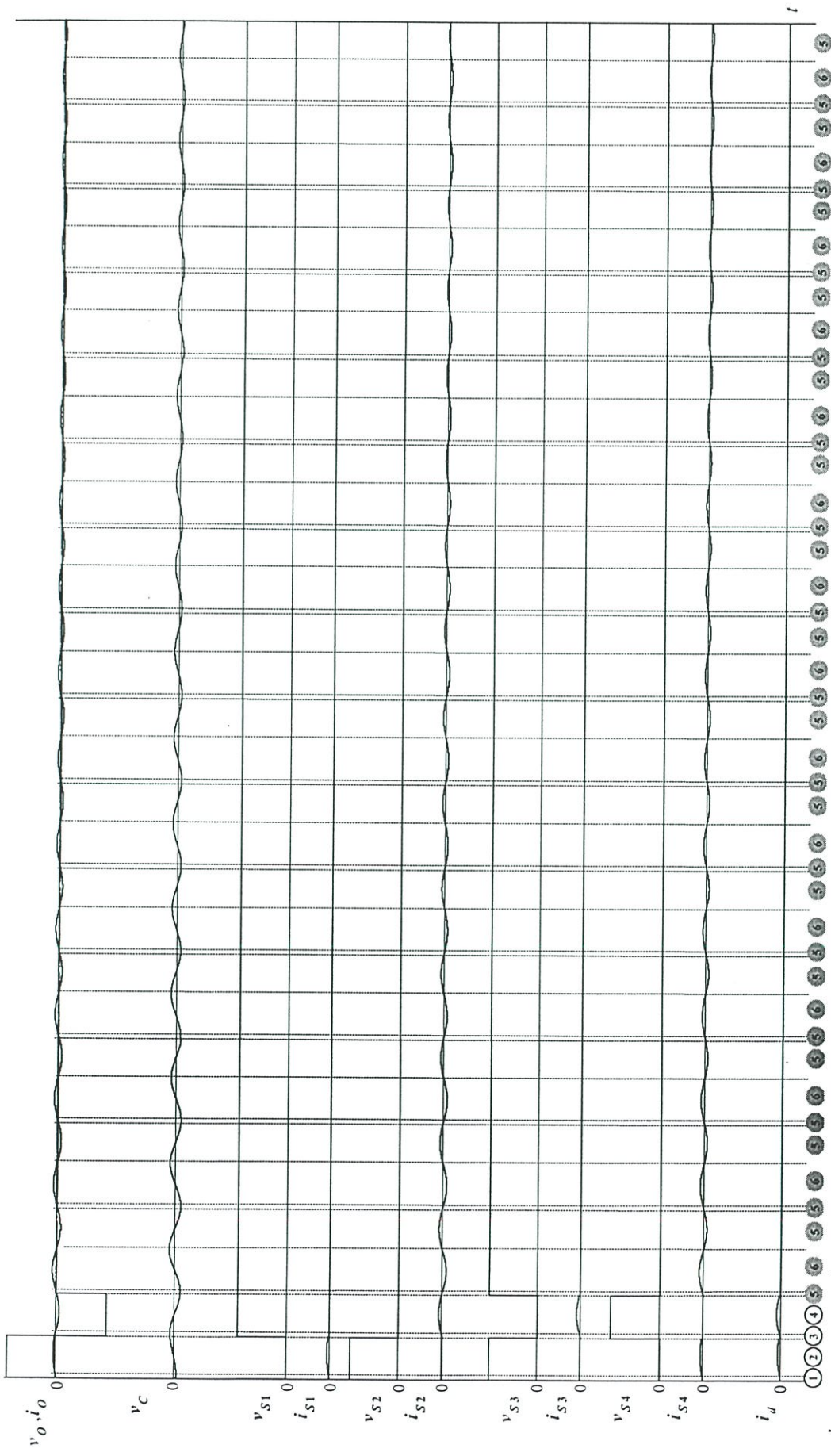
5.3 หลักการปรับควบคุมจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายสำหรับกรณีจำนวน ไซเคิลต่อคาบเวลาเท่ากับ 1/16

5.3.1 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในช่วง 1 คาบเวลา(กรณี 1/16)

ในรูปที่ 5.2 ได้แสดงคลื่น v_o, i_o จำนวนไซเคิลเท่ากับ 1 ไซเคิลจากจำนวนไซเคิลอินพุทที่ป้อนเท่ากับ 16 ไซเคิล ซึ่งเป็นกรณีที่แรงดันและกระแสเอาท์พุท หรือนั่นก็คือกำลังไฟฟ้าเอาท์พุทมีค่าต่ำสุดและยังได้แสดงให้เห็นลักษณะการจับแพทเทิร์นของแรงดันและกระแสเอาท์พุทแรงดันและกระแสที่ตัวสวิตช์ทั้ง 4 $(v_{S_1}, i_{S_1}), (v_{S_2}, i_{S_2}), (v_{S_3}, i_{S_3})$ และ (v_{S_4}, i_{S_4}) ตลอดจนลักษณะกระแสที่จ่ายออกจากแหล่งจ่ายดีซีซัพพลายซึ่งจะเห็นได้ว่าลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสที่ตัวสวิตช์แต่ละชุดในจำนวนทั้งหมด 4 ชุดจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับคลื่นแรงดันและกระแส v_o, i_o โดยในช่วงโหมด 1-4 ชุดแรงดันและกระแส (v_{S_1}, i_{S_1}) จะมีลักษณะเหมือนชุดแรงดันและกระแส $(v_{S_2}, i_{S_2}), (v_{S_3}, i_{S_3})$ และ (v_{S_4}, i_{S_4}) เพียงแต่จะมีลักษณะของเฟสที่ต่างกัน โดยที่ชุดแรงดันและกระแส (v_{S_1}, i_{S_1}) จะเหมือนกับชุดแรงดันและกระแส (v_{S_4}, i_{S_4}) ซึ่งเป็นคู่สวิตช์ที่อยู่เยื้องกันในแต่ละกึ่ง ในทำนองเดียวกันชุดแรงดันและกระแส (v_{S_2}, i_{S_2}) จะมีลักษณะเหมือนกับชุดแรงดันและกระแส (v_{S_3}, i_{S_3}) ซึ่งเป็นสวิตช์ 2 ตัวที่เหลือในแต่ละกึ่งที่อยู่เยื้องกัน นอกจากนี้ยังจะเห็นได้ว่าลักษณะคลื่นกระแส i_d ที่จ่ายออกจากแหล่งจ่ายมีลักษณะเป็นคลื่นทิศทางเดียว (unidirectional current) และจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับกระแสโหลด i_o โดยจะกลับทิศครึ่งไซเคิลลบของกระแสโหลด i_o ให้เป็นซีกบวก ในส่วนของโหมด (5, 6, 5), (5, 6, 5), (5, 6, 5), (5, 6, 5) นับตั้งแต่ไซเคิลที่ 2 แรงดันเอาท์พุท v_o จะไม่มีแรงดันเอาท์พุท ในขณะที่กระแสเอาท์พุท i_o จะยังคงมีอยู่ในลักษณะคลื่นไซน์โดยผ่านสวิตช์และไดโอดชุดล่างของแต่ละกึ่งในวงจรบริดจ์อินเวอร์เตอร์ นอกจากนี้แรงดันที่ C-resonant ยังคงมีแรงดันปรากฏอย่างต่อเนื่องในลักษณะรูปคลื่นไซน์ซึ่งเกิดจากการทำงานของวงจรเรโซแนนท์ RLC ในรูปล่างของวงจรบริดจ์ทำให้กระแสสามารถไหลกลับไปในลักษณะคลื่นไซน์ได้ซึ่งในช่วงขณะนี้สวิตช์คู่บนของวงจรบริดจ์จะ OFF หรือไม่ทำงานและจะมีแรงดันแหล่งจ่าย V_{dc} ปรากฏระหว่างเดรน-ซอร์สที่สวิตช์ทั้งสอง

5.3.2 ค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 1/16)

จากลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่าง ๆ ในวงจรบริดจ์อินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 5.2 สามารถเขียนสรุปค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในวงจรบริดจ์อินเวอร์เตอร์ เช่น แรงดันและกระแสที่ตัวสวิตช์ทั้ง 4 $(v_{S_1}, i_{S_1}), (v_{S_2}, i_{S_2}), (v_{S_3}, i_{S_3})$ และ (v_{S_4}, i_{S_4}) ตลอดจนกระแสที่ออกจากแหล่งจ่ายดีซีซัพพลาย i_d ได้ดังตารางที่ 5.1 โดยในช่วง 1 ไซเคิลแรกซึ่งประกอบด้วยการทำงานในโหมดที่ 1, 2, 3 และ 4 จะได้แรงดันคร่อมสวิตช์เป็น 0 และ V_d ใน



รูปที่ 5.2 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆเฉพาะในช่วง 1 คาบเวลาสำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายในกรณี 1/16 ไซเคิลต่อคาบเวลา

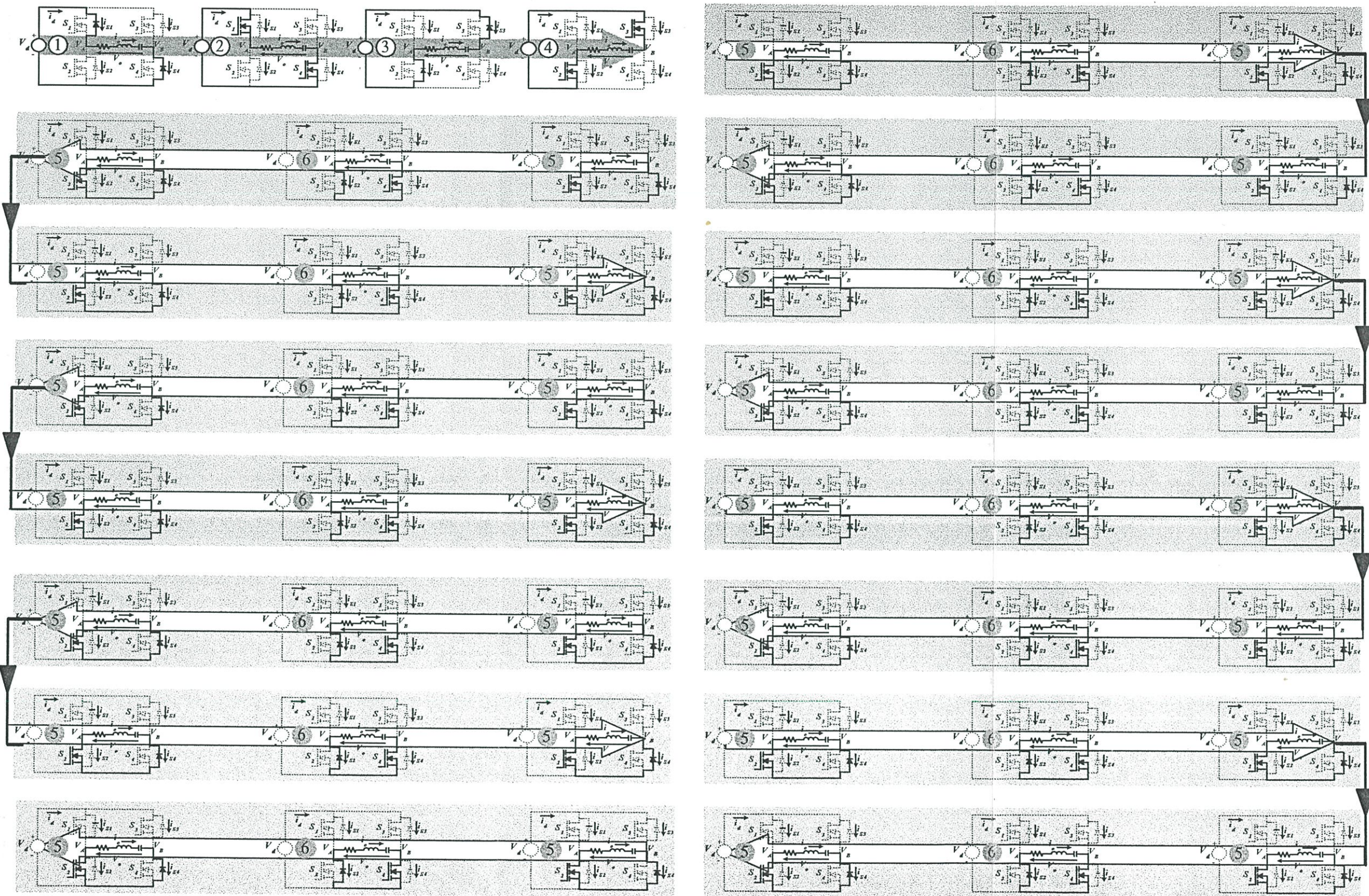
โหมค 5 และ 6 กระแสที่ไหลผ่านสวิตช์ทั้ง 4 โดยเฉพาะสวิตช์ที่ 2 ตัวบนของวงจรบริดจ์อินเวอร์เตอร์จะมีค่าเป็นศูนย์ขณะที่ ขณะที่สวิตช์ 2 ตัวล่างจะมีค่าเป็น i_o และ $-i_o$ สลับไปมาอันเนื่องจากการเกิดเรโซแนนซ์ในรูปล่างของวงจรบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ในขณะที่เดียวกันกระแสที่จ่ายจากแหล่งจ่ายดีซีซึ่งพลายนับจากไซเกิลที่ 2 เป็นต้นไปนั้นจนถึงไซเกิลที่ 16 จะมีค่าเป็นศูนย์คงที่เสมอ

5.3.3 ลำดับขั้นตอนการทำงานของวงจร (Circuit Flow Diagram) ในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 1/16)

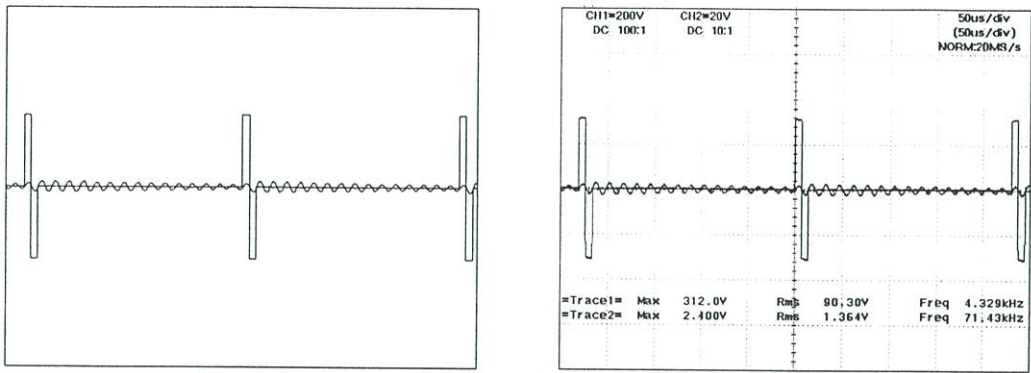
จากลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ในรูปที่ 5.2 และจากตารางแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ในตารางที่ 5.1 สามารถนำมาเขียนสรุปลำดับขั้นตอนการทำงาน ON-OFF ของสวิตช์ทั้ง 4 ของวงจรบริดจ์อินเวอร์เตอร์ได้ดัง Circuit Flow Diagram ในรูปที่ 5.3 โดยสามารถแบ่งการทำงานของวงจรทั้งหมดใน 1 คาบเวลา ออกเป็น 16 กลุ่ม เฉพาะวงจรในกลุ่มแรกสุดจะมีความแตกต่างกับวงจรในกลุ่มอื่นๆ ที่เหลืออีก 15 กลุ่ม โดยวงจรในกลุ่มแรกจะมีโหมคการทำงานเป็น 1, 2, 3, 4 ซึ่งเป็นการทำงานของวงจรในลักษณะที่แหล่งจ่ายดีซีซึ่งพลายจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดในโหมคที่ 2 และ 4 ส่วนในโหมคที่ 1 และ 3 จะเป็นโหมคที่โหลดจ่ายกำลังไฟฟ้าคืนให้กับแหล่งจ่ายดีซีซึ่งพลายเป็นช่วงระยะเวลาสั้นๆ เมื่อเทียบกับโหมค 2 และ 4 ซึ่งเป็นช่วงระยะเวลาที่ยาวนานกว่า ส่วนการทำงานของวงจรที่เหลือทั้งหมดอีก 15 กลุ่ม จะมีลักษณะการทำงานที่เหมือนกัน กล่าวคือตั้งแต่กลุ่มที่ 2, 3, 4, ..., 16 จะเป็นวงจรที่ทำงานในลักษณะของฟรีวิลลิ่ง กล่าวคือแรงดันเอาต์พุตเป็นศูนย์ (กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตเป็นศูนย์) ในขณะที่กระแสเอาต์พุตที่โหลด RLC มีทิศทางไหลกลับไปที่กลับมากในลักษณะของคลื่นไซน์ซีกบวกและซีกลบ จะเห็นได้ว่าวงจรทั้งหมด 16 กลุ่ม โหลด RLC ได้รับกำลังไฟฟ้าสุทธิเฉพาะในช่วงการทำงานของวงจรในกลุ่มแรกเท่านั้น ซึ่งการทำงานในรูปแบบของแพทเทิร์น PDM 1/16 ไซเกิลนี้ โหลดจะได้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตต่ำสุด เมื่อเทียบกับรูปแบบอื่นๆ ทั้งหมด 16 รูปแบบ

5.3.4 การเปรียบเทียบลักษณะคลื่นแรงดัน กระแส แลปสเปกตรัมจากการวัดและ ซิมูเลต (กรณี 1/16)

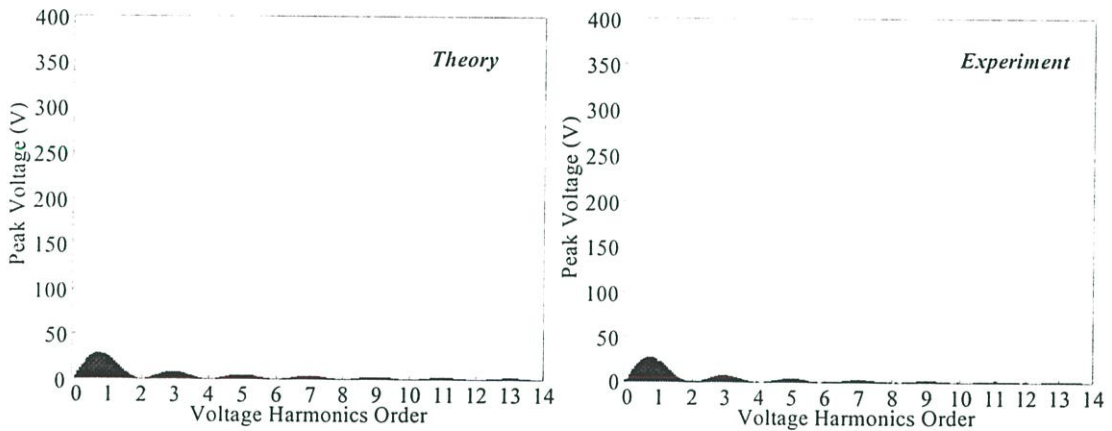
จากความเข้าใจในหลักการพื้นฐานในเรื่องโหมคการทำงานของวงจรในโหมคต่างๆ พร้อมทั้งลักษณะการทำงานของวงจรในลักษณะของ Circuit Flow Diagram ที่ได้กล่าวมาแล้ว เมื่อนำวงจรในโหมคการทำงานต่างๆ มาวิเคราะห์ด้วยสมการที่ (4.1) – (4.21) ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ในหัวข้อที่ 4.2 มาทำการซิมูเลตด้วยโปรแกรม MATLAB ก็จะได้ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแส v_o, i_o ในกรณีพัลส์ PDM 1/16 ดังรูปที่ 5.2 และเมื่อนำทั้งคลื่นแรงดันและกระแสไปหาสเปกตรัมก็จะได้แลปสเปกตรัมของแรงดันและกระแส v_o, i_o ดังรูปที่ 5.4 ผลที่ได้จากการซิมูเลตไม่ว่าจะเป็นคลื่นแรงดันและกระแส v_o, i_o แลปสเปกตรัมของแรงดันและกระแส v_o, i_o เมื่อนำมาเปรียบเทียบเพื่อยืนยันความถูกต้องกับค่าที่ได้จากการทดลองปรากฏว่าได้ผลที่ใกล้เคียงกันมาก



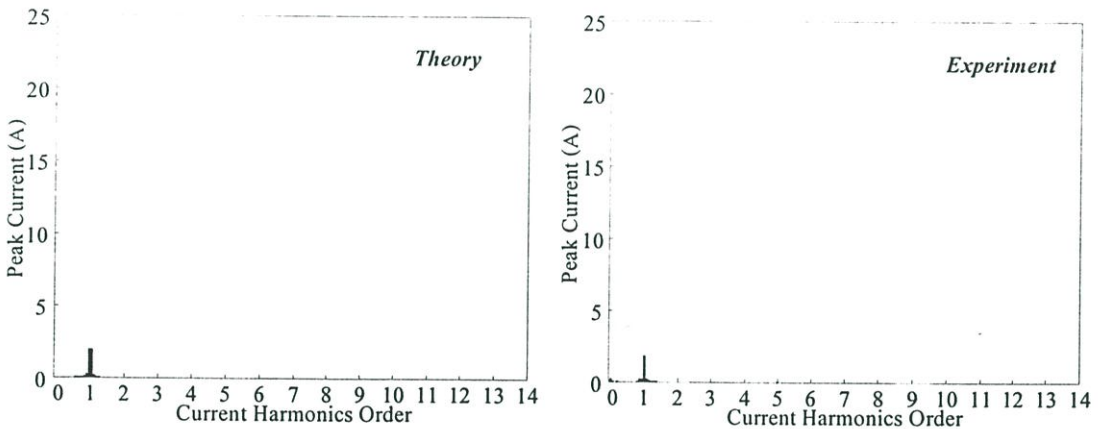
รูปที่ 5.3 ลำดับขั้นตอนการทำงานของวงจร (Circuit Flow Diagram) ในช่วง 1 คาบเวลา สำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายโนกรณี 1/16 ไซเคิลต่อคาบเวลา



a) ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



b) ลักษณะสเปกตรัมของแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



c) ลักษณะสเปกตรัมของกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

รูปที่ 5.4 ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลองสำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายในกรณี 1/16 ไซเคิลต่อคาบเวลา

ในหัวข้อที่ 5.3 ได้กล่าวถึงหลักการปรับควบคุมจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจาย สำหรับกรณีจำนวนไซเคิลต่อคาบเวลาเท่ากับ $1/16$ ไว้แล้วอย่างละเอียด ในหัวข้อถัดจากนี้ไปซึ่งเป็นหัวข้อที่ 5.4, 5.5, ..., 5.8 จะได้กล่าวถึงหลักการปรับควบคุมจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายสำหรับกรณีจำนวนไซเคิลต่อคาบเวลาเท่ากับ $4/16, 7/16, \dots, 16/16$ ตามลำดับ ทั้งนี้เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นถึงความแตกต่างในการทำงานในแต่ละรูปแบบ ซึ่งลำดับขั้นตอนการอธิบายจะมีลักษณะคล้ายกับกรณีพัลส์ PDM $1/16$ ทุกประการจะต่างกันเฉพาะในรายละเอียดของข้อมูลในแต่ละแบบเท่านั้นซึ่งจะมีเนื้อหาในหัวข้อต่างๆดังนี้

5.4 หลักการปรับควบคุมจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายสำหรับกรณีจำนวนไซเคิลต่อคาบเวลาเท่ากับ $4/16$

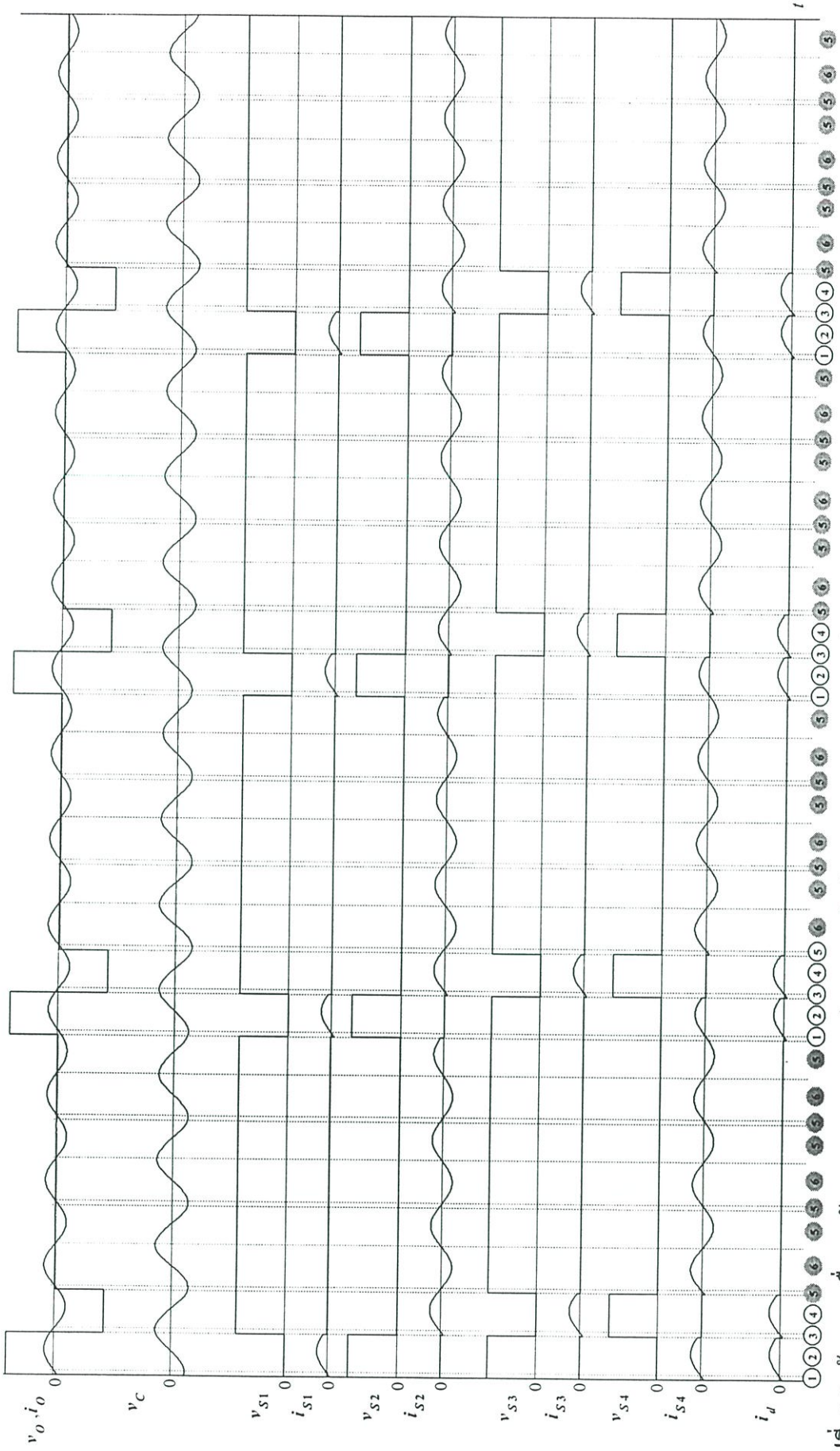
5.4.1 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในช่วง 1 คาบเวลา(กรณี $4/16$)

ในรูปที่ 5.5 ได้แสดงคลื่น v_o, i_o จำนวนไซเคิลเท่ากับ 4 ไซเคิลจากจำนวนไซเคิลอินพุทที่ป้อนเท่ากับ 16 ไซเคิล และยังได้แสดงให้เห็นลักษณะการจัดแพทเทิร์นของแรงดันและกระแสเอาต์พุท แรงดันและกระแสที่ตัวสวิตช์ทั้ง 4 (v_{S_1}, i_{S_1}), (v_{S_2}, i_{S_2}), (v_{S_3}, i_{S_3}) และ (v_{S_4}, i_{S_4}) ตลอดจนลักษณะกระแสที่จ่ายออกจากแหล่งจ่ายดิซิชัฟฟลายซึ่งจะเห็นได้ว่าลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสที่ตัวสวิตช์แต่ละชุดในจำนวนทั้งหมด 4 ชุดจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับคลื่นแรงดันและกระแส v_o, i_o เช่นเดียวกันกับในกรณี $1/16$ นั่นคือในช่วงโหมด 1-4 ชุดแรงดันและกระแส (v_{S_1}, i_{S_1}) จะมีลักษณะเหมือนชุดแรงดันและกระแส (v_{S_2}, i_{S_2}), (v_{S_3}, i_{S_3}) และ (v_{S_4}, i_{S_4}) เพียงแต่จะมีลักษณะของเฟสที่ต่างกันโดยที่ชุดแรงดันและกระแส (v_{S_1}, i_{S_1}) จะเหมือนกับชุดแรงดันและกระแส (v_{S_4}, i_{S_4}) ซึ่งเป็นคู่สวิตช์ที่อยู่เยื้องกันในแต่ละกึ่ง ในทำนองเดียวกันชุดแรงดันและกระแส (v_{S_2}, i_{S_2}) จะมีลักษณะเหมือนกับชุดแรงดันและกระแส (v_{S_3}, i_{S_3}) ซึ่งเป็นสวิตช์ 2 ตัวที่เหลือในแต่ละกึ่งที่อยู่เยื้องกัน นอกจากนี้ยังจะเห็นว่าลักษณะคลื่นกระแส i_d ที่จ่ายออกจากแหล่งจ่ายมีลักษณะเป็นคลื่นทิศทางเดียว (unidirectional current) และจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับกระแสโหลด i_o โดยจะกลับทิศครึ่งไซเคิลลบของกระแสโหลด i_o ให้เป็นซีกบวก ในส่วนของโหมด (5, 6, 5) นั้นจะเกิดขึ้นในไซเคิลที่ 2-4, 6-8, 11-12 และ 14-16 ซึ่งจะให้แรงดันเอาต์พุท v_o เป็นศูนย์ในขณะที่กระแสเอาต์พุท i_o จะยังคงมีอยู่ในลักษณะคลื่นไซน์โดยผ่านสวิตช์และไดโอดชุดล่างของแต่ละกึ่งในวงจรบริดจ์อินเวอร์เตอร์เช่นเดียวกับในกรณี $1/16$ เพียงแต่จะมีขนาดเพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงดันเอาต์พุทที่เพิ่มขึ้น โดยที่แรงดันที่ C-resonant ยังคงมีแรงดันปรากฏอย่างต่อเนื่องเช่นเดียวกับในกรณี $1/16$ ในลักษณะรูปคลื่นไซน์ซึ่งเกิดจากการทำงานของวงจรเรโซแนนท์ RLC ในรูปกลางของวงจรบริดจ์ทำให้กระแสสามารถ

ไหลกลับไปมาในลักษณะคลื่นไซน์ได้ซึ่งในช่วงขณะนี้สวิตช์คู่บนของวงจรบริดจ์จะ OFF หรือไม่ทำงานและจะมีแรงดันแหล่งจ่าย V_{dc} ปรากฏระหว่างแคโรน-ชอร์สที่สวิตช์ทั้งสอง

5.4.2 ค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 4/16)

จากลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ในวงจรบริดจ์อินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 5.5 สามารถเขียนสรุปค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในวงจรบริดจ์อินเวอร์เตอร์ เช่น แรงดันและกระแสที่ตัวสวิตช์ทั้ง 4 (v_{S_1}, i_{S_1}) , (v_{S_2}, i_{S_2}) , (v_{S_3}, i_{S_3}) และ (v_{S_4}, i_{S_4}) ตลอดจนกระแสที่ออกจากแหล่งจ่ายดีซีซัพพลาย i_d ได้ดังตารางที่ 5.2 โดยการทำงานในโหมดที่ 1, 2, 3 และ 4 จะเกิดขึ้นที่ไซเกิลที่ 1, 5, 9 และ 13 โดยที่โหมดนี้จะได้แรงดันคร่อมสวิตช์เป็น 0 และ V_d ในขณะที่กระแสที่ไหลผ่านสวิตช์ทั้ง 4 จะมีค่าเป็น i_o และ $-i_o$ สลับกันไปในแต่ละโหมด ส่วนในโหมด 5 และ 6 ซึ่งจะเกิดขึ้นในช่วงไซเกิลที่ 2-4, 6-8, 10-12 และ 14-16 ซึ่งจะให้แรงดันเอาต์พุตเป็นศูนย์โดยมีแรงดันคร่อมสวิตช์ที่ 2 ตัวบนของวงจรบริดจ์อินเวอร์เตอร์จะมีค่าเป็น V_d และที่สวิตช์ 2 ตัวล่างแรงดันจะมีค่าเป็นศูนย์ ในขณะที่กระแสไหล i_o จะไหลผ่านสวิตช์ 2 ตัวล่างเท่านั้น ขณะเดียวกันกระแสที่จ่ายจากแหล่งจ่าย ดีซีซัพพลาย จะมีค่าเป็นศูนย์คงที่เสมอในช่วงไซเกิลที่แรงดันเอาต์พุตมีค่าเป็นศูนย์



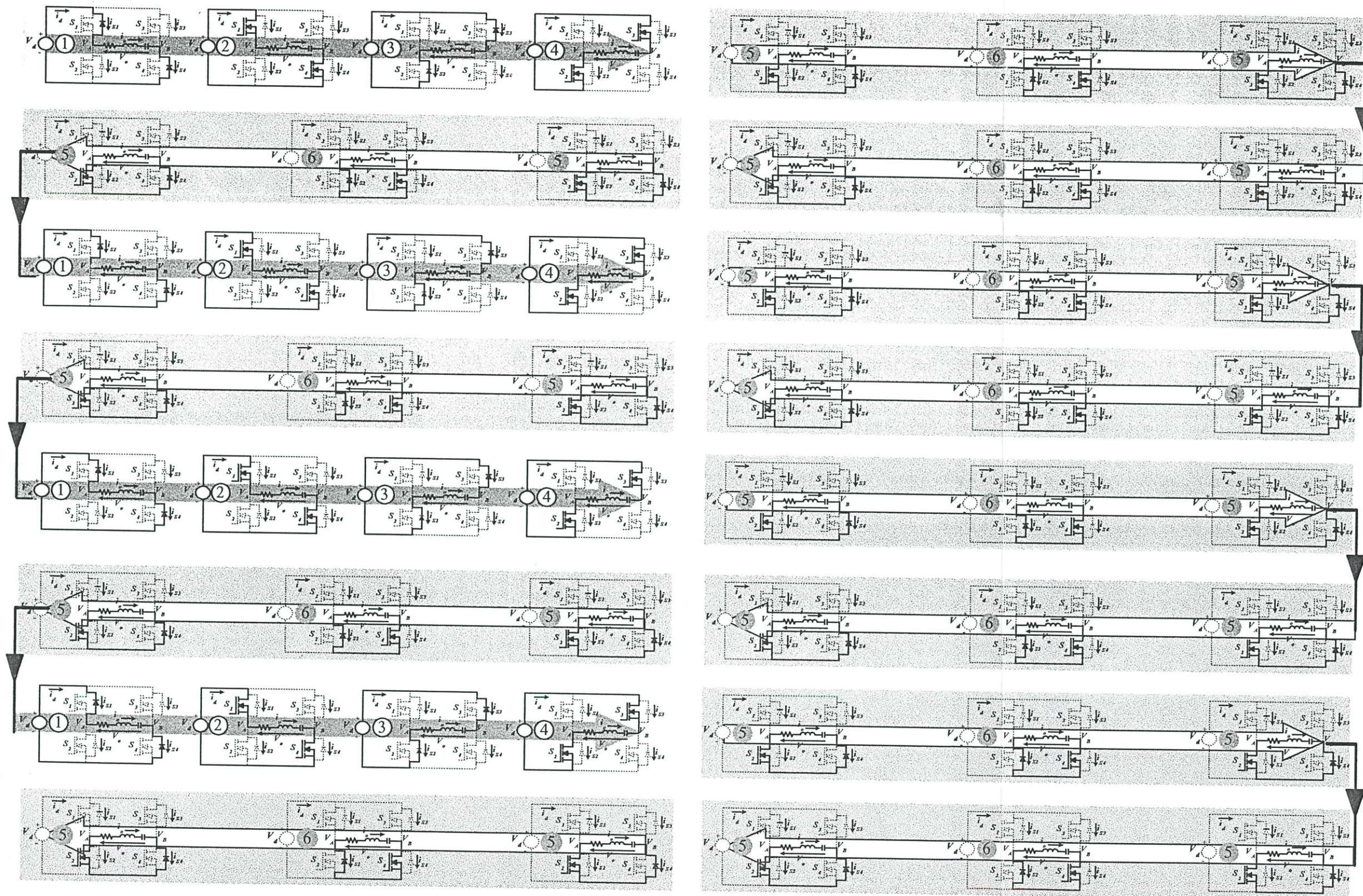
รูปที่ 5.5 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆเฉพาะในช่วง 1 ตามเวลาสำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายในกรณี 4/16 ไซกิลต่อคาบเวลา

5.4.3 ลำดับขั้นตอนการทำงานของวงจรในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 4/16)

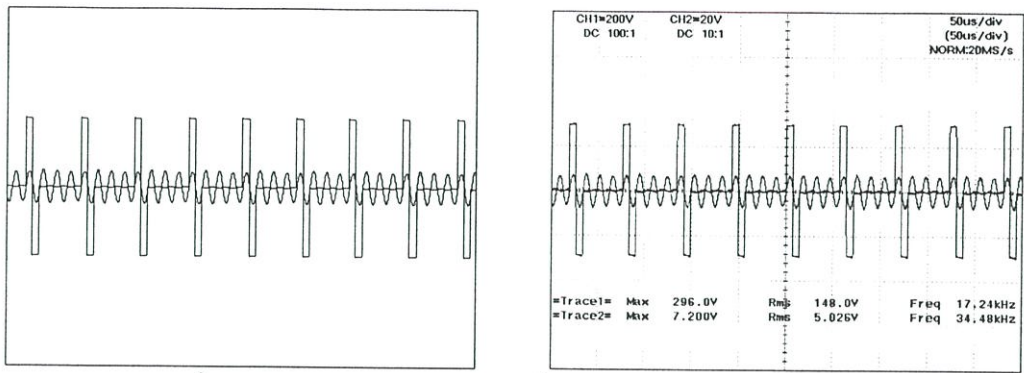
จากลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสในรูปที่ 5.5 และจากตารางค่าแรงดันและกระแสในตารางที่ 5.2 สามารถนำมาเขียนสรุปลำดับขั้นตอนการทำงานของ ON – OFF ของสวิตช์ทั้ง 4 ของวงจรบริดจ์อินเวอร์เตอร์ได้ดัง Circuit Flow Diagram ในรูปที่ 5.6 โดยสามารถแบ่งการทำงานของวงจรทั้งหมดใน 1 คาบเวลา ออกเป็น 16 กลุ่ม โดยวงจรในกลุ่มที่ 1, 5, 9 และ 13 จะมีโหมดการทำงานเป็น 1, 2, 3, 4 ซึ่งที่กลุ่มนี้จะให้แรงดันเอาต์พุต โดยในโหมดที่ 1 และ 3 จะเป็นโหมดที่โหลดจ่ายกำลังไฟฟ้าคืนให้กับแหล่งจ่ายดีซีซีพพลาย ในขณะที่โหมดที่ 2 และ 4 จะเป็นโหมดที่แหล่งจ่ายดีซีซีพพลายจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลด โดยมีช่วงระยะเวลาที่ยาวนานกว่าส่วนการทำงานของวงจรที่เหลือทั้งหมดอีก 12 กลุ่มจะมีลักษณะการทำงานที่เหมือนกัน โดยจะเป็นการทำงานในโหมด 5 และ 6 ซึ่งจะเป็นวงจรที่ทำงานในลักษณะของฟรีวิลลิง กล่าวคือแรงดันเอาต์พุตเป็นศูนย์ (กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตเป็นศูนย์) โดยที่แหล่งจ่ายดีซีซีพพลายจะไม่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลด ในขณะที่กระแสเอาต์พุตที่โหลด RLC มีทิศทางไหลกลับไปกลับมาในลักษณะของคลื่นไซน์ซีกบวกและซีกลบ

5.4.4 การเปรียบเทียบลักษณะคลื่นแรงดัน กระแส แลปสเปกตรัมจากการวัดและ ซิมูเลต (กรณี 4/16)

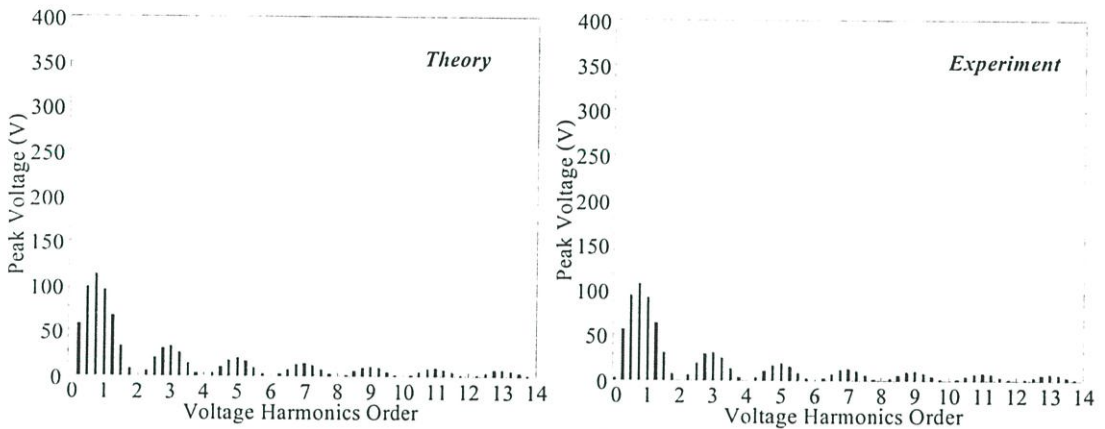
จากความเข้าใจในหลักการพื้นฐานในเรื่องโหมดการทำงานของวงจรในโหมดต่างๆ พร้อมทั้งลักษณะการทำงานของวงจรในลักษณะของ Circuit Flow Diagram ที่ได้กล่าวมาแล้ว เมื่อนำวงจรในโหมดการทำงานต่างๆ มาวิเคราะห์ด้วยสมการที่ (4.1) – (4.21) ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ในหัวข้อที่ 4.2 มาทำการซิมูเลตด้วยโปรแกรม MATLAB ก็จะได้ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแส v_o, i_o ในกรณีพัลส์ PDM 4/16 ดังรูปที่ 5.5 และเมื่อนำทั้งคลื่นแรงดันและกระแสไปหาสเปกตรัมก็จะได้แถบสเปกตรัมของแรงดันและกระแส v_o, i_o ดังรูปที่ 5.7 จะเห็นได้ว่าค่ายอดของแถบสเปกตรัมของแรงดันและกระแส v_o, i_o จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นจากในกรณีพัลส์ PDM 1/16 และผลที่ได้จากการซิมูเลตนี้ไม่ว่าจะเป็นคลื่นแรงดันและกระแส v_o, i_o แถบสเปกตรัมของแรงดันและกระแส v_o, i_o เมื่อนำมาเปรียบเทียบเพื่อยืนยันความถูกต้องกับค่าที่ได้จากการทดลองปรากฏว่าได้ผลที่ใกล้เคียงกันมาก



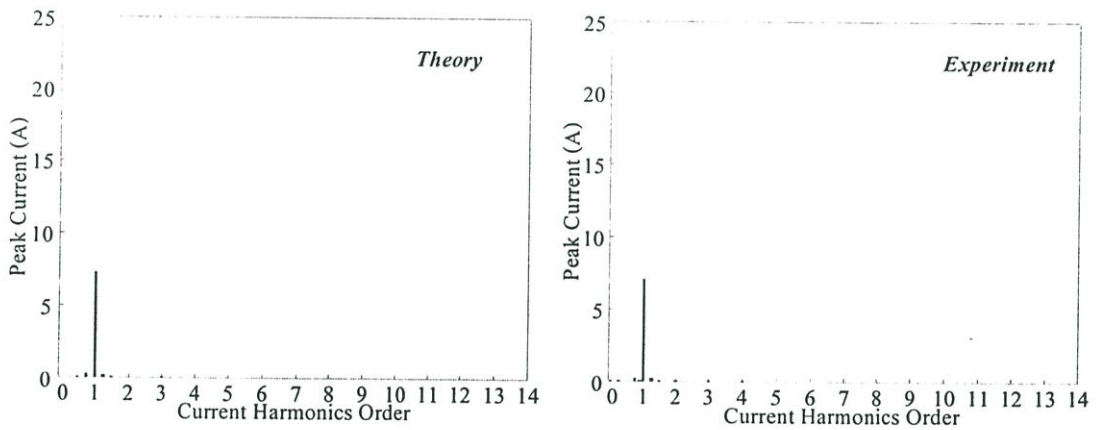
รูปที่ 5.6 ลำดับขั้นตอนการทำงานของวงจร (Circuit Flow Diagram) ในช่วง 1 คาบเวลา สำหรับพัดลม PDM ในรูปแบบการกระจายในกรณี 4/16 ไซเคิลต่อคาบเวลา



a) ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



b) ลักษณะสเปกตรัมของแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



c) ลักษณะสเปกตรัมของกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

รูปที่ 5.7 ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลองสำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายในกรณี 4/16 ไซเคิลต่อคาบเวลา

5.5 หลักการปรับควบคุมจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายสำหรับกรณีจำนวน ไซเคิลต่อคาบเวลา เท่ากับ 7/16

5.5.1 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 7/16)

ในรูปที่ 5.8 ได้แสดงคลื่น v_o, i_o จำนวนไซเคิลเท่ากับ 7 ไซเคิลจากจำนวนไซเคิลอินพุตที่ป้อนเท่ากับ 16 ไซเคิล โดยแสดงให้เห็นลักษณะการจัดแพทเทิร์นของแรงดันและกระแสเอาต์พุต แรงดันและกระแสที่ตัวสวิตช์ทั้ง 4 (v_{S_1}, i_{S_1}), (v_{S_2}, i_{S_2}), (v_{S_3}, i_{S_3}) และ (v_{S_4}, i_{S_4}) ตลอดจนลักษณะกระแสที่จ่ายออกจากแหล่งจ่ายดีซีซึ่งพลาจากรูปจะเห็นได้ว่าจะมีแรงดันปรากฏที่ไซเคิลที่ 1, 3, 5, 7, 9, 11 และ 14 ซึ่งมีการกระจายตัวอยู่ตลอดคาบเวลา ในขณะที่กระแสโหลด i_o จะมีขนาดมากขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนไซเคิลของแรงดันเอาต์พุต

5.5.2 ค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 7/16)

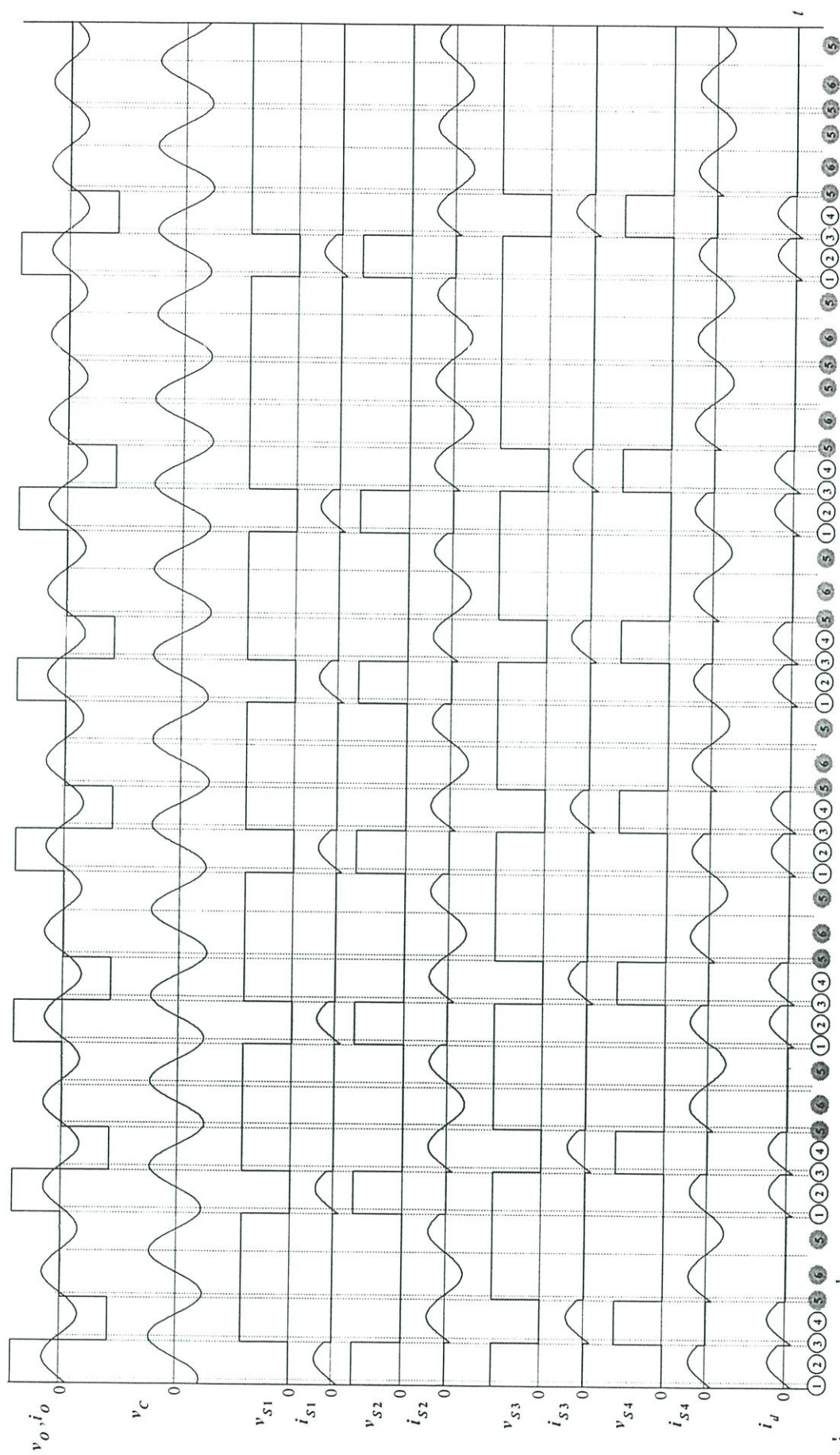
จากลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในวงจรบริดจ์อินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 5.8 สามารถเขียนสรุปค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในวงจรบริดจ์อินเวอร์เตอร์ได้ดังตารางที่ 5.3

5.5.3 ลำดับขั้นตอนการทำงานของวงจร (Circuit Flow Diagram) ในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 7/16)

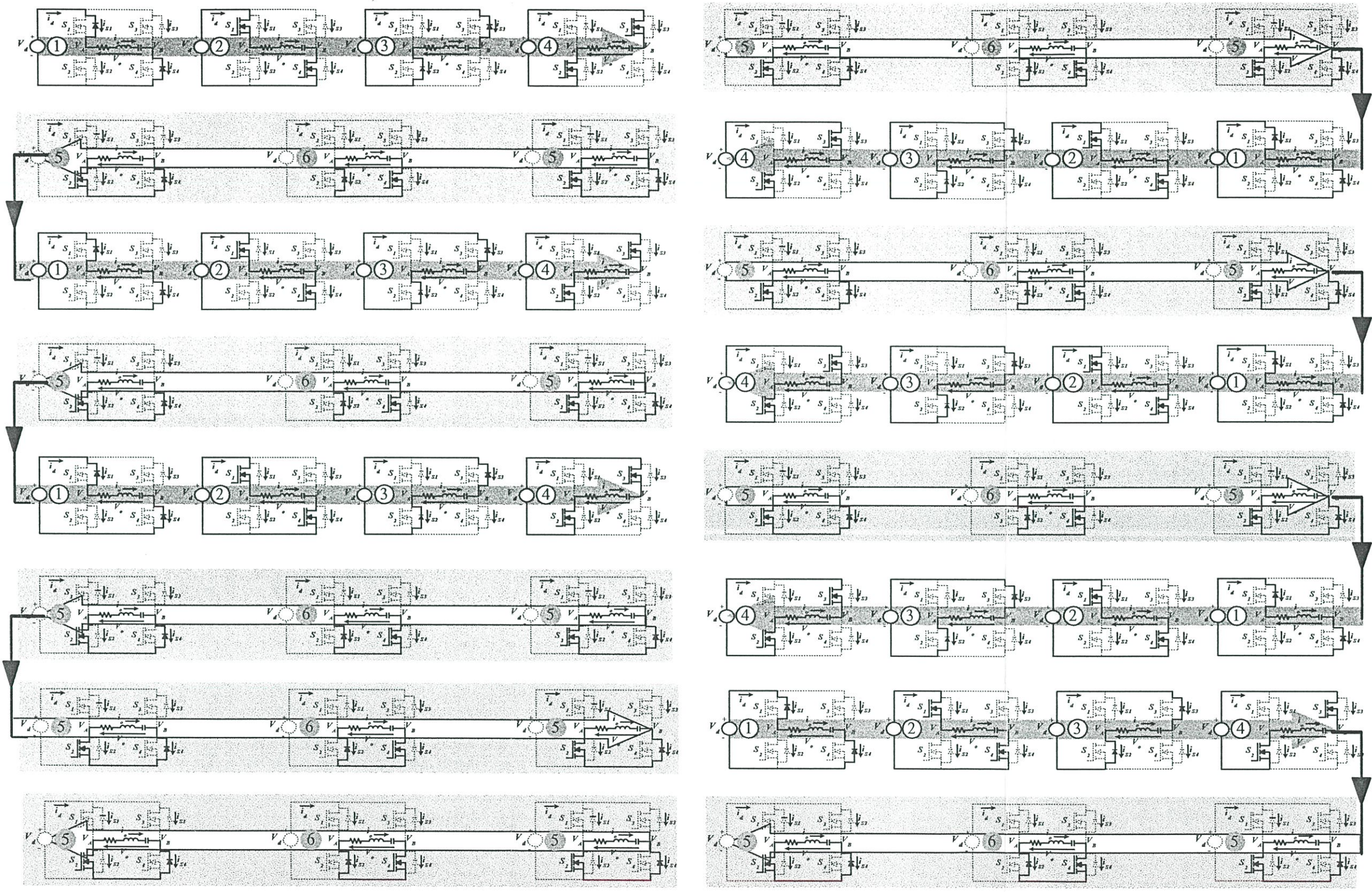
จากลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ในรูปที่ 5.8 และจากตารางแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ในตารางที่ 5.3 สามารถนำมาเขียนสรุปลำดับขั้นตอนการทำงานของ ON-OFF ของสวิตช์ทั้ง 4 ของวงจรบริดจ์อินเวอร์เตอร์ได้ดัง Circuit Flow Diagram ในรูปที่ 5.9 โดยสามารถแบ่งการทำงานของวงจรทั้งหมดใน 1 คาบเวลา ออกเป็น 16 กลุ่ม เฉพาะวงจรในกลุ่มที่ 1, 3, 5, 7, 9, 11 และ 14 จะมีความแตกต่างกับวงจรในกลุ่มอื่นๆ ที่เหลืออีก 9 กลุ่ม โดยวงจรในกลุ่มเหล่านี้จะมีโหมดการทำงานเป็น 1, 2, 3, 4 ซึ่งเป็นการทำงานของวงจรที่ให้แรงดันเอาต์พุต ส่วนการทำงานของวงจรที่เหลือทั้งหมดอีก 9 กลุ่ม จะมีลักษณะการทำงานที่เหมือนกัน กล่าวคือ แรงดันเอาต์พุตเป็นศูนย์ (กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตเป็นศูนย์)

5.5.4 การเปรียบเทียบลักษณะคลื่นแรงดัน กระแส แลปสเปกตรัมจากการวัดและซิมูเลต (กรณี 7/16)

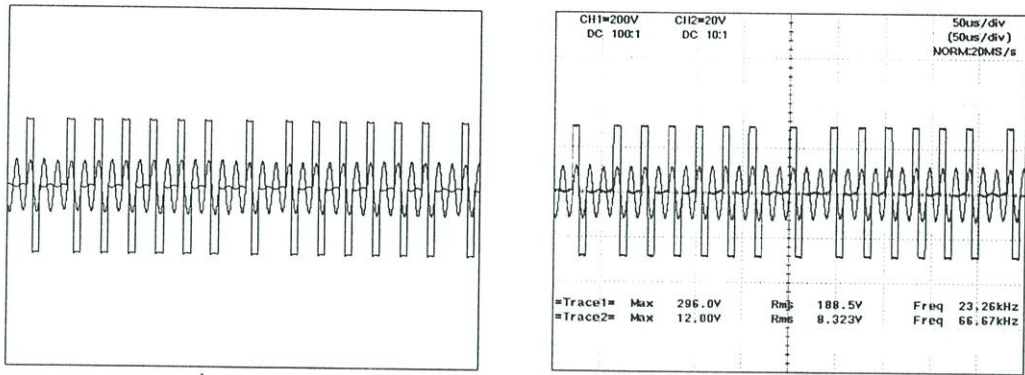
จากรูปที่ 5.10 แสดงการเปรียบเทียบคลื่นแรงดันและกระแสที่ได้จากการซิมูเลต แลปสเปกตรัมของแรงดันและกระแส v_o, i_o ซึ่งผลที่ได้จากการซิมูเลตไม่ว่าจะเป็นคลื่นแรงดันและกระแส v_o, i_o แลปสเปกตรัมของแรงดันและกระแส v_o, i_o เมื่อนำมาเปรียบเทียบเพื่อยืนยันความถูกต้องกับคลื่นแรงดันและกระแส v_o, i_o แลปสเปกตรัมของแรงดัน v_o และแลปสเปกตรัมของกระแสโหลด i_o ที่ได้จากการทดลองปรากฏว่าได้ผลที่ใกล้เคียงกันมาก



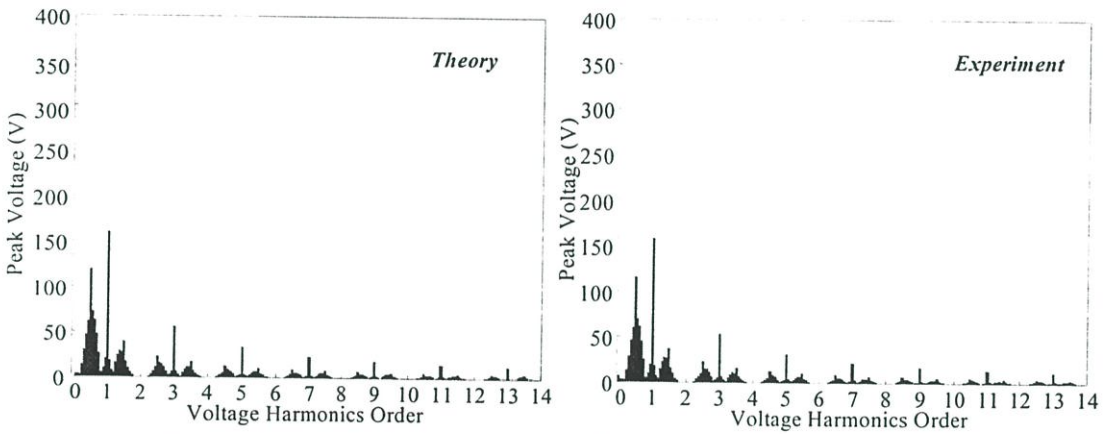
รูปที่ 5.8 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆเฉพาะในช่วง 1 ตามเวลาสำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายในกรณี 7/16 ที่เกิดต่อคาบเวลา



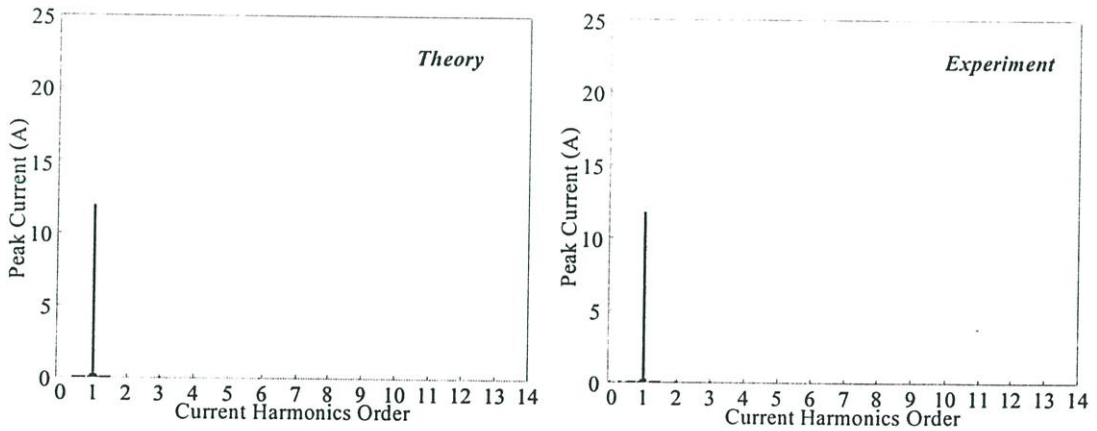
รูปที่ 5.9 ลำดับขั้นตอนการทำงานของวงจรในช่วง 1 คาบเวลา สำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายในกรณี 7/16 ไซกิลต่อคาบเวลา



a) ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



b) ลักษณะสเปกตรัมของแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



c) ลักษณะสเปกตรัมของกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

รูปที่ 5.10 ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลองสำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายในกรณี 7/16 ไซเคิลต่อคาบเวลา

5.6 หลักการปรับควบคุมจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายสำหรับกรณีจำนวน ไซเกิลต่อคาบเวลาเท่ากับ 10/16

5.6.1 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 10/16)

ในรูปที่ 5.11 ได้แสดงคลื่น v_o, i_o จำนวนไซเกิลเท่ากับ 10 ไซเกิล จากจำนวน ไซเกิลอินพุตที่ป้อนเท่ากับ 16 ไซเกิล โดยแสดงให้เห็นลักษณะการจัดแพทเทิร์นของแรงดันและ กระแสเอาต์พุต แรงดันและกระแสที่ตัวสวิตช์ทั้ง 4 (v_{S_1}, i_{S_1}), (v_{S_2}, i_{S_2}), (v_{S_3}, i_{S_3}) และ (v_{S_4}, i_{S_4}) ตลอดจนลักษณะกระแสที่จ่ายออกจากแหล่งจ่ายดีซีซีพพลาย ซึ่งจะเห็นได้ว่าใน กรณีนี้จะมีพัลส์เพิ่มขึ้นเป็น 10 ไซเกิลโดยจะปรากฏที่ไซเกิลที่ 1 - 2 , 4 - 5 , 7 , 9 - 10 , 12 - 13 และ 15 ในขณะที่กระแสโหลด i_o ก็จะมีขนาดเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนไซเกิลของ แรงดันเอาต์พุต

5.6.2 ค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 10/16)

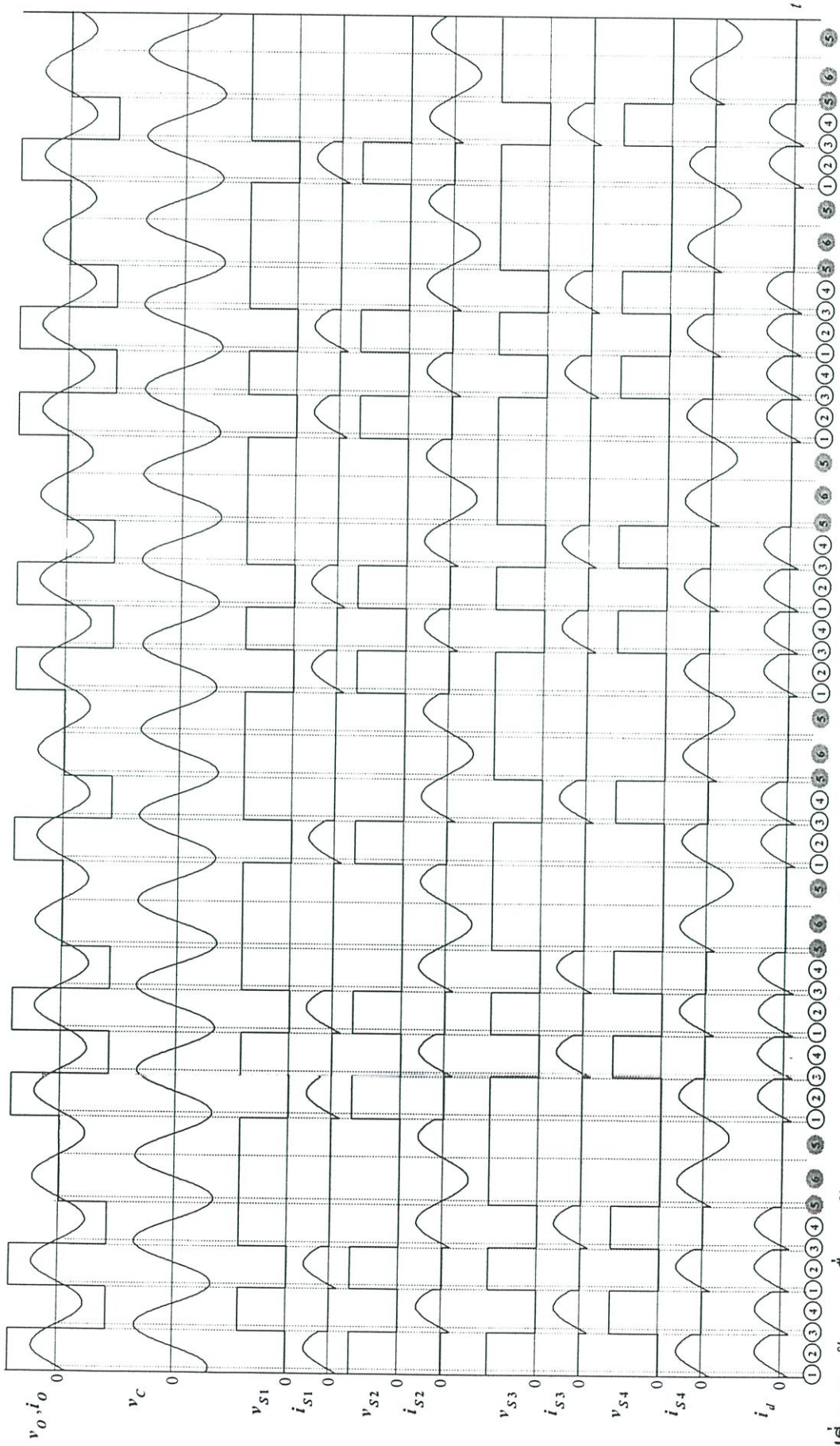
จากลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่าง ๆ ในวงจรบริดจ์อินเวอร์เตอร์ในรูป ที่ 5.11 สามารถเขียนสรุปค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในวงจรบริดจ์อินเวอร์เตอร์ได้ดังตาราง ที่ 5.4

5.6.3 ลำดับขั้นตอนการทำงานของวงจร (Circuit Flow Diagram) ในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 10/16)

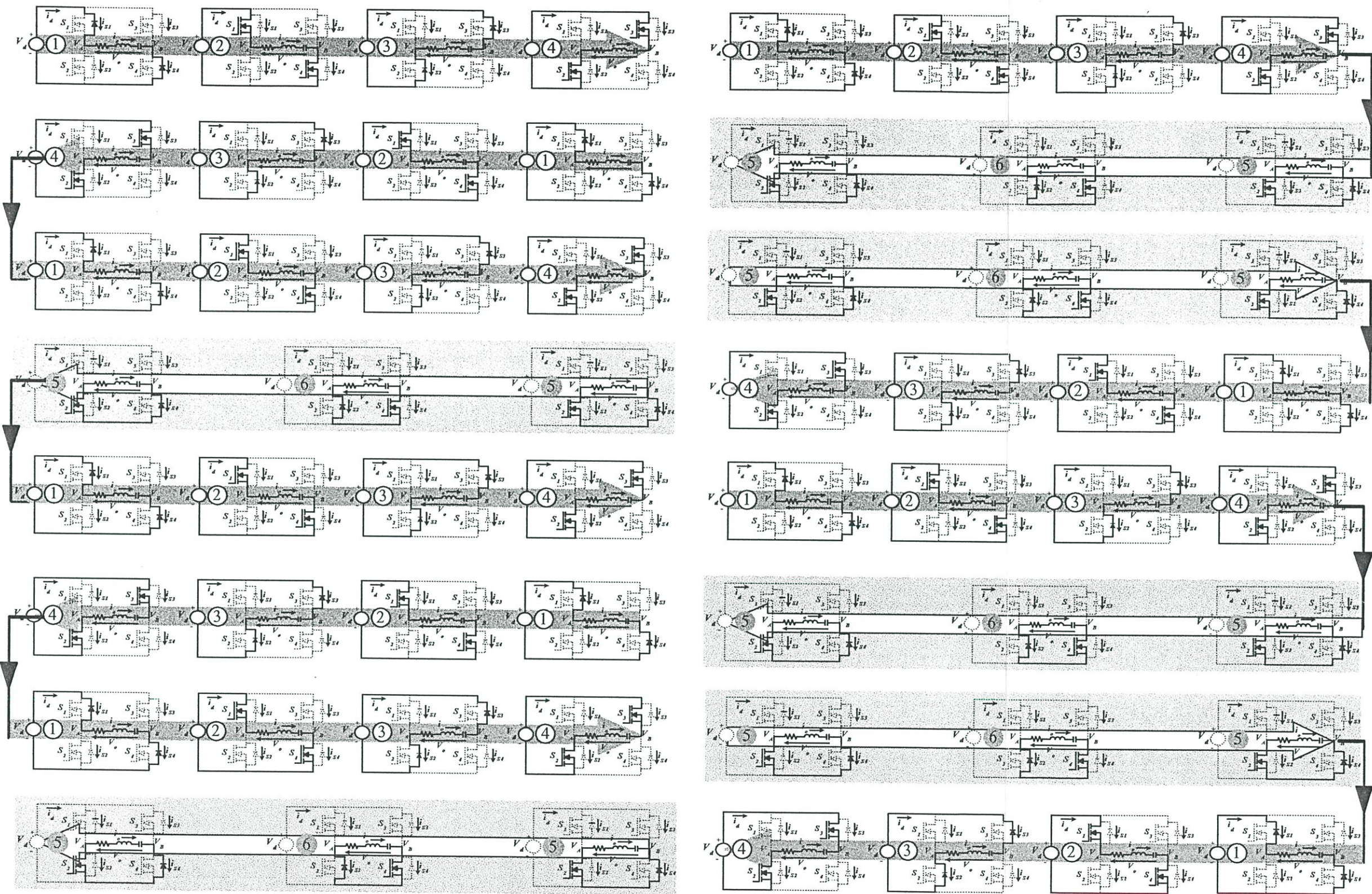
จากลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ในรูปที่ 5.11 และจากตารางแรง ดันและกระแสตามจุดต่าง ๆ ในตารางที่ 5.4 สามารถนำมาเขียนสรุปลำดับขั้นตอนการทำงาน ON - OFF ของสวิตช์ทั้ง 4 ของวงจรบริดจ์อินเวอร์เตอร์ได้ดัง Circuit Flow Diagram ในรูปที่ 5.12 โดยสามารถแบ่งการทำงานของวงจรทั้งหมดใน 1 คาบเวลา ออกเป็น 16 กลุ่ม โดยวงจรในกลุ่มที่ 1 - 2 , 4 - 5 , 7 , 9 - 10 , 12 - 13 และ 15 จะมีโหมดการทำงานเป็น 1 , 2 , 3 , 4 ซึ่งเป็นกลุ่มการทำงานของ วงจรที่ให้แรงดันเอาต์พุต ในขณะที่กลุ่มอื่นๆ ที่เหลือซึ่งประกอบด้วยกลุ่มที่ 3 , 6 , 8 , 11 , 14 และ 16 จะมีลักษณะการทำงานที่ให้แรงดันเอาต์พุตเป็นศูนย์ (กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตเป็นศูนย์)

5.6.4 การเปรียบเทียบลักษณะคลื่นแรงดัน กระแส แลบทสเปกตรัมจากการวัดและซิมูเลต (กรณี 10/16)

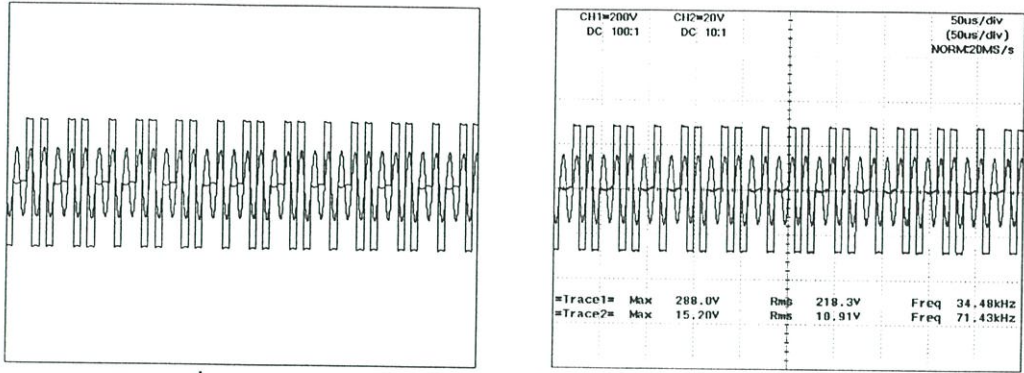
จากรูปที่ 5.13 แสดงการเปรียบเทียบคลื่นแรงดันและกระแสที่ได้จากการซิมูเลต แลบทสเปกตรัมของแรงดันและกระแส v_o, i_o ซึ่งผลที่ได้จากการซิมูเลตไม่ว่าจะเป็นคลื่นแรงดัน และกระแส v_o, i_o แลบทสเปกตรัมของแรงดันและกระแส v_o, i_o เมื่อนำมาเปรียบเทียบเพื่อยืนยันความถูกต้องกับคลื่นแรงดันและกระแส v_o, i_o แลบทสเปกตรัมของแรงดัน v_o และแลบทสเปกตรัมของกระแสโหลด i_o ที่ได้จากการทดลองปรากฏว่าได้ผลที่ใกล้เคียงกัน



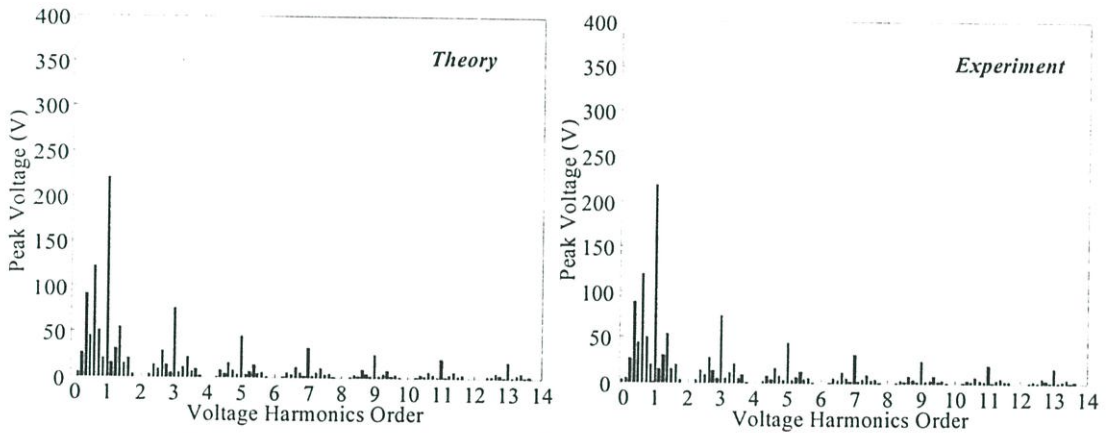
รูปที่ 5.11 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆเฉพาะในช่วง 1 คาบเวลาสำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายในกรณี 10/16 ที่เกิดต่อคาบเวลา



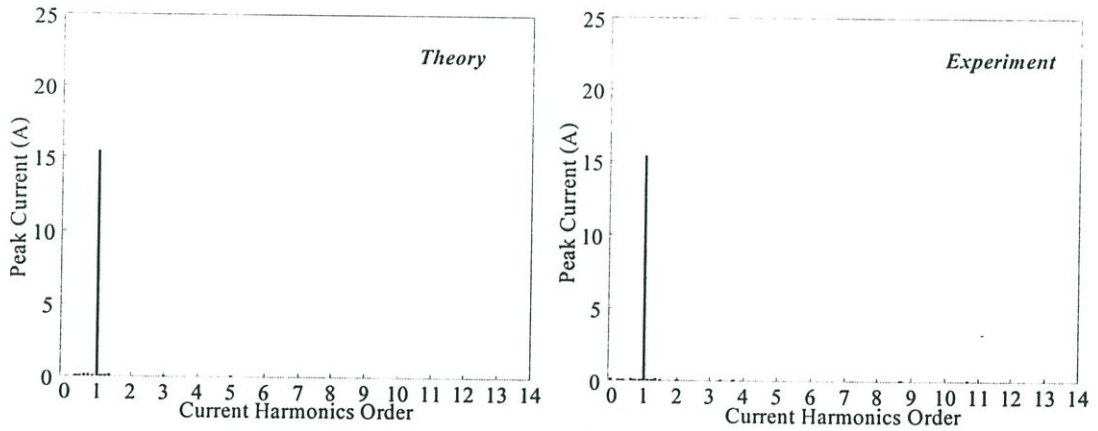
รูปที่ 5.12 ลำดับขั้นตอนการทำงานของวงจรในช่วง 1 คาบเวลา สำหรับพัดรี PDM ในรูปแบบการกระจายในกรณี 10/16 ไซเคิลต่อคาบเวลา



a) ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



b) ลักษณะสเปกตรัมของแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



c) ลักษณะสเปกตรัมของกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

รูปที่ 5.13 ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลองสำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายในกรณี 10/16 ไซเกิลต่อคาบเวลา

5.7 หลักการปรับควบคุมจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายสำหรับกรณีจำนวน ไซเคิลต่อคาบเวลาเท่ากับ 13/16

5.7.1 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 13/16)

ในรูปที่ 5.14 ได้แสดงคลื่น v_o, i_o จำนวนไซเคิลเท่ากับ 13 ไซเคิล จากจำนวนไซเคิลอินพุตที่ป้อนเท่ากับ 16 ไซเคิล โดยได้แสดงให้เห็นลักษณะการจัดแพทเทิร์นของแรงดันและกระแสเอาต์พุต แรงดันและกระแสที่ตัวสวิตช์ทั้ง 4 $(v_{S_1}, i_{S_1}), (v_{S_2}, i_{S_2}), (v_{S_3}, i_{S_3})$ และ (v_{S_4}, i_{S_4}) ตลอดจนลักษณะกระแสที่จ่ายออกจากแหล่งจ่ายดีซีซีพพลาย โดยกรณีนี้จะมีแรงดันเอาต์พุตปรากฏที่ไซเคิลที่ 1-5, 7-10 และ 12-15 โดยที่กระแสโหลด i_o ก็ยังคงมีขนาดเพิ่มขึ้นตามจำนวนไซเคิลของแรงดันเอาต์พุตที่เพิ่มขึ้น

5.7.2 ค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 13/16)

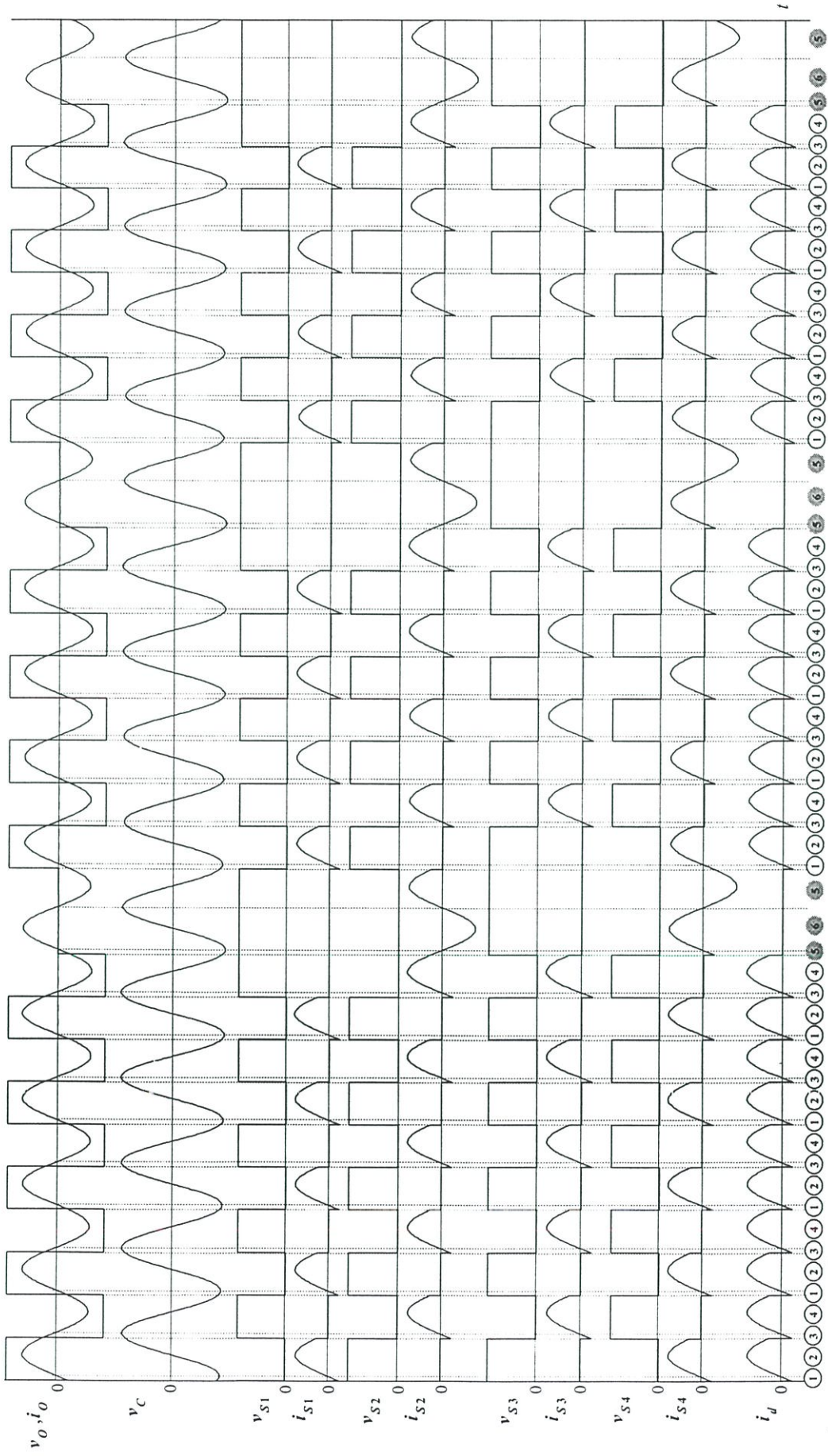
จากลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ในวงจรบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ในรูปที่ 5.14 สามารถเขียนสรุปค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ในวงจรบริดจ์อินเวอร์เตอร์ได้ดังตารางที่ 5.5

5.7.3 ลำดับขั้นตอนการทำงานของวงจร (Circuit Flow Diagram) ในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 13/16)

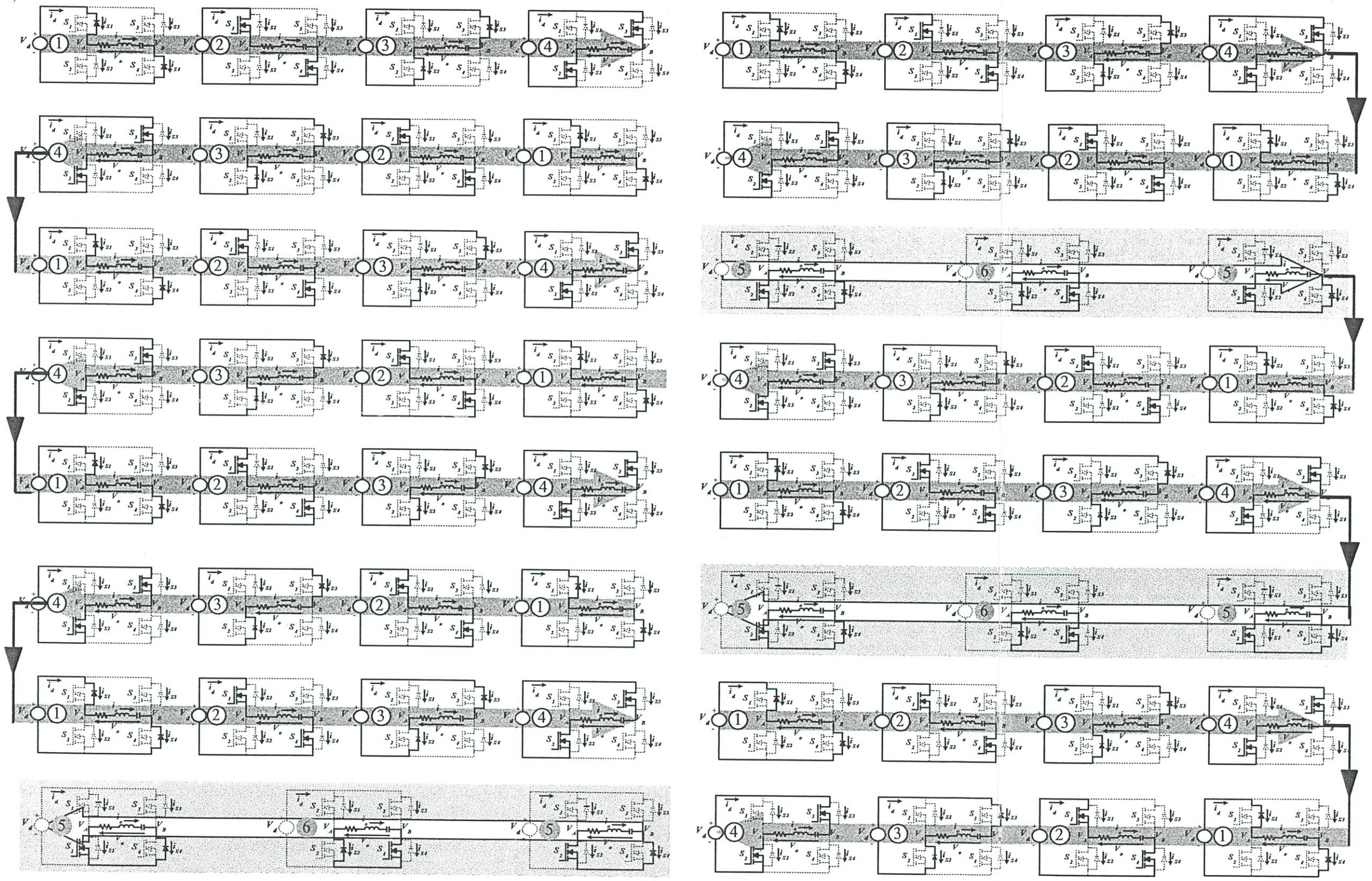
จากลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ในรูปที่ 5.14 และจากตารางแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ในตารางที่ 5.5 สามารถนำมาเขียนสรุปลำดับขั้นตอนการทำงาน ON-OFF ของสวิตช์ทั้ง 4 ของวงจรบริดจ์อินเวอร์เตอร์ได้ดัง Circuit Flow Diagram ในรูปที่ 5.15 โดยสามารถแบ่งการทำงานของวงจรทั้งหมดใน 1 คาบเวลา ออกเป็น 16 กลุ่ม โดยที่วงจรในกลุ่ม 1-5, 7-10 และ 12-15 จะมีโหมดการทำงานเป็น 1, 2, 3, 4 ซึ่งให้แรงดันเอาต์พุต ส่วนการทำงานของวงจรกลุ่มที่เหลือได้แก่กลุ่มที่ 6, 11 และ 16 จะมีลักษณะการทำงานที่ให้แรงดันเอาต์พุตเป็นศูนย์ (กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตเป็นศูนย์)

5.7.4 การเปรียบเทียบลักษณะคลื่นแรงดัน กระแส แอมพลิจูดจากการวัดและซิมูเลต (กรณี 13/16)

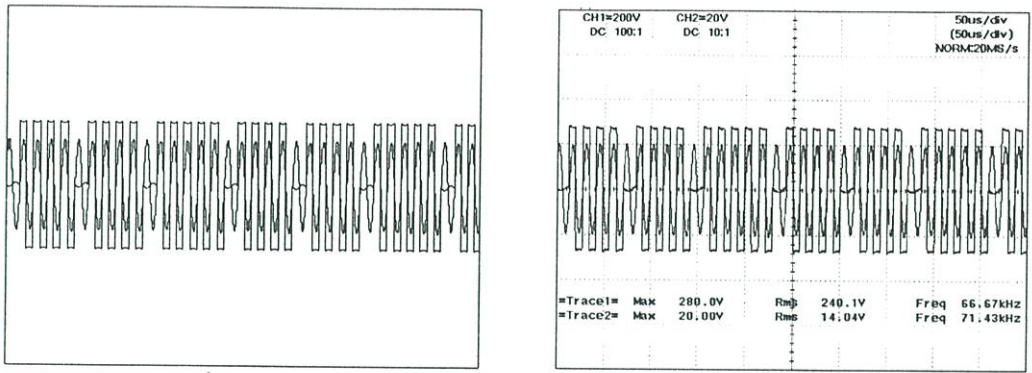
จากรูปที่ 5.16 แสดงการเปรียบเทียบคลื่นแรงดันและกระแสที่ได้จากการซิมูเลต แอมพลิจูดของแรงดันและกระแส v_o, i_o ซึ่งผลที่ได้จากการซิมูเลตไม่ว่าจะเป็นคลื่นแรงดันและกระแส v_o, i_o แอมพลิจูดของแรงดันและกระแส v_o, i_o เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับคลื่นแรงดันและกระแส v_o, i_o แอมพลิจูดของแรงดัน v_o และแอมพลิจูดของกระแสโหลด i_o ที่ได้จากการทดลองปรากฏว่าได้ผลที่ใกล้เคียงกันมาก



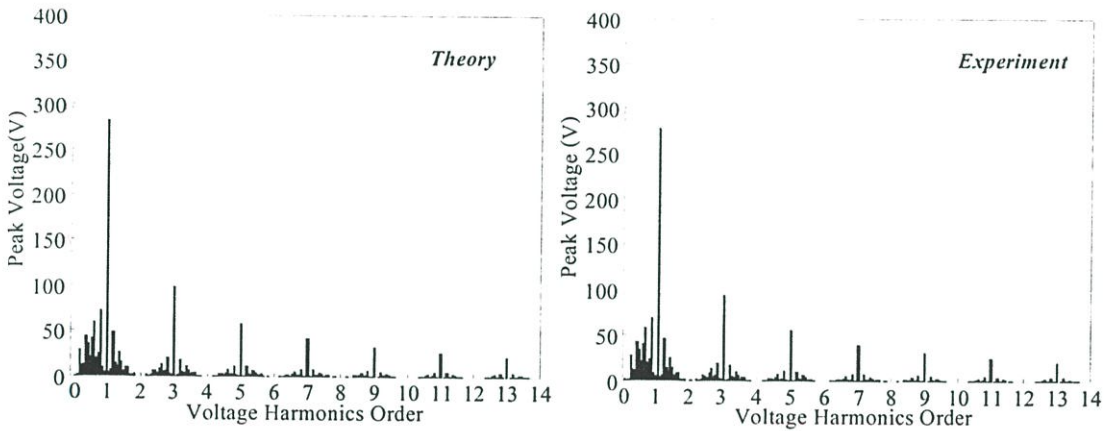
รูปที่ 5.14 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆเฉพาะในช่วง 1 คาบเวลาสำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายในกรณี 13/16 ซึ่งเกิดต่อคาบเวลา



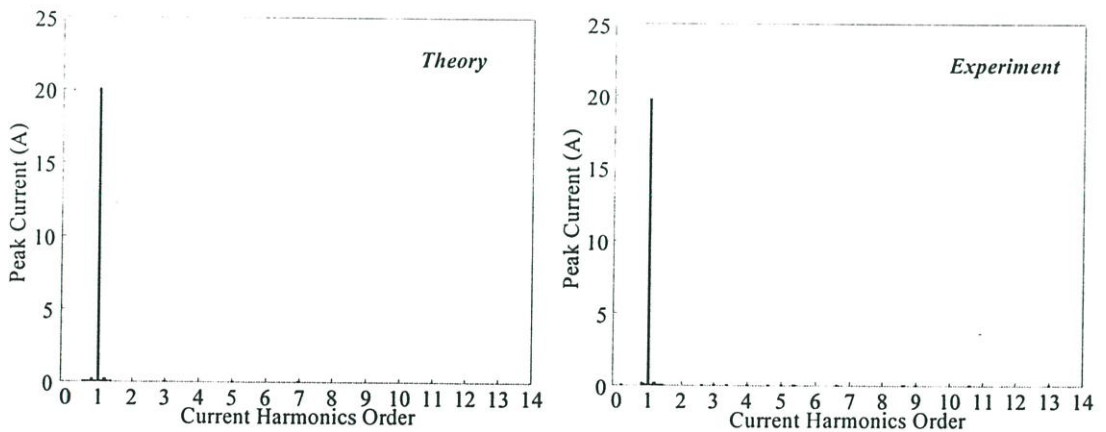
รูปที่ 5.15 ลำดับขั้นตอนการทำงานของวงจรในช่วง 1 คาบเวลา สำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายในกรณี 13/16 ไซเคิลต่อคาบเวลา



a) ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



b) ลักษณะสเปกตรัมของแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



c) ลักษณะสเปกตรัมของกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

รูปที่ 5.16 ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลองสำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายในกรณี 13/16 ไซเกิลต่อคาบเวลา

5.8 หลักการปรับควบคุมจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายสำหรับกรณีจำนวนไซเคิลต่อคาบเวลาเท่ากับ 16/16

5.8.1 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 16/16)

ในรูปที่ 5.17 ได้แสดงคลื่น v_o, i_o จำนวนไซเคิลเท่ากับ 16 ไซเคิลเต็ม จากรูปแสดงให้เห็นถึงลักษณะการจัดแพทเทิร์นของแรงดันและกระแสเอาท์พุท แรงดันและกระแสที่ตัวสวิตช์ทั้ง 4 $(v_{S_1}, i_{S_1}), (v_{S_2}, i_{S_2}), (v_{S_3}, i_{S_3})$ และ (v_{S_4}, i_{S_4}) ตลอดจนลักษณะกระแสที่จ่ายออกจากแหล่งจ่ายดีซีซีพพลาย จะเห็นได้ว่าในกรณีนี้คลื่นแรงดันเอาท์พุทจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยไม่มีการขาดช่วงของแรงดันส่งผลให้กระแสโหลด i_o มีค่ายอดของกระแสที่สม่ำเสมอและมีค่าสูงสุด ซึ่งต่างจากกรณีอื่นๆที่มีค่ายอดของกระแสที่ไม่สม่ำเสมออันเนื่องมาจากการขาดหายไปของแรงดันในบางไซเคิล

5.8.2 ค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 16/16)

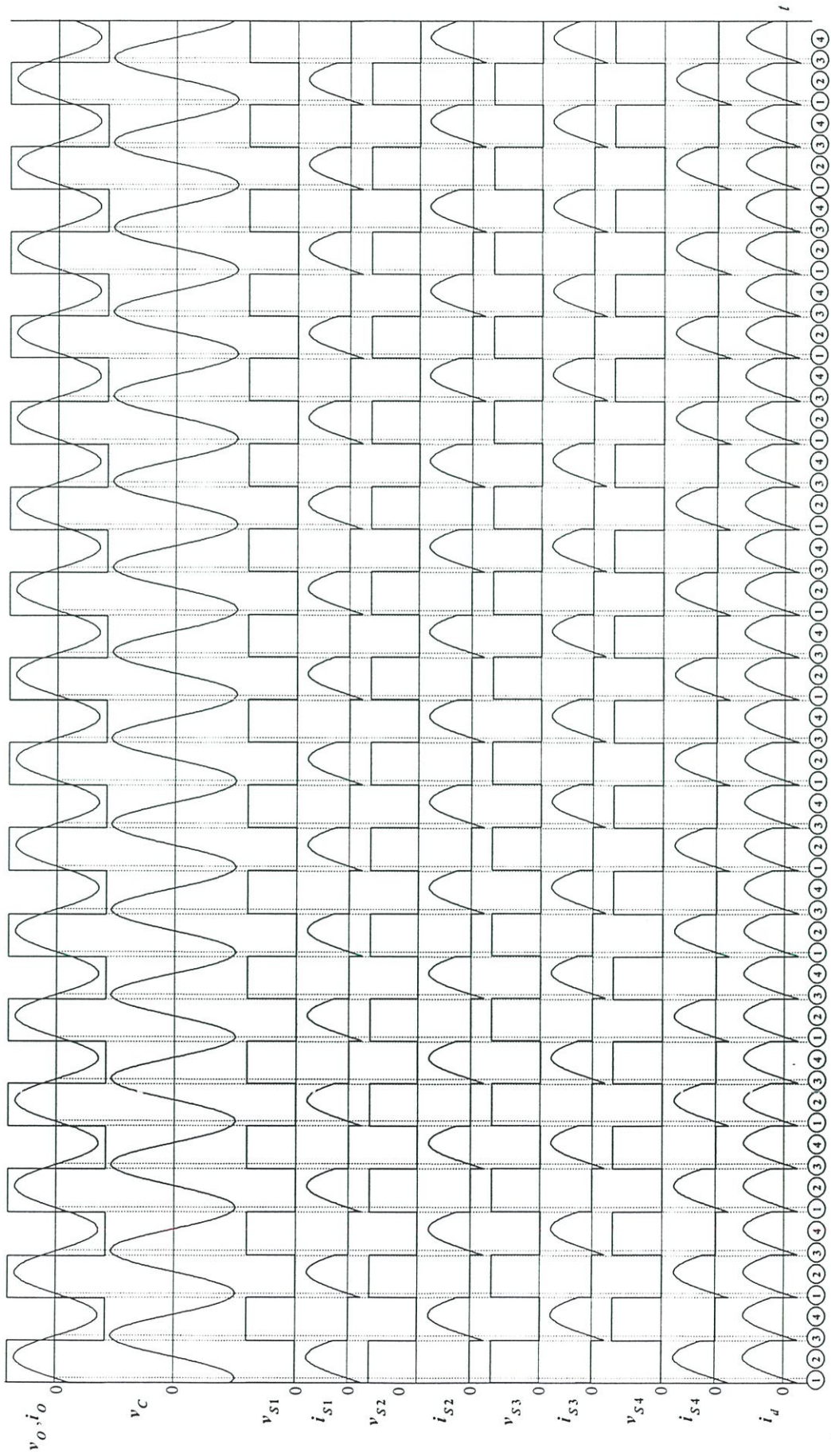
จากลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่าง ๆ ในวงจรบริดจ์อินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 5.17 สามารถเขียนสรุปค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ในวงจรบริดจ์อินเวอร์เตอร์ เช่น แรงดันและกระแสที่ตัวสวิตช์ทั้ง 4 $(v_{S_1}, i_{S_1}), (v_{S_2}, i_{S_2}), (v_{S_3}, i_{S_3})$ และ (v_{S_4}, i_{S_4}) ตลอดจนกระแสที่ออกจากแหล่งจ่ายดีซีซีพพลาย i_d ได้ดังตารางที่ 5.6

5.8.3 ลักษณะวงจรในโหมดต่างๆในช่วง 1 ไซเคิล (กรณี 16/16)

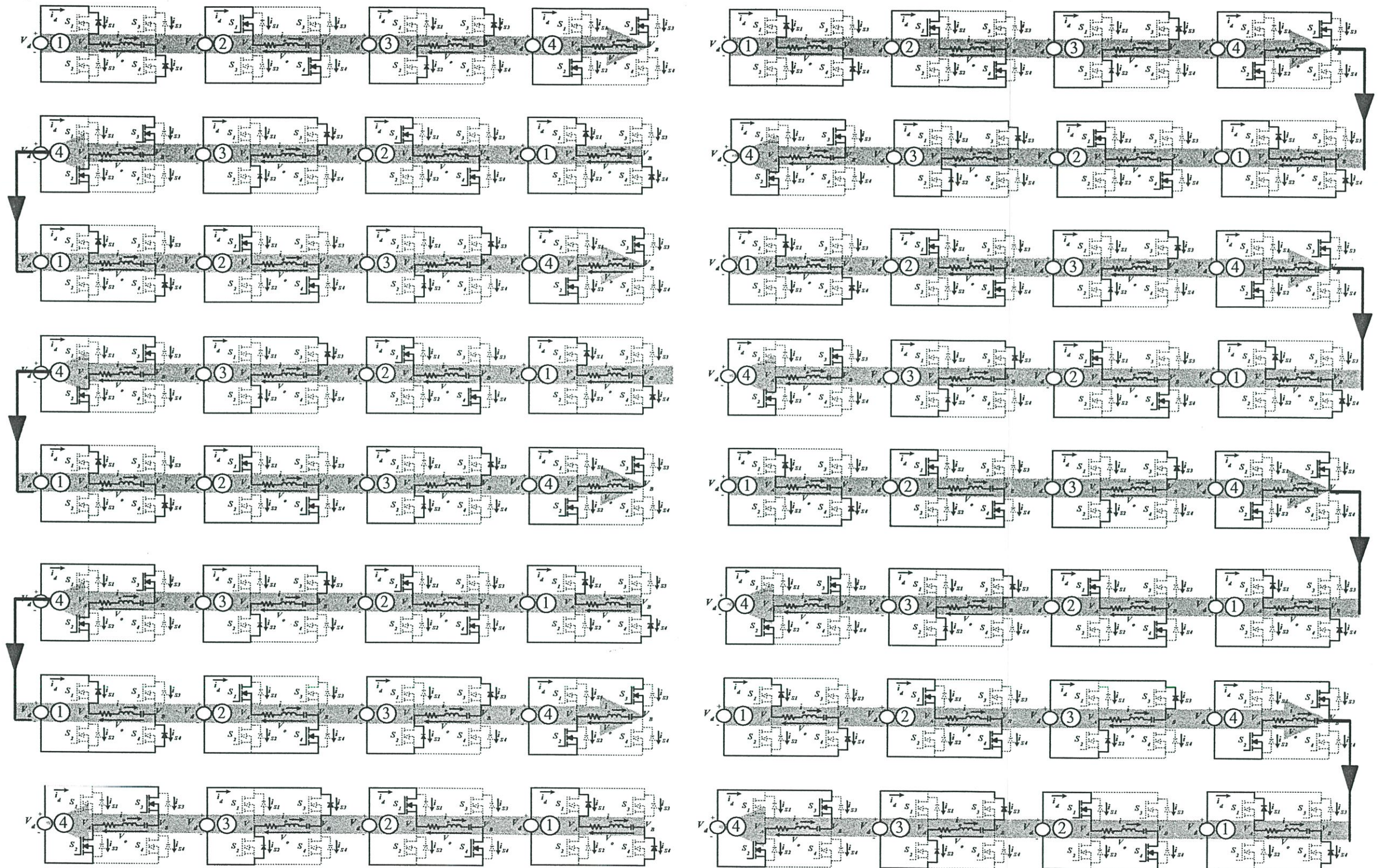
จากลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ในรูปที่ 5.17 และจากตารางแรงดันและกระแสตามจุดต่าง ๆ ในตารางที่ 5.6 สามารถนำมาเขียนสรุปลำดับขั้นตอนการทำงาน ON – OFF ของสวิตช์ทั้ง 4 ของวงจรบริดจ์อินเวอร์เตอร์ได้ดัง circuit flow diagram ในรูปที่ 5.18 โดยสามารถแบ่งการทำงานของวงจรทั้งหมดใน 1 คาบเวลา ออกเป็น 16 กลุ่ม ซึ่งในกรณีนี้ทุกกลุ่มจะมีการทำงานที่เหมือนกัน โดยในแต่ละกลุ่มจะมีโหมดการทำงานเป็น 1, 2, 3, 4 ซึ่งเป็นการทำงานของวงจรที่ให้แรงดันเอาท์พุท ในรูปแบบของแพทเทิร์น PDM 16/16 ซึ่งในกรณีนี้โหลดจะได้กำลังไฟฟ้าเอาท์พุทสูงสุด เมื่อเทียบกับรูปแบบอื่นๆ ทั้งหมด 16 รูปแบบ

5.8.4 การเปรียบเทียบลักษณะคลื่นแรงดัน กระแส แออสเพลกตรัมจากการวัดและซิมูเลต (กรณี 16/16)

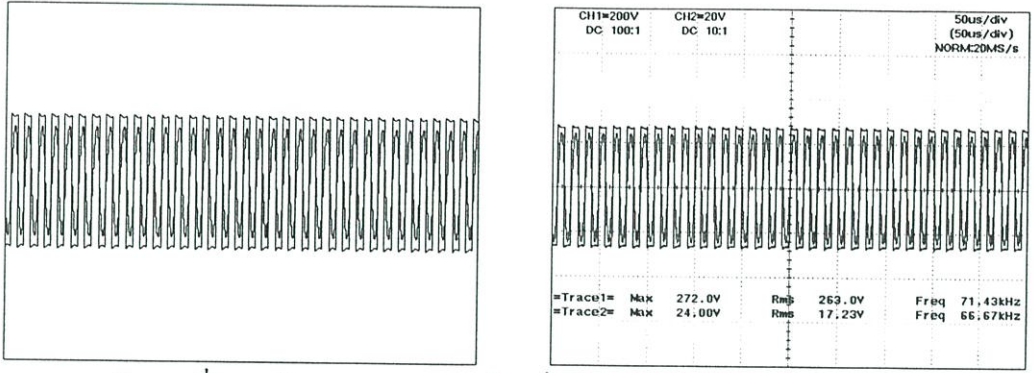
จากรูปที่ 5.19 แสดงการเปรียบเทียบคลื่นแรงดันและกระแสที่ได้จากการซิมูเลต แออสเพลกตรัมของแรงดันและกระแส v_o, i_o ซึ่งผลที่ได้จากการซิมูเลตไม่ว่าจะเป็นคลื่นแรงดันและกระแส v_o, i_o แออสเพลกตรัมของแรงดันและกระแส v_o, i_o เมื่อนำมาเปรียบเทียบเพื่อยืนยันความถูกต้องกับคลื่นแรงดันและกระแส v_o, i_o แออสเพลกตรัมของแรงดัน v_o และแออสเพลกตรัมของกระแสโหลด i_o ที่ได้จากการทดลองปรากฏว่าได้ผลที่ใกล้เคียงกันมาก



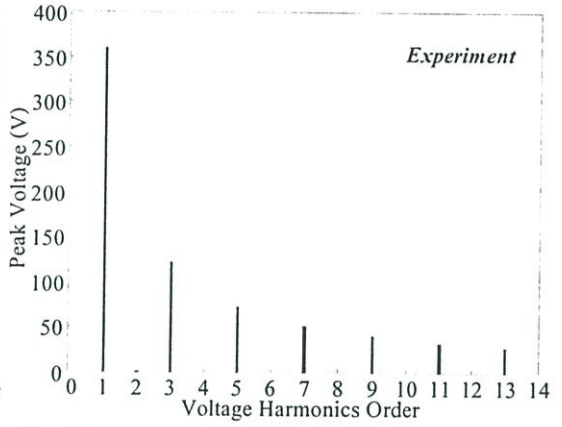
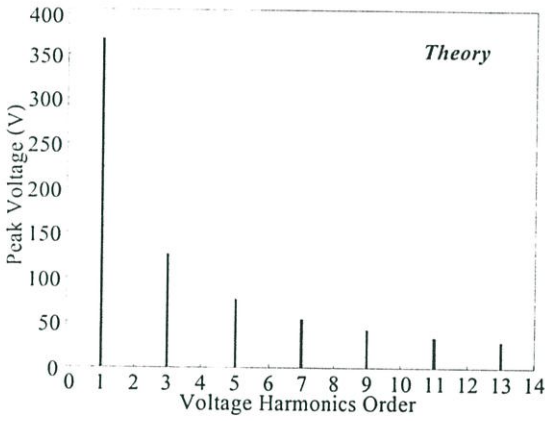
รูปที่ 5.17 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆเฉพาะในช่วง 1 คาบเวลาสำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายในกรณี 16/16 ซึ่งเกิดต่อคาบเวลา



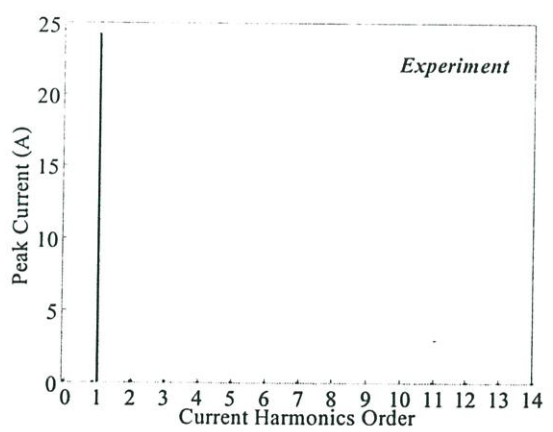
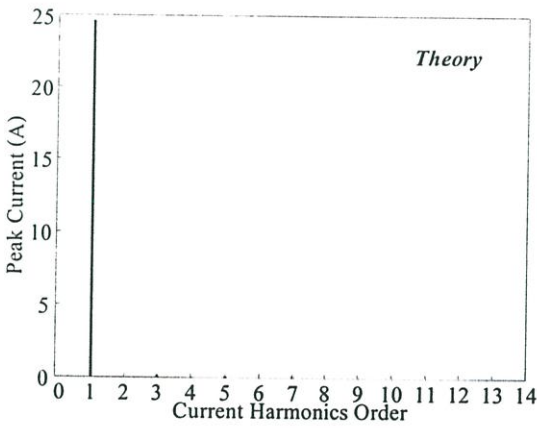
รูปที่ 5.18 ลำดับขั้นตอนการทำงานของวงจรในช่วง 1 คาบเวลา สำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายในกรณี 16/16 ไชกิลต่อคาบเวลา



a) ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสเอาท์พุทที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



b) ลักษณะสเปกตรัมของแรงดันเอาท์พุทที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



c) ลักษณะสเปกตรัมของกระแสเอาท์พุทที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

รูปที่ 5.19 ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาท์พุทที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลองสำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจายในกรณี 16/16 ไซเคิลต่อคาบเวลา

5.9 สรุป

ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าในวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์อนุกรมสำหรับเครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำความถี่สูงโดยวิธีการปรับจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบการในรูปแบบการกระจายได้กำหนดการปรับระดับกำลังไฟฟ้าไว้ทั้งหมดรวม 16 ระดับหรือรูปแบบคือ 1/16, 2/16, 3/16, , 16/16 โดยในแต่ละรูปแบบสามารถนำมาวิเคราะห์หาลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจากผลที่ได้นี้สามารถนำมาคำนวณหาลักษณะสเปกตรัมของคลื่นแรงดันและกระแสเอาท์พุทได้ และเมื่อนำไปผลการคำนวณที่ได้นี้ไปเปรียบเทียบกับลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากการทดลองปรากฏว่าได้ผลสอดคล้องและใกล้เคียงกัน

บทที่ 6

หลักการปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยวิธี

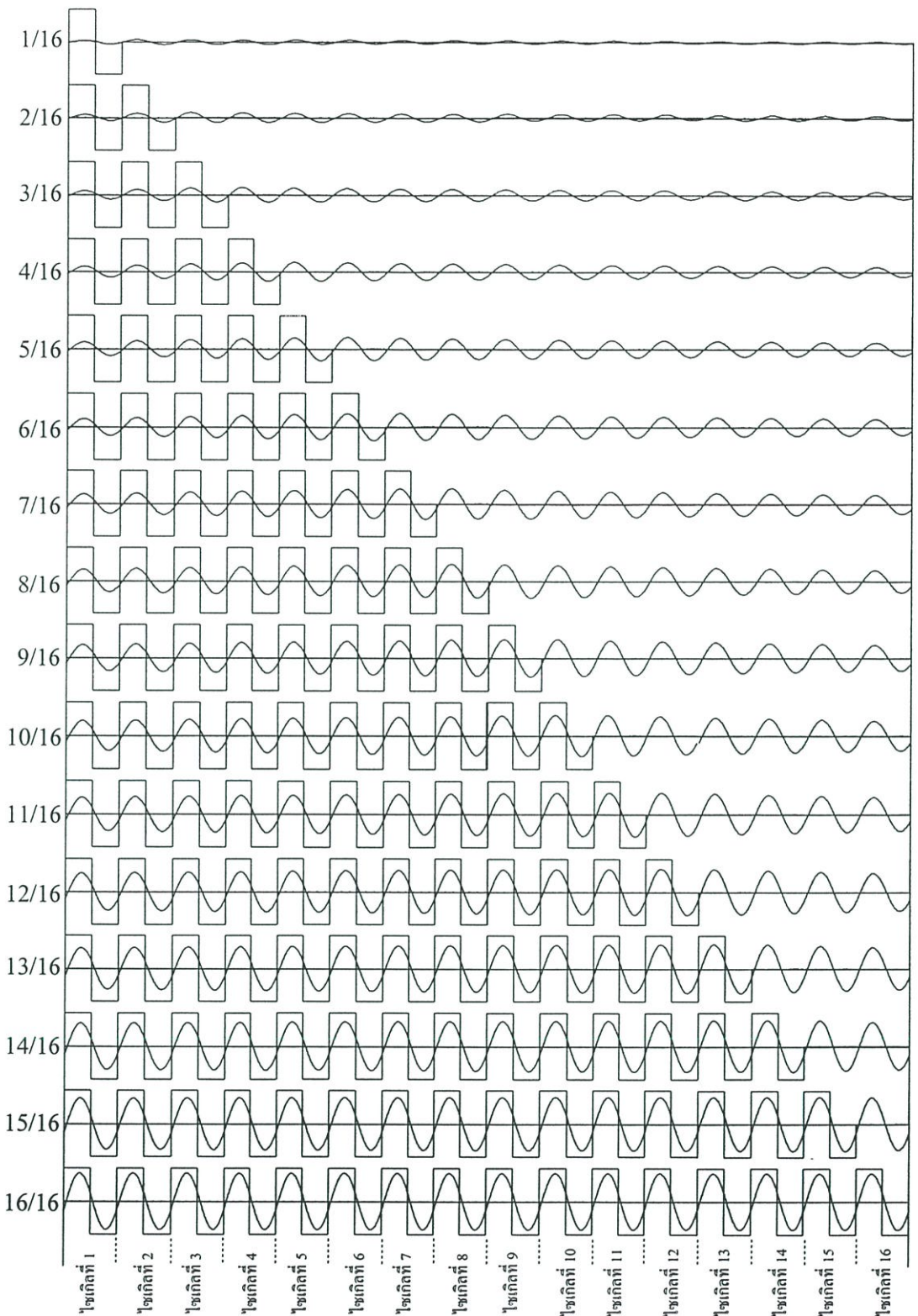
การปรับจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมตัวเป็นกลุ่ม

6.1 บทนำ

จากหลักการควบคุมกำลังไฟฟ้าในวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์ความถี่สูงสำหรับกรณีการปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยวิธีการปรับลดจำนวนพัลส์ PDM (Pulse Density Modulation) ในรูปแบบการกระจายดังที่ได้กล่าวรายละเอียดไว้ในบทที่ 5 นั้นเพื่อเป็นการเปรียบเทียบกับหลักการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยใช้วิธีการปรับลดจำนวนพัลส์ PDM ในอีกรูปแบบหนึ่งซึ่งเป็นรูปแบบที่คลื่นพัลส์มีลักษณะการรวมตัวกันเป็นกลุ่ม ทั้งนี้เพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติต่างๆทางไฟฟ้าของทั้ง 2 กรณีนี้ เช่น ลักษณะคลื่นและค่าของแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในวงจร ลักษณะโหมดการทำงานของวงจรในช่วง 1 คาบเวลา และลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสเอาท์พุทตลอดจนการหาสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาท์พุทของ PDM พัลส์ในรูปแบบต่างๆที่ได้จากการซิมูเลตเพื่อใช้เปรียบเทียบกับผลการทดลองของวงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์ความถี่สูง ซึ่งรายละเอียดดังกล่าวจะได้นำเสนอในอันดับถัดไปดังนี้

6.2 หลักการปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยวิธีการปรับจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมตัวเป็นกลุ่ม

ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าในวงจรพัลส์ PDM แบบการรวมตัวเป็นกลุ่มนี้ จะกำหนดรูปแบบพัลส์ไว้ทั้งหมด 16 รูปแบบเช่นเดียวกับกรณี วิธีการปรับลดจำนวนพัลส์ PDM แบบการกระจายโดยแต่ละรูปแบบจะประกอบด้วยรูปคลื่นพัลส์ 16 ไชเกิดต่อคาบเวลาที่มีช่วงการ ON-OFF พัลส์ในจำนวนที่ต่างกัน สำหรับในกรณีรูปแบบ PDM แบบรวมตัวเป็นกลุ่มนี้จะเป็นการจัดรูปคลื่นพัลส์ให้มีการรวมตัวเป็นกลุ่มอยู่ในแถบบริเวณเดียวกันโดยไม่ให้มีการกระจายออกภายในช่วงบริเวณ 1 คาบเวลา ที่ใช้ในการพิจารณา โดยมีรูปแบบทั้งสิ้น 16 รูปแบบดังแสดงในรูปที่ 6.1 ดังนั้นในอันดับถัดจากนี้ไปจะได้นำเสนอข้อมูลต่างๆ สำหรับกรณีการปรับพัลส์ PDM ในรูปแบบที่มีการรวมตัวเป็นกลุ่ม ในลักษณะทำนองเดียวกับกรณีวิธีการปรับพัลส์ PDM แบบกระจายออก โดยการนำเสนอจะพิจารณาข้อมูลของพัลส์ PDM เพียง 6 รูปแบบ จากข้อมูลทั้งสิ้น 16 รูปแบบ ในทำนองเดียวกับ กรณีของพัลส์ PDM แบบกระจาย กล่าวคือ รูปแบบพัลส์ PDM 1/16 , 4/16 , 7/16 , 10/16 , 13/16 และ 16/16



รูปที่ 6.1 ลักษณะพัลส์ PDM แบบการรวมตัวเป็นกลุ่มในแต่ละรูปแบบจากจำนวนรวมทั้งสิ้น 16 รูปแบบ

6.3 หลักการปรับควบคุมจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมตัวเป็นกลุ่มสำหรับ กรณีจำนวนไซเคิลต่อคาบเวลาเท่ากับ 1/16

6.3.1 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 1/16)

หลักการทำงานและข้อมูลของแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆของวงจรเครื่องหลอมโลหะสำหรับกรณีวิธีการปรับพัลส์ PDM 1/16 ในรูปแบบการรวมตัวเป็นกลุ่มนี้จะมีลักษณะเหมือนกรณีวิธีการปรับพัลส์ PDM 1/16 ในรูปแบบการกระจายในหัวข้อที่ 5.3.1 ทุกประการ โดยแสดงได้ดังรูปที่ 6.2

6.3.2 ค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 1/16)

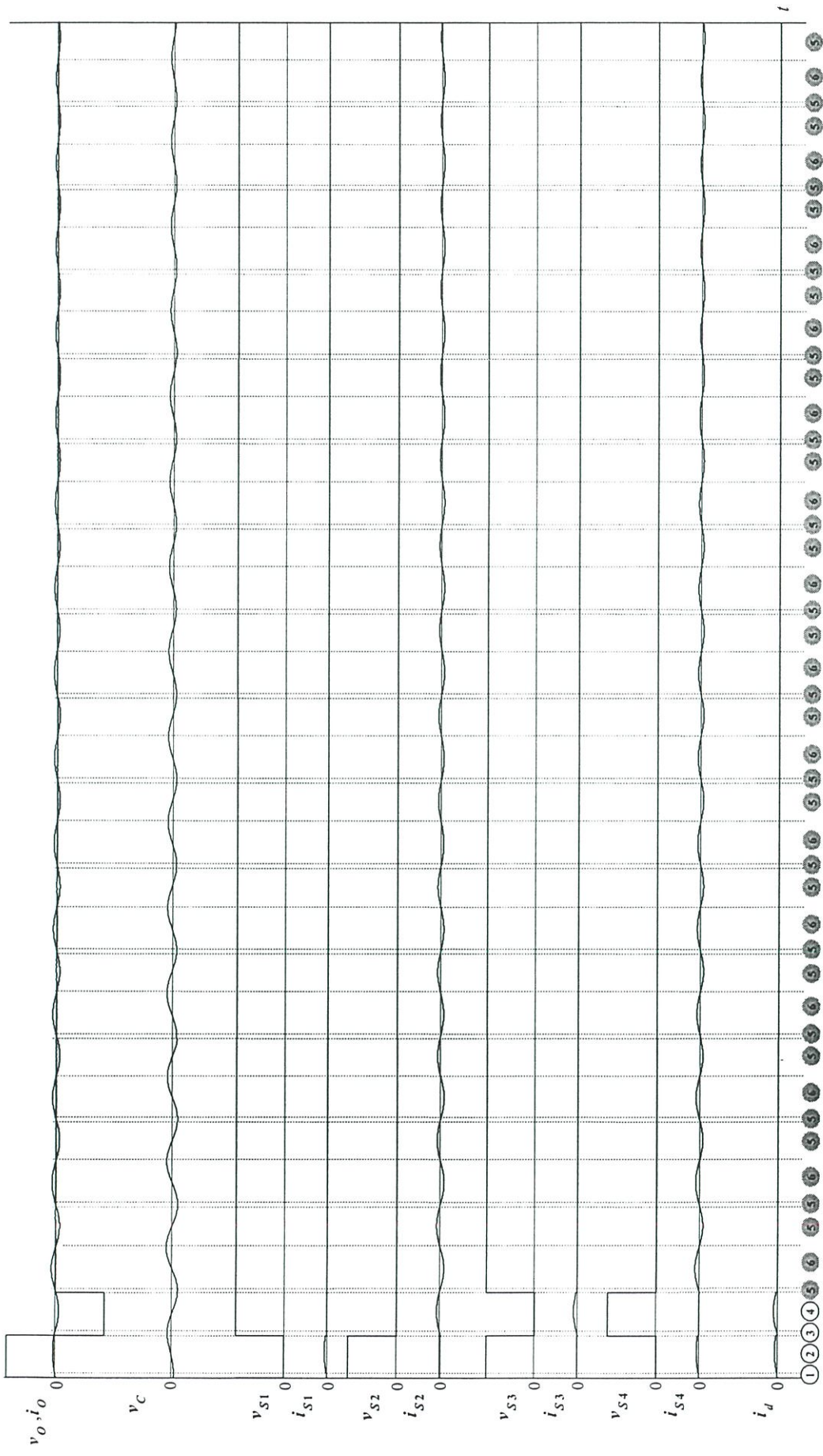
จะมีลักษณะเหมือนกับหัวข้อที่ 5.3.2 โดยแสดงได้ดังตารางที่ 6.1

6.3.3 ลำดับขั้นตอนการทำงานของวงจร (Circuit Flow Diagram) ในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 1/16)

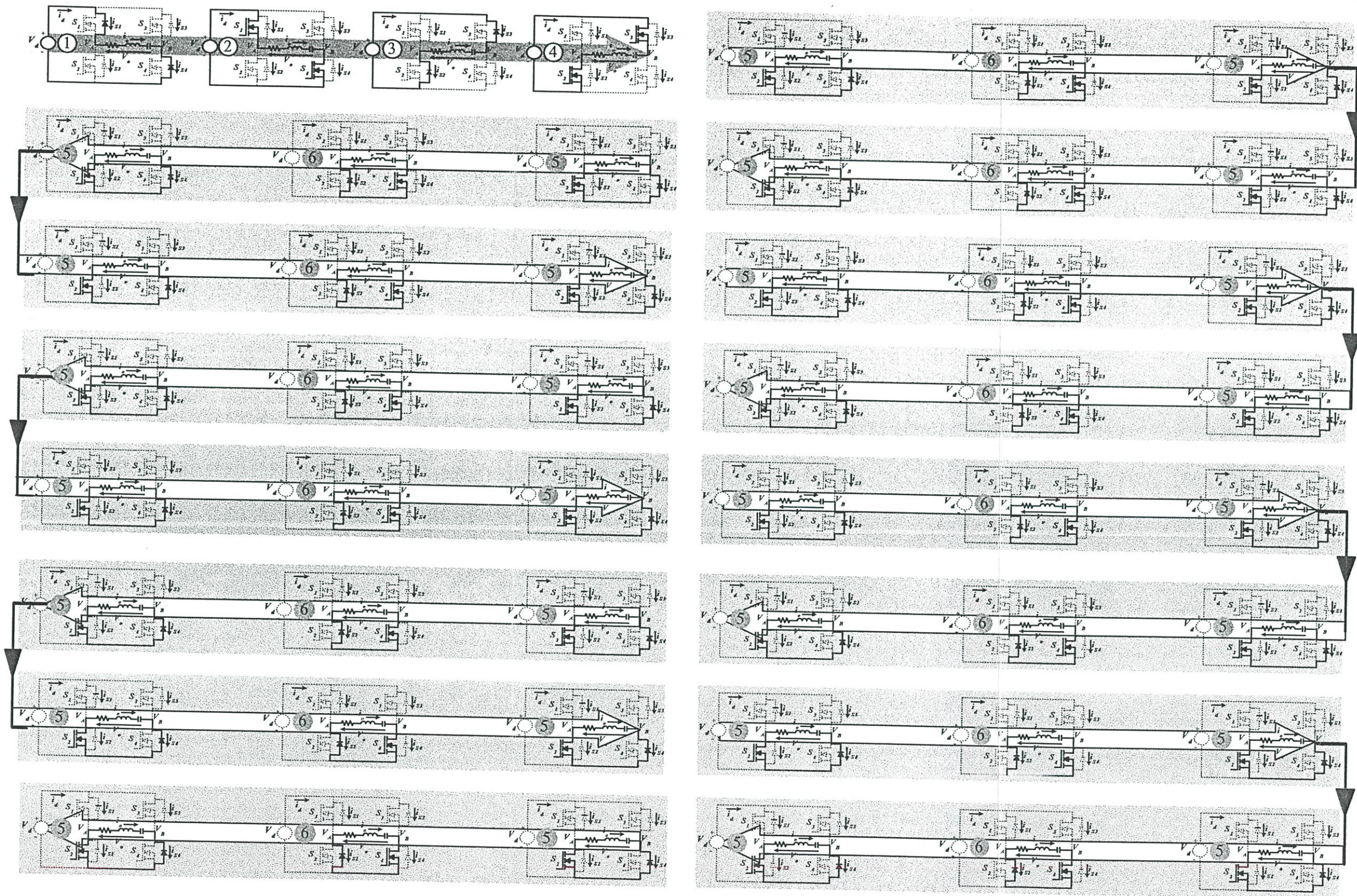
จะมีลักษณะเหมือนกับหัวข้อที่ 5.3.3 โดยแสดงได้ดังรูปที่ 6.3

6.3.4 การเปรียบเทียบลักษณะคลื่นแรงดัน กระแส แอมป์สเปกตรัมจากการวัดและซิมูเลต (กรณี 1/16)

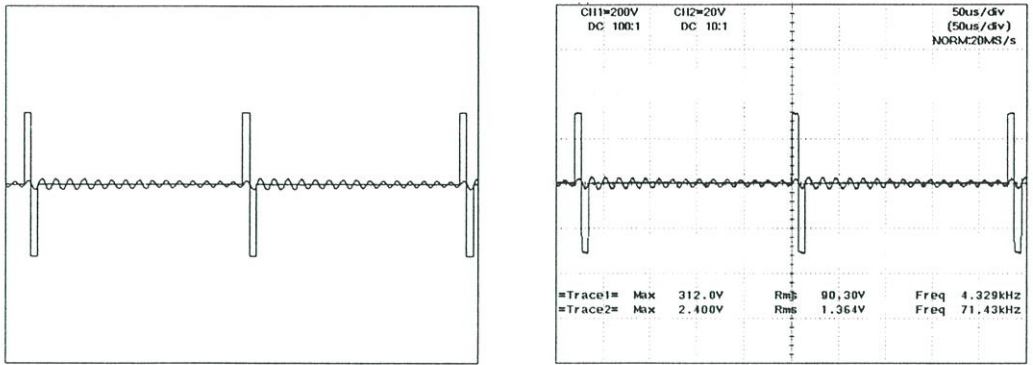
จะมีลักษณะเหมือนกับหัวข้อที่ 5.3.4 โดยแสดงได้ดังรูปที่ 6.4



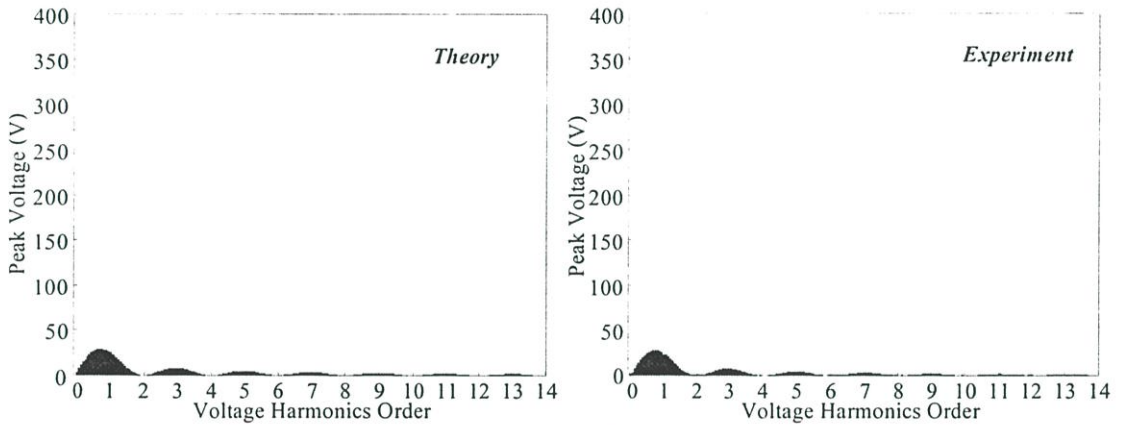
รูปที่ 6.2 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆเฉพาะในช่วง 1 คาบเวลา สำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบรวมเป็นกลุ่มในกรณี 1/16 ไชเกิดต่อคาบเวลา



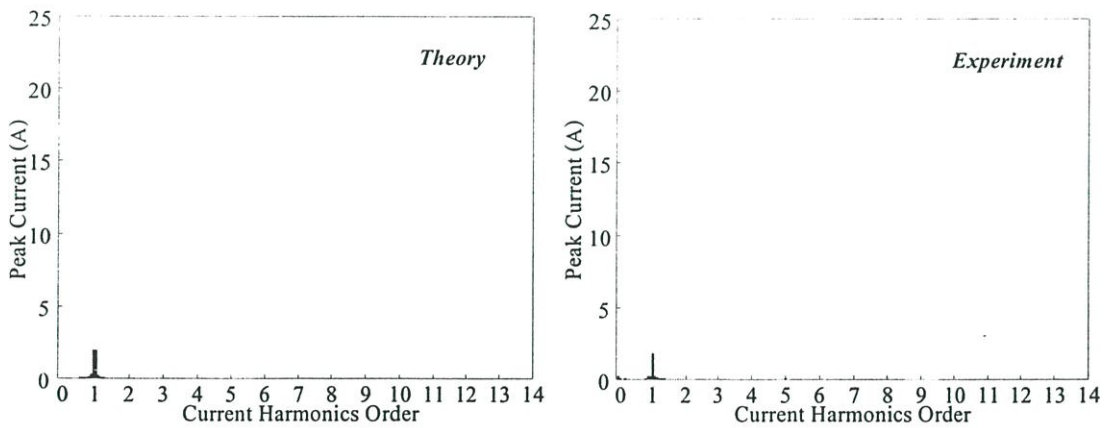
รูปที่ 6.3 ลำดับขั้นตอนการทำงานของวงจร (Circuit Flow Diagram) ในช่วง 1 คาบเวลา สำหรับพัลส์ PDM รูปแบบรวมเป็นกลุ่มในกรณี 1/16 ไซเคิลต่อคาบเวลา



a) ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



b) ลักษณะสเปกตรัมของแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



c) ลักษณะสเปกตรัมของกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

รูปที่ 6.4 ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลองสำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมกลุ่มในกรณี 1/16 ไซกิลต่อคาบเวลา

6.4 หลักการปรับควบคุมจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมตัวเป็นกลุ่มสำหรับกรณีจำนวนไซเคิลต่อคาบเวลาเท่ากับ 4/16

6.4.1 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในช่วง 1 คาบเวลา(กรณี 4/16)

ในรูปที่ 6.5 ได้แสดงคลื่น v_o, i_o จำนวนไซเคิลเท่ากับ 4 ไซเคิลจากจำนวนไซเคิลอินพุตที่ป้อนเท่ากับ 16 ไซเคิล และยังได้แสดงให้เห็นลักษณะการจัดแพทเทิร์นของแรงดันและกระแสเอาต์พุต แรงดันและกระแสที่ตัวสวิตช์ทั้ง 4 (v_{S_1}, i_{S_1}), (v_{S_2}, i_{S_2}), (v_{S_3}, i_{S_3}) และ (v_{S_4}, i_{S_4}) ตลอดจนลักษณะกระแสที่จ่ายออกจากแหล่งจ่ายดีซีซีพพลายซึ่งจะเห็นได้ว่าลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสที่ตัวสวิตช์แต่ละชุดในจำนวนทั้งหมด 4 ชุดจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับคลื่นแรงดันและกระแส v_o, i_o โดยในช่วงโหมด 1-4 ซึ่งจะเกิดขึ้นที่ไซเคิลที่ 1-4 ชุดแรงดันและกระแส (v_{S_1}, i_{S_1}) จะมีลักษณะเหมือนชุดแรงดันและกระแส (v_{S_2}, i_{S_2}), (v_{S_3}, i_{S_3}) และ (v_{S_4}, i_{S_4}) เพียงแต่จะมีลักษณะของเฟสที่ต่างกันโดยที่ชุดแรงดันและกระแส (v_{S_1}, i_{S_1}) จะเหมือนกับชุดแรงดันและกระแส (v_{S_4}, i_{S_4}) ซึ่งเป็นคู่สวิตช์ที่อยู่เอียงกันในแต่ละกิ่ง ในทำนองเดียวกันชุดแรงดันและกระแส (v_{S_2}, i_{S_2}) จะมีลักษณะเหมือนกับชุดแรงดันและกระแส (v_{S_3}, i_{S_3}) ซึ่งเป็นสวิตช์ 2 ตัวที่เหลื่อในแต่ละกิ่งที่อยู่เอียงกัน นอกจากนั้นยังจะเห็นว่าลักษณะคลื่นกระแส i_d ที่จ่ายออกจากแหล่งจ่ายมีลักษณะเป็นคลื่นทิศทางเดียว (unidirectional current) และจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับกระแสโหลด i_o โดยจะกลับทิศครึ่งไซเคิลลบของกระแสโหลด i_o ให้เป็นซีกบวก ในส่วนของโหมด (5, 6, 5) นั้นจะเกิดขึ้นในไซเคิลที่ 5-16 ซึ่งจะให้แรงดันเอาต์พุต v_o เป็นศูนย์ในขณะที่กระแสเอาต์พุต i_o จะยังคงมีอยู่ในลักษณะคลื่นไซน์โดยผ่านสวิตช์และไดโอดชุดล่างของแต่ละกิ่งในวงจรบริดจ์อินเวอร์เตอร์เช่นเดียวกับในกรณี 1/16 เพียงแต่จะมีขนาดเพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงดันเอาต์พุตที่เพิ่มขึ้น โดยที่แรงดันที่ C-resonant ยังคงมีแรงดันปรากฏอย่างต่อเนื่องเช่นเดียวกับในกรณี 1/16 ในลักษณะรูปคลื่นไซน์ซึ่งเกิดจากการทำงานของวงจรเรโซแนนท์ RLC ในรูปต่างของวงจรบริดจ์ทำให้กระแสสามารถไหลกลับไปในลักษณะคลื่นไซน์ได้ซึ่งในช่วงขณะนี้สวิตช์คู่บนของวงจรบริดจ์จะ OFF หรือไม่ทำงานและจะมีแรงดันแหล่งจ่าย V_{dc} ปรากฏระหว่างแคป-ซอร์สที่สวิตช์ทั้งสอง ในขณะที่คลื่นกระแส i_d ในช่วงเวลานี้จะมีค่าเป็นศูนย์

6.4.2 ค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 4/16)

จากลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ในวงจรบริดจ์อินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 6.5 สามารถเขียนสรุปค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในวงจรบริดจ์อินเวอร์เตอร์ เช่น แรงดันและกระแสที่ตัวสวิตช์ทั้ง 4 (v_{S_1}, i_{S_1}), (v_{S_2}, i_{S_2}), (v_{S_3}, i_{S_3}) และ (v_{S_4}, i_{S_4}) ตลอดจนกระแสที่ออกจากแหล่งจ่ายดีซีซีพพลาย i_d ได้ดังตารางที่ 5.2 โดยการทำงานในโหมดที่ 1, 2, 3

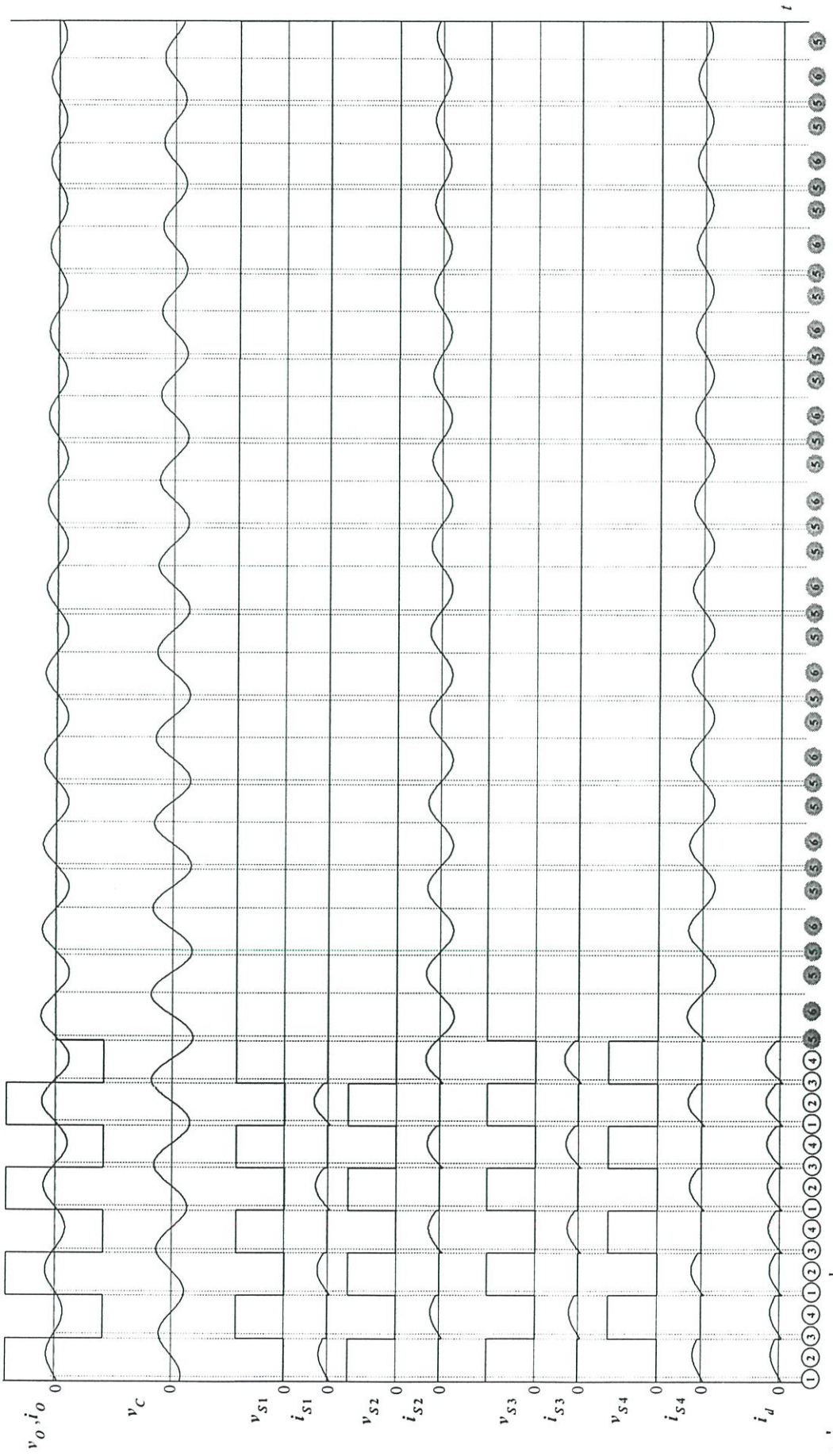
และ 4 จะเกิดขึ้นในไซเกิลที่ 1-4 ซึ่งที่โหมคนี้จะได้แรงดันคร่อมสวิตช์มีค่าเป็น 0 และ V_d ในขณะที่กระแสที่ไหลผ่านสวิตช์ทั้ง 4 จะมีค่าเป็น i_o และ $-i_o$ สลับกันไปในแต่ละโหมค ส่วนในโหมค 5 และ 6 ซึ่งจะเกิดขึ้นในช่วงไซเกิลที่ 5-16 ซึ่งจะให้แรงดันเอาต์พุตเป็นศูนย์โดยมีแรงดันคร่อมสวิตช์ที่ 2 ตัวบนของวงจรบริดจ์อินเวอร์เตอร์จะมีค่าเป็น V_d ในขณะที่แรงดันคร่อมสวิตช์ 2 ตัวล่างจะมีค่าเป็นศูนย์ ขณะที่กระแสไหล i_o จะไหลผ่าน สวิตช์ 2 ตัวล่างเท่านั้น ในขณะที่เดียวกันกระแสที่จ่ายจากแหล่งจ่าย ดีซีซัพพลาย จะมีค่าเป็นศูนย์คงที่เสมอในช่วงไซเกิลที่แรงดันเอาต์พุตมีค่าเป็นศูนย์

6.4.3 ลักษณะวงจรในโหมคต่างๆในช่วง 1 ไซเกิล (กรณี 4/16)

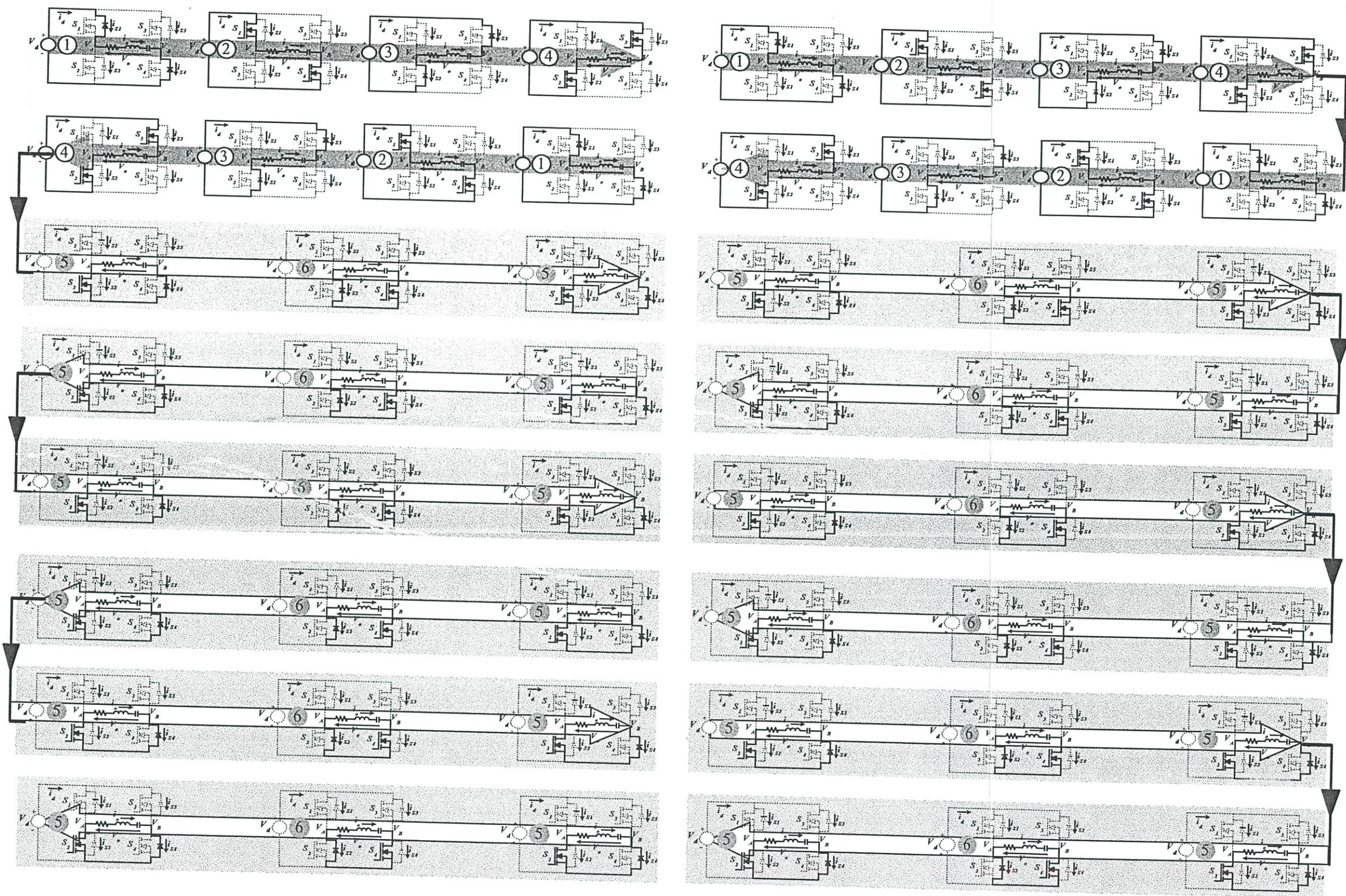
จากลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสในรูปที่ 6.5 และจากตารางค่าแรงดันและกระแสในตารางที่ 6.2 สามารถนำมาเขียนสรุปลำดับขั้นตอนการทำงาน ON-OFF ของสวิตช์ทั้ง 4 ของวงจรบริดจ์อินเวอร์เตอร์ได้ดัง Circuit Flow Diagram ในรูปที่ 6.6 โดยสามารถแบ่งการทำงานของวงจรทั้งหมดใน 1 คาบเวลา ออกเป็น 16 กลุ่ม โดยวงจรในกลุ่มที่ 1-4 จะมีโหมคการทำงานเป็น 1, 2, 3, 4 ซึ่งที่กลุ่มนี้จะให้แรงดันเอาต์พุต โดยในโหมคที่ 1 และ 3 จะเป็นโหมคที่ไหลจ่ายกำลังไฟฟ้าคืนให้กับแหล่งจ่ายดีซีซัพพลาย ในขณะที่โหมคที่ 2 และ 4 จะเป็นโหมคที่แหล่งจ่ายดีซีซัพพลายจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลด โดยมีช่วงระยะเวลาที่ยาวนานกว่า ส่วนการทำงานของวงจรที่เหลือทั้งหมดอีก 12 กลุ่มจะมีลักษณะการทำงานที่เหมือนกัน โดยจะเป็นการทำงานในโหมค 5 และ 6 ซึ่งจะเป็นวงจรที่ทำงานในลักษณะของฟรีวิลลิง กล่าวคือแรงดันเอาต์พุตเป็นศูนย์ (กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตเป็นศูนย์) โดยที่แหล่งจ่ายดีซีซัพพลายจะไม่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลด

6.4.4 การเปรียบเทียบลักษณะคลื่นแรงดัน กระแส แลปสเปกตรัมจากการวัดและซิมูเลต (กรณี 4/16)

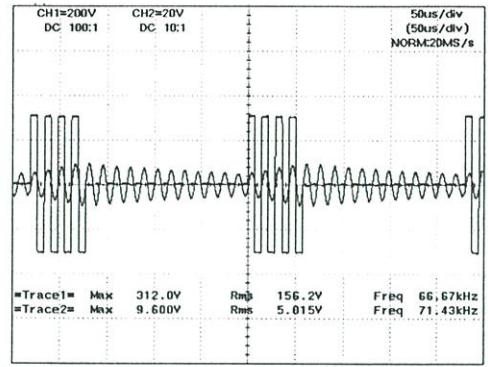
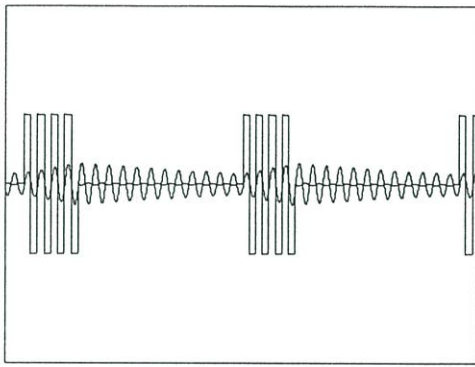
จากความเข้าใจในหลักการพื้นฐานในเรื่องโหมคการทำงานของวงจรในโหมคต่างๆ พร้อมทั้งลักษณะการทำงานของวงจรในลักษณะของ Circuit Flow Diagram ที่ได้กล่าวมาแล้ว เมื่อนำวงจรในโหมคการทำงานต่างๆ มาวิเคราะห์ด้วยสมการที่ (4.1) – (4.21) ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ในหัวข้อที่ 4.2 มาทำการซิมูเลตด้วยโปรแกรม MATLAB ก็จะได้ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแส v_o, i_o ในกรณีฟิลส์ PDM 4/16 ดังรูปที่ 6.7(a) และเมื่อนำทั้งคลื่นแรงดันและกระแสไปหาสเปกตรัมก็จะได้แลปสเปกตรัมของแรงดันและกระแส v_o, i_o ดังรูปที่ 6.7(b) และ 6.7(c) จะเห็นได้ว่าค่ายอดของแลปสเปกตรัมของแรงดันและกระแส v_o, i_o จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นจากในกรณีฟิลส์ PDM 1/16 และผลที่ได้จากการซิมูเลตนี้ไม่ว่าจะเป็นคลื่นแรงดันและกระแส v_o, i_o แลปสเปกตรัมของแรงดันและกระแส v_o, i_o เมื่อนำมาเปรียบเทียบเพื่อยืนยันความถูกต้องกับค่าที่ได้จากการทดลอง ปรากฏว่าได้ผลที่ใกล้เคียงกันมาก



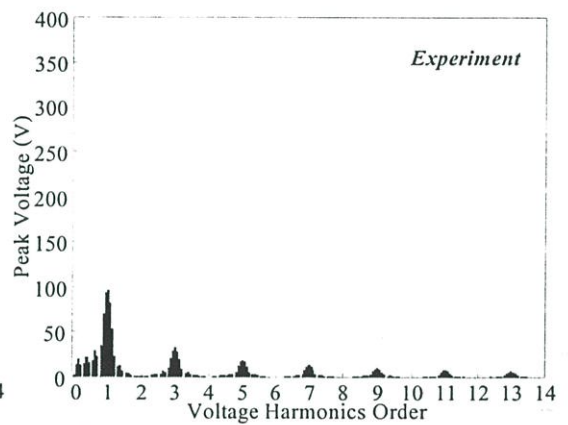
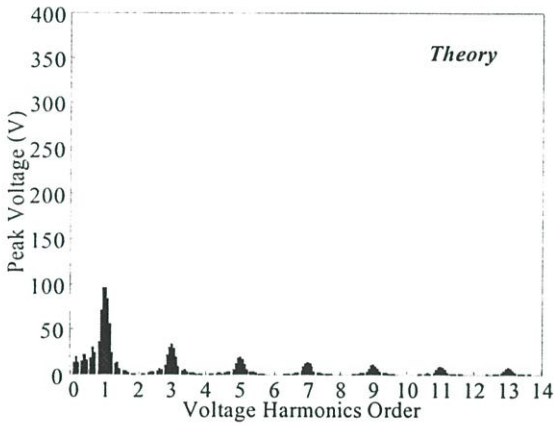
รูปที่ 6.5 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆเฉพาะในช่วง 1 คาบเวลาสำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบรวมเป็นกลุ่มในกรณี 4/16 ไช้เกิดต่อคาบเวลา



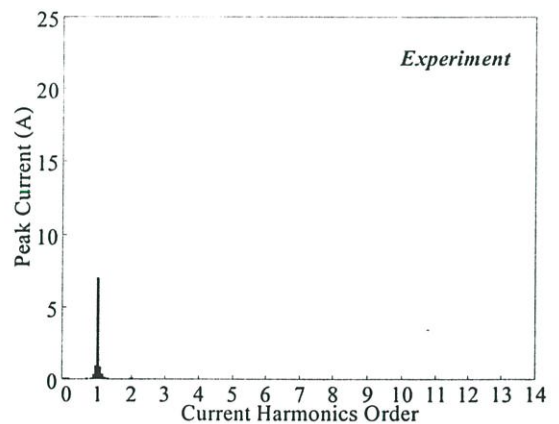
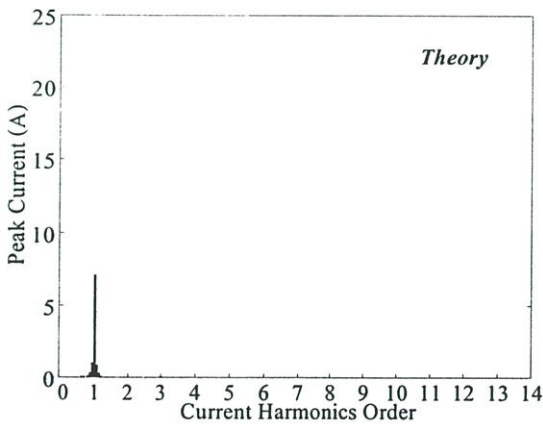
รูปที่ 6.6 ลำดับขั้นตอนการทำงานของวงจรในช่วง 1 คาบเวลา สำหรับพัลส์ PDM รูปแบบรวมเป็นกลุ่มโนกรณี 4/16 ไชเกิดต่อคาบเวลา



a) ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสเอาท์พุทที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



b) ลักษณะสเปกตรัมของแรงดันเอาท์พุทที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



c) ลักษณะสเปกตรัมของกระแสเอาท์พุทที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

รูปที่ 6.7 ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาท์พุทที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลองสำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมเป็นกลุ่มในกรณี 4/16 ไซเคิลต่อคาบเวลา

6.5 หลักการปรับควบคุมจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมตัวเป็นกลุ่มสำหรับกรณีจำนวนไซเคิลต่อคาบเวลา เท่ากับ 7/16

6.5.1 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 7/16)

ในรูปที่ 6.8 ได้แสดงคลื่น v_o, i_o จำนวนไซเคิลเท่ากับ 7 ไซเคิลจากจำนวนไซเคิลอินพุตที่ป้อนเท่ากับ 16 ไซเคิล โดยแสดงให้เห็นลักษณะการจัดแพทเทิร์นของแรงดันและกระแสเอาท์พุท แรงดันและกระแสที่ตัวสวิตช์ทั้ง 4 (v_{S_1}, i_{S_1}), (v_{S_2}, i_{S_2}), (v_{S_3}, i_{S_3}) และ (v_{S_4}, i_{S_4}) ตลอดจนลักษณะกระแสที่จ่ายออกจากแหล่งจ่ายดีซีซัพพลายจากรูปจะเห็นได้ว่าจะมีแรงดันปรากฏที่ไซเคิลที่ 1-7 โดยที่ไซเคิลที่อื่นๆที่เหลือแรงดันจะมีค่าเป็นศูนย์ ในขณะที่กระแสโหลด i_o จะมีขนาดมากขึ้นจากกรณี 4/16 เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนไซเคิลของแรงดันเอาท์พุท

6.5.2 ค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 7/16)

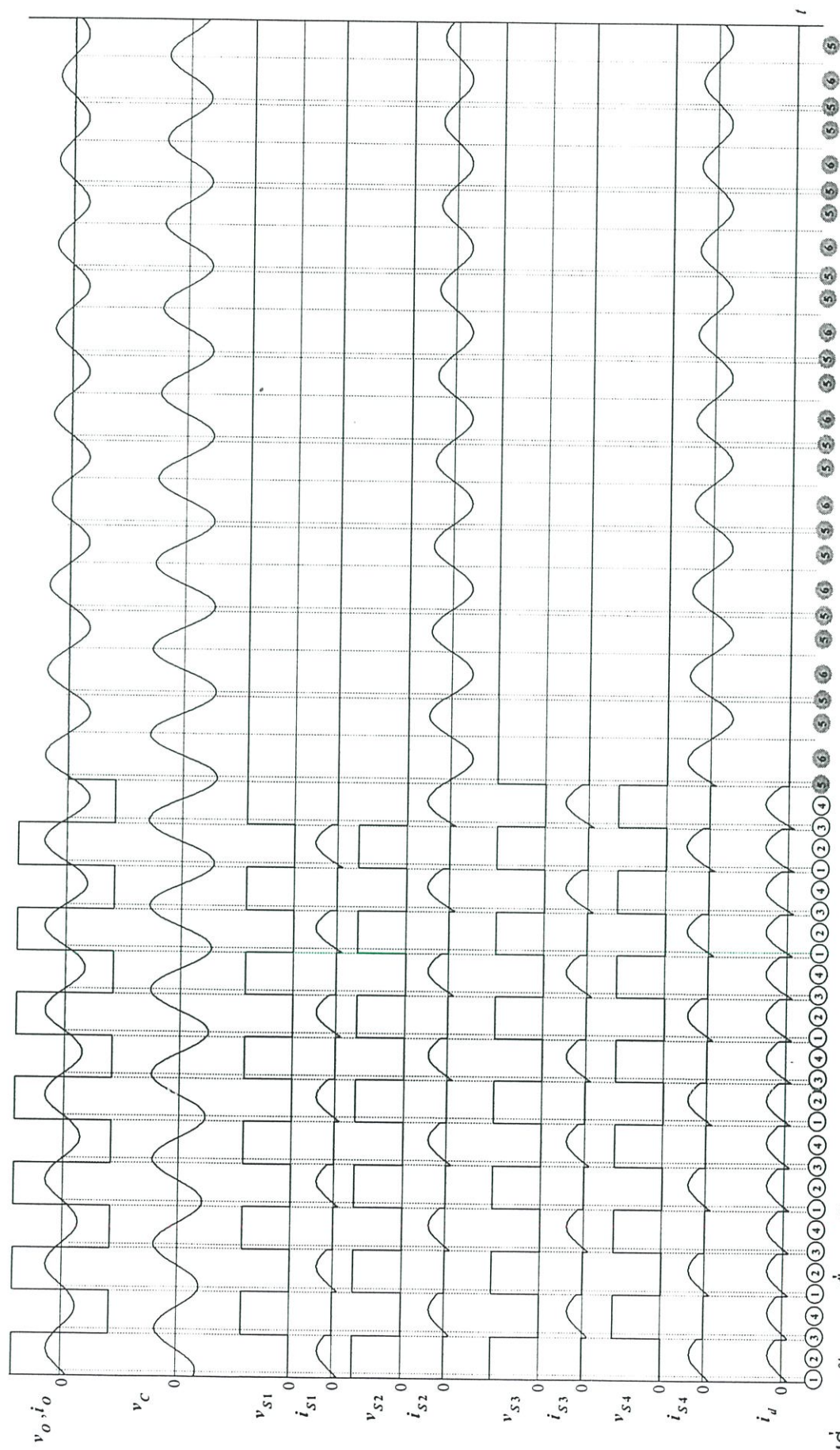
จากลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในวงจรบริดจ์อินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 6.8 สามารถเขียนสรุปค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในวงจรบริดจ์อินเวอร์เตอร์ได้ในลักษณะเดียวกันกับในกรณี 1/16 และ 4/16 ดังตารางที่ 6.3

6.5.3 ลักษณะวงจรในโหมดต่างๆในช่วง 1 ไซเคิล (กรณี 7/16)

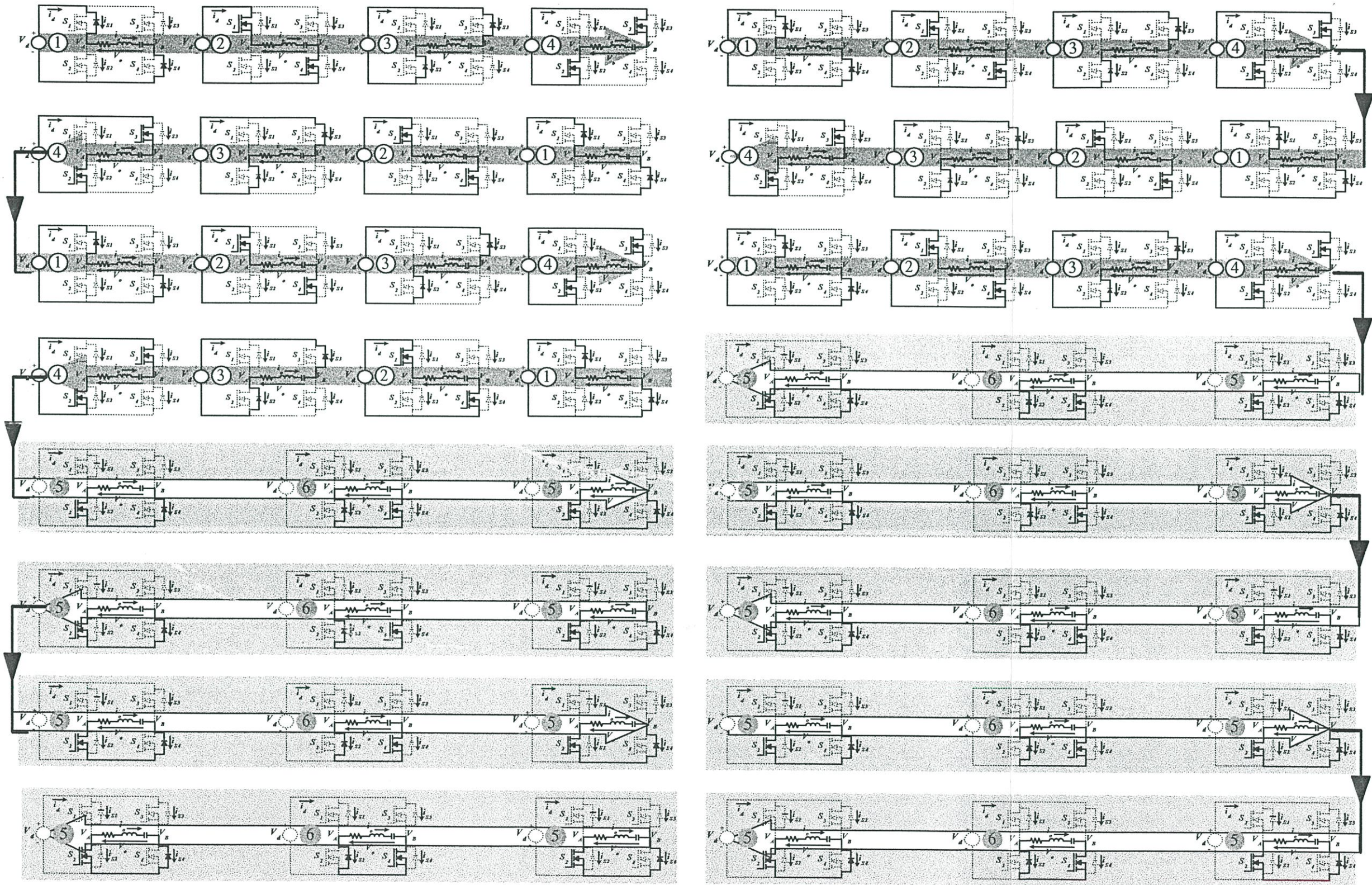
จากลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ในรูปที่ 6.8 และจากตารางแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ในตารางที่ 6.3 สามารถนำมาเขียนสรุปลำดับขั้นตอนการทำงาน ON - OFF ของสวิตช์ทั้ง 4 ของวงจรบริดจ์อินเวอร์เตอร์ได้ดัง Circuit Flow Diagram ในรูปที่ 6.9 โดยสามารถแบ่งการทำงานของวงจรทั้งหมดใน 1 คาบเวลา ออกเป็น 16 กลุ่มเช่นเดียวกัน โดยวงจรในกลุ่มที่ 1-7 จะมีโหมดการทำงานเป็น 1, 2, 3, 4 ซึ่งเป็นการทำงานของวงจรที่ให้แรงดันเอาท์พุท ส่วนการทำงานของวงจรที่เหลือทั้งหมดอีก 9 กลุ่ม จะมีลักษณะการทำงานในโหมดที่ 5, 6 ซึ่งจะให้แรงดันเอาท์พุทเป็นศูนย์ (กำลังไฟฟ้าเอาท์พุทเป็นศูนย์)

6.5.4 การเปรียบเทียบลักษณะคลื่นแรงดัน กระแส แอมสเปกตรัมจากการวัดและซิมูเลต (กรณี 7/16)

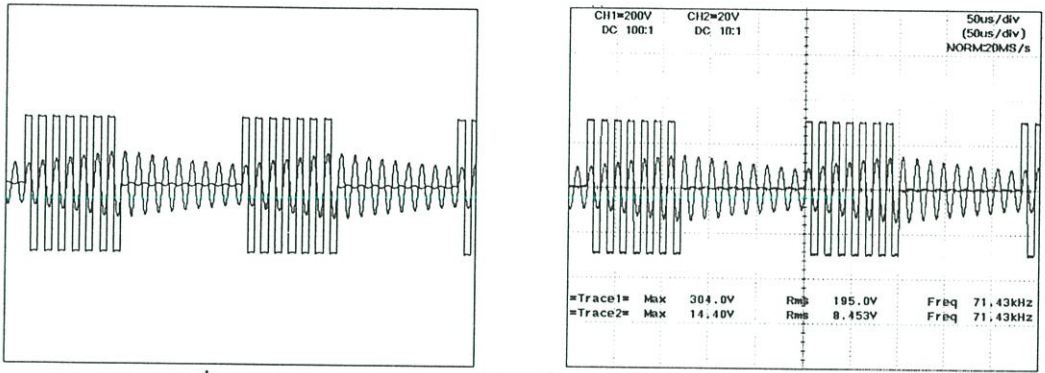
จากหลักการที่กล่าวมาแล้ว เมื่อนำวงจรในโหมดต่างๆมาวิเคราะห์ด้วยสมการ (4.1) - (4.21) เช่นเดียวกับกับในกรณีก่อนหน้านี้ จะได้ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแส v_o, i_o ดังรูปที่ 6.10(a) และเช่นเดียวกันเมื่อนำคลื่นแรงดันและกระแสไปหาสเปกตรัมแรงดันและกระแสจะได้ดังรูปที่ 6.10 (b) และ 6.10 (c) ซึ่งผลที่ได้จากการซิมูเลตไม่ว่าจะเป็นคลื่นแรงดันและกระแส v_o, i_o แอมสเปกตรัมของแรงดันและกระแส v_o, i_o เมื่อนำมาเปรียบเทียบเพื่อยืนยันความถูกต้องกับคลื่นแรงดันและกระแส v_o, i_o แอมสเปกตรัมของแรงดัน v_o และแอมสเปกตรัมของกระแสโหลด i_o ที่ได้จากการทดลองปรากฏว่าได้ผลที่ใกล้เคียงกันมาก



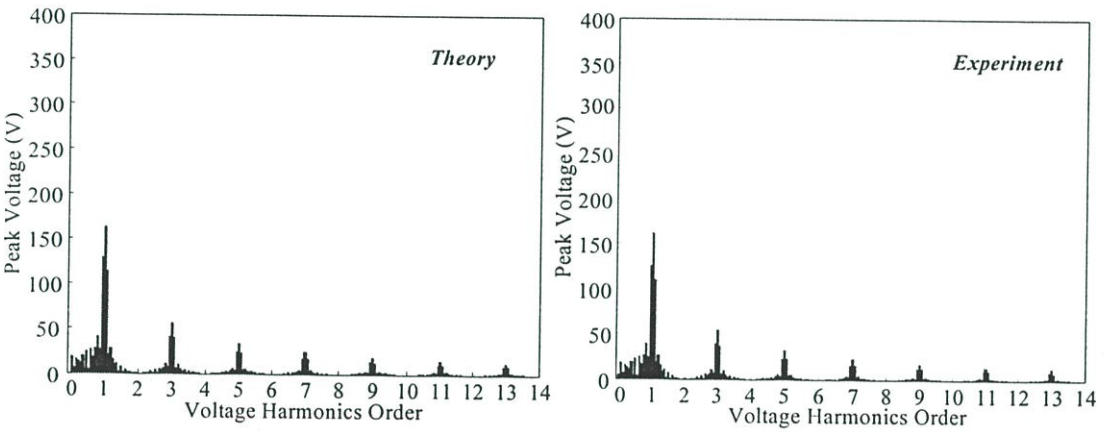
รูปที่ 6.8 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆเฉพาะในช่วง I คาบเวลา สำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบรวมเป็นกลุ่มในกรณี 7/16 ไซเคิลต่อคาบเวลา



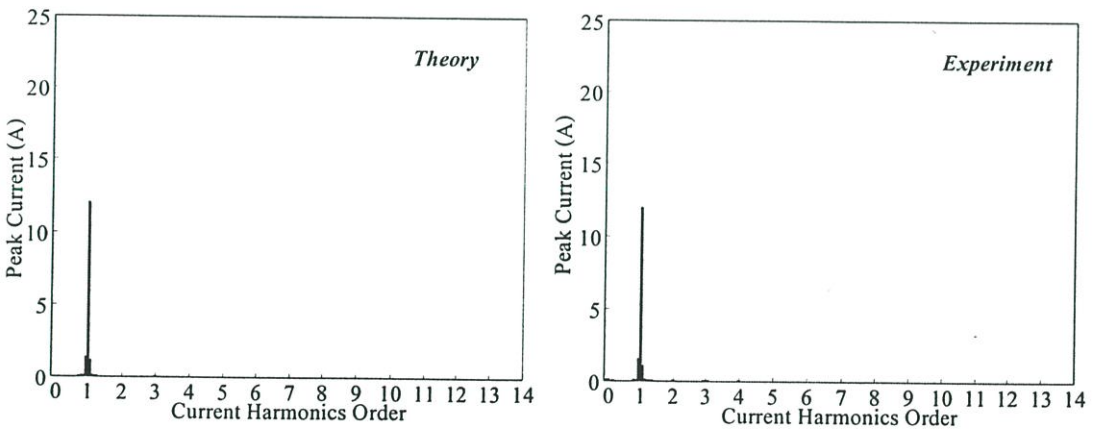
รูปที่ 6.9 ลำดับขั้นตอนการทำงานของวงจรในช่วง 1 คาบเวลา สำหรับพัลส์ PDM รูปแบบรวมเป็นกลุ่มในกรณี 7/16 ไซเคิลต่อคาบเวลา



a) ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



b) ลักษณะสเปกตรัมของแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



c) ลักษณะสเปกตรัมของกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

รูปที่ 6.10 ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลองสำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมเป็นกลุ่มในกรณี 7/16 ไซเคิลต่อคาบเวลา

6.6 หลักการปรับควบคุมจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมตัวเป็นกลุ่มสำหรับกรณีจำนวนไซกิลต่อคาบเวลาเท่ากับ 10/16

6.6.1 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 10/16)

ในรูปที่ 6.11 ได้แสดงคลื่น v_o, i_o จำนวนไซกิลเท่ากับ 10 ไซกิล จากจำนวนไซกิลอินพุตที่ป้อนเท่ากับ 16 ไซกิล โดยแสดงให้เห็นลักษณะการจัดแพทเทิร์นของแรงดันและกระแสเอาต์พุต แรงดันและกระแสที่ตัวสวิตช์ทั้ง 4 $(v_{S_1}, i_{S_1}), (v_{S_2}, i_{S_2}), (v_{S_3}, i_{S_3})$ และ (v_{S_4}, i_{S_4}) ตลอดจนลักษณะกระแสที่จ่ายออกจากแหล่งจ่ายดีซีซึ่งพยายาเช่นเดียวกับในกรณีอื่นๆที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าในกรณีนี้จะมีพัลส์เพิ่มขึ้นเป็น 10 ไซกิลโดยจะปรากฏที่ไซกิลที่ 1-10 ในขณะที่กระแสโหลด i_o ก็จะมีขนาดเพิ่มมากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนไซกิลของแรงดันเอาต์พุต

6.6.2 ค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 10/16)

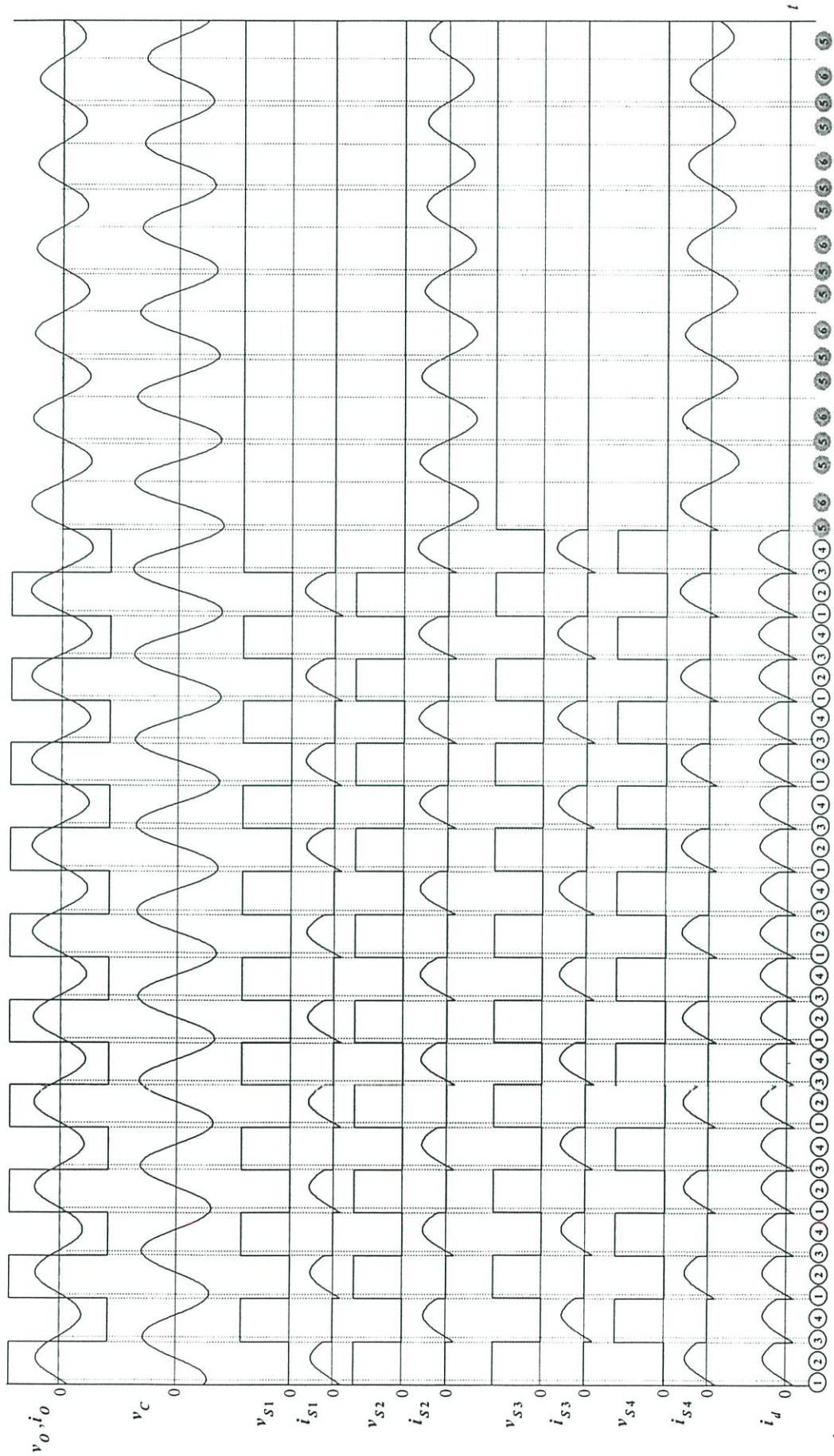
จากลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่าง ๆ ในวงจรบริดจ์อินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 6.11 สามารถเขียนสรุปค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในวงจรบริดจ์อินเวอร์เตอร์เช่นเดียวกับในกรณีอื่นๆที่ได้กล่าวมาแล้วดังตารางที่ 6.4

6.6.3 ลักษณะวงจรในโหมดต่างๆในช่วง 1 ไซกิล (กรณี 10/16)

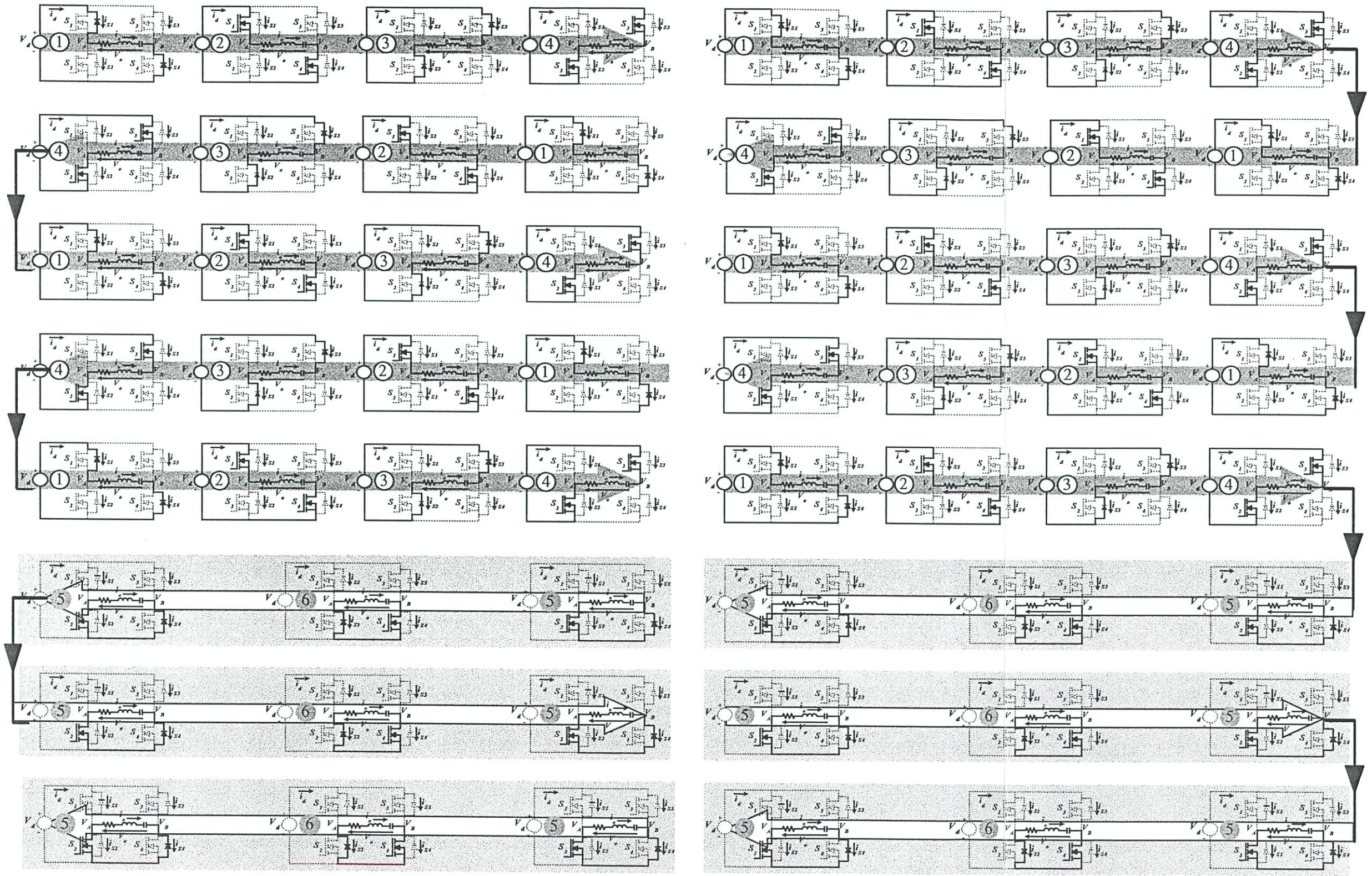
จากลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ในรูปที่ 6.11 และจากตารางแรงดันและกระแสตามจุดต่าง ๆ ในตารางที่ 6.4 สามารถนำมาเขียนสรุปลำดับขั้นตอนการทำงาน ON-OFF ของสวิตช์ทั้ง 4 ของวงจรบริดจ์อินเวอร์เตอร์ได้ดัง Circuit Flow Diagram ในรูปที่ 6.12 โดยสามารถแบ่งการทำงานของวงจรทั้งหมดใน 1 คาบเวลา ออกเป็น 16 กลุ่ม โดยวงจรในกลุ่มที่ 1-10 จะมีโหมดการทำงานเป็น 1, 2, 3, 4 ซึ่งเป็นกลุ่มการทำงานของวงจรที่ให้แรงดันเอาต์พุต ในขณะที่กลุ่มอื่นๆ ที่เหลือจะมีลักษณะการทำงานที่ให้แรงดันเอาต์พุตเป็นศูนย์ (กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตเป็นศูนย์) นั่นก็คือจะมีโหมดการทำงานเป็นโหมด 5 และ 6

6.6.4 การเปรียบเทียบลักษณะคลื่นแรงดัน กระแส แลปสเปกตรัมจากการวัดและซิมูเลต (กรณี 10/16)

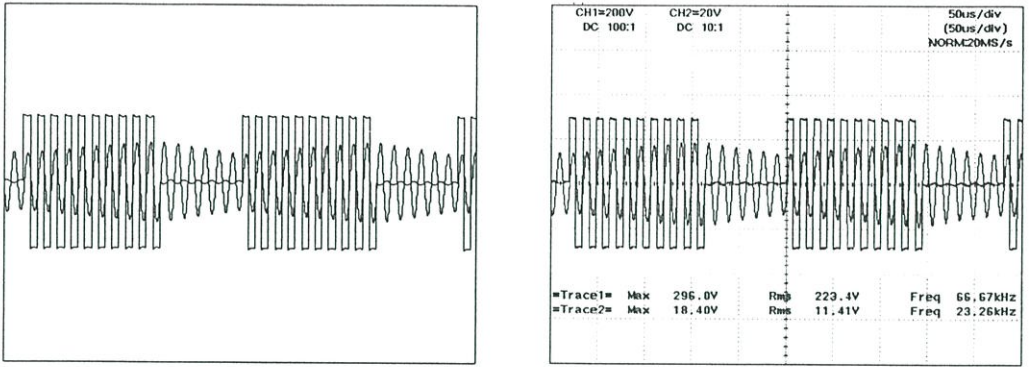
จากหลักการที่กล่าวมาแล้ว เมื่อนำวงจรในโหมดต่างๆมาวิเคราะห์ด้วยสมการ (4.1)-(4.21) เช่นเดียวกับในกรณีก่อนหน้านี้ จะได้ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแส v_o, i_o ดังรูปที่ 6.13(a) และเมื่อนำมาคำนวณหาสเปกตรัมแรงดันและกระแส v_o, i_o จะได้ดังรูปที่ 6.13 (b) และ 6.13(c) ซึ่งผลที่ได้จากการซิมูเลตไม่ว่าจะเป็นคลื่นแรงดันและกระแส v_o, i_o แลปสเปกตรัมของแรงดันและกระแส v_o, i_o เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับคลื่นแรงดันและกระแส v_o, i_o แลปสเปกตรัมของแรงดัน v_o และแลป สเปกตรัมของกระแสโหลด i_o ที่ได้จากการทดลองจะเห็นว่าผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันมาก



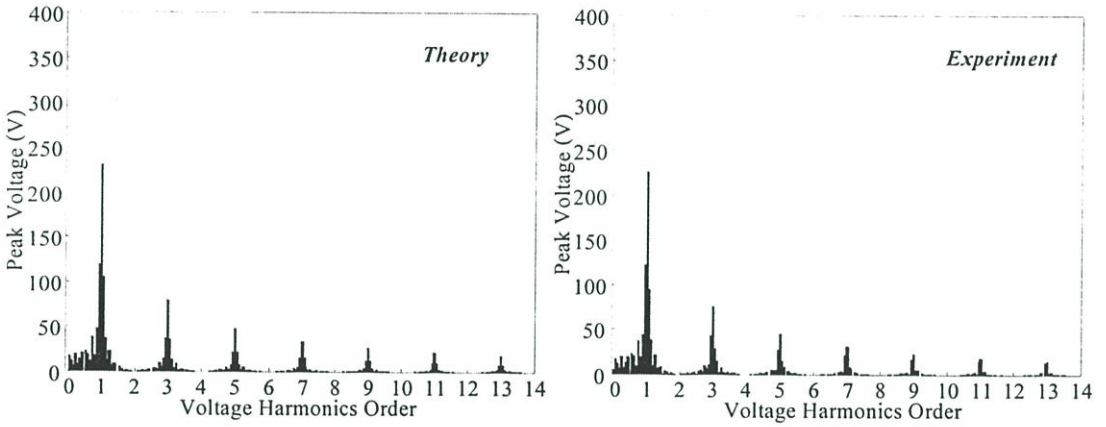
รูปที่ 6.11 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆเฉพาะในช่วง 1 คาบเวลา สำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบรวมเป็นกลุ่มในกรณี 10/16 ไซเคิลต่อคาบเวลา



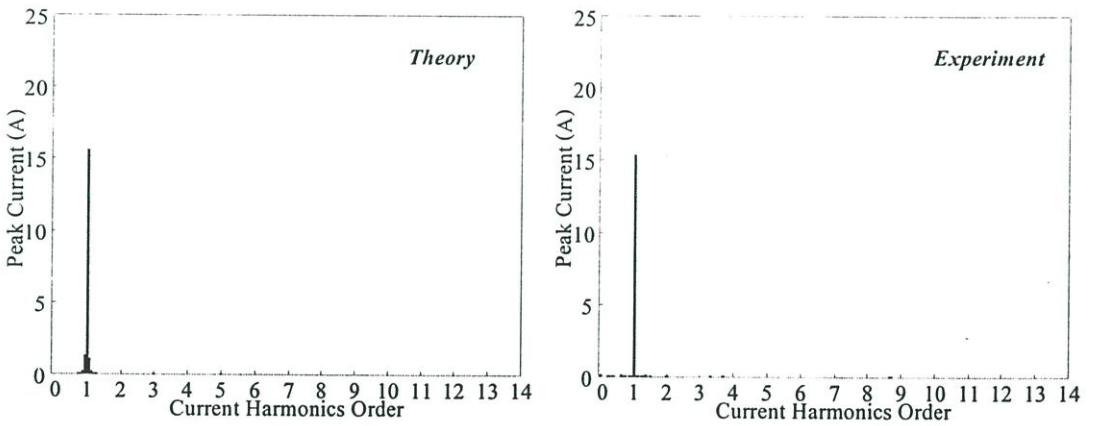
รูปที่ 6.12 ลำดับขั้นตอนการทำงานของวงจรในช่วง 1 คาบเวลา สำหรับพัดลม PDM รูปแบบรวมเป็นกลุ่มในกรณี 10/16 ไซเคิลต่อคาบเวลา



a) ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสเอาท์พุทที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



b) ลักษณะสเปกตรัมของแรงดันเอาท์พุทที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



c) ลักษณะสเปกตรัมของกระแสเอาท์พุทที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

รูปที่ 6.13 ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาท์พุทที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลองสำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมกลุ่มในกรณี 10/16 ไชเกิดต่อคาบเวลา

6.7 หลักการปรับควบคุมจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมตัวเป็นกลุ่มสำหรับกรณีจำนวนไซเคิลต่อคาบเวลา เท่ากับ 13/16

6.7.1 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 13/16)

ในรูปที่ 6.14 ได้แสดงคลื่น v_o, i_o จำนวนไซเคิลเท่ากับ 13 ไซเคิล จากจำนวนไซเคิลอินพุตที่ป้อนเท่ากับ 16 ไซเคิล โดยได้แสดงให้เห็นลักษณะการจัดแพทเทิร์น ของแรงดันและกระแสเอาต์พุต แรงดันและกระแสที่ตัวสวิตช์ทั้ง 4 (v_{S_1}, i_{S_1}), (v_{S_2}, i_{S_2}), (v_{S_3}, i_{S_3}) และ (v_{S_4}, i_{S_4}) ตลอดจนลักษณะกระแสที่จ่ายออกจากแหล่งจ่ายดีซีซัพพลาย โดยกรณีนี้จะมีแรงดันเอาต์พุตปรากฏที่ไซเคิลที่ 1 – 13 ส่วนกระแสโหลด i_o ก็ยังคงมีขนาดเพิ่มขึ้นตามจำนวนไซเคิลของแรงดันเอาต์พุตที่เพิ่มขึ้น

6.7.2 ค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 13/16)

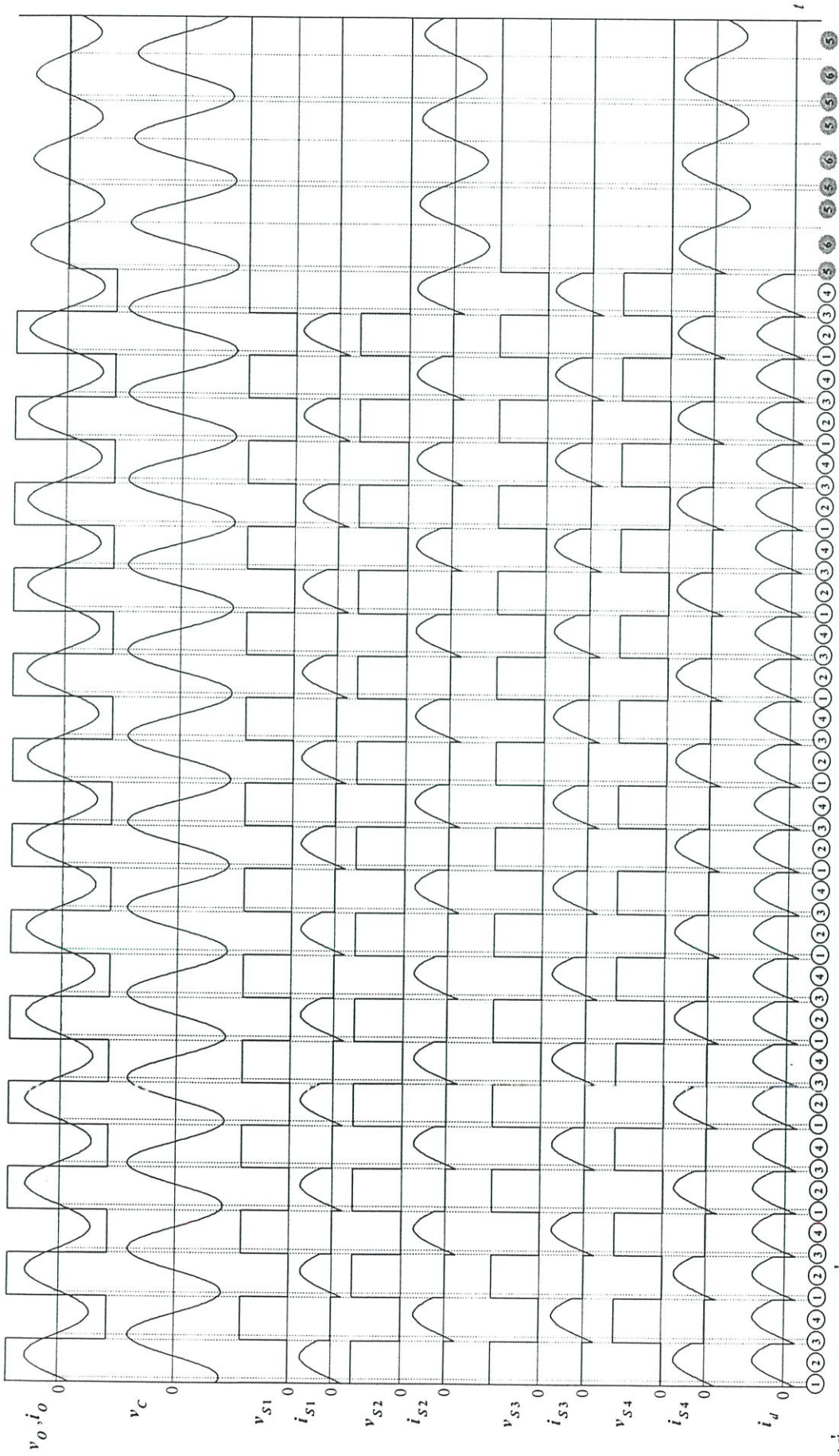
จากลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่าง ๆ ในวงจรบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ในรูปที่ 6.14 ซึ่งสามารถสามารถเขียนสรุปค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ในวงจรบริดจ์อินเวอร์เตอร์ได้เช่นเดียวกับกรณีก่อนหน้านี้ได้ดังตารางที่ 6.5

6.7.3 ลักษณะวงจรในโหมดต่างๆในช่วง 1 ไซเคิล (กรณี 13/16)

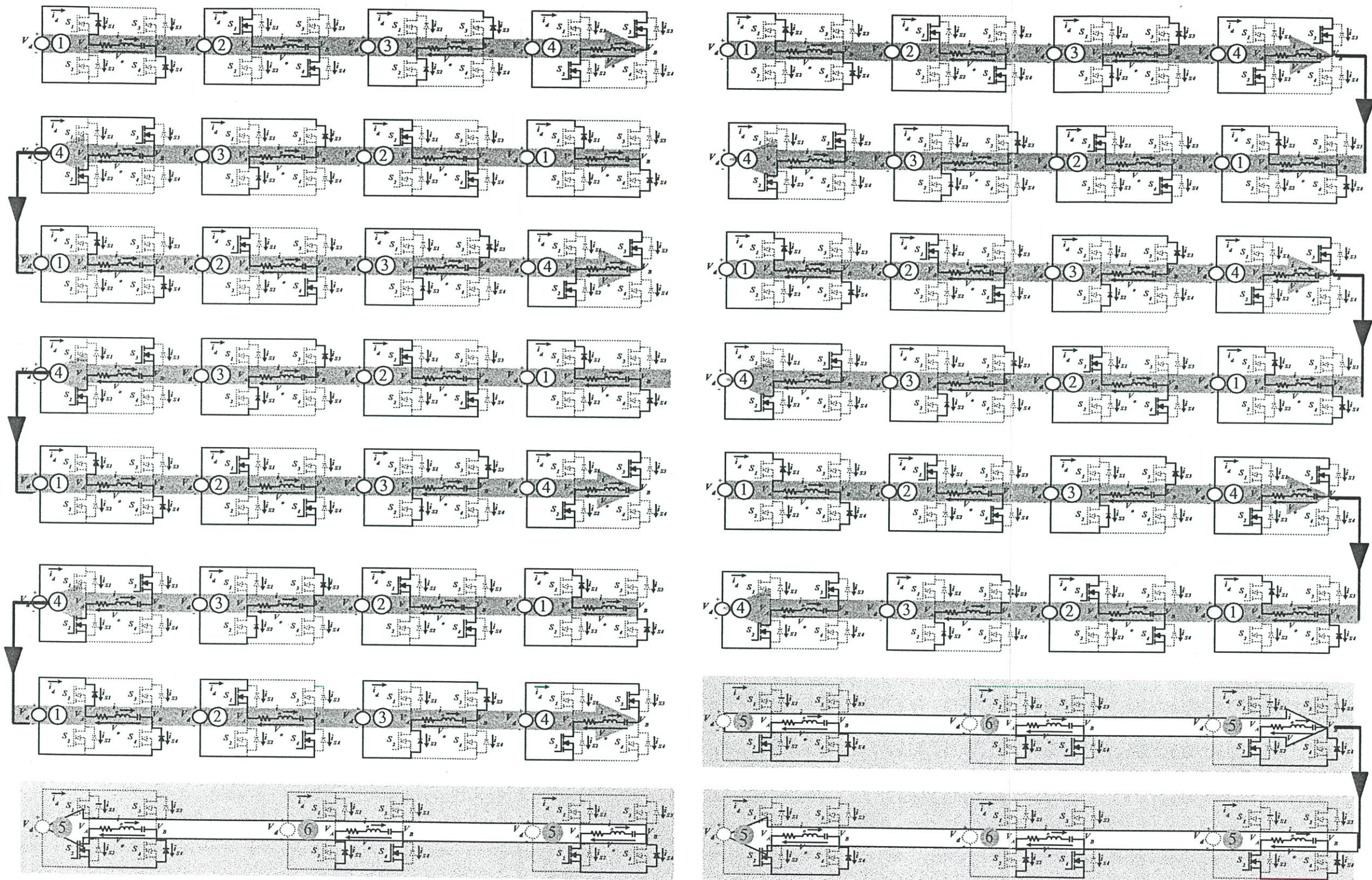
จากลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ในรูปที่ 6.14 และจากตารางแรงดันและกระแสตามจุดต่าง ๆ ในตารางที่ 6.5 สามารถนำมาเขียนสรุปลำดับขั้นตอนการทำงาน ON – OFF ของสวิตช์ทั้ง 4 ของวงจรบริดจ์อินเวอร์เตอร์ได้ดัง Circuit Flow Diagram ในรูปที่ 6.15 โดยสามารถแบ่งการทำงานของวงจรทั้งหมดใน 1 คาบเวลา ออกเป็น 16 กลุ่ม โดยที่วงจรในกลุ่ม 1 – 13 จะมีโหมดการทำงานเป็น 1, 2, 3, 4 ซึ่งให้แรงดันเอาต์พุต ส่วนการทำงานของวงจรที่เหลือทั้งหมดนั้นคือในกลุ่มที่ 14 – 16 จะมีลักษณะการทำงานในโหมดที่ 5 และ 6 ซึ่งให้แรงดันเอาต์พุตเป็นศูนย์ (กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตเป็นศูนย์)

6.7.4 การเปรียบเทียบลักษณะคลื่นแรงดัน กระแส แลปสเปกตรัมจากการวัดและซิมูเลต

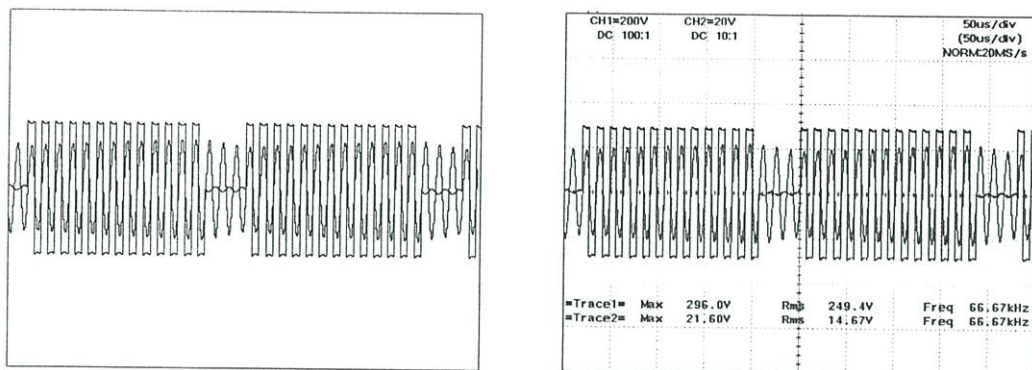
เช่นเดียวกันกับในกรณีก่อนหน้านี้ เมื่อนำวงจรในโหมดต่างๆมาวิเคราะห์ด้วยสมการที่ (4.1) – (4.21) จะได้ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแส v_o, i_o ดังแสดงในรูปที่ 6.16(a) และเมื่อนำมาคำนวณหาสเปกตรัมแรงดันและกระแส v_o, i_o จะได้ดังรูปที่ 6.16(b) และ 6.16(c) ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลที่ได้จากการซิมูเลตไม่ว่าจะเป็นคลื่นแรงดันและกระแส v_o, i_o แลปสเปกตรัมของแรงดันและกระแส v_o, i_o เมื่อนำมาเปรียบเทียบเพื่อยืนยันความถูกต้องกับคลื่นแรงดันและกระแส v_o, i_o แลปสเปกตรัมของแรงดัน v_o และแลปสเปกตรัมของกระแสโหลด i_o ที่ได้จากการทดลองปรากฏว่าจะได้ผลที่ใกล้เคียงกันมาก



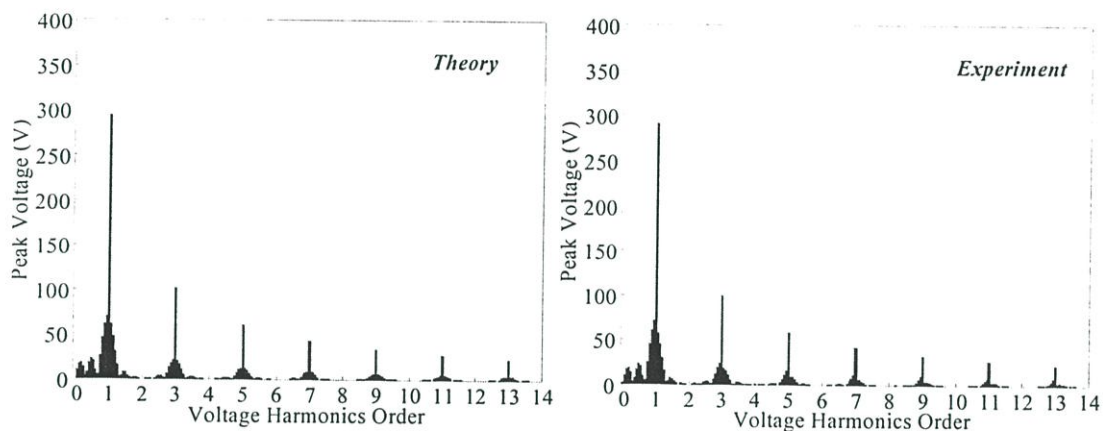
รูปที่ 6.14 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆเฉพาะในช่วง 1 คาบเวลา สำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบรวมเป็นกลุ่มในกรณี 13/16 ซึ่งเกิดต่อคาบเวลา



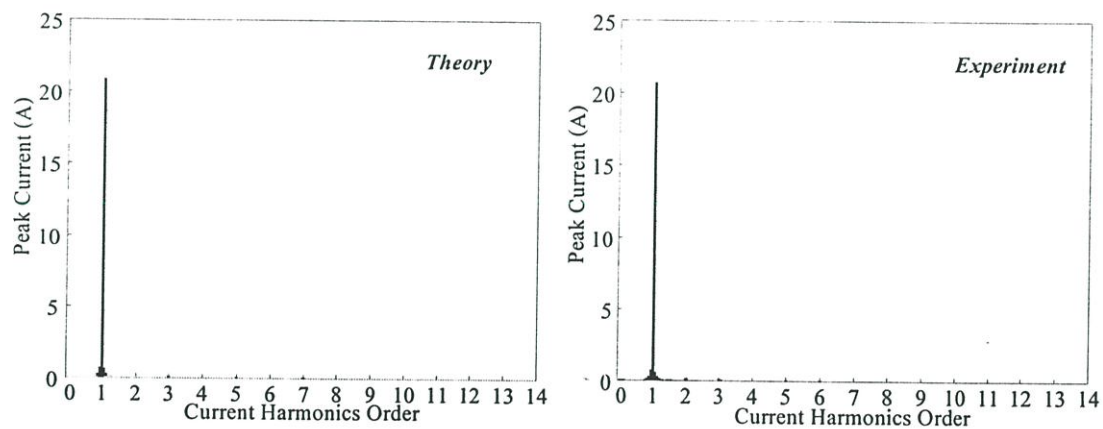
รูปที่ 6.15 ลำดับขั้นตอนการทำงานของวงจรในช่วง 1 คาบเวลา สำหรับพัลส์ PDM รูปแบบรวมเป็นกลุ่มโนกรณี 13/16 ไซเคิลต่อคาบเวลา



a) ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



b) ลักษณะสเปกตรัมของแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



c) ลักษณะสเปกตรัมของกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

รูปที่ 6.16 ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลองสำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมกลุ่มในกรณี 13/16 ไชเกิดต่อคาบเวลา

6.8 หลักการปรับควบคุม จำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมตัวเป็นกลุ่มสำหรับ
กรณีจำนวนไซเคิลต่อคาบเวลา เท่ากับ 16/16

6.8.1 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 16/16)

จะมีลักษณะเหมือนกับหัวข้อที่ 5.8.1 โดยแสดงได้ดังรูปที่ 6.17

6.8.2 ค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆในช่วง 1 คาบเวลา (กรณี 16/16)

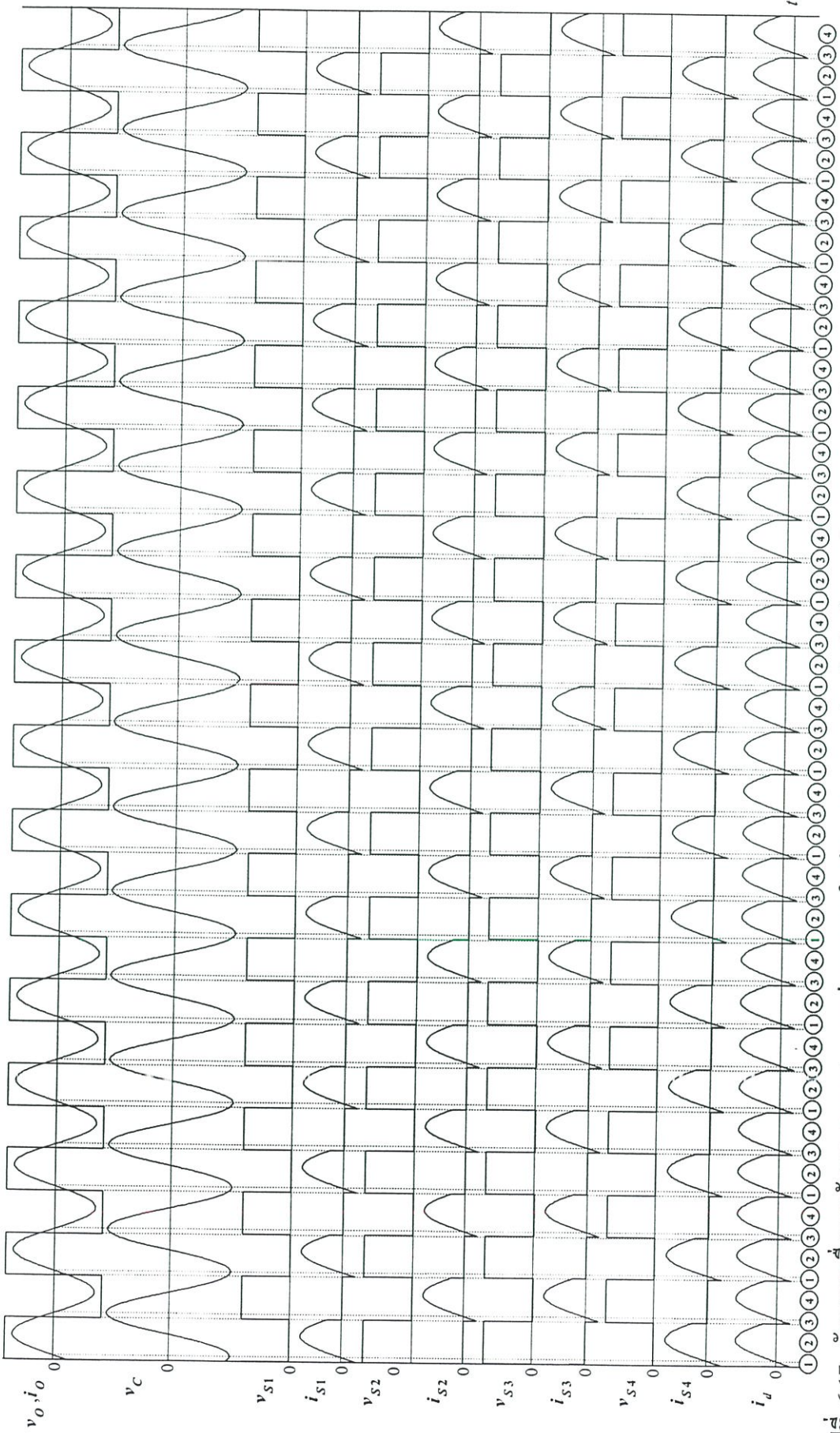
จะมีลักษณะเหมือนกับหัวข้อที่ 5.8.2 โดยแสดงได้ดังตารางที่ 6.5

6.8.3 ลักษณะวงจรในโหมดต่างๆในช่วง 1 ไซเคิล (กรณี 16/16)

จะมีลักษณะเหมือนกับหัวข้อที่ 5.8.3 โดยแสดงได้ดังรูปที่ 6.18

6.8.4 การเปรียบเทียบลักษณะคลื่นแรงดัน กระแส แอมป์เปกตรัมจากการวัดและซิมูเลต
(กรณี 16/16)

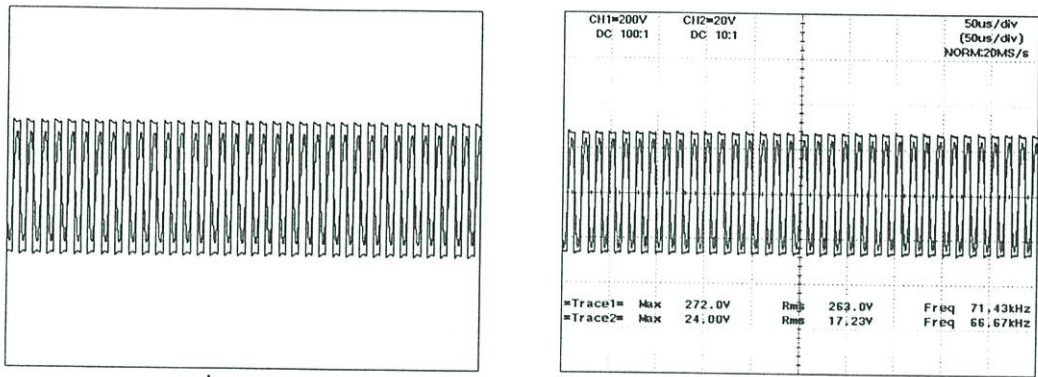
จะมีลักษณะเหมือนกับหัวข้อที่ 5.8.4 โดยแสดงได้ดังรูปที่ 6.19



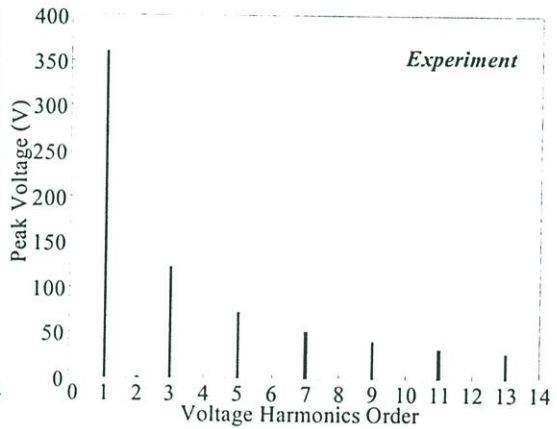
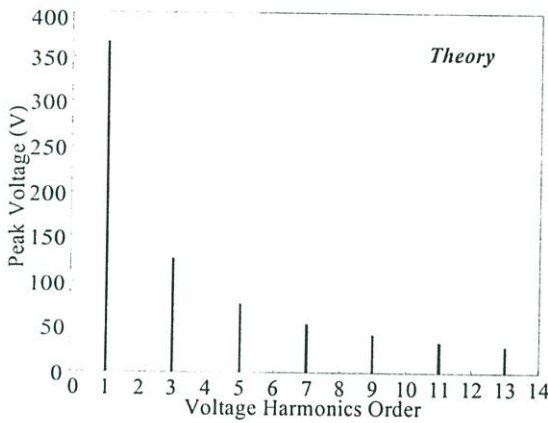
รูปที่ 6.17 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆเฉพาะในช่วง 1 คาบเวลา สำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบรวมเป็นกลุ่มในกรณี 16/16 ซึ่งเกิดต่อคาบเวลา



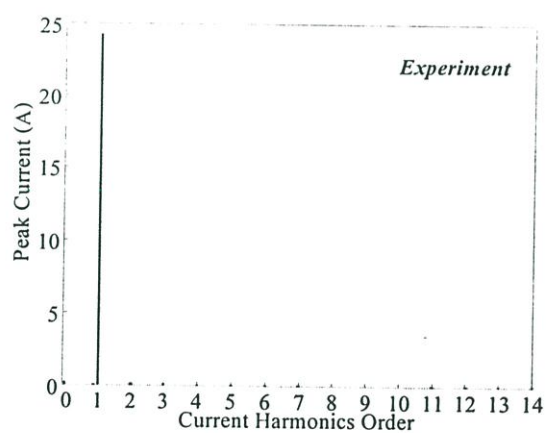
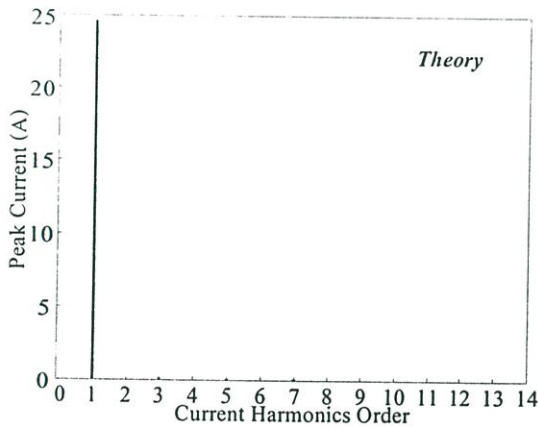
รูปที่ 6.18 ลำดับขั้นตอนการทำงานของวงจรในช่วง 1 คาบเวลา สำหรับฟิลล์ PDM รูปแบบรวมเป็นกลุ่มในกรณี 16/16 ไชเกิดต่อคาบเวลา



a) ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



b) ลักษณะสเปกตรัมของแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



c) ลักษณะสเปกตรัมของกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

รูปที่ 6.19 ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลองสำหรับพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมกลุ่มในกรณี 16/16 ไซเคิลต่อคาบเวลา

6.9 สรุป

ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าในวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์อนุกรมสำหรับเครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำความถี่สูงโดยวิธีการปรับจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมตัวเป็นกลุ่มได้กำหนดการปรับระดับกำลังไฟฟ้าไว้ทั้งหมดรวม 16 รูปแบบเช่นเดียวกันกับกรณีการปรับจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจาย คือ $1/16, 2/16, 3/16, \dots, 16/16$ เพียงแต่จะแตกต่างกันที่ลักษณะรูปแบบของการเกิดพัลส์ในแต่ละไซเคิล โดยในแต่ละรูปแบบสามารถนำมาวิเคราะห์หาค่าคลื่นแรงดันและกระแสที่จุดต่างๆในวงจรอินเวอร์เตอร์ ตลอดจนสามารถนำมาคำนวณหาลักษณะสเปกตรัมของคลื่นแรงดันและกระแสเอาท์พุทได้เช่นเดียวกัน และเมื่อนำสเปกตรัมของคลื่นแรงดันและกระแสเอาท์พุทไปเปรียบเทียบกับลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาท์พุทอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากการปรับจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจาย จะเห็นได้ว่า ที่จำนวนพัลส์เท่ากัน ในกรณีการปรับจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบการรวมตัวเป็นกลุ่มจะมีฮาร์โมนิกส์เกิดขึ้นมากกว่า (ยกเว้นที่พัลส์ $1/16$ และ $16/16$ เนื่องจากมีรูปแบบเดียวกัน) และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองปรากฏว่าได้ผลสอดคล้องและใกล้เคียงกันเช่นกัน

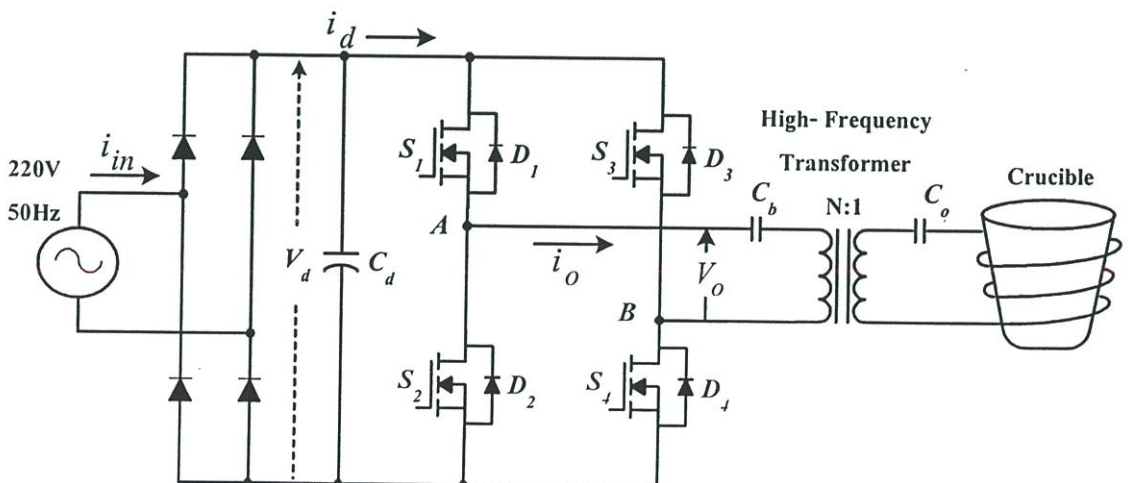
บทที่ 7

การวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ขณะขับโหลดเรโซแนนท์อนุกรมที่มีการควบคุมด้วย หลักการปรับความถี่ FC ในเครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำความถี่สูง

7.1 บทนำ

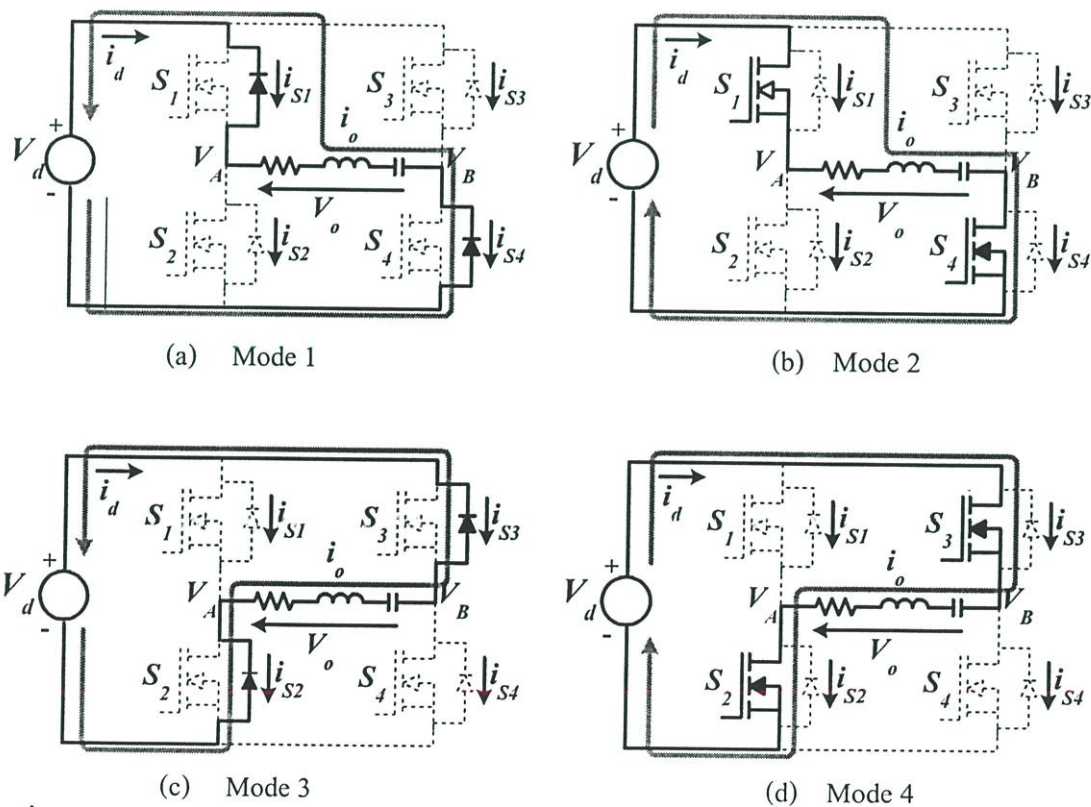
ในบทนี้จะนำเสนอถึงการวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ขณะขับโหลดเรโซแนนท์อนุกรมที่มีการควบคุมด้วยการปรับความถี่ FC [6] ในเครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำความถี่สูง ซึ่งเป็นหลักการควบคุมกำลังไฟฟ้าในวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์อีกวิธีหนึ่ง ทั้งนี้เพื่อเป็นการเปรียบเทียบกับหลักการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยวิธีการปรับจำนวนพัลส์ เพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ รวมถึงข้อดีข้อเสียในแต่ละวิธีการควบคุม และเช่นเดียวกันกับในบทที่ 4 , 5 และ 6 โดยเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึง การวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมด้วยการปรับความถี่ ลักษณะคลื่นของแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆของวงจร ลักษณะโหมคการทำงานของวงจรในช่วง 1 พีรีเยค และลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตตลอดจนการหาสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ อีกทั้งยังได้มีการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับการซิมูเลต ซึ่งรายละเอียดดังกล่าวจะได้นำเสนอในอันดับถัดไปดังต่อไปนี้

7.2 หลักการทำงาน



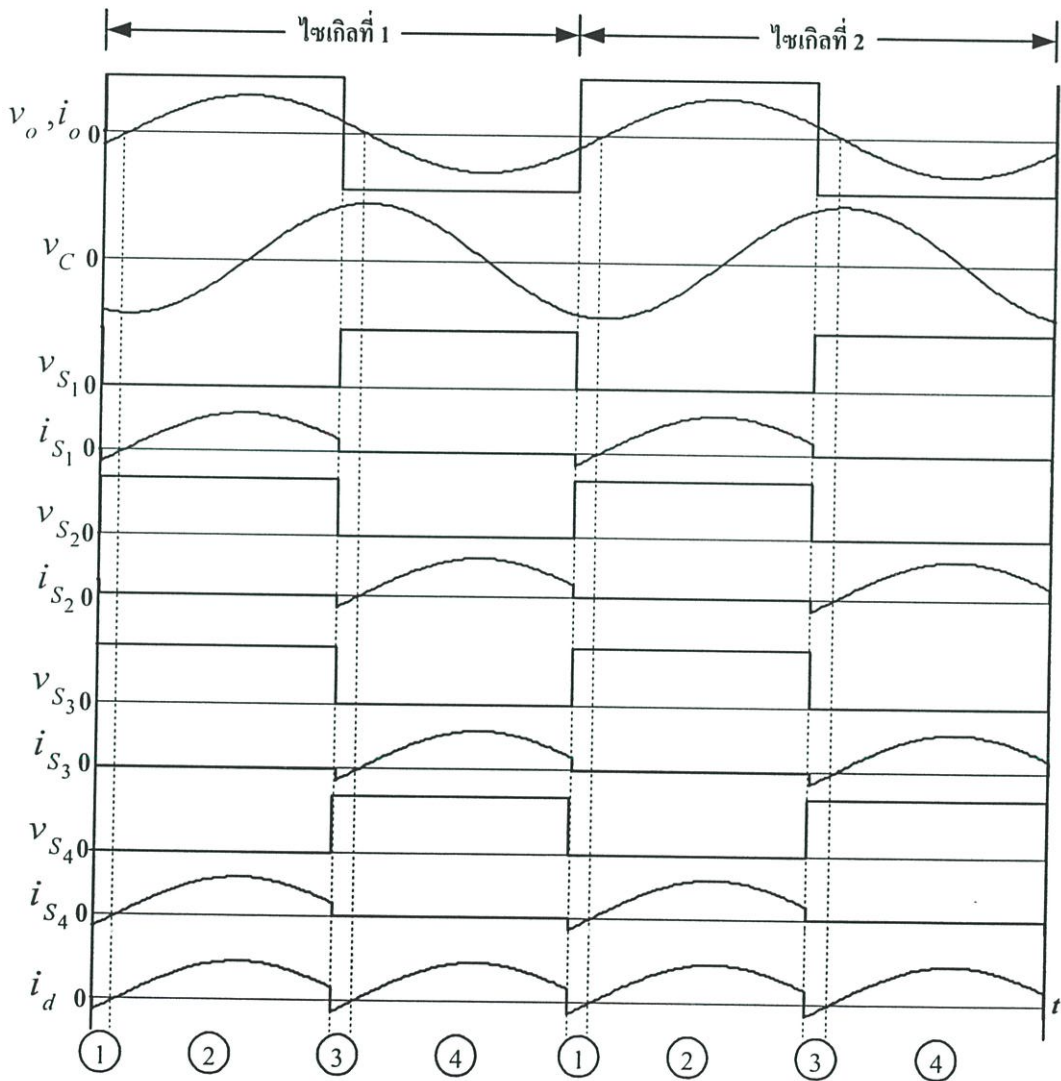
รูปที่ 7.1 วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์อนุกรมของเครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำความถี่สูง

สำหรับโครงสร้างของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์อนุกรมของเครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำความถี่สูงที่มีการควบคุมด้วยการปรับความถี่ จะมีโครงสร้างเช่นเดียวกันกับของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์อนุกรมของเครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำความถี่สูงกรณีที่มีการควบคุมด้วยการปรับจำนวนพัลส์ดังที่ได้แสดงในบทที่ 4 รูปที่ 4.1 ซึ่งจะได้นำเสนออีกครั้งดังรูปที่ 7.1 โดยในส่วนของหลักการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ในกรณีที่มีการควบคุมกำลังไฟด้วยการปรับความถี่นี้จะแตกต่างจากในกรณีที่มีการควบคุมกำลังไฟด้วยการปรับจำนวนพัลส์ นั่นคือ ในกรณีของการปรับความถี่จะให้แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เพียง 2 สถานะคือ $+V_d$ และ $-V_d$ เท่านั้น และเช่นเดียวกับในกรณีการควบคุมกำลังไฟด้วยการปรับจำนวนพัลส์ เมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่สวิตช์สูงกว่าความถี่เรโซแนนท์ จะสามารถแบ่งการทำงานของวงจรออกได้เป็น 4 โหมด ดังแสดงในรูปที่ 7.2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าจะมีจำนวนโหมดการทำงานของอินเวอร์เตอร์ลดลงจากในกรณีของการปรับจำนวนพัลส์ที่มีด้วยกัน 6 โหมด อันเนื่องมาจากในกรณีของการปรับความถี่นี้จะไม่มีสถานะที่ให้แรงดันเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์มีค่าเป็น 0 โดยมีลักษณะการทำงานที่โหมดต่างๆ ดังนี้



รูปที่ 7.2 โหมดการทำงานของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมด้วยการปรับความถี่

โหมด 1, 2 ในโหมดนี้จะให้แรงดันเอาต์พุตเป็น $+V_d$ โดยจะมีการทำงานดังแสดงในรูปที่ 7.2 (a) และ 7.2 (b) โดยในโหมด 1 และ 2 นี้ สวิตช์ S_1 และ S_4 ON ในขณะที่สวิตช์ S_2 และ S_3 OFF โดยจะได้แรงดันเอาต์พุตเป็น $+V_d$ สำหรับทิศทางการไหลของกระแส เนื่องจากในโหมด 1 กระแสมีค่าเป็นลบดังนั้นกระแสจะไหลผ่านไดโอดของ S_1 และ S_4 ดังรูปที่ 7.2(a) และเมื่อเข้าสู่โหมด 2 สวิตช์ S_1 และ S_4 จะยังคง ON อยู่แต่กระแสจะเริ่มมีค่าเป็นบวกทำให้ทิศทางการไหลของกระแสจะเปลี่ยนมาไหลผ่านสวิตช์ของ S_1 และ S_4 แทนดังรูปที่ 7.2(b)

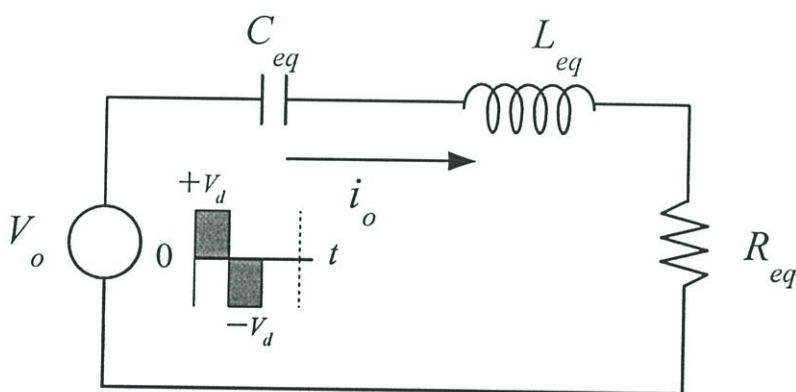


รูปที่ 7.3 คลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆใน 2 ไซเกิลของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมด้วยการปรับความถี่

โหมด 3, 4 ในโหมดนี้แรงดันเอาต์พุตจะเป็น $-V_d$ โดยจะมีการทำงานดังแสดงในรูปที่ 7.2 © และ 7.2(d) โดยในโหมด 2 และ 3 นี้ สวิตช์ S_2 และ S_3 ON ในขณะที่สวิตช์ S_1 และ S_4 จะ OFF โดยมีทิศทางการไหลของกระแสดังนี้คือ ในโหมด 3 เนื่องจากกระแยังคงมีค่าเป็นบวกต่อเนื่องจากโหมด 2 ดังนั้นส่งผลให้กระแสไหลผ่านไดโอดของ S_2 และ S_3 ดังรูปที่ 7.2(c) และเมื่อเข้าสู่โหมด 4 กระแสจะกลับไปมีค่าเป็นลบอีกครั้งทำให้จากเดิมที่กระแสไหลผ่านไดโอดของ S_2 และ S_3 จะเปลี่ยนทิศทางมาไหลผ่านที่สวิตช์ S_2 และ S_3 แทน ดังรูปที่ 7.2(d) โดยสามารถแสดงลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆของวงจรอินเวอร์เตอร์ทั้ง 4 โหมดได้ดังรูปที่ 7.3

7.3 การวิเคราะห์ แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต

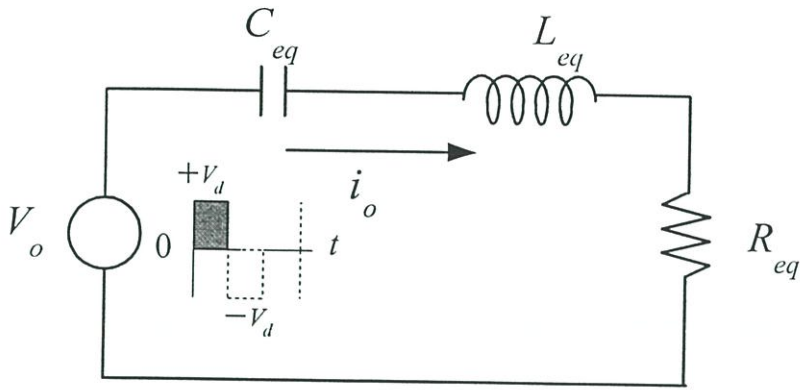
ในการวิเคราะห์ แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์อนุกรมที่ควบคุมด้วยการปรับความถี่สำหรับเครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำความถี่สูงนั้นจะมีหลักการวิเคราะห์เช่นเดียวกันกับในกรณีที่มีการควบคุมด้วยการปรับลดจำนวนพัลส์ในบิตที่ 4 นั่นคือ จะทำการวิเคราะห์ในลักษณะวงจรสมมูล RLC เรโซแนนท์อนุกรม ซึ่งจากโหมดการทำงานทั้ง 4 โหมดที่แสดงในรูปที่ 7.2 สามารถนำมาแสดงเป็นวงจรสมมูล RLC เรโซแนนท์อนุกรมได้ดังรูปที่ 7.4



รูปที่ 7.4 วงจรสมมูล RLC เรโซแนนท์อนุกรม

จากวงจรสมมูล RLC เรโซแนนท์อนุกรมดังรูปที่ 7.4 สามารถนำมาพิจารณาสมการแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆเป็นโหมดๆ ได้ดังนี้

โหมด 1-2 ในโหมดนี้จะได้แรงดัน V_o มีค่าเป็น $+V_d$ ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการได้โดยพิจารณาจากรูปที่ 7.5 ได้ดังนี้



รูปที่ 7.5 วงจรสมมูล RLC เรโซแนนซ์อนุกรมของโหมดการทำงานที่ 1-2

จากรูปที่ 7.5 สามารถเขียนสมการแรงดันได้ดังนี้

$$v_R + v_L + v_C = +V_d \quad (7.1)$$

จากสมการ (7.1) สามารถเขียนเป็นสมการอนุพันธ์ได้คือ

$$R_{eq} i_o + L_{eq} \frac{di_o}{dt} + \frac{1}{C_{eq}} \int i_o dt = +V_d \quad (7.2)$$

เมื่อทำการแก้สมการอนุพันธ์ในสมการ (7.2) แล้วจะได้กระแสไหลผ่านโหลดดังนี้

$$i_o = e^{-mt} \left[\left(\frac{+V_d - V_{C1} - L_{eq} m I_{o1}}{nL_{eq}} \right) \sin nt + I_{o1} \cos nt \right] \quad (7.3)$$

และจากสมการกระแส i_o ในสมการ (7.3) สามารถทำการคำนวณหาแรงดันตกคร่อมความต้านทาน R_{eq} ดังนี้

$$v_R = R_{eq} i_o = R_{eq} \cdot e^{-mt} \left[\left(\frac{+V_d - V_{C1} - L_{eq} m I_{o1}}{nL_{eq}} \right) \sin nt + I_{o1} \cos nt \right] \quad (7.4)$$

ทำนองเดียวกันสามารถคำนวณหาแรงดันตกคร่อมรีแอคแตนซ์ X_L ได้ดังนี้

$$v_L = L_{eq} \frac{di_o}{dt} = L_{eq} e^{-mt} \left[\frac{(+V_d - V_{C1} - L_{eq} m I_{o1})}{nL_{eq}} (n \cos nt - m \sin nt) - I_{o1} (n \sin nt + m \cos nt) \right] \quad (7.5)$$

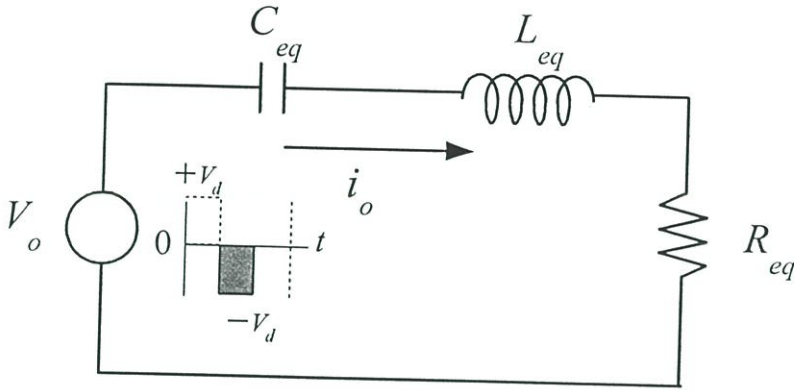
ดังนั้นค่าแรงดันตกคร่อมคาปาซิแตนซ์สามารถคำนวณหาได้ดังนี้

$$v_C = \frac{1}{C_{eq}} \int i_o dt = \frac{1}{C_{eq} (m^2 + n^2)} \left\{ \left(\frac{+V_d - V_{C1} - L_{eq} m I_{o1}}{nL_{eq}} \right) \left[e^{-mt} (-m \sin nt - n \cos nt) + n \right] + I_{o1} \left[e^{-mt} (-m \cos nt + n \sin nt) + m \right] \right\} + V_{C1} \quad (7.6)$$

และจากสมการ (7.4) และ (7.5) จะได้แรงดันตกคร่อมโหลด RL ดังนี้

$$\begin{aligned} v_{RL} &= v_R + v_L \\ &= R_{eq} \cdot e^{-mt} \left[\left(\frac{+V_d - V_{C1} - L_{eq} m I_{o1}}{nL_{eq}} \right) \sin nt + I_{o1} \cos nt \right] \\ &\quad + L_{eq} e^{-mt} \left[\frac{(+V_d - V_{C1} - L_{eq} m I_{o1})}{nL_{eq}} (n \cos nt - m \sin nt) - I_{o1} (n \sin nt + m \cos nt) \right] \end{aligned} \quad (7.7)$$

โหมค 3-4 ในโหมคนี้จะได้แรงดัน V_o มีค่าเป็น $-V_d$ ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการโดยพิจารณาจากรูปที่ 7.6 ได้ดังนี้



รูปที่ 7.6 วงจรสมมูล RLC เรโซแนนซ์อนุกรมของโหมคการทำงานที่ 3-4

จากรูปที่ 7.6 สามารถเขียนสมการแรงดันใหม่ได้ดังนี้

$$v_R + v_L + v_C = -V_d \quad (7.8)$$

จากสมการ (7.8) สามารถเขียนเป็นสมการอนุพันธ์ได้ดังนี้

$$R_{eq} i_o + L_{eq} \frac{di_o}{dt} + \frac{1}{C_{eq}} \int i_o dt = -V_d \quad (7.9)$$

เมื่อทำการแก้สมการอนุพันธ์ในสมการ (7.9) แล้วจะได้กระแสไหลผ่านโหลดดังนี้

$$i_o = e^{-mt} \left[\left(\frac{-V_d - V_{C1} - L_{eq} m I_{o1}}{n L_{eq}} \right) \sin nt + I_{o1} \cos nt \right] \quad (7.10)$$

และจากสมการกระแส i_o ในสมการ (7.10) สามารถทำการคำนวณหาแรงดันตกคร่อมความต้านทาน R_{eq} ได้ดังนี้

$$v_R = R_{eq} i_o = R_{eq} \cdot e^{-mt} \left[\left(\frac{-V_d - V_{C1} - L_{eq} m I_{o1}}{n L_{eq}} \right) \sin nt + I_{o1} \cos nt \right] \quad (7.11)$$

ในทำนองเดียวกันสามารถคำนวณหาแรงดันตกคร่อมรีแอคแตนซ์ X_L ได้ดังนี้

$$v_L = L_{eq} \frac{di_o}{dt} = L_{eq} e^{-mt} \left[\left(\frac{-V_d - V_{C1} - L_{eq} m I_{o1}}{n L_{eq}} \right) (n \cos nt - m \sin nt) - I_{o1} (n \sin nt + m \cos nt) \right] \quad (7.12)$$

ดังนั้นค่าแรงดันตกคร่อมคาปาซิแตนซ์สามารถคำนวณหาได้ดังนี้

$$v_C = \frac{1}{C_{eq}} \int i_o dt = \frac{1}{C_{eq} (m^2 + n^2)} \left\{ \left(\frac{-V_d - V_{C1} - L_{eq} m I_{o1}}{n L_{eq}} \right) \left[e^{-mt} (-m \sin nt - n \cos nt) + n \right] + I_{o1} \left[e^{-mt} (-m \cos nt + n \sin nt) + m \right] \right\} + V_{C1} \quad (7.13)$$

และจากสมการ (7.11) และ (7.12) จะได้แรงดันตกคร่อมโหลด RL ดังนี้

$$\begin{aligned} v_{RL} &= v_R + v_L \\ &= R_{eq} \cdot e^{-mt} \left[\left(\frac{-V_d - V_{C1} - L_{eq} m I_{o1}}{n L_{eq}} \right) \sin nt + I_{o1} \cos nt \right] \\ &\quad + L_{eq} e^{-mt} \left[\left(\frac{-V_d - V_{C1} - L_{eq} m I_{o1}}{n L_{eq}} \right) (n \cos nt - m \sin nt) - I_{o1} (n \sin nt + m \cos nt) \right] \end{aligned} \quad (4.14)$$

$$\text{เมื่อ } m = \frac{R_{eq}}{2L_{eq}} \quad \text{และ } n = \sqrt{\left(\frac{R_{eq}}{2L_{eq}}\right)^2 - \frac{1}{L_{eq}C_{eq}}}$$

V_{C1}, I_{o1} = ค่าแรงดันและกระแสเริ่มต้นที่ตกคร่อม C_{eq} และไหลผ่าน L_{eq}

จากสมการดังกล่าวข้างต้นสามารถนำมาคำนวณหากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมด้วยวิธีการปรับความถี่ได้โดยอาศัยหลักการอนุกรมฟูเรียร์พร้อมทั้งใช้โปรแกรม MATLAB เข้ามาช่วยในการคำนวณเช่นเดียวกันกับในกรณีที่มีการควบคุมด้วยการปรับลดจำนวนพัลส์โดยใช้สมการดังต่อไปนี้[5]

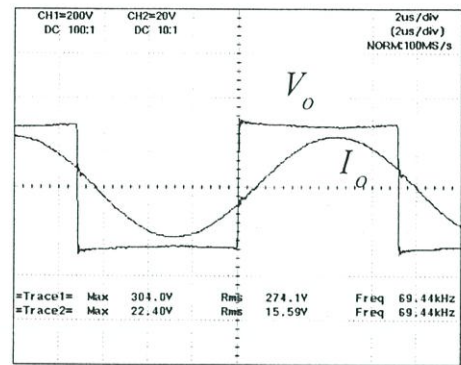
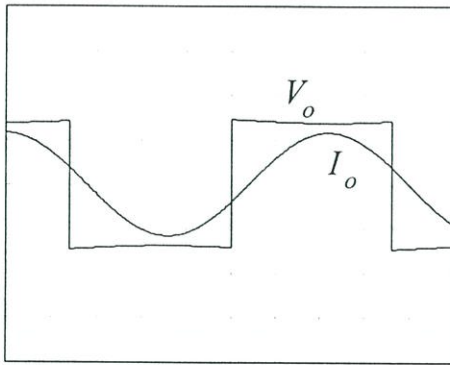
$$v_o = \sum_{n=1}^{\infty} V_{on,max} \sin(n\omega_o t) \quad (4.22)$$

$$i_o = \sum_{n=1}^{\infty} I_{on,max} \sin(n\omega_o t + \theta_n) \quad (4.23)$$

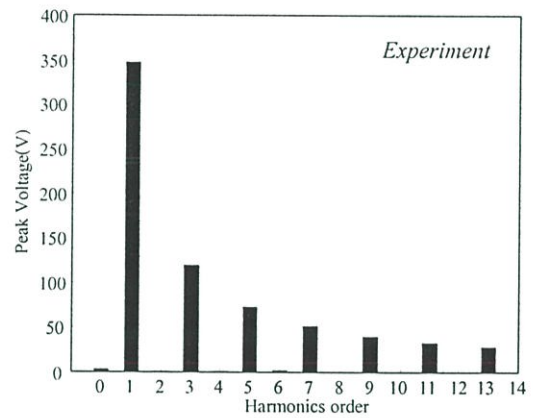
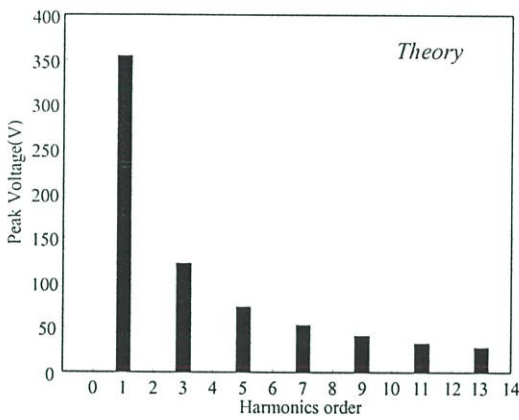
$$P_{out} = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{V_{on,max} I_{on,max}}{2} \right) \cos \theta_n \quad (4.24)$$

7.4 หลักการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยวิธีการปรับความถี่

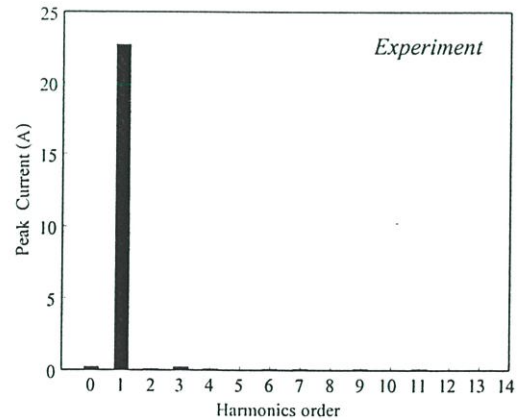
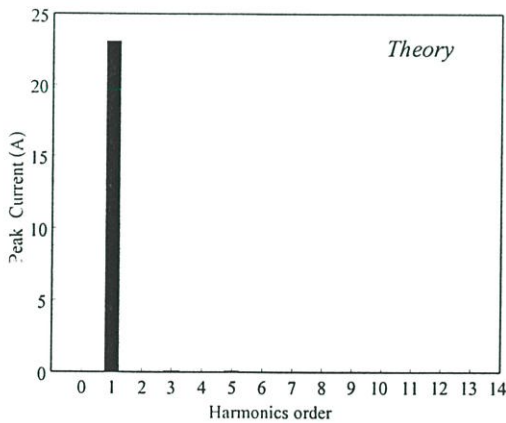
ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าในวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเรโซแนนซ์โดยวิธีการปรับความถี่ FC ที่ใช้ในเครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำความถี่สูงนั้น จะใช้หลักการของเรโซแนนซ์ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 โดยการปรับความถี่สวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ให้มีความถี่สูงกว่าที่ความถี่เรโซแนนซ์ นั่นคือ เมื่อความถี่สวิตช์มีค่าสูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตก็จะมีการลดลงตามความถี่สวิตช์ที่สูงขึ้น ซึ่งจะแตกต่างจากหลักการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยวิธีการปรับจำนวนพัลส์ที่จะอาศัยหลักการลดขนาดของแรงดันที่จ่ายให้กับโหลดเรโซแนนซ์ลงด้วยการลดจำนวนพัลส์ในแต่ละพีเรียดเพื่อปรับลดกำลังไฟฟ้า และเพื่อให้เห็นขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงในขณะที่มีการปรับความถี่เพื่อปรับลดกำลังไฟฟ้าจะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.7 – 7.9 โดยแสดงให้เห็นถึงลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ สเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ในขณะที่มีการปรับความถี่สวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 70 , 75 และ 80 kHz ตามลำดับ



a) ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

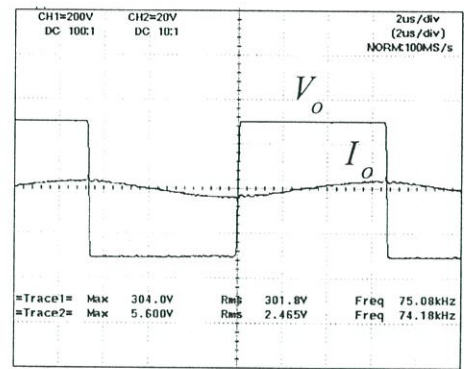
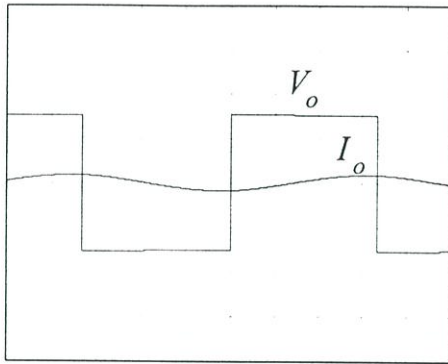


b) ลักษณะสเปกตรัมของแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

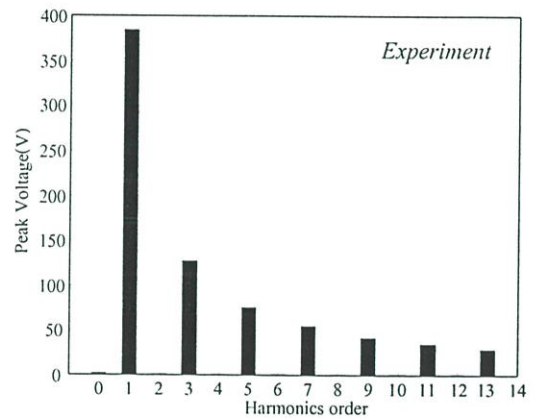
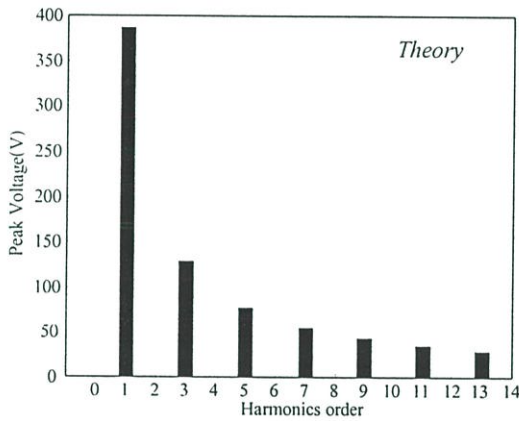


c) ลักษณะสเปกตรัมของกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

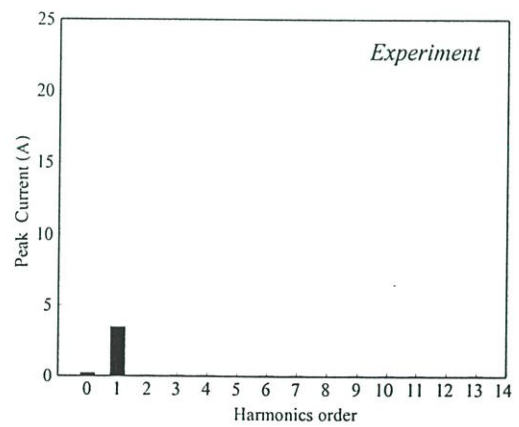
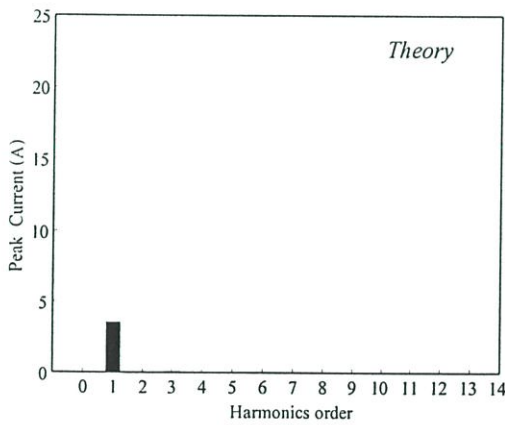
รูปที่ 7.7 ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลองเมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่สวิตซ์ 70 kHz



a) ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

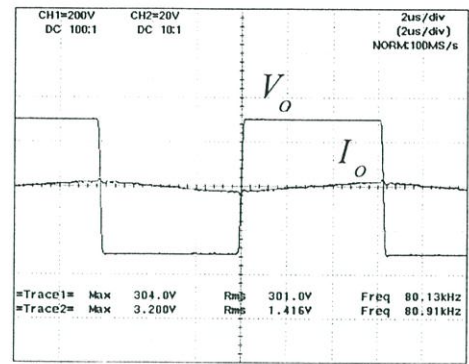
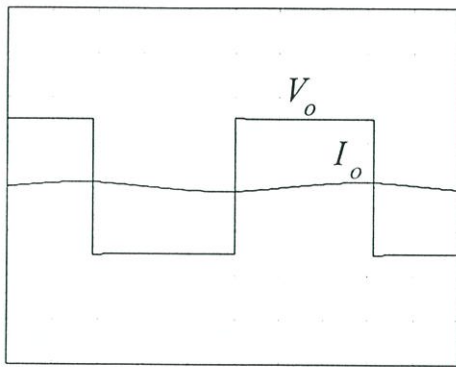


b) ลักษณะสเปกตรัมของแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

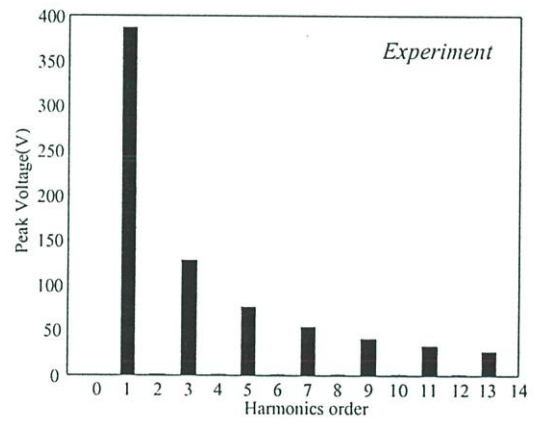
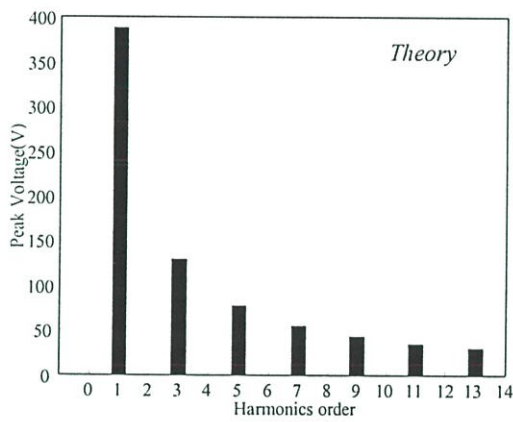


c) ลักษณะสเปกตรัมของกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

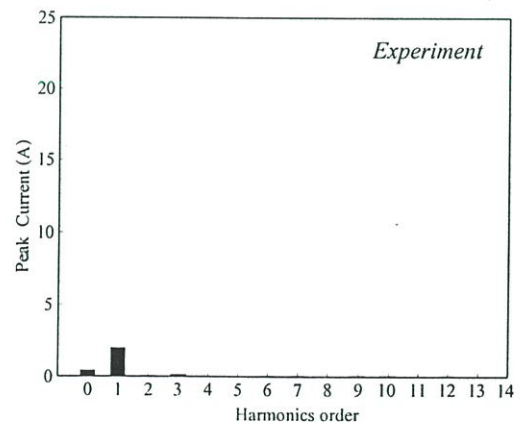
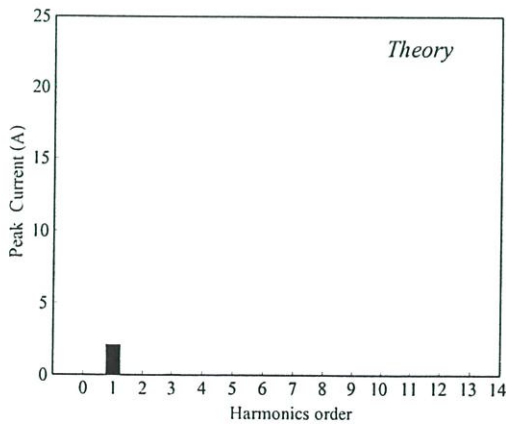
รูปที่ 7.8 ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลองเมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่สวิทซ์ 75 kHz



a) ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



b) ลักษณะสเปกตรัมของแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



c) ลักษณะสเปกตรัมของกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

รูปที่ 7.9 ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลองเมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่สวิตช์ 80 kHz

จากรูปที่ 7.7 – 7.9 แสดงลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีโดยการซิมูเลตและจากการทดลอง เมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่สวิตซ์ 70 kHz 75 kHz และ 80 kHz ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์จะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน และเมื่อนำมาคำนวณและเขียนสรุปค่าแรงดัน V_o (RMS.) กระแส I_o (RMS.) ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า $\cos\phi$ และกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต P_o เมื่อมีการปรับความถี่ต่างๆกันสามารถแสดงได้ดังในตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 ค่าแรงดัน V_o (RMS.) กระแส I_o (RMS.) ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า $\cos\phi$ และกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต P_o ทางด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 70 kHz 75 kHz และ 80 kHz (จากการทดลอง)

ความถี่ : f (kHz)	แรงดันเอาต์พุต V_o (RMS.) (Volts)	กระแสเอาต์พุต I_o (RMS.) (Amps)	ตัวประกอบกำลัง (Power Factor)	กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต P_o (Watts)
70	280	15	0.786	3,300
75	310	2.74	0.10	80
80	312	1.56	0.05	20

จากตารางที่ 7.1 จะเห็นว่าเมื่อมีการปรับความถี่สวิตซ์ให้มามีค่าสูงกว่าความถี่เรโซแนนท์มากขึ้น กระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์และค่าตัวประกอบกำลังจะมีค่าลดลงตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์มีค่าลดลงตาม นั่นคือเมื่อความถี่สวิตซ์มีค่ายิ่งสูงขึ้นเท่าใดกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ก็จะยิ่งมีค่าลดลงตาม

7.5 สรุป

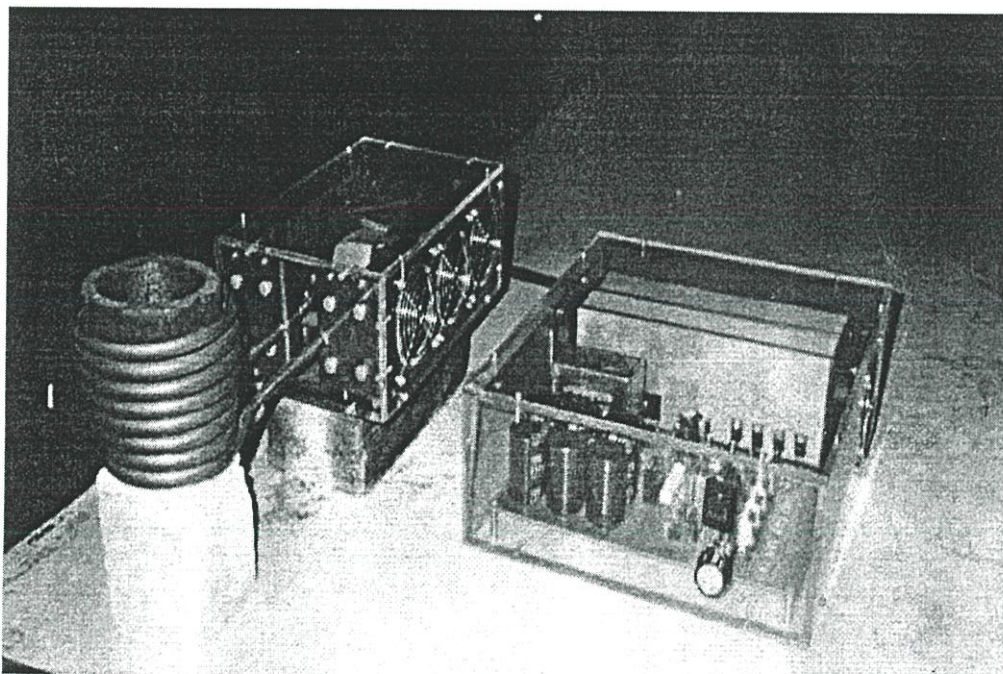
ในกาวิเคราะห์หลักการทํางานของวงจรมอเตอร์แบบเรโซแนนท์อนุกรมโดยวิธีการปรับควบคุมกำลังไฟฟ้ด้วยความถี่ FC ที่ใช้ในเครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำความถี่สูง ซึ่งจะเป็นหลักการควบคุมกำลังไฟฟ้าอีกวิธีหนึ่งนั้นสามารถใช้วิธีการวิเคราะห์ในลักษณะเดียวกับที่ใช้ในการวิเคราะห์หลักการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยวิธีการปรับลดจำนวนพัลส์ PDM ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทก่อนหน้านี้ และเพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องก็ได้มีการเปรียบเทียบผลทั้งที่ได้ทั้งจากทางทฤษฎีและการทดลองปรากฏว่าให้ผลที่สอดคล้องกัน โดยเมื่อปรับความถี่สวิตซ์ให้มามีค่าสูงกว่าความถี่เรโซแนนท์มากขึ้น กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการหลอมโลหะจะลดต่ำลงเช่นที่ ความถี่ 70 kHz จะได้กำลังไฟฟ้าประมาณ 3,300 วัตต์ ขณะที่ความถี่ 80 kHz จะได้กำลังไฟฟ้าประมาณ 20 วัตต์

บทที่ 8

การทดสอบเครื่องหลอมโลหะเหนียวนำความถี่สูง

8.1 บทนำ

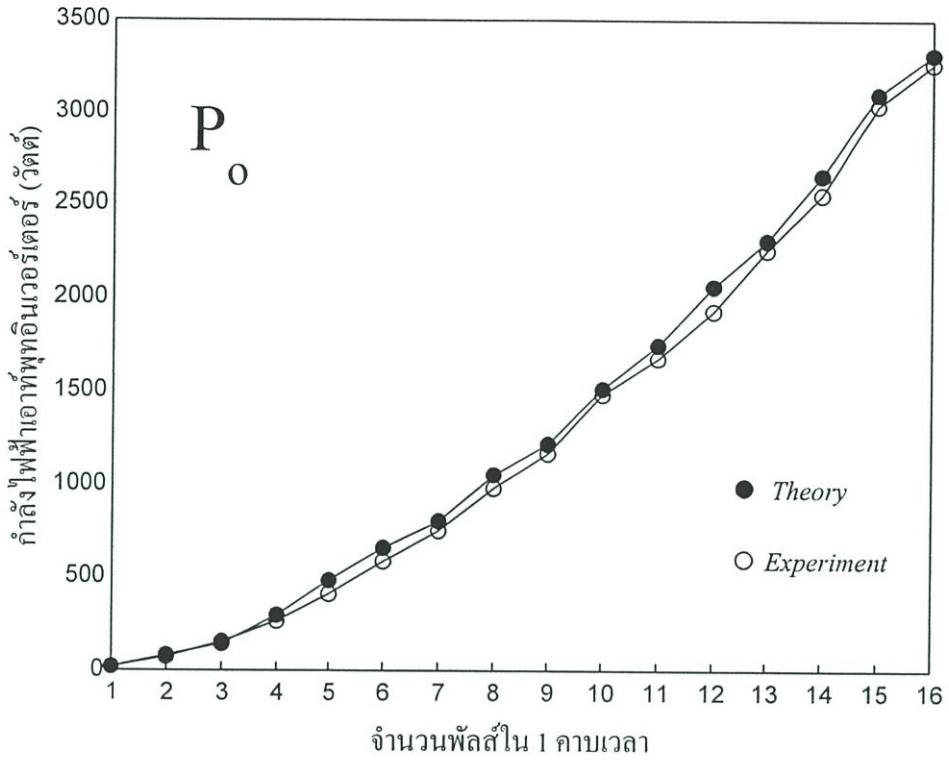
ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบเครื่องหลอมโลหะเหนียวนำความถี่สูง ซึ่งจะประกอบด้วย การทดสอบเครื่องหลอมโลหะเหนียวนำความถี่สูงในกรณีที่มีการควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการปรับจำนวนพัลส์ PDM และกรณีที่มีการควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการปรับความถี่ FC โดยในแต่ละวิธีจะมีการทดสอบการปรับกำลังไฟฟ้าที่ระดับต่างๆกันเพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของ กระแสไหลด กำลังไฟฟ้า ประสิทธิภาพ และเวลาที่ใช้ในการหลอมโลหะ ตลอดจนการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการปรับกำลังไฟฟ้าทั้ง 2 วิธี ในเงื่อนไขกำลังไฟฟ้าอินพุทเท่ากัน



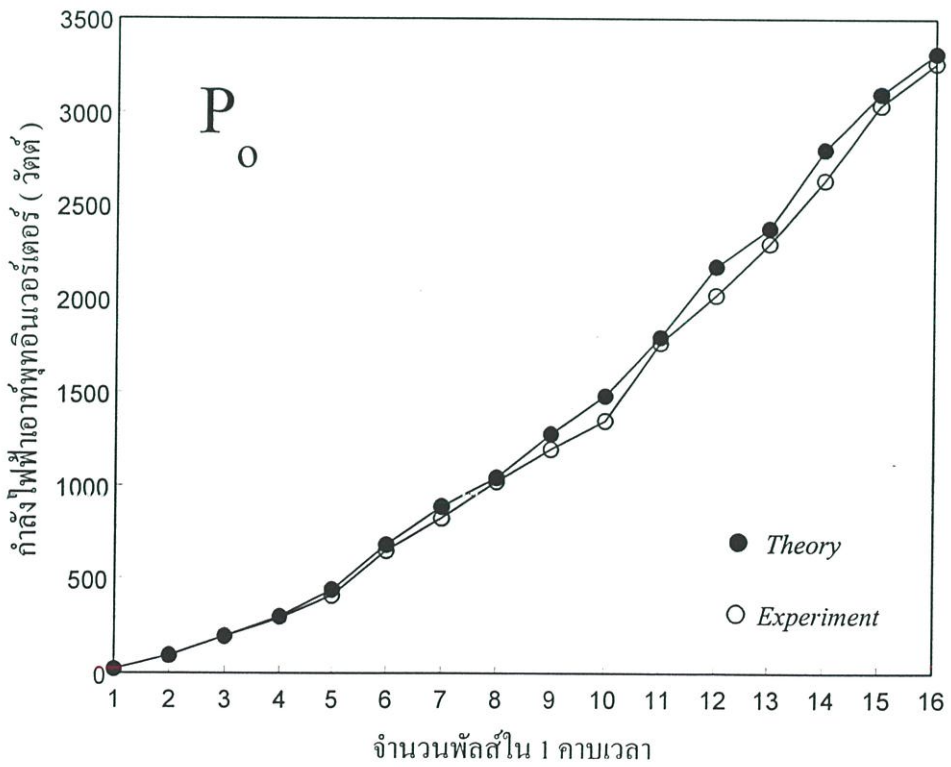
รูปที่ 8.1 เครื่องหลอมโลหะเหนียวนำดันแบบที่ใช้ในการทดสอบ

8.2 การทดสอบเครื่องหลอมโลหะเหนียวนำที่มีการควบคุมด้วยวิธีการปรับจำนวนพัลส์ PDM

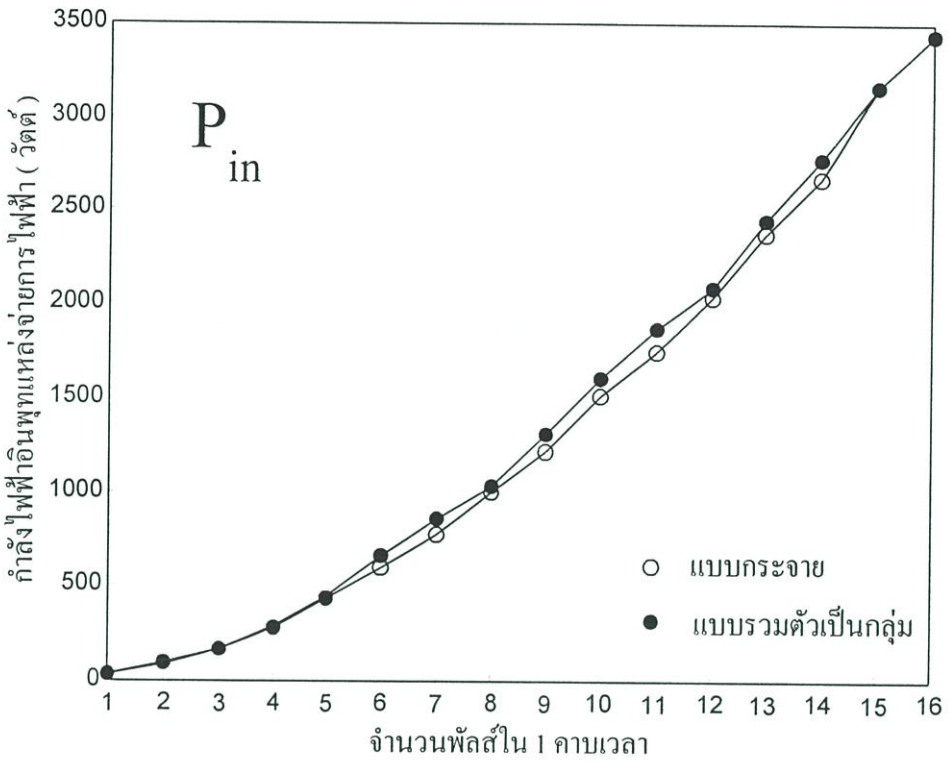
ในการทดสอบเครื่องหลอมโลหะเหนียวนำที่มีการควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วย วิธีการปรับจำนวนพัลส์ PDM ทั้งแบบกระจาย และแบบรวมเป็นกลุ่มนั้น จะทำการทดสอบทั้งทางด้านอินพุทแหล่งจ่ายการไฟฟ้าและ ทางด้านเอาต์พุทอินเวอร์เตอร์ เมื่อมีการปรับจำนวนพัลส์ตั้งแต่ $1/16$, $2/16$, $3/16$, , $16/16$ โดยอินเวอร์เตอร์มีการทำงานที่ความถี่สวิตซ์สูงกว่าความถี่ไซน์แกนที่ที่



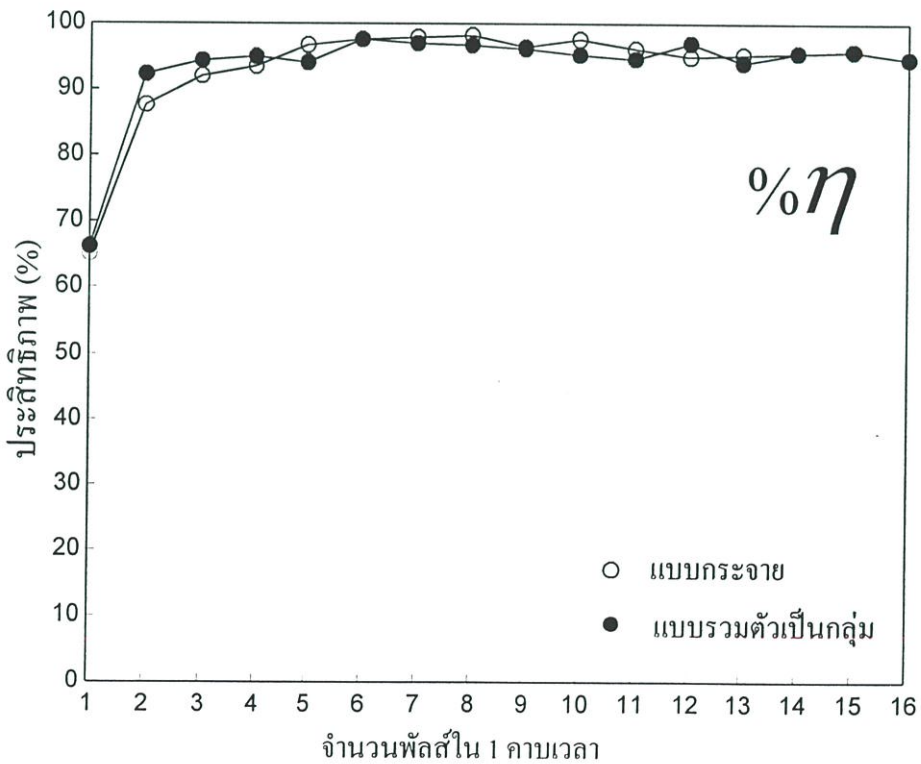
รูปที่ 8.2 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ขณะปรับฟัลส์แบบกระจาย



รูปที่ 8.3 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ขณะปรับฟัลส์แบบรวมเป็นกลุ่ม



รูปที่ 8.4 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าอินพุตด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้าขณะปรับพัลส์ในกรณีของ PDM แบบกระจายและแบบรวมกลุ่ม

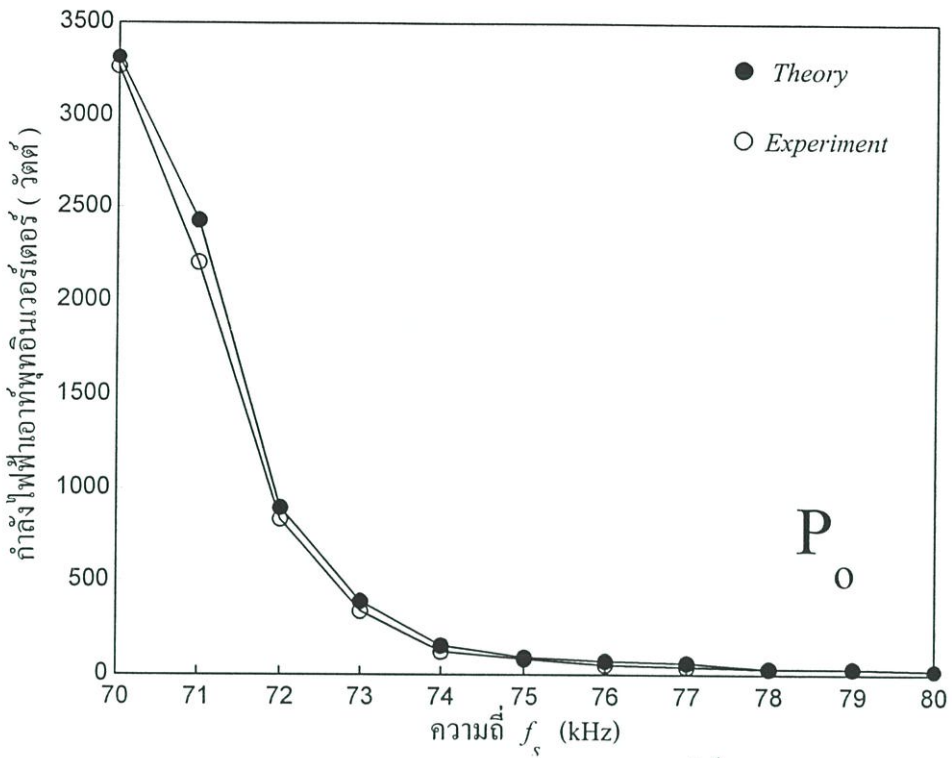


รูปที่ 8.5 ประสิทธิภาพเร็กติไฟเออร์ - อินเวอร์เตอร์ขณะปรับพัลส์ในกรณี PDM แบบกระจาย และแบบรวมกลุ่ม

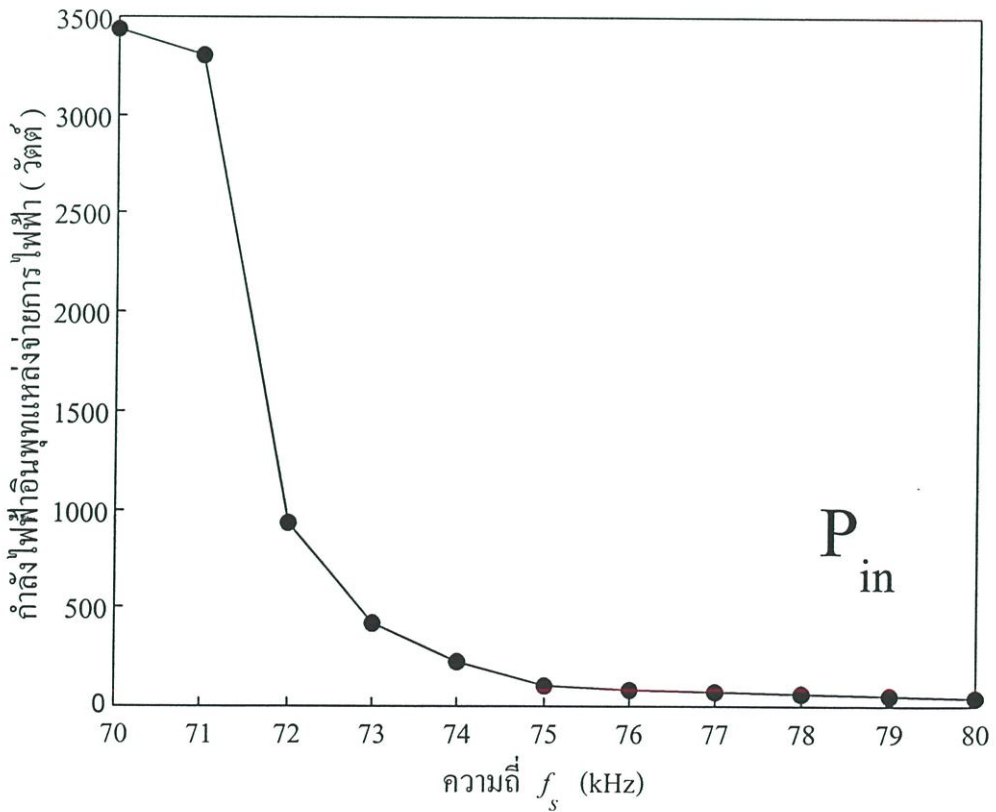
70 kHz คงที่ตลอดย่านการปรับจำนวนพัลส์ และมีโหลดชิ้นงานเป็นอลูมิเนียมน้ำหนัก 100 กรัม ซึ่งผลการทดสอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8.2 – 8.5 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าการควบคุมด้วยวิธีการปรับจำนวนพัลส์ PDM ทั้ง 2 แบบ นั้นสามารถปรับกำลังไฟฟ้าได้ 16 ระดับ และสามารถควบคุมได้เป็นอย่างดี โดยในรูปที่ 8.2 และ 8.3 แสดงกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์เมื่อมีการปรับจำนวนพัลส์ในแบบกระจายและแบบรวมกลุ่มตามลำดับ ซึ่งสามารถปรับได้ตั้งแต่ 33 วัตต์ ที่พัลส์ 1/16 จนถึง 3,300 วัตต์ ที่พัลส์ 16/16 โดยกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากการปรับพัลส์ทั้ง 2 แบบนั้น จะให้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตที่ใกล้เคียงกันเมื่อมีการปรับที่จำนวนพัลส์เดียวกัน และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการซิมูเลตจะเห็นได้ว่าผลที่ได้มีค่าที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองทั้ง 2 แบบ และเมื่อทำการทดสอบกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตแหล่งจ่ายการไฟฟ้าจะได้กำลังไฟฟ้าอินพุตต่ำสุด 50 วัตต์ ที่พัลส์ 1/16 และกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุด 3,400 วัตต์ ที่พัลส์ 16/16 ดังแสดงในรูปที่ 8.4 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าอินพุตแหล่งจ่ายการไฟฟ้าในแบบกระจายและแบบรวมกลุ่ม โดยจะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าอินพุตที่มีการปรับจำนวนพัลส์เดียวกันจะให้กำลังไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกัน สำหรับรูปที่ 8.5 แสดงประสิทธิภาพเรกติไฟเออร์ - อินเวอร์เตอร์ขณะปรับพัลส์ในกรณี PDM แบบกระจายและแบบรวมกลุ่ม โดยจะให้ประสิทธิภาพที่ประมาณ 97-98 %

8.3 การทดสอบเครื่องหลอมโลหะเหนียวนำที่มีการควบคุมด้วยวิธีการปรับความถี่ FC

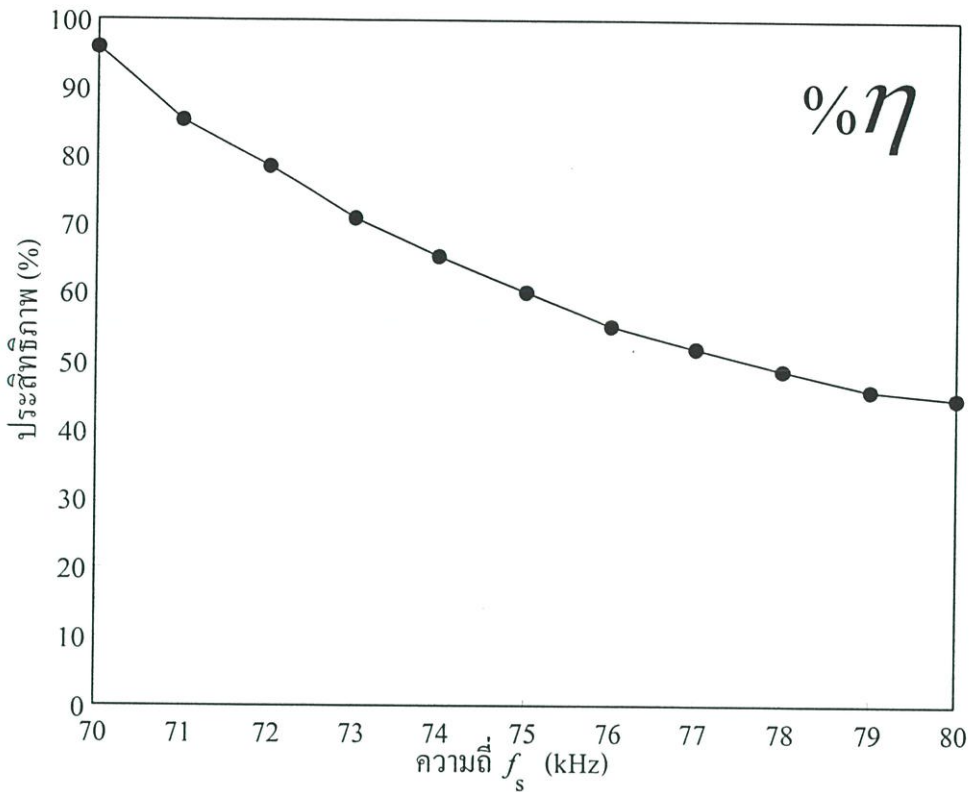
ในการทดสอบเครื่องหลอมโลหะเหนียวนำที่มีการควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับความถี่ จะทดสอบเช่นเดียวกับในกรณีปรับจำนวนพัลส์ โดยจะทำการปรับความถี่ในช่วง 70 – 80 kHz เพื่อทำการปรับกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ที่จ่ายให้กับโหลด ซึ่งจากการทดสอบสามารถปรับกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตได้ตั้งแต่ 22 วัตต์ ที่ 80 kHz จนถึง 3,300 วัตต์ ที่ 70 kHz ดังแสดงในรูปที่ 8.6 และจะเห็นได้อีกว่าการลดลงของกำลังไฟฟ้าเป็นไปอย่างรวดเร็วในช่วงความถี่ 70 – 72 kHz ซึ่งเป็นผลมาจากค่าของ Q ในระบบที่มีค่าค่อนข้างสูงดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 และยังสามารถแสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองและจากการซิมูเลตซึ่งผลที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อทำการทดสอบกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตแหล่งจ่ายการไฟฟ้าซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 8.7 จะได้กำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตต่ำสุด 37 วัตต์ ที่ความถี่ 80 kHz และที่กำลังไฟฟ้าอินพุตสูงสุด 3,400 วัตต์ ที่ความถี่ 70 kHz สำหรับในรูปที่ 8.7 แสดงประสิทธิภาพเรกติไฟเออร์ - อินเวอร์เตอร์ขณะปรับความถี่ในช่วง 70 – 80 kHz จะเห็นได้ว่ายิ่งความถี่มีค่าสูงขึ้นประสิทธิภาพจะยิ่งมีค่าลดลงตามลำดับ



รูปที่ 8.6 กำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ในกรณีปรับความถี่ตั้งแต่ 70-80 kHz



รูปที่ 8.7 กำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้าในกรณีปรับความถี่ตั้งแต่ 70-80 kHz



รูปที่ 8.8 ประสิทธิภาพเรกติไฟเออร์ - อินเวอร์เตอร์ในกรณีปรับความถี่ตั้งแต่ 70-80 kHz

จากการทดสอบเครื่องหลอมโลหะเหนียวนำความถี่สูงที่มีการควบคุมทั้งแบบปรับ PDM และแบบปรับความถี่ FC สามารถสรุปคุณสมบัติทางไฟฟ้าจากการควบคุมทั้ง 2 แบบ ได้ดังตารางที่ 8.1 และ 8.2 โดยในตารางที่ 8.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขกำลังไฟฟ้าอินพุทแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 3,300 วัตต์ โดยในการควบคุมด้วยวิธี PDM จะตรงกับกรณี 15/16 พัลส์ ในขณะที่การควบคุมด้วยความถี่จะทำงานที่ 71 kHz และในตารางที่ 8.2 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขกำลังไฟฟ้าอินพุทแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 100 วัตต์ โดยในการควบคุมด้วยวิธี PDM จะตรงกับกรณี 2/16 พัลส์ ในขณะที่การควบคุมด้วยความถี่จะทำงานที่ 75 kHz ซึ่งจากตารางทั้ง 2 จะเห็นได้ว่าในกรณีของ PDM จะให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่าในกรณี ปรับความถี่ อีกทั้งยังมีการทำงานที่ความถี่สวิตช์ที่ต่ำกว่าเมื่อมีการปรับลดกำลังไฟฟาลง ซึ่งส่งผลให้การสูญเสียจากการสวิตช์มีค่าที่ต่ำกว่าในกรณีปรับความถี่ แต่ในขณะเดียวกันในการปรับกำลังไฟฟ้าในกรณีควบคุมด้วยความถี่จะสามารถปรับได้ละเอียดและต่อเนื่องกว่าในกรณีการปรับแบบ PDM ซึ่งจะทำการปรับได้เป็นช่วงๆ เท่านั้น สำหรับตารางที่ 8.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทางไฟฟ้าเมื่อโลหะขึ้นงานต่างชนิดกันซึ่งประกอบด้วย เงิน อลูมิเนียม และตะกั่ว ซึ่งจากการทดสอบภายใต้เงื่อนไขกระแสเอาต์พุต i_o เดียวกันคือ 15 A จะเห็นได้ว่าเมื่อขึ้นงานเป็นโลหะต่างชนิดกันจะมีผลต่อความถี่ที่การทำงานของอินเวอร์เตอร์ มุมต่างเฟสระหว่างแรงดันและกระแสเอาต์พุต ตลอดจนกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต ซึ่งเป็นผลมาจากคุณสมบัติทางไฟฟ้าในโลหะ

ตารางที่ 8.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าจากการควบคุมแบบ PDM และ FC ภายใต้เงื่อนไขกำลังไฟฟ้าอินพุทแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 3,300 วัตต์ และที่ PDM 15/16 พัลส์

รายละเอียด	PDM		FC
	แบบกระจาย	แบบรวมกลุ่ม	
ช่วงการปรับ	ปรับได้เป็นช่วง	ปรับได้เป็นช่วง	ปรับละเอียดได้ต่อเนื่อง
Switching Frequency	คงที่ที่ 70 kHz	คงที่ที่ 70 kHz	ที่ 71 kHz
THD _{v_o}	56.5727 %	56.5727 %	49.0569 %
THD _{i_o}	2.9044 %	2.9044 %	5.4069 %
PF _o	0.74527	0.74527	0.6167
P _o	3,047.778 W	3,047.778 W	2,410.342 W
THD _{v_i}	2.158 %	2.158 %	1.6875 %
THD _{i_i}	109.316 %	109.316 %	141.41 %
PF _i	0.6644	0.6644	0.667
η (Rectifier-Inverter)	90.385 %	90.385 %	78.45 %

ตารางที่ 8.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าจากการควบคุมแบบ PDM และ FC ภายใต้เงื่อนไขกำลังไฟฟ้าอินพุทแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 100 วัตต์ และที่ PDM 2/16 พัลส์

รายละเอียด	PDM		FC
	แบบกระจาย	แบบรวมกลุ่ม	
ช่วงการปรับ	ปรับได้เป็นช่วง	ปรับได้เป็นช่วง	ปรับละเอียดได้ต่อเนื่อง
Switching Frequency	คงที่ที่ 70 kHz	คงที่ที่ 70 kHz	ที่ 75 kHz
THD _{v_o}	2.9904 %	2.9496 %	46.9401 %
THD _{i_o}	15.4309 %	26.569 %	8.0644 %
PF _o	0.2922	0.318	0.0941
P _o	85.2 W	87.719 W	80.075 W
THD _{v_i}	0.909 %	1.4 %	0.896 %
THD _{i_i}	184.472 %	209.956 %	205.638 %
PF _i	0.472	0.429	0.433
η (Rectifier-Inverter)	85.2 %	87.72 %	80.08 %

ตารางที่ 8.3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทางไฟฟ้าเมื่อโลหะขึ้นงานต่างชนิดกัน

ชนิดโลหะ (100 g.)	แรงดัน เอาต์พุท อินเวอร์เตอร์ V_O RMS.[V]	กระแส เอาต์พุท อินเวอร์เตอร์ I_O RMS.[A]	ความถี่ อินเวอร์ เตอร์ f_S [kHz]	มุมต่าง เฟส θ	กำลังไฟฟ้า เอาต์พุท P_O [W]	เวลา หลอม ละลาย t [min]
เงิน	280	15.5	68	39.57°	2,940	18
อลูมิเนียม	280	15.4	70	32.8°	3,240	4
ตะกั่ว	280	15.3	68	36°	3,110	< 0.15

แต่ละชนิดที่แตกต่างกันที่แตกต่างกันดังที่ได้แสดงไว้แล้วในบทที่ 2 ตารางที่ 2.1 ดังนั้นในการใช้งานจริงสำหรับเครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำความถี่สูงที่มีการควบคุมด้วยวิธี PDM จะไม่สามารถหลอมละลายโลหะต่างชนิดกันได้เนื่องจากมีการทำงานที่ความถี่คงที่ ซึ่งต่างจากในกรณีของวิธีการปรับความถี่ที่สามารถทำการปรับความถี่เพื่อให้เหมาะสมกับโลหะชนิดนั้นๆ แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือ เมื่อมีการปรับลดกำลังไฟฟ้าเอาต์พุทอินเวอร์เตอร์ลงประสิทธิภาพของเครื่องจะมีค่าต่ำลง

8.4 สรุป

จากการทดสอบเครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำความถี่สูงที่มีการควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการปรับจำนวนพัลส์ PDM และการปรับความถี่ FC สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) เมื่อมีการปรับกำลังไฟฟ้าลดลงในกรณีของการควบคุมด้วยวิธี PDM จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าในกรณีการปรับด้วยความถี่ตลอดย่านการปรับกำลังไฟฟ้า
- 2) ในกรณีของการปรับกำลังไฟฟ้าด้วยวิธี PDM จะไม่สามารถปรับได้ละเอียดซึ่งต่างจากในกรณีของการปรับด้วยความถี่ซึ่งสามารถปรับกำลังไฟฟ้าได้ละเอียดและต่อเนื่อง
- 3) ในวิธี PDM จะไม่สามารถหลอมโลหะที่ต่างชนิดกันได้ซึ่งต่างจากในกรณีของการปรับความถี่ซึ่งจะมีความสามารถหลอมโลหะได้หลายชนิด เนื่องจากสามารถปรับความถี่ให้เหมาะสมกับโลหะชนิดนั้นๆ ได้

บทที่ 9

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากผลการคำนวณวิเคราะห์และทดลองเกี่ยวกับอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันความถี่สูงเพื่อใช้ในการหลอมโลหะสามารถสรุปประเด็นสำคัญต่างๆ ได้ดังนี้

1) สามารถเข้าใจหลักการคำนวณค่าความต้านทานสมมูลและค่าความเหนี่ยวนำสมมูลเพื่อใช้เป็นพื้นฐานในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจร เช่น สเปกตรัมแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์ความถี่สูงได้

2) สามารถเข้าใจหลักการทำงานของวงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์ความถี่สูงสำหรับกรณีที่มีการทำงานของวงจรในรูปแบบพัลส์ PDM ที่มีรูปแบบต่างกัน 2 ลักษณะกล่าวคือลักษณะพัลส์ PDM รูปแบบการกระจาย และ รูปแบบการรวมตัวเป็นกลุ่ม และกรณีที่มีการทำงานโดยการปรับความถี่ได้เป็นอย่างดีโดยได้นำผลที่ได้จากการคำนวณวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองเพื่อเป็นการยืนยันความเข้าใจของการทำงานของวงจรได้อย่างถูกต้อง

3) สามารถคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์ความถี่สูงรวมทั้งค่าประสิทธิภาพของวงจรอินเวอร์เตอร์นี้ โดยได้นำผลการคำนวณเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองซึ่งปรากฏว่าได้ค่าใกล้เคียงกัน โดยที่ประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ในเกณฑ์ประมาณ 98 % ที่กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตขณะหลอมละลายประมาณ 3.3 kW และสามารถหลอมละลายวัสดุอลูมิเนียมขนาดน้ำหนัก 100 กรัมได้ภายในเวลา 4 นาที

4) ในการทดสอบเครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำความถี่สูงที่มีการควบคุมด้วยวิธีปรับจำนวนพัลส์ PDM และการปรับด้วยความถี่ FC จะเห็นได้ว่าในแต่ละวิธีจะมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 8 ดังนั้นเพื่อให้เครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำความถี่สูงนี้มีการทำงานที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดจึงควรนำการควบคุมทั้ง 2 วิธีมาประยุกต์ใช้ร่วมกัน

5) เนื่องจากงานวิจัยนี้วิเคราะห์แต่ทางด้านภาคเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เท่านั้น โดยไม่ได้คำนึงถึงผลทางด้านภาคอินพุตเรกติไฟเออร์ ซึ่งจากการทดสอบจะเห็นได้ว่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ทางด้านอินพุตมีค่าที่ต่ำมากรวมทั้งกระแสไฟฟ้าด้านอินพุตเรกติไฟเออร์จะมีค่าฮาร์โมนิกส์ที่สูง ซึ่งส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าโดยรวม ดังนั้นปัญหานี้จึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจในการพิจารณาว่าจะทำอย่างไรในการแก้ไขปรับปรุงเพาเวอร์แฟกเตอร์ตลอดจนฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบต่อไป

บรรณานุกรม

- [1] J. Davies and P. Simpson. **Induction Heating Handbook**. Mcgraw-Hill:London, 1979.
- [2] M.K.Kazimierczuk , D.Czarkowski. **Resonant Power Converters**. , John Wiley & Sons,Inc.1995.
- [3]. H. Fujita , H. Akagi “ Pulse-Density-Modulated Power Control of a 4 kW , 450 kHz Voltage-Source Inverter for Induction Melting Applications ” IEEE Trans. On Industry Applications, Vol. 32, No. 2 , 1996. pp. 279-286.
- [4] อานัต ถึงสาคร และ วิริยะ พิเชฐจำเริญ “ การวิเคราะห์เครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำความถี่สูงโดยอาศัยหลักการควบคุมจำนวนพัลส์ ” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 25 (EECON-25) คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 21-22 พฤศจิกายน 2545.
- [5] D.W. Hart. **Introduction to Power Electronic**. Prentic – Hall , 1997.
- [6] P.Viriya, S.Sittichok and K.Matsuse “Analylysis of High Frequency Induction Cooker with Variable Frequency Power Control” PCC-OSAKA Conf.Rec.,2002,pp.1502-1507.
- [7] I. Khan , J. Tapson and I. de Vries “Automatic Frequency Control of an Induction Furnace” 1999 IEEE AFRICON-5th AFRICON CONFERENCE IN AFRICA ,Vol.2 , pp. 913 -916.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

ผลงานเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์ที่ได้รับการตีพิมพ์

1. อาณัติ ถึงสาคร และ วิริยะ พิเชฐจำเริญ “ การวิเคราะห์เครื่องหลอมโลหะเหนียวนำความถี่สูงโดยอาศัยหลักการควบคุมจำนวนพัลส์ ” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 25 (EECON-25) คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 21-22 พฤศจิกายน 2545.

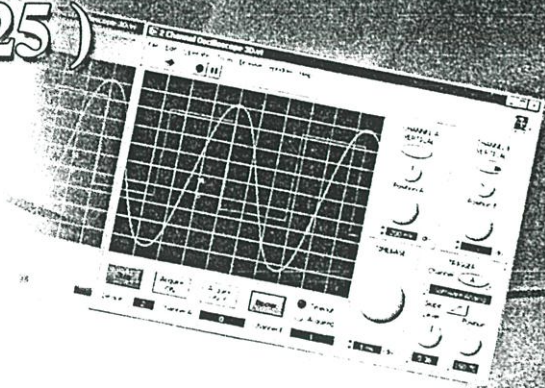
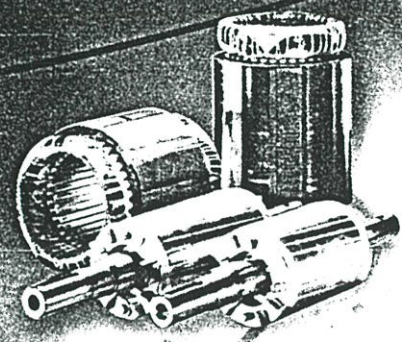


การประชุมวิชาการ ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 25



25th Electrical Engineering Conference

(EECON - 25)



21-22 พฤศจิกายน 2545

ณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Volume II

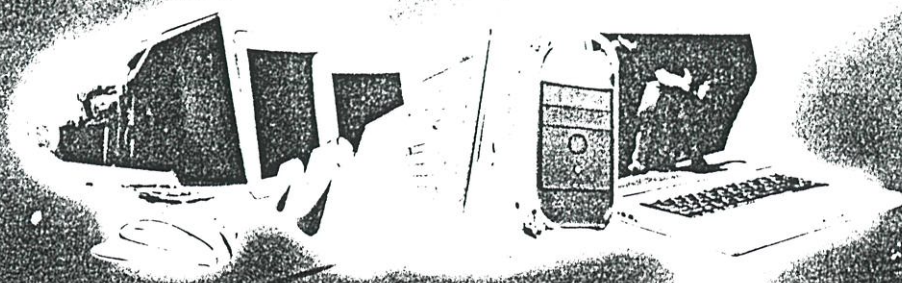
สาขาบทความ

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)

ดำเนินการจัดการประชุมโดย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การวิเคราะห์เครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำความถี่สูงโดยอาศัยหลักการควบคุมจำนวนพัลส์

Analysis of High Frequency Induction Melter Using Pulse Density Modulation

อาณัติ ถึงสารกร วิริยะ พิเชฐจำริญ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

โทร (02)7373000Ext.3516 โทรสาร (02)3269902 E-mail:kpviriya@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

ในบทความวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจร series resonant inverter สำหรับงานหลอมโลหะด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง โดยใช้หลักการปรับลดจำนวนพัลส์ในช่วงเวลา 1 คาบของความถี่เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ด้วยจำนวน 16,15,.....1,0 ซึ่งตรงกับค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุดของอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 4 kW ที่สามารถปรับลดระดับลงจนเป็น 0 ที่ความถี่สวิตช์คงที่ที่ 70 kHz การวิเคราะห์วงจรจะเริ่มจากการจำลอง คลื่นแรงดันและกระแสในวงจรเครื่องหลอมโลหะดังกล่าวด้วย MATLAB และผลที่ได้นี้ยังได้มีการยืนยันความถูกต้องอีกครั้งด้วยผลการทดลองจริง ทั้งนี้เพื่อให้สามารถเข้าใจหลักการทำงานของวงจรได้อย่างถูกต้อง ผลการคำนวณในทางทฤษฎีสามารถนำไปสู่การคำนวณหาค่าตัวแปรที่สำคัญอื่นๆของวงจรต่อไป เช่น กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต และประสิทธิภาพของการแปลงไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าเหล่านี้กับผลการทดลองอีกครั้งก็จะปรากฏว่ามีค่าใกล้เคียงกันมาก

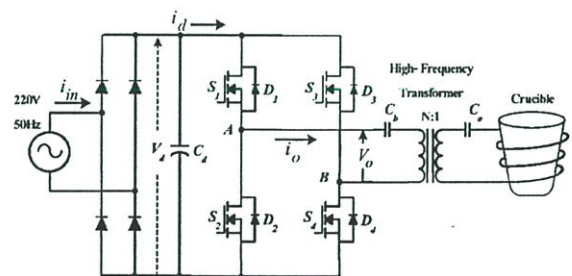
Abstract

In this paper . the method of output power control of series resonant inverter for high-frequency induction melter is proposed , using the principle of pulse density modulation (PDM) with the number of cycle per one period of inverter output frequency equal to 16, 15, ..., 1, 0 which corresponds to its Max. output power of 4kW decreasing to zero at a constant switching frequency of 70kHz. The circuit analysis starts with the MATLAB simulation of voltage and current waveforms in the melter circuit which is also verified by experiment in order to confirm the correct understanding of circuit operation. All these verified results can further lead to the calculation of important circuit parameters such as output power and conversion efficiency , etc. Again, these theoretical results when compared with the experimental ones appear to be very close to each other.

Keywords : Melter , Pulse Density Modulation , HF-Resonant

1. บทนำ

การปรับกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงเพื่อขับโหลด series resonant นั้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่น โดยวิธีปรับความถี่สวิตช์ ของอินเวอร์เตอร์หรือ โดยวิธีปรับมุมเลื่อนเฟส ของคลื่นแรงดัน square ของเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ โดยการเลื่อน signal กิ่งใดกิ่งหนึ่งในจำนวน 2 กิ่งของวงจร Bridge 1 phase ให้ เลื่อนซ้อนทับกับsignal ของกิ่งที่เหลือเป็นต้น ซึ่งหลักการทั้งสองนี้ได้นำเสนอไว้แล้วใน [1] และ [2] ตามลำดับ ในบทความวิจัยนี้จะเป็นการนำเสนอหลักการควบคุมกำลังไฟฟ้าในอีกลักษณะหนึ่งที่ต่างจากหลักการดังกล่าวโดยจะเป็นหลักการควบคุมเพื่อปรับลดกำลังไฟฟ้าด้วยการลดจำนวน cycle ของคลื่น square ของแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ โดยจะลดจากจำนวน cycle สูงสุดเท่ากับ 16 cycle/period ให้เหลือ 15,14,13,..... เช่นนี้เรื่อยไปจนเป็น 1 และ 0 cycle ในที่สุดซึ่งหลักการปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าในลักษณะดังกล่าวที่นำเสนอในบทความวิจัยนี้จะใช้กับโหลดประเภทเข้าหลอมโลหะ ที่มีภาระเหนี่ยวนำที่ตัวชิ้นงานที่จะหลอมด้วยความถี่สูงในระดับ 70 kHz ดังแสดงด้วยวงจรในรูปที่ 1 โดยจะทำการวิเคราะห์โดยละเอียดเพื่อให้เข้าใจ



รูปที่ 1 วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในเครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำความถี่สูง

ใจอย่างถ่องแท้ถึงหลักการทำงานของวงจร โดยอาศัย การคำนวณทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการ simulate ด้วยโปรแกรม MATLAB ควบคู่กับการยืนยันเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากนั้นจะเป็นการพิจารณาลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่จำนวน cycle ต่างๆในช่วง 1 period จากสูงสุดไปจนต่ำสุดซึ่งผลที่ได้นี้สามารถนำไปคำนวณหาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตเพื่อเปรียบเทียบกับ

กำลังไฟฟ้าอินพุทซึ่งจะเป็นค่าประสิทธิภาพของการแปลงกำลังไฟฟ้าได้ในที่สุดและทุกขั้นตอนของการคำนวณวิเคราะห์นี้จะมีกรีนอินตันความถูกต้องด้วยผลการทดลองจริงจากเครื่องต้นแบบที่ได้สร้างขึ้นด้วยขนาด 4kW ความถี่ 70kHz ดังแสดงในรูปที่ 7 และสามารถหาลอมโลหะได้ตามข้อมูลที่ไดจากการหาลอมจริงซึ่งแสดงในรูปที่ 6(c)

2. หลักการทำงานของวงจร

จากรูปที่ 1 ซึ่งเป็นวงจร Full Bridge Inverter ที่ใช้ในเครื่องหาลอมโลหะเหนี่ยวนำความถี่สูง แรงดันไฟสลับ 220V 50 Hz จะถูกแปลงเป็นแรงดันไฟตรงด้วย วงจรฟูลบริดจ์เรียกไฟเออร์เพื่อจ่ายให้กับวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะทำหน้าที่แปลงเป็นแรงดันไฟสลับความถี่สูงต่อไปโดยมี MOSFET S_1, S_2, S_3, S_4 และฟริววิลลิ่งไดโอด D_1, D_2, D_3, D_4 ต่อขนานกันตามลำดับภายใน MOSFET ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ สำหรับโหลดทางด้านเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์จะพิจารณาจากด้าน primary ของหม้อแปลงความถี่สูงซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของวงจรอนุกรมเทียบเท่า RLC ดังนั้นจะได้สมการแรงดัน และกระแสเอาท์พุทอินเวอร์เตอร์ดังนี้

$$v_R(t) + v_L(t) + v_C(t) = V_o \tag{1}$$

$$Ri_o(t) + L \frac{di_o(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int i_o(t) dt = V_o \tag{2}$$

$$i_o(t) = e^{-mt} \left[\left(\frac{V_o - V_{C1} - LmI_{o1}}{nL} \right) \sin nt + I_{o1} \cos nt \right] \tag{3}$$

$$v_C(t) = \frac{1}{C(m^2 + n^2)} \left\{ \left(\frac{V_o - V_{C1} - LmI_{o1}}{nL} \right) \left[e^{-mt} (-m \sin nt - n \cos nt) + n \right] + I_{o1} \left[e^{-mt} (-m \cos nt + n \sin nt) + m \right] \right\} + V_{C1} \tag{4}$$

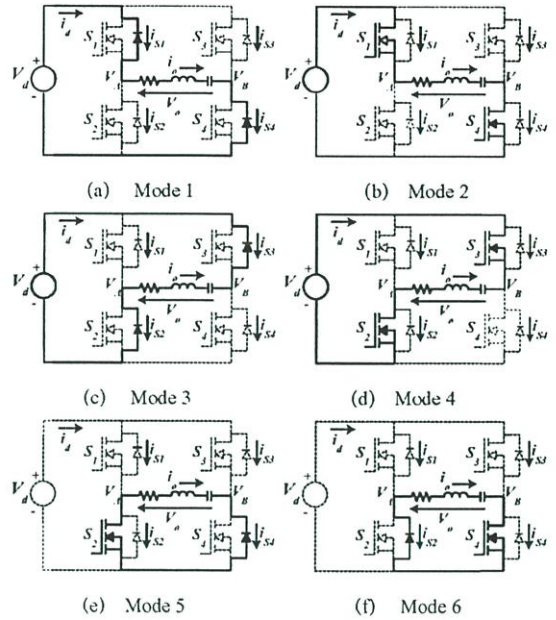
$$v_R(t) = R \cdot e^{-mt} \left[\left(\frac{V_o - V_{C1} - LmI_{o1}}{nL} \right) \sin nt + I_{o1} \cos nt \right] \tag{5}$$

$$v_L(t) = L e^{-mt} \left[\left(\frac{V_o - V_{C1} - LmI_{o1}}{nL} \right) (n \cos nt - m \sin nt) - I_{o1} (n \sin nt + m \cos nt) \right] \tag{6}$$

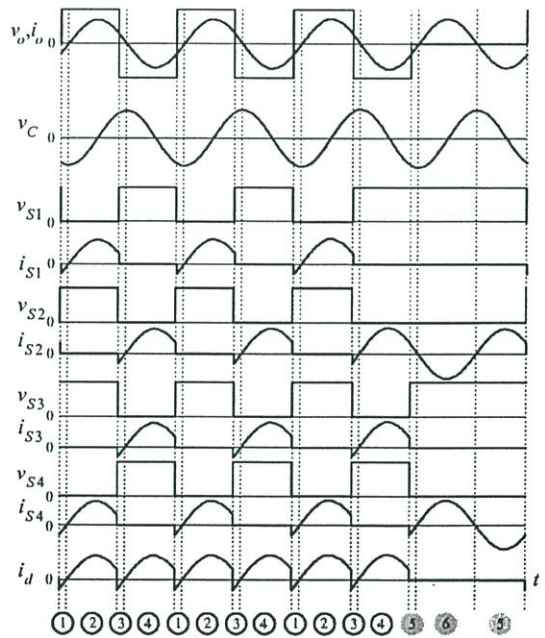
$$v_{RL}(t) = v_R(t) + v_L(t) \tag{7}$$

เมื่อ $V_o = \pm V_d, 0 : m = \frac{R}{2L} ; n = \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}$

V_{C1}, I_{o1} = ค่า แรงดันและกระแสเริ่มต้นที่ ตกคร่อม C และไหลผ่าน L



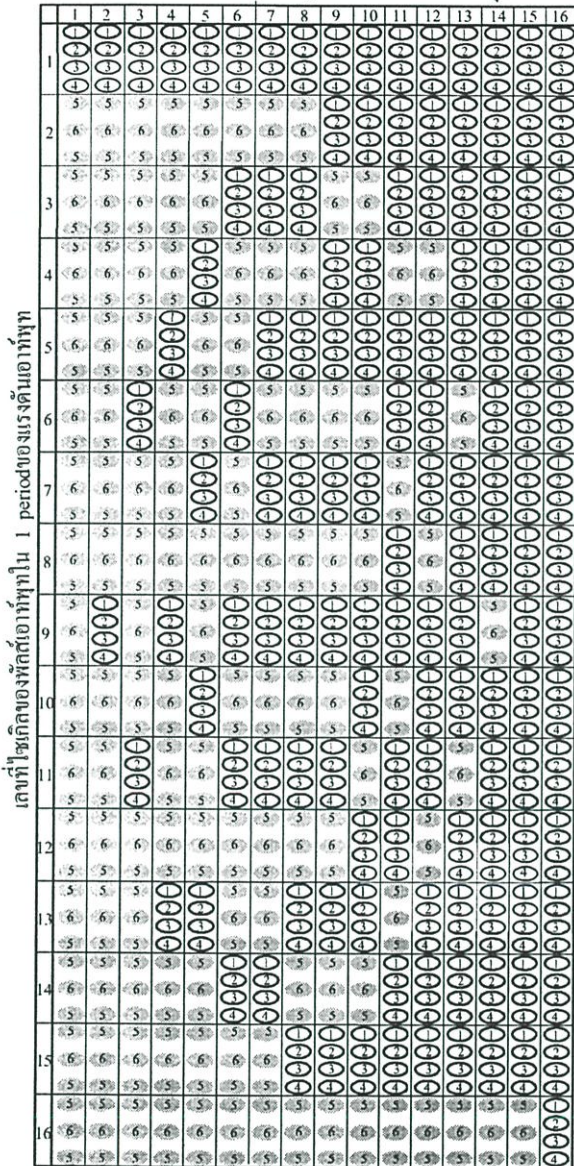
รูปที่ 2 โหมดการทำงาน



รูปที่ 3 คลื่นแรงดันและกระแสใน 1/4 period กริดที่ 12 cycle

สำหรับการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ในกรณีของการควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับลดจำนวนพัลส์ของแรงดันใน 1 คาบเวลาของแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์จะทำให้ได้แรงดันเอาท์พุท 3 สถานะคือ $+V_d, -V_d$ และ 0 เมื่อกำหนดให้อินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่ สวิตช์สูงกว่าความถี่เรโซแนนท์จะสามารถแบ่งการทำงานของวงจรออกได้เป็น 6 โหมดดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งโดยทั่วไปอินเวอร์เตอร์ชนิดปรับความถี่จะมีโหมดการทำงานเพียง 4 โหมด(1-4)เท่านั้น แต่ในกรณีนี้จะมีโหมด

จำนวนไซเคิลทั้งหมดใน 1 period ของแรงดันเอาต์พุต



รูปที่ 4 แผนภาพแสดงลำดับโหมดการทำงานทั้งหมดใน 1 period

การทำงานเพิ่มขึ้นอีก 2 โหมด(5-6)โดยมีลักษณะการทำงานดังนี้

โหมด 1,2,3,4 ในโหมดนี้จะให้แรงดันเอาต์พุตเป็น $\pm V_d$ โดยสวิตช์ S_1 และ S_2 จะสลับการทำงานกับ S_2 และ S_3 นั่นคือในโหมด 1 และ 2 เฉพาะสวิตช์ S_1 และ S_4 ON จะได้แรงดันเอาต์พุตเป็น $+V_d$ สำหรับทิศทางการไหลของกระแส เนื่องจากในโหมด 1 กระแสมีค่าเป็นลบ ดังนั้นกระแสจะไหลผ่านไดโอดของ S_1 และ S_2 ดังรูปที่ 2(a) และเมื่อเข้าสู่โหมด 2 กระแสเริ่มมีค่าเป็นบวกกระแสจะเปลี่ยนมาไหลผ่านสวิตช์ของ S_1 และ S_4 แทนดังรูปที่ 2(b) ส่วนในกรณีของโหมด 3 และ 4 เฉพาะสวิตช์ S_2 และ S_3 ON แรงดันเอาต์พุตจะเป็น $-V_d$ มีทิศทางการไหลของกระแสคือในโหมด 3 กระแสจะไหลผ่านไดโอดของ S_2 และ S_3 และเมื่อเข้าสู่โหมด 4 กระแสจะไหลผ่านสวิตช์ของ S_2 และ S_3 แทน

โหมด 5,6 ในโหมด 5 นี้จะได้แรงดันเอาต์พุตเป็น 0 โดยมีลักษณะการทำงานของสวิตช์แตกต่างจากโหมดอื่นคือเฉพาะสวิตช์ของ S_2 และไดโอดของ S_1 ON ดังรูปที่ 2(c) และเมื่อเข้าสู่โหมด 6 กระแสจะเปลี่ยนมาไหลผ่านไดโอดของ S_2 และสวิตช์ของ S_3 แทนดังรูปที่ 2(d) ซึ่งลักษณะรูปคลื่นแรงดันและกระแสในโหมดต่างๆสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 และยังสามารถแสดงลำดับโหมดในการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการปรับลดจำนวน cycle ใน 1 period ทั้ง 16 รูปแบบดังรูปที่ 4 ส่วนตารางที่ 1 จะแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสที่ตัวสวิตช์ในโหมดการทำงานต่างๆ

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ของแรงดัน กระแสที่ตัวสวิตช์ในโหมดต่างๆ

โหมด	1	2	3	4	5	6
v_{S1}	0	0	V_d	V_d	V_d	V_d
i_{S1}	$-i_o(t)$	$i_o(t)$	0	0	0	0
v_{S2}	V_d	V_d	0	0	0	0
i_{S2}	0	0	$-i_o(t)$	$i_o(t)$	$i_o(t)$	$-i_o(t)$
v_{S3}	V_d	V_d	0	0	V_d	V_d
i_{S3}	0	0	$-i_o(t)$	$i_o(t)$	0	0
v_{S4}	0	0	V_d	V_d	0	0
i_{S4}	$-i_o(t)$	$i_o(t)$	0	0	$-i_o(t)$	$i_o(t)$
i_d	$-i_o(t)$	$i_o(t)$	$-i_o(t)$	$i_o(t)$	0	0

3. การวิเคราะห์กำลังไฟฟ้า

ในการวิเคราะห์ กำลังไฟฟ้าสามารถทำได้โดยวิธีแยกสเปกตรัมของทั้งแรงดันและกระแสซึ่งจะทำให้ได้แรงดันและกระแสที่ลำดับฮาร์โมนิกต่างๆ แล้วนำค่าที่ได้นี้มาคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าต่อไปได้ดังนี้

กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ : P_{out}

สามารถหาได้โดยอาศัยสมการที่ (8),(9) และ (10)

$$v_o(t) = \sum_{n=1}^{\infty} V_{on,max} \sin(n\omega_o t) \tag{8}$$

$$i_o(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_{on,max} \sin(n\omega_o t + \theta_n) \tag{9}$$

$$P_{out} = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{V_{on,max} I_{on,max}}{2} \right) \cos \theta_n \tag{10}$$

เมื่อ v_o, i_o คือแรงดันและกระแสที่เอาต์พุตอินเวอร์เตอร์

กำลังไฟฟ้าอินพุตที่แหล่งจ่าย : P_{in}

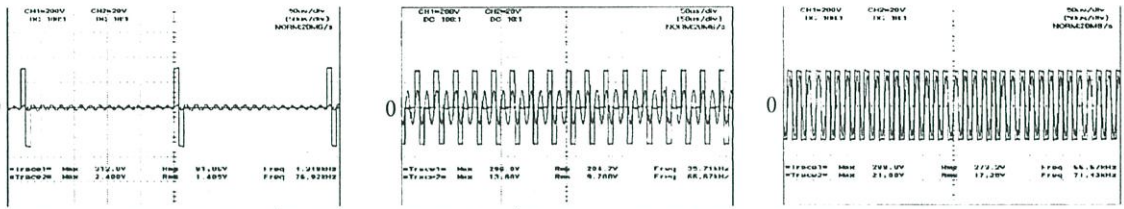
สามารถหาได้โดยอาศัยสมการที่ (11),(12) และ (13)

$$v_S(t) = \sum_{n=1}^{\infty} V_{Sn,max} \sin(n\omega t) \tag{11}$$

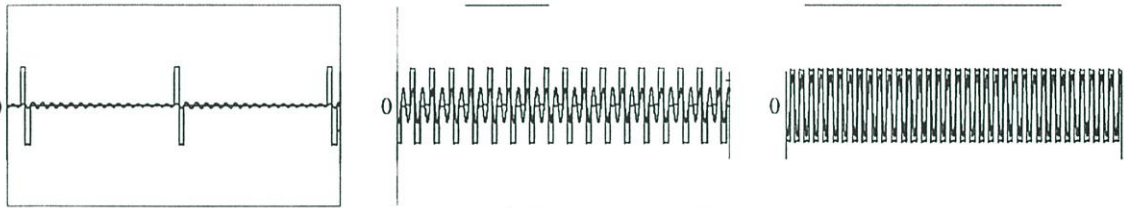
$$i_S(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_{Sn,max} \sin(n\omega t + \phi_n) \tag{12}$$

$$P_{in} = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{V_{Sn,max} I_{Sn,max}}{2} \right) \cos \phi_n \tag{13}$$

เมื่อ v_S, i_S คือแรงดันและกระแสอินพุตที่แหล่งจ่าย



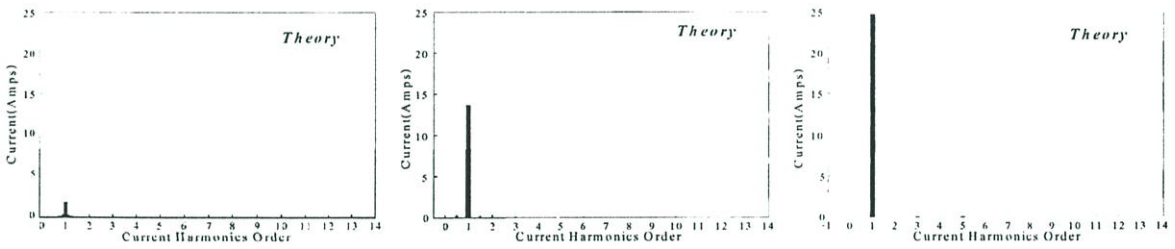
a) ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสเอาท์พุทที่ได้จากการทดลอง (ช้า,กลาง,ขวา : 1.8,16 cycles)



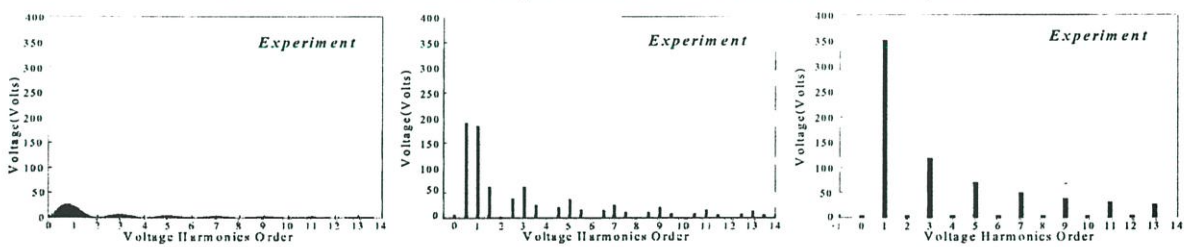
b) ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสเอาท์พุทที่ได้จากการ simulate (ช้า,กลาง,ขวา : 1.8,16 cycles)



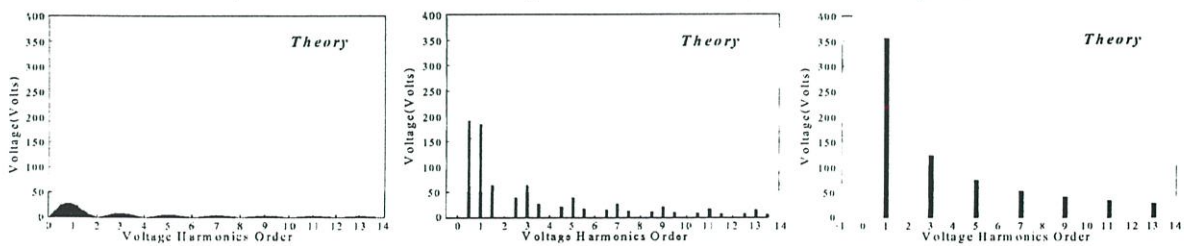
c) ลักษณะสเปกตรัมของกระแสเอาท์พุทที่ได้จากการทดลอง (ช้า,กลาง,ขวา : 1.8,16 cycles)



d) ลักษณะสเปกตรัมของกระแสเอาท์พุทที่ได้จากการ simulate (ช้า,กลาง,ขวา : 1.8,16 cycles)

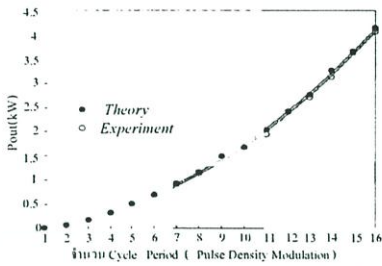


e) ลักษณะสเปกตรัมของแรงดันเอาท์พุทที่ได้จากการทดลอง (ช้า,กลาง,ขวา : 1.8,16 cycles)

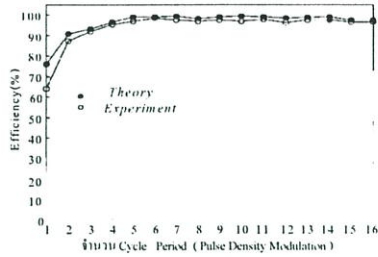


f) ลักษณะสเปกตรัมของแรงดันเอาท์พุทที่ได้จากการ simulate (ช้า,กลาง,ขวา : 1.8,16 cycle)

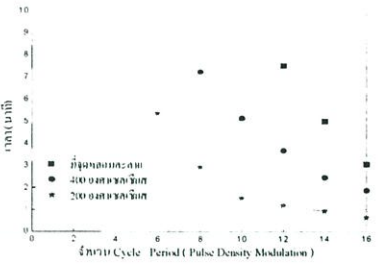
รูปที่ 5 ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาท์พุทที่ได้จากการทดลองและการ simulate



a) กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์



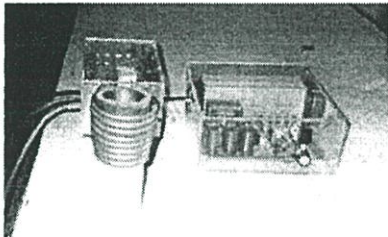
b) ประสิทธิภาพ



c) เวลาในการหลอม

รูปที่ 6 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต ประสิทธิภาพ และเวลาในการหลอมละลาย

4. ผลการทดลอง



รูปที่ 7 เครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำคั่นแบบ

ในการควบคุมกำลังไฟด้วยวิธีปรับลดจำนวน cycle ใน 1 period ได้กำหนดไว้ทั้งหมด 16 ระดับ ซึ่งสามารถแสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์จากการทดลองได้ดังรูป 5(a) จากซ้ายไปขวาซึ่งเป็นการปรับค่าไว้ที่ระดับต่ำสุด กลาง และสูงสุดตามลำดับ และเพื่อขึ้นชั้นความถูกต้องจึงได้ทำการ simulate ด้วย MATLAB ดังแสดงผลในรูปที่ 5(b) เพื่อคำนวณลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตโดยใช้สมการ(1)-(7) จะเห็นว่ารูปคลื่นจะมีลักษณะใกล้เคียงกันมากในขณะเดียวกันยังได้ทำการวิเคราะห์สเปกตรัมของทั้งแรงดันและกระแสเพื่อแสดงให้เห็น ลำดับฮาร์โมนิกส์ต่างๆที่เกิดขึ้นในกรณีที่มีจำนวน cycle ในหนึ่ง period ต่างกันพร้อมทั้งได้แสดงผลที่ได้จากการ simulate เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองจะเห็นได้ว่ามีลักษณะใกล้เคียงกันมากในทุกกรณีดังแสดงในรูปที่ 5(c) ถึง (f) จากรูปจะเห็นว่าในกรณีของกระแสจะมีลำดับฮาร์โมนิกส์คล้ายกันทั้ง 3 กรณี ในขณะที่ฮาร์โมนิกส์ของแรงดันในกรณี 1 และ 8 cycle จะมีฮาร์โมนิกส์ sideband เกิดขึ้น ซึ่งจากสเปกตรัมที่ได้สามารถนำไปคำนวณหา กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตได้ จากสมการที่ (10) โดยสามารถนำมา plot กราฟกำลังไฟฟ้าที่ได้ที่จำนวน cycle ต่างๆดังรูปที่ 6(a) ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ 16 cycle จะให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 4.1kW และที่ 1 cycle จะให้กำลังไฟฟ้าต่ำสุดเท่ากับ 25W ส่วนในรูปที่ 6(b) เป็นการแสดงประสิทธิภาพของเครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำทั้งในทางทฤษฎีและปฏิบัติ ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกันและเมื่อนำไปใช้ในการหลอมโลหะอลูมิเนียมน้ำหนัก 100 กรัม จะสามารถหลอมละลายได้ภายในระยะเวลา 3 นาที ที่จำนวน 16 cycle ดังแสดงในรูปกราฟที่ 6(c)

5. สรุป

บทความวิจัยนี้ได้นำเสนอหลักการวิเคราะห์เครื่องหลอมโลหะความถี่สูงชนิดควบคุมกำลังไฟด้วยการปรับลดจำนวน cycle ของความถี่เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์โดยสามารถปรับได้จากค่าสูงสุด 4kW จนเป็นศูนย์ ซึ่งสรุปประเด็นสำคัญได้คือ สามารถเข้าใจการทำงานของวงจรได้อย่างดี เนื่องจากคลื่นแรงดันและกระแสตลอดจนแถบสเปกตรัมต่างๆที่ใช้ในการอธิบายการทำงานทั้งที่ได้จากการคำนวณและการทดลองมีค่าใกล้เคียงกันมากดังนั้นวงจรการใช้งานของเครื่องหลอมโลหะนี้จึงมีประสิทธิภาพการใช้งานสูง โดยจะอยู่ในเกณฑ์ 98% และสามารถหลอมละลายโลหะเช่นอลูมิเนียมขนาดน้ำหนัก 100 กรัมได้ในระยะเวลา 3 นาที

เอกสารอ้างอิง

- [1] P.Viriya , S.Sittichok and K.Matsuse "Analysis of High-Frequency Induction Cooker with Variable Frequency Power Control " PCC-OSAKA Conf.Rec., 2002, pp. 1502-1507.
- [2] P. Viriya and T. Thomas, " Power Transfer Characteristics of a Phase-shift Controlled ZVS Inverter for the Application of Induction Heating " IPEC-Tokyo (Japan) Conf.Rec., 2000. pp. 423-428.

ประวัติผู้เขียนบทความ



นายอาฉัต ถึงสาร การศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ปัจจุบันเป็นนักศึกษาระดับปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

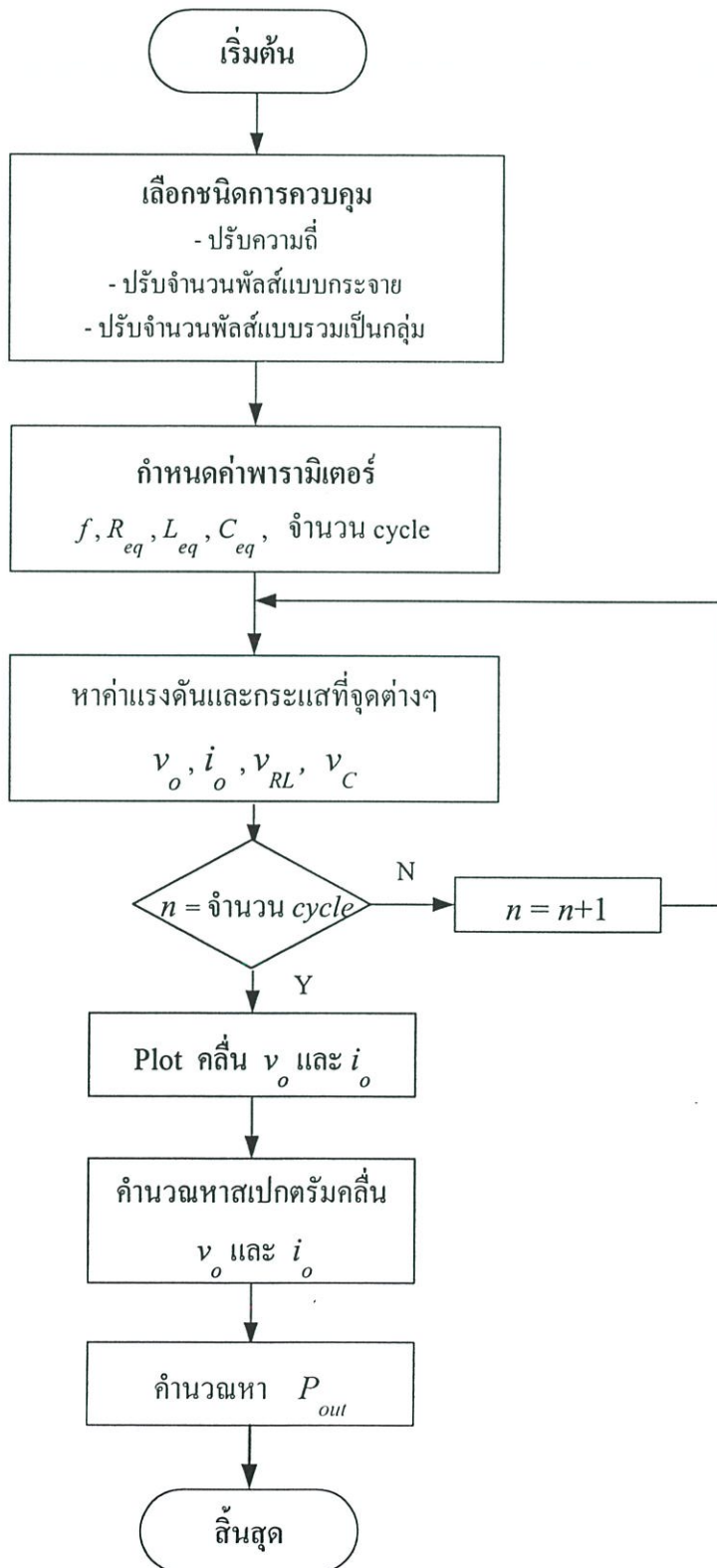


นายวิริยะ พิเชฐจำริญ การศึกษาวุฒิปริญญาโท เอก จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยโตเกียว และมหาวิทยาลัยเมจิ ประเทศญี่ปุ่น ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ สาขาวิชาเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ภาคผนวก ข.

โพลซาร์จแสดงขั้นตอนการคำนวณคุณสมบัติทางไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์
ด้วยโปรแกรม MATLAB



ตารางคุณสมบัติของเครื่องหลอมโลหะเหนียวนำความถี่สูงต้นแบบ ณ ตำแหน่งพิกัด

รายการ	ผลการทดสอบ	หน่วย
Max. Output Power (P_{out})	3,300	Watt
Max. Input Power (P_{in})	3,450	Watt
Rectifier-Inverter Efficiency(η)	97.05	%
%Total Harmonic Distortion of Rectifier Input Current; THD_i (Rectifier)	102.21	%
%Total Harmonic Distortion of Rectifier Input Voltage; THD_v (Rectifier)	2.98	%
Input Rectifier Power Factor (PF.)	0.680	
%Total Harmonics Distortion of Inverter Output Current: THD_i (Inverter)	4.247	%
%Total Harmonics Distortion of Inverter Output Voltage: THD_v (Inverter)	49.07	%
Output Inverter Power Factor (PF.)	0.770	

การคำนวณหาค่า Percent Total Harmonic Distortion (%THD) , Power Factor (PF) และ Displacement Factor (DPF), Distortion Factor (DF)

ตัวประกอบความเพี้ยน (Distortion Factor):
$$DF = \frac{I_{s1}}{I_s} = \frac{\sqrt{I_s^2 - I_{dis}^2}}{I_s}$$

ตัวประกอบการกระจัด (Displacement Factor):
$$DPF = \cos\theta_1$$

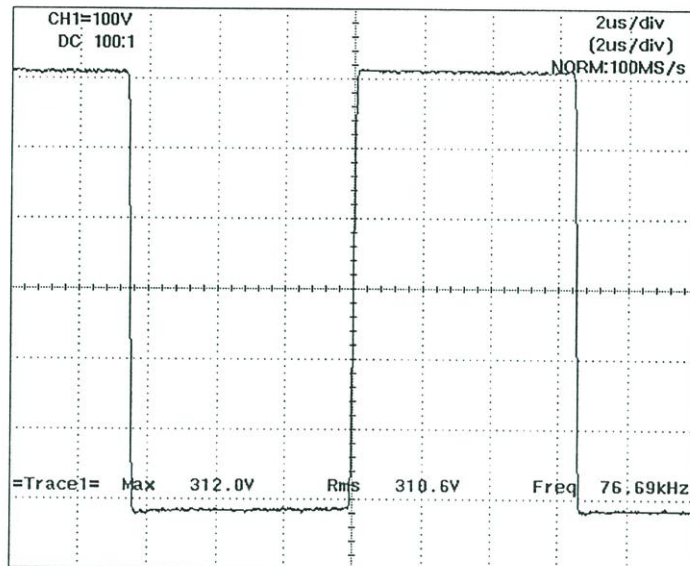
ตัวประกอบกำลัง (Power Factor):
$$PF = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} V_{sn} I_{sn} \cos\theta_{sn}}{\left[\sum_{n=1}^{\infty} V_{sn}^2 \right]^{1/2} \left[\sum_{n=1}^{\infty} I_{sn}^2 \right]^{1/2}}$$

Percent ความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์รวม (%Total Harmonic Distortion)

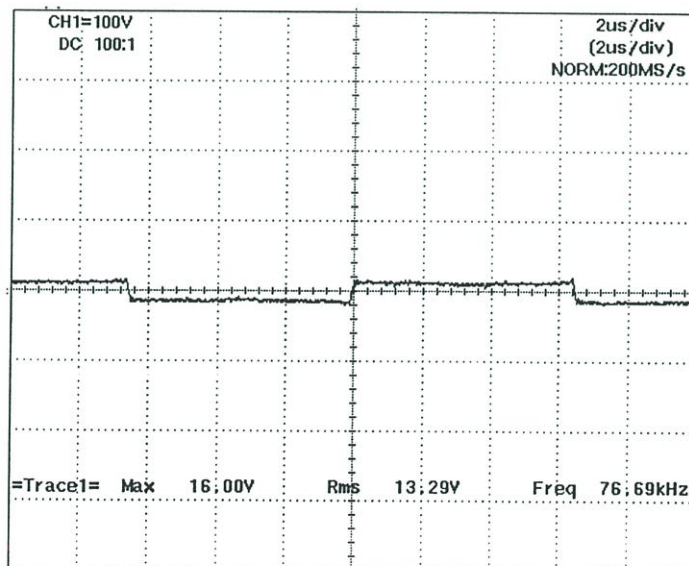
กรณีแรงดัน $\%THD_v = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} V_{sn}^2}{V_{s1}^2}} \times 100$ [%] ; กรณีกระแส $\%THD_i = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_{sn}^2}{I_{s1}^2}} \times 100$ [%]

การทดสอบอัตราส่วนของหม้อแปลงความถี่สูง

ทางด้าน PRIMARY



ทางด้าน SECONDARY



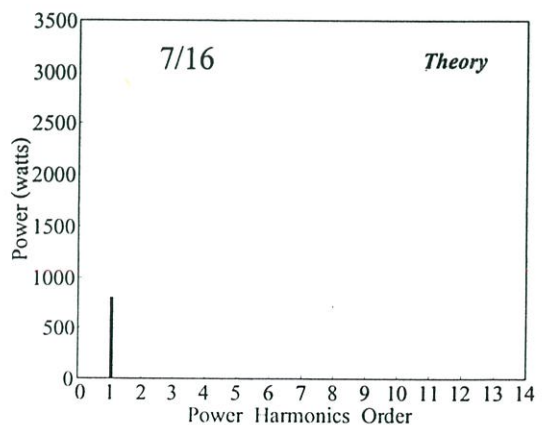
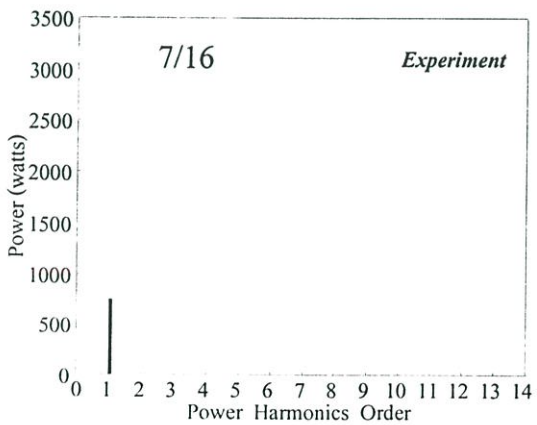
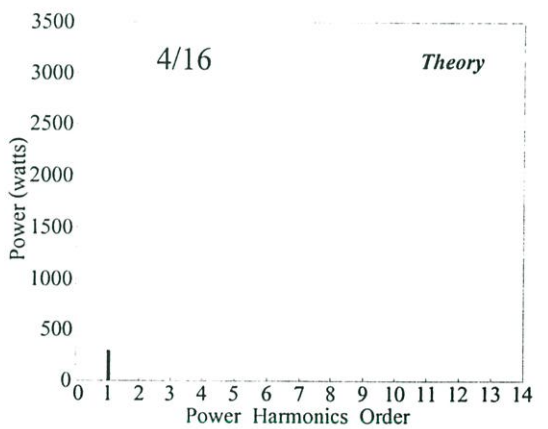
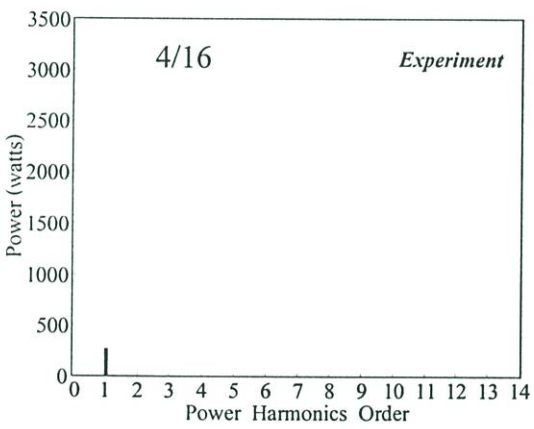
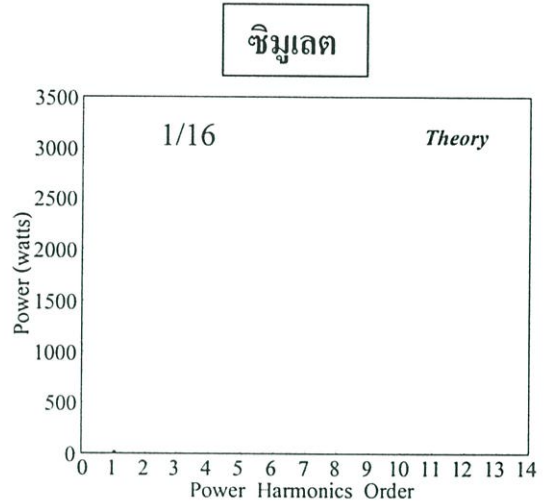
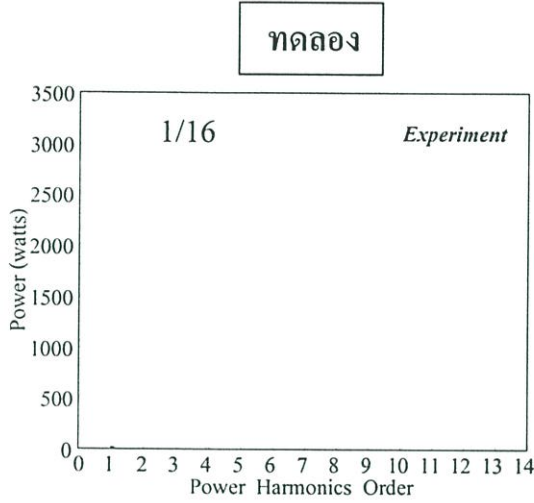
Secondary

TURN RATIO จากการออกแบบ $N_1 : N_2 = 20 : 1$

TURN RATIO จากการทดสอบ $N_1 : N_2 = 310/16 = 19.4:1$

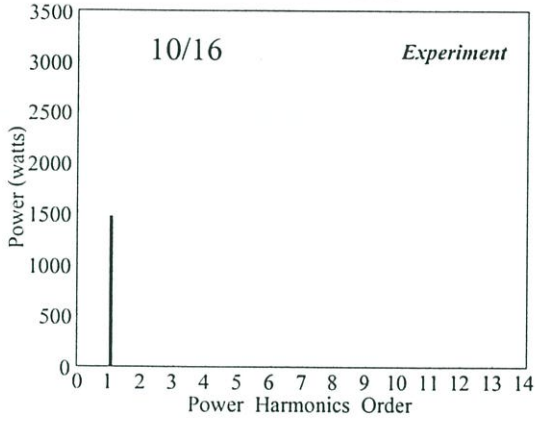
ภาพแสดงสเปกตรัมกำลังของเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์

- PDM แบบกระจาย ในกรณีตัวอย่าง

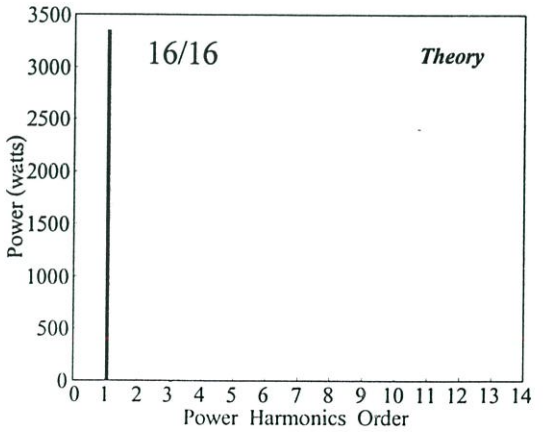
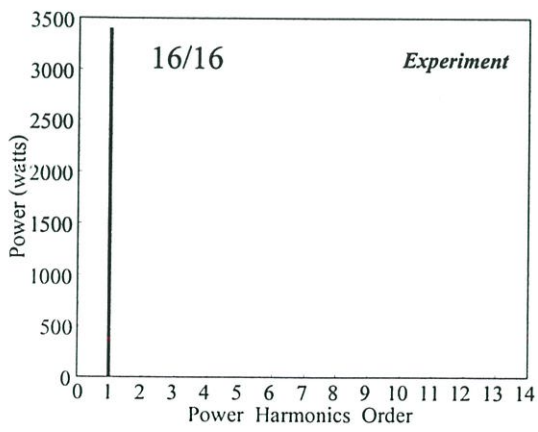
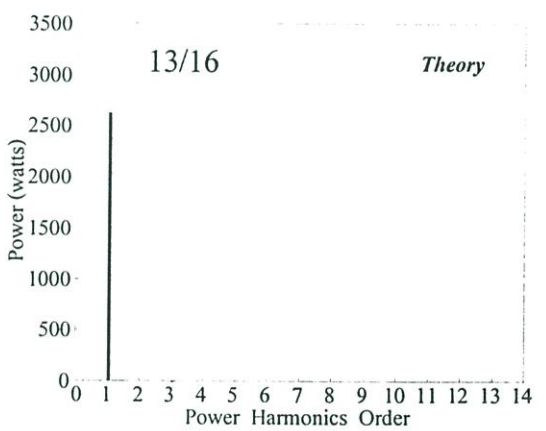
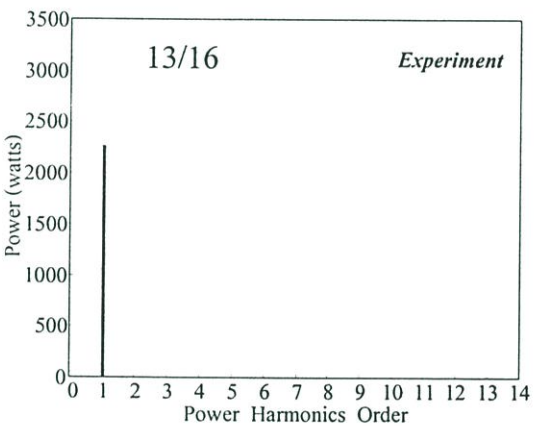
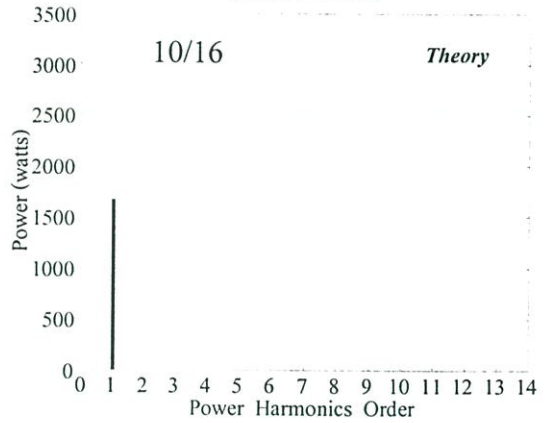


- PDM แบบกระจาย ในกรณีตัวอย่าง(ต่อ)

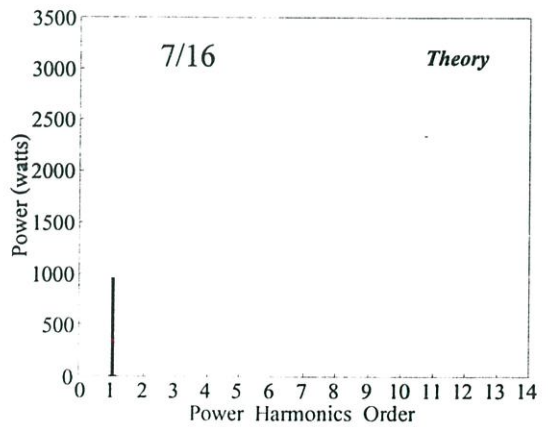
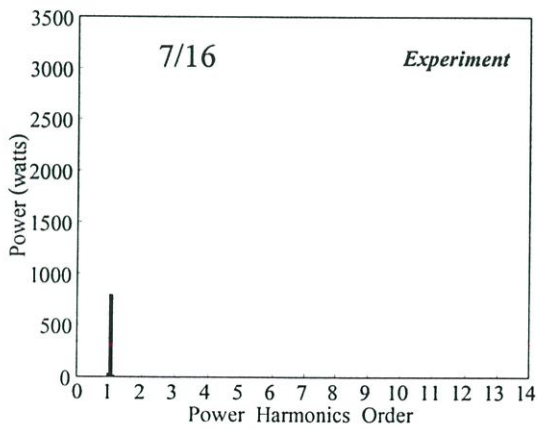
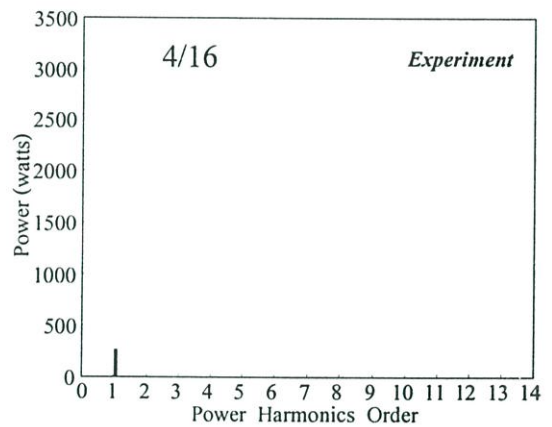
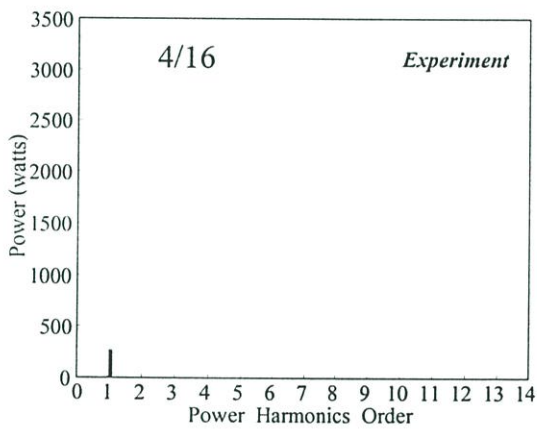
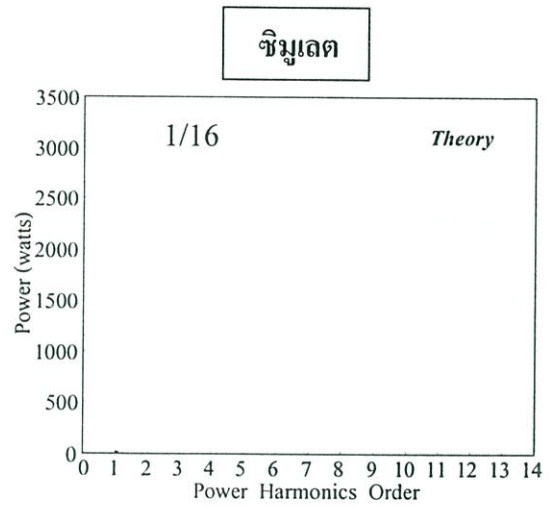
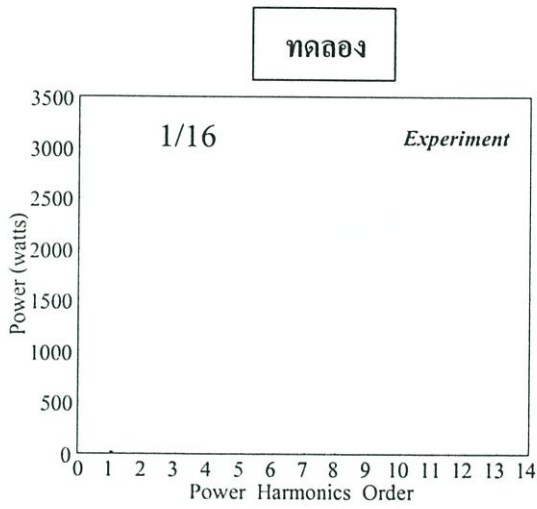
ทดลอง



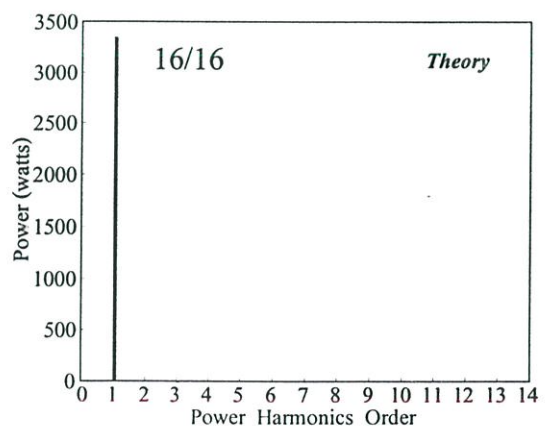
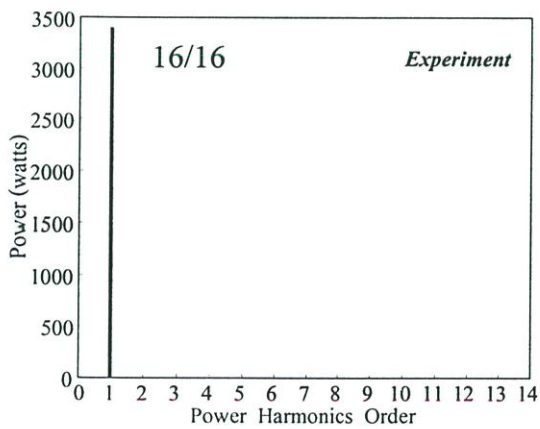
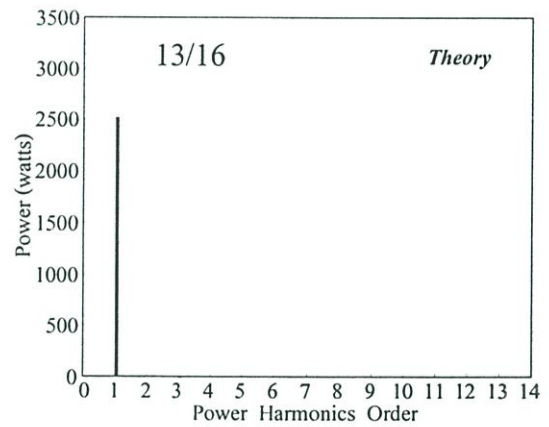
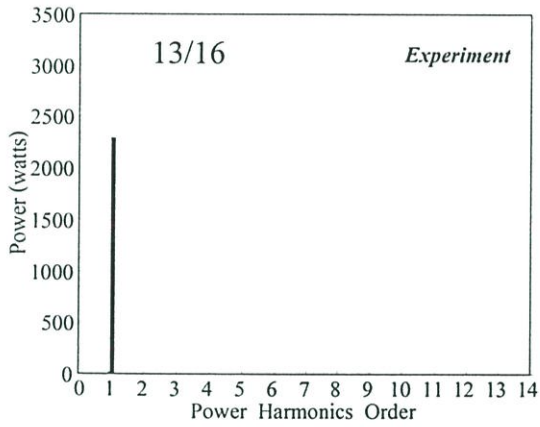
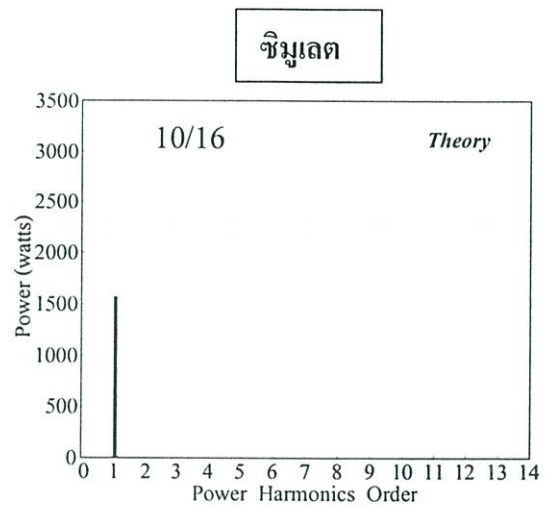
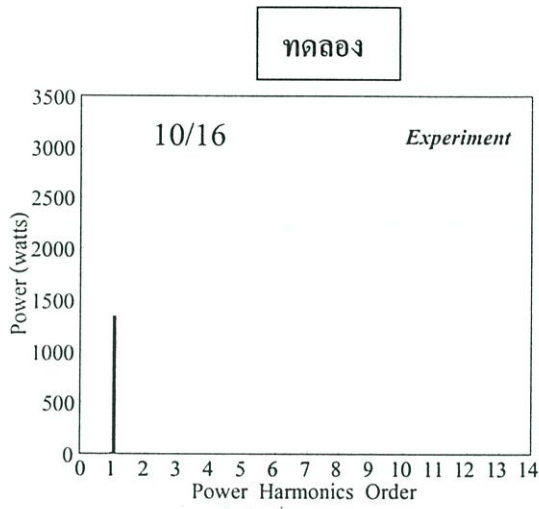
ซิมูเลต



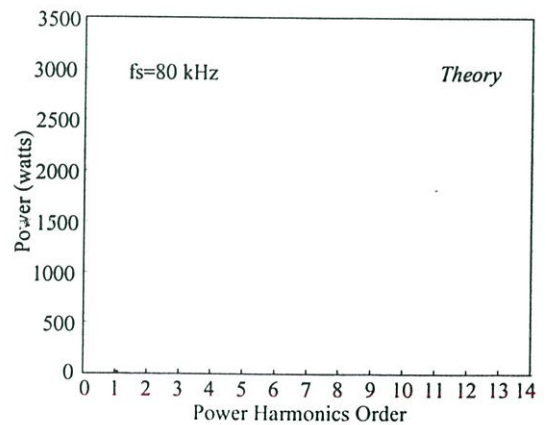
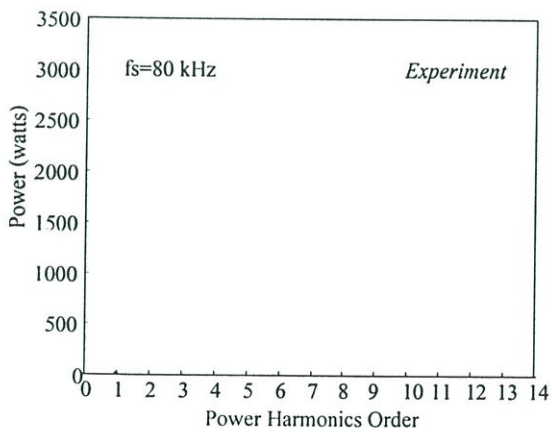
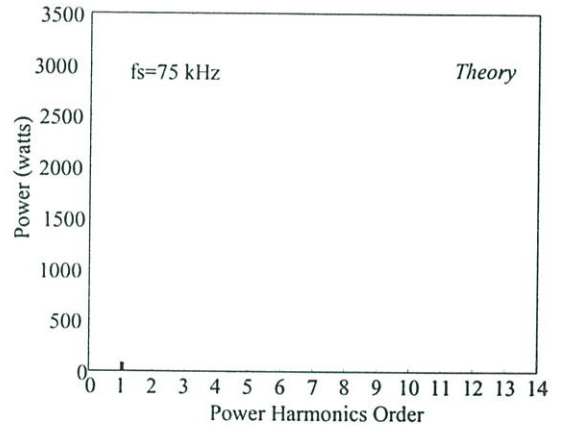
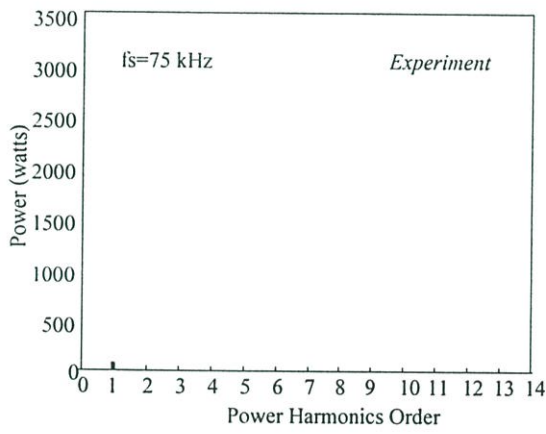
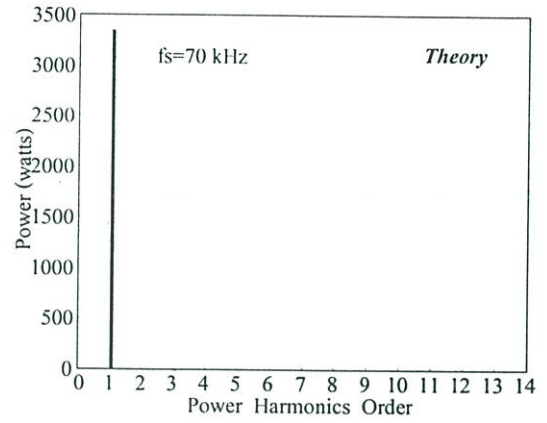
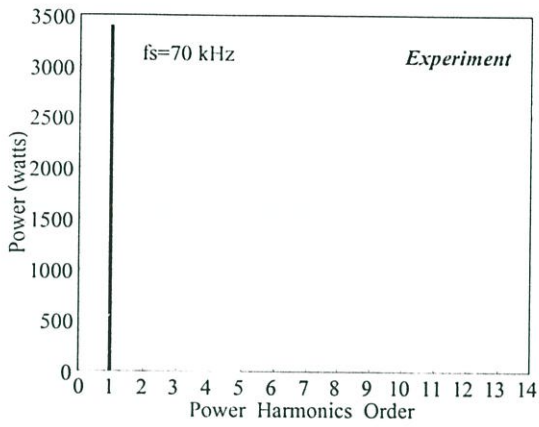
- PDM แบบรวมเป็นกลุ่ม ในกรณีตัวอย่าง



- PDM แบบรวมเป็นกลุ่ม ในกรณีตัวอย่าง(ต่อ)

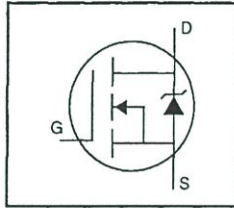


- แบบปรับความถี่ ในกรณีตัวอย่าง



HEXFET® Power MOSFET

- Dynamic dv/dt Rating
- Repetitive Avalanche Rated
- Isolated Central Mounting Hole
- Fast Switching
- Ease of Paralleling
- Simple Drive Requirements

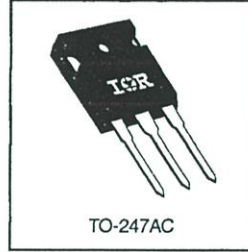


$V_{DSS} = 500V$
 $R_{DS(on)} = 0.27\Omega$
 $I_D = 20A$

Description

Third Generation HEXFETs from International Rectifier provide the designer with the best combination of fast switching, ruggedized device design, low on-resistance and cost-effectiveness.

The TO-247 package is preferred for commercial–industrial applications where higher power levels preclude the use of TO-220 devices. The TO-247 is similar but superior to the earlier TO-218 package because of its isolated mounting hole. It also provides greater creepage distance between pins to meet the requirements of most safety specifications.



DATA SHEETS

Absolute Maximum Ratings


	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10 V$	20	A
$I_D @ T_C = 100^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10 V$	13	
I_{DM}	Pulsed Drain Current ①	80	
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	Power Dissipation	280	W
	Linear Derating Factor	2.2	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	±20	V
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy ②	960	mJ
I_{AR}	Avalanche Current ①	20	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy ①	28	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ③	3.5	V/ns
T_J	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to +150	°C
T_{STG}			
	Mounting Torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf•in (1.1 N•m)	

Thermal Resistance


	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	—	0.45	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	—	0.24	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	—	40	

IRFP460

Electrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	500	—	—	V	$V_{GS}=0V, I_D=250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.63	—	V/°C	Reference to 25°C , $I_D=1\text{mA}$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	0.27	Ω	$V_{GS}=10V, I_D=12A$ ④
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	$V_{DS}=V_{GS}, I_D=250\mu A$
g_{fs}	Forward Transconductance	13	—	—	S	$V_{DS}=50V, I_D=12A$ ④
I_{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	μA	$V_{DS}=500V, V_{GS}=0V$
		—	—	250		$V_{DS}=400V, V_{GS}=0V, T_J=125^\circ\text{C}$
I_{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{GS}=20V$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100		$V_{GS}=-20V$
Q_g	Total Gate Charge	—	—	210	nC	$I_D=20A$
Q_{gs}	Gate-to-Source Charge	—	—	29		$V_{DS}=400V$
Q_{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	110		$V_{GS}=10V$ See Fig. 6 and 13 ④
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	18	—	ns	$V_{DD}=250V$
t_r	Rise Time	—	59	—		$I_D=20A$
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	110	—		$R_G=4.3\Omega$
t_f	Fall Time	—	58	—		$R_D=13\Omega$ See Figure 10 ④
L_D	Internal Drain Inductance	—	5.0	—	nH	Between lead, 6 mm (0.25in.) from package and center of die contact 
L_S	Internal Source Inductance	—	13	—		
C_{iss}	Input Capacitance	—	4200	—	pF	$V_{GS}=0V$
C_{oss}	Output Capacitance	—	870	—		$V_{DS}=25V$
C_{rss}	Reverse Transfer Capacitance	—	350	—		$f=1.0\text{MHz}$ See Figure 5

Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
I_S	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	20	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode. 
I_{SM}	Pulsed Source Current (Body Diode) ④	—	—	80		
V_{SD}	Diode Forward Voltage	—	—	1.8	V	$T_J=25^\circ\text{C}, I_S=20A, V_{GS}=0V$ ④
t_{rr}	Reverse Recovery Time	—	570	860	ns	$T_J=25^\circ\text{C}, I_F=20A$
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge	—	5.7	8.6	μC	$di/dt=100A/\mu s$ ④
t_{on}	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by L_S+L_D)				

Notes:

- ① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature (See Figure 11)
- ② $V_{DD}=50V$, starting $T_J=25^\circ\text{C}$, $L=4.3\text{mH}$, $R_G=25\Omega$, $I_{AS}=20A$ (See Figure 12)
- ③ $I_{SD}\leq 20A$, $di/dt\leq 160A/\mu s$, $V_{DD}\leq V_{(BR)DSS}$, $T_J\leq 150^\circ\text{C}$
- ④ Pulse width $\leq 300\mu s$; duty cycle $\leq 2\%$.



IRFP460

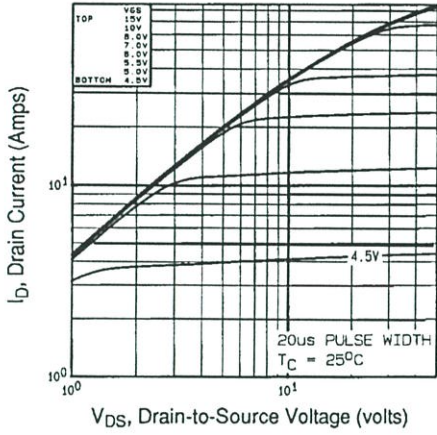


Fig 1. Typical Output Characteristics, $T_C=25^\circ\text{C}$

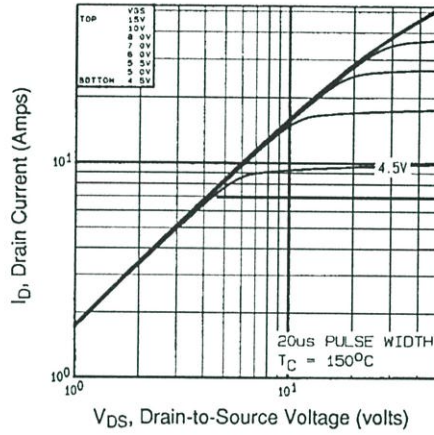


Fig 2. Typical Output Characteristics, $T_C=150^\circ\text{C}$

DATA SHEETS

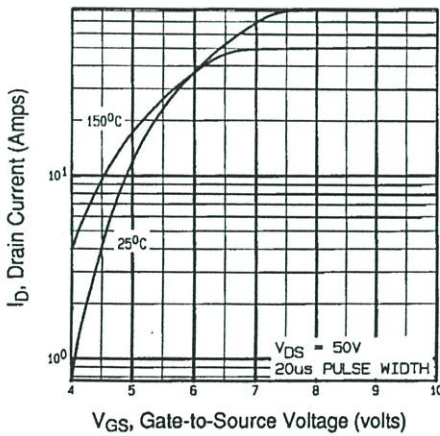


Fig 3. Typical Transfer Characteristics

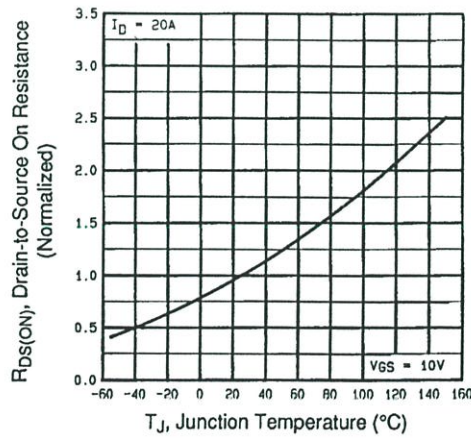


Fig 4. Normalized On-Resistance Vs. Temperature

IRFP460

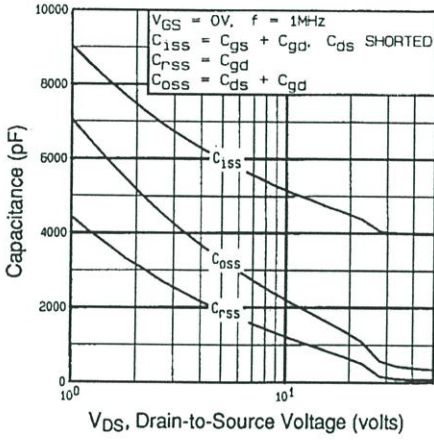


Fig 5. Typical Capacitance Vs. Drain-to-Source Voltage

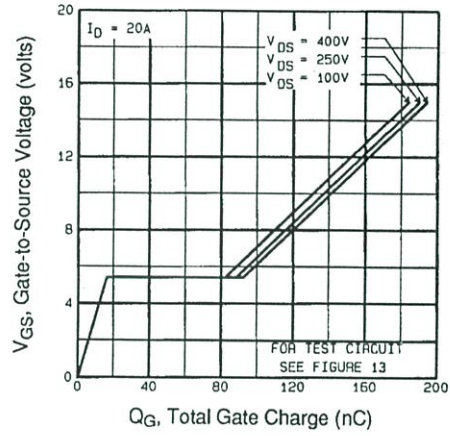


Fig 6. Typical Gate Charge Vs. Gate-to-Source Voltage

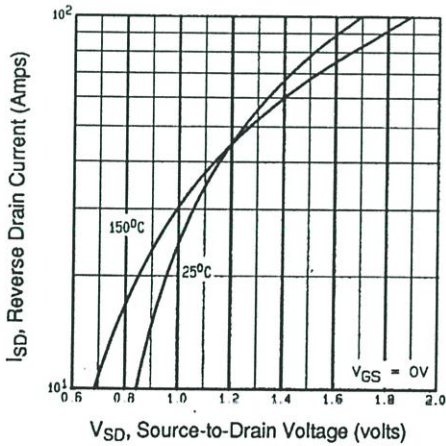


Fig 7. Typical Source-Drain Diode Forward Voltage

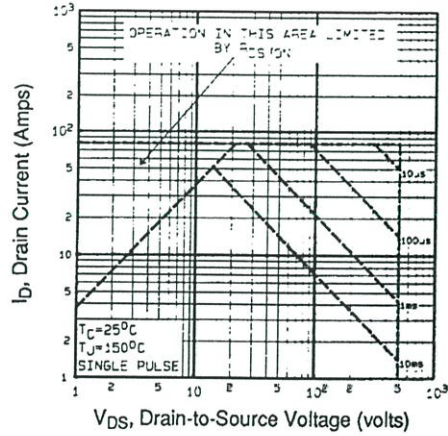


Fig 8. Maximum Safe Operating Area



IRFP460

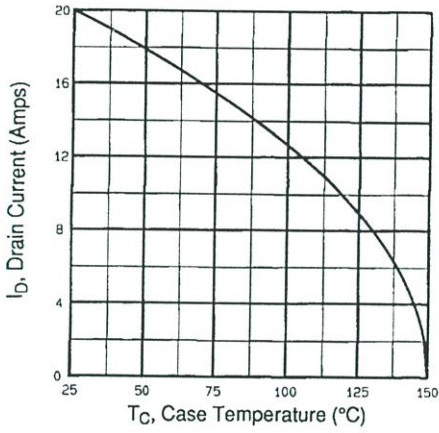


Fig 9. Maximum Drain Current Vs. Case Temperature

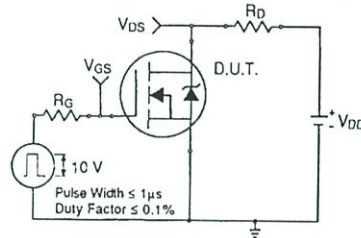


Fig 10a. Switching Time Test Circuit

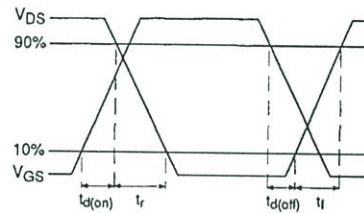


Fig 10b. Switching Time Waveforms

DATA SHEETS

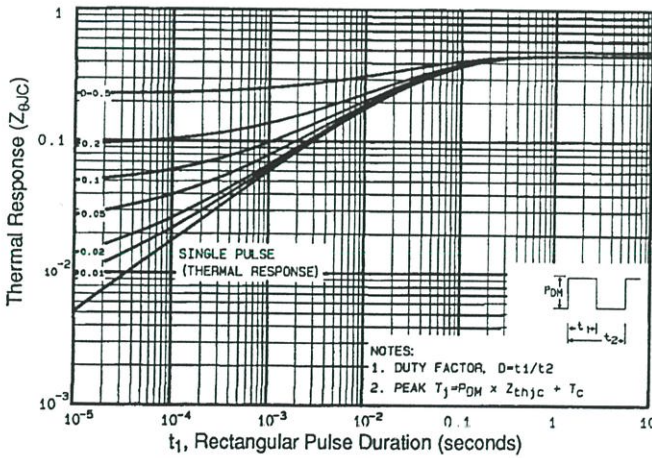


Fig 11. Maximum Effective Transient Thermal Impedance, Junction-to-Case

IRFP460

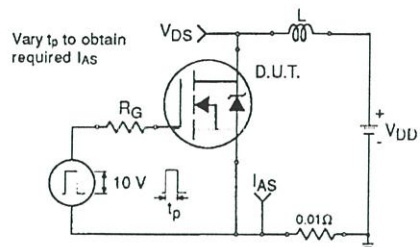


Fig 12a. Unclamped Inductive Test Circuit

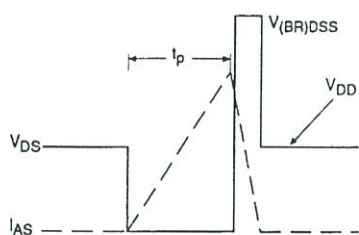


Fig 12b. Unclamped Inductive Waveforms

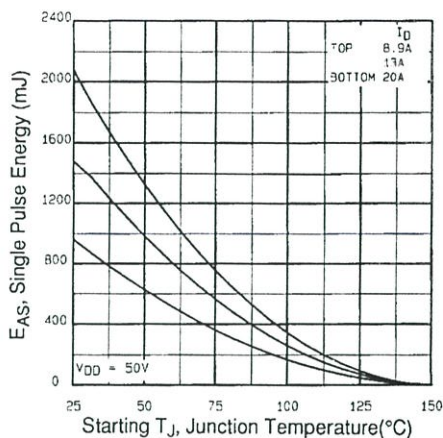


Fig 12c. Maximum Avalanche Energy Vs. Drain Current

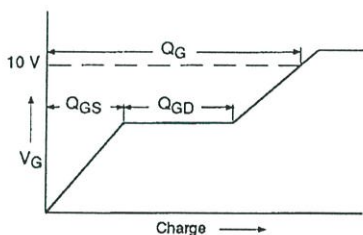


Fig 13a. Basic Gate Charge Waveform

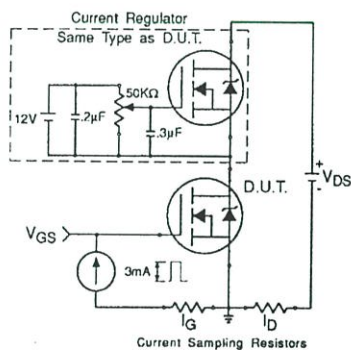


Fig 13b. Gate Charge Test Circuit

Appendix A: Figure 14, Peak Diode Recovery dv/dt Test Circuit – See page 1505

Appendix B: Package Outline Mechanical Drawing – See page 1511

Appendix C: Part Marking Information – See page 1517



ประวัติผู้เขียน

นายอานัต ถึงสาคร เกิดวันที่ 22 พฤศจิกายน พ.ศ.2517 ที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2540 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูงจากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตนนทบุรี สาขาไฟฟ้ากำลัง ปีการศึกษา 2536 ปัจจุบันเป็นนักศึกษาระดับปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง