

การออกแบบวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟสลับแบบเรโซแนนซ์อนุกรมคู่



นายวิรัตน์      สมาคเอียค

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ.2538

ISBN 974-632-840-9

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A DESIGN OF A DUAL SERIES RESONANT DC-TO-AC CONVERTER

MR.VIRATH SAMADEAID

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Electrical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

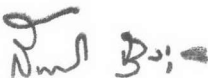
1995

ISBN 974-632-840-9


หัวข้อวิทยานิพนธ์ : การออกแบบวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟสลับแบบเรโซแนนซ์อนุกรมคู่  
โดย : นายวิรัตน์ สماعيل  
ภาควิชา : วิศวกรรมไฟฟ้า  
อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.โคทม อารียา

---

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาค้นคว้าหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

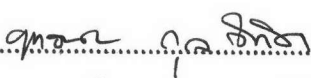
  
.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สันติ อุงสุวรรณ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
.....ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร.มงคล เคชนครินทร์)

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร.โคทม อารียา)

  
.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย ลีลาธรรม)

  
.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา กุลวิทิต)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

วิรัตน์ สมาดเอียด : การออกแบบวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟสลับแบบเรโซแนนซ์อนุกรมคู่  
(A DESIGN OF A DUAL SERIES RESONANT DC-TO-AC CONVERTER ) อ.ที่ปรึกษา :  
รองศาสตราจารย์ ดร.โคทม อารียา, 126 หน้า. ISBN 974-632-840-9

วิทยานิพนธ์นี้กล่าวถึงการออกแบบสร้างและทดสอบวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟสลับที่ใช้หม้อแปลง  
ความถี่สูงและวงจรคี่ที่ความถี่สายกำลัง มีการควบคุมแอมพลิจูดของแรงดันด้านออกให้เกือบคงที่ในขณะที่  
ป้อนแรงดันไฟตรงระหว่าง 160-200 โวลต์ให้กับวงจรแปลงผัน การควบคุมใช้เทคนิคการเลื่อนเฟสของ  
สัญญาณขั้วนำสวิตช์ของวงจรกึ่งบริดจ์สองวงจรและใช้แรงดันระหว่างวงจรทั้งสองเป็นแรงดันด้านออก มีการ  
ใช้เทคนิคเรโซแนนซ์เพื่อลดการสูญเสียในการสวิตช์ แรงดันที่ได้จากหม้อแปลงความถี่สูงมีเอนเวลอปเป็น  
ค่าสัมบูรณ์ของแรงดันไซน์ เมื่อนำแรงดันนี้มาเรียงกระแสและกรององค์ประกอบความถี่สูงออกจะได้แรงดันที่  
เป็นค่าสัมบูรณ์ของไซน์ เมื่อใช้วงจรคี่ก็จะได้แรงดันไซน์ประมาณ 220 โวลต์ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ที่สามารถจ่าย  
กำลัง 500 วัตต์ให้แก่โหลด

ภาควิชา ..... วิศวกรรมไฟฟ้า  
สาขาวิชา ..... อิเล็กทรอนิกส์กำลัง  
ปีการศึกษา ..... 2538

ลายมือชื่อนิสิต ..... วิรัตน์ สมาดเอียด  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

## C415619 : MAJOR POWER ELECTRONICS

KEY WORD: DUAL SERIES RESONANT CONVERTER(DSRC)/ PHASE-SHIFT CONTROL

VIRATH SAMADEAID : A DESIGN OF A DUAL SERIES RESONANT DC-TO-AC CONVERTER. THESIS ADVISOR : ASSO.PROF. GOTHOM ARYA, DR. ING., 126 pp. ISBN 974-632-840-9

This thesis presents a design, construction and testing of a dc-to-ac converter using an HF transformer and a line-frequency unfolding circuit. The regulated output voltage is nearly constant when the dc input varies in the range of 160-200 volts. The control technique consists of varying the phase-shift between driving signals of two half-bridge circuits, the voltage difference of which provides the output voltage. Resonant technique is used to reduce switching loss. The envelope of the output voltage of the HF transformer is an absolute sine. By rectifying and filtering the high-frequency components of this voltage, a rectified wave is obtained. A line-frequency unfolding circuit converts this into a sine-wave of 220 volts, 50 Hz. The output power is 500 watts.

ภาควิชา..... วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต..... ธีรเดช สิมตาดอน

สาขาวิชา..... อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... Ohm.g.

ปีการศึกษา..... 2538

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

### กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจากรองศาสตราจารย์ดร.โคทม อาริยา ที่ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์และเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาซึ่งท่านได้ให้ข้อคิดและคำแนะนำต่างๆของการวิจัยด้วยดีตลอดมาอีกทั้งศาสตราจารย์ ดร.มงคล เชนครินทร์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา กุลวิฑิต อ.ดร.สมบูรณ์ แสงวงศ์วณิชย์ ที่ได้ให้คำปรึกษาและแนะนำความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้กล่าวมาข้างต้น นอกจากนี้ ข้าพเจ้าใคร่ขอขอบคุณ คุณนที สุขุมตันติ และเพื่อนนิสิตปริญญาโทห้องปฏิบัติการวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลังทุกท่านตลอดถึง คุณกิงกาญจน์ สุยะหลาน ที่กรุณาช่วยพิมพ์ต้นฉบับวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ใคร่ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้าเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

วิรัตน์ สมาคเอ็ยค

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฌ
บทที่ 1      บทนำ.....	1
บทที่ 2      การแปลงผันเรโซแนนซ์.....	8
บทที่ 3      เทคนิคการควบคุมการแปลงผันพลังงานเรโซแนนซ์.....	36
บทที่ 4      วงจรกำลังและการควบคุม.....	48
บทที่ 5      สรุปผลการทดสอบวงจรแปลงผัน.....	83
บทที่ 6      บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	94
รายการอ้างอิง.....	97
ภาคผนวก.....	99
ภาคผนวก ก.....	100
ภาคผนวก ข.....	103
ภาคผนวก ค.....	110
ภาคผนวก ง.....	119
ประวัติผู้เขียน.....	126

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	แสดงกระแสไหลและกำลังที่มุมเฟสต่างๆ.....4
2.1	วงจรแปลงผันเก็บบเรโซแนนซ์ที่พัฒนาจากวงจรแปลงผันพื้นฐาน.....22
2.2	วงจรแปลงผันเก็บบเรโซแนนซ์ชนิดกระแสศูนย์.....23
2.3	วงจรแปลงผันเก็บบเรโซแนนซ์ชนิดแรงดันศูนย์.....24
2.4	วงจรแปลงผันหลายเรโซแนนซ์โดยสวิตช์ที่แรงดันศูนย์.....25
4.1	ผลของตัวประกอบคุณภาพ.....55
4.2	แสดงการปรับครรชนีการมอดูเลตเมื่อแรงดันไฟตรงมีค่าสูงขึ้น.....71
5.1	ประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันแบบที่ 1 ที่มุม $\theta$ ต่างๆ.....90
5.2	แสดงการทดสอบวงจรแปลงผันแบบที่ 1 เมื่อแปรค่าไฟตรงและมอดูเลตเฟส ด้วยสัญญาณไซน์.....91
5.3	ประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันแบบที่ 2 ที่มุม $\theta$ ต่างๆ.....92
5.4	แสดงการทดสอบวงจรแปลงผันแบบที่ 2 เมื่อแปรค่าไฟตรงและมอดูเลตเฟส ด้วยสัญญาณไซน์.....93



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1	วงจรมุมูลการแปลงผัน โดยการเลื่อนเฟส.....2
1.2	วงจรมุมูลเทวินิน.....3
1.3	แผนภาพเฟสเซอร์แสดงการบวกแรงดัน.....3
1.4	แผนภาพแสดงส่วนต่างๆของวงจรแปลงผัน.....5
1.5	รูปคลื่นแรงดันที่จุดต่างๆของรูปที่ 1.4.....6
2.1	วงจรถงแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงพื้นฐาน
	(ก) วงจรถงแปลงผันแบบทอนระดับ.....9
	(ข) วงจรถงแปลงผันแบบทบระดับ.....9
	(ค) วงจรถงแปลงผันแบบทอน-ทบระดับ.....9
2.2	แผนภาพการแปลงผันพลังงานเรโซแนนซ์.....10
2.3	ลักษณะวงจรถงผันเข้าแบบแหล่งแรงดัน.....11
2.4	ลักษณะวงจรถงผันเข้าแบบแหล่งกระแส.....11
2.5	ลักษณะของสวิตช์
	(ก) กระแสไหลทางเดียวทนแรงดันสองทาง.....12
	(ข) กระแสไหลสองทางทนแรงดันทางเดียว.....12
2.6	ตัวอย่างวงจรถงเรโซแนนซ์อันดับสอง.....13
2.7	ตัวอย่างวงจรถงเรโซแนนซ์อันดับสาม.....13
2.8	วงจรถงรีงค้ำยอดของกระแสและแรงดัน.....14
2.9	การใช้ตัวเก็บประจุกันองค์ประกอบแรงดันไฟตรง
	(ก) วงจรมุมูล.....15
	(ข) การแยกโคควงจรถงด้วยหม้อแปลง.....15
2.10	การใช้ตัวเหนี่ยวนำค่าใหญ่กันองค์ประกอบกระแสไฟตรง
	(ก) แสดงวงจรมุมูล.....15
	(ข) การแยกโคคด้วยหม้อแปลงบินกลับ.....15

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่		หน้า
2.11	วงจรมุมตวงจรกรองแบบผ่านต่ำ	
	(ก) ตัวกรองเป็นตัวเหนี่ยวนำ.....	16
	(ข) ตัวกรองเป็นตัวเก็บประจุ.....	16
2.12	รูปแบบวงจрд้านออก.....	16
2.13	แสดงการขั้บนำจากแหล่งที่ความถี่เรโซแนนซ์เรโซแนนซ์.....	17
2.14	แสดงการขั้บนำที่คาบน้อยกว่าความถี่เรโซแนนซ์.....	18
2.15	แสดงการเชื่อมโยงวงจรเรโซแนนซ์สู่โหลดที่ความถี่เรโซแนนซ์.....	18
2.16	แสดงการวงจรเรโซแนนซ์สู่โหลดที่ไม่ใช่ความถี่เรโซแนนซ์.....	19
2.17	แสดงการจำแนกแปลงผันแบบเรโซแนนซ์เป็นสี่ควอแดรนต์.....	20
2.18	(ก) วงจรอนุกรม $RLC$ .....	26
	(ข) รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ $V_c$ .....	26
2.19	(ก) วงจรเรโซแนนซ์อนุกรม.....	28
	(ข) แอคมิตแตนซ์.....	28
2.20	แสดงขั้วและศูนย์บนระนาบ $S$ (S-Plane).....	29
2.21	แสดงขนาดและเฟสของแอคมิตแตนซ์เมื่อแปรค่าความถี่.....	30
2.22	แสดงตัวประกอบคุณภาพ $Q$ กับอัตราหน่วง $\zeta$ .....	30
2.23	แสดงแถบความถี่ครึ่งกำลัง.....	32
2.24	(ก) รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่กระตุ้นวงจร $RLC$ .....	32
	(ข) รูปคลื่นแรงดันและกระแสเมื่อ $\omega_s = \omega_o$ .....	32
2.25	การแปลงผันเรโซแนนซ์ขนาน	
	(ก) รูปคลื่นกระแสที่เกิดจากการสวิตซ์.....	34
	(ข) วงจร $RLC$ ขนาน.....	34
	(ค) กราฟของค่าอิมพีแดนซ์.....	34
	(ง) รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลดกรณี $\omega_s = \omega_o$ .....	34
3.1	แผนภาพแสดงการควบคุมโดยแปรค่าความถี่สวิตซ์.....	35
3.2	แผนภาพแสดงการควบคุมโดยการมอดูเลตความกว้างพัลส์.....	36
3.3	แสดงการควบคุมวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์โดยโปรแกรมกระแส	
	(ก) แสดงการควบคุมแบบความถี่คงตัว.....	37
	(ข) แสดงการควบคุมแบบแปรค่าความถี่.....	37

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่		หน้า
3.4	(ก) วงจรแปลงผันกึ่งบริดจ์.....	38
	(ข) แรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยม.....	38
3.5	(ก) วงจรแปลงผันแบบบริดจ์เต็ม.....	38
	(ข) แรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยม.....	38
3.6	สัญญาณขั้วนำวงจรที่ควบคุมโดยการแปรค่าความถี่สวิตช์.	
	(ก) สัญญาณขั้วนำวงจรในรูปที่ 3.4.....	39
	(ข) สัญญาณขั้วนำวงจรในรูปที่ 3.5.....	39
3.7	สัญญาณขั้วนำสวิตช์โดยการควบคุมการเลื่อนเฟส.....	39
3.8	แสดงแรงดันตกคร่อมวงจรเรโซแนนซ์.....	40
3.9	วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงเรโซแนนซ์อนุกรมแบบบริดจ์เต็ม.....	40
3.10	โครงสร้างของวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์อนุกรม	
	(ก) วงจรแปลงผันแบบกึ่งบริดจ์.....	41
	(ข) วงจรแปลงผันแบบบริดจ์เต็ม.....	41
	(ค) วงจรสมมูล.....	41
3.11	วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรมคู่แบบที่ 1	
	(ก) วงจร.....	42
	(ข) วงจรสมมูล.....	42
3.12	วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรมคู่แบบที่ 2	
	(ก) วงจร.....	43
	(ข) วงจรสมมูล.....	43
3.13	วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรมคู่แบบที่ 3	
	(ก) วงจร.....	44
	(ข) วงจรสมมูล.....	44
4.1	แสดงการควบคุมแอมพลิจูดขององค์ประกอบหลักมูลโดยการบวกแรงดัน	
	(ก) วงจรบริดจ์.....	48
	(ข) แผนภาพเฟสเซอร์.....	48
	(ค) รูปคลื่นแรงดัน.....	49

## สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.2	แผนภาพแสดงส่วนต่างๆของวงจรแปลงผัน.....	50
4.3	วงจรกำลัง	
	(ก) วงจรแบบที่ 1.....	51
	(ข) วงจรแบบที่ 2.....	51
4.4	วงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรมคู่	
	(ก) วงจรแบบที่ 1.....	52
	(ข) วงจรแบบที่ 2.....	52
4.5	แสดงรูปคลื่นแรงดันจากแผนภาพส่วนต่างๆของวงจร.....	53
4.6	แสดงรูปคลื่นแรงดันที่จุดต่างๆตามรูปที่ 4.3.....	54
4.7	วงจรอนุกรม RLC.....	55
4.8	รูปคลื่นกระแสผ่านโหลดเมื่อกระตุ้นวงจรในรูปที่ 4.4 (ก) ด้วยแรงดันสี่เหลี่ยม ( $\theta = 0$ ) ที่มีแอมพลิจูด 80 โวลต์.....	58
4.9	วงจรสมมูลการแปลงผันโดยการเลื่อนเฟส ; $Z_1 = Z_2$ .....	58
4.10	(ก) วงจรสมมูลการแปลงผันโดยการเลื่อนเฟส.....	59
	(ข) แสดงวงจรแรงดันผลบวก.....	59
	(ค) แสดงวงจรแรงดันผลต่าง.....	59
4.11	แผนภาพแสดงแรงดันผลบวกและแรงดันผลต่าง.....	60
4.12	แสดงค่าปทัสถานกระแสของแหล่งเมื่อแปรค่ามุม $\theta$ ของวงจรแปลงผันแบบที่ 1.....	61
4.13	รูปคลื่นกระแสที่จ่ายออกจากแหล่งแรงดันแต่ละแหล่งที่มุม $\theta = 90^\circ$	
	(ก) กระแส $I_1$ .....	62
	(จ) กระแส $I_2$ .....	62
4.14	รูปคลื่นกระแสที่จ่ายออกจากแหล่งแรงดันแต่ละแหล่งที่มุม $\theta = 135^\circ$	
	(ก) กระแส $I_1$ .....	63
	(จ) กระแส $I_2$ .....	63
4.15	แสดงค่าปทัสถานกระแสของแหล่งเมื่อแปรค่ามุม $\theta$ ของวงจรแปลงผันแบบที่ 2.....	64

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.16	รูปคลื่นกระแสที่จ่ายออกจากแหล่งแรงดันแต่ละแหล่งที่มุม $\theta = 90^\circ$
	(ก) กระแส $I_1$ .....65
	(ข) กระแส $I_2$ .....65
4.17	รูปคลื่นกระแสที่จ่ายออกจากแหล่งแรงดันแต่ละแหล่งที่มุม $\theta = 135^\circ$
	(ก) กระแส $I_1$ .....66
	(ข) กระแส $I_2$ .....66
4.18	กราฟเปรียบเทียบกระแสที่สถานะของวงจรแปลงผันแบบที่ 1 และแบบที่ 2
	(ก) กราฟเปรียบเทียบกระแส $I_{1no}$ ของวงจรแปลงผันแบบที่ 1 และแบบที่ 2.....67
	(ข) กราฟเปรียบเทียบกระแส $I_{2no}$ ของวงจรแปลงผันแบบที่ 1 และแบบที่ 2.....67
	(ค) กราฟเปรียบเทียบกระแสที่สถานะของวงจรแปลงผันแบบที่ 1 และแบบที่ 2.....67
4.19	สัญญาณขั้วนำสวิตช์ของวงจรถูกบังคับแต่ละวงจรเมื่อ ( $\theta > 90^\circ$ ).....68
4.20	แสดงแผนภาพการเก็บเวลาการตัดต่อสวิตช์บนตัว EPROM.....72
4.21	แผนภาพของวงจรควบคุม.....73
4.22	วงจรตรวจจับศูนย์,เฟสล็อกและวงจรมับ.....75
4.23	วงจรปรับความชันและศูนย์.....76
4.24	วงจรถือแก้วจักรงาน.....78
4.25	วงจรถ้าเนิดสัญญาณขั้วนำ.....79
4.26	วงจรถ้าเนิดดวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์อนุกรมคู่.....81
4.27	วงจรถ้าเนิดวงจรถ้า.....82
5.1	แสดงรูปคลื่นแรงดันด้านออกของหม้อแปลงความถี่สูง (สเกลแรงดัน 100 V/DIV สเกลเวลา 5 ms/DIV).....83
5.2	รูปคลื่นแรงดันด้านออกจากวงจรกรองแบบผ่านต่ำ (สเกลแรงดัน 100 V/DIV สเกลเวลา 5 ms/DIV).....84

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.3	รูปคลื่นแรงดันค้ำานออกจากวงจรคลื่นความถี่สายกำลัง (สเกลแรงดัน 100 V/DIV. สเกลเวลา 5 ms/DIV.).....84
5.4	รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมสวิตช์และกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำที่มุม $\theta \approx 0^\circ$ (รูปที่ 4.3) (สเกลแรงดัน 50 V/DIV. สเกลกระแส 2 Amp./DIV สเกลเวลา 10 $\mu$ s/DIV.).....85
5.5	รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมสวิตช์และกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำที่มุม $\theta \approx 180^\circ$ (รูปที่ 4.3 ก)(สเกลแรงดัน 50 V/DIV. สเกลกระแส 5 Amp./DIV. สเกลเวลา 10 $\mu$ s/DIV.).....85
5.6	รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมสวิตช์และกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำที่มุม $\theta \approx 180^\circ$ (รูปที่ 4.3 ข)(สเกลแรงดัน 50 V/DIV. สเกลกระแส 2 Amp./DIV. สเกลเวลา 10 $\mu$ s/DIV.).....86
5.7	รูปคลื่นแรงดันค้ำานออกวงจรรองและกระแสค้ำานเข้าห้อมแปลงความถี่สูง ที่มุม $\theta$ ใดๆ (สเกลแรงดัน 100 V/DIV. สเกลกระแส 10 Amp./DIV สเกลเวลา 5 ms/DIV.).....87
5.8	รูปคลื่นกระแสค้ำานเข้าห้อมแปลงความถี่สูงที่มุม $\theta \approx 180^\circ$ (สเกลกระแส 2 Amp./DIV สเกลเวลา 5 ms/DIV.).....87
5.9	รูปคลื่นกระแสค้ำานเข้าห้อมแปลงความถี่สูงที่มุม $\theta \approx 0^\circ$ (สเกลกระแส 5 Amp./DIV. สเกลเวลา 10 $\mu$ s/DIV.).....88
5.10	รูปคลื่นแรงดันผลต่างระหว่างวงจรกึ่งบริดจ์ที่มุม $\theta \approx 0^\circ$ (สเกลแรงดัน 50 V/DIV. สเกลเวลา 10 $\mu$ s/DIV.).....89
5.11	รูปคลื่นแรงดันผลต่างระหว่างวงจรกึ่งบริดจ์ที่มุม $\theta \approx 180^\circ$ (สเกลแรงดัน 50 V/DIV. สเกลเวลา 10 $\mu$ s/DIV.).....89