

วงจรมีเพิ่มระดับแรงดันดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่มีอัตราขยายสูง  
DC-DC CONVERTERS WITH LARGE VOLTAGE STEP-UP RATIO

ปรีชาพร    ปรีชาพลกุล  
อังคณา    ศรีวิฑิตกุล

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2560

วงจรเพิ่มระดับแรงดันดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่มีอัตราขยายสูง  
DC-DC CONVERTERS WITH LARGE VOLTAGE STEP-UP RATIO

ปรีชาพร      ปรีชาพลกุล  
อังคณา      ศรีวิทิตกุล

600264471  
TB00015

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2560

# DC-DC CONVERTERS WITH LARGE VOLTAGE STEP-UP RATIO

PREECHAPORN      PREECHAPOLLAKUL  
UNGKANA            SRIVITIDKUL

THIS THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHATRONICS ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2017

## ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2560

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์

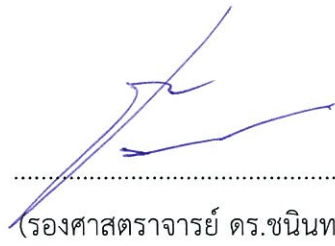
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง วงจรเพิ่มแรงดันดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่มีอัตราขยายสูง

DC-DC CONVERTERS WITH LARGE VOLTAGE STEP-UP RATIO

ผู้จัดทำ นายปรีชาพร ปรีชาพลกุล 57010755

นางสาวอังคณา ศรีวิฑิตกุล 57011512

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชนินทร์ บุญลักษณะนามสรณ์)

# วงจรมีอัตรายายสูง

โดย

นายปรีชาพร ปรีชาพลกุล 57010755

นางสาวอังคณา ศรีวิทิตกุล 57011512

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.ชนินทร์ บุญลักษณ์านุสรณ์

ปีการศึกษา 2560

## บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ได้ถูกจัดทำขึ้นโดยมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาวงจรมีอัตรายายสูง โดยใช้เทคนิคการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าด้วยวงจรสวิตช์เปิดอินดักเตอร์บูสต์คอนเวอร์เตอร์มาต่อร่วมกับบวงจรมัลติเลเวล เมื่อเลือกอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดตัวเหนี่ยวนำร่วมกันที่เหมาะสมจะทำให้สามารถเพิ่มอัตรายายได้ด้วยดีวีดี ซีเคิลปานกลาง ในปริญญานิพนธ์นี้มีการศึกษาและวิเคราะห์การทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่นำเสนอ และใช้โปรแกรม PSpice จำลองการทำงานเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง จากนั้นจึงสร้างวงจรต้นแบบและทำการทดสอบ พบว่าวงจรต้นแบบสามารถเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าขาเข้าจาก 30 โวลต์ ถึง 40 โวลต์ เป็นแรงดันไฟฟ้าขาออก 400 โวลต์ และจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ถึง 200 วัตต์

# DC-DC CONVERTERS WITH LARGE VOLTAGE STEP-UP RATIO

By

Mr. Preechaporn Preechapollakul 57010755

Miss Ungkana Srivitidkul 57011512

Advisor

Assoc.Prof.Dr.Chanin Boonlaksananusorn

Academic Year 2017

## ABSTRACT

This project proposes a new dc-dc converter with a high step-up voltage gain implemented by cascading a Switched-Coupled-Inductor (SCL) boost converter and a Multi-Level Circuit. By appropriately selecting the coupled inductor's turn ratio, the proposed converter can achieve a high step-up gain with a moderate duty cycle of the power switch. In this project, the converter operation is studied and analyzed. To confirm the validity, circuit simulation is performed using PSpice. The laboratory prototype is subsequently built and tested. Experimental results show that the proposed converter can boost a 40V input voltage into a 400V output voltage, supplying a maximum load power of 200W.

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ชนินทร์ บุญลักษณะนามุสรณ์ ซึ่งเป็นผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์สำหรับ คำแนะนำ คำสั่งสอน ความกรุณารวมถึงแนวคิดด้านการใช้ชีวิตจากประสบการณ์ที่สั่งสมมาและความห่วงใยดูแลเอาใจใส่ที่ผู้วิจัยได้รับตลอดมา พร้อมทั้งชี้แนะแนวทางให้ปฏิบัติอย่างถูกต้องตามขั้นตอนจนปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จอย่างสมบูรณ์

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์นันทวัฒน์ จุลเดชะ ที่ให้ข้อคิด ความรู้และการช่วยเหลือ ที่เป็นประโยชน์ต่อปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ ดร.กวีวัชร ทิตวงษ์ ที่ช่วยเหลือในการทดลอง ให้คำแนะนำในการออกแบบ แก้ไขปัญหาและช่วยกำกับดูแลผู้วิจัย จนทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ธุรการของภาควิชาที่ช่วยให้คำแนะนำในการพิมพ์ จัดวางรวมถึงตรวจทานปริญญาานิพนธ์

ผู้จัดทำ

ปรีชาพร ปรีชาพลกุล

อังคณา ศรีวิทิตกุล

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปริญญานิพนธ์	1
1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	1
1.3 ขอบเขตการศึกษา	1
1.4 ขั้นตอนของการศึกษา	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 บทนำ	3
2.2 วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์	3
2.2.1 หลักการทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์	4
2.3 วงจรสวิตช์คัปเปิ้ลอินดักเตอร์บูสต์คอนเวอร์เตอร์	11
2.3.1 หลักการทำงานของวงจรสวิตช์คัปเปิ้ลอินดักเตอร์บูสต์คอนเวอร์เตอร์	11
2.4 วงจรมัลติเลเวล	17
2.4.1 หลักการทำงานของวงจรมัลติเลเวล	18
บทที่ 3 วงจรสวิตช์คัปเปิ้ลอินดักเตอร์บูสต์คอนเวอร์เตอร์ต่อร่วมกับมัลติเลเวล	20
3.1 บทนำ	20
3.2 หลักการทำงานของวงจร	20
3.3 การวิเคราะห์ตัวแปรภายในวงจร	25
3.3.1 อัตราขยายวงจร	25
3.3.2 ค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำร่วม	26

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 การออกแบบวงจร	28
3.4.1 รายละเอียดในการออกแบบที่ต้องการ	28
3.4.2 ออกแบบวงจรต้นแบบ	28
3.4.3 ค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของตัวเก็บประจุ ไดโอด และสวิตช์	31
3.5 ผลการจำลองการทำงานของวงจร	31
<b>บทที่ 4 ผลการทดสอบสมรรถนะของวงจร</b>	<b>36</b>
4.1 บทนำ	36
4.2 รายละเอียดวงจรต้นแบบ	36
4.3 ผลการวัดสัญญาณดิฟเฟอเรนเชียล	39
4.4 ผลการวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขาออก	44
4.5 ผลการวัดรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าขาเข้าและรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของไดโอด $D_1$ และ $D_2$	49
4.6 ผลการวัดรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของสวิตช์และไดโอด $D_3$	57
4.7 ผลการวัดแรงดันไฟฟ้าคร่อมไดโอด $D_3$ และ $D_2$	63
4.8 ผลการวัดแรงดันไฟฟ้าคร่อมสวิตช์และไดโอด $D_3$	69
4.9 ผลการวัดความสามารถในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าขาออก เมื่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้า และกระแสไฟฟ้าขาออกเปลี่ยนแปลง	75
4.10 ผลการวัดประสิทธิภาพของวงจร	76
<b>บทที่ 5 สรุป</b>	<b>77</b>
5.1 สรุป	77
เอกสารอ้างอิง	79
ประวัติผู้วิจัย	80

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 อุปกรณ์ภายในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์	3
2.2 วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์	4
2.3 วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ช่วงสวิตช์ปิดวงจรไฟฟ้า	4
2.4 วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ช่วงสวิตช์เปิดวงจรไฟฟ้า	5
2.5 แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์	6
2.6 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์	6
2.7 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไดโอดของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์	7
2.8 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์	7
2.9 กราฟอัตราขยายกับค่าดีวีดีไซน์เคิลของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ปกติ	10
2.10 อุปกรณ์ภายในวงจรสวิตช์คัปเปิ้ลอินดักเตอร์บูสต์คอนเวอร์เตอร์	11
2.11 วงจรสวิตช์คัปเปิ้ลอินดักเตอร์บูสต์คอนเวอร์เตอร์ในช่วงที่สวิตช์ปิดวงจรไฟฟ้า	12
2.12 วงจรสวิตช์คัปเปิ้ลอินดักเตอร์บูสต์คอนเวอร์เตอร์ในช่วงที่สวิตช์เปิดวงจรไฟฟ้า	13
2.13 แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมสวิตช์ของวงจรสวิตช์คัปเปิ้ลอินดักเตอร์บูสต์คอนเวอร์เตอร์	14
2.14 แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมไดโอดตัวที่ 1 ของวงจรสวิตช์คัปเปิ้ลอินดักเตอร์บูสต์คอนเวอร์เตอร์	14
2.15 แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมไดโอดตัวที่ 2 ของวงจรสวิตช์คัปเปิ้ลอินดักเตอร์บูสต์คอนเวอร์เตอร์	14
2.16 แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมไดโอดตัวที่ 3 ของวงจรสวิตช์คัปเปิ้ลอินดักเตอร์บูสต์คอนเวอร์เตอร์	15
2.17 แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำร่วมวงจรสวิตช์คัปเปิ้ลอินดักเตอร์บูสต์คอนเวอร์เตอร์	15
2.18 กระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำร่วมวงจรสวิตช์คัปเปิ้ลอินดักเตอร์บูสต์คอนเวอร์เตอร์	15
2.19 กระแสไฟฟ้าออกของตัวเก็บประจุของวงจรสวิตช์คัปเปิ้ลอินดักเตอร์บูสต์คอนเวอร์เตอร์	16
2.20 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุของวงจรสวิตช์คัปเปิ้ลอินดักเตอร์บูสต์คอนเวอร์เตอร์	16
2.21 วงจรมัลติเลเวล 7 ระดับ	17
2.22 วงจรมัลติเลเวลในช่วงที่สวิตช์ปิดวงจรไฟฟ้า	18
2.23 วงจรมัลติเลเวลในช่วงที่สวิตช์เปิดวงจรไฟฟ้า	19
3.1 วงจรสวิตช์คัปเปิ้ลอินดักเตอร์บูสต์คอนเวอร์เตอร์ต่อร่วมกับมัลติเลเวล	20
3.2 วงจรในช่วงสวิตช์ปิดวงจรไฟฟ้า	21

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3 วงจรในช่วงสวิตช์เปิดวงจรไฟฟ้า	22
3.4 กราฟของตัวแปรต่างๆ จากการวิเคราะห์ห้วงจรไฟฟ้า	24
3.5 กระแสไฟฟ้าในขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิของตัวเหนี่ยวนำร่วม โดยใช้ PSpice Simulation	26
3.6 ภาพจำลองวงจรโดยใช้โปรแกรม PSpice	31
3.7 ผลการจำลองการทำงาน $V_{sw}$ , $V_{D_1}$ และ $V_{D_2}$	32
3.8 ผลการจำลองการทำงาน $V_{sw}$ , $V_{D_3}$ , $V_{D_4}$ และ $V_{D_5}$	32
3.9 ผลการจำลองการทำงาน $V_{sw}$ , $V_1$ และ $V_2$	33
3.10 ผลการจำลองการทำงาน $V_{sw}$ และ $i_{sw}$	33
3.11 ผลการจำลองการทำงาน $V_{sw}$ , $i_{D_1}$ และ $i_{D_2}$	34
3.12 ผลการจำลองการทำงาน $V_{sw}$ , $i_{D_3}$ , $i_{D_4}$ และ $i_{D_5}$	34
3.13 ผลการจำลองการทำงาน $V_{sw}$ , $i_{C_1}$ , $i_{C_2}$ และ $i_{C_3}$	35
4.1 ภาพถ่ายวงจรต้นแบบ	37
4.2 Schematic ของวงจรต้นแบบ	38
4.3 สัญญาณดิฟเฟอเรนเชียลเมื่อ $I_o = 0.27A$ และ $V_i = 30V$	39
4.4 สัญญาณดิฟเฟอเรนเชียลเมื่อ $I_o = 0.27A$ และ $V_i = 35V$	39
4.5 สัญญาณดิฟเฟอเรนเชียลเมื่อ $I_o = 0.27A$ และ $V_i = 40V$	40
4.6 สัญญาณดิฟเฟอเรนเชียลเมื่อ $I_o = 0.36A$ และ $V_i = 30V$	40
4.7 สัญญาณดิฟเฟอเรนเชียลเมื่อ $I_o = 0.36A$ และ $V_i = 35V$	40
4.8 สัญญาณดิฟเฟอเรนเชียลเมื่อ $I_o = 0.36A$ และ $V_i = 40V$	41
4.9 สัญญาณดิฟเฟอเรนเชียลเมื่อ $I_o = 0.39A$ และ $V_i = 30V$	41
4.10 สัญญาณดิฟเฟอเรนเชียลเมื่อ $I_o = 0.39A$ และ $V_i = 35V$	41
4.11 สัญญาณดิฟเฟอเรนเชียลเมื่อ $I_o = 0.39A$ และ $V_i = 40V$	42
4.12 สัญญาณดิฟเฟอเรนเชียลเมื่อ $I_o = 0.47A$ และ $V_i = 30V$	42
4.13 สัญญาณดิฟเฟอเรนเชียลเมื่อ $I_o = 0.47A$ และ $V_i = 35V$	42
4.14 สัญญาณดิฟเฟอเรนเชียลเมื่อ $I_o = 0.47A$ และ $V_i = 40V$	43



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.33 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าขาเข้าและรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของไดโอด $D_1$ และ $D_2$ เมื่อ $I_o = 0.39A$ และ $V_i = 30V$	52
4.34 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าขาเข้าและรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของไดโอด $D_1$ และ $D_2$ เมื่อ $I_o = 0.39A$ และ $V_i = 35V$	52
4.35 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าขาเข้าและรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของไดโอด $D_1$ และ $D_2$ เมื่อ $I_o = 0.39A$ และ $V_i = 40V$	53
4.36 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าขาเข้าและรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของไดโอด $D_1$ และ $D_2$ เมื่อ $I_o = 0.47A$ และ $V_i = 30V$	53
4.37 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าขาเข้าและรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของไดโอด $D_1$ และ $D_2$ เมื่อ $I_o = 0.47A$ และ $V_i = 35V$	54
4.38 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าขาเข้าและรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของไดโอด $D_1$ และ $D_2$ เมื่อ $I_o = 0.47A$ และ $V_i = 40V$	54
4.39 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของสวิตช์และไดโอด $D_3$ เมื่อ $I_o = 0.27A$ และ $V_i = 30V$	57
4.40 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของสวิตช์และไดโอด $D_3$ เมื่อ $I_o = 0.27A$ และ $V_i = 35V$	57
4.41 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของสวิตช์และไดโอด $D_3$ เมื่อ $I_o = 0.27A$ และ $V_i = 40V$	58
4.42 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของสวิตช์และไดโอด $D_3$ เมื่อ $I_o = 0.36A$ และ $V_i = 30V$	58
4.43 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของสวิตช์และไดโอด $D_3$ เมื่อ $I_o = 0.36A$ และ $V_i = 35V$	58
4.44 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของสวิตช์และไดโอด $D_3$ เมื่อ $I_o = 0.36A$ และ $V_i = 40V$	59
4.45 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของสวิตช์และไดโอด $D_3$ เมื่อ $I_o = 0.39A$ และ $V_i = 30V$	59
4.46 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของสวิตช์และไดโอด $D_3$ เมื่อ $I_o = 0.39A$ และ $V_i = 35V$	59
4.47 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของสวิตช์และไดโอด $D_3$ เมื่อ $I_o = 0.39A$ และ $V_i = 40V$	60
4.48 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของสวิตช์และไดโอด $D_3$ เมื่อ $I_o = 0.47A$ และ $V_i = 30V$	60
4.49 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของสวิตช์และไดโอด $D_3$ เมื่อ $I_o = 0.47A$ และ $V_i = 35V$	60
4.50 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของสวิตช์และไดโอด $D_3$ เมื่อ $I_o = 0.47A$ และ $V_i = 40V$	61
4.51 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมไดโอด $D_1$ และ $D_2$ เมื่อ $I_o = 0.27A$ และ $V_i = 30V$	63

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.52 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมไดโอด $D_1$ และ $D_2$ เมื่อ $I_o = 0.27A$ และ $V_i = 35V$	63
4.53 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมไดโอด $D_1$ และ $D_2$ เมื่อ $I_o = 0.27A$ และ $V_i = 40V$	64
4.54 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมไดโอด $D_1$ และ $D_2$ เมื่อ $I_o = 0.36A$ และ $V_i = 30V$	64
4.55 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมไดโอด $D_1$ และ $D_2$ เมื่อ $I_o = 0.36A$ และ $V_i = 35V$	64
4.56 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมไดโอด $D_1$ และ $D_2$ เมื่อ $I_o = 0.36A$ และ $V_i = 40V$	65
4.57 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมไดโอด $D_1$ และ $D_2$ เมื่อ $I_o = 0.39A$ และ $V_i = 30V$	65
4.58 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมไดโอด $D_1$ และ $D_2$ เมื่อ $I_o = 0.39A$ และ $V_i = 35V$	65
4.59 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมไดโอด $D_1$ และ $D_2$ เมื่อ $I_o = 0.39A$ และ $V_i = 40V$	66
4.60 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมไดโอด $D_1$ และ $D_2$ เมื่อ $I_o = 0.47A$ และ $V_i = 30V$	66
4.61 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมไดโอด $D_1$ และ $D_2$ เมื่อ $I_o = 0.47A$ และ $V_i = 35V$	66
4.62 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมไดโอด $D_1$ และ $D_2$ เมื่อ $I_o = 0.47A$ และ $V_i = 40V$	67
4.63 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมสวิตช์และไดโอด $D_3$ เมื่อ $I_o = 0.27A$ และ $V_i = 30V$	69
4.64 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมสวิตช์และไดโอด $D_3$ เมื่อ $I_o = 0.27A$ และ $V_i = 35V$	69
4.65 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมสวิตช์และไดโอด $D_3$ เมื่อ $I_o = 0.27A$ และ $V_i = 40V$	70
4.66 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมสวิตช์และไดโอด $D_3$ เมื่อ $I_o = 0.36A$ และ $V_i = 30V$	70
4.67 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมสวิตช์และไดโอด $D_3$ เมื่อ $I_o = 0.36A$ และ $V_i = 35V$	70
4.68 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมสวิตช์และไดโอด $D_3$ เมื่อ $I_o = 0.36A$ และ $V_i = 40V$	71
4.69 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมสวิตช์และไดโอด $D_3$ เมื่อ $I_o = 0.39A$ และ $V_i = 30V$	71
4.70 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมสวิตช์และไดโอด $D_3$ เมื่อ $I_o = 0.39A$ และ $V_i = 35V$	71
4.71 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมสวิตช์และไดโอด $D_3$ เมื่อ $I_o = 0.39A$ และ $V_i = 40V$	72
4.72 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมสวิตช์และไดโอด $D_3$ เมื่อ $I_o = 0.47A$ และ $V_i = 30V$	72
4.73 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมสวิตช์และไดโอด $D_3$ เมื่อ $I_o = 0.47A$ และ $V_i = 35V$	72
4.74 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมสวิตช์และไดโอด $D_3$ เมื่อ $I_o = 0.47A$ และ $V_i = 40V$	73
4.75 ประสิทธิภาพของวงจรที่แรงดันไฟฟ้าขาเข้าต่างๆ	76

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ตัวแปรและอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรต้นแบบ	28
4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในวงจร	37
4.2 การเปรียบเทียบค่าตัวชี้วัดระหว่างผลจากการวัด และผลจากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice	43
4.3 การเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าขาเข้าสูงสุดระหว่างผลจากการวัด และผลจากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice	55
4.4 การเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ไหลผ่านไดโอด D_1 ระหว่างผลจากการวัด และผลจากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice	55
4.5 การเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ไหลผ่านไดโอด D_2 ระหว่างผลจากการวัด และผลจากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice	55
4.6 ค่ากระแสไฟฟ้าขาเข้าสูงสุดจากการคำนวณ	56
4.7 ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ไหลผ่านไดโอด D_1 จากการคำนวณ	56
4.8 ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ไหลผ่านไดโอด D_2 จากการคำนวณ	56
4.9 การเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ไหลผ่านสวิตช์ระหว่างผลจากการวัด และผลจากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice	61
4.10 การเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไดโอด D_3 ระหว่างผลจากการวัด และผลจากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice	62
4.11 การเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าคร่อมไดโอด D_1 ระหว่างผลจากการวัด และผลจากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice	67
4.12 การเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าคร่อมไดโอด D_2 ระหว่างผลจากการวัด และผลจากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice	68
4.13 การเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าคร่อมสวิตช์ระหว่างผลจากการวัด และผลจากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice	73
4.14 การเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าคร่อมไดโอด D_3 ระหว่างผลจากการวัด และผลจากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice	74
4.15 ผลการวัดความสามารถในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าขาออก เมื่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้า และกระแสไฟฟ้าขาออกเปลี่ยนแปลง	75
4.16 ผลการวัดประสิทธิภาพของวงจรเมื่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้า และกระแสไฟฟ้าขาออกเปลี่ยนแปลง	76

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปริญญานิพนธ์

ปัจจุบันความต้องการใช้พลังงานที่มีเพิ่มมากขึ้น ทำให้ต้องหาวิธีการในการผลิตพลังงานให้ได้มากเพื่อตอบสนองกับระดับความต้องการ โดยไม่ทำลายสิ่งแวดล้อมเหมือนอย่างเชื้อเพลิงฟอสซิลที่นอกจากจะเป็นแหล่งพลังงานที่สิ้นเปลืองแล้ว ยังก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ ดังนั้นพลังงานทดแทน เช่น พลังงานลมและพลังงานแสงอาทิตย์ จึงเข้ามามีบทบาทอย่างมากในการผลิตพลังงาน แต่ด้วยข้อจำกัดของการผลิตส่งผลให้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ได้มีค่าน้อย อยู่ในช่วง 20V-40V สำหรับแต่ละแผงเซลล์แสงอาทิตย์ การจะเพิ่มแรงดันไฟฟ้านี้ให้อยู่ในระดับที่สามารถใช้งานได้ (100V-400V) จำเป็นต้องใช้วงจรเพิ่มแรงดันดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ เช่น วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ซึ่งต้องใช้ค่าดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) มากเพื่อให้ได้อัตราขยายแรงดันไฟฟ้าสูง อย่างไรก็ตามเมื่อค่าดิวตี้ไซเคิลมาก อัตราขยายแรงดันไฟฟ้า และประสิทธิภาพของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์จะลดลง เนื่องจากการสูญเสียภายในอุปกรณ์เกิดขึ้น เช่น ความต้านทานอนุกรมภายใน (Equivalent Series Resistance : ESR) ของขดลวดเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ความต้านทานในขณะที่สวิตช์ทำงาน ฯลฯ

ปริญญานิพนธ์นี้นำเสนอวงจรเพิ่มแรงดันดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่มีอัตราขยายสูงแบบใหม่ ซึ่งเกิดจากการนำวงจรสวิตช์คอปเปอร์อินดักเตอร์บูสต์คอนเวอร์เตอร์ (Switched Coupled Inductor (SCL) Boost Converter) มาต่อร่วมกับมัลติเลเวล (Multilevel) เมื่อเลือกอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดตัวเหนี่ยวนำร่วมกันที่เหมาะสม จะทำให้สามารถเพิ่มอัตราขยายได้ด้วยดิวตี้ไซเคิลปานกลาง

### 1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพของวงจรเพิ่มแรงดันดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่มีอัตราขยายสูง
2. เพื่อเสนอวงจรเพิ่มแรงดันดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่มีอัตราขยายสูงแบบใหม่

### 1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. วิเคราะห์การทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์ ที่นำเสนอที่สภาวะกระแสไฟฟ้าไหลต่อเนื่อง (Continuous Conduction Mode : CCM)
2. จำลองการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่นำเสนอด้วยโปรแกรม PSpice
3. ทดสอบและสร้างวงจรต้นแบบของวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่นำเสนอ

## 1.4 ขั้นตอนของการศึกษา

1. วิเคราะห์การทำงานของวงจร
2. ออกแบบวงจรและจำลองการทำงาน
3. ออกแบบแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB)
4. เตรียมอุปกรณ์สำหรับวงจรต้นแบบ
5. สร้างวงจรต้นแบบ
6. ทดสอบและพัฒนางจรต้นแบบ

## บทที่ 2

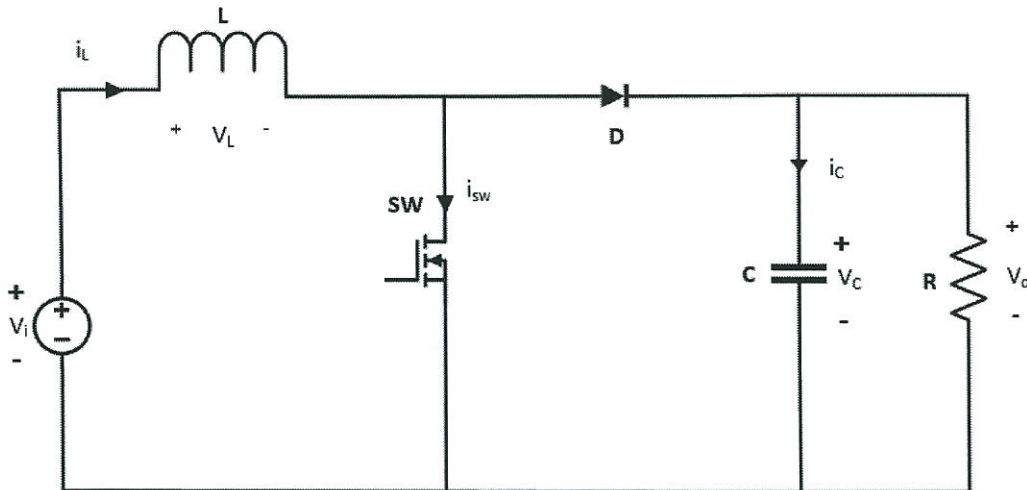
# ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 บทนำ

เนื่องจากข้อจำกัดในการผลิต ทำให้แหล่งพลังงานทดแทนสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าได้ต่ำ ยกตัวอย่างเช่น ถ้าเป็นแหล่งพลังงานแสงอาทิตย์ แต่ละแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าได้ประมาณ 20 โวลต์ ถึง 40 โวลต์ ในขณะที่ระดับที่สามารถนำไปใช้ได้จริงคือ 100 โวลต์ ถึง 400 โวลต์ ดังนั้นโครงงานนี้จึงได้นำเสนอวงจรเพิ่มแรงดันดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่มีอัตราขยายสูงแบบใหม่ ซึ่งเกิดจากการนำวงจรสวิตช์คอปเปอร์อินดักเตอร์บูสต์คอนเวอร์เตอร์ (Switched Coupled Inductor (SCL) Boost Converter) มาต่อร่วมกันกับ มัลติเลเวล (Multilevel) การเลือกอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดตัวเหนี่ยวนำร่วมกันที่เหมาะสม จะทำให้สามารถเพิ่มอัตราขยายได้ด้วยตัวดีไซ์เคลของสวิตช์ปานกลาง

### 2.2 วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ (Boost Converter) [1]

วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์เป็นวงจรเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง อุปกรณ์ภายในวงจรประกอบไปด้วยสวิตช์ตัวเหนี่ยวนำ ไดโอดและตัวเก็บประจุ โดยอัตราขยายจะขึ้นอยู่กับค่าดีไซ์เคล ดังรูปที่ 2.1

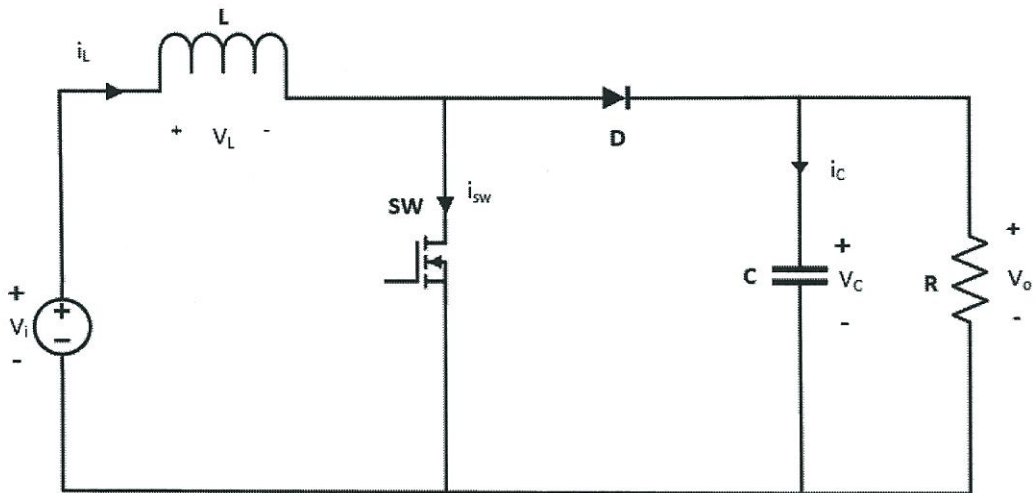


รูปที่ 2.1 อุปกรณ์ภายในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์

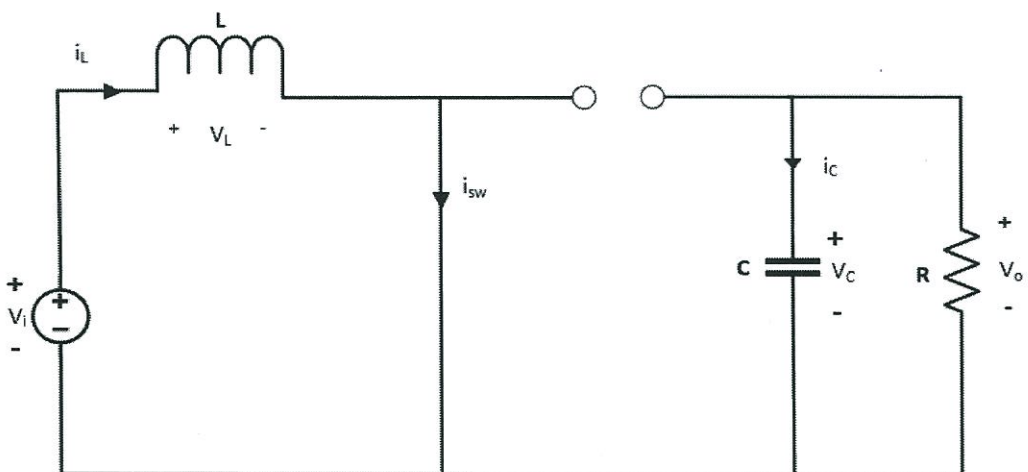
### 2.2.1 หลักการทำงานของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์

ข้อกำหนดในการวิเคราะห์วงจรมีดังนี้

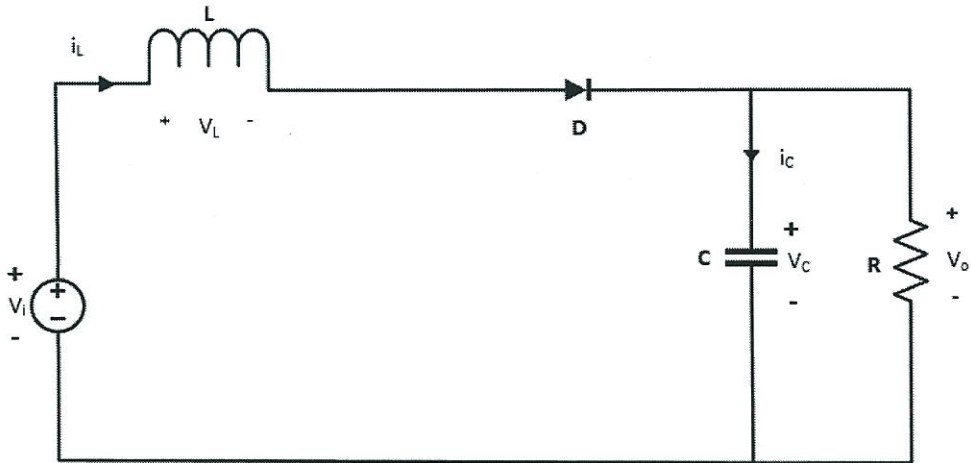
1. วงจรทำงานที่สภาวะคงที่
2. ให้คาบการทำงาน คือ  $T$  ช่วงที่สวิตช์ปิดวงจรไฟฟ้าคือ  $DT$  และช่วงที่สวิตช์เปิดวงจรไฟฟ้าคือ  $(1 - D)T$
3. กระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวเหนี่ยวนำไหลต่อเนื่อง (มีค่าเป็นบวก)
4. ตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่และแรงดันทางออกเป็นค่าคงที่
5. อุปกรณ์ภายในวงจรทั้งหมดถือว่ามีความเป็นอุดมคติ



รูปที่ 2.2 วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.3 วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์ช่วงสวิตช์ปิดวงจรไฟฟ้า



รูปที่ 2.4 วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์ช่วงสวิตช์เปิดวงจรไฟฟ้า

การวิเคราะห์ที่วงจรในช่วงสวิตช์ปิดวงจรไฟฟ้า เมื่อสวิตช์ปิดวงจรไฟฟ้าไดโอด D จะอยู่ในสถานะไม่นำกระแสไฟฟ้าจากกฎของแรงดันไฟฟ้าเคอร์ชอฟ จะได้ว่า

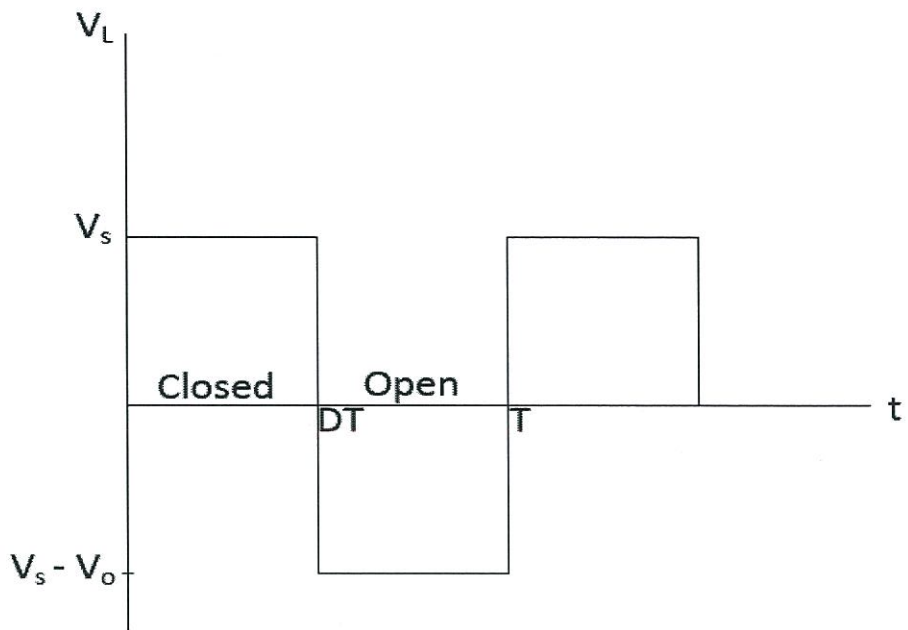
$$V_L = V_s = L \frac{di_L}{dt} \quad \text{หรือ} \quad \frac{di_L}{dt} = \frac{V_s}{L} \quad (2.1)$$

การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าเป็นค่าคงที่ เพราะฉะนั้นกระแสไฟฟ้าจะมีลักษณะเป็นเชิงเส้นในช่วงที่สวิตช์ปิดวงจร ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งทำให้สามารถหาค่าการเปลี่ยนแปลงของตัวเหนี่ยวนำได้จาก

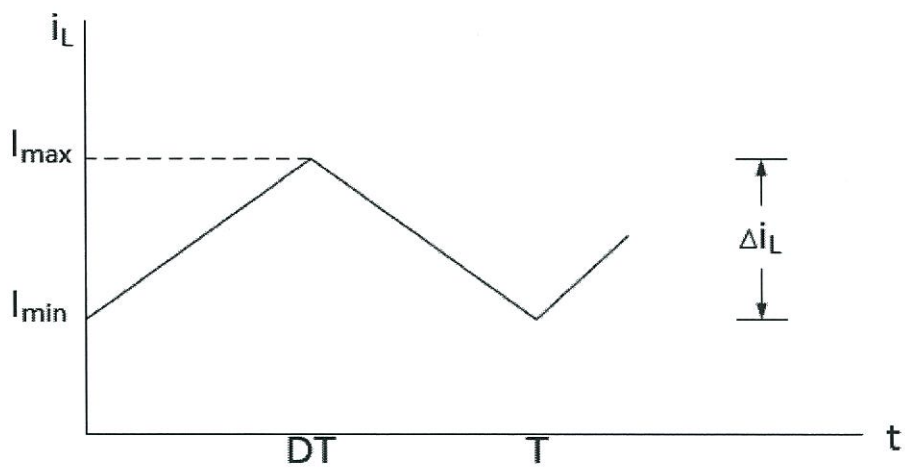
$$\frac{\Delta i_L}{\Delta} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_s}{L}$$

จะได้

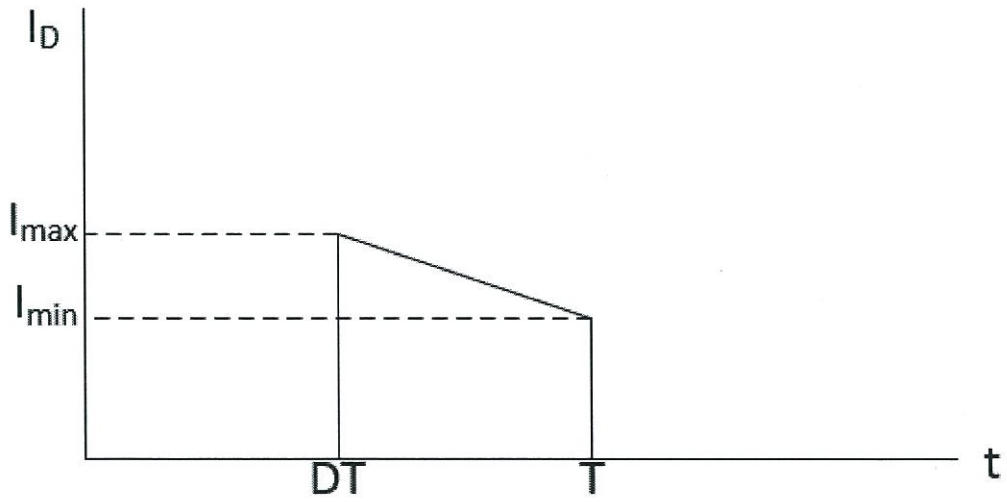
$$(\Delta i_L)_{closed} = \frac{V_s DT}{L} \quad (2.2)$$



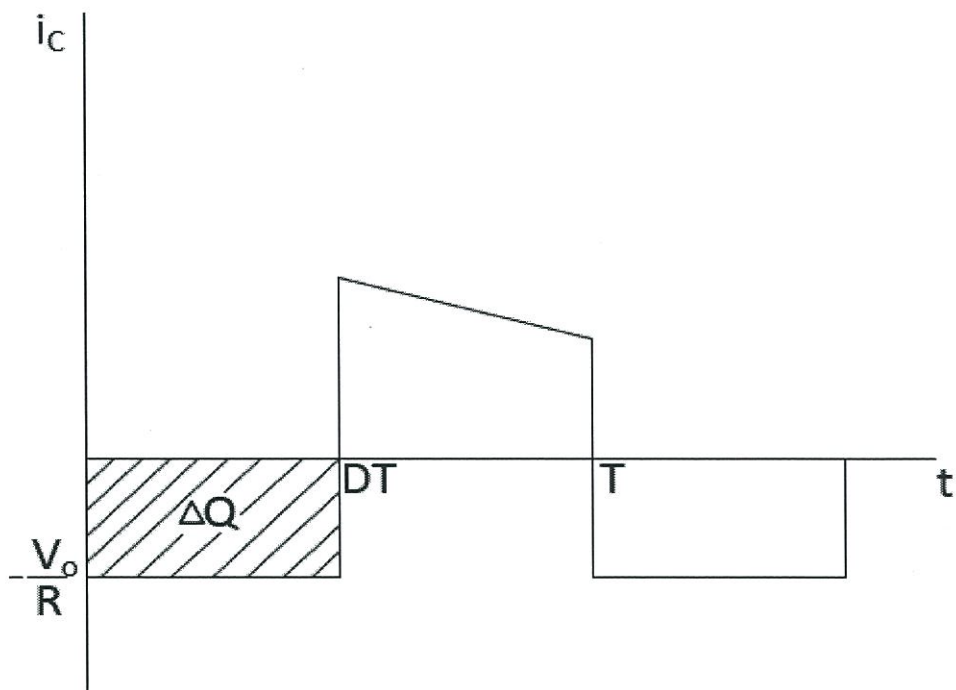
รูปที่ 2.5 แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.6 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.7 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไดโอดของวงจรมุสตัคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.8 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุของวงจรมุสตัคอนเวอร์เตอร์

การวิเคราะห์วงจรในช่วงสวิตช์เปิดวงจรไฟฟ้า เมื่อสวิตช์เปิดวงจรกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำนั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด ส่งผลให้ไดโอดนำกระแสไฟฟ้าให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง สามารถหาแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมที่ตัวเหนี่ยวนำจาก

$$V_L = V_s - V_o = L \frac{di_L}{dt}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L} \quad (2.3)$$

กระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำไม่มีการเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้กระแสไฟฟ้านั้นมีลักษณะเชิงเส้น ในช่วงที่สวิตช์เปิดวงจร จะได้ว่าการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำในช่วงสวิตช์เปิดวงจรคือ

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = \frac{V_s - V_o}{L}$$

$$(\Delta i_L)_{open} = \frac{(V_s - V_o)(1-D)T}{L} \quad (2.4)$$

วงจรทำงานที่สภาวะคงที่ กระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำไม่มีการเปลี่ยนแปลง จะได้

$$(\Delta i_L)_{closed} + (\Delta i_L)_{open} = 0$$

$$\frac{V_s DT}{L} + \frac{(V_s - V_o)(1-D)T}{L} = 0$$

$$V_o = \frac{V_s}{1-D} \quad (2.5)$$

จากสมการที่ (2.5) แสดงให้เห็นว่าในกรณีที่สวิตช์เปิดวงจรไฟฟ้า และค่า D มีค่าเป็นศูนย์ แรงดันไฟฟ้าที่ขาออกจะมีขนาดเท่ากับแรงดันไฟฟ้าด้านขาเข้า ในขณะที่เมื่อค่า D มีค่าเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าด้านขาออกนั้นมีค่าสูงมาก วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์เป็นวงจรที่ทำให้แรงดันไฟฟ้าด้านขาออกมีค่าเท่ากับหรือมากกว่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้าเสมอ ในกรณีที่ค่า D มีค่าเข้าใกล้ 1 จะพบว่าแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกจะมีค่าสูงได้แบบไม่จำกัด ซึ่งในความเป็นจริงนั้นจะมีผลจากตัวอุปกรณ์ที่ไม่เป็นอุดมคติซึ่งผลที่ได้ก็จะแตกต่างออกไป

กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของตัวเหนี่ยวนำนั้นสามารถหาได้จากพลังงานเฉลี่ยของแหล่งกำเนิด ซึ่งมีค่าเท่ากับพลังงานเฉลี่ยที่ถูกดูดซับด้วยโหลดตัวต้านทาน ทำให้พลังงานด้านขาออกมีค่าดังนี้

$$P_o = \frac{V_o^2}{R} = V_o I_o$$

พลังงานด้านขาเข้ามีค่า  $V_s I_s = V_s I_L$  ใช้สมการพลังงานด้านขาเข้าและด้านขาออกกับสมการที่ (2.5) จะได้

$$V_s I_L = \frac{V_o^2}{R} = \frac{V_s^2}{(1-D)^2} R$$

แก้สมการเพื่อหาค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของตัวเหนี่ยวนำและแทนค่า  $I_L$  จะได้

$$I_L = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} = \frac{V_o I_o}{V_s} \quad (2.6)$$

กระแสไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุดของตัวเหนี่ยวนำ หาได้โดยการใช้ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า

$$I_{max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} + \frac{V_s D T}{2L} \quad (2.7)$$

$$I_{min} = I_L - \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} - \frac{V_s D T}{2L} \quad (2.8)$$

สมการที่ (2.5) ได้จากการที่กระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำไหลอย่างต่อเนื่องซึ่งหมายความว่าค่าที่ได้จะเป็นบวกเสมอเงื่อนไขที่สำคัญของการหาคือ ให้  $I_{min}$  มีค่าเป็นบวก ดังนั้นจะได้ขอบเขตของกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำในช่วงไหลต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องจาก

$$I_{min} = 0 = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} - \frac{V_s D T}{2L}$$

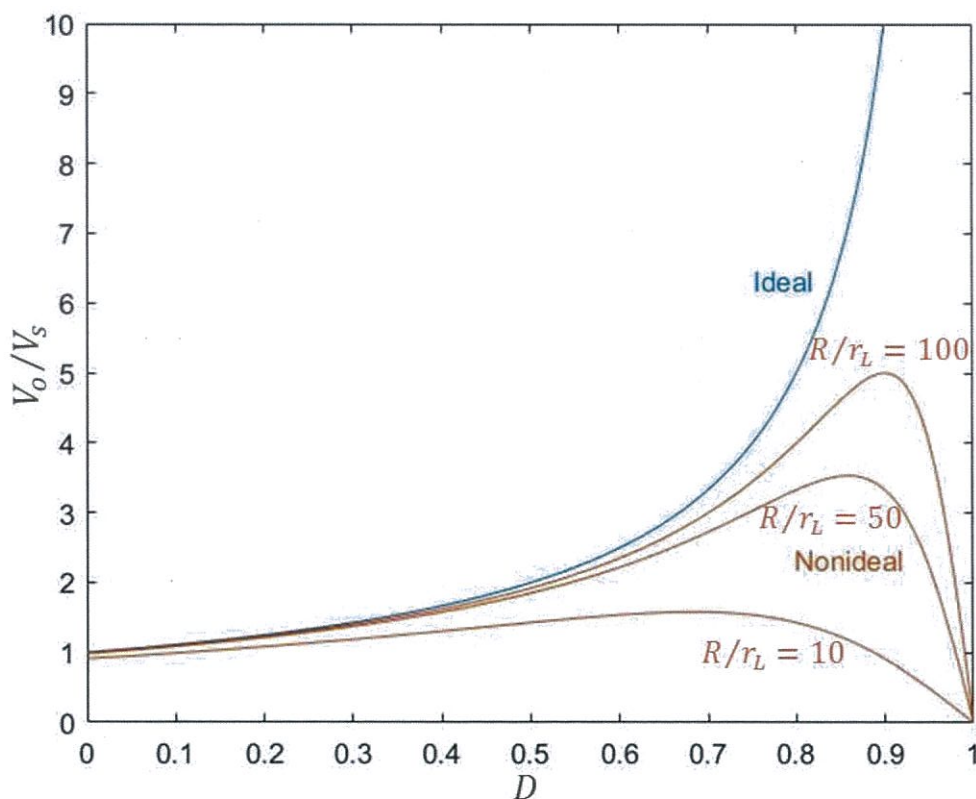
$$\frac{V_s}{(1-D)^2 R} = \frac{V_s D T}{2L} = \frac{V_s D}{2L f}$$

ค่าต่ำสุดของกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำกับสวิตช์ความถี่ในช่วงที่ไหลต่อเนื่องในวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์ จะได้

$$L_{min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f} \quad (2.9)$$

จากที่ได้กล่าวไปข้างต้นเกี่ยวกับอัตราขยายของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์ ในความเป็นจริงแล้ว เมื่อค่าตัวรีซิสเคิลสูงเกินไป จะทำให้ค่าอัตราขยายของวงจรมันลดลงเนื่องจากผลของความต้านภายในขดลวดตัวเหนี่ยวนำ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 และจะได้ค่าอัตราขยายของวงจรดังสมการด้านล่าง

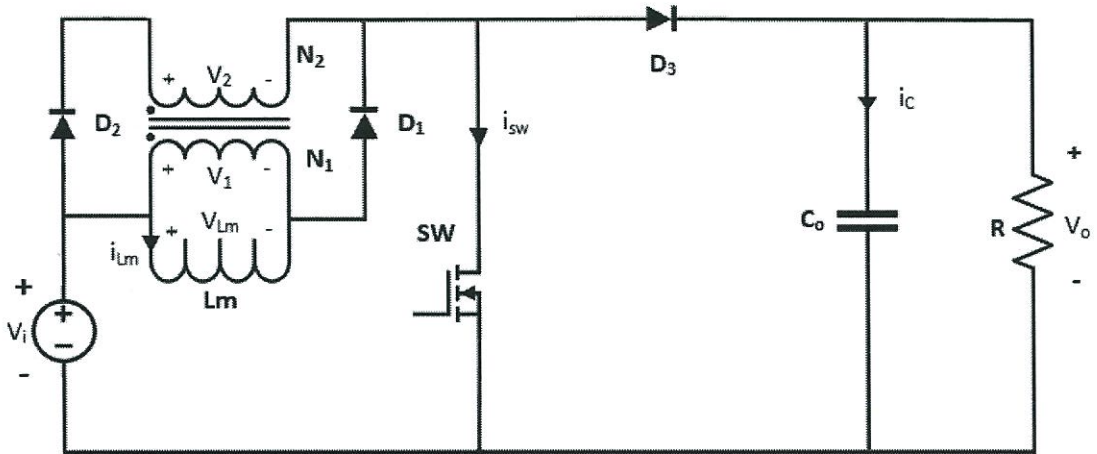
$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-D} \times \left( \frac{1}{1 + \frac{r_L}{R(1-D)^2}} \right)$$



รูปที่ 2.9 กราฟอัตราขยายกับค่าตัวรีซิสเคิลของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์ปกติ

## 2.3 วงจรสวิตช์คัปเปิลอินดักเตอร์บูสต์คอนเวอร์เตอร์ (Switched Coupled Inductor (SCL) Boost Converter) [2]

วงจรสวิตช์คัปเปิลอินดักเตอร์บูสต์คอนเวอร์เตอร์เป็นวงจร ที่พัฒนาโดยการแทนที่ตัวเหนี่ยวนำธรรมดาด้วยตัวเหนี่ยวนำร่วม เพื่อให้ได้อัตราขยายสูงโดยปราศจากการให้ค่าตัวชี้เซลล์ที่มากเกินไป ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 อุปกรณ์ภายในวงจรสวิตช์คัปเปิลอินดักเตอร์บูสต์คอนเวอร์เตอร์

### 2.3.1 หลักการทำงานของวงจรสวิตช์คัปเปิลอินดักเตอร์บูสต์คอนเวอร์เตอร์

จุดประสงค์ของวงจรคือ การให้  $N_1 < N_2$  ผลที่ได้คือ แรงดันไฟฟ้าที่ขาออกจะมีความมากกว่าแรงดันไฟฟ้าด้านขาเข้าเสมอ กำหนดให้  $T_{on} = t_1 - t_0$  และ  $T_{off} = t_2 - t_1$

โหมดที่ 1 ช่วงที่สวิตช์ปิดวงจรไฟฟ้าที่เวลา  $t_0$  สวิตช์จะอยู่ในสภาวะนำกระแสไฟฟ้าซึ่งส่งผลให้ไดโอด  $D_3$  อยู่ในสภาวะไม่นำกระแสไฟฟ้า ดังนั้นโหลดจะได้รับพลังงานที่ถูกสะสมไว้ใน  $C_o$  กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านขดลวด  $L_m$  เนื่องจาก  $D_1$  อยู่ในสภาวะนำกระแสไฟฟ้า เกิดการเก็บพลังงานที่ขดลวด  $L_m$  จากค่าที่ต่ำที่สุด ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ขดลวด  $N_1$  สะท้อนมาที่ขดลวด  $N_2$  ส่งผลให้  $D_2$  อยู่ในสภาวะที่ไม่นำกระแสไฟฟ้า จากกฎแรงดันของเคอร์ชอฟ จะได้ว่า

$$V_1(t) = V_i \quad (2.9)$$

$$V_2(t) = \frac{N_2}{N_1} V_i \quad (2.10)$$

$$i_{L_m}(t) = \frac{V_i}{L_m}t + I_{L_m \min} \quad (2.11)$$

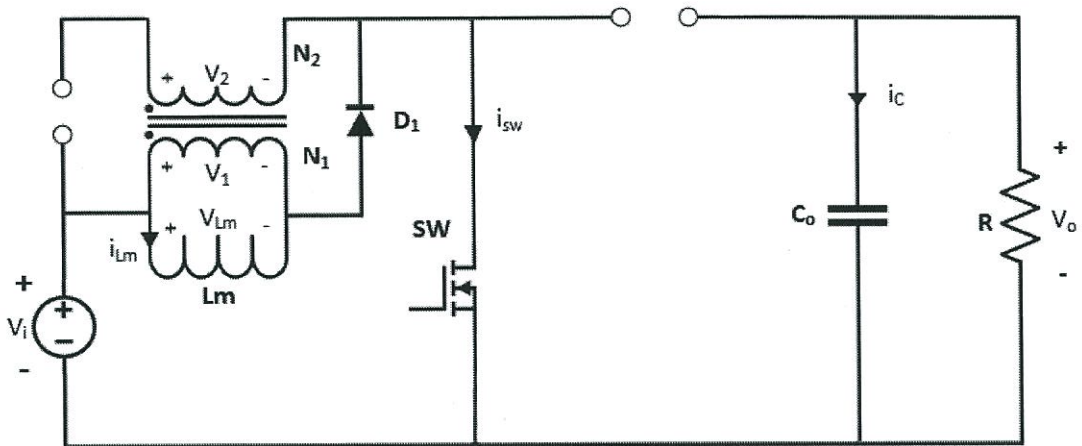
$$V_{D_2}(t) = \left(1 - \frac{N_2}{N_1}\right)V_i \quad (2.12)$$

$$V_{D_3}(t) = -V_o \quad (2.13)$$

$$i_{C_i}(t) = -\frac{V_i}{L_m}t - I_{L_m \min} + I_i \quad (2.14)$$

$$i_{C_o}(t) = -I_o \quad (2.15)$$

สมการที่ (2.9) ถึงสมการที่ (2.15) แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ในช่วงที่สวิตช์ปิดวงจรไฟฟ้า ( $t_0 \leq t \leq t_1$ )



รูปที่ 2.11 วงจรสวิตช์คัปเปิลอินดักเตอร์บูสต์คอนเวอร์เตอร์ในช่วงที่สวิตช์ปิดวงจรไฟฟ้า

โหมดที่ 2 ช่วงที่สวิตช์เปิดวงจรไฟฟ้า ( $t_1 - t_2$ ) และขดลวด  $L_m$  หยุดสะสมพลังงาน  $N_2$  จะเกิดการกลับขั้วเนื่องจาก  $D_2$  และ  $D_3$  อยู่ในสภาวะนำกระแสไฟฟ้า พลังงานที่ถูกสะสมไว้จะถูกเหนี่ยวนำส่งให้กับขดลวด  $N_2$  และจ่ายพลังงานนั้นให้กับ  $C_o$  และโหลด เป็นผลให้กระแสไฟฟ้าที่  $N_2$  ลดลงจากค่าสูงสุด จากกฎแรงดันของเคอร์ชอฟจะได้

$$V_2(t) = V_i - V_o \quad (2.16)$$

$$i_2(t) = \frac{V_i - V_o}{\left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 L_m} (t - T_{on}) + I_{L_2 max} \quad (2.17)$$

$$V_1(t) = \frac{N_1}{N_2} (V_i - V_o) \quad (2.18)$$

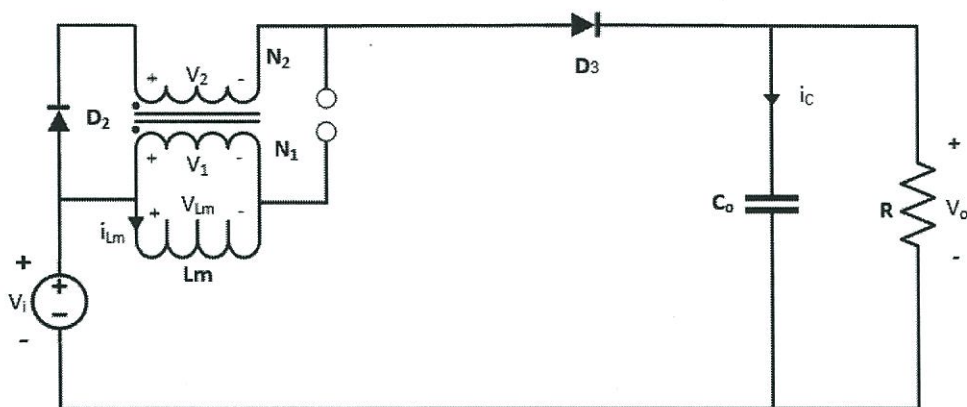
$$V_{D_1}(t) = \left(1 - \frac{N_1}{N_2}\right) (V_i - V_o) \quad (2.19)$$

$$V_{D_5}(t) = V_o \quad (2.20)$$

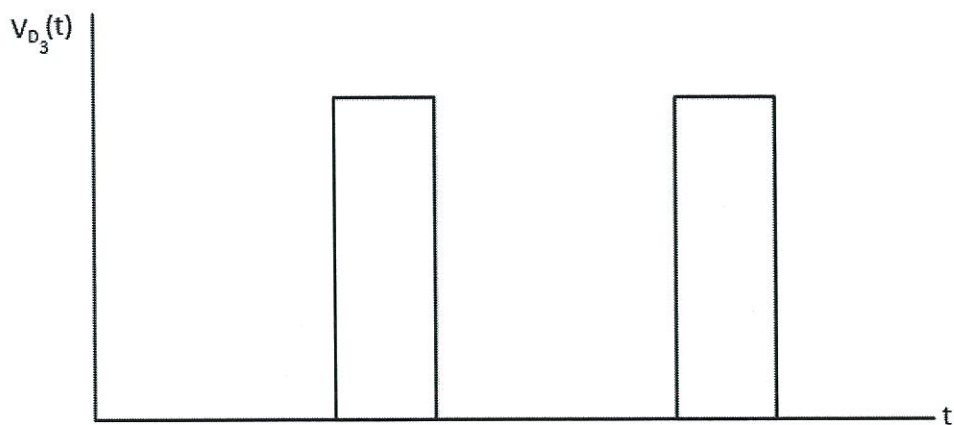
$$i_{C_i}(t) = I_i - \frac{V_i - V_o}{\left(\frac{N_2}{N_1}\right) L_m} (t - T_{on}) - I_{L_2 max} \quad (2.21)$$

$$i_{C_o}(t) = \frac{V_i - V_o}{\left(\frac{N_2}{N_1}\right) L_m} (t - T_{on}) + I_{L_2 max} - I_o \quad (2.22)$$

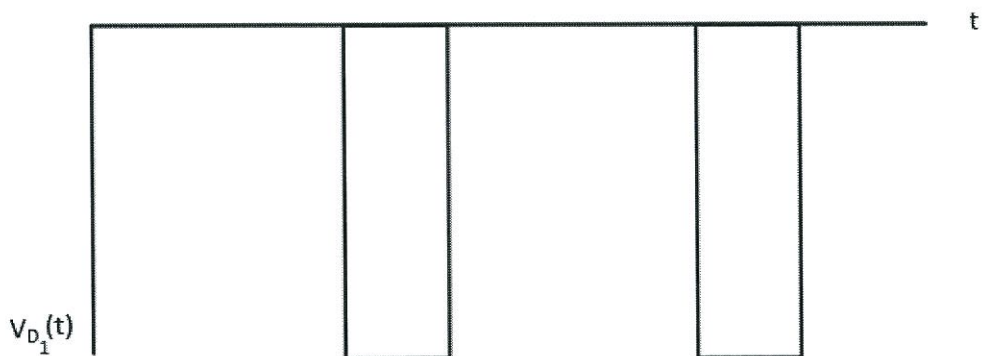
สมการที่ (2.16) ถึงสมการที่ (2.22) แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ในช่วงที่สวิตช์เปิดวงจรไฟฟ้า ( $t_1 \leq t \leq t_2$ )



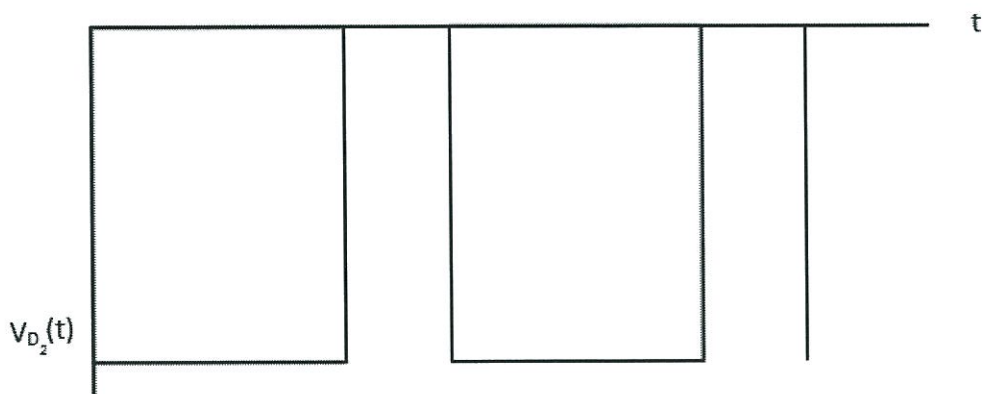
รูปที่ 2.12 วงจรสวิตช์ขับเคลื่อนอินดักเตอร์บูสต์คอนเวอร์เตอร์ในช่วงที่สวิตช์เปิดวงจรไฟฟ้า



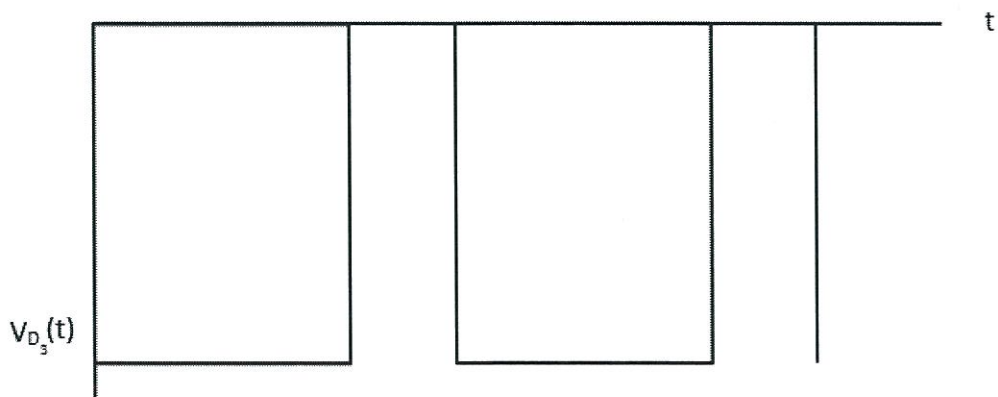
รูปที่ 2.13 แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมสวิตช์ของวงจรสวิตช์คัปเปิ้ลอินดักเตอร์บูสต์คอนเวอร์เตอร์



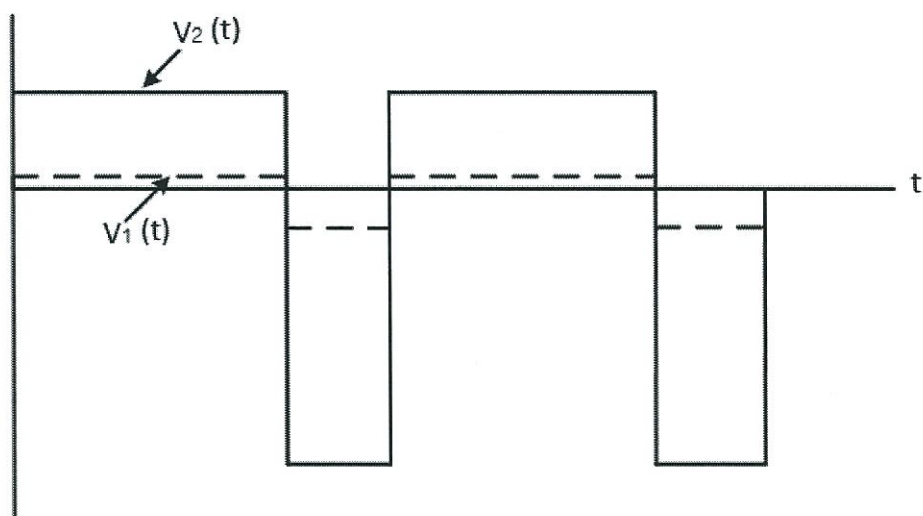
รูปที่ 2.14 แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมไดโอดตัวที่ 1 ของวงจรสวิตช์คัปเปิ้ลอินดักเตอร์บูสต์คอนเวอร์เตอร์



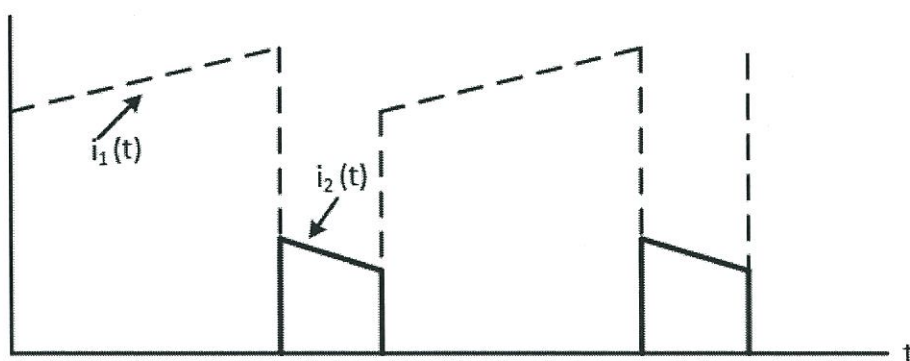
รูปที่ 2.15 แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมไดโอดตัวที่ 2 ของวงจรสวิตช์คัปเปิ้ลอินดักเตอร์บูสต์คอนเวอร์เตอร์



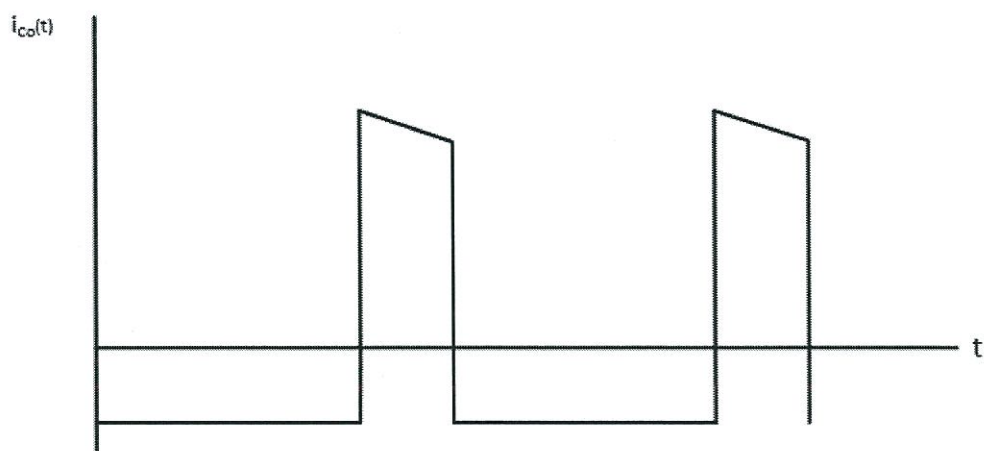
รูปที่ 2.16 แรงแดันไฟฟ้าตกคร่อมไดโอดตัวที่ 3 ของวงจรสวิตช์คัปเปิ้ลอินดักเตอร์บูสต์คอนเวอร์เตอร์



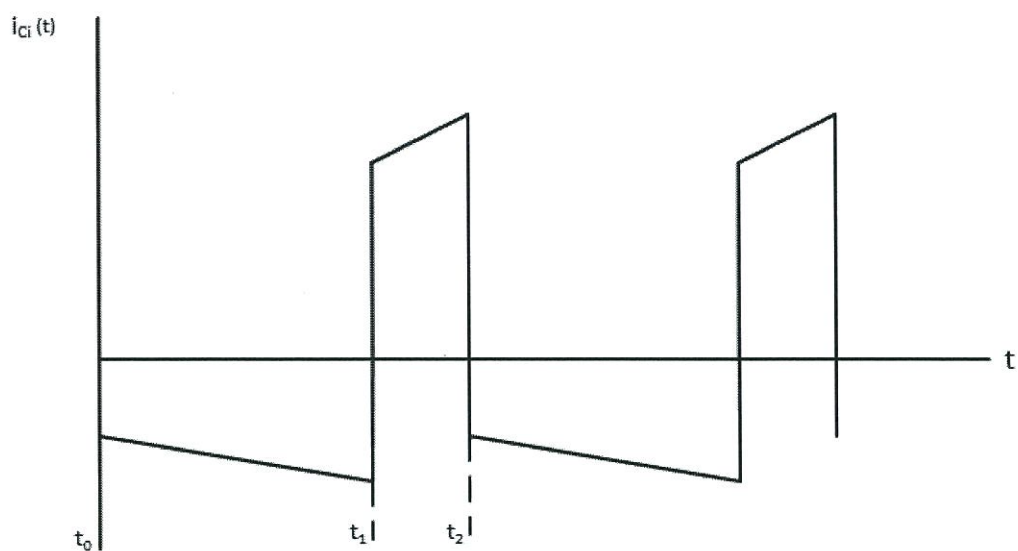
รูปที่ 2.17 แรงแดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำร่วมวงจรสวิตช์คัปเปิ้ลอินดักเตอร์บูสต์คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.18 กระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำร่วมวงจรสวิตช์คัปเปิ้ลอินดักเตอร์บูสต์คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.19 กระแสไฟฟ้าออกของตัวเก็บประจุของวงจรสวิตช์คัปเปิ้ลอินดักเตอร์บูสต์คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.20 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุของวงจรสวิตช์คัปเปิ้ลอินดักเตอร์บูสต์คอนเวอร์เตอร์

จากสมการที่ (2.9) และสมการที่ (2.18) สามารถหาอัตราขยายวงจรสวิตซ์คัปเปิ้ลอินดักเตอร์ได้ดังนี้

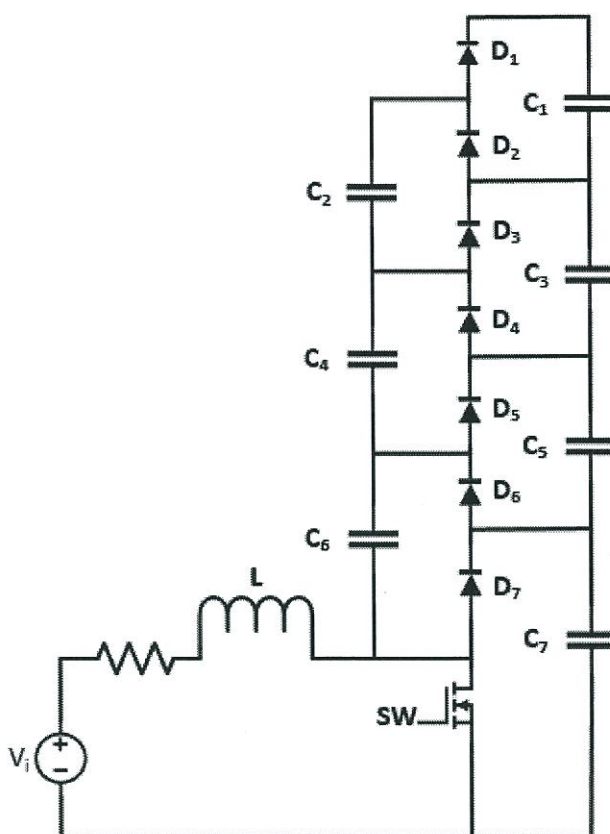
$$V_i T_{on} + \frac{N_1}{N_2} (V_i - V_o) T_{off} = 0$$

$$V_i \left( T_{on} + \frac{N_1}{N_2} T_{off} \right) = \frac{N_1}{N_2} V_o T_{off}$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{N_2}{N_1} \frac{T_{on}}{T_{off}} + 1 \quad (2.23)$$

## 2.4 วงจรมัลติเลเวล (Multilevel) [3]

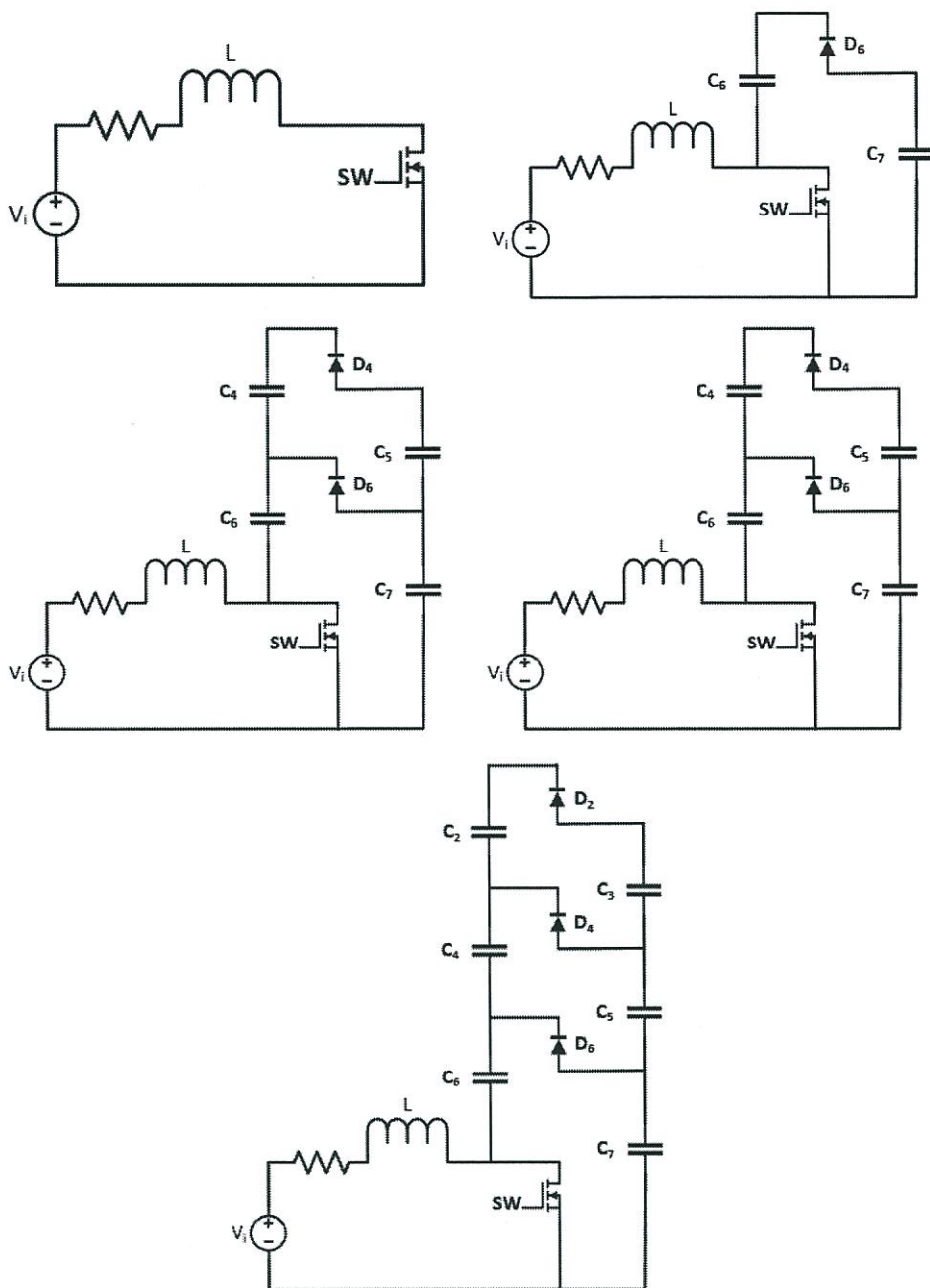
วงจรมัลติเลเวลเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ตัวเก็บประจุ ในการเก็บประจุจากความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายโดยต่อตัวเก็บประจุ  $2N - 1$  ตัว ขนานกับโหลดเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าที่โหลดมีค่าเป็น  $N$  เท่า ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 วงจรมัลติเลเวล 7 ระดับ

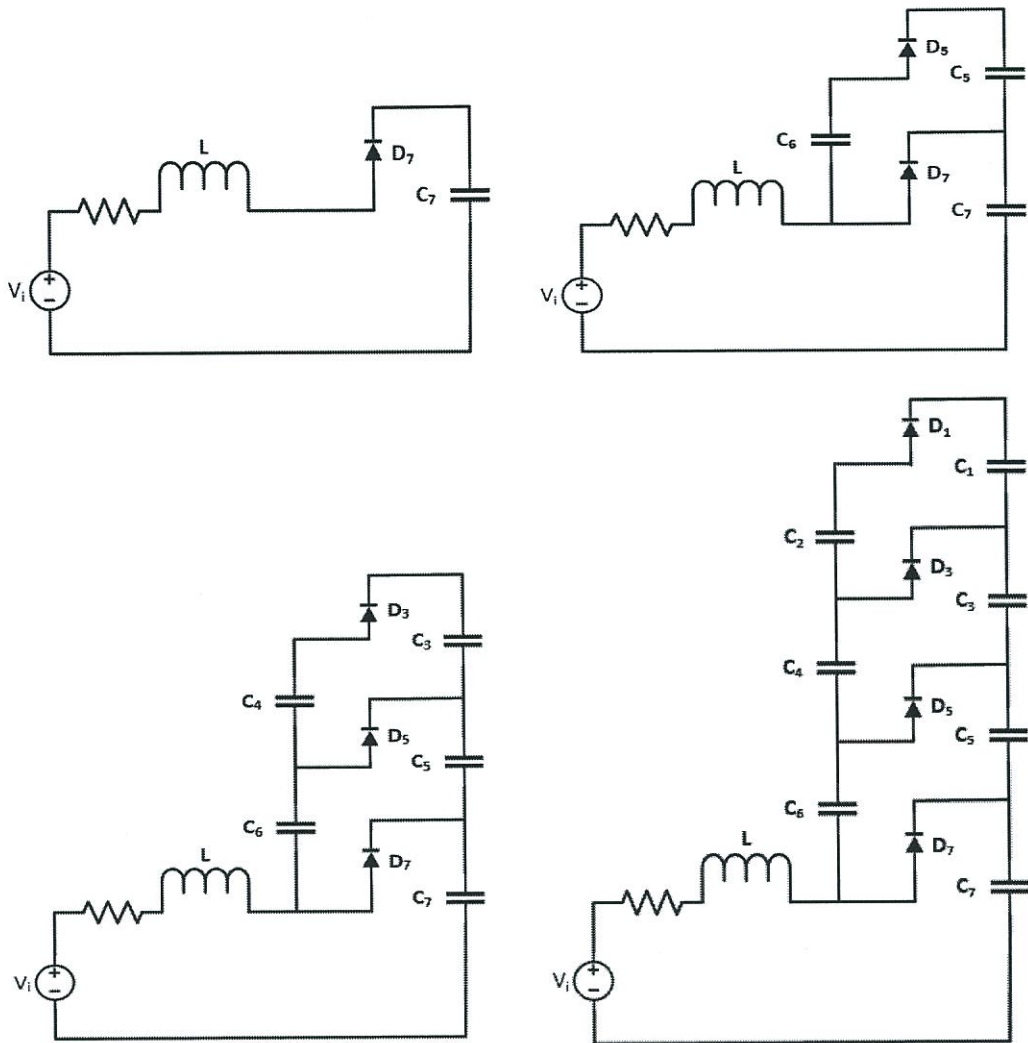
2.4.1 หลักการทำงานของวงจรมัลติเลเวล

โหมดที่ 1 ช่วงสวิตช์ปิดวงจรไฟฟ้า ขดลวดเหนี่ยวนำต่อกับแหล่งจ่าย ถ้า  $C_6$  มีค่าแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า  $C_7$  จะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าจาก  $C_7$  และสวิตช์จะตกคร่อม  $C_6$  ผ่าน  $D_6$  ในขณะเดียวกันถ้าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม  $C_4 + C_6$  มีค่าต่ำกว่า  $C_5 + C_7$  จะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าจาก  $C_5$  และ  $C_7$  ตกคร่อม  $C_4$  และ  $C_6$  ผ่านสวิตช์และ  $D_4$  ในทำนองเดียวกัน  $C_3$   $C_5$  และ  $C_7$  จะตกคร่อมให้กับ  $C_2$   $C_4$  และ  $C_6$  ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 วงจรมัลติเลเวลในช่วงที่สวิตช์ปิดวงจรไฟฟ้า

โหมดที่ 2 ช่วงสวิตช์เปิดวงจรไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าที่ตัวเหนี่ยวนำไหลผ่าน  $D_7$  ส่งผ่านประจุไฟฟ้าให้กับ  $C_7$  ขณะเดียวกันแรงดันไฟฟ้าที่  $C_6$  และ  $V_{in}$  จ่ายให้กับ  $C_5$  และ  $C_7$  ผ่าน  $D_5$  ในทำนองเดียวกันแรงดันไฟฟ้าจาก  $V_{in}$   $C_4$  และ  $C_6$  จะส่งผ่านให้  $C_3$   $C_5$  และ  $C_7$  ผ่าน  $D_3$  สุดท้ายแล้วแรงดันไฟฟ้าที่  $C_1$ ,  $C_3$ ,  $C_5$  และ  $C_7$  จะถูกจ่ายให้โดย  $C_2$ ,  $C_4$ ,  $C_6$ ,  $V_{in}$  และแรงดันไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำ ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 วงจรมัลติเลเวลในช่วงที่สวิตช์เปิดวงจรไฟฟ้า

### บทที่ 3

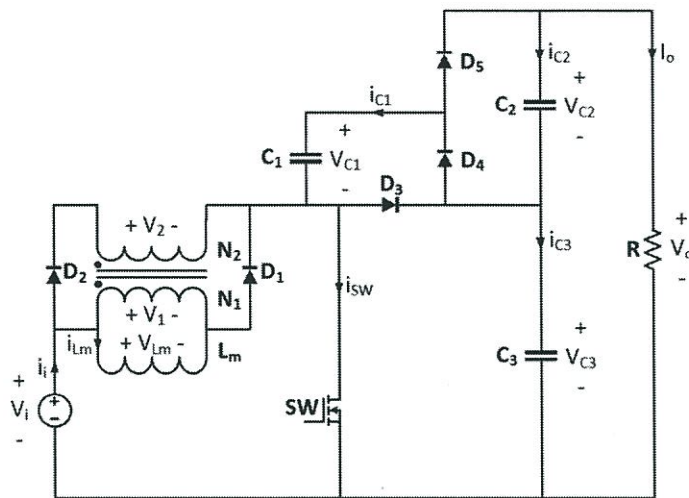
## วงจรสวิตช์คัปเปิ้ลอินดักเตอร์บูสต์คอนเวอร์เตอร์ ต่อร่วมกับมัลติเลเวล

### 3.1 บทนำ

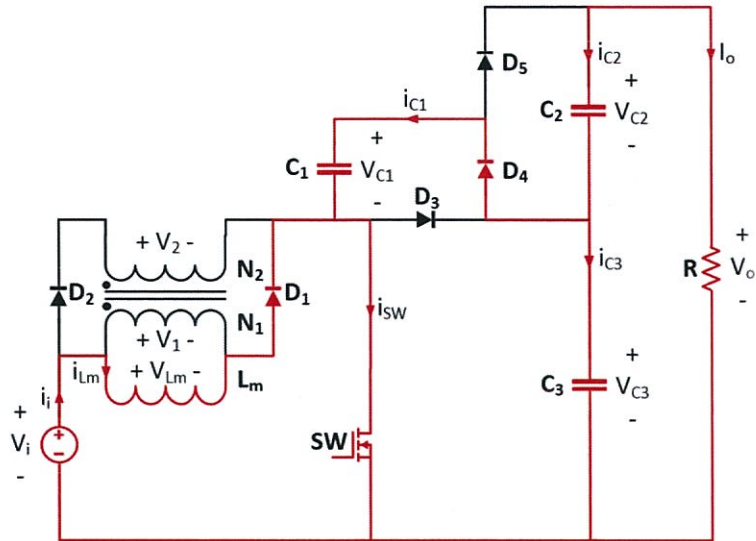
บทนี้นำเสนอการวิเคราะห์การทำงานของวงจรสวิตช์คัปเปิ้ลอินดักเตอร์บูสต์คอนเวอร์เตอร์ต่อร่วมกับมัลติเลเวลในทางอุดมคติ ผลลัพธ์ที่ได้คือ สมการแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและอัตราขยายของวงจร โดยความถูกต้องของผลการวิเคราะห์วงจรจะถูกยืนยันด้วยผลการทดสอบซึ่งจะแสดงในบทถัดไป

### 3.2 หลักการทำงานของวงจร

จากรูปที่ 3.1 แสดงวงจรสวิตช์คัปเปิ้ลอินดักเตอร์บูสต์คอนเวอร์เตอร์ต่อร่วมกับมัลติเลเวลสองระดับซึ่งสามารถทำงานได้ทั้งสภาวะกระแสไฟฟ้าไหลต่อเนื่อง (Continuous Conduction Mode : CCM) และสภาวะกระแสไฟฟ้าไหลไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Conduction Mode : DCM) แต่ในการศึกษาจะพิจารณาเฉพาะสภาวะกระแสไฟฟ้าไหลต่อเนื่องเท่านั้น



รูปที่ 3.1 วงจรสวิตช์คัปเปิ้ลอินดักเตอร์บูสต์คอนเวอร์เตอร์ต่อร่วมกับมัลติเลเวล



รูปที่ 3.2 วงจรในช่วงสวิตช์ปิดวงจรไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.2 แสดงรูปวงจรในช่วงเวลา  $0 \leq t \leq DT$  เมื่อสวิตช์ทำงานปิดวงจรไฟฟ้า ไดโอด  $D_1$  ไบอัสตรง (Forward Bias) ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L_m$  เพิ่มขึ้น ไดโอด  $D_3$  และ  $D_5$  ไบอัสกลับ (Reverse Bias) ในขณะที่ไดโอด  $D_4$  ไบอัสตรง แรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดด้านปฐมภูมิ ส่งผลถึงขดลวดด้านทุติยภูมิ ดังนั้น  $v_1 < v_2$  ทำให้ไดโอด  $D_2$  ไบอัสกลับ

สมการของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ไม่เป็นศูนย์ในขณะสวิตช์ปิดวงจรไฟฟ้า สามารถแสดงได้ดังนี้

$$v_{L_m} = V_i = L_m \frac{di_{L_m}}{dt} = L_m \frac{\Delta i_{L_m}}{\Delta t}$$

$$(\Delta i_{L_m})_{on} = \frac{V_{L_m} \Delta t}{L_m} = \frac{V_{L_m} DT}{L_m}$$

$$v_2 = \frac{N_2}{N_1} v_1 = \frac{N_2}{N_1} V_i$$

$$v_{D_2} = v_2 - v_1$$

$$v_{D_3} = V_{C_3} = V_{C_1}$$

$$V_o = V_{C_2} + V_{C_3}$$

$$v_{D_5} = V_{C_2}$$

$$i_{L_m} = i_i = i_{D_1}$$

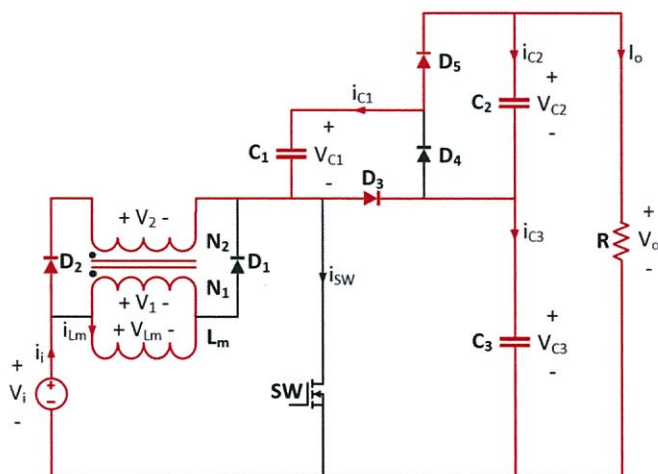
$$i_{SW} = i_{L_m} = i_{C_1}$$

$$i_{C_2} = i_{D_4} + i_{C_3}$$

$$i_{D_4} = i_{C_1}$$

$$i_o = -i_{C_2}$$

$$i_{C_3} = -I_o - i_{C_1}$$



รูปที่ 3.3 วงจรในช่วงสวิตช์เปิดวงจรไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.3 แสดงรูปวงจรในช่วงเวลา  $DT \leq t \leq T$  เมื่อสวิตช์ทำงานเปิดวงจรไฟฟ้า ตัวเหนี่ยวนำ  $L_m$  จะหยุดสะสมพลังงาน ขดลวดด้านทุติยภูมิเกิดการสลับขั้วทางไฟฟ้าทำให้ไดโอด  $D_2$ ,  $D_3$  และ  $D_5$  ไบอัสตรง ในขณะที่ไดโอด  $D_4$  ไบอัสกลับ พลังงานที่เก็บสะสมในตัวเหนี่ยวนำ  $L_m$  ถูกส่งไปยังขดลวดด้านทุติยภูมิแล้วจ่ายไปยังโหลด ทำให้กระแสไฟฟ้าของขดลวดด้านทุติยภูมิลดลงจากค่าสูงสุด ซึ่งแรงดันไฟฟ้าของขดลวดด้านทุติยภูมิส่งผลถึงกันกับขดลวดด้านปฐมภูมิด้วยทำให้ไดโอด  $D_1$  ไบอัสกลับ

สมการของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ไม่เป็นศูนย์ในขณะที่สวิตช์เปิดวงจรไฟฟ้า สามารถแสดงได้ดังนี้

$$v_2 = V_i - V_o + V_{C_1}$$

$$V_{C_1} = V_{C_2} = v_{D_4}$$

$$v_{D_1} = v_1 - v_2$$

$$v_{SW} = V_{C_3}$$

$$V_o = V_{C_2} + V_{C_3}$$

$$v_1 = v_{L_m} = L_m \frac{di_{L_m}}{dt}$$

$$v_1 = \frac{N_1}{N_2} [V_i - V_o + V_{C_1}] = \frac{1}{n} [V_i - V_o + V_{C_1}] \quad \text{โดยที่ } n = \frac{N_2}{N_1}$$

$$(\Delta i_{L_m})_{off} = \frac{[V_i - V_o + V_{C_1}](1-D)T}{nL_m} = \frac{(V_i - V_{C_3})(1-D)T}{nL_m}$$

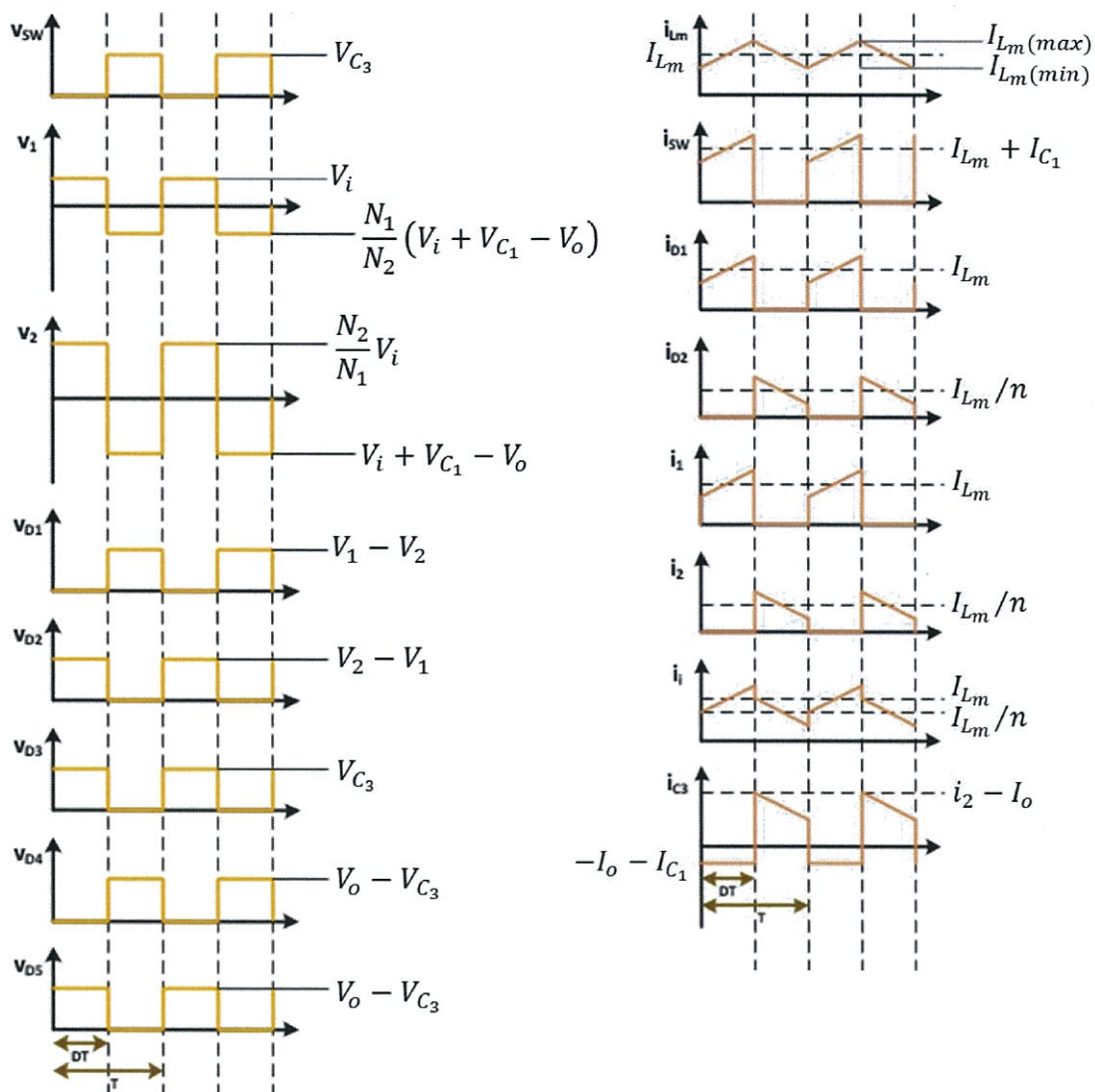
$$i_{L_m} = i_1 = ni_2$$

$$i_i = i_2 = i_{D_2} = i_{C_3} + I_o$$

$$i_{D_3} = i_{C_1} + i_2$$

$$i_{C_3} = i_{C_2} + i_{D_3}$$

$$i_{D_5} = i_{C_2} + i_o = -i_{C_1}$$



รูปที่ 3.4 กราฟของตัวแปรต่างๆ จากการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า

### 3.3 การวิเคราะห์ตัวแปรภายในวงจร

#### 3.3.1 อัตรายายวงจร

$$(\Delta i_{L_m})_{on} + (\Delta i_{L_m})_{off} = 0$$

$$\frac{V_{L_m}DT}{L_m} + \frac{V_i - V_o + V_{C_3}(1-D)T}{nL_m} = 0 \quad \text{โดยที่ } V_{L_m} = V_i \text{ และ } V_{C_1} = V_{C_3}$$

$$nV_{L_m}DT + (V_i - V_o + V_{C_3})(1-D)T = 0$$

$$V_o = \frac{nV_iD}{(1-D)} + V_i + V_{C_3} \quad (3.1)$$

$$\frac{V_iDT}{L_m} + \frac{(V_i - V_{C_3})(1-D)T}{nL_m} = 0$$

$$nV_iDT + (V_i - V_{C_3})(1-D)T = 0$$

$$V_{C_3} = \left[ \frac{nD+1-D}{1-D} \right] V_i \quad (3.2)$$

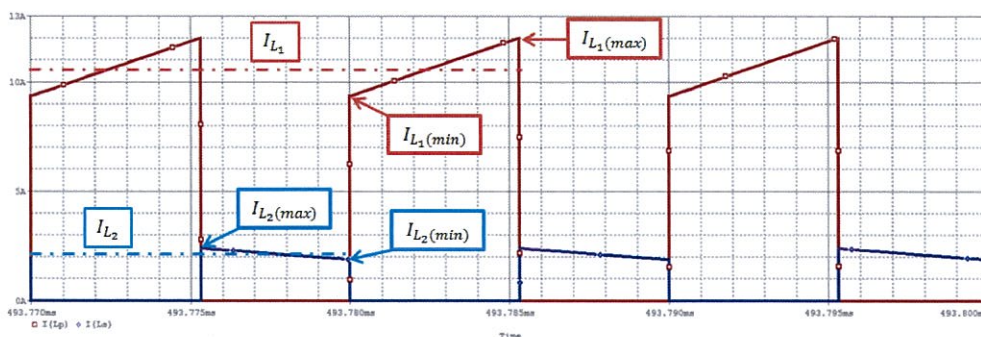
แทน  $V_{C_3}$  จากสมการที่ (3.2) ในสมการที่ (3.1) จะได้

$$V_o = \frac{nV_iD}{(1-D)} + V_i + \left[ \frac{nD+1-D}{1-D} \right] V_i$$

$$V_o = V_i \left[ \frac{2nD+2-2D}{1-D} \right]$$

$$\frac{V_o}{V_i} = 2 \left[ \frac{nD}{1-D} + 1 \right] \quad (3.3)$$

### 3.3.2 ค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำร่วม



รูปที่ 3.5 กระแสไฟฟ้าในขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิของตัวเหนี่ยวนำร่วม โดยใช้ PSpice Simulation

จากรูปที่ 3.5 กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแหล่งจ่าย ( $I_i$ ) ซึ่งไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำร่วมสามารถหาได้จากการหาพื้นที่ใต้กราฟของกระแสไฟฟ้าด้วยเวลาทั้งหมด

พื้นที่ใต้กราฟ A ในช่วงสวิตช์ปิดวงจรแสดงดังสมการด้านล่าง

$$I_1(DT) = I_{L_m}(DT)$$

พื้นที่ใต้กราฟ B ในช่วงสวิตช์เปิดวงจรแสดงดังสมการด้านล่าง

$$I_2(1 - D)T = \frac{N_1}{N_2} I_{L_m}(1 - D)T \text{ from } I_2 = \frac{N_1}{N_2} I_1$$

$$I_i = \frac{\text{Region A} + \text{Region B}}{T} = \frac{I_L(DT) + \frac{N_1}{N_2} I_L(1 - D)T}{T}$$

$$I_i = I_{L_m}D + \frac{N_1}{N_2} I_{L_m}(1 - D) \tag{3.4}$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานด้านแหล่งจ่ายและโหลด

$$V_i I_i = \frac{V_o^2}{R}$$

แทน  $V_o$  จากสมการที่ (3.3) และ  $I_i$  จากสมการที่ (3.4) จะได้

$$I_{L_m} = \frac{2\left[\frac{nD}{1-D}+1\right]I_o}{D+\left(\frac{1-D}{n}\right)} \quad (3.5)$$

$$I_{L_m(max)} = I_{L_m} - \frac{\Delta i_{L_m}}{2} = \frac{2\left[\frac{nD}{1-D}+1\right]I_o}{D+\left(\frac{1-D}{n}\right)} + \frac{V_i DT}{2L_m} \quad (3.6)$$

$$I_{L_m(min)} = I_{L_m} - \frac{\Delta i_{L_m}}{2} = \frac{2\left[\frac{nD}{1-D}+1\right]I_o}{D+\left(\frac{1-D}{n}\right)} - \frac{V_i DT}{2L_m} \quad (3.7)$$

คำนวณหา  $L_{min}$  จากการให้ค่า  $I_{L_m(min)} = 0$  จะได้

$$\frac{2\left[\frac{nD}{1-D}+1\right]I_o}{D+\left(\frac{1-D}{n}\right)} = \frac{V_i DT}{2L_m}$$

$$L_{min} = \frac{V_i D \left[D + \frac{1-D}{n}\right]}{4f I_o \left[\frac{nD}{1-D} + 1\right]} \quad (3.8)$$

คำนวณหาผลรวมทั้งหมดของค่าตัวเก็บประจุ

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \quad \text{โดยที่ } C_2 = C_3 = C$$

$$C_{eq} = \frac{C}{2}$$

คำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุจากกราฟกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

$$|\Delta Q| = \left(\frac{V_o}{R}\right) DT = C_{eq} \Delta V_o$$

$$C_{eq} = \frac{V_o DT}{R \Delta V_o}$$

$$C = \frac{2D}{R(\Delta V_o/V_o)f} \quad (3.9)$$

### 3.4 การออกแบบวงจร

#### 3.4.1 รายละเอียดในการออกแบบที่ต้องการ

แรงดันไฟฟ้าขาเข้า	$V_i = 30V - 40V$
แรงดันไฟฟ้าขาออก	$V_o = 400V$
ความถี่สวิตช์	$f_s = 100kHz$
กระแสไฟฟ้าขาออก	$I_o = 0.5A$
ค่าความต้านทานขาออก	$R_{min} = 800\Omega$
กำลังไฟฟ้าขาออก	$P_o = 200W$
ริปเปิลแรงดันของตัวเก็บประจุ	$\Delta V_o = 0.2\%V_o$
อัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวด	$\frac{N_2}{N_1} = 5$

#### 3.4.2 ออกแบบวงจรต้นแบบ

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรต้นแบบ

Duty cycle	$D = 0.5313$
Switch	Power MOSFET N-Channel $600V/47A, 120W$
Diode	Super Fast Recovery Diode $600V/20A$
Capacitor	Electrolytic capacitor $100\mu F/250V$
Primary winding inductor	$L_1 = 60\mu H$
Secondary winding inductor	$L_2 = 1500\mu H$
No. of turns at primary winding	$N_1 = 10 \text{ turns}$
No. of turns at secondary winding	$N_2 = 50 \text{ turns}$
Core	Ferrite core ETD-59 material N87 with $A_L = 5300 \text{ nH}$ and 0.50 mm gap ( $A_L = 2400 \text{ nH}$ )

กระบวนการในการหาค่าตัวแปรจากตารางด้านบน สามารถแสดงได้ดังนี้

### 3.4.2.1 คำนวณหาค่าตัวดีไซเคิล โดยใช้สมการที่ (3.3)

ให้อัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดเท่ากับ 5 จะได้

$$V_o = 2V_{C_1} = 2V_i \left[ 1 + \frac{N_2}{N_1} \left( \frac{D}{1-D} \right) \right]$$

$$D = 0.44$$

### 3.4.2.2 คำนวณหาค่าเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำรวม โดยใช้สมการที่ (3.8)

$$\text{แทน } \frac{N_2}{N_1} = 5, D = 0.5313, R = 800\Omega, f = 100\text{kHz};$$

$$L_{min} = \frac{V_{in}D \left[ D + \frac{1-D}{n} \right]}{4fI_o \left[ \frac{nD}{1-D} + 1 \right]}$$

$$L_{min} = 9.856\mu\text{H}$$

ให้ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้ามีค่ามากกว่า 25% จากที่คำนวณได้เพื่อให้มั่นใจได้ว่ากระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำอยู่ในสถานะกระแสไฟฟ้าไหลต่อเนื่อง

$$1.25L_{min} = 12.32\mu\text{H}$$

หาค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของขดลวดทุติยภูมิจากความสัมพันธ์  $\frac{L_1}{L_2} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2$  จะได้

$$L_2 = 25L_1$$

$$L_2 = 308\mu\text{H}$$

ดังนั้น ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่เลือกใช้คือ  $L_1 = 60\mu\text{H}$  และ  $L_2 = 1500\mu\text{H}$  เพื่อให้มั่นใจได้ว่าจะได้จำนวนรอบของขดลวดที่สามารถพันขึ้นได้จริง

### 3.4.2.3 คำนวณหาจำนวนรอบของตัวเหนี่ยวนำร่วม

จำนวนขดลวดของตัวเหนี่ยวนำร่วมสามารถหาได้โดยใช้สมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$L_N = A_L \times N^2 \times 10^{-3}$$

โดยที่  $L_N$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่  $N$  รอบ ( $\mu H$ )

$A_L$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าภายใน ( $nH/turn^2$ )

ให้

$$A_L = 2400nH, L_1 = 60\mu H, L_2 = 1500\mu H$$

คำนวณจำนวนรอบโดยใช้ความสัมพันธ์ด้านบนจะได้

$$N_1 = 10 \text{ turns} \text{ และ } N_2 = 50 \text{ turns}$$

### 3.4.2.4 หาขนาดของขดลวดสำหรับตัวเหนี่ยวนำร่วม

การออกแบบนี้จะทำการคิดที่ค่าความเครียดสูงสุดที่เกิดบนตัวเหนี่ยวนำร่วมกัน ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อ  $V_i = 30V$

จากการจำลองการทำงานวงจรด้วยโปรแกรม PSpice จะได้ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของขดลวดด้านปฐมภูมิเท่ากับ 6.3855A และขดลวดด้านทุติยภูมิเท่ากับ 1.1185 A ดังนั้นจึงจะใช้แผ่นทองแดงสำหรับขดลวดด้านปฐมภูมิและเส้นลวด AWG-26 ซึ่งสามารถทนกระแสไฟฟ้าสูงสุดได้ 0.361 A มัดละ 4 เส้น สำหรับขดลวดด้านทุติยภูมิ

### 3.4.2.5 คำนวณหาค่าตัวเก็บประจุ

แทนค่า  $D = 0.5313, R = 800\Omega, f = 100kHz, \Delta V_o/V_o = 0.002$  จะได้

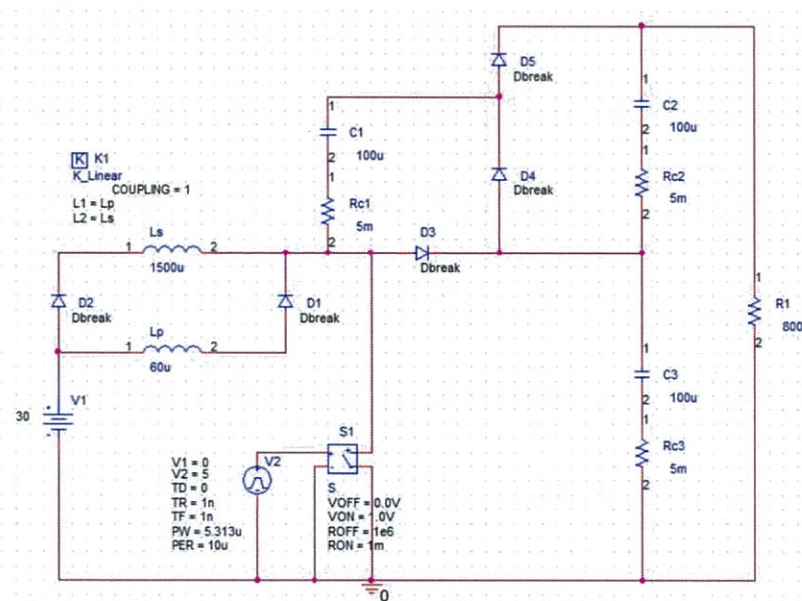
$$C = \frac{2D}{R(\Delta V_o/V_o)f} = 5.5\mu F$$

### 3.4.3 ค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของตัวเก็บประจุ ไดโอด และสวิตช์

ตารางที่ 3.2 ค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของตัวเก็บประจุ ไดโอด และสวิตช์ จากผลการจำลองการทำงานของวงจร

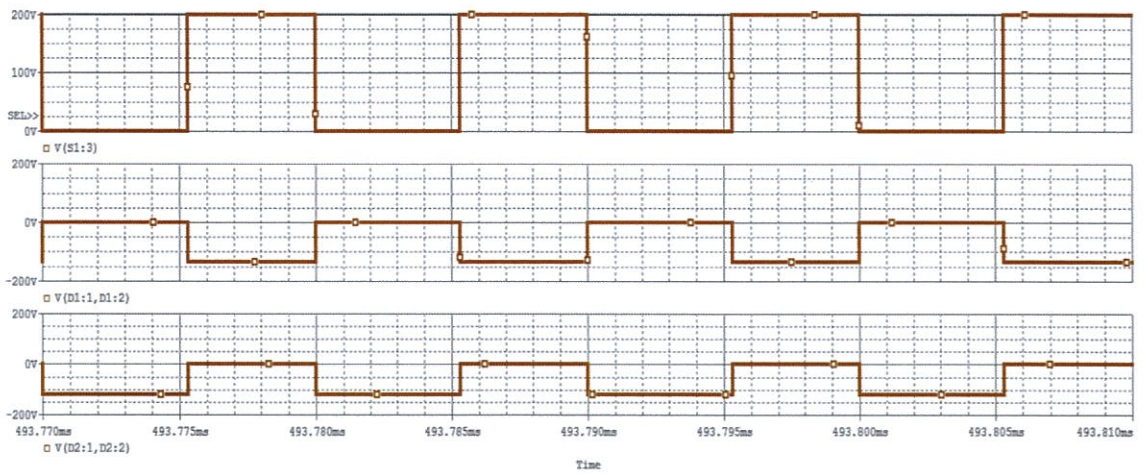
Components	Rated voltage (V)	Rated current (A)
C <sub>1</sub>	200	
C <sub>2</sub>	200	
C <sub>3</sub>	200	
D <sub>1</sub>	136.077	12.101
D <sub>2</sub>	119.948	2.4218
D <sub>3</sub>	200.008	2.0296
D <sub>4</sub>	199.985	9.748
D <sub>5</sub>	199.959	2.4204
Switch	200.078	19.194

### 3.5 ผลการจำลองการทำงานของวงจร

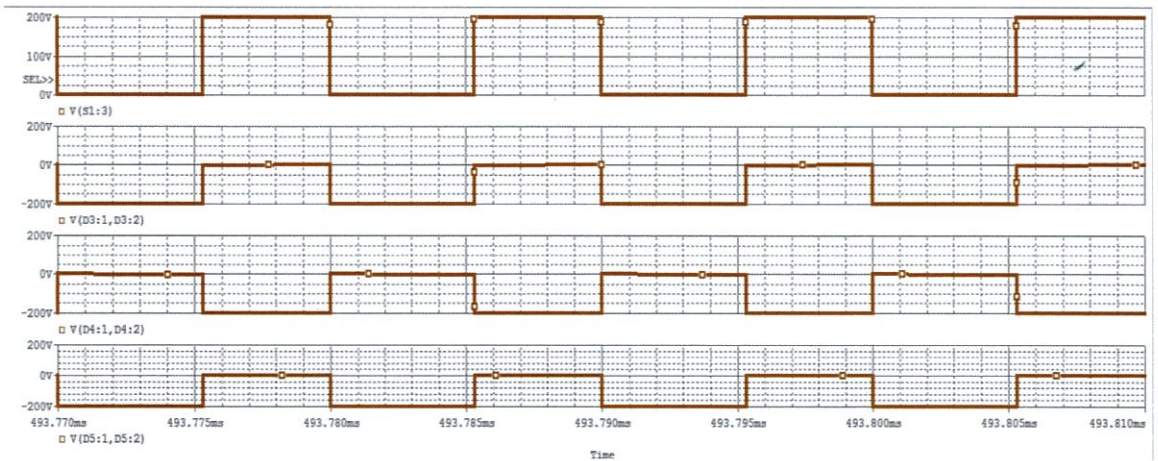


รูปที่ 3.6 ภาพจำลองวงจรโดยใช้โปรแกรม PSpice

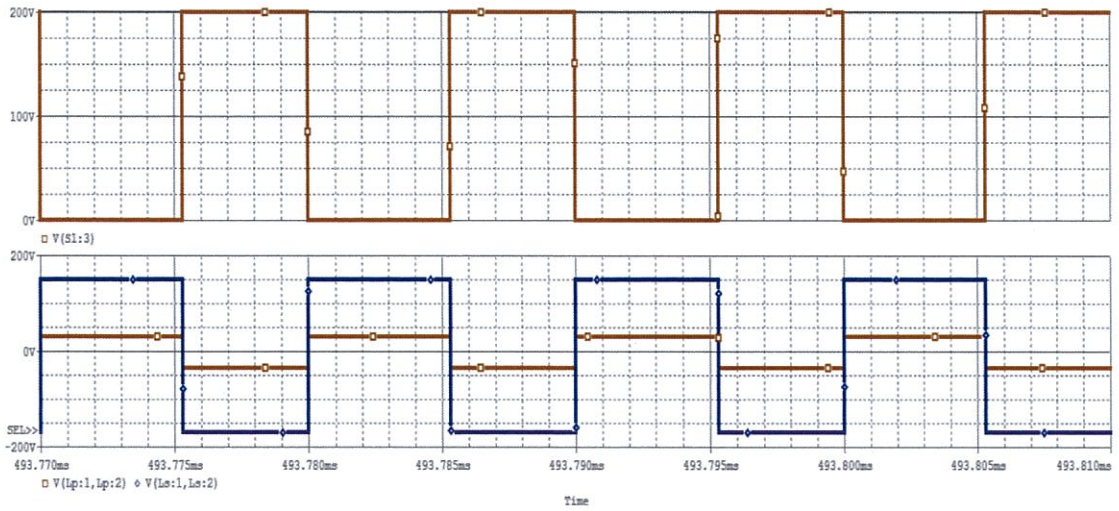
ผลการจำลองการทำงานของวงจรที่นำเสนอเมื่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้าเท่ากับ 30V สามารถแสดงได้ดังนี้



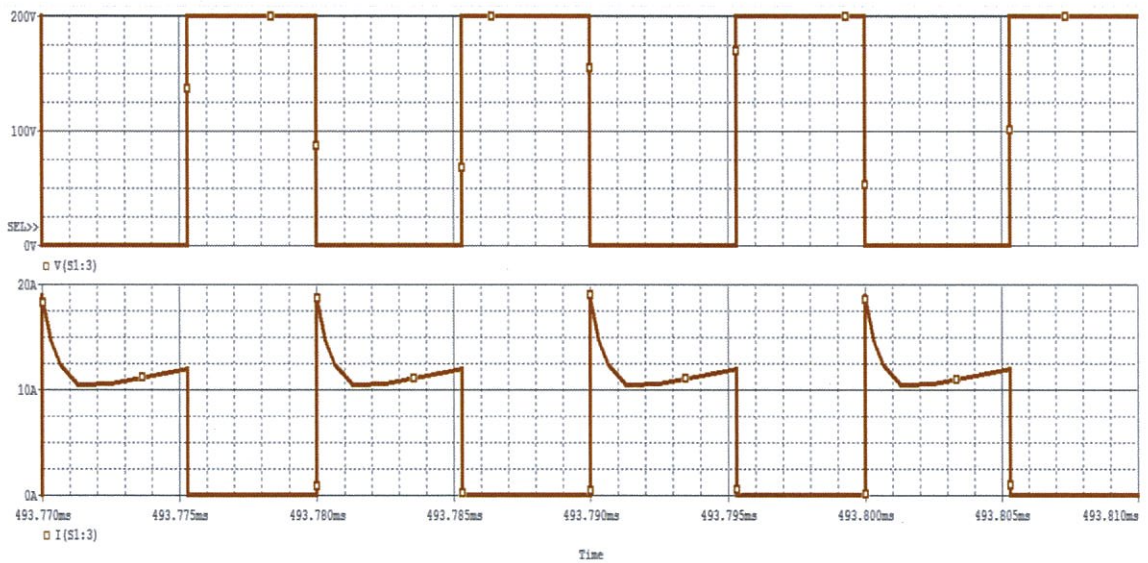
รูปที่ 3.7 ผลการจำลองการทำงานของ  $V_{sw}$ ,  $V_{D_1}$  และ  $V_{D_2}$  เรียงลำดับจากบนลงล่าง



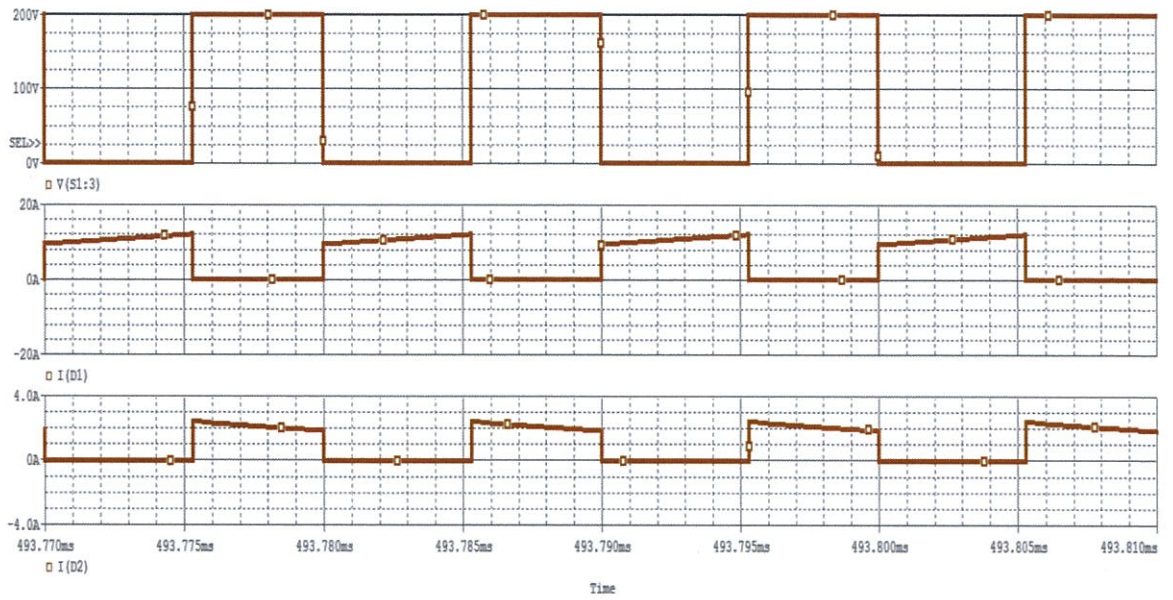
รูปที่ 3.8 ผลการจำลองการทำงานของ  $V_{sw}$ ,  $V_{D_3}$ ,  $V_{D_4}$  และ  $V_{D_5}$  เรียงลำดับจากบนลงล่าง



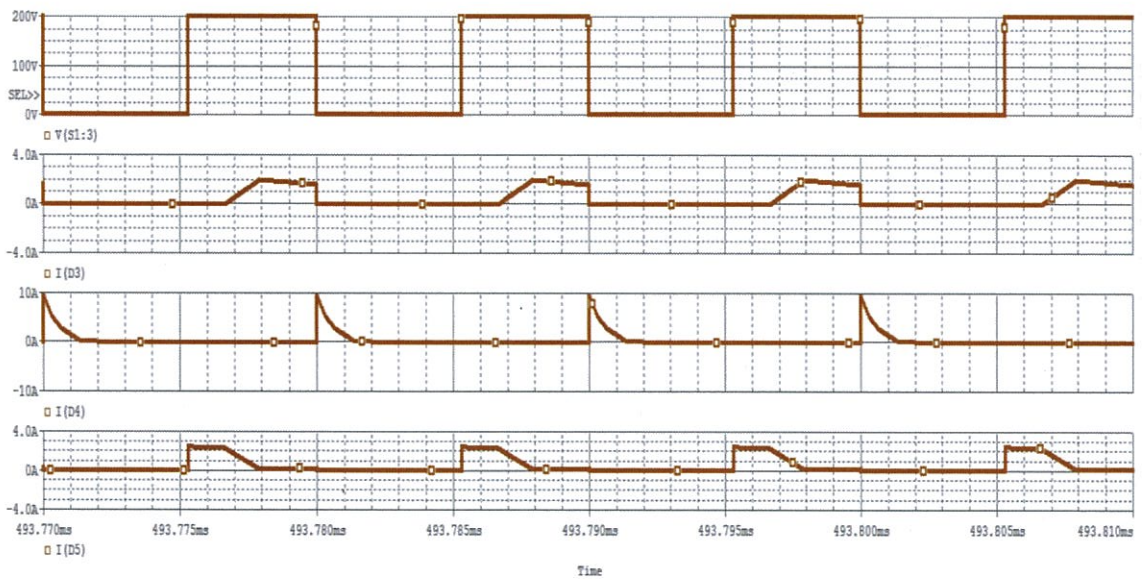
รูปที่ 3.9 ผลการจำลองการทำงาน  $V_{sw}$ ,  $V_1$  และ  $V_2$  โดยที่  $V_{sw}$  คือกราฟด้านบน  $V_1$  คือกราฟสีน้ำตาล และสีน้ำเงินคือ  $V_2$



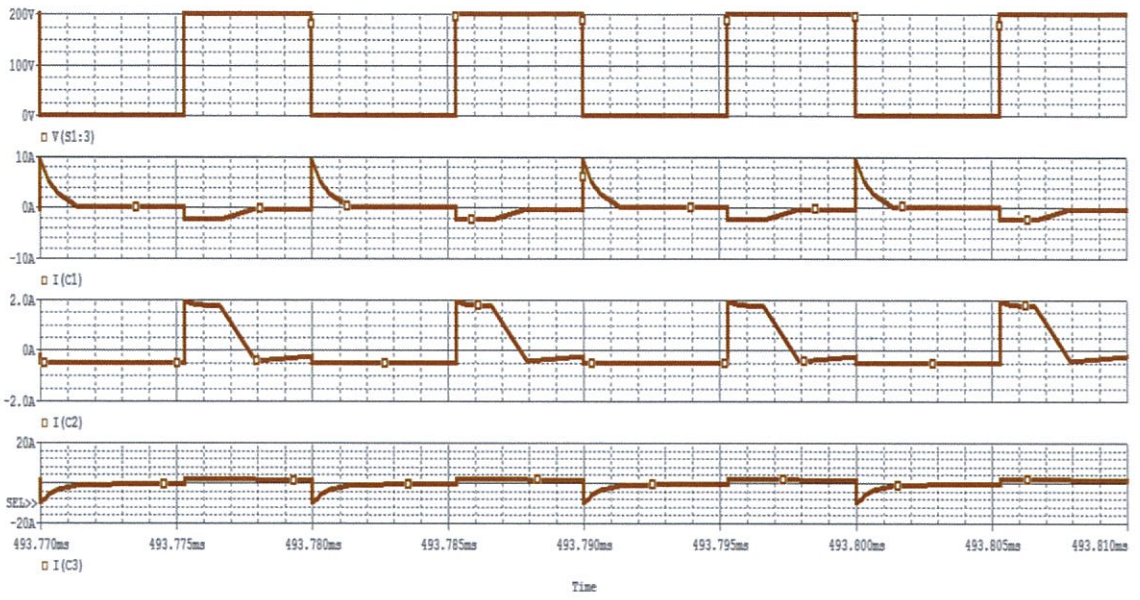
รูปที่ 3.10 ผลการจำลองการทำงาน  $V_{sw}$  และ  $i_{sw}$  เรียงลำดับจากบนลงล่าง



รูปที่ 3.11 ผลการจำลองการทำงาน  $V_{sw}$ ,  $i_{D1}$  และ  $i_{D2}$  เรียงลำดับจากบนลงล่าง



รูปที่ 3.12 ผลการจำลองการทำงาน  $V_{sw}$ ,  $i_{D3}$ ,  $i_{D4}$  และ  $i_{D5}$  เรียงลำดับจากบนลงล่าง



รูปที่ 3.13 ผลการจำลองการทำงาน  $V_{sw}$ ,  $i_{C1}$ ,  $i_{C2}$  และ  $i_{C3}$  เรียงลำดับจากบนลงล่าง

## บทที่ 4

### ผลการทดสอบสมรรถนะของวงจร

#### 4.1 บทนำ

บทนี้นำเสนอผลการทดสอบวงจรต้นแบบที่สร้างขึ้น โดยแสดงผลการวัดรูปคลื่นกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์ต่างๆ ในวงจร โดยเทียบกับผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice ผลการวัดความสามารถในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าขาออก เมื่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้าและกระแสไฟฟ้าขาออกเปลี่ยนแปลง และประสิทธิภาพของวงจร

#### 4.2 รายละเอียดวงจรต้นแบบ

วงจรสวิตช์คัปเปิ้ลอินดักเตอร์บูสต์คอนเวอร์เตอร์ต่อร่วมกับวงจรมัลติเลเวล ที่ออกแบบดังรูปที่

4.1 มีข้อกำหนดทางไฟฟ้า ดังนี้

แรงดันไฟฟ้าขาเข้า  $V_i = 30V - 40V$

แรงดันไฟฟ้าขาออก  $V_o = 400V$

ความถี่สวิตช์  $f_s = 100kHz$

กระแสไฟฟ้าขาออก  $I_o = 0.5A$

ค่าความต้านทานขาออก  $R_{min} = 800\Omega$

กำลังไฟฟ้าขาออก  $P_o = 200W$

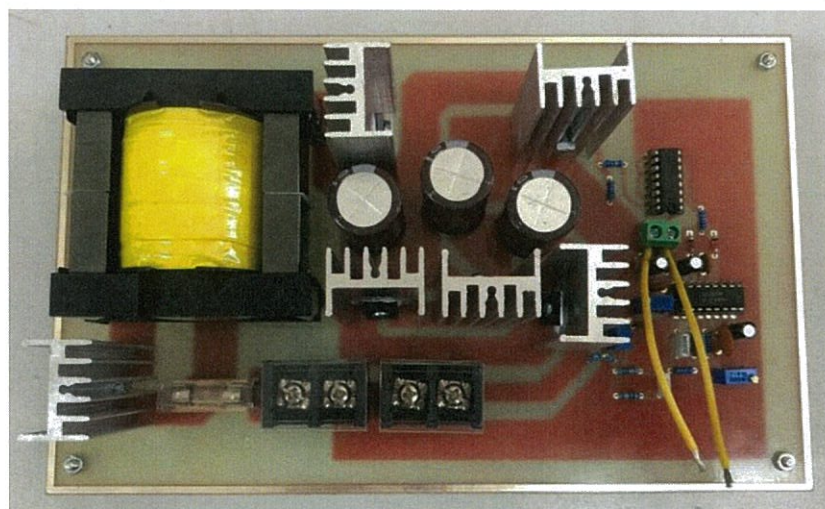
ริบเปิลแรงดันของตัวเก็บประจุ  $\Delta V_o = 0.2\%V_o$

อัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวด  $\frac{N_2}{N_1} = 5$

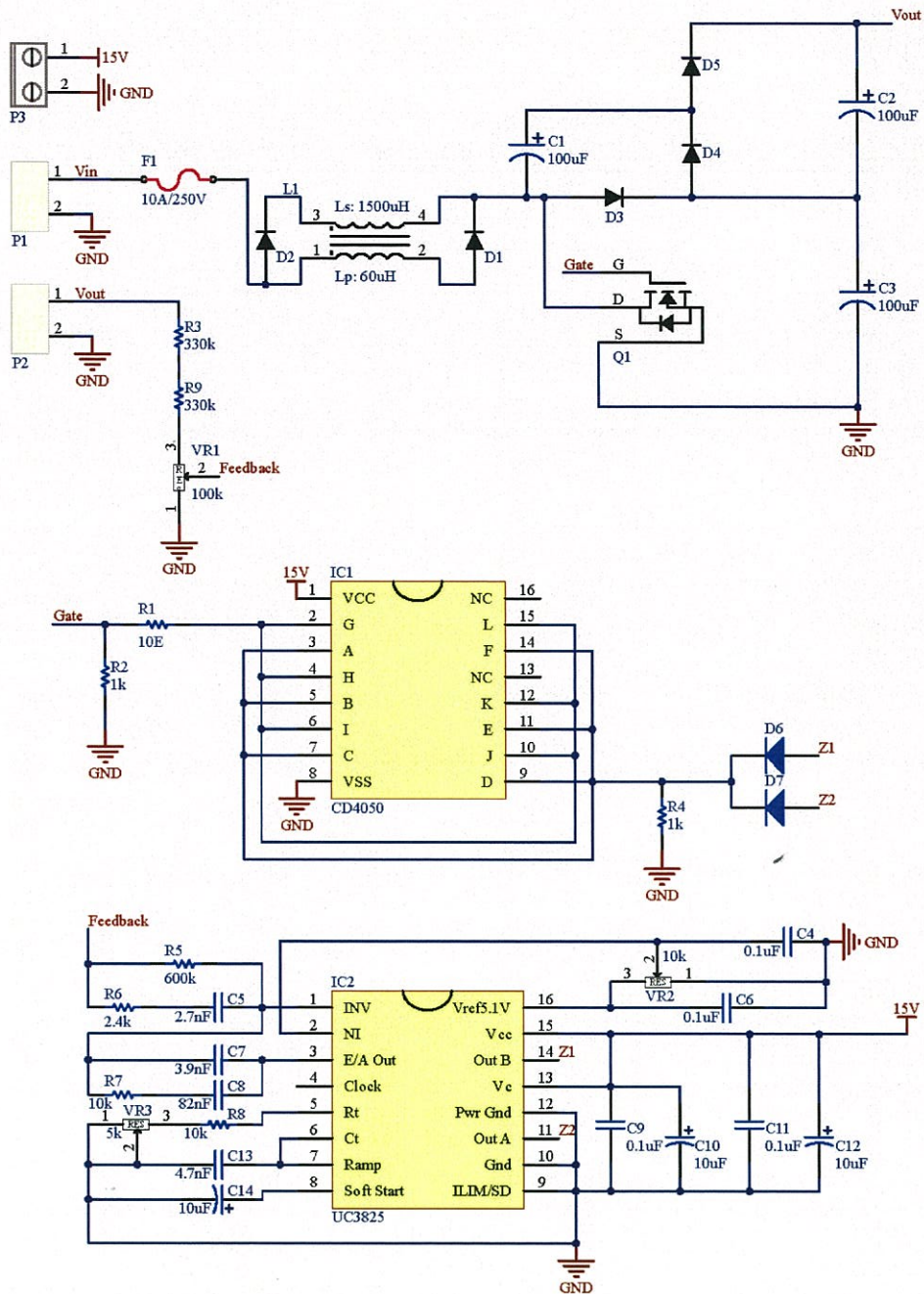
รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรต้นแบบแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในวงจร

อุปกรณ์	รายละเอียด
Switch	Power MOSFET N-Channel 600V/47A, 120W
Diode	Super Fast Recovery Diode 600V/20A
Capacitor	Electrolytic capacitor 100 $\mu$ F/250V
Core	Ferrite core ETD-59 material N87 with $A_L = 5300nH$ and 0.5 mm gap
Primary winding inductor	$L_1 = 60\mu H$
Secondary winding inductor	$L_2 = 1500\mu H$
No. of turns at primary winding	$N_1 = 10 \text{ turns}$
No. of turns at secondary winding	$N_2 = 50 \text{ turns}$



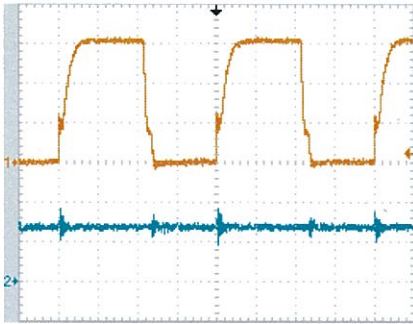
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายวงจรต้นแบบ



รูปที่ 4.2 Schematic ของวงจรต้นแบบ

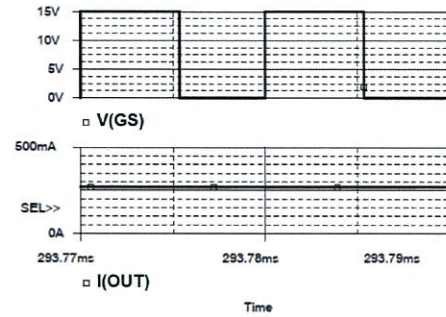
จาก Schematic ของวงจรดังรูปที่ 4.2 แรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรต้นแบบถูกควบคุมให้มีค่าคงที่ 400V โดยไอซี UC3825 และนำสัญญาณขาออก PWM ที่ขา 11 และ 24 มาต่อร่วมกันผ่านทางไดโอด 1N4148 ทำให้สัญญาณที่ได้มีค่าดิวิตีเซิลเปลี่ยนแปลงได้ตั้งแต่ 0% ถึง 90% ต่างจากเดิมที่แต่ละขาสามารถเปลี่ยนแปลงค่าดิวิตีเซิลได้ถึง 45% เท่านั้น สัญญาณ PWM นี้ถูกนำไปขับเกทของสวิตช์มอสเฟต โดยผ่านไอซีบัฟเฟอร์ CD4050

### 4.3 ผลการวัดสัญญาณตัวชี้เซลล์



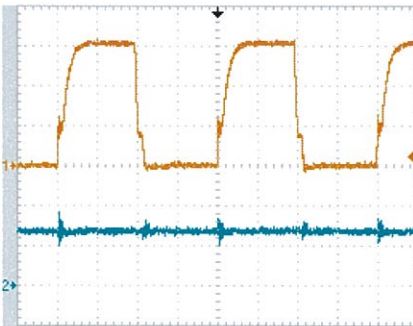
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $V_{GS}$  [5V/div] และ CH2:  $I_o$  [200mA/div]



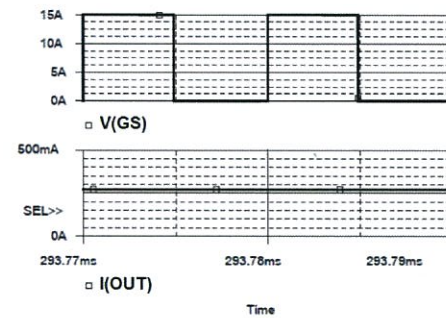
(ข) ผลการจำลองการทำงาน

รูปที่ 4.3 สัญญาณตัวชี้เซลล์เมื่อ  $I_o = 0.27A$  และ  $V_i = 30V$



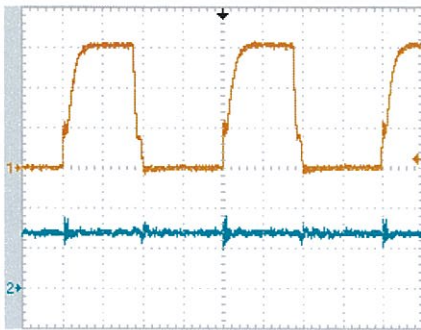
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $V_{GS}$  [5V/div] และ CH2:  $I_o$  [200mA/div]

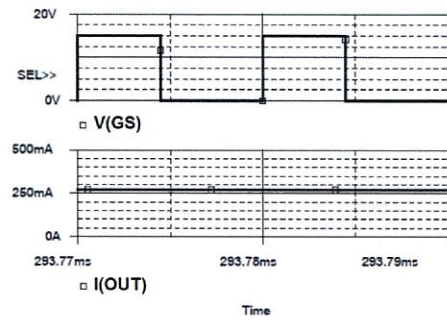


(ข) ผลการจำลองการทำงาน

รูปที่ 4.4 สัญญาณตัวชี้เซลล์เมื่อ  $I_o = 0.27A$  และ  $V_i = 35V$



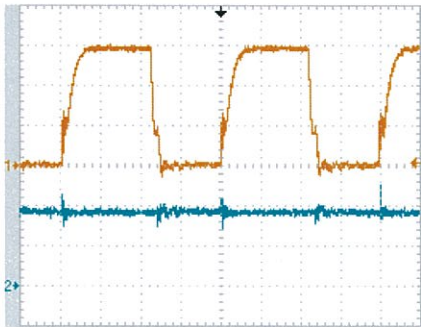
(ก) ผลการทดลอง



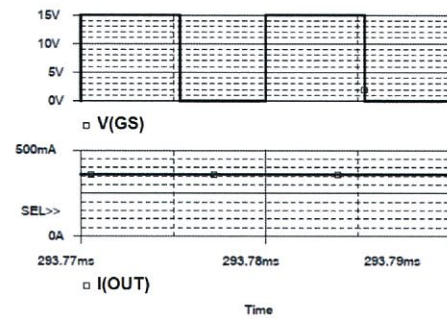
(ข) ผลการจำลองการทำงาน

CH1:  $V_{GS}$  [5V/div] และ CH2:  $I_o$  [200mA/div]

รูปที่ 4.5 สัญญาณดิวตี้ไซเคิลเมื่อ  $I_o = 0.27A$  และ  $V_i = 40V$



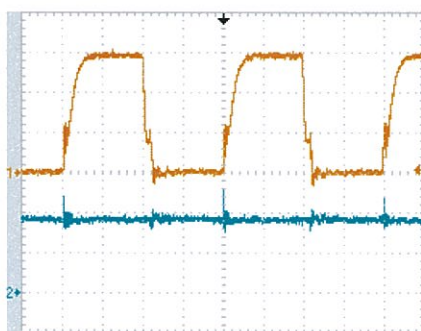
(ก) ผลการทดลอง



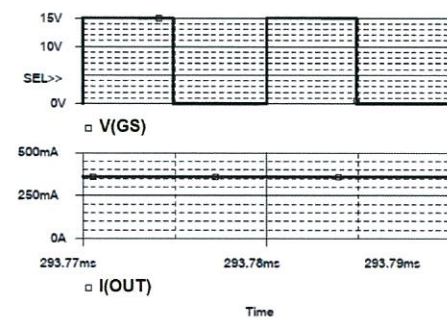
(ข) ผลการจำลองการทำงาน

CH1:  $V_{GS}$  [5V/div] และ CH2:  $I_o$  [200mA/div]

รูปที่ 4.6 สัญญาณดิวตี้ไซเคิลเมื่อ  $I_o = 0.36A$  และ  $V_i = 30V$



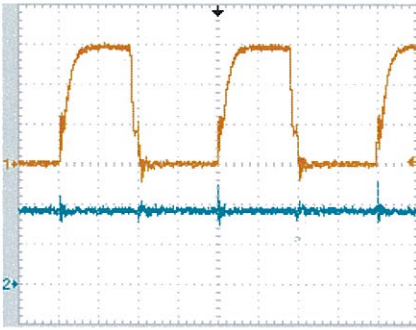
(ก) ผลการทดลอง



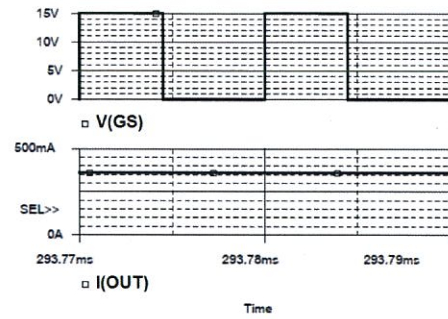
(ข) ผลการจำลองการทำงาน

CH1:  $V_{GS}$  [5V/div] และ CH2:  $I_o$  [200mA/div]

รูปที่ 4.7 สัญญาณดิวตี้ไซเคิลเมื่อ  $I_o = 0.36A$  และ  $V_i = 35V$



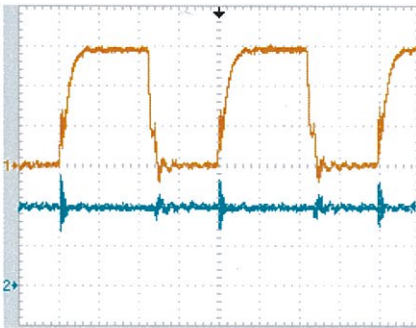
(ก) ผลการทดลอง



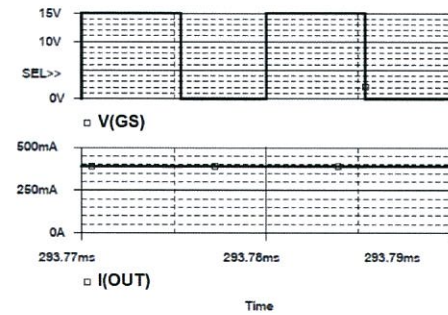
(ข) ผลการจำลองการทำงาน

CH1:  $V_{GS}$  [5V/div] และ CH2:  $I_o$  [200mA/div]

รูปที่ 4.8 สัญญาณดิวตี้ไซเคิลเมื่อ  $I_o = 0.36A$  และ  $V_i = 40V$



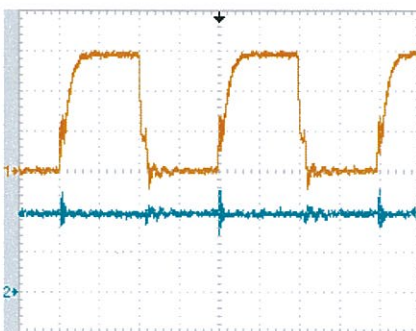
(ก) ผลการทดลอง



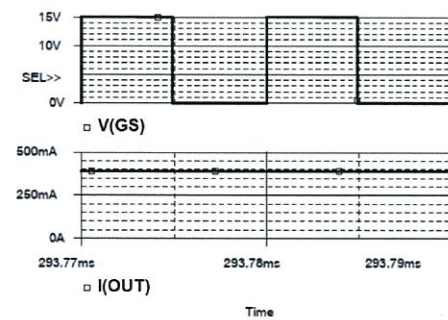
(ข) ผลการจำลองการทำงาน

CH1:  $V_{GS}$  [5V/div] และ CH2:  $I_o$  [200mA/div]

รูปที่ 4.9 สัญญาณดิวตี้ไซเคิลเมื่อ  $I_o = 0.39A$  และ  $V_i = 30V$



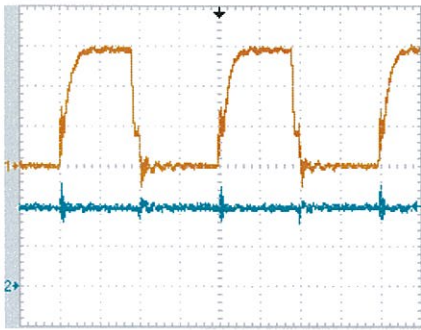
(ก) ผลการทดลอง



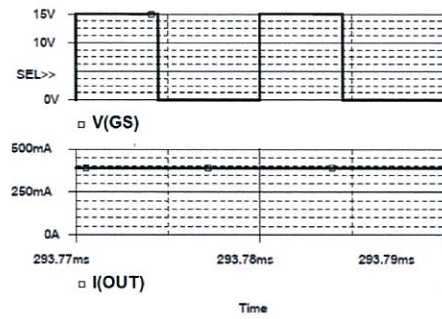
(ข) ผลการจำลองการทำงาน

CH1:  $V_{GS}$  [5V/div] และ CH2:  $I_o$  [200mA/div]

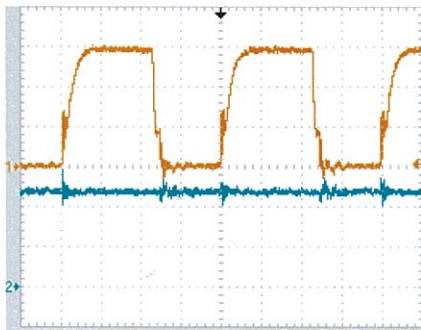
รูปที่ 4.10 สัญญาณดิวตี้ไซเคิลเมื่อ  $I_o = 0.39A$  และ  $V_i = 35V$



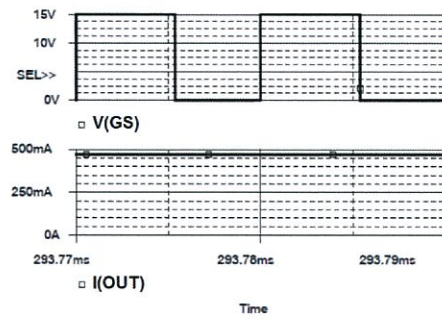
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $V_{GS}$  [5V/div] และ CH2:  $I_o$  [200mA/div]

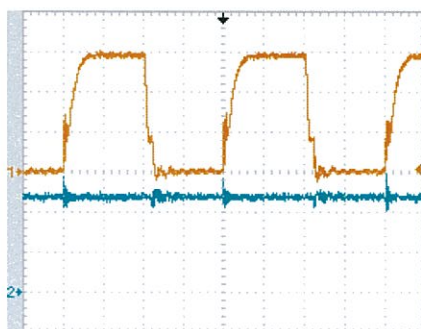
(ข) ผลการจำลองการทำงาน

รูปที่ 4.11 สัญญาณดิวตี้ไซเคิลเมื่อ  $I_o = 0.39A$  และ  $V_i = 40V$ 

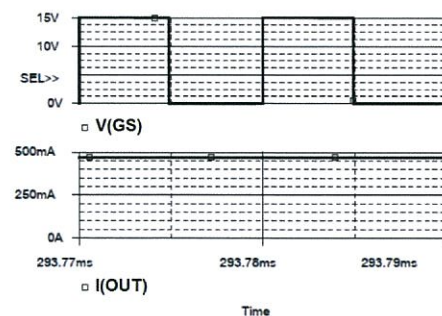
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $V_{GS}$  [5V/div] และ CH2:  $I_o$  [200mA/div]

(ข) ผลการจำลองการทำงาน

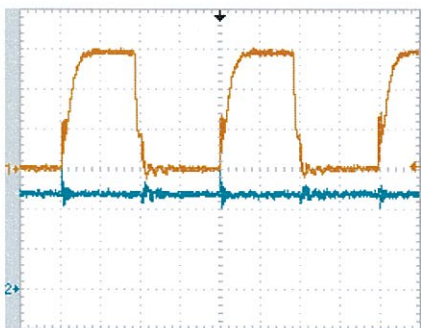
รูปที่ 4.12 สัญญาณดิวตี้ไซเคิลเมื่อ  $I_o = 0.47A$  และ  $V_i = 30V$ 

(ก) ผลการทดลอง

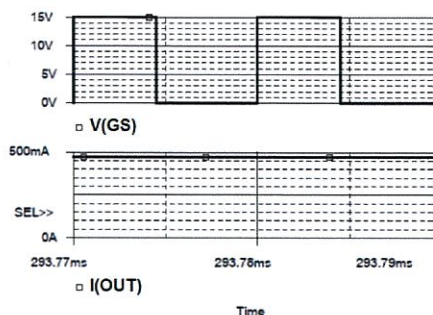
CH1:  $V_{GS}$  [5V/div] และ CH2:  $I_o$  [200mA/div]

(ข) ผลการจำลองการทำงาน

รูปที่ 4.13 สัญญาณดิวตี้ไซเคิลเมื่อ  $I_o = 0.47A$  และ  $V_i = 35V$



(ก) ผลการทดลอง



(ข) ผลการจำลองการทำงาน

CH1:  $V_{GS}$  [5V/div] และ CH2:  $I_o$  [200mA/div]

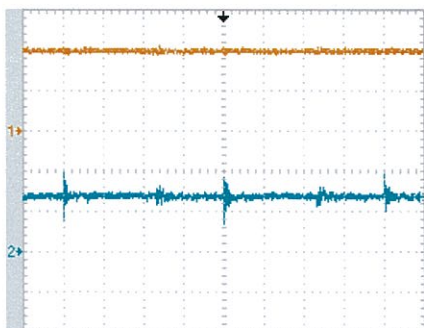
#### รูปที่ 4.14 สัญญาณดิวตี้ไซเคิลเมื่อ $I_o = 0.47A$ และ $V_i = 40V$

ผลการวัดสัญญาณขับมอสเฟต  $V_{GS}$  จากกระแสไฟฟ้าขาออกต่ำสุดถึงกระแสไฟฟ้าขาออกสูงสุดจากการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.3(ก) ถึงรูปที่ 4.14(ก) เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลจากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice ดังรูปที่ 4.3(ข) ถึงรูปที่ 4.14(ข) พบว่ามีความใกล้เคียงกัน และค่าดิวตี้ไซเคิลจากตารางที่ 4.2 มีความสอดคล้องกับค่าทางทฤษฎีซึ่งเท่ากับ 53.13%, 48.53% และ 44.44% เมื่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้าเท่ากับ 30V, 35V และ 40V ตามลำดับ การที่ค่าดิวตี้ไซเคิลมีค่ามากขึ้นที่กระแสไฟฟ้าขาออกสูงเกิดจากแรงดันตกคร่อมในวงจรที่เพิ่มขึ้นอันเกิดจากความต้านทานแฝงต่างๆ (Parasitic Resistances) เช่น ความต้านทานขณะสวิตช์นำกระแสไฟฟ้า  $r_{ds,on}$  ความต้านทานของขดลวดตัวเหนี่ยวนำ  $r_L$  เป็นต้น

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่าดิวตี้ไซเคิลระหว่างผลจากการวัดและผลจากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice

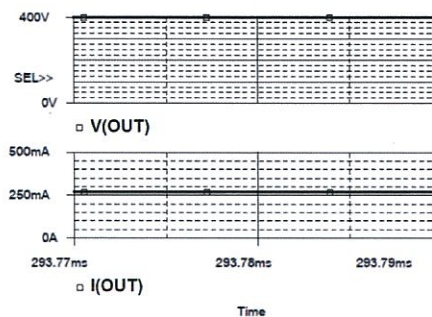
$V_i$	$I_o = 0.27A$		$I_o = 0.36A$		$I_o = 0.39A$		$I_o = 0.47A$	
	ค่าจากการวัด	ค่าจาก PSpice	ค่าจากการวัด	ค่าจาก PSpice	ค่าจากการวัด	ค่าจาก PSpice	ค่าจากการวัด	ค่าจาก PSpice
30V	0.547	0.535	0.555	0.536	0.555	0.537	0.572	0.538
35V	0.491	0.489	0.505	0.489	0.507	0.490	0.519	0.491
40V	0.445	0.447	0.455	0.448	0.456	0.449	0.466	0.449

#### 4.4 ผลการวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขาออก



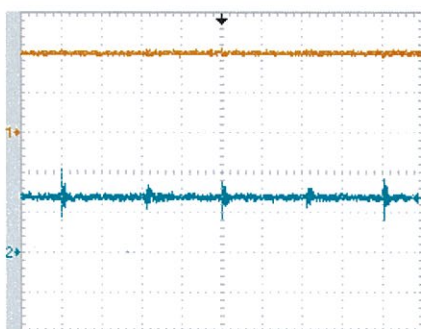
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $V_o$  [200V/div] และ CH2:  $I_o$  [200mA/div]



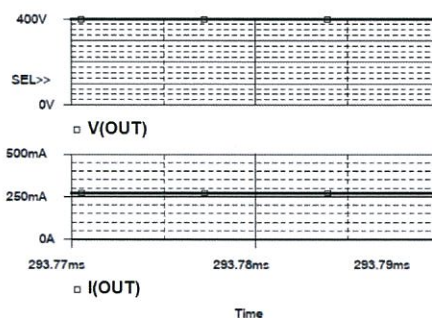
(ข) ผลการจำลองการทำงาน

รูปที่ 4.15 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าขาออกเมื่อ  $I_o = 0.27A$  และ  $V_i = 30V$



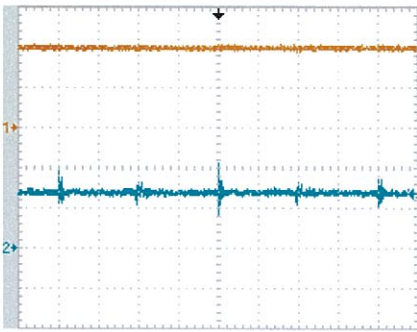
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $V_o$  [200V/div] และ CH2:  $I_o$  [200mA/div]

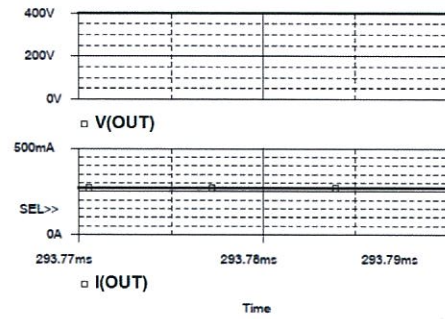


(ข) ผลการจำลองการทำงาน

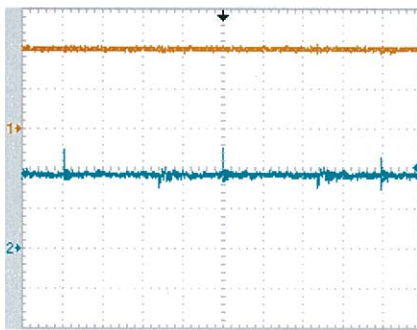
รูปที่ 4.16 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าขาออกเมื่อ  $I_o = 0.27A$  และ  $V_i = 35V$



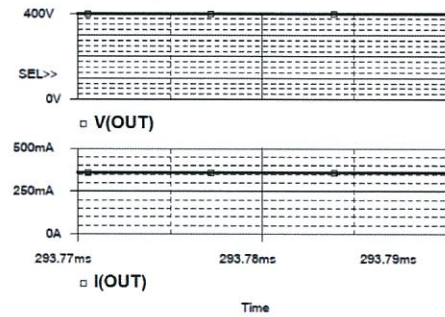
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $V_o$  [200V/div] และ CH2:  $I_o$  [200mA/div]

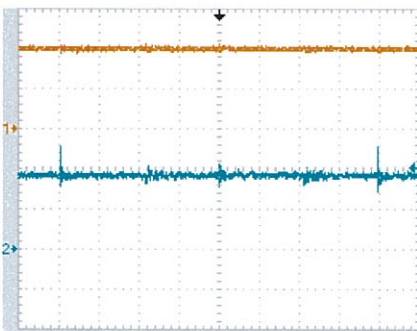
(ข) ผลการจำลองการทำงาน

รูปที่ 4.17 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าขาออกเมื่อ  $I_o = 0.27A$  และ  $V_i = 40V$ 

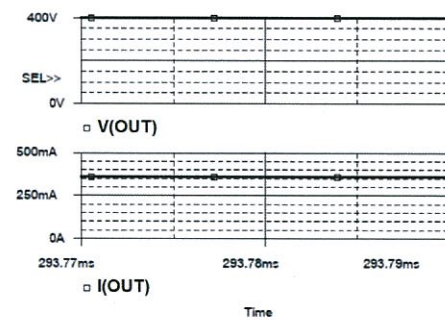
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $V_o$  [200V/div] และ CH2:  $I_o$  [200mA/div]

(ข) ผลการจำลองการทำงาน

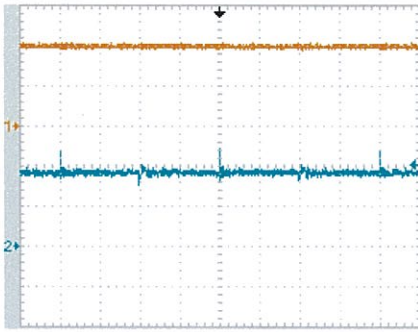
รูปที่ 4.18 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าขาออกเมื่อ  $I_o = 0.36A$  และ  $V_i = 30V$ 

(ก) ผลการทดลอง

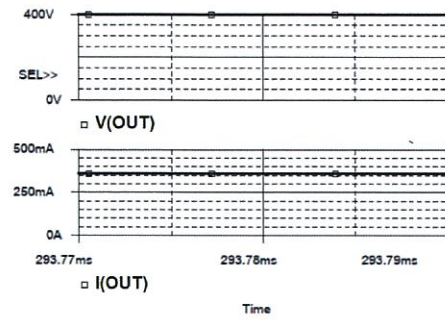
CH1:  $V_o$  [200V/div] และ CH2:  $I_o$  [200mA/div]

(ข) ผลการจำลองการทำงาน

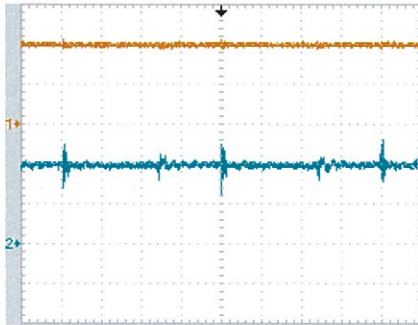
รูปที่ 4.19 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าขาออกเมื่อ  $I_o = 0.36A$  และ  $V_i = 35V$



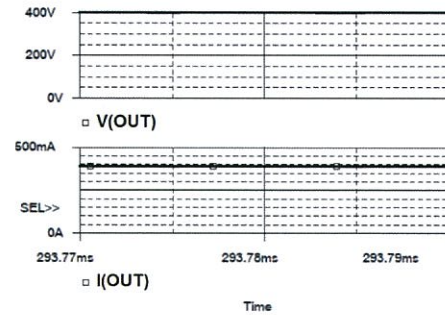
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $V_o$  [200V/div] และ CH2:  $I_o$  [200mA/div]

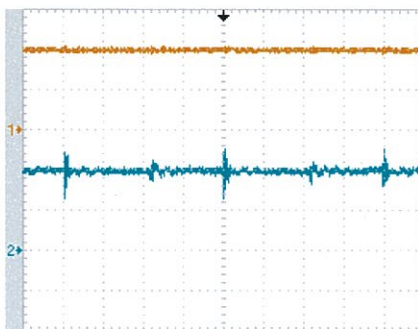
(ข) ผลการจำลองการทำงาน

รูปที่ 4.20 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าขาออกเมื่อ  $I_o = 0.36A$  และ  $V_i = 40V$ 

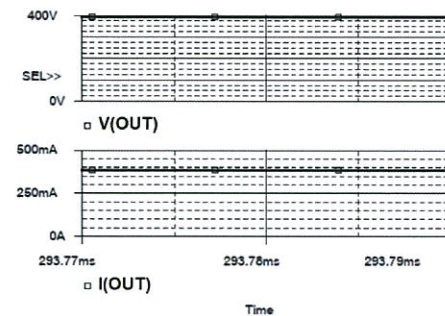
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $V_o$  [200V/div] และ CH2:  $I_o$  [200mA/div]

(ข) ผลการจำลองการทำงาน

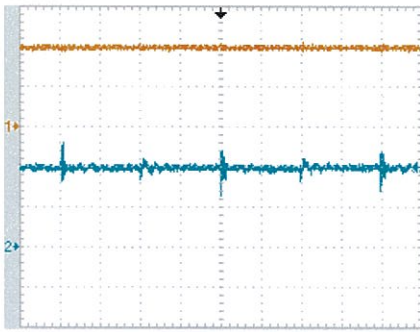
รูปที่ 4.21 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าขาออกเมื่อ  $I_o = 0.39A$  และ  $V_i = 30V$ 

(ก) ผลการทดลอง

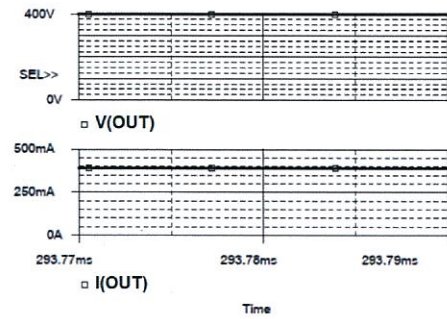
CH1:  $V_o$  [200V/div] และ CH2:  $I_o$  [200mA/div]

(ข) ผลการจำลองการทำงาน

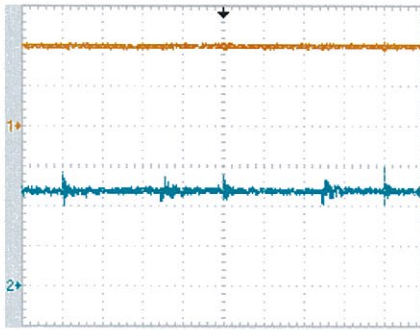
รูปที่ 4.22 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าขาออกเมื่อ  $I_o = 0.39A$  และ  $V_i = 35V$



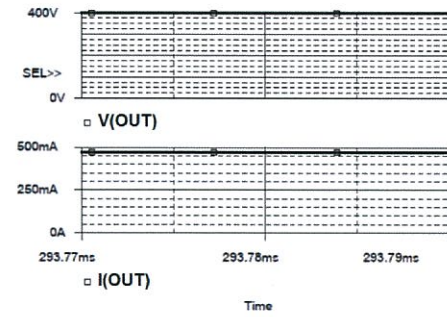
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $V_o$  [200V/div] และ CH2:  $I_o$  [200mA/div]

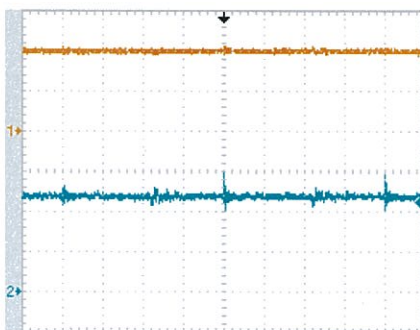
(ข) ผลการจำลองการทำงาน

รูปที่ 4.23 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าขาออกเมื่อ  $I_o = 0.39A$  และ  $V_i = 40V$ 

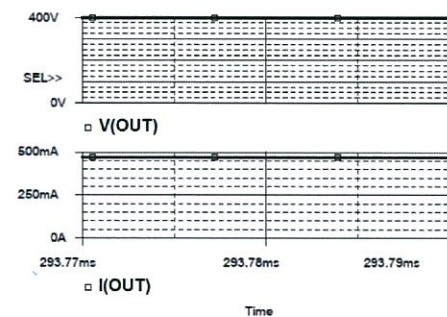
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $V_o$  [200V/div] และ CH2:  $I_o$  [200mA/div]

(ข) ผลการจำลองการทำงาน

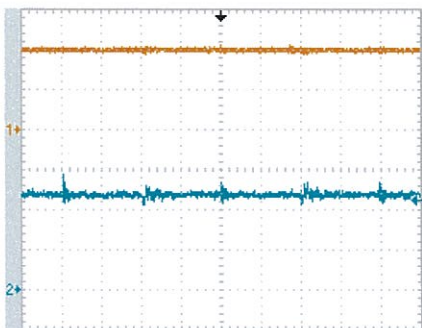
รูปที่ 4.24 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าขาออกเมื่อ  $I_o = 0.47A$  และ  $V_i = 30V$ 

(ก) ผลการทดลอง

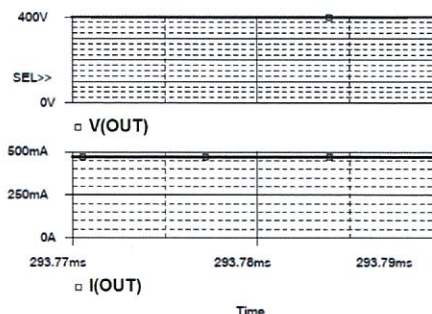
CH1:  $V_o$  [200V/div] และ CH2:  $I_o$  [200mA/div]

(ข) ผลการจำลองการทำงาน

รูปที่ 4.25 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าขาออกเมื่อ  $I_o = 0.47A$  และ  $V_i = 35V$



(ก) ผลการทดลอง



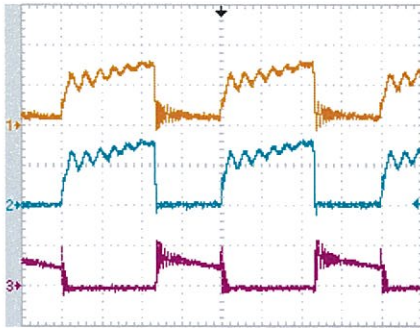
(ข) ผลการจำลองการทำงาน

CH1:  $V_o$  [200V/div] และ CH2:  $I_o$  [200mA/div]

รูปที่ 4.26 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าขาออกเมื่อ  $I_o = 0.47A$  และ  $V_i = 40V$

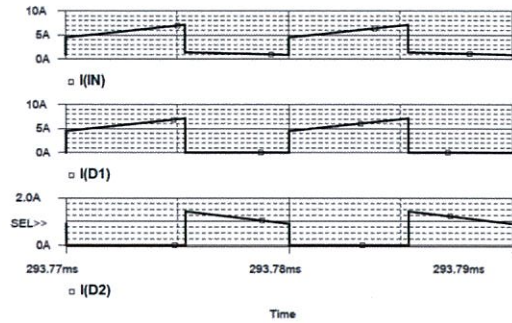
ผลการวัดรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าขาออกจากการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.15(ก) ถึงรูปที่ 4.26(ก) มีความใกล้เคียงกันกับผลจากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice ดังรูปที่ 4.15(ข) ถึงรูปที่ 4.26(ข) พบว่าวงจรต้นแบบสามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าขาออกที่ 400V ได้ แม้กระแสไฟฟ้าขาออกเปลี่ยนแปลงในช่วง 0.27A ถึง 0.47A หรือแรงดันไฟฟ้าขาเข้าเปลี่ยนแปลงในช่วง 30V ถึง 40V

#### 4.5 ผลการวัดรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าขาเข้าและรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของไดโอด $D_1$ และ $D_2$



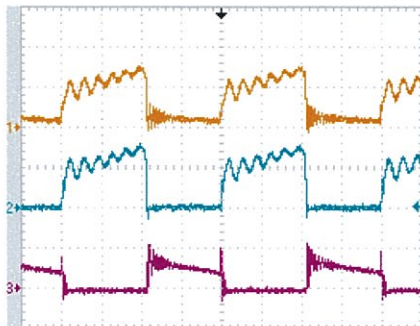
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $I_i$  [5A/div] CH2:  $I_{D_1}$  [5A/div] และ  
CH3:  $I_{D_2}$  [2A/div]



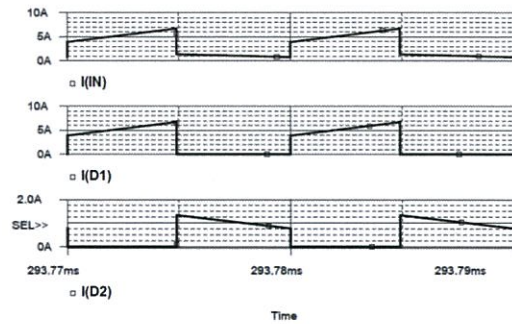
(ข) ผลการจำลองการทำงาน

รูปที่ 4.27 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าขาเข้าและรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$   
เมื่อ  $I_o = 0.27A$  และ  $V_i = 30V$



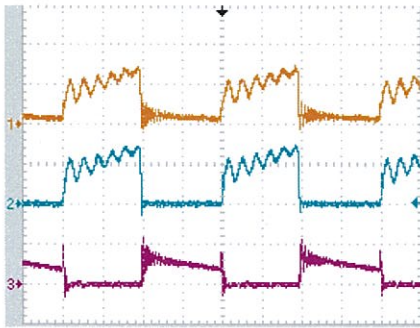
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $I_i$  [5A/div] CH2:  $I_{D_1}$  [5A/div] และ  
CH3:  $I_{D_2}$  [2A/div]



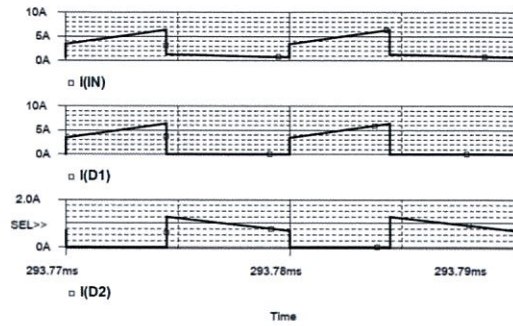
(ข) ผลการจำลองการทำงาน

รูปที่ 4.28 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าขาเข้าและรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$   
เมื่อ  $I_o = 0.27A$  และ  $V_i = 35V$



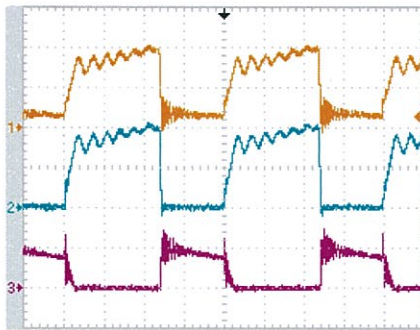
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $I_i$  [5A/div] CH2:  $I_{D_1}$  [5A/div] และ  
CH3:  $I_{D_2}$  [2A/div]



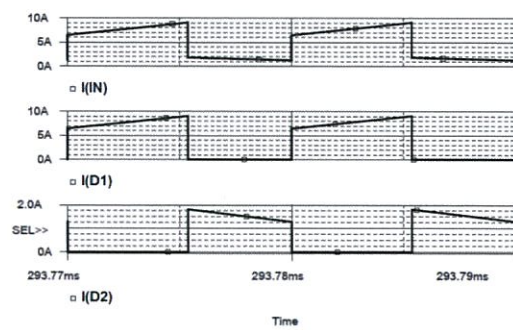
(ข) ผลการจำลองการทำงาน

รูปที่ 4.29 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าขาเข้าและรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$   
เมื่อ  $I_o = 0.27A$  และ  $V_i = 40V$



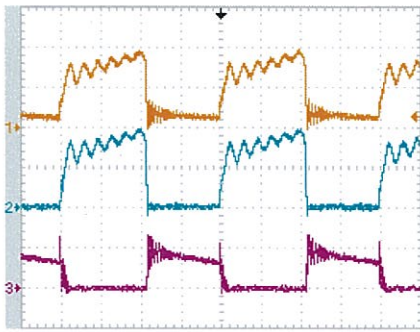
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $I_i$  [5A/div] CH2:  $I_{D_1}$  [5A/div] และ  
CH3:  $I_{D_2}$  [2A/div]



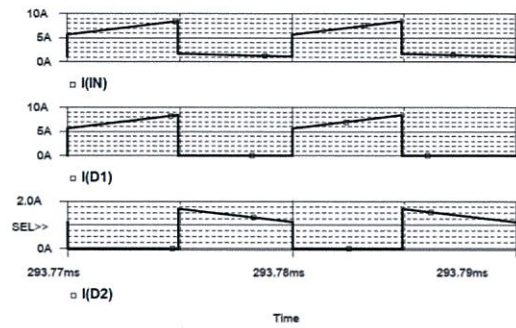
(ข) ผลการจำลองการทำงาน

รูปที่ 4.30 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าขาเข้าและรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$   
เมื่อ  $I_o = 0.36A$  และ  $V_i = 30V$



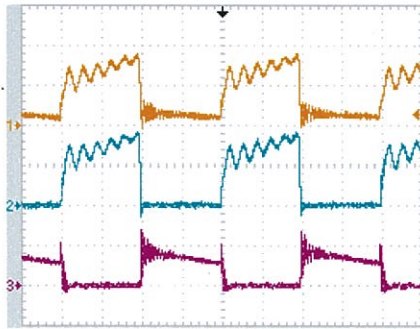
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $I_i$  [5A/div] CH2:  $I_{D_1}$  [5A/div] และ  
CH3:  $I_{D_2}$  [2A/div]



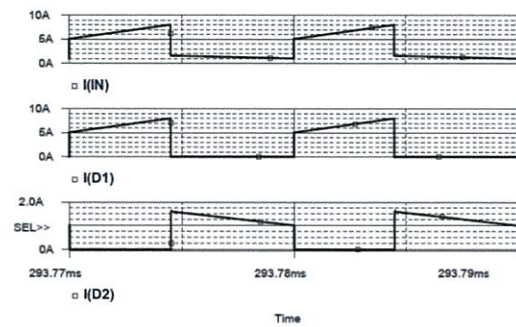
(ข) ผลการจำลองการทำงาน

รูปที่ 4.31 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าขาเข้าและรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$   
เมื่อ  $I_o = 0.36A$  และ  $V_i = 35V$



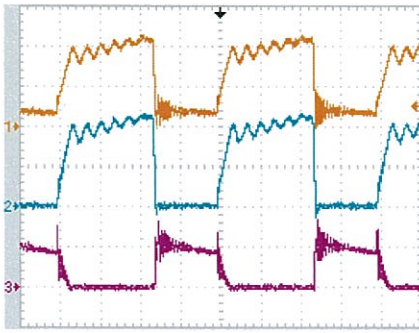
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $I_i$  [5A/div] CH2:  $I_{D_1}$  [5A/div] และ  
CH3:  $I_{D_2}$  [2A/div]



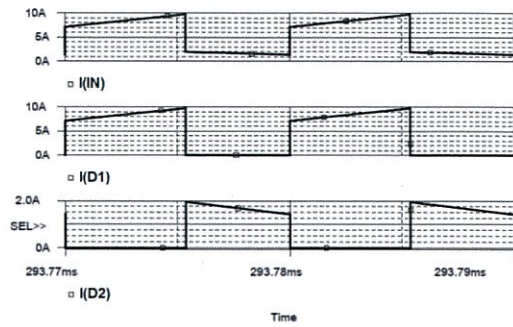
(ข) ผลการจำลองการทำงาน

รูปที่ 4.32 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าขาเข้าและรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$   
เมื่อ  $I_o = 0.36A$  และ  $V_i = 40V$



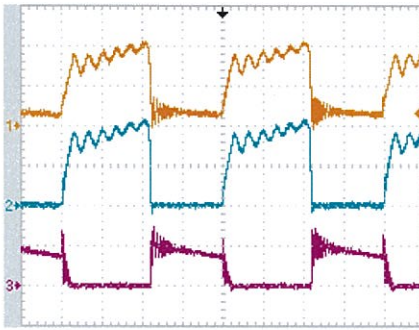
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $I_i$  [5A/div] CH2:  $I_{D_1}$  [5A/div] และ  
CH3:  $I_{D_2}$  [2A/div]



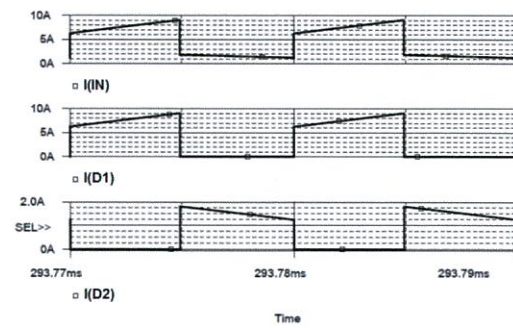
(ข) ผลการจำลองการทำงาน

รูปที่ 4.33 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าขาเข้าและรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$   
เมื่อ  $I_o = 0.39A$  และ  $V_i = 30V$



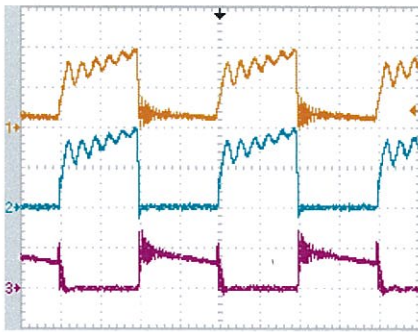
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $I_i$  [5A/div] CH2:  $I_{D_1}$  [5A/div] และ  
CH3:  $I_{D_2}$  [2A/div]



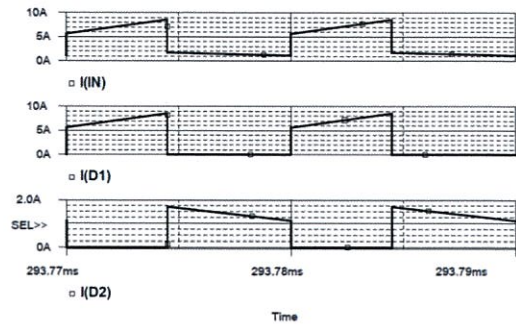
(ข) ผลการจำลองการทำงาน

รูปที่ 4.34 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าขาเข้าและรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$   
เมื่อ  $I_o = 0.39A$  และ  $V_i = 35V$



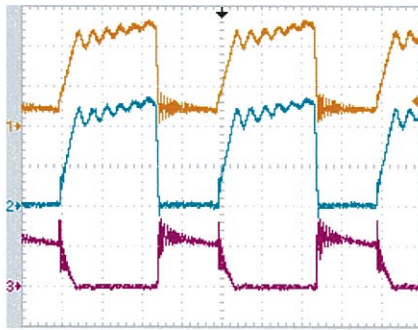
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $I_i$  [5A/div] CH2:  $I_{D1}$  [5A/div] และ  
CH3:  $I_{D2}$  [2A/div]



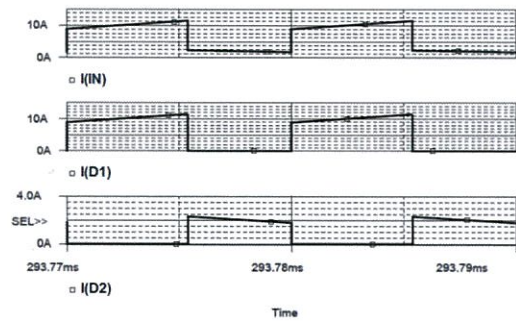
(ข) ผลการจำลองการทำงาน

รูปที่ 4.35 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าขาเข้าและรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$   
เมื่อ  $I_o = 0.39A$  และ  $V_i = 40V$



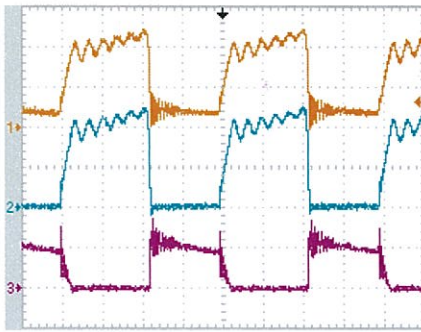
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $I_i$  [5A/div] CH2:  $I_{D1}$  [5A/div] และ  
CH3:  $I_{D2}$  [2A/div]



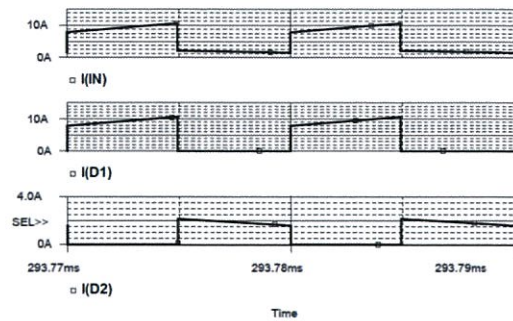
(ข) ผลการจำลองการทำงาน

รูปที่ 4.36 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าขาเข้าและรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$   
เมื่อ  $I_o = 0.47A$  และ  $V_i = 30V$



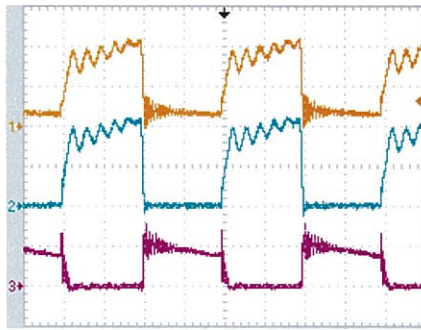
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $I_i$  [5A/div] CH2:  $I_{D_1}$  [5A/div] และ  
CH3:  $I_{D_2}$  [2A/div]



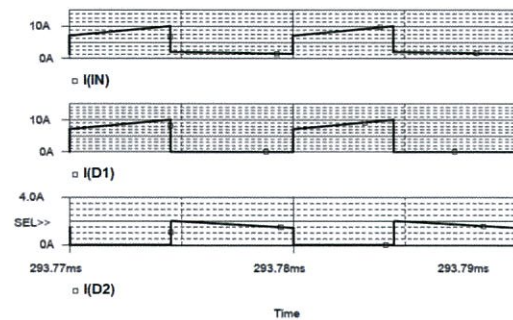
(ข) ผลการจำลองการทำงาน

รูปที่ 4.37 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าขาเข้าและรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$   
เมื่อ  $I_o = 0.47A$  และ  $V_i = 35V$



(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $I_i$  [5A/div] CH2:  $I_{D_1}$  [5A/div] และ  
CH3:  $I_{D_2}$  [2A/div]



(ข) ผลการจำลองการทำงาน

รูปที่ 4.38 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าขาเข้าและรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$   
เมื่อ  $I_o = 0.47A$  และ  $V_i = 40V$

ผลการวัดรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าขาเข้าและรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$  จากการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.27(ก) ถึงรูปที่ 4.38(ก) มีลักษณะเดียวกันกับรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าจากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice ดังรูปที่ 4.27(ข) ถึงรูปที่ 4.38(ข) และค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่วัดได้ของกระแสไฟฟ้าขาเข้า ไดโอด  $D_1$  และไดโอด  $D_2$  จากตารางที่ 4.3 ถึงตารางที่ 4.5 มีความใกล้เคียงกันกับค่าจากการคำนวณดังตารางที่ 4.6 ถึงตารางที่ 4.8 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าขาเข้าสูงสุดระหว่างผลจากการวัด และผลจากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice

$V_i$	$I_o = 0.27A$		$I_o = 0.36A$		$I_o = 0.39A$		$I_o = 0.47A$	
	ค่าจากการวัด	ค่าจาก PSpice	ค่าจากการวัด	ค่าจาก PSpice	ค่าจากการวัด	ค่าจาก PSpice	ค่าจากการวัด	ค่าจาก PSpice
30V	8.00A	7.1285A	10.20A	9.0671A	11.40A	9.7470A	13.20A	11.4910A
35V	7.60A	6.6994A	9.80A	8.4492A	10.60A	9.0605A	12.20A	10.6510A
40V	7.40A	6.3649A	9.00A	8.0053A	9.80A	8.5578A	11.00A	10.0150A

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ไหลผ่านไดโอด  $D_1$  ระหว่างผลจากการวัด และผลจากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice

$V_i$	$I_o = 0.27A$		$I_o = 0.36A$		$I_o = 0.39A$		$I_o = 0.47A$	
	ค่าจากการวัด	ค่าจาก PSpice	ค่าจากการวัด	ค่าจาก PSpice	ค่าจากการวัด	ค่าจาก PSpice	ค่าจากการวัด	ค่าจาก PSpice
30V	8.00A	7.1285A	10.20A	9.0741A	11.40A	9.7540A	13.20A	11.4970A
35V	7.60A	6.7058A	9.80A	8.4522A	10.60A	9.0628A	12.20A	10.6520A
40V	7.40A	6.3649A	9.00A	8.0084A	9.80A	8.5602A	11.00A	10.0170A

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ไหลผ่านไดโอด  $D_2$  ระหว่างผลจากการวัด และผลจากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice

$V_i$	$I_o = 0.27A$		$I_o = 0.36A$		$I_o = 0.39A$		$I_o = 0.47A$	
	ค่าจากการวัด	ค่าจาก PSpice	ค่าจากการวัด	ค่าจาก PSpice	ค่าจากการวัด	ค่าจาก PSpice	ค่าจากการวัด	ค่าจาก PSpice
30V	1.60A	1.4257A	2.04A	1.8134A	2.28A	1.9494A	2.64A	2.2982A
35V	1.52A	1.3409A	1.96A	1.6906A	2.12A	1.8130A	2.44A	2.1313A
40V	1.48A	1.2733A	1.80A	1.6022A	1.96A	1.7132A	2.20A	2.0046A

ตารางที่ 4.6 ค่ากระแสไฟฟ้าขาเข้าสูงสุดจากการคำนวณ

$I_o$ $V_i$	0.27A	0.36A	0.39A	0.47A
30V	7.0889A	9.0091A	9.6491A	11.3560A
35V	6.6612A	8.4098A	8.9927A	10.5470A
40V	6.3409A	7.9608A	8.5008A	9.9407A

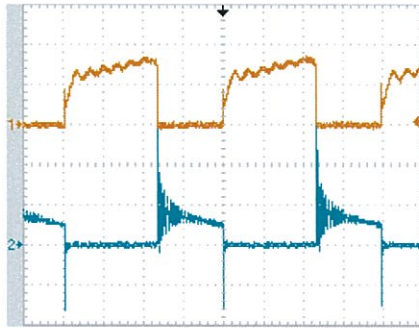
ตารางที่ 4.7 ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ไหลผ่านไดโอด  $D_1$  จากการคำนวณ

$I_o$ $V_i$	0.27A	0.36A	0.39A	0.47A
30V	7.0889A	9.0091A	9.6491A	11.3560A
35V	6.6612A	8.4098A	8.9927A	10.5470A
40V	6.3409A	7.9608A	8.5008A	9.9407A

ตารางที่ 4.8 ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ไหลผ่านไดโอด  $D_2$  จากการคำนวณ

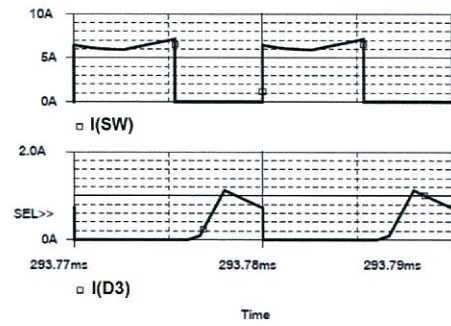
$I_o$ $V_i$	0.27A	0.36A	0.39A	0.47A
30V	1.4178A	1.8018A	1.9298A	2.2712A
35V	1.3322A	1.6820A	1.7985A	2.1094A
40V	1.2682A	1.5922A	1.7002A	1.9881A

#### 4.6 ผลการวัดรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของสวิตช์และไดโอด $D_3$



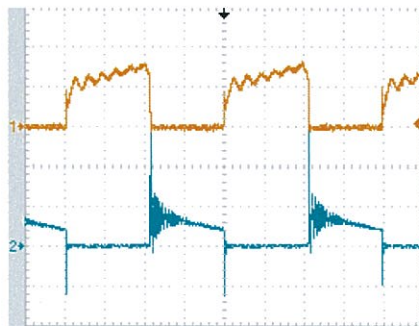
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $I_{SW}$  [5A/div] และ CH2:  $I_{D_3}$  [1A/div]



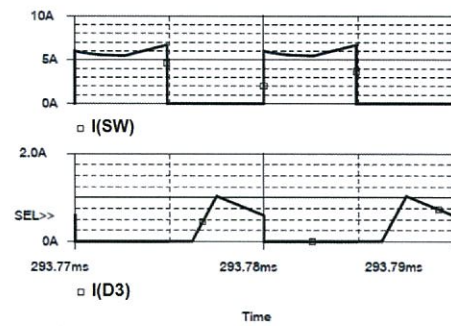
(ข) ผลการจำลองการทำงาน

รูปที่ 4.39 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของสวิตช์และไดโอด  $D_3$  เมื่อ  $I_o = 0.27A$  และ  $V_i = 30V$



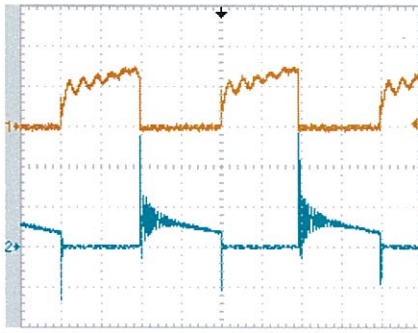
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $I_{SW}$  [5A/div] และ CH2:  $I_{D_3}$  [1A/div]

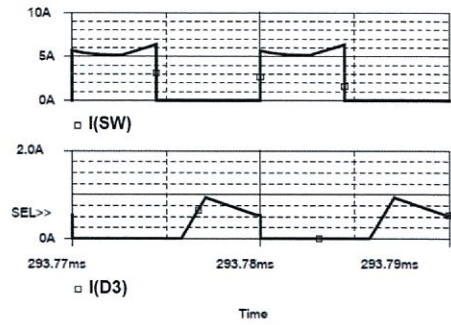


(ข) ผลการจำลองการทำงาน

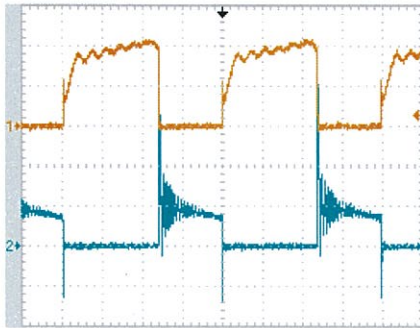
รูปที่ 4.40 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของสวิตช์และไดโอด  $D_3$  เมื่อ  $I_o = 0.27A$  และ  $V_i = 35V$



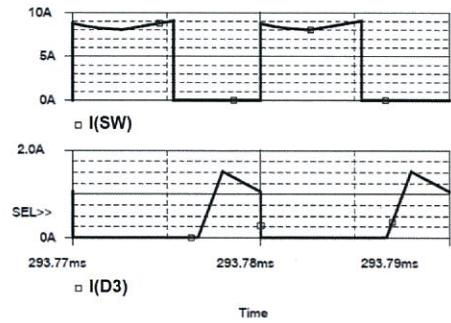
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $I_{SW}$  [5A/div] และ CH2:  $I_{D3}$  [1A/div]

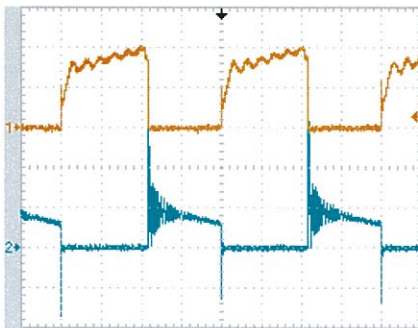
(ข) ผลการจำลองการทำงาน

รูปที่ 4.41 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของสวิตช์และไดโอด  $D_3$  เมื่อ  $I_o = 0.27A$  และ  $V_i = 40V$ 

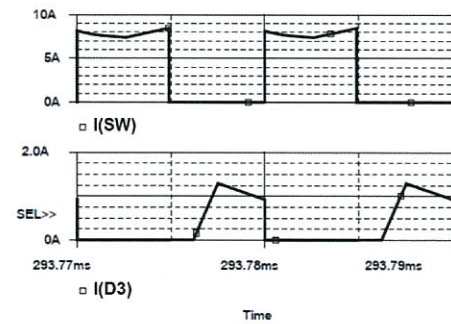
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $I_{SW}$  [5A/div] และ CH2:  $I_{D3}$  [1A/div]

(ข) ผลการจำลองการทำงาน

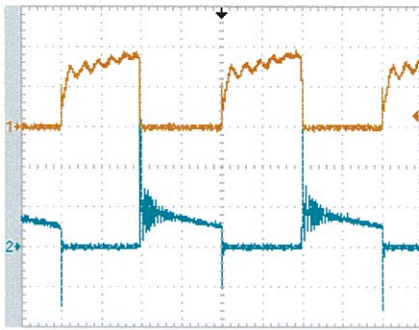
รูปที่ 4.42 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของสวิตช์และไดโอด  $D_3$  เมื่อ  $I_o = 0.36A$  และ  $V_i = 30V$ 

(ก) ผลการทดลอง

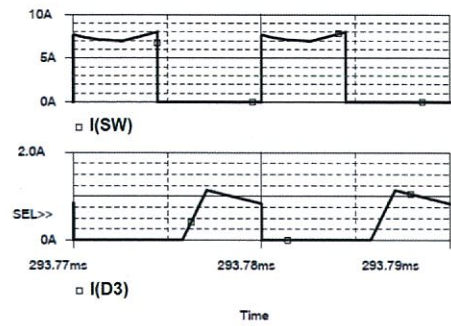
CH1:  $I_{SW}$  [5A/div] และ CH2:  $I_{D3}$  [1A/div]

(ข) ผลการจำลองการทำงาน

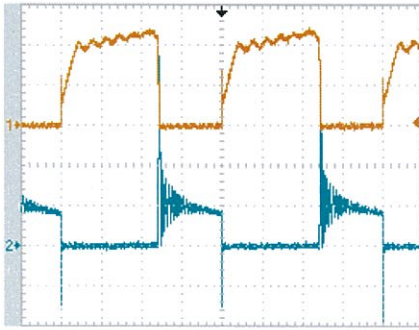
รูปที่ 4.43 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของสวิตช์และไดโอด  $D_3$  เมื่อ  $I_o = 0.36A$  และ  $V_i = 35V$



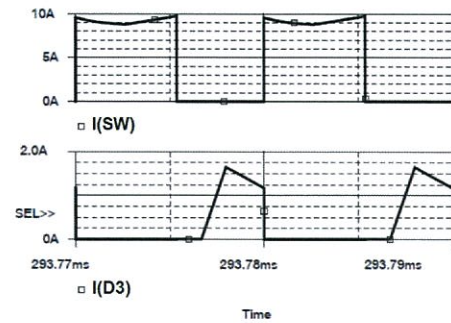
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $I_{SW}$  [5A/div] และ CH2:  $I_{D3}$  [1A/div]

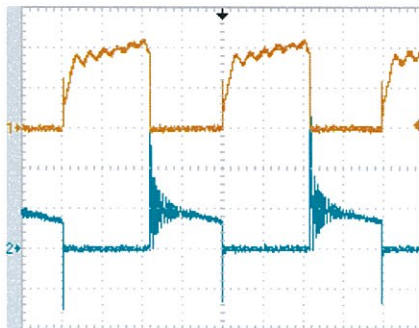
(ข) ผลการจำลองการทำงาน

รูปที่ 4.44 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของสวิตช์และไดโอด  $D_3$  เมื่อ  $I_o = 0.36A$  และ  $V_i = 40V$ 

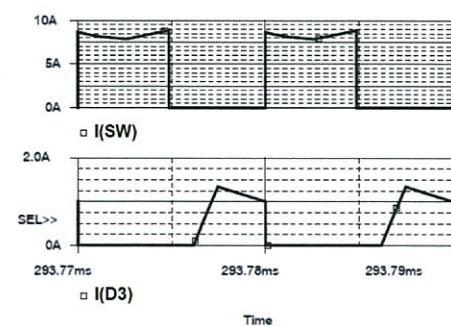
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $I_{SW}$  [5A/div] และ CH2:  $I_{D3}$  [1A/div]

(ข) ผลการจำลองการทำงาน

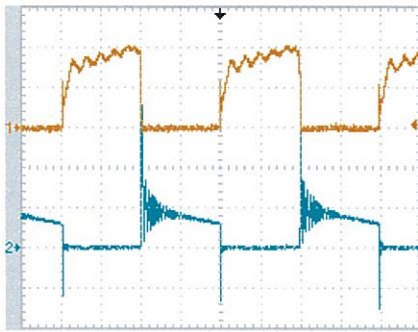
รูปที่ 4.45 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของสวิตช์และไดโอด  $D_3$  เมื่อ  $I_o = 0.39A$  และ  $V_i = 30V$ 

(ก) ผลการทดลอง

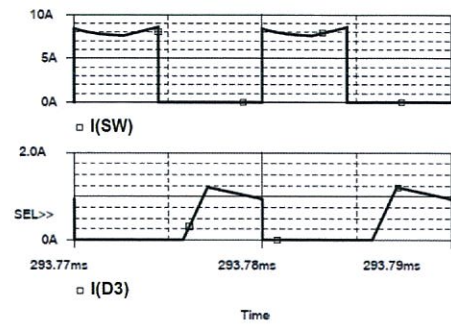
CH1:  $I_{SW}$  [5A/div] และ CH2:  $I_{D3}$  [1A/div]

(ข) ผลการจำลองการทำงาน

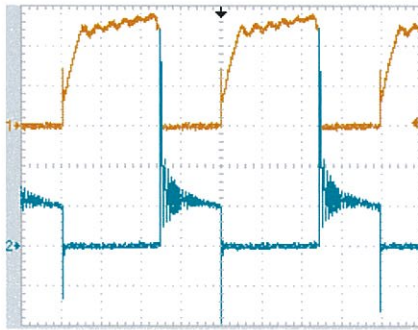
รูปที่ 4.46 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของสวิตช์และไดโอด  $D_3$  เมื่อ  $I_o = 0.39A$  และ  $V_i = 35V$



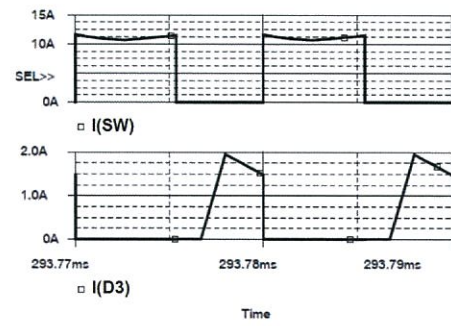
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $I_{SW}$  [5A/div] และ CH2:  $I_{D_3}$  [1A/div]

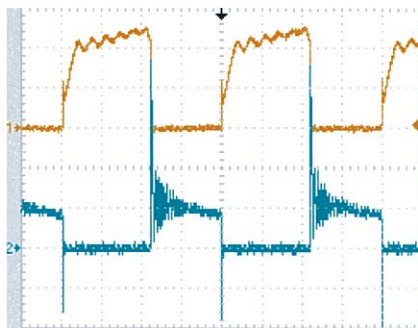
(ข) ผลการจำลองการทำงาน

รูปที่ 4.47 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของสวิตช์และไดโอด  $D_3$  เมื่อ  $I_o = 0.39A$  และ  $V_i = 40V$ 

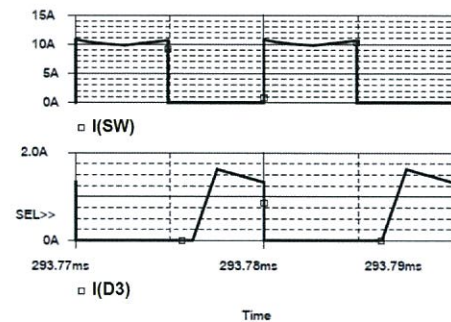
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $I_{SW}$  [5A/div] และ CH2:  $I_{D_3}$  [1A/div]

(ข) ผลการจำลองการทำงาน

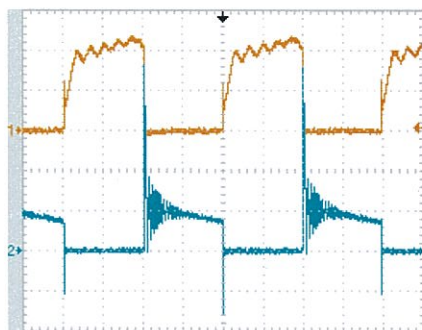
รูปที่ 4.48 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของสวิตช์และไดโอด  $D_3$  เมื่อ  $I_o = 0.47A$  และ  $V_i = 30V$ 

(ก) ผลการทดลอง

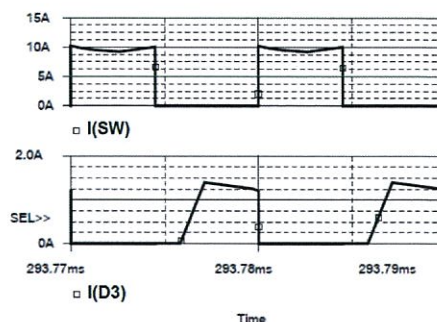
CH1:  $I_{SW}$  [5A/div] และ CH2:  $I_{D_3}$  [1A/div]

(ข) ผลการจำลองการทำงาน

รูปที่ 4.49 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของสวิตช์และไดโอด  $D_3$  เมื่อ  $I_o = 0.47A$  และ  $V_i = 35V$



(ก) ผลการทดลอง



(ข) ผลการจำลองการทำงาน

CH1:  $I_{SW}$  [5A/div] และ CH2:  $I_{D3}$  [1A/div]

รูปที่ 4.50 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของสวิตช์และไดโอด  $D_3$  เมื่อ  $I_o = 0.47A$  และ  $V_i = 40V$

ผลการวัดรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของสวิตช์และไดโอด  $D_3$  แสดงดังรูปที่ 4.39(ก) ถึงรูปที่ 4.50(ก) และผลจากการจำลองการทำงานแสดงดังรูปที่ 4.39(ข) ถึงรูปที่ 4.50(ข) มีลักษณะคล้ายคลึงกัน รวมถึงค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ไหลผ่านสวิตช์และค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไดโอด  $D_3$  ที่คาบเวลา ( $T = 10\mu s$ ) ที่วัดได้และจากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice มีค่าใกล้เคียงกันดังตารางที่ 4.9 และตารางที่ 4.10 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.9 การเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ไหลผ่านสวิตช์ระหว่างผลจากการวัด และผลจากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice

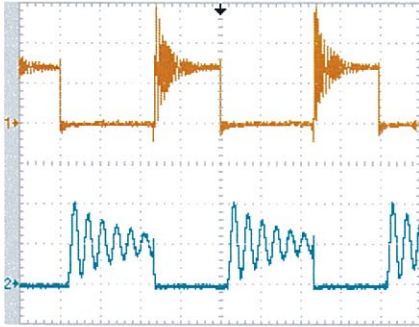
$V_i$	$I_o = 0.27A$		$I_o = 0.36A$		$I_o = 0.39A$		$I_o = 0.47A$	
	ค่าจากการวัด	ค่าจาก PSpice	ค่าจากการวัด	ค่าจาก PSpice	ค่าจากการวัด	ค่าจาก PSpice	ค่าจากการวัด	ค่าจาก PSpice
30V	7.60A	7.1285A	9.80A	9.0671A	10.50A	9.7480A	12.00A	11.6380A
35V	6.80A	6.6845A	8.70A	8.4496A	9.00A	8.8512A	10.80A	10.7930A
40V	6.50A	6.3649A	8.40A	7.9880A	8.90A	8.5578A	10.40A	10.1980A

ตารางที่ 4.10 การเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไดโอด  $D_3$  ระหว่างผลจากการวัด และผลจากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice

$V_i$	$I_o = 0.27A$		$I_o = 0.36A$		$I_o = 0.39A$		$I_o = 0.47A$	
	ค่าจากการวัด	ค่าจาก PSpice	ค่าจากการวัด	ค่าจาก PSpice	ค่าจากการวัด	ค่าจาก PSpice	ค่าจากการวัด	ค่าจาก PSpice
30V	0.60A	0.7225A	0.80A	1.0524A	0.90A	1.1719A	1.10A	1.4770A
35V	0.45A	0.5943A	0.70A	0.9193A	0.75A	0.9975A	1.00A	1.3244A
40V	0.40A	0.5289A	0.60A	0.8340A	0.70A	0.9321A	0.90A	1.2045A

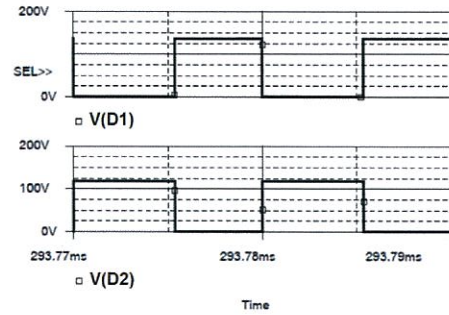
หมายเหตุ      ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไดโอด  $D_3$  วัดที่ตำแหน่ง Time = T (คาบเวลา)

#### 4.7 ผลการวัดแรงดันไฟฟ้าคร่อมไดโอด $D_1$ และ $D_2$



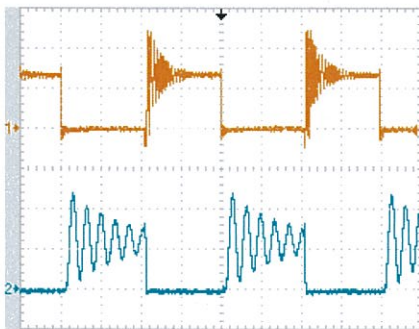
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $V_{D_1}$  [100V/div] และ CH2:  $V_{D_2}$  [100V/div]



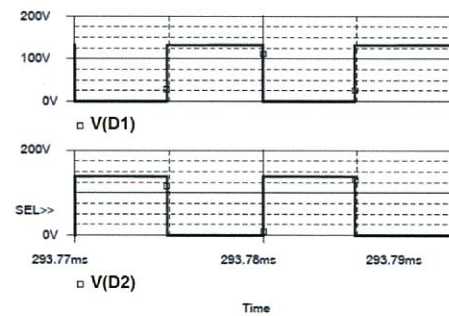
(ข) ผลการจำลองการทำงาน

รูปที่ 4.51 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$  เมื่อ  $I_o = 0.27A$  และ  $V_i = 30V$



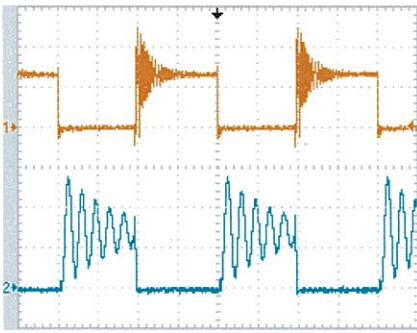
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $V_{D_1}$  [100V/div] และ CH2:  $V_{D_2}$  [100V/div]

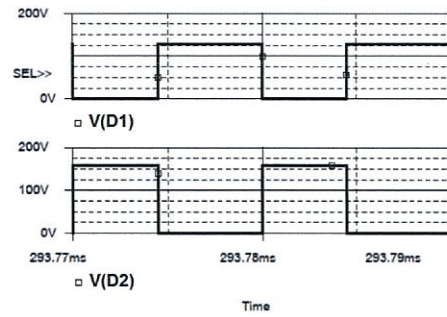


(ข) ผลการจำลองการทำงาน

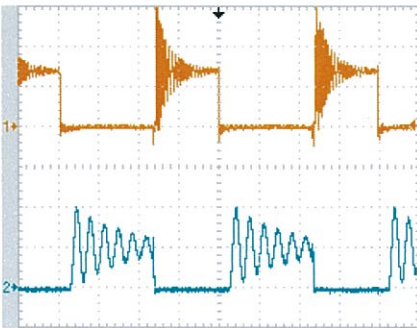
รูปที่ 4.52 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$  เมื่อ  $I_o = 0.27A$  และ  $V_i = 35V$



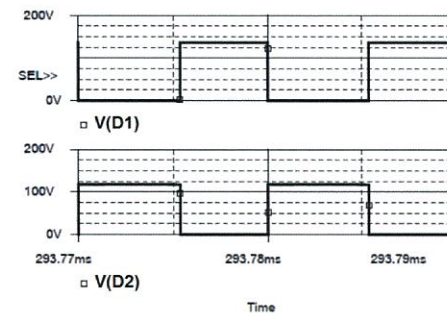
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $V_{D1}$  [100V/div] และ CH2:  $V_{D2}$  [100V/div]

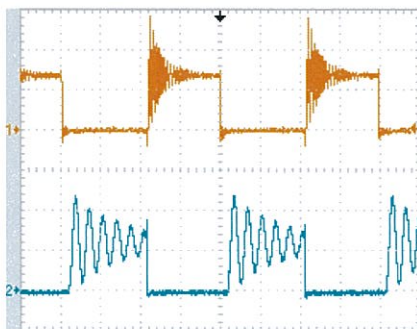
(ข) ผลการจำลองการทำงาน

รูปที่ 4.53 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$  เมื่อ  $I_o = 0.27A$  และ  $V_i = 40V$ 

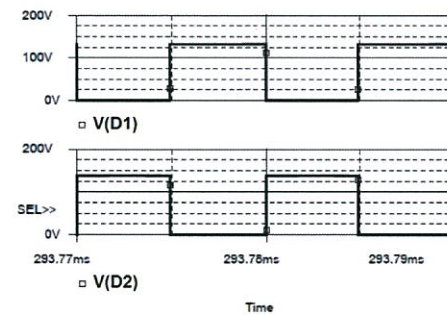
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $V_{D1}$  [100V/div] และ CH2:  $V_{D2}$  [100V/div]

(ข) ผลการจำลองการทำงาน

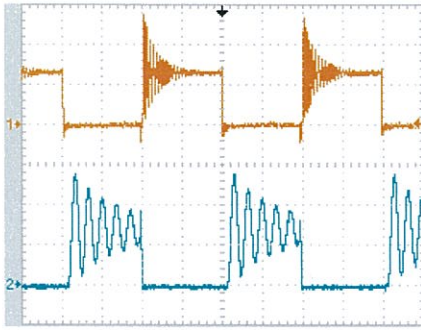
รูปที่ 4.54 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$  เมื่อ  $I_o = 0.36A$  และ  $V_i = 30V$ 

(ก) ผลการทดลอง

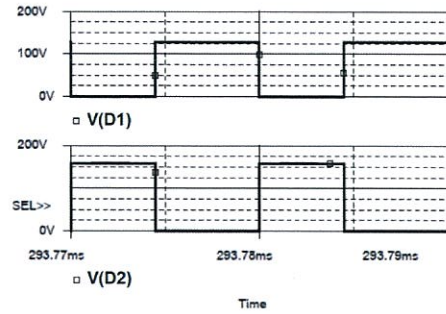
CH1:  $V_{D1}$  [100V/div] และ CH2:  $V_{D2}$  [100V/div]

(ข) ผลการจำลองการทำงาน

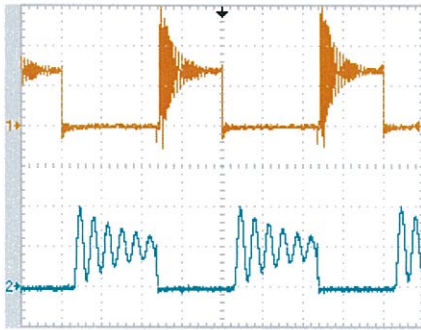
รูปที่ 4.55 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$  เมื่อ  $I_o = 0.36A$  และ  $V_i = 35V$



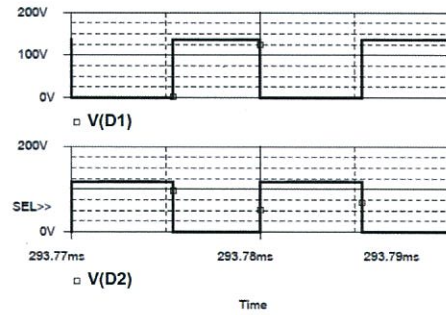
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $V_{D_1}$  [100V/div] และ CH2:  $V_{D_2}$  [100V/div]

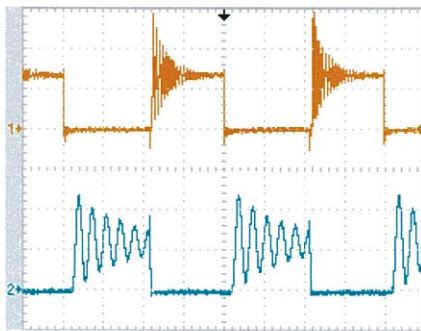
(ข) ผลการจำลองการทำงาน

รูปที่ 4.56 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$  เมื่อ  $I_o = 0.36A$  และ  $V_i = 40V$ 

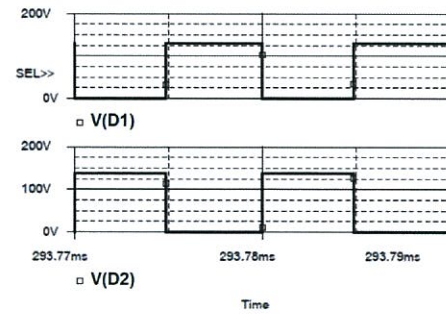
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $V_{D_1}$  [100V/div] และ CH2:  $V_{D_2}$  [100V/div]

(ข) ผลการจำลองการทำงาน

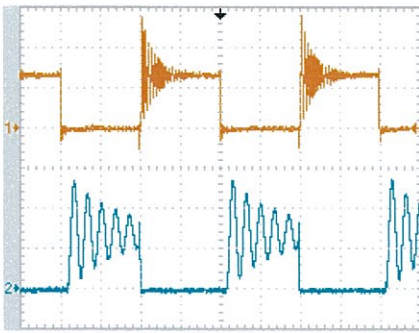
รูปที่ 4.57 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$  เมื่อ  $I_o = 0.39A$  และ  $V_i = 30V$ 

(ก) ผลการทดลอง

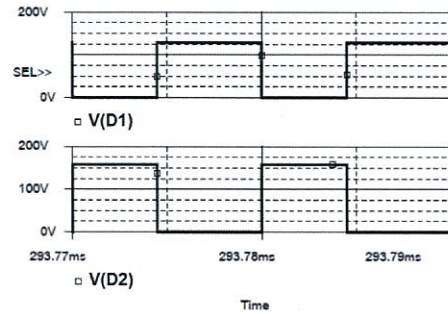
CH1:  $V_{D_1}$  [100V/div] และ CH2:  $V_{D_2}$  [100V/div]

(ข) ผลการจำลองการทำงาน

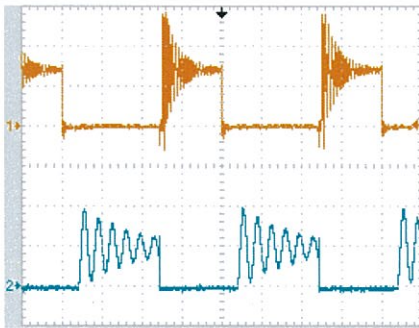
รูปที่ 4.58 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$  เมื่อ  $I_o = 0.39A$  และ  $V_i = 35V$



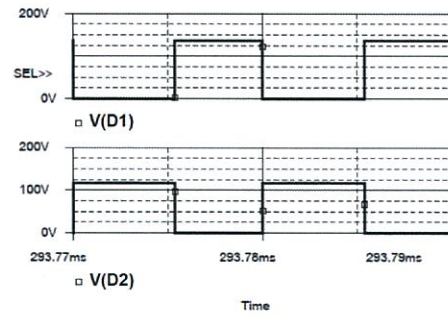
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $V_{D1}$  [100V/div] และ CH2:  $V_{D2}$  [100V/div]

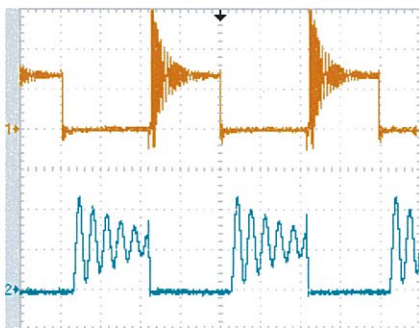
(ข) ผลการจำลองการทำงาน

รูปที่ 4.59 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$  เมื่อ  $I_o = 0.39A$  และ  $V_i = 40V$ 

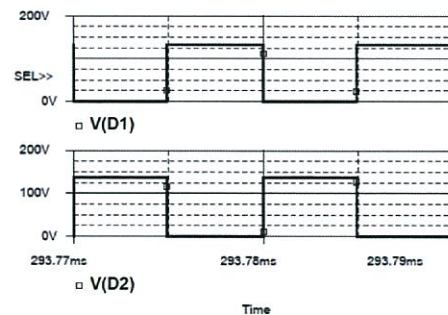
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $V_{D1}$  [100V/div] และ CH2:  $V_{D2}$  [100V/div]

(ข) ผลการจำลองการทำงาน

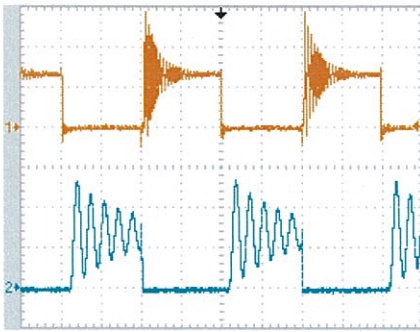
รูปที่ 4.60 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$  เมื่อ  $I_o = 0.47A$  และ  $V_i = 30V$ 

(ก) ผลการทดลอง

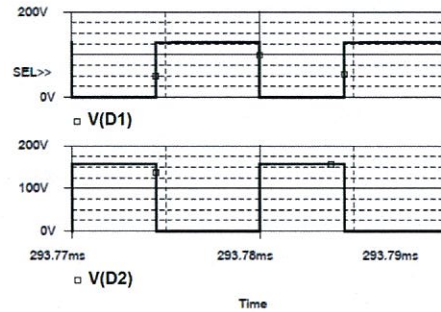
CH1:  $V_{D1}$  [100V/div] และ CH2:  $V_{D2}$  [100V/div]

(ข) ผลการจำลองการทำงาน

รูปที่ 4.61 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$  เมื่อ  $I_o = 0.47A$  และ  $V_i = 35V$



(ก) ผลการทดลอง



(ข) ผลการจำลองการทำงาน

CH1:  $V_{D_1}$  [100V/div] และ CH2:  $V_{D_2}$  [100V/div]

รูปที่ 4.62 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$  เมื่อ  $I_o = 0.47A$  และ  $V_i = 40V$

ผลการวัดรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$  แสดงดังรูปที่ 4.51(ก) ถึงรูปที่ 4.62(ก) มีลักษณะเดียวกันกับผลจากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice ดังรูปที่ 4.51(ข) ถึงรูปที่ 4.62(ข) ค่าแรงดันไฟฟ้าคร่อมไดโอด  $D_1$  จากตารางที่ 4.11 มีค่าใกล้เคียงกับค่าจากการคำนวณคือ 136V, 132V และ 128V เมื่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้าเท่ากับ 30V, 35V และ 40V ตามลำดับ และค่าแรงดันไฟฟ้าคร่อมไดโอด  $D_2$  จากตารางที่ 4.12 มีค่าใกล้เคียงกับค่าจากการคำนวณคือ 120V, 140V และ 160V เมื่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้าเท่ากับ 30V, 35V และ 40V ตามลำดับ

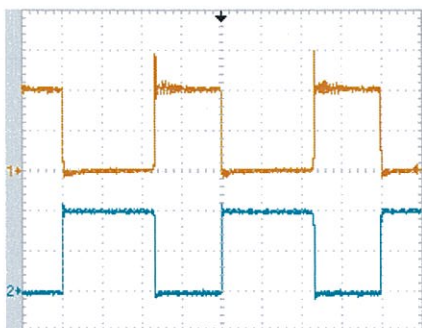
ตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าคร่อมไดโอด  $D_1$  ระหว่างผลจากการวัด และผลจากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice

$V_i$	$I_o = 0.27A$		$I_o = 0.36A$		$I_o = 0.39A$		$I_o = 0.47A$	
	ค่าจากการวัด	ค่าจาก PSpice	ค่าจากการวัด	ค่าจาก PSpice	ค่าจากการวัด	ค่าจาก PSpice	ค่าจากการวัด	ค่าจาก PSpice
30V	140V	136.085V	140V	135.938V	140V	136.242V	140V	136.161V
35V	135V	131.946V	135V	131.944V	135V	129.723V	135V	132.338V
40V	132V	128.159V	132V	127.999V	132V	128.371V	132V	128.252V

ตารางที่ 4.12 การเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าคร่อมไดโอด  $D_2$  ระหว่างผลจากการวัด และผลจากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice

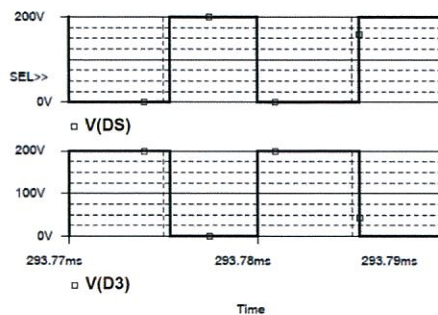
$V_i$	$I_o = 0.27A$		$I_o = 0.36A$		$I_o = 0.39A$		$I_o = 0.47A$	
	ค่าจากการวัด	ค่าจาก PSpice	ค่าจากการวัด	ค่าจาก PSpice	ค่าจากการวัด	ค่าจาก PSpice	ค่าจากการวัด	ค่าจาก PSpice
30V	120V	118.292V	120V	117.684V	118V	117.472V	120V	116.925V
35V	140V	138.426V	138V	137.867V	142V	137.730V	140V	137.171V
40V	160V	158.514V	160V	157.993V	162V	157.812V	160V	157.345V

#### 4.8 ผลการวัดแรงดันไฟฟ้าคร่อมสวิตช์และไดโอด $D_3$



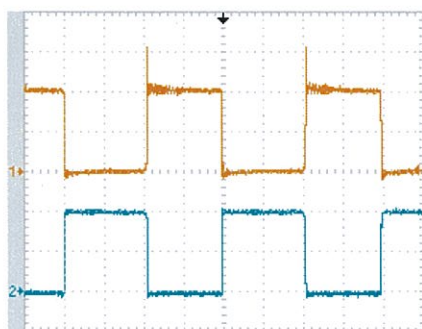
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $V_{DS}$  [100V/div] และ CH2:  $V_{D_3}$  [100V/div]



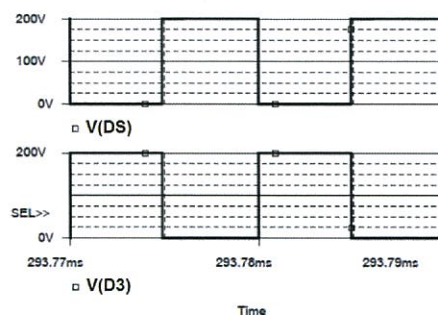
(ข) ผลการจำลองการทำงาน

รูปที่ 4.63 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมสวิตช์และไดโอด  $D_3$  เมื่อ  $I_o = 0.27A$  และ  $V_i = 30V$



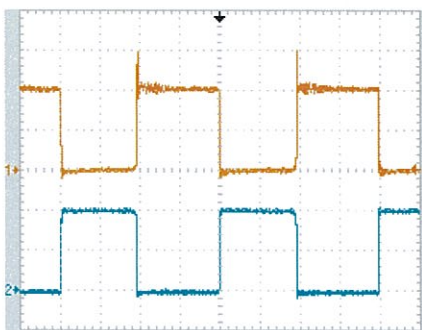
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $V_{DS}$  [100V/div] และ CH2:  $V_{D_3}$  [100V/div]



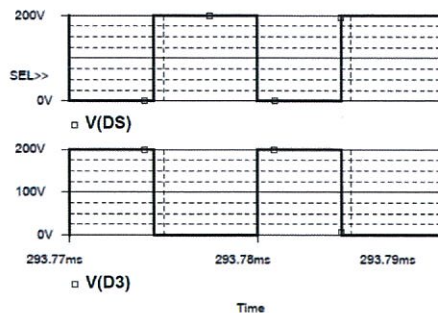
(ข) ผลการจำลองการทำงาน

รูปที่ 4.64 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมสวิตช์และไดโอด  $D_3$  เมื่อ  $I_o = 0.27A$  และ  $V_i = 35V$



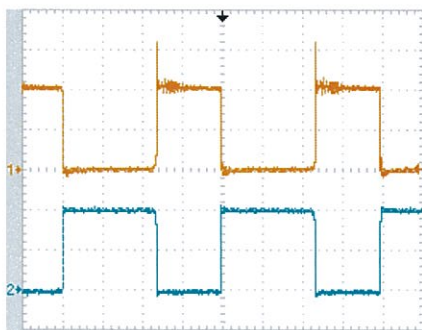
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $V_{DS}$  [100V/div] และ CH2:  $V_{D3}$  [100V/div]



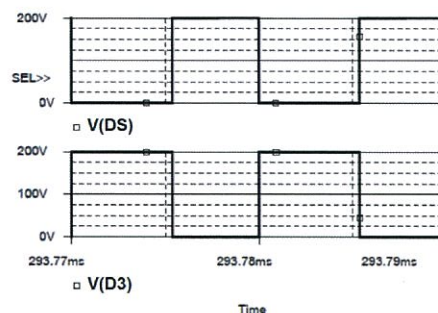
(ข) ผลการจำลองการทำงาน

รูปที่ 4.65 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมสวิตช์และไดโอด  $D_3$  เมื่อ  $I_o = 0.27A$  และ  $V_i = 40V$



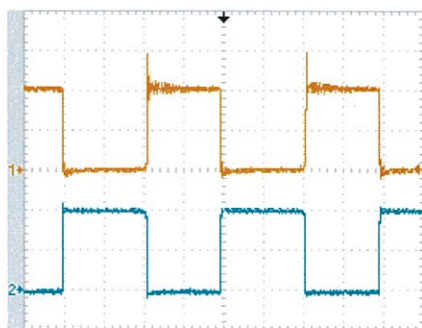
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $V_{DS}$  [100V/div] และ CH2:  $V_{D3}$  [100V/div]



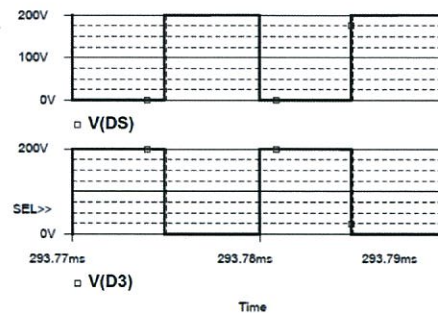
(ข) ผลการจำลองการทำงาน

รูปที่ 4.66 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมสวิตช์และไดโอด  $D_3$  เมื่อ  $I_o = 0.36A$  และ  $V_i = 30V$



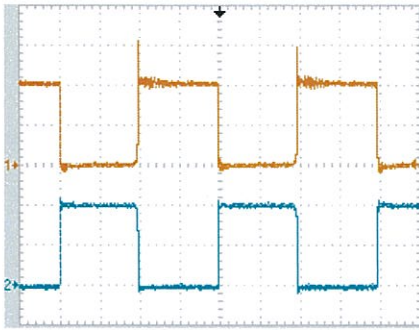
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $V_{DS}$  [100V/div] และ CH2:  $V_{D3}$  [100V/div]

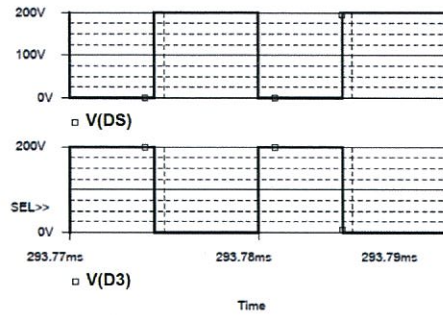


(ข) ผลการจำลองการทำงาน

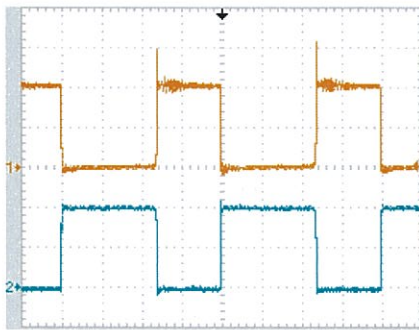
รูปที่ 4.67 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมสวิตช์และไดโอด  $D_3$  เมื่อ  $I_o = 0.36A$  และ  $V_i = 35V$



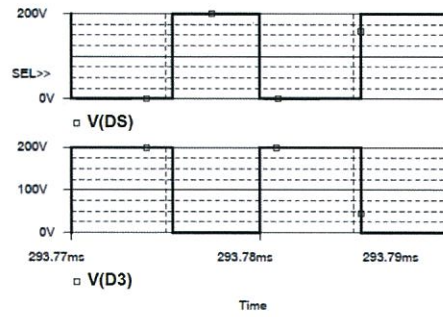
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $V_{DS}$  [100V/div] และ CH2:  $V_{D3}$  [100V/div]

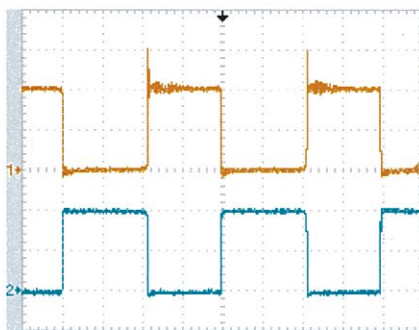
(ข) ผลการจำลองการทำงาน

รูปที่ 4.68 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมสวิตช์และไดโอด  $D_3$  เมื่อ  $I_o = 0.36A$  และ  $V_i = 40V$ 

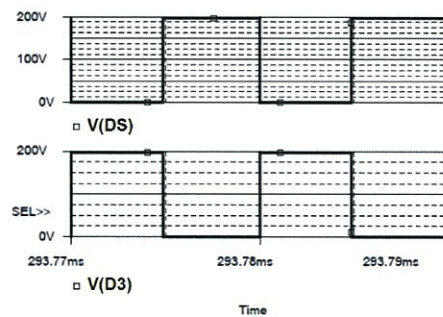
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $V_{DS}$  [100V/div] และ CH2:  $V_{D3}$  [100V/div]

(ข) ผลการจำลองการทำงาน

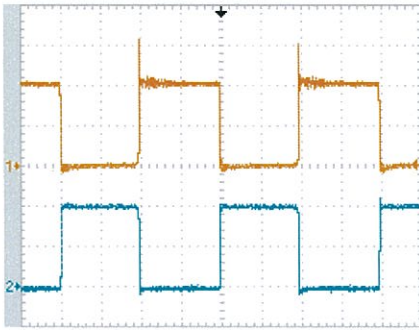
รูปที่ 4.69 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมสวิตช์และไดโอด  $D_3$  เมื่อ  $I_o = 0.39A$  และ  $V_i = 30V$ 

(ก) ผลการทดลอง

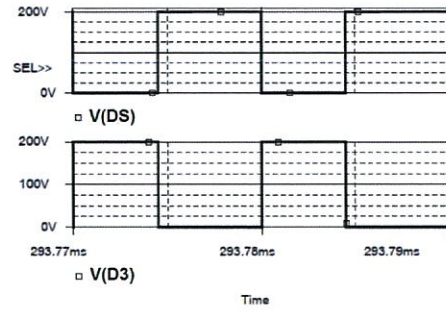
CH1:  $V_{DS}$  [100V/div] และ CH2:  $V_{D3}$  [100V/div]

(ข) ผลการจำลองการทำงาน

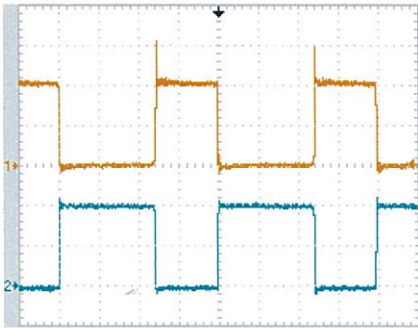
รูปที่ 4.70 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมสวิตช์และไดโอด  $D_3$  เมื่อ  $I_o = 0.39A$  และ  $V_i = 35V$



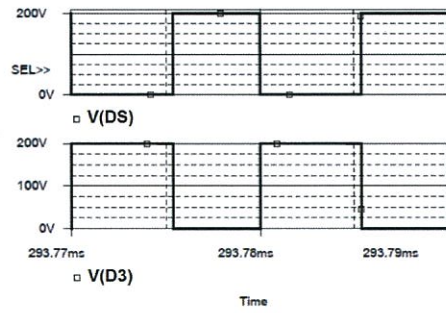
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $V_{DS}$  [100V/div] และ CH2:  $V_{D3}$  [100V/div]

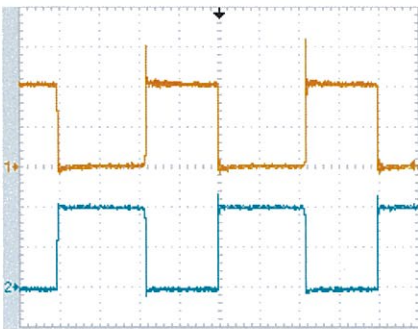
(ข) ผลการจำลองการทำงาน

รูปที่ 4.71 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมสวิตช์และไดโอด  $D_3$  เมื่อ  $I_o = 0.39A$  และ  $V_i = 40V$ 

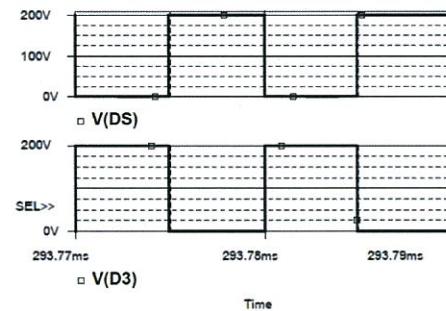
(ก) ผลการทดลอง

CH1:  $V_{DS}$  [100V/div] และ CH2:  $V_{D3}$  [100V/div]

(ข) ผลการจำลองการทำงาน

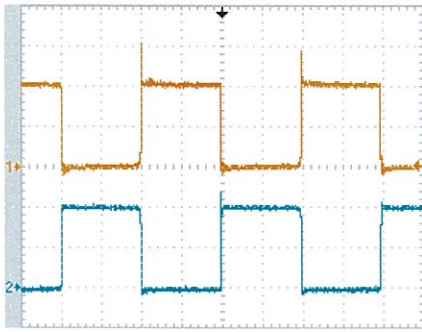
รูปที่ 4.72 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมสวิตช์และไดโอด  $D_3$  เมื่อ  $I_o = 0.47A$  และ  $V_i = 30V$ 

(ก) ผลการทดลอง

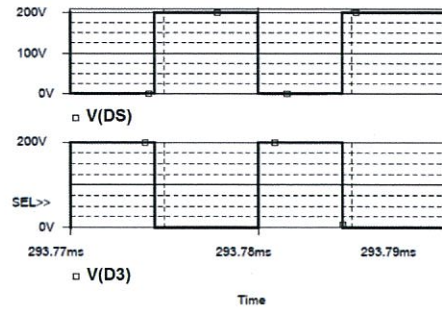
CH1:  $V_{DS}$  [100V/div] และ CH2:  $V_{D3}$  [100V/div]

(ข) ผลการจำลองการทำงาน

รูปที่ 4.73 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมสวิตช์และไดโอด  $D_3$  เมื่อ  $I_o = 0.47A$  และ  $V_i = 35V$



(ก) ผลการทดลอง



(ข) ผลการจำลองการทำงาน

CH1:  $V_{DS}$  [100V/div] และ CH2:  $V_{D3}$  [100V/div]

รูปที่ 4.74 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมสวิตช์และไดโอด  $D_3$  เมื่อ  $I_o = 0.47A$  และ  $V_i = 40V$

รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าคร่อมสวิตช์และไดโอด  $D_3$  จากการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.63(ก) ถึงรูปที่ 4.74(ก) มีลักษณะเดียวกันกับรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าจากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice ดังรูปที่ 4.63(ข) ถึงรูปที่ 4.74(ข) ค่าแรงดันไฟฟ้าคร่อมสวิตช์จากตารางที่ 4.13 มีค่าใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎีซึ่งเท่ากับ 200V และค่าแรงดันไฟฟ้าคร่อมไดโอด  $D_3$  จากตารางที่ 4.14 มีค่าใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎีซึ่งเท่ากับ 200V เช่นกัน

ตารางที่ 4.13 การเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าคร่อมสวิตช์ระหว่างผลจากการวัด และผลจากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice

$V_i$	$I_o = 0.27A$		$I_o = 0.36A$		$I_o = 0.39A$		$I_o = 0.47A$	
	ค่าจากการวัด	ค่าจาก PSpice	ค่าจากการวัด	ค่าจาก PSpice	ค่าจากการวัด	ค่าจาก PSpice	ค่าจากการวัด	ค่าจาก PSpice
30V	201V	200.106V	201V	199.923V	201V	200.303V	201V	200.201V
35V	201V	199.933V	201V	199.931V	201V	197.154V	201V	200.423V
40V	201V	200.199V	201V	199.999V	201V	200.464V	201V	200.316V

ตารางที่ 4.14 การเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าคร่อมไดโอด  $D_3$  ระหว่างผลจากการวัด และผลจากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice

$V_i$	$I_o = 0.27A$		$I_o = 0.36A$		$I_o = 0.39A$		$I_o = 0.47A$	
	ค่าจากการวัด	ค่าจาก PSpice	ค่าจากการวัด	ค่าจาก PSpice	ค่าจากการวัด	ค่าจาก PSpice	ค่าจากการวัด	ค่าจาก PSpice
30V	198V	199.642V	198V	199.294V	198V	199.617V	198V	199.369V
35V	198V	199.502V	198V	199.348V	198V	196.534V	198V	199.652V
40V	198V	199.790V	198V	199.448V	198V	199.864V	198V	199.587V

#### 4.9 ผลการวัดความสามารถในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าขาออก เมื่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้าและกระแสไฟฟ้าขาออกเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 4.15 ผลการวัดความสามารถในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าขาออก เมื่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้าและกระแสไฟฟ้าขาออกเปลี่ยนแปลง

$I_o$ $V_i$	0.27A	0.36A	0.39A	0.47A
30V	400.36V	401.99V	400.55V	401.01V
35V	401.37V	400.97V	400.70V	400.65V
40V	401.60V	401.29V	400.78V	401.28V

ผลการวัดความสามารถในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าขาออกและค่าดีวีดีซีเคิล เมื่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้าและกระแสไฟฟ้าขาออกเปลี่ยนแปลงแสดงดังตารางที่ 4.15 และตารางที่ 4.2 จากตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าค่าดีวีดีซีเคิลจากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎีคือ 0.5313, 0.4853 และ 0.4444 เมื่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้าเท่ากับ 30V, 35V และ 40V ตามลำดับ

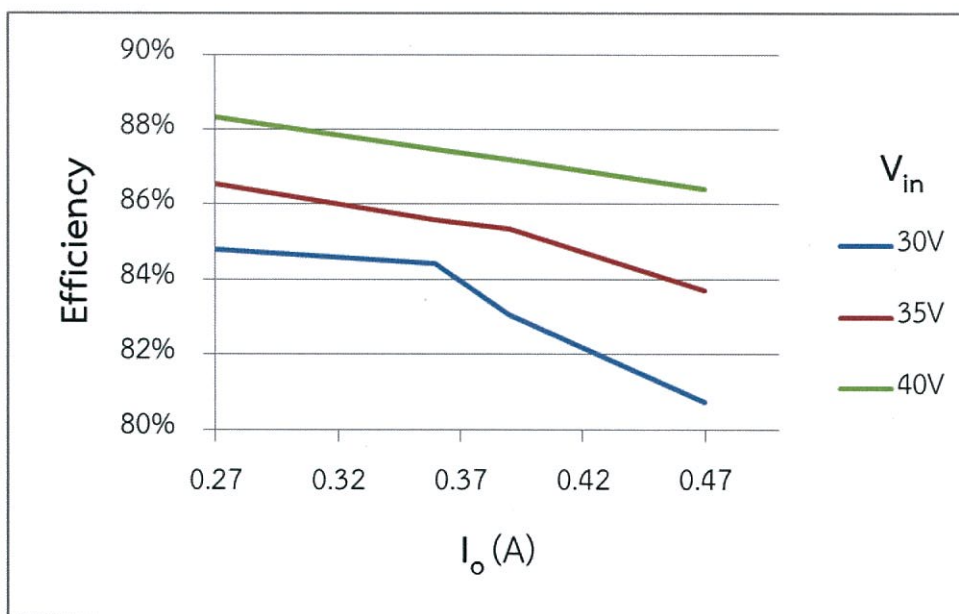
จากตารางที่ 4.15 จะเห็นว่าวงจรสามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าขาออกได้ที่ 400V ที่แรงดันไฟฟ้าขาเข้าเท่ากับ 30V, 35V และ 40V และที่กระแสไฟฟ้าขาออกเท่ากับ 0.27A, 0.36A, 0.39A และ 0.47A

#### 4.10 ผลการวัดประสิทธิภาพของวงจร

ผลการวัดประสิทธิภาพของวงจรต้นแบบที่ค่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้า และกระแสไฟฟ้าขาออกต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.16 และนำไปเขียนกราฟแสดงแนวโน้มของประสิทธิภาพได้ดังรูปที่ 4.75 จากการทดลองวงจรต้นแบบมีประสิทธิภาพสูงสุดประมาณ 88% ที่แรงดันไฟฟ้าขาเข้าสูงสุดและกระแสไฟฟ้าขาออกต่ำสุด เมื่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้าลดลง กระแสไฟฟ้าขาออกสูงขึ้น ประสิทธิภาพของวงจรจะลดลง เนื่องจากความสูญเสียในการนำกระแสไฟฟ้าของสวิตช์และไดโอด

ตารางที่ 4.16 ผลการวัดประสิทธิภาพของวงจร เมื่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้า และกระแสไฟฟ้าขาออกเปลี่ยนแปลง

$\frac{I_o}{V_i}$	0.27A	0.36A	0.39A	0.47A
30V	84.803%	84.432%	83.052%	80.707%
35V	86.558%	85.591%	85.354%	83.697%
40V	88.324%	87.467%	87.213%	86.396%



รูปที่ 4.75 ประสิทธิภาพของวงจรที่แรงดันไฟฟ้าขาเข้าต่างๆ

## บทที่ 5

### สรุป

#### 5.1 สรุป

ปริณญาณพนธ์ฉบับนี้้นำเสนอวงจรมเพิ่มแรงดันดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่มีอัตราขยายสูงแบบใหม่ซึ่งเกิดจากการนำวงจรสวิตช์คัปเปิ้ลอินดักเตอร์บูสต์คอนเวอร์เตอร์ (Switched Coupled Inductor (SCL) Boost Converter) มาต่อร่วมกันกับวงจรมัลติเลเวล (Multilevel) ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรสวิตช์คัปเปิ้ลอินดักเตอร์บูสต์คอนเวอร์เตอร์ จะถูกเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าเป็นสองเท่าด้วยวงจรมัลติเลเวลสองระดับที่นำมาต่อร่วมกัน ทำให้อัตราขยายของวงจรแบบใหม่นี้เพิ่มสูงขึ้นได้

การวิเคราะห์ห้วงจรมเพิ่มแรงดันดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่มีอัตราขยายสูงแบบใหม่นี้ จะพิจารณาการทำงานของวงจรที่สภาวะคงตัวและไม่คิดผลของ Leakage Inductance ของตัวเหนี่ยวนำร่วม ทำให้สามารถเขียนรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของวงจรโดยประมาณได้ดังรูปที่ 3.4 ซึ่งจากรูปสามารถหาสมการค่าตัวดีไอเคิล (3.3) สมการกระแสไฟฟ้า  $I_{L_m}$  (3.5) สมการกระแสไฟฟ้า  $I_{L_m(max)}$  (3.6) สมการกระแสไฟฟ้า  $I_{L_m(min)}$  (3.7) สมการค่าของตัวเหนี่ยวนำร่วม  $L_{min}$  (3.8) และสมการค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ (3.9) โดยสมการเหล่านี้สามารถนำมาใช้ในการกำหนดพิกัดของอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรได้ แต่เนื่องจากในการศึกษาครั้งนี้ไม่ได้มีการพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ จึงจะใช้การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice ในการหาขนาดพิกัดกระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์แทน

ผลการทดสอบสมรรถนะของวงจรต้นแบบที่สร้างขึ้นสามารถสรุปได้ดังนี้

- ค่าตัวดีไอเคิลที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎี
- วงจรสามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าขาออก 400V ให้คงที่ได้ แม้แรงดันไฟฟ้าขาเข้าจะเปลี่ยนแปลงในช่วง 30V ถึง 40V
- ผลการวัดรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของสวิตช์ ไดโอด  $D_1$ ,  $D_2$  และ  $D_3$  มีความคล้ายคลึงกับรูปคลื่นทางทฤษฎีในรูปที่ 3.4 และมีค่าใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎี
- ผลการวัดประสิทธิภาพที่ค่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้าและกระแสไฟฟ้าขาออกต่างๆ พบว่ามีประสิทธิภาพสูงสุดประมาณ 88% แต่เมื่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้าลดลง กระแสไฟฟ้าขาออกสูงขึ้น ประสิทธิภาพของวงจรจะลดลง เนื่องจากความสูญเสียในการนำกระแสไฟฟ้าของสวิตช์และไดโอด

- งานวิจัยในปริญยานิพนธ์นี้ได้เน้นศึกษาเฉพาะส่วนของวงจรภาคกำลัง

## เอกสารอ้างอิง

- [1] D. W. Hart, “**Power Electronics**” Europe: McGraw-Hill Education, 2010.
- [2] I. Laird, D.D.C. Lu, and V. G. Agelidis, “**High-gain switched-coupled-inductor boost converter,**” IEEE transactions on Power Electronics and Drive Systems, 2009, pp. 423-428.
- [3] J. C. Rosas-Caro, J. M. Ramirez, F. Z. Peng and A. Valderrabano, “**A DC-DC multilevel boost converter,**” IET Power Electronics, vol. 3, no. 1, pp. 129-137, January 2010.

## ประวัติผู้วิจัย



นาย ปรีชาพร ปรีชาพลกุล

เกิดวันที่ 29 มิถุนายน พ.ศ. 2538

ประวัติการศึกษา : สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสตรีประเสริฐศิลป์ จังหวัดตราด  
เข้าศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปี พ.ศ. 2557

เบอร์โทรศัพท์ : 081-782-6799

อีเมล : Preechapollakul.pp@gmail.com

ความสามารถด้านการใช้โปรแกรม : Orcad PSPICE, SOLIDWORKS, MS Office

ทักษะด้านภาษา : ภาษาอังกฤษ

ฝึกงานที่ : บริษัท ไทยซัมมิทโกลด์เพรส จำกัด

## ประวัติผู้วิจัย (ต่อ)



นางสาว อังคณา ศรีวิทิตกุล

เกิดวันที่ 12 กันยายน พ.ศ. 2538

ประวัติการศึกษา : สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนอัสสัมชัญคอนแวนต์ จังหวัด กรุงเทพมหานคร เข้าศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปี พ.ศ. 2557

เบอร์โทรศัพท์ : 086-778-2501

อีเมล : unggkana.ks@gmail.com

ความสามารถด้านการใช้โปรแกรม : Microsoft Office (Excel, Word, PowerPoint, Visio), SOLIDWORKS, PSpice, C programming, Arduino, Altium Designer, EAGLE และ MATLAB

ทักษะด้านภาษา : ภาษาอังกฤษ

ฝึกงานที่ : TOKAI UNIVERSITY (SHONAN CAMPUS)