

วงจรถับระดับอัตราขยายแรงดันสูงแบบขนานเหลื่อมเฟส

**HIGH GAIN DC BOOST CONVERTER USING PARALLELY
INTERLEAVED TECHNIQUE**

วีระชาติ ชัดมัน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2556
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

วงจรทบระดับอัตราขยายแรงดันสูงแบบขนานเหลื่อมเฟส

วีระชาติ ชัดมัน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

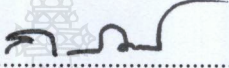
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

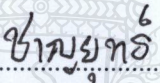
ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์ วงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูงแบบขนานเหลื่อมเฟส
High Gain DC Boost Converter using Parallely Interleaved Technique
ชื่อ - นามสกุล นายวีระชาติ ชัดมัน
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ทรัพย์สิงห์, Ph.D.
ปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์, Ph.D.)


..... กรรมการ
(อาจารย์ชาญยุทธ์ กาญจนพิบูลย์, Ph.D.)


..... กรรมการ
(อาจารย์สุรินทร์ แห่งมงาม, Ph.D.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ทรัพย์สิงห์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 20 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2557

หัวข้อวิทยานิพนธ์	วงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูงแบบขนานเหลื่อมเฟส
ชื่อ – นามสกุล	นายวีระชาติ ชัดมัน
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ทรัพย์สิงห์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2556

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอเกี่ยวกับการวิเคราะห์และออกแบบวงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูงแบบขนานเหลื่อมเฟส เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาและการประยุกต์วงจรทระดับแรงดันที่เหมาะสมสำหรับการต่อใช้งานร่วมกับระบบผลิตกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ วงจรทระดับแรงดันที่นำเสนอนี้มีข้อดีคือ มีอัตราขยายแรงดันด้านออกสูง ทำให้สามารถขยายแรงดันด้านออกให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมกับการใช้งานหรือสามารถประยุกต์ใช้กับงานอื่นๆ ได้ แนวความคิดของวิทยานิพนธ์อยู่ที่การออกแบบและสร้างวงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูงแบบขนานโดยใช้เทคนิคการเหลื่อมเฟส ให้มีความสามารถในการยกระดับแรงดันด้านออกสูง พิกัดกำลังไฟฟ้าด้านออกสูงสุดที่ 500 W

วงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูงที่นำเสนอนี้จะทำหน้าที่ยกระดับแรงดันจากทางด้านเข้า 24 V ให้ได้ระดับแรงดันทางด้านออก 120 V พิกัดกำลังไฟฟ้าด้านออกสูงสุด 500 W โดยมีการควบคุมค่าระดับแรงดันด้านออกให้คงที่ ด้วยวิธีการป้อนกลับแรงดันควบคุมแบบพีไอ รูปแบบวงจรที่นำเสนอจะใช้วิธีการขนานกันจำนวน 4 วงจร ควบคุมการสวิตช์ด้วยวิธีการปรับความกว้างของพัลส์ และมีการเหลื่อมเฟสกัน 90 องศา เพื่อลดการกระเพื่อมของคลื่นกระแส

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นสมรรถนะของวงจรทระดับแรงดันที่นำเสนอ สามารถตอบสนองการทำงานทั้ง 2 สภาวะคือ สภาวะคงตัวและสภาวะชั่วขณะ โดยทำการทดสอบวงจรที่ค่าพิกัดกำลังไฟฟ้า 125 W, 250 W, 375 W และ 500 W ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดสอบวงจรสามารถควบคุมแรงดันทางด้านออกให้มีค่า 120 V คงที่ และมีการตอบสนองอย่างรวดเร็วถึงแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใดก็ตาม โดยวงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูงที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 90% ที่แรงดัน 120 V พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุด 500 W

คำสำคัญ: วงจรทระดับแรงดัน การปรับความกว้างของพัลส์ เทคนิคการเหลื่อมเฟส

Thesis Title	High Gain DC Boost Converter using Parallely Interleaved Technique
Name - Surname	Mr.Weerachat Khadmun
Program	Electrical Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Wanchai Subsingha, Ph.D.
Academic Year	2013

ABSTRACT

This paper presents the high gain DC boost converter using a parallely interleaved technique in order to develop and apply an appropriate converters in utilized with photovoltaic system. This proposed converter has an advantage high voltage gain which is able to use with other applications. However, the concepts of this research is to design and build high gain non-isolated DC boost converter at 500 W power rating.

This proposed high gain DC boost converter converts 24 V input voltage to 120 V output voltage with rated power output of 500 W. The voltage PI compensation was applied to this proposed converter. The power stage was implemented by 4 parallel circuits. Power switches was gating by a variable pulse width modulation with a 90 degree phase shift technique for reduce system current ripple.

From the experimental results, the proposed converter can operated in good performance both in steady and transient condition. It can regulate a 120 V output voltage at operation power rating of 125 W, 250 W, 375 W and 500 W. Nevertheless, the 120 V output voltage can be regulated both steady state and transient state under sudden load changes. The efficiency of this proposed converter is about 90 percentage at 120 V voltage output at 500 W power output.

Keywords: high gain dc boost converter, pulse width modulation, interleaved technique

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณาและความอนุเคราะห์ของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์ ประธานกรรมการสอบ อาจารย์ ดร.สุรินทร์ แห่งงาม กรรมการสอบ และ อาจารย์ ดร.ชาญยุทธ์ กาญจนพิบูลย์ กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่อง พร้อมทั้งช่วยเหลือในการแก้ไขปัญหาต่างๆในการทำวิทยานิพนธ์ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ล้านนา น่าน ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือและห้องปฏิบัติการทดลอง รวมถึงคณาจารย์ในสาขา วิศวกรรมไฟฟ้าที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ที่ดีตลอดมาจนวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสิ้น

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่คอยเป็นกำลังใจและอบรมสั่งสอนให้ ผู้ทำวิจัยมีความอดทนต่อสู้กับอุปสรรคที่เกิดขึ้น ตลอดจนได้ให้ความเมตตาสนับสนุนช่วยเหลือ ด้านค่าใช้จ่ายในการเรียนทั้งหมด ตั้งแต่เริ่มมาสมัครเข้าเรียนจนสำเร็จการศึกษา ซึ่งถือเป็นผู้ที่ให้ โอกาสทางการศึกษาที่ดีที่สุดในชีวิต

ประโยชน์อันใดก็ตามที่เกิดขึ้นจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบเป็นความดีให้กับ ทุกท่านที่กล่าวมาแล้วข้างต้นขอให้ท่านทั้งหลายจงมีแต่ ความสุข ความเจริญ สืบเนื่องตลอดไป

วีระชาติ ชัดมัน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(12)
บทที่ 1 บทนำ.....	13
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	13
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	14
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	14
1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	14
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	14
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.1 เซลล์แสงอาทิตย์.....	16
2.2 แบตเตอรี่.....	20
2.3 วงจรทบทแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	23
2.4 วงจรทบทระดับอัตราขยายแรงดันสูงแบบเหลื่อมเฟส.....	29
2.5 ทฤษฎีพื้นฐานการมอดูเลตแบบปรับความกว้างพัลส์.....	32
2.6 วงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้านออก.....	33
2.7 ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล.....	38
2.8 สรุป.....	40
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	41
3.1 สมการทางคณิตศาสตร์ของวงจรระดับแรงดัน.....	41
3.2 สมการทางคณิตศาสตร์ของวงจรทบทระดับแรงดันแบบวงจรถ่าย.....	43
3.3 สมการทางคณิตศาสตร์ของวงจรทบทระดับอัตราขยายแรงดันสูง.....	50

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 สมการทางคณิตศาสตร์ของวงจรถอบระดับแรงดันแบบขนานสองเฟส.....	52
3.5 สมการทางคณิตศาสตร์ของวงจรถอบระดับอัตราขยายแรงดันสูงที่มีการขนาน.....	57
3.6 การออกแบบวงจรถอบภาคควบคุมวงจรถอบระดับอัตราขยายแรงดันสูง.....	59
3.7 การออกแบบวงจรถอบกำลังวงจรถอบระดับอัตราขยายแรงดันสูง.....	65
3.8 การจำลองการทำงานวงจรถอบระดับอัตราขยายแรงดันสูง.....	70
3.9 สรุป.....	75
บทที่ 4 ผลการทดสอบ.....	76
4.1 การทดสอบวงจรถอบระดับอัตราขยายแรงดันสูง.....	76
4.2 การทดสอบที่สภาวะคงตัว.....	77
4.3 การทดสอบที่สภาวะชั่วขณะ.....	86
4.4 ประสิทธิภาพวงจร.....	90
4.4 สรุป.....	91
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	92
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	92
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	93
รายการอ้างอิง.....	94
ภาคผนวก.....	96
ภาคผนวก ก วงจรถอบระดับอัตราขยายแรงดันสูงเครื่องต้นแบบ.....	97
ภาคผนวก ข ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	99
ประวัติผู้เขียน.....	104

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง.....	70
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรที่ใช้ในการทดสอบ.....	77



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์.....	17
รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์.....	18
รูปที่ 2.3 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....	19
รูปที่ 2.4 แสดงส่วนประกอบของแบตเตอรี่ตะกั่ว – กรด.....	20
รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบของเซลล์โวลตาอิก.....	22
รูปที่ 2.6 วงจรทบระดับแรงดัน.....	23
รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์นำกระแส.....	24
รูปที่ 2.8 แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ.....	25
รูปที่ 2.9 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ.....	25
รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส.....	25
รูปที่ 2.11 วงจรทบระดับแรงดันตัวเหนี่ยวนำและไดโอดอยู่ด้านลบ.....	28
รูปที่ 2.12 วงจรทบระดับแรงดันแบบขนานหลายเฟส.....	29
รูปที่ 2.13 วงจร PWM แบบอนาล็อก.....	31
รูปที่ 2.14 หลักการสร้างสัญญาณ PWM.....	32
รูปที่ 2.15 วงจรพื้นฐานสำหรับการควบคุมใน โหมคควบคุมจากแรงดัน.....	33
รูปที่ 2.16 การแสดงลักษณะความกว้างของพัลส์จาก PWM.....	34
รูปที่ 2.17 วงจรพื้นฐานสำหรับการควบคุมใน โหมคควบคุมจากกระแส.....	34
รูปที่ 2.18 วงจรควบคุมเมื่อตัดตัวขยายความแตกต่างออก.....	35
รูปที่ 2.19 ลักษณะการทำงานที่จุดต่างๆ ของวงจร.....	37
รูปที่ 2.20 การ์ดอินเตอร์เฟส dSPACE รุ่น DS1104.....	38
รูปที่ 2.21 บล็อกไดอะแกรมฮาร์ดแวร์ของการ์ดอินเตอร์เฟส DS1104.....	39
รูปที่ 3.1 โครงสร้างวงจรทบระดับอัตราขยายแรงดันสูง.....	41
รูปที่ 3.2 แผนภูมิขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	42
รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลของวงจรทบระดับแรงดัน โดยที่ตัวเหนี่ยวนำอยู่ด้านบวก.....	43
รูปที่ 3.4 วงจรสมมูลของวงจรทบระดับแรงดัน โดยที่ตัวเหนี่ยวนำอยู่ด้านลบ.....	44
รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลของวงจรทบระดับแรงดันเมื่อสวิตช์นำกระแส.....	44

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลย์ของวงจรทระดับแรงดันเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส.....	46
รูปที่ 3.7 กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ.....	49
รูปที่ 3.8 วงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูง.....	50
รูปที่ 3.9 เปรียบเทียบอัตราขยายแรงดันวงจรทระดับแรงดัน.....	52
รูปที่ 3.10 วงจรทระดับแรงดันแบบขนานสองเฟส.....	52
รูปที่ 3.11 วงจรสมมูลย์ขณะสวิตช์นำกระแส.....	53
รูปที่ 3.12 วงจรสมมูลย์ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส.....	55
รูปที่ 3.13 วงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูงแบบขนานเหลื่อมเฟส.....	57
รูปที่ 3.14 วงจรมอดูเลตตามความกว้างของสัญญาณพัลส์.....	61
รูปที่ 3.15 แสดงตำแหน่งขาของไอซี 74HC595.....	62
รูปที่ 3.16 วงจรสร้างสัญญาณเหลื่อมเฟส.....	63
รูปที่ 3.17 วงจรขับนำสวิตช์โดยใช้ไอซีเบอร์ TLP 250.....	64
รูปที่ 3.18 วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุท.....	64
รูปที่ 3.19 ระบบควบคุมแรงดันป้อนกลับแบบพีไอ.....	65
รูปที่ 3.20 แบบจำลองวงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูง.....	71
รูปที่ 3.21 สัญญาณกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_{L1}, i_{L2}) ที่พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	72
รูปที่ 3.22 สัญญาณกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_{L3}, i_{L4}) ที่พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	72
รูปที่ 3.23 สัญญาณแรงดันของตัวเก็บประจุ C_u ที่พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	73
รูปที่ 3.24 สัญญาณแรงดันของตัวเก็บประจุ C_b ที่พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	73
รูปที่ 3.25 สัญญาณแรงดันด้านออก (V_{output}) ที่พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	74
รูปที่ 3.26 สัญญาณกระแสด้านออก (I_{load}) ที่พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	74
รูปที่ 4.1 วงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูงที่ใช้ทดสอบ.....	77
รูปที่ 4.2 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้ง 4 เฟส ที่กระแสโหลด 1 A.....	78
รูปที่ 4.3 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้ง 4 เฟส ที่กระแสโหลด 2 A.....	79
รูปที่ 4.4 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้ง 4 เฟส ที่กระแสโหลด 3 A.....	79
รูปที่ 4.5 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้ง 4 เฟส ที่กระแสโหลด 4 A.....	80

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.6 แรงดันด้านออก 120 V ที่กระแสไหล 1 A.....	80
รูปที่ 4.7 แรงดันด้านออก 120 V ที่กระแสไหล 2 A.....	81
รูปที่ 4.8 แรงดันด้านออก 120 V ที่กระแสไหล 3 A.....	81
รูปที่ 4.9 แรงดันด้านออก 120 V ที่กระแสไหล 4 A.....	82
รูปที่ 4.10 แรงดันด้านออกขณะกระแสไหลสูงสุดที่ได้จากการจำลอง.....	82
รูปที่ 4.11 กระแสไหลสูงสุดของวงจรที่ได้จากการจำลอง.....	83
รูปที่ 4.12 แรงดันที่ตัวเก็บประจุ C_a และ C_b ที่กระแสไหล 1 A.....	83
รูปที่ 4.13 แรงดันที่ตัวเก็บประจุ C_a และ C_b ที่กระแสไหล 2 A.....	84
รูปที่ 4.14 แรงดันที่ตัวเก็บประจุ C_a และ C_b ที่กระแสไหล 3 A.....	84
รูปที่ 4.15 แรงดันที่ตัวเก็บประจุ C_a และ C_b ที่กระแสไหล 4 A.....	85
รูปที่ 4.16 แรงดันของตัวเก็บประจุ C_a ขณะกระแสไหล 4 A ที่ได้จากการจำลอง.....	85
รูปที่ 4.17 แรงดันของตัวเก็บประจุ C_b ขณะกระแสไหล 4 A ที่ได้จากการจำลอง.....	85
รูปที่ 4.18 กระแสไหลเปลี่ยนจาก 1 A ไปที่ 2 A กรณีระบบมีการชดเชย.....	87
รูปที่ 4.19 กระแสไหลเปลี่ยนจาก 1 A ไปที่ 3 A กรณีระบบมีการชดเชย.....	87
รูปที่ 4.20 กระแสไหลเปลี่ยนจาก 1 A ไปที่ 4 A กรณีระบบมีการชดเชย.....	88
รูปที่ 4.21 กระแสไหลเปลี่ยนจาก 1 A ไปที่ 2 A กรณีระบบไม่มีการชดเชย.....	89
รูปที่ 4.22 กระแสไหลเปลี่ยนจาก 1 A ไปที่ 3 A กรณีระบบไม่มีการชดเชย.....	89
รูปที่ 4.23 กระแสไหลเปลี่ยนจาก 1 A ไปที่ 4 A กรณีระบบไม่มีการชดเชย.....	90
รูปที่ 4.24 ตำแหน่งวัดกระแส แรงดัน สำหรับคำนวณหาประสิทธิภาพ.....	90
รูปที่ ก.1 วงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูงเครื่องต้นแบบ.....	98
รูปที่ ก.2 ระบบที่ใช้ทดสอบ.....	98

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A_p	Effective core Volume (Ve) มีหน่วยเป็น mm^3
A_w	Cross-sectional winding area of core (Acw) มีหน่วยเป็น mm^2
D	ค่าวัฏจักรงาน (Duty cycle)
D_N	จำนวนวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ขนานกันมากกว่า 2 เฟสขึ้นไป
f_s	ความถี่สวิตช์
I	กระแสไฟฟ้าขาออก (หัวข้อ 2.1)
I_D	กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไดโอด (หัวข้อ 2.1)
I_L	กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแหล่งพลังงานแสง (หัวข้อ 2.1)
I_{out}	กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต
I_{peak}	ค่ากระแสสูงสุดที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (A)
I_{SH}	กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านความต้านทาน Shunt (หัวข้อ 2.1)
I_{rms}	ค่ากระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (A)
k	จีดจำกัดของช่องหน้าต่างมีค่าระหว่าง 0.3-0.9
L	ค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการนำมาออกแบบ (H)
P_{in}	กำลังไฟฟ้าอินพุต
R_L	ค่าความต้านทานของขดลวดของตัวเหนี่ยวนำ
R_S	ความต้านทานอนุกรม (หัวข้อ 2.1)
S	Effective cross-sectional area (Ae) มีหน่วยเป็น mm^2
T	ค่าคาบเวลา
t_{on}	ค่าช่วงเวลาในสภาวะ High
u_o	แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต
u_s	แรงดันไฟฟ้าอินพุต
V	แรงดันไฟฟ้าขาออก (หัวข้อ 2.1)
W	พื้นที่หน้าต่างที่ใช้พันขดลวด (mm^2)
η	ประสิทธิภาพคอนเวอร์เตอร์
ΔI_L	อัตราค่าระลอกคลื่นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ
ΔU_{bus}	อัตราค่าระลอกคลื่นแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุเอาต์พุต

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นขบวนการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นกระแสไฟฟ้าได้โดยตรง โดยเมื่อแสงซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและจะมีพลังงานมากระทบกับสารกึ่งตัวนำจะเกิดการถ่ายทอดพลังงานระหว่างกัน โดยพลังงานจากแสงจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้า (อิเล็กตรอน) ขึ้นในสารกึ่งตัวนำ จึงสามารถนำพลังงานไฟฟ้างี้ดกล่าวไปใช้งานได้ แต่ยังมีข้อจำกัดด้วยตัวเซลล์แสงอาทิตย์เองคือแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้ซึ่งยังเป็นแรงดันที่ต่ำไม่สามารถนำไปใช้ได้ทันที หรือหากจะส่งออกไปเพื่อใช้งานกับโหลดทางไฟฟ้าก็ยังไม่สามารถใช้กับโหลดได้หลากหลาย จึงจำเป็นที่จะต้องยกระดับแรงดันไฟฟ้าเพื่อทำให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกที่ได้มีขนาดสูงขึ้นให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานยกตัวอย่างระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้งานแบ่งออกเป็น

- 42 V ใช้ในมาตรฐานระบบไฟฟ้ารถยนต์รุ่นใหม่
- 48 V, 120 -180 V หรือ 400 - 480 V สำหรับเป็นแหล่งจ่ายไฟหลักหรือใช้ขนานระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้าหลัก

- 70 V หรือ 350 V ใช้เป็นมาตรฐานในระบบขับเคลื่อนเครื่องบินไฟฟ้า
- 270 - 540 V ใช้ในระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้าพลังงานร่วม (CFV)
- 350 V ใช้ในระบบขนส่งมวลชนหรือทางพาณิชย์ เช่น รถบัส รถไฟ เป็นต้น

ในส่วนวงจรยกระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงจำเป็นที่จะต้องเลือกใช้วงจรทระดับแรงดัน (Boost Converter) [1-2] มาใช้งาน แต่เนื่องจากวงจรทระดับแรงดันแบบพื้นฐานยังมีข้อด้อยคือแรงดันไฟฟ้าด้านออกที่ได้ยังมีอัตราขยายต่ำ ดังนั้นเพื่อแก้ข้อด้อยนี้จึงได้นำวงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูงแบบขนานเหลื่อมเฟส (High Gain DC Boost Converter using Parallely Interleaved Technique) [3-9] มาใช้งาน จากการศึกษาพบว่าวงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูงโดยไม่ใช้หม้อแปลง ซึ่งวงจรทระดับแรงดันนี้จะต้องมีความน่าเชื่อถือได้สูงและทนทานต่อการชำรุดเสียหาย ดังนั้นวิธีการขนานวงจรทระดับแรงดัน เพื่อจะช่วยในการจ่ายกระแสและเพิ่มความน่าเชื่อถือได้ของระบบจึงเป็นทางออกที่น่าสนใจ วงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูงนี้ยังทำให้อุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรมีขนาดเล็กลง ความร้อนก็น้อยลง เนื่องจากมีการช่วยในการจ่ายกระแสของแต่ละเฟสจึงทำให้กำลังไฟฟ้ารวมมีค่าสูงขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาและออกแบบสร้างวงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูงแบบขนานเหลื่อมเฟส เพื่อนำไปต่อใช้งานกับโหลดซึ่งมีกระแสอินพุตต่อเนื่อง ควบคุมการสวิตช์ด้วยวิธีการปรับความกว้างของพัลส์ และควบคุมค่าระดับแรงดันด้านออกให้คงที่

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ออกแบบวงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูงแบบขนานเหลื่อมเฟส พิกัดแรงดันทางด้านเข้า 24 V แรงดันทางด้านออก 120 V พิกัดกำลังไฟฟ้าด้านออกสูงสุด 500 W

1.3.2 ออกแบบวงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูงแบบขนานเหลื่อมเฟสโดยใช้วิธีการขนานกันจำนวน 4 วงจร

1.3.3 ออกแบบวงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูงแบบขนานเหลื่อมเฟส โดยควบคุมแรงดันทางด้านออกให้มีค่าคงที่ตลอดเวลา

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

1.4.1 ศึกษาค้นคว้างานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ศึกษาการทำงานของวงจรทระดับแรงดันและวงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูงแบบขนานเหลื่อมเฟส

1.4.3 ศึกษาและจำลองของวงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูงแบบขนานเหลื่อมเฟส เพื่อให้ได้ผลการจำลองการทำงานตามขอบเขตที่กำหนด

1.4.4 สร้างวงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูงแบบขนานเหลื่อมเฟส ตามแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้

1.4.5 ทดสอบวงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูงแบบขนานเหลื่อมเฟสที่สร้างขึ้น เก็บข้อมูลจากการทดลองแล้วเปรียบเทียบกับผลการจำลองการทำงาน

1.4.6 สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัยเพื่อจัดทำวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1.5.1 ทำให้ทราบกระบวนการสร้างแบบจำลองและการออกแบบสร้างวงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูงแบบขนานเหลื่อมเฟส

1.5.2 สามารถพัฒนาและประยุกต์ใช้งาน วงจรทระดับอัตรายายแรงดันสูงแบบขนาน
เหลื่อมเฟส ควบคุมการสวิตช์ด้วยเทคนิคการปรับความกว้างพัลส์

1.5.3 เพื่อเป็นแนวทางในการวิจัยในหัวข้อที่มีวัตถุประสงค์เดียวกัน



บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทนี้กล่าวถึงหลักการงานพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ แบบเตอร์รี่ และหลักการงานของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบทระดับแรงดันและวงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูง ที่มีการขนานกันหลายเฟส รวมถึงการประยุกต์ใช้งานกับระบบผลิตกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

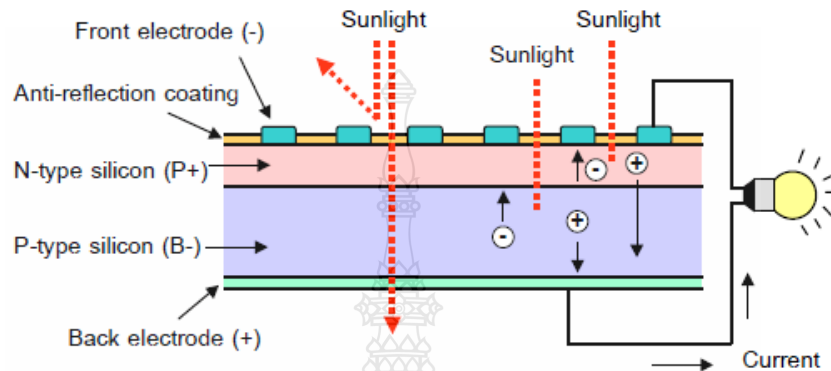
2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic Cell)

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าทำจากสารกึ่งตัวนำ จะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงเป็นไฟฟ้าโดยตรง [10] อาศัยกระบวนการโฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic Effect) ซึ่งจะเกิดจากความต่างศักย์ไฟฟ้าภายในสารกึ่งตัวนำมีค่าแตกต่างกัน โดยเมื่อได้รับแสงที่มีพลังงานมากพอซึ่งจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระ โดยโครงสร้างที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์มีลักษณะเหมือนกันกับไดโอดทั่วไป ประกอบด้วยรอยต่อระหว่างวัสดุสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกันสองชั้น ได้แก่ สารกึ่งตัวนำชนิดพีเป็นชั้นบวกและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเป็นชั้นลบ โดยสารกึ่งตัวนำมาใช้งานในลักษณะดังกล่าวส่วนมากเป็นซิลิกอนและเพื่อให้เข้าใจได้ง่ายซึ่งโดยส่วนใหญ่จะใช้การอธิบายสารกึ่งตัวนำที่ทำจากซิลิกอน แม้ว่าปัจจุบันจะมีสารกึ่งตัวนำที่ทำจากวัสดุอื่นก็ตาม

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน ซึ่งจะประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิดพีผลิตขึ้นจากผลึกของซิลิกอนใช้สารเจือปน กล่าวคือโบรอนเพื่อทำให้เป็นวัสดุขาดอิเล็กตรอนอิสระ ทั้งนี้การขาดอิเล็กตรอนทำให้เกิดช่องว่างเรียกว่า โฮล (Hole) และการขาดอิเล็กตรอนที่เป็นประจุลบ จึงทำให้ส่วนนี้เทียบได้กับอนุภาคประจุบวก ส่วนสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยจะผ่านการเติมสารเจือปนคือ ฟอสฟอรัสเพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนส่วนเกิน ซึ่งจุดเชื่อมต่อเรียกว่า รอยต่อพี-เอ็น การเชื่อมต่อกันของสารกึ่งตัวนำที่มี คุณสมบัติต่างกันจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้า (Electrical field) ในบริเวณรอยต่อ โดยสนามไฟฟ้านี้มีลักษณะเหมือนกับสนามไฟฟ้าสถิตย์ ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดอนุภาคของประจุลบเคลื่อนที่ไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง และอนุภาคของประจุบวกที่เคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้าม

การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนไปยังบริเวณผลึกชนิดเอ็นทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าได้ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งเมื่อต่อเข้ากับวงจรภายนอกจะทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านตลอดวงจร การเคลื่อนที่ไปยังวงจรภายนอกของอิเล็กตรอนในกรณีของสารกึ่งตัวนำโดยผ่านวัสดุตัวนำที่ติดอยู่

กับผิวด้านหน้าของเซลล์ ในเวลาเดียวกัน โฟตอนจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามผ่านเนื้อเซลล์จนไปถึงวัสดุตัวนำอีกส่วนหนึ่งที่ยึดติดอยู่กับด้านล่างของเซลล์ ซึ่งจะทำให้ครบวงจร โดยร่วมกับอิเล็กตรอนที่อยู่อีกด้านหนึ่งของวงจรภายนอก แต่ในทางตรงข้ามการไหลของอิเล็กตรอนไม่เกิดขึ้นหากไม่สามารถทำให้ครบวงจร



รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

กำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ต้องอาศัยทั้งแรงดันและกระแสไฟฟ้า โดยที่กระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นเมื่อมีการไหลของอิเล็กตรอนและแรงดันไฟฟ้าโดยเป็นผลมาจากสนามไฟฟ้าภายในบริเวณรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งโดยทั่วไปเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนแบบผลึกเดี่ยวจะออกแบบให้มีแรงดันไฟฟ้าประมาณ 0.5 V ที่กระแสไฟฟ้าประมาณ 2.5 A ดังนั้นจะเกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 1.25 W

2.1.1 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์

เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อลดต้นทุนด้านวัสดุของเซลล์แสงอาทิตย์จะทำให้ราคาเซลล์อาทิตย์ลดลง โดยการแบ่งประเภทเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ตามการผลิตและวัสดุที่ใช้แบ่งได้เป็น 3 ประเภทหลักๆ คือ

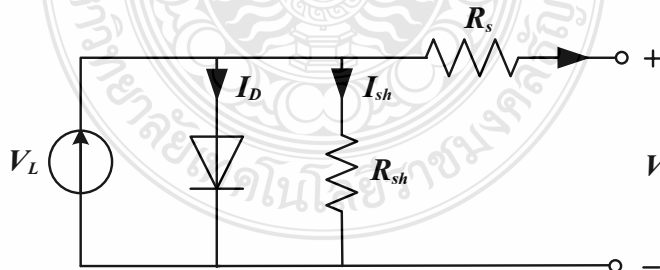
1. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน (Single Crystalline Silicon Solar Cell หรือ c-Si) ซิลิกอนเป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำที่มากที่สุดในโลกและมีราคาถูก จึงนิยมใช้ธาตุซิลิกอนในงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ใช้ทำทรานซิสเตอร์และไอซี และเซลล์แสงอาทิตย์ เทคโนโลยี c-Si ได้รับความนิยมและใช้งานกันอย่างแพร่หลายนิยมใช้งานในพื้นที่เฉพาะ ได้แก่ ในชนบทที่ไม่มีไฟฟ้าใช้เป็นหลัก

2. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกโพลีซิลิกอน (Polycrystalline Silicon Solar Cell หรือ pc-Si) จากความพยายามในการที่จะลดต้นทุนการผลิตของ c-Si จึงทำให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยี pc-Si ขึ้น เป็นผลให้ต้นทุนการผลิตของ pc-Si ต่ำกว่า c-Si ร้อยละ 10 แต่อย่างไรก็ตามเทคโนโลยี pc-Si ก็ได้รับความนิยมนำใช้งานกันอย่างแพร่หลายเช่นกัน

3. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิกอน (Amorphous Silicon Solar Cell หรือ a-Si) เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ธาตุซิลิกอนเช่นกันแต่จะไม่ใช่ผลึก แต่ผลของสารอะมอร์ฟัสจะทำให้เกิดเป็นฟิล์มบางของซิลิกอน ซึ่งมีความบางประมาณ 300 นาโนเมตร ซึ่งจะทำให้ไม่สิ้นเปลืองเนื้อวัสดุ น้ำหนักเบา และการผลิตทำได้ง่าย และข้อดีของ a-Si คือ ไม่เกิดมลพิษกับสิ่งแวดล้อมจึงเหมาะที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่กินไฟฟ้าน้อย เช่น เครื่องคิดเลข นาฬิกาข้อมือ วิทยุทรานซิสเตอร์ เป็นต้น

2.1.2 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

โดยทั่วไปสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะแสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้า เริ่มต้นที่วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยเป็นการต่อขนานระหว่างแหล่งกำเนิดแสง ไดโอด (รอยต่อพี-เอ็น) และความต้านทานขนาน (R_{sh}) และต่ออนุกรมกับความต้านทานอนุกรม (R_s) ตามลำดับ เขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 2.1 นั่นคือผลลัพธ์ของกระแสที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์เกิดมาจากแหล่งพลังงานแสงหักลบด้วยกระแสที่ไหลผ่านไดโอดและผ่านความต้านทานขนาน (R_{sh}) ขณะกระแสไฟฟ้าไหลผ่านทำให้เกิดค่าแรงดันไฟฟ้าในแต่ละจุดขึ้น



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

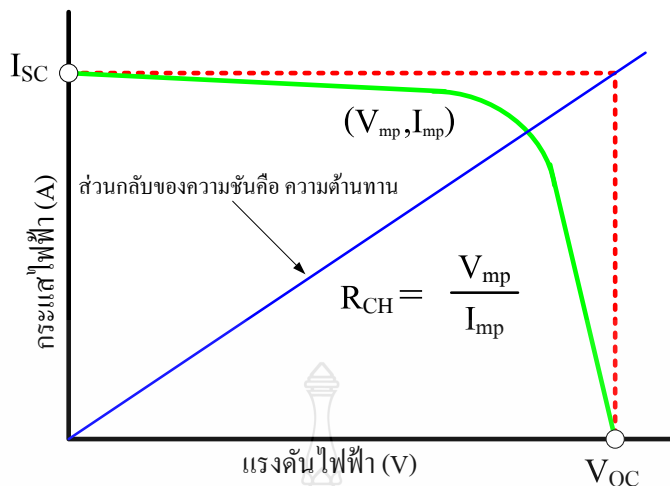
สมการที่ 2.2 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้า ณ จุดใดๆ เท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่ขาออกบวกด้วยผลคูณระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความต้านทานอนุกรม

$$I = I_L - I_D - I_{SH} \quad (2.1)$$

$$V_j = V - IR_s \quad (2.2)$$

โดยที่	I	กระแสไฟฟ้าขาออก
	I_L	กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแหล่งพลังงานแสง
	I_D	กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไดโอด
	I_{SH}	กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านความต้านทานขนาน
	V	แรงดันไฟฟ้าขาออก
	I	กระแสไฟฟ้าขาออก
	R_s	ความต้านทานอนุกรม
	R_{sh}	ความต้านทานอนุกรม
	FF	ฟิล์มแพกเตอร์

พารามิเตอร์ที่บ่งบอกประสิทธิภาพรูปของเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วย กระแสลัดวงจร (I_{sc}) แรงดันวงจรเปิด (V_{oc}) และฟิล์มแพกเตอร์ (FF) รูปที่ 2.3 แสดงกระแสลัดวงจรและแรงดันวงจรเปิดคือ กระแสไฟฟ้าขณะที่แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเป็นศูนย์ เป็นกระแสไฟฟ้าสูงสุดและแรงดันไฟฟ้าขณะที่ไม่มีกระแสเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด ส่วนฟิล์มแพกเตอร์เป็นสัดส่วนระหว่างผลคูณแรงดันกับกระแสที่จุดทำงานสูงสุดและผลคูณของกระแสลัดวงจรกับแรงดันวงจรเปิดซึ่งมีค่าน้อยกว่าหนึ่ง นอกจากนี้มีพารามิเตอร์เกี่ยวกับความต้านทานในเซลล์แสงอาทิตย์เป็นประโยชน์ต่อการติดตามพฤติกรรมของเซลล์แสงอาทิตย์และการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ โดยคิดจากสัดส่วนระหว่างค่าแรงดันที่จุดสูงสุดต่อกระแสที่จุดทำงานสูงสุดหรืออาจใช้สัดส่วนระหว่างค่าแรงดันวงจรเปิดต่อกระแสลัดวงจร



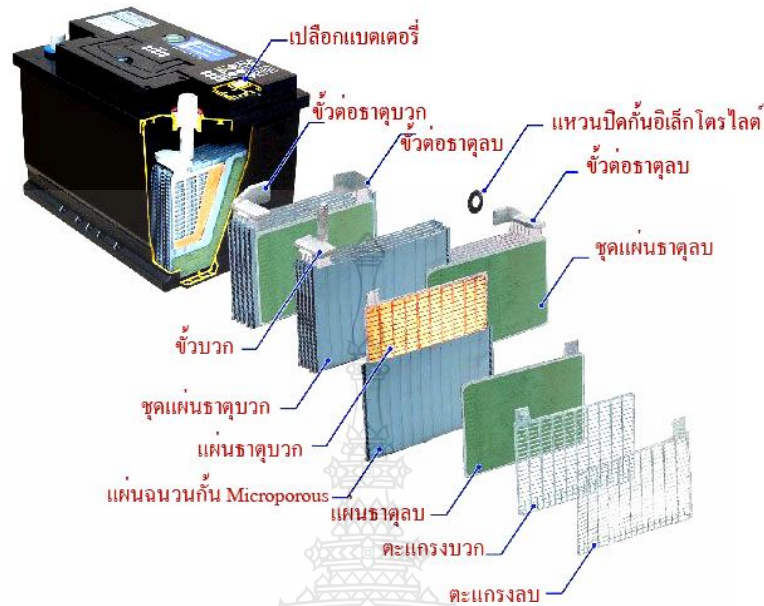
รูปที่ 2.3 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

2.2 แบตเตอรี่

แบตเตอรี่ที่ใช้ในระบบเซลล์แสงอาทิตย์ [10] ได้ถูกออกแบบเพื่อให้การจ่ายประจุมีค่าแรงดันไฟฟ้าคงที่อย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีความแตกต่างจากแบตเตอรี่สำหรับการสตาร์ทเครื่องยนต์ ซึ่งได้รับการออกแบบให้จ่ายกระแสไฟฟ้าได้มากๆ ในช่วงระยะเวลาหนึ่งๆ ส่วนการแบ่งแบตเตอรี่นั้นโดยทั่วไปจะแบ่งได้ 2 กลุ่ม คือแบบปฐมภูมิ (Primary Battery) และแบบทุติยภูมิ (Secondary Battery) โดยแบตเตอรี่ปฐมภูมิ หมายถึงแบตเตอรี่ที่ใช้งานได้เพียงแค่ครั้งเดียวแล้วจะต้องทิ้งไป เนื่องจากไม่สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีแบบย้อนกลับใหม่ได้ ส่วนแบตเตอรี่ทุติยภูมิ คือแบตเตอรี่ที่สามารถทำการเก็บประจุไฟใหม่และนำกลับมาใช้งานได้ใหม่อีกหรือกล่าวคือสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีแบบย้อนกลับได้

ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์นิยมใช้แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด แบตเตอรี่นิเกิล-แคดเมียม ใช้กับอุปกรณ์ขนาดเล็กและน้ำหนักเบา เช่น เครื่องคิดเลข นาฬิกาข้อมือ เป็นต้น สำหรับแบตเตอรี่นิเกิล-เหล็ก ไม่นำมาใช้ เนื่องจากการคายประจุโดยตัวเองมีค่าสูง ส่วนแบตเตอรี่ นิเกิล-ไฮไดรด์ ราคาค่อนข้างสูงเมื่อคิดราคาต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมงเทียบกับแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด ถึงอย่างไรก็ตามค่าความจุของแบตเตอรี่นี้โดยจะมีช่วงให้เล็กลงใช้งานได้ระดับหลายร้อยจนถึงพันแอมแปร์-ชั่วโมง และต้องการระบบป้องกันในวงจรการประจุมิเหมาะสมกับการใช้งานในระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่

2.2.1 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด



รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่ตะกั่ว - กรด

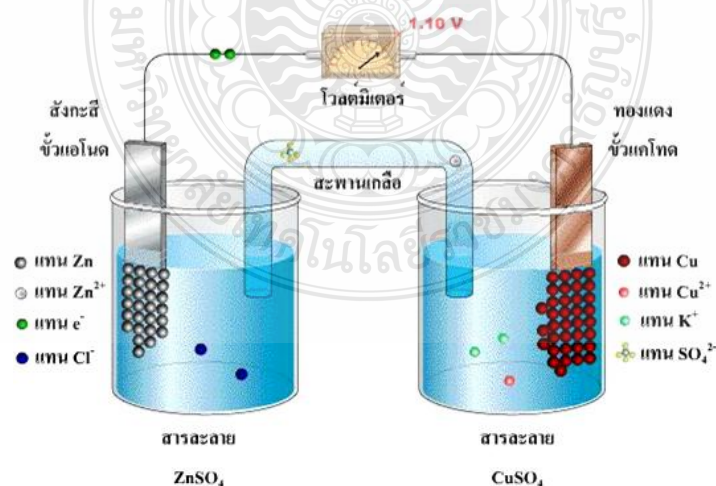
1. เปลือกและฝาแบตเตอรี่ เพื่อใช้บรรจุกลุ่มแผ่นธาตุบวกและลบ โดยทั่วไปทำจากยางแข็งหรือพลาสติกทนทานกรดกำมะถันซึ่งในรูปเป็นแบตเตอรี่ชนิด 12 V แบ่งเป็น 6 ช่อง
2. กลุ่มแผ่นธาตุบวกและแผ่นธาตุลบ จะเป็นโครงตะกั่วผสมระหว่างตะกั่วกับพลวง หรือตะกั่วกับแคลเซียมแล้วฉาบด้วยผงตะกั่วบริสุทธิ์ผสมสารเคมี แผ่นธาตุบวกมีเนื้อแผ่นสีน้ำตาล แผ่นธาตุลบมีเนื้อแผ่นสีเทา ซึ่งจะทำปฏิกิริยาทางเคมีกับน้ำกรดแล้วเกิดกระแสไฟฟ้า
3. แผ่นกั้น ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้แผ่นธาตุบวกและลบสัมผัสกัน แผ่นกั้นอาจทำจากแผ่นยางพรม แผ่นพลาสติกที่มีรูพรุนเล็กๆ หรือแผ่นกระดาษสังเคราะห์ ช่วยให้เกิดการทำปฏิกิริยาทางเคมีได้อย่างดีระหว่างแผ่นธาตุบวกและแผ่นธาตุลบเมื่อมีน้ำกรด
4. น้ำกรดผสมหรือน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ เป็นส่วนผสมระหว่างน้ำกลั่นและน้ำกรดกำมะถันชนิดเข้มข้นทำให้เจือจาง โดยประเทศในเขตร้อนใช้น้ำกรดผสมที่มีค่าความถ่วงจำเพาะ 1.240 - 1.260 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส
5. ฝาจุกแบตเตอรี่ ทำหน้าที่รักษาและไม่ให้น้ำกรดผสมออกจากช่องเซลล์แบตเตอรี่พร้อมระบายก๊าซที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมี จึงควรป้องกันและรักษาความสะอาดไม่ให้เกิดการอุดตัน

ความแตกต่างของโครงสร้างที่สำคัญระหว่างแบตเตอรี่แบบ Deep cycle lead-acid ซึ่งจะเหมาะสมใช้งานในระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดทั่วไป คือแผ่นตะกั่วของแบตเตอรี่แบบแรกเป็นของแข็งทึบ แต่ในแบตเตอรี่อีกแบบหนึ่งเป็นแบบของแข็งมีรูพรุนเหมือนฟองน้ำ ทั้งนี้ อาจพบแบตเตอรี่แสดงไว้ที่ฉลากเป็น Deep cycle lead-acid แต่ภายในไม่ใช่แผ่นตะกั่วแบบของแข็ง ทึบจึงอาจเรียกแบตเตอรี่นี้เป็นแบบผสมผสาน (Hybrid battery) อย่างไรก็ตามแบตเตอรี่แบบ Deep cycle lead-acid ถูกออกแบบให้สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ถึง 20% ของค่าความจุและสามารถทำการประจุได้หลายพันรอบ ทั้งนี้หลายบริษัทได้แนะนำว่า แบตเตอรี่แบบผสมผสาน โดยจะไม่สามารถจ่ายประจุได้ถึง 50% ของค่าความจุ

2.2.2 การทำงานของแบตเตอรี่

แบตเตอรี่หรือเซลล์โวลตาอิก (Voltaic Cell) แสดงด้วยสองครึ่งเซลล์ซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยสะพานเกลือเพื่อเป็นตัวกั้นระหว่างแต่ละเซลล์และยินยอมให้ส่งผ่านไอออนได้เท่านั้น แต่จะไม่ยินยอมให้โมเลกุลของน้ำผ่านในรูปที่ 2.5 แสดงส่วนประกอบในเซลล์โวลตาอิก

แบตเตอรี่เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่อาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง แบตเตอรี่ประกอบด้วยหนึ่งเซลล์โวลตาอิกหรือมากกว่าหนึ่งเซลล์ โดยแต่ละเซลล์โวลตาอิกประกอบด้วยสองครึ่งเซลล์ เป็นการต่อแบบขั้วบวกกับขั้วลบเรียงเข้าเช่นนี้ไปตามลำดับหรือเรียกว่าการต่ออนุกรม ทั้งนี้หนึ่งครึ่งเซลล์จะรวมถึงสารอิเล็กโทรไลต์และอิเล็กโทรดที่ส่งผ่านประจุลบ เรียกว่าแอโนด ส่วนอีกหนึ่งที่ส่งผ่านประจุบวกคาโทด



รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบของเซลล์โวลตาอิก

ในปฏิกิริยารีดอกซ์ที่เกิดขึ้นนี้เมื่อนำแผ่นสังกะสีจุ่มลงในสารละลายของทองแดงหรือตัวรีดิวซ์จุ่มลงในตัวออกซิไดซ์โดยตรงแล้ว ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดพลังงานในรูปของความร้อน แต่ถ้าแยกตัวรีดิวซ์ออกจากตัวออกซิไดซ์ แล้วเชื่อมต่อวงจรภายนอกและสะพานเกลือ (Salt bridge) อิเล็กตรอนก็จะถูกถ่ายโอนผ่านตัวกลางภายนอกจากขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันไปยังขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน จึงทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าได้ เซลล์ไฟฟ้าที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีนี้เรียกว่า เซลล์กัลวานิก หรือเซลล์โวลตาอิก โดยการทำให้ปฏิกิริยาหรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในแบตเตอรี่ ปฏิกิริยาเคมีในแบตเตอรี่เป็นการรับและให้อิเล็กตรอน หรือที่เรียกว่า “ปฏิกิริยารีดอกซ์” ซึ่งการเสียดิเล็กตรอนเกิดขึ้นที่ขั้วบวก ทำให้มีสตรูปลาดแคลนอิเล็กตรอน แต่การรับอิเล็กตรอนเกิดขึ้นที่ขั้วลบ ทำให้มีสตรูปลอดด้วยอิเล็กตรอน ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นภายในอิเล็กโทรไลต์หรือน้ำกรดกำมะถัน (Sulfuric acid) กับแผ่นธาตุบวก (เป็นตะกั่วไดออกไซด์) และแผ่นธาตุลบ (เป็นตะกั่วพูน) ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ การคายประจุและการอัดประจุ

2.3 วงจรทบทระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (Boost Converter)

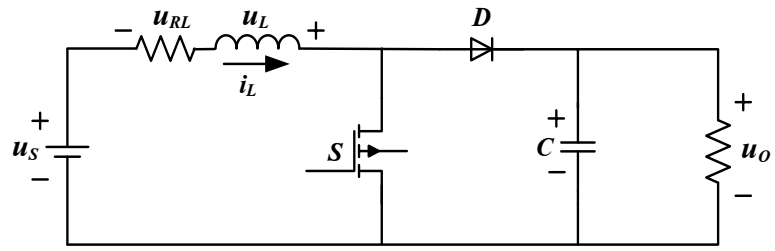
เมื่อพิจารณาวงจรทบทระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง [1-2] แสดงดังรูปที่ 2.6 โดยจะนำมาประยุกต์ต่อใช้งานร่วมกับระบบผลิตกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อต้องการยกกระด้นแรงดันด้านออกให้มีความสูงขึ้น ก่อนจะนำพลังงานไฟฟ้าไปใช้งาน ดังนั้นจึงเลือกวงจรทบทระดับแรงดัน ซึ่งเป็นวงจรที่ทำหน้าที่เพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าด้านออกให้สูงกว่าแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า โดยจะอาศัยการเก็บและคายพลังงานจากตัวเหนี่ยวนำในวงจร ซึ่งจะมีจำนวนอุปกรณ์ที่ใช้ต่อในวงจรน้อย ออกแบบง่าย ในการพิจารณาหลักการการทำงานของวงจรมีเงื่อนไขการทำงานคือ

กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ณ ตำแหน่งเดียวกันในแต่ละคาบ จะมีค่าเท่ากันและมีค่าเป็น บวกเสมอ

แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบจะเท่ากับศูนย์ หมายถึงผลรวมของผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำกับเวลาในแต่ละคาบจะเท่ากับศูนย์

ตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่ทำให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกมีค่าคงที่

กำลังไฟฟ้าด้านเข้าเท่ากับกำลังไฟฟ้าด้านออก กรณีนี้ไม่คำนึงถึงการสูญเสียเนื่องจากการทำงานของวงจร โดยกำหนดให้อุปกรณ์ทุกตัวเป็นอุดมคติ ทำให้สรุปได้ว่าประสิทธิภาพของวงจรเป็นหนึ่งร้อยเปอร์เซ็นต์

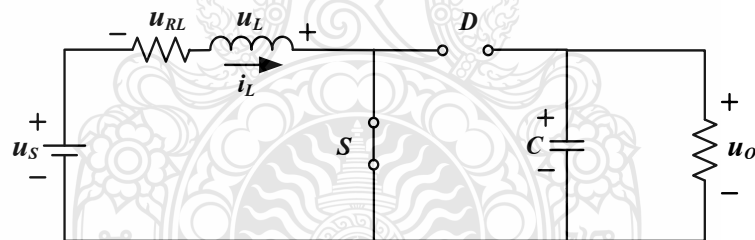


รูปที่ 2.6 วงจรทบทระดับแรงดัน

2.3.1 หลักการทำงานของวงจรทบทระดับแรงดัน

หลักการทำงานของวงจรทบทระดับแรงดันเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าทางด้านออกตามต้องการ จะเริ่มต้นจากข้อกำหนดที่ว่า แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะเท่ากับศูนย์ และสามารถหากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำได้โดยวิเคราะห์การทำงานของสวิตช์ในแต่ละ โหมดทั้งนี้ การทำงานต้องอยู่ในช่วงสภาวะคงตัวดังนี้

2.3.1.1 ขณะสวิตช์นำกระแส



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์นำกระแส

พิจารณาจากรูปที่ 2.7 พบว่าแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย u_s มีค่าเท่ากับแรงดันตกคร่อมที่ u_L ไดโอดจะถูกไบอัสกลับจึงสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$-u_s + u_L = 0 \quad (2.3)$$

$$u_L = u_s = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.4)$$

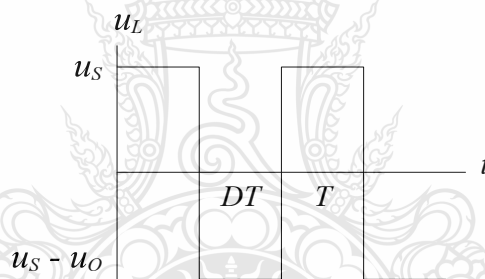
$$\frac{di_L}{dt} = \frac{u_S}{L} \quad (2.5)$$

ขณะที่สวิตช์นำกระแส $dt = DT$ เมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสคงที่อาจจะถือว่าการเพิ่มของกระแสไฟฟ้าเป็นเชิงเส้น ทำให้สามารถได้จาก

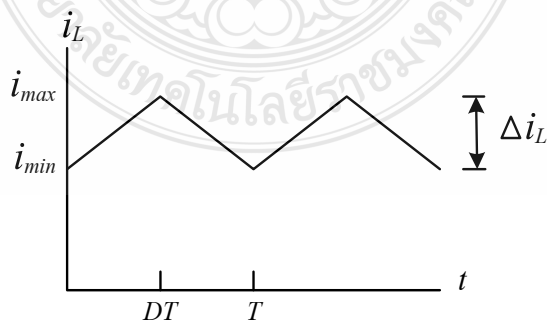
$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{u_S}{L} \quad (2.6)$$

$\Delta i_{L,on}$ หมายถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำขณะสวิตช์นำกระแส

แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำแสดงดังรูปที่ 2.8 และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแสดงดังรูปที่ 2.9 ที่ได้จากการวิเคราะห์การทำงาน

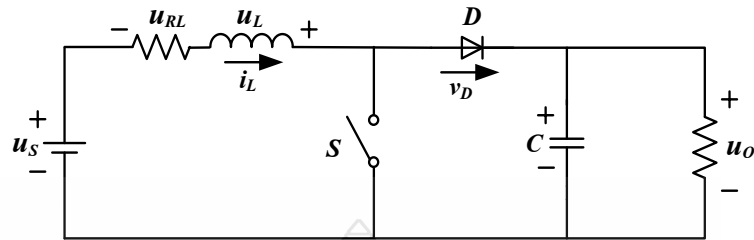


รูปที่ 2.8 แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.9 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ

2.3.1.2 ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส

เมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส กระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำซึ่งจะเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดไม่ได้ ไดโอดจะถูกไบอัสไปข้างหน้าให้นำกระแส ซึ่งทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำอย่างต่อเนื่อง สมมติแรงดันไฟฟ้าที่ด้านออกมีค่าคงที่ จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์โดยจะได้สมการของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำดังนี้

$$-u_s + u_L + u_o = 0 \quad (2.7)$$

$$u_L = u_s - u_o \quad (2.8)$$

$$u_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.9)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{u_s - u_o}{L} \quad (2.10)$$

ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส $dt = (1-D)T$ อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าคงที่ และถือว่าการลดลงของกระแสเป็นเชิงเส้นดังรูปที่ 2.9 สามารถคำนวณได้จาก

$$\Delta i_{L,off} = \left[\frac{u_s - u_o}{L} \right] (1-D)T \quad (2.11)$$

ที่สภาวะคงตัวการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวเหนี่ยวนำสุทธิ มีค่าเท่ากับศูนย์จะได้ว่า

$$\Delta i_{L,on} + \Delta i_{L,off} = 0 \quad (2.12)$$

$$\left(\frac{u_s}{L}\right)DT + \frac{(u_s - u_o)(1-D)T}{L} = 0 \quad (2.13)$$

แทนค่า $t_{on} = DT$ และ $t_{off} = (1-D)T$ ลงในสมการที่ 2.9

$$u_s D + (u_s - u_o)(1-D) = 0 \quad (2.14)$$

$$u_s DT = u_o(1-D)T - u_s DT \quad (2.15)$$

$$u_s - u_o(1-D) = 0 \quad (2.16)$$

ดังนั้นแรงดันด้านออกเฉลี่ยจากวงจรทระดับแรงดันจะได้ดังสมการที่ 2.17

$$\frac{u_s}{u_o} = \frac{1}{1-D} \quad (2.17)$$

ดังนั้นการวิเคราะห์การทำงานและคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรทระดับแรงดันทำงานในโหมดกระแสไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำต่อเนื่อง ซึ่งมีข้อกำหนดของการออกแบบในบทที่ 1 โดยสมมติว่าสวิตช์และองค์ประกอบต่างๆ ของวงจรมีลักษณะอุดมคติไม่มีค่าสูญเสีย

สามารถคำนวณค่าวัฏจักรงาน (D) ได้ดังนี้

$$D = 1 - \frac{U_s}{U_{bus}} \quad (2.18)$$

ค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำหาได้จาก

$$L = \frac{D \cdot U_s}{\Delta I_L \cdot f_s} \quad (2.19)$$

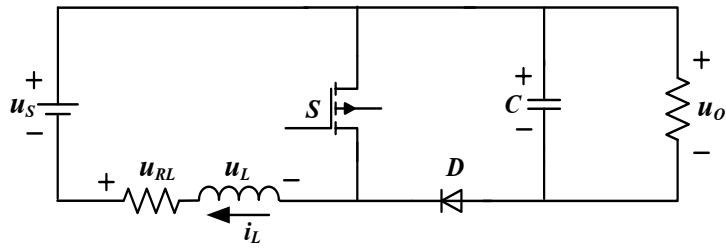
ค่าความจุของตัวเก็บประจุด้านออกหาได้จาก

$$C_{bus} = \frac{\eta \cdot P_{in} \cdot D}{U_{bus} \cdot \Delta U_{bus} \cdot f_s} \quad (2.20)$$

เมื่อ	U_s	คือ แรงดันไฟฟ้าด้านเข้า
	U_o	คือ แรงดันไฟฟ้าด้านออก
	D	คือ ค่าวัฏจักรงาน (Duty cycle)
	ΔI_L	คือ อัตราการระลอกคลื่นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ
	ΔU_{bus}	คือ อัตราการระลอกคลื่นแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุด้านออก
	f_s	คือ ความถี่สวิตช์
	P_{in}	คือ กำลังไฟฟ้าด้านเข้า
	η	คือ ประสิทธิภาพวงจรระดับแรงดัน

2.3.2 วงจรทระดับแรงดันตัวเหนี่ยวนำและไดโอดอยู่ด้านลบ

วงจรทระดับแรงดัน โดยที่ตัวเหนี่ยวนำและไดโอดอยู่ทางด้านลบ [3,5,8,9] ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งยังคงมีการทำงานเหมือนกันกับวงจรทระดับแรงดันแบบทั่วไป โดยจะต่างกันตรงที่ตำแหน่งของตัวเหนี่ยวนำและไดโอด แต่หลักการทำงานและอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกของวงจรยังคงเหมือนเดิม ดังนั้นสามารถวิเคราะห์การทำงานของวงจรในแต่ละโหมดสวิตช์ได้ ทั้งนี้การทำงานต้องอยู่ในช่วงสภาวะคงตัว



รูปที่ 2.11 วงจรทบทระดับแรงดันตัวเหนี่ยวนำและไดโอดอยู่ด้านล่าง

2.4 วงจรทบทระดับอัตราขยายแรงดันสูงแบบขนานเหลื่อมเฟส

วงจรทบทระดับแรงดันเป็นวงจรที่นิยมนำมาต่อใช้ในงานที่ต้องการยกระดับแรงดันไฟฟ้า ด้านออกให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งข้อดีของวงจรทบทระดับแรงดันคือ อุปกรณ์ที่ต่อใช้งานร่วมมีจำนวนน้อย และทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง (Continues Current Mode) หรือโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง (Discontinues Current Mode) ได้ การสูญเสียของอุปกรณ์ในวงจรจึงน้อยลง ง่ายต่อการออกแบบ แต่การทำงานของวงจรทบทระดับแรงดันเพียงแฉ่งจรเดียวยังมีข้อด้อยคือ

เมื่อต้องการให้วงจรสามารถทำงานที่ก้ำลิ่งสูงๆ การออกแบบตัวเหนี่ยวนำและขนาดของแกนเฟอร์ไรต์จะต้องมีขนาดใหญ่

กระแสกระเพื่อม (Ripple Current) ที่ทางด้านเข้าของวงจรทบทระดับแรงดันยังมีขนาดที่สูง ซึ่งจะส่งผลทำให้อายุการใช้งานอุปกรณ์ที่ต่อใช้งานสั้นลง

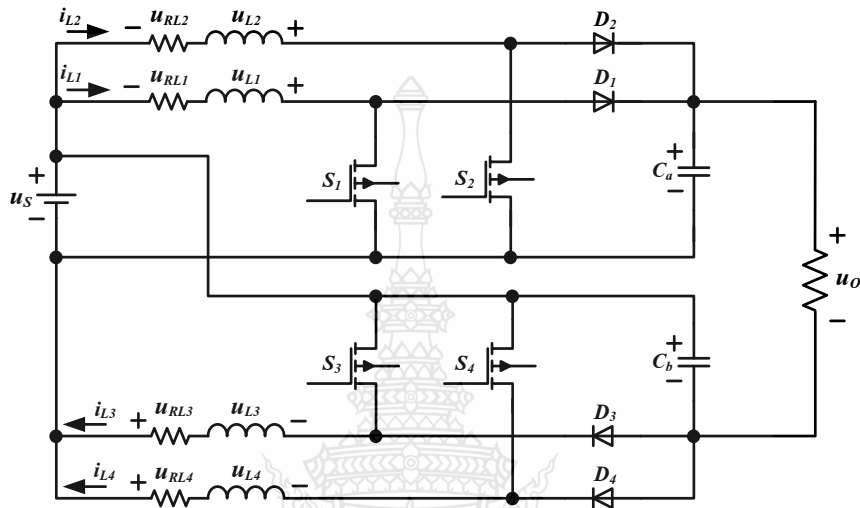
การกรองแรงดันด้านออกที่ดีชิบส์ให้เรียบจะต้องใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดค่าความจุสูง ทำให้วงจรมีขนาดใหญ่

เนื่องจากอุปกรณ์จะต้องทำงานที่ก้ำลิ่งสูงทำให้ ขนาดการสูญเสีย ความร้อน และราคาของอุปกรณ์แต่ละตัวสูง

จากข้อด้อยที่เกิดขึ้นของวงจรทบทระดับแรงดันแบบธรรมดา ดังนั้นจึงได้มีวิธีการขนานวงจรทบทระดับแรงดัน [3-9] ดังรูปที่ 2.12 และใช้เทคนิคการเหลื่อมเฟสของกระแส โดยจะเห็นได้ว่าวงจรทบทระดับแรงดันจะมีการขนานกันจำนวน N วงจร โดยที่ไม่มีการขนานอุปกรณ์ ดังนั้นในแต่ละวงจรก็จะช่วยกันจ่ายกำลังงานทางด้านออกทำให้เพิ่มความสามารถในการจ่ายกระแสทางด้านออกให้เพิ่มมากขึ้นกว่าเดิมและมีข้อดี คือสามารถลดกระแสกระเพื่อมทางด้านเข้าได้อีกด้วย ซึ่งหลักการนี้มีชื่อเรียกว่า อินเตอร์ลีฟเทคนิค (Interleaved Techniques) โดยวิธีการขนานวงจรทบทระดับแรงดันนี้ จะมีการแยกลำดับการสวิตช์ของสวิตช์แต่ละตัวในวงจรให้มีมุมต่างกัน เพื่อที่สวิตช์จะไม่เริ่มทำงานพร้อมกันสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\text{มุมในการสวิตช์} = \frac{2\pi}{N} \text{ เรเดียน} \quad (2.21)$$

เมื่อ N คือ จำนวนของวงจรระดับแรงดันที่นำมาต่อขนานกัน



รูปที่ 2.12 วงจรทระดับแรงดันแบบขนานหลายเฟส

จากสมการการหามุมในการสวิตช์จะเห็นว่าเมื่อมีจำนวนวงจรต่อขนานมากขึ้นจะทำให้มุมจุดเริ่มต้นในการสวิตช์น้อยลงตาม เมื่อมีสวิตช์ที่นำกระแสติดต่อกันตามลำดับมีจำนวนมากขึ้น การกระเพื่อมของกระแสก็จะน้อยลงและกระแสก็จะไหลผ่านสวิตช์ทุกตัวที่ต่ออยู่ในวงจรเท่าๆกัน ดังนั้นกระแสรวมทางด้านออกของวงจรก็จะมากกว่าวงจรทระดับแรงดันปกติทั่วไป และกระแสกระเพื่อมยังน้อยลงด้วย โดยที่อัตราการขยายแรงดันด้านออกยังเท่าเดิม นอกจากนี้วงจรระดับแรงดันแบบหลายเฟสยังมีข้อดีคือ

ค่าความจุของตัวเก็บประจุและค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำมีขนาดและจำนวนน้อยลง กระแสกระเพื่อม (Ripple Current) ทางด้านเข้าน้อยลง

ชุดวงจรทระดับแรงดันที่มีการขนานนี้เป็นการเพิ่มความเชื่อมั่นของระบบ (Reliability) ให้มากขึ้น

เมื่ออุปกรณ์ของแต่ละวงจรที่นำมาต่อขนานกันซึ่งจะช่วยในการจ่ายกระแส ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์แต่ละวงจรถ้าจะน้อยลง ความร้อนที่เกิดขึ้นก็น้อยลงตามไปด้วย ทำให้ระบบการระบายความร้อนทำได้ง่ายเพราะความร้อนไม่สูงมาก ราคาอุปกรณ์ก็ถูกลง

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังของแต่ละวงจรซึ่งจะช่วยในการจ่ายกระแสรวม ทำให้สามารถลดคุณสมบัติการทนกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังแต่ละตัวลงซึ่งทำให้ขนาดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ถูกลง

ดังนั้นการวิเคราะห์การทำงานและคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรทระดับแรงดันแบบขนานหลายเฟสทำงานในโหมดกระแสไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำแบบต่อเนื่อง ซึ่งมีข้อกำหนดของการออกแบบในบทที่ 1 โดยสมมติว่าสวิตช์และองค์ประกอบต่างๆ ของวงจรมีลักษณะอุดมคติซึ่งไม่มีค่าสูญเสีย

สามารถคำนวณค่าวัฏจักรงาน (D) ได้ดังนี้

$$D = 1 - \frac{U_s}{U_{bus}} \quad (2.22)$$

ค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำได้จาก

$$L = \frac{D \cdot U_s}{4 \cdot \Delta I_L \cdot f_s} \quad (2.23)$$

ค่าความจุของตัวเก็บประจุด้านออกหาได้จาก

$$C_{bus} = \frac{I_{out} \cdot D}{2 \cdot \Delta U_{bus} \cdot f_s} \quad (2.24)$$

เมื่อ

U_s คือ แรงดันไฟฟ้าด้านเข้า

U_o คือ แรงดันไฟฟ้าด้านออก

D คือ ค่าวัฏจักรงาน (Duty cycle)

ΔI_L คือ อัตราการะลอกคลื่นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ

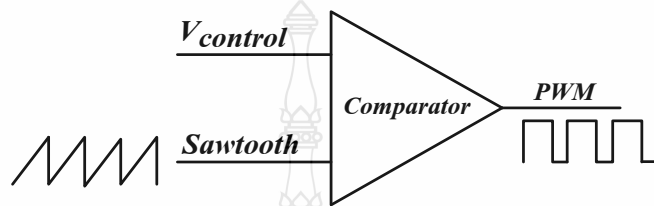
ΔU_{bus} คือ อัตราการะลอกคลื่นแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุด้านออก

I_{out} คือ กระแสไฟฟ้าด้านออก

f_s คือ ความถี่สวิตช์

2.5 ทฤษฎีพื้นฐานการมอดูเลตแบบปรับความกว้างพัลส์

วิธีการสร้างสัญญาณมอดูเลตตามความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation; PWM) [11] โดยจะใช้การสร้างสัญญาณฟันเลื่อย (Sawtooth) หรือสัญญาณแบบขั้นบันไดมาเปรียบเทียบกับระดับสัญญาณอ้างอิง ($V_{Control}$) ที่เป็นระดับสัญญาณกระแสตรงหรือสัญญาณชานัน์ ตามรูปแบบของสัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่ต้องการ การสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบอนาล็อกแสดงได้ดังรูปที่ 2.13

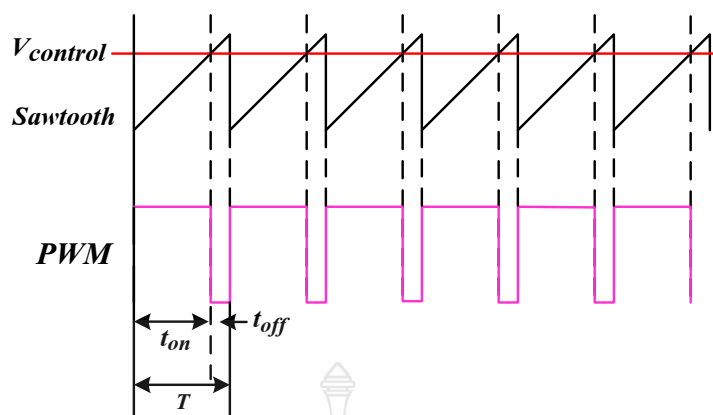


รูปที่ 2.13 วงจรพีดับบลิวเอ็มแบบอนาล็อก

จากรูปที่ 2.13 สัญญาณฟันเลื่อยจะถูกเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงกระแสตรง ผลของการเปรียบเทียบทำให้ได้สัญญาณพีดับบลิวเอ็มดังแสดงในรูปที่ 2.14 ซึ่งเป็นสัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่ได้จากสัญญาณฟันเลื่อยกับสัญญาณอ้างอิงกระแสตรงที่เปรียบเทียบกัน ผลของการเปรียบเทียบเมื่อระดับของสัญญาณอ้างอิงกระแสตรงสูงกว่าระดับของสัญญาณฟันเลื่อย ซึ่งจะทำให้ได้ระดับของพีดับบลิวเอ็มเป็น High (Switch ON) แต่เมื่อระดับของสัญญาณอ้างอิงกระแสตรงต่ำกว่าระดับของสัญญาณฟันเลื่อย ซึ่งจะทำให้ได้ระดับของพีดับบลิวเอ็มเป็น Low (Switch OFF) โดยสามารถคำนวณค่าวัฏจักรงานได้เท่ากับ

$$D = \frac{t_{on}}{T} \times 100\% \quad (2.22)$$

โดยที่ D คือ เปอร์เซนต์ค่าวัฏจักรงาน
 t_{on} คือ ค่าช่วงเวลาในสถานะ High
 T คือ ค่าคาบเวลา



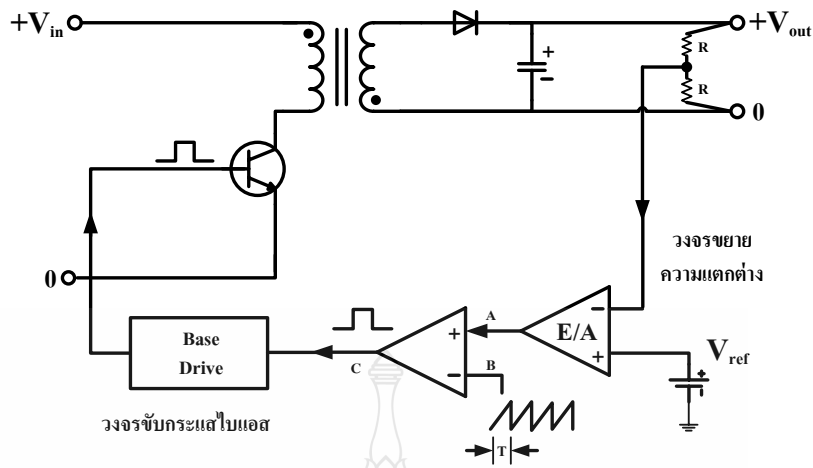
รูปที่ 2.14 หลักการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม

2.6 วงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้านออก

เนื่องจากวงจรทระดับแรงดันโดยส่วนมากจะคงค่าระดับแรงดันทางด้านออกได้ด้วยการควบคุมช่วงเวลานำกระแส (t_{ON}) ของเพาเวอร์มอสเฟต ดังนั้นวงจรควบคุมการทำงานของวงจรทระดับแรงดันโดยทั่วไปจึงมักนิยมใช้เทคนิคการปรับความกว้างของพัลส์เป็นหลัก โดยการใช้พีดับบลิวเอ็มเพื่อควบคุมช่วงเวลานำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟตในวงจรทระดับแรงดันสามารถทำได้สองลักษณะคือ ควบคุมจากแรงดันและควบคุมจากกระแส [12]

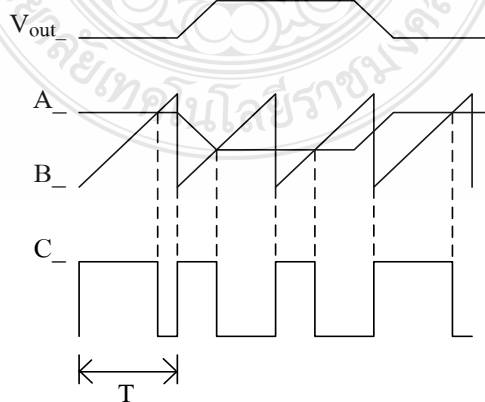
2.6.1 วงจรควบคุมในโหมดควบคุมจากแรงดัน

การทำงานของวงจรควบคุมในโหมดแรงดัน (Voltage Mode Control) โดยจะอาศัยการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงค่าของแรงดันทางด้านออกมาควบคุมช่วงเวลานำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟตเพื่อการคงค่าแรงดันทางด้านออกเป็นหลัก วงจรพื้นฐานแสดงดังรูปที่ 2.15 โดยวงจรควบคุมจะอาศัยการป้อนกลับค่าแรงดันทางด้านออกและเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง (V_{ref}) ของวงจร เพื่อจะตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันด้านออก ค่าความแตกต่างที่ได้จะถูกขยายโดยวงจรขยายความแตกต่าง E/A ก่อนที่จะส่งต่อไปยังวงจรพีดับบลิวเอ็ม โดยค่าแรงดันที่ได้จากวงจรขยายความแตกต่างที่ตำแหน่ง A จะถูกเปรียบเทียบกับแรงดันรูปฟันเลื่อยที่ตำแหน่ง B ของพีดับบลิวเอ็มอีกครั้งหนึ่ง สัญญาณที่ได้จากวงจรพีดับบลิวเอ็มจะมีลักษณะเป็นพัลส์สี่เหลี่ยม ซึ่งมีคาบเวลาที่เท่ากับคาบเวลาของแรงดันรูปฟันเลื่อยและมีความกว้างของพัลส์ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามผลการมอดูเลชั่นของค่าแรงดันที่ตำแหน่ง A และ B ค่าความกว้างของพัลส์นี้เองที่จะเป็นตัวกำหนดช่วงเวลานำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟตในวงจรทระดับแรงดัน



รูปที่ 2.15 วงจรพื้นฐานสำหรับการควบคุมในโหมดควบคุมจากแรงดัน

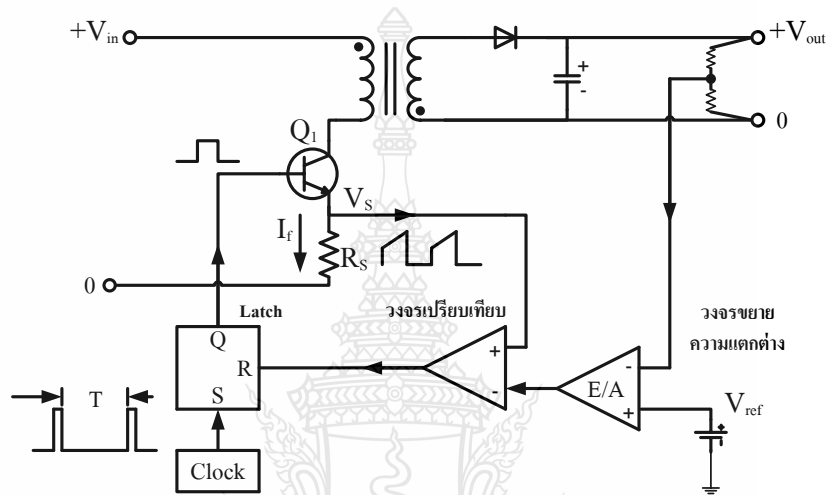
เนื่องจากค่าแรงดันป้อนกลับจะถูกส่งมายังวงจรขยายความแตกต่างที่ขาอินเวอร์ตซึ่งผลต่างของแรงดันทางด้านออกและแรงดันอ้างอิงที่จุด A จึงมีลักษณะกลับเฟสอยู่ 180 องศา กล่าวคือเมื่อแรงดันด้านออกมีค่ามากขึ้น แรงดันที่จุด A จะมีค่าลดลง ความกว้างของพัลส์ที่เอาต์พุตของวงจรพีดีบีลิวเอ็มจึงมีค่าลดลงด้วย และช่วงเวลานำกระแสของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ (t_{ON}) ก็จะมีค่าลดลง ถ้าแรงดันทางด้านออกมีค่าลดลง แรงดันที่จุด A จะมีค่าเพิ่มขึ้น ความกว้างพัลส์ทางด้านออกของวงจรพีดีบีลิวเอ็มจึงมีค่าเพิ่มขึ้นการนำกระแสก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นตาม ทำให้วงจรทบระดับแรงดันสามารถคงค่าแรงดันด้านออกไว้ได้ ลักษณะรูปคลื่นแรงดันขณะวงจรทำงานจะแสดงดังรูปที่ 2.16 ตัวอย่าง IC ที่ใช้ควบคุมวงจรทบระดับแรงดันในโหมดควบคุมจากแรงดันได้แก่ MC34060, MC34166 และ TL494 เป็นต้น



รูปที่ 2.16 ลักษณะความกว้างของพัลส์จากพีดีบีลิวเอ็ม

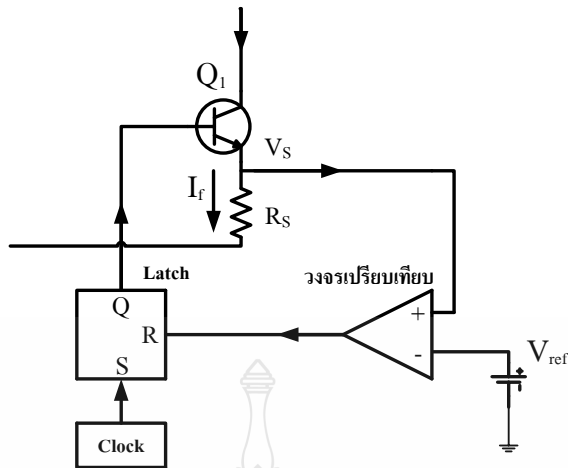
2.6.2 วงจรควบคุมในโหมดควบคุมจากกระแส

การคงค่าแรงดันด้านออกของวงจรที่ระดับแรงดันด้วยวงจรควบคุมในโหมดควบคุมจากกระแส (Current Mode Control) มีข้อดีหลายประการกว่าโหมดควบคุมจากแรงดัน จึงเป็นวงจรควบคุมที่นิยมใช้กันมาก วงจรควบคุมในโหมดควบคุมจากกระแสนี้ยังคงใช้เทคนิคการปรับความกว้างของพัลส์เช่นกัน วงจรพื้นฐานแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 วงจรพื้นฐานสำหรับการควบคุมในโหมดควบคุมจากกระแส

เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาจะแยกคิดการทำงานของวงจรควบคุมด้วยการตัดวงจรขยายความแตกต่าง E/A ออกไปก่อน และกำหนดขาอินเวอร์ตติ้งของวงจรเปรียบเทียบให้ต่อเข้ากับแรงดันอ้างอิงดังแสดงในรูปที่ 2.17 วงจร latch จะทำงานโดยขา Q ของวงจร latch จะมีสถานะเป็น High เมื่อมีการกระตุ้นที่ขา S และขา Q จะมีสถานะเป็น Low เมื่อมีการกระตุ้นที่ขา R



รูปที่ 2.18 วงจรควบคุมเมื่อตัดตัวขยายความแตกต่างออก

เมื่อวงจรทำงานวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาจะให้กำเนิดสัญญาณนาฬิกาที่มีคาบเวลาคงที่ไปกระตุ้นที่ขา S ของ latch ขา Q จึงมีสถานะเป็น High เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ Q_1 ซึ่งจะเริ่มนำกระแส เมื่อ Q_1 นำกระแสจะมีกระแสไหลผ่านขดโรมารีและตัวต้านทาน R_s ที่ต่ออนุกรมไว้กับ Q_1 โดยทำให้เกิดแรงดัน V_s ตกคร่อมที่ตัวต้านทาน R_s ด้วย

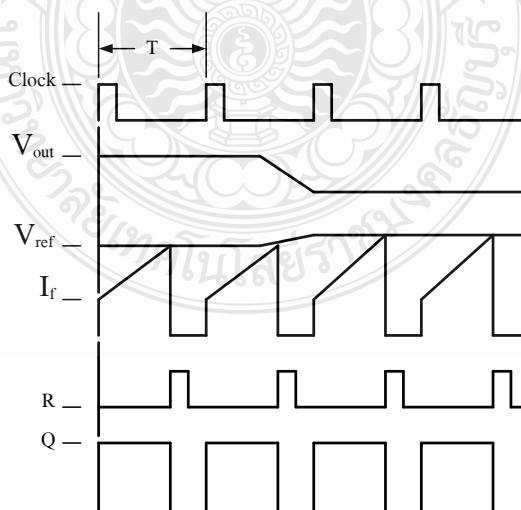
แรงดันตกคร่อม R_s ที่เกิดขึ้นจะถูกเปรียบเทียบกับสัญญาณแรงดันอ้างอิง (V_{ref}) โดยวงจรเปรียบเทียบ ดังนั้นเมื่อค่าของ V_s เพิ่มขึ้นจนมีค่ามากกว่าค่าของสัญญาณแรงดันอ้างอิง สัญญาณทางด้านออกของวงจรเปรียบเทียบจะมีสถานะเป็น High และไปกระตุ้นที่ขา R ของวงจร latch ทำให้ขา Q มีสถานะเป็น Low และเพาเวอร์มอสเฟต Q_1 หยุดนำกระแสจนกว่าที่ขา S ของวงจร latch จะได้รับการกระตุ้นจากสัญญาณนาฬิกาอีกครั้งจะเห็นได้ว่าความกว้างของสัญญาณด้านออกพัลส์ที่ขา Q ของวงจร latch จะถูกควบคุมโดยค่าของแรงดัน V_s ที่ตกคร่อมตัวต้านทาน R_s ถ้าค่าแรงดันด้านเข้าของวงจรทระดับแรงดันมีค่าเพิ่มขึ้น แรงดัน V_s จะเพิ่มขึ้นจนมีค่ามากกว่าแรงดันอ้างอิงได้เร็วขึ้นด้วย ทำให้ความกว้างของสัญญาณด้านออกพัลส์ลดลง เพาเวอร์มอสเฟตก็จะมีช่วงเวลานำกระแสน้อยลง ในทางกลับกันถ้าแรงดันด้านเข้าของวงจรทระดับแรงดันมีค่าลดลง แรงดัน V_s จะเพิ่มขึ้นได้ช้า ความกว้างของสัญญาณด้านออกพัลส์จึงเพิ่มขึ้น เพาเวอร์มอสเฟตก็จะมีช่วงเวลานำกระแสนมากขึ้นด้วย จะเห็นได้ว่าเมื่อโหลดคงที่วงจรทระดับแรงดันจะสามารถคงค่าแรงดันทางด้านออกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันด้านเข้าได้ โดยไม่ต้องอาศัยการป้อนกลับแรงดันทางด้านออกเลย ทำให้วงจรทระดับแรงดันตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของแรงดันทางด้านเข้าได้อย่างรวดเร็ว

พิจารณาวงจรควบคุมอีกครั้งตามวงจรในรูปที่ 2.17 เมื่อต่อวงจรขยายความแตกต่าง E/A เพิ่มเข้ามา วงจรในลักษณะนี้เมื่อแรงดันทางด้านออกมีค่าลดลง สัญญาณทางด้านออกของวงจรขยาย

ความแตกต่างจะมีค่ามากขึ้น เพาเวอร์มอสเฟตก็จะใช้เวลานาน่ากระแสมากขึ้นด้วย เพื่อให้ค่าแรงดัน V_s มากกว่าแรงดันทางด้านออกของวงจรถ่ายความแตกต่าง ซึ่งในทางกลับกันเมื่อแรงดันด้านออกของวงจรถ่ายระดับแรงดันมีค่าเพิ่มขึ้น สัญญาณทางด้านออกของวงจรถ่ายความแตกต่างจะมีค่าลดลง เพาเวอร์มอสเฟตก็จะใช้เวลานาน่ากระแสลดลงด้วย ดังนั้นวงจรถ่ายระดับแรงดันจะสามารถคงค่าแรงดันทางด้านออกเอาไว้ได้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงที่โหลดลักษณะรูปคลื่นและแรงดันขณะที่วงจรทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.19

จากลักษณะการทำงานดังกล่าวทำให้วงจรควบคุมใน โหมดควบคุมจากกระแสมีข้อดีมากกว่าวงจรถ่ายควบคุมใน โหมดควบคุมจากแรงดันดังนี้

1. ตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของแรงดันด้านเข้าได้รวดเร็วกว่า ทำให้ลดปัญหาการคงค่าแรงดันที่ด้านออกเมื่อเกิดทรานเซียนส์และการกระเพื่อมของแรงดันสูงที่แรงดันด้านเข้า เพราะไม่ต้องรอสัญญาณป้อนกลับจากด้านออก
2. สามารถป้องกันกระแสไหลเกินได้ ด้วยการจำกัดค่ากระแสสูงสุดที่ขดไฟโรมารี่ในลักษณะพัลส์ต่อพัลส์อย่างรวดเร็ว ให้ค่าไลน์เรกูเลชันที่ดีมาก
3. โดยการจำกัดกระแสสูงสุดที่ขดไฟโรมารี่ ปัญหาการไม่สมมาตรฟลักซ์แม่เหล็กของ พุช-พูลคอนเวอร์เตอร์จะไม่เกิดขึ้น
4. สามารถต่อขนานวงจรถ่ายระดับแรงดันหลายชุดเข้าด้วยกันได้เพื่อให้จ่ายกระแสได้มาก ตัวอย่าง IC ที่นำมาใช้ควบคุมวงจรถ่ายระดับแรงดันใน โหมดควบคุมจากกระแสได้แก่ UC3842/3/4/5, MC34023/5 และ MC34129 เป็นต้น



รูปที่ 2.19 ลักษณะการทำงานที่จุดต่างๆ ของวงจรถ่าย

2.8 ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

การ์ดควบคุมแบบเวลาจริงของบริษัท dSPACE เป็นการ์ดอินเทอร์เฟซที่ออกแบบสำหรับใช้กับงานพัฒนาต้นแบบ (prototype) และงานวิจัยในอุตสาหกรรมยานยนต์ (automobile industrial) เป็นหลักแต่ในเวลาต่อมาสถานศึกษาโดยเฉพาะอย่างยิ่งในระดับมหาวิทยาลัยที่ต้องการพัฒนาห้องทดลองให้ทันสมัยและพัฒนางานวิจัยต้นแบบได้รวดเร็วมากขึ้นด้วย จึงได้นำการ์ดอินเทอร์เฟซ dSPACE มาใช้งานมากขึ้น โดยเฉพาะรุ่น ACE kit1103, ACE kit1104 และ ACE kit MicroAutobox (ACE: Advanced Control Education) ข้อได้เปรียบของการใช้การ์ดอินเทอร์เฟซ dSPACE คือ เมื่อมีการจำลองการทำงานระบบควบคุมด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK เรียบร้อยแล้วสามารถเชื่อมต่อเข้ากับกระบวนการจริงได้ทันทีโดยผ่าน Blocksets สำหรับการอินเทอร์เฟซโดยเฉพาะและสามารถปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ออกแบบด้วยเวลาจริง

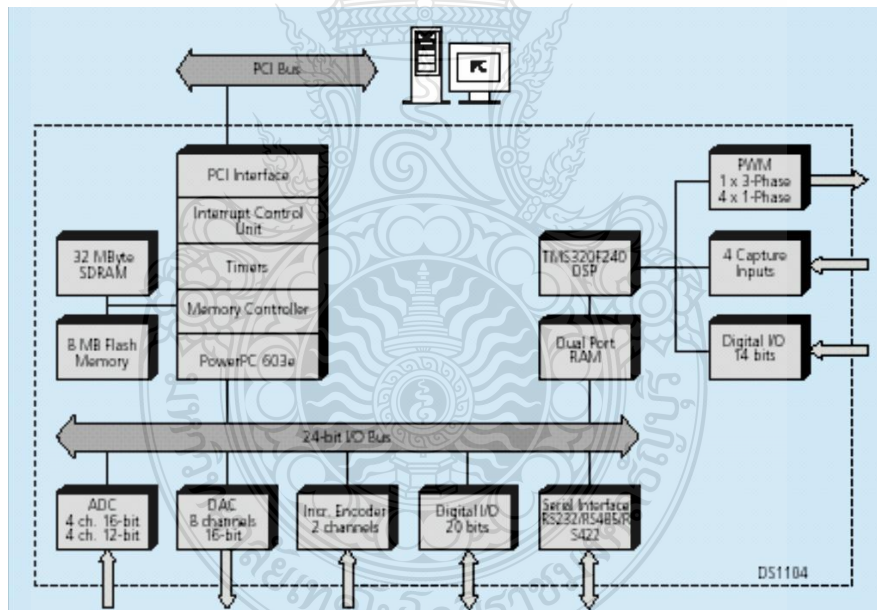
การ์ดอินเทอร์เฟซ dSPACE จะประกอบด้วยจำนวนช่อง A/D, D/A PWM, Digital I/O, Encoder ที่มากเพียงพอสำหรับระบบควบคุมทุกประเภท ยกตัวอย่างเช่น การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบเวกเตอร์ (AC motor Vector control) การควบคุมหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ การควบคุมแขนกล การควบคุมกระบวนการแบบไม่เชิงเส้นที่ซับซ้อน เป็นต้น

ในที่นี้จะกล่าวถึงการติดตั้ง และใช้งานการ์ดอินเทอร์เฟซ DS1104 [13] สำหรับงานระบบควบคุมและงานควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นหลัก ลักษณะคุณสมบัติของการ์ดสามารถกล่าวโดยสรุปดังนี้คือ เป็นการ์ดอินเทอร์เฟซสำหรับควบคุมแบบเวลาจริง (Real time) ผ่านสล็อต PCI 32 บิต ในคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC/AT) ใช้โปรเซสเซอร์หลัก PPC603e 250 MHz และตัวประมวลผลเชิงดิจิทัลรอง (Slave Digital Signal Processor) เบอร์ TMS320F240

- ช่องสัญญาณ A/D 8 ช่อง ความละเอียด 12 และ 16 บิต แรงดันอินพุต $\pm 10V$
- ช่องสัญญาณ D/A 8 ช่อง ความละเอียด 16 บิต แรงดันเอาต์พุต $\pm 10V$
- สัญญาณ PWM 10 ช่อง แบบอิสระจาก DSP TMS320F240
- ดิจิตอล I/O 20 ช่อง แบบขนาน
- ช่องสัญญาณสำหรับเอนโคเดอร์จำนวน 2 ช่อง
- ช่องสัญญาณอินเทอร์เฟซแบบอนุกรม RS232, RS485
- อินเทอร์เฟซพีซีอาร์คแวร์และซอฟต์แวร์
- แผงเชื่อมต่อสัญญาณ (Panel) สำหรับควบคุมกระบวนการ
- Microtec C Compiler
- ไดรเวอร์ซอฟต์แวร์สำหรับ MATLAB/SIMULINK และ Control Desk standard



รูปที่ 2.20 การ์ดอินเตอร์เฟส dSPACE รุ่น DS1104



รูปที่ 2.21 บล็อกไดอะแกรมฮาร์ดแวร์ของการ์ดอินเตอร์เฟส DS1104

2.7 สรุป

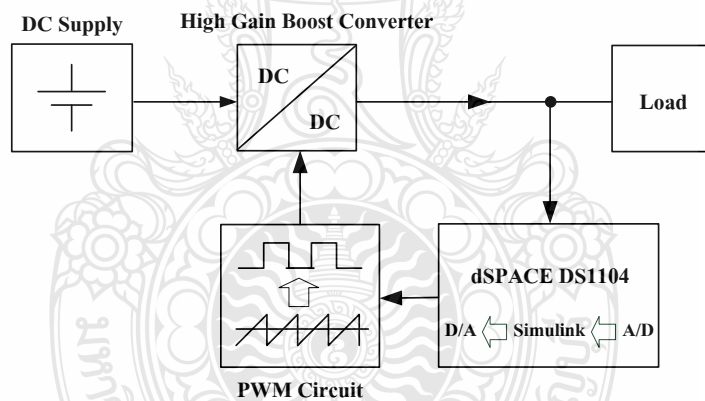
จากการศึกษาเนื้อหาส่วนที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งทำให้ทราบว่า การนำวงจรระดับแรงดันมาประยุกต์ใช้งานกับระบบผลิตกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจะต้องทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง ส่วนวงจรระดับแรงดันนั้นยังมีอัตราขยายแรงดันที่ต่ำ ทำให้แรงดันไฟฟ้าทางด้านออกยังต่ำเกินไป ยังไม่เหมาะกับการใช้งาน ดังนั้นจึงได้มีวงจรระดับแรงดันที่มีอัตราขยายที่สูงกว่าวงจรระดับแรงดันแบบพื้นฐาน โดยมีทั้งแบบที่ไม่ใช้หม้อแปลงและใช้หม้อแปลง ซึ่งในการเลือกใช้จะต้องคำนึงถึงขนาด น้ำหนักของชิ้นงาน ความยากง่ายในการออกแบบ และการสูญเสียที่เกิดขึ้น ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงได้มีหลักการขนานวงจรระดับแรงดัน ซึ่งจะช่วยให้กระแสเพื่อมลดน้อยลงได้ อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มความสามารถในการจ่ายกำลังงานด้านออกของวงจร และยังช่วยลดความร้อน ขนาด ราคา ของอุปกรณ์ลงได้ โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้วงจรระดับอัตราขยายแรงดันสูงแบบไม่ใช้หม้อแปลง เพราะมีข้อดีคือ ขนาดของตัวเหนี่ยวนำมีขนาดเล็ก ขนาดตัวเก็บประจุใช้ค่าความจุน้อย ซึ่งใช้หลักการขนานวงจรระดับแรงดันได้ เพื่อทำให้วงจรมีขนาดเล็ก สามารถทำงานที่แรงดันและกำลังไฟฟ้าสูงๆได้



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

บทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบรวมถึงการจำลองการทำงานของวงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูง ซึ่งใช้หลักการพีดับบลิวเอ็มแบบเลื่อนเฟสในการสวิตช์ และควบคุมระดับค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้า่นออก โดยโครงสร้างและหลักการทำงานของวงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูงสำหรับประยุกต์ใช้งานกับระบบผลิตกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยประกอบไปด้วย ภาควงจรกำลัง และภาควงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้าทางด้า่นออก ดังแสดงในรูปที่ 3.1 พร้อมทั้งทำการวิเคราะห์การทำงานของวงจรโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink จำลองการทำงานเพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมทางพลวัตของวงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูงแบบเลื่อนเฟส โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังแสดงแผนภูมิในรูปที่ 3.2

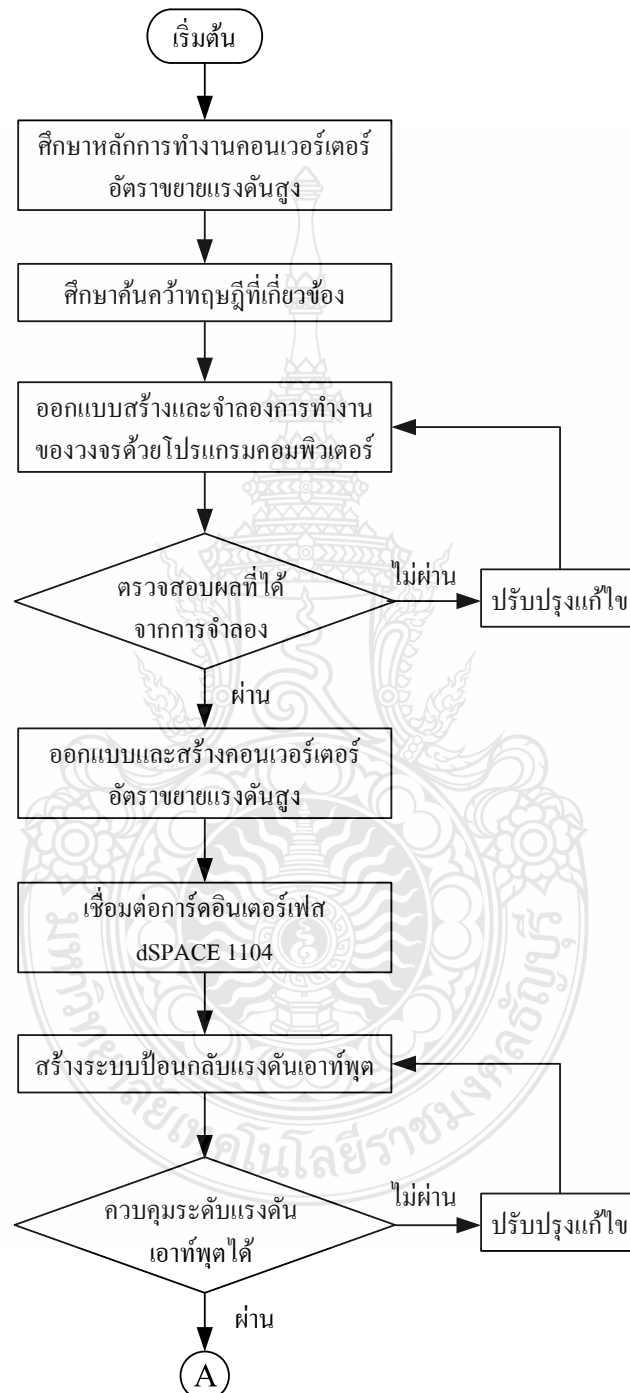


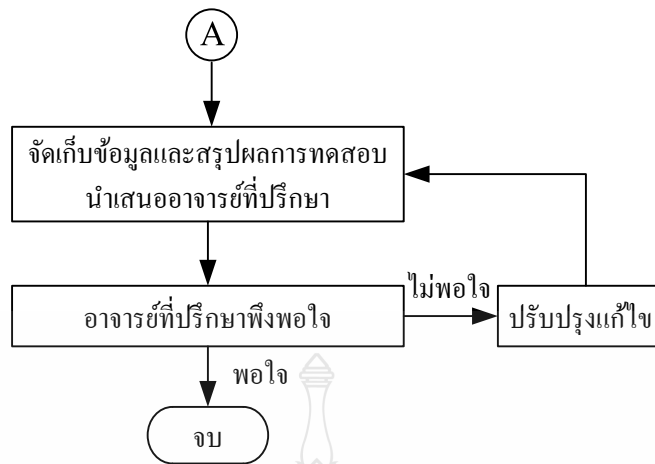
รูปที่ 3.1 โครงสร้างวงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูง

3.1 สมการทางคณิตศาสตร์ของวงจรทระดับแรงดัน

ในการวิเคราะห์วงจรถดับอัตราขยายแรงดันสูงจะพิจารณาค่าความต้านทานภายในของตัวเหนี่ยวนำ (R_L) เนื่องจากค่าความต้านทานนี้จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพและความสามารถในการจ่ายกระแสของวงจร และวงจรถดับอัตราขยายแรงดันสูงนี้ เป็นการนำวงจรถดับแรงดันมาต่อขนานกันด้วยแหล่งจ่ายเดียว ดังนั้นการวิเคราะห์หาสมการทางคณิตศาสตร์จะเริ่มวิเคราะห์จากวงจร

ทบระดับแรงดันเพียงวงจรเดียวก่อน หลังจากนั้นก็จะเพิ่มวงจรทบระดับแรงดันเข้าไปจนได้วงจรทบระดับอัตราขยายสูง ซึ่งการขนานวงจรทบระดับแรงดันนี้สามารถช่วยในการจ่ายกระแสให้สูงขึ้น

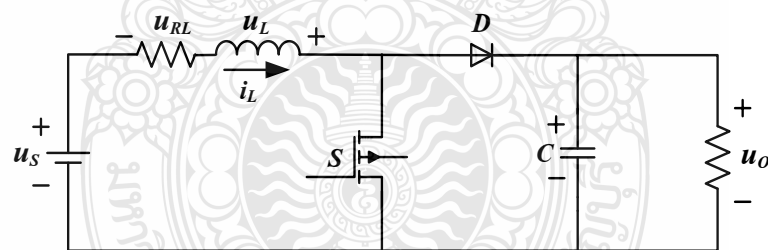




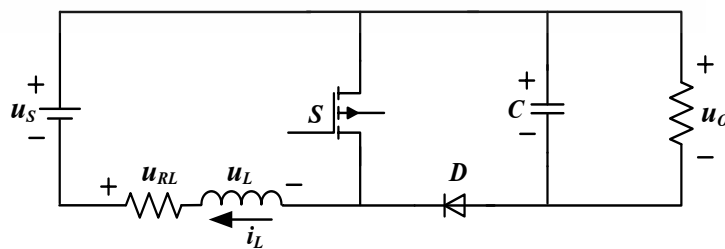
รูปที่ 3.2 แผนภูมิขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2 สมการทางคณิตศาสตร์ของวงจรทบทระดับแรงดันแบบวงจรเดี่ยว

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3.3 และ รูปที่ 3.4 จะเห็นว่าตำแหน่งของตัวเหนี่ยวนำและไดโอดจะต่างกันแต่หลักการทำงานและอัตราขยายแรงดันด้านออกของวงจรเหมือนกัน ดังนั้นสามารถวิเคราะห์การทำงานของสวิตช์ในแต่ละโหมดได้ ทั้งนี้การทำงานต้องอยู่ในช่วงสภาวะคงตัวดังนี้ [3,5,8,9]

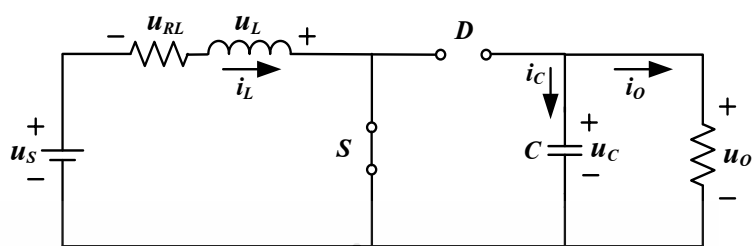


รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลของวงจรทบทระดับแรงดัน โดยที่ตัวเหนี่ยวนำอยู่ด้านบน



รูปที่ 3.4 วงจรสมมูลของวงจรทบทระดับแรงดัน โดยที่ตัวเหนี่ยวนำอยู่ด้านล่าง

3.2.1 ขณะสวิตช์นำกระแส



รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลของวงจรทระดับแรงดันเมื่อสวิตช์นำกระแส

จากวงจรดังที่แสดงในรูปที่ 3.5 สามารถวิเคราะห์สมการของกระแสได้โดยใช้หลักการของเคอร์ชอฟฟ์เพื่อหาแรงดันที่ตกคร่อมแต่ละจุด ซึ่งผลรวมของแรงดันทั้งหมดจะมีค่าเท่ากับศูนย์โดยแรงดันที่ตกคร่อม u_{RL} รวมกับแรงดันที่ตกคร่อม u_L จะเท่ากับแรงดันที่แหล่งจ่ายสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ดังนี้

$$-u_s + u_{RL} + u_L = 0 \quad (3.1)$$

$$u_s = u_{RL} + u_L \quad (3.2)$$

$$u_{RL} = i_L \cdot R_L \quad (3.3)$$

$$u_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (3.4)$$

แทนสมการที่ 3.3 และ 3.4 ลงในสมการที่ 3.2 แล้วจัดรูปใหม่จะได้

$$u_s = (i_L \cdot R_L) + (L \frac{di_L}{dt}) \quad (3.5)$$

$$L \frac{di_L}{dt} = u_s - i_L \cdot R_L \quad (3.6)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(u_s - i_L \cdot R_L) \quad (3.7)$$

ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่าน i_L หาได้จากสมการ

$$i_L = \frac{1}{L} \int (u_s - i_L \cdot R_L) dt \quad (3.8)$$

จากรูปที่ 3.3 สามารถวิเคราะห์สมการของแรงดันได้ดังนี้ คือ

$$i_c = i_o \quad (3.9)$$

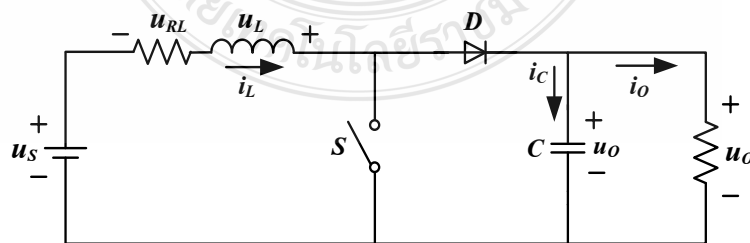
$$i_c = C \frac{du_o}{dt} \quad (3.10)$$

$$C \frac{du_o}{dt} = i_o \quad (3.11)$$

แรงดันทางด้านออกหาได้จากสมการดังนี้

$$u_o = \frac{1}{C} \int (i_o) dt \quad (3.12)$$

3.2.2 ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส



รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลย์ของวงจรทระดับแรงดันเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส

เมื่อสวิตช์ไม่นำกระแสจรรยาแสดงดังรูปที่ 3.6 กระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดไม่ได้ ใดโดยโอดจะถูกไบอัสไปข้างหน้าให้นำกระแส ซึ่งจะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำอย่างต่อเนื่อง สมมติแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกมีค่าคงที่ ซึ่งจากกฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้สมการของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำดังนี้

$$u_s = u_{RL} + u_L + u_o \quad (3.13)$$

$$u_{RL} = i_L \cdot R_L \quad (3.14)$$

$$u_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (3.15)$$

แทนสมการที่ 3.14 และ 3.15 ลงในสมการที่ 3.13 แล้วจัดรูปใหม่จะได้

$$u_s = (i_L \cdot R_L) + (L \frac{di_L}{dt}) + u_o \quad (3.16)$$

$$L \frac{di_L}{dt} = u_s - (i_L \cdot R_L) + u_o \quad (3.17)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} (u_s - (i_L \cdot R_L) - u_o) \quad (3.18)$$

ผลของกระแสที่ไหลผ่าน i_L หาได้จากสมการ

$$i_L = \frac{1}{L} \int (u_s - (i_L \cdot R_L) - u_o) \quad (3.19)$$

สมการของแรงดันสามารถวิเคราะห์ได้จากการพิจารณาการไหลของกระแส ซึ่งจากสมการกระแสไหลเข้าเท่ากับกระแสไหลออก แสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$i_L = i_C + i_o \quad (3.20)$$

$$i_c = i_L - i_o \quad (3.21)$$

$$C \frac{du_o}{dt} = i_c \quad (3.22)$$

$$C \frac{du_o}{dt} = (i_L - i_o) \quad (3.23)$$

แรงดันไฟฟ้าทางด้าออกหาได้จากสมการ

$$u_o = \frac{1}{C} \int (i_L - i_o) dt \quad (3.24)$$

เมื่อ R_L คือ ค่าความต้านทานขลวดของตัวเหนี่ยวนำ

3.2.3 อัตราขยายแรงดันไฟฟ้าทางด้าออก

เป็นการหาค่าของแรงดันไฟฟ้าทางด้าออกที่เกิดจากค่าวัฏจักรงานต่างๆ (Duty Cycle) เพื่อใช้สำหรับคำนวณหาค่าแรงดันด้าออก โดยใช้กฎของเคอร์ชอฟฟ์มาช่วยในการวิเคราะห์หาแรงดันทางด้าออก โดยวิเคราะห์จากทางด้าออกไปหาแรงดันที่ตัวเก็บประจุ u_c จะได้สมการคือ

$$-u_o + u_c = 0 \quad (3.25)$$

$$u_o = u_c \quad (3.26)$$

เมื่อ $u_c = \frac{u_s}{(1-D)}$ (3.27)

$$u_o = \frac{u_s}{(1-D)} \quad (3.28)$$

จากสมการจะได้อัตราส่วนระหว่างแรงดันด้าออกกับแรงดันด้าเข้าคือ

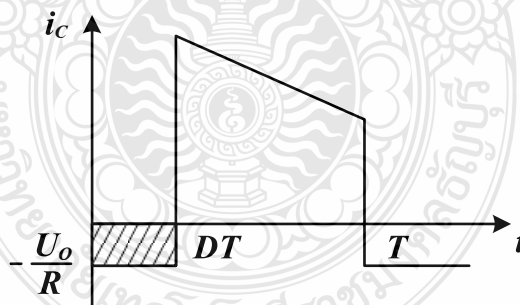
$$\frac{u_o}{u_s} = \frac{1}{(1-D)} \quad (3.29)$$

เมื่อ D คือ วัฏจักรงาน (Duty Cycle)

3.2.4 ค่าอัตราการลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออก

การที่มีตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ทางด้านออกจะสามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าด้านออกให้คงที่ได้โดยใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุมากๆ แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่ได้ เนื่องจากมีราคาแพงและขนาดใหญ่ จึงควรเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดเหมาะสม และค่าอัตราการลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออกอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

การคำนวณหาค่าอัตราการลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออกจากยอดถึงยอด สามารถหาได้จากกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ แสดงดังรูปที่ 3.7 อัตราการลอกคลื่นมักใช้เป็นอัตราส่วนของระลอกคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้านออกระหว่างยอดถึงยอดกับค่าแรงดันทางด้านออก ในที่นี้หมายถึงเฉพาะแรงดันไฟฟ้า หากต้องการทำให้อัตราการลอกคลื่นแรงดันไฟฟ้าของวงจรมีค่าน้อยลง ยิ่งอัตราการลอกคลื่นน้อยลงเท่าไรหมายถึงว่าได้แรงดันที่เรียบมากที่สุด โดยสามารถทำได้สองวิธีคือ พยายามทำให้ค่าวัฏจักรงานน้อยที่สุด หรือพยายามเพิ่มค่าความเหนียวนำ ตัวเก็บประจุหรือเพิ่มความถี่ในการสวิตช์ให้มากขึ้น โดยการเพิ่มความถี่ของการสวิตช์ขึ้นไปเป็น 50 kHz หรือ 100 kHz



รูปที่ 3.7 กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ

$$|\Delta Q| = C\Delta U_o = I_o\Delta t_{on} \quad (3.30)$$

$$i_o = \frac{U_o}{R} \quad (3.31)$$

$$\Delta t_{on} = DT \quad (3.32)$$

$$\Delta U_o = \frac{I_o \Delta t_{on}}{C} = \frac{U_o DT}{RC} \quad (3.33)$$

$$\frac{\Delta U_o}{U_o} = \frac{DT}{RC} \quad (3.34)$$

$$\frac{\Delta U_o}{U_o} = \frac{DT}{RCf} \quad (3.35)$$

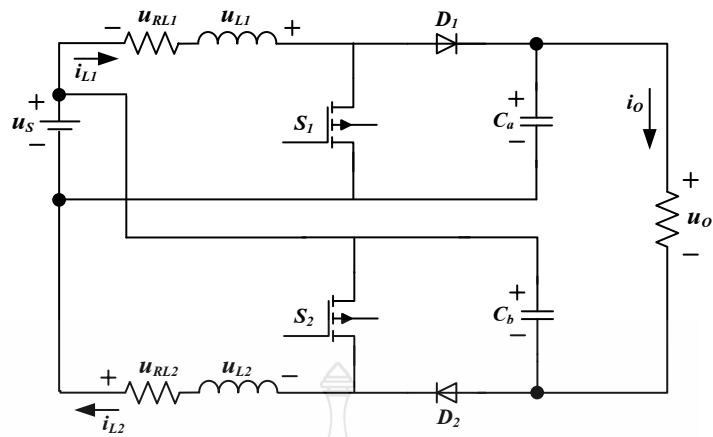
ดังนั้นสามารถหาค่าระลอกคลื่นแรงดันด้านออกได้จาก

$$\Delta U_o = \frac{U_o D}{RCf} \quad (3.36)$$

3.3 สมการทางคณิตศาสตร์ของวงจรทระดับอัตรายายแรงดันสูง

วงจรทระดับแรงดันแบบพื้นฐานเป็นวงจรที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในงานที่ต้องการระดับแรงดันทางด้านออกสูงกว่าแรงดันด้านเข้า แต่แรงดันที่ได้ยังมีขนาดไม่สูงมาก เนื่องจากวงจรทระดับแรงดันยังมีข้อจำกัดคือ อัตราขยายของวงจรสามารถยกระดับแรงดันประมาณ 3.3 เท่า หากสั่งให้วงจรมีอัตราขยายแรงดันมากกว่านี้วงจรก็จะขาดความเสถียร แต่ถ้าต้องการทำให้ระดับแรงดันทางด้านออกสูงมากกว่านี้ จำเป็นที่จะต้องใช่วงจรทระดับแรงดันที่มีการประยุกต์ใช้หม้อแปลงเพื่อใช้จำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิมาขยายระดับแรงดันให้สูงมากขึ้น [14-16] แต่วิธีนี้จะมีข้อจำกัดเรื่องการพันจำนวนรอบของขดลวดไม่ตรงกับอัตราขยายที่ได้ออกแบบไว้และปัญหาการแปลงแรงดันขึ้นของหม้อแปลง (Step Up) เกิดปัญหาในเรื่องของการสะท้อนกลับของอิมพีแดนซ์ที่มีผลกลับมาในวงจร (Reflected Impedance) ทำให้แรงดันด้านเข้าน้อยลง เนื่องจากมีแรงดันไปตกคร่อมที่ด้านเข้าของอิมพีแดนซ์มีผลทำให้แรงดันทางด้านออกน้อยลง

ดังนั้นจึงมีการคิดวงจรยกระดับแรงดันขึ้นมาใหม่ [3-9,17-23] โดยที่ไม่มีการใช้หม้อแปลงเข้ามาเกี่ยวข้องแต่จะใช้วิธีการรวมแรงดันที่มาจากตัวเก็บประจุคือ C_a และ C_b วงจรแสดงดังรูปที่ 3.8 ทำให้อัตราขยายแรงดันมากกว่าวงจรทระดับแรงดันแบบพื้นฐานเมื่อเทียบกับที่ค่าวัฏจักรงานเท่ากัน



รูปที่ 3.8 วงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูง

วงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูงนี้จะมีวิธีการสวิตช์ที่คล้ายกับวงจรทระดับแรงดันแบบขนานคือมีการเหลื่อมเฟสการทำงานเพื่อที่สวิตช์จะไม่เริ่มทำงานพร้อมกันสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.37

$$\text{มุมในการสวิตช์} = \frac{2\pi}{N} \text{ เรเดียน} \quad (3.37)$$

สามารถวิเคราะห์หาอัตราขยายแรงดันทางด้านออกได้จากการใช้กฎของเคอร์ชอฟฟ์

$$-u_o + u_{Ca} - u_s + u_{Cb} = 0 \quad (3.38)$$

$$u_o = u_{Ca} - u_s + u_{Cb} \quad (3.39)$$

เมื่อ

$$u_{Ca} = u_{Cb} = \frac{u_s}{(1-D)} \quad (3.40)$$

$$u_o = \frac{u_s}{(1-D)} - u_s = \frac{u_s}{(1-D)} \quad (3.41)$$

$$u_o = \frac{u_s - u_s(1-D) + u_s}{(1-D)} \quad (3.42)$$

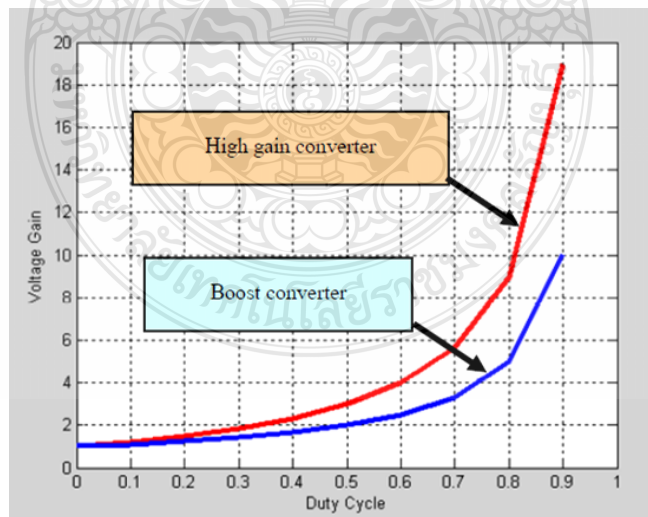
$$u_o = \frac{u_s + u_s D}{(1-D)} \quad (3.43)$$

$$u_o = \frac{u_s(1+D)}{(1-D)} \quad (3.44)$$

ดังนั้นสมการแรงดันทางด้านออกต่อแรงดันทางด้านเข้ามีค่าเท่ากับ

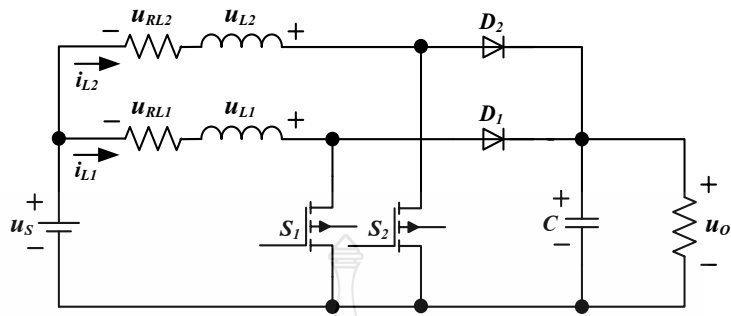
$$\frac{U_o}{U_s} = \frac{(1+D)}{(1-D)} \quad (3.45)$$

เมื่อนำสมการแรงดันทางด้านออกของวงจรทระดับแรงดันแบบพื้นฐานมาเปรียบเทียบกับสมการแรงดันทางด้านออกของวงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูง ด้วยวิธีการเขียนโปรแกรมเพื่อแทนค่าวัฏจักรงานของทั้งสองสมการเพื่อหาค่าอัตราขยายแรงดันทางด้านออก โดยจากรูปที่ 3.9 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ค่าวัฏจักรงานสูงๆ วงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูงจะมีอัตราขยายแรงดันทางด้านออกมากกว่าวงจรทระดับแรงดันแบบพื้นฐาน



รูปที่ 3.9 เปรียบเทียบอัตราขยายแรงดันวงจรทระดับแรงดัน

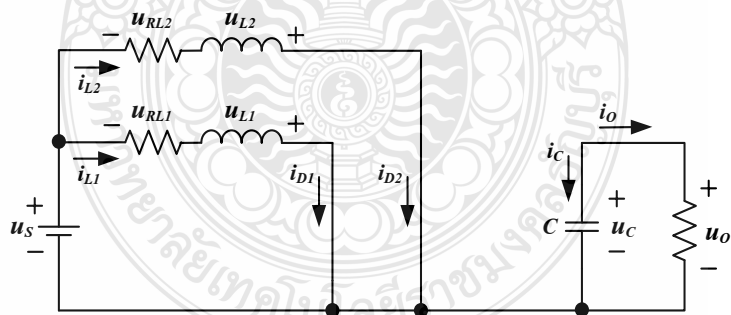
3.4 สมการทางคณิตศาสตร์ของวงจรทระดับแรงดันแบบขนานสองเฟส



รูปที่ 3.10 วงจรทระดับแรงดันแบบขนานสองเฟส

จากวงจรแสดงในรูปที่ 3.10 จากการพิจารณาวงจรทระดับแรงดันที่ละวงจรเพื่อหาสมการแรงดันและกระแสโดยใช้หลักการพิจารณาเหมือนกับวงจรทระดับแรงดันแบบพื้นฐานในการขนานวงจรทระดับแรงดันสามารถที่จะขนานได้มากกว่าสองเฟสขึ้นไป โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาเพียงสองเฟส [3,5,8,9] ซึ่งตรงกับวงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูงที่มีการขนานด้านละสองวงจรเพื่อช่วยในการจ่ายกระแสของวงจร สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

3.4.1 ขณะสวิตช์นำกระแส



รูปที่ 3.11 วงจรสมมูลขณะสวิตช์นำกระแส

โดยจะเปลี่ยนสมการกระแส i_L เป็น i_D เพื่อแยกตัวแปรให้มีความแตกต่างกัน จากรูปที่ 3.11 สามารถวิเคราะห์สมการของกระแสได้ดังนี้ คือ

$$-u_S + u_{RL1} + u_{L1} = 0 \quad (3.46)$$

$$u_S = u_{RL1} + u_{L1} \quad (3.47)$$

$$u_{RL1} = i_{D1} \cdot R_{L1} \quad (3.48)$$

$$u_{L1} = L_1 \frac{di_{D1}}{dt} \quad (3.49)$$

$$u_S = (i_{L1} \cdot R_{L1}) + (L_1 \frac{di_{L1}}{dt}) \quad (3.50)$$

$$L_1 \frac{di_{D1}}{dt} = u_S - i_{D1} \cdot R_{L1} \quad (3.51)$$

$$\frac{di_{D1}}{dt} = \frac{1}{L_1} (u_S - i_{D1} \cdot R_{L1}) \quad (3.52)$$

สมการกระแสที่ไหลผ่าน i_{D1} หาได้จาก

$$i_{D1} = \frac{1}{L_1} \int (u_S - i_{D1} \cdot R_{L1}) dt \quad (3.53)$$

กระแสที่ไหลใน i_{L2} และ i_{LN} ก็สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้วิธีเดียวกันจะได้

$$i_{D2} = \frac{1}{L_2} \int (u_S - i_{D2} \cdot R_{L2}) dt \quad (3.54)$$

$$i_{DN} = \frac{1}{L_N} \int (u_S - i_{DN} \cdot R_{LN}) dt \quad (3.55)$$

สามารถวิเคราะห์สมการของแรงดันได้ดังนี้ คือ

$$i_C = i_O \quad (3.56)$$

$$i_C = C \frac{du_O}{dt} \quad (3.57)$$

$$C \frac{du_O}{dt} = i_O \quad (3.58)$$

$$i_O = i_{D1} + i_{D2} + i_{DN} \quad (3.59)$$

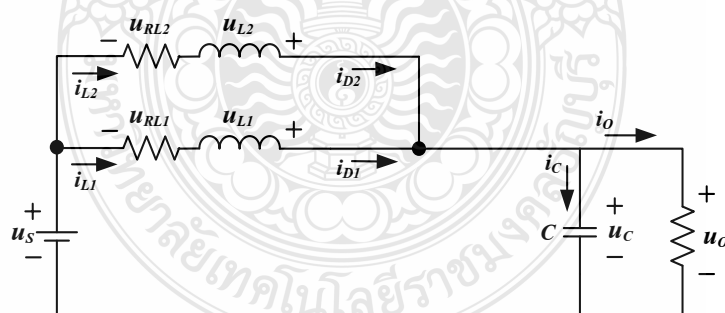
สามารถหาสมการแรงดันได้จาก

$$u_O = \frac{1}{C} \int (i_{D1} + i_{D2} + i_{DN}) dt \quad (3.60)$$

เมื่อ R_L คือ ค่าความต้านทานของขดลวดของตัวเหนี่ยวนำ

D_N คือ จำนวนวงจรที่ระดับแรงดันที่ขนานกันมากกว่า 2 เฟสขึ้นไป

3.4.2 ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส



รูปที่ 3.12 วงจรสมมูลขณะสวิตช์ไม่นำกระแส

เมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส กระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำแต่ละตัวจะเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดไม่ได้ ซึ่งไดโอดทุกตัวจะถูกไบอัสไปข้างหน้าให้นำกระแสไหลผ่านทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแต่ละตัวอย่างต่อเนื่องดังรูปที่ 3.12 สมมติแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกมีค่าคงที่ จากกฎของ

เคอร์ชอฟฟ์โดยจะได้สมการของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ โดยจะยกตัวอย่างการพิจารณา วงจรเพียงสองเฟสได้ดังนี้

$$u_S = u_{RL1} + u_{L1} + u_O \quad (3.61)$$

$$u_{RL1} = i_{D1} \cdot R_{L1} \quad (3.62)$$

$$u_{L1} = L_1 \frac{di_{D1}}{dt} \quad (3.63)$$

$$u_S = (i_{D1} \cdot R_{L1}) + (L_1 \frac{di_{D1}}{dt}) + u_O \quad (3.64)$$

$$L_1 \frac{di_{D1}}{dt} = u_S - (i_{D1} \cdot R_{L1}) - u_O \quad (3.65)$$

$$\frac{di_{D1}}{dt} = \frac{1}{L_1} (u_S - (i_{D1} \cdot R_{L1}) - u_O) \quad (3.66)$$

สมการกระแสที่ไหลผ่าน i_{D1} หาได้จาก

$$i_{D1} = \frac{1}{L_1} \int (u_S - (i_{D1} \cdot R_{L1}) - u_O) \quad (3.67)$$

ส่วนกระแสที่ไหลใน i_{D2} และ i_{DN} สามารถหาได้ด้วยวิธีเดียวกันสมการของแรงดันสามารถวิเคราะห์ได้จากการพิจารณาการเท่ากันของกระแสไหลเข้ากับกระแสไหลออก โดยเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$i_{D1} + i_{D2} + i_{DN} = i_C + i_O \quad (3.68)$$

$$i_C = (i_{D1} + i_{D2} + i_{DN}) - i_O \quad (3.69)$$

$$C \frac{du_o}{dt} = i_o \quad (3.70)$$

ดังนั้นผลรวมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแต่ละตัวหาได้จากสมการ

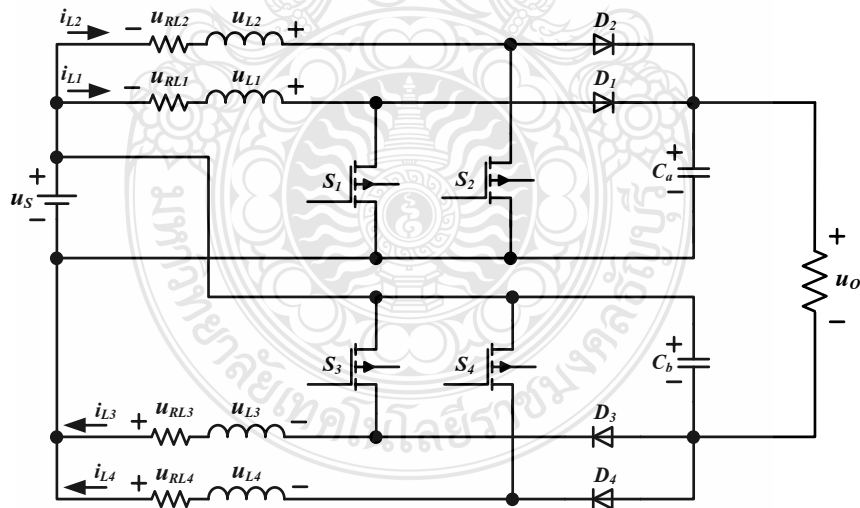
$$u_o = \frac{1}{C} \int ((i_{D1} + i_{D2} + i_{DN}) - i_o) dt \quad (3.60)$$

เมื่อ R_L คือ ค่าความต้านทานของขดลวดของตัวเหนี่ยวนำ

D_N คือ จำนวนวงจรทระดับแรงดันที่ขนานกันมากกว่า 2 เฟสขึ้นไป

3.5 สมการทางคณิตศาสตร์ของวงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูงที่มีการขนาน

วงจรทระดับแรงดันที่แสดงในดั่งรูปที่ 3.10 ซึ่งมีความสามารถขยายแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกได้ตามที่ออกแบบไว้ แต่เนื่องจากการจ่ายกระแสของวงจรยังมีข้อจำกัด ดังนั้นเพื่อทำให้วงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูงที่สร้างขึ้นสามารถจ่ายกระแสได้มากขึ้น จึงได้ประยุกต์ใช้หลักการขนานวงจรทระดับแรงดัน ด้วยวิธีเหลื่อมเฟสของกระแส (Multiphase Interleaved Technique) [3,5,8,9]



รูปที่ 3.13 วงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูงแบบขนานเหลื่อมเฟส

วงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูงแบบขนานเหลื่อมเฟส ซึ่งจะมีวิธีการสวิตช์ที่คล้ายกับวงจรทระดับแรงดันแบบขนานสองเฟสคือ จะมีการเหลื่อมเฟสการทำงานเพื่อที่สวิตช์จะไม่เริ่มทำงานพร้อมกันสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\text{มุมในการสวิตช์} = \frac{2\pi}{N} \text{ เรเดียน} \quad (3.61)$$

เมื่อ N คือ จำนวนของวงจรทระดับแรงดันที่นำมาต่อขนานกัน

จากวงจรรูปที่ 3.13 โดยสวิตช์ S_1 จะทำงานที่มุม 0 องศา สวิตช์ S_2 จะทำงานที่มุม 90 องศา สวิตช์ S_3 จะทำงานที่มุม 180 องศา และ สวิตช์ S_4 จะทำงานที่มุม 270 องศา ซึ่งโดยแต่ละตัวจะทำงานเหลื่อมเฟสกัน 90 องศา

สมการของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแต่ละตัวสามารถหาได้เหมือนกับสมการกระแสของวงจรทระดับแรงดันแบบธรรมดา

ดังนั้นกระแสที่ไหลในตัวเหนี่ยวนำหาได้จากสมการกระแสของวงจรทระดับแรงดัน

$$i_{D1} = \frac{1}{L_1} \int (u_S - i_{D1} \cdot R_{L1}) dt \quad (3.62)$$

$$i_{D2} = \frac{1}{L_2} \int (u_S - i_{D2} \cdot R_{L2}) dt \quad (3.63)$$

$$i_{D3} = \frac{1}{L_3} \int (u_S - i_{D3} \cdot R_{L3}) dt \quad (3.64)$$

$$i_{D4} = \frac{1}{L_4} \int (u_S - i_{D4} \cdot R_{L4}) dt \quad (3.65)$$

เมื่อ R_L คือ ค่าความต้านทานขดลวดของตัวเหนี่ยวนำ

จากวงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูงแบบขนานเหลื่อมเฟสสามารถวิเคราะห์สมการของแรงดันไฟฟ้าทางด้าน u_{Ca} ด้วยวิธีการคิดที่โนดได้ดังนี้

$$i_{Ca} + i_O = i_{D1} + i_{D2} \quad (3.66)$$

$$i_{Ca} = (i_{D1} + i_{D2}) - i_O \quad (3.67)$$

และกระแสที่ไหลออกจากตัวเก็บประจุ C_a

$$i_{Ca} = (i_{D1} + i_{D2}) - i_O \quad (3.68)$$

$$C_a \frac{du_{Ca}}{dt} = (i_{D1} + i_{D2}) - i_O \quad (3.69)$$

$$u_a = u_{Ca} = \frac{1}{C_a} \int ((i_{D1} + i_{D2}) - i_O) dt \quad (3.70)$$

และกระแสที่ไหลออกจากตัวเก็บประจุ C_b

$$i_{Cb} = (i_{D3} + i_{D4}) - i_O \quad (3.71)$$

ส่วนแรงดันไฟฟ้าทางด้าน u_{Cb} ก็สามารถหาได้จากสมการเช่นเดียวกันกับการหาแรงดันไฟฟ้า u_{Ca}

$$u_b = u_{Cb} = \frac{1}{C_b} \int ((i_{D3} + i_{D4}) - i_O) dt \quad (3.72)$$

แรงดันไฟฟ้าที่ได้ทางด้านออกจะหาได้จากผลรวมของแรงดันที่ออกมาจาก ตัวเก็บประจุทั้งสองตัวทำให้ต้องแยกวิธีหาสมการออกเป็น u_{Ca} และ u_{Cb} เมื่อได้สมการแรงดันของทั้งสองโนดแล้ววิธีการหาแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกก็จะหาได้จากเคอร์ชอฟฟ์คือ

$$+u_O - u_{Ca} + u_S - u_{Cb} = 0 \quad (3.73)$$

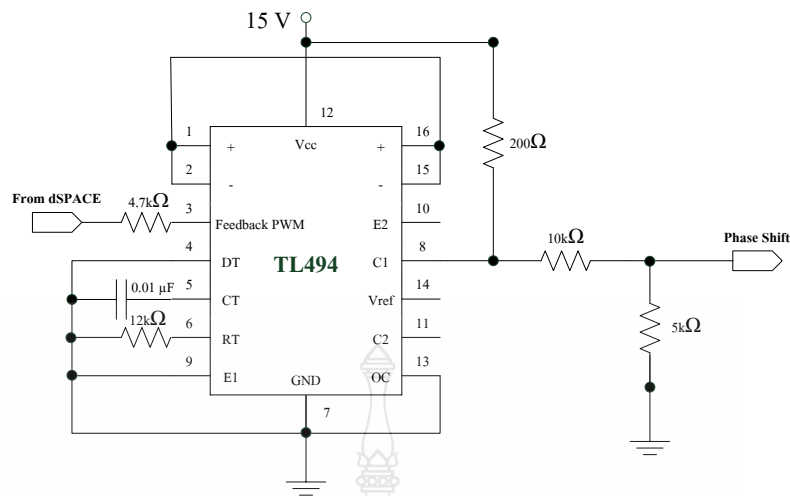
$$u_O = u_{Ca} + u_{Cb} - u_S \quad (3.74)$$

3.6 การออกแบบวงจรภาคควบคุมวงจรระดับอัตราขยายแรงดันสูง

วงจรภาคควบคุมจะทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของวงจรระดับอัตราขยายแรงดันสูง เพื่อให้วงจรระดับอัตราขยายแรงดันสูงรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าทางค่านอกให้คงที่ซึ่งจะไปตามสัญญาณคำสั่ง ซึ่งประกอบด้วยวงจรส่วนต่างๆที่ทำงานร่วมกันดังนี้

3.6.1 วงจรมอดูเลตตามความกว้างของสัญญาณพัลส์ (PWM)

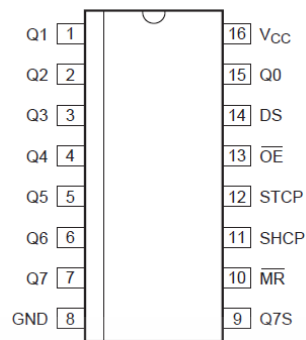
วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุมวัฏจักรการทำงานของสวิตช์ภาคกำลังซึ่งจะใช้ไอซีเบอร์ TL494 เป็นไอซีที่สามารถสร้างความถี่ในการสวิตช์และสามารถปรับค่าวัฏจักรงานได้ โดยวิทยานิพนธ์นี้กำหนดความถี่ที่เลือกใช้งานคือ 25 kHz ซึ่งในการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุมวัฏจักรการทำงานของสวิตช์ภาคกำลังจะประกอบด้วย 2 ส่วนสำคัญด้วยกันคือ ส่วนแรกไอซีเบอร์ TL494 จะเป็นวงจที่ใช้กำเนิดสัญญาณพัลส์ได้ที่มีความถี่ 25 kHz โดยสัญญาณนี้จะถูกส่งออกไปทางขา 8 โดยการกำหนดความถี่นั้นสามารถกำหนดได้จากค่าของตัวต้านทานและตัวเก็บประจุที่ขา 6 และ 5 ตามลำดับ ในที่นี้เลือกใช้ค่าความต้านทานเป็น 12 k Ω และค่าตัวเก็บประจุเป็น 0.01 μ F และในส่วนที่สองคือ ส่วนการปรับค่าวัฏจักรงาน โดยใช้หลักการมอดูเลตสัญญาณ โดยนำสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากตัวประมวลผลคิสเปซ DS1104 สัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงนี้เกิดจากการตรวจจับค่าแรงดันค่านอกของวงจรระดับอัตราขยายแรงดันสูงแล้วแปลงจากสัญญาณอะนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (A/D) แล้วส่งเข้าไปคำนวณในแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของวงจรระดับอัตราขยายแรงดันสูง ผลที่ได้คือค่าแรงดันตามคุณลักษณะของวงจรระดับอัตราขยายแรงดันสูง ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามค่าแรงดันค่านอก สัญญาณดิจิทัลที่คำนวณได้จะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณแอนะล็อก (D/A) ส่งผ่านตัวต้านทาน 4.7 k Ω มาเข้าขาที่ 3 ของไอซี TL494 เพื่อเข้าไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพื้นเลื้อยที่ได้จากขา 5 ผลของการเปรียบเทียบสัญญาณทั้งสองส่งผลให้สามารถปรับค่าวัฏจักรงานได้ จากนั้นสัญญาณพัลส์จากขา 8 ของไอซี TL494 จะถูกส่งเข้าไปยังวงจรเหลื่อมเฟสโดยผ่านไอซีเบอร์ M74HC595B1 ซึ่งเป็นไอซีชิฟต์รีจิสเตอร์ เพื่อให้ได้สัญญาณขับนำสวิตช์ออกมาจำนวน 4 สัญญาณ โดยมีการเหลื่อมเฟสกัน 90 องศา ก่อนที่จะนำไปขับเคลื่อนของเพาเวอร์มอสเฟตทั้ง 4 ตัว เพื่อขยายสัญญาณให้ได้ 15 VDC และเป็นการแยกการเชื่อมต่อระหว่างวงจรกำลังและวงจรควบคุมอีกด้วยเพื่อเพิ่มความปลอดภัยของวงจรควบคุม สัญญาณพัลส์ขับเคลื่อนของเพาเวอร์มอสเฟตจะได้จากขา 6 ของไอซีเบอร์ TLP250 ทั้ง 4 ตัว วงจรมอดูเลตตามความกว้างของสัญญาณพัลส์ของวงจรระดับอัตราขยายแรงดันสูงแสดงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 วงจรมอดูเลตตามความกว้างของสัญญาณพัลส์

3.6.2 วงจรสร้างสัญญาณเหลี่ยมเฟส

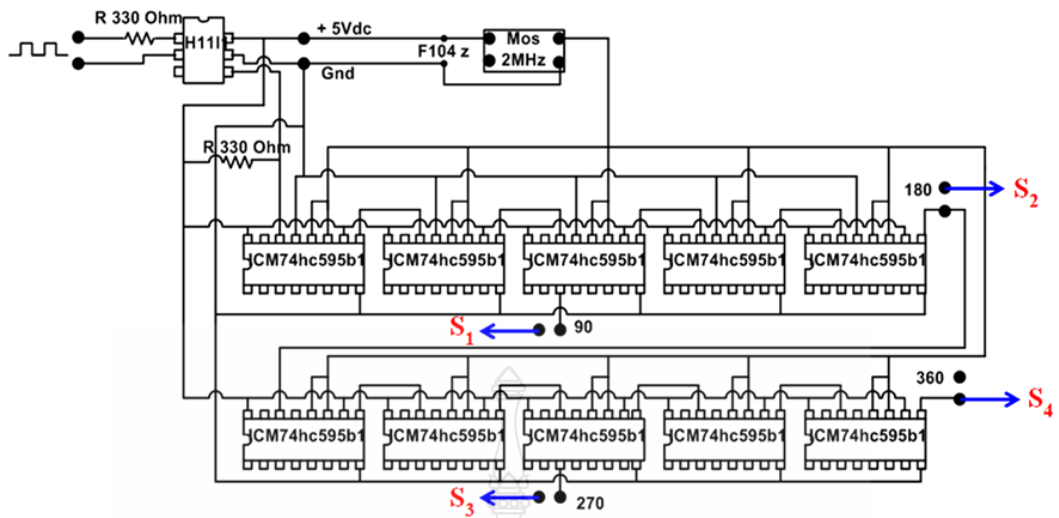
ในวิทยานิพนธ์นี้วงจรระดับอัตราขยายแรงดันสูงมีการสวิตช์ที่เหลี่ยมเฟสกัน 90 องศา ดังนั้นเมื่อได้สัญญาณพัลส์ที่ได้จากไอซี TL494 สัญญาณจะถูกส่งผ่านมายังไอซี 74HC595 ซึ่งเป็น ไอซีลอจิก (Logic IC) ซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรเลื่อนบิตขนาด 8 บิต (8-bit Shift Register) โดยรับข้อมูลเข้าและจะส่งข้อมูลออกทีละบิต (Serial-In & Serial-Out) และมีเอาต์พุตแบบ 8 บิต (Parallel Data Output) ถ้าต้องการจะส่งข้อมูลไปกำหนดสถานะลอจิกให้ขาเอาต์พุตทั้ง 8 ขา (Q0...Q7) จะต้องใช้วิธีเลื่อนบิตทีละบิตเข้าที่ขาอินพุต DS (Serial Data Input) และสร้างสัญญาณ Clock ป้อนเข้าที่ขา SHCP (Shift Clock Input) เพื่อกำหนดจังหวะในการทำงาน และสามารถเลือกใช้ความถี่ของสัญญาณอินพุต SHCP ได้เกินกว่า 10 MHz สัญญาณ SHCP หนึ่งไซเคิล (Clock Cycle) หมายถึงการเลื่อนบิตหนึ่งครั้ง ดังนั้นจึงต้องใช้ทั้งหมด 8 ไซเคิล สำหรับ 8 บิต ถ้าเลื่อนบิตมากกว่า 8 ไซเคิล ข้อมูลในรีจิสเตอร์ก็จะถูกส่งออกมาตามลำดับที่ขา Q7S การเลื่อนบิตเพื่อส่งข้อมูลจะส่งแบบ MSB First เมื่อข้อมูลถูกนำไปใส่ไว้ในรีจิสเตอร์ภายในจนครบ 8 บิตแล้ว และต้องการให้ขาเอาต์พุต Q0 ถึง Q7 มีสถานะลอจิกตรงตามข้อมูลในรีจิสเตอร์ จะต้องสร้างสัญญาณแบบพัลส์เข้าที่ขา STCP (Storage Clock Input) และต้องกำหนดขาอินพุต /OE (Output Enable) ให้เป็นลอจิก LOW ถ้าต้องการจะเคลียร์ข้อมูลในรีจิสเตอร์ให้ป้อนอินพุตที่ขา /MR (Master Reset) เป็น Low แล้วจึงเปลี่ยนเป็น High การเลือกใช้แรงดันไฟเลี้ยง (V_{CC}) สำหรับ 74HC595 จะใช้งานได้ในช่วง 2.0 V ถึง 6.0 V ดังแสดงในรูปที่ 3.15 ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้ต่อร่วมกัน 10 ตัว วงจรแสดงดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.15 แสดงตำแหน่งขาของไอซี 74HC595

ไอซี 74HC595 ตัวถังแบบ PDIP-16 มีขาดังต่อไปนี้

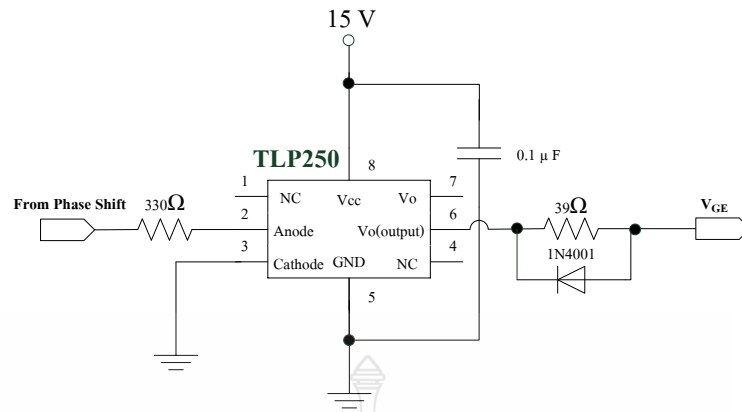
- Pin 1 = Q1 -- Data Output Bit 1
- Pin 2 = Q2 -- Data Output Bit 2
- Pin 3 = Q3 -- Data Output Bit 3
- Pin 4 = Q4 -- Data Output Bit 4
- Pin 5 = Q5 -- Data Output Bit 5
- Pin 6 = Q6 -- Data Output Bit 6
- Pin 7 = Q7 -- Data Output Bit 7
- Pin 8 = GND
- Pin 9 = Q7S -- Serial Data Output
- Pin 10 = \overline{MR} -- Master Reset (Active-Low)
- Pin 11 = SHCP -- Shift Register Clock Input
- Pin 12 = STCP -- Storage Register Clock Input
- Pin 13 = \overline{OE} -- Output Enable Input (Active-Low)
- Pin 14 = DS -- Serial Data Input
- Pin 15 = Q0 -- Data Output Bit 0
- Pin 16 = V_{CC} -- Supply Voltage



รูปที่ 3.16 วงจรสร้างสัญญาณเหลือมเฟส

3.6.3 วงจรขับนำสวิทช์

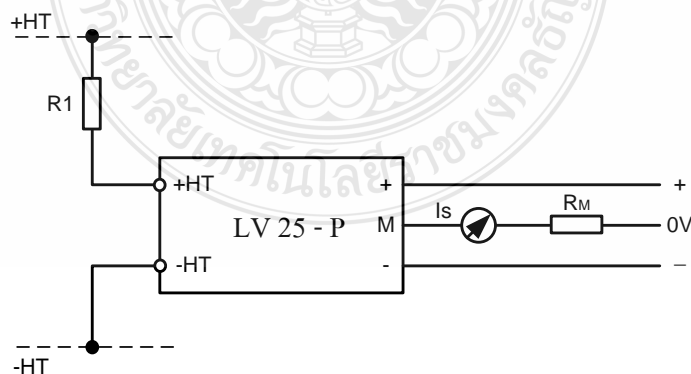
ในการกระตุ้นให้อุปกรณ์สวิทช์ เช่น ทรานซิสเตอร์ เพาเวอร์มอสเฟต ทำงานจะต้องมีระดับสัญญาณพัลส์ที่มีแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 12 V เพื่อให้สวิทช์ทำงานได้เต็มที่ แต่การควบคุมวงจรที่มีกระแสสูงๆ จะต้องมีการแยกกราวด์ของวงจรควบคุมกับวงจรกำลังออกจากกัน เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวน การแยกกราวด์ด้วยไอซีสำเร็จรูปเป็นวิธีที่สะดวกและมีขนาดเล็ก โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้ ไอซีเบอร์ TLP 250 เพื่อใช้ควบคุมการทำงานของเพาเวอร์มอสเฟส วงจรในการสร้างสัญญาณขับเกตสัญญาณด้านเข้าเป็นสัญญาณที่ถูกส่งมาจากวงจรสร้างสัญญาณเหลือมเฟสซึ่งจะมีขนาดแรงดัน 5 V สัญญาณนี้จะถูกต่อเข้าไปไบอัสให้กับแอลอีดีให้นำกระแส โดยมีค่าความต้านทาน R_1 ทำหน้าที่จำกัดกระแสในการไบอัสเมื่อแอลอีดีนำกระแส จะเกิดแสงทำให้ทรานซิสเตอร์ทางด้านเอาท์พุทนำกระแส ทำให้แรงดันที่ขา 8 ของไอซี เมื่อเทียบกราวด์มีค่า 12 V ออกไปที่ขา 7 มีค่า 12 V ซึ่งแรงดันไฟฟ้าระดับนี้สามารถทำให้เพาเวอร์มอสเฟสทำงานได้ แต่เมื่อทางอินพุทมีสัญญาณที่แรงดันน้อยกว่า 0.7 V แอลอีดีภายในไม่นำกระแสซึ่งจะส่งผลทำให้ทรานซิสเตอร์หยุดนำกระแส ทำให้ที่ขา 7 ของไอซีมีแรงดันไฟฟ้า 0 V ทำให้เพาเวอร์มอสเฟตหยุดนำกระแส ซึ่งการออกแบบวงจรแสดงดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 วงจรขับนำสวิตช์โดยใช้ไอซีเบอร์ TLP 250

3.6.4 วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าด้านออก

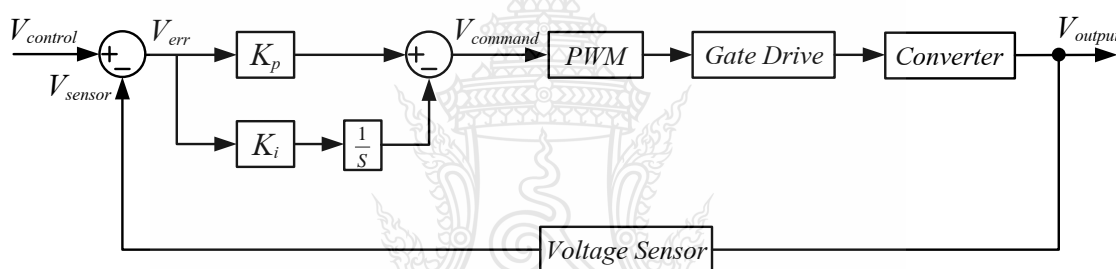
อุปกรณ์ตรวจจับแรงดันไฟฟ้าด้านออก (Voltage Transducer) นั้นจะทำหน้าที่ตรวจจับค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรระดับอัตราขยายแรงดันสูง จากนั้นจะทำการทอนค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตรวจจับได้ในอัตราส่วน 100 V ต่อ 1 V เพื่อส่งสัญญาณเข้าไปยังอุปกรณ์อินเตอร์เฟซการ์ด DS1104 เพื่อให้นำไปคำนวณค่าสัญญาณอ้างอิงในการสร้างสัญญาณพัลส์ขั้วเกิดของอุปกรณ์สวิตช์เพาเวอร์มอสเฟตต่อไป โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้ Voltage Transducer ของ LEM รุ่น LA 25-P ซึ่งมี Conversion ratio 100:1 สามารถตรวจจับค่าแรงดันไฟฟ้าได้สูงสุด 500 V ซึ่งจากวงจรที่ได้ออกแบบแรงดันไฟฟ้าด้านออกที่มีค่าสูงสุดที่ 120 V จะได้ค่าความต้านทานทางด้านปฐมภูมิ $R_1 = 25 \text{ k}\Omega$ และความต้านทานด้านทุติยภูมิ $R_M = 100 \Omega$ วงจรแสดงดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าด้านออก

3.6.5 วงจรควบคุมแรงดันแบบพีไอ (PI-Controller)

ระบบควบคุมแบบป้อนกลับจะแตกต่างจากระบบควบคุมแบบเปิดคือ มีการนำเอาผลที่ได้จากกระบวนการป้อนกลับ มาเข้าเป็นส่วนหนึ่งของข้อมูลที่จะส่งเข้าไปเป็นอินพุตให้กับระบบควบคุม การที่จะทราบค่าแรงดันด้านนอกได้จะต้องมีการตรวจจับแรงดันทางด้านออกของวงจร เมื่อทราบค่าแรงดันด้านออกของวงจรแล้ว จะนำค่าแรงดันที่ได้ไปเปรียบเทียบกับแรงดันที่ต้องการจากระบบ จากนั้นความแตกต่างระหว่างแรงดันด้านออกที่ต้องการและแรงดันที่แท้จริงจะถูกส่งต่อไปสู่อุปกรณ์ควบคุมในอินเทอร์เฟซการ์ด DS1104 แล้วส่งต่อเป็นอินพุตเข้าสู่ระบบเพื่อให้ความแตกต่างระหว่างแรงดันที่ต้องการและแรงดันด้านออกที่แท้จริงลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งไม่มีความแตกต่างระหว่างค่าทั้งสอง ดังนั้นก็จะได้ว่าค่าแรงดันด้านออกของระบบเป็นไปตามต้องการ โดยระบบควบคุมแรงดันแบบป้อนกลับแสดงในรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 ระบบควบคุมแรงดันป้อนกลับแบบพีไอ

วงจรควบคุมพีไอ [24] เป็นวงจรที่ทำหน้าที่ควบคุมให้ระดับแรงดันด้านออกให้มีค่าคงที่ ถึงแม้ว่าโหลดทางด้านออกของวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลง โดยจากรูปที่ 3.19 เป็นการนำสัญญาณแรงดันไฟฟ้าด้านออกที่ทำการตรวจวัด V_{sensor} มารวมกับสัญญาณคำสั่ง $V_{control}$ เพื่อหาค่าผิดพลาด (Error) เมื่อได้ค่าผลลัพธ์ก็จะถูกส่งเข้าวงจรควบคุมบูรณาการร่วมหน่วยแบบพีไอ PI Control ทำการขจัดความผิดพลาด เพื่อสร้างสัญญาณ $V_{command}$ ไปใช้ในการปรับความกว้างของสัญญาณขับเพาเวอร์มอสเฟตทั้ง 4 ตัว ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ค่า $K_p = 500$ และ $K_i = 1000$ โดยพิจารณาจากการทดสอบระบบที่สร้างขึ้น พบว่าค่าที่เลือกดังกล่าวมา ทำให้ระบบมีการตอบสนองและชดเชยแรงดันได้อย่างรวดเร็วในกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดก็ตาม

3.7 การออกแบบวงจรภาคกำลังวงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูง

ในการออกแบบวงจรภาคกำลังของวงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูง [3-5,9] จะประกอบไปด้วยวงจรทระดับแรงดันจำนวน 4 วงจรมาขนานกันโดยจะมี 2 วงจรที่มีตัวเหนี่ยวนำจะอยู่ทางด้านบวกของแหล่งจ่ายไฟและส่วนอีก 2 วงจรจะมีตัวเหนี่ยวนำอยู่ทางด้านลบของแหล่งจ่ายดังแสดงในรูปที่ 3.13 วงจรภาคกำลังที่ได้ออกแบบนี้ใช้พาเวอรัมอสเฟตเป็นอุปกรณ์สวิตช์ โดยเลือกใช้เบอร์ IRF 3415 ของบริษัท International Rectifier (IR) ซึ่งมีคุณสมบัติคือ มีค่า $R_{DS(on)}$ ต่ำประมาณ 0.042 Ω และสามารถทนกระแสได้สูงถึง 43 A ที่แรงดัน 150 V ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ส่วนไดโอดเป็นแบบพื้นตัวเร็วโดยเลือกใช้เบอร์ RURG3020 ของบริษัท FAIRCHILD มีคุณสมบัติทนกระแสได้ 30 A ที่แรงดัน 200V ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้สามารถคำนวณได้จาก

3.7.1 การคำนวณหาตัวเหนี่ยวนำความถี่สูง (L)

ในวงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูง ตัวเหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์สำคัญซึ่งจะมีหน้าที่เก็บและคายพลังงานซึ่งเป็นผลให้ระดับแรงดันไฟฟ้าด้านออก มีค่าสูงกว่าระดับแรงดันไฟฟ้าด้านทางเข้า การคำนวณหาตัวเหนี่ยวนำนี้สามารถคำนวณได้จาก

$$L = \frac{D U_s}{4 \Delta I_L \cdot f_s} \quad (3.74)$$

เมื่อ U_s คือ แรงดันไฟฟ้าด้านเข้า
 D คือ ค่าวัฏจักรงาน (Duty cycle)
 ΔI_L คือ อัตราการระลอกคลื่นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ
 f_s คือ ความถี่สวิตช์

สามารถคำนวณค่าวัฏจักรงาน (D) ได้ดังนี้

$$D = 1 - \frac{24}{72} = 0.66 \quad (3.75)$$

U_{bus} คือ แรงดันไฟฟ้าบัสมีค่า 72 V

แทนค่าเพื่อหาค่าตัวเหนี่ยวนำ

$$L = \frac{0.66 \times 24}{4 \times 0.2 \times 25,000} = 792 \mu H \quad (3.76)$$

เลือกแกนของขดลวดเป็นชนิดแกนเฟอร์ไรต์ เพราะมีค่าสูญเสียต่ำเมื่อทำงานที่ความถี่สูง การคำนวณหาขนาดใช้วิธีการคำนวณแบบ A_p (Area Approach) เป็นการออกแบบที่ใช้ค่า T_{rise} ซึ่งอยู่ในรูปความหนาแน่นของกระแสขดลวดเหนี่ยวนำ ($J = 100-1000 A/cm^2$) โดยคำนวณหาขนาดแกนเหล็กดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 จากขีดจำกัดและข้อกำหนดในการคำนวณหา A_p กำหนดค่าต่างๆดังนี้ $J = 4 A/mm^2 = 4 \times 10^6 A/m^2$, $k = 0.65$, กระแสเอาต์พุต (I_{rms}) = 5.5 A, กระแสไฟฟ้าสูงสุด (I_{peak}) = 6 A, $\Delta I = 2(I_{peak} - I_{rms}) = 1 A$ และ $B = 0.5 T$

$$A_p = \frac{L \cdot I_{peak} \cdot I_{rms}}{B_{max} \cdot J \cdot k} = \frac{792 \times 10^{-6} \times 6 \times 5.5}{0.5 \times 4 \times 10^6 \times 0.8} = 16,335 mm^3 \quad (3.77)$$

- เมื่อ L คือ ค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการนำมาออกแบบ (H)
 I_{peak} คือ ค่ากระแสสูงสุดที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (A)
 I_{rms} คือ ค่ากระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (A)
 k คือ ขีดจำกัดของช่องหน้าต่างมีค่าระหว่าง 0.3-0.9
 W คือ พื้นที่หน้าต่างที่ใช้พันขดลวด (mm^2)

ขั้นตอนที่ 2 เลือกขนาดของแกนเฟอร์ไรต์ที่มีค่า A_p มากกว่าค่าที่ได้คำนวณจากขั้นตอนที่ 1 โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้แกนเฟอร์ไรต์เบอร์ EE42/42/15 ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ดังนี้

$$A_p = 17,600 mm^3, A_w = 179 mm^2, S = 182 mm^2$$

ค่าตัวแปรจาก Data Sheet ของแกนเฟอร์ไรต์เมื่อเทียบตัวแปรจากสูตร

A_p คือ Effective core Volume (Ve) มีหน่วยเป็น mm^3

A_w คือ Cross-sectional winding area of core (Acw) มีหน่วยเป็น mm^2

S คือ Effective cross-sectional area (Ae) มีหน่วยเป็น mm^2

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณจำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำโดยกำหนดให้

$$L = 792 \mu H, I_{peak} = 6 A, B_{max} = 0.5 \mu T, S = 182 mm^2$$

แทนค่าเพื่อหาจำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ

$$N = \frac{L \cdot I_{peak}}{B_{max} \cdot S} = \frac{792 \times 10^{-6} \times 6}{0.5 \times 10^{-6} \times 182} = 52 \text{ รอบ} \quad (3.78)$$

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณหาขนาดของขดลวดตัวนำ A_w

$$A_w = \frac{I_{rms}}{J} = \frac{5.5 A}{4 A / mm^2} = 1.375 mm^2 \quad (3.79)$$

ขั้นตอนที่ 5 เลือกเบอร์ลวดทองแดงให้มี A_w ใหญ่กว่า A_w ที่ได้จากการคำนวณในขั้นตอนที่ 4 โดยคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดได้จาก

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot A_w}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 1.375 mm^2}{\pi}} = 1.323 mm \quad (3.80)$$

ในงานวิจัยนี้เลือกขนาดขดลวดเบอร์ 15 AWG มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.45 mm มากกว่าที่ได้คำนวณไว้ เนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางมีผลต่อการไหลของกระแสในขดลวด ถ้าค่าน้อยกว่าที่คำนวณได้ จะทำให้กระแสไหลผ่านไม่ได้ตามต้องการและเกิดความร้อนขึ้น

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดขดลวดที่ใช้งานจริงกับแกนเฟอร์ไรต์

$$A_w = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi(1.45\text{mm})^2}{4} = 1.65\text{mm}^2 \quad (3.81)$$

$$W = \frac{N \cdot A_w}{k} = \frac{52 \times 1.65\text{mm}^2}{0.8} = 107.25\text{mm}^2 \quad (3.82)$$

W ที่ใช้ได้ต้องมีค่า $\leq 179 \text{ mm}^2$

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณหาค่าความกว้างของ Air Gab (l_g)

$$l_g = \frac{\mu_o \cdot N^2 \cdot S}{2L} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 52^2 \times 182 \times 10^{-6}}{2 \times 792 \times 10^{-6}} = 0.00039\text{mm} \quad (3.83)$$

สรุป วงจรทบทระดับอัตราขยายแรงดันสูงที่สร้างขึ้น ใช้แกนเฟอร์ไรต์ขนาด EE42/42/15 ขดลวดเบอร์ 15 AWG จำนวนรอบที่พัน 52 รอบ ความกว้าง Air Gab มีขนาด 0.00039 mm

3.7.2 การคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุ

วงจรกำลังของวงจรทบทระดับอัตราขยายแรงดันสูง ตัวเก็บประจุด้านออกมีหน้าที่เก็บพลังงานอยู่ในรูปประจุไฟฟ้าและทำการจ่ายแรงดันออกให้กับภาระทางไฟฟ้า (Load) หรือคายประจุเมื่อสวิตช์เปิดวงจร และทำการเก็บประจุเมื่อสวิตช์ปิดวงจร ดังนั้นจึงจำเป็นที่ต้องเลือกตัวเก็บประจุที่สามารถทนแรงดันได้เท่าหรือมากกว่าแรงดันด้านออก หากเลือกตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่จะมีส่วนช่วยในการลดการกระเพื่อมของแรงดันและกระแสทางด้านออก โดยคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุได้จาก

$$C_{bus} = \frac{I_{out} \cdot D}{2 \cdot \Delta U_{bus} \cdot f_s} = \frac{4 \times 0.66}{2 \times 0.1 \times 25,000} = 528 \mu\text{F} \quad (3.84)$$

เมื่อ ΔU_{bus} คือ อัตราค่าระลอกคลื่นแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุด้านออก

I_{out} คือ กระแสไฟฟ้าด้านออก

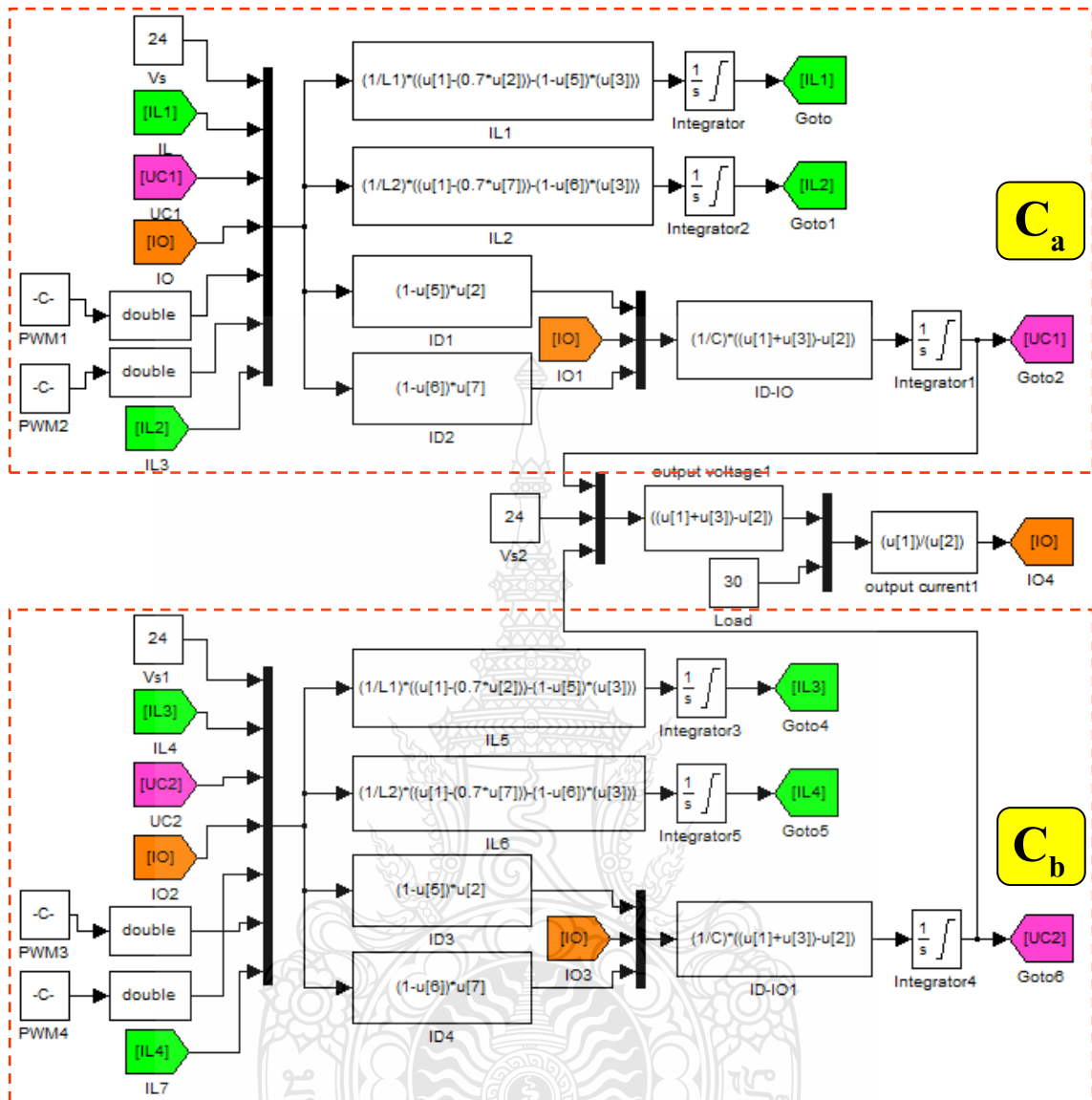
สรุป งานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวเก็บประจุขนาด 470 μF , 450 V

3.8 การจำลองการทำงานของวงจรระดับอัตราขยายแรงดันสูงแบบขนานเหลื่อมเฟส

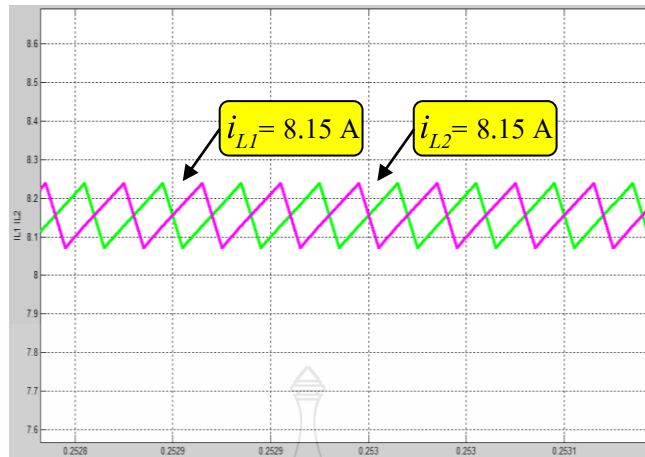
ในการจำลองการทำงานนี้วงจรจะแสดงดังรูปที่ 3.20 เนื่องจากวงจรระดับอัตราขยายแรงดันสูงจะมีการแบ่งตัวเก็บประจุออกเป็น C_a และ C_b ตามลักษณะการต่อวงจรจริง ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองจะแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนทางด้าน C_a และทางด้าน C_b โดยสัญญาณขับนำสวิทช์จะมี 4 สัญญาณซึ่งจะเหลื่อมเฟสกัน 90 องศา ซึ่งในการจำลองการทำงานของวงจรระดับอัตราขยายแรงดันสูงจะใช้ค่าพารามิเตอร์จริงตามที่ได้คำนวณไว้ซึ่งแสดงในตารางที่ 3.1 โดยแทนค่าต่างๆที่คำนวณได้ลงในแบบจำลองในรูปที่ 3.19 โดยจะเริ่มจำลองการทำงานของวงจรระดับอัตราขยายแรงดันสูงเพื่อดูสัญญาณของกระแสและอัตราขยายแรงดัน โดยในการสร้างแบบจำลองจะใช้สมการของกระแสและสมการของแรงดันที่หาได้จากข้างต้นนำมาแทนค่าลงในแบบจำลอง โดยจะแยกออกเป็นสมการของกระแส (i_L) และสมการของแรงดัน (u_o) โดยโหนดของวงจรซึ่งจะใช้การแทนค่าความต้านทานคงที่

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง

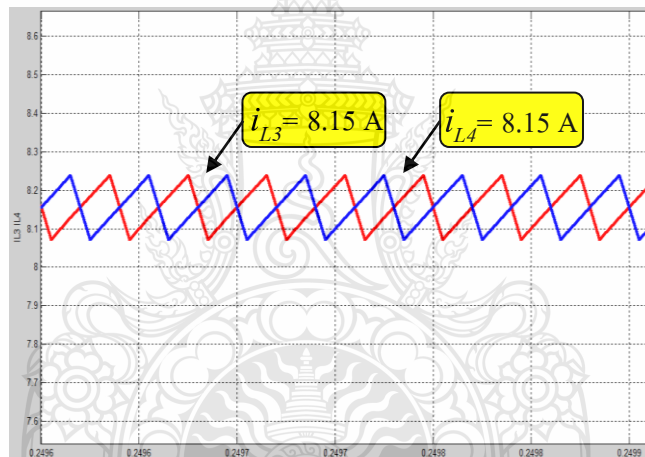
รายการ	ข้อกำหนด
1. แรงดันไฟฟ้าด้านเข้า	24 V
2. แรงดันไฟฟ้าด้านออก	120 V
3. กำลังไฟฟ้าด้านออกสูงสุด	500 W
4. ค่าเหนี่ยวนำ L_1, L_2, L_3, L_4	800 μ H, 0.7 Ω
5. ค่าความจุ C_a, C_b	470 μ F
6. ความถี่สวิทช์ f_s	25 kHz



รูปที่ 3.20 แบบจำลองวงจรระดับอัตราขยายแรงดันสูงแบบขนานเหนี่ยวนำ

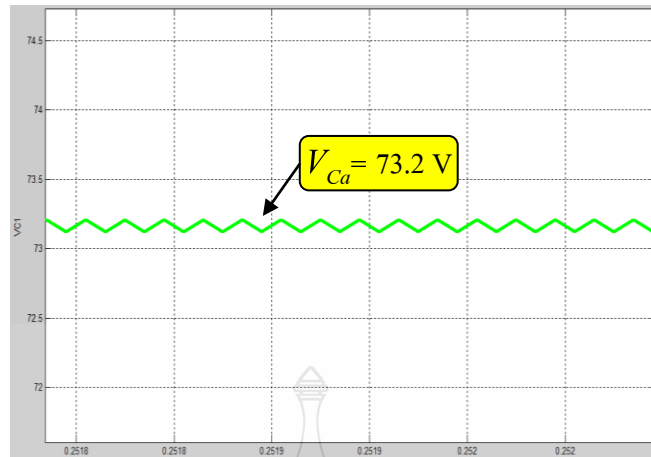


รูปที่ 3.21 สัญญาณกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_{L1} , i_{L2}) ที่พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

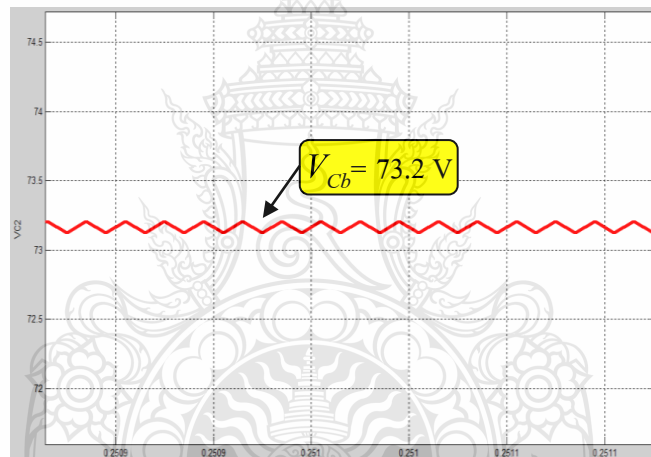


รูปที่ 3.22 สัญญาณกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_{L3} , i_{L4}) ที่พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

จากรูปที่ 3.21 และรูปที่ 3.22 แสดงให้เห็นว่าขณะจ่ายโหลดที่พิกัดสูงสุดวงจรมีการแบ่งกระแสที่เท่ากัน ซึ่งกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้ง 4 วัตต์ค่าได้ 8.15 A โดยมีการเลื่อนกันเฟส 90 องศา

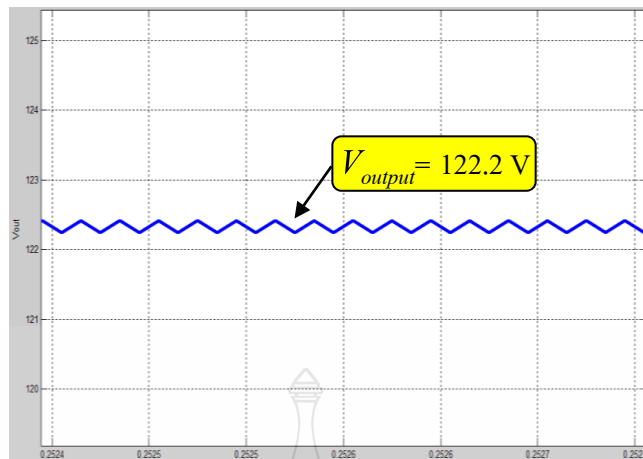


รูปที่ 3.23 สัญญาณแรงดันของตัวเก็บประจุ C_a ที่พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

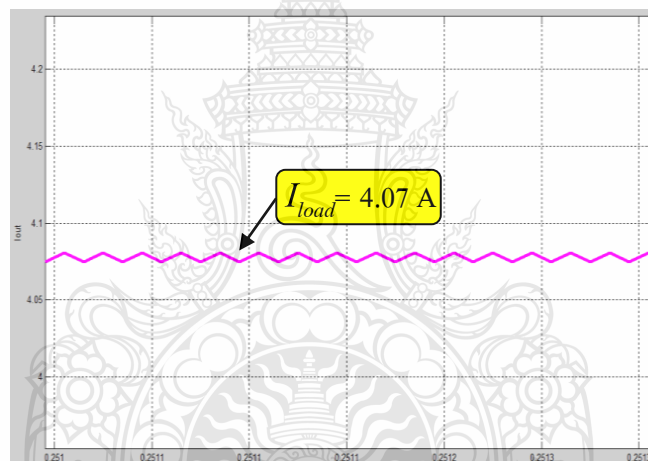


รูปที่ 3.24 สัญญาณแรงดันของตัวเก็บประจุ C_b ที่พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

จากรูปที่ 3.23 และรูปที่ 3.24 แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุทั้ง 2 คือ V_{Ca} และ V_{Cb} โดยวัดค่าได้ประมาณ 73 V ซึ่งมีค่าแรงดันที่เท่ากัน โดยเป็นไปตามทฤษฎีที่ได้ออกแบบไว้ข้างต้น



รูปที่ 3.25 สัญญาณแรงดันด้านออก (V_{output}) ที่พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุด



รูปที่ 3.26 สัญญาณกระแสด้านออก (I_{load}) ที่พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

จากรูปที่ 3.25 แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าด้านออกวัดค่าได้ประมาณ 122 V และรูปที่ 3.26 แสดงสัญญาณกระแสไฟฟ้าด้านออกวัดค่าได้ประมาณ 4 A โดยได้ทดสอบการจำลองการทำงานของวงจรที่พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุด 500 W ซึ่งเป็นไปทฤษฎีที่ได้คำนวณและออกแบบไว้ข้างต้น

3.9 สรุป

จากการวิเคราะห์หาสมการกระแส แรงดันและอัตราขยาย ทางด้านออกของวงจรระดับอัตราขยายแรงดันสูง เมื่อนำสมการมาจำลองการทำงานของวงจรระดับอัตราขยายแรงดันสูงแบบขนานเหลื่อมเฟสด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยการนำสมการกระแสและสมการแรงดันที่ได้มาสร้างแบบจำลอง ผลการจำลองการทำงานของวงจรระดับอัตราขยายแรงดันสูงที่ออกแบบภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด สามารถจ่ายแรงดันด้านออกได้ 120 V ที่พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุด 500 W ซึ่งเป็นไปตามขอบเขตที่ได้กำหนดไว้ ดังนั้นแนวทางการวิเคราะห์และออกแบบในบทนี้โดยจะนำไปใช้ในการออกแบบและสร้างวงจรระดับอัตราขยายแรงดันสูงเครื่องต้นแบบ เพื่อที่จะได้นำไปทดสอบหาสมรรถนะและประสิทธิภาพดังจะกล่าวถึงในบทที่ 4 ต่อไป



บทที่ 4

ผลการทดสอบ

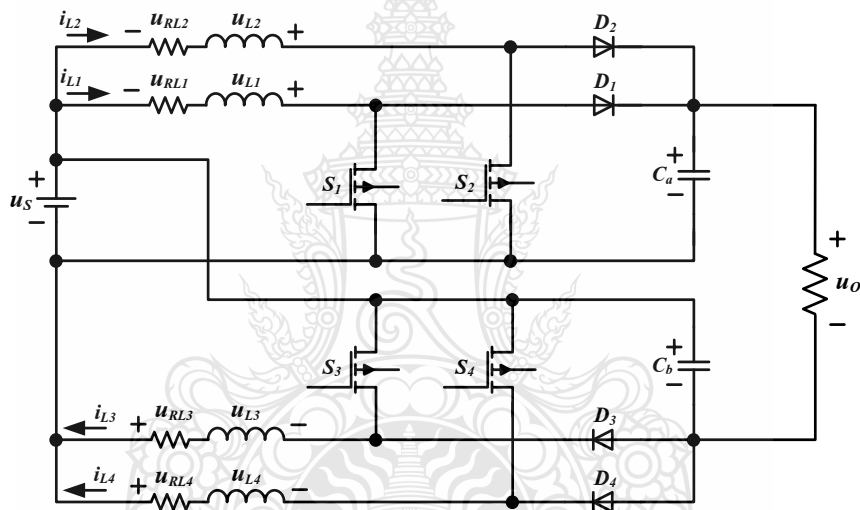
ในบทนี้กล่าวถึงผลการทดสอบที่ได้จากการออกแบบและสร้างวงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูงแบบขนานเหลื่อมเฟส ตามขอบเขตที่กำหนดไว้ในบทที่ 1 โดยการทดสอบนี้จะใช้ดิจิทัลออสซิลโลสโคป (Digital Oscilloscope) ยี่ห้อ Agilent รุ่น DSO-X-2002A วัดค่าแรงดันและกระแสของวงจร และชุดตรวจจับแรงดัน (Voltage Transducer) ยี่ห้อ LEM รุ่น LV 25-P เพื่อใช้วัดค่าแรงดันทางด้านออกในสถานะคงตัว (Steady State) และสถานะชั่วครู่ (Transient State) โดยจะส่งสัญญาณจากค่าที่วัดได้แล้วทำการทอนแรงดันในอัตราส่วน 100 ต่อ 1 และแปลงจากสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (A/D) ส่งเข้าไปคำนวณในแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของตัวประมวลผลดีสเปซ (dSPACE-DS1104) โดยผลที่ได้คือ สัญญาณแรงดัน $V_{command}$ ที่ใช้ควบคุมค่าวัฏจักรงานซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงตามค่ากำลังไฟฟ้าด้านออกของวงจร สัญญาณดิจิทัลที่คำนวณได้จะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณอนาล็อก (D/A) และถูกส่งไปยังวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ทำการเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะเพื่อปรับค่าวัฏจักรงาน โดยคงค่าระดับแรงดันไฟฟ้าด้านออกต่อการเปลี่ยนแปลงภาระทางไฟฟ้า (Load) ซึ่งมีรายละเอียดของการทดสอบดังต่อไปนี้

4.1 การทดสอบวงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูง

ในการทดสอบนี้เป็นการทดสอบการทำงานของวงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูงที่มีการขนานกันจำนวน 4 วงจร เพื่อเพิ่มความสามารถในการจ่ายกระแสและแรงดันของวงจรโดยได้ทำการทดสอบที่แรงดันทางด้านออก 120 V คงที่ แต่มีการปรับภาระทางไฟฟ้าเพื่อให้ค่ากำลังไฟฟ้าทางด้านออกมีการเปลี่ยนแปลง เพื่อที่จะทำให้วงจรมีการจ่ายกระแสที่ต่างกัน ค่าพารามิเตอร์ของวงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูงแสดงในตารางที่ 4.1 และวงจรที่ใช้ทดสอบแสดงในรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรที่ใช้ในการทดสอบ

รายการ	ข้อกำหนด
1. แรงดันไฟฟ้าด้านเข้า	24 V
2. แรงดันไฟฟ้าด้านออก	120 V
3. กำลังไฟฟ้าด้านออกสูงสุด	500 W
4. ค่าเหนี่ยวนำ L_1, L_2, L_3, L_4	800 μ H , 0.7 Ω
5. ค่าความจุ C_a, C_b	470 μ F
6. ความถี่สวิตช์ f_s	25 kHz

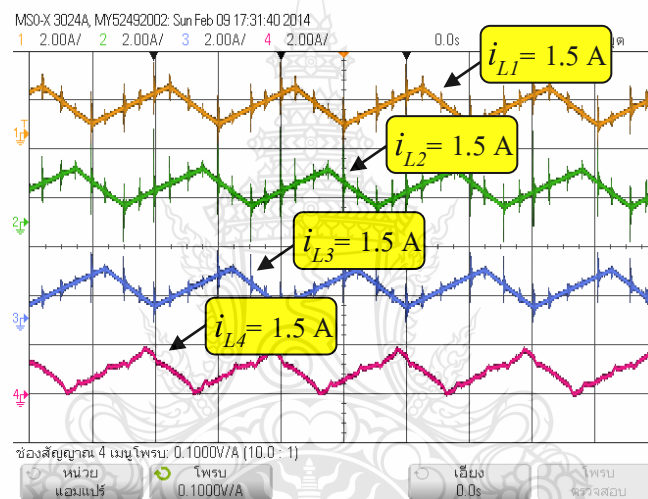


รูปที่ 4.1 วงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูงที่ใช้ทดสอบ

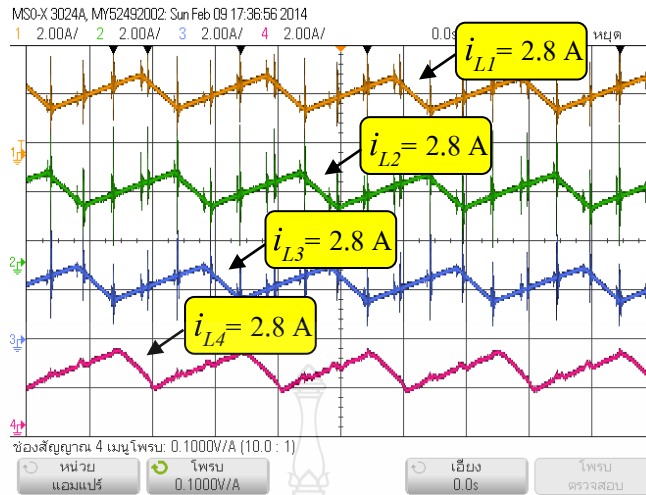
4.2 การทดสอบที่สภาวะคงตัว (Steady State)

ที่สภาวะคงตัววงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูงที่สร้างขึ้นมาจะต้องมีความสามารถในการขยายแรงดันได้ตรงกับที่ออกแบบไว้และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้ง 4 ตัว จะต้องมีการแบ่งกระแสเท่ากันมีการเหลื่อมเฟสกัน 90 องศา ในการทดสอบนี้จะใช้ตัวประมวลผลดีสเปซ (dSPACE-DS1104) ควบคุมค่าวัฏจักรงานให้กับวงจร ขณะทำการทดสอบนี้ใช้หลอดไส้ (Incandescent) ต่อเป็นภาระทางไฟฟ้าด้านออก โดยการทดสอบจะสั่งให้วงจรทำงานที่กระแสต่างกันแต่จะควบคุมแรงดันทางด้านออกให้มีค่าคงที่ 120 V โดยจะทำการเพิ่มจำนวนหลอดไส้ที่ใช้ต่อเป็นโหลดของวงจรให้มีการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังไฟฟ้า ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.2 ถึงรูปที่ 4.5 ใช้เครื่องวัดกระแสวัด

ที่ขดลวดเหนี่ยวนำทางด้านขาเข้า เพื่อวัดกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ I_L แต่ละตัวทั้งหมด 4 ตัว และใช้ดิจिटอลโวลต์มิเตอร์วัดที่แรงดันด้านออก โดยสัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดกระแสต่อเข้ากับดิจिटอลออสซิลโลสโคปใช้วัดกระแสตามลำดับคือ CH1 วัดที่ I_{L1} ส่วน CH2 วัดที่ I_{L2} ส่วน CH3 วัดที่ I_{L3} และ CH4 วัดที่ I_{L4} ส่วนแรงดันเนื่องจากมีระดับความต่างศักย์ที่สูงจึงใช้โวลต์เตจดิฟเฟอเรนเชียลโพรบลดความต่างศักย์ลงให้อยู่ในระดับที่สามารถต่อเข้าออสซิลโลสโคปได้ เพื่อวัดแรงดันที่จุดต่างๆ ของวงจร รวมถึงการใช้เครื่องวัดกระแสวัดค่าทางด้านออกที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับค่ากำลังไฟฟ้างดแสดงในรูปที่ 4.6 ถึงรูปที่ 4.9 ซึ่งจากการทดสอบที่สภาวะคงตัวนี้ตัวเหนี่ยวนำทำงานที่กระแสคงที่เนื่องจากไม่มีการกระชากของกระแสแบบทันทีทันใด

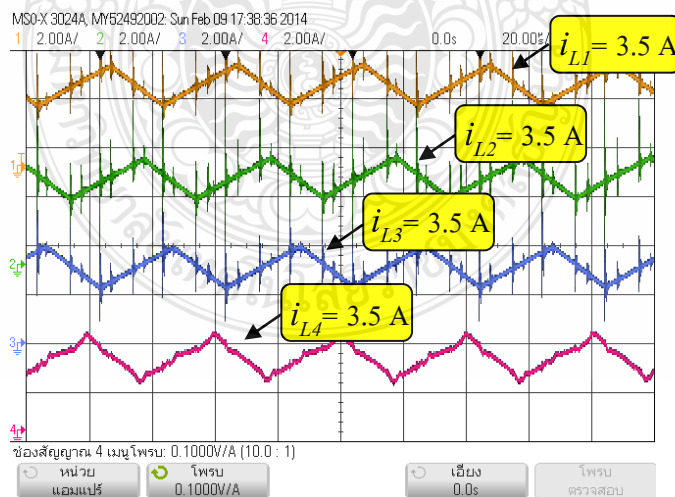


รูปที่ 4.2 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้ง 4 เฟส ที่กระแสโหลด 1 A

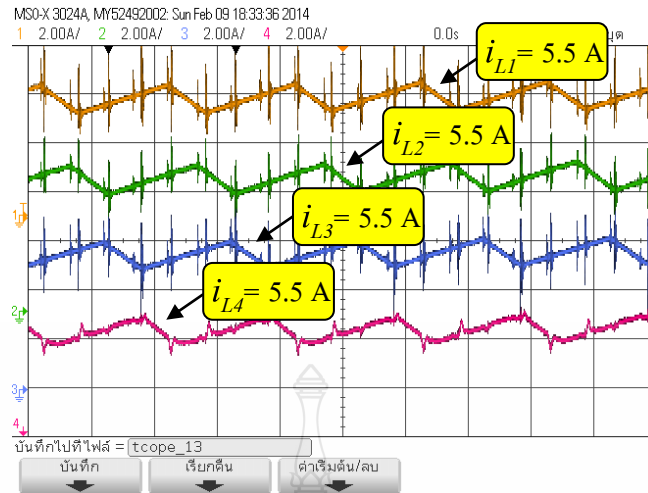


รูปที่ 4.3 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้ง 4 เฟส ที่กระแสโหลด 2 A

จากรูปที่ 4.2 ถึงรูปที่ 4.5 เป็นการวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้ง 4 โดยทำการทดสอบ วงจรสถานะคงที่ ที่ค่ากระแสโหลดของวงจร 1 A , 2 A , 3 A และ 4 A ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า สัญญาณของกระแสทั้ง 4 เฟส ซึ่งจะมีการแบ่งกระแสที่เท่ากันตามลำดับ โดยแต่ละเฟสจะห่างกัน 90 องศา ตามหลักการของการขนานวงจรด้วยวิธีเหลื่อมเฟสของกระแส (Interleaved Technique) โดยแรงดันด้านออกจะค่ามีเท่ากับ 120 V คงที่

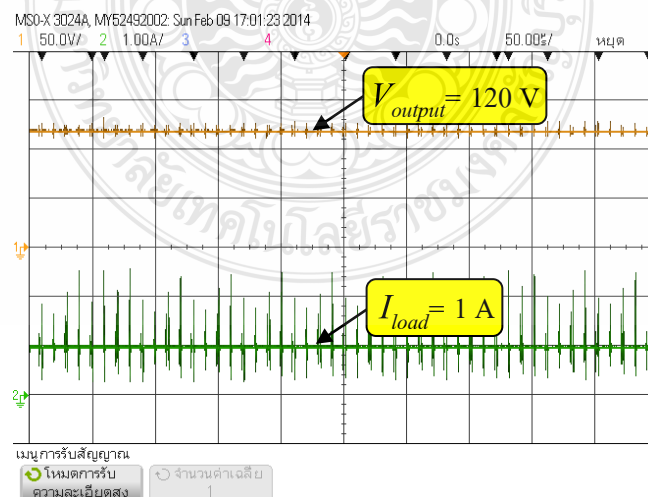


รูปที่ 4.4 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้ง 4 เฟส ที่กระแสโหลด 3 A

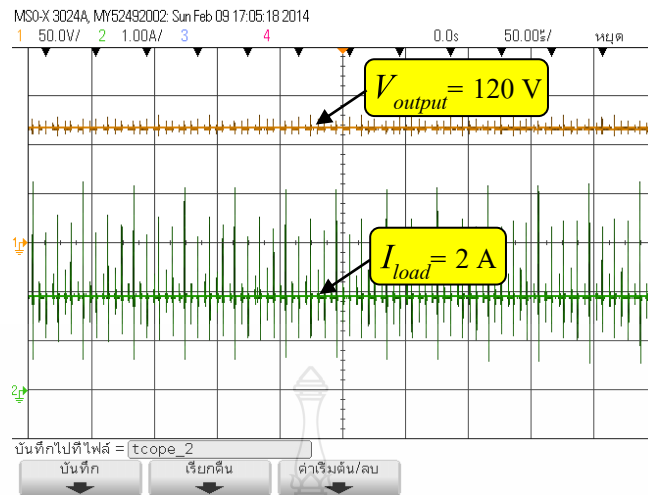


รูปที่ 4.5 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้ง 4 เฟส ที่กระแสโหลด 4 A

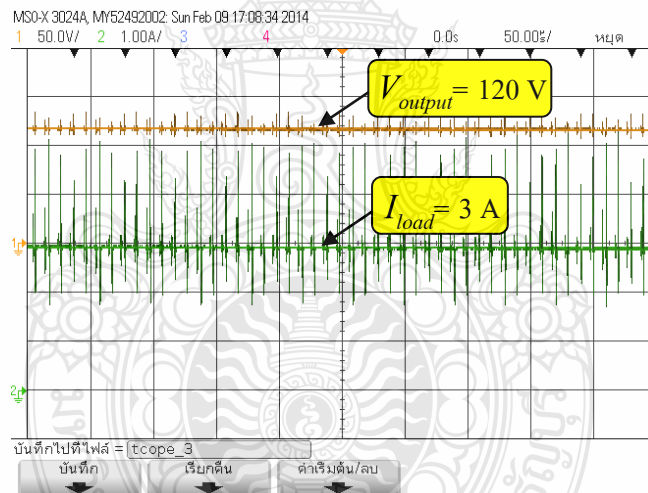
จากรูปที่ 4.6 จนถึงรูปที่ 4.9 เป็นการวัดค่ากระแสและแรงดันด้านออกของวงจร โดยทำการทดสอบวงจรสถานะคงที่ ที่กระแสโหลดของวงจร 1 A , 2 A , 3 A และ 4 A ตามลำดับ โดยจะสังเกตเห็นว่าแรงดันด้านออกจะมีระดับคงที่ที่ 120 V ซึ่งเป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้ จากผลการทดสอบที่สถานะคงตัวพบว่าวงจรทบระดับอัตราขยายแรงดันสูงที่สร้างขึ้นสามารถจ่ายแรงดันด้านออกได้ตามที่ออกแบบไว้คือ 120 V ที่ค่ากระแสโหลดต่างกันก็คือที่กระแส 1 A , 2 A , 3 A , และ 4 A ตามลำดับ



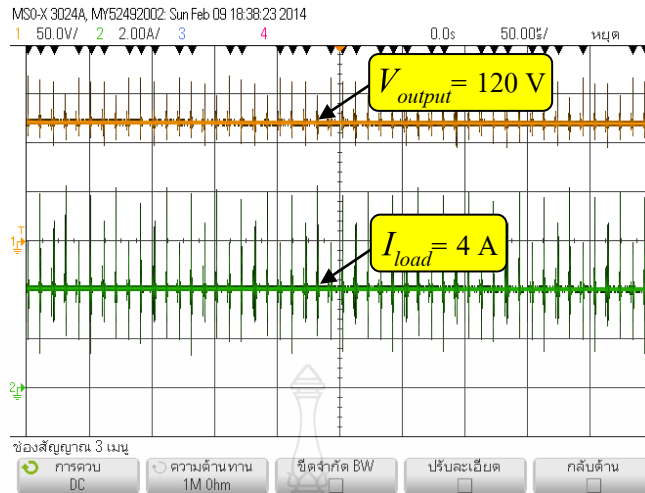
รูปที่ 4.6 แรงดันด้านออก 120 V ที่กระแสโหลด 1 A



รูปที่ 4.7 แรงดันด้านออก 120 V ที่กระแสโหลด 2 A

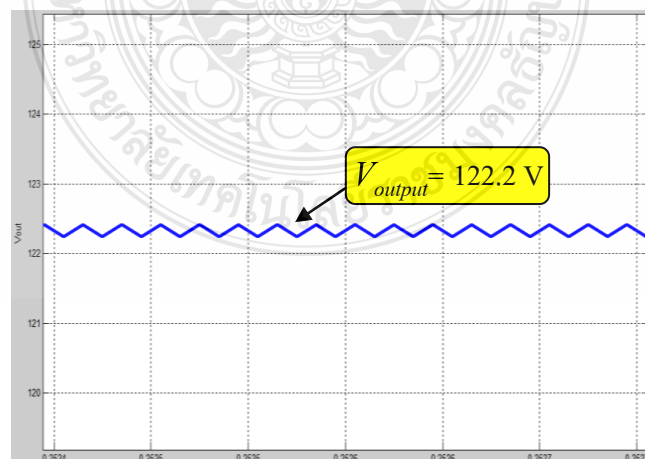


รูปที่ 4.8 แรงดันด้านออก 120 V ที่กระแสโหลด 3 A

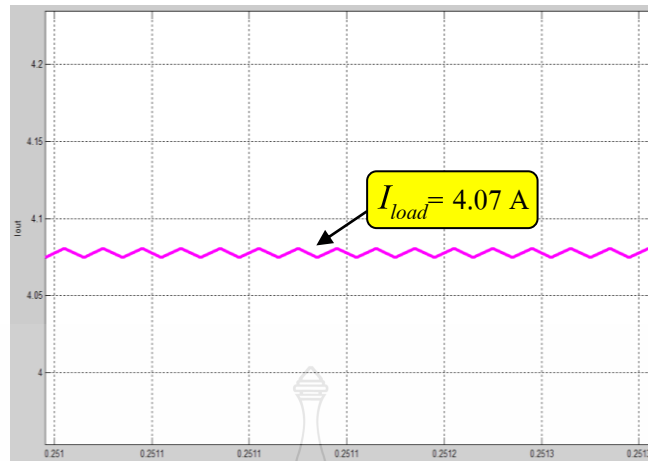


รูปที่ 4.9 แรงดันด้านออก 120 V ที่กระแสโหลด 4 A

จากรูปที่ 4.9 เป็นการวัดค่ากระแสและแรงดันทางด้านออกของวงจรขณะทำการทดสอบที่กระแสโหลดสูงสุดคือ 4 A โดยวงจรที่สร้างขึ้นสามารถจ่ายแรงดันทางด้านออกได้ 120 V คงที่ ซึ่งสามารถเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ดังแสดงในบทที่ 3 โดยค่าแรงดันด้านออกของวงจรที่ได้จากการทดสอบสามารถเปรียบเทียบกับค่าแรงดันด้านออกที่ได้จากการจำลองดังแสดงในรูปที่ 4.10 [รูปที่ 3.25 ในบทที่ 3] และค่ากระแสโหลดสูงสุดของวงจรที่ได้จากการทดสอบซึ่งสามารถเปรียบเทียบกับค่ากระแสโหลดสูงสุดที่ได้จากการจำลองดังแสดงในรูปที่ 4.11 [รูปที่ 3.26 ในบทที่ 3] โดยผลที่ได้จากการทดสอบวงจรที่สร้างขึ้นเป็นไปตามแนวทางที่ได้ออกแบบไว้ทุกประการ

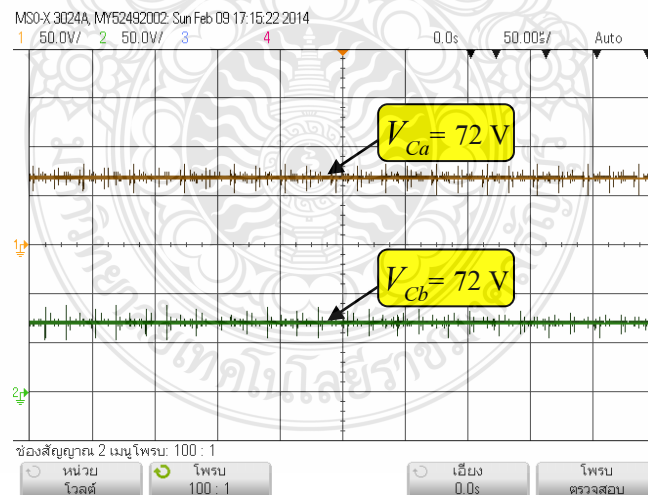


รูปที่ 4.10 แรงดันด้านออกขณะกระแสโหลดสูงสุดที่ได้จากการจำลอง [รูปที่ 3.25]

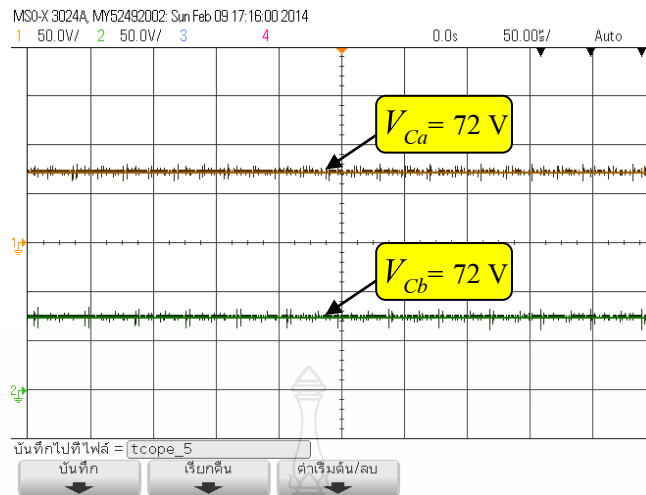


รูปที่ 4.11 กระแสโหลดสูงสุดของวงจรที่ได้จากการจำลอง [รูปที่ 3.26]

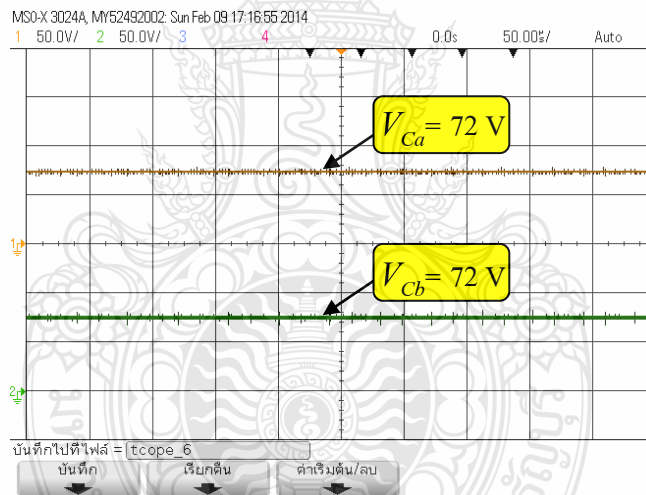
จากรูปที่ 4.12 จนถึงรูปที่ 4.15 เป็นการวัดค่าแรงดันที่ตัวเก็บประจุ C_a และ C_b โดยทำการทดสอบวงจรที่สภาวะคงที่ ที่ค่ากระแสโหลด 1 A, 2 A, 3 A และ 4 A ตามลำดับ โดยจะสังเกตเห็นว่าแรงดันที่ตัวเก็บประจุทั้ง 2 จะมีค่าเท่ากัน โดยวัดค่าได้ประมาณ 72 V ซึ่งเป็นไปตามหลักการที่ได้ออกแบบไว้



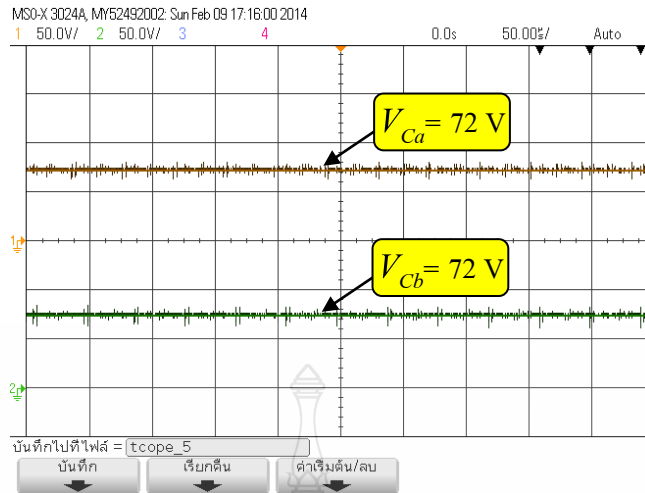
รูปที่ 4.12 แรงดันที่ตัวเก็บประจุ C_a และ C_b ที่กระแสโหลด 1 A



รูปที่ 4.13 แรงดันที่ตัวเก็บประจุ C_a และ C_b ที่กระแสโหลด 2 A

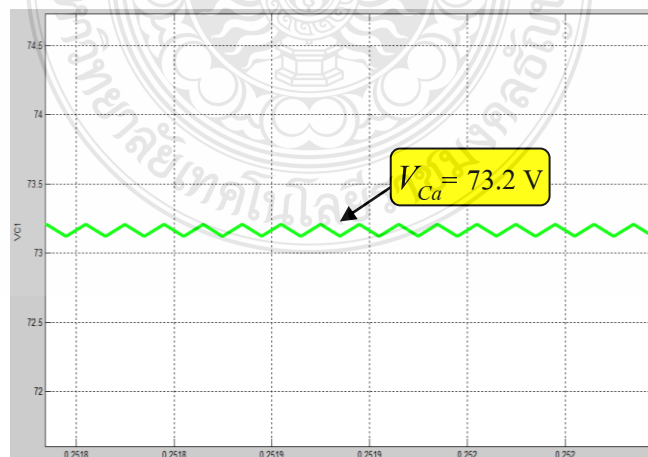


รูปที่ 4.14 แรงดันที่ตัวเก็บประจุ C_a และ C_b ที่กระแสโหลด 3 A

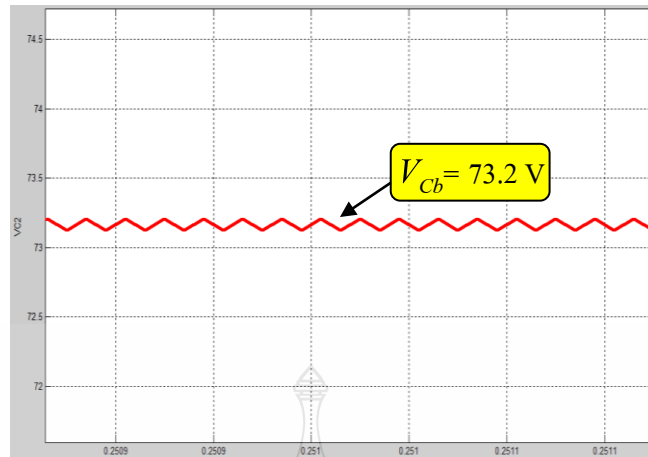


รูปที่ 4.15 แรงดันที่ตัวเก็บประจุ C_a และ C_b ที่กระแสโหลด 4 A

จากรูปที่ 4.15 เป็นการวัดค่าแรงดันของตัวเก็บประจุทั้ง 2 คือ C_a และ C_b ขณะทดสอบ วงจรที่กระแสโหลดสูงสุดคือ 4 A โดยแรงดันของตัวเก็บประจุ C_a และ C_b วัดค่าได้ 72 V ซึ่งสามารถเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ดังที่ได้แสดงในบทที่ 3 โดยค่าแรงดันของตัวเก็บประจุ C_a ที่ได้จากการทดสอบสามารถเปรียบเทียบกับค่าแรงดันของตัวเก็บประจุ C_a ที่ได้จากการจำลองดังแสดงในรูปที่ 4.16 [รูปที่ 3.23 ในบทที่ 3] และค่าแรงดันของตัวเก็บประจุ C_b ที่ได้จากการทดสอบสามารถเปรียบเทียบกับค่าแรงดันของตัวเก็บประจุ C_b ที่ได้จากการจำลองดังแสดงในรูปที่ 4.17 [รูปที่ 3.24 ในบทที่ 3] โดยผลที่ได้จากการทดสอบวงจรเป็นไปตามแนวทางที่ได้ออกแบบไว้



รูปที่ 4.16 แรงดันของตัวเก็บประจุ C_a ขณะกระแสโหลด 4 A ที่ได้จากการจำลอง [รูปที่ 3.23]



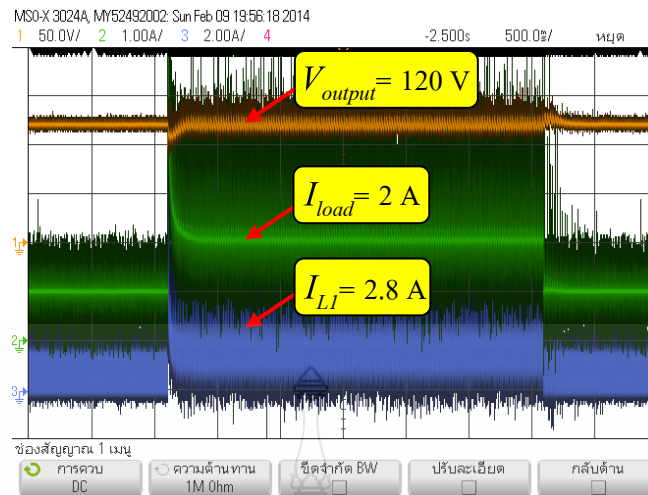
รูปที่ 4.17 แรงดันของตัวเก็บประจุ C_b ขณะกระแสโหลด 4 A ที่ได้จากการจำลอง [รูปที่ 3.24]

4.3 การทดสอบที่สภาวะชั่วขณะ (Transient State)

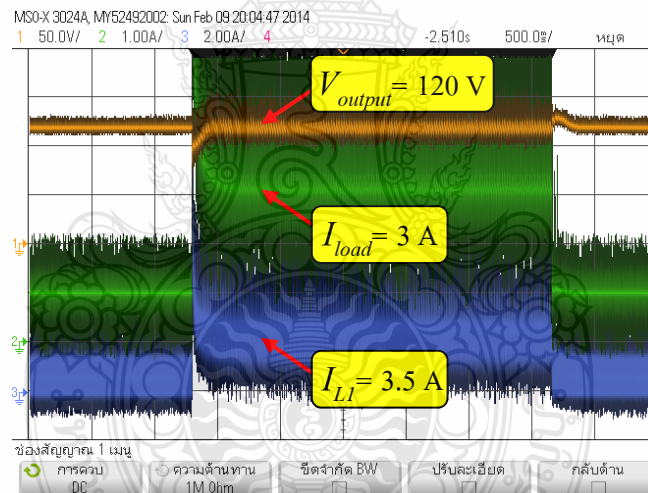
การทดสอบนี้เป็นการทดสอบขณะที่วงจรทำงานตามปกติแล้วมีการเปลี่ยนแปลงภาระทางไฟฟ้า (Load) อย่างทันทีทันใด เพื่อทดสอบวงจรว่ายังสามารถทำงานได้แม้จะมีสัญญาณรบกวนเข้ามาก็ตามเนื่องจากจะต้องมีการเพิ่มค่ากำลังไฟฟ้าด้านออกที่มีลักษณะเป็นขั้นบันได ทำให้กระแสด้านออกของวงจรไม่คงที่ ซึ่งโดยระบบทั่วไปจะไม่สามารถตอบสนองการทำงานในสภาวะนี้ได้ทัน

4.3.1 การทดสอบที่สภาวะชั่วขณะกรณีระบบมีการชดเชย

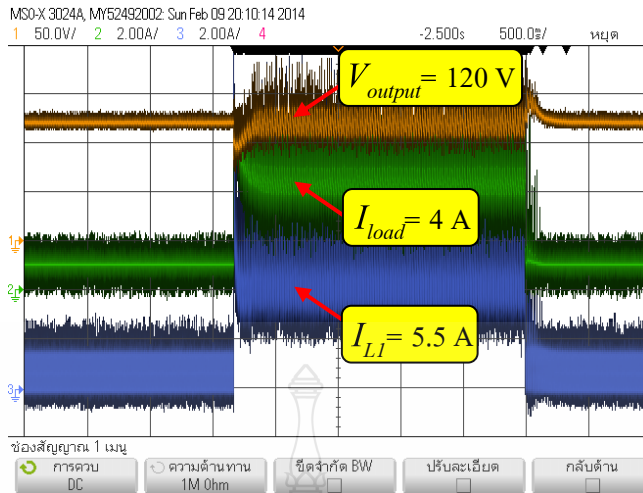
สำหรับการทดสอบนี้เป็นการหลีกเลี่ยงปัญหาที่จะเกิดขึ้น เพื่อศึกษาลักษณะการตอบสนองของระบบที่มีผลจากการเปลี่ยนแปลงภาระทางไฟฟ้า จึงได้มีการป้อนกลับแรงดันควบคุมแบบพีไอ โดยตัวประมวลผลดีสเปซ (dSPACE-DS1104) จะทำหน้าที่ควบคุมค่าวัฏจักรงานให้กับวงจรระดับแรงดันทำงานที่กระแสด้านออกจาก 1 A ไปที่ 2 A, 1 A ไปที่ 3 A และ 1A ไปที่ 4 A แบบทันทีทันใด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้แรงดันทางด้านออก (Output Voltage) มีค่า 120 V คงที่ โดยจะเท่ากันทุกการทดสอบ ซึ่งจะแสดงดังรูปที่ 4.18 ถึงรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.18 กระแสโหลดเปลี่ยนจาก 1 A ไปที่ 2 A กรณีระบบมีการชดเชย



รูปที่ 4.19 กระแสโหลดเปลี่ยนจาก 1 A ไปที่ 3 A กรณีระบบมีการชดเชย



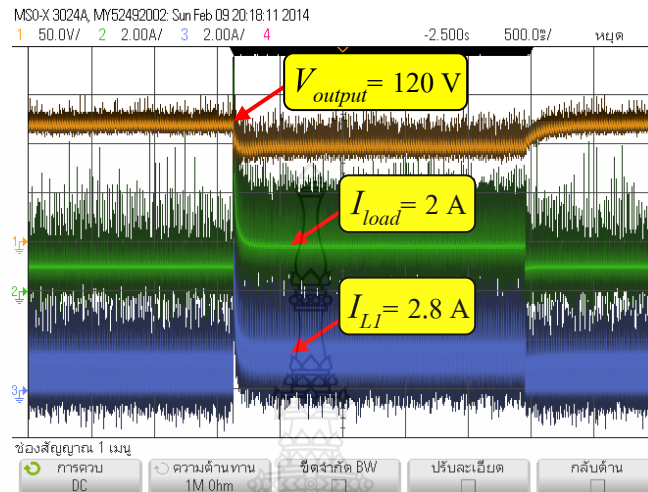
รูปที่ 4.20 กระแสโหลดเปลี่ยนจาก 1 A ไปที่ 4 A กรณีระบบมีการชดเชย

จากผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.18 จนถึงรูปที่ 4.20 โดยได้ทำการเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าทางด้านออกของวงจรพบว่าแรงดันด้านออกจะยังคงที่ ที่ 120 V และกระแสทางด้านออก (Output - Current) มีขนาดของการกระเพื่อม (Ripple) ยังคงที่ ถึงแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงภาระทางไฟฟ้าจาก 1 A ไปที่ 2 A หรือที่กระแส 25 % ไปที่ 50% หรือที่ 1 A ไปที่ 3 A หรือที่กระแส 25% ไปที่ 75% และจาก 1 A ไปที่ 4 A หรือที่กระแส 25 % ไปที่ 100% โดยมีช่วงเวลาที่เปลี่ยนแปลงเข้าสู่สภาวะคงตัว (Settling Time) ซึ่งจากการทดสอบนี้ระบบสามารถทำงานได้แม้ภาระทางไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงไปก็ตาม เมื่อพิจารณาที่รูปที่ 4.18 ถึงรูปที่ 4.20 แสดงให้เห็นถึงขอบขาขึ้นและขอบขาลงของสัญญาณทางด้านออก ระบบจะคงยังรักษาเสถียรภาพคือ ควบคุมระดับแรงดันด้านออกให้คงที่ตลอดที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลง

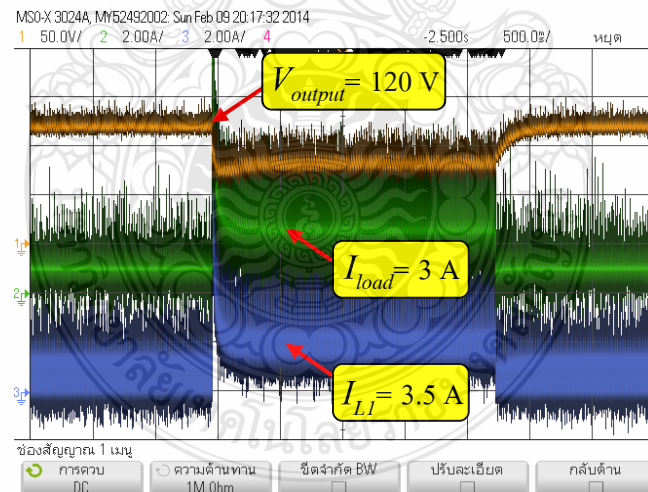
4.3.2 การทดสอบที่สภาวะชั่วขณะกรณีระบบไม่มีการชดเชย

จากผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.21 ถึงรูปที่ 4.23 โดยทำการเปลี่ยนภาระทางไฟฟ้า (Load) ของวงจรพบว่าวงจรที่ระดับแรงดัน ไม่สามารถรักษาระดับแรงดันด้านออกให้คงที่ ที่ 120 V ไปได้ ถึงแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงภาระทางไฟฟ้าจาก 1 A ไปที่ 2 A หรือที่กระแสโหลด 25% ไปที่ 50% เพิ่มจาก 1 A ไปที่ 3 A หรือที่กระแสโหลด 25% ไปที่ 75% และเพิ่มจาก 1 A ไปที่ 4 A หรือที่กระแสโหลด 25% ไปที่ 100% โดยมีช่วงเวลาที่เปลี่ยนแปลงเข้าสู่สภาวะคงตัว (Settling Time) จากการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่าระบบไม่สามารถรักษาระดับแรงดันด้านออกไว้ได้ในกรณีที่ภาระทางไฟฟ้า (Load) มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อพิจารณาที่รูปที่ 4.21 ถึงรูปที่ 4.23 แสดงให้เห็นถึงขอบ

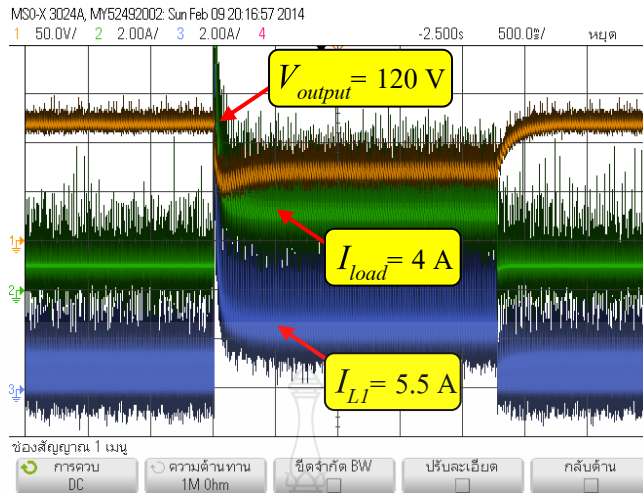
ขาขึ้นและขอบข้างของสัญญาณทางด้านออก ซึ่งระบบไม่สามารถรักษาเสถียรภาพคือ ไม่สามารถควบคุมระดับแรงดันด้านออกให้คงที่ตลอดการเปลี่ยนแปลงโหลดได้



รูปที่ 4.21 กระแสโหลดเปลี่ยนจาก 1 A ไปที่ 2 A กรณีระบบไม่มีการชดเชย



รูปที่ 4.22 กระแสโหลดเปลี่ยนจาก 1 A ไปที่ 3 A กรณีระบบไม่มีการชดเชย



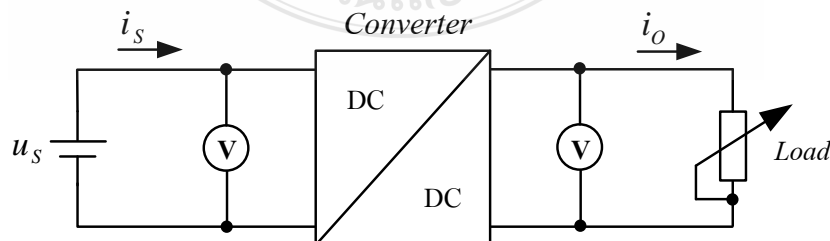
รูปที่ 4.23 กระแสโหลดเปลี่ยนจาก 1 A ไปที่ 4 A กรณีระบบไม่มีการชดเชย

4.4 ประสิทธิภาพของวงจร

ในการออกแบบวงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูง จำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงปัจจัยที่สำคัญคือประสิทธิภาพของวงจร เนื่องจากเป็นตัวบอกระดับคุณภาพของวงจรทระดับแรงดันที่สร้างขึ้นว่ามีคุณภาพมากน้อยเพียงใด ดังนั้นในการทดสอบนี้จะเป็นการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันโดยใช้วิธีการวัดกำลังไฟฟ้าทางด้านเข้าและกำลังไฟฟ้าทางด้านออกเพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพ (η) ดังแสดงในสมการที่ 4.1

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (4.1)$$

$$P = I \times U \quad (4.2)$$



รูปที่ 4.24 ตำแหน่งวัดกระแส แรงดัน สำหรับคำนวณหาประสิทธิภาพ

จากรูปที่ 4.24 แสดงจุดวัดกระแสและแรงดัน สำหรับหาประสิทธิภาพของวงจรระดับอัตรายายแรงดันสูงแบบขนานเหลื่อมเฟส โดยจะทำการปรับโพลดให้มีการเปลี่ยนแปลงเพื่อทำให้แรงดันทางด้านออกคงที่ 120 V แต่กระแสโพลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบขึ้นบันได ซึ่งผลการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของวงจรระดับอัตรายายแรงดันสูง ทำได้โดยการวัดกระแสทางด้านเข้าและทางด้านออก กับวัดแรงดันทางด้านเข้าและแรงดันทางด้านออก แล้วแทนค่าลงในสมการโดยพบว่าประสิทธิภาพสูงสุดของวงจรระดับอัตรายายแรงดันสูงแบบขนานเหลื่อมเฟสที่สร้างขึ้นมีค่าสูงสุดประมาณ 90% โดยวงจรระดับอัตรายายแรงดันสูงแบบขนานเหลื่อมเฟสที่สร้างขึ้นสามารถรักษาระดับแรงดันทางด้านออก 120 V ได้คงที่

4.5 สรุป

จากผลการทดสอบการทำงานของวงจรระดับอัตรายายแรงดันสูงแบบขนานเหลื่อมเฟสพบว่าวงจรสามารถเพิ่มอัตรายายของแรงดัน จากแรงดันทางด้านเข้า 24 V ให้ได้แรงดันด้านออก 120 V ที่กำลังไฟฟ้านอกสูงสุด 500 W ของการทดสอบแบบสภาวะคงตัว และเมื่อทำการทดสอบวงจรแบบสภาวะชั่วขณะ โดยมีการเปลี่ยนแปลงภาระไฟฟ้า (Load) ด้านออกจาก 25% ไปที่ 50% , เพิ่มจากจาก 25 % ไปที่ 75% และเพิ่มจาก 25% ไปที่ 100% ซึ่งวงจรระดับอัตรายายแรงดันสูงแบบขนานเหลื่อมเฟสให้การตอบสนองต่อสภาวะชั่วขณะที่รวดเร็ว ซึ่งจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าระบบที่นำเสนอสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งในสภาวะคงตัวและสภาวะชั่วขณะ ซึ่งระบบสามารถควบคุมค่าระดับแรงดันทางด้านออกไว้ที่ 120 V คงที่ การออกแบบและควบคุมระบบที่ได้นำเสนอสามารถทำได้ง่าย ให้ผลตอบสนองทางพลวัตได้ดีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระทางไฟฟ้าอย่างทันทีทันใด

บทที่ 5

สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษา วิเคราะห์ และออกแบบสร้างวงจรระดับอัตราขยายแรงดันสูงโดยใช้เทคนิคการเหลื่อมเฟสกระแสทางด้านเข้า เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาและประยุกต์วงจรระดับแรงดันที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานร่วมกับระบบผลิตกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อให้แรงดันไฟฟ้าที่ได้ทางด้านออกอยู่ในระดับที่เหมาะสมกับการใช้งานหรือสามารถประยุกต์ใช้กับงานอื่นๆ ได้ ซึ่งใช้การป้อนกลับแรงดันเพื่อควบคุมค่าระดับแรงดันไฟฟ้าด้านออก (Bus Voltage) แบบพีไอคอนโทรล ทำงานในโหมดกระแสไหลต่อเนื่อง โดยประยุกต์ใช้วิธีการขนานวงจรระดับแรงดันด้วยหลักการเหลื่อมเฟส (Interleaved Technique) เพื่อลดการกระเพื่อมของกระแสทางด้านเข้า กระแสทางด้านออก (Bus Current) และแรงดันทางด้านออก ระบบต้นแบบถูกออกแบบให้ทำงานที่พิกัดแรงดันทางด้านเข้า 24 V แรงดันทางด้านออก 120 V คงที่ และมีพิกัดกำลังไฟฟ้าด้านออกสูงสุด 500 W

5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้เริ่มจากการศึกษาทฤษฎีและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบวงจรระดับอัตราขยายแรงดันสูงโดยศึกษาการทำงานของวงจรระดับแรงดัน (Boost Converter) ที่ทำงานในโหมดกระแสขดลวดเหนี่ยวนำต่อเนื่อง (CCM) และวิเคราะห์การทำงานของวงจรเพื่อหาสมการทางคณิตศาสตร์ จากสมการทางคณิตศาสตร์ที่วิเคราะห์ได้จึงออกแบบสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ก่อนและจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมแมทแลบ/ซิมูลิงค์ ทั้งการทำงานแบบวงจรเดี่ยวและแบบขนานกัน 4 โมดูล โดยมีการกำหนดค่าความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำเพื่อให้มีความใกล้เคียงกับงานจริงที่มีการสูญเสียภายในขดลวด ผลการจำลองการทำงานพบว่าวงจรระดับอัตราขยายแรงดันสูงสามารถทำงานได้ดีและมีผลการจำลองเป็นไปตามขอบเขตที่ต้องการ ดังนั้นจึงได้ทำการออกแบบสร้างวงจรระดับอัตราขยายแรงดันสูงจริงขึ้น ตามขอบเขตที่กำหนดไว้คือ แรงดันด้านเข้า 24 V แรงดันด้านออก 120 V คงที่ พิกัดกำลังไฟฟ้าด้านออกสูงสุด 500 W ซึ่งจากผลการทดสอบการทำงานพบว่า วงจรระดับอัตราขยายแรงดันสูงที่สร้างขึ้นสามารถตอบสนองการทำงานทั้ง 2 สถานะ คือสถานะคงตัว (Steady State) โดยทำการทดสอบวงจรที่ค่าพิกัดกำลังไฟฟ้า 125 W, 250 W, 375 W และ 500 W ตามลำดับ โดยวงจรสามารถจ่ายแรงดันด้านออก (Bus Voltage)

ที่ค่า 120 V ได้ตามเป้าหมายและทำการทดสอบที่สภาวะชั่วขณะ (Transient State) ซึ่งการทดสอบนี้เป็นการทดสอบขณะที่วงจรทำงานตามปกติแล้วมีการเปลี่ยนแปลงภาระทางไฟฟ้า (Load) อย่างทันทีทันใด เพื่อทดสอบวงจรว่ายังสามารถทำงานได้แม้จะมีสัญญาณรบกวนเข้ามาก็ตาม เนื่องจากจะต้องมีการเพิ่มค่ากำลังไฟฟ้านอกที่มีลักษณะเป็นขั้นบันได ทำให้กระแสทางด้านออกของวงจรไม่คงที่ ซึ่งระบบทั่วไปจะไม่สามารถตอบสนองการทำงานในสภาวะนี้ได้ทัน เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงปัญหาที่จะเกิดขึ้น จึงได้มีการป้อนกลับแรงดันด้านออกควบคุมแบบพีไอ โดยตัวประมวลผลดีสเปซ (dSPACE-DS1104) ซึ่งจะทำหน้าที่ควบคุมค่าวัฏจักรงานให้กับวงจรทระดับแรงดันทำงานที่พิกัดกำลังไฟฟ้านอกมีการเปลี่ยนแปลงคือ 125 W ไปที่ 250 W, 125 W ไปที่ 375 W และ 125 W ไปที่ 500 W แบบทันทีทันใด ซึ่งจากผลการทดสอบวงจรสามารถควบคุมแรงดันทางด้านออกมีค่า 120 V คงที่และมีการตอบสนองอย่างรวดเร็วถึงแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใดก็ตาม โดยวงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูงที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 90 % ที่แรงดัน 120 V พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุด 500 W

5.2 ข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นแนวทางเบื้องต้นในการศึกษา ออกแบบ และสร้างวงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูง ดังนั้นในการดำเนินการวิจัยขั้นต่อไปเพื่อพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงสุด ควรมีลักษณะดังนี้

5.2.1 ควรออกแบบวงจรควบคุมให้มีการสวิตช์แบบซอร์ฟสวิตช์ (Soft Switch) เพื่อลดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าที่เกิดจากการสวิตช์

5.2.2 วงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูงที่สร้างขึ้นสามารถเพิ่มพิกัดกำลังไฟฟ้าให้สูงขึ้นกว่าเดิมได้อีก โดยใช้วิธีการขนานวงจรเพิ่มเข้าไปทั้งฝั่งด้านไฟบวกและฝั่งด้านไฟลบของวงจร เช่น เพิ่มขึ้นเป็นแบบ 6 เฟส หรือ แบบ 8 เฟส

5.2.3 ควรออกแบบอินเวอร์เตอร์มาต่อรวมเพื่อทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ได้ โดยสามารถนำไปใช้งานได้ทันที

5.2.4 เพื่อความสมบูรณ์ของวงจรควรมีการควบคุมลูปของกระแสอินพุตด้วยดีสเปซ และมีการนำแหล่งจ่ายไฟชนิดต่างๆมาต่อขนานเข้ากับระบบ

5.2.5 ควรปรับปรุงให้วงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูงที่สร้างขึ้นมีขนาดเล็กลง เพื่อให้มีอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้านอกต่อพื้นที่สูงขึ้น

รายการอ้างอิง

- [1] วีระเชษฐ ชันเงิน , วุฒิพล ชาราธิรเศรษฐ์. (2553). **อิเล็กทรอนิกส์กำลัง**. (พิมพ์ครั้งที่ 1)
กรุงเทพฯ : 2553
- [2] Wanchai Subsingha. (2008). **Power Electronics**. (Academic Book, Faculty of Engineering, RMUTT, Thailand, 2008.)
- [3] ณิชนน พูนน้อย , ปฏิพัทธ์ ทวนทอง , วิบูลย์ ชื่นแขก. (2552). **คอนเวอร์เตอร์อัตราขยายสูงสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงในงานผลิต กำลังไฟฟ้า**. (บทความงานประชุมวิชาการ EECON ครั้งที่ 32)
- [4] ประเสริฐ สารการ , วันชัย ทรัพย์สิงห์ , ปฏิพัทธ์ ทวนทอง. (2552). **บูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบ 4 เฟส สำหรับประยุกต์ใช้กับเซลล์เชื้อเพลิง**. (บทความงานประชุมวิชาการ EECON ครั้งที่ 32)
- [5] K. Kajangpan , B. Neammanee. (2009). **High Gain Double Interleave Technique with Maximum Peak Power Tracking for Wind Turbine Converter**. (Electrical Engineer/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, ECTI-CON 2009. 6th International Conference on Date of Conference: 6-9 May 2009.)
- [6] P. Thounthong, P. Sethakul, and B. Davat . (2009). **Modified 4-phase interleaved fuel cell converter for high-power high-voltage applications**. (Proceeding of the International Conference on Industrial Technology (ICIT'09), Monash University, Gippsland- Australia, 10-13 February 2009, pp. 440-445)
- [7] P. Thounthong, P. Sethakul, V. Chunkag, Stephane Rael, Bernard Davat. (2008). **Multiphase Interleaved Step-up Converter for Fuel Cell High Power Applications**. (EECON 31 D. Agelidis, V.G. Sewan Choi “Experimental verification of floating-output interleaved-input DC-DC high-gain, transformer-less converter topologies” Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008 IEEE)
- [8] S. Choi , V.G. Agelidis , J. Yang , D. Coutellier , P. Marabeas. (2009). **Analysis, design and experimental results of a floating output interleaved input boost derived DC-DC high gain transformer less converter**. (Published in IET Power Electronics.) IET Power Electron., 2011, Vol. 4, Iss. 1, pp. 168–180

รายการอ้างอิง (ต่อ)

- [9] W. Khadmun , W. Subsingha. (2012). **High Voltage Gain Interleaved DC Boost Converter Application for Photovoltaic Generation System.** (10th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium 2012 EMSES.)
- [10] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2553). **การประยุกต์ใช้เซลล์แสงอาทิตย์.** (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน) กระทรวงพลังงาน เลขที่ 17 ถนนพระรามที่ 1 เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330
- [11] พิทยา ปานนิล , ประภษา อุดคคิมาพันธุ์. (2550). **เทคนิคการสร้างสัญญาณ PWM แบบดิจิทัลด้วย FPGA.** (วิศวกรรมสาร มข. ปีที่ 34 ฉบับที่ 3 (333 - 341) พฤษภาคม - มิถุนายน 2550)
- [12] สุวัฒน์ คั่น. (2538). **เทคนิคการออกแบบสวิทช์ซิงเพาเวอร์ซัพพลาย.** (พิมพ์ครั้งที่ 2) กรุงเทพฯ : เอนเทลไทย, 2538
- [13] สมพงษ์ ศิลป์สมบุญ. **คู่มือการติดตั้งและใช้งานการ์ด dSPACE (DS1104).** บริษัท เวลด์วาย เทคคิง แอนด์ ดีเวลอปเม้นท์ จำกัด.
- [14] Kyu-Dong Kim , Jun-Gu Kim , Yong-Chae Jung , Chung-Yuen Won. (2011). **Improved Non-isolated High Voltage Gain Boost Converter Using Coupled Inductors.** (Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2011 International Conference on Date 20-23 Aug. 2011)
- [15] Yuang-Shung Lee , Wei-Ting Hong, Tzu-Han Chou. (2013). **Multiphase High Gain Boost Converter with Switched-Capacitor and Coupled-Inductor.** (Future Energy Electronics Conference (IFEEC), 2013 1st International Date 3-6 Nov. 2013)
- [16] Yuang-Shung Lee , Wei-Ting Hong, Tzu-Han Chou. (2012). **High Gain Boost Converter with Quasi-Resonant Switched Capacitor and Coupled Inductor.** (Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC), 2012 7th International Date 2-5 June 2012)
- [17] Girish Ganesan R. , Dr.M.Prabhakar. (2013) **Non-Isolated High Gain Boost Converter for Photovoltaic Applications.** (International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC) 2013 IEEE.)

รายการอ้างอิง (ต่อ)

- [18] S. Choi , V.G. Agelidis , J. Yang , D. Coutellier , P. Marabeas. (2009). **Analysis, design and experimental results of a floating output interleaved input boost derived DC-DC high gain transformer less converter.** (Published in IET Power Electronics.)
IET Power Electron., 2011, Vol. 4, Iss. 1, pp. 168–180
- [19] Ryan Weichel , Guanghui Wang , Jeffrey Mayer , Heath Hofmann. **Active Stabilization of DC-DC Converters with Input LC Filters Via Current-Mode Control and Input Voltage Feedback.** (Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 IEEE)
- [20] Sira Eaksuwan , Chanin Bunlaksananusorn. (2008). **Feedback Control Design of Zero-Voltage-Switched Quasi-Resonant DC-DC Converters.** (Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, 2008. ECTI-CON 2008. 5th International Conference on Date 14-17 May 2008.)
- [21] S. Vijayalakshmi , K. Muthukumar. (2012). **Design and simulation for Sliding-Mode Control in DC-DC Converter.** (Advances in Engineering, Science and Management (ICAESM), 2012 International Conference on Date 30-31 March 2012)
- [22] G. Henn; R. Silva; P. Praça; L. Barreto; D. Oliveira. (2010). **Interleaved Boost Converter with High Voltage Gain.** (Power Electronics, IEEE Transactions on Date of Publication: Nov. 2010)
- [23] E. Mahrous Ahmed, IEEE Member, M. Mostafa, IEEE student member, and O. Mohamed, IEEE Senior Member (2010). **Development of High Gain and Efficiency Photovoltaic System Using Multilevel Boost Converter Topology.** (Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2010 2nd IEEE International Symposium on Date of Conference: 16-18 June 2010.)
- [24] สุชาติ จันทรจักรมานิตย์. (2555). **ระบบควบคุม.** (สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการพิมพ์เพื่อจำหน่าย © โดยสุชาติ จันทรจักรมานิตย์ ไม่สงวนสิทธิ์สำหรับการพิมพ์เพื่อเป็นวิทยาทาน.)
สุชาติ จันทรจักรมานิตย์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี suchart@rmutl.ac.th

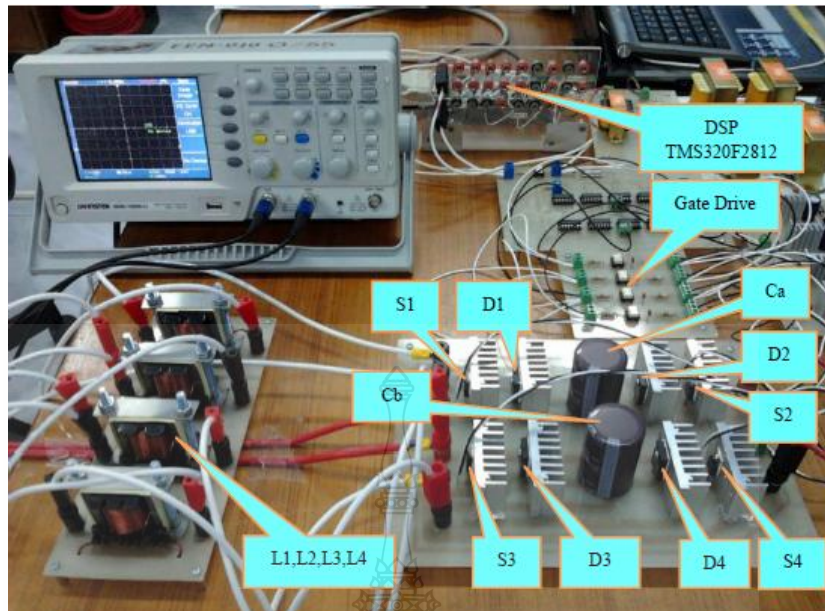


ภาคผนวก

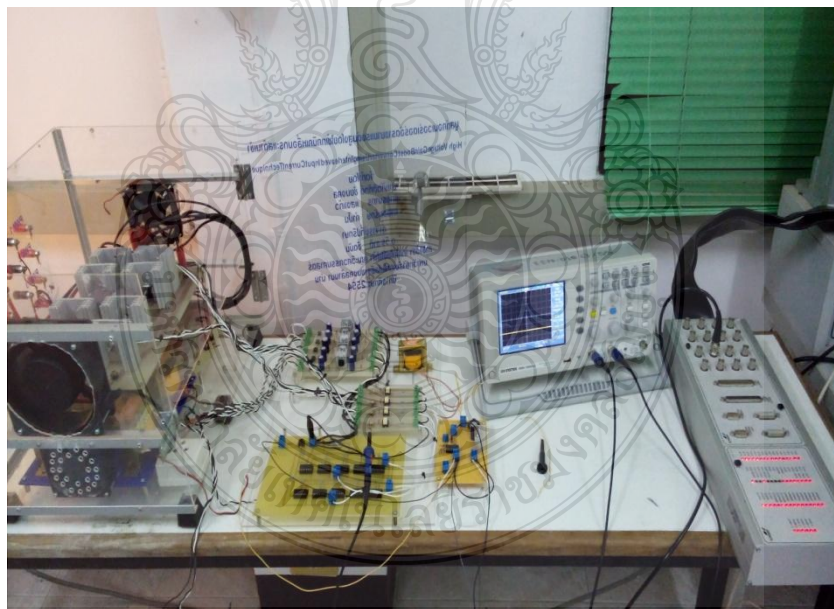
ภาคผนวก ก

วงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูงแบบขนานเหลื่อมเฟสเครื่องต้นแบบ



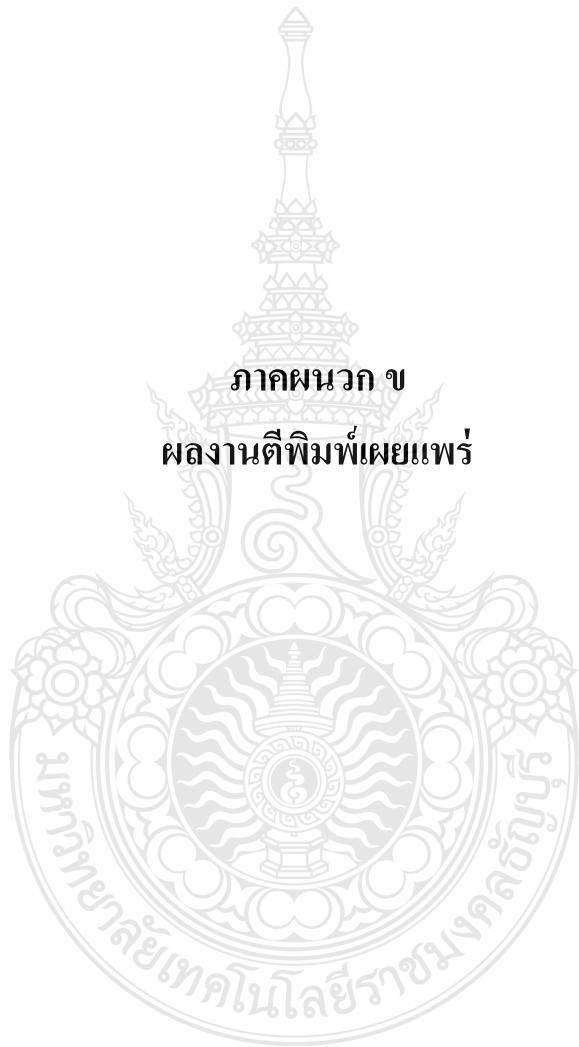


รูปที่ ก.1 วงจรทระดับอัตราขยายแรงดันสูงแบบขนานเหลื่อมเฟสเครื่องต้นแบบ



รูปที่ ก.2 ระบบที่ใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ภาคผนวก ข
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



10th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium

Energy Technology, Environmental and Social Impact, Nanotechnology and Material Technology, Energy Economic and Management, Nuclear Technology, New Technology and Other topics related to energy field.

On December 5-8, 2012
Sunee grand hotel,
Ubon-ratchathani

Organized by



Co-organized by



International Scientific Advisory Committee:

General Chair:		
	Assoc.Prof.Dr. Namyoot SONGTHANAPITAK	RMUTT, Thailand
General Co-Chair:		
	Prof. Dr. Kiyoshi YOSHIKAWA	Kyoto Uni., Japan
	Asst. Prof. Dr. Panpetch CHININTORN	RMUTT, Thailand
Organizing Chair:		
	Asst. Prof. Dr. Sommai PIVSA-ART	RMUTT, Thailand
	Prof. Dr. Takeshi YAO	Kyoto Uni., Japan
Organizing Co-Chair:		
	Prof. Dr. Hideaki OHGAKI	Kyoto Uni., Japan
International Scientific Committees:		
	Prof. Dr. Susumu YOSHIKAWA	Kyoto Uni., Japan
	Prof. Dr. Phadungsak RATTANADECHO	TU, Thailand
	Prof. Dr. Shiro SAKA	Kyoto Uni., Japan
	Prof. Dr. Hitomi OHARA	Kyoto Uni., Japan
	Prof. Dr.-Ing. Habil Ingo STADLER	FH Koeln, Germany
	Prof. Dr. Young S. CHAI	Korea
	Prof. Dr. Nipon TANGTHAM	KU, Thailand
	Prof. Dr. Masayoshi OKUBO	Osaka Uni, Japan
	Prof. Dr. Somchai WONGWISES	KMITL, Thailand
	Prof. Dr. Nadarajah MITHULANANTHAN	UQ, Australia
	Prof. Dr. Yukio OGATA	Kyoto Uni., Japan
	Prof. Dr. Yuichi ANADA	Hokkaido Info. Uni., Japan
	Prof. Dr. Narongrit SOMBATSOMPOP	KMUTT, Thailand
	Assoc. Prof. Dr. Bandit FUNGTAMMASAN	KMUTT, Thailand
	Assoc. Prof. Dr. K. Srinivas REDDY	IIT-Madras, India
	Assoc. Prof. Dr. David Jan COWAN	IUPUI, USA
	Assoc. Prof. Dr. Per B ZETTERLUND	Australia
	Assoc. Prof. Dr. Vijit KINNARES	KMITL, Thailand
	Assoc. Prof. Dr. Yoshikazu SUZUKI	Japan
	Assoc. Prof. Dr. Thawatch KERDCHEUN	RMUTI, Thailand
	Assoc. Prof. Dr. Wakin PIYARAT	SWU, Thailand
	Assoc. Prof. Dr. Seiichi KAWAHARA	Nakaoga Uni., Japan
	Assoc.Prof.Dr. Kawee SRIKULKIT	CU, Thailand
	Asst. Prof. Dr. Somchai HIRANVAROMDOM	RMUTT, Thailand
	Asst. Prof. Dr. Wanchai SUBSINGHA	RMUTT, Thailand
	Asst. Prof. Dr. Thanapong SUWANNASRI	KMUTNB, Thailand
	Asst. Prof. Dr. Napaporn PHUANGPORNPIITAK	KU, Thailand
	Asst. Prof. Dr. Boonrit PRASARTKAEW	RMUTT, Thailand
	Asst. Prof. Dr. Supakit SUTTIRUENGWONG	SU, Thailand
	Asst. Prof. Dr. Vallop PHUPA	RMUTP, Thailand
	Asst. Prof. Dr. Pramook UNAHALEKHAKA	RMUTSB, Thailand

Dr. Arthit Sode-Yome	EGAT, Thailand
Dr. Sei-ichi AIBA	Japan
Dr. Wirachai ROYNARIN	RMUTT, Thailand
Dr. Yuttana KAMSUWAN	RMUTT, Thailand
Dr. Jakkree SRINONCHAT	RMUTT, Thailand
Dr. Chatchai SOPPAPITAKSAKUL	RMUTT, Thailand
Dr. Pinit SRITHORN	RMUTI, Thailand
Dr. Uthen KAMNAN	RMUTL, Thailand
Dr. Cattariya SUWANNASRI	KMUTNB, Thailand
ASEAN Committee:	
Prof. Dr. Yoyok Wahyu Subroto	UGM, Indonesia
Prof. Dr. Wega TRISUNAYANTI	UGM, Indonesia
Prof. Dr. Tumiran	UGM, Indonesia
Prof. Dr. Jun LI	NYU, Singapore
Prof. Dr. INTHAN	ITB, Indonesia
Prof. Dr. Khamphone NANTHAVONG	NOL, Laos
Prof. Dr. Kampui SOUTHISOMBHAT	NOL, Laos
Prof. Dr. Yew Wei LEONG	NYU, Singapore
Prof. Dr. Nguyen Minh TAN	HU, Vietnam
General Secretary:	
Asst. Prof. Dr. Krischonme BHUMKITTIPICH	RMUTT, Thailand
Dr. Sumonman NIAMLANG	RMUTT, Thailand
Technical Program Chair:	
Asst. Prof. Dr. Krischonme BHUMKITTIPICH	RMUTT, Thailand
Area: Energy Technology (ET)	
Dr. Wirachai ROYNARIN	RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Boonrit PRASARTKAEW	RMUTT, Thailand
Dr. Sathapron THONGWIK	RMUTT, Thailand
Dr. Nathabhat PHANKONG	RMUTT, Thailand
Area: Environmental and Social Impact (ES)	
Dr. Nithiwat CHOOSAKUL	RMUTT, Thailand
Area: Nanotechnology and Materials Science (NM)	
Dr. Sorapong PAVASUPREE	RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Kitipong KIMAPONG	RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Sirichai TORSAKUL	RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Warunee ARIYAWIRIYANANT	RMUTT, Thailand
Area: Energy Economic and Management (EM)	
Assoc. Prof. Dr. Natha KUPTHASTHIEN	RMUTT, Thailand
Dr. Surin NGAEMNGAM	RMUTT, Thailand
Dr. Pimapat IEMSOMBOON	RMUTT, Thailand
Area: New Energy Technology (NT)	
Dr. Boonyang PLANGKLANG	RMUTT, Thailand
Area: Nuclear Technology (NU)	
Asst. Prof. Dr. Krischonme BHUMKITTIPICH	RMUTT, Thailand

10th EMSES 2012

Exhibition Chair:

Dr. Amnoiy REUNGWAREE RMUTT, Thailand
Dr. Winai CHANPENG RMUTT, Thailand

Local Arrangement Chair

Dr. Sorapong PAVASUPREE RMUTT, Thailand
Dr. Natee SRISAWAT RMUTT, Thailand

Registration and Finance Chair

Dr. Sumonman NIAMLANG RMUTT, Thailand
Dr. Supapom THOMSORN RMUTT, Thailand
Weeraporn PIVSA-ART RMUTT, Thailand

Publicity Chair

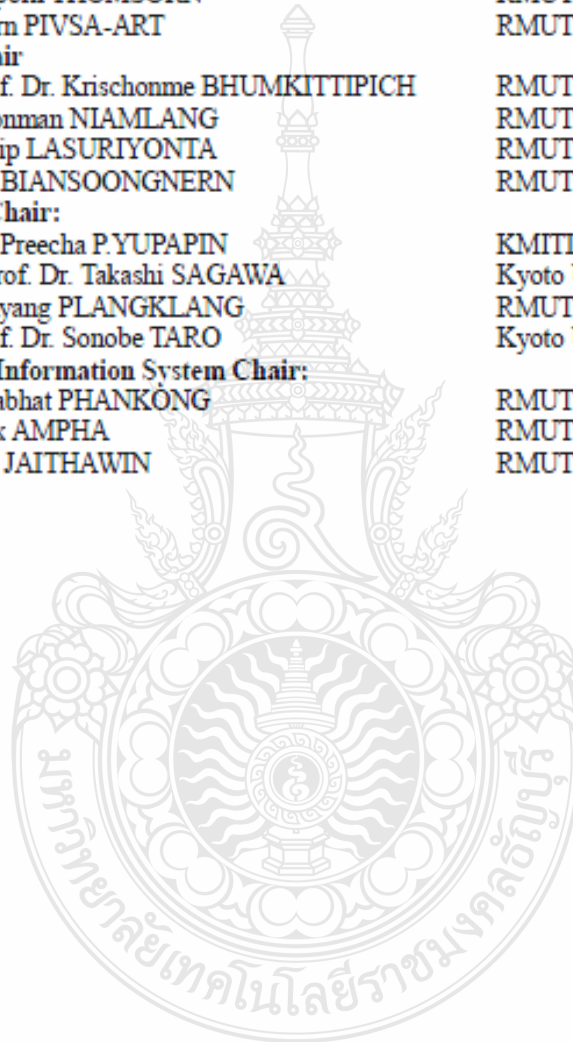
Asst. Prof. Dr. Krischonme BHUMKITTIPICH RMUTT, Thailand
Dr. Sumonman NIAMLANG RMUTT, Thailand
Dr. Montip LASURIYONTA RMUTT, Thailand
Somchai BIANSOONGNERN RMUTT, Thailand

Publication Chair:

Prof. Dr. Preecha P YUPAPIN KMITL, Thailand
Assoc. Prof. Dr. Takashi SAGAWA Kyoto Uni., Japan
Dr. Boonyang PLANGKLANG RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Sonobe TARO Kyoto Uni., Japan

Website and Information System Chair:

Dr. Nathabhat PHANKONG RMUTT, Thailand
Phongsuk AMPHA RMUTT, Thailand
Deachrat JAITHAWIN RMUTT, Thailand



CONTENT

ET43	Control of Parallel-Connected AC to DC Converters with Droop Technique for DC Microgrid Application <i>C. Tarasantisuk V. Chunkag and P. Thounthong</i>	61
ET45	Design of Matlab/Simulink Modeling of Fixed-Pitch Angle Wind Turbine Simulator <i>P. Jansuya and Y. Kumsuwan</i>	62
ET46	Closed Loop Speed Control of Induction Generator with Scalar-Control Inverters <i>A. Upasan and Y. Kumsuwan</i>	63
ET47	Study of Generator Reaction on Permanent Magnet Synchronous Motor for Energy Regenerative Applications <i>S. Kantawong, A. Noppakant and B. Plangklang</i>	64
ET48	Ethanol Production from Rice Straw by Simultaneous Saccharification and Co-Fermentation <i>N. Suriyachai, V. Champreda, N. Laosripojana, and P. Unrean</i>	65
ET49	High Voltage Gain Interleaved DC Boost Converter Application for Photovoltaic Generation System <i>W. Khadmun and W. Subsingha</i>	66
ET50	Influence of Bath Temperature on the Properties of In ₂ S ₃ Films Grown by Chemical Bath Deposition <i>G.R. Gopinath, R.W. Miles and K.T. Ramakrishna Reddy</i>	67
ET51	Unsteady Surface Pressures and Airload of a Pitching Airfoil <i>Supakit Worasinchai Grant Ingram and Robert Dominy</i>	68
ET52	Fast Pyrolysis of Jatropha Residue with Alumina Based Catalysts using Pyrolysis-Gas Chromatography/Mass Spectrometry <i>Prangtip Kaewpengkrow, Duangduen Atong and Viboon Sricharoenchaikul</i>	69
ET54	Selective Synthesis of Monoglycerides in a Capillary Microreactor <i>Matee Sirisin, Chawalit Ngamcharussrivichai, Sirilux Poompradub</i>	70

High Voltage Gain Interleaved DC Boost Converter Application for Photovoltaic Generation System

W. Khadmun and W. Subsingha

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Klong 6, Thanyaburi, Pathumthani 12110
E-mail: weerachat-2526@hotmail.com, wanchai.s@en.rmutt.ac.th

Abstract— This paper presents a novel high voltage gain interleaved DC boost converter. This converter is non-isolated boost converter, which can level up DC voltage from 24 Vdc input voltage to 130 Vdc output voltage. This is adequate suitable in order to develop and apply with any dc output renewable energy source, such as PV generation system and etc. The converter in this paper has power rating at 350W. The proposed converter has totally four modules of DC boost converter, which are connected in parallel. At the same purpose, these switching devices are controlled by 90 degree shifting to each other, due to an interleaving technique. This will leads to a smoother output dc current. Nevertheless, the High gain DC boost converter in this project was done by MATLAB / SIMULINK based Digital Signal Processing Board (here is TMS320F2812) implementation. The laboratory experiment shows that the converter works very well, and its result is in a good satisfaction.

Keywords— non-isolated boost converter, 4 phase Interleave technique, DSP implementation

1. INTRODUCTION

In general, Photo Voltaic cell (or Solar cell) can transform the energy form any light sources into an electrical dc power source. When the electromagnetic wave in light source impacts the semiconductor junction in the PV cells, energy will be transformed by causing a movement of electrons in PV's semiconductor junction. By connecting the external of the load side, the current will flows into an electrical circuit. However, there are some limitations on the PV's power rating. Due to the output voltage of such PV cell and PV panel is not high enough to provide to a customer in general, thus, the PV's output voltage has to be boosted up higher enough for providing any electrical appliances, it is depending on its applications[3].

- 42 V (PowerNet) a new standard voltage for automobile systems,
- 48 V; 120 V; or 400 V to 480 V for stand-alone or parallel grid connections,
- 270 V or 350 V for the standard on the all-electric aircraft,
- 350 V (transit bus systems) to 750V (tramway and locomotive systems).

Alternatively is converted into AC with using DC-AC converter (Inverter) for AC loads. Therefore, DC boost converter is needed to boost up a dc voltage. Normally, a traditional non-isolated DC boost converter has a significant disadvantage due to its low voltage. Thus, a high gain DC converter has to be proposed. However, such DC converter must have a good reliability in long time operation. In which, it also should be a small size in

order to ease of installation, maintenance, power lossless and toughness [1]-[9].

2. DC BOOST CONVERTER TOPOLOGIES

Typical boost converter

High voltage gain DC converter that proposed in this paper is considered from a traditional non-isolated DC boost converter as shown in Figure 1. However, the difference between DC Converter in Figure 1 and 2 is the location of diode, but its operations of both circuits are the same.

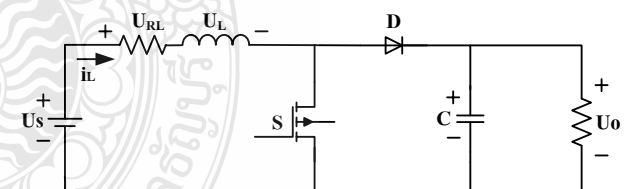


Fig.1 Boost converter with inductor and diode in positive side

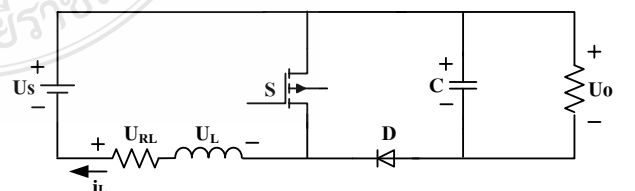


Fig. 2 Boost converter with inductor and diode in negative side

Interleaved boost converter

There are two configurations of interleaving DC boost converter circuit in this project as shown in Figure 3 and Figure 4, respectively. An advantage of the interleaved technique is to reduce the converter size (especially

inductor), reduce a ripple current and also increasing the converter's efficiency.

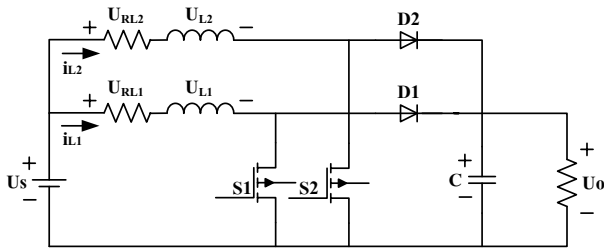


Fig. 3 Two phases interleaved Boost converter (inductor and diode in positive side)

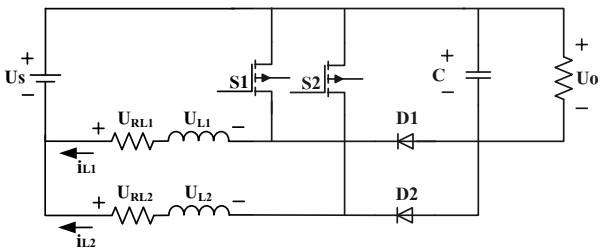


Fig. 4 Two phases interleaved Boost converter (inductor and diode in negative side)

However, the capacitor from two DC boost converters could be combined and uses only one capacitor as seen in both Figures above (Figure 3 and Figure 4).

3. HIGH VOLTAGE GAIN INTERLEAVED DC BOOST CONVERTER

High voltage gain DC boost converter that proposed in this paper is a combination of two 2 phase interleaved boost converter from Figure 3 and 4 together as shown in Figure 5.

Such circuit is called as 4 phase interleaved DC boost converter. The four switching devices (here is Power MOSFET IRF3415) are controlled in 90° phase delay to each others simultaneously (interleave technique method), in order to smooth output ripple current, raising power rating and efficiency as described above.

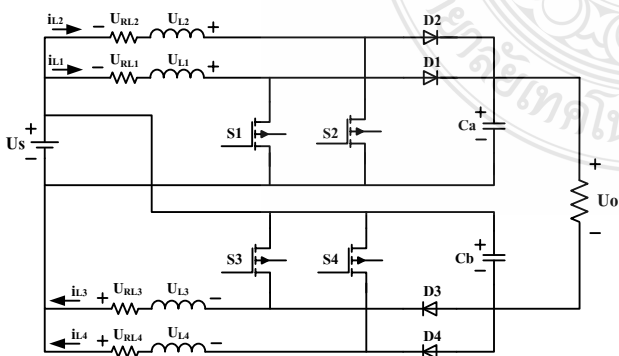


Fig. 5 High voltage gain Interleaved DC boost converter

Voltage gain of the circuit can be determined by applying KVL in two separated circuits as follows

$$-U_o + U_{Ca} + U_{Cb} - U_s = 0 \tag{1}$$

$$U_o = U_{Ca} + U_{Cb} - U_s \tag{2}$$

when U_s is DC input voltage

U_o is DC output voltage

U_{Ca} is Capacitor voltage across C_a

U_{Cb} is Capacitor voltage across C_b

Thus, voltage gain of the circuit is given in (3).

$$\frac{U_o}{U_s} = \frac{(1 + D)}{(1 - D)} \tag{3}$$

This means that the voltage can be raised over than a traditional non-isolated boost converter depend on the value of the duty cycle.

Inductance Design

Since the interleaving concept can reduces input current ripple also with inductance sizing, but the converters must be operated in continuous conduction mode (CCM). With a maximum current ripple (ΔI_L), it allowed to use for determining an appropriate value of And the current through the inducto inductance as follows [1]

$$L = \frac{D \cdot U_s}{4 \cdot \Delta I_L \cdot f_s} \tag{4}$$

Capacitance Design

The output voltage ripple of the circuit depends the size of capacitor. However, there are two capacitors that connected in series, which effect to output voltage ripple (ΔU_{bus}). The value of each capacitor depends on output current (I_{out}), duty cycle (D) and depends inversely with ΔU_{bus} , switching frequency (f_s) as follows [1].

$$C_{bus} = \frac{I_{out} \cdot D}{2 \cdot \Delta U_{bus} \cdot f_s} \tag{5}$$

Table 1. Component specification

Devices	Value
Inductances (L_1, L_2, L_3, L_4)	840 μ H , EE 42 core
Capacitances (C_a, C_b)	470 μ F 450V
Power switches (S_1, S_2, S_3, S_4)	IRF3415
Diodes (D_1, D_2, D_3, D_4)	RURG3020
Input voltage	24 Vdc
Output voltage	130 Vdc
Maximum power output	350 W
Switching frequency; f_s	25 kHz.

4. EXPERIMENTAL RESULTS

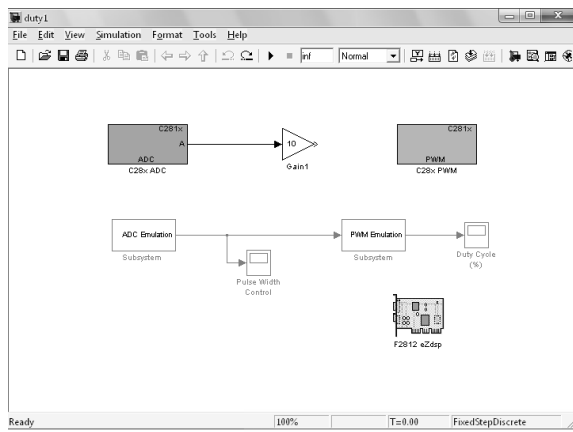


Fig. 6 TMS320F2812 control model

The proposed DC boost converter is built in a laboratory scale using TMS320F2812 DSP board. The DSP board is set for generating a suitable control signals for all four switching devices in the circuit. However, in order to controlling the essential data and some important control parameters, MATLAB/Simulink is used as a basis platform for managing the control model and such control data through TMS320F2812 DSP board.

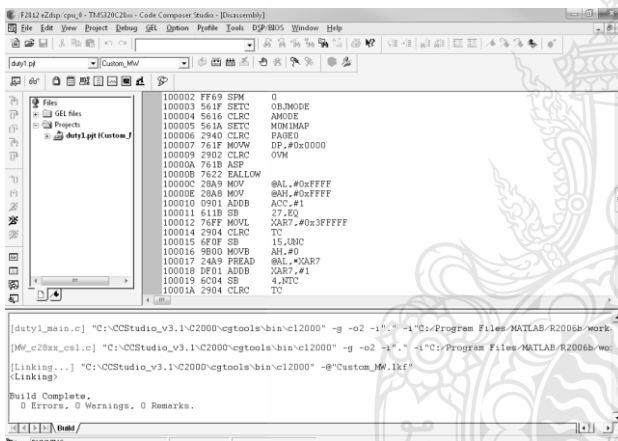


Fig. 7 TMS320F2812 command windows

The gate driving signals of switching devices generated from TMS320F2812 are shown in Figure 8. A phase angle of each gate driving signals is 0, 90, 180 and 270 degree.

The experimental results shown that the steady-state interleaved averaged inductor currents i_{L1} , i_{L2} , i_{L3} and i_{L4} were 3.4A, 3.8A, 3.4A and 3.2A respectively. The inductor current waveforms are shown in Figure 9.

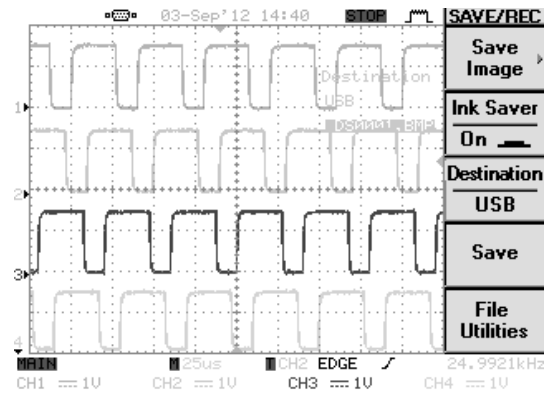


Fig.8 Gate driving signals generated from TMS320F2812.

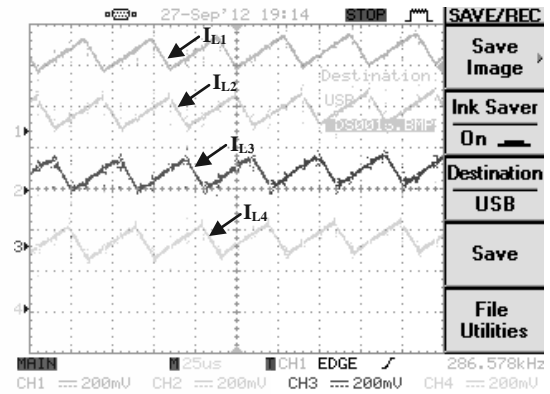


Fig.9 The steady-state inductor currents of proposed converter.

The maximum output power of proposed converter is 350W. This output power is calculated by multiply output voltage 130Vdc and output current 2.8A. The output voltage waveform and output current waveform are shown in Figure 10.

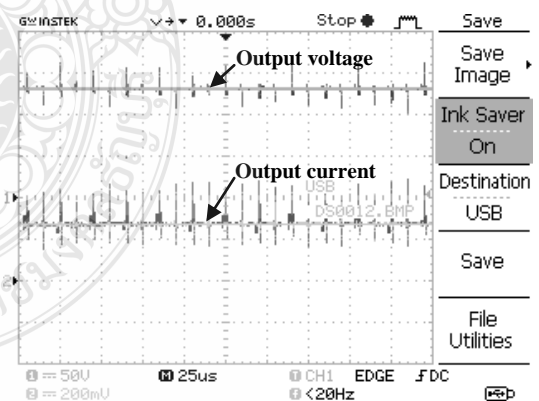


Fig. 10 Output voltage and current

The voltage of output capacitors U_{c_a} and U_{c_b} are the same as 78V. The capacitor voltage waveforms are shown in Figure 11.

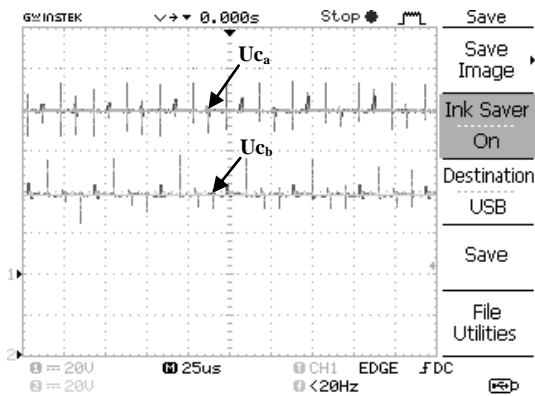


Fig.11 The voltage waveforms of output capacitors.

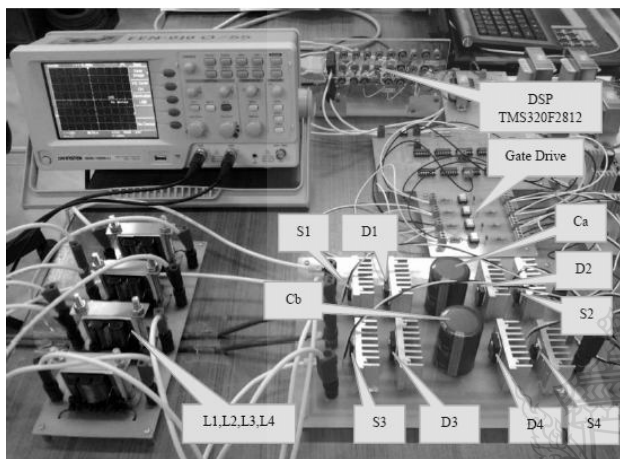


Fig.12 The proposed prototype converter system.

5. CONCLUSION

This paper present DC-Boost Converter for applying to the photovoltaic generation system by using interleaves technique. This converter is non-isolated boost converter, which can level up DC voltage from 24Vdc input voltage to 130Vdc output voltage at power rating of 350W. Four phase of each switching control signal are difference at 90 degree. However, inductor currents in each phase in the experimental results are not exactly the same because of the inductors' parasitic. High voltage gain interleaved DC boost converter in this paper could be applied to any renewable energy systems and some related applications.

Further research is to analyze in balancing the inductor currents and feedback control scheme in order to stabilize the converter output voltage.

REFERENCES

- [1] D. Agelidis, V.G. Sewan Choi "Experimental verification of floating-output interleaved-input DC-DC high-gain. transformer-less converter topologies" Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE
- [2] K. Kajangpan , B. Neammanee "High Gain Double Interleave Technique with Maximum Peak Power Tracking for Wind Turbine Converter" IEEE 2009.
- [3] P. Thounthong, P. Sethakul, and B. Davat "Modified 4-phase interleaved fuel cell converter for high-power

high-voltage applications," in Proceeding of the International Conference on Industrial Technology (ICIT'09), Monash University, Gippsland- Australia, 10-13 February 2009, pp. 440-445.

- [4] P. Thounthong. P. Sethakul. V. Chunkag. Stephane Rael. Bernard Davat, "Multiphase Interleaved Step-up Converter for Fuel Cell High Power Applications," EECON 31
- [5] B. Huang, J. P. Martin, S. Pierfederici, and B. Davat, "High voltage ratio non-isolated dc-dc Converter for fuel cell power source applications," in Proc. 39th IEEE-PESC, 15-19 June 2008
- [6] G. A. L. Henn; L. H. S. C. Barreto; D. S. Oliveira Jr.; E. A. S. da Silva " A Novel Bidirectional Interleaved Boost Converter with High Voltage Gain" 2008 IEEE
- [7] G. Henn; R. Silva; P. Praça; L. Barreto; D. Oliveira "Interleaved Boost Converter with High Voltage Gain" 2011 IEEE
- [8] E. Mahrous Ahmed, IEEE Member, M. Mostafa, IEEE student member, and O. Mohamed, IEEE Senior Member "Development of High Gain and Efficiency Photovoltaic System Using Multilevel Boost Converter Topology" 2010 IEEE
- [9] Wanchai Subsingha, "Power Electronics" Academic Book, Faculty of Engineering, RMUTT, Thailand, 2008.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	นายวีระชาติ ชัดมัน
วัน เดือน ปีเกิด	17 สิงหาคม 2526
ที่อยู่	31/1 รอบเมืองด้านเหนือ ตำบลในเวียง อำเภอเมืองน่าน จังหวัดน่าน 55000
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก ปีการศึกษา 2547
ประสบการณ์การทำงาน	พ.ศ. 2548 – ปัจจุบัน เป็นอาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา น่าน
เบอร์โทรศัพท์	084-6086782
อีเมล	Weerachat-2526@hotmail.com

