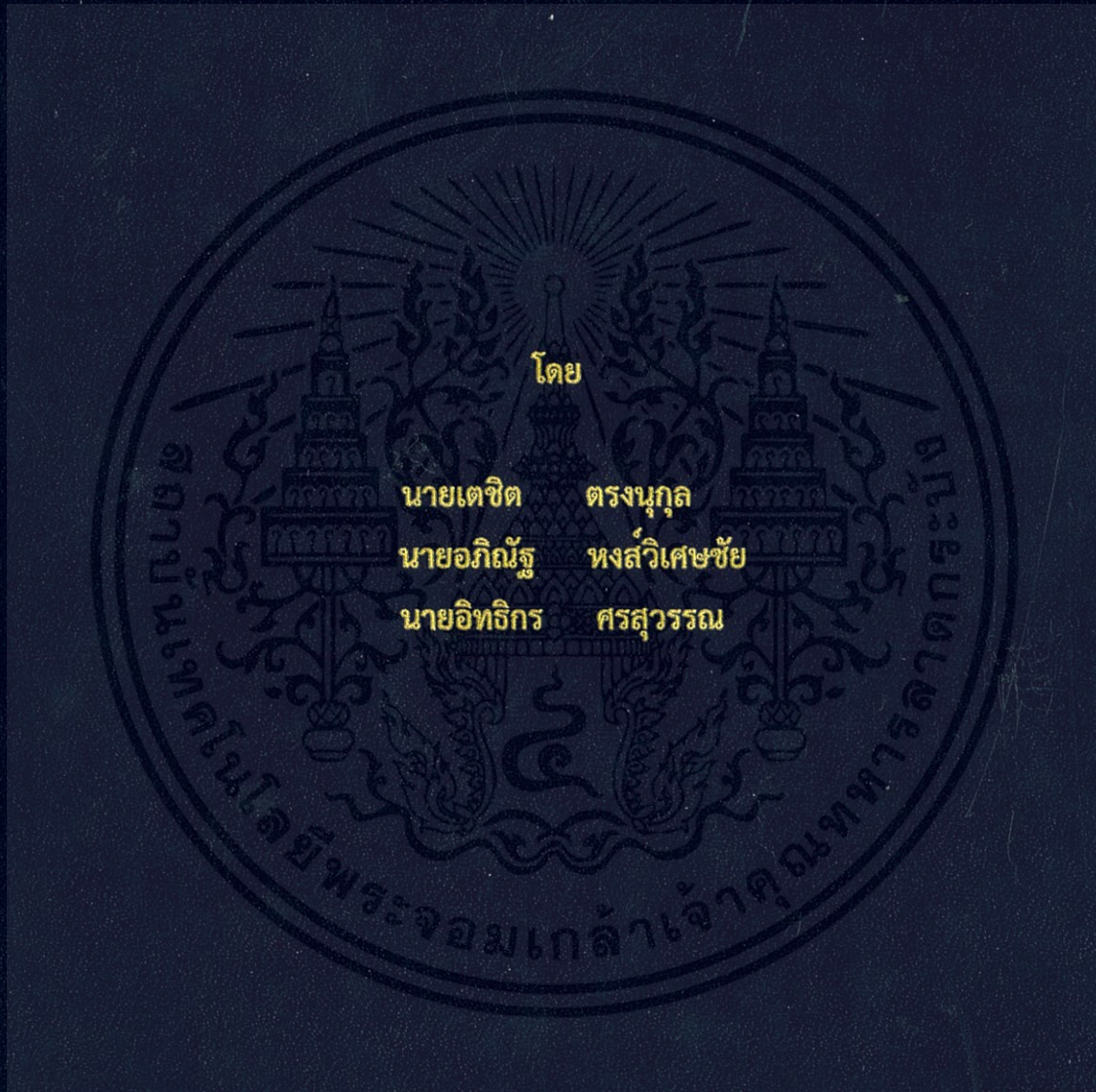


เทคนิคการสร้างวงจรขับสำหรับ LED  
LED driver Technique



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2557

เทคนิคการสร้างวงจรขับสำหรับ LED

LED driver Technique



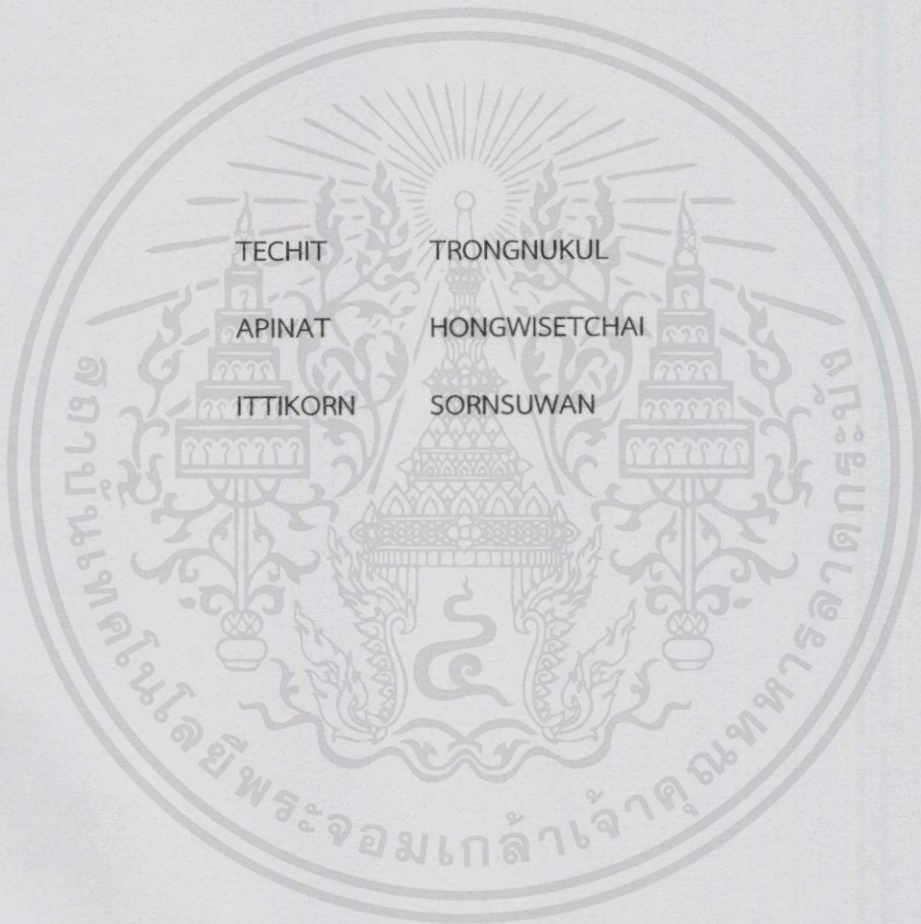
ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# LED DRIVER TECHNIQUE



A PAPER SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT

FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
2014  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2557

เทคนิคการสร้างวงจรขับสำหรับ LED

LED driver Technique



อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รศ.ร.อ.ดร.วิระเชษฐ์ ชันเงิน  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2557

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เทคนิคการสร้างวงจรขับสำหรับ LED

ผู้จัดทำ

1. นายเตชิต
  2. นายอภิณัฐ
  3. นายอิทธิกร
- ตรงนุกุล  
หงส์วิเศษชัย  
ศรสวรรณ



.....  
(รศ.ร.อ.ดร.วีระเชษฐ์ ชันเงิน) อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เทคนิคการสร้างวงจรขับสำหรับ LED

นาย เตชิต	ตรงนกุล	
นาย อภินัฐ	หงส์วิเศษชัย	
นาย อธิธิกร	ศรสุวรรณ	
รศ.ร.อ.ดร.วีระเชษฐ์	ชั้นเงิน	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2557		

### บทคัดย่อ

เนื่องจากในปัจจุบันไฟฟ้าได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตมนุษย์อย่างมาก และเทคโนโลยีก็ได้ถูกพัฒนาไปต่อเนื่อง รวมถึงแนวคิดในเรื่องการอนุรักษ์ทรัพยากร เพื่อลดภาวะโลกร้อน จึงเป็นที่มาของการประดิษฐ์หลอดไฟแอลอีดีที่เข้ามาแทนหลอดฟลูออเรสเซนต์ โดยหลอดชนิดนี้มีข้อดีคือสามารถให้ความสว่างมากกว่าหลอดฟลูออเรสเซนต์โดยทั่วไป อีกทั้งยังสิ้นเปลืองพลังงานน้อยกว่าและสามารถใช้งานได้ยาวนานกว่าซึ่งจะเป็นผลดีต่อผู้ใช้และสิ่งแวดล้อม โดยในอนาคตจะมีการนำมาใช้งานทดแทนอย่างแพร่หลาย ในโครงงานฉบับนี้เป็นรายงานผลการออกแบบสร้างวงจรขับหลอดแอลอีดีที่สามารถรับแรงดันกระแสตรงขาเข้าได้ 9 V ถึง 36 V เพื่อสามารถใช้ในรถยนต์กรณีที่แบตเตอรี่ต่ำลงถึง 9V หรือมีแรงดันถึง 36V ได้ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมความสว่าง และป้องกันความเสียหายของหลอดแอลอีดีด้วยการควบคุมกระแสให้คงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## LED driver Technique

Techit Trongnukul

Apinat Hongwisetchai

Ittikorn Sornsuwan

Assoc.Prof.Dr. Werachet Khan-ngern Supervisor

Year 2014

### ABSTRACT

Nowadays, electricity has become important things in human life and technology has been continuously developing with ideas about conservation of natural resources for reducing global warming. This is the reason to invent LED lamp to replaces fluorescent lamp. This type of lamp has a lot of advantage such as it is brighter than fluorescent lamp, it is also low power consumption, has longer lifetime, and it is good for environment and user. It should be implemented widely in the future replacement. This project shows the design of LED driver that can receive input voltage 9 V dc to 36 V dc in order to use in car when battery low to 9 volt or high to 36 volt. This driver is controlled by Microcontroller for the light dimmer and protects LED from peak current damage by constant current control.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ รศ.ร.อ.ดร.วีระเชษฐ์ ชันเงิน ซึ่งเป็นที่ปรึกษาโครงการ รวมถึงอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องทุกท่านซึ่งได้ให้ความสะดวกในการใช้สถานที่ตลอดจนอุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆ

นอกจากนี้คณะผู้จัดทำต้องขอขอบคุณบริษัทวิเชียรไดนามิก สำหรับการเช่าเทอร์มอลสแกน รุ่นพีที่ศึกษาปริญญาโทและปริญญาเอกในห้องปฏิบัติการ สำหรับคำแนะนำด้านวงจรขับหลอดแอลอีดี และวัดค่าทางแสง ขอขอบคุณเพื่อนๆ สำหรับคำแนะนำ กำลังใจที่มีให้กันตลอดมา

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VI
สารบัญตาราง	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	1
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ	1
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 DC-DC Converter	3
2.1.1 หลักการทำงานของวงจรสวิตชิ่ง	3
2.1.2 วงจรทอนระดับแรงดัน (Buck converter)	4
2.1.2.1 เงื่อนไขการทำงานของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์	4
2.1.2.2 หลักการทำงานของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์	5
2.1.3 วงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้า (Boost converter)	5
2.1.3.1 เงื่อนไขการทำงานของวงจรบูตส์คอนเวอร์เตอร์	6
2.1.3.2 หลักการทำงานของวงจรบูตส์คอนเวอร์เตอร์	6
2.1.4 วงจรลดทอน-ทบระดับแรงดันไฟฟ้า (Buck-Boost converter)	6
2.1.4.1 เงื่อนไขการทำงานของวงจรบัค-บูตส์คอนเวอร์เตอร์	6
2.1.4.2 หลักการทำงานของวงจรบัค-บูตส์คอนเวอร์เตอร์	7
2.1.5 วงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ (Cuk converter)	7
2.1.5.1 เงื่อนไขการทำงานของวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์	8
2.1.5.2 หลักการทำงานของวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์	8
2.1.6 วงจรซีพิกคอนเวอร์เตอร์ (Sepic converter)	8
2.1.6.1 เงื่อนไขการทำงานของวงจรซีพิกคอนเวอร์เตอร์	9
2.1.6.2 หลักการทำงานของวงจรซีพิกคอนเวอร์เตอร์	9
2.1.7 วงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ (Zeta converter)	9
2.1.7.1 เงื่อนไขการทำงานของวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์	10
2.1.7.2 หลักการทำงานของวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์	10
2.1.7.3 ค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออก	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้ง  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกหนึ่งสิ่งที่มีค่าเหนือสิ่งอื่นใดก็คือการศึกษาค้นคว้าและการนำเอาความรู้ที่ได้รับไปใช้ในการพัฒนาประเทศไทยให้ก้าวหน้าต่อไป

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของหลอดแอลอีดี	15
2.2.1 นิยามของไดโอดเปล่งแสง	15
2.2.2 โครงสร้างของไดโอดเปล่งแสง	15
2.2.3 หลักการทำงานเบื้องต้นของไดโอดเปล่งแสง	16
2.2.4 การนำไดโอดเปล่งแสงไปใช้งาน	18
2.2.5 ข้อดีของหลอดไฟแอลอีดี	19
2.3 Microcontroller	19
<b>บทที่ 3 การออกแบบและสร้างวงจรขับแอลอีดี</b>	<b>21</b>
3.1 ซีต้าคอนเวอร์เตอร์ (Zeta converter)	21
3.1.1 เงื่อนไขการทำงานของวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์	21
3.1.2 หลักการทำงานของวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์	21
3.2 การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ LC	22
3.2.1 การออกแบบตัวเก็บประจุที่ด้านเข้า ( $C_{in}$ )	22
3.2.2 การออกแบบตัวเก็บประจุที่อยู่ระหว่างกลาง ( $C_{fly}$ )	23
3.2.3 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ $L_1$	23
3.2.4 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ $L_2$	24
3.2.5 การออกแบบตัวเก็บประจุด้านออก ( $C_o$ )	24
3.3 การออกแบบวงจรควบคุมการทำงานของวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์	25
3.3.1 วงจรกำลังของวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์	25
3.3.2 วงจรขับเกต (Gate drive)	26
3.3.3 วงจรควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)	26
3.3.4 วงจรไฟเลี้ยง (Regulators)	27
3.4 การออกแบบวงจร	27
3.5 การออกแบบการกำหนดค่ากระแสต้านออกของวงจรเพื่อนำไปใช้กับหลอดไฟ LED	29
3.5.1 กระบวนการควบคุมวงจรเพื่อให้กระแสขาออกคงที่	29
3.5.2 ขั้นตอนการทำงานของวงจรควบคุม	29
<b>บทที่ 4 การจำลองและการทดลอง</b>	<b>30</b>
4.1 สร้างแบบจำลองให้มีลักษณะเสมือนจริง	30
4.1.1 ปรับค่าพารามิเตอร์	30
4.2 การจำลองและผลการจำลอง	31
4.2.1 การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Psim	31
4.2.2 ผลการจำลองที่แรงดัน 12 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิล 70%	31
4.2.3 ผลการจำลองที่แรงดัน 24 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิล 38%	33

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.4 ผลการจำลองที่แรงดัน 36 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิล 26%	36
4.3 การทดลอง	39
4.3.1 การทดลองทางไฟฟ้า	39
4.3.1.1 การทดลองหาประสิทธิภาพ	39
4.3.1.2 การวัดกำลังสูญเสียของวงจรควบคุม	39
4.3.1.3 การวัดกราฟกระแสและแรงดันด้านเข้าและด้านออก	39
4.3.1.4 การวัดค่ากระแสและแรงดันกระแสเพิ่มด้านขาออก	40
4.3.2 การทดลองทางแสงสว่าง	40
4.3.3 การทดลองหาความร้อนที่เกิดขึ้นในวงจร	41
4.4 ผลการทดลอง	41
4.4.1 ผลการทดลองทางไฟฟ้า	41
4.4.1.1 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพ	41
4.4.1.2 กำลังไฟฟ้าสูญเสียของวงจรที่กำลังไฟฟ้านำด้านออก 10.8W	46
4.4.1.3 การวัดกราฟกระแสและแรงดันด้านเข้าและด้านออก	47
4.4.1.4 การวัดกราฟกระแสและแรงดันกระแสเพิ่มด้านขาออก	50
4.4.2 การทดลองทางแสงสว่าง	52
4.4.3 การทดลองหาความร้อนที่เกิดขึ้นในวงจร	54
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนาต่อไป	61
5.1 สรุปผลการทดลอง	61
5.2 ข้อเสนอแนะ	61
5.3 แนวทางการพัฒนาต่อไป	62
เอกสารอ้างอิง	63
ภาคผนวก	64
ก.บทความทางวิชาการ	65
ข.โค้ดควบคุมวงจรขับเคลื่อนแอลอีดี	70
ค.ข้อมูลอุปกรณ์	75
ประวัติผู้เขียน	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 วงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์	5
2.2 วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์	6
2.3 วงจรบั๊ก-บูสต์คอนเวอร์เตอร์	7
2.4 วงจรชุกคอนเวอร์เตอร์	8
2.5 วงจรซีพีกคอนเวอร์เตอร์	9
2.6 วงจรสมมูลของซีต้าคอนเวอร์เตอร์	10
2.7 โครงสร้างของไดโอดเปล่งแสง	16
2.8 โครงสร้างภายในชิปสารกึ่งตัวนำ	16
2.9 การจ่ายไบอัสตรงให้ไดโอด	17
2.10 การจ่ายไบอัสย้อนกลับให้ไดโอด	18
2.11 กราฟระหว่างแรงดันกับกระแสของไดโอดเมื่อได้รับการไบอัส	18
2.12 การหาค่าความต้านทานเมื่อทราบค่าแรงดันและกระแส	19
2.13 ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ PIC16F685	20
3.1 วงจรสมมูลของ Zeta converter	21
3.2 วงจรขณะมอสเฟตนำกระแส	22
3.3 วงจรขณะมอสเฟตไม่นำกระแส	22
3.4 วงจรสมมูลของซีต้าคอนเวอร์เตอร์	25
3.5 วงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ที่ออกแบบ	25
3.6 วงจรขั้วเกต	26
3.7 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์	26
3.8 วงจรไฟเลี้ยง	27
3.9 ลายวงจรขั้วหลอดแอลอีดี	27
3.10 Schematic ของวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์	28
3.11 วงจรจริงที่ได้ทำการออกแบบ	28
4.1 วงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงาน	30
4.2 ผลการจำลองกระแส(สีน้ำเงิน) และแรงดัน(สีแดง)ที่มอสเฟตที่แรงดัน 12 โวลต์ ดิวตีไซเคิล 70%	31
4.3 ผลการจำลองกำลังสูญเสียที่มอสเฟตที่แรงดัน 12 โวลต์ ดิวตีไซเคิล 70%	31
4.4 ผลการจำลองกระแส(สีน้ำเงิน) และแรงดัน(สีแดง)ที่ไดโอดที่แรงดัน 12 โวลต์ ดิวตีไซเคิล 70%	32
4.5 ผลการจำลองกำลังสูญเสียที่ไดโอดที่แรงดัน 12 โวลต์ ดิวตีไซเคิล 70%	32

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 ผลการจำลองกระแสที่ไหลผ่าน L1 (ซ้าย) และ L2 (ขวา) ที่แรงดัน 12 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิล 70%	32
4.7 ผลการจำลองแรงดันที่ด้านออก(ซ้าย) และริบเบิลของแรงดันด้านออก(ขวา) ที่แรงดัน 12 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิล 70%	32
4.8 ผลการจำลองกระแสที่ด้านออก(ซ้าย) และริบเบิลของกระแสที่ด้านออก(ขวา) ที่แรงดัน 12 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิล 70%	33
4.9 ผลการจำลองกำลังที่ด้านออก(ซ้าย) และริบเบิลของกำลังที่ด้านออก(ขวา) ที่แรงดัน 12 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิล 70%	33
4.10 ผลการจำลองกระแส(สีน้ำเงิน) และแรงดัน(สีแดง)ที่มอสเฟตที่แรงดัน 24 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิล 38%	33
4.11 ผลการจำลองกำลังสูญเสียที่มอสเฟตที่แรงดัน 24 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิล 38%	34
4.12 ผลการจำลองกระแส(สีน้ำเงิน) และแรงดัน(สีแดง)ที่ไดโอดที่แรงดัน 24 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิล 38%	34
4.13 ผลการจำลองกำลังสูญเสียที่ไดโอดที่แรงดัน 24 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิล 38%	34
4.14 ผลการจำลองกระแสที่ไหลผ่าน L1 (ซ้าย) และ L2 (ขวา)ที่แรงดัน 24 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิล 38%	35
4.15 ผลการจำลองแรงดันที่ด้านออก(ซ้าย) และริบเบิลของแรงดันด้านออก(ขวา)	35
4.16 ผลการจำลองกระแสที่ด้านออก(ซ้าย) และริบเบิลของกระแสที่ด้านออก(ขวา) ที่แรงดัน 24 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิล 38%	35
4.17 ผลการจำลองกำลังที่ด้านออก(ซ้าย) และริบเบิลของกำลังที่ด้านออก(ขวา) ที่แรงดัน 24 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิล 38%	35
4.18 ผลการจำลองกระแส(สีน้ำเงิน) และแรงดัน(สีแดง)ที่มอสเฟตที่แรงดัน 36 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิล 26%	36
4.19 ผลการจำลองกำลังสูญเสียที่มอสเฟตที่แรงดัน 36 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิล 26%	36
4.20 ผลการจำลองกระแส(สีน้ำเงิน) และแรงดัน(สีแดง)ที่ไดโอดที่แรงดัน 36 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิล 26%	36
4.21 ผลการจำลองกำลังสูญเสียที่ไดโอด ที่แรงดัน 36 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิล 26%	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยไม่หวังผลตอบแทน หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง และขอเชิญชวนให้ท่านช่วยกันตรวจสอบและแจ้งข้อผิดพลาดให้ทราบโดยด่วนที่สุด เพื่อปรับปรุงแก้ไขให้ดียิ่งขึ้นต่อไป

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 ผลการจำลองกระแสที่ไหลผ่าน L1 (ซ้าย) และ L2 (ขวา) ที่แรงดัน 36 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิล 26%	37
4.23 ผลการจำลองแรงดันที่ด้านออก(ซ้าย) และริบเปิ้ลของแรงดันด้านออก(ขวา) ที่แรงดัน 36 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิล 26%	38
4.24 ผลการจำลองกระแสที่ด้านออก(ซ้าย) และริบเปิ้ลของกระแสที่ด้านออก(ขวา) ที่แรงดัน 36 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิล 26%	38
4.25 ผลการจำลองกำลังที่ด้านออก(ซ้าย) และริบเปิ้ลของกำลังที่ด้านออก(ขวา) ที่แรงดัน 36 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิล 26%	38
4.26 การวัดประสิทธิภาพของวงจรขับ	39
4.27 ออสซิลโลสโคป RIGOL DS1052E	40
4.28 เครื่อง Goniophotometer	40
4.29 กล้องตรวจจับความร้อนในวงจร Testo-875	41
4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าด้านออก และแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า	43
4.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของวงจร และแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า	44
4.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของวงจร และกำลังไฟฟ้าด้านออก	45
4.33 กราฟกระแสด้านขาเข้า (ซ้าย) กราฟกระแสด้านขาออก (ขวา) ที่แรงดันขาเข้า 10 V	47
4.34 กราฟกระแสด้านขาเข้า (ซ้าย) กราฟกระแสด้านขาออก (ขวา) ที่แรงดันขาเข้า 12 V	47
4.35 กราฟกระแสด้านขาเข้า (ซ้าย) กราฟกระแสด้านขาออก (ขวา) ที่แรงดันขาเข้า 24 V	47
4.36 กราฟกระแสด้านขาเข้า (ซ้าย) กราฟกระแสด้านขาออก (ขวา) ที่แรงดันขาเข้า 36 V	48
4.37 กราฟแรงดันขาเข้า (ซ้าย) กราฟแรงดันด้านขาออก (ขวา) ที่แรงดันขาเข้า 10 V	48
4.38 กราฟแรงดันขาเข้า (ซ้าย) กราฟแรงดันด้านขาออก (ขวา) ที่แรงดันขาเข้า 12 V	48
4.39 กราฟแรงดันขาเข้า (ซ้าย) กราฟแรงดันด้านขาออก (ขวา) ที่แรงดันขาเข้า 24 V	49
4.40 กราฟแรงดันขาเข้า (ซ้าย) กราฟแรงดันด้านขาออก (ขวา) ที่แรงดันขาเข้า 36 V	49
4.41 กราฟ Back ground noise ของกระแสขาออก	49
4.42 กระแสด้านออก(ซ้าย) และแรงดันด้านออก(ขวา)	50

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.43 กระแสกระเพื่อมด้านนอก(ซ้าย) และกระเพื่อมด้านนอก(ขวา) ที่แรงดันที่ขาเข้า 12 V	50
4.44 กระแสกระเพื่อมด้านนอก(ซ้าย) และกระเพื่อมด้านนอก(ขวา) ที่แรงดันขาเข้า 24 V	50
4.45 กระแสกระเพื่อมด้านนอก(ซ้าย) และกระเพื่อมด้านนอก(ขวา) ที่แรงดันขาเข้า 36 V	51
4.46 การกระจายความเข้มส่องสว่างที่ $V_{in} = 10$ V $P_{out} = 10.86$ W (ซ้าย) การกระจายความเข้มส่องสว่างที่ $V_{in} = 12$ V $P_{out} = 10.93$ W (ขวา)	52
4.47 การกระจายความเข้มส่องสว่างที่ $V_{in} = 24$ V $P_{out} = 10.80$ W (ซ้าย) การกระจายความเข้มส่องสว่างที่ $V_{in} = 24$ V $P_{out} = 5.12$ W (ขวา)	52
4.48 การกระจายความเข้มส่องสว่างที่ $V_{in} = 24$ V $P_{out} = 7.03$ W (ซ้าย) การกระจายความเข้มส่องสว่างที่ $V_{in} = 36$ V $P_{out} = 10.8$ W (ขวา)	53
4.49 การกระจายความเข้มส่องสว่างที่ $V_{in} = 28.2$ V $P_{out} = 10$ W จ่ายไฟด้วย Linear supply	53
4.50 ตรวจสอบความร้อนที่แรงดันขาเข้า 10 V กำลังขาออก 10 W	54
4.51 ตรวจสอบความร้อนที่แรงดันขาเข้า 12 V กำลังขาออก 10 W	55
4.52 ตรวจสอบความร้อนที่แรงดันขาเข้า 24 V กำลังขาออก 10 W	56
4.53 ตรวจสอบความร้อนที่แรงดันขาเข้า 24 V กำลังขาออก 7 W	57
4.54 ตรวจสอบความร้อนที่แรงดันขาเข้า 24 V กำลังขาออก 5 W	58
4.55 ตรวจสอบความร้อนที่แรงดันขาเข้า 36 V กำลังขาออก 10 W	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินโครงการช่วงภาคเรียนที่ 1	2
1.2 แผนการดำเนินโครงการช่วงภาคเรียนที่ 2	2
4.1 ตารางเปรียบเทียบกำลังสูญเสียของมอเตอร์ และไดโอดที่แรงดันด้านเข้าต่างๆ	39
4.2 ตารางผลการทดลองวัดประสิทธิภาพ เมื่อเปลี่ยนแปลงแรงดันขาเข้า	42
4.3 ตารางบันทึกผลเปรียบเทียบระหว่างแรงดันคงที่กับกำลังขาออก (ก) ที่แรงดัน 12 V (ข) ที่แรงดัน 24 V (ค) ที่แรงดัน 36 V	44
4.4 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในวงจร	46
4.5 เปรียบเทียบกระแสและแรงดันกระแสที่แรงดันต่างๆ	51
4.6 ผลการวัดค่าทางแสง	54
4.7 บันทึกผลอุณหภูมิของอุปกรณ์ที่แรงดันขาเข้า 10 V กำลังขาออก 10 W	55
4.8 บันทึกผลอุณหภูมิของอุปกรณ์ที่แรงดันขาเข้า 12 V กำลังขาออก 10 W	56
4.9 บันทึกผลอุณหภูมิของอุปกรณ์ที่แรงดันขาเข้า 24 V กำลังขาออก 10 W	57
4.10 บันทึกผลอุณหภูมิของอุปกรณ์ที่แรงดันขาเข้า 24 V กำลังขาออก 7 W	57
4.11 บันทึกผลอุณหภูมิของอุปกรณ์ที่แรงดันขาเข้า 24 V กำลังขาออก 5 W	58
4.12 บันทึกผลอุณหภูมิของอุปกรณ์ที่แรงดันขาเข้า 36 V กำลังขาออก 10 W	59
4.13 บันทึกผลอุณหภูมิของอุปกรณ์ที่แรงดันขาเข้า 10-36 V กำลังขาออก 10 W	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

หลอดไฟนั้นเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าส่องสว่างที่มีความจำเป็นอย่างมากในการดำเนินชีวิตประจำวันของมนุษย์ ซึ่งในปัจจุบันมีหลอดไฟหลากหลายชนิดให้เลือกใช้และหลอดแอลอีดี (LED : Light Emitting Diode) ก็เป็นหนึ่งในทางเลือกนั้น หลอดไฟแอลอีดีมีข้อดีคือให้ประสิทธิภาพด้านแสงสว่างสูงกว่าหลอดไฟชนิดอื่น มีอายุการใช้งานยาวนาน และใช้พลังงานน้อยตรงกับแนวคิดการอนุรักษ์พลังงานและรักษาสิ่งแวดล้อมในปัจจุบัน ซึ่งการนำหลอดไฟแอลอีดีมาใช้ทดแทนหลอดไฟแบบดั้งเดิมจำเป็นต้องมีวงจรขับหลอดแอลอีดี (LED Driver) สำหรับต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้า ซึ่งประสิทธิภาพของวงจรขับหลอดไฟแอลอีดีเป็นหัวใจสำคัญในการประหยัดพลังงานของหลอดไฟ

ดังนั้นจึงต้องออกแบบวงจรขับหลอดแอลอีดีโดยอาศัยตามทฤษฎี และการสร้างวงจรที่ใช้งานได้จริงตามที่ออกแบบไว้ โดยให้มีประสิทธิภาพสูงสุด มีขนาดเหมาะสม สามารถผลิตได้จำนวนมากเพื่อทดแทนวงจรขับเดิมในท้องตลาดที่ประสิทธิภาพต่ำกว่าได้

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบวงจรขับหลอดแอลอีดีที่มีประสิทธิภาพสูงมากกว่า 85%
2. เพื่อศึกษาคุณลักษณะของวงจรขับแต่ละชนิด
3. เพื่อศึกษาวิธีการออกแบบและควบคุมวงจรสำหรับขับแอลอีดี
4. เพื่อส่งเสริมการพัฒนาเทคโนโลยีหลอดไฟแอลอีดีและวงจรขับ

#### 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

1. ศึกษาวงจรขับหลอดไฟแอลอีดีแต่ละประเภท
2. ออกแบบและสร้างวงจรขับหลอดไฟแอลอีดีที่สามารถต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 9 ถึง 36 โวลต์ได้

#### 1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ

การดำเนินโครงการจะเริ่มจากการศึกษาวงจรขับแต่ละวงจร จากนั้นทำการจำลองวงจรในโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาวงจรขับที่เหมาะสม หลังจากนั้นจึงทำการสร้างวงจรขับจริง ปรับปรุงแก้ไขและวัดประสิทธิภาพของวงจรขับให้ใกล้เคียงกับผลการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.5 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานช่วงภาคเรียนที่ 1

การทำงาน	ก.ย.		ต.ค.				พ.ย.				ธ.ค.		
	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	3	4	
1. ศึกษาหลอดแอลอีดี	←→												
2. ศึกษาวงจรขับ			←→										
3. จำลองการทำงานของวงจร							←→						
4. เขียนโปรแกรม ไมโครคอนโทรลเลอร์							←→						
5. ประกอบวงจรขับ											←→		
6. ทดสอบ ปรับแก้วงจร											←→		
7. ทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์								←→					

ตารางที่ 1.2 แผนการดำเนินงานช่วงภาคเรียนที่ 2

การทำงาน	ม.ค.				ก.พ.				มี.ค.				เม.ย.				พ.ค.			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	
1. เขียนโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์	←→																			
2. ประกอบวงจรขับ					←→															
3. ทดสอบและเก็บข้อมูลของวงจร									←→											
4. ทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์																				←→

### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจในการสร้างวงจรขับหลอดไฟแอลอีดี
2. ทราบถึงการสร้างสัญญาณพัลส์วิดท์โมดูเลชั่น (PWM) ที่ใช้ในการควบคุมแสงสว่างของหลอดไฟแอลอีดี
3. เผยแพร่ความรู้เกี่ยวกับหลอดไฟแอลอีดีและวงจรขับให้แก่ผู้ที่สนใจ
4. สร้างแนวคิดได้การผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าคุณภาพสูงมากกว่าเน้นราคาถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 DC-DC Converter [1]

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหรือดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ หรือ วงจรช้อปเปอร์เป็นที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมและคอมพิวเตอร์อย่างแพร่หลาย โดยที่พัฒนาการของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากกระแสตรงเป็นกระแสตรง เริ่มต้นตั้งแต่ปี ค.ศ.1950 โดยแบ่งพัฒนาการออกเป็น 5 ยุคด้วยกัน ได้แก่ ยุคแรก classical converter ยุคที่สอง multi quadrant converter ยุคที่สาม switched-component converter ยุคที่สี่ soft-switching converter และ ยุคที่ห้า synchronous rectifier converter การวิวัฒนาการของคอนเวอร์เตอร์ถูกเปลี่ยนแปลงไปตามยุคสมัย ทำให้มีขนาดที่เล็กลงการทำงานซับซ้อนขึ้น ประสิทธิภาพที่ได้มีค่าที่สูงขึ้น การนำไปประยุกต์ใช้งานง่ายขึ้น และสามารถที่จะรองรับโหลดที่สูงขึ้น

##### 2.1.1 หลักการทำงานของวงจรสวิตชิง

อุปกรณ์สวิตชิง เช่น มอสเฟต หรือ ไอจีบีที จะทำหน้าที่เป็นสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์มีโหมดการทำงานคือ โหมดนำกระแส และหยุดนำกระแส โดยสมมติให้มอสเฟต หรือ ไอจีบีที ที่ใช้เป็นสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ในอุดมคติ หลักการทำงานคือ เมื่อสวิตซ์นำกระแส แรงดันไฟฟ้าออกจะมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า  $V_0 = V_s$  และ เมื่อสวิตซ์ไม่นำกระแส แรงดันไฟฟ้าด้านออกจะมีค่าเท่ากับศูนย์ หรือ  $V_0 = 0$

ช่วงเวลาในการนำกระแสและหยุดนำกระแส จะได้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าด้านออกเป็นพัลส์ ซึ่งสามารถหาค่าเฉลี่ยหรือค่าของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านออกได้จากสมการ

$$V_0 = \frac{1}{T} \int_0^{DT} V_s dt \quad (2.1)$$

เมื่อ  $V_s =$  แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

$D =$  ดิวตี้ไซเคิล

จะพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านออกจะถูกควบคุมได้จากการปรับค่าดิวตี้ไซเคิล (Duty cycle หรือ Duty ratio :  $D$ ) ซึ่ง  $D$  หมายถึง อัตราส่วนของช่วงเวลาที่ยานนำกระแสต่อช่วงเวลาหนึ่งคาบการสวิตชิง มีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T} \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$t_{\text{on}} = DT \quad (2.3)$$

$$t_{\text{off}} = (1-D)T \quad (2.4)$$

เมื่อ  $t_{\text{on}}$  = ช่วงเวลานำกระแส  
 $t_{\text{off}}$  = ช่วงเวลาไม่นำกระแส  
 $T$  = เวลาหนึ่งคาบ

การกำหนดค่า  $D$  นิยมบอกเป็นสองลักษณะ คือ เป็นเลขเต็มหนึ่งและบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ค่าต่ำสุดของ  $D$  คือศูนย์และค่าสูงสุดคือหนึ่ง ขณะที่บอกเปอร์เซ็นต์จะมีค่าต่ำสุดเป็นศูนย์เปอร์เซ็นต์และค่าสูงสุดคือหนึ่งร้อยเปอร์เซ็นต์

ตัวอย่างเช่น  $D=0.4$  หรือ  $D=40\%$  หมายถึงช่วงเวลาที่สวิตช์นำกระแสมีอยู่ 0.4 ส่วน จากช่วงเวลานำกระแส หรือหมายถึงช่วงเวลาที่สวิตช์นำกระแสมีอยู่สี่สิบเปอร์เซ็นต์จากช่วงเวลานำกระแสหรือหนึ่งร้อยเปอร์เซ็นต์ ในกรณีศึกษาเบื้องต้นนี้ เพื่อให้ง่ายต่อการศึกษา จะสมมติให้ในขณะที่สวิตช์นำกระแส แรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์มีค่าเป็นศูนย์ ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการคำนวณ และจะไม่คำนึงถึงการสูญเสียจากการทำงานของสวิตช์ ซึ่งหมายถึงวงจรนี้มีประสิทธิภาพหนึ่งร้อยเปอร์เซ็นต์

### 2.1.2 วงจรทอนระดับแรงดัน (Buck converter)

วงจรทอนระดับหรือวงจรบักคอนเวอร์เตอร์ คือ วงจรที่ทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าด้านออกมีค่าต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า และเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าด้านออกที่มีความเป็นกระแสตรงมากๆ จะนิยมใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low pass filter) ซึ่งโดยมากจะเลือกใช้วงจรกรองแบบ LC เพราะมีอัตราลดทอนสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการ ผกผันกับกำลังสองของความถี่

2.1.2.1 เงื่อนไขการทำงานของวงจรบักคอนเวอร์เตอร์ การวิเคราะห์การทำงานของวงจรบักคอนเวอร์เตอร์ ในช่วงที่เป็นสภาวะคงตัว (steady state) จะมีการกำหนดเงื่อนไขการทำงานของวงจรบักคอนเวอร์เตอร์ ดังนี้

1. กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากัน

$$i_L(t+T) = i_L(t) \quad (2.5)$$

หมายถึงกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าเท่ากัน ณ ตำแหน่งเดียวกันในทุกคาบเวลา

2. แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากับศูนย์

$$V_L = \frac{1}{T} \int_0^{t+T} V_L(\lambda) dx = 0 \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายถึงผลรวมของผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำกับเวลา (volt-second) ในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากับศูนย์

3. กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของตัวเก็บประจุในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากับศูนย์

$$I_C = \frac{1}{T} \int_0^{T} i_C(t) dt = 0 \quad (2.7)$$

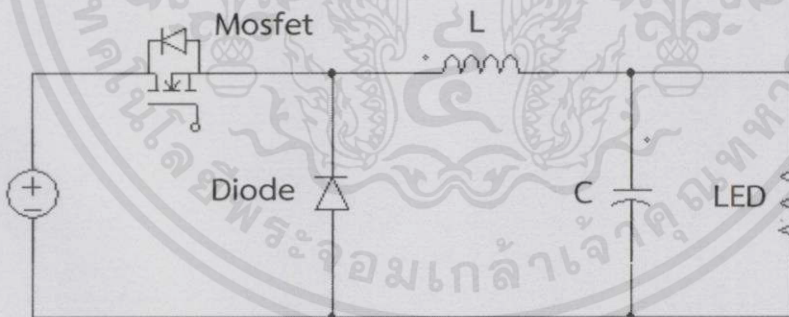
หมายถึงประจุที่ถูกเก็บ (charged) และที่คาย (discharged) ของตัวเก็บประจุ ในแต่ละคาบเวลาจะต้องเท่ากัน

4. กำลังไฟฟ้าด้านเข้าเท่ากับกระแสไฟฟ้าด้านออก

$$P_s = P_o \quad (2.8)$$

กรณีนี้กำหนดให้อุปกรณ์ทุกตัวเป็นอุดมคติ ทำให้ไม่มีการสูญเสียเนื่องจากการทำงานของวงจร ประสิทธิภาพของวงจรจึงเท่ากับร้อยเปอร์เซ็นต์

2.1.2.2 หลักการทำงานของวงจรบักคอนเวอร์เตอร์ เพื่อจะออกแบบให้ได้แรงดันไฟฟ้าด้านออกตามที่ต้องการ คือ ต้องเริ่มจากเงื่อนไขที่ว่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมที่ตัวเหนี่ยวนำ ในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากับศูนย์ จากนั้นก็จะสามารถหากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ การวิเคราะห์การทำงานของสวิตช์ ในแต่ละโหมด จะต้องวิเคราะห์ในสภาวะคงตัว รูปที่ 2.7 แสดงวงจรสมมูลของบักคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.1 วงจรบักคอนเวอร์เตอร์

ขณะสวิตช์นำกระแส กระแสไฟฟ้าที่ไหลจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจะไหลผ่านตัวสวิตช์ ผ่านตัวเหนี่ยวนำไปยังโหลด โดยที่กระแสไฟฟ้าส่วนหนึ่งจะไปเก็บที่ตัวเก็บประจุ ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส เมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส ไดโอดจะถูกไบอัสไปหน้า (Forward bias) ให้นำกระแส ทำให้กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเกิดการไหลอย่างต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.3 วงจรยกระดับแรงดันไฟฟ้า (Boost converter)

วงจรยกระดับหรือวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ คือ วงจรที่ทำการเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกให้สูงกว่าแรงดันไฟฟ้าด้านขาเข้า ที่เรียกวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ (Boost converter) ก็เพราะแรงดันไฟฟ้าด้านออกสูงกว่าแรงดันไฟฟ้าด้านเข้านั่นเอง

2.1.3.1 เงื่อนไขการทำงานของวงจรวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ การวิเคราะห์การทำงานของวงจรวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ ในช่วงที่เป็นสภาวะคงตัว (steady state) จะมีการกำหนดเงื่อนไขการทำงานของวงจรวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ ดังนี้

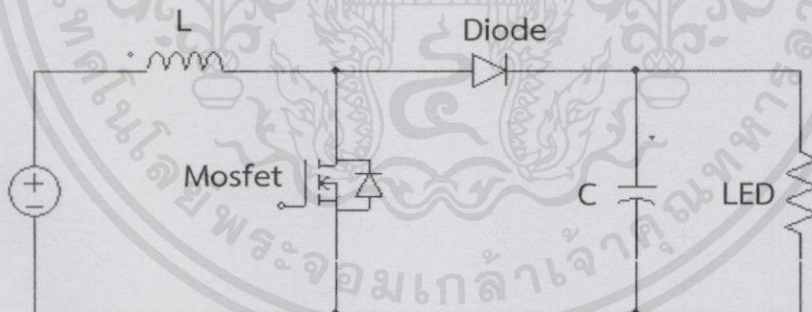
1. กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ณ ตำแหน่งเดียวกันในแต่ละคาบ จะมีค่าเท่ากันและมีค่าเป็นบวกเสมอ

2. แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากับศูนย์ หมายถึงผลรวมของผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำกับเวลา (volt-second) ในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากับศูนย์

3. ตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่ทำให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกมีค่าคงที่

4. กำลังไฟฟ้าด้านเข้าเท่ากับกระแสไฟฟ้าด้านออก กรณีนี้กำหนดให้อุปกรณ์ทุกตัวเป็นอุดมคติ ทำให้ไม่มีการสูญเสียเนื่องจากการทำงานของวงจร ประสิทธิภาพของวงจรจึงเท่ากับร้อยเปอร์เซ็นต์

2.1.3.2 หลักการทำงานของวงจรวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ เพื่อให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกตามต้องการ จะเริ่มต้นจากข้อกำหนดที่ว่า แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะเท่ากับศูนย์ และสามารถหากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำได้โดยวิเคราะห์การทำงานของสวิตช์ในแต่ละโหมด ทั้งนี้การทำงานจะต้องอยู่ในช่วงสภาวะคงตัว รูปที่ 2.8 แสดงวงจรมูลของบูสต์คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.2 วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์

ขณะสวิตช์นำกระแส กระแสไฟฟ้าที่ไหลจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจะไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ โดยผ่านสวิตช์ ขณะเดียวกันไดโอดจะถูกไบอัสย้อนกลับทำให้ไม่สามารถนำกระแสได้

ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส เมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส กระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดไม่ได้ ไดโอดจะถูกไบอัสไปหน้าให้นำกระแส ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำอย่างต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และในเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่เป็นประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

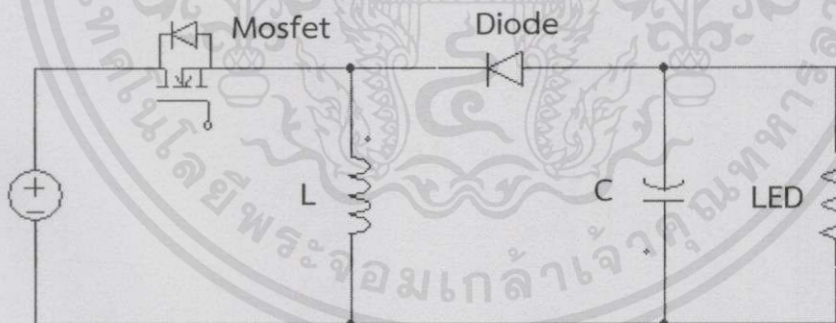
### 2.1.4 วงจรลดทอน-ทบระดับแรงดันไฟฟ้า (Buck-Boots converter)

วงจรลดทอน-ทบระดับแรงดันไฟฟ้าหรือวงจรบั๊ก-บูสต์คอนเวอร์เตอร์ คือ วงจรที่ทำการลดหรือเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกให้ต่ำหรือสูงกว่าแรงดันไฟฟ้าด้านขาเข้าได้

2.1.4.1 เงื่อนไขการทำงานของวงจรบั๊ก-บูสต์คอนเวอร์เตอร์ การวิเคราะห์การทำงานของวงจรบั๊ก-บูสต์คอนเวอร์เตอร์ ในช่วงที่เป็นสภาวะคงตัว (steady state) จะมีการกำหนดเงื่อนไขการทำงานของวงจรบั๊ก-บูสต์คอนเวอร์เตอร์ ดังนี้

1. กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ณ ตำแหน่งเดียวกันในแต่ละคาบ จะมีค่าเท่ากันและมีค่าเป็นบวกเสมอ
2. แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากับศูนย์ หมายถึงผลรวมของผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำกับเวลา (volt-second) ในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากับศูนย์
3. ตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่ทำให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกมีค่าคงที่
4. กำลังไฟฟ้าด้านเข้าเท่ากับกระแสไฟฟ้าด้านออก กรณีนี้กำหนดให้อุปกรณ์ทุกตัวเป็นอุดมคติ ทำให้ไม่มีการสูญเสียเนื่องจากการทำงานของวงจร ประสิทธิภาพของวงจรจึงเท่ากับร้อยเปอร์เซ็นต์

2.1.4.2 หลักการทำงานของวงจรบั๊ก-บูสต์คอนเวอร์เตอร์ เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าด้านออก มีค่าลดลงหรือเพิ่มขึ้นตามต้องการโดยจะเริ่มต้นจากข้อกำหนดที่ว่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะเท่ากับศูนย์ ซึ่งจะสามารถหากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ได้โดยการวิเคราะห์การทำงานของสวิตช์ในแต่ละโหมด ทั้งนี้ต้องอยู่ในสภาวะคงตัว ในรูปที่ 2.9 แสดงวงจรสมมูลของวงจรบั๊ก-บูสต์ คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.3 วงจรบั๊ก-บูสต์คอนเวอร์เตอร์

ขณะที่สวิตช์นำกระแส กระแสไฟฟ้าที่ไหลจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจะไหลผ่าน สวิตช์และผ่านตัวเหนี่ยวนำ ในขณะที่ไดโอดจะถูกไบอัสย้อนกลับ ขณะที่สวิตช์ไม่นำกระแสเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส กระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดไม่ได้ ไดโอดจะถูกไบอัสไปหน้าให้นำกระแส ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำอย่างต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ ใช้นับเป็นเอกสารการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทางสน อักทงห้ามมิ ให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.5 วงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ (Cuk converter)

วงจรชุกคอนเวอร์เตอร์มีการทำงานแบบเพิ่มหรือลดระดับแรงดันไฟฟ้า โดยที่แรงดันไฟฟ้านำออกมาทิศทางตรงข้ามกับแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าเช่นเดียวกันกับ วงจรบัก-บูสต์คอนเวอร์เตอร์แต่ปัญหาในวงจรบัก-บูสต์คอนเวอร์เตอร์ก็คือ มีขนาดกระแสฮาร์มอนิกส์ สูงเนื่องจากไม่มีตัวเหนี่ยวนำทำหน้าที่กรองกระแสทางด้านเข้า และมีวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านชนิด LC ทางด้านออก ส่วนการเชื่อมต่อระหว่างด้านเข้ากับด้านออกของวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์จะใช้ตัวเก็บประจุ ซึ่งแตกต่างจากวงจรบักคอนเวอร์เตอร์ และวงจรบัก-บูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ผ่านมาที่มีการเชื่อมต่อด้านเข้ากับด้านออกโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำ นอกจากนั้นเมื่อเทียบอุปกรณ์ของวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ กับวงจรที่ผ่านมาจะเห็นว่าวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์จะมีจำนวนตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นอย่างละหนึ่งตัว

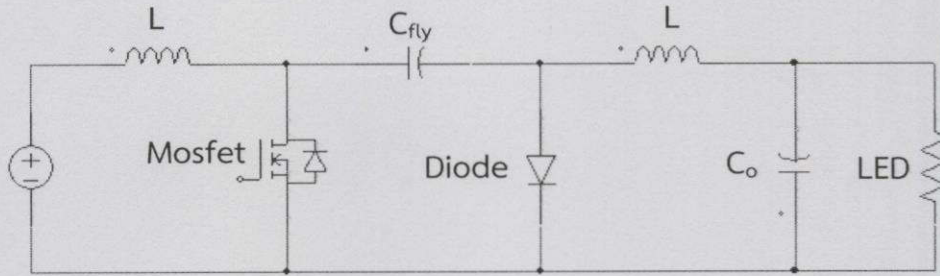
2.1.5.1 เงื่อนไขการทำงานของวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ การวิเคราะห์การทำงานของวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ ในช่วงที่เป็นสภาวะคงตัว (steady state) จะมีการกำหนดเงื่อนไขการทำงานของวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ ดังนี้

1. ตัวเหนี่ยวนำมีขนาดใหญ่เป็นผลทำให้ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าคงที่
2. ตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่เป็นผลทำให้ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าคงที่
3. กระแสและแรงดันไฟฟ้า ณ เวลาซ้ำกันในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากัน
4. กำลังไฟฟ้านำเข้าเท่ากับกำลังไฟฟ้านำออก กรณีนี้จะไม่คำนึงถึงการสูญเสียที่เกิดจากการทำงานของวงจร เนื่องจากอุปกรณ์ทุกตัวเป็นอุดมคติทำให้ประสิทธิภาพรวมของวงจรเป็นหนึ่งร้อยเปอร์เซ็นต์
5. ช่วงเวลานำกระแสคือ DT และช่วงเวลาที่หยุดนำกระแสคือ  $(1 - D)T$

2.1.5.2 หลักการทำงานของวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าด้านออก มีค่าลดลงหรือเพิ่มขึ้นตามต้องการโดยจะเริ่มต้นจากข้อกำหนดที่ว่า แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะเท่ากับศูนย์ ซึ่งจะสามารถหากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ได้โดยการวิเคราะห์การทำงานของสวิตซ์ในแต่ละโหมด ทั้งนี้ต้องอยู่ในสภาวะคงตัว ในรูปที่

### 2.10 แสดงวงจรสมมูลของวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 วงจรชุกคอนเวอร์เตอร์

ขณะสวิตช์นำกระแส กระแสไฟฟ้าที่ไหลจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจะไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และผ่าน สวิตช์ในขณะที่ไดโอดยังไม่ถูกไบอัสย้อนกลับ ขณะสวิตช์ไม่นำกระแสเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส กระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดไม่ได้ ไดโอดจะถูกไบอัสไปหน้าให้นำกระแส ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำอย่างต่อเนื่อง

#### 2.1.6 วงจรซีพิกคอนเวอร์เตอร์ (Sepic converter)

วงจรซีพิกคอนเวอร์เตอร์มีการทำงานแบบเพิ่มหรือลดระดับแรงดันไฟฟ้า โดยที่แรงดันไฟฟ้าด้านออกมาทิศทางเดียวกันกับแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าเช่นเดียวกันกับ แต่ปัญหาในวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ก็คือ แรงดันกลับชั่วคราวไฟฟ้าที่ขาออก ส่วนการเชื่อมต่อระหว่างด้านเข้ากับด้านออกของวงจรซีพิกคอนเวอร์เตอร์จะใช้ตัวเก็บประจุในการเชื่อมต่อด้านเข้ากับด้านออก นอกจากนั้นเมื่อเทียบอุปกรณ์ของวงจรซีพิกคอนเวอร์เตอร์ กับวงจรที่ผ่านมาจะเห็นว่าวงจรซีพิกคอนเวอร์เตอร์จะมีจำนวนตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ เพิ่มขึ้นอย่างละหนึ่งตัว เช่นเดียวกับวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์

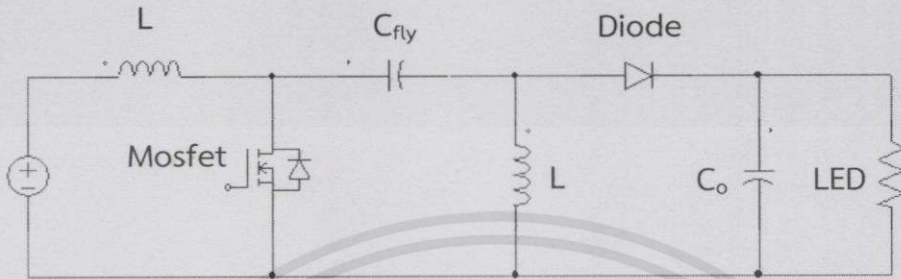
2.1.6.1 เงื่อนไขการทำงานของวงจรซีพิกคอนเวอร์เตอร์ การวิเคราะห์การทำงานของวงจรซีพิกคอนเวอร์เตอร์ ในช่วงที่เป็นสภาวะคงตัว (steady state) จะมีการกำหนดเงื่อนไขการทำงานของวงจรซีพิกคอนเวอร์เตอร์ ดังนี้

1. ตัวเหนี่ยวนำมีขนาดใหญ่เป็นผลทำให้ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าคงที่
2. ตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่เป็นผลทำให้ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าคงที่
3. กระแสและแรงดันไฟฟ้า ณ เวลาซ้ำกันในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากัน
4. กำลังไฟฟ้าด้านเข้าเท่ากับกำลังไฟฟ้าด้านออก กรณีนี้จะไม่คำนึงถึงการสูญเสียที่เกิดจากการทำงานของวงจร เนื่องจากอุปกรณ์ทุกตัวเป็นอุดมคติทำให้ประสิทธิภาพรวมของวงจรเป็นร้อยเปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาโดยผู้จัดทำไว้เพื่อใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมี เหตุใดเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งไม่ว่าจะ  
 2.1.6.2 หลักการทำงานของวงจรซีพิกคอนเวอร์เตอร์ เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าด้านออก มีค่าลดลงหรือเพิ่มขึ้นตามต้องการโดยจะเริ่มต้นจากข้อกำหนดที่ว่า

แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อม ตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะเท่ากับศูนย์ ซึ่งจะสามารถหากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ได้โดยการวิเคราะห์การทำงานของสวิตช์ในแต่ละโหมด ทั้งนี้ต้องอยู่ในสภาวะอยู่ตัว ในรูปที่ 2.11 แสดงวงจรสมมูลของวงจรซิกคอนเวอร์เตอร์

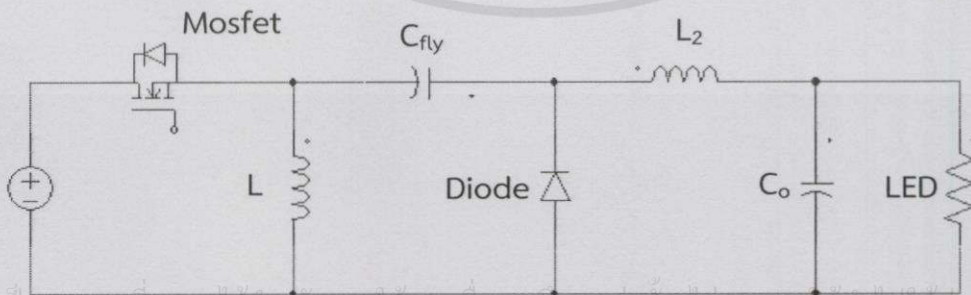


รูปที่ 2.5 วงจรซิกคอนเวอร์เตอร์

ขณะสวิตช์นำกระแส กระแสไฟฟ้าที่ไหลจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจะไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และผ่านสวิตช์ในขณะที่ไดโอดยังไม่ถูกไบอัสไปด้านหน้าขณะสวิตช์ไม่นำกระแส เมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส กระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดไม่ได้ ไดโอดจะถูกไบอัสไปหน้าให้นำกระแส ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำอย่างต่อเนื่อง

2.1.7 วงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ (Zeta converter) [2]

วงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ มีการทำงานเป็นแบบเพิ่มหรือลดระดับแรงดันไฟฟ้า โดยที่แรงดันไฟฟ้าด้านออกมีทิศทางตรงกันกับแรงไฟฟ้าด้านเข้า และมีวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านชนิด LC ทางด้านออก ส่วนการเชื่อมต่อระหว่างด้านเข้าและด้านออกของวงจร Zeta converter จะใช้ตัวเก็บประจุ ซึ่งแตกต่างจากวงจรบักคอนเวอร์เตอร์ บูสต์ และวงจรบัก-บูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำเชื่อมต่อด้านเข้าและด้านออก ข้อดีของวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์คือกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกส์ทางด้านขาออกมีค่าต่ำ วงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ จะประกอบไปด้วย ตัวเก็บประจุสามตัว ตัวเหนี่ยวนำสองตัว มอสเฟตหนึ่งตัว และไดโอดหนึ่งตัว ดังรูปด้านล่างนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีรูปที่ 2.6 วงจรสมมูลของซีต้าคอนเวอร์เตอร์ งดเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.7.1 เงื่อนไขการทำงานของวงจรถูก ซีต้าคอนเวอร์เตอร์ ในการวิเคราะห์การทำงานของวงจรถูก ซีต้าคอนเวอร์เตอร์ จะต้องกำหนดให้วงจรทำงานในสภาวะคงตัว และกำหนดเงื่อนไขการทำงานของวงจรถูก ซีต้าคอนเวอร์เตอร์ เป็นดังนี้

1. ตัวเหนี่ยวนำมีขนาดใหญ่เป็นผลทำให้ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าคงที่
2. ตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่เป็นผลทำให้ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าคงที่
3. กระแสและแรงดัน ณ เวลาในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากัน
4. กำลังไฟฟ้าด้านเข้าจะเท่ากับกำลังไฟฟ้าด้านออก กรณีนี้จะไม่คำนึงถึงการสูญเสียที่เกิดจากการทำงานของวงจรถูก เนื่องจากอุปกรณ์ทุกตัวเป็นอุดมคติทำให้ประสิทธิภาพรวมของวงจรถูกเป็นร้อยเปอร์เซ็นต์
5. ช่วงเวลานำกระแสคือ DT และช่วงเวลาที่หยุดนำกระแสคือ (1-D) T

2.1.7.2 หลักการทำงานของวงจรถูก ซีต้าคอนเวอร์เตอร์ ขั้นตอนที่หนึ่งก็คือ การหาค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_{fly}$  โดยเริ่มพิจารณาจากสมการแรงดันวงนอกสุด โดยแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบจะเท่ากับศูนย์  $V_{L1}=V_{L2}=0$  และแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_{fly}$  สามารถคำนวณจากสมการที่ 2.9 ซึ่งได้ผลลัพธ์ดังสมการที่ 2.10

$$-V_s + V_{L1} - V_{c1} + V_{L2} + V_0 = 0 \quad (2.9)$$

$$-V_s - V_{c1} + V_0 = 0 \quad (2.10)$$

$$V_{c1} = V_0 + V_s \quad (2.11)$$

หลักการทำงานของวงจรถูก ซีต้าคอนเวอร์เตอร์ ขั้นตอนที่สอง เริ่มเมื่อสวิตช์นำกระแส ไดโอดจะไม่นำกระแส ซึ่งสามารถหาสมการของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ  $C_{fly}$  ได้ดังสมการที่ 2.11

$$i_{c1,on} = I_{L2} \quad (2.11)$$

หลักการทำงานของวงจรถูก ซีต้าคอนเวอร์เตอร์ ขั้นตอนที่สาม พิจารณาเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสองตัวจะไหลในทิศทางที่ทำให้ไดโอดนำกระแส ดังนั้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า กระแสไฟฟ้าในตัวเก็บประจุ  $C_{fly}$  จะเป็นดังสมการที่ 2.12  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i_{c1,off} = I_{L1} \quad (2.12)$$

หลักการการทำงานของวงจร ซีต้าคอนเวอร์เตอร์ ขั้นตอนที่สอง กำลังไฟฟ้าด้านเข้า เท่ากับกำลังไฟฟ้าด้านออก กรณีนี้จะไม่คำนึงถึงการสูญเสียที่เกิดจากการทำงานของวงจร เนื่องจากอุปกรณ์ทุกตัวเป็นอุดมคติทำให้ประสิทธิภาพรวมของวงจรเป็นร้อยเปอร์เซ็นต์

$$V_s I_{L1} = V_0 I_{L2} \quad (2.13)$$

หลักการการทำงานของวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ ขั้นตอนที่ยี่ห้า กระแสและแรงดันไฟฟ้า หากเทียบที่จุดใดๆ ในแต่ละคาบจะมีค่าเท่ากัน เพราะเป็นสภาวะอยู่ตัว กระแสเฉลี่ยในตัวเก็บประจุ จะมีค่าเท่ากับศูนย์ โดยได้จากสมการที่ 2.11 ซึ่งคิดขณะที่สวิตช์นำกระแส และสมการที่ 2.12 คิด ขณะที่สวิตช์ไม่นำกระแส

$$i_{c1,on}(DT) + i_{c1,off}(1-D)T = 0 \quad (2.14)$$

$$(-I_{L2})(DT) + (I_{L1})(1-D)T = 0 \quad (2.15)$$

$$\frac{I_{L1}}{I_{L2}} = \frac{D}{1-D} \quad (2.16)$$

หลักการการทำงานของวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ ขั้นตอนที่ยี่หก คือ กำลังไฟฟ้าด้านเข้า เท่ากับกำลังไฟฟ้าด้านออก จากสมการที่ 2.17

$$P_s = P_0$$

$$V_s I_{L1} = V_0 I_{L2} \quad (2.17)$$

$$\frac{I_{L1}}{I_{L2}} = \frac{V_0}{V_s} \quad (2.18)$$

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.10 และสมการที่ 2.13 จะได้อัตราขยายแรงดัน  
เอกสารในสมการที่ 2.14 งานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{V_0}{V_s} = \frac{D}{1-D} \quad (2.19)$$

2.1.7.3 ค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออก เนื่องจากในส่วนของวงจรด้านออก ของวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์จะคล้ายกับวงจรบักคอนเวอร์เตอร์ คือ มีวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบ LC และมีกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเช่นเดียวกับบักคอนเวอร์เตอร์ ดังนั้นการคำนวณหาค่า อัตราระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออก จะเหมือนกับวงจรบักคอนเวอร์เตอร์ คือ

$$\frac{\Delta V_0}{V_0} = \frac{1-D}{8L_2C_0f^2} \quad (2.20)$$

เมื่อคำนวณแรงดันระลอกคลื่นใน  $C_{fly}$  เมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  กับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ  $C_{fly}$  จะเท่ากัน และจากขั้นตอนการทำงานในข้อที่สองคือตัวเหนี่ยวนำมีขนาดใหญ่ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าคงที่ ดังสมการที่ 2.21 สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ 2.22

$$\Delta V_{c_{fly}} \approx \frac{1}{C_{fly}} \int_{DT}^T I_{L1} d(t) \quad (2.21)$$

$$\Delta V_{c_{fly}} \approx \frac{1}{C_{fly}} I_{L1} (1-D)T \quad (2.22)$$

จากสมการที่ (2.18) และ (2.19)

$$\frac{I_{L1}}{I_{L2}} = \frac{V_0}{V_s} = \frac{D}{1-D}$$

จัดรูปใหม่เพื่อหา  $I_{L1}$  และ  $V_0$  ได้เป็น

$$I_{L1} = \frac{V_0}{V_s} \times I_{L2}$$

$$V_0 = V_s \left( \frac{D}{1-D} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น จากสมการที่ 2.22 เป็น

$$\Delta V_{\text{fly}} \approx \frac{1}{C_{\text{fly}}} \left( \frac{V_{012}}{V_s} \right) \frac{1-D}{f} \quad (2.23)$$

และเมื่อกระแสไหลตมมีขนาดตรงกันกระแส  $L_2$

$$I_{L1} = \frac{V_0}{R}$$

$$\Delta V_{C_{\text{fly}}} \approx \frac{1}{C_{\text{fly}}} \left( \frac{1}{V_s} \right) \left( \frac{V_0}{R} \right) (V_s) \left( \frac{D}{1-D} \right) \left( \frac{1-D}{f} \right) \quad (2.24)$$

$$\Delta V_{C_{\text{fly}}} \approx \frac{1}{C_{\text{fly}} R} \left( \frac{1}{V_s} \right) (V_s) \left( \frac{D}{1-D} \right) (V_s) \left( \frac{1-D}{f} \right)$$

สรุป คือ

$$\Delta V_{C_{\text{fly}}} \approx \frac{V_s}{C_{\text{fly}} R f} \left( \frac{D^2}{1-D} \right) \quad (2.25)$$

หรือกล่าวได้ว่าระลอกคลื่นของแรงดัน  $C_{\text{fly}}$  คือ

$$\Delta V_{C_{\text{fly}}} \approx \frac{V_0 D}{C_{\text{fly}} R f} \quad (2.26)$$

ทำนองเดียวกันเมื่อหาระลอกคลื่นของกระแส จะหาได้จากสมการแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.27 และ 2.28

$$V_{L1} = V_s = L_1 \frac{di_{L1}}{dt} \quad (2.27)$$

$$\frac{\Delta i_{L1}}{DT} = \frac{V_s}{L_1}$$

$$\Delta i_{L1} = \frac{V_s}{L_1} DT = \frac{V_s D}{L_1 f} \quad (2.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำนองเดียวกันเมื่อคำนวณหากระแสไหลกลับใน  $L_2$  เมื่อสวิตช์นำกระแส จะหาได้จาก สมการแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ  $L_2$  สามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ 2.29 และ 2.30

$$V_{L2} = V_0 + (V_s - V_0) = L_2 \frac{di_{L2}}{dt} \quad (2.29)$$

$$\Delta i_{L2} = \frac{V_s}{L_2} DT = \frac{V_s D}{L_2 f} \quad (2.30)$$

การทำงานในโหมดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบต่อเนื่อง เงื่อนไขที่ทำให้ได้ตัวเหนี่ยวนำที่ออกแบบได้เล็กที่สุดและทำงานโหมดกระแสต่อเนื่อง อ้างอิง [1]

$$L_{1,\min} = \frac{(1-D)^2}{2Df} \times R \quad (2.31)$$

$$L_{2,\min} = \frac{(1-D)}{2f} \times R \quad (2.32)$$

$$C_{\text{fly}} = \frac{I_0 \times V_0}{(V_s + V_0) \times f \times V_{\text{ripple}}} \quad (2.33)$$

$$C_{\text{in}} = I_0 \times \frac{1}{2 \times f \times I_{\text{ripple}} \times V_s} \quad (2.34)$$

$$C_o = \frac{(1-D)}{8L_2 f^2 \times \frac{\Delta V_o}{V_0}} \quad (2.35)$$

## 2.2 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของหลอดแอลอีดี [3]

### 2.2.1 นิยามของไดโอดเปล่งแสง

ไดโอดเปล่งแสงหรือ LED (Light-emitting diode) คืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จำพวกสารกึ่งตัวนำที่สามารถเปล่งแสงได้ ไดโอดเปล่งแสงประกอบด้วยด้วยสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-Type) ซึ่งมีโฮล (Hole) เป็นพาหะข้างมากและชนิดเอ็น (N-Type) ซึ่งมีอิเล็กตรอนเป็นพาหะข้างมาก ต่อกันเป็นรอยต่อพีเอ็น (P-N Junction) จะเปล่งแสงออกมาได้ก็ต่อเมื่อได้รับการไบอัสตรง (Forward Bias) โดยกระแสไบอัสตรงจะไปกระตุ้นอิเล็กตรอนและโฮลให้ข้ามรอยต่อพีเอ็นมาเพื่อรวมตัวกัน ในการรวมตัวกันนี้จะปลดปล่อยพลังงานในรูปของอนุภาคของแสงหรือโฟตอน (Photon) โดยแสงที่เปล่งออกมาประกอบด้วยคลื่นความถี่เดียวและเฟสต่อเนื่องกันซึ่งแตกต่างกับแสงธรรมดาที่

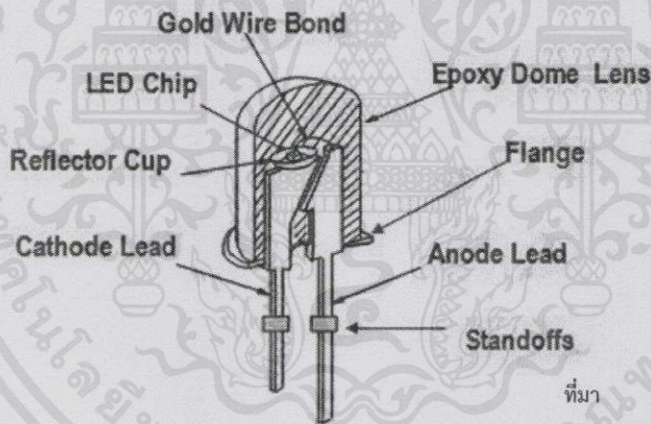
ประกอบด้วยคลื่นซึ่งมีความถี่และเฟสต่าง ๆ กันมารวมกัน ไดโอดเปล่งแสงสามารถให้แสงตั้งแต่ย่านอินฟราเรดขึ้นไปถึงย่านอัลตราไวโอเลต

### 2.2.2 โครงสร้างของไดโอดเปล่งแสง

ไดโอดเปล่งแสงประกอบด้วย

1. ชิปสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor chip)
2. กรวยสะท้อนแสง (Reflector Cup)
3. สวดเชื่อมต่อกับชิปสารกึ่งตัวนำ (Bonding Wire)
4. เลนส์ครอบบนอก (Epoxy Dome Lens)

โครงสร้างที่เป็นหัวใจหลักของไดโอดเปล่งแสงคือ ชิปสารกึ่งตัวนำ แสดงดังรูปที่ 2.1 ภายในชิปจะมีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเป็นชั้นผิวที่มีอิเล็กตรอนส่วนเกิน ส่วนอีกชั้นผิวหนึ่งจะอยู่ด้านบนเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่จัดรอยของชั้นผิวเอ็นและพื้นนี้เรียกว่า ชั้นผิวทำงาน (Active region) ซึ่งแสงสว่างจะเปล่งออกมาจากจุดนี้เมื่อไดโอดเปล่งแสงได้รับการไบอัสแรงดันไฟฟ้าจะไปจับอิเล็กตรอนและโฮลเข้าไปในชั้นผิวทำงานให้ชั้นทั้งสองมาบรรจบกัน เมื่อชั้นทั้งสองบรรจบกันก็จะปล่อยโฟตอนออกมา โครงสร้างของไดโอดเปล่งแสงจะถูกหุ้มไว้ด้วยเลนส์ที่ทำจากอีพอกซีเพื่อกระจายแสงในทิศทางต่างๆและเป็นส่วนที่กรองเอาช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการออกมา นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันตัวชิปที่อยู่ภายในอีกด้วย

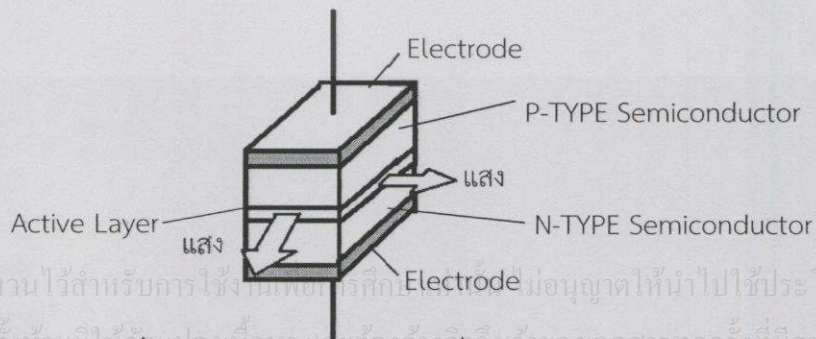


ที่มา

<http://www.gets.co.th/knowledge.p>

[hp?txtNo=17](http://www.gets.co.th/knowledge.php?txtNo=17) พ.ศ. 2558

รูปที่ 2.7 โครงสร้างของไดโอดเปล่งแสง



รูปที่ 2.8 โครงสร้างภายในชิปสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะการศึกษา กรุณาอย่าเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

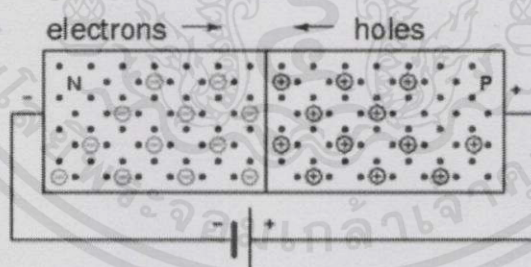
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และใส่เครื่องหมายลิขสิทธิ์ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.3 หลักการทำงานเบื้องต้นของไดโอดเปล่งแสง

การจะนำไดโอดเปล่งแสงไปใช้งานจะต้องมีการจ่ายไบอัสหรือจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้ตัวไดโอดเปล่งแสงเพื่อให้ไดโอดเปล่งแสงนำกระแสและหยุดกระแส ซึ่งสามารถจ่ายไบอัสได้สองวิธีคือ ไบอัสตรง (Forward Bias) และไบอัสกลับ (Reverse Bias)

1. ไบอัสตรง (Forward Bias) เมื่อสารกึ่งตัวนำชนิดพีซึ่งมีโฮลเป็นพาหะข้างมาก เชื่อมต่อการสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นซึ่งมีอิเล็กตรอนเป็นพาหะข้างมาก (พาหะ คือ โฮลหรืออิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่) จะทำให้อิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อไปหาโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดพีซึ่งก็เปรียบเสมือนว่าโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดพีเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อไปหาสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น การเคลื่อนที่ของพาหะส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นบริเวณใกล้รอยต่อพีเอ็น ในบริเวณใกล้รอยต่อนี้จะเป็นบริเวณปลอดพาหะเพราะมีโฮลกับอิเล็กตรอนเท่ากันทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้น สนามไฟฟ้านี้จะต้านการเคลื่อนที่ของพาหะส่วนใหญ่ของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดไม่ให้เคลื่อนที่ผ่านรอยต่อ เรียกสภาวะนี้ว่าสภาวะสมดุล

เมื่อไดโอดเปล่งแสงได้รับไบอัสตรง แสดงดังรูปที่ 2.3 โดยต่อศักย์บวกของแหล่งจ่ายไฟฟ้าเข้ากับขานแอโนดและต่อศักย์ลบเข้ากับขาคะโทด ไฟลบบจะไปผลักอิเล็กตรอนอิสระในสารชนิดเอ็นให้เคลื่อนที่ได้ ในเวลาเดียวกันไฟบวกที่จ่ายให้สารชนิดพีจะดึงดูดอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่เข้ามาหา และจะผลักโฮลให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้าอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านสารชนิดพีเข้าศักย์ไฟบวกของแหล่งจ่าย และเคลื่อนที่ผ่านจากรอยต่อไปยังขาคะโทดของสารชนิดเอ็น เกิดกระแสไหลผ่านไดโอด แรงดันไบอัสตรงที่จ่ายให้ไดโอดจะต้องจ่ายแรงดันไบอัสมากกว่าศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมอยู่ตรงรอยต่อ ค่าแรงดันนี้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่ใช้ผลิตไดโอด ดังนั้นการจ่ายแรงดันไบอัสตรงจะต้องจ่ายให้มากกว่าศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมรอยต่อพีเอ็นอยู่



ที่มา

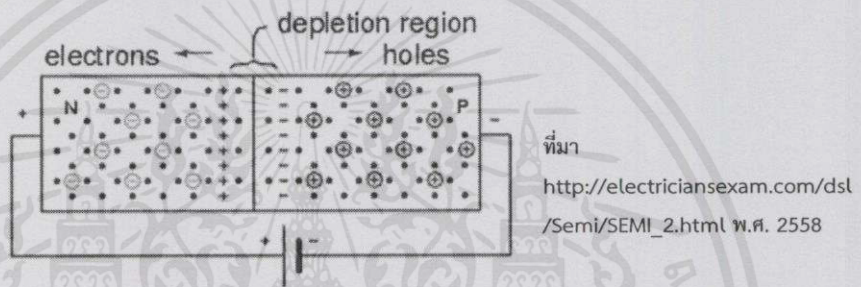
[http://electriciansexam.com/dsl/Semi/SEMI\\_2.html](http://electriciansexam.com/dsl/Semi/SEMI_2.html) พ.ศ. 2558

รูปที่ 2.9 การจ่ายไบอัสตรงให้ไดโอด

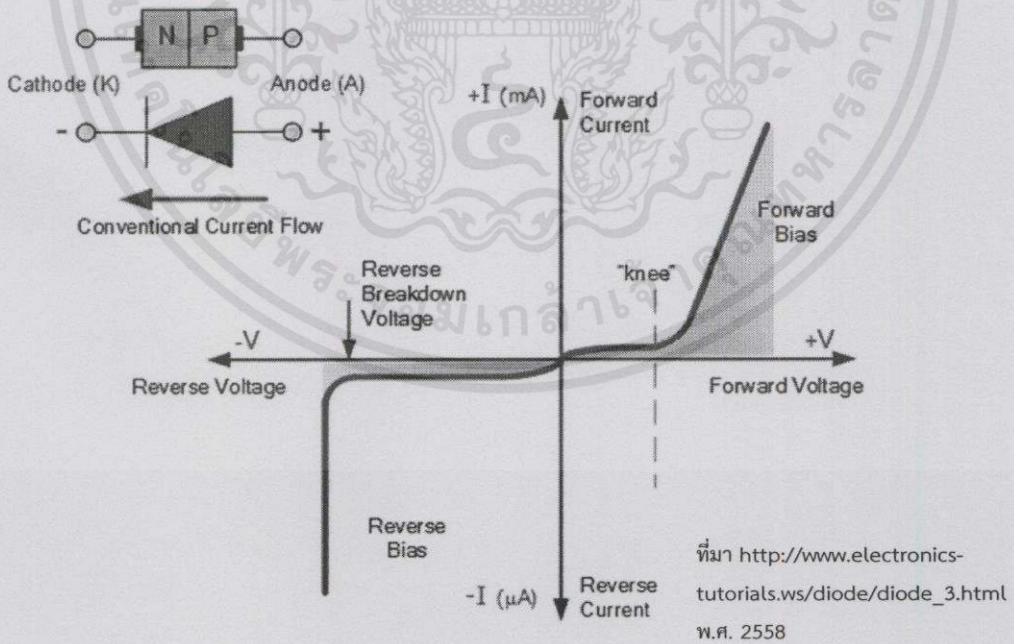
2. ไบอัสกลับ (Reverse Bias) เป็นการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับไดโอดเปล่งแสงแบบกลับขั้วคือจ่ายศักย์ไฟฟ้าบวกให้ขั้วแคโทดและจ่ายไฟลบให้ขั้วแอโนดแสดงดังรูป 2.4 จะมีผลให้เกิดการทำงานคือศักย์ไฟบวกที่จ่ายให้ขาคะโทดจะดึงดูดอิเล็กตรอนอิสระในสารชนิดเอ็นเคลื่อนที่ออกจากห่างรอยต่อพีเอ็น ส่วนศักย์ไฟลบที่จ่ายให้ขานแอโนดจะดึงโฮลจากสารชนิดพีเคลื่อนที่ออกจากห่างรอยต่อพีเอ็นเช่นกันทำให้รอยต่อกว้างมากขึ้น อิเล็กตรอนจึงไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อพีเอ็นได้ทำให้ไม่มีไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสไหลในตัวไดโอด แต่อาจจะมีกระแสรั่วไหล (Leakage Current) บ้างเล็กน้อย การไบอัสกลับที่แรงดันสูงๆเป็นระยะเวลาานจะทำให้ไดโอดเปล่งแสงเสียหายได้

จากรูปที่ 2.5 เมื่อจ่ายแรงดันไบอัสตรงกับไดโอดในช่วงเริ่มแรกจะยังไม่นำกระแส เพราะแรงดันไบอัสตรงยังไม่สามารถทำลายศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อพีเอ็นได้ เราต้องให้แรงดันไฟฟ้าไบอัสตรงกับไดโอดจนถึงค่าแรงดันคัทอิน (Cut-in Voltage) จึงจะทำให้ศักย์ไฟฟ้ารอยต่อพีเอ็นลดลงซึ่งจะทำให้ไดโอดนำกระแสได้ ในทำนองเดียวกันเมื่อจ่ายแรงดันไบอัสกลับให้ไดโอด จะไม่มีกระแสไหลในวงจร มีเพียงกระแสรั่วไหลเพียงเล็กน้อยผ่านไดโอดซึ่งกระแสดังกล่าวมีจำนวนน้อยมากเป็นไมโครแอมป์เปรียบได้ว่าขณะไดโอดได้รับไบอัสกลับจะไม่นำกระแสแน่นอน แต่ถ้าเพิ่มแรงดันไบอัสกลับให้สูงมากขึ้นจนถึงแรงดันค่าหนึ่งเรียกว่าแรงดันพังทลาย (Breakdown Voltage) ซึ่งไดโอดจะนำกระแสได้ ในสภาวะนี้รอยต่อพีเอ็นของไดโอดจะทะลุและมีกระแสไหลผ่านรอยต่อพีเอ็นจำนวนมากซึ่งในการใช้งานทั่วไปจะไม่ยอมให้แรงดันไบอัสกลับแก่ไดโอดเกินแรงดันพังทลาย



รูปที่ 2.10 การจ่ายไบอัสย้อนกลับให้ไดโอด

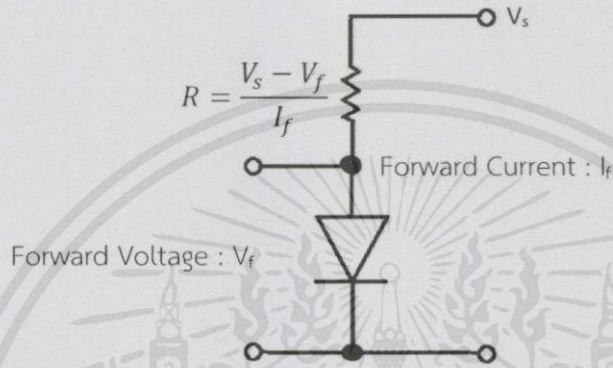


รูปที่ 2.11 แรงดันและกระแสของไดโอดเมื่อได้รับการไบอัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับคนใช้งานเพื่อการศึกษานำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.4 การนำไดโอดเปล่งแสงไปใช้งาน

ในการนำไดโอดเปล่งแสงไปใช้งานจะต้องต่อตัวต้านทานจำกัดกระแสอนุกรมเข้ากับไดโอดเปล่งแสงด้วยเพื่อป้องกันไม่ให้ไดโอดเปล่งแสงเสียหาย รูปที่ 2.5 แสดงการหาค่าตัวต้านทาน (R) เพื่อให้ได้กระแสที่เหมาะสมแก่ไดโอดเปล่งแสง โดยตัวต้านทานจะต่อที่ขั้วแอโนดหรือแคโทดของไดโอดเปล่งแสงก็ได้ ความสว่างของไดโอดเปล่งแสงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสที่ไหลผ่านตัวมัน โดยทั่วไปไดโอดเปล่งแสงจะสามารถทนกระแสได้สูงสุดประมาณไม่เกิน 30-40 มิลลิแอมป์



รูปที่ 2.12 การหาค่าความต้านทานเมื่อทราบค่าแรงดันและกระแส

### 2.2.5 ข้อดีของหลอดไฟแอลอีดี

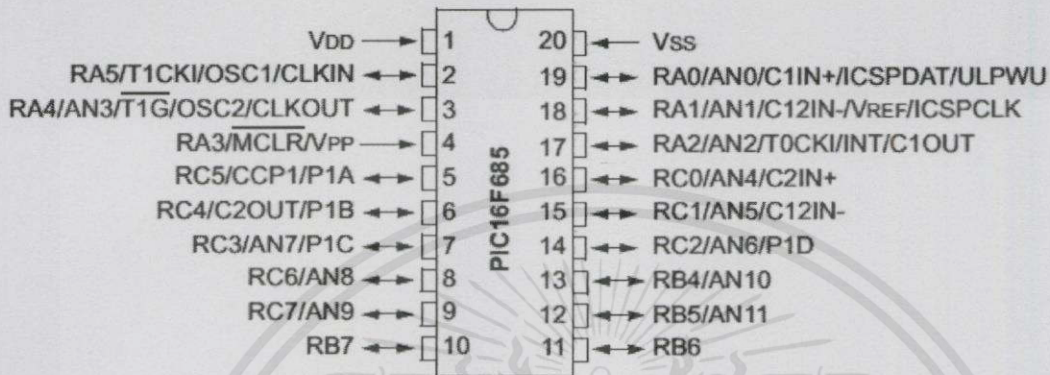
หลอดไฟแอลอีดีสามารถนำมาใช้แทนหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้ทั่วไปได้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้แทนหลอดเมทัลฮาไลด์ หลอดฮาโลเจน หรือหลอดไฟชนิดอื่นที่ต้องการความสว่างสูงได้ ซึ่งหลอดไฟแอลอีดีมีข้อดีดังนี้

1. มีประสิทธิภาพในการให้แสงสว่างสูงเมื่อเทียบกับหลอดเผาไส้
2. อายุการใช้งานยาวนานกว่าหลอดฟลูออเรสเซนต์หรือหลอดเผาไส้
3. มีความทนทานต่อการสั่นสะเทือนมากกว่า
4. ขณะใช้งานปล่อยความร้อนออกมาน้อยมาก
5. ทำงานที่ไฟฟ้ากระแสตรงระดับแรงดันต่ำ
6. ไม่มีการแผ่รังสีอัลตราไวโอเล็ต ปราศจากสารปรอทและสารกลุ่มฮาโลเจนที่เป็นพิษ
7. มีแสงหลายสีและปรับหรี่แสงได้ง่าย
8. สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) [4]

pic16f685 เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล pic16f มี 20 pin ประมวลผล 8 bit ที่มีความเร็วในกระประมวลผล 200 ns instruction cycle สามารถทำการอินเตอร์รัพได้ ซอฟต์แวร์สามารถเลือกความถี่ได้ตั้งแต่ 8 MHz to 32 kHz มีขา analog to digital 12 ขา



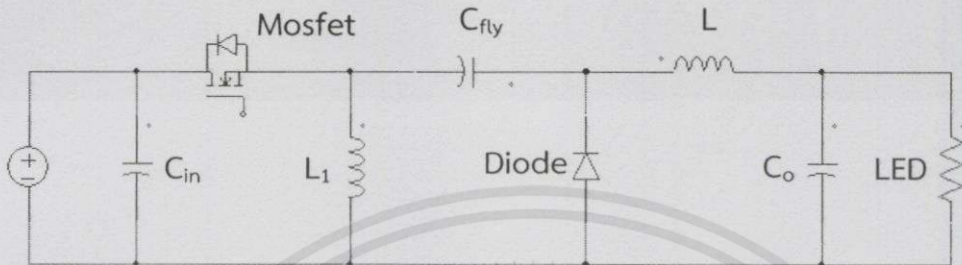
รูปที่ 2.13 ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ PIC16F685

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## การออกแบบและสร้างวงจรขับแอลอีดี

### 3.1 ซีต้าคอนเวอร์เตอร์(Zeta converter)



รูปที่ 3.1 วงจรสมมูลของ Zeta converter

อุปกรณ์ภายในตัววงจรจะประกอบไปด้วยตัวเหนี่ยวนำ (L) สองตัว ตัวเก็บประจุ (C) สามตัว มอสเฟต 1 ตัว และไดโอด 1 ตัว การสร้างวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ จะต้องประกอบไปด้วยวงจรควบคุมโดยการเขียนโปรแกรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของวงจร วงจรขับเคลื่อน และวงจรไฟเลี้ยง

#### 3.1.1 เงื่อนไขการทำงานของวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์

การวิเคราะห์การทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์ ในช่วงที่เป็นสถานะอยู่ตัว (steady state) จะมีการกำหนดเงื่อนไขการทำงานของวงจรซึ่งโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์ดังนี้

1. ตัวเหนี่ยวนำมีขนาดใหญ่เป็นผลทำให้ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าคงที่
2. ตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่เป็นผลทำให้ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าคงที่
3. กระแสและแรงดันไฟฟ้า ณ เวลาซ้ำกันในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากัน
4. กำลังไฟฟ้าด้านเข้าเท่ากับกำลังไฟฟ้าด้านออก กรณีนี้จะไม่คำนึงถึงการสูญเสียที่เกิดจาก

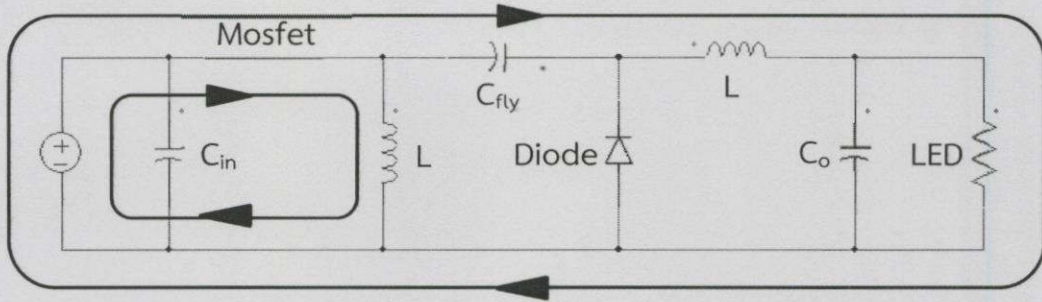
การทำงานของวงจร เนื่องจากอุปกรณ์ทุกตัวเป็นอุดมคติทำให้ประสิทธิภาพรวมของวงจรเป็นหนึ่งในร้อยเปอร์เซ็นต์

5. ช่วงเวลานำกระแสคือ  $DT$  และช่วงเวลาที่หยุดนำกระแสคือ  $(1 - D)T$

#### 3.1.2 หลักการทำงานของวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์

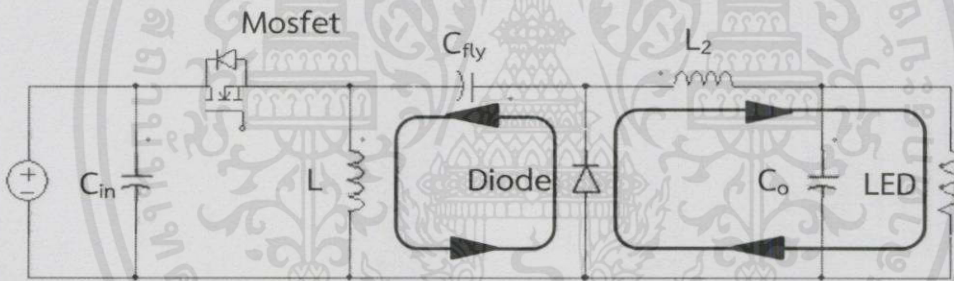
การวิเคราะห์การทำงานของวงจรในแต่ละโหมดการทำงานจะประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอนหลักๆ คือ ขณะมอสเฟตนำกระแส กระแสจะไหลสองเส้นทาง เส้นทางแรกจากแหล่งจ่ายผ่านสวิตซ์ซึ่งตัวแรก ไปยังตัวเก็บประจุ  $C_{fly}$  ผ่านตัวเหนี่ยวนำทางด้านขาออก ( $L_2$ ) และไปยังโหลด และจะวนกลับมาที่แหล่งจ่ายผ่านกราวด์ เส้นทางที่สองจากแหล่งจ่ายผ่านมอสเฟตไปตัวเหนี่ยวนำ ( $L_1$ ) และกลับมายังแหล่งจ่ายผ่านกราวด์ ดังแสดงในรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ หากท่านสนใจในการนำเอกสารนี้ไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ กรุณาติดต่อขอสงวนสิทธิ์ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 วงจรขณะมอสเฟตนำกระแส

ในขณะที่มอสเฟตหยุดนำกระแส ตัวเก็บประจุทางด้านขาเข้าจะถูกตัดออกจากระบบแต่กระแสยังคงไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสองเส้นทาง เส้นทางแรกจากตัวเหนี่ยวนำทางด้านออก (L<sub>2</sub>) ไหลผ่านโหลดและลงกราวด์ และผ่านไดโอดกลับมายังตัวเหนี่ยวนำทางด้านออก เส้นทางที่สองจากตัวเหนี่ยวนำ (L<sub>1</sub>) กระแสไหลไปยังตัวเก็บประจุ (C<sub>fly</sub>) ผ่านไดโอดกลับมายังตัวเหนี่ยวนำ ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรขณะมอสเฟตไม่นำกระแส

### 3.2 การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ LC

#### 3.2.1 การออกแบบตัวเก็บประจุที่ด้านเข้า (C<sub>in</sub>) จากสมการที่ 2.34

$$C_{in} = \frac{I_o}{2 \times f \times I_{ripple} \times V_s}$$

แรงดันด้านเข้า 12 V กำลังด้านออก 10 W

I<sub>o</sub> = 0.384 A (กระแสด้านออก)

f = 20 kHz (ความถี่สวิตซ์ซิ่ง)

V<sub>s</sub> = 12 V (แรงดันขาเข้า)

I<sub>ripple</sub> = 0.001 A (กระแสริปเปิ้ล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะทางเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_{in} = \frac{0.384}{2 \times 20000 \times 0.001 \times 12}$$

$$C_{in} = 800 \mu\text{F}$$

เลือกใช้ตัวเก็บประจุด้านเข้า ( $C_{in}$ ) 1000  $\mu\text{F}$

3.2.2 การออกแบบตัวเก็บประจุที่อยู่ระหว่างกลาง ( $C_{fly}$ ) จากสมการที่ 2.26

$$C_{fly} = \frac{V_o D}{R \times f \times V_{ripple}}$$

$I_o = 0.384 \text{ A}$  (กระแสด้านออก)

$V_o = 28.12 \text{ V}$  (แรงดันด้านออก)

$R = 73 \text{ V}$  (ความต้านทานของโหลด)

$f = 20 \text{ kHz}$  (ความถี่สวิตซ์ซิ่ง)

$V_{ripple} = 0.05 \text{ A}$  (แรงดันริบเปิ้ล)

$D = 0.7$  (ค่าดีวตีไซเคิล)

$$C_{fly} = \frac{28.12 \times 0.7}{73 \times 20000 \times 0.05} \quad (3.5)$$

$$C_{fly} = 270 \mu\text{F}$$

เลือกใช้ตัวเก็บประจุที่อยู่ระหว่างกลาง ( $C_{fly}$ ) 1000  $\mu\text{F}$

3.2.3 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  จากสมการ 2.31

$$L_1 = \frac{(1 - D)^2}{2 D f} \times R$$

$R = 73 \text{ V}$  (ความต้านทานของโหลด)

$f = 20 \text{ kHz}$  (ความถี่สวิตซ์ซิ่ง)

$D = 0.7$  (ค่าดีวตีไซเคิล)

$$L_1 = \frac{(1 - 0.7)^2}{2 \times 0.7 \times 20000} \times 73$$

$$L_1 = 235 \mu\text{H}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 เลือกใช้ตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  เท่ากับ 390  $\mu\text{H}$   
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ  $L_2$  จากสมการที่ 2.32

$$L_2 = \frac{(1 - D)}{2f} \times R$$

$R = 73 \text{ m}\Omega$  (ความต้านทานของโหลด)

$f = 20 \text{ kHz}$  (ความถี่สวิตซ์ซิ่ง)

$D = 0.7$  (ค่าตัวดีไซเคิล)

$$L_2 = \frac{(1 - 0.7)}{2 \times 20000} \times 73$$

$$L_2 = 549 \mu\text{H}$$

เลือกใช้ตัวเหนี่ยวนำ  $L_2$  เท่ากับ  $390 \mu\text{H}$

3.2.5 การออกแบบตัวเก็บประจุด้านออก ( $C_o$ ) จากสมการที่ 2.35

$$C_o = \frac{(1 - D)}{8L_2f^2 \times \frac{\Delta V_o}{V_o}}$$

$V_o = 28.46 \text{ V}$  (แรงดันด้านออก)

$f = 20 \text{ kHz}$  (ความถี่สวิตซ์ซิ่ง)

อัตราการสั่นคลอนแรงดันไฟฟ้าด้านออก =  $0.1 \%$

$D = 0.7$  (ค่าตัวดีไซเคิล)

$L_2 = 390 \mu\text{H}$

$$C_o = \frac{(1 - 0.54)}{8(390 \times 10^{-6}) \times (20000^2) \times 0.001}$$

$$C_o = 369 \mu\text{F}$$

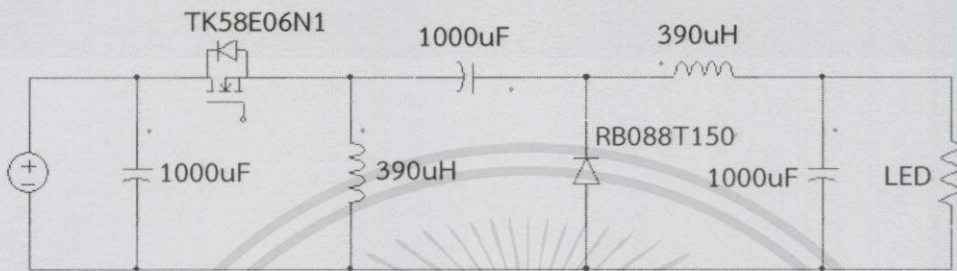
เลือกใช้ตัวเก็บประจุด้านออก ( $C_o$ )  $1000 \mu\text{F}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

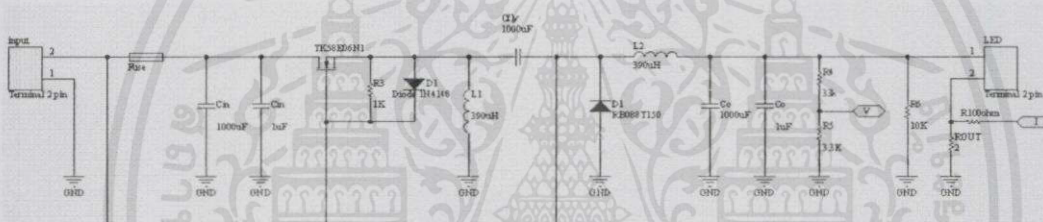
### 3.3 การออกแบบวงจรควบคุมการทำงานของวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์

ในวงจรจะประกอบไปด้วยวงจรกำลังคือวงจรถักคอนเวอร์เตอร์ และวงจรควบคุมที่ประกอบไปด้วยวงจรไฟเลี้ยง วงจรควบคุมการทำงาน วงจรชั้บเกต วงจรตรวจจับสัญญาณ การทำงานของแต่ละวงจรสามารถแบ่งออกได้เป็นดังนี้

#### 3.3.1 วงจรกำลังของวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.4 วงจรสมมูลของซีต้าคอนเวอร์เตอร์

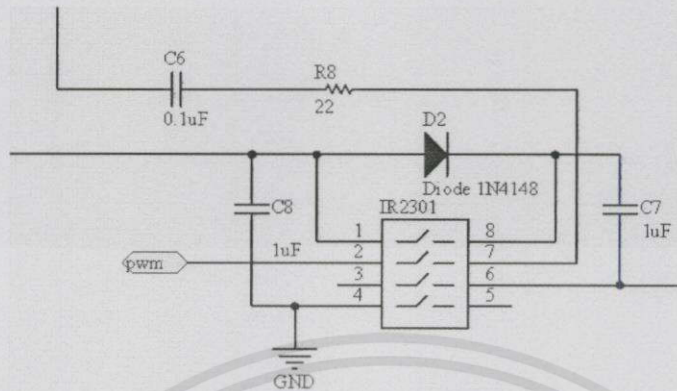


รูปที่ 3.5 วงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ที่ออกแบบ

วงจรกำลังประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุขนาด  $1000 \mu\text{F}$  3 ตัว ตัวเหนี่ยวนำขนาด  $390 \mu\text{H}$  2 ตัว อุปกรณ์สวิตช์ (มอสเฟต TK58E06N1) 1 ตัว ซึ่งมีค่า  $R_{DS(ON)} = 4.4 \text{ m}\Omega$  พิกัดแรงดัน  $60 \text{ V}$  และพิกัดกระแส  $58 \text{ A}$  และ Schottky Diode (RB088T150) 1 ตัว ซึ่งมีค่าแรงดันตกคร่อมขณะนำกระแส =  $0.275 \text{ V}$  พิกัดแรงดัน  $150 \text{ V}$  และพิกัดกระแส  $10 \text{ A}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

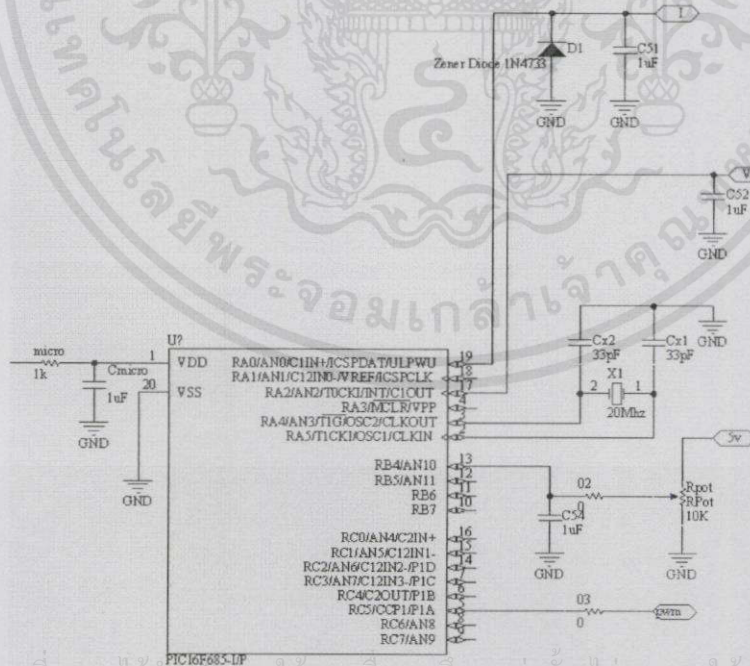
3.3.2 วงจรขับเคลื่อน (Gate drive)



รูปที่ 3.6 วงจรขับเคลื่อน

วงจรถูกขับเคลื่อนจะประกอบไปด้วย IC ที่ใช้ในการยกระดับแรงดัน จากไมโครคอนโทรลเลอร์เป็น 12 V เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนของมอเตอร์ โดย IC ที่ใช้เบอร์ IR2301 ไฟเลี้ยงที่ใช้จะอยู่ในช่วง 5 - 20 V ตัววงจรจะประกอบไปด้วย Diode 1N4148 เป็นชนิด Fast switching diode และ ตัวเป็นประจุ C<sub>7</sub> ซึ่งทำหน้าที่ในการ boost แรงดันให้กับขาเกตทางด้าน High เนื่องจากทางด้านขา High ตัวมอเตอร์ ขาดขอสไม่ได้ต่อลงกราวด์ จึงจำเป็นที่จะต้องมีการต่อ Diode และ ตัวเก็บประจุ เข้าไปเพื่อช่วยในการ boost แรงดันขาเกต

3.3.3 วงจรควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)

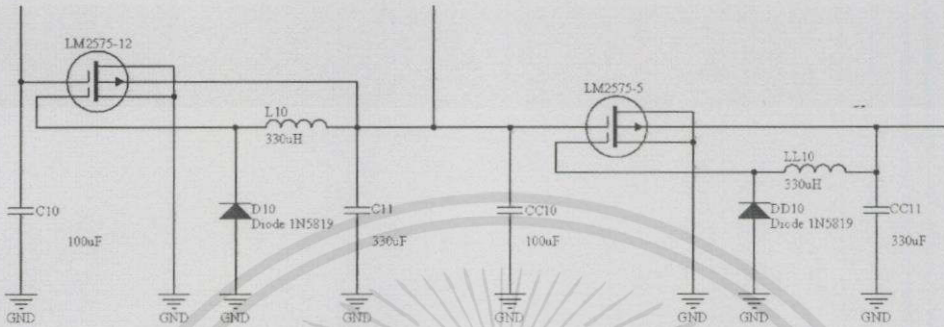


รูปที่ 3.7 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์มี pic16f685 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ประมวลผลเพื่อควบคุมให้ กระแสด้านออกมีค่าตามที่ต้องการ โดยจะมีการรับค่าแรงดันที่ได้จากการตรวจจบบรรทัดที่ด้านออก (ขา19) และค่าแรงดันอ้างอิงที่ใช้ในการควบคุม(ขา13)

### 3.3.4 วงจรไฟเลี้ยง (Regulators)

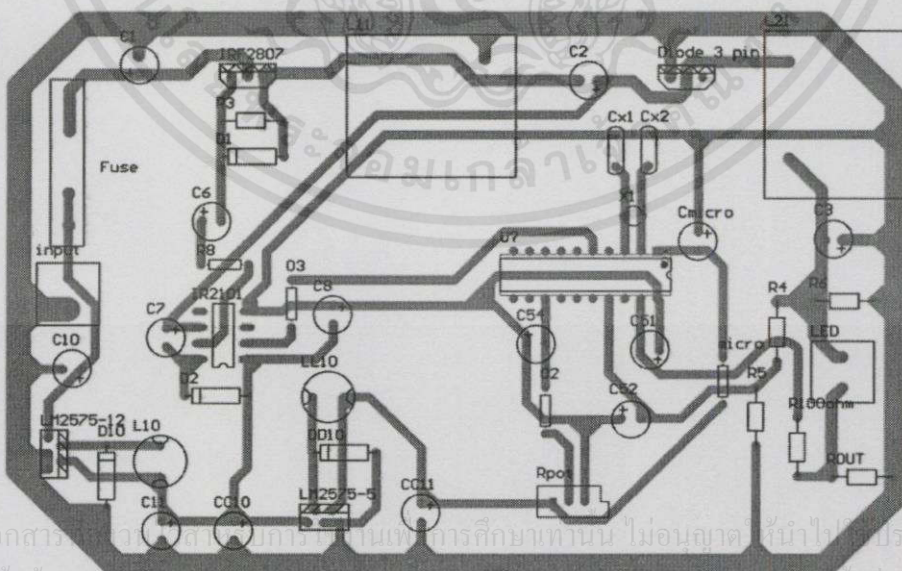


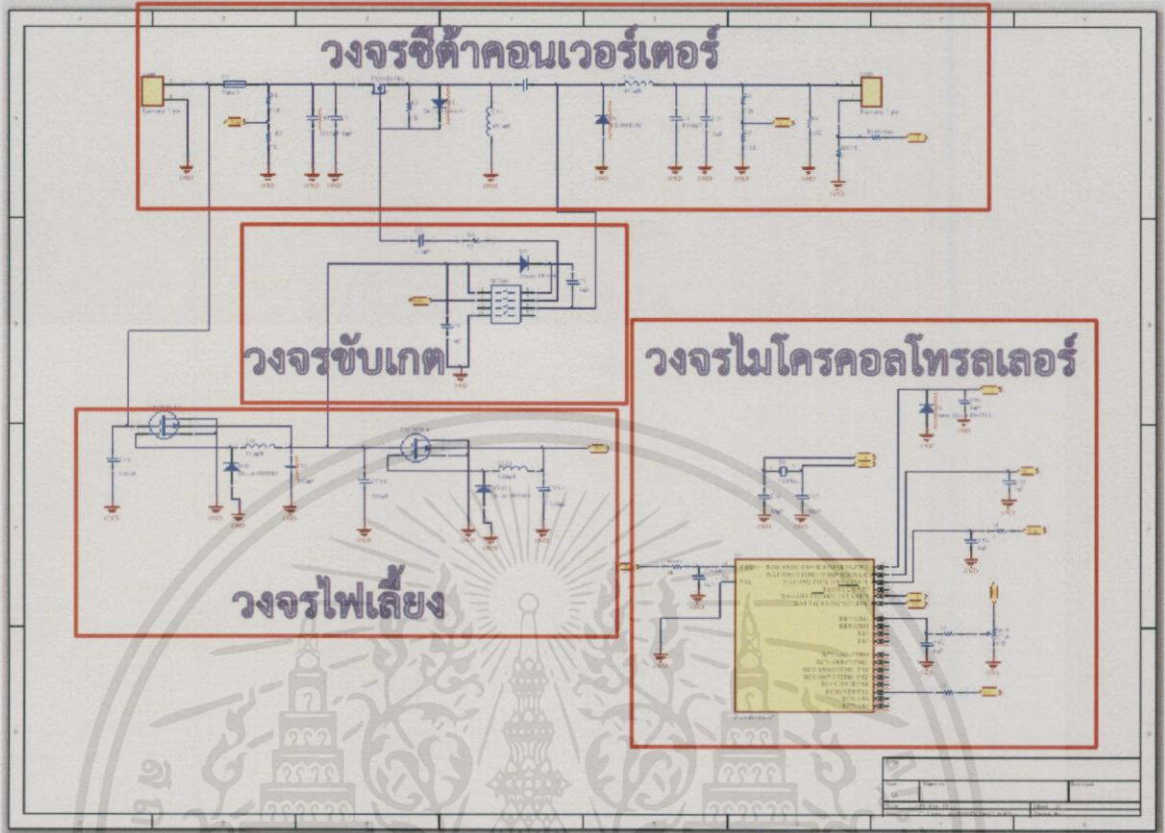
รูปที่ 3.8 วงจรไฟเลี้ยง

วงจรไฟเลี้ยงประกอบด้วย Switching regulators step down คือ lm2575-12 ทำหน้าที่แปลงแรงดันจากแหล่งจ่ายให้กลายเป็น 12 V เพื่อนำไปใช้กับไอซี IR2301 ซึ่งเป็นวงจรขับเคลื่อน และ lm2575-05 ทำหน้าที่แปลงแรงดัน 12 V จาก lm2575-12 ให้กลายเป็น 5 V เพื่อนำไปใช้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ pic16f685 ซึ่งเป็นวงจรควบคุม

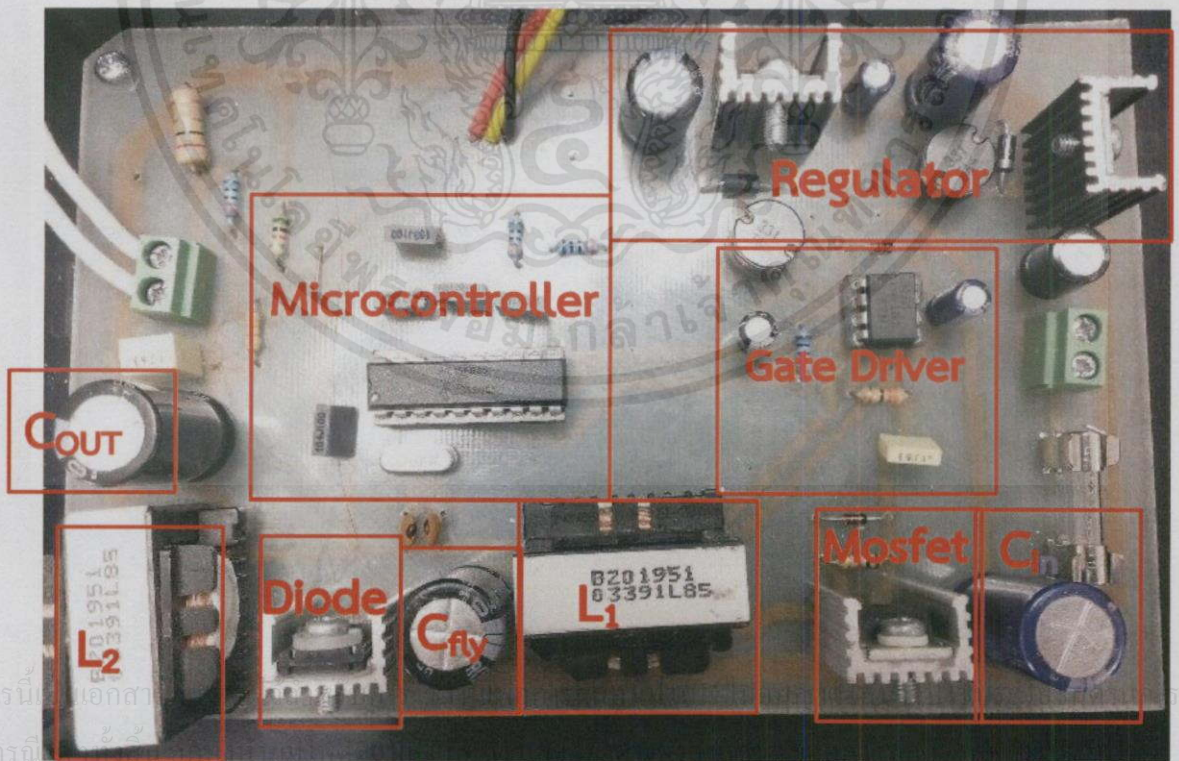
### 3.4 การออกแบบวงจร

ลายวงจรของวงจรซีดีคอนเวอร์เตอร์ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Altium Designer ซึ่งในการออกแบบลายวงจรต้องคำนึงถึงการเลือกขนาดอุปกรณ์ และจัดวางจัดวางให้เหมาะสม





รูปที่ 3.10 Schematic ของวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.11 วงจรจริงที่ได้ทำการออกแบบ

### 3.5 การออกแบบการกำหนดค่ากระแสต้านออกของวงจรเพื่อนำไปใช้กับหลอดไฟ LED

#### 3.5.1 กระบวนการควบคุมวงจรเพื่อให้กระแสขาออกคงที่

เทคนิคการควบคุมกระแสจะใช้การปรับค่าดิวตี้ไซเคิลเพื่อควบคุมกระแสขาออกเทียบกับแรงดันอ้างอิงซึ่งปรับค่าได้ โดยอาศัยตัวต้านทานขนาด  $2 \Omega$  เป็นเซนเซอร์ตรวจจับกระแสเนื่องจากกระแสขาออกมีค่าต่ำ จากนั้นใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์วัดแรงดันและหาค่าย้อนกลับเป็นกระแสขาออก การส่งสัญญาณ PWM จะใช้ความถี่ 20 kHz และหน่วงเวลา 1 รอบของความถี่ PWM เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงดิวตี้ไซเคิลเร็วเกินไปและควบคุมดิวตี้ไซเคิลไม่ให้เกิน 80% เพื่อป้องกันตัวเหนี่ยวนำอิ่มตัว ข้อดีของวิธีการดังกล่าวคือระบบจะมีการตอบสนองอย่างรวดเร็วแต่ดิวตี้ไซเคิลจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาทำให้กระแสขาออกมีการกระเพื่อมเล็กน้อย ข้อเสียของการใช้ตัวต้านทานส่งกระแสน้อยกลับคือตัวต้านทานจะมีค่าเปลี่ยนแปลงเนื่องจากอุณหภูมิทั้งจากการนำกระแสและสิ่งแวดล้อม

#### 3.5.2 ขั้นตอนการทำงานของวงจรควบคุม

1. เมื่อรับแรงดันขาเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งสัญญาณ PWM ที่ดิวตี้ไซเคิล 20% เพื่อให้เกิดกระแสย้อนกลับเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์
2. ตรวจสอบกระแสน้อยกลับเทียบกับแรงดันอ้างอิง จากนั้นเพิ่มหรือลดดิวตี้ไซเคิลเพื่อควบคุมกระแสขาออก
3. ตรวจสอบแรงดันขาออกว่าเกินกว่าที่กำหนดหรือไม่ ถ้าเกินที่กำหนดให้หยุดการส่งสัญญาณ PWM และแสดงไฟเตือน
4. วนรอบการทำงานซ้ำโดยรับค่าแรงดันอ้างอิง ตรวจสอบกระแสขาออก ตรวจสอบแรงดันขาออก ปรับค่าดิวตี้ไซเคิลตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การจำลองและการทดลอง

ในบทนี้จะแยกออกเป็นสองส่วนหลักๆ ได้แก่การจำลองและการทดลอง การจำลองจะใช้โปรแกรม PSIM จำลองวงจร Zeta Converter เพื่อหา ripple current, ripple voltage แรงดันและกระแสตกคร่อมมอเตอร์เฟส, แรงดันและกระแสตกคร่อมไดโอด และ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ส่วนการทดลองจะทดลองกับวงจรจริงโดยมีหัวข้อทดลองได้แก่ ประสิทธิภาพของวงจร, ripple current, ripple voltage, ความสูญเสียของอุปกรณ์, ความร้อนที่เกิดขึ้นในวงจร และการทดลองทางแสง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

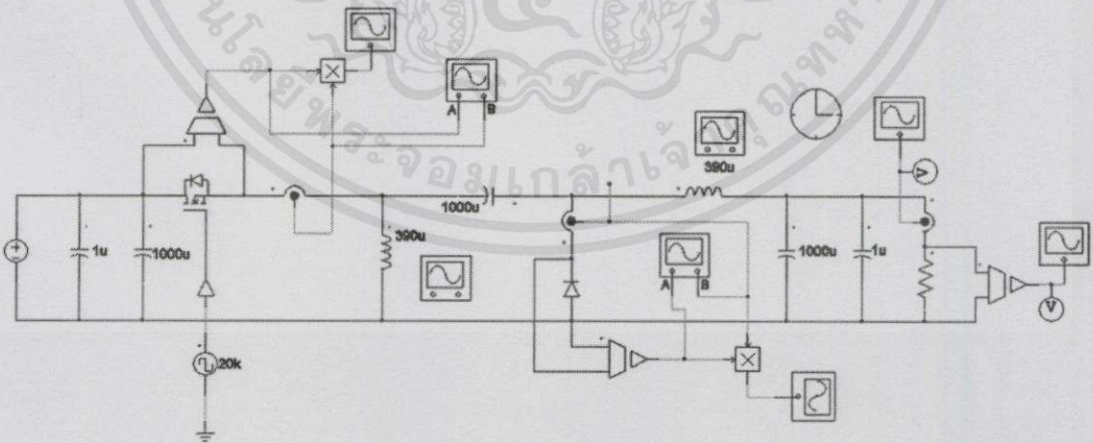
#### 4.1 สร้างแบบจำลองให้มีลักษณะเสมือนจริง

การจำลองการทำงานของวงจร จะทำการปรับค่าแรงดันด้านเข้า และค่าตัวที่ใช้เซลล์ เพื่อวัดผลของแรงดันและกระแสที่อุปกรณ์ต่างๆในวงจร และเพื่อให้สอดคล้องกับการทดลองจริงจึงต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ให้ตรงตามที่ได้ออกแบบไว้ ดังนี้

##### 4.1.1 ปรับค่าพารามิเตอร์

1. ตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  และ  $L_2$  เท่ากับ  $390 \mu\text{H}$
2. ตัวเก็บประจุขาเข้า  $C_{in}$  และ ขาออก  $C_o$  เท่ากับ  $1000 \mu\text{F}$
3. ตัวเก็บประจุตรงกลางที่ใช้เชื่อมต่อ  $C_{fly}$  เท่ากับ  $1000 \mu\text{F}$
4.  $R_{ds(on)}$  ของมอสเฟต เท่ากับ  $4.4 \text{ m}\Omega$
5. แรงดันตกคร่อมไดโอด เท่ากับ  $0.275 \text{ V}$
6. โหลด R เท่ากับ  $73 \Omega$  (แทนหลอด LED 10W)

##### 4.1.2 วงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงาน



รูปที่ 4.1 วงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น กรุณาอย่าให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

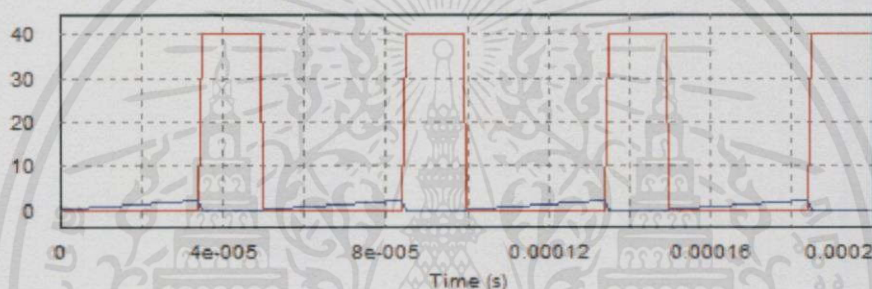
#### 4.2 การจำลองและผลการจำลอง

การจำลองเป็นการจะมีการวัดค่าของแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียที่มอสเฟต และไดโอด วัดค่ากระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำ และวัดกระแส แรงดัน กระแสรีปเปิ้ล และแรงดันรีปเปิ้ลที่โหลดตัวต้านทาน

#### 4.2.1 การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Psim

การจำลองเป็นการจำลองการทำงานของวงจรที่แรงดันอินพุต 12, 24 และ 36 โวลต์ โดยใช้โหลดเป็นตัวต้านทานที่มีค่า 73  $\Omega$  แทนโหลดไฟแอลอีดีกำลังไฟฟ้านอก 10.8 วัตต์ ที่มีแรงดันด้านออก 28.13 โวลต์ และกระแสด้านออก 384 มิลลิแอมป์ ตั้งค่า Time step  $1 \times 10^{-6}$  s และปรับค่าดิวิตีไซเคิลให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกได้ 28.13 โวลต์ ตามการใช้งานจริงของโหลดไฟแอลอีดี และผลการจำลองจะเป็นดังต่อไปนี้

#### 4.2.2 ผลการจำลองที่แรงดัน 12 โวลต์ ดิวิตีไซเคิล 70%

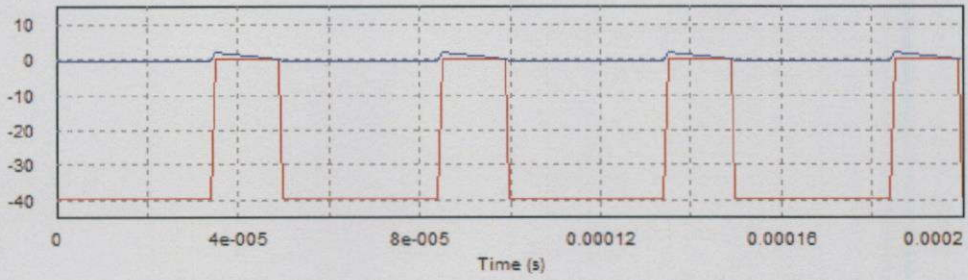


รูปที่ 4.2 ผลการจำลองกระแส(สีน้ำเงิน) และแรงดัน(สีแดง) ที่มอสเฟตที่แรงดัน 12 โวลต์ ดิวิตีไซเคิล 70%

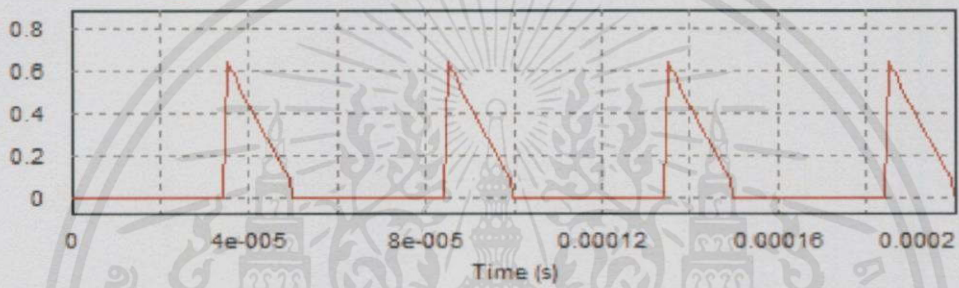


รูปที่ 4.3 ผลการจำลองกำลังสูญเสียที่มอสเฟตที่แรงดัน 12 โวลต์ ดิวิตีไซเคิล 70%

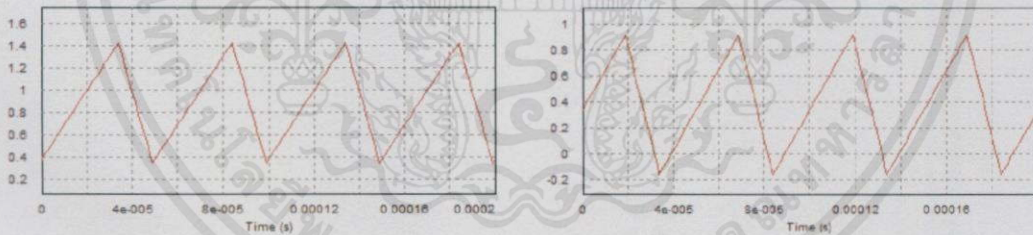
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



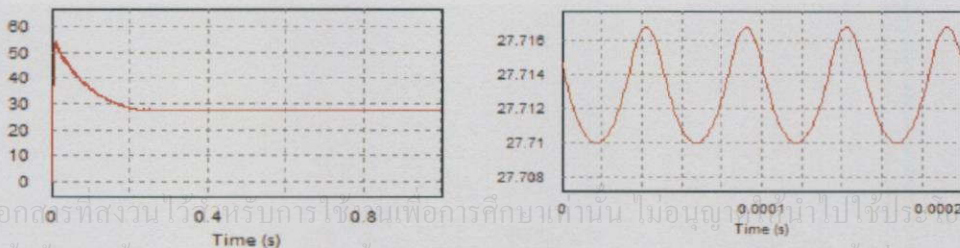
รูปที่ 4.4 ผลการจำลองกระแส(สีน้ำเงิน) และแรงดัน(สีแดง)  
ที่ไดโอดที่แรงดัน 12 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิล 70%



รูปที่ 4.5 ผลการจำลองกำลังสูญเสียที่ไดโอดที่แรงดัน 12 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิล 70%



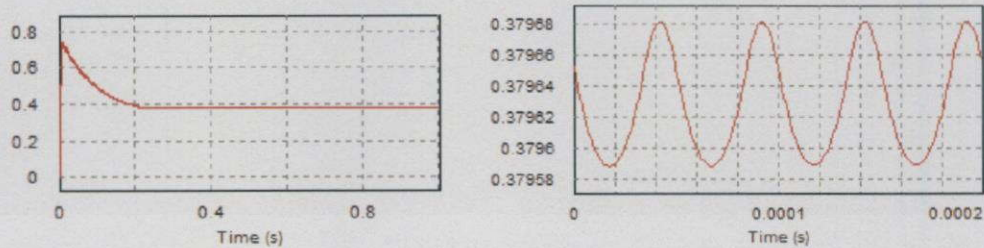
รูปที่ 4.6 ผลการจำลองกระแสที่ไหลผ่าน  $L_1$  (ซ้าย) และ  $L_2$  (ขวา)  
ที่แรงดัน 12 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิล 70%



รูปที่ 4.7 ผลการจำลองแรงดันที่ด้านออก(ซ้าย) และริบเบิลของแรงดันด้านออก(ขวา)  
ที่แรงดัน 12 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิล 70%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ 0.8 เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ลึกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงข้อมูล และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ผลการจำลองกระแสที่ด้านออก(ซ้าย) และริบเบิลของกระแสที่ด้านออก(ขวา) ที่แรงดัน 12 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิล 70%



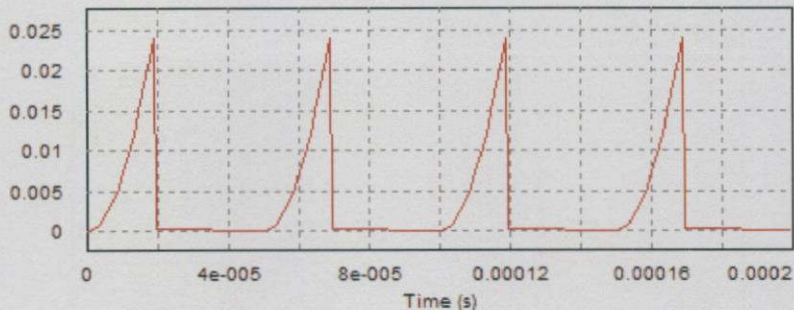
รูปที่ 4.9 ผลการจำลองกำลังที่ด้านออก(ซ้าย) และริบเบิลของกำลังที่ด้านออก(ขวา) ที่แรงดัน 12 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิล 70%

4.2.3 ผลการจำลองที่แรงดัน 24 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิล 38%

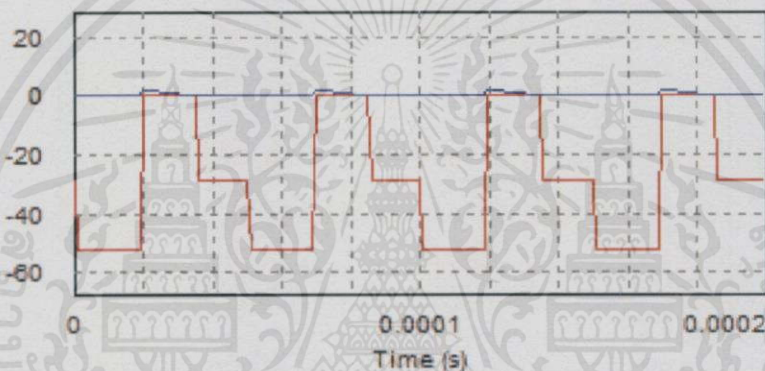


รูปที่ 4.10 ผลการจำลองกระแส(สีน้ำเงิน) และแรงดัน(สีแดง) ที่มอสเฟตที่แรงดัน 24 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิล 38%

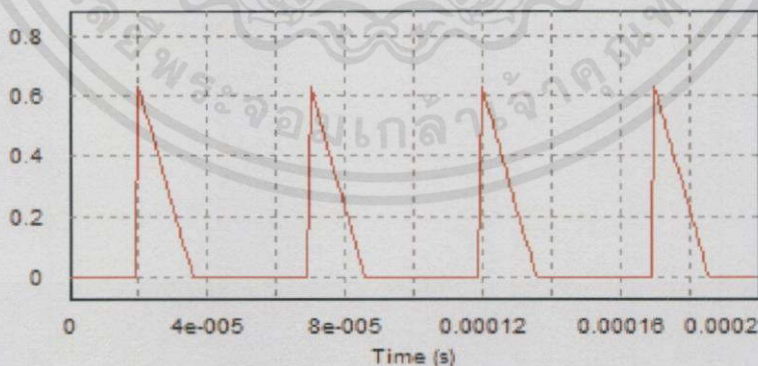
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ผลการจำลองกำลังสูญเสียที่มอสเฟตที่แรงดัน 24 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิล 38%

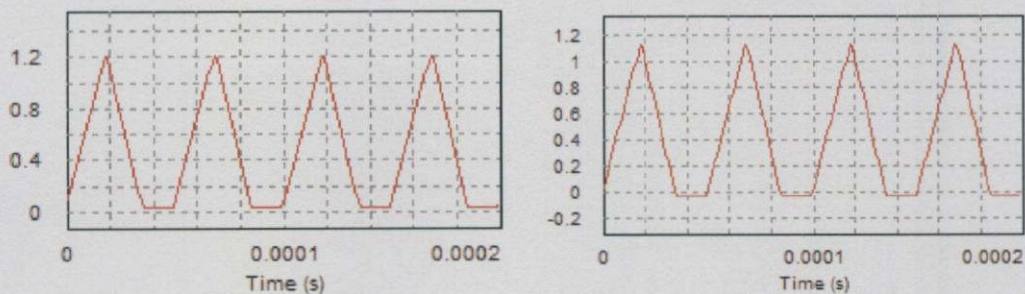


รูปที่ 4.12 ผลการจำลองกระแส(สีน้ำเงิน) และแรงดัน(สีแดง) ที่ไดโอดที่แรงดัน 24 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิล 38%

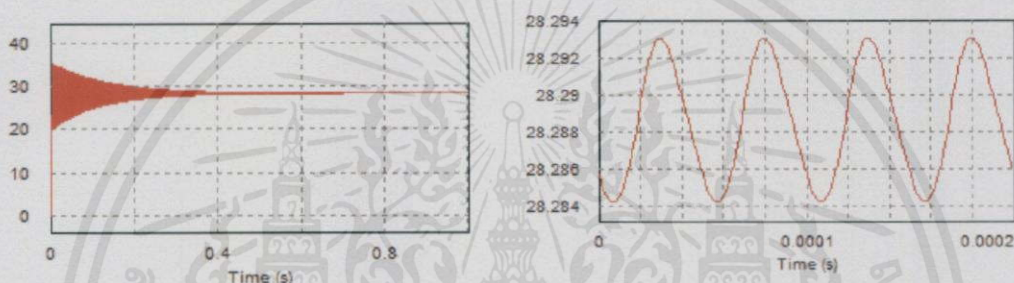


รูปที่ 4.13 ผลการจำลองกำลังสูญเสียที่ไดโอดที่แรงดัน 24 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิล 38%

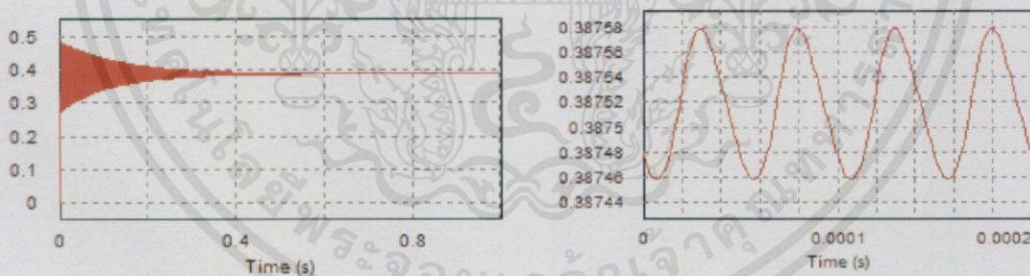
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 ผลการจำลองกระแสที่ไหลผ่าน  $L_1$  (ซ้าย) และ  $L_2$  (ขวา) ที่แรงดัน 24 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิล 38%

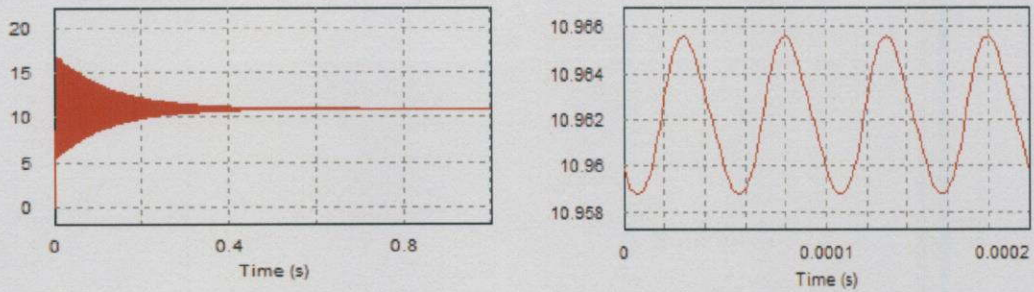


รูปที่ 4.15 ผลการจำลองแรงดันที่ด้านออก(ซ้าย) และริบเบิลของแรงดันด้านออก(ขวา)



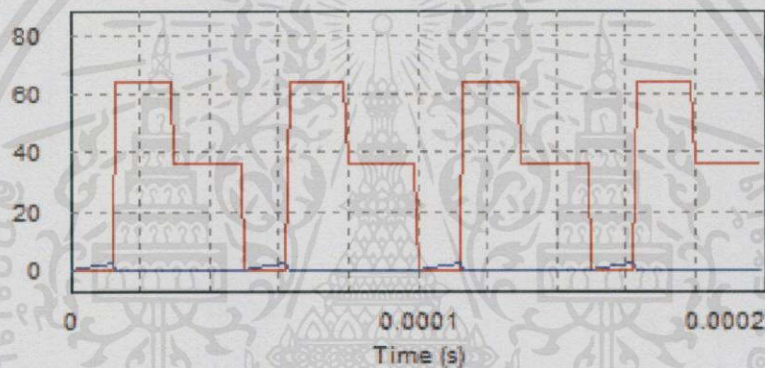
รูปที่ 4.16 ผลการจำลองกระแสที่ด้านออก(ซ้าย) และริบเบิลของกระแสที่ด้านออก(ขวา) ที่แรงดัน 24 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิล 38%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

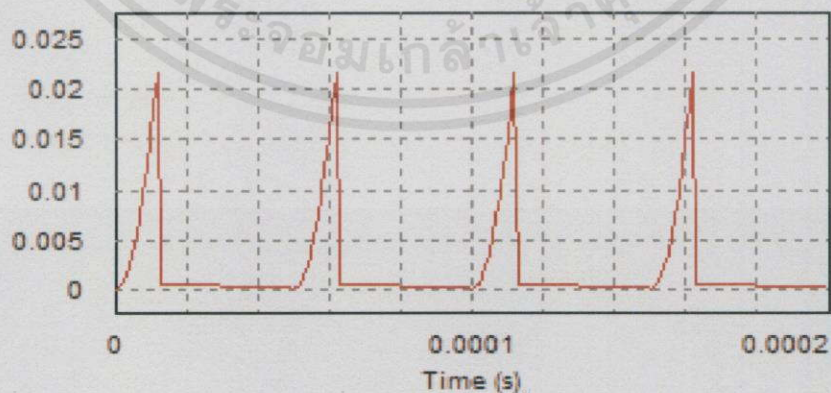


รูปที่ 4.17 ผลการจำลองกำลังที่ต้านออก(ซ้าย) และริบเปิ้ลของกำลังที่ต้านออก(ขวา)  
ที่แรงดัน 24 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิล 38%

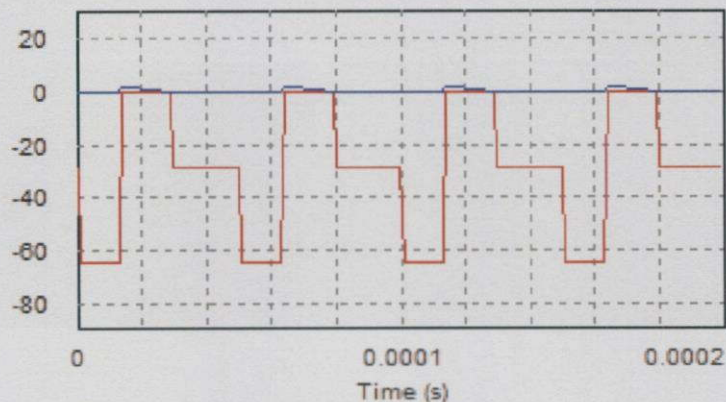
#### 4.2.4 ผลการจำลองที่แรงดัน 36 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิล 26%



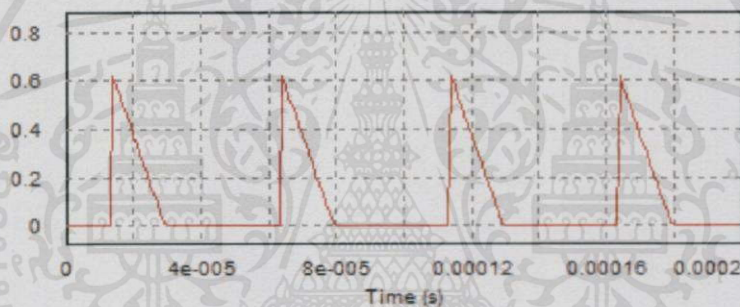
รูปที่ 4.18 ผลการจำลองกระแส(สีน้ำเงิน) และแรงดัน(สีแดง)  
ที่มอสเฟตที่แรงดัน 36 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิล 26%



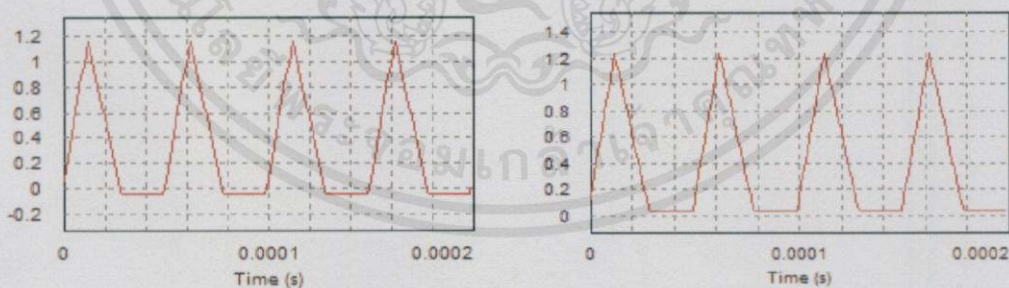
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้ง รูปที่ 4.19 ผลการจำลองกำลังสูญเสียที่มอสเฟตที่แรงดัน 36 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิล 26% ารนำไปใช้



รูปที่ 4.20 ผลการจำลองกระแส(สีน้ำเงิน) และแรงดัน(สีแดง)  
ที่ไดโอดที่แรงดัน 36 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิล 26%

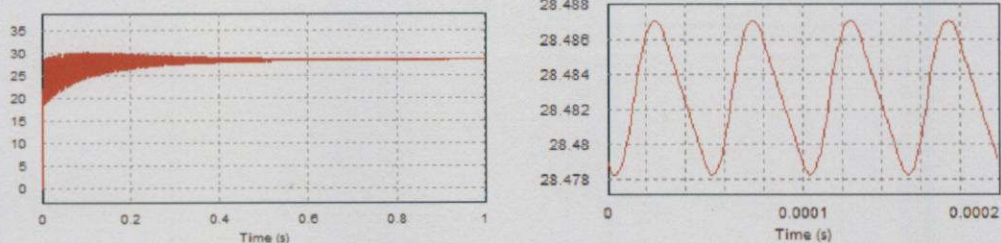


รูปที่ 4.21 ผลการจำลองกำลังสูญเสียที่ไดโอด ที่แรงดัน 36 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิล 26%



รูปที่ 4.22 ผลการจำลองกระแสที่ไหลผ่าน  $L_1$  (ข้าย) และ  $L_2$  (ขวา)  
ที่แรงดัน 36 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิล 26%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 ผลการจำลองแรงดันที่ด้านออก(ซ้าย) และริบเบิลของแรงดันด้านออก(ขวา)  
ที่แรงดัน 36 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิล 26%



รูปที่ 4.24 ผลการจำลองกระแสที่ด้านออก(ซ้าย) และริบเบิลของกระแสที่ด้านออก(ขวา)  
ที่แรงดัน 36 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิล 26%



รูปที่ 4.25 ผลการจำลองกำลังที่ด้านออก(ซ้าย) และริบเบิลของกำลังที่ด้านออก(ขวา)  
ที่แรงดัน 36 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิล 26%

จากการจำลองที่แรงดันด้านเข้า 12.24 และ 36 โวลต์ ที่แรงดันไฟฟ้าด้านเข้าต่ำจะเข้าสู่ภาวะคงตัวเร็วกว่าแรงดันไฟฟ้าสูง กำลังสูญเสียที่มอสเฟต และไดโอดเป็นดังตารางที่ 4.1 ซึ่งกำลังสูญเสียที่มอสเฟตที่แรงดันต่ำจะมีค่ามากกว่า แต่กำลังสูญเสียที่ไดโอดแรงดันสูงจะมีค่ามากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ตารางเปรียบเทียบกำลังสูญเสียของมอสเฟต และไดโอดที่แรงดันด้านเข้าต่างๆ

แรงดัน (V)	กำลังสูญเสียที่มอสเฟต (mW)	กำลังสูญเสียที่ไดโอด (mW)
12	9.77	203
24	7.06	205
36	6.34	207

### 4.3 การทดลอง

การทดลองจะแบ่งเป็น 3 หัวข้อใหญ่ได้แก่ การทดลองทางไฟฟ้า การทดลองหาความร้อนที่เกิดขึ้นในวงจร และการทดลองทางแสงสว่าง จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์ต่อไป ซึ่งแต่ละการทดลองมีรายละเอียดต่างๆดังนี้

#### 4.3.1 การทดลองทางไฟฟ้า

การทดลองจะใช้ Linear power supply จ่ายไฟให้กับวงจรเพื่อขับหลอดแอลอีดีขนาด 10 วัตต์ โดยปรับแรงดันขาเข้าตั้งแต่ 9 ถึง 36 โวลต์เพื่อหาประสิทธิภาพของวงจร จากนั้นปรับกำลังไฟฟ้าขาออกด้วยวงจรขับให้มีค่า 3, 5, 7 และ 10 วัตต์ โดยใช้แรงดันขาเข้า 12, 24 และ 36 โวลต์ เพื่อหาประสิทธิภาพของวงจรขณะปรับกำลังไฟฟ้าขาออก

##### 4.3.1.1 การทดลองหาประสิทธิภาพ

การทดลองหาประสิทธิภาพจะใช้ Multimeter SANWA CD772 จำนวน 4 เครื่อง วัดแรงดันและกระแสทั้งขาเข้าและขาออก จากนั้นบันทึกค่าลงตาราง



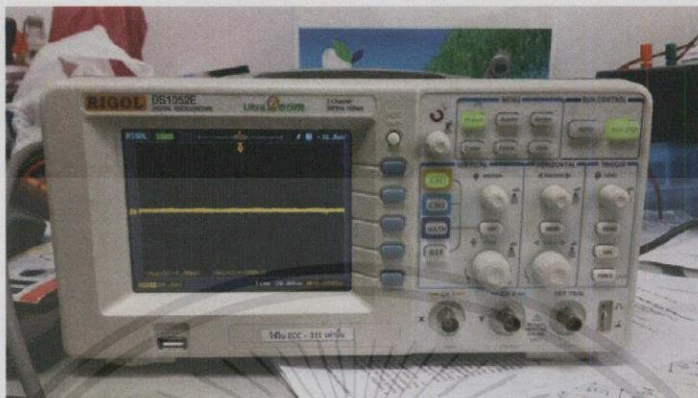
รูปที่ 4.26 การวัดประสิทธิภาพของวงจรขับ

##### 4.3.1.2 การวัดกำลังสูญเสียของวงจรควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในท้องถิ่นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ทำการจ่ายไฟที่แรงดันขาเข้า 12 V ถึง 36 V ในสถานะ no load จากนั้นทำการวัด  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
 กระแสที่ผ่านอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อวัดกำลังสูญเสียของแต่ละอุปกรณ์

##### 4.3.1.3 การวัดกราฟกระแสและแรงดันด้านเข้าและด้านออก

วัดกระแสและแรงดันด้วยออสซิลโลสโคป RIGOL DS1052E เปรียบเทียบระหว่าง  
ด้านเข้าและด้านออก



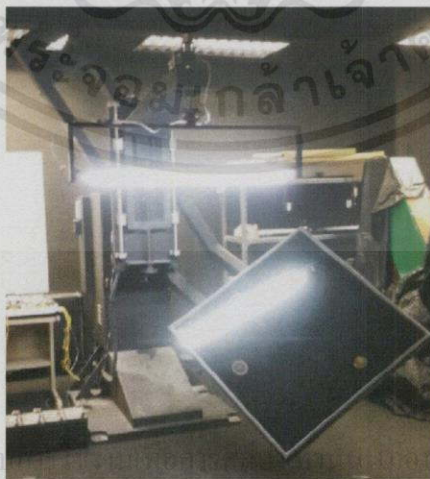
รูปที่ 4.27 ออสซิลโลสโคป RIGOL DS1052E

#### 4.3.1.4 การวัดค่ากระแสและแรงดันกระแสเพื่อมด้านขาออก

วัดกระแสกระแสเพื่อมด้านออกโดยการวัดแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน  $2 \Omega$  และมี  
การตั้งค่าออสซิลโลสโคป  $2 \text{ mV/div}$  และ  $20 \text{ us/div}$  โดยที่ปรับแรงดันด้านเข้า  $12 \text{ 24}$  และ  $36$  โวลต์  
กระแสด้านออก  $384 \text{ mA}$  และแรงดันด้านออก  $28.12 \text{ V}$

#### 4.3.2 การทดลองทางแสงสว่าง

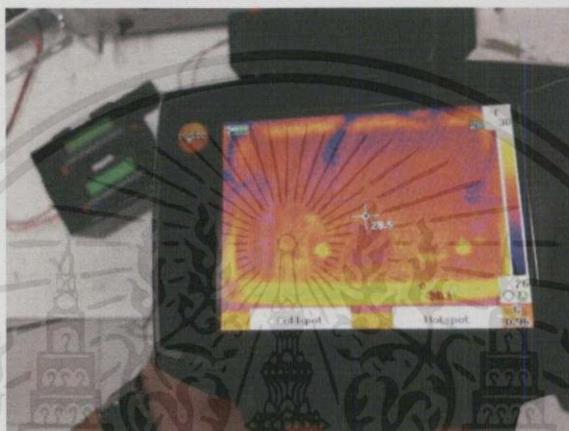
การทดลองทางแสงสว่างทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการทางแสงชมภูอินทิว ภาควิชา  
วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดย  
ใช้เครื่อง Goniophotometer เก็บค่าการกระจายความเข้มส่องสว่างของดวงโคมในรูปแบบของ ies ไฟล์  
จากนั้นนำค่าที่ได้ไปสร้างกราฟการกระจายแสงโดยใช้โปรแกรม Photometric Viewer



รูปที่ 4.28 เครื่อง Goniophotometer

### 4.3.3 การทดลองหาความร้อนที่เกิดขึ้นในวงจร

การทดลองจะใช้กล้องตรวจจับความร้อน Testo-875 ในการหาอุณหภูมิของแต่ละอุปกรณ์ โดยปรับแรงดันขาเข้า 10, 12, 24 และ 36 โวลต์ กำลังไฟฟ้าขาออก 10 วัตต์ ใช้กล้องตรวจจับความร้อนวัดอุณหภูมิที่แรงดันแต่ละค่า จากนั้นปรับแรงดันขาเข้าให้คงที่ที่ 24 โวลต์ แล้วปรับกำลังไฟฟ้าขาออกให้อยู่ที่ 5 และ 7 วัตต์ แล้วใช้กล้องตรวจจับความร้อนวัดอุณหภูมิที่กำลังไฟฟ้าขาออกแต่ละค่า ทั้งนี้ในการวัดอุณหภูมิแต่ละครั้งจะวัดหลังจากวงจรทำงานไปแล้ว 15 นาที เพื่อให้วงจรอยู่ในสภาวะคงตัว



รูปที่ 4.29 กล้องตรวจจับความร้อนในวงจร Testo-875

## 4.4 ผลการทดลอง

### 4.4.1 ผลการทดลองทางไฟฟ้า

#### 4.4.1.1 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพ

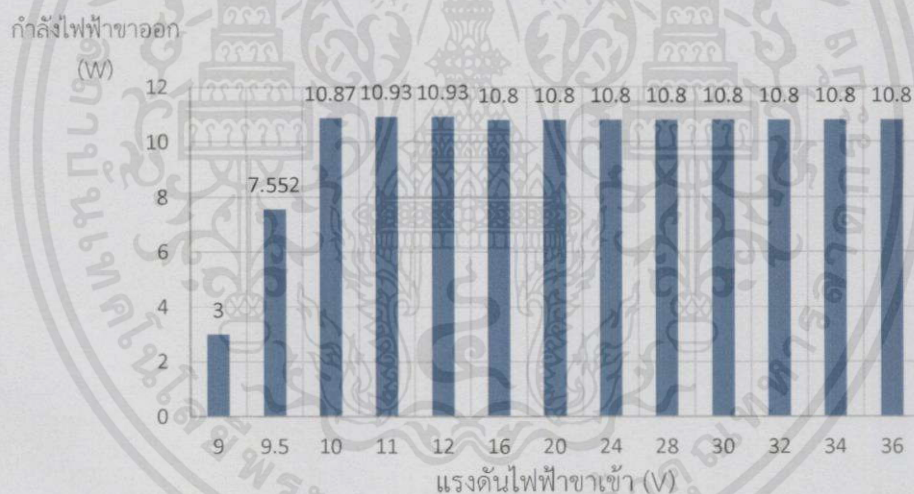
จากการทดลองหาประสิทธิภาพโดยเปลี่ยนแรงดันขาเข้าตั้งแต่ 9 ถึง 36 โวลต์ ผลปรากฏว่ากำลังไฟฟ้าขาออกมีค่าคงที่ที่ 11 วัตต์ แต่เมื่อลดแรงดันขาเข้าต่ำกว่า 10 โวลต์ ปรากฏว่ากำลังไฟฟ้าขาออกมีค่าลดลงเหลือ 7.5 วัตต์ ที่แรงดันขาเข้า 9.5 โวลต์ และเหลือ 3 วัตต์ ที่แรงดันขาเข้า 9 โวลต์ เนื่องจากเมื่อแรงดันขาเข้าต่ำเกินไปที่ไซเคิลของสัญญาณ PWM มีค่ามาก ทำให้ตัวเหนี่ยวนำเกิดการอิ่มตัวจึงไม่สามารถยกระดับแรงดันให้ได้เท่าที่ต้องการ ดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ตารางผลการทดลองวัดประสิทธิภาพ เมื่อเปลี่ยนแปลงแรงดันขาเข้า

เปลี่ยนแปลง INPUT โดย OUTPUT 10 W						
INPUT			OUTPUT			EFF (%)
V (V)	I (A)	P (W)	V (V)	I (A)	P (W)	
9.03	0.65	5.84	25.00	0.12	3.00	51.35
9.52	1.03	9.89	26.97	0.28	7.55	76.34
9.76	1.34	13.04	28.07	0.38	10.67	81.80
10.01	1.29	12.90	28.15	0.39	10.87	84.21
11.00	1.15	12.67	28.17	0.39	10.93	86.25
11.25	1.12	12.65	28.17	0.39	10.93	86.44
11.51	1.09	12.59	28.17	0.39	10.93	86.80
11.74	1.07	12.57	28.17	0.39	10.93	86.93
12.01	1.04	12.52	28.17	0.39	10.93	87.26
12.49	1.00	12.51	28.17	0.39	10.93	87.34
13.01	0.96	12.48	28.17	0.39	10.93	87.60
14.01	0.88	12.37	28.17	0.39	10.90	88.12
15.03	0.82	12.28	28.15	0.39	10.87	88.48
16.01	0.76	12.17	28.13	0.38	10.80	88.78
17.02	0.71	12.12	28.13	0.38	10.80	89.14
18.01	0.67	12.12	28.13	0.38	10.80	89.12
19.01	0.64	12.09	28.13	0.38	10.80	89.34
20.20	0.60	12.20	28.13	0.38	10.80	88.53
21.02	0.58	12.09	28.13	0.38	10.80	89.37
22.01	0.55	12.10	28.13	0.38	10.80	89.23
23.01	0.53	12.08	28.13	0.38	10.80	89.42
23.24	0.52	12.11	28.13	0.38	10.80	89.21
23.50	0.52	12.10	28.12	0.38	10.77	88.99
23.76	0.51	12.09	28.13	0.38	10.80	89.32
24.01	0.50	12.03	28.13	0.38	10.80	89.80
24.50	0.49	12.10	28.13	0.38	10.80	89.25
25.02	0.48	12.08	28.12	0.38	10.78	89.12
26.00	0.47	12.09	28.13	0.38	10.80	89.35
27.03	0.45	12.08	28.12	0.38	10.80	89.37
28.02	0.43	12.10	28.12	0.38	10.80	89.21
28.99	0.42	12.09	28.12	0.38	10.80	89.32
29.95	0.40	12.10	28.12	0.38	10.80	89.24

เปลี่ยนแปลง INPUT โดย OUTPUT 10 W						
INPUT			OUTPUT			EFF (%)
V (V)	I (A)	P (W)	V (V)	I (A)	P (W)	
30.99	0.39	12.12	28.12	0.38	10.80	89.11
32.01	0.38	12.10	28.12	0.38	10.80	89.24
33.00	0.37	12.11	28.12	0.38	10.80	89.16
34.01	0.36	12.14	28.12	0.38	10.80	88.93
35.00	0.35	12.15	28.13	0.38	10.80	88.94
35.24	0.35	12.16	28.12	0.38	10.77	88.58
35.49	0.34	12.14	28.12	0.38	10.80	88.96
35.76	0.34	12.16	28.12	0.38	10.77	88.58
35.99	0.34	12.13	28.12	0.38	10.80	89.02
36.50	0.33	12.12	28.12	0.38	10.80	88.88



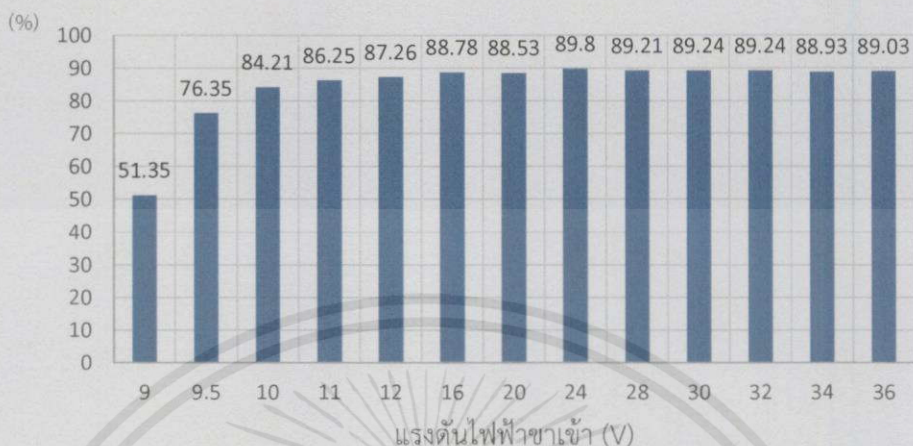
รูปที่ 4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้านอก และแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า

จากการทดลองหาประสิทธิภาพโดยเปลี่ยนแรงดันขาเข้าตั้งแต่ 9 ถึง 36 โวลต์ ผลปรากฏว่าประสิทธิภาพของวงจรมีค่าคงที่ประมาณร้อยละ 88 - 89 แต่เมื่อลดแรงดันขาเข้าต่ำกว่า 12 โวลต์ปรากฏว่าประสิทธิภาพของวงจรมีค่าลดลงเหลือร้อยละ 86 ที่ 11 โวลต์ และร้อยละ 84 ที่ 10 โวลต์ จากนั้นประสิทธิภาพจะลดลงอย่างมากเหลือร้อยละ 76 ที่ 9.5 โวลต์ และเหลือเพียงร้อยละ 51 ที่ 9 โวลต์ ซึ่งมีสาเหตุมาจากมอดเฟต เนื่องจากที่แรงดันขาเข้าต่ำจะมีกระแสไหลผ่าน

มอดเฟตมาก ทำให้เกิดการสูญเสียที่มอดเฟตมากกว่าที่แรงดันขาเข้าสูง ดังตารางที่ 4.2 และ รูปที่

4.31

ประสิทธิภาพของวงจร



รูปที่ 4.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของวงจร และแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า

จากการทดลองหาประสิทธิภาพโดยให้แรงดันขาเข้าคงที่ที่ 12, 24 และ 36 โวลต์ จากนั้นใช้วงจรขับปรับกำลังไฟฟ้าขาออก ผลปรากฏว่าประสิทธิภาพของวงจรมีค่าลดลงตามกำลังไฟฟ้าขาออกที่ปรับลดลง ซึ่งสอดคล้องกันที่แรงดันขาเข้าทั้ง 3 ค่า ซึ่งมีสาเหตุมาจากกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียที่วงจรคอนโทรลมีค่าคงที่ เมื่อปรับกำลังไฟฟ้าขาออกลง ประสิทธิภาพโดยรวมของวงจรขับจึงลดลง ดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.32

ตารางที่ 4.3 ตารางบันทึกผลเปรียบเทียบระหว่างแรงดันคงที่กับกำลังขาออก (ก) ที่แรงดัน 12 V (ข) ที่แรงดัน 24 V (ค) ที่แรงดัน 36 V

EFFICIENCY 12V						
INPUT			OUTPUT			EFFICIENCY (%)
V (V)	I (A)	P (W)	V (V)	I (A)	P (W)	
12	0.31	3.73	25.13	0.13	3.14	84.17
12	0.50	5.96	26.07	0.20	5.16	86.55
12	0.67	8.02	26.82	0.26	7.03	87.53
12	0.83	10.00	27.45	0.32	8.76	87.60
12	0.92	11.09	27.80	0.35	9.70	87.50
12	1.04	12.52	28.17	0.39	10.93	87.33

(ก)

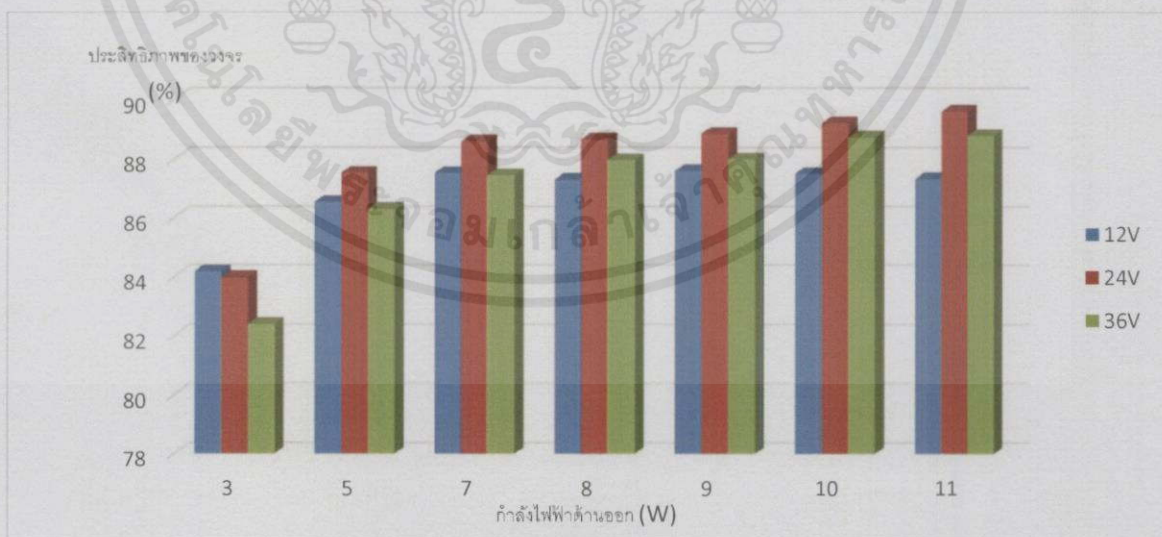
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFICIENCY 24V						
INPUT			OUTPUT			EFFICIENCY (%)
V (V)	I (A)	P (W)	V (V)	I (A)	P (W)	
24	0.17	3.744	25.15	0.125	3.14	83.97
24	0.25	5.904	26.1	0.198	5.16	87.53
24	0.33	7.944	26.86	0.262	7.03	88.59
24	0.41	9.912	27.52	0.32	8.81	88.85
24	0.46	10.92	27.83	0.35	9.74	89.20
24	0.50	12.024	28.13	0.383	10.77	89.60

(ข)

EFFICIENCY 36V						
INPUT			OUTPUT			EFFICIENCY (%)
V (V)	I (A)	P (W)	V (V)	I (A)	P (W)	
36	0.11	3.78	25.12	0.12	3.11	82.40
36	0.17	5.98	26.05	0.2	5.16	86.31
36	0.22	7.99	26.78	0.26	6.99	87.46
36	0.28	9.93	27.41	0.32	8.74	88.00
36	0.30	10.91	27.73	0.35	9.67	88.72
36	0.33	12.13	28.12	0.38	10.76	88.77

(ค)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่เอาออกให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**รูปที่ 4.32** กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของวงจร และกำลังไฟฟ้าต้านออก  
 ไม่ว่าจะฉี โฉง ทั้ง คั้ง อี ก ทั้ง ห้า มื ให้ คัด เล ง เนื่อ หา และ ต้อง อ้ำ อึง ดึง เจ้า ของ เอก สด ร ทุก คั้ง ที่ มี การ นำ ไป ใช้

#### 4.4.1.2 กำลังไฟฟ้าสูญเสียของวงจรที่กำลังไฟฟ้านอก 10.8W

หากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่อุปกรณ์แต่ละตัวเมื่อทำการจ่ายไฟที่แรงดันขาเข้า 12 V ถึง 36 V ได้ผลดังตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าที่แรงดัน 12V วงจรจะมีความสูญเสียที่มอสเฟต และ L<sub>1</sub> เนื่องจากมีกระแสมาก ในขณะที่ที่แรงดัน 36V จะมีการสูญเสียในวงจรไฟเลี้ยงเนื่องจากต้องแรงดันด้านเข้ามีช่วงของแรงดันต่างจากไฟเลี้ยงวงจรที่มีค่า 12V มากจึงทำให้เกิดความสูญเสียมาก

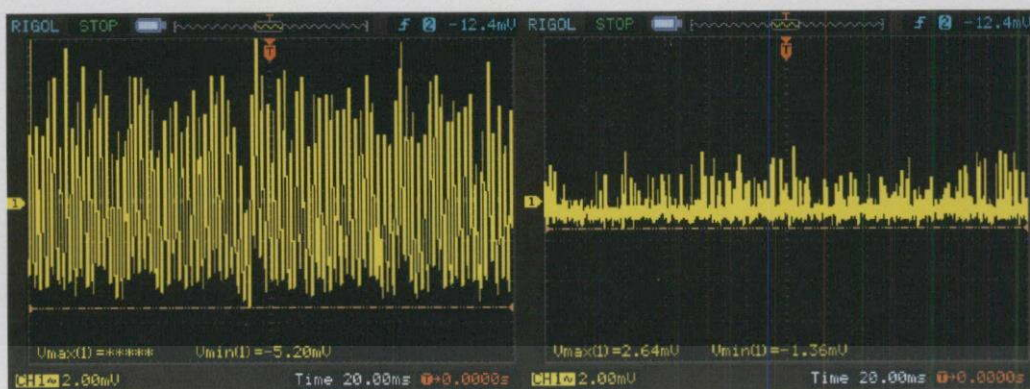
ตารางที่ 4.4 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในวงจร

DEVICE	กำลังสูญเสีย (W)		
	12V	24V	36V
Mosfet	0.01	0.007	0.005
Diode	0.22	0.214	0.23
R	0.294	0.294	0.294
L1	0.211	0.074	0.052
L2	0.052	0.06	0.067
Regulator	0.276	0.264	0.324
PIC16F685	0.048	0.072	0.072
Total loss	1.11	0.99	1.04
%Loss	10.29%	9.12%	9.67%

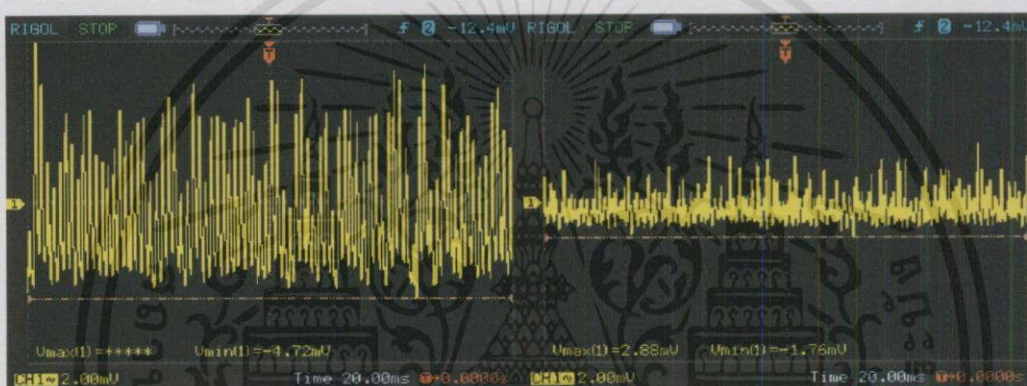
#### 4.4.1.3 การวัดกราฟกระแสและแรงดันด้านเข้าและด้านออก

วัดกราฟกระแสและแรงดันด้วยออสซิลโลสโคป RIGOL DS1052E เพื่อเปรียบเทียบระหว่างด้านเข้าและด้านออก พบว่ากระแสขาออกมีการกระเพื่อมน้อยกว่าขาเข้า เนื่องจากวงจรซีดาคอนเวอร์เตอร์มีตัวเหนี่ยวนำมีขนาดใหญ่เป็นผลทำให้ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าคงที่ ส่วนแรงดันกระเพื่อมขาออกมีค่ามากกว่าแรงดันกระเพื่อมขาเข้า โดยกราฟวัดค่ากระแสตั้งค่า currentprobe ที่ 10 mV/A

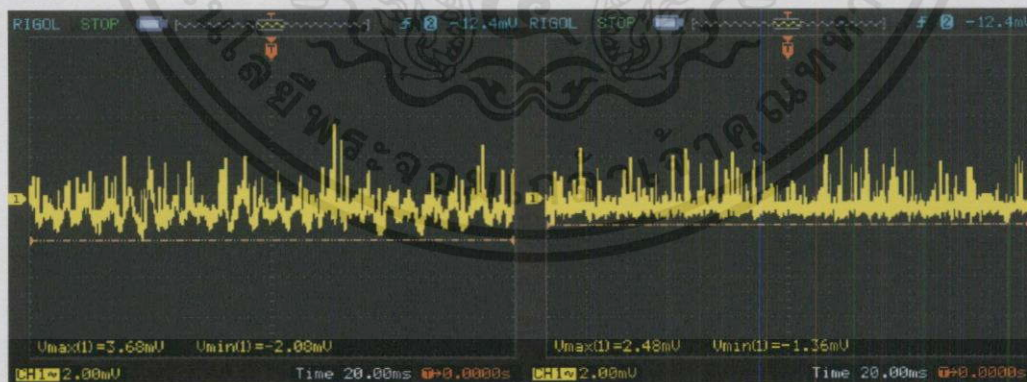
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.33 กราฟกระแสต้านขาเข้า (ซ้าย) กราฟกระแสต้านขาออก (ขวา) ที่แรงดันขาเข้า 10 V

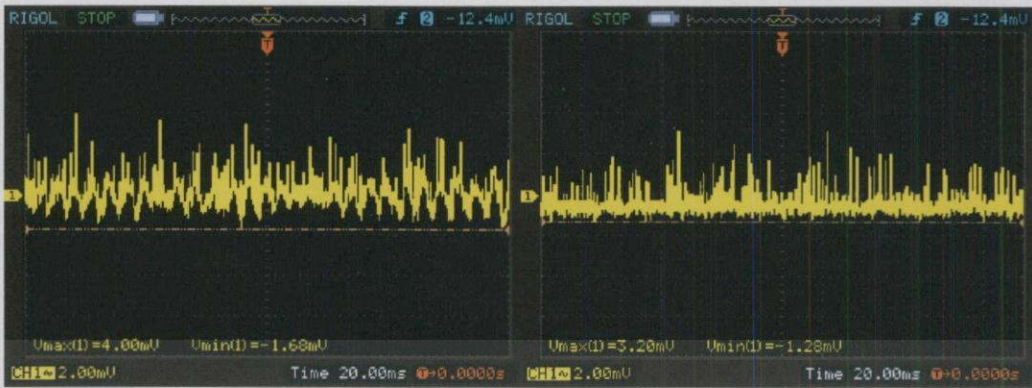


รูปที่ 4.34 กราฟกระแสต้านขาเข้า (ซ้าย) กราฟกระแสต้านขาออก (ขวา) ที่แรงดันขาเข้า 12 V



รูปที่ 4.35 กราฟกระแสต้านขาเข้า (ซ้าย) กราฟกระแสต้านขาออก (ขวา) ที่แรงดันขาเข้า 24 V

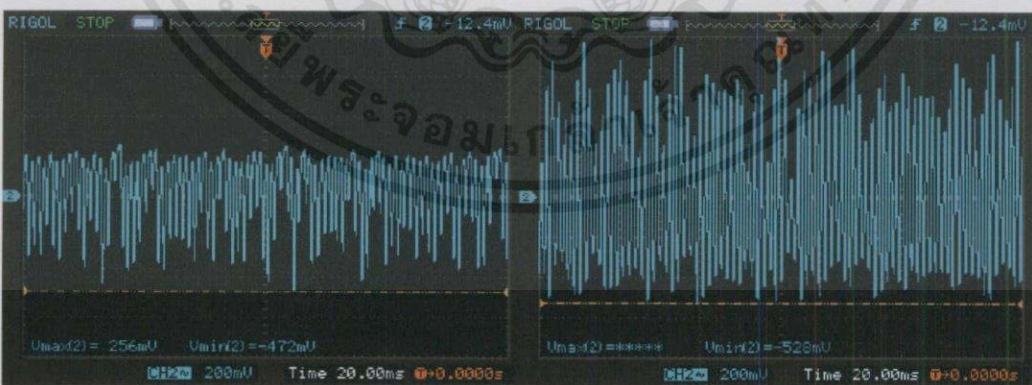
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 กราฟกระแสด้านขาเข้า (ซ้าย) กราฟกระแสด้านขาออก (ขวา) ที่แรงดันขาเข้า 36 V

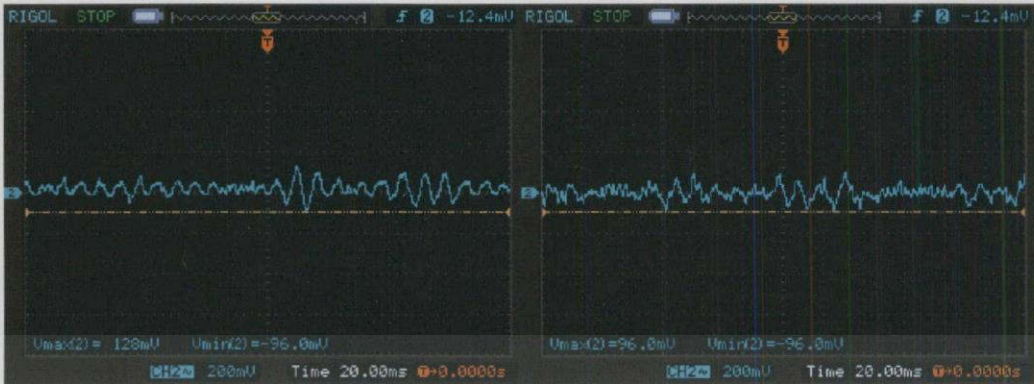


รูปที่ 4.37 กราฟแรงดันขาเข้า (ซ้าย) กราฟแรงดันด้านขาออก (ขวา) ที่แรงดันขาเข้า 10 V



รูปที่ 4.38 กราฟแรงดันขาเข้า (ซ้าย) กราฟแรงดันด้านขาออก (ขวา) ที่แรงดันขาเข้า 12 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.39 กราฟแรงดันขาเข้า (ซ้าย) กราฟแรงดันด้านขาออก (ขวา) ที่แรงดันขาเข้า 24 V



รูปที่ 4.40 กราฟแรงดันขาเข้า (ซ้าย) กราฟแรงดันด้านขาออก (ขวา) ที่แรงดันขาเข้า 36 V



รูปที่ 4.41 กราฟ Back ground noise ของกระแสขาออก

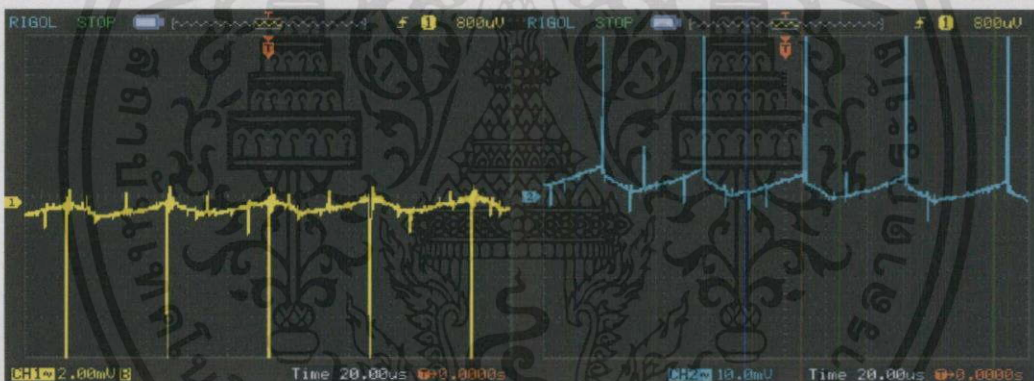
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.4.1.4 การวัดกราฟกระแสและแรงดันกระเพื่อมด้านขาออก

วัดกระแสกระเพื่อมด้านออกโดยการวัดแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน 2 โอห์ม และมีการตั้งค่าออสซิลโลสโคป 2 mV/div และ 20 us/div โดยที่ปรับแรงดันด้านเข้า 12 24 และ 36 โวลต์ กระแสด้านออกจากออสซิลโลสโคป 77 mA และแรงดันด้านออกจากออสซิลโลสโคป 2.95 V



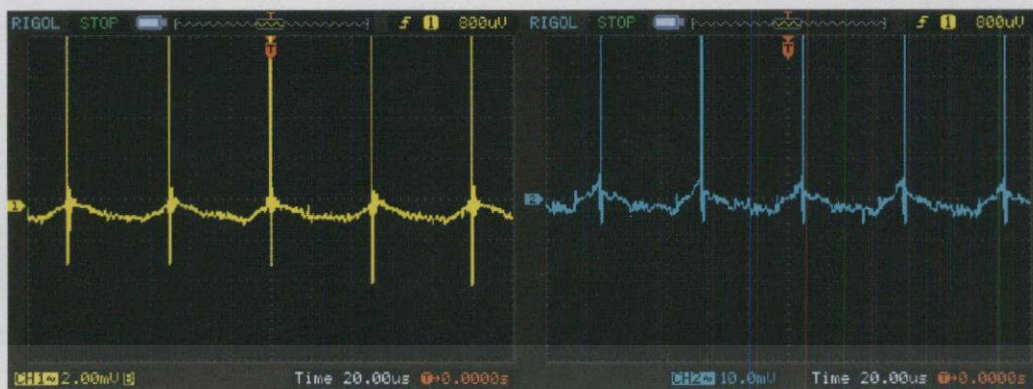
รูปที่ 4.42 กระแสด้านออก(ซ้าย) และแรงดันด้านออก(ขวา)



รูปที่ 4.43 กระแสกระเพื่อมด้านออก(ซ้าย) และแรงดันกระเพื่อมด้านออก(ขวา) ที่แรงดันที่ขาเข้า 12 V



รูปที่ 4.44 กระแสกระเพื่อมด้านออก(ซ้าย) และแรงดันกระเพื่อมด้านออก(ขวา) ที่แรงดันขาเข้า 24 V



รูปที่ 4.45 กระแสกระแสเพิ่มด้านออก(ซ้าย) และแรงดันกระแสเพิ่มด้านออก(ขวา)  
ที่แรงดันขาเข้า 36 V

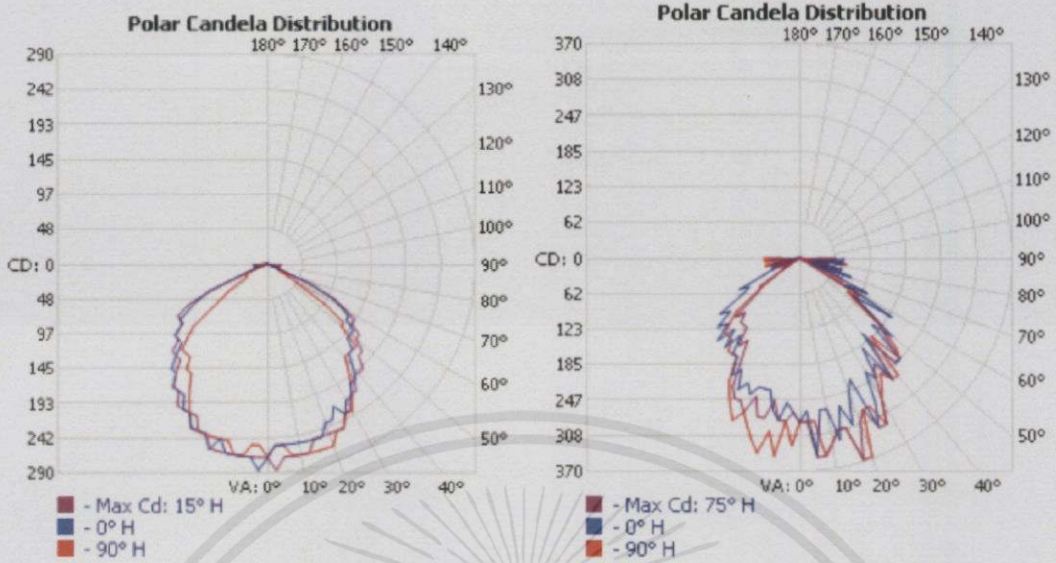
ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบกระแสและแรงดันกระแสเพิ่มที่แรงดันต่างๆ

แรงดันด้าน เข้า (V)	กระแสกระแสเพิ่ม ด้านออก (mV)	เปอร์เซ็นต์ กระแส กระแสเพิ่มด้าน ออก(%)	แรงดันกระแสเพิ่ม ด้านออก (mV)	เปอร์เซ็นต์แรงดัน กระแสเพิ่มด้าน ออก(%)
12	0.5	1.35	8	0.27
24	0.5	1.35	10	0.34
36	0.5	1.35	10	0.34

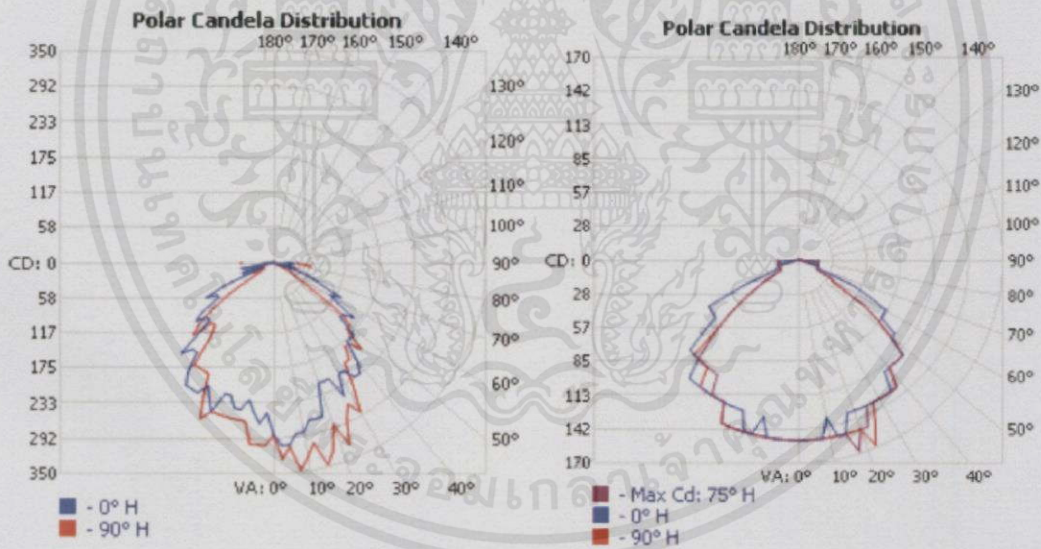
#### 4.4.2 การทดลองทางแสงสว่าง

เมื่อนำวงจรขับหลอดแอลอีดีพร้อมโคมไปทำการวัดแสงเก็บค่าจะได้ไฟล์ ies มา  
เมื่อนำมาวิเคราะห์ที่ ies ไฟล์ จะได้กราฟการกระจายความเข้มส่องสว่างที่แรงดันขาเข้าและกำลังขา  
ออกต่างๆ พบว่ามีกราฟการกระจายความเข้มส่องสว่างใกล้เคียงกันที่แรงดันต่างๆดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

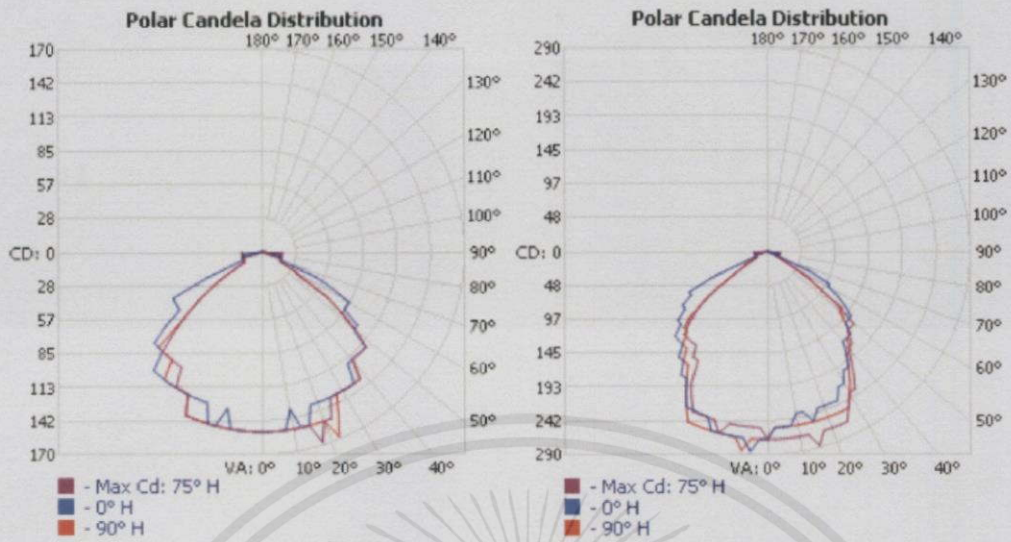


รูปที่ 4.46 การกระจายความเข้มส่องสว่างที่  $V_{in} = 10 \text{ V}$   $P_{out} = 10.86 \text{ W}$  (ซ้าย)  
 การกระจายความเข้มส่องสว่างที่  $V_{in} = 12 \text{ V}$   $P_{out} = 10.93 \text{ W}$  (ขวา)

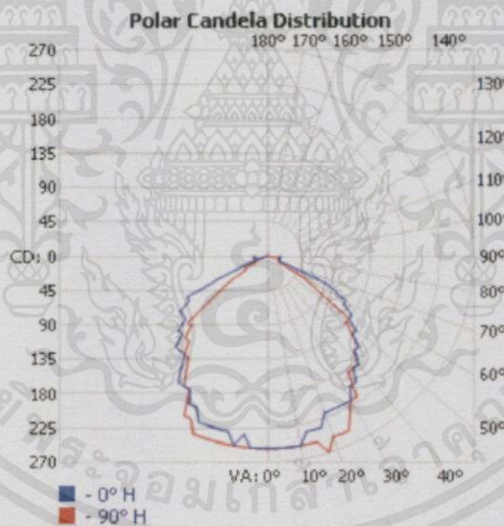


รูปที่ 4.47 การกระจายความเข้มส่องสว่างที่  $V_{in} = 24 \text{ V}$   $P_{out} = 10.80 \text{ W}$  (ซ้าย)  
 การกระจายความเข้มส่องสว่างที่  $V_{in} = 24 \text{ V}$   $P_{out} = 5.12 \text{ W}$  (ขวา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.48 การกระจายความเข้มส่องสว่างที่  $V_{in} = 24\text{ V}$   $P_{out} = 7.03\text{ W}$  (ซ้าย)  
การกระจายความเข้มส่องสว่างที่  $V_{in} = 36\text{ V}$   $P_{out} = 10.8\text{ W}$  (ขวา)



รูปที่ 4.49 การกระจายความเข้มส่องสว่างที่  $V_{in} = 28.2\text{ V}$   $P_{out} = 10.8\text{ W}$   
จ่ายไฟด้วย Linear supply

จากการทดลองที่แรงดันด้านเข้า 12, 24 และ 36 โวลต์ ในช่วงกำลังขาออกต่างๆ

สามารถคำนวณ ค่า Lumen/lamp และ Efficacy ได้ดังตาราง 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

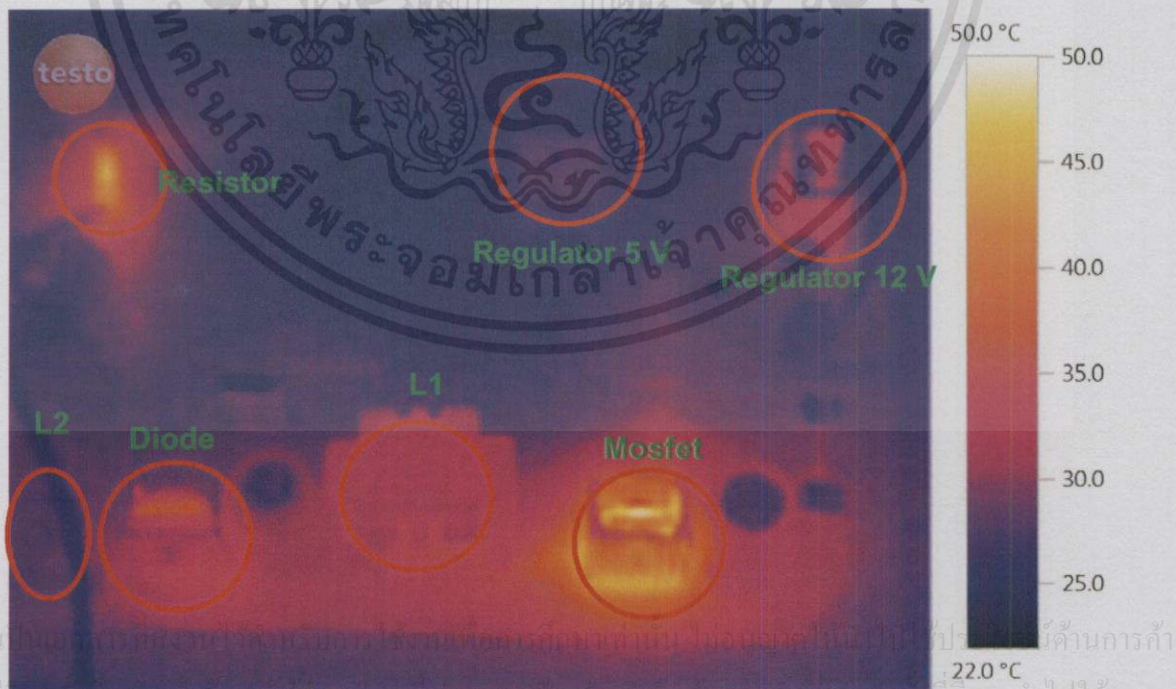
ตารางที่ 4.6 ผลการวัดค่าทางแสง

Vinput(V)	Lumen/lamp (lm)	Poutput(W)	Efficacyของหลอด (lm/W)	Efficacyของระบบ (lm/W)
10.00	672.30	10.87	61.87	52.10
12.00	759.30	10.93	69.47	60.62
24.00	735.30	10.80	68.07	61.13
24.00	506.90	7.03	72.11	63.81
24.00	428.80	5.15	83.26	72.63
28.20	628.00	10.00	62.80	62.80
36.00	660.90	10.80	61.19	54.49

จากตารางที่ 4.6 พบว่า จะมีค่า Efficacy ของระบบสูงสุดที่ แรงดันขาออก 24 V กำลังขาออก 5.15 W ที่ 72.63 lm/W

4.4.3 การทดลองหาความร้อนที่เกิดขึ้นในวงจร

การทดสอบวัดความร้อนในวงจรจะทำการวัดที่แรงดัน 10V, 12V และ 36V ที่กำลังไฟฟ้านำเข้า 10W และที่แรงดัน 24V ที่กำลังไฟฟ้านำเข้า 10W, 7W และ 5W ซึ่งจะทำให้การวัดความร้อนของวงจรหลังจากใช้งานหลอดไฟ LED เป็นเวลา 15 นาที ทำการวัดอุณหภูมิที่ตัวต้านทาน 2 Ω (ตัวตรวจจับกระแส) ไดโอด มอสเฟต และวงจรรักษาระดับแรงดันทั้ง 5V และ 12V



รูปที่ 4.50 ตรวจสอบความร้อนที่แรงดันขาเข้า 10 V กำลังขาออก 10 W

ตารางที่ 4.7 บันทึกผลอุณหภูมิของอุปกรณ์ที่แรงดันขาเข้า 10 V กำลังขาออก 10 W

Device	Temp. [°C]
Resistor 2 $\Omega$	43.5
Diode	33.9
Mosfet	49.4
Regulator 12 V	29.5
Regulator 5 V	27.4
L <sub>1</sub>	32.4
L <sub>2</sub>	27.6



รูปที่ 4.51 ตรวจสอบความร้อนที่แรงดันขาเข้า 12 V กำลังขาออก 10 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 บันทึกผลอุณหภูมิของอุปกรณ์ที่แรงดันขาเข้า 12 V กำลังขาออก 10 W

Device	Temp. [°C]
Resistor 2 $\Omega$	44.7
Diode	35.0
Mosfet	36.5
Regulator 12 V	30.1
Regulator 5 V	27.0
L <sub>1</sub>	29.2
L <sub>2</sub>	27.2



รูปที่ 4.52 ตรวจสอบความร้อนที่แรงดันขาเข้า 24 V กำลังขาออก 10 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 บันทึกผลอุณหภูมิของอุปกรณ์ที่แรงดันขาเข้า 24 V กำลังขาออก 10 W

Device	Temp. [°C]
Resistor 2 $\Omega$	44.5
Diode	35.5
Mosfet	31.1
Regulator 12 V	31.1
Regulator 5 V	28.6
L <sub>1</sub>	28.8
L <sub>2</sub>	27.8

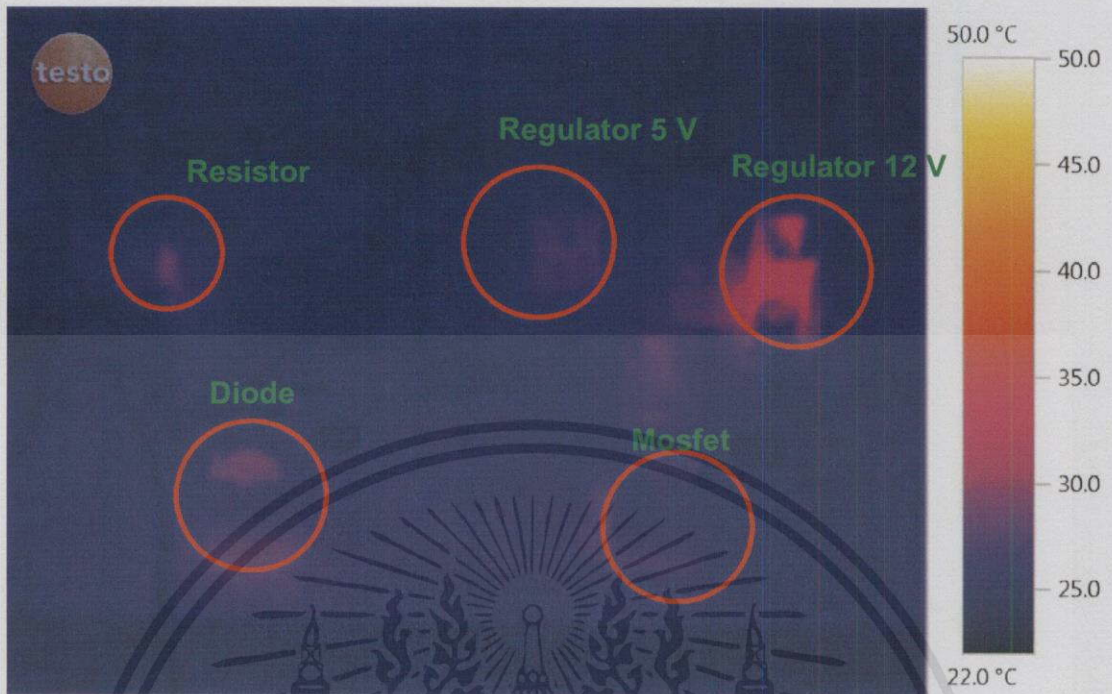


รูปที่ 4.53 ตรวจสอบความร้อนที่แรงดันขาเข้า 24 V กำลังขาออก 7 W

ตารางที่ 4.10 บันทึกผลอุณหภูมิของอุปกรณ์ที่แรงดันขาเข้า 24 V กำลังขาออก 7 W

Device	Temp. [°C]
Resistor 2 $\Omega$	33.3
Diode	30.3
Mosfet	27.4
Regulator 12 V	28.8
Regulator 5 V	24.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่ข้อมูลนี้ไปยังบุคคลอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางออกเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

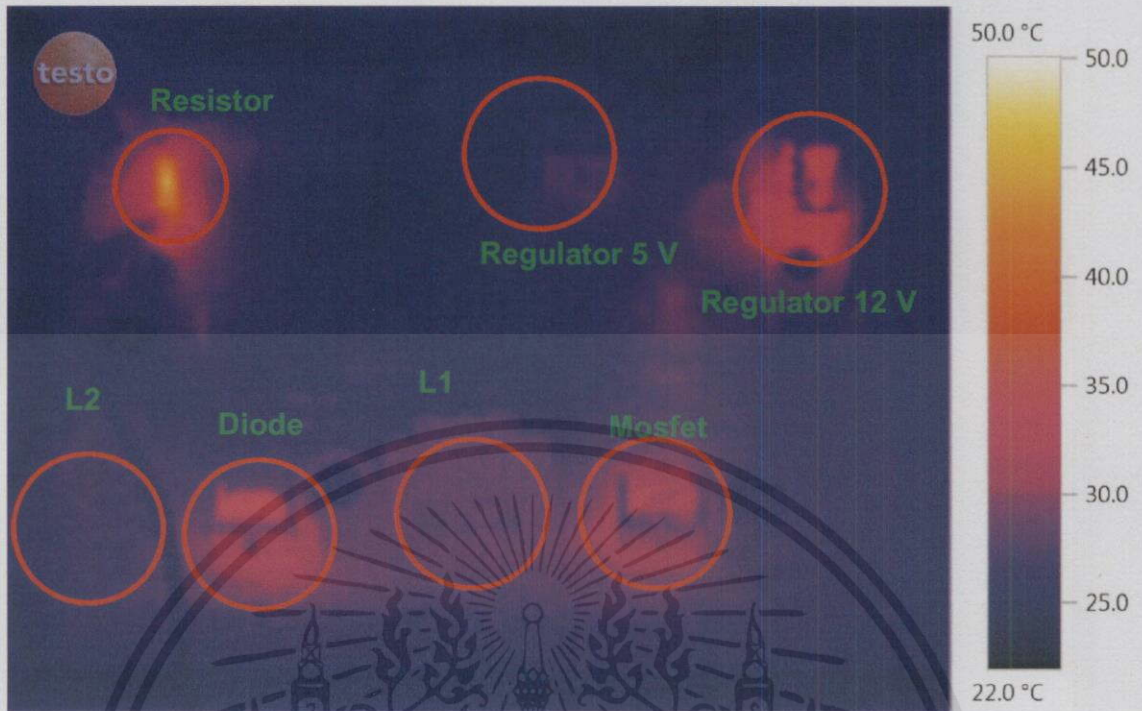


รูปที่ 4.54 ตรวจสอบความร้อนที่แรงดันขาเข้า 24 V กำลังขาออก 5 W

ตารางที่ 4.11 บันทึกผลอุณหภูมิของอุปกรณ์ที่แรงดันขาเข้า 24 V กำลังขาออก 5 W

Device	Temp. [°C]
Resistor 2 Ω	24.8
Diode	28.1
Mosfet	27.4
Regulator 12 V	28.7
Regulator 5 V	28.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.55 ตรวจจับความร้อนที่แรงดันขาเข้า 36 V กำลังขาออก 10 W

ตารางที่ 4.12 บันทึกผลอุณหภูมิของอุปกรณ์ที่แรงดันขาเข้า 36 V กำลังขาออก 10 W

Device	Temp. [°C]
Resistor 2 $\Omega$	42.8
Diode	34.3
Mosfet	30.1
Regulator 12 V	31.4
Regulator 5 V	26.4
L1	28.5
L2	27.0

จากการวัดอุณหภูมิของวงจรที่กำลังไฟฟ้า 10 วัตต์ หลังจากเปิดใช้งาน 15 นาที จะได้ผลเปรียบเทียบดังตารางที่ 4.10 ความร้อนที่เกิดขึ้นที่ตัวต้าน ไดโอด และวงจรรักษาระดับแรงดันมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่ที่มอสเฟตที่แรงดันต่ำจะมีความร้อนเกิดขึ้นมากกว่าเนื่องจากที่แรงดันต่ำมีกระแสไหลผ่านมอสเฟตมากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 บันทึกผลอุณหภูมิของอุปกรณ์ที่แรงดันขาเข้า 10-36 V กำลังขาออก 10 W

Device	อุณหภูมิของอุปกรณ์ (°C)			
	10 V	12 V	24 V	36 V
Resistor 2 $\Omega$	43.5	44.7	44.5	42.8
Diode	33.9	35.0	35.5	34.3
Mosfet	49.4	36.5	31.1	30.1
Regulator 12 V	29.5	30.1	31.1	31.4
Regulator 5 V	27.4	27.0	28.6	26.4
L1	32.4	29.2	28.8	28.5
L2	27.6	27.2	27.8	27.0

จากตารางที่ 4.13 อุปกรณ์ในวงจรมีค่าความร้อนที่เกิดขึ้นไม่มาก ซึ่งจะทำให้อุปกรณ์ในวงจรมีอายุการใช้งานที่นานกว่า ในการออกแบบวงจรจึงต้องคำนึงถึงตำแหน่งของอุปกรณ์ที่มีความร้อนสูงไม่ให้มีผลกระทบต่ออุปกรณ์อื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนาต่อไป

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองวงจรเพื่อทำการขับหลอดเพาเวอร์แอลอีดี ทั้งในส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์ วงจรขับเกท วงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ และในส่วนของวงจร feedback มาประกอบกันเพื่อให้วงจรสมบูรณ์ โดยจากการทดลองพบว่าวงจรสามารถทำงานได้ในช่วง 9-36 V ซึ่งเป็นการทำงานได้ในสภาวะที่แรงดันมีค่าผิดปกติ และจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าด้านออก และแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า พบว่าเมื่อแรงดันเท่ากับ 10-36 V จะมีกำลังไฟฟ้าด้านออกค่อนข้างคงที่ จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของวงจร และแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า พบว่าเมื่อแรงดันเท่ากับ 10-36 V จะมีประสิทธิภาพในช่วง 84-89% โดยวงจรขับหลอดแอลอีดีสามารถควบคุมกระแสให้คงที่ได้ 380 mA ที่ 10-36 V มีค่า efficacy สูงสุดที่ 83 lumen/W และมีประสิทธิภาพของวงจรขับสูงสุดที่ 89.4% ที่แรงดันด้านเข้า 24 โวลต์

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การเลือกใช้วงจรไฟเลี้ยงเข้ามาใช้งาน ควรที่จะเลือกแบบ switching แทนที่แบบ linear เพื่อให้ประสิทธิภาพของวงจรมีค่าที่สูงขึ้นและยังลดการสูญเสียที่เกิดจากการรับพลังงานไฟฟ้าทางด้านขาเข้ามาใช้เลี้ยงระบบคอนโทรลและระบบกำลัง
2. การเลือกใช้ความถี่สวิตซ์ซิ่ง ควรเลือกใช้ความถี่สวิตซ์ซิ่งที่เหมาะสม ควรเลือกใช้ไม่น้อยกว่า 20 kHz เนื่องจากเสียงที่เราได้ยินจะเป็นช่วงที่มีความถี่ต่ำกว่านี้ และการเลือกใช้ความถี่ที่สูงเกินไปจะทำให้เกิด switching loss มาก
3. การเลือกใช้อุปกรณ์ในการตรวจจับกระแสที่ด้านออก ที่เหมาะสมจะสามารถทำให้ประสิทธิภาพของวงจรให้สูงขึ้น และสามารถลดความร้อนที่เกิดขึ้นในวงจรในส่วนของการตรวจจับกระแสได้
4. การเลือกใช้อุปกรณ์ในวงจรที่มีความสูญเสียต่ำเช่น มอสเฟตที่มีค่าความต้านทานขณะใช้งานต่ำ หรือไดโอดที่มีแรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสที่มีค่าต่ำ จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรให้สูงขึ้น แต่ต้องเลือกอุปกรณ์ให้มีพิคกที่ทนต่อการใช้งานได้
5. การทดสอบหลอดไฟแอลอีดี ควรทำหลังจากหลอดทำงานไปแล้ว 15 นาที เพื่อให้หลอดไฟ และวงจรเข้าสู่สภาวะคงตัวก่อน การวัดจึงจะมีความถูกต้องมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 แนวทางการพัฒนาต่อไป

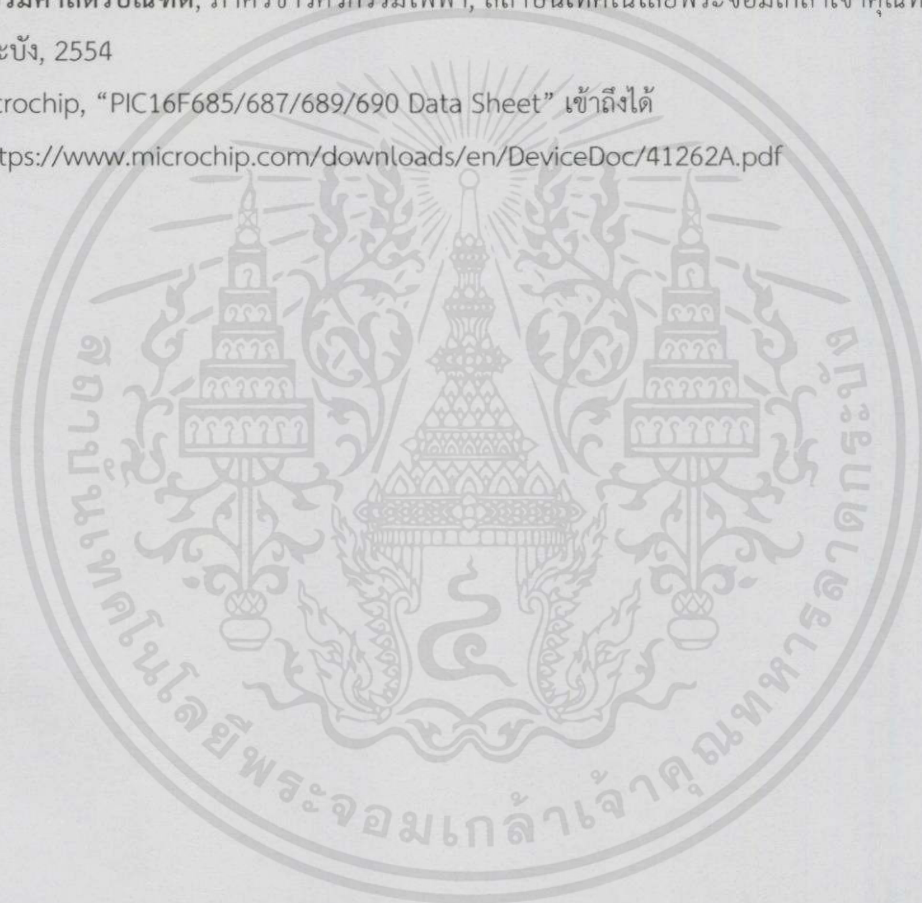
1. ค่าความสว่างที่ได้ของหลอดแอลอีดียังมีค่าน้อยอยู่ ดังนั้นเราสามารถนำไปพัฒนาต่อได้ โดยการเพิ่มค่าความสว่างของหลอดโดย เพิ่มจำนวนของหลอดให้มากขึ้น เปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มค่าลูเมนให้มากขึ้น หรือเปลี่ยนหลอดแอลอีดีใหม่ที่มีค่าลูเมนต่อวัตต์สูงชันกว่าหลอดที่ใช้อยู่
2. สามารถเพิ่มฟังก์ชันทำงานได้ เช่น หลอดไฟแสดงสถานการณ์ทำงานต่างๆ ฟังก์ชันการทำงานเปิดปิดไฟจากระบบไร้สาย และฟังก์ชันลดแสงสว่างจากระบบไร้สาย
3. ขนาดของวงจรขับหลอดยังมีขนาดใหญ่ ดังนั้นเราสามารถนำไปพัฒนาต่อ โดยการเพิ่มความถี่สวิตชิงเพื่อลดขนาดของอุปกรณ์ในวงจรขับลงได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] รศ.ร.อ.ดร.วีระเชษฐ์ ชันเงิน, วุฒิพล ธาราธิระเศรษฐ์ “อิเล็กทรอนิกส์กำลัง” พิมพ์ครั้งที่ 3 สำนักพิมพ์ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ.พรินต์ติ้ง
- [2] กวีพจน์ วรเนตรสุทธิกุล, “การเพิ่มประสิทธิภาพการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้วงจรชิงโครนัส ซีต้าคอนเวอร์เตอร์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์,” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2557.
- [3] วันวิสา เอกแก้ว ันณวัฒน์ เฉิดฉิม และ จิรัชตา บุญพร้อม, “โคมไฟอัจฉริยะ,” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2554
- [4] Microchip, “PIC16F685/687/689/690 Data Sheet” เข้าถึงได้  
จาก:<https://www.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/41262A.pdf>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# เทคนิคการสร้างวงจรขับสำหรับ LED

## LED driver Technique

เดชิต ตรงนุกุล อภินัฐ หงส์วิเศษชัย และ อธิธิกร ศรสุวรรณ

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย ฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทร 02-329-8000 ต่อ 3925

### บทคัดย่อ

เนื่องจากในปัจจุบันไฟฟ้าได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตมนุษย์อย่างมาก รวมทั้งแนวคิดเรื่องลดภาวะโลกร้อน จึงเป็นที่มาของการประดิษฐ์หลอดไฟแอลอีดีที่แทนหลอดฟลูออเรสเซนต์ โดยหลอดชนิดนี้มีข้อดีคือสามารถให้ความสว่างมากกว่าหลอดฟลูออเรสเซนต์โดยทั่วไป ในโครงการฉบับนี้เป็นรายงานผลการออกแบบสร้างวงจรขับหลอดแอลอีดี ที่สามารถรับแรงดันกระแสตรงขาเข้าได้ 9 V ถึง 36 V เพื่อสามารถใช้ในรถยนต์ที่แบตเตอรี่ต่ำลงถึง 9 V หรือมีแรงดันถึง 36 V ได้ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อควบคุมความสว่าง และป้องกันความเสียหายของหลอดแอลอีดีด้วยการควบคุมกระแสให้คงที่

**คำสำคัญ:** แอลอีดี, ซีต้าคอนเวอร์เตอร์, วงจรขับ

### Abstract

Nowadays, electricity has become important things in human life and technology has been continuously developing with ideas about for reducing global warming. This is the reason to invent LED lamp to replaces fluorescent lamp. This type of lamp has a lot of advantage such as it is brighter than fluorescent lamp, it is also low power consumption, has longer lifetime. This project shows the design of LED driver that can receive input voltage 9 V dc to 36 V dc in order to use in car when battery low to 9 volt or high to 36 volt. This driver is controlled by Microcontroller for the light dimmer and protects LED from peak current damage by constant current control.

**Keyword:** LED, Zeta converter, LED driver

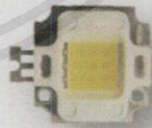
### 1.บทนำ

การนำหลอดไฟแอลอีดีมาใช้ทดแทนหลอดไฟแบบดั้งเดิม จำเป็นต้องมีวงจรขับหลอดแอลอีดี (LED Driver) ดังนั้นจึงต้องออกแบบวงจรขับหลอดแอลอีดีโดยอาศัยความรู้ และ การสร้างวงจรที่ใช้งานได้จริงตามที่ออกแบบไว้ โดยให้มีประสิทธิภาพสูงสุด มีขนาดเหมาะสม สามารถผลิตได้จำนวนมากเพื่อทดแทนวงจรขับเดิมในท้องตลาดที่ประสิทธิภาพต่ำกว่าได้

### 2.ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 หลอดแอลอีดี

ไดโอดเปล่งแสง หรือ LED (Light-emitting diode) คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จำพวกสารกึ่งตัวนำที่สามารถเปล่งแสงได้ หลอดไฟแอลอีดีสามารถนำมาใช้แทนหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้ทั่วไปได้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้แทนหลอดเมทัลฮาไลด์ หลอดฮาโลเจน หรือ หลอดไฟชนิดอื่นที่ต้องการความสว่างสูงได้

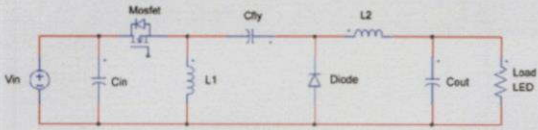


รูปที่ 1 หลอดแอลอีดี

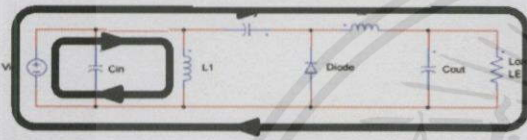
#### 2.2 วงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์

วงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ มีการทำงานเป็นแบบเพิ่มหรือลดระดับแรงดันไฟฟ้า โดยที่แรงดันไฟฟ้าด้านออกมีทิศทางตรงกันข้ามแรงไฟฟ้าด้านเข้า และมีวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านชนิด LC ทางด้านออก ส่วนการเชื่อมต่อระหว่างด้านเข้าและด้านออกของวงจร Zeta converter จะใช้ตัวเก็บประจุ ซึ่งมีหลักการทำงานดังนี้ การทำงานของวงจรในแต่ละโหมดการทำงานจะประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอนหลักๆ คือ ขณะ

มอสเฟตนำกระแส กระแสจะไหลสองเส้นทาง เส้นทางแรกจากแหล่งจ่ายผ่านสวิตช์ซึ่งตัวแรก ไปยังตัวเก็บประจุ  $C_{fly}$  ผ่านตัวเหนี่ยวนำทางด้านขาออก ( $L_2$ ) และไปยังโหลด และจะวนกลับมาที่แหล่งจ่ายผ่านกราวด์เส้นทางที่สองจากแหล่งจ่ายผ่านมอสเฟตไปตัวเหนี่ยวนำ ( $L_1$ ) และกลับมายังแหล่งจ่ายผ่านกราวด์ ดังแสดงในรูปที่ 3

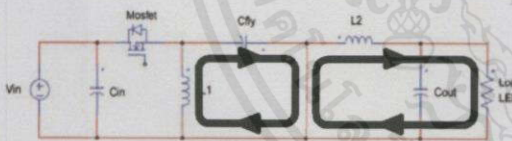


รูปที่ 2 วงจรสวิตช์คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 3 วงจรสวิตช์คอนเวอร์เตอร์ขณะนำกระแส

ในขณะที่มอสเฟตหยุดนำกระแส ตัวเก็บประจุทางด้านขาเข้าจะถูกตัดออกจากระบบแต่กระแสยังไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสองเส้นทาง เส้นทางแรกจากตัวเหนี่ยวนำทางด้านออก ( $L_2$ ) ไหลผ่านโหลดและลงกราวด์ และผ่านไดโอดกลับมายังตัวเหนี่ยวนำทางด้านออก เส้นทางที่สอง จากตัวเหนี่ยวนำ ( $L_1$ ) กระแสไหลไปยังตัวเก็บประจุ ( $C_{fly}$ ) ผ่านไดโอดกลับมายังตัวเหนี่ยวนำ ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 วงจรสวิตช์คอนเวอร์เตอร์ขณะไม่นำกระแส

3 การออกแบบ

การออกแบบพารามิเตอร์ต่างๆจะมีสูตรการคำนวณดังนี้

การออกแบบตัวเก็บประจุที่ด้านเข้า ( $C_{in}$ )

$$C_{in} = \frac{I_o}{2 \times f \times I_{ripple} \times V_s} \tag{1}$$

การออกแบบตัวเก็บประจุที่อยู่ระหว่างกลาง ( $C_{fly}$ )

$$C_{fly} = \frac{V_o D}{R \times f \times V_{ripple}} \tag{2}$$

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$

$$L_1 = \frac{(1-D)^2}{2Df} \times R \tag{3}$$

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ  $L_2$

$$L_2 = \frac{(1-D)}{2f} \times R \tag{4}$$

การออกแบบตัวเก็บประจุด้านออก ( $C_o$ )

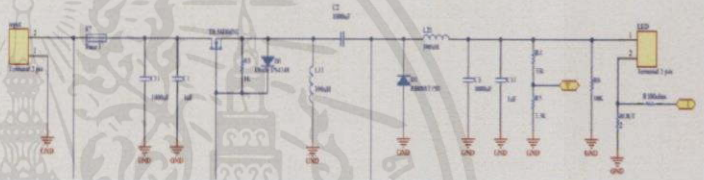
$$C_o = \frac{(1-D)}{8L_2 f^2 \times \frac{\Delta V_o}{V_o}} \tag{5}$$

เมื่อทำการออกแบบพารามิเตอร์ต่างๆจะได้ค่าดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของวงจรสวิตช์คอนเวอร์เตอร์ที่ได้ทำการออกแบบ

$C_{in}$	1000 $\mu$ H	$L_1$	390 $\mu$ H
$C_{fly}$	1000 $\mu$ F	$L_2$	390 $\mu$ H
$C_o$	1000 $\mu$ F	Mosfet	TK58E06N1

จึงสามารถทำการออกแบบวงจรได้ดังรูปที่ 5 และ รูปที่ 6



รูปที่ 5 วงจรสวิตช์คอนเวอร์เตอร์ที่ได้ทำการออกแบบ



รูปที่ 6 วงจรสวิตช์คอนเวอร์เตอร์ที่ได้ทำการสร้างจริง

4.ผลการทดลอง

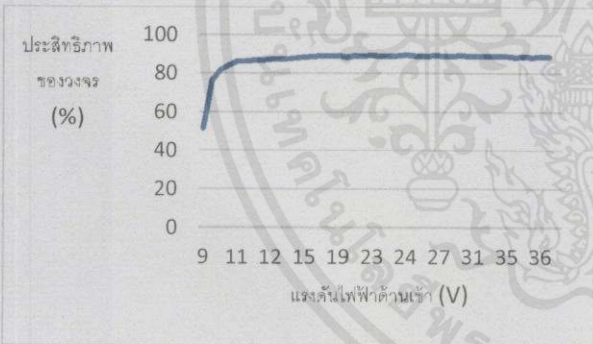
4.1 การหาประสิทธิภาพของวงจร

จากการทดลองหาประสิทธิภาพโดยเปลี่ยนแรงดันขาเข้า ตั้งแต่ 9 ถึง 36 โวลต์ ผลปรากฏว่ากำลังไฟฟ้าขาออกมีค่าคงที่ที่ 10.8 วัตต์ แต่เมื่อลดแรงดันขาเข้าต่ำกว่า 10 โวลต์ ปรากฏว่ากำลังไฟฟ้าขาออกมีค่าลดลงเหลือ 7.5 วัตต์ ที่แรงดันขาเข้า 9.5 โวลต์ และเหลือ 3 วัตต์ ที่แรงดันขาเข้า 9 โวลต์ เนื่องจากเมื่อแรงดันขาเข้าต่ำตัวไดโอดของสัญญาณ PWM มีค่ามาก ทำให้ตัวเหนี่ยวนำเกิดการอิ่มตัวจึงไม่สามารถลดกระแสขาเข้าให้ได้อะไรที่ต้องการ ดังรูปที่ 7

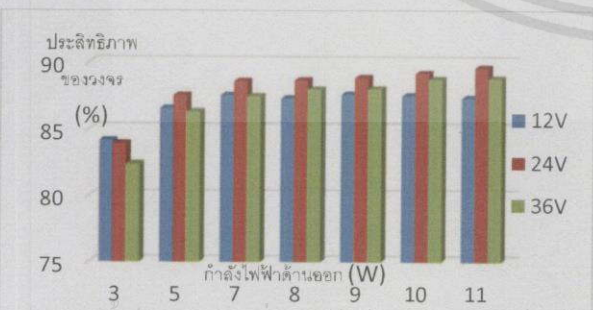


รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้านำเข้าและแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า

จากการทดลองหาประสิทธิภาพโดยเปลี่ยนแรงดันขาเข้า ตั้งแต่ 9 ถึง 36 โวลต์ ผลปรากฏว่าประสิทธิภาพของวงจรมีค่าคงที่ประมาณร้อยละ 84 – 89 แต่เมื่อลดแรงดันขาเข้าต่ำกว่า 12 โวลต์พบว่าประสิทธิภาพของวงจรมีค่าลดลงเหลือร้อยละ 86 ที่ 11 โวลต์ และร้อยละ 84 ที่ 10 โวลต์ จากนั้นประสิทธิภาพจะลดลงอย่างมากเหลือร้อยละ 76 ที่ 9.5 โวลต์ และเหลือเพียงร้อยละ 51 ที่ 9 โวลต์ ซึ่งมีสาเหตุมาจาก มอดเฟต เนื่องจากที่แรงดันขาเข้าต่ำจะมีกระแสไหลผ่าน มอดเฟตมากกว่าทำให้เกิดการสูญเสียที่มอดเฟตมากกว่าที่แรงดันขาเข้าสูง ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของวงจรและแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า



รูปที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของวงจรและกำลังไฟฟ้าด้านเข้า

จากการทดลองหาประสิทธิภาพโดยให้แรงดันขาเข้าคงที่ที่ 12, 24 และ 36 โวลต์ จากนั้นใช้วงจรขับปรับกำลังไฟฟ้าขาออก ผลปรากฏว่าประสิทธิภาพของวงจรมีค่าลดลงตามกำลังไฟฟ้าขาออกที่ปรับลดลง ซึ่งสอดคล้องกันที่แรงดันขาเข้าทั้ง 3 ค่า ซึ่งมีสาเหตุมาจากกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียที่วงจรคอนโทรลมีค่าคงที่ เมื่อปรับกำลังไฟฟ้าขาออกลง ประสิทธิภาพโดยรวมของวงจรขับจึงลดลง ดังรูปที่ 9

### 4.2 การทดลองหาค่าความสูญเสียในวงจร

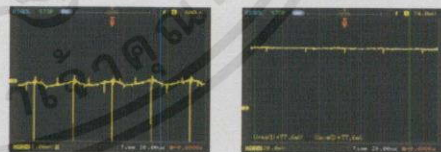
จากการทดลองหาค่าความสูญเสียที่อุปกรณ์ต่างๆ พบว่าที่แรงดันขาออก 12V มีความสูญเสียมากที่สุดดัง ตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าความสูญเสียในอุปกรณ์ต่างๆ

กำลังสูญเสีย (W)			
Device	Vin 12 V	Device	Vin 12 V
Diode	0.22	L	0.26
Mosfet	0.01	R	0.29
วงจรควบคุม	0.07	Total	10.29%

### 4.3 การวัดกราฟกระแสกระเพื่อม

วัดกราฟกระแสจากออสซิลโลสโคป เพื่อเปรียบเทียบระหว่างด้านเข้าและด้านออก พบว่าที่แรงดันขาเข้า 12 V ถึง 36 V มีกระแสกระเพื่อมเท่ากันที่ 0.5 mA ดังตารางที่ 3 ส่วนรูปที่ 10 แสดงถึงกราฟกระแสขาเข้าและขาออก โดยกระแสขาออกจะมีกระแสกระเพื่อมน้อยกว่าขาเข้า



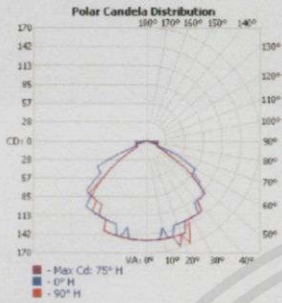
รูปที่ 10 (ซ้าย) กระแสขาเข้าที่แรงดัน 12V (ขวา) กระแสขาออก

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบกระแสกระเพื่อมขาออก

แรงดันด้านเข้า (V)	กระแสกระเพื่อมด้านออก (mA)	กระแสด้านออก (mA)	Ripple Factor
12	0.5	388	0.14
24	0.5	388	0.14
36	0.5	388	0.14

### 4.4 การทดลองทางแสงสว่าง

เมื่อนำวงจรขับหลอดแอลอีดีไปทำการวัดแสงเก็บค่าจะได้ไฟล์ ies เมื่อนำมาวิเคราะห์ จะได้กราฟการกระจายความเข้มส่องสว่างที่แรงดันขาเข้า 24 V กำลังขาออก 5.8 W มี Efficacy 72.63 lm/W



รูปที่ 11 การกระจายความเข้มส่องสว่างที่ Vin= 24 V Pout= 5.8 W

### 4.5 การทดลองหาความร้อนที่เกิดขึ้นในวงจร

การทดสอบวัดความร้อนในวงจรจะทำการวัดที่แรงดัน 24V ที่กำลังไฟฟ้าขาออก 10W ซึ่งจะทำให้การวัดความร้อนของวงจรหลังจากใช้งานหลอดไฟ LED เป็นเวลา 15 นาที เพื่อให้อุณหภูมิเข้าสู่สภาวะคงตัว ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 12 พบว่าอุณหภูมิของอุปกรณ์มีค่าไม่สูงมากจึงไม่มีผลกระทบต่อ life cycle ของวงจรขับหลอดแอลอีดี



รูปที่ 12 ตรวจวัดความร้อนที่แรงดันขาเข้า 24 V กำลังขาออก 10 W

แรงดันไฟฟ้าด้านเข้าพบว่าเมื่อแรงดันเท่ากับ 10-36 V จะมีประสิทธิภาพในช่วง 84-89% โดยวงจรขับหลอดแอลอีดีสามารถควบคุมกระแสให้คงที่ได้ 380 mA ที่ 24 V มี 5.8 W มีค่า efficacy สูงสุดที่ 72.63 lumen/W และมีประสิทธิภาพของวงจรขับสูงสุดที่ 89.4% ที่ 24 V 10.8 W โดยอีกประมาณ 10%-15% สูญเสียจากวงจรรักษาระดับแรงดัน วงจรควบคุม ตัวต้านทาน ไดโอด และมอดเฟด

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์ พี่ที่วีเซียร์ ไดนามิก และพี่ๆที่ห้องแลป EMC ที่คอยให้คำแนะนำเรื่องต่างๆและขอบคุณบิดาและมารดาที่คอยเป็นกำลังใจให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

### เอกสารอ้างอิง

- [1] รศ.ร.อ.ดร.วีระเชษฐ ชันเงิน, วุฒิพล ชาราธิ์เศรษฐ์ "อิเล็กทรอนิกส์กำลัง" พิมพ์ครั้งที่ 3 สำนักพิมพ์ ห้างหุ้นส่วนจำกัด วิ.เจ.พรินติ้ง
- [2] กวีพจน์ วรเนตรสุทธิกุล, "การเพิ่มประสิทธิภาพการติดตามกำลังไฟฟ้สูงสุดโดยใช้วงจรซิงโครไนส์ซีต้าคอนเวอร์เตอร์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2557.

### ประวัติผู้เขียนบทความ



นายเดชิต ตรงนุกุล เกิดวันที่ 19 มีนาคม พ.ศ.2536 ภูมิลำเนา 428 เจริญนคร 14 แขวงคลองตัน ไทร เขต คลองสาน กรุงเทพฯ 10600 สนใจงานวิจัยด้าน เพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์



นาย อิทธิกร ศรีสุวรรณ เกิดวันที่ 9 กันยายน พ.ศ. 2535 ภูมิลำเนา 96/7 หมู่ 8 ต.ธารเกษม อ.พระพุทธรบาท จ.สระบุรี 18120 สนใจงานวิจัยด้านระบบไฟฟ้า



นาย อภิณัฐ หงส์วิเศษชัย เกิดวันที่ 25 กันยายน พ.ศ. 2535 ภูมิลำเนา 18 หมู่บ้านเพชรอินทรา ซอยราม ำเนินการค้า อินทรา 99 ถนนรามอินทรา แขวงคันนายาว เขตคันนายาว กรุงเทพฯ 10230 สนใจงานวิจัยระบบไฟฟ้า

### 5.สรุป

จากการทดลองวงจรเพื่อทำการขับหลอดเพาเวอร์แอลอีดี ทั้งในส่วนขงไมโครคอนโทรลเลอร์ วงจรขับเกท วงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ และในส่วนขงวงจร feedback มาประกอบกันเพื่อให้วงจรสมบูรณ์ โดยจากการทดลองพบว่าวงจรสามารถทำงานได้ในช่วง 9-36 V จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าด้านออก และแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า พบว่าเมื่อแรงดันเท่ากับ 10-36 V จะมีกำลังไฟฟ้าด้านออกค่อนข้างคงที่ จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของวงจร และ



โค้ดควบคุมวงจรขับหลอดแอลอีดี

```

#include <16f685.h> // เรียก libraries ของ PIC16f685
#fuses hs,noprotect,nowdt // ตั้งค่าโปรแกรมเป็น high speed
clock, no protection, no watchdog
#device adc=10 // ตั้งค่า Analog to Digital เป็น 10 บิต
#use delay(clock=20000000) // ใช้ crystal 20 MHz
#use fast_io(a) // เปิดใช้งานพอร์ต A
#use fast_io(c) // เปิดใช้งานพอร์ต C
short done,operate; // ตั้งตัวแปร short ชื่อ done และ operate
int16 feedback,ref,dutyx; // ตั้งตัวแปร int16 ชื่อ feedback, ref
และ dutyx
#int_ext // สร้างฟังก์ชัน interrupt เมื่อขา
inerrupt เกิดสัญญาณภายนอก
void ext()
{
    operate=0; // เมื่อฟังก์ชัน interrupt ทำงานให้ตัวแปร
    operate =0
}
void main() // สร้างฟังก์ชัน main
{
    set_tris_a(0b00000111); // กำหนดขา 0 ถึง 2 ของพอร์ต A เป็น
input ขาที่เหลือเป็น output
    set_tris_c(0b00000000); // กำหนดขาทุกขาของพอร์ต C เป็น
output
    setup_ccp1(ccp_pwm); // เรียกใช้งานขา ccp กำหนดเป็น
pwm mode
    setup_timer_2(t2_div_by_1,249,1); //
    dutyx=50; // ตั้งค่าตัวแปร dutyx = 50 (50/250 = 20%)
    setup_adc_ports(pin_a1); // กำหนดพิน A1 เป็น Analog to
Digital
    setup_adc_ports(pin_a10); // กำหนดพิน A10 เป็น Analog to
Digital
    setup_adc(adc_clock_internal); // กำหนดขา Analog to Digital ให้ใช้
clock ภายใน
    enable_interrupts(global); // เปิดใช้งาน interrupt
    enable_interrupts(int_ext); // เปิดใช้งาน interrupt แบบสัญญาณ
ภายนอก

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น | ผู้อ่านผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

set_adc_channel(10);           // อ่านค่า Analog to Digital จากขา A10
delay_us(50);                 // หน่วงเวลา 50 us เพื่ออ่านค่า
ref=read_adc();               // กำหนดตัวแปร ref เท่ากับค่า
digital ที่อ่านได้
ref=ref/13;
ref=ref*2;
if(ref<35)                    // ตรวจสอบเงื่อนไขว่าตัวแปร ref น้อยกว่า 35
หรือไม่
{
    ref=35;                   // ถ้าตัวแปร ref น้อยกว่า 35 ให้ตัวแปร ref มี
ค่าเท่ากับ 35
}
set_pwm1_duty(dutyx);        // ส่งสัญญาณ pwm duty เท่ากับค่า
dutyx
operate=1;                   // กำหนดตัวแปร operate เท่ากับ 1
while(feedback<ref)          // สร้าง while loop โดยมีเงื่อนไขว่าเมื่อ
feedback น้อยกว่า ref ให้ทำงาน
{
    dutyx=dutyx+1;           // เพิ่มค่า dutyx ทีละ 1
    if(dutyx>198)            // ตรวจสอบเงื่อนไขว่าตัวแปร dutyx มากกว่า
198 หรือไม่
    {
        dutyx=198;          // ถ้าตัวแปร dutyx มากกว่า 198 ให้ตัวแปร
dutyx มีค่าเท่ากับ 198 (198/250 = 79%)
    }
    set_pwm1_duty(dutyx);    // ส่งสัญญาณ pwm duty เท่ากับค่า
dutyx
    set_adc_channel(0);      // อ่านค่า Analog to Digital จากขา
A0
    delay_us(30);           // หน่วงเวลา 30 us เพื่ออ่านค่า
    feedback=read_adc();    // กำหนดตัวแปร feedback เท่ากับค่า
digital ที่อ่านได้
    delay_ms(30);          // หน่วงเวลา 30 ms ก่อนวน loop ใหม่
}
while(1)                     // สร้าง loop ให้ PIC ทำงานตลอด
{

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายเท่านั้น เมื่อผู้ใดได้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

while(operate) // สร้าง while loop โดยมีเงื่อนไขว่า
เมื่อ operate=1 ให้ทำงานใน loop
{
set_adc_channel(0); // อ่านค่า Analog to Digital จากขา A0
done=adc_done(); // กำหนดค่าตัวแปร done เมื่ออ่านค่า
Analog to Digital เสร็จ done จะเท่ากับ 1
while(!done) // สร้าง while loop โดยมีเงื่อนไขว่า
เมื่อ done=0 ให้ทำงานใน loop
{
done=adc_done(); // กำหนดค่าตัวแปร done เมื่ออ่านค่า
Analog to Digital เสร็จ done จะเท่ากับ 1 จนกว่าจะอ่านค่าเสร็จ
}
feedback=read_adc(); // กำหนดตัวแปร feedback เท่ากับค่า
digital ที่อ่านได้
while(feedback<ref) // สร้าง while loop โดยมี
เงื่อนไขว่าเมื่อ feedback น้อยกว่า ref ให้ทำงาน
{
dutyx=dutyx+1; // เพิ่มค่า dutyx ทีละ 1
if(dutyx>198) // ตรวจสอบเงื่อนไขตัวแปร dutyx มากกว่า
198 หรือไม่
{
dutyx=198; // ถ้าตัวแปร dutyx มากกว่า 198 ให้ตัวแปร dutyx มีค่าเท่ากับ 198
(198/250 = 79%)
}
set_pwm1_duty(dutyx); // ส่งสัญญาณ pwm duty เท่ากับค่า dutyx
set_adc_channel(0); // อ่านค่า Analog to Digital จากขา A0
delay_us(10); // หน่วงเวลา 10 us เพื่ออ่านค่า
feedback=read_adc(); // กำหนดตัวแปร feedback เท่ากับค่า digital ที่อ่านได้
delay_us(30); // หน่วงเวลา 30 ms ก่อนวน loop ใหม่
}

while(feedback>ref) // สร้าง while loop โดยมีเงื่อนไขว่า
เมื่อ feedback มากกว่า ref ให้ทำงาน
{
dutyx=dutyx-1; // ลดค่า dutyx ทีละ 1
set_pwm1_duty(dutyx); // ส่งสัญญาณ pwm duty เท่ากับค่า dutyx
set_adc_channel(0); // อ่านค่า Analog to Digital จากขา A0
delay_us(10); // หน่วงเวลา 10 us เพื่ออ่านค่า
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ภายใต้การใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น หากพบว่ามีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องวางอิงคิงเจ้าของลิขสิทธิ์ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

feedback=read_adc(); // กำหนดตัวแปร feedback เท่ากับค่า digital ที่อ่านได้
delay_us(30); // หน่วงเวลา 30 ms ก่อนวน loop ใหม่
}

set_adc_channel(10); // อ่านค่า Analog to Digital จากขา A10
delay_us(10); // หน่วงเวลา 10 us เพื่ออ่านค่า
ref=read_adc(); // กำหนดตัวแปร ref เท่ากับค่า digital ที่อ่านได้
ref=ref/13;
ref=ref*2;
if(ref<35) // ตรวจสอบเงื่อนไขว่าตัวแปร ref น้อยกว่า 35 หรือไม่
{
ref=35; // ถ้าตัวแปร ref น้อยกว่า 35 ให้ตัวแปร ref มีค่าเท่ากับ 35
}
}
while(!operate) // สร้าง while loop โดยมีเงื่อนไขว่าเมื่อ
operate=0 ให้ทำงานใน loop
{
set_pwm1_duty(0); // หยุดส่งสัญญาณ pwm
output_high(pin_c2); // สั่งขา C2 เป็น high (สัญญาณไฟ
เตียน)
}
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค.  
ข้อมูลอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


**MICROCHIP**
**PIC16F685/687/689/690**
**20-Pin Flash-Based, 8-Bit CMOS Microcontrollers with nanoWatt Technology**
**High-Performance RISC CPU:**

- Only 35 instructions to learn:
  - All single-cycle instructions except branches
- Operating speed:
  - DC – 20 MHz oscillator/clock input
  - DC – 200 ns instruction cycle
- Interrupt capability
- 8-level deep hardware stack
- Direct, Indirect and Relative Addressing modes

**Special Microcontroller Features:**

- Precision Internal Oscillator:
  - Factory calibrated to  $\pm 1\%$
  - Software selectable frequency range of 8 MHz to 32 kHz
  - Software tunable
  - Two-Speed Start-up mode
  - Crystal fail detect for critical applications
  - Clock mode switching during operation for power savings
- Power-saving Sleep mode
- Wide operating voltage range (2.0V-5.5V)
- Industrial and Extended Temperature range
- Power-on Reset (POR)
- Power-up Timer (PWRT) and Oscillator Start-up Timer (OST)
- Brown-out Reset (BOR) with software control option
- Enhanced low-current Watchdog Timer (WDT) with on-chip oscillator (software selectable nominal 268 seconds with full prescaler) with software enable
- Multiplexed Master Clear/Input pin
- Programmable code protection
- High Endurance Flash/EEPROM cell:
  - 100,000 write Flash endurance
  - 1,000,000 write EEPROM endurance
  - Flash/Data EEPROM retention: > 40 years
- Enhanced USART Module:
  - Supports RS-485, RS-232, and LIN 2.0
  - Auto-Baud Detect
  - Auto-wake-up on Start bit

**Low-Power Features:**

- Standby Current:
  - 1 nA @ 2.0V, typical
- Operating Current:
  - 20  $\mu$ A @ 32 kHz, 2.0V, typical
  - <1 mA @ 4 MHz, 5.5V, typical
- Watchdog Timer Current:
  - <1  $\mu$ A @ 2.0V, typical

**Peripheral Features:**

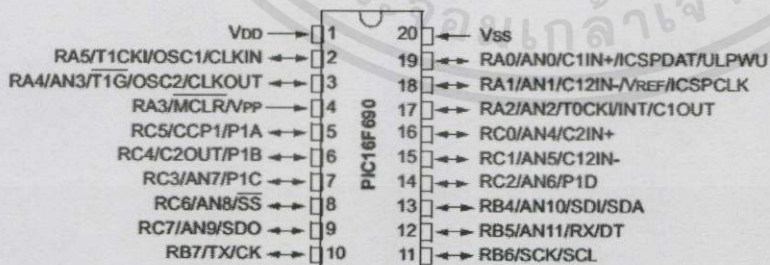
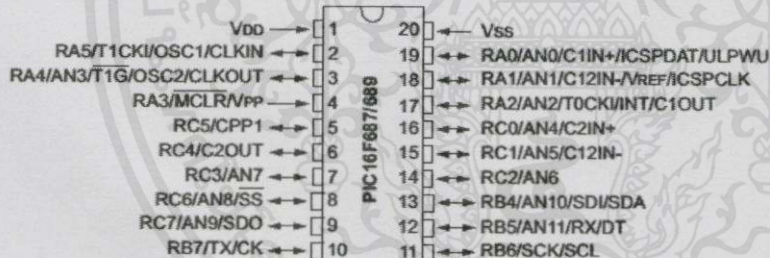
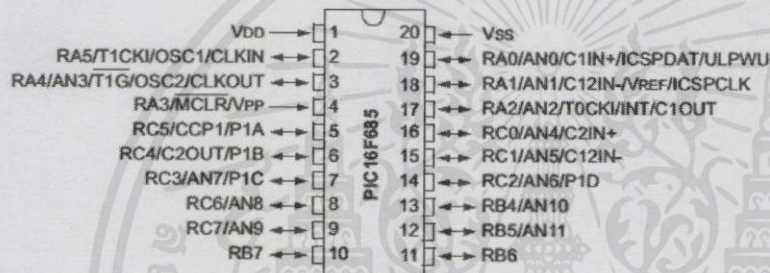
- 17 I/O pins and 1 input only pin:
  - High current source/sink for direct LED drive
  - Interrupt-on-pin change
  - Individually programmable weak pull-ups
  - Ultra Low-Power Wake-up (ULPWU)
- Analog comparator module with:
  - Two analog comparators
  - Programmable on-chip voltage reference (CVREF) module (% of VDD)
  - Comparator inputs and outputs externally accessible
  - SR Latch mode
  - Timer 1 Gate Sync Latch
- A/D Converter:
  - 10-bit resolution and 12 channels
- Timer0: 8-bit timer/counter with 8-bit programmable prescaler
- Enhanced Timer1:
  - 16-bit timer/counter with prescaler
  - External Gate Input mode
  - Option to use OSC1 and OSC2 in LP mode as Timer1 oscillator if INTOSC mode selected
- Timer2: 8-bit timer/counter with 8-bit period register, prescaler and postscaler
- Enhanced Capture, Compare, PWM+ module:
  - 16-bit Capture, max resolution 12.5 ns
  - Compare, max resolution 200 ns
  - 10-bit PWM with 1, 2 or 4 output channels, programmable "dead time", max frequency 20 kHz
  - PWM output steering control
- Synchronous Serial Port (SSP):
  - SPI™ mode (Master and Slave)
- I<sup>2</sup>C™ (Master/Slave modes):
  - I<sup>2</sup>C™ address mask
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) via two pins

# PIC16F685/687/689/690

Device	Program Memory	Data Memory		I/O	10-bit A/D (ch)	Comparators	Timers 8/16-bit	SSP	ECCP+	EUSART
	Flash (words)	SRAM (bytes)	EEPROM (bytes)							
PIC16F685	4096	256	256	18	12	2	2/1	No	Yes	No
PIC16F687	2048	128	256	18	12	2	1/1	Yes	No	Yes
PIC16F689	4096	256	256	18	12	2	1/1	Yes	No	Yes
PIC16F690	4096	256	256	18	12	2	2/1	Yes	Yes	Yes

## Pin Diagrams

20-pin PDIP, SOIC, SSOP

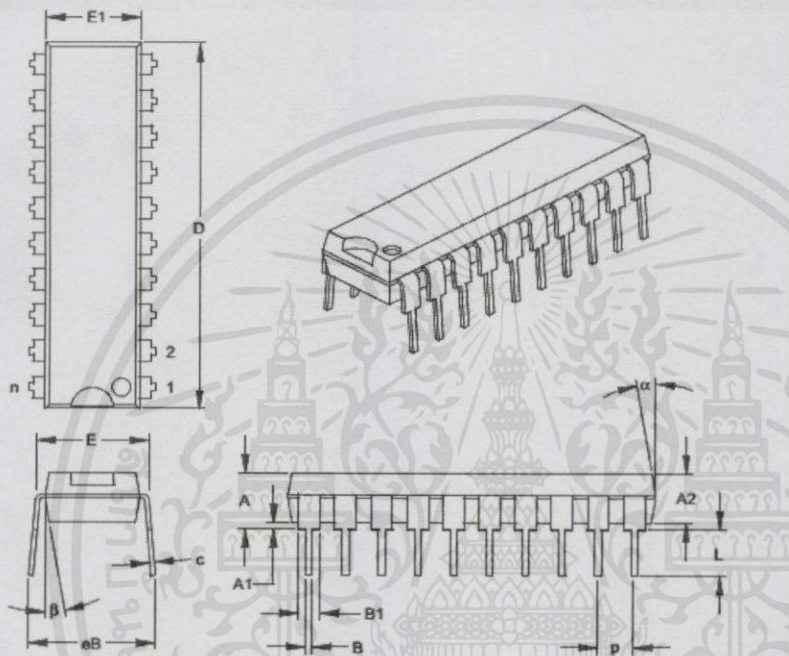


# PIC16F685/687/689/690

## 19.2 Package Details

The following sections give the technical details of the packages.

### 20-Lead Plastic Dual In-line (P) – 300 mil Body (PDIP)



Dimension Limits	Units	INCHES*			MILLIMETERS		
		MIN	NOM	MAX	MIN	NOM	MAX
Number of Pins	n		20			20	
Pitch	p		.100			2.54	
Top to Seating Plane	A	.140	.155	.170	3.56	3.94	4.32
Molded Package Thickness	A2	.115	.130	.145	2.92	3.30	3.68
Base to Seating Plane	A1	.015			0.38		
Shoulder to Shoulder Width	E	.295	.310	.325	7.49	7.87	8.26
Molded Package Width	E1	.240	.250	.260	6.10	6.35	6.60
Overall Length	D	1.025	1.033	1.040	26.04	26.24	26.42
Tip to Seating Plane	L	.120	.130	.140	3.05	3.30	3.56
Lead Thickness	c	.008	.012	.015	0.20	0.29	0.38
Upper Lead Width	B1	.055	.060	.065	1.40	1.52	1.65
Lower Lead Width	B	.014	.018	.022	0.36	0.46	0.56
Overall Row Spacing	§ eB	.310	.370	.430	7.87	9.40	10.92
Mold Draft Angle Top	α	5	10	15	5	10	15
Mold Draft Angle Bottom	β	5	10	15	5	10	15

\* Controlling Parameter  
§ Significant Characteristic

Notes:

Dimensions D and E1 do not include mold flash or protrusions. Mold flash or protrusions shall not exceed

.010" (0.254mm) per side.

JEDEC Equivalent: MS-001

Drawing No. C04-019

**TOSHIBA**

TK58E06N1

MOSFETs Silicon N-channel MOS (U-MOS™-H)

# TK58E06N1

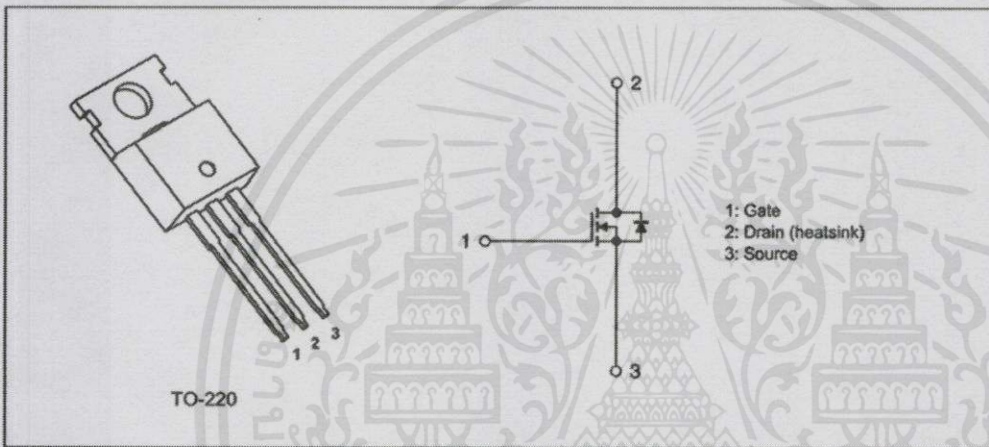
## 1. Applications

- Switching Voltage Regulators

## 2. Features

- (1) Low drain-source on-resistance:  $R_{DS(ON)} = 4.4 \text{ m}\Omega$  (typ.) ( $V_{GS} = 10 \text{ V}$ )
- (2) Low leakage current:  $I_{DSS} = 10 \text{ }\mu\text{A}$  (max) ( $V_{DS} = 60 \text{ V}$ )
- (3) Enhancement mode:  $V_{th} = 2.0$  to  $4.0 \text{ V}$  ( $V_{DS} = 10 \text{ V}$ ,  $I_D = 0.5 \text{ mA}$ )

## 3. Packaging and Internal Circuit



## 4. Absolute Maximum Ratings (Note) ( $T_a = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified)

Characteristics	Symbol	Rating	Unit
Drain-source voltage	$V_{DS}$	60	V
Gate-source voltage	$V_{GS}$	$\pm 20$	V
Drain current (DC) (Silicon limit)	$I_D$	105	A
Drain current (DC) (Note 1), (Note 2)	$I_D$	58	A
Drain current (pulsed) ( $t = 1 \text{ ms}$ )	$I_{DP}$	268	A
Power dissipation ( $T_c = 25^\circ\text{C}$ )	$P_D$	110	W
Single-pulse avalanche energy (Note 4)	$E_{AS}$	158	mJ
Avalanche current	$I_{AR}$	58	A
Channel temperature	$T_{ch}$	150	$^\circ\text{C}$
Storage temperature	$T_{stg}$	-55 to 150	$^\circ\text{C}$

Note: Using continuously under heavy loads (e.g. the application of high temperature/current/voltage and the significant change in temperature, etc.) may cause this product to decrease in the reliability significantly even if the operating conditions (i.e. operating temperature/current/voltage, etc.) are within the absolute maximum ratings.

Please design the appropriate reliability upon reviewing the Toshiba Semiconductor Reliability Handbook ("Handling Precautions"/"Derating Concept and Methods") and individual reliability data (i.e. reliability test report and estimated failure rate, etc).

Start of commercial production

2012-06

2014-06-30

Rev.5.0

**TOSHIBA**

TK58E06N1

**5. Thermal Characteristics**

Characteristics	Symbol	Max	Unit
Channel-to-case thermal resistance	$R_{th(ch-c)}$	1.13	°C/W
Channel-to-ambient thermal resistance	$R_{th(ch-a)}$	83.3	

Note 1: Ensure that the channel temperature does not exceed 150°C.

Note 2: Limited by silicon chip capability. Package limit is 100A.

Note 3: Device mounted with heatsink so that  $R_{th(ch-a)}$  becomes 3.57°C/W.

Note 4:  $V_{DD} = 48\text{ V}$ ,  $T_{ch} = 25^\circ\text{C}$  (initial),  $L = 36.1\ \mu\text{H}$ ,  $I_{AR} = 58\text{ A}$

Note: This transistor is sensitive to electrostatic discharge and should be handled with care.



## 6. Electrical Characteristics

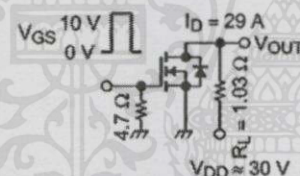
6.1. Static Characteristics ( $T_a = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise specified)

Characteristics	Symbol	Test Condition	Min	Typ.	Max	Unit
Gate leakage current	$I_{GSS}$	$V_{GS} = \pm 20\text{ V}, V_{DS} = 0\text{ V}$	—	—	$\pm 0.1$	$\mu\text{A}$
Drain cut-off current	$I_{DSS}$	$V_{DS} = 60\text{ V}, V_{GS} = 0\text{ V}$	—	—	10	
Drain-source breakdown voltage	$V_{(BR)DSS}$	$I_D = 10\text{ mA}, V_{GS} = 0\text{ V}$	60	—	—	V
Drain-source breakdown voltage (Note 5)	$V_{(BR)DSX}$	$I_D = 10\text{ mA}, V_{GS} = -20\text{ V}$	45	—	—	
Gate threshold voltage	$V_{th}$	$V_{DS} = 10\text{ V}, I_D = 0.5\text{ mA}$	2.0	—	4.0	
Drain-source on-resistance	$R_{DS(ON)}$	$V_{GS} = 10\text{ V}, I_D = 29\text{ A}$	—	4.4	5.4	$\text{m}\Omega$

Note 5: If a reverse bias is applied between gate and source, this device enters  $V_{(BR)DSX}$  mode. Note that the drain-source breakdown voltage is lowered in this mode.

6.2. Dynamic Characteristics ( $T_a = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise specified)

Characteristics	Symbol	Test Condition	Min	Typ.	Max	Unit
Input capacitance	$C_{iss}$	$V_{DS} = 30\text{ V}, V_{GS} = 0\text{ V}, f = 1\text{ MHz}$	—	3400	—	$\text{pF}$
Reverse transfer capacitance	$C_{rss}$		—	45	—	
Output capacitance	$C_{oss}$		—	1120	—	
Gate resistance	$r_g$	—	—	2.6	—	$\Omega$
Switching time (rise time)	$t_r$	See Figure 6.2.1.	—	11	—	ns
Switching time (turn-on time)	$t_{on}$		—	33	—	
Switching time (fall time)	$t_f$		—	17	—	
Switching time (turn-off time)	$t_{off}$		—	56	—	



Duty  $\leq 1\%$ ,  $t_w = 10\ \mu\text{s}$   
Fig. 6.2.1 Switching Time Test Circuit

6.3. Gate Charge Characteristics ( $T_a = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise specified)

Characteristics	Symbol	Test Condition	Min	Typ.	Max	Unit
Total gate charge (gate-source plus gate-drain)	$Q_g$	$V_{DD} = 48\text{ V}, V_{GS} = 10\text{ V}, I_D = 58\text{ A}$	—	46	—	nC
Gate-source charge 1	$Q_{gs1}$		—	15	—	
Gate-drain charge	$Q_{gd}$		—	11	—	
Gate switch charge	$Q_{sw}$		—	17	—	

**TOSHIBA**

TK58E06N1

**6.4. Source-Drain Characteristics ( $T_a = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise specified)**

Characteristics	Symbol	Test Condition	Min	Typ.	Max	Unit
Reverse drain current (DC) (Note 6)	$I_{DR}$	—	—	—	58	A
Reverse drain current (pulsed) (Note 6)	$I_{DRP}$	—	—	—	268	A
Diode forward voltage	$V_{DSF}$	$I_{DR} = 58\text{ A}, V_{GS} = 0\text{ V}$	—	—	-1.2	V
Reverse recovery time (Note 7)	$t_{rr}$	$I_{DR} = 58\text{ A}, V_{GS} = 0\text{ V}$	—	63	—	ns
Reverse recovery charge (Note 7)	$Q_{rr}$	$-dI_{DR}/dt = 100\text{ A}/\mu\text{s}$	—	100	—	nC

Note 6: Ensure that the channel temperature does not exceed  $150^\circ\text{C}$ .

Note 7: Ensure that  $V_{DS}$  peak does not exceed  $V_{DSS}$ .

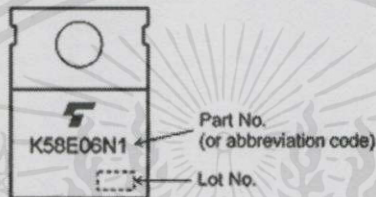
**7. Marking**

Fig. 7.1 Marking

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน



ชื่อ นายเทชิต ตรงนุกูล  
 วันเกิด 19 มีนาคม พ.ศ.2536  
 ที่อยู่ 428 เจริญนคร14 แขวงคลองตันโทร เขตคลองสาน  
 กรุงเทพฯ 10600  
 เบอร์โทร 081-3065793  
 อีเมล techit\_-\_@hotmail.com



ชื่อ นาย อธิธิกร ศรีสุวรรณ  
 วันเกิด 9 กันยายน พ.ศ. 2535  
 ที่อยู่ 96/7 หมู่ 8 ต.ธารเกษม อ.พระพุทธบาท จ.สระบุรี 18120  
 เบอร์โทร 086-8007700  
 อีเมล gent2535@gmail.com



ชื่อ นาย อภิณัฐ หงส์วิเศษชัย  
 วันเกิด 25 กันยายน พ.ศ.2535  
 ที่อยู่ 18 หมู่บ้านเพชรอินทรา ซอยรามอินทรา99 ถนนรามอินทรา  
 แขวงคันนายาว เขตคันนายาว กรุงเทพฯ 10230  
 เบอร์โทร 089-1132948  
 อีเมล hongapinat@yahoo.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้