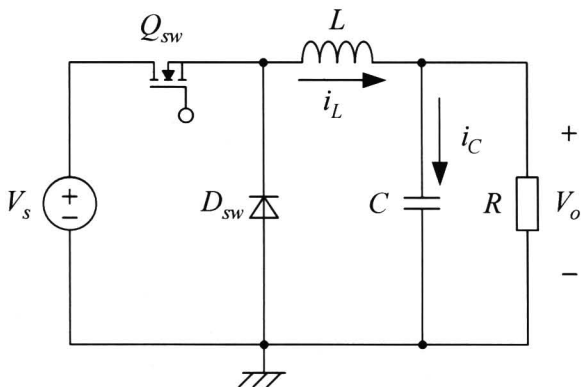


บทที่ 3

การออกแบบวงจรขับหลอด LEDs สำหรับเครื่องต้นแบบ

เนื่องจากหลอด LEDs มีคุณลักษณะทางไฟฟ้าเปรียบเสมือนอุปกรณ์ไดโอดเปล่งแสงได้ ดังนั้นการควบคุมกระแสที่ไหลผ่านตัวหลอด LEDs จึงส่งผลกระทบต่อคุณภาพของแสงที่ได้จากตัวหลอดกล่าวคือ ปริมาณ และคุณภาพรูปคลื่นกระแสไฟที่ไหลผ่านหลอดจะมีผลโดยตรงต่อค่าฟลักซ์ส่องสว่าง และอายุการใช้งานของหลอด ดังได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ซึ่งจะพบว่าที่ค่ากระแสเฉลี่ยขับหลอดใดๆ ที่ไหลผ่านตัวหลอด LEDs คือหนึ่งจุดการทำงานของตัวหลอด LEDs นั้นเอง ดังนั้นสิ่งที่ควรต้องคำนึงอย่างมากในการออกแบบวงจรขับหลอด LEDs คือค่าปริมาณกระแสเฉลี่ย และคุณภาพของรูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านหลอด

ในบทนี้จะกล่าวถึงวงจรภาคกำลังสำหรับการขับหลอด LEDs โดยแยกพิจารณาออกเป็น 2 รูปแบบหลัก ซึ่งแต่ละรูปแบบของวงจรภาคกำลังจะมีความเหมาะสมกับการใช้งานในแต่ละสถานที่ การควบคุมค่ากระแสเฉลี่ยขับหลอดจะอยู่ที่ประมาณ 80-85% ของกระแสพิกัดของหลอด LEDs ทั้งนี้เพื่อให้อุณหภูมิที่รอยต่อของหลอดไม่สูงมากเกินไปจนความจำเป็น อีกทั้งเป็นการยืดอายุการใช้งานให้ยาวนานขึ้น และง่ายต่อการระบายความร้อน ซึ่งจะพบว่าการขับหลอด LEDs ด้วยกระแสเฉลี่ยประมาณ 80-85% ของกระแสพิกัดนั้น จะส่งผลให้ได้ค่าฟลักซ์ส่องสว่างที่ได้จากหลอดไม่สูงที่สุด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเพิ่มจำนวนหลอดให้มากขึ้น เพื่อให้ได้ค่าฟลักซ์ความสว่างโดยรวมตามที่ต้องการ ซึ่งก็จะเป็นการเพิ่มต้นทุนให้สูงขึ้นเช่นกัน (จำนวนหลอดเพิ่มมากขึ้นจากเดิม) อย่างไรก็ตามอายุการใช้งานโดยรวมของระบบที่ยาวนานขึ้น จะเป็นตัวชดเชยความคุ้มค่าในการลงทุนระยะยาว



รูปที่ 3-1 วงจรแปลงผันกำลังไฟตรง-ไฟตรงบด (DC-DC Buck Converter)

3.1 การออกแบบวงจรขับหลอด

3.1.1 วงจรขับหลอดสำหรับแรงดันอินพุตไฟตรง (รูปแบบที่ 1)

วงจรขับหลอดในหัวข้อนี้จะถูกออกแบบให้เหมาะสมกับการใช้งานกรณีที่มีแรงดันอินพุตของโคมเป็นแรงดันไฟตรง ซึ่งจะเหมาะสมอย่างมากเมื่อถูกนำไปใช้งานร่วมกับระบบพลังงานทดแทน เช่นพลังงานแสงอาทิตย์ในที่ห่างไกล ฯลฯ เป็นต้น ซึ่งการควบคุมค่าฟลักซ์ส่องสว่างสามารถทำได้โดยง่ายด้วยการควบคุมกระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านหลอดเท่านั้น โดยไม่จำเป็นต้องมีการควบคุมที่ลูบแรงดัน แต่ต้องมีเงื่อนไขการใช้งานคือแรงดันตกคร่อมอนุกรมกับวงจรหลอด LEDs (แรงดันเอาต์พุตของวงจรภาคกำลัง) จะต้องมีความต่ำกว่าแรงดันอินพุตของวงจรภาคกำลังเสมอ รูปที่ 3-1 แสดงวงจรภาคกำลัง และภาคควบคุมของวงจรขับอนุกรมหลอด LEDs จำนวน 68 หลอด หัวข้อนี้จะแสดงรายละเอียดการออกแบบวงจรภาคกำลัง และวงจรควบคุมกระแสด้วยเทคนิคฮิสเทอรีซิส (Hysteresis technique) ผ่านสมการที่จำเป็นที่ใช้ในการออกแบบ พร้อมทั้งแสดงตัวอย่างการออกแบบวงจรภาคกำลัง และภาคควบคุมกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ

3.1.1.1 วงจรภาคกำลัง

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ L ของวงจรแปลงผันบัค

วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงบัคที่แสดงดังรูป 3-1 จัดเป็นวงจรแปลงผันกำลังที่มีคุณสมบัติสำคัญคือแรงดันทางด้านเอาต์พุตต้องต่ำกว่าแรงดันทางด้านอินพุตเสมอ โดยการวิเคราะห์ในวงจรแปลงผันในที่นี้จะวิเคราะห์ห้วงจรในโหมดกระแสที่ขดลวดเหนี่ยวนำต่อเนื่อง และการออกแบบค่าของขดลวดเหนี่ยวนำ L เพื่อให้วงจรทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องมีเงื่อนไขอยู่บนสมมติฐานดังนี้

- ❖ กระแสที่ไหลผ่านขดลวด i_L เป็นสัญญาณคาบเวลา
- ❖ ค่าแรงดันเฉลี่ยที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ V_L ใน 1 คาบเวลาการสวิตช์มีค่าเป็นศูนย์
- ❖ ค่ากระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ I_C ใน 1 คาบเวลาการสวิตช์มีค่าเป็นศูนย์
- ❖ การเปลี่ยนแปลงสุทธิของกระแส i_L ใน 1 คาบเวลาการสวิตช์มีค่าเป็นศูนย์
- ❖ ตัวเก็บประจุ C มีค่าสูงมากเป็นอนันต์ ดังนั้นแรงดัน V_o คงที่ และไม่มีการกระเพื่อม
- ❖ สวิตช์ Q_{sw} ปิดวงจรเป็นเวลา DT และเปิดวงจรเป็นเวลา $(1 - D)T$

ทั้งนี้ในส่วนของวงจรควบคุมจะทำการควบคุมกระแสเฉลี่ยเอาต์พุตให้คงที่ และค่าของตัวเหนี่ยวนำจะมีผลในการควบคุมในเรื่องของความถี่การสวิตช์ (f) ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เนื่องจากวงจรควบคุมถูกออกแบบมาควบคุมค่าระลอกคลื่นของกระแสที่ขดลวดเหนี่ยวนำ โดยค่าตัวเหนี่ยวนำสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (3-1)

$$L = V_o \times \left[\frac{(1 - D)}{\Delta i_L \times f} \right]$$

(3-1)

การออกแบบตัวเก็บประจุ C ของวงจรแปลงผัน

จากการออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำ L ข้างต้นนี้ จึงสมมติให้ตัวเก็บประจุมีค่าสูงมากจนเป็นอนันต์ (เพื่อให้่ายต่อการออกแบบ) เพื่อรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าคงที่ และไม่มีการกระเพื่อมที่แรงดันเอาต์พุต อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ เราไม่สามารถหาค่าตัวเก็บประจุที่มีขนาดดังกล่าวนี้ได้ ดังนั้นค่าตัวเก็บประจุเอาต์พุตนี้จะมีอิทธิพลต่อการกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุตตามความสัมพันธ์ของสมการ (3-2)

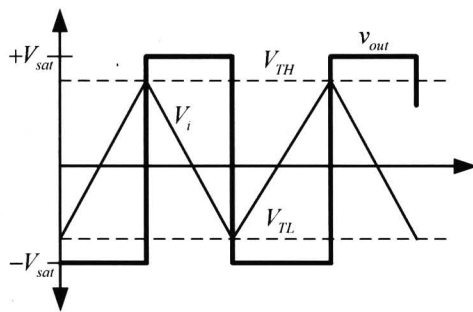
$$\Delta V_o = \frac{V_o \times (1 - D)}{8 \times L \times C \times f^2} \tag{3-2}$$

- โดยที่ C คือค่าความจุของตัวเก็บประจุ (ฟารัด: F)
- f คือความถี่การสวิตช์ของสวิตช์กำลัง (Hz)
- L คือค่าตัวเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำ (เฮนรี: H)
- V_o คือแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันบัค
- D คือค่าวัฏจักรงาน (Duty Cycle) ของสัญญาณสวิตช์
- Δi_L คือค่าการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (Ripple current)

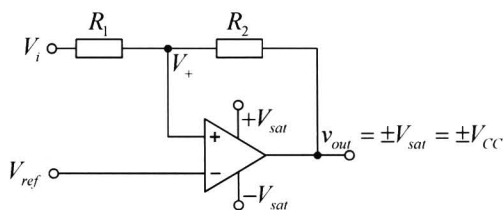
ในการออกแบบวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงบัค เพื่อนำมาใช้เป็นวงจรภาคกำลังสำหรับขับอนุกรมหลอด LEDs จำนวน 68 หลอด ด้วยการควบคุมกระแสเอาต์พุตให้คงที่ ส่วนที่ควรคำนึงถึง และให้มีความสำคัญ คือค่าของขดลวดเหนี่ยวนำ ซึ่งจะมีผลต่อความถี่ในการควบคุมการสวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์กำลัง โดยสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (3-1) พบว่าถ้าค่าวัฏจักรงานคงที่ แรงดันเอาต์พุตคงที่ ค่ากระแสลอคคลื่นกระแสคงที่แล้ว ค่าความเหนี่ยวนำมีผลทำให้ความถี่เปลี่ยนแปลง ในส่วนของค่าตัวเก็บประจุนั้นควรคำนึงถึงความสัมพันธ์ระหว่างการกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุต และกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุเป็นสำคัญ

3.1.1.2 การออกแบบตัวควบคุมกระแสด้วยเทคนิคฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Technique)

ขณะที่วงจรแปลงผันบัคอยู่ในสภาวะคงตัว ค่าของกระแสเฉลี่ยที่ขดลวดเหนี่ยวนำจะเท่ากับค่าของกระแสเฉลี่ยเอาต์พุตที่ไหลผ่านภาระตัวต้านทาน R เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการควบคุมกระแสเฉลี่ยเอาต์พุตให้คงที่ จึงควบคุมด้วยการควบคุมระลอกคลื่นของกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำโดยใช้วงจรตรวจจับระดับสัญญาณฮิสเทอรีซิส ในการควบคุมระลอกคลื่นของกระแสที่ขดลวดเหนี่ยวนำ เพื่อให้ค่าของกระแสเฉลี่ยที่ขดลวดเหนี่ยวนำคงที่ หลักการทำงานของวงจรตรวจจับระดับสัญญาณฮิสเทอรีซิสคือการกำหนดขอบเขตการตรวจจับแรงดันด้านบน (V_{TH}) และแรงดันด้านล่าง (V_{TL})



(ก)



(ข)

รูปที่ 3-2 วงจรตรวจจับสัญญาณฮิสเตอร์ซิสแบบไม่กลับขั้ว

(ก) ความสัมพันธ์สัญญาณแรงดันด้านเอาต์พุตของตัวควบคุม

(ข) วงจรตรวจจับด้วยอุปกรณ์ออป-แอมป์

สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้วงจรตรวจจับระดับสัญญาณฮิสเตอร์ซิสแบบไม่กลับขั้ว (Noninverting hysteresis) พิจารณารูปที่ 3-2 (ก) และ (ข) เห็นว่าเมื่อระดับสัญญาณที่นำมาทำการตรวจจับ (V_i) มีค่าชนขอบแรงดันขอบเขตการตรวจจับด้านล่าง (V_{TL}) แรงดันเอาต์พุต (v_{out}) จะมีค่าเท่ากับแรงดันศักย์ไฟฟ้าอิมิต์วด้านลบ ($-V_{sat}$) จนกระทั่งระดับสัญญาณที่นำมาทำการตรวจจับ (V_i) มีค่าชนขอบแรงดันขอบเขตการตรวจจับด้านบน (V_{TH}) แรงดันเอาต์พุต (v_{out}) จะมีค่าเท่ากับแรงดันศักย์ไฟฟ้าอิมิต์วด้านบวก ($+V_{sat}$) ดังนั้นสมการแรงดันที่ขาบวกของออป-แอมป์ (V_+) คือ

$$V_+ = V_i \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) + v_{out} \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \quad (3-3)$$

ช่วงแรกของการทำงานกำหนดให้ในค่าของระดับสัญญาณที่นำมาตรวจจับ (V_i) มีค่าต่ำกว่าแรงดันขอบเขตการตรวจจับด้านล่าง (V_{TL}) พิจารณาขณะที่แรงดันเอาต์พุต (v_{out}) เปลี่ยนจากแรงดันอิมิต์วศักย์บวก ($+V_{sat}$) เป็นแรงดันอิมิต์วศักย์ลบ ($-V_{sat}$) จะได้แรงดันขอบเขตการตรวจจับด้านล่าง (V_{TL}) ดังสมการ

$$V_{TL} = V_{ref} \left(\frac{R_1 + R_2}{R_2} \right) - V_{sat} \left(\frac{R_1}{R_2} \right) \quad (3-4)$$

ช่วงที่สองของการทำงานกำหนดให้ในค่าของระดับสัญญาณที่นำมาตรวจจับ (V_i) มีค่าสูงกว่าแรงดันขอบเขตการตรวจจับด้านบน (V_{TH}) พิจารณาขณะที่แรงดันเอาต์พุต (v_{out}) เปลี่ยนจากแรงดันอิ่มตัวศักย์ลบ ($-V_{sat}$) เป็นแรงดันอิ่มตัวศักย์บวก ($+V_{sat}$) จะได้แรงดันขอบเขตการตรวจจับด้านบน (V_{TH}) ดังสมการ

$$V_{TH} = V_{ref} \left(\frac{R_1 + R_2}{R_2} \right) + V_{sat} \left(\frac{R_1}{R_2} \right) \quad (3-5)$$

หลังจากได้สมการแรงดันขอบเขตการตรวจจับ (V_{TH}) และ (V_{TL}) แล้วจะทำให้สามารถหาสมการความกว้างของแรงดันช่วงการตรวจจับได้ดังนี้

$$V_H = \left(\frac{R_1}{R_2} \right) [(+V_{sat}) - (-V_{sat})] \quad (3-6)$$

การหาค่าแรงดันจุดกึ่งกลาง V_{ctr} ของช่วงแรงดันการตรวจจับพิจารณาได้จาก

$$V_{ctr} = \frac{V_{TH} + V_{TL}}{2} = V_{ref} \left(\frac{R_1 + R_2}{R_2} \right) \quad (3-7)$$

การหาค่าแรงดันอ้างอิง V_{ref} สามารถพิจารณาได้ดังนี้

$$V_{ref} = V_{ctr} \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad (3-8)$$

เมื่อนำค่าของกระแสที่ขดลวดเหนี่ยวนำ i_L มาเปรียบเทียบกับกระแสอ้างอิง i_{ref} แล้ว จากนั้นนำค่าสัญญาณความแตกต่างที่ได้ มาตรวจจับด้วยวงจรตรวจจับระดับสัญญาณฮิสเตอร์ซิสแบบไม่กลับซ้ำ เพื่อนำสัญญาณเอาต์พุต (v_{out}) ที่ได้ไปใช้เป็นสัญญาณสวิตช์ซึ่งผ่านวงจรขับเคลื่อน (Gate drive circuit) อีกครั้ง



ตัวอย่าง การคำนวณค่าอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยของวงจรภาคกำลังจะอยู่บนพื้นฐานของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงบuck โดยจะให้ความสำคัญกับค่าตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งส่งผลกระทบต่อกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ (L) และความสัมพันธ์ในการสวิตช์ซึ่งจากสมการที่ (3-1) ตามข้อกำหนดดังนี้

แรงดันเอาต์พุต (V_o) ประมาณ	224	V_{dc} (68 หลอด $\times$ 3.5 โวลต์/หลอด)
ระลอกคลื่นกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ (Δi_L)	40	mA
ความถี่ในการสวิตช์ซิ่ง (f)	20	kHz
ค่าขดลวดเหนี่ยวนำ (L) มีค่า	18.23	mH
วัฏจักรงาน (D) ที่สภาวะคงตัวประมาณ	0.765	

การออกแบบวงจรตัวตรวจจับกระแสจะใช้วงจรขยายผลต่าง โดยการต่ออนุกรมตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานต่ำกับตัวเหนี่ยวนำ ในที่นี้ใช้ค่า $R_{sen} = 0.1 \Omega$) และใช้วงจรขยายผลต่างมาทำการตรวจจับค่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานแทน เพื่อให้ได้สัญญาณของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ โดยพิจารณาหาค่าของอุปกรณ์ในวงจรขยายผลต่างจากสมการข้างล่างนี้

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} (V_2 - V_1) \tag{3-9}$$

โดยกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ดังนี้

ค่าตัวต้านทานตรวจจับกระแส R_{sen}	0.1	Ω
ผลต่างของแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน $R_{sen} (V_2 - V_1)$	30	mV
แรงดันขาออกของวงจรขยายผลต่าง (V_o)	3	V
อัตราส่วนตัวต้านทาน R_2/R_1	10	

ในส่วนของการออกแบบวงจรตรวจจับระดับสัญญาณ สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือค่าของแรงดันอิ่มตัว ($\pm V_{sat}$) ของอุปกรณ์ออป-แอมป์ ซึ่งมีผลต่อการกำหนดค่าแรงดันขอบเขตบน (V_{TH}) และแรงดันขอบเขตล่าง (V_{TL}) ดังนั้นเมื่อกำหนดให้แรงดันอ้างอิง (V_{ref}) มีค่าเท่ากับศูนย์ จะทำให้สามารถกำหนดค่าแรงดันขอบเขตการตรวจจับได้ตามสมการ

$$V_{TL} = V_{ref} \left(\frac{R_1 + R_2}{R_2} \right) - V_{sat} \left(\frac{R_1}{R_2} \right) \tag{3-10}$$

$$V_{TH} = V_{ref} \left(\frac{R_1 + R_2}{R_2} \right) + V_{sat} \left(\frac{R_1}{R_2} \right) \tag{3-11}$$

โดยกำหนดค่าตัวแปรดังนี้

แรงดันอ้างอิง (V_{ref})	0	V
แรงดันอิมิตต์วักซ์บวก ($+V_{sat}$)	11.4	V
แรงดันอิมิตต์วักซ์ลบ ($-V_{sat}$)	-13.6	V
อัตราส่วนความต้านทาน (R_1/R_2)	0.08	

3.1.1.3 ผลการจำลองด้วยโปรแกรม LTSPICE

รูปที่ 3-3 แสดงภาพโดยรวมวงจรภาคกำลังของวงจรขับหลอดอนุกรม LEDs จำนวน 68 หลอด โดยมีเป้าประสงค์ เพื่อทำการศึกษาแนวทางการตรวจจ่ายกระแส และควบคุมกระแสที่ไหลผ่านหลอดให้มีค่าคงที่ที่จุดการทำงานของหลอด LEDs (กระแส 300 mA ที่แรงดันตกคร่อมต่อ 1 หลอด ประมาณ 3.3 V_{dc}) ซึ่งในที่นี้ใช้ยี่ห้อ Nichia รุ่น NS6W083BT อีกทั้งยังสามารถนำเอาเทคนิคดังกล่าวนี้ไปประยุกต์ใช้ ในกรณีที่ต้องออกแบบวงจรแปลงผันดังกล่าวสำหรับใช้ร่วมกับแหล่งจ่ายแรงดันด้านอินพุตไฟตรงที่มาจากแหล่งอื่นๆ เช่น แบตเตอรี่ เป็นต้น โดยวงจรแปลงผันมีคุณสมบัติดังนี้

แรงดันไฟตรงด้านอินพุต	311	V _{dc}
แรงดันไฟตรงด้านเอาต์พุต	224	V _{dc} (68 หลอด × 3.3 V _{dc})
กระแสเฉลี่ยขับหลอดอยู่ที่ประมาณ	300	mA

รูปที่ 3-4 เป็นผลการจำลองด้วยโปรแกรม LTSPICE ของวงจรขับอนุกรมหลอด LEDs จำนวน 68 หลอด ซึ่งจะพบว่าค่ากระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านหลอด (เส้นสีชมพู ซึ่งก็คือสัญญาณของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ) มีค่าเท่ากับ 300 mA โดยเฉลี่ย หรืออยู่ที่ประมาณ 85% ของค่ากระแสพิกัด (350 mA) หลอด LEDs ยี่ห้อ Nichia เบอร์ NS6W083BT ซึ่งค่ากระแสดังกล่าวนี้จะสามารถทำให้หลอด LEDs เปล่งค่าฟลักซ์ส่องสว่างออกมาได้ประมาณ 100 lm/หลอด (ข้อมูลจาก Datasheet ในภาคผนวก ค) ดังนั้นอนุกรมหลอด LEDs จำนวน 68 หลอดนี้จะให้ค่าฟลักซ์ส่องสว่างโดยรวมอยู่ที่ 6,800 lm โดยประมาณ

นอกจากนี้สังเกตได้ว่าแรงดันที่ตกคร่อมกึ่งอนุกรมหลอด LEDs ทั้ง 68 หลอด (เส้นสีดำ ซึ่งจะถูกแถบสัญญาณสีชมพูทับอยู่ช่วงท้าย) จะมีค่าค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนถึงค่าที่จุดการทำงานคือประมาณ 224 V_{dc} (224 ÷ 68 = 3.29 โวลต์/หลอด) ในขณะที่กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ (เส้นสีแดง) จะมีค่าเริ่มต้น

ที่ค่าเดียวกับกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ แต่จะลดลงเรื่อยๆ จนมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ศูนย์ เมื่อแรงดันที่ตกคร่อมอนุกรมหลอด LEDs มีค่าถึงจุดการทำงาน ในขณะที่กระแสเฉลี่ยที่ตัวเหนี่ยวนำจะถูกควบคุมให้มีค่าคงที่ อยู่ที่ประมาณ 300 mA รูปที่ 3-5 เป็นผลการจำลอง โดยแยกพิจารณาที่หลอด LEDs เพียง 1 หลอด ซึ่งจะพบว่ากระแสที่ไหลผ่านหลอดจะมีค่าที่ประมาณ 300 mA เท่าเดิม แต่แรงดันที่ตกคร่อมหลอด จะมีค่าเท่ากับ $224 \div 68 = 3.3 \text{ V}_{dc}$ นั่นเอง

3.1.1.4 ผลการทดลองการ และเครื่องต้นแบบ (รูปแบบที่ 1)

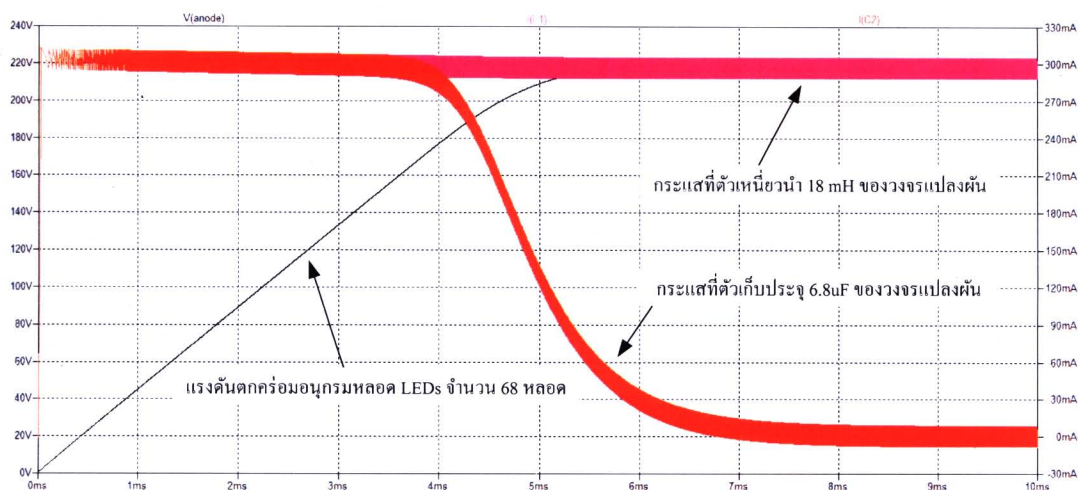
เครื่องต้นแบบของวงจรขับหลอดสำหรับแรงดันอินพุตไฟตรง (รูปแบบที่ 1) แสดงดังรูปที่ 3-6 ซึ่งแผ่นพิมพ์ลายวงจรถูกออกแบบมาให้สอดคล้องกับตัวโคมไฟเดิมที่มีอยู่ โดยการจัดเรียงหลอด LEDs จะถูกแสดงดังในรูปที่ 3-7 ซึ่งเป็นแผ่นพิมพ์ลายวงจร

รูปที่ 3-8 แสดงผลการทดลองการวัดกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และสัญญาณขับนำสวิตซ์กำลังของวงจรขับหลอดสำหรับแรงดันอินพุตไฟตรง (รูปแบบที่ 1) ซึ่งจะพบว่าค่าเฉลี่ยกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (กระแสที่ภาระด้านเอาต์พุตของวงจรแปลงผัน) จะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 300 mA ตามที่ได้ ออกไว้ อีกทั้งสัญญาณกระแส (บน) จะสอดคล้องกับสัญญาณขับนำเกต (ล่าง) ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังอีกด้วย รูปที่ 3-9 แสดงการพล็อตค่าความผิดพลาดที่ได้จากเทคนิคการตรวจจับ และควบคุมกระแสด้วยเทคนิคฮิสเตอร์รีซิส สำหรับแรงดันอินพุตไฟตรง (รูปแบบที่ 1) ที่ค่ากระแสเทียบเคียงต่างๆ จะพบว่าเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดที่ได้นั้นจะเปลี่ยนแปลงไป ขึ้นอยู่กับค่ากระแสที่ใช้ในการควบคุม แต่จะพบว่าที่จุดการทำงานของหลอด (300 mA) ซึ่งได้ถูกออกแบบไว้ จะให้ค่าความผิดพลาดที่ประมาณ 8% จากค่ากระแสค่าสั่งเทียบเคียง (Reference current)

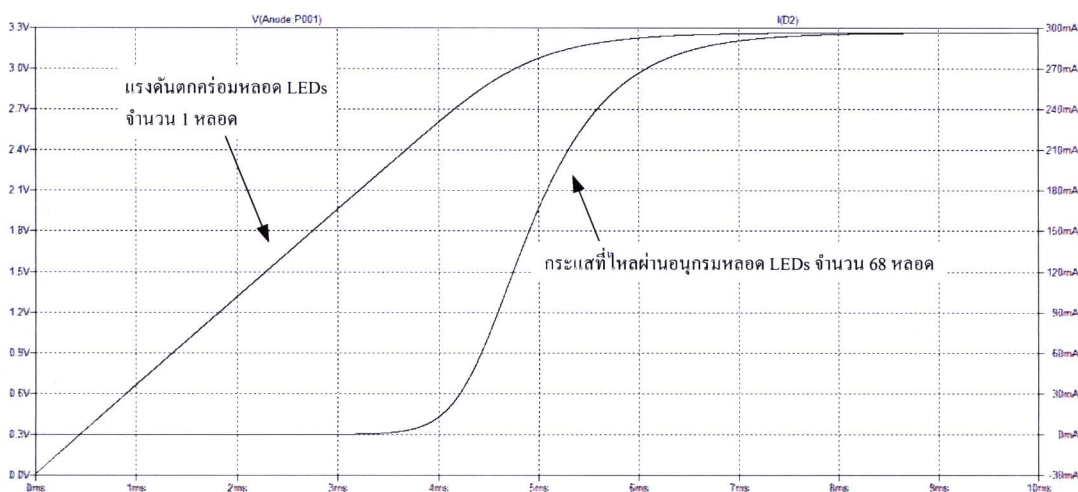
3.1.1.5 สรุปวงจรรขับหลอดสำหรับแรงดันอินพุตไฟตรง (รูปแบบที่ 1)

เนื่องจากหลอด LEDs มีคุณลักษณะทางไฟฟ้าเปรียบเสมือนอุปกรณ์ไดโอด ดังนั้นการควบคุมค่ากระแสเฉลี่ยไฟตรงที่ไหลผ่านหลอด LEDs ด้วยเทคนิคฮิสเตอร์รีซิส จึงเพียงพอต่อการควบคุมการทำงานของหลอดที่จุดการทำงานใดๆ โดยไม่จำเป็นต้องมีการควบคุมลูปแรงดัน อีกทั้งผลการติดตามค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเทียบกับกระแสคำสั่งสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว และสามารถทำได้โดยง่ายจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พื้นฐานที่มีขายอยู่ทั่วไปตามท้องตลาด โดยรายการอุปกรณ์พร้อมราคารวมของวงจรต้นแบบทั้งวงจรภาคกำลังถูกแสดงในตารางที่ 3-1

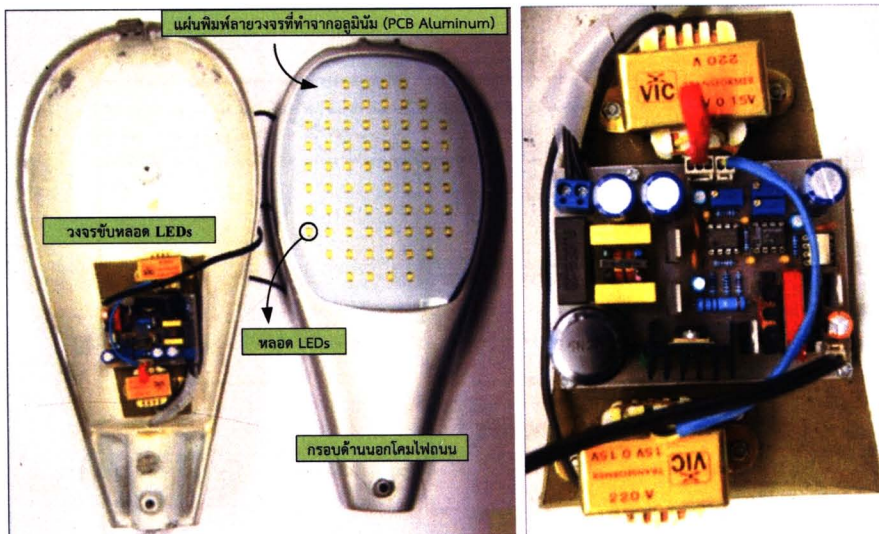
การประยุกต์ใช้งานจริงสามารถนำเอาเทคนิคดังกล่าวนี้ไปใช้กรณีที่มิแหล่งจ่ายเป็นแรงดันไฟตรงอื่นๆ ได้เป็นอย่างดี เช่น แรงดันจากแบตเตอรี่รถยนต์ หรือแรงดันจากแบตเตอรี่ในระบบพลังงานแสงอาทิตย์ในที่ห่างไกล เป็นต้น



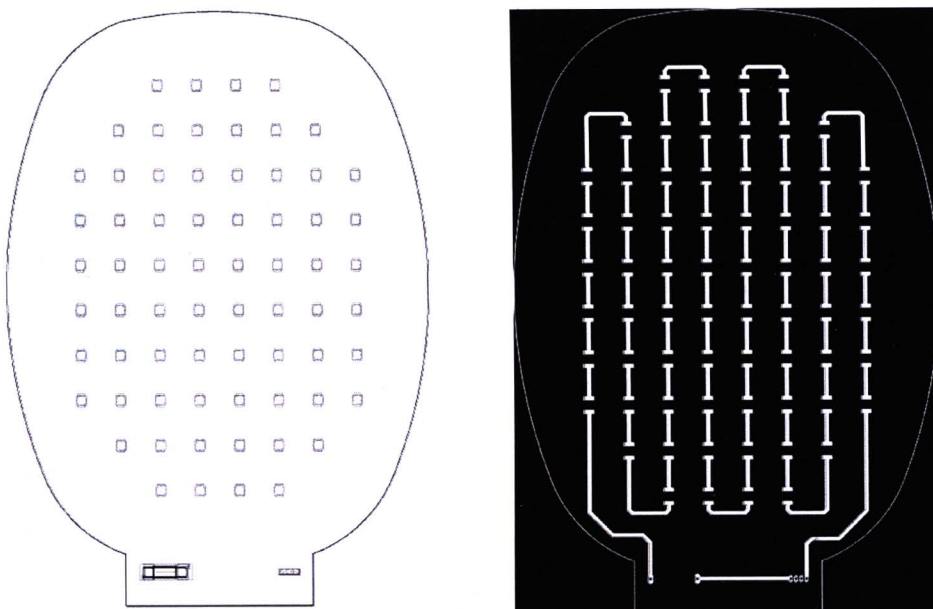
รูปที่ 3-4 ผลการจำลองด้วยโปรแกรม LTSPICE ของวงจรขับอนุกรมหลอด LEDs จำนวน 68 หลอด
ที่มีวงจรภาคกำลังอยู่บนพื้นฐานของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงบัค



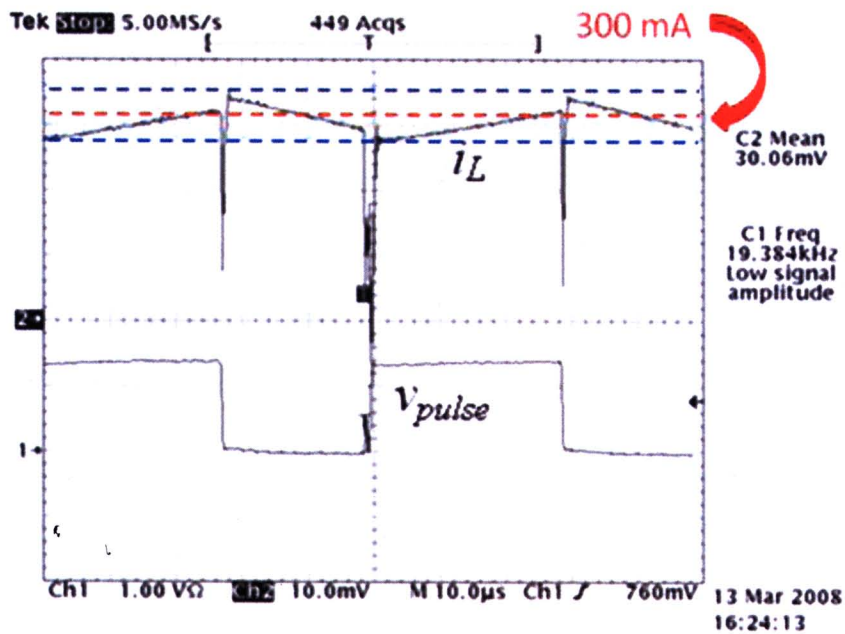
รูปที่ 3-5 ผลการจำลองด้วยโปรแกรม LTSPICE ของวงจรขับอนุกรมหลอด LEDs จำนวน 1 หลอด
ที่มีวงจรภาคกำลังอยู่บนพื้นฐานของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงบัค



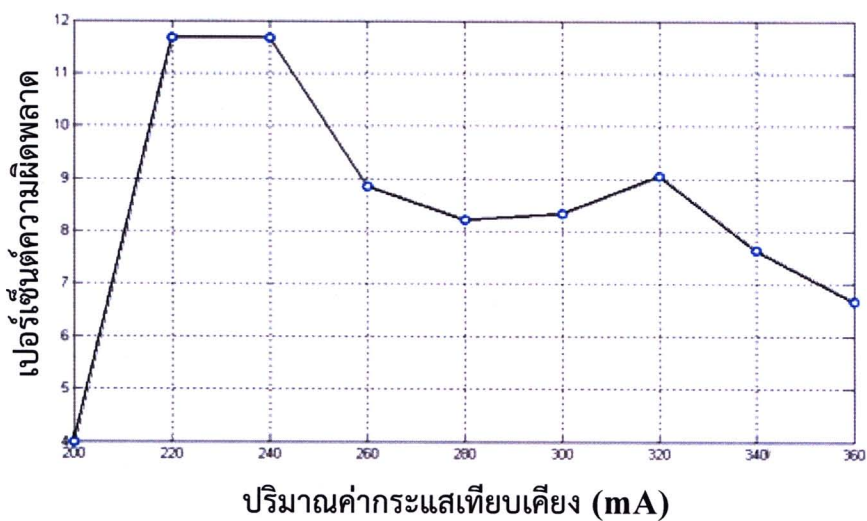
รูปที่ 3-6 เครื่องต้นแบบของวงจรขับหลอดสำหรับแรงดันอินพุตไฟตรง (รูปแบบที่ 1)



รูปที่ 3-7 แผ่นพิมพ์ลายวงจรเครื่องต้นแบบของวงจรขับหลอดสำหรับแรงดันอินพุตไฟตรง (รูปแบบที่ 1)



รูปที่ 3-8 ผลการทดลองการวัดกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และสัญญาณขับนำสวิตช์กำลังของวงจรแปลงผันกำลังไฟตรง/ไฟตรงแบบบัคที่ควบคุมกระแสด้วยเทคนิคฮิสเตอร์รีซิส



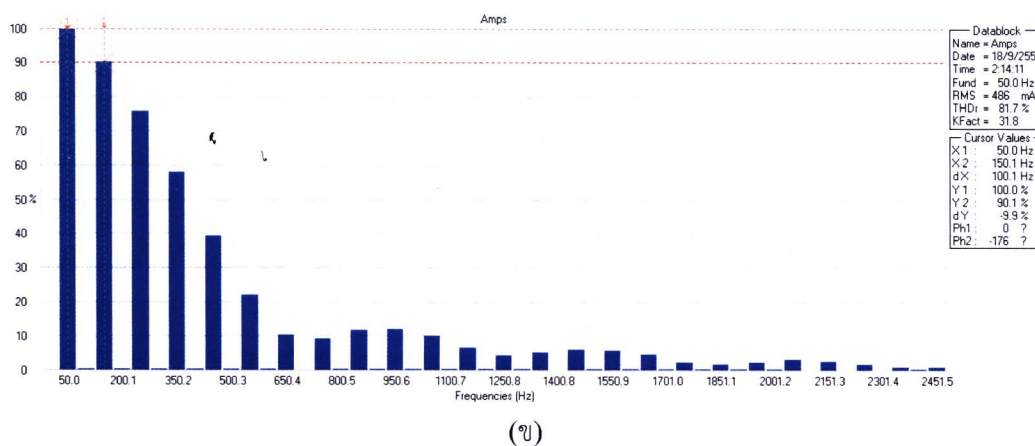
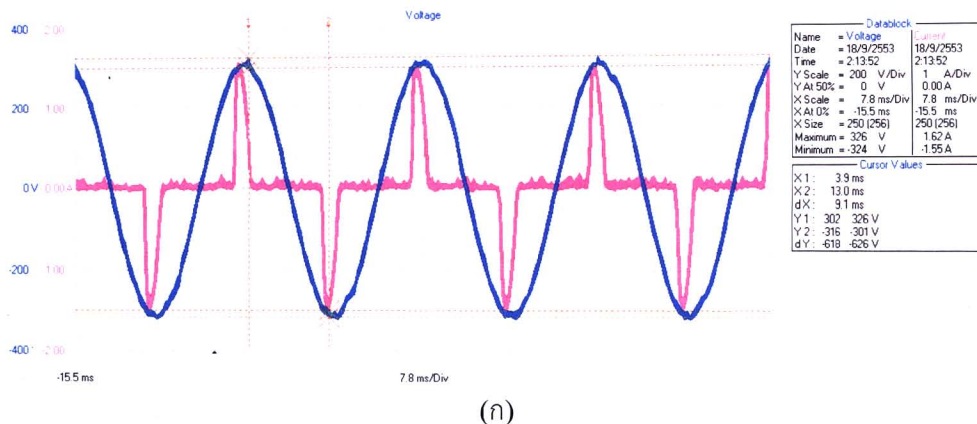
รูปที่ 3-9 เปอร์เซ็นค่าความผิดพลาดที่ได้จากการใช้เทคนิคตรวจจับกระแส และควบคุมด้วยเทคนิคฮิสเตอร์รีซิส

ตารางที่ 3-1: รายละเอียดอุปกรณ์พร้อมราคาของวงจรขับหลอด LEDs สำหรับแรงดันอินพุตไฟตรง (รูปแบบที่ 1) ที่มีวงจรภาคกำลังเป็นวงจรแปลงผันบัค (DC – D C buck converter)

รายการ	ค่าอุปกรณ์	รหัสอุปกรณ์	จำนวน	ราคา/หน่วย (บาท)	ราคารวม (บาท)
R1,R3,R9	1k Ohm ¼ W 1%		3	1	3
R2,R4,R6,R7	10k Ohm ¼ W 1%		4	1	4
R5,R8	1M Ohm ¼ W 1%		2	1	2
R10	10 Ohm ¼ W 1%		1	1	1
R11	1 Ohm ½ W 1%		1	1	1
L1	5.47mH		1	9.52	9.52
L2	18mH		1	9.52	9.52
C1,C2	0.1µF 280V MPX X2		2	1.69	3.38
C3	100µF 400V Electrolyte		1	28.56	28.56
C4	6.8µF 400 V Electrolyte		1	2.89	2.89
C5,C6,C7,C8,C9,C10	1000µF 400V Electrolyte		6	2.48	14.88
D1,D2,D3	400V 1.5A Bridge		3	7.15	21.45
D4	Ultrafast Diode	MUR840	1	15.76	15.76
F1	Fast Fuse 1A 250Vac		1	1.79	1.79
Q1	Power MOSFET	IRF740	1	25.05	25.05
U1,U3	Linear Voltage Regulator	LM7815	2	5.82	11.64
U2	Linear Voltage Regulator	LM7915	1	5.66	5.66
U4	Operational Amplifier	TL072	1	4.62	4.62
U5	Comparator	LM311	1	7.04	7.04
U6	IC Opto Isolator	TLP250	1	34.96	34.96
รวม					207.72

หมายเหตุ

1. ราคาโดยรวมของอุปกรณ์จะต่ำกว่านี้ ถ้ามีการสั่งเป็นจำนวนมากๆ
2. ราคานี้ยังไม่รวมแผ่นพิมพ์ลายวงจรที่ทำจากวัสดุอลูมิเนียม (ซึ่งราคาจะขึ้นอยู่กับจำนวนการสั่งทำ)

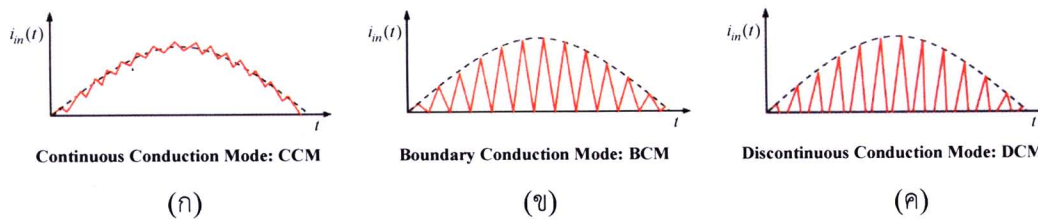


รูปที่ 3-10 ผลการวัดรูปคลื่นของกระแส และแรงดันด้านอินพุตของวงจรเรียงกระแสในรูปที่ 3-3
(ก) กระแส (สีชมพู) และแรงดัน (สีฟ้า) (ข) ฮาร์โมนิกส์ของกระแสอินพุตที่ค่าความถี่ต่างๆ

3.1.2 วงจรขับหลอด LEDs ที่มีวงจรแปลงผันกำลังฟลายแบ็ค (Flyback converter) เป็นวงจรภาคกำลังด้านหน้า (รูปแบบที่ 2)

วงจรขับหลอดสำหรับแรงดันอินพุตไฟตรง (รูปแบบที่ 1) ก่อนหน้านี้ได้รับแรงดันไฟตรงอินพุต 311 V_{dc} ที่ซึ่งเป็นแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุขนาด 100μF/400V_{dc} ดังแสดงในรูป 3-3 ซึ่งในความเป็นจริงแล้ววงจรดังกล่าวได้รับแรงดันด้านอินพุตเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 220V_{ac}/50Hz แล้วทำการแปลงแรงดันให้เป็นแรงดันไฟตรงขนาด 311 V_{dc} ด้วยวงจรเรียงกระแส (Rectifier circuit) เพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานกับระบบไฟฟ้ากระแสสลับ

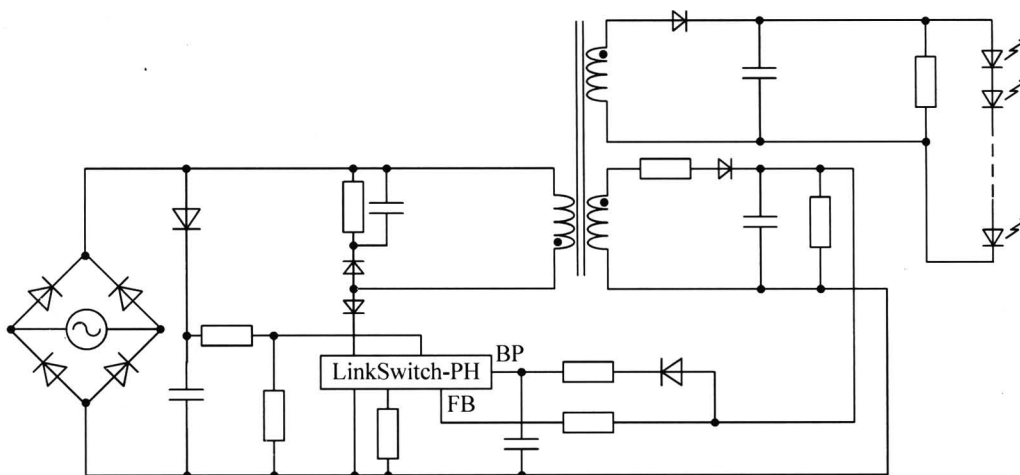
จากวงจรขับหลอดที่กล่าวมาข้างต้นจะพบว่าวงจรที่ใช้มีความง่ายไม่ซับซ้อน และสามารถใช้งานได้จริง แต่จะเหมาะกับการประยุกต์ใช้งานกรณีที่แรงดันทางด้านอินพุตเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่มีแรงดันไม่สูงมากนัก (ไม่เกิน 48 โวลต์ ตามมาตรฐานความปลอดภัยของระดับแรงดันไฟตรงในระบบสื่อสารต่างๆ) ทั้งนี้เนื่องจากถ้านำเอาวงจรภาคกำลังดังกล่าวนี้มาใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับ 220V_{ac}/50Hz จะต้องมีการ



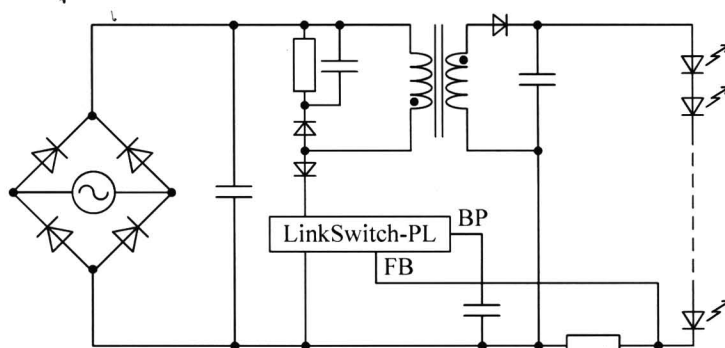
รูปที่ 3-11 โหมดการทำงานต่างๆ ของวงจรแปลงผัน เพื่อให้ได้รูปคลื่นกระแสใกล้เคียงฟังก์ชันไซน์

แปลงแรงดันไฟสลับดังกล่าวมาเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่มีระดับแรงดันอยู่ที่ 311 V_{dc} ซึ่งมีค่าสูงเกินมาตรฐานความปลอดภัย อีกทั้งจะพบว่าไม่มีการแยกโดดทางไฟฟ้า (Electrical Isolation) นอกจากนี้วงจรเรียงกระแสที่ทำหน้าที่ในการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับมาเป็นไฟฟ้ากระแสตรงของวงจรในรูปที่ 3-3 จะทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสด้านอินพุต ส่งผลให้เกิดมลภาวะทางไฟฟ้าที่เรียกว่าฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลัง และค่าตัวประกอบกำลังต่ำอีกด้วย รูปที่ 3-10 แสดงผลการวัดรูปคลื่นกระแส และแรงดันด้านอินพุตของวงจรเรียงกระแสของวงจรในรูปที่ 3-3 ซึ่งจะเห็นว่ารูปคลื่นของกระแสอินพุตมีความผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นฟังก์ชันไซน์ และเมื่อพิจารณาในโดเมนความถี่จะพบว่าฮาร์มอนิกส์เกิดขึ้นที่ความถี่ต่างๆ มากมาย ซึ่งค่า THDi (Total Harmonics Distortion of Current) สูงเกินกว่ามาตรฐานกำหนด (เกินกว่า 5%) จากจุดนี้จึงเป็นที่มาของการพัฒนาอุปกรณ์ IC สำหรับวงจรขับหลอดที่ไม่สร้างมลภาวะฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลัง อีกทั้งมีการแยกโดดทางไฟฟ้า และมีระดับแรงดันด้านเอาต์พุตที่ไม่สูงเกินค่ามาตรฐานความปลอดภัย เพื่อให้เหมาะสมกับผู้บริโภค โดยโหมดการทำงานของ IC ดังกล่าวมีทั้งแบบ Linear Control with Constant Output Current และแบบ Switching Mode Control with Constant Output Current ซึ่งสามารถใช้ขับจำนวนหลอด LEDs ได้ไม่มาก (ประมาณไม่เกิน 12 หลอด) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระดับแรงดันไฟตรงที่ตกรวมอนุกรมหลอดจะต้องไม่เกินค่าพิกัดแรงดันที่อุปกรณ์ IC นั้นๆ สามารถรองรับได้ อีกทั้งมีข้อจำกัดสำคัญอีกข้อคือแรงดันทางด้านอินพุตของชุดวงจรขับหลอดต้องเป็นแรงดันไฟตรง (dc voltage) ซึ่งจะเหมาะกับการประยุกต์ใช้ส่องสว่างในบริเวณเฉพาะจุด หรือที่แคบๆ ตัวอย่างเช่น ในรถยนต์ ไฟฉายขนาดเล็ก ฯลฯ เป็นต้น (ใช้แหล่งพลังงานจากแบตเตอรี่) ซึ่งเป็นหนึ่งในข้อจำกัดการใช้อุปกรณ์ IC เหล่านี้

ปัจจุบันเริ่มมีการวางจำหน่ายของอุปกรณ์ IC กึ่งสำเร็จรูปที่ใช้งานร่วมกับแรงดันไฟสลับขนาด $220 \text{ Vrms}/50\text{Hz}$ สำหรับการขับหลอด LEDs ให้ได้จำนวนที่มากขึ้นตัวอย่างเช่น IC เบอร์ LinkSwitch-PH (รูปที่ 3-12) และเบอร์ LinkSwitch-PL (รูปที่ 3-13) ของบริษัท Power Integrations เป็น IC ที่ถูกออกแบบให้มีอุปกรณ์สวิตช์กำลังไว้ภายในตัว อีกทั้งสามารถควบคุมรูปคลื่นกระแสอินพุตให้มีความผิดเพี้ยนต่ำ และให้ค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor: PF) สูง โดยจะต้องออกแบบวงจรภาคกำลังเป็นวงจรแปลงผันฟลายแบ็ค อย่างไรก็ตาม IC ทั้ง 2 เบอร์นี้ สามารถควบคุมกระแสขับหลอด LEDs ด้านเอาต์พุตได้เพียงกิ่งวงจร (Branch) เดียว และสามารถจ่ายกำลังไฟสูงสุดได้เพียง



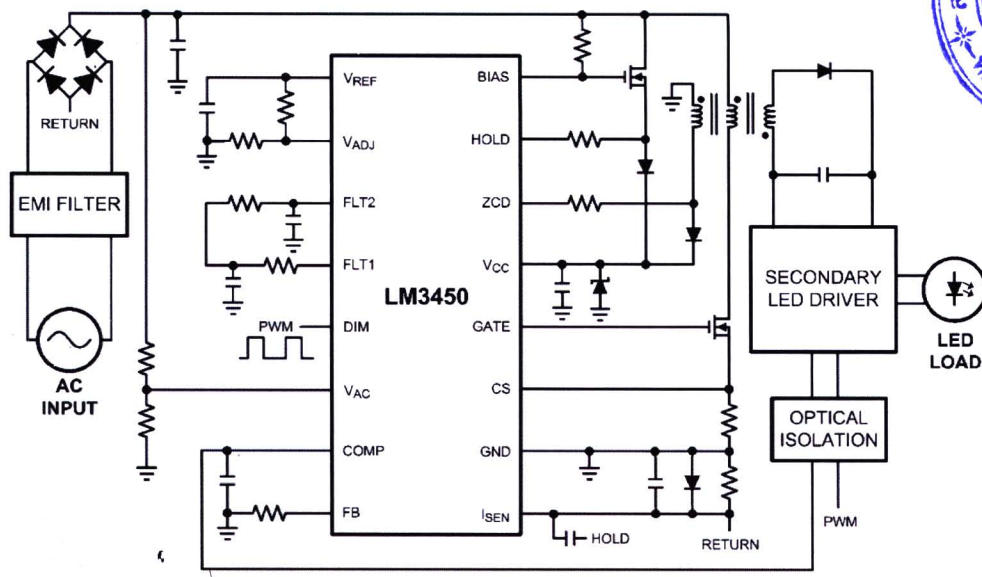
รูปที่ 3-12 การใช้งาน IC เบอร์ LinkSwitch-PH สำหรับงานขับหลอด LEDs เพื่อการส่องสว่าง



รูปที่ 3-13 การใช้งาน IC เบอร์ LinkSwitch-PL สำหรับงานขับหลอด LEDs เพื่อการส่องสว่าง

50 วัตต์ โดยประมาณเท่านั้น ดังนั้นสำหรับงานที่ต้องการค่าความส่องสว่างสูงมากขึ้น ซึ่งอาจทำให้ไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ เช่นระบบส่องสว่างนอกตัวอาคาร หรือตามสถานที่สาธารณะต่างๆ เนื่องจากกำลังไฟฟ้าด้านเอาต์พุตถูกจำกัดด้วยอุปกรณ์สวิตช์กำลังภายในตัว IC ทำให้ไม่สามารถขยายขนาดกำลังให้สูงขึ้นได้

สำหรับอุปกรณ์ IC เบอร์ LM3450 ของบริษัท National Semiconductor (รูปที่ 3-14) เป็น IC ที่ต่างกับ 2 เบอร์แรก เนื่องจากต้องมีการต่ออุปกรณ์สวิตช์กำลังเพิ่มเติมต่างหากภายนอก ทำให้สามารถขยายขนาดกำลังได้ตามความต้องการ อย่างไรก็ดีเพื่อให้ได้ค่าตัวประกอบกำลังที่สูง ควรนำ IC เบอร์ LM3450 มาประยุกต์ร่วมกับวงจรแปลงผันที่สามารถแก้ค่าตัวประกอบกำลังให้สูงขึ้นได้เช่น วงจรแปลงผันบูสต์ ฟลายแบ็ค หรือซุก ฯลฯ เป็นต้น แต่จะต้องทำการออกแบบวงจรขับหลอด LEDs (Secondary LEDs Driver) เพื่อให้ได้กระแสเลี้ยงคงที่ด้านเอาต์พุตของวงจรฟลายแบ็คต่างหาก (Two cascade converters)



รูปที่ 3-14 การประยุกต์ใช้งาน IC เบอร์ LM3450 สำหรับงานขับหลอด LEDs เพื่อการส่องสว่าง

จากเหตุผลข้างต้นนี้ทำให้มีแนวคิดในการพัฒนาเพิ่มเติมของวงจรขับหลอด LEDs ที่มีวงจรแปลงผันกำลังฟลายแบ็ค (Flyback converter) เป็นวงจรภาคกำลังด้านหน้า (รูปแบบที่ 2) ที่สามารถจ่ายพลังงานที่เพียงพอต่อหลอด LEDs เพื่อให้สามารถสร้างค่าฟลักซ์ส่องสว่าง (Luminous flux) เท่ากับเครื่องต้นแบบที่ 1 อีกทั้งมีคุณสมบัติคือสามารถรักษาระดับแรงดันไฟตรงด้านเอาต์พุตอยู่ที่ 44 โวลต์ (อยู่ภายใต้มาตรฐานความปลอดภัยของระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง) มีการแยกโดดทางไฟฟ้าระหว่างภาคไฟฟ้ากระแสสลับ และภาคไฟฟ้ากระแสตรง ด้วยหม้อแปลงความถี่สูง และมีความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสทางด้านอินพุตต่ำ (มีรูปคลื่นใกล้เคียงฟังก์ชันไซน์: Sinusoidal function) ดังนั้นวงจรแปลงผันกำลังฟลายแบ็ค (Flyback converter) เป็นวงจรภาคกำลังด้านหน้า (รูปแบบที่ 2) จะถูกแบ่งออกแบบเป็น 2 ส่วนคือ

ส่วนที่ 1: ส่วนของวงจรภาคหน้าที่อยู่บนพื้นฐานของวงจรแปลงผันกำลังฟลายแบ็ค จะทำหน้าที่ดูดซับกระแสอินพุตรูปคลื่นไซน์ที่มีมมต่างเฟสเป็นศูนย์จากแหล่งจ่ายแรงดัน $220V_{rms}/50Hz$ เพื่อให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าจริงสูงสุด และมีผลภาวะทางไฟฟ้าต่ำสุดนั่นเอง โดยวงจรแปลงผันฟลายแบ็คจะถูกควบคุมให้ทำงานในโหมดกระแสที่ขดลวดเหนี่ยวนำไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Conduction Mode) เพื่อให้ได้ค่าตัวประกอบกำลังที่สูง ดังแสดงในรูป 3-11 (ค)

ส่วนที่ 2: ส่วนของวงจรจ่ายกระแสทางด้านเอาต์พุตสำหรับขับหลอด LEDs ซึ่งในส่วนนี้จะใช้วงจรจ่ายกระแสเชิงเส้น ซึ่งง่ายต่อการออกแบบ สมรรถนะที่ดีในการใช้งาน

3.1.2.1 วงจรภาคกำลัง

รูปที่ 3-15 และรูปที่ 3-16 แสดงวงจรแปลงผันกำลังฟลายแบ็ค และรูปคลื่นตามจุดต่างๆ ของวงจรที่สภาวะการทำงาน 1 คาบเวลาการสวิตช์ ซึ่งจะวิเคราะห์วงจรในโหมดกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทำแม่เหล็ก $i_{Lm}(t)$ ไม่ต่อเนื่อง ซึ่งค่ากระแสสูงสุดในแต่ละคาบเวลาการสวิตช์ที่ไหลผ่าน L_m สามารถหาได้โดยพิจารณาที่แรงดันอินพุตมีค่าเป็น $v_m(t) = \hat{V}_m \sin \omega t$ ดังนั้น

$$\hat{i}_{Lm}(t) = \frac{\hat{V}_m |\sin \omega t| \times D_1 \times T_s}{L_m} \quad (3-12)$$

I_{Lm} คือกระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์สวิตช์กำลังในช่วงเวลา $D_1 \times T_s$ ดังนั้น $\hat{I}_{Lm}$ มีค่าเท่ากับ $\hat{I}_s$ โดยกระแสเฉลี่ยของรูปคลื่นกระแสอินพุตหาได้จากค่าเฉลี่ยพื้นที่ใต้กราฟของกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์ $i_s(t)$ ในแต่ละคาบเวลาการสวิตช์ซึ่งมีค่าเท่ากับ

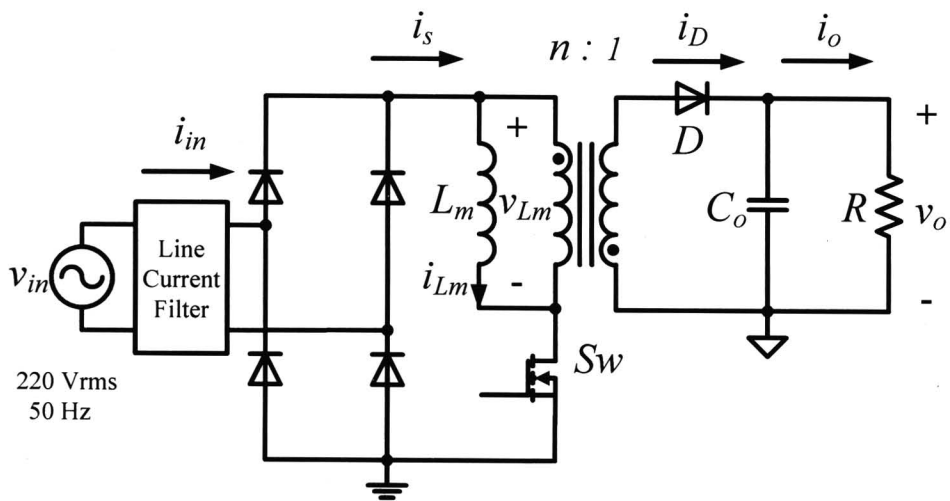
$$i_{s,avg}(t) = \left(\frac{D_1^2 \times T_s}{2 \times L_m} \right) \hat{V}_m |\sin \omega t| \quad (3-13)$$

เนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์กำลัง $i_s(t)$ มีรูปร่างเหมือนกระแสอินพุต $i_m(t)$ แต่กระแสอินพุตมีช่วงที่ฟังก์ชันไซน์เป็นลบ ดังนั้น

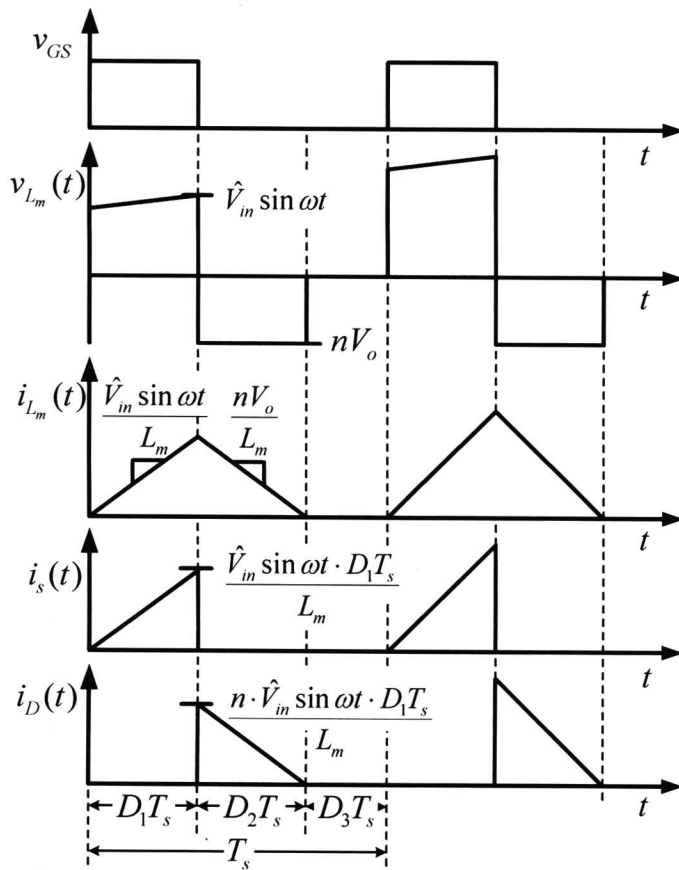
$$i_m(t) = \left(\frac{D_1^2 \times T_s}{2 \times L_m} \right) \hat{V}_m \sin \omega t \quad (3-14)$$

จากสมการจะเห็นว่ากระแสอินพุต $i_m(t)$ มีลักษณะเป็นฟังก์ชันไซน์ ซึ่งจากความสัมพันธ์ของแรงดันอินพุต $v_m(t)$ และกระแสอินพุต $i_m(t)$ ดังรูปที่ 3-17 ซึ่งจะเห็นว่าวงจรแปลงผันมีลักษณะเหมือนโหลดเชิงเส้นซึ่งค่าตัวต้านทานเทียบเคียงมีค่าเท่ากับ

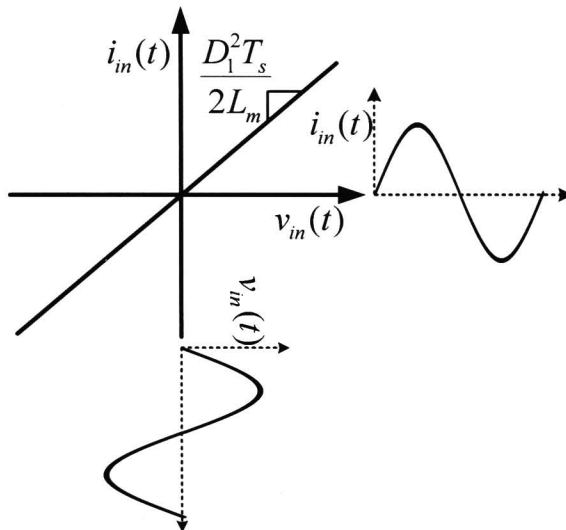
$$R_{eq} = \frac{2 \times L_m}{D_1^2 \times T_s} \quad (3-15)$$



รูปที่ 3-15 วงจรแปลงผันกำลังไฟสลับ-ไฟตรงฟลายแบ็คที่สามารถแก้ค่าตัวประกอบกำลัง



รูปที่ 3-16 รูปคลื่นตามจุดต่างๆ ของวงจรแปลงผันฟลายแบ็คที่สภาวะ 1 คาบเวลาการสวิตช์



รูปที่ 3-17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุต และกระแสอินพุต

โดยค่าตัวเหนี่ยวนำทำแม่เหล็ก (L_m) จะพิจารณาที่แรงดันยอดของแรงดันอินพุต ร่วมกับความสัมพันธ์ระหว่างกำลังด้านอินพุตและกำลังด้านเอาต์พุต $\eta \times P_m = P_{out}$ เมื่อกำหนดให้ประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันเป็น 100% เพื่อหาขอบเขตค่าตัวเหนี่ยวนำทำแม่เหล็ก L_m ที่เป็นตัวกำหนดโหมดการทำงานของวงจรแปลงผันหลายแบ็คในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องจะได้ค่าตัวเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กที่ค่าขอบดังนี้

$$L_{m(\text{boundary})} = \frac{R \times (1 - D_1)^2 \times n^2}{4 \times f_s} \quad (3-16)$$

ค่าแรงดันเอาต์พุต (V_o) หาได้จากสมการความสัมพันธ์ของกำลังด้านอินพุต และกำลังด้านเอาต์พุต จากนั้นให้แรงดันเอาต์พุต (V_o) เป็นค่าคงที่ โดยไม่คิดผลจากอัตราระลอกคลื่นของแรงดันเอาต์พุตจะได้

$$V_o = \hat{V}_m \times D_1 \times \sqrt{\frac{R}{4 \times L_m \times f_s}} \quad (3-17)$$

ค่าตัวเก็บประจุด้านเอาต์พุตสามารถหาได้จาก ความสัมพันธ์ของแรงดัน และกระแสที่ไหลผ่านในตัวเก็บประจุด้านเอาต์พุต ซึ่งแปรผกผันกับค่าระลอกคลื่นของแรงดันด้านเอาต์พุต โดยแรงดันด้านเอาต์พุตของวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังจะมีความถี่เป็นสองเท่าของความถี่แรงดันอินพุตซึ่งเป็นไปตามสมการ

$$C_o = \frac{V_o}{2\pi \times f_{line} \times R \times \Delta V_o} \quad (3-18)$$

อัตราส่วนจำนวนรอบ (n) ของหม้อแปลงฟลายแบ็คจะมีผลต่อแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์สวิตช์กำลังใน
ขณะที่สวิตช์หยุดนำกระแส โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

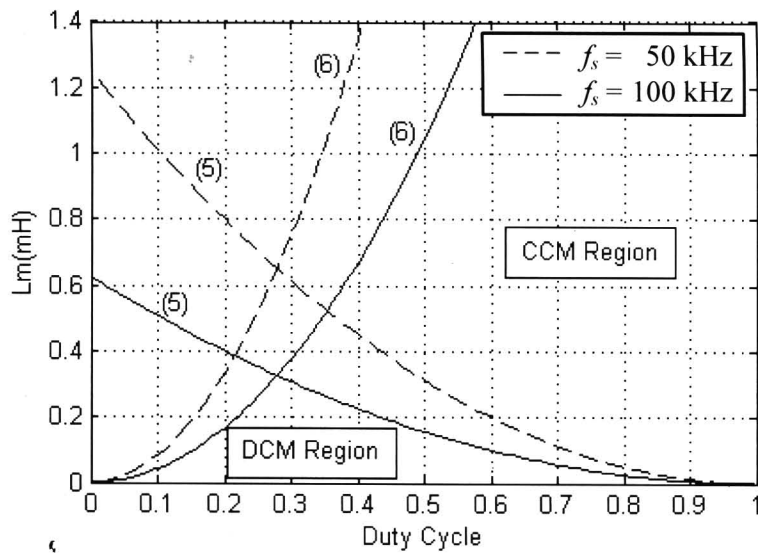
$$V_{SW} = \hat{V}_{in} + V_{spike} + n \times (V_o + V_D) \quad (3-19)$$

ในทางปฏิบัติการเลือกอัตราส่วนจำนวนรอบ (n) ของหม้อแปลงต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขค่าแรงดันพิกัดของ
สวิตช์กำลัง (V_{SW}) และค่าแรงดันพุ่ง (V_{spike}) อันเนื่องมาจากฟลักซ์รั่วไหล (Flux leakage) ภายในหม้อ
แปลงซึ่งจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 30% ของแรงดันอินพุตสูงสุด [X] โดยขอบเขตอัตราส่วนจำนวนรอบ (n)
ของหม้อแปลงคือ

$$n < \frac{V_{SW} - \hat{V}_{in} - V_{spike}}{V_o + V_D} \quad (3-20)$$

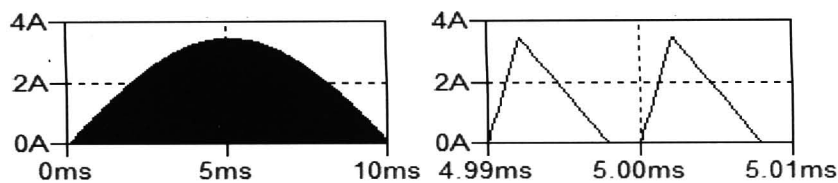
ในงานวิจัยนี้พิจารณาเลือกพิกัดแรงดันของสวิตช์กำลังที่ค่า $700 V_{dc}$ คูณด้วยค่าแฟกเตอร์เพื่อความ
ปลอดภัย (Safety factor) ไว้ที่ประมาณ 20 % ของแรงดันพิกัดของสวิตช์กำลัง และเลือกค่าอัตราส่วน
จำนวนรอบ (n) ของหม้อแปลงที่ $n = 2.5$ โดยจะได้ $V_{SW} = 527 V_{dc}$ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าแรงดันพิกัดของสวิตช์
กำลังประมาณ 24 % กล่าวคือการเลือกอุปกรณ์สวิตช์กำลังควรคำนึงถึงแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์ซึ่งต้องมี
ค่าต่ำกว่าแรงดันพิกัดของตัวสวิตช์นั่นเอง

การคำนวณค่าวัฏจักรงาน และตัวเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กสามารถทำได้โดยพิจารณาสมการที่
(3-16) เมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $V_o = 48 V_{dc}$, $\hat{V}_{in} = 311 V_{dc}$, $n = 2.5$ และ $R = 40 \Omega$ พล็อตกราฟในช่วง
ความถี่ 2 ค่าคือ $f_s = 50 \text{ kHz}$ และ $f_s = 100 \text{ kHz}$ จากนั้นนำกราฟดังกล่าวมาหาความสัมพันธ์
ระหว่างค่าวัฏจักรงาน และค่าตัวเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กดังแสดงในรูปที่ 3-15 โดยพิจารณาจากขอบเขต
ของโหมดการทำงานของวงจรแปลงผันฟลายแบ็คระหว่างช่วงกระแสต่อเนื่อง (Continuous Conduc-
tion Mode Region: CCM Region) และช่วงกระแสไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Conduction
Mode Region: DCM Region) ทำให้สามารถเลือกค่าวัฏจักรงาน (Duty Cycle: D_1) และตัว
เหนี่ยวนำทำแม่เหล็ก (L_m) ที่เหมาะสมตามเงื่อนไขที่กำหนด เพื่อทำให้วงจรแปลงผันสามารถทำงานใน
โหมดกระแสไม่ต่อเนื่องได้ โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้ $f_s = 100 \text{ kHz}$, $L_m = 200 \mu\text{H}$ และ $D_1 = 0.22$

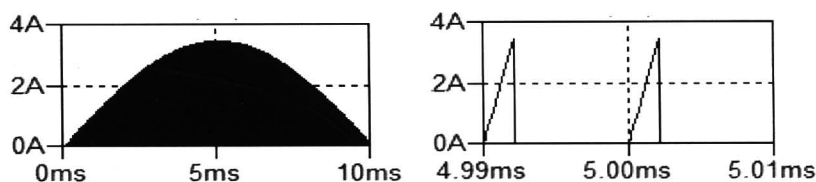


รูปที่ 3-18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเหนี่ยวนำทำแม่เหล็ก, ค่าวัฏจักรงาน และความถี่การสวิตช์

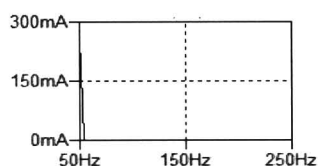
ในทางปฏิบัติถ้าต้องการคุณภาพรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ดีมากจะออกแบบอัตรา
 ระลอกคลื่นของแรงดันเอาต์พุตไม่เกิน 1 % ดังนั้นตัวเก็บประจุเอาต์พุตจะต้องมีค่ามากกว่า 7,958 μF
 ในงานวิจัยนี้เลือกจะใช้ $C_o = 8,000 \mu\text{F}$



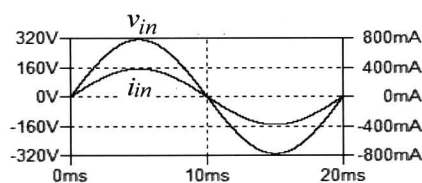
(ก)



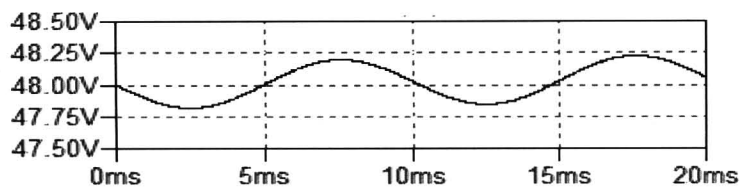
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

- รูปที่ 3-19 ผลการจำลองรูปคลื่นตามจุดต่างๆ ของวงจรแปลงผันกำลังฟลายแบ็ค
- (ก) กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทำแม่เหล็ก (ข) กระแสที่ไหลผ่านสวิตช์กำลัง
- (ค) แรงดัน และกระแสอินพุต (ง) แรงดันเอาต์พุต
- (จ) ระลอกคลื่นของแรงดันทางด้านเอาต์พุต

3.1.2.2 ผลการจำลองด้วยโปรแกรม LTSPICE

ในการจำลองการทำงานจะใช้โปรแกรม LTSPICE ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของวงจรมีดังนี้

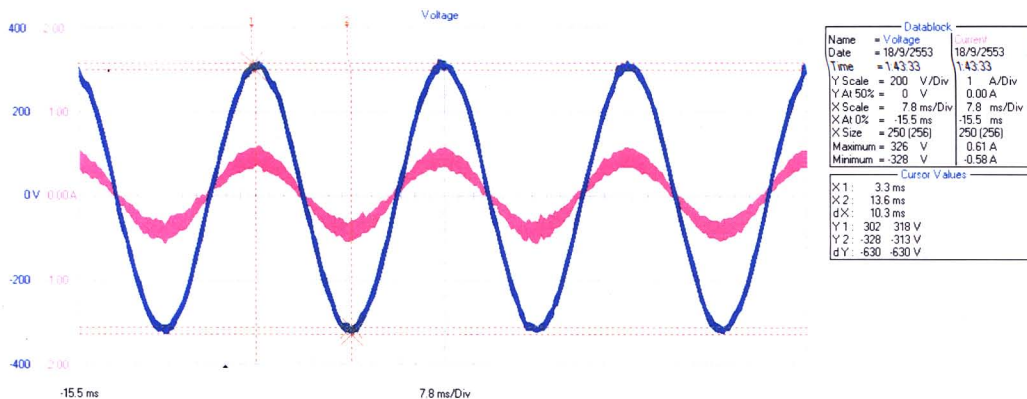
แรงดันอินพุตไฟสลับ	220 Vrms / 50 Hz
แรงดันเอาต์พุตไฟตรง	48 V _{dc}
ความถี่การสวิตช์	100 kHz
ค่าตัวเหนี่ยวนำทำแม่เหล็ก	200 μH
ค่าตัวเก็บประจุด้านเอาต์พุต	8,000 μF
ค่าวัฏจักรงาน	0.22

จากผลการจำลองจะได้รูปคลื่นของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กไม่ต่อเนื่องที่เวลา 5 ms ดังรูปที่ 3-19 (ก) ซึ่งเป็นจุดที่แรงดันไซน์ด้านอินพุตมีค่าสูงสุด (ค่ายอดของแรงดันไซน์) และสอดคล้องกับการออกแบบ รูปที่ 3-19 (ข) แสดงรูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์กำลัง $i_s(t)$ ซึ่งจะเห็นว่าค่ากระแสสูงสุดในแต่ละคาบการสวิตช์เป็นไปตามฟังก์ชันไซน์ รูปที่ 3-19 (ค) แสดงกระแสอินพุตของวงจรแปลงผันฟลายแบ็คที่มีการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังมีกระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่มูลฐาน (50 Hz) เพียงความถี่เดียว และเมื่อผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำจะพบว่ากระแสมีรูปร่างใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ และมีมูฟเมนต์ตรงกับมูฟเมนต์ของแรงดันอินพุตไซน์ดังแสดงในรูปที่ 3-19 (ง) ถูกแสดงในรูปที่ 3-19 (จ) ขณะที่ระลอกคลื่นของแรงดันเอาต์พุต ซึ่งจะเห็นว่ามีค่าน้อยกว่า 1 % เนื่องจากใช้ค่า $C_o > 7,957 \mu F$ และมีความถี่เท่ากับ 100 Hz

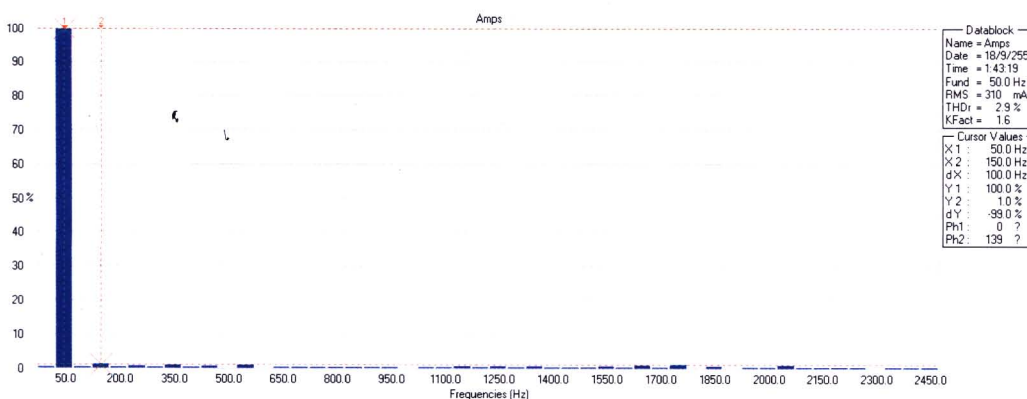
3.1.2.3 ผลการทดลองการ และเครื่องต้นแบบวงจรขับหลอด LEDs ที่มีวงจรแปลงผันกำลัง

ฟลายแบ็ค (Flyback converter) เป็นวงจรภาคกำลังด้านหน้า (รูปแบบที่ 2)

ความถี่การทำงานของสวิตช์กำลัง (MOSFET) ของวงจรแปลงผันฟลายแบ็คมีค่าคงที่ที่ 100 kHz โดยจะนำวงจรขับหลอดดังกล่าวมาขับกึ่งอนุกรมหลอด LEDs ยี่ห้อ Nichia รุ่น NS3W183 จำนวน 12 หลอด ที่ถูกนำมาต่อขนานกัน 6 กิ่งวงจร (จำนวนหลอดทั้งหมด $12 \times 6 = 72$ หลอด) โดยมีกระแสขับหลอดแต่ละกิ่งวงจรอยู่ที่ประมาณ 280 mA ดังแสดงในรูปที่ 3-12 การควบคุมแรงดันด้านเอาต์พุตของวงจรแปลงผันฟลายแบ็คจะใช้ TL494 สำหรับสร้างสัญญาณ PWM โดยแรงดันเอาต์พุตที่ได้จะถูกนำไปเป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงให้กับชุดขับหลอด LEDs จำนวน 72 หลอด (ในส่วนวงจรภาคกำลังที่ 2) ซึ่งการปรับค่ากระแสที่ไหลผ่านหลอด LEDs ในแต่ละกิ่งวงจร จะสามารถทำได้โดยการควบคุมสัญญาณกระแสอ้างอิงผ่านออป-แอมป์ TL071



(ก)

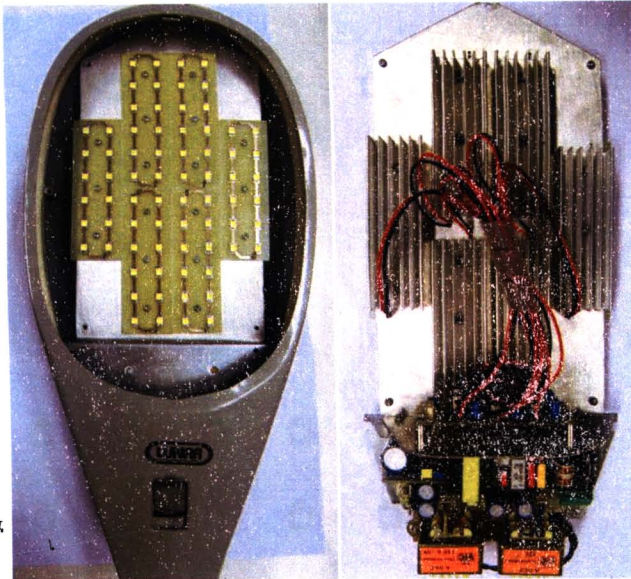


(ข)

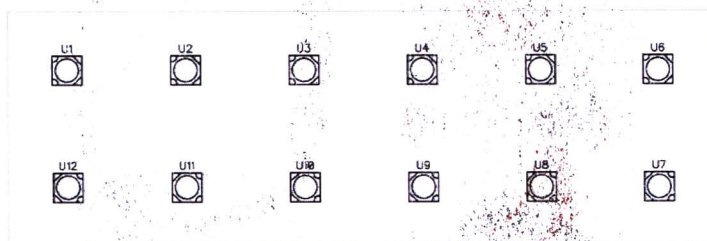
รูปที่ 3-21 ผลการวัดรูปคลื่นของกระแส และแรงดันด้านอินพุตของวงจรแปลงผันฟลายแบ็ค

(ก) กระแส (สีชมพู) และแรงดัน (สีฟ้า) (ข) ฮาร์มอนิกส์ของกระแสอินพุตที่ค่าความถี่ต่างๆ

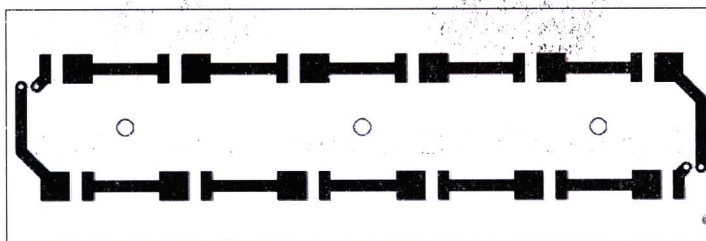
รูปที่ 3-20 และรูปที่ 3-21 แสดงรายละเอียดของวงจรและเครื่องต้นแบบวงจรขับหลอด LEDs รูปแบบที่ 2 ซึ่งจะพบว่าทางด้านเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังฟลายแบ็คจะเป็นชุดวงจรขับหลอด LEDs จำนวน 6 กิ่งวงจรต่อขนานกัน ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว จำนวนกิ่งวงจรที่ต่อขนานกันนี้สามารถจะเพิ่มหรือลงจำนวนลงได้ตามความเหมาะสมของการนำไปประยุกต์ใช้งาน กล่าวคือถ้างานส่องสว่างใดต้องการค่าฟลักซ์ส่องสว่างมากขึ้นก็สามารถเพิ่มจำนวนกิ่งวงจรลงไปได้ จากรูปที่ 3-21 (ก) จะเห็นว่ากระแสด้านอินพุตของวงจรเรียงกระแสที่ได้จากวงจรในรูปที่ 3-20 นั้นมีรูปคลื่นใกล้เคียงฟังก์ชันไซน์ ซึ่งแตกต่างจากรูปคลื่นของกระแสที่ได้จากรูปที่ 3-10 (ก) อีกทั้งกระแสอินพุตที่ได้มีมมต่างเฟสเล็กน้อยมาก เมื่อเทียบกับมมของรูปคลื่นแรงดัน ส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent power: VA) และค่ากำลังไฟฟ้าจริง (Real Power: Watt) ที่วงจรแปลงผันได้รับมีค่าใกล้เคียงกัน จากรูปที่ 3-21 (ข) พบว่าค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ที่ความถี่ต่างๆ มีค่าต่ำมาก โดยมีค่ากระแสสูงสุดอยู่ที่ความถี่มูลฐาน (ความถี่ 50Hz) ค่า THD_i (Total Harmonics Distion of current) ที่ได้จะมีค่าตามที่มาตรฐานกำหนด (ไม่เกิน 5%) คืออยู่ที่ 2.9%



รูปที่ 3-22 เครื่องต้นแบบของวงจรขับหลอด LEDs ที่ได้จากวงจรรูปที่ 3-16



(ก)

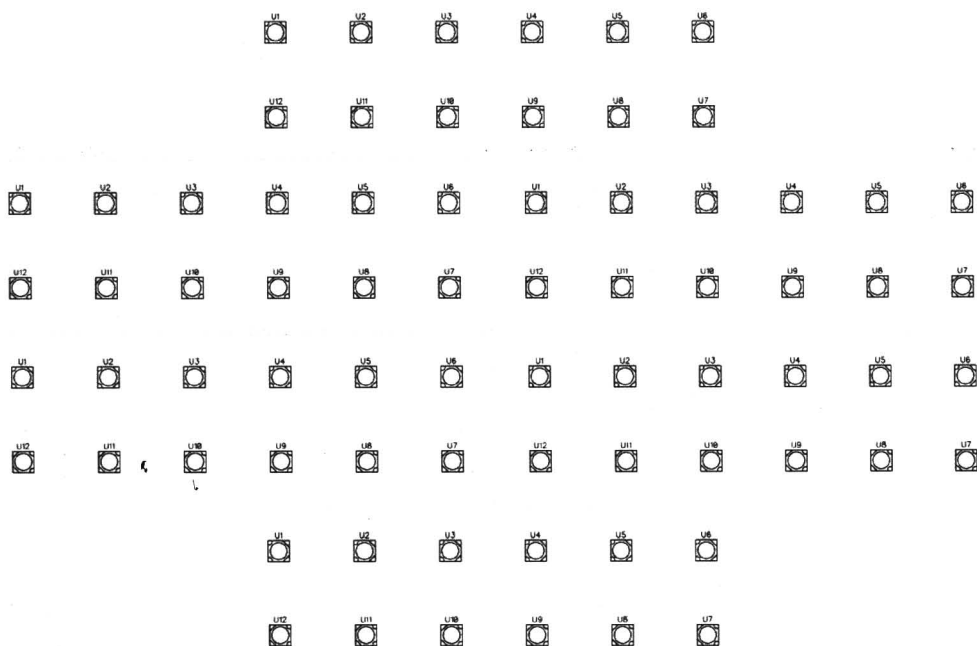


(ข)

รูปที่ 3-23 แผ่นพิมพ์ลายวงจรสำหรับอนุกรมหลอด LEDs จำนวน 12 หลอด

(ก) แสดงตำแหน่งการวางหลอด LEDs บนแผ่นพิมพ์ลายวงจร

(ข) แสดงลายทางเดินใต้แผ่นพิมพ์ลายวงจร



รูปที่ 3-24 แสดงตำแหน่งการวางตำแหน่งแผ่นพิมพ์ลายวงจร ภายในตัวคอม

รูปที่ 3-23 (ก) แสดงตำแหน่งการวางหลอด LEDs บนแผ่นพิมพ์ลายวงจร โดยจะสอดคล้องกับลายทางเดินใต้แผ่นพิมพ์ลายวงจรดังแสดงในรูปที่ 3-23 (ข) ซึ่งจะเห็นว่าการต่ออนุกรมหลอด LEDs จำนวน 12 หลอด รูปที่ 3-24 แสดงตำแหน่งการวางตำแหน่งแผ่นพิมพ์ลายวงจร ภายในตัวคอม โดยจะมีหลอด LEDs ทั้งหมด 72 หลอด ตารางที่ 3-2 แสดงรายละเอียดอุปกรณ์พร้อมราคาของวงจรขับหลอด LEDs ที่มีวงจรแปลงผันกำลังฟลายแบ็ค (Flyback converter) เป็นวงจรภาคกำลังด้านหน้า (รูปแบบที่ 2)

ดังนั้นสรุปได้ว่าวงจรแปลงผันกำลังฟลายแบ็ค มีหน้าที่หลักๆ คือใช้ในการแก้ค่าตัวประกอบกำลัง แยกโอดทางไฟฟ้า และเป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงให้กับวงจรขับหลอด LEDs ในส่วนที่ 2 ซึ่งทำให้การออกแบบระบบวงจรขับหลอดดังกล่าวนี้สามารถทำได้โดยง่าย เนื่องจากการออกแบบวงจรภาคกำลังทั้ง 2 ส่วนนี้สามารถแยกออกแบบได้

ตารางที่ 3-2: รายละเอียดอุปกรณ์พร้อมราคาของวงจรขับหลอด LEDs ที่มีวงจรแปลงผันกำลัง
ฟลายแบ็คเป็นวงจรภาคกำลังด้านหน้า (รูปแบบที่ 2)

รายการ	ค่าอุปกรณ์	รหัสอุปกรณ์	จำนวน	ราคา/หน่วย (บาท)	ราคารวม (บาท)
R1,R2,R3,R4,R5,R6,R28	1k Ohm ¼ W 1%		7	1	7
R7,R8,R9,R10,R11,R12	1 Ohm ¼ W 1%		6	1	6
R13,R14,R15,R16, R17,R18,,R21,R24	50K Ohm Trim pot		8	23	184
R19	50k Ohm 5W 1%		1	1	1
R20	90k Ohm ¼ W 1%		1	1	1
R22	930k Ohm ¼ W 1%		1	1	1
R23	75k Ohm ¼ W 1%		1	1	1
R25	1.3k Ohm ¼ W 1%		1	1	1
R26	10k Ohm ¼ W 1%		1	1	1
R27	5k Ohm ¼ W 1%		1	1	1
R29	10 Ohm ¼ W 1%		1	1	1
L1	33mH		1	9.52	9.52
C1	0.1µF MPX X2		1	1.69	1.69
C2	0.033 µF WIMA MKS		1	20	20
C3	2200pF WIMA MKP		1	10	10
C4	2200µF Electrolyte		1	18.16	18.16
C5	0.22µF film		1	2.67	2.67
C6,C7	0.15µF film		2	1.51	1.51
D1	400V 1.5A Bridge	DF1504S	1	7.15	7.15
D2	1000V 1A	BYV26E	1	2	2
D3	600V 60A	STTH60L06W	1	213	213
Q1,Q2,Q3,Q4,Q5,Q6	80V 1.5A	BD139	6	3.26	19.56
Q7	800V 10.5A	STW12NK80Z	1	119	119
TLP250	IC Opto Isolator		1	34.96	34.96
TL082	IC Op-Amp	TL082	3	4.62	13.86
TL494	IC PWM Controller	TL494	1	8.32	8.32
T1	TR Ferrite Core E	TD34	1	70	70
รวม					756.40

หมายเหตุ

- 1. ราคาโดยรวมของอุปกรณ์จะต่ำกว่านี้ ถ้ามีการสั่งเป็นจำนวนมากๆ
- 2. ราคานี้ยังไม่รวมแผ่นพิมพ์ลายวงจรที่ทำจากวัสดุอลูมิเนียม (ซึ่งราคาจะขึ้นอยู่กับจำนวนการสั่งทำ)