

บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดจุดหลอดด้วยวงจรเรโซแนนซ์อนุกรม และใช้งานด้วยวงจรเรโซแนนซ์ขนาน

Series Resonant Starting and Parallel Resonant Operation Electronic Ballast

สุขสันต์ หวังสถิตยวัณษ์¹ ชวนะ อยู่ภักดี¹ และ วราภพ แซ่ซิ่น²

บทคัดย่อ

อายุการใช้งานของหลอดฟลูออเรสเซนต์ ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ ทั้งช่วงจุดหลอดและใช้งาน งานวิจัยนี้เสนอบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ใช้วงจรเรโซแนนซ์อนุกรมทำงานช่วงจุดหลอด ส่วนช่วงใช้งานจะเป็นวงจรเรโซแนนซ์ขนาน โดยวงจรจะทำงานที่ความถี่สูงขณะเผาไส้หลอดและทำงานที่ความถี่ต่ำในช่วงใช้งาน

การใช้วงจรอนุกรมเรโซแนนซ์นั้น เพื่อควบคุมให้แรงดันหลอดขณะเผาไส้หลอดมีค่าน้อยที่สุดเท่าทำได้ ขณะที่วงจรขนานจะทำงานเป็นแหล่งจ่ายกระแสเหมือนวงจรบัลลาสต์ปกติ

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า แรงดันหลอดและกระแสหลอดขณะเผาไส้และใช้งานเท่ากับ 46 โวลต์, 195 มิลลิแอมแปร์ และ 219 โวลต์, 88 มิลลิแอมแปร์ ตามลำดับ

คำสำคัญ : บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์, เผาไส้, ใช้งาน

Abstract

The operating lifetime of fluorescent lamp is dependent on the starting and operating parameters. This paper presents an electronic ballast using series resonant circuit during starting and parallel resonant for operating period. The ballast circuit was driven with two frequencies, a high frequency at preheat and reduced to a low frequency when operating.

The series resonant was designed to keep preheat lamp voltage as low as possible. While parallel resonant was operated as a current source as in conventional ballast circuits.

From the experiment, it was shown that the lamp voltage and lamp filament current during preheat and operation are 46 V, 195 mA, and 219 V, 88 mA, respectively.

Keywords : electronic ballast, preheat, operating

¹ อาจารย์, ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² นักศึกษา, ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

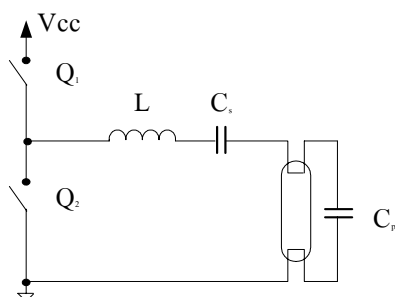
1. บทนำ

การเสื่อมสภาพของหลอดฟลูออเรสเซนต์นั้น [1] ส่วนใหญ่เกิดจากการสูญเสียการแผ่รังสีของอิเล็กตรอนที่เคลือบ (Electron Emissive Coating) ไว้ที่ไส้หลอด โดยอุณหภูมิของไส้หลอดมีผลโดยตรงต่ออัตราสูญเสียการแผ่รังสีที่ถูกเคลือบไว้นี้ หากอุณหภูมิต่ำกว่า 700°C หรือสูงกว่า $1,000^{\circ}\text{C}$ จะทำให้อายุการใช้งานของหลอดสั้นลง เนื่องจากอัตราสูญเสียการแผ่รังสีที่ถูกเคลือบที่ไส้หลอดเพิ่มขึ้น ดังนั้นสิ่งสำคัญของบัลลาสต์คือจะต้องทำให้ไส้หลอดมีความร้อนที่เหมาะสมทั้งในช่วงจุดหลอดและใช้งาน เพื่อลดการสูญเสียที่ไส้หลอดและยืดอายุการใช้งาน อย่างไรก็ตามการที่จะวัดอุณหภูมิไส้หลอดโดยตรงทำได้ค่อนข้างยาก ในทางปฏิบัติใช้วิธีควบคุมปัจจัยทางไฟฟ้าต่าง ๆ แทน เช่น แรงดันจุดหลอด แรงดันไส้หลอด กระแสหลอดและค่าอื่น ๆ ทั้งในช่วงจุดหลอดและใช้งาน มีความเหมาะสมตรงตามมาตรฐานเกี่ยวข้องที่กำหนด โดยมีรายละเอียดดังนี้ [2]

1. เริ่มแรกไส้หลอดต้องถูกอุ่นจนมีอุณหภูมิที่เหมาะสม หากสูงหรือต่ำเกินไปจะทำให้เกิดการความเสียหายต่อไส้หลอด เนื่องจากการแผ่รังสีของอิเล็กตรอนไม่สม่ำเสมอและ/หรือเกิดการกระเหย
2. ระหว่างการเผาไส้หลอด แรงดันตกคร่อมหลอดต้องรักษาให้มีค่าน้อยสุดเท่าที่ทำได้ หากแรงดันสูงเกินไปทำให้เกิดปล่อยประจุรังแสง (Glow Discharge) ซึ่งเป็นผลเสียต่อไส้หลอด
3. หลังจากอุณหภูมิไส้หลอดถึงระดับที่เหมาะสมแล้ว แรงดันของไส้หลอดต้องเพิ่มขึ้นจนถึงระดับจุดหลอดติด
4. เมื่อหลอดถูกจุดติดแล้ว แรงดันไส้หลอดต้องลดลง เพื่อรักษาระดับอุณหภูมิไส้หลอดให้ได้ตามต้องการที่กระแสหลอดปกติไหลผ่าน
5. ตัวประกอบยอดคลื่นของกระแสหลอดต้องไม่เกิน 1.7 เพื่อไม่ให้ความหนาแน่นกระแสที่ผิวไส้หลอดมากเกินไป
6. บัลลาสต์ต้องเป็นเสมือนแหล่งจ่ายกระแสเพื่อให้มีการทำงานที่เสถียร โดยความชันของเส้นแรงดัน-กระแส (หรือความต้านทาน) ของบัลลาสต์ต้องมากกว่าของหลอดที่จุดติดระหว่างเส้นทั้งสอง [3]

ดังนั้นหากการทำงานของบัลลาสต์สอดคล้องตามที่กล่าวในข้อ 1-6 แล้ว หลอดไฟจะมีอายุการใช้งานที่นานขึ้น นั่นคือกระบวนการจุดหลอดและจุดติดหลอดที่ถูกต้องเป็นองค์ประกอบที่สำคัญยิ่งต่อบัลลาสต์ที่มีคุณภาพสูง

2. หลักการทำงานทั่วไป



รูปที่ 1 วงจรแปลงผันเรโซแนนซ์แบบขนาน

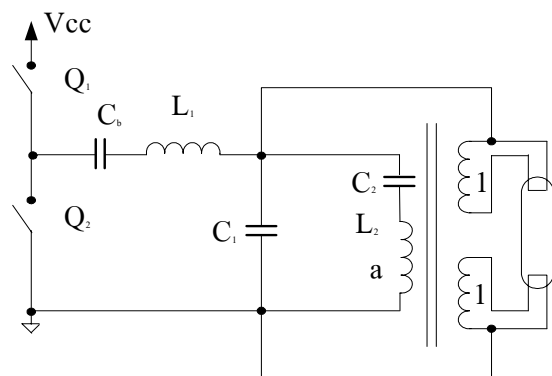
บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่จะเป็นวงจรแปลงผัน LCC อนุกรม-ขนานชนิดแหล่งจ่ายกระแส ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยในกรณีนี้ กระแสเผาไส้หลอดจะเป็นค่าเดียวกับกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุขนาน (C_p) การเผาไส้หลอด ทำได้โดยให้วงจรแปลงผันทำงานหรือสวิตช์ที่ความถี่ใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์ของวงจร เพื่อขับกระแสผ่านไส้หลอดให้ได้ตามที่ต้องการ โดยความถี่การสวิตช์ช่วงจุดหลอดนั้นจะสูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์ ดังนั้นแรงดันตกคร่อม C_p และหลอดจึงมีค่าน้อยที่กระแสตามกำหนด ซึ่งจะสอดคล้องกับการทำงานที่ได้กล่าวไว้ในข้อ 2 ข้างต้น การให้ทำงานที่ความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์ยังเป็นการสวิตช์แบบซอฟท์ด้วย

วงจรเรโซแนนซ์แบบขนานขณะเผาไส้หลอด ความต้านทานไส้หลอดจะไม่ค่อยมีผลต่อกระแสไส้หลอด เนื่องจากอิมพีแดนซ์อนุกรมมีค่าสูงกว่าความต้านทานไส้หลอดมาก ดังนั้นแรงดันตกคร่อมไส้หลอดจึงมีค่าต่ำกว่าแรงดันที่ขับ

อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าว หากแรงดันตกคร่อมหลอดไม่ต่ำมากพอ จะยังคงทำให้เกิดกระแสรังแสงขณะเผาไส้หลอด ซึ่งมีผลให้ไส้หลอดเสื่อม และเกิดดวงหลอดดำที่ปลายหลอด

3 ทฤษฎีและหลักการที่เสนอ

วงจรในรูปที่ 2 นั้นจะทำงานที่ 2 ความถี่เรโซแนนซ์ ประกอบด้วย L_1 และ C_1 ที่ขับกำลังให้หลอดและวงจรเรโซแนนซ์อนุกรม L_2 และ C_2 ที่ทำงานช่วงเผาไส้หลอด ส่วนตัวเก็บประจุ C_b นั้นเพื่อกันแรงดัน dc ไส้หลอดจะถูกขับด้วยขดลวดแรงดันต่ำผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_2 ที่ต่ออนุกรมอยู่กับ C_2 ในรูปของเรโซแนนซ์อนุกรมที่ใช้ขับไส้หลอดช่วงเผาไส้ การอธิบายการทำงานของ วงจรดังกล่าวทั้งช่วงจุดหลอดและใช้งานจะใช้วงจรสมมูลแบบประมาณ ซึ่งมีดังนี้



รูปที่ 2 วงจรจุดหลอดด้วยเรโซแนนซ์อนุกรมและใช้งานด้วยเรโซแนนซ์ขนาน

กำหนดให้ $L_1 C_1 > L_2 C_2$ โดยความถี่เรโซแนนซ์ทั้ง 2 จะได้ว่า

$$\omega_{01} = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \quad (1)$$

$$\omega_{02} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} \quad (2)$$

$$\text{ซึ่ง} \quad \omega_{02} > \omega_{01} \quad (3)$$

บัลลาสต์จะถูกกำหนดให้มีความถี่การทำงานระหว่าง 2 ความถี่ ช่วงเผื่อไว้ความถี่การสวิตช์ $f_{s,w}$ จะเป็น

$$f_{s,w} \approx \omega_{02}/2\pi \quad (4)$$

ขณะใช้งานความถี่การสวิตช์ f_s จะเป็น

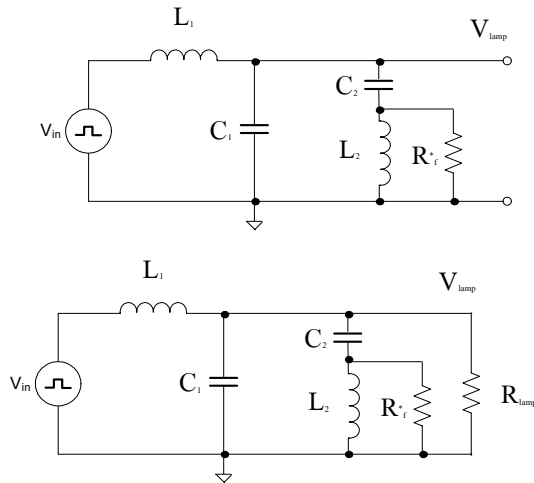
$$f_s \approx \omega_{01}/2\pi \quad (5)$$

3.1 ช่วงจุดโหลด

ขณะเผื่อไว้ไม่ต้องคำนึงถึงโหลดหลอดไฟ ทำให้วงจรสมมูลดังแสดงในรูปที่ 3ก. หากแรงดันที่ป้อนเป็นรูปคลื่นไซน์ (พิจารณาเฉพาะฮาร์โมนิกลำดับที่ 1) ที่ความถี่เรโซแนนซ์ โดยมีค่าตัวประกอบคุณภาพ (Q) สูง ความต้านทานโหลดที่มองเห็นทางด้านปฐมภูมิจะเป็น

$$R_f^* = a^2 R_f \quad (6)$$

โดยที่ R_f^* คือความต้านทานสมมูลของโหลดทางด้านปฐมภูมิ
 R_f คือความต้านทานโหลด
 a คืออัตราส่วนจำนวนรอบ



รูปที่ 3 วงจรสมมูลของวงจรรูปที่ 2

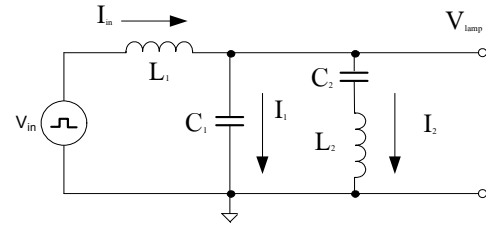
ก) ช่วงจุดโหลด ข) ช่วงใช้งาน

ส่วนช่วงใช้งานโหลดสามารถแสดงได้เป็นตัวแทนทางเชิงเส้น

R_{lamp} ดังในรูปที่ 3ข.

ในทางปฏิบัติช่วงจุดโหลด กระแสไหลผ่าน R_f^* จะน้อยกว่า L_2 ทำให้สามารถลดรูปวงจรในช่วงจุดโหลดได้ตามรูปที่ 4 เมื่อวงจรดังกล่าวถูก

ขับเคลื่อนการสวิตช์ที่ความถี่ $f_{s,w}$ L_2 และ C_2 จะเป็นเหมือนลัดวงจร ทำให้แรงดัน V_{lamp} ไกลเคียงศูนย์ มีผลให้กระแสไหลผ่าน C_1 เพียงเล็กน้อย และ $I_{in} \approx I_2$



รูปที่ 4 วงจรสมมูลช่วงจุดโหลดแบบลัดรูป

ดังนั้น

$$I_{in,w,rms} = \frac{V_{in(1)pk}}{\sqrt{2}\omega_{s,w}L_1} \quad (7)$$

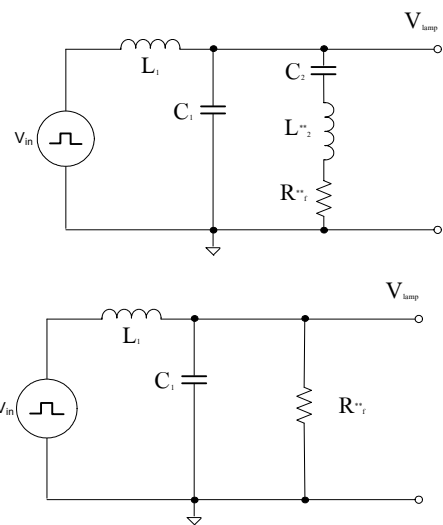
โดยที่

$I_{in,w,rms}$ คือกระแส rms ไหลเข้าบัลลาสต์ช่วงจุดโหลด
 $V_{in(1)pk} = \frac{4}{\pi} V_{in}$ แรงดันยอดของแรงดันอินพุตฮาร์โมนิกลำดับที่ 1
 V_{in} คือค่ายอดของแรงดันอินพุตรูปคลื่นสแควร์ที่ความถี่ $\omega_{s,w} = 2\pi f_{s,w}$

ดังนั้นแรงดัน rms ตกคร่อม L_2 ($V_{L2,w,rms}$) และแรงดัน rms โหลด ($V_{f,w,rms}$) ช่วงจุดโหลดจะเป็น

$$V_{L2,w,rms} = I_{in,w,rms} \omega_{s,w} L_2 = \frac{V_{in(1)pk} L_2}{\sqrt{2} L_1} \quad (8)$$

$$V_{f,w,rms} = \frac{V_{L2,w,rms}}{a} = \frac{V_{in(1)pk} L_2}{\sqrt{2} a L_1} \quad (9)$$



รูปที่ 5 วงจรสมมูลขณะจุดโหลดหลังจากแปลงเป็นวงจรอนุกรมแล้ว
 ก).กรณีทั่วไป ข).เมื่อขับเคลื่อนด้วยความถี่เรโซแนนซ์ $L^{**}C_2$

โดยมีข้อสมมติฐานว่าแรงดันตกคร่อมหลอดขณะจุดหลอดนั้นเกือบเป็นศูนย์ แต่หากพิจารณาโดยละเอียดมากขึ้น โดยรวมผลกระทบของความต้านทานไส้หลอดด้วยตามรูปที่ 3ก. ในส่วนการขนานกันของ R_f^* และ L_2 สามารถแสดงเป็นอิมพีแดนซ์อนุกรมได้ดังรูปที่ 5ก. โดย

$$R_f^{**} = \frac{R_f^*}{1 + \left(\frac{R_f^*}{2\pi f_{s.w} L_2} \right)^2} \quad (10)$$

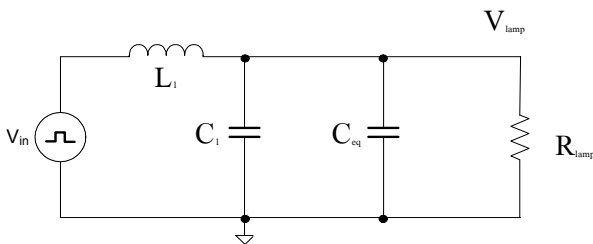
$$L_2^{**} = \frac{L_2}{1 + \left(\frac{2\pi f_{s.w} L_2}{R_f^*} \right)^2} \quad (11)$$

$$f_{s.w} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_2^{**} C_2}} \quad (12)$$

เมื่อความถี่ในการขับสวิตช์เท่ากับเรโซแนนซ์ ดังนั้นวงจรจะเป็นดังรูปที่ 5ข. ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแรงดันตกคร่อมไส้หลอดขณะจุดติดจะไม่เป็นศูนย์ แต่สามารถทำให้ต่ำลงได้หากออกแบบให้เหมาะสม

3.2 ช่วงใช้งาน

ตามรูปที่ 3ข. สามารถลดรูปได้ตามรูปที่ 6. โดย C_{eq} เป็นอิมพีแดนซ์ของ $L_2 C_2$ ที่ความถี่ใช้งาน (f_s) ที่ความถี่ดังกล่าวจะต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์อนุกรมช่วงจุดหลอด การรวมกันของ $L_2 C_2$ จะแสดงผลเหมือนเป็นคาปาซิเตอร์ ดังนั้นวงจรจะเป็นเรโซแนนซ์ขนานที่ความถี่การสวิตช์ ω_{01}^* ซึ่งต่ำกว่า ω_{01}



รูปที่ 6 วงจรสมมูลในช่วงใช้งานแบบลดรูป

$$\omega_{01}^* = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 (C_1 + C_{eq})}} \quad (13)$$

สำหรับการใช้งานที่ ω_{01}^* วงจรจะทำงานเป็นเสมือนแหล่งจ่ายกระแส โดยกระแส rms ($I_{cs,rms}$)

$$I_{cs,rms} = \frac{V_{in(1)pk}}{\sqrt{2} Z_r} \quad (14)$$

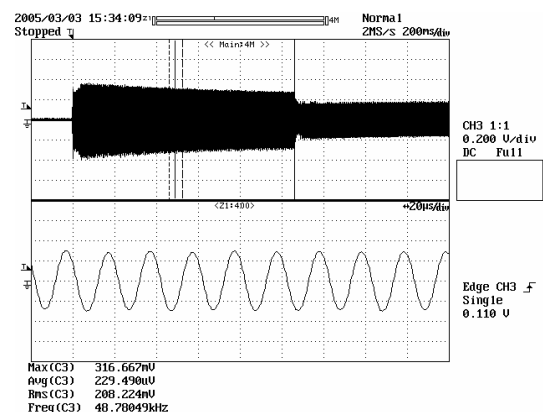
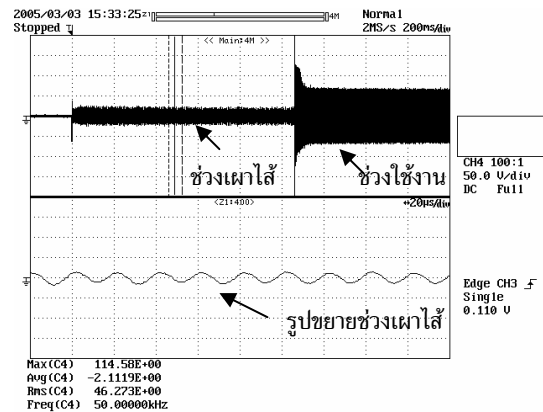
$$Z_r = \sqrt{\frac{L_1}{C_1 + C_{eq}}} \quad (15)$$

ซึ่งจะเห็นว่าในการทำงานช่วงใช้งาน จะมีลักษณะเหมือนกับวงจรเรโซแนนซ์ขนานชนิดแหล่งจ่ายกระแสทั่วไป

4. ผลการทดสอบและดำเนินการ

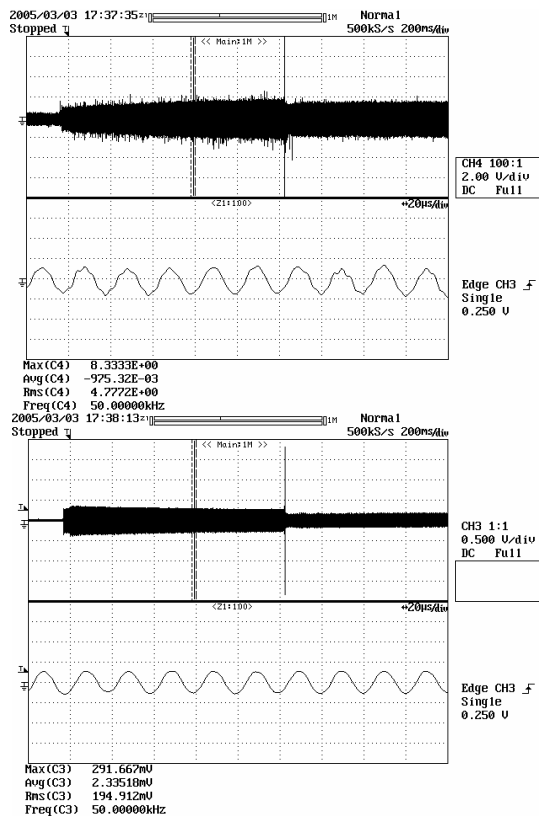
ตารางที่ 1 ค่าแรงดันและกระแสต่างๆ

สภาวะ	แรงดัน (V)		กระแส (mA)	
	หลอด	ไส้หลอด	หลอด	ไส้หลอด
ช่วงเผาไส้	46	4.77	208	195
ช่วงใช้งาน	219	3.62	172	88



รูปที่ 7 แรงดัน (บน) กระแสหลอด (ล่าง)

ในการทดสอบการทำงานตามหลักการที่นำเสนอ โดยทำการทดสอบกับหลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิด T5 ขนาด 35 วัตต์ จำนวน 1 หลอด รายละเอียดค่าต่างๆที่ได้ตามแสดงตารางที่ 1 สำหรับค่าตัวประกอบยอดคลื่นกระแสหลอดที่ได้เท่ากับ 1.4 สำหรับรูปคลื่นของแรงดันและกระแสหลอดตามแสดงในรูปที่ 7 ส่วนแรงดันและกระแสไส้หลอด ดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งแสดงให้เห็นทั้งช่วงเผาไส้และช่วงใช้งาน โดยช่วงเผาไส้ทำงานที่ความถี่ 50 kHz ส่วนช่วงใช้งานที่ความถี่ 20 kHz



รูปที่ 8 แรงดัน (บน) และกระแสไส้หลอด (ล่าง)

5. สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นได้ชัดเจนว่า ผลที่ได้สอดคล้องตามข้อกำหนดที่กล่าวก่อนหน้า โดยในช่วงเผาไส้ซึ่งต้องการแรงดันหลอดต่ำ จะใช้การทำงานของวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมที่ต่ออยู่กับหลอดไฟ หากมีความถี่ที่เหมาะสมจะทำให้แรงดันหลอดนั้นมีค่าต่ำมาก ประมาณ 46 โวลต์ และเมื่อจุดหลอดติดแล้ว ก็สามารถควบคุมระดับกระแสที่ไหลผ่านไส้หลอดให้มีค่าตามต้องการได้ โดยเปลี่ยนการทำงานเป็นวงจร

เรโซแนนซ์แบบขนาน ซึ่งจะทำงานเป็นแหล่งจ่ายกระแส โดยการทำงานทั้งสองสภาวะจะมีความถี่แตกต่างกัน

หลักการที่เสนอนั้น เมื่อเปรียบเทียบกับวงจรทั่วไปที่ใช้ในบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ จะใช้อุปกรณ์เพิ่มขึ้น คือตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุมากกว่าวงจรที่ใช้ทั่วไป ทำให้ค่าใช้จ่ายมากขึ้น แต่หากใช้กับหลอดไฟมากกว่าหนึ่งหลอดจะไม่ผลแตกต่างกัน

ข้อดีของหลักการที่เสนอนี้ซึ่งเห็นได้ชัดคือ การทำงานของวงจรจะเป็นแหล่งจ่ายกระแส ดังนั้นสามารถต่อหลอดไฟอนุกรมจำนวนเท่าใดก็ได้ โดยขึ้นอยู่กับข้อจำกัดในทางปฏิบัติเท่านั้น แม้ว่าจะมีไส้หลอดชุดใดชุดที่สามารถจุดติดได้ โดยหลอดที่ไส้ขาดจะจุดหลอดในสภาวะที่เย็น ส่วนหลอดที่ปกติจะจุดหลอดในสภาวะเผาไส้เหมือนเดิม

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทั้งทางด้านข้อมูลและเครื่องมือจากบริษัทไทยเอ็นเนอร์ยี่คอนเซอร์เวชั่นจำกัด

เอกสารอ้างอิง

- [1] J.Yanef, R. Davis, C. O'Rourke and W-M Chui, "Compatibility testing of fluorescent lamp and ballast systems," IEEE Transaction on Industry Applications, vol. 35, 1999, pp. 1271 – 1276.
- [2] S Ben-Yaakov, Moshe Shvartsas, Gregory Ivensky, "HF multiresonant electronic ballast for fluorescent lamps with constant filament preheat voltage," Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2002. APEC 2002. Seventeenth Annual IEEE , Volume: 2 ,10-14 March 2002 , pp.911-917.
- [3] S.Glozman, S.Ben-Yaakov. "Dynamic interaction of high frequency electronic ballasts and fluorescent lamps" IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC-2000, Galway, Ireland. 2000, pp.1363-1368.
- [4] M.C.J.Ribas, J., J.M.Alonson, E.L., Corominas, A.J. Calleja, and M.C.J.Rico-Secades, "Design considerations for optimum ignition and dimming of fluorescent lamps using a resonant inverter operating open loop," IEEE Industry Applications Conference, Thirty-Third IAS Annual Meeting, 1998, pp.2068-2075.