

บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ภาคเดียวค่าตัวประกอบกำลังสูง สำหรับหลอดเมทัลฮาไลด์ 400 วัตต์

ชนิศ ศรีเดช¹ อุดมศักดิ์ ยั้งยี่น² และ อธิญา บุญญารุณเนตร³

Abstract

Sridech, C., Yungyuen, U., Boonyaroonate, I.

High power factor single-stage electronic ballast for 400W metal halide lamp
Songklanakarin J. Sci. Technol., May 2007, Suppl 2 : 379-389

This paper propose a high power factor single-stage electronic ballast for the metal halide lamp which operates at zero-voltage switching (ZVS) condition of all active switches. To reduce the number of switches, a switch mode rectifier with power factor correction is integrated with a half-bridge inverter. An electronic ballast prototype operating at 55 kHz has been implemented to drive 400W metal halide lamp. Experimental results show that the designed electronic ballast has 0.99 power factor (PF), 1.49 lamp current crest factor (CF), 11.40 % total current harmonic distortion (THDi) and 77.78 % efficiency (η) at full load.

Key words : electronic ballast, power factor correction, half bridge resonant inverter, zero voltage switching

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, 10140 Thailand.

¹นักศึกษาลัทธิสุตร วศ.ม สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ²MS.E.E (Electrical Engineering) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ³D.Eng. (Electrical Engineering) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

Corresponding e-mail : Chanis9@msn.com

รับต้นฉบับ 21 เมษายน 2549 รับลงพิมพ์ 8 พฤศจิกายน 2549

บทคัดย่อ

ชนิศ ศรีเดช อุดมศักดิ์ ยั่งยืน และ อธิญา บุญญาอรุณเนตร

บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ภาคเดียวค่าตัวประกอบกำลังสูงสำหรับหลอดเมทัลฮาไลด์ 400 วัตต์

ว. สงขลานครินทร์ วทท. พฤษภาคม 2550 ฉบับพิเศษ 2 : 379-389

บทความนี้นำเสนอบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ภาคเดียวสำหรับหลอดเมทัลฮาไลด์ขนาด 400 วัตต์ ภายใต้พื้นฐานการทำงานของสวิตช์แรงดันศูนย์ (ZVS) สามารถที่จะลดจำนวนอุปกรณ์สวิตซ์ลงได้ โดยการใช้อุปกรณ์สวิตซ์ของวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบกึ่งบริดจ์ให้ทำงานร่วมกับวงจรเรียงกระแสสำหรับเพื่อการแก้ไขค่าตัวประกอบกำลัง โดยวงจรต้นแบบทดลองกับหลอดเมทัลฮาไลด์ขนาด 400 วัตต์ ทำงานที่ความถี่สวิตซ์ 55 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งจากผลการทดลองค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.99 ค่าตัวประกอบยอดคลื่นของกระแสโหลดเท่ากับ 1.49 ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกของกระแสด้านเข้า เท่ากับ 14.40% และประสิทธิภาพเท่ากับ 77.78% ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกับหลักการทางทฤษฎี

หลอดเมทัลฮาไลด์มีความนิยมใช้กันอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากให้แสงที่มีความใกล้เคียงกับธรรมชาติมากที่สุดในกลุ่มของหลอดแก๊สดีสชาร์จความเข้มสูง (High Intensity Discharge Lamp : HID) ชนิดอื่นๆ แต่ปัจจุบันบัลลาสต์แกนเหล็กที่ใช้เป็นส่วนประกอบในวงจรมีข้อเสียอยู่หลายประการ คือ มีการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในบัลลาสต์สูง ค่าตัวประกอบกำลังต่ำ มีขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก เนื่องจากในปัจจุบันมีการให้ความสำคัญในเรื่องการประหยัดพลังงานและการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่าที่เป็นเป้าหมายสำคัญระดับประเทศ การวิจัยและพัฒนาบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวสำหรับหลอดเมทัลฮาไลด์นั้นก็มีการพัฒนาบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ขึ้นมาใช้งานเช่นกัน โดยสามารถแบ่งกลุ่มตามขนาดของหลอดออกเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มกำลังไฟฟ้ต่ำที่มีขนาดกำลังไฟฟ้ไม่เกิน 175 วัตต์ กลุ่มกำลังไฟฟ้ปานกลางที่มีขนาดกำลังไฟฟ้ 175-400 วัตต์ และกลุ่มกำลังไฟฟ้สูงที่มีขนาดกำลังไฟฟ้สูงกว่า 400 วัตต์ ปัจจุบันหลอดเมทัลฮาไลด์ขนาดกำลังไฟฟ้ปานกลางมีความนิยมใช้กันมากในห้างสรรพสินค้า สนามกีฬา และป้ายโฆษณา โดยเริ่มแรกมีการพัฒนาวงจรแบบสองภาค (Chi-Hwan, 2002; Seung and Chi-Hwan, 2001) (Two stage) คือ ภาคแรกเป็นส่วนของการแก้ไขค่าตัวประกอบกำลัง ภาคที่สองเป็นส่วนของบัลลาสต์ซึ่งทำหน้าที่จำกัดกระแส และควบคุมแรงดันไฟฟ้ให้เหมาะสมกับหลอด ซึ่งบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์แบบสองภาคมีความง่ายต่อการออกแบบและการควบคุมการ

ทำงาน แต่จะต้องใช้อุปกรณ์ในวงจรเป็นจำนวนมาก ซึ่งส่งผลให้มีขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก รวมทั้งต้นทุนในการผลิตสูง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการพัฒนาบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับหลอดเมทัลฮาไลด์ขนาดกำลังไฟฟ้ปานกลางขึ้นมา โดยทำการวิจัยและพัฒนาต่อไปเป็นบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์แบบภาคเดียว (Hung et al., 2005; Laskai et al., 1994) (Single stage) ซึ่งรวมส่วนที่ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังกับส่วนของบัลลาสต์ให้ทำงานร่วมกัน ทำให้สามารถลดจำนวนอุปกรณ์ลงได้

1. หลอดเมทัลฮาไลด์

โดยทั่วไปโครงสร้างของหลอดเมทัลฮาไลด์จะเป็นหลอดแก้วสองชั้น โดยชั้นในสุดของหลอดแก้วจะเป็นหลอดอาร์ค สามารถแสดงรายละเอียดได้ดัง Figure 1 ลักษณะทั่วไปของหลอดเมทัลฮาไลด์คล้ายกับหลอดไอปรอท ซึ่งหลอดอาร์ค

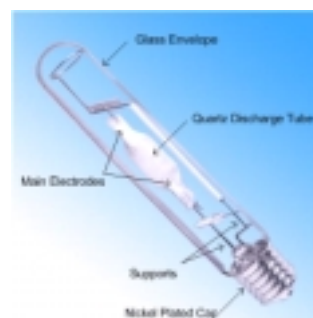


Figure 1. Metal Halide Lamp

(Arc Tube) ทำด้วยซิลิกาเหลวแต่มีขนาดเล็กกว่า หลอดอาร์คของหลอดเมทัลฮาไลด์ภายในจะบรรจุขั้วไฟฟ้า (Electrode) ที่ทำด้วยทั้งสแตนลิว ๆ ไม่นิยมเคลือบด้วยสารเร่งอิเล็กตรอน เนื่องจากสารนี้จะถูกทำลายเมื่อรวมกับฮาโลเจนภายในกระเปาะเองมีการเติมสารตระกูลฮาไลด์ (Halide) ลงไปได้แก่ Dysprosium, Thallium, Sodium, Scandium ที่นอกเหนือไปจาก Argon, Neon, Krypton, Sodium และหยดปรอท สารฮาไลด์ที่เติมเข้าไปทำให้ได้รับปริมาณแสงเพิ่มขึ้นเกือบเท่าตัวเมื่อเทียบกับหลอดไอปรอท และมีแสงสีสมดุลงันจนดูใกล้เคียงแสงอาทิตย์ ดังนั้นกระเปาะแก้วจึงไม่จำเป็นต้องเคลือบสารฟอสฟอรัส (phosphor) แต่อาจเคลือบเพื่อให้ได้แสงสีนุ่มนวลขึ้นเท่านั้น สถานที่ที่นิยมใช้หลอดเมทัลฮาไลด์ ได้แก่ การใช้ในสนามกีฬา การถ่ายทอดทางโทรทัศน์ สวนสาธารณะ ไฟสาธิตอาคาร ไฟป้ายโฆษณา เป็นต้น การติดตั้งหลอดต้องเป็นไปตามที่ผู้ผลิตกำหนดในเรื่องของตำแหน่งการติดตั้งและมุมของการจุดไส้หลอด เพื่อให้ได้ปริมาณแสงที่ต้องการ และมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน

1.1 หลักการทำงาน

หลอดเมทัลฮาไลด์มีหลักการทำงานเช่นเดียวกับหลอดไอปรอทเพียงแต่ต้องอาศัยตัวอิกเนเตอร์ช่วยในการจุดหลอด โดยไปกระตุ้นให้สารไอโอดีน (Iodide) กลายเป็นไอซึ่งมีคุณสมบัติเปล่งแสงออกมาได้หลายช่วงความยาวคลื่นสายตาเราจึงสามารถมองเห็นวัตถุได้ชัดเจน โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารฟอสฟอรัสเข้าช่วย ระยะเวลาที่ใช้ในการจุดและอุ่นไส้หลอดประมาณ 3 นาที จะต้องใช้เวลานานประมาณ 4-6 นาที เพื่อให้ได้แสงสว่างเต็มที่ เมื่อหลอดดับ (ร้อน) จะ

ต้องรอเวลาในการเริ่มจุดใหม่ (restart) ประมาณ 10-15 นาที โดยระยะเวลาต่างๆ เป็นไปตามข้อกำหนดของบริษัทผู้ผลิต

1.2 การกระจายแสงสี และพลังงานทางสเปกตรัม

หลอดเมทัลฮาไลด์นี้ให้แสงสีออกมากกระจายครอบคลุมความยาวคลื่นที่ตาเราสามารถมองเห็นได้ จึงได้แสงที่ใสกว่าหลอดแบบอื่น แต่สีอาจต่างกันบ้างทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของหลอด และสารไอโอดีนที่ใช้ Figure 2 A, B

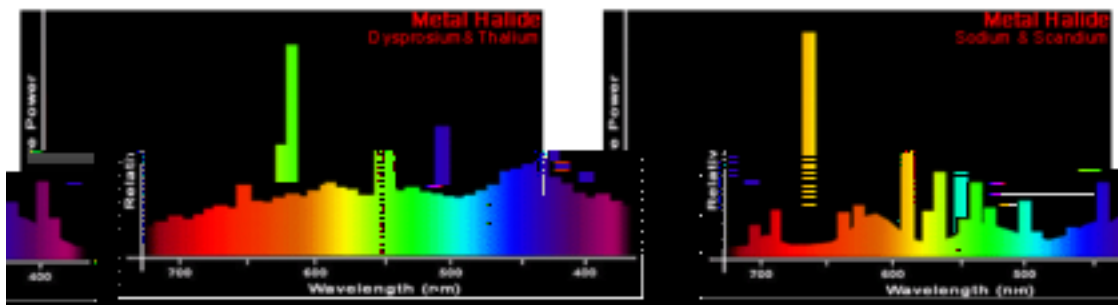
1.3 อายุการใช้งาน

หลอดเมทัลฮาไลด์มีอายุการใช้งานเฉลี่ยโดยปกติประมาณ 6,000-15,000 ชั่วโมง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดกำลังไฟฟ้าของหลอด และอุปกรณ์ประกอบในวงจร โดยคิดที่การเปิดใช้งาน 10 ชั่วโมง/ครั้งการใช้งาน โดยมีข้อแนะนำในการใช้งาน ดังนี้

- นิยมใช้แทนหลอดฟลูออเรสเซนต์กรณีที่ใช้กับเพดานสูง
- เหมาะสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป แสงสว่างในสนามกีฬา บริเวณที่ต้องการความถูกต้องของสี เช่น ห้างสรรพสินค้า ป้ายโฆษณา เป็นต้น
- ไม่เหมาะกับพื้นที่ที่ต้องการแสงสว่างที่จุดติดแบบทันทีทันใด

1.4 วงจรการทำงาน

โดยทั่วไปของหลอดเมทัลฮาไลด์ที่ใช้บัลลาสต์แกนเหล็กจะมีวงจรการทำงานดังแสดงใน Figure 3 A) ซึ่งมีตัวเก็บประจุ (C) เป็นตัวปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังให้กับวงจร และมีอิกเนเตอร์สำหรับสร้างพัลส์แรงดันสูงเพื่อช่วยในการจุดหลอด โดยคุณลักษณะของหลอดกับแรงดัน

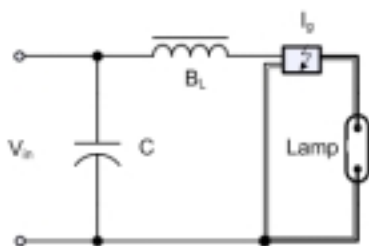


A) Spectral Output of Dysprosium & Thallium Iodide

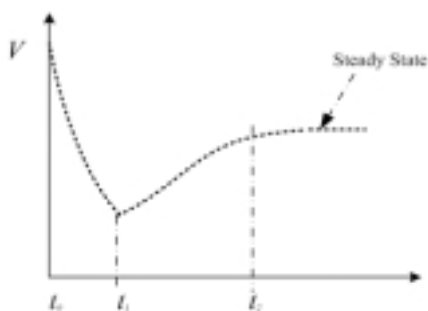
B) Spectral Output of Sodium & Scandium Iodide

Figure 2. Spectral Output of Metal Halide Lamp Iodide

(Color figure can be viewed in the electronic version)



A) Circuit of Iron core Ballast and Ignitor



B) Characteristic of Lamp Voltage

Figure 3. Metal Halide Lamp Circuit

ไฟฟ้าในตั้งแต่เริ่มจุดหลอดสามารถแสดงได้ดัง Figure 3B) โดยที่ก่อนเวลา t_0 หลอดยังไม่มีการจุดติดอิมพีแดนซ์ของหลอดมีค่าสูงมาก เมื่อต้องการให้หลอดจุดติดต้องไฟฟ้าแรงสูงพอที่จะจุดหลอดให้ติดได้ที่เวลา t_0 เมื่อหลอดจุดติดแล้วแรงดันไฟฟ้าที่หลอดจะลดลงอย่างรวดเร็วที่เวลา t_1 คือสภาวะที่อิมพีแดนซ์ อุณหภูมิ และกำลังไฟฟ้า ปรากฏที่หลอดมีค่าต่ำมาก เป็นช่วงเวลาในการอุ่นไส้หลอด หลังจากนั้นหลอดจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องแบบไม่เป็นเชิงเส้น อิมพีแดนซ์และกำลังไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นจนถึงเวลา t_2 จึงหยุดการเปลี่ยนแปลง และเข้าสู่สภาวะคงตัว (steady state) ที่พิกัดกำลังไฟฟ้าของหลอด

2. บัลลาสต์

หลอดเมทัลฮาไลด์นิยมใช้กับบัลลาสต์แกนเหล็กเป็นส่วนมากเนื่องจากมีราคาถูกและมีประสิทธิภาพต่ำ ในปัจจุบันได้เน้นถึงเรื่องของการประหยัดพลังงานมากขึ้น และความนิยมของการใช้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ (Cao and Hui, 2004; Dongyan et al., 2004; Fellows, 2003; Harry and Hoare, 2000; Mohan et al., 2003) ก็เริ่มมีมากขึ้น

จึงได้มีการวิจัยและพัฒนาบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับหลอดเมทัลฮาไลด์ขึ้นมาจำหน่ายในท้องตลาด ซึ่งสามารถแบ่งบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ตามลักษณะการทำงานได้ 2 ลักษณะคือ แบบภาคเดียว (Hung et al., 2005; Laskai et al., 1994) (Single stage) และแบบสองภาค (Chi-Hwan, 2002; Seung and Chi-Hwan, 2001) (Two stage)

บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ย่านความถี่ต่ำจะมีสัญญาณด้านออกเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Square wave) ย่านความถี่ต่ำ โดยที่ย่านความถี่นี้จะไม่เกิดปัญหาเรื่องอะคูสติกรีโซแนนซ์ (Park and Jong, 2001) (Acoustic resonance) ที่จะทำให้หลอดเสียหาย แต่บัลลาสต์จะมีขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก ถ้าเป็นบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ในย่านความถี่สูงจะมีสัญญาณด้านออกเป็นรูปคลื่นไซน์ (Sine wave) โดยที่ย่านความถี่สูงนี้จะเกิดปัญหาเรื่องของอะคูสติกรีโซแนนซ์กับหลอดอาร์คซึ่งจำเป็นต้องหลีกเลี่ยง แต่ข้อดีคือบัลลาสต์ที่ย่านความถี่สูงจะมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา สำหรับย่านความถี่สูงมาก ๆ จะไม่มีปัญหาเรื่องของอะคูสติกรีโซแนนซ์ แต่จะมีปัญหาของการสูญเสียในขณะสวิตซ์สูง และจะเกิดสัญญาณฮาร์โมนิกส์รบกวนได้มาก

2.1 อะคูสติกรีโซแนนซ์

การทำงานของหลอดประเภทนี้กับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์จะเกิดปัญหาในขณะที่หลอดทำงาน เนื่องจากที่ความถี่สูงทำให้เกิดอะคูสติกรีโซแนนซ์ (Acoustic Resonances) Figure 4 โดยจะมีผลเสียหายเกิดขึ้นกับหลอดอาร์ค และสามารถที่จะหาค่าความถี่อะคูสติกรีโซแนนซ์ (Park and Jong, 2001) ได้จากสมการพื้นฐาน Table 1

2.2 องค์ประกอบของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

ส่วนประกอบของวงจรบัลลาสต์แกนเหล็กสำหรับหลอดเมทัลฮาไลด์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันนี้ สามารถแบ่งส่วนประกอบออกเป็นส่วนต่างๆ ได้ ดังแสดงใน Figure 5

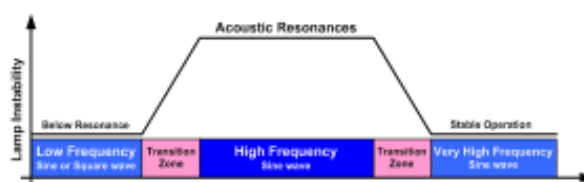


Figure 4. Acoustic Resonances Zone

Table 1. Acoustic Resonance Frequency of Metal Halide Lamp

Basic Acoustic Resonance Frequency	
Basic Longitudinal	$f_l = \frac{C}{2L}$
Basic Radial Frequency	$f_r = \frac{3.83C}{2\pi R}$
Basic Azimuthally Frequency	$f_a = \frac{1.84C}{2\pi R}$

* เมื่อ C คือ Velocity in Bulb, L คือ Arc Tube Length และ R คือ Cylindrical Bulb High



Figure 5. Block Diagram of Iron core Ballast



Figure 6. Block Diagram of Two Stage Electronic Ballast



Figure 7. Block Diagram of Single Stage Electronic Ballast

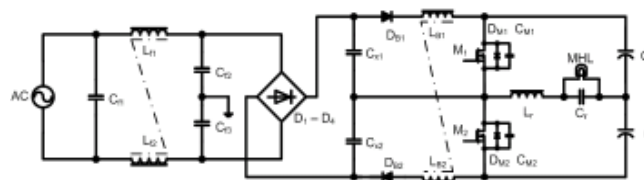


Figure 8. Single-Stage Electronic Ballast Prototype

เพื่อความสะดวกในการพิจารณารายละเอียดของการทำงานแต่ละภาค และเป็นต้นแบบของแนวความคิดต่อไป

จากแนวความคิดขององค์ประกอบจาก Figure 5 นำมาพิจารณาการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะการทำงานของวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ โดยแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ลักษณะคือ บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สองภาค (Two Stage Electronic Ballast) ดังแสดงใน Figure 6 โดยส่วนของการปรับปรุ่ค่าตัวประกอบกำลังจะแยกออกจากส่วนของการจ่ายโหลดอย่างชัดเจน สำหรับลักษณะของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์แบบภาคเดียว (Single Stage Electronic Ballast) ดังแสดงใน Figure 7 ส่วนของการปรับปรุ่ค่าตัวประกอบกำลังจะรวมอยู่ด้วยกันกับส่วนของการจ่ายโหลด

1. บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ภาคเดียว

บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์แบบภาคเดียวสำหรับหลอดเมทัลฮาไลด์ขนาด 400 วัตต์ ที่นำเสนอในบทความนี้ วงจรหลักที่นำมาใช้ในการพิจารณาออกแบบคือวงจรปรับปรุ่ค่าตัวประกอบกำลัง จะทำหน้าที่ในการปรับปรุ่ค่าตัวประกอบกำลังของวงจร และวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ทำหน้าที่เป็นวงจรบัลลาสต์ โดยทำหน้าที่ในการจ่ายพลังงานให้กับหลอด การออกแบบวงจรต้นแบบให้ใช้กับหลอดเมทัลฮาไลด์ยี่ห้อฟิลิปส์ รุ่น HPI-T Plus ขนาด 400 วัตต์บนพื้นฐานการทำงานที่มีค่าตัวประกอบกำลังสูง อุปกรณ์สวิตซ์ทำงานในโหมดแรงดันศูนย์ (ZVS) โดยมีรายละเอียดการทำงานดังต่อไปนี้

วงจรต้นแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ภาคเดียวที่นำเสนอใน Figure 8 ส่วนแรกจะเป็นส่วนของวงจรกรองสัญญาณด้านเข้า (EMI Filter) มีวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์เพื่อเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับจ่ายให้กับวงจร ส่วนของการปรับปรุ่ค่าตัวประกอบกำลัง และวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์จะ

ทำงานร่วมกันโดยมีอุปกรณ์สวิตช์ M_1 และ M_2 เป็นส่วนที่เชื่อมต่อของทั้งสองวงจร โดยส่วนของการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง อุปกรณ์สวิตช์ M_1 จะทำงานร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ L_{B1} และอุปกรณ์สวิตช์ M_2 จะทำงานร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ L_{B2} เพื่อทำหน้าที่ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีความต่อเนื่องเพื่อการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง ในขณะที่เดียวกันอุปกรณ์สวิตช์ M_1 และ M_2 ก็จะจ่ายพลังงานให้กับหลอดโดยการเปลี่ยนแหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม จ่ายให้กับวงจรเรโซแนนซ์ ทำให้กระแสที่หลอดมีสัญญาณใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่สูง โดยการสวิตช์ครั้งแรกส่วนของวงจรเรโซแนนซ์จะกำเนิดสัญญาณแรงดันสูง (High Voltage) เพื่อการจุดหลอดด้วย โดยการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์จะทำงานในลักษณะของสวิตช์แรงดันศูนย์ (ZVS) ส่วนของวงจรขั้วนำสวิตช์จะทำหน้าที่กำเนิดสัญญาณขับที่ความถี่สูงที่มีขนาดเหมาะสม โดยที่สัญญาณด้านออกที่หลอดจะมีรูปสัญญาณเป็นรูปคลื่นไซน์

การทำงานของวงจร

บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ภาคเดียวเครื่องต้นแบบที่นำเสนอนี้ ได้รับการออกแบบสำหรับระบบไฟฟ้าด้านเข้าเป็น

แรงดัน 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ด้านออกเป็นหลอดเมทัลฮาไลด์ยี่ห้อฟิลิปส์ รุ่น HPI-T Plus ที่พิกัดกำลังไฟฟ้า 400 วัตต์ จากวงจรต้นแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ออกแบบที่ 55 กิโลเฮิร์ตซ์ และวัฏจักรการทำงานที่ 50 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่าส่วนของวงจรปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังมีลักษณะการทำงานดังแสดงใน Figure 9 และส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์ดังแสดงใน Figure 11 ซึ่งวงจรทั้ง 2 ส่วนนี้มีอุปกรณ์ที่ทำงานร่วมกันคือ อุปกรณ์สวิตช์ตัวที่ 1 (M_1) อุปกรณ์สวิตช์ตัวที่ 2 (M_2)

ส่วนการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง

ลักษณะการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังสามารถแสดงใน Figure 9 และ 10 จะแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงแรกเป็นการทำงานของ L_{B1} กับ M_1 และช่วงที่ 2 เป็นการงานของ L_{B2} กับ M_2 โดยที่แหล่งจ่ายมีการแบ่งแรงดันไฟฟ้าออกเป็น 2 ส่วน ($V_{in}/2$) ด้วย C_{X1} กับ C_{X2}

- ที่เวลา $t_0 - t_1$ (Figure 9 A))

สวิตช์ M_1 ทำงาน และ M_2 หยุดทำงาน กระแสใน L_{B2} เริ่มการดิซชาร์จผ่านทาง D_{M1} ขณะเดียวกันกระแส

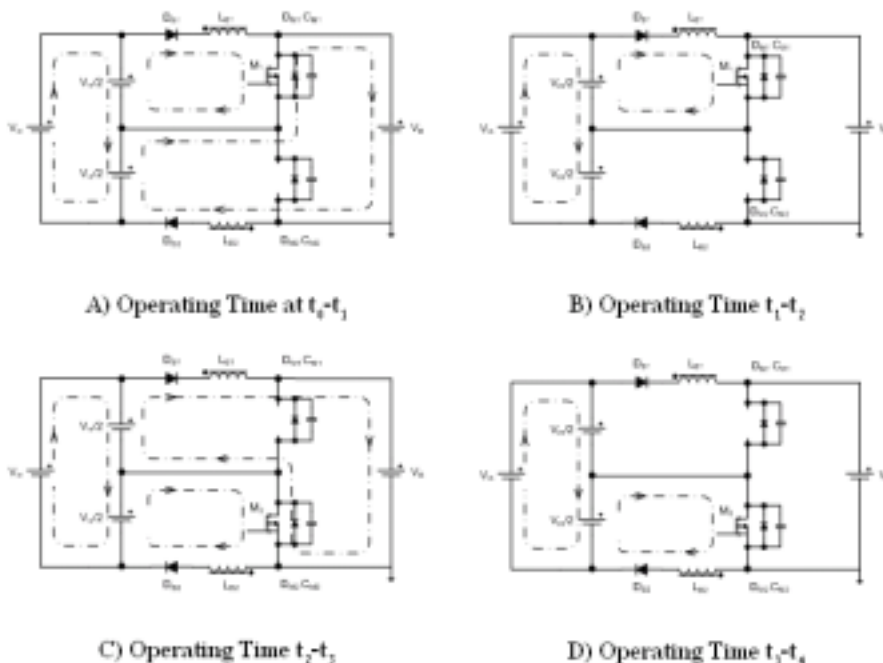


Figure 9. The Characteristic of Circuit Operating

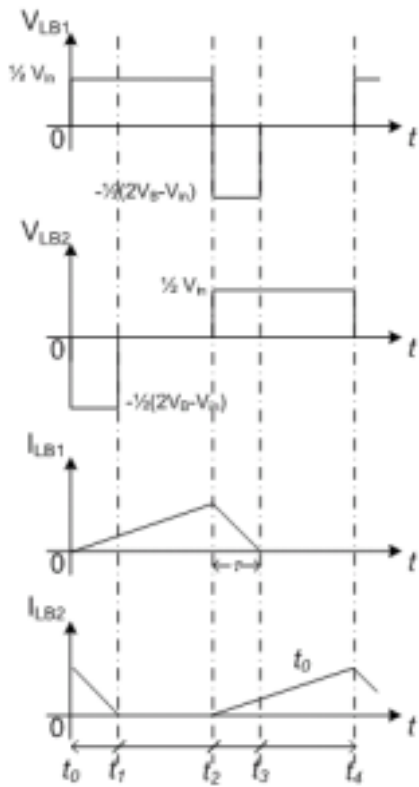


Figure 10. Power Factor Correction Operating Time

ที่สะสมใน L_{B1} เริ่มทำการชาร์จโดยคุณลักษณะของการบูตซ์ผ่าน D_{B1}

- ที่เวลา $t_1 - t_2$ (Figure 9 B))
สวิตซ์ M_1 ทำงาน และ M_2 หยุดทำงานเช่นเดิม แต่กระแสของ L_{B2} ชาร์จหมดแล้ว แต่กระแส L_{B1} ยังคงชาร์จอยู่เพื่อสะสมพลังงาน
- ที่เวลา $t_2 - t_3$ (Figure 9 C))
สวิตซ์ M_2 ทำงาน และ M_1 หยุดทำงาน กระแสใน L_{B1} เริ่มการดิสชาร์จผ่านทาง D_{M2} ขณะเดียวกันกระแสที่สะสมใน L_{B2} เริ่มทำการชาร์จโดยคุณลักษณะของการบูตซ์ผ่าน D_{B2}
- ที่เวลา $t_3 - t_4$ (Figure 9 D))
สวิตซ์ M_2 ทำงาน และ M_1 หยุดทำงานเช่นเดิม แต่กระแสของ L_{B1} ชาร์จหมดแล้ว แต่กระแส L_{B2} ยังคงชาร์จอยู่เพื่อสะสมพลังงานจนหมดคาบเวลา จึงเริ่มทำงานที่ t_0 ใหม่

3. ส่วนของวงจรบัลลาสต์

จาก Figure 11 A เป็นวงจร LCC เรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ที่ทำหน้าที่เป็นวงจรบัลลาสต์ประกอบด้วย L_r , C_r กับ C ซึ่งจะทำงานสัมพันธ์กับสวิตซ์ตัวที่ 1 (M_1) และสวิตซ์ตัวที่ 2 (M_2) ตามลำดับ (Mohan *et al.*, 2003) วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรมแบบแยกตัวเก็บประจุนี้ ดัดแปลงมาจากอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรมโดยการแบ่งตัวเก็บประจุเป็น 2 ตัว และทำการต่อโหลดความต้านทานขนานกับตัวเก็บประจุตัวหนึ่ง ซึ่งบางครั้งเราเรียกวงจรชนิดนี้ว่า วงจร LCC เรโซแนนซ์ ดัง Figure 11 B, C ในที่นี้ใช้ค่าความต้านทานแทนโหลดเนื่องจากในสภาวะคงตัวของการทำงาน (Steady state) โหลดจะเปรียบเสมือนกับค่าความต้านทานนั่นเอง ในวงจรแบบกึ่งบริดจ์จะใช้ตัวเก็บประจุค่าใหญ่เป็นตัวแบ่งแรงดันและพิจารณา C_r ร่วมกันกับ C เมื่อเปรียบเทียบกับวงจรสมมูลย์ของวงจรเรโซแนนซ์อนุกรม Figure 11 D จะเห็นว่ามีความคล้ายคลึงกัน เพียงแต่ความต้านทานโหลดต่อขนานกับ C แทนที่จะต่ออนุกรม การต่อความต้านทานโหลดเช่นนี้จะรักษาข้อดีของวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมคือสามารถลดวงจรโหลดได้โดยมีการจำกัดกระแส แต่ก็ยังสามารถควบคุมแรงดันด้านออกได้เมื่อโหลดเปิดวงจร

การหาค่าพารามิเตอร์ของวงจร

การหาค่าพารามิเตอร์ในวงจรมีสองส่วนคือ ส่วนของการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และส่วนของวงจรบัลลาสต์สามารถพิจารณาได้ดังนี้

1. ส่วนการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง

ส่วนของการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังนี้ พิจารณาจาก Figure 9 และ 10 สามารถหาค่ากระแสได้ดังนี้

$$I_p = \frac{1}{2} \frac{V_{in}}{L_B} \times \frac{1}{2} \times T_s \quad (1)$$

τ คือ ช่วงเวลาในการดิสชาร์จ

$$\tau = \frac{V_{in}}{2(2V_B - V_{in})} T_s \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{V_p}{2V_B} \quad (3)$$

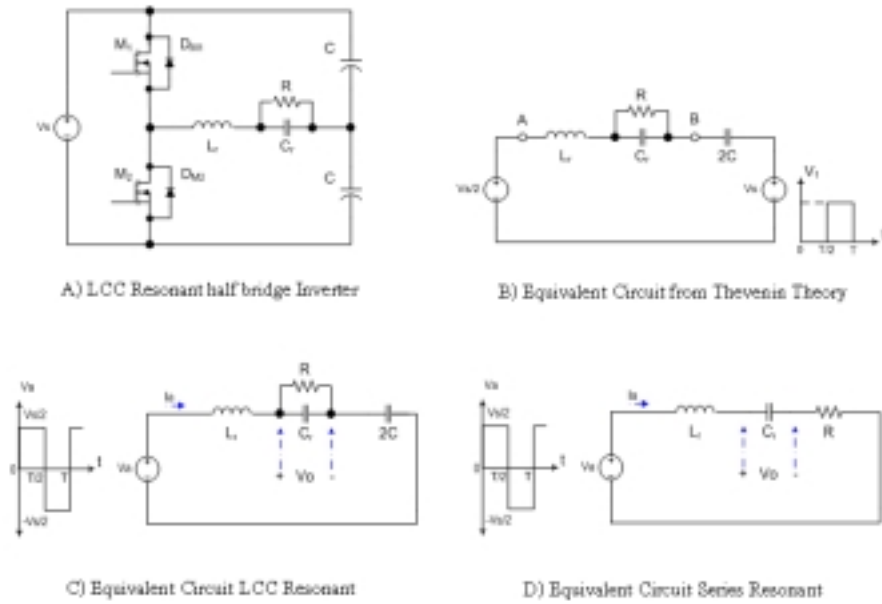


Figure 11. LCC Resonant half bridge Inverter

$$y = -\frac{2}{\alpha} - \frac{\pi}{\alpha^2} + \frac{2}{\alpha^2 \sqrt{1-\alpha^2}} \left[\frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left(\frac{-\alpha}{\sqrt{1-\alpha^2}} \right) \right] \quad (4)$$

$$C_T = \frac{C \cdot C_r}{C + C_r} \quad (7)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_r C_T}} \quad (8)$$

จากสมการที่ว่า $P_o = \eta \cdot P_{in}$ นั้น P_o แสดงประสิทธิภาพของการทำงาน เราจะสามารถหาค่าของขดลวดได้ดังสมการที่ (5)

$$L_B = \frac{\eta \cdot y \cdot T_s}{16\pi \cdot P_o} \times V_p^2 \quad (5)$$

ที่ $\omega_0 = \omega_r$ กระแส I_s ไหลผ่าน ตาม Figure 11 C) จะมีค่าสูงสุด แสดงในสมการที่ (9)

$$I_{a(max)} = \frac{2V_s R C_r^2 \omega_0^2}{\pi} \quad (9)$$

และแรงดันคร่อมโหลดที่มีค่าสูงสุด แสดงในสมการที่ (10)

$$V_{O(max)} = \frac{I_{O(max)}}{C_r \omega_0} \quad (10)$$

2. ส่วนของวงจรบัลลาสต์

สมมุติว่าค่า Q ของวงจรมีค่าสูง เราสามารถวิเคราะห์ค่าต่างๆ ได้ดังนี้

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_r C_T}} \quad (6)$$

เมื่อ $\omega_r = 2\pi f_r$

นั่นคือ f_r คือ ค่าที่ความถี่เรโซแนนซ์ และ C_T คือ ค่าคาปาซิเตอร์สมมูลย์ จะได้

ผลการทดลอง

คณะผู้วิจัยได้ทำการสร้างและทดสอบการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ภาคเดียวสำหรับหลอดเมทัลฮาไลด์ 400 วัตต์ โดยการพิจารณารายละเอียดและการวิเคราะห์ทางทฤษฎี สามารถกำหนดค่าอุปกรณ์สวิตช์และพารามิเตอร์ต่างๆ ในวงจรการทดลองทดสอบตามสมการ ดังต่อไปนี้

$L_r=90 \mu\text{H}$, $L_{B1}=L_{B2}=100 \mu\text{H}$, $L_r=80 \mu\text{H}$,
 $C_{f1}-C_{f3}=220 \text{ nF}$, $C_{x1}=C_{x2}=0.1 \mu\text{F}$, $C_{M1}=C_{M2}=1.5 \text{ nF}$,
 $C_r=100 \text{ nF}$, $C_1=C_2=660 \mu\text{F}$, $M_1=M_2=\text{IRFP460}$,
 $D_{1-4}=\text{MUR1560}$, $D_{B1}, D_{B2}=\text{MUR1560}$,

สามารถแสดงผลการทดลองโดยออสซิลโลสโคป ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DL1620 วัดรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้า (CH1) กระแสไฟฟ้า (CH2) และกำลังไฟฟ้า (M1) เนื่องจากสัญญาณแรงดันไฟฟ้ามี่แรงดันไฟฟ้าสูงในช่วง เพื่อความปลอดภัยจึงต้องวัดด้วย Differential Probe แยกกราวด์ มีอัตราส่วนเป็น 1:2 สามารถแสดงผลการทดลองและทดสอบได้ดัง Figure 12-16 และทำการวิเคราะห์หาค่ากำลังไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดวิเคราะห์หาค่ากำลังไฟฟ้า ยี่ห้อ FLUKE รุ่น 43B ดัง Figure 17 และ 18

จาก Figure 12

ขนาดแรงดันไฟฟ้าจุดหลอดมีค่า
 $= 310.417 \times 2 = 620.834 \text{ โวลต์}$

จาก Figure 13

ค่าแรงดันไฟฟ้าด้านเข้ามีค่า
 $= 110.148 \times 2 = 220.296 \text{ โวลต์}$
 กำลังไฟฟ้าด้านเข้ามีค่า
 $= 257.47 \times 2 = 514.94 \text{ วัตต์}$

จาก Figure 14

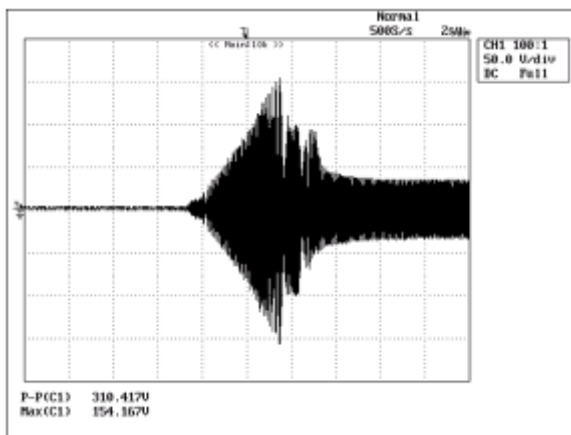


Figure 12. High Voltage Ignited Lamp

ค่าแรงดันไฟฟ้าด้านออกมีค่า
 $= 63.563 \times 2 = 127.126 \text{ โวลต์}$
 กำลังไฟฟ้าด้านออกมีค่า
 $= 200.27 \times 2 = 400.54 \text{ วัตต์}$

จาก Figure 16

ค่า Current crest factor ที่หลอดมีค่า
 $= \frac{I_{max}}{I_{rms}} = \frac{4.75}{3.17} = 1.498$

Table 2 แสดงผลเปรียบเทียบผลการทดลองด้านเข้า (Input) กับด้านออก (Output) ใช้ออสซิลโลสโคปเป็นตัว

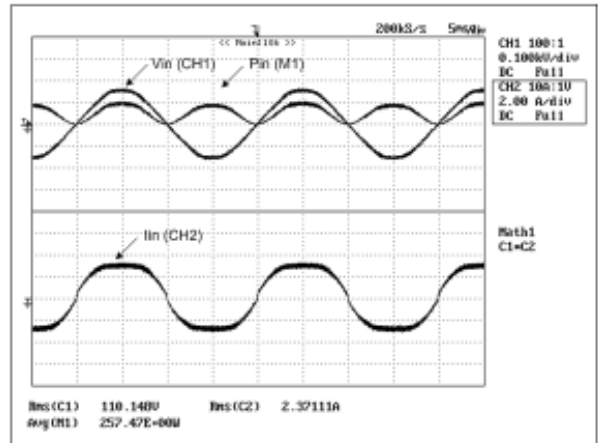


Figure 13. Input voltage, current and power

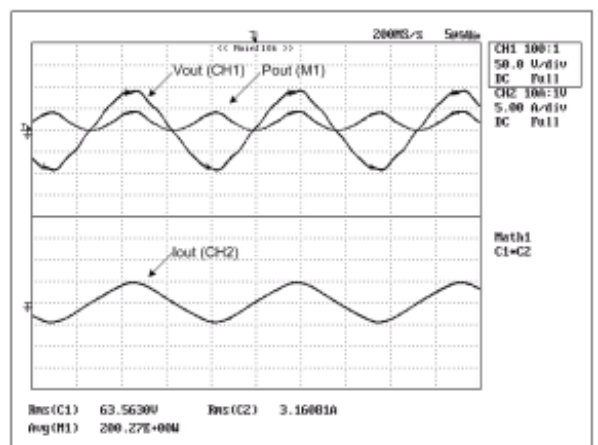


Figure 14. Output voltage, current and power

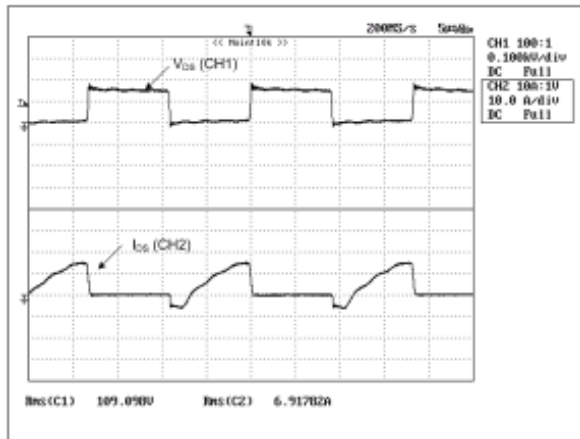


Figure 15. Voltage and Current of Active switch

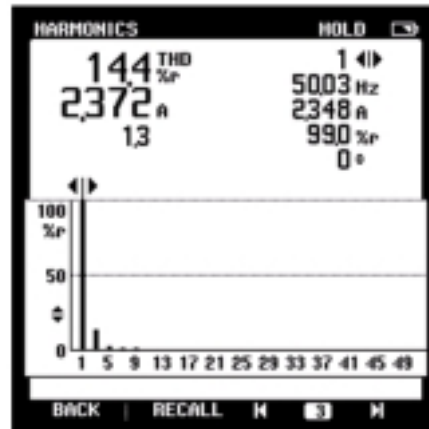


Figure 18. Total Current Harmonic Distortion of Input Current

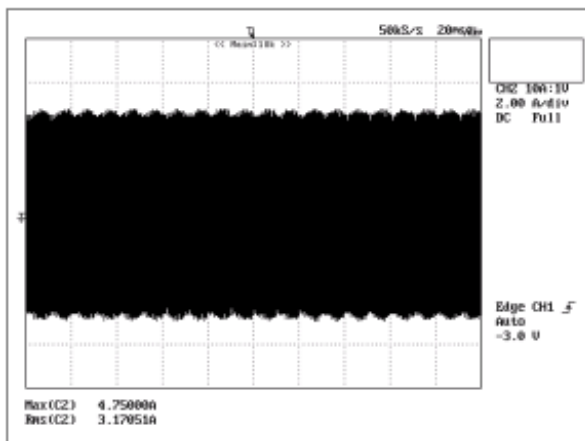


Figure 16. Current crest factor

Table 2. Data Test from Prototype Single-Stage Electronic Ballast

Data	Input	Output
Voltage (V.)	220.29	127.12
Current (A.)	2.37	3.16
Power (W.)	514.94	400.54
Crest Factor		1.49
Total Harmonic distortion (%)	14.40	
Power factor	0.99	
Efficiency (%)		77.78

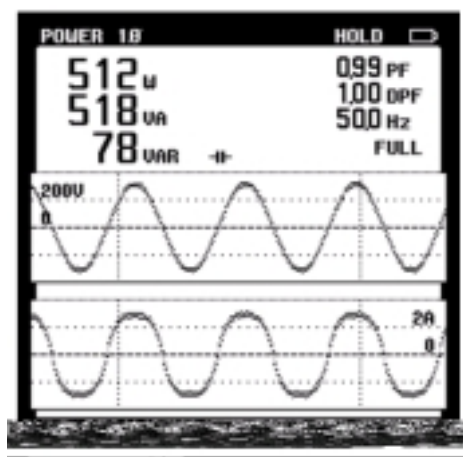


Figure 17. Input power factor

วัดค่าเพื่อเปรียบเทียบผล เนื่องจากว่าเป็นเครื่องมือวัดตัวเดียวกันที่สามารถวัดค่าได้ทั้งความถี่ต่ำ (ด้านเข้า) และความถี่สูง (ด้านออก) ซึ่งผลของเครื่องวัดวิเคราะห์คุณภาพกำลังไฟฟ้าสามารถวัดค่าเฉพาะที่ค่าความถี่ต่ำเท่านั้น

สรุปผล

บทความนี้นำเสนอบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ภาคเดียวสำหรับหลอดเมทัลฮาไลด์ ซึ่งวงจรต้นแบบได้ทดสอบกับหลอดเมทัลฮาไลด์ยี่ห้อฟิลิปส์ HPI-T Plus ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า 400 วัตต์ จากผลการทดลอง Figure 12-18 และ Table 2 จะเห็นได้ว่าวงจรต้นแบบที่นำเสนอนี้ได้ค่าตัวประกอบกำลังสูงถึง 0.99 ค่าแอสเพคเตอร์ของกระแสหลอด

1.49 และค่าฮาร์มอนิกส์ของกระแสด้านเข้า 14.40% ซึ่งผลที่ได้เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 61000-3-2 Class C และ มอก.1506-2541

เนื่องจากวงจรบัลลาสต์ที่นำเสนอนี้มีการทำงานแบบภาคเดี่ยว (Single-stage) ทำให้อุปกรณ์สวิตช์ที่ใช้มีจำนวนน้อยกว่าแบบสองภาค (Two-stage) ส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตต่ำ ซึ่งสามารถนำแนวคิดนี้ไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถใช้งานได้จริงในเชิงอุตสาหกรรมเพื่อลดการนำเข้าจากต่างประเทศได้

เอกสารอ้างอิง

- Cao, S.Y.R., Hui, F. 2004. Reliability Improvement of High Frequency Electronics Ballasts for Metal Halide Lamp, Proceedings of the 2004 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Anaheim, California, USA, pp. 997-1002.
- Chi-Hwan, L. 2002. Electronic Ballast for 400 W Metal Halide Lamp, China Light & Lighting, Korea, pp. 1-5
- Dongyan, Z., Weiping, Z., Yuanchao, L. and Xuesun, Z. 2004. Design of LCC Resonant Inverter for Metal Halide Lamp Ballast, Power Electronics and Motion control Conference, pp. 1558-1562
- Fellows, M.W. 2003. A Study of the High Intensity Discharge Lamp Electronics Ballast Interface, HID Lamp IEEE Transactions on Industrial Electronics., pp. 1043-1048
- Harry, J.E. and Hoare, D.W. 2000. Electronic Power Supplies for High-Intensity discharge Lamps, Engineering Science and Education Journal, October, 2000.
- Hung, J.C., Wu, T.F., Lai, Y.S. and Chen, Y.M. 2005. A Single-Stage Fast Regulator with PFC Based on an Asymmetrical Half-Bridge Topology. IEEE Transactions on Industrial Electronics Vol. 52. No. 1, 139-150
- Jianqiang, W., Dianguo, X. and Hua, Y. 2003. Practical Design Considerations of LCC Resonant Inverter for Metal Halide Electronic Ballasts, ICIT 2003, Maribor, Slovenia, pp. 1043-1048
- Laskai, L., Enjeti, P. and Pitel, I.J. 1994. A unity power factor electronic ballast for metal halide lamps, IEEE Transactions on Industrial Power Electronics, pp. 31-37
- Littlefair, M. Richardson, J. and Rakowski, R.T. 2001. Resonant Power Supply for Discharge Lamps, conference Publication, Brunel University, UK, pp. 63-68
- Park, J.Y. and Jung, D.Y. 2001. Electronic Ballast with Constant Power Output Controller for 250W MHD Lamp, IEEE International Symposium on, 46-51.
- Seung H. L. and Chi-Hwan, L. 2001. Resonance type Electronics ballast for MHL 400 W, Research Institute of Industrial Science & Technology, Korea, 62-69
- Mohan, Undeland, Robbins. 2003. Power Electronics. John wiley & Sons. inc. 2003.