

การออกแบบและวิเคราะห์บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับหลอดโซเดียมความดันสูง 250 วัตต์ โดยใช้วงจรจุดหลอดภายในแบบ LCC ที่มีการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่หลอดให้คงที่

Design and Analysis of an Electronic Ballast for a 250-W High Pressure Sodium Lamp using LCC Internal Ignition with Constant Lamp Power Control

พูนศรี วรรณการ¹ ภูธร พงษ์ไทย² และ วิจิตร กิมเรศ³

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร (ศูนย์พระนครเหนือ)

1381 ถ.พินุลสงคราม แขวงบางซื่อ เขตบางซื่อ กทม. 10800 โทรศัพท์: 0-2913-2424 E-mail: v_poonsri555@yahoo.com

²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3 หมู่ 2 ถ.ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 105200 โทรศัพท์: 0-2326-4550 E-mail: kkwijit@kmit.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับหลอดโซเดียมความดันสูง 250 วัตต์ โดยใช้วงจรจุดหลอดภายในแบบ LCC ที่มีการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่หลอดให้คงที่ซึ่งภายในประกอบไปด้วย วงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ที่นำมาใช้ในการแก้ไขค่าตัวประกอบกำลัง และวงจรอินเวอร์เตอร์คลาสดีที่ป้อนพลังงานให้กับหลอดไฟ นอกจากนี้ยังสามารถปรับความเข้มแสงได้ในช่วงกว้างระดับหนึ่ง จุดประสงค์หลักของงานวิจัยนี้เน้นที่การออกแบบและวิเคราะห์การจุดไส้หลอด HPS ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้วงจรจุดหลอดภายใน แบบ LCC โดยใช้หลักการเรโซแนนซ์ร่วมในการวิเคราะห์ และการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่หลอดให้คงที่ทำให้การทำงานของระบบมีเสถียรภาพ จากหลักการที่ได้นำเสนอนี้จะต่อการออกแบบและสามารถนำไปใช้งานได้จริง ในตอนที่ท้ายของบทความนี้ยังได้นำเสนอการสร้างเครื่องต้นแบบและทดสอบการทำงานต่าง ๆ ซึ่งให้ผลเป็นที่น่าพอใจ

คำสำคัญ: บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์, หลอดโซเดียมความดันสูง

Abstract

This paper proposes the design and construction of an electronic ballast for a 250-W high sodium lamp, using LCC internal ignition with constant power control. The system consists of a power factor correction-boost converter and a class-D inverter supplying energy to the lamp. Additionally, this technique offers light intensity dimability for a certain range. The aim of the research is to design and analyze the start-up for HPS, using a LCC resonant circuit combined with constant power control of the lamp resulting in an operation stability. The proposed technique provides simplicity of the design and the prototype can operate successfully. In the final part, the prototype

has been constructed and tested under various operating conditions.

The test results appear satisfactory.

Keywords: Electronic ballast, High pressure sodium lamp

1. บทนำ

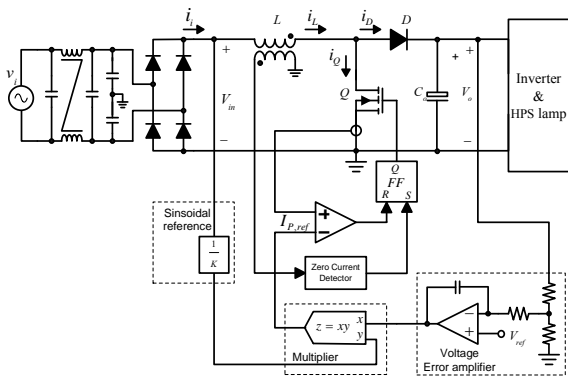
ปัจจุบันมีการนำหลอดโซเดียมความดันสูง (High Pressure Sodium Lamp) ประยุกต์ใช้งานส่องสว่างอย่างแพร่หลาย เนื่องจากให้ประสิทธิภาพในการส่องสว่างสูง องค์ประกอบในการให้แสงสว่างของหลอดไฟชนิดนี้ประกอบไปด้วยหลอดไฟ, บัลลาสต์และอิเล็กทรอนิกส์ ในส่วนของบัลลาสต์ที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบันคือบัลลาสต์แกนเหล็ก (Magnetic Ballast) แต่จากการศึกษาการทำงานของบัลลาสต์แกนเหล็กพบว่าก่อให้เกิดการสูญเสียพลังงานทางไฟฟ้าจำนวนมากรวมทั้งค่าตัวประกอบกำลังต่ำ (ประมาณ 0.4-0.6) จากปัญหาข้างต้นแนวทางที่จะลดการสูญเสียต่างๆ โดยการนำบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์มาพัฒนาเพื่อใช้งานร่วมกับหลอดไฟแทนบัลลาสต์แกนเหล็ก เมื่อพิจารณาในส่วนของหลอดโซเดียมความดันสูง ตัวอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งเป็นอุปกรณ์ต่อร่วมจากภายนอกจะสร้างแรงดันสูงประมาณ 2,000 ถึง 4,000 โวลต์ เพื่อใช้ในการจุดหลอดจากงานวิจัยที่ผ่านมา[1] ส่วนใหญ่จะใช้วงจรจุดหลอดแบบภายนอก (External Ignitor) ซึ่งในการทดสอบพบว่าวงจรจุดแบบนี้มีข้อด้อยหลายประการ เช่น มีความยุ่งยาก รวมทั้งโครงสร้างที่ใหญ่

ดังนั้นในบทความนี้จึงได้นำเสนอการออกแบบวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจะเน้นในส่วนของการจุดหลอดภายในแบบ LCC เป็นผลให้วงจรมีขนาดเล็กและได้มีการนำเทคนิคการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่หลอดให้คงที่ ทำให้สมรรถนะรวมทั้งประสิทธิภาพของระบบโดยรวมดีขึ้นและมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

ภายในบทความกล่าวถึงวิธีการออกแบบวงจรที่ง่าย เหมาะสมที่จะนำไปพัฒนาใช้งาน ได้จริง

2. วงจรแก้ไขค่าตัวประกอบกำลัง

สัญญาณรูปคลื่นที่ออกจากวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ ไดโอดพร้อมด้วยตัวเก็บประจุโดยทั่วไปนั้น พบว่าจะมีค่าตัวประกอบกำลังที่ต่ำรวมทั้งค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของสัญญาณกระแสด้านอินพุตมีค่าสูง ดังนั้นจึงได้นำวงจรมอเตอร์ไดรฟ์มาช่วยในการแก้ไขค่าตัวประกอบกำลังและวงจรมอเตอร์ไดรฟ์ (EMI filter) ช่วยลดค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของสัญญาณกระแสด้านอินพุต

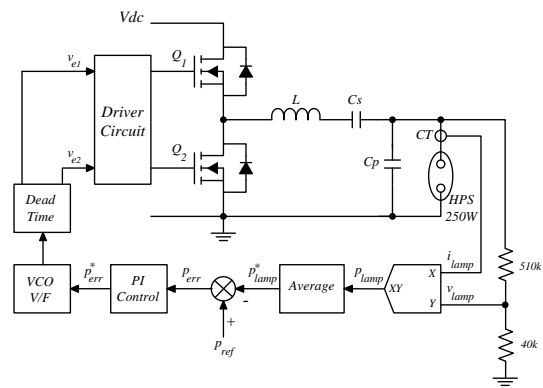


รูปที่ 1 วงจรมอเตอร์ไดรฟ์ที่ใช้ในการแก้ไขค่าตัวประกอบกำลัง

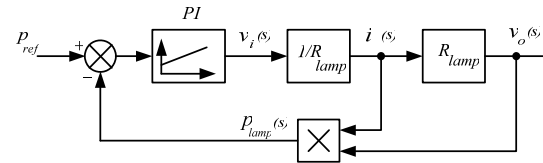
ลักษณะของวงจรมอเตอร์ไดรฟ์ที่แสดงในรูปที่ 1 ประกอบไปด้วยภาควงจรถูกกำลังและภาควงจรมอเตอร์ไดรฟ์ในส่วนของวงจรมอเตอร์ไดรฟ์ใช้เทคนิคการควบคุมแบบเส้นแบ่งเขต (Border line Control) หลักการทำงานของวงจรควบคุมวิธีนี้คือ เริ่มจากการควบคุมไฟฟ้าด้านออกโดยการป้อนแรงดันไฟฟ้าด้านออกกลับมายังวงจรมอเตอร์ไดรฟ์ความผิดพลาดแรงดัน (Voltage error amplifier) ซึ่งแรงดันที่ถูกป้อนกลับมานี้จะถูกลดระดับลงเพื่อเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิงที่กำหนดไว้ ผลต่างของแรงดันทั้งสองจะถูกขยายสัญญาณส่งไปยังวงจรมอเตอร์ไดรฟ์ (Multiplier) ทำการคูณกับสัญญาณไซน์อ้างอิง (Sinsoidal Reference) เพื่อไปกำหนดค่าของกระแสอ้างอิง ($I_{p,ref}$) ซึ่งจะเป็นตัวบังคับการดึงกระแสไฟฟ้าด้านเข้าให้เพียงพอที่จะจ่ายให้กับโหลดเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าด้านออกให้มีค่าคงที่ จากนั้นกระแสอ้างอิง ($I_{p,ref}$) จะถูกส่งไปยังวงจรมอเตอร์ไดรฟ์สัญญาณกระแส (Current Comparator) เพื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสป้อนกลับ (Current sense) จากนั้นจะส่งไปยังวงจรมอเตอร์ไดรฟ์สัญญาณขับเคลื่อน ในขณะที่เดียวกันตัวเหนี่ยวนำควบคุมกระแส i_L จ่ายพลังงานไปให้กับโหลดจนกระทั่งกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำมีค่าเป็นศูนย์แรงดันที่ตัวเหนี่ยวนำจะลดลงเร็วกว่าแรงดันด้านแหล่งจ่ายจากวงจรป้องกันกระแสศูนย์ (Zero current detector) จะจับสัญญาณให้มอเตอร์ไดรฟ์เริ่มทำงานใหม่และกลับสู่สภาวะเดิม

ในการออกแบบในส่วนของวงจรมอเตอร์ไดรฟ์ที่ใช้ในการแก้ไขค่าตัวประกอบกำลัง เมื่อต้องการควบคุมแรงดันด้านออก (V_o) ที่ 360 โวลต์ จากการคำนวณเลือกค่าตัวเหนี่ยวนำที่ $250 \mu H$, $C_o = 100 \mu F$ และใช้ไอซีสำเร็จเบอร์ L6561

3. วงจรอินเวอร์เตอร์แบบคลาสสิกที่มีการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่โหลดให้คงที่



(ก) วงจรถูกกำลังและวงจรมอเตอร์ไดรฟ์



(ข) ระบบควบคุมแบบลูปปิด

รูปที่ 2 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบคลาสสิกที่มีการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่โหลดให้คงที่

จากที่กล่าวมาแล้วว่าโหลดของบัลลาสต์คือหลอดท่อนิกซ์นี่จะเป็นวงจรโหลดเรโซแนนซ์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วงจรมอเตอร์ไดรฟ์แบบคลาสสิก เนื่องจากโครงสร้างของวงจรมอเตอร์ไดรฟ์ที่ง่ายมีหลักการการทำงานในช่วงปานกลางเพียงพอสำหรับการจ่ายพลังงานไปยังโหลดลักษณะวงจรมอเตอร์ไดรฟ์แสดงในรูปที่ 2(ก) ซึ่งการทำงานของวงจรมอเตอร์ไดรฟ์คือ สวิตช์ MOSFET Q_1 และสวิตช์ MOSFET Q_2 ทำงานสลับกันเพื่อแปลงไฟกระแสตรงให้เป็นไฟกระแสสลับความถี่สูง ส่วนวงจรมอเตอร์ไดรฟ์จะใช้เทคนิคการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่โหลดให้คงที่ โดยการตรวจจับแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมโหลด (v_{lamp}) ทำการคูณกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหลด (i_{lamp}) จะได้กำลังไฟฟ้าที่โหลด (P_{lamp}) นำสัญญาณที่ได้ทำการเปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้าอ้างอิง (P_{ref}) จากนั้นนำค่าผิดพลาด (e) ไปผ่านตัวควบคุมแบบลูปปิดซึ่งจะทำการชดเชยค่าผิดพลาดของระบบ จากนั้นสัญญาณจะส่งไปยังวงจรมอเตอร์ไดรฟ์สัญญาณควบคุมสวิตช์เพื่อนำไปขับเกตสวิตช์ MOSFET วงจรมอเตอร์ไดรฟ์แบบคลาสสิกต่อไป

4. วงจรจุดหลอดภายในแบบ LCC

ในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้วงจรจุดหลอดภายในแบบ LCC โดยใช้ทฤษฎีหลักการเรโซแนนซ์คือ ที่ความถี่เรโซแนนซ์ซึ่งทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรมีค่าเท่ากับค่าความต้านทานพอดีกว่าคือ ทำให้ค่า $X_L = X_C$ ณ. จุดนี้จะให้ค่ากระแสที่ไหลผ่านวงจรมากที่สุดและให้กำลังงานกับวงจรมากที่สุด จากการทดสอบวงจรจุดหลอดแบบ LCC พบว่าใช้จุดหลอดได้จริง กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านหลอดในช่วงเวลาขณะอุ่นไส้หลอดไฟมีค่าไม่สูงมาก เป็นผลให้การทำงานในวงจรภาคอินเวอร์เตอร์มีความนุ่มนวลมากขึ้น ในส่วนการวิเคราะห์ห้วงจรจุดหลอดจะพิจารณา 2 สภาวะ คือกรณีที่ไม่คิดค่าอิมพีแดนซ์ของหลอดไฟมีค่าสูงมาก ส่วนตัวเก็บประจุ C_p ที่ขนานกับหลอดไฟจะทำหน้าที่ช่วยในการจุดหลอด[3] จนกระทั่งเมื่อหลอดติดแล้วกระแสไฟฟ้าไหลครบวงจรค่าอิมพีแดนซ์ของหลอดไฟจะลดลง ในการออกแบบวงจรจุดหลอดภายในแบบ LCC ต้องทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างเรโซแนนซ์แบบอนุกรมและแบบขนาน โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ หาได้จากสมการ

$$C_e = \frac{C_s \cdot C_p}{C_s + C_p} \quad (1)$$

$$C_e = \frac{1}{L \cdot (2\pi f)^2} \quad (2)$$

$$L = \frac{1}{C_e \cdot (2\pi f)^2} \quad (3)$$

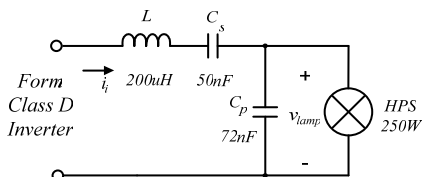
$$C_p = \frac{i_{lamp}}{V_{lamp} \cdot 2\pi \cdot f} \quad (4)$$

เลือกค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่ 65 kHz จะได้

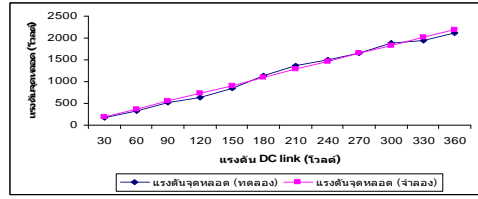
ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรจุดหลอดภายในแบบ LCC

L	C _s	C _p
200 μH	50 nF	72 nF

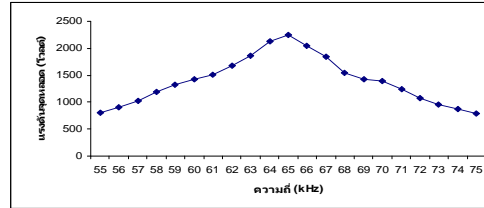
จากนั้นนำค่าที่ได้จากการออกแบบในตารางที่ 1 จำลองด้วยโปรแกรม PSpice จากรูปที่ 4 เป็นการทดลองหาแรงดันที่ใช้ในการจุดหลอดโดยการปรับเปลี่ยนแรงดัน DC link จากพิกัด 30 ถึง 360 โวลต์ จากกราฟการจำลองและจากการทดสอบ จะเห็นได้ว่าแรงดันจุดหลอดมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน ส่วนในรูปที่ 5 เป็นการทดสอบปรับความถี่ข้างเคียงความถี่เรโซแนนซ์ โดยที่งานวิจัยนี้เลือกความถี่เรโซแนนซ์ที่ 65 kHz จากกราฟจะเห็นว่าช่วงความถี่ 64 ถึง 66 kHz ให้แรงดันในการจุดหลอดสูงประมาณ 2,000 โวลต์ มากเพียงพอที่จะทำให้หลอดติดได้ และในรูปที่ 6 แสดงกราฟค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยเมื่อปรับเปลี่ยนความถี่ โดยการปรับความถี่ในช่วง 60 ถึง 70 kHz จะทำให้หลอดไฟมีแสงสว่างลดลงได้



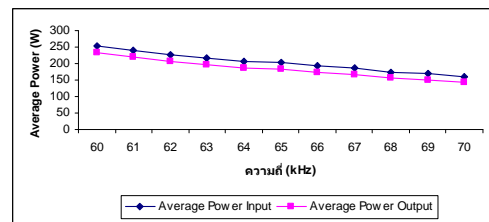
รูปที่ 3 วงจรจุดหลอดภายในแบบ LCC ที่ออกแบบ



รูปที่ 4 กราฟเปรียบเทียบแรงดันที่ใช้ในการจุดหลอด



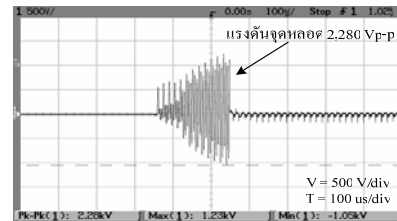
รูปที่ 5 กราฟการทดสอบความถี่ข้างเคียงความถี่เรโซแนนซ์



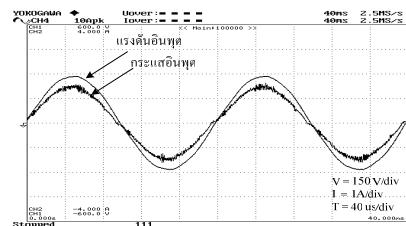
รูปที่ 6 กราฟค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยเมื่อทำการปรับเปลี่ยนความถี่

5. การทดสอบและผลการทดสอบ

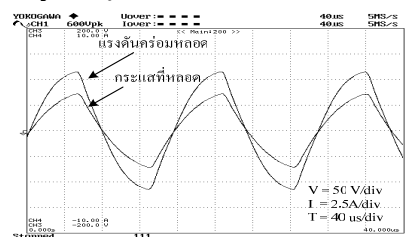
ในหัวข้อนี้จะเป็นการทดสอบหาต่อังค์ประกอบทางไฟฟ้าและทางแสงของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ต้นแบบ พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลการทดสอบกับบัลลาสต์ชนิดแกนเหล็ก



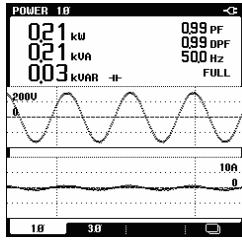
รูปที่ 7 รูปคลื่นแรงดันจุดหลอด



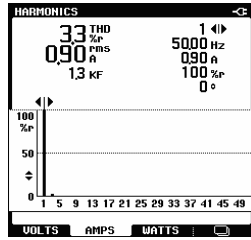
รูปที่ 8 รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านอินพุต



รูปที่ 9 รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่หลอดไฟ



(ก) ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์



(ข) ค่า THDi (%)

รูปที่ 10 ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์และค่า THDi (%)



รูปที่ 11 การทดสอบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ต้นแบบสำหรับหลอดโซเดียมความดันสูง 250 วัตต์

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์กับบัลลาสต์ชนิดแกนเหล็ก

การวัดค่าองค์ประกอบต่าง ๆ	บัลลาสต์แกนเหล็ก	บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์
แรงดันจุดหลอด (โวลต์)	3,160	2,280
แรงดันอินพุต (โวลต์)	220.58	220.73
กระแสอินพุต (แอมป์)	2.683	0.921
กำลังไฟฟ้าอินพุต (วัตต์)	229.6	202
แรงดันคร่อมหลอด (โวลต์)	82.8	78.93
กระแสที่หลอด (แอมป์)	2.681	2.312
กำลังไฟฟ้าที่หลอด (วัตต์)	189	182.1
ค่า THDi (%)	7.2	3.3
ค่า Power Factor	0.42	0.99
ค่า Power Loss (%)	17.60 %	9.80 %
ค่า Power Efficiency (%)	82.31 %	90.14 %
ค่า Luminous Flux (lm)	23,070	23,178
ค่า Luminous Effic. (lm/W)	100.47	114.74

6. สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ต้นแบบในส่วนวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์แก้ไขค่าตัวประกอบกำลังจะเห็นได้ว่าค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์สูงถึง 0.99 มีค่าใกล้เคียงหนึ่ง ค่า THDi อยู่ที่ 3.3% ในส่วนของวงจรจุดหลอดภายในแบบ LCC สร้างแรงดันในการจุดหลอดประมาณ 2,200 โวลต์ สามารถที่จะจุดหลอดโซเดียมความดันสูงได้จริงเหมาะสมที่จะนำมาพัฒนา จากข้อมูลผลการทดสอบโดยรวมในตารางที่ 2 เห็นได้ว่า

บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ประหยัดพลังงานมากกว่าบัลลาสต์แกนเหล็กถึง 12.02 % โดยที่ปริมาณค่าฟลักซ์ส่องสว่างมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นสามารถที่จะสรุปได้ว่าบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ต้นแบบที่ได้นำเสนอ มีสมรรถนะโดยรวมของระบบสูงกว่าบัลลาสต์แบบแกนเหล็กที่ใช้ในงานตามท้องตลาดทั่วไปเหมาะที่จะนำมาประยุกต์ใช้งานแทนกันได้ นอกจากนี้ยังสามารถหรี่แสงได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Yang Hua, Xu Dianguo, Lang Yongqiang, "Analysis and Design of A Novel Start Circuit for HID Electronic Ballast" IEEE Trans.Power Electronics., ICIEA 1st 2006, pp. 1-4, May 2006
- [2] Zhang Weiqiang, Xu Dianguo, "Novel constant power control of electronic ballast for HPS lamps" IEEE Trans.Power Electronics., ICIT 2nd 2002, Vol.1, pp. 129-132, Dec. 2002.
- [3] C. Branas, F.J. Azcondo, S. Bracho, "Experimental study of HPS lamp ignition by using LC network resonance", IEEE Trans. Power Electronics., IECON 28th 2002 , pp. 473-478, Nov. 2002.



พูนศรี วรรณการ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และปริญญาโทสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบัน

เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทำงานวิจัยด้านเครื่องกลไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์กำลัง และการขับเคลื่อนไฟฟ้า



ภูธร พงษ์ไทย สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมการวัดคุมและ ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง งานวิจัยที่สนใจบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับหลอด HID lamps



วิจิตร ภิณเรศ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี(เกียรตินิยม)และปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปริญญาเอก University

of Nottingham, UK. ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทำงานวิจัยด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังและการขับเคลื่อนไฟฟ้า