

ศึกษาและการออกแบบวงจรบัลลาสต์แบบอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อการประหยัดพลังงานไฟฟ้าสำหรับการส่องสว่าง Investigation and Designing of an Electronic Ballast for Electrical Energy Saving in Lighting System

วิบูลย์ ชื่นแขก¹ และ สมานมิตร อยู่สุขสวัสดิ์²

บทคัดย่อ

ปัจจุบันได้มีการนำบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์มาใช้งานร่วมกับหลอดฟลูออเรสเซนต์ในระบบไฟฟ้าแสงสว่างมากขึ้น เนื่องจาก คุณสมบัติที่ดีกว่าหลายประการเมื่อเทียบกับบัลลาสต์แบบขดลวด แต่จากการศึกษาในเบื้องต้นพบว่า บัลลาสต์ที่มีอยู่ในประเทศ ส่วนใหญ่ผลิตโดยไม่ได้คำนึงถึงมาตรฐานและไม่เข้าใจถึงหลักการและแนวคิดในการออกแบบ งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงลำดับ แนวคิด ความเป็นมา และลักษณะขั้นตอนของการพัฒนางานวิจัยสำหรับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ และแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของวงจรกับค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่ได้ ซึ่งเป็นที่มาในการกำหนดมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ที่เป็นบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์และที่เกี่ยวข้อง สุดท้ายงานวิจัยนี้นำเสนอถึงขั้นตอนวิธีการวิเคราะห์และออกแบบวงจรสำหรับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อให้ได้คุณลักษณะทางไฟฟ้าที่สำคัญของวงจรซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกำหนดไว้แล้วทำการสร้างวงจรต้นแบบเพื่อทำการทดสอบ ผลการทดสอบที่ได้แสดงถึงการวิเคราะห์และออกแบบที่ถูกต้อง โดยวงจรต้นแบบสำหรับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ได้สร้างขึ้น เมื่อใช้งานร่วมกับหลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาด 36 W จำนวน 2 หลอด ให้ค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่สำคัญตามเกณฑ์และข้อกำหนดของมาตรฐานของ มอก. 1506-2541 และ IEC-929 โดยมีผลการทดสอบดังนี้ ค่าตัวประกอบกำลังวงจรเท่ากับ 0.997 (ล้าหลัง) , ค่าความผิดเพี้ยนของกระแสอินพุตเท่ากับ 2.03% ค่าตัวประกอบยอดคลื่นของกระแสผ่านหลอดเท่ากับ 1.42 ค่าตัวประกอบกำลังส่องสว่างเท่ากับ 0.952 และ 0.951 และมีค่ากำลังสูญเสียเท่ากับ 3.7 W ต่อหลอด โดยให้ค่าประสิทธิภาพรวมของวงจรเท่ากับ 89%

คำสำคัญ : บัลลาสต์, พลังงานไฟฟ้า, การส่องสว่าง, มาตรฐาน

Abstract

Nowadays, high frequency electronic ballasts, instead of iron core ballasts, are increasingly used to drive fluorescent lamps because there are many advantage characteristics comparing with the core type. However, some of electronic ballasts that were made and sold in the market, the manufacturers did not deeply understand the concept of circuit topologies. This research presents the concepts of topology approaching the circuit of the electronic ballasts. These showed the relationship between electrical specifications and circuit topologies that come to meet standards. Finally, the research provides a design guideline for the high frequency electronic ballasts with 2-stages approach including practical considerations. Experimental results from 2×36 W lamp prototype electronic ballast were presented

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² อาจารย์, ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

to demonstrate the good electrical characteristics that comply with the IEC-929 and TIS-1506-2541 standards. The test result showed that the circuit power-factor was 0.997 (Lagging), the total harmonic distortion of input-line current was 2.03%, the lamp current crest factor was 1.42 and the ballast lumen factors were 0.952 and 0.951. The circuit power loss was 3.7 W per lamp and the overall efficiency of the prototype circuit was 89%.

Keywords : Ballasts , Electrical Energy , Lighting System , Standard

1. บทนำ

1.1 ความสำคัญที่มาของปัญหา

เนื่องจากภาระหลักของระบบไฟฟ้าอย่างหนึ่งคือระบบแสงสว่าง ซึ่งแหล่งกำเนิดแสงสว่างส่วนใหญ่นิยมใช้ในอาคารที่พักอาศัย อาคารพาณิชย์ โรงงานอุตสาหกรรมและอื่นๆ ก็คือ หลอดฟลูออเรสเซนต์ เนื่องจากการให้ค่าประสิทธิภาพในการส่องสว่าง (ลูเมนต่อวัตต์) สูงกว่าหลอดชนิดไส้ (incandescent) แต่เนื่องจากวงจรหลอดฟลูออเรสเซนต์จะต้องประกอบด้วยบัลลาสต์แบบขดลวดและสตาร์ทเตอร์ เพื่อช่วยในการให้หลอดเริ่มนำกระแสและจำกัดปริมาณกระแสที่ไหลผ่านหลอด บัลลาสต์แบบขดลวดโดยทั่วไปมีการสูญเสียกำลังงานประมาณ 10 W (สำหรับหลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาด 36 W) และมีค่าตัวประกอบกำลังของวงจรที่ต่ำประมาณ 0.4 - 0.5 ซึ่งมีผลทำให้ค่ากระแสสัทธิผล (I_{rms}) ที่อินพุตของวงจรมีค่าสูง ทำให้เกิดกำลังสูญเสียในสายไฟและอื่นๆ ในรูปของ I^2R มีค่าสูงตามไปด้วย นอกจากนี้ยังเกิดปรากฏการณ์การกระพริบของหลอดที่ความถี่ 50 Hz (stroboscopic effect) และมีการกระพริบในขณะที่หลอดเริ่มจะติดด้วย ดังนั้นเพื่อขจัดปัญหาต่างๆ ที่กล่าวมาจึงได้มีการพัฒนาบัลลาสต์แบบอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อใช้กับหลอดชนิดฟลูออเรสเซนต์ขึ้น ซึ่งการออกแบบวงจรจะมีหลายลักษณะและหลายรูปแบบมากมาย ซึ่งจะให้ผลทางด้านแสงสว่างที่คล้ายกัน ยกที่จะแยกแยะได้ว่าผลิตภัณฑ์ชนิดใดดีกว่าชนิดใด และมีการโต้เถียงกันเกี่ยวกับข้อกำหนดเฉพาะของบัลลาสต์เหล่านั้นว่าจะเข้าข่ายที่จะยอมรับได้หรือไม่ จากการศึกษาในเบื้องต้นพบว่าบัลลาสต์ที่จำหน่ายอยู่ในประเทศส่วนใหญ่เป็นการผลิตที่ไม่ได้คำนึงถึงมาตรฐาน เนื่องจากการกำหนดมาตรฐานเกี่ยวกับเรื่องดังกล่าวเป็นเรื่องที่ค่อนข้างใหม่ ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จะทำการวัดและหาค่าคุณลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่จำหน่ายอยู่ในท้องตลาด เพื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานและข้อกำหนดที่เกี่ยวข้อง เช่น มาตรฐาน มอก. 1506-2541, IEC-60929, IEC-6092 และ IEC-1000-3-2 เป็นต้น รวมทั้งทำการออกแบบและสร้างบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับหลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาด 2×36 W เพื่อให้ได้ค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าตามข้อกำหนดในมาตรฐานดังกล่าวข้างต้น และตามข้อกำหนดในขอบเขตการวิจัยที่กำหนดไว้

1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาถึงข้อกำหนดมาตรฐานบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับ สำหรับหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ประกาศใช้ในประเทศไทย : มอก. 1506-2541 และมาตรฐานสากลต่างๆ ที่

เกี่ยวข้อง [1-2] เช่น IEC-60928 “Auxiliaries for lamps-AC supplied electronics ballasts for tubular fluorescent lamps-General and safety requirements”, IEC-60929 “AC supplied electronic ballasts for tubular fluorescent lamps-performance” และมาตรฐาน IEC-1000-3-2 “Electromagnetic compatibility (EMC) Part 3 : Limits-Section 2 : Limits for harmonic current emission (equipment input current ≤ 16 A per phase)”

1.2.2 ทำการวัดและหาค่าคุณลักษณะเฉพาะทางด้านไฟฟ้าของบัลลาสต์ที่มีจำหน่ายในตลาดทั้งชนิดแบบขดลวดและแบบอิเล็กทรอนิกส์

1.2.3 ออกแบบและสร้างบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับหลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาด 2×36 W เพื่อให้ได้ตามข้อกำหนดดังนี้

แรงดันอินพุต : AC 1 Phase 220 V_{rms} 50 Hz

สามารถใช้งานได้ปกติในย่านแรงดัน : 198-242 V_{rms}

ใช้กับหลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาด : 2×36 W

มีความถี่ในการสวิตช์ช่วง : 25 – 50 kHz

มีค่าตัวประกอบกำลังของวงจร : > 0.99

ค่า THD ของกระแสอินพุต : $< 5\%$

มีค่ากำลังการสูญเสียต่ำ : < 5 W ต่อ 1 หลอด

มีค่า Lamp Current Crest Factor : < 1.7

มีค่าความส่องสว่าง : $> 94\%$ เมื่อเทียบกับหลอดและบัลลาสต์แบบขดลวดที่ผลิตได้ตามมาตรฐาน มอก. 23-2531 “บัลลาสต์สำหรับหลอดฟลูออเรสเซนต์”

1.2.4 ศึกษาผลกระทบทางเศรษฐศาสตร์ในการเลือกใช้บัลลาสต์แบบอิเล็กทรอนิกส์

1.3 ผลที่ได้รับ

1.3.1 เข้าใจถึงความต้องการและข้อกำหนดในการเลือกใช้บัลลาสต์แบบอิเล็กทรอนิกส์

1.3.2 ทราบและสามารถทำการวัดและตรวจสอบถึงคุณลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของบัลลาสต์ได้

1.3.3 ได้ต้นแบบวงจรของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีประสิทธิภาพสูงและมีสัญญาณการรบกวนต่ำ

1.3.4 ได้ต้นแบบของบัลลาสต์เพื่อการผลิตในเชิงพาณิชย์

1.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยและพัฒนาบัลลาสต์แบบอิเล็กทรอนิกส์ได้มีการดำเนินการมาอย่างต่อเนื่องและมีระยะเวลานาน ซึ่งในการวิจัยจะเน้นที่ทำให้เกิดการ

สูญเสียกำลังงานที่เป็นความร้อนต่ำและให้แสงสว่างที่ราบเรียบ หลอดติดสว่างทันทีที่จ่ายแรงดันเข้าไป โดยวงจรทำงานที่ความถี่สูงเพื่อให้ใช้หลอดขนาดเล็ก [3] ซึ่งจากรายงานแสดงให้เห็นว่าวงจรสามารถทำงานที่ความถี่สวิตช์ประมาณ 50 kHz และให้ค่าตัวประกอบกำลัง 0.99 แต่ในการวิจัยปัจจุบันจะเพิ่มความสนใจในการที่จะทำการลดปัญหาเกี่ยวกับกระแสฮาร์มอนิก โดยทำให้ค่าตัวประกอบกำลังของวงจรมีค่าใกล้เคียง 1 โดยอาจใช้วงจรเรกติไฟเออร์ที่มีการเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบพาสซีฟ [4] หรือมีการประยุกต์ใช้วงจรควบคุมค่าตัวประกอบกำลังแบบแอคทีฟประกอบเข้าไปเป็นวงจรส่วนหน้าของบัลลาสต์ [5] เพื่อทำการเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังให้ใกล้เคียง 1 และลดกระแสฮาร์มอนิก แต่นั่นก็อาจทำให้เกิดปัญหาต่าง ๆ เกิดขึ้น เช่น จุดที่จะเกิดปัญหามีมากขึ้น เนื่องจากทำการเพิ่มอุปกรณ์ประกอบ วงจรที่มากขึ้น ดังนั้นการเลือกอุปกรณ์เพื่อประกอบในวงจรและการกำหนดจุดทำงานเป็นเรื่องสำคัญที่ต้องพิจารณา ในการวิจัยครั้งนี้จะเป็นการพัฒนาออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ใช้ในการควบคุมหลอด และวงจรส่วนหน้าเพื่อค่าตัวประกอบกำลังโดยมีการทดสอบสมรรถนะ ของวงจรโดยรวม

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 ทำการศึกษาถึงมาตรฐานและความต้องการต่าง ๆ ของการใช้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ตามวัตถุประสงค์ข้อ 1.2.1

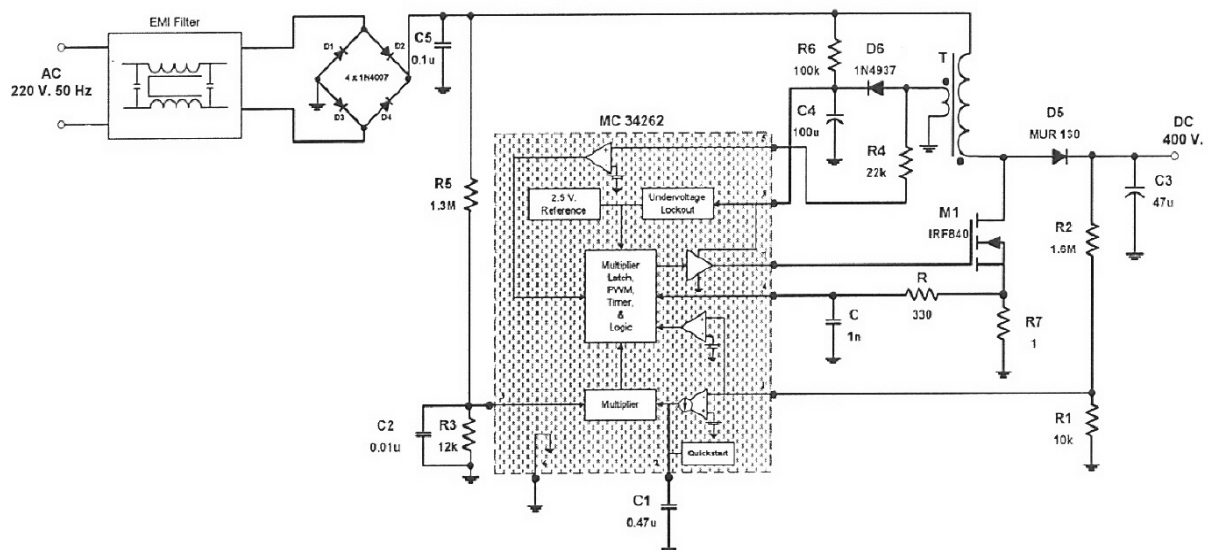
2.2 ทำการออกแบบสร้าง และทดลองการทำงานเพื่อหาประสิทธิภาพของวงจรที่สร้างขึ้น และเปรียบเทียบกับของที่มีอยู่แล้วในท้องตลาด โดยทำการออกแบบและกำหนดค่าพารามิเตอร์ในวงจรส่วนต่าง ๆ ดังนี้

2.2.1 วงจรส่วนหน้า

วงจรส่วนหน้าที่เลือกใช้จะเป็นวงจรเรียงกระแส ที่มีการเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังวงจรแบบแอคทีฟ ซึ่งอยู่ในพื้นฐานของวงจรบูสต์โดยใช้ไอซีเบอร์ MC34262 เป็นอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของสวิตช์ โดยพื้นฐาน ของวงจรบูสต์นั้นมันจะทำงานที่ขอบระหว่างโหมดกระแสต่อเนื่องและกระแสไม่ต่อเนื่อง (boundary mode) [6] ซึ่งจะทำให้คุณสมบัติของรูปคลื่นกระแสอินพุตที่เหมือนกันกับแรงดันอินพุตและมีเฟสตรงกัน เมื่อมีการกรองความถี่สูงแล้วจึงส่งผลให้กระแสอินพุตของวงจรมีค่ากระแสฮาร์มอนิกต่ำและค่าตัวประกอบกำลังวงจรที่ใกล้เคียง 1 [7] ทำให้สามารถรักษาระดับแรงดันไฟตรงทางเอาต์พุตให้คงที่ได้แม้มีการเปลี่ยนแปลงระดับอินพุต ส่งผลให้มีพิสัยของระดับแรงดันไฟฟ้าใช้งานได้กว้างขึ้น จึงทำให้วงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์มีคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่ดีและมีประสิทธิภาพสูง

2.2.2 วงจรส่วนหลัง [8]

วงจรส่วนหลังจะเลือกใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแบบกึ่งบริดจ์ที่กระตุ้นการทำงานด้วยตัวเองโดยใช้มอสเฟตเป็นอุปกรณ์สวิตช์ในวงจร โดยจะเห็นว่าการกำหนดความถี่การทำงานของสวิตช์มอสเฟตจะมีความสัมพันธ์กับการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมที่ต่อภาระแบบขนาน และมี ผลต่อการทำงานของสวิตช์ในวงจรอินเวอร์เตอร์อีกด้วย กล่าวคือ ค่าความถี่การทำงานของวงจรที่กำหนดนั้นจะต้องทำให้สถานะของภาระที่เป็นวงจร เรโซแนนซ์นั้นมีลักษณะเป็นอินดักทีฟ เพื่อให้การทำงานของสวิตช์ในวงจรอินเวอร์เตอร์มีลักษณะเป็นสวิตช์ภาคแรงดันศูนย์ขณะที่ปิดวงจร (zero voltage turn-on switches)



รูปที่ 1 รายละเอียดอุปกรณ์ที่ใช้งานจริงของวงจรส่วนหน้าชนิดที่มีการเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังวงจรแอคทีฟโดยอยู่ในพื้นฐานของวงจรบูสต์โดยใช้ไอซีเบอร์ MC34262

จากหลักการดังกล่าวนี้ สามารถสรุปแนวคิด วิธีการและขั้นตอนในการออกแบบวงจรเรโซแนนซ์สำหรับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ให้มี คุณลักษณะทางไฟฟ้าตามข้อกำหนดและความเหมาะสมได้ดังต่อไปนี้

- 1.) กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เป็นค่าคงที่ในวงจร ได้แก่ แรงดันอินพุตของอินเวอร์เตอร์ (V_B), ความถี่การทำงานของวงจร (f_s , ω), ค่าความต้านทานสวิตช์ (R_f), ความต้านทานสมมูลของหลอดขณะติดสว่าง (R) และพิกัดกำลังเอาต์พุตของหลอด (P)
- 2.) คำนวณตามข้อกำหนดที่สภาวะคงตัวในช่วงที่หลอดติดสว่างแล้ว ตามสมการดังนี้

$$C(\phi) = \frac{1}{\omega(R + R_f)} \times \sqrt{\frac{P(x^2 + (x \tan \phi)^2)}{V_{rms}^2 \cdot x} - 1} \quad (1)$$

$$L(\phi) = \frac{x \tan \phi + \omega R^2 C}{\omega(1 + \omega^2 C^2 (R + R_f)^2)} \quad ; \quad X = R + R_f \quad (2)$$

โดยที่ ϕ คือ มุมต่างเฟสระหว่างกระแสเทียบกับแรงดันอินพุต

จะทำให้ได้ความสัมพันธ์ของตัวเก็บประจุ $C(\phi)$ และขดลวดเหนี่ยวนำ $L(\phi)$ กับค่ามุมเฟสของกระแสที่ไหลในวงจรเมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้าอินพุตตามเงื่อนไขและข้อกำหนดทางไฟฟ้าของวงจร โดยค่าของตัวเก็บประจุและขดลวดเหนี่ยวนำที่สามารถใช้งานได้ต้องอยู่ในย่านที่ค่ามุมเฟสของกระแสที่ไหลในวงจรเป็นบวก นั่นคือสถานะของวงจรเรโซแนนซ์ที่เป็นอินดักทีฟ เพื่อให้การทำงานของสวิตช์ในวงจรอินเวอร์เตอร์มีลักษณะเป็นสวิตช์ภาคแรงดันศูนย์ขณะที่ปิดวงจร (ZVS)

- 3.) นำค่าของตัวเก็บประจุและขดลวดเหนี่ยวนำที่ได้จากสมการที่ (1) และ (2) ในเงื่อนไขที่สภาวะคงตัวในช่วงที่หลอดติดสว่างแล้วไปแทนลงในสมการที่ (3) และ (4) เพื่อตรวจสอบการทำงานในช่วงก่อนจุดหลอดให้ติดสว่าง นั่นคือตรวจสอบว่าค่าของตัวเก็บประจุและขดลวดเหนี่ยวนำที่ใช้งานต้องทำให้เกิดค่าของแรงดันจุดหลอด (V_{ig}) ที่สูงเพียงพอที่จะทำให้หลอดสามารถจุดให้ติดสว่างได้ตามข้อกำหนดและต้องมีค่ามุมเฟสของกระแสในวงจรที่ล้าหลังแรงดันอินพุต (ϕ_{ig}) เพื่อให้สวิตช์ในวงจรอินเวอร์เตอร์มีการทำงานที่มีลักษณะเป็นสวิตช์ภาคแรงดันศูนย์ขณะที่ปิดวงจรในช่วงขณะจุดหลอดให้ติดสว่างเช่นกัน

$$\phi_{ig} = \tan^{-1} \left(\frac{\omega^2 LC - 1}{2R_f \omega C} \right) \quad (3)$$

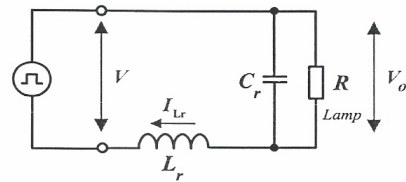
$$V_{ig} = \frac{\sqrt{2}V_B}{\pi} \sqrt{\frac{1 + R_f^2 \omega^2 C^2}{(2R_f \omega C)^2 (\tan^2 \phi + 1)}} \quad (4)$$

2.2.3 เปรียบเทียบคุณลักษณะเฉพาะที่สำคัญต่างๆ เช่น รูปคลื่นกระแสของวงจร, ของหลอด, ค่าตัวประกอบกำลังและประสิทธิภาพ เป็นต้น โดย เทียบกับมาตรฐานที่ระบุไว้ในวัตถุประสงค์ข้อ 1.2.1

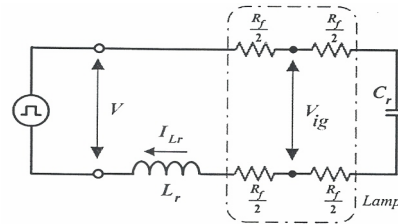
3. ผลการทดลอง

ผลการทดลองจะแสดงถึงการจำลองการทำงานของวงจรที่ได้ออกแบบมาโดยแบบจำลองที่สร้างโดยใช้โปรแกรม SIMULINK ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโปรแกรม MATLAB โดยจะจำลองการทำงานของวงจรเป็น 2 ช่วงการทำงานคือ ช่วงก่อนจุดหลอดให้ติดสว่างและช่วงที่หลอดติดสว่างแล้ว และทำการสร้างวงจรต้นแบบสำหรับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์และทดลองการทำงานเพื่อหาประสิทธิภาพของวงจรที่สร้างขึ้น แล้วทำการเปรียบเทียบกับของที่มีจำหน่ายอยู่แล้วในตลาด

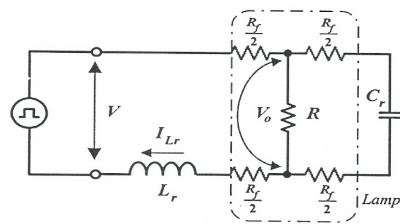
วงจรหลักที่ใช้เพื่อการจำลองการทำงานแสดงดังรูปที่ 2 และสามารถสมมูลวงจรหลักได้เป็น 2 วงจรตามการสมมูลหลอดฟลูออเรสเซนต์ใน 2 ช่วงการทำงาน คือ ช่วงก่อนจุดหลอดให้ติดสว่าง และช่วงหลอดติดสว่างแล้ว ดังรูปที่ 3 และ 4



รูปที่ 2 วงจรเทียบเท่าของวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมที่ต่อภาระแบบขนาน

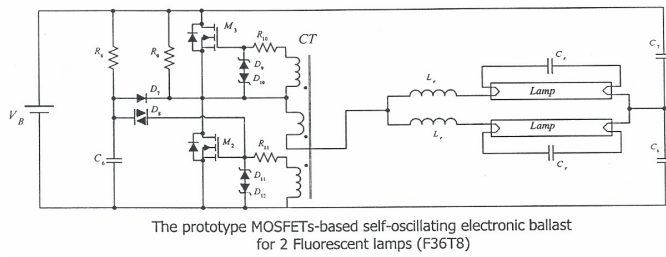


รูปที่ 3 วงจรเทียบเท่าของวงจรเรโซแนนซ์ช่วงก่อนจุดหลอดให้ติดสว่าง



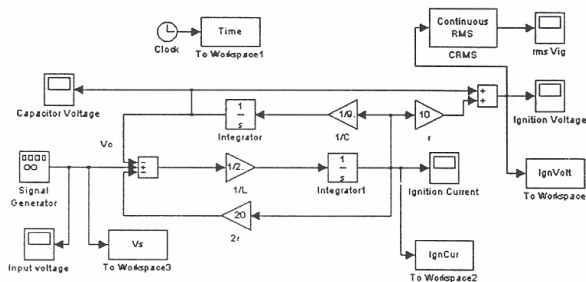
รูปที่ 4 วงจรเทียบเท่าของวงจรเรโซแนนซ์ช่วงที่หลอดจุดติดสว่างแล้ว

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าวงจรส่วนหน้าที่ใช้เป็นวงจรเรียงกระแสที่มีการเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบแอคทีฟซึ่งมีลักษณะของวงจรดังรูปที่ 1 และในส่วนหลังของวงจรส่วนหลังนั้นก็จะเป็นประกอบด้วยวงจรย่อย 2 ส่วนคือ วงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ที่กระตุ้นการทำงานด้วยตัวเอง และวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมที่ต่อภาระแบบขนานนั้น ลักษณะของวงจรต้นแบบดังกล่าวจะแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 วงจรต้นแบบของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับหลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาด 2×36 W

3.1 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากวงจรเทียบเท่าและผลจากการทดสอบวงจรต้นแบบในช่วงก่อนจุดหลอดให้ติดสว่าง
จากวงจรเทียบเท่าดังภาพที่ 3 นั้น เมื่อนำมาสร้างเป็นโมเดลโดยใช้โปรแกรม SIMULINK ของวงจรในช่วงก่อนจุดหลอดให้ติดสว่างก็จะได้แบบจำลองของวงจรเทียบเท่าดังภาพที่ 6



รูปที่ 6 แบบจำลองของวงจรเทียบเท่าช่วงก่อนจุดหลอดให้ติดสว่างที่สร้างขึ้นโดยโปรแกรม SIMULINK

และเมื่อประกอบวงจรตามรูปที่ 6 แล้วทำการทดสอบประสิทธิภาพของการทำงานของวงจรที่ได้สร้างขึ้น และนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองการทำงานของวงจรจะได้ผลดังนี้

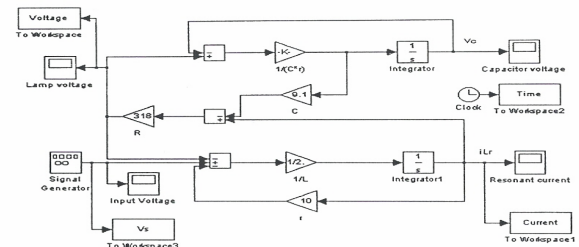
ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองการทำงานและผลจากการทดสอบวงจรต้นแบบในช่วงก่อนจุดหลอดให้ติดสว่าง

รายการ	$V_{ig,rms}$	ϕ_{ig}
ผลการจำลอง	499 V	80°
ผลการทดสอบ	460 V	83°
การคลาดเคลื่อน	-7.8%	+3.75%

จากตารางจะเห็นว่าแรงดันจุดหลอดที่เกิดขึ้นจากการจำลองวงจรนั้นมีค่าใกล้เคียงกับแรงดันที่เกิดขึ้นจริงในทางปฏิบัติ โดยการคลาดเคลื่อนนั้นเกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้นของภาระที่เป็นหลอดฟลูออเรสเซนต์นั่นเอง

3.2 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากวงจรเทียบเท่าและผลจากการทดสอบวงจรต้นแบบในช่วงหลอดติดสว่างแล้ว

จากวงจรเทียบเท่าดังรูปที่ 4 นั้น เมื่อนำมาสร้างเป็นโมเดลโดยใช้โปรแกรม SIMULINK ของวงจรในช่วงก่อนจุดหลอดให้ติดสว่างก็จะได้แบบจำลองของวงจรเทียบเท่าดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 แบบจำลองของวงจรเทียบเท่าช่วงติดหลอดติดสว่างแล้วที่สร้างขึ้นโดยโปรแกรม SIMULINK

ประกอบวงจรตามภาพที่ 5 แล้วทำการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของวงจรที่ได้สร้างขึ้นและนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองการทำงานของวงจรจะได้ผลดังนี้

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองการทำงานและผลจากการทดสอบวงจรต้นแบบในเงื่อนไขวงจรที่สภาวะคงตัวหรือเมื่อหลอดติดสว่างแล้ว

รายการ	$V_{Lamp,rms}$	$I_{Lamp,rms}$	P_{Lamp}	ϕ
ผลการจำลอง	106 V	313 mA	32 W	63°
ผลการทดสอบ	104 V	286 mA	30 W	60°
การคลาดเคลื่อน	-1.89%	-8.63%	-6.25%	-4.76%

จากตารางจะเห็นว่าแรงดันจุดหลอดที่เกิดขึ้นจากการจำลองวงจรนั้นมีค่าใกล้เคียงกับแรงดันที่เกิดขึ้นจริงในทางปฏิบัติ โดยการคลาดเคลื่อนนั้นเกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้นของภาระที่เป็นหลอดฟลูออเรสเซนต์เช่นกัน

3.3 การทดสอบประสิทธิภาพและคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่สำคัญ

ขั้นตอนและวิธีการวัดรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้าต่าง ๆ นั้น จะอ้างอิงตามมาตรฐาน มอก. 1506-2541 และมาตรฐาน IEC-60929 เป็นสำคัญ และจะทำการทดสอบวงจรสำหรับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีอยู่ในท้องตลาดด้วยเพื่อนำผลที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกับวงจรต้นแบบที่ได้สร้างขึ้น

3.3.1 การทดสอบวงจรต้นแบบสำหรับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ได้สร้างขึ้น

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าสำคัญที่วัดได้จริงจากบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้น

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวงจรที่ทดสอบ	ผลการทดสอบ		
แรงดันอินพุตของวงจร V_{rms} (V)	198.0	220.0	242.0
กระแสอินพุตที่ไหลในวงจร I_{rms} (A)	0.343	0.308	0.020
กำลังอินพุตของวงจร P_{in} (W)	67.7	67.3	67.5
กำลังเอาต์พุตที่โหลด P_{Lamp} (W)	30+29.9 =59.9	30+29.9 =59.9	30+30 =60
ค่าประสิทธิภาพของวงจร η (%)	88.5	89.0	88.9
ค่าตัวประกอบกำลังของวงจร PF.	0.997	0.997	0.996
ค่า THD ของกระแสอินพุต THD_i (%)	1.98	2.03	3.95
ค่าตัวประกอบยอดคลื่นของกระแสผ่านโหลด CF.	1.42, 1.42	1.42, 1.42	1.42, 1.42
ค่าตัวประกอบ การส่องสว่าง LF.	0.952, 0.951	0.952, 0.951	0.952, 0.952

3.3.2 การทดสอบวงจรสำหรับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีอยู่แล้วในตลาด

- 1) บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ผลิตภัณฑ์ ก. ใช้ร่วมกับหลอดฟลูออเรสเซนต์ 1×36 W

ตารางที่ 4 คุณสมบัติทางไฟฟ้าสำคัญที่วัดได้จริงจากบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ผลิตภัณฑ์ ก.

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวงจรที่ทดสอบ	ผลการทดสอบ
แรงดันอินพุตของวงจร V_{rms} (V)	220.0
กระแสอินพุตที่ไหลในวงจร I_{rms} (A)	0.176
กำลังอินพุตของวงจร P_{in} (W)	37.0
กำลังเอาต์พุตที่โหลด P_{Lamp} (W)	31.12
ค่าประสิทธิภาพของวงจร η (%)	84.1
ค่าตัวประกอบกำลังของวงจร PF.	0.957
ค่า THD ของกระแสอินพุต THD_i (%)	22.68
ค่าตัวประกอบยอดคลื่นของกระแสผ่านโหลด CF.	2.18
ค่าตัวประกอบ การส่องสว่าง LF.	0.958

- 2) บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ผลิตภัณฑ์ ข. ใช้ร่วมกับหลอดฟลูออเรสเซนต์ 1×36 W

ตารางที่ 5 คุณสมบัติทางไฟฟ้าสำคัญที่วัดได้จริงจากบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ผลิตภัณฑ์ ข.

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวงจรที่ทดสอบ	ผลการทดสอบ
แรงดันอินพุตของวงจร V_{rms} (V)	220.0
กระแสอินพุตที่ไหลในวงจร I_{rms} (A)	0.397
กำลังอินพุตของวงจร P_{in} (W)	43.5
กำลังเอาต์พุตที่โหลด P_{Lamp} (W)	34.2
ค่าประสิทธิภาพของวงจร η (%)	0.80
ค่าตัวประกอบกำลังของวงจร PF.	0.498
ค่า THD ของกระแสอินพุต THD_i (%)	10.30
ค่าตัวประกอบยอดคลื่นของกระแสผ่านโหลด CF.	1.625
ค่าตัวประกอบ การส่องสว่าง LF.	0.96

4. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการทดสอบประสิทธิภาพและคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญของบัลลาสต์แต่ละชนิด โดยทำงานร่วมกับหลอดฟลูออเรสเซนต์ในวงจรนั้น ผลการทดสอบประสิทธิภาพของวงจรต้นแบบสำหรับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้นได้ผลเป็นที่น่าพอใจ และมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นไปตามข้อกำหนดที่ได้กำหนดไว้ในวัตถุประสงค์ในการวิจัยทุกประการ

จากการวิเคราะห์ข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าในกรณีที่เลือกใช้บัลลาสต์แบบอิเล็กทรอนิกส์ชนิดใช้งานร่วมกับหลอดฟลูออเรสเซนต์ 1×36 W จะต้องใช้ระยะเวลาประมาณ 4 ปี 5 เดือน จึงจะถึงจุดคุ้มทุน ซึ่งจากความเป็นจริงที่บัลลาสต์แบบอิเล็กทรอนิกส์ประกอบด้วยอุปกรณ์ที่เป็นอิเล็กทรอนิกส์อาจมีอายุการใช้งานไม่ยาวนานเท่าที่ควร แต่ทั้งนี้ถ้ามีการออกแบบที่ถูกต้อง การเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีคุณภาพ รวมทั้งมีการออกแบบระบบป้องกันวงจรและการระบายความร้อนที่ดี ก็จะเป็นส่วนสำคัญให้บัลลาสต์แบบอิเล็กทรอนิกส์มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

แต่ถ้าเลือกใช้บัลลาสต์แบบอิเล็กทรอนิกส์ชนิดใช้งานร่วมกับหลอดฟลูออเรสเซนต์ 2×36 W จากการวิเคราะห์จะเห็นได้ชัดเจนว่าสามารถที่จะทำให้การลงทุนคุ้มค่าน่าขึ้น นั่นคือ การที่จะถึงจุดคุ้มทุนที่เร็วขึ้นคือจะใช้เวลาประมาณ 1 ปี 4 เดือน เนื่องจากการใช้งานร่วมกับจำนวนหลอดที่มากขึ้น ทำให้สามารถประหยัดพลังงานในรูปกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เป็นวัตต์ต่อหลอดได้มากขึ้นนั่นเอง ซึ่งน่าจะเป็นทางเลือกที่ดีกว่าในการเลือกที่จะใช้งานแทนบัลลาสต์แบบขดลวดในแบบเดิม แต่ทั้งนี้เมื่อเลือกใช้งานในกรณีประเภทบัลลาสต์ 1 ตัวทำงานร่วมกับหลอดฟลูออเรสเซนต์ 2 หลอด ก็จะทำให้ความน่าเชื่อถือของระบบ (reliability) ลดลงเมื่อเทียบกับการใช้งานที่เป็นบัลลาสต์ 1 ตัวทำงานร่วมกับหลอดฟลูออเรสเซนต์ 1 หลอด

และเมื่อนำบัลลาสต์แบบอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้นมาเปรียบเทียบกับของที่มีอยู่ตามท้องตลาดแล้วจะเห็นได้ชัดเจนว่าบัลลาสต์แบบอิเล็กทรอนิกส์สามารถลดกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในวงจรได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่เกิดขึ้นจากบัลลาสต์แบบขดลวดในแบบเดิม อีกทั้งยังสามารถลดค่ากำลังงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้ เนื่องจากการออกแบบให้วงจรหลอดทำงานที่ความถี่สูงขึ้น คือ ลดค่ากำลังงานของ

ลดลงจาก 36 W เหลือเพียง 32 W ในขณะที่ปริมาณแสงที่ได้จากหลอดมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่จะพบว่าบัลลาสต์แบบอิเล็กทรอนิกส์แบบธรรมดาหรือแม้กระทั่งการเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบพาสซีฟแล้วนั้นเป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์โมนิก และกระแสฮาร์โมนิกนี้เองจะก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนที่ป้อนเข้าสู่ระบบจ่ายไฟฟ้า ทำให้เกิดผลเสียและความเสียหายต่าง ๆ ตามมา เช่น ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ที่ต่ออยู่ในระบบทำงานผิดพลาด และมีอายุการใช้งานสั้นลง รวมทั้งลดทอนคุณภาพของระบบไฟฟ้าจำหน่าย

แต่บัลลาสต์แบบอิเล็กทรอนิกส์ที่มีการเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบแอคทีฟและมีการกรองกระแสที่ความถี่สูงด้วยวงจรกรองสัญญาณรบกวนนั้นทำให้สามารถลดสัญญาณรบกวนที่จะออกไปสู่ระบบให้มีปริมาณน้อยลง หรือมีค่าความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิก (THD_i) อีกทั้งยังทำให้ค่าตัวประกอบกำลังวงจรสูงขึ้น คือ จากค่าตัวประกอบกำลังวงจรที่ใช้บัลลาสต์แบบขดลวดที่มีค่าเท่ากับ 0.498 จะเพิ่มขึ้นเป็น 0.997 และสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าลงได้อีก 22.6% (เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้งานของบัลลาสต์แบบขดลวด 2 ตัวและหลอดฟลูออเรสเซนต์ 2 หลอด โดยใช้พื้นฐานการคำนวณจากบัลลาสต์แบบขดลวดสำหรับหลอดฟลูออเรสเซนต์ 36 W จำนวน 1 ตัวต่อหลอดฟลูออเรสเซนต์ 1 หลอด) แต่ในงานวิจัยนี้ยังไม่ได้ศึกษาและพิจารณาถึงเรื่องความคงทน (endurance) การกันแม่เหล็ก (magnetic screening) และระบบป้องกันของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

ในการวิเคราะห์ผลกระทบทางเศรษฐศาสตร์ที่เกิดขึ้นจากการเลือกใช้บัลลาสต์แบบอิเล็กทรอนิกส์นั้น จะคำนึงถึงประโยชน์ทางตรงที่ได้รับในส่วนที่เป็นค่าใช้จ่ายในรูปของค่าไฟฟ้าที่ลดลงเป็นสำคัญ แต่ยังมีประโยชน์ทางอ้อมที่จะได้รับอีกคือสามารถลดค่าใช้จ่ายของค่าไฟฟ้าในรูปของค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้า (demand charge) ได้ด้วยเนื่องจากการใช้พลังงานไฟฟ้าของหลอดต่อหน่วยที่ลดลง ค่าความสูญเสียในรูปของความร้อนที่เกิดขึ้นน้อยลงกว่าเดิม เมื่อเทียบกับบัลลาสต์แบบขดลวด ทำให้ช่วยลดภาระของเครื่องปรับอากาศที่ใช้งาน มีผลทำให้ค่าไฟฟ้าในส่วนที่เป็นระบบปรับอากาศลดลงด้วย เป็นต้น

5. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเชิงประยุกต์ สาขาอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และการอนุรักษ์พลังงาน เรื่อง “ศึกษาและการออกแบบวงจรบัลลาสต์แบบอิเล็กทรอนิกส์เพื่อการประหยัดพลังงานไฟฟ้าสำหรับการส่องสว่าง” นี้ได้รับทุนอุดหนุนวิจัยกำหนดเรื่อง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พ.ศ.

2541 ผู้วิจัยจึงขอขอบคุณในการให้ความสนับสนุนในการวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างสูง และขอขอบคุณ นายนภดล วิวัชรโกเศศ นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ได้ช่วยดำเนินการวิจัยโดยการสร้างวงจรเพื่อทดลองงานวิจัยนี้สำเร็จลงด้วยดี และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการอนุญาตให้ใช้สถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] CEI/IEC-929, AC – Supplied electronic ballasts for tubular fluorescent lamps – Performance requirements. INTERNATIONAL STANDARD, First Edition, 1990-12
- [2] มอก. 1506 – 2541, บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ประกาศใช้ในประเทศไทย. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, พ.ศ. 2541.
- [3] M. K. Kazimierczuk and W. Szaraniec, “Electronic ballast for fluorescent lamps,” IEEE Trans. Power Electronic, vol.8, pp. 386-395, Oct. 1993.
- [4] J. Spangler, B. Hussain, and A.K. Behera, “Electronic fluorescent ballast using a power factor correction technique for loads greater than 300 watts,” IEEE APEC’1991., Sixth Annual, pp.393-399.
- [5] M. F. Schlecht and B. A. Miwa, “Active Power factor correction for switching power supplies,” IEEE Trans. Power Electronics, vol. PE-2, no.2, pp.273-281, Oct. 1987.
- [6] วิบูลย์ ชื่นแขก, ศึกษาวงจร AC - DC คอนเวอร์เตอร์เฟสเดียวที่ใช้สวิตช์เพียงหนึ่งตัวและมีค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง. รายงานการวิจัย พัฒนาและวิศวกรรม, ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ, สำนักพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ พ.ศ. 2540.
- [7] D. Tadesse, F. P. and S. B. Dewan, “A Comparison of power circuit topologies and control techniques for high frequency ballast” IEEE IAS. Conf., vol.3, pp.2341-2347, 1993.
- [8] Motorola Analog IC Device Data, “MC34262-33262,” Technical data book, pp.450-464, 1993.