

การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์อย่างเป็นระบบ Systematic Design of Electronics Ballast

ไพศาล บุญเยี่ยม¹

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแนวทางการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์อย่างเป็นระบบเพื่อให้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ทำงานร่วมกับฟลูออเรสเซนต์ที่กำลังออกเท่ากับพิกัดและมีเสถียรภาพการวิเคราะห์และออกแบบจะใช้สมการจากวงจรสมมูลสำหรับความถี่หลักมูลของวงจรโหนดของคอนเวอร์เตอร์และมีจำลองการทำงานและการทดลองเพื่อยืนยันถึงความถูกต้องของการออกแบบ

คำสำคัญ-บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

Abstract

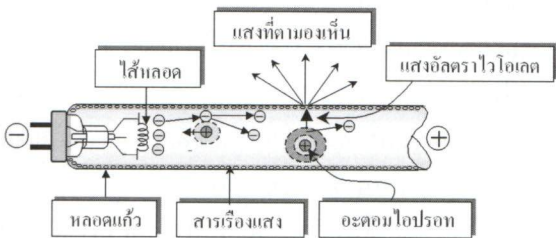
This paper presents a novel design of electronics ballast. The selection criteria stem from ballast specifications as well as operation characteristics and constraints. Lamp rated power, minimum lamp ignition voltage, filament heating current and zero voltage turn on operation of the inverter switches are used as criteria for load circuit component selection. Fundamental frequency approximation analytical technique and linear lamp model are used to establish the circuit equations. The experimental results show that approximation analysis is good enough for primary design.

Keyword-Electronic Ballast

1. หลักการพื้นฐานของหลอดฟลูออเรสเซนต์

หลอดฟลูออเรสเซนต์ คือ หลอดคิซซาร์ดไอปรอท ความดันต่ำ (low pressure mercury gas discharge lamp) ที่ได้นำเสนอ (J.R. Coaton and A.M.Marden, 1990) จะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นแสงสว่าง โดยใช้คุณสมบัติของก๊าซความดันต่ำ ไอปรอท และสารเรืองแสง ซึ่งจะแตกต่างจากหลอดแบบเผาไส้ (Incandescent lamp) ที่ใช้กระแสเผาไส้หลอดให้ร้อนเพื่อให้เกิดแสงสว่าง หลอดฟลูออเรสเซนต์มีโครงสร้างและการทำงานดังต่อไปนี้ หลอดฟลูออเรสเซนต์มีองค์ประกอบหลายอย่างรวมกันเพื่อกำเนิดแสงสว่างที่ตามนุษย์สามารถมองเห็นได้ โครงสร้างของหลอดฟลูออเรสเซนต์ประกอบด้วยหลอดแก้วทรงกระบอกยาวภายในเคลือบด้วยสารเรืองแสง ขั้วหลอดไส้หลอด ก๊าซความดันต่ำและไอปรอท การทำงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์มีดังต่อไปนี้ ก่อนจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ก๊าซความดันต่ำและไอปรอทภายในหลอดแก้วยังไม่นำกระแสจนกว่าจะมีแรงดันไฟฟ้าสูงที่เพียงพอมากระตุ้นทำให้มีการปล่อยประจุออกมาจึงจะทำให้เริ่มนำกระแสได้และเกิดแสงอัลตราไวโอเลตที่ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า แสงอัลตราไวโอเลตจะไปกระตุ้นสารเรืองแสงที่ถูกฉาบไว้ภายในผิวหลอดแก้วให้กำเนิดแสงสว่างที่สามารถมองเห็นออกมา แสดงปรากฏการณ์การกำเนิดแสงสว่างดังกล่าวแสดงให้เห็นในรูปที่ 1

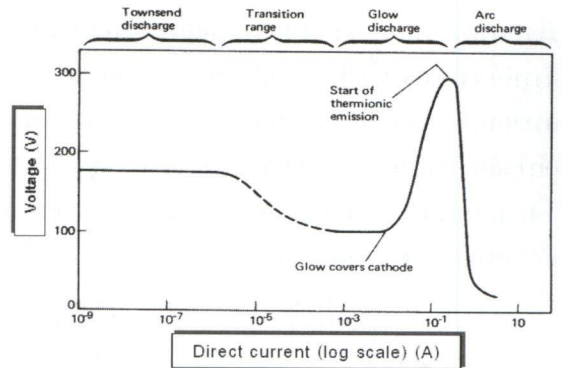
การใช้งานหลอดแบบเผาไส้กำเนิดแสงสว่างสามารถต่อเข้ากับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้โดยตรง แต่สำหรับหลอดฟลูออเรสเซนต์ต้องใช้ร่วมกับบัลลาสต์ (Ballast) และสตาร์ทเตอร์ (Starter) เพื่อให้หลอดฟลูออเรสเซนต์ทำงานได้ ดังนั้นในการออกแบบบัลลาสต์จึงควรทราบคุณสมบัติของหลอดฟลูออเรสเซนต์ทั้งในขณะก่อนจุดหลอด ขณะจุดหลอด และขณะที่หลอดติดสว่าง คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหลอดฟลูออเรสเซนต์สามารถจำแนกตามลักษณะการทำงานได้ 2 แบบ คือ ลักษณะสมบัติก่อนและขณะจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ และลักษณะสมบัติขณะทำงานปกติ โดยอธิบายรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้



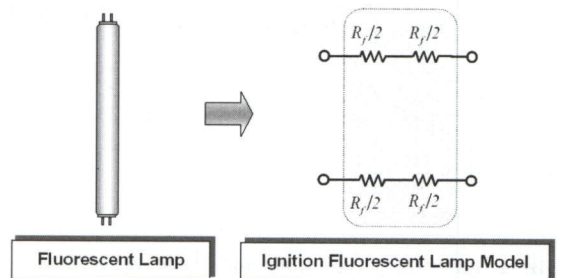
รูปที่ 1 หลักการทำงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์

ก่อนจุดหลอดความต้านทานหลอดมีค่าสูงมาก เป็นอนันต์ การจุดหลอดต้องใช้แรงดันไฟฟ้าสูงเพื่อกระตุ้นให้ก๊าซความดันต่ำแตกตัว เกิดประจุที่เป็นภาหะนำกระแสเคลื่อนทำให้หลอดฟลูออเรสเซนต์นำกระแสได้และหลอดติดสว่าง แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการจุดหลอดมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความยาวของหลอดฟลูออเรสเซนต์ อุณหภูมิของไส้หลอดและอุณหภูมิรอบๆ ตัวหลอด เมื่อหลอดฟลูออเรสเซนต์เริ่มติดสว่างความต้านทานของหลอดฟลูออเรสเซนต์ลดต่ำลง รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ด้านไฟตรงของแรงดันคร่อมหลอดและกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์ จะเห็นว่าในช่วง Townsend discharge และช่วง Transition range เป็นช่วงที่ค่าความต้านทานของหลอดฟลูออเรสเซนต์มีค่าสูงมาก ต่อมาเมื่อให้แรงดันไฟฟ้าสูงแบบทันทีทันใดในช่วง glow discharge อิเล็กตรอนจากไส้หลอดมีการแตกตัว เกิดแสงอัลตราไวโอเลตออกมา เมื่อหลอดติดสว่างแล้วจุดทำงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์

จะอยู่ในช่วง Arc discharge ที่กำลังด้านออกเกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์ในช่วงแรกมีการเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จากค่าต่ำไปสู่จุดทำงานในช่วง Arc discharge แต่แรงดันตกคร่อมหลอดในช่วง glow discharge จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว



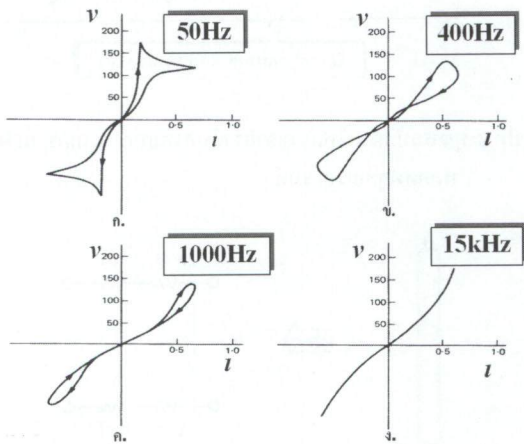
รูปที่ 2 คุณสมบัติด้านไฟตรงของแรงดันคร่อมหลอดกับกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์



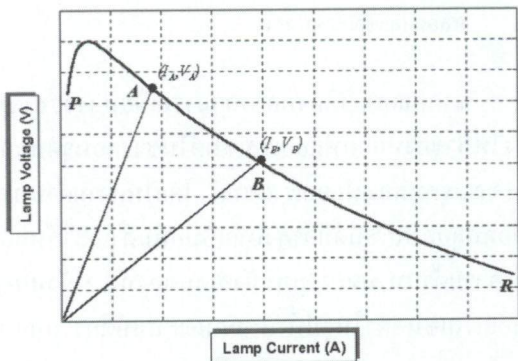
รูปที่ 3 วงจรสมมูลของหลอดฟลูออเรสเซนต์ในช่วงก่อนจุดหลอดและขณะจุดหลอด

จากคุณสมบัติดังกล่าวสามารถเขียนวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของหลอดฟลูออเรสเซนต์ในช่วงก่อนจุดหลอดและขณะจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ โดยให้ความต้านทานหลอดฟลูออเรสเซนต์มีค่าสูงมากเป็นอนันต์ และไส้หลอดมีค่าความต้านทานของโลหะทั้งสแตนของทั้ง 2 ขั้วหลอดฟลูออเรสเซนต์ดังในรูปที่ 3 ลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของหลอดฟลูออเรสเซนต์ในช่วง arc discharge จะมีลักษณะไม่เชิงเส้นและมีค่าความต้านทานพลวัตในภาวะ

การทำงานปกติเป็นลบ หลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่ต่างๆ กัน มีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันคร่อมหลอดและกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์แตกต่างกันดังรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำ อิมพีแดนซ์ของหลอดฟลูออเรสเซนต์มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นและความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันขณะเพิ่มและลดไม่เหมือนกันดังรูปที่ 4 (ก) และเมื่อเพิ่มความถี่การทำงาน ลักษณะสมบัติกระแสกับแรงดันของหลอดฟลูออเรสเซนต์จะมีลักษณะเข้าใกล้ความต้านทานแบบเชิงเส้นมากขึ้นดังในรูปที่ 4 (ข) - 4 (ง) เรียงตามลำดับ และที่ความถี่มากกว่า 15 kHz จะมีความไม่เป็นเชิงเส้นเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 4 คุณสมบัติ V-I ของหลอดฟลูออเรสเซนต์เมื่อเปลี่ยนความถี่การทำงาน



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันคร่อมหลอดและกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์

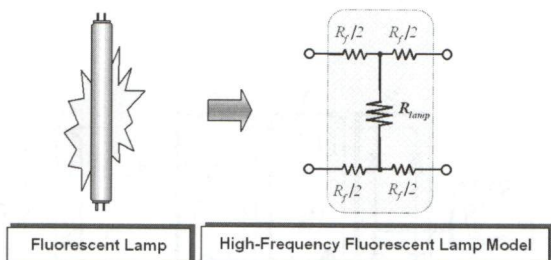
เมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงป้อนให้กับหลอดฟลูออเรสเซนต์ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันคร่อมหลอดและกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์จะมีลักษณะเกือบเป็นเชิงเส้นที่ค่าความต้านทานสมมูลขึ้นกับความชัน (Slop) ของกราฟ อย่างไรก็ตาม ความชันของกราฟของแรงดันคร่อมหลอดและกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์จะแปรตามกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่หลอดรูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันคร่อมหลอดและกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่กำลังออก 2 ค่า มีค่ายอดของกระแสผ่านหลอดและแรงดันคร่อมหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่จุด A และ B เมื่อนำค่ายอด (peak value) หรือค่าประสิทธิผล (effective value) ของกระแสผ่านหลอดและแรงดันคร่อมหลอดที่กำลังไฟฟ้าค่าต่างๆ ไปเขียนบนกราฟของกระแสและแรงดันจะได้กราฟ PR เส้นกราฟดังกล่าวเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่ายอดหรือประสิทธิผลของกระแสผ่านหลอดและแรงดันคร่อมหลอดที่กำลังออกค่าต่างๆ กัน ซึ่งเราจะเรียกว่าเส้นหลอด (lamp line) จะเห็นได้ว่าความชันของกราฟคุณสมบัติกระแสและแรงดันจะเพิ่มขึ้นถ้ากำลังออกของหลอดลดลง เนื่องจากกำลังออกจะเพิ่มตามกระแสที่ผ่าน ดังนั้นแรงดันของหลอดจะลดลงเมื่อกระแสเพิ่มขึ้น ลักษณะดังกล่าวจะเป็นลักษณะของอุปกรณ์ที่มีค่าความต้านทานพลวัตเป็นลบ ($dV/di < 0$)

สำหรับไส้หลอดทั้งสองชนิดที่อยู่ทั้งสองข้างของหลอดฟลูออเรสเซนต์จะมีค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ดังนั้นจากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสผ่านหลอดและแรงดันคร่อมหลอดฟลูออเรสเซนต์ และไส้หลอดฟลูออเรสเซนต์สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลของหลอดฟลูออเรสเซนต์ช่วงทำงานปกติได้โดยสมมติให้กระแสไหลผ่านฟลูออเรสเซนต์เป็นกระแสที่ออกจากจุดกึ่งกลางของไส้หลอดทำให้สามารถแบ่งความต้านทานไส้หลอดแต่ละข้างเป็นครึ่งหนึ่งดังรูปที่ 6 (Mark Sun and Bryce L. Hesterman., 1998) เพื่อให้เป็นกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่หลอดฟลูออเรสเซนต์จริง แต่ในทางปฏิบัติการวัดค่ากำลังออกของหลอดจะวัดได้เฉพาะกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์ไม่สามารถวัดแรงดันคร่อมหลอดจริงได้

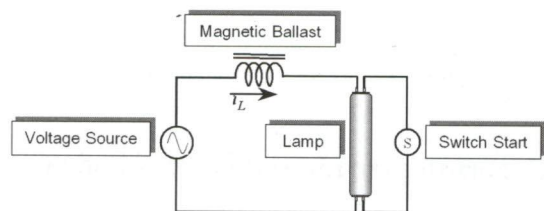
เพราะต้องวัดแรงดัน ณ จุดที่ต้องรวมแรงดันคร่อมไส้หลอด หลอดเรสเซนส์ด้วย ซึ่งมีกำลังสูญเสียที่ไส้หลอด ประมาณ 1-2 W

2. หลอดฟลูออเรสเซนต์กับบัลลาสต์แบบขดลวด พันบนแกนเหล็ก

เนื่องจากหลอดฟลูออเรสเซนต์มีความต้านทานพลวัต ในภาวะการทำงานปกติเป็นลบ จึงจำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่มีลักษณะใกล้เคียงแหล่งจ่ายกระแส เพื่อให้การทำงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์มีเสถียรภาพ การทำให้แหล่งแรงดันมีลักษณะใกล้เคียงกับแหล่งกระแสทำได้โดยใช้อิมพีแดนซ์ที่มีค่าสูงต่ออนุกรมกับแหล่งจ่ายแรงดัน อันเป็นผลทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายแรงดันสูงขึ้น จึงมีลักษณะสมบัติก่อนไปทางด้านแหล่งจ่ายกระแส โดยทั่วไปจะใช้ตัวเหนี่ยวนำเป็นอิมพีแดนซ์ต่ออนุกรมกับแหล่งจ่ายแรงดัน ไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อไม่ให้เกิดกำลังสูญเสียในอิมพีแดนซ์มากเกินไป ดังนั้นลักษณะการต่อหลอดฟลูออเรสเซนต์จะเป็นดังรูปที่ 7



รูปที่ 6 แบบจำลองของหลอดฟลูออเรสเซนต์ขณะทำงานปกติ



รูปที่ 7 ลักษณะการต่อหลอดฟลูออเรสเซนต์ใช้งานร่วมกับ บัลลาสต์แกนเหล็กและสตาร์ทเตอร์

การทำงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์เมื่อใช้ร่วมกับบัลลาสต์แกนเหล็กและสตาร์ทเตอร์มีลักษณะดังนี้ คือ เมื่อเริ่มป้อนแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้วงจรในรูปที่ 7 หลอดฟลูออเรสเซนต์จะไม่นำกระแสทันที แรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายส่วนใหญ่จะตกคร่อมสตาร์ทเตอร์ ทำให้เกิด glow discharge ขึ้นที่หน้าสัมผัสของสตาร์ทเตอร์ ทำให้หน้าสัมผัสร้อนขึ้นและต่อวงจรเมื่อหน้าสัมผัสของสตาร์ทเตอร์ที่เป็น bimetal ต่อวงจรแรงดันคร่อมสตาร์ทเตอร์จะลดลง glow discharge หยุดและหน้าสัมผัสของสตาร์ทเตอร์จะเย็นลง และตัดวงจรในช่วงที่สตาร์ทเตอร์ตัดวงจร บัลลาสต์แกนเหล็กจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันสูงคร่อมหลอดฟลูออเรสเซนต์ แรงดันนี้เรียกว่าแรงดันจุดหลอด (Striking Voltage, V_{ig}) ถ้า V_{ig} ไม่สูงเพียงพอที่จะจุดหลอดให้ติดสว่างขบวนการจุดหลอดจะเริ่มต้นใหม่ แต่ถ้า V_{ig} สูงพอจะทำให้หลอดฟลูออเรสเซนต์ติดสว่าง แรงดันคร่อมหลอดฟลูออเรสเซนต์จะลดต่ำลง ทำให้แรงดันคร่อมสตาร์ทเตอร์ไม่สูงพอที่จะทำให้เกิด glow discharge ได้อีก สตาร์ทเตอร์ก็จะเปิดวงจรอย่างนี้ตลอดไป ช่วงทำงานปกติของหลอดฟลูออเรสเซนต์

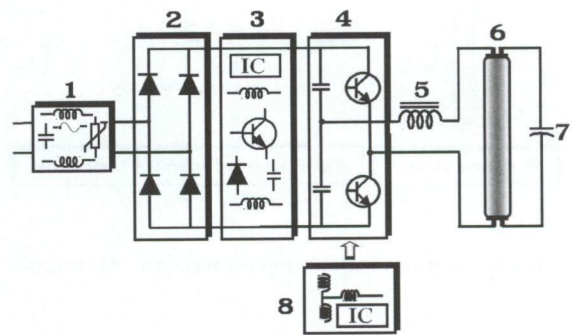
3. บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ (Electronic ballast)

บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแหล่งไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สายกำลังเป็นแหล่งไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงจ่ายให้กับหลอดฟลูออเรสเซนต์ เพื่อให้หลอดฟลูออเรสเซนต์ติดสว่างและทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ การใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงสามารถออกแบบตัวเหนี่ยวนำให้มีขนาดเล็กและมีกำลังสูญเสียต่ำและราคาไม่แพงเกินไปได้ การทำงานที่ความถี่สูงนอกจากสามารถลดกำลังสูญเสียในตัวเหนี่ยวนำที่ทำหน้าที่เป็นบัลลาสต์แล้ว ยังทำให้ประสิทธิภาพการส่องสว่าง (luminous efficacy) ของหลอดฟลูออเรสเซนต์สูงขึ้นตามความถี่การทำงานได้อีกด้วย การให้หลอดฟลูออเรสเซนต์ทำงานที่ความถี่สูงถึงแม้จะช่วยลดกำลังสูญเสียในบัลลาสต์และลดกำลังด้านเข้าของหลอดลงได้ก็จริง แต่เนื่องจากแหล่งจ่ายพลังงานโดยทั่วไปจะเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ

ความถี่ 50Hz หรือไม่กี่เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้คอนเวอร์เตอร์ (Converter) ในการสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงขึ้นที่เรียกว่า อินเวอร์เตอร์ (inverter) การเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงหรือไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำเป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงจะทำให้เกิดกำลังสูญเสียขึ้นในคอนเวอร์เตอร์เอง และเพื่อให้สามารถลดกำลังสูญเสียรวมของระบบลงได้ ตัวคอนเวอร์เตอร์ต้องมีประสิทธิภาพสูง

การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ให้เหมาะสมจึงสามารถลดกำลังสูญเสียลงได้ประมาณ 4-6 วัตต์ เรียกบัลลาสต์ชนิดนี้ว่าบัลลาสต์แกนเหล็กกำลังสูญเสียต่ำ (low-loss magnetic ballast) การลดการสูญเสียของบัลลาสต์ทำได้อีกวิธีคือ การลดขนาดตัวเหนี่ยวนำโดยการเพิ่มความถี่การทำงานของแหล่งจ่าย การเพิ่มความถี่การทำงานแหล่งจ่ายจะต้องมีวงจรเพิ่มเติมคือวงจรเรียงกระแส (rectifier circuit) และวงจรอินเวอร์เตอร์ (inverter circuit) ซึ่งวงจรเหล่านี้ก็มีกำลังสูญเสียเช่นกัน ดังนั้นการออกแบบวงจรดังกล่าวจึงต้องให้กำลังสูญเสียรวมน้อยกว่ากำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในบัลลาสต์แกนเหล็ก การลดกำลังสูญเสียโดยอาศัยการเพิ่มความถี่ของแหล่งจ่ายมีผลดี 2 ประการคือ ลดขนาดของตัวเหนี่ยวนำที่ทำหน้าที่เช่นเดียวกับบัลลาสต์แกนเหล็ก และเพิ่มประสิทธิภาพการส่องสว่างของหลอดฟลูออเรสเซนต์ขึ้นประมาณร้อยละ 10 เรียกอุปกรณ์ที่เปลี่ยนแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สายกำลังเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงเพื่อจ่ายให้กับหลอดฟลูออเรสเซนต์ทำหน้าที่แทนบัลลาสต์แกนเหล็กนี้ว่า “บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ (electronic ballast)” โครงสร้างของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ โดยทั่วไปประกอบด้วยวงจรกรองสัญญาณรบกวน (EMI and RFI filter circuit) มีหน้าที่กรองสัญญาณรบกวน EMI และ RFI จากภายนอกมารบกวนบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์และจากภายในบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ไปรบกวนอุปกรณ์ภายนอกโดยสายส่งวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Rectifier Circuit) มีหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สายกำลังเป็นไฟฟ้ากระแสตรง วงจรเพิ่มค่าตัว

ประกอบกำลัง (Power factor correction circuit) มีหน้าที่เพิ่มค่าตัวประกอบกำลังและลดฮาร์มอนิกด้านเข้าบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ วงจรกรองแรงดัน (Voltage filter circuit) มีหน้าที่ลดการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเข้าวงจรอินเวอร์เตอร์ วงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter circuit) มีหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ วงจรอินเวอร์เตอร์ที่นิยมใช้กันในปัจจุบันโดยทั่วไปจะใช้สวิตช์ไวงานเป็นทรานซิสเตอร์ ทำงานแบบเรโซแนนซ์ภาคแรงดันศูนย์ (Zero voltage resonant switching, ZVS) แรงดันออกของอินเวอร์เตอร์เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ วัฏจักรงานร้อยละ 50 วงจรกำเนิดสัญญาณขับนำสวิตช์ (Drive circuit) มีหน้าที่สร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ ๓ ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) มีหน้าที่เป็นส่วนประกอบของปรากฏการณ์เรโซแนนซ์สร้างแรงดันจุดหลอด และควบคุมกระแสผ่านหลอดขณะทำงานปกติ ตัวเก็บประจุ (Ignition circuit) มีหน้าที่เป็นส่วนประกอบของปรากฏการณ์เรโซแนนซ์สร้างแรงดันจุดหลอด และเป็นทางผ่านของกระแสอุ่นไส้หลอดขณะทำงานปกติ ดังแสดงในรูปที่ 8

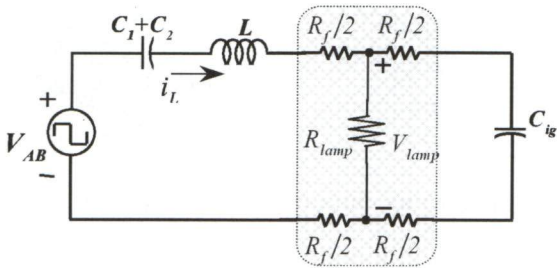


รูปที่ 8 โครงสร้างของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

4. วงจรสมมูลของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์และสมการของวงจร

จากรูปที่ 9 สามารถเขียนวงจรสมมูลไฟฟ้ากระแสสลับของวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรมที่

ต่อโหลดขนานได้ ดังรูปที่ 9 โดยที่ V_{AB} คือแรงดันออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ C_1 และ C_2 คือตัวเก็บประจุแบ่งแรงดันของอินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ L คือตัวเหนี่ยวนำควบคุมกระแสผ่านโหลดฟลูออเรสเซนต์ R_f คือความต้านทานไส้หลอด R_{lamp} คือความต้านทานสมมูลของหลอดฟลูออเรสเซนต์ และ C_{ig} คือ วงจรจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์



รูปที่ 9 วงจรสมมูลของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต่อร่วมกับหลอดฟลูออเรสเซนต์

แรงดัน V_{AB} ซึ่งเป็นแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์จะมีลักษณะเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ที่เวลาต่างๆ กันดังในสมการที่ 1 สามารถเขียนในรูปของอนุกรมฟูเรียร์ได้ดังสมการที่ 1

$$V_{AB} = \begin{cases} \frac{V_{DC}}{2}, & 0 \leq t \leq \frac{\pi}{\omega} \\ -\frac{V_{DC}}{2}, & \frac{\pi}{\omega} \leq t \leq \frac{2\pi}{\omega} \end{cases} \quad (1)$$

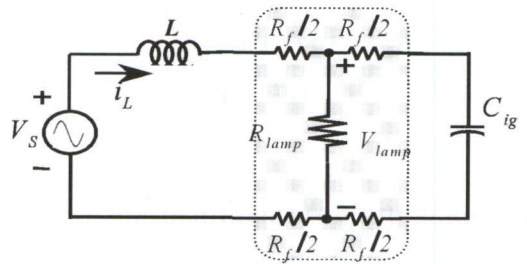
$$V_S(t) = \frac{V_{DC}}{2} \left\{ \frac{4}{\pi} \sum_{n=odd} \frac{\sin n\omega t}{n} \right\} = \sum_{n=odd} V_{sn} \sin n\omega t \quad (2)$$

เมื่อ ω คือความถี่การสวิตช์
 V_{DC} คือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเข้า

เนื่องจากวงจรโหลดมีการต่อในลักษณะเป็นวงจรผ่านตัวอันดับสอง (Second order low-pass filter) และมีความถี่การทำงานของวงจรอยู่รอบๆ ความถี่ธรรมชาติไม่หน่วง (Undamp natural frequency, f_o) ทำให้รูปคลื่นของแรงดันคร่อมหลอดและกระแสผ่านหลอดมีรูปคลื่น

ใกล้เคียงความถี่หลักมูล ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักมูลของแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ดังนั้นการวิเคราะห์ห้วงจรจึงอาจวิเคราะห์โดยใช้แรงดันที่มีรูปคลื่นไซน์แทนรูปคลื่นสี่เหลี่ยมได้ ดังรูปที่ 10

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 10 สามารถคำนวณสมการที่ใช้ในการออกแบบได้ ซึ่งประกอบด้วยค่าอิมพีแดนซ์ (load impedance, Z_L) มุมเฟสของกระแสออกเทียบกับแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ (Load angle, θ_{RUN}) ฟังก์ชันโอนย้ายของ V_{lamp} กับ V_S และค่าตัวประกอบคุณภาพของวงจรโหลด (Load quality factor, Q_L) ตามลำดับ



รูปที่ 10 วงจรสมมูลของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบ

$$Z_T(j\omega) = \frac{1 - LC_{ig}\omega^2 + j\omega \left[\frac{L + (2R_{lamp} + R_f)R_f C_{ig}}{R_{lamp} + R_f} \right]}{\frac{1}{R_{lamp} + R_f} + j\omega C_{ig}}$$

$$= \frac{Z_o \left[1 - \omega_n^2 + j \frac{\omega_n}{Q_L} \right]}{\frac{Z_o}{R_{lamp} + R_f} + j\omega_n}$$

$$= |Z| e^{j\theta_{RUN}} \quad (3)$$

เมื่อ

$$\frac{|Z_T|}{Z_o} = \frac{\sqrt{[1 - \omega_n^2]^2 + \left[\frac{\omega_n}{Q_L}\right]^2}}{\sqrt{\left[\frac{Z_o}{R_{lamp} + R_f}\right]^2 + \omega_n^2}} \quad (4)$$

$$\theta_{RUN} = \arctan \left\{ \omega_n \times \frac{[Q_L(R_{lamp} + R_f)(\omega_n^2 - 1) + Z_o]}{Z_o Q_L [1 - \omega_n^2] + \omega_n^2 (R_{lamp} + R_f)} \right\} \quad (5)$$

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC_{ig}}} \quad \omega_r = \omega_o \sqrt{1 - \frac{1}{Q_L}} \quad \omega_n = \frac{\omega_o}{\omega_o}$$

$$Z_o = \omega_o L = \frac{1}{\omega_o C_{ig}} = \sqrt{\frac{L}{C_{ig}}}$$

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{L + (2R_{lamp} + R_f)R_f C_{ig}}{R_{lamp} + R_f} \times \omega_o \cong \frac{1}{Q_P} + \frac{1}{Q_S}$$

$$Q_P = \frac{R_{lamp} + R_f}{\sqrt{\frac{L}{C_{ig}}}} \quad Q_S = \frac{\sqrt{\frac{L}{C_{ig}}}}{2R_f}$$

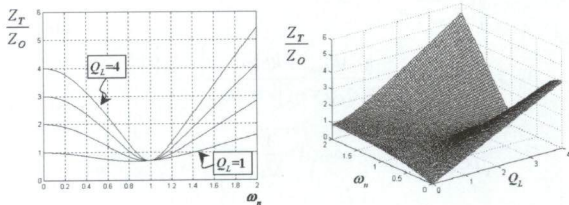
สมการฟังก์ชันโอนย้ายของแรงดันคร่อมหลอด ฟลูออเรสเซนต์ V_{lamp} กับแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ V_S ดังสมการที่ 6 จากสมการที่ 4, 5 และ 6 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $|Z_T|/Z_o$, θ^{RUN} และ V_{lamp}/V_S กับ ω_n สำหรับ Q_L ที่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0-4 ดังแสดงในรูปที่ 11, 12 และรูปที่ 13

$$\frac{V_{lamp}}{V_S}(j\omega) = \frac{R_{lamp} + j\omega R_f R_{lamp} C_{ig}}{R_{lamp} + R_f} \cdot \frac{1}{1 - \omega^2 LC_{ig} + j\omega \left(\frac{L + (2R_{lamp} + R_f) R_f C_{ig}}{R_{lamp} + R_f} \right)}$$

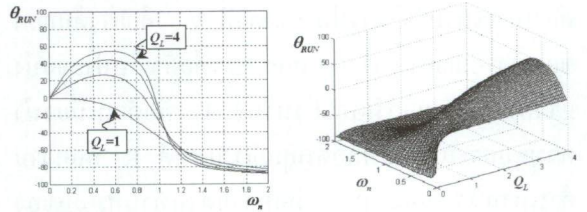
$$= \frac{R_{lamp}}{R_{lamp} + R_f} \times \left[\frac{1 + j\omega R_f C_{ig}}{1 - \omega_n^2 + j \frac{\omega_n}{Q_L}} \right] \quad (6)$$

5. การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

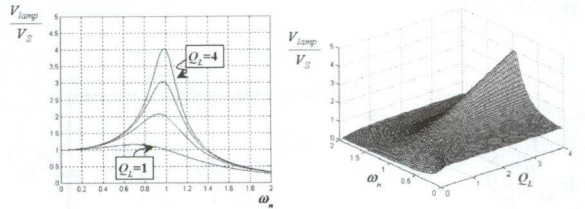
การออกแบบของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ จะพิจารณาข้อกำหนด ชิดจำกัด และพฤติกรรมการทำงานของ บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ร่วมกัน ข้อกำหนดการออกแบบ ประกอบด้วยคุณสมบัติของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ได้แก่ แรงดันไฟฟ้าค้ำเข้า และวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังที่ใช้ (power factor correction circuit) ส่วนคุณสมบัติของหลอด ได้แก่ R_f และกำลังออกเท่ากับพิกัดของหลอดชิดจำกัด การออกแบบประกอบด้วย แรงดันจุดหลอด (Ignition Voltage, V_{ig}) และมุมเฟสของกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ (Load current, I_L) ต้องล้าหลังแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ ทิ้งก่อนจุดหลอดให้ติดสว่างและ



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ของ Z_T กับ ω_n และ Q_L



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ของ θ^{RUN} กับ ω_n และ Q_L



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ของ V_{lamp}/V_S กับ ω_n และ Q_L

ขณะทำงานปกติ เพื่อให้สวิตช์เรโซแนนซ์เริ่มนำกระแสที่แรงดันศูนย์ และพฤติกรรมการทำงานของวงจรประกอบด้วย กระแสอุ่นไส้หลอดก่อนจุดหลอด (preheating current, I_{ph}) และความถี่การทำงานต้องมีค่าที่เหมาะสม เมื่อแทนค่ากำลังออกเท่ากับพิกัดลงในสมการที่ 6 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง L และ C_{ig} ดังสมการที่ 7

$$L = \frac{-b(C_{ig}) \pm \sqrt{b^2(C_{ig}) - 4a(C_{ig})k(C_{ig})}}{2a(C_{ig})} \quad (7)$$

เมื่อ

$$a(C_{ig}) = \omega^2 + (\omega^2 C_{ig} (R_{lamp} + R_f))^2$$

$$b(C_{ig}) = -2\omega^2 R_{lamp}^2 C_{ig} \quad (8)$$

$$k(C_{ig}) = (R_{lamp} + R_f)^2 + \omega^2 ((2R_{lamp} + R_f) R_f C_{ig})^2 - (R_{lamp}^2 + (\omega R_{lamp} R_f C_{ig})^2) \times \left| \frac{V_S}{V_{lamp}} \right|^2$$

: สำหรับข้อกำหนดกำลังด้านออก

$$a(C_{ig}) = \omega^4 C_{ig}^2$$

$$b(C_{ig}) = -(2C_{ig} \omega^2) \quad (9)$$

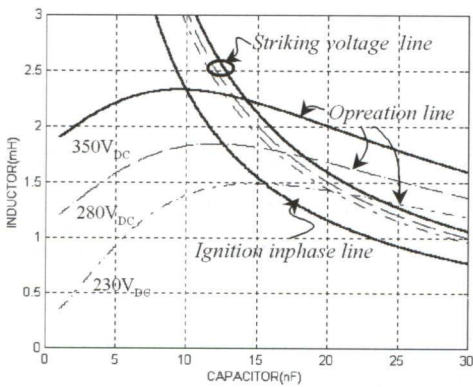
$$k(C_{ig}) = 1 + (2\omega R_f C_{ig})^2 - (1 + (\omega R_f C_{ig})^2) \times \left| \frac{V_S}{V_{ig}} \right|^2$$

: สำหรับขีดจำกัดแรงดันจุดหลอดเมื่อความต้านทานหลอดเป็นอนันต์

$$\omega L \geq \frac{1}{\omega C_{ig}} \quad (10)$$

: สำหรับขีดจำกัดของเฟสคอนจุดหลอด

รูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง L และ C_{ig} ตามเงื่อนไขต่างๆ ในสมการที่ 7-10 สำหรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเข้า 3 ค่า ที่ทำให้หลอดมีกำลังออกเท่ากับพิกัดสำหรับหลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาด 36W เมื่อทำงานทำงานร่วมกับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ให้กำลังออกที่พิกัดเท่ากับ 32W แรงดันจุดหลอด V_{ig} เท่ากับ 600V_{peak} และความสัมพันธ์ระหว่าง L และ C_{ig} ที่ทำให้ I_{ig} และ V_S มี เฟสตรงกัน ซึ่งจะไม่ขึ้นกับ V_{DC} จากรูปที่ 14 จะเห็นว่าต้องเลือกค่า L และ C_{ig} ที่อยู่ในเส้น operation line ตามค่าของ V_{DC} ที่กำหนด โดยเลือกได้เฉพาะค่าในเส้นที่อยู่ระหว่างเส้น ignition inphase line กับ constant open circuit voltage line ในบทความนี้ออกแบบสำหรับ V_{DC}³ ค่า แรงดันจุดหลอด V_{ig} เท่ากับ 800V_{peak} กำลังออกของหลอดฟลูออเรสเซนต์เท่ากับพิกัด กระแส I_{th} เท่ากับ 300-400 mA และมุมเฟสของ I_{ig} ล้าหลัง V_S และมุมเฟสของ I_L ล้าหลัง V_S มีค่ากว่า 30° ขณะทำงานปกติ จะได้ค่า L และ C_{ig} ดังแสดงในตารางที่ 1 จะเห็นว่าจำนวนเกณฑ์ที่ใช้พิจารณาเพื่อเลือกค่าอุปกรณ์จะมีมากกว่าจำนวนอุปกรณ์ที่ต้องเลือก เนื่องจากมีการกำหนดเกณฑ์ที่เป็นช่วงแทนที่จะเป็นค่าเดียวยกเว้นกำลังออกเท่ากับพิกัดและพบว่า Q_L ของวงจรโพลจะลดลงเมื่อ V_{DC} สูงขึ้น



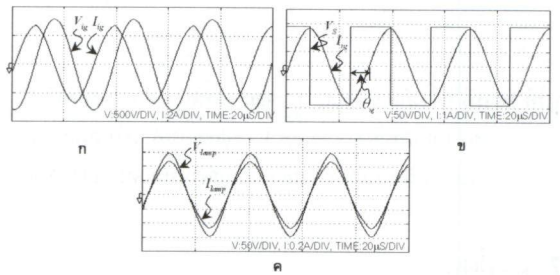
รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่าง L และ C_{ig} สำหรับ V_{DC} 3 ค่า

เมื่อจำลองการทำงานของวงจรที่มีค่าอุปกรณ์วงจรโพลตามที่ออกแบบไว้โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 1 สำหรับกรณี V_{DC} เท่ากับ 280V และ R_f เท่ากับ 2.5Ω

ความถี่การทำงาน 33 kHz ได้ผลจำลองการทำงานดังในรูปที่ 8 จะเห็นว่าค่าแรงดัน V_{ig} มีค่าเท่ากับ 795 V_{peak} แรงดัน V_{lamp} เท่ากับ 147 V_{peak} และ I_{lamp} เท่ากับ 425mA_{peak} และขนาดของมุมเฟสของกระแสออกล้าหลังแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ทั้งขณะก่อนจุดหลอดให้ติดสว่างและขณะทำงานปกติไม่น้อยกว่า 30°

ตารางที่ 1 ค่า L, C_{ig} และ Q_L สำหรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 3 ค่า

V _{DC} (V)	L(mH)	C _{ig} (nF)	Q _L
230	1.4	19	1.1
280	1.8	15	0.9
350	2.3	12	0.7



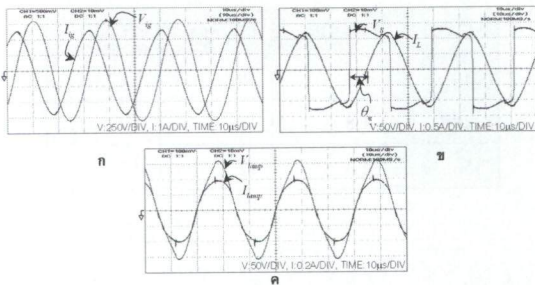
รูปที่ 15 (ก) แรงดันจุดหลอดและกระแสจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ (ข) แรงดันออกและกระแสออกอินเวอร์เตอร์ขณะจุดหลอด (ค) แรงดันคร่อมหลอดและกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์

6. ผลการทดลอง

การทดสอบวัดค่าตัวแปรจากบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างตามค่าที่ออกแบบไว้กับหลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาด 36W ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 20 โดยรูป ก เป็นรูปคลื่นของ V_{ig} กับ I_{ig} รูป ข เป็นมุมเฟสของ V_S กับ I_{ig} และรูป ค เป็นรูปคลื่นของ V_{Rlamp} กับ I_{Rlamp} ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองจริง จะเห็นว่าผลการคลาดเคลื่อนของ I_{lamp} และ V_{lamp} จะมากอันเป็นผลเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของหลอด และกระแส I_{th} ซึ่งมีลักษณะรูปคลื่นไม่ใช่ไซน์มีค่าประมาณ 250mA

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานและผลทดลองจริง

รายการ	ผลการจำลอง	ผลการทดลอง
$V_{ig}(V_{peak})$	795	800
$V_{lamp}(V_{peak})$	147	160
$I_{lamp}(mA_{peak})$	425	380
θ_{ig}	84	78.75



รูปที่ 16 (ก) แรงดัน V_{ig} และ I_{ig} ขณะจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์
 (ข) มุมเฟสของ V_s และ I_{ig} ขณะจุดหลอดให้ติดสว่าง
 (ค) แรงดันคร่อมหลอดและกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์

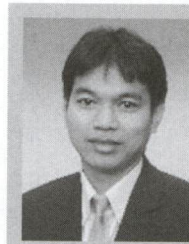
7. สรุปผล

บทความนี้แสดงวิธีการใช้ข้อกำหนดและขีดจำกัดของการออกแบบตลอดจนพฤติกรรมการทำงานเป็นเกณฑ์การเลือกค่าอุปกรณ์ ของวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ วิธีการดังกล่าวทำให้การเลือกค่าอุปกรณ์มีแนวทางที่ชัดเจนและเป็นระบบกว่าแนวทางการออกแบบที่ผ่านมา โดยที่จำนวนคุณสมบัติของบัลลาสต์ที่ใช้พิจารณาประกอบการเลือกค่าอุปกรณ์ของวงจรโหลดสามารถมีได้มากกว่าจำนวนตัวแปรของวงจร และแสดงให้เห็นว่าการคำนวณสมการที่ใช้ในการเลือกค่าอุปกรณ์โดยใช้วงจรสมมูลสำหรับความถี่หลักมูลของแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ รวมถึงการละเลยผลความไม่เป็นเชิงเส้นของหลอด ให้ผลไม่ต่างจากความจริงมากนัก แต่จะทำให้การวิเคราะห์และออกแบบทำได้ง่ายขึ้นมาก

บรรณานุกรม

- [1] Marian K. Kazimierzczuk, Dariusz Czarkowski. **Resonant Power Converters**.(n.p.): John Wiley and sons,Inc. , 1995.
- [2] J.R. Coaton, A.M. Marsden. **Lamp and Lighting** .(n.p.): John Wiley and sons,Inc., 1990.Thomas J. Ribarich, John J. Ribarich. "A New model for high-frequency electronic ballast design" . **Conf. Record of IEEE/IAS Annual Meeting** , 1997. pp 2334-2339.
- [3] Thomas J. Ribarich, John J. Ribarich. "A New procedure for high-frequency electronic ballast design" . **Conf. Record of IEEE/IAS Annual Meeting** ,1997.
- [4] Thomas J. Ribarich, John J. Ribarich. "A New control method for Dimmable high-frequency electronic ballasts" . **Conf. Record of IEEE/IAS Annual Meeting**, 1998.
- [5] Hesterman B.L., Poehlman T.M. "A novel parallel-resonant programmed start electronic ballast" . **Conf. Record of IEEE/IAS Annual Meeting** 1999, pp 249-255.
- [6] Thomas Ribarich. "A System Approach to Ballast IC Design" . **PCIM Europe Nuremburg**, Germany June 22-24, 1999.
- [7] Moo C.S., Cheng H.L., Chen H.N. and Yen H.C. "Designing dimmable electronic ballast with frequency control" . **APEC Annual meeting**, 1999, pp 727-733.
- [8] Chin S.Moo., Hung L. Cheng., Tsai F. Lin and Hau C. Yen. "Designing a dimmable electronic ballast with voltage control for fluorescent lamp" . **ISIE 1999**, pp 786-791.
- [9] Hammer, E.E., "Photocell Enhanced Technique for Measuring Electrode Starting Temperature in

- fluorescent lamps". **Plasma Science, ICOPS '99**, IEEE International Conference on , 1999, pp 329 -329
- [10] Hammer, E.E., "Compact light source performance in recessed type luminaires". **Industry Applications Conference. Thirty-Third IAS Annual Meeting.**, 1998, pp 2145 -2150 vol.3
- [11] Hammer, E.E. "Starting voltage characteristics of 40 W biaxial fluorescent lamp". **Industry Applications Society Annual Meeting**, 1988., Conference Record of the 1988 IEEE, 1988, pp 1835 -1841 vol.2
- [12] Hammer, E.E. "Effects of changing line voltage with various fluorescent systems". **Industry Applications**, IEEE Transactions on Volume: 24 4 , July-Aug. 1988 , pp 692 -699
- [13] Gluskin E. "A contribution to the theory of fluorescent lamp circuits". **IEEE Circuit and system**, 1988, pp 1385-1388.
- [14] Gluskin E. "On the theory of fluorescent lamp circuits". **IEE science**, Measurement and Technology 1990, pp 201-208.
- [15] Wu T.-F., Hung J.-C., Yu T.-H., "A Pspice model for fluorescent lamps operated at high frequencies". **IEEE IECON 21st International Conference**, 1995, pp 359-364.
- [16] Thomas J. Ribarich, John J. Ribarich. "A new high-frequency fluorescent lamp model". **IEEE IAS Annual meeting**, 1998, pp 2094-2098.
- [17] T. Liu, K.J. Tseng and D.M. Vilathgamuwa. "A Pspice model for the electrical characteristics of fluorescent lamp". **IEEE/IAS conference record**, 1998.
- [18] Mark Sun, Bryce L. Hesterman. "Pspice high-frequency dynamic fluorescent lamp model". **IEEE transaction on power electronics**, Vol.13 No.2, 1998.
- [19] Zhu P., Hui S.Y.R. "Modeling of a High-frequency operated fluorescent lamp in an electronic ballast environment". **IEE ISMTEV**, 1998, pp 111-116.
- [20] Onishi N., Shiomi T., Okude A. and Yamauchi T. "A Fluorescent lamp model for high frequency wide range dimming electronic ballast simulation". **IEEE APEC conference record** ,1999, pp 1001-1005.
- [21] Urs Mader. "Steady-state analysis of a voltage-fed inverter with second-order network and fluorescent lamp load". **IEE IEE ISMTEV**, 1998, pp 110-116.



ไพศาล นุญเจียม : จบการศึกษาปริญญาตรี และปริญญาโท ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปี พ.ศ. 2539 และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปี พ.ศ. 2543 ตามลำดับ ในปี 2540 เคยไปฝึกอบรบทางด้าน วิศวกรรมระบบวัดคุม ณ สถาบันเทคโนโลยีแห่งรัฐอัลเบอร์ต้าคอนเนตทิคัต เมืองแฮ็คมอนด์ รัฐอัลเบอร์ต้า ประเทศแคนาดา และในปี 2544-2546 เคยเป็นนักวิจัย ณ สถาบันสำหรับอิเล็กทรอนิกส์กำลังและระบบการขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า โรงเรียนเทคนิคขั้นสูงแห่งรัฐนอร์ทไทรท์เวสฟาลเลนส์ เมืองอาเก้น รัฐนอร์ทไทรท์เวสฟาลเลนส์ ประเทศเยอรมันนี โดยทำวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมด้วยระบบดิจิทัลของคอนเวอร์เตอร์สำหรับไฟฟ้าแรงดันสูง ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2539 เป็นอาจารย์อยู่ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โดยทำงานสอนในกลุ่มวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลังและวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ปัจจุบัน นายไพศาล เป็นสมาชิกสภาวิศวกร สมาชิกสถาบันวิศวกรรมไฟฟ้าและวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์แห่งประเทศไทยและกำลังเรียนปริญญาเอกทางด้านระบบไฟฟ้ากำลัง ณ สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย งานวิจัยที่สนใจคือ ระบบตรวจสอบคุณภาพไฟฟ้าและปรับปรุงระบบ พลังงานไฟฟ้าจากลมหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงความถี่สูง