สำนักงานวิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

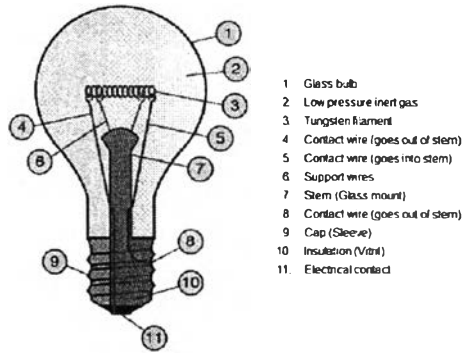
บทที่ 2

การวิเคราะห์พฤติกรรมของการเกิดไฟกะพริบ จากหลอดไส้และหลอดฟลูออเรสเซนต์

ในบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์พฤติกรรมของการเกิดไฟกะพริบจากหลอดไส้และหลอดฟลูออเรสเซนต์ โดยจะประกอบด้วย หลักการทำงานของหลอดไส้ ผลตอบสนองของหลอดไส้ภายใต้แรงดันไฟกะพริบ หลักการทำงานหลอดฟลูออเรสเซนต์ ผลตอบสนองของหลอดฟลูออเรสเซนต์ภายใต้แรงดันที่ผิดเพี้ยน และผลกระทบของหลอดไฟของผู้อยู่อาศัยภายใต้แรงดันไฟกะพริบ ตามลำดับ

2.1 หลักการทำงานของหลอดไส้ [4]

หลอดไส้เป็นหลอดที่ให้แสงสว่างได้โดยการป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านไส้หลอด แล้วทำให้เกิดพลังงานความร้อนที่ไส้หลอด หลังจากป้อนกระแสไฟฟ้าถึงระดับพลังงานความร้อนระดับหนึ่งไส้หลอดจะปล่อยแสงสว่างออกมา ซึ่งมีอุณหภูมิสูงประมาณ 3000 เควิน โดยขึ้นอยู่กับชนิดของไส้หลอด รูปร่างของหลอด ระดับกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป โดยทั่วไปค่าความยาวคลื่นสูงสุดของแสงที่ตาคนเรามองเห็นมีความยาวคลื่นใกล้เคียงกับแสงอินฟาเรด โครงสร้างของหลอดไส้แสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของหลอดไส้

จากรูปที่ 2.1 ลังเกตได้ว่าโครงสร้างของหลอดไส้มีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้ คือ กระเปาะแก้ว ก๊าซที่บรรจุ ไส้หลอด ตัวพยุงไส้หลอด คอหลอดและขั้วหลอด

1. กระเปาะแก้ว (Glass bulb) สร้างจากแก้วอ่อน ซึ่งขึ้นรูปโดยการหลอมเหลวแก้วหรือทำให้แก้วร้อน จากนั้น จึงเป่าหรือขึ้นรูปเพื่อให้ได้กระเปาะแก้วที่สมบูรณ์

หอสมุดกลาง สำนักงานวิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. ก๊าซที่บรรจุในสมัยก่อน มีการใช้ไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นก๊าซที่บรรจุในหลอดไส้ เพื่อป้องกันการอาร์คที่ไส้หลอด ต่อมาพบว่าถ้าต้องการลดการสูญเสียความร้อนจากไส้หลอดให้ใช้ก๊าซเฉื่อย เช่น อาร์กอน แต่อาร์กอนบริสุทธิ์ทำให้เกิดแสงเรืองรอบไส้หลอดซึ่งทำให้กระเปาะแก้วดำ เพื่อแก้ปัญหานี้ จึงมักใช้ก๊าซผสมเช่น อาร์กอน 85% กับไนโตรเจน 15% บางครั้งจะใช้คริปตอนแทนอาร์กอนเพราะมีการนำความร้อนต่ำกว่าแต่คริปตอนมีราคาสูงกว่า

3. ไส้หลอด (Filament) ของหลอดไส้ทำจากทังสเตน เพราะทังสเตนมีประสิทธิภาพสูงในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานแสง กล่าวคือ ทังสเตนมีจุดหลอมเหลวสูงทำให้ไส้หลอดปล่อยแสงได้มาก (ไส้หลอดมีอุณหภูมิสูงขึ้นก็ยิ่งให้แสงออกมาได้มาก)

นอกจากนี้ ทังสเตนยังยืดอายุการใช้งานของไส้หลอดให้นานขึ้น เนื่องจากจุดหลอมเหลวของทังสเตนสูงกว่าอุณหภูมิขณะใช้งาน กล่าวคือจุดหลอมเหลวของทังสเตนอยู่ที่ประมาณ 3650 เควิน แต่ไส้หลอดที่ทำจากทังสเตนในหลอดไฟฟ้าที่ใช้กันทั่วไป จะทำงานที่อุณหภูมิ 2800 เควิน ถึง 3000 เควิน

4. ลวดพยุงไส้หลอด (Support wires) ไส้หลอดได้รับการพยุงเอาไว้ เพื่อไม่ให้หย่อนหรือผิดรูปร่างด้วยลวดพยุงไส้หลอดที่ฝังตัวอยู่ที่แก้วบัตตอน (Button) ลวดพยุงไส้หลอดทำจากโมลิบดีนัม (Molybdenum; โลหะชนิดหนึ่งสีขาวแข็งคล้ายเหล็กซึ่งทนความร้อนได้ดี) เพื่อลดการสูญเสียความร้อน

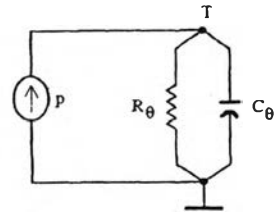
5. คอหลอดและขั้วหลอด คอหลอดประกอบด้วย แก้วหุ้มลวดนำไฟฟ้า แผ่นหักเหความร้อน และท่อไล่อากาศออก หลอดไฟขนาดกำลังไฟฟ้าสูงบางหลอดจะมีแผ่นหักเหความร้อนเพื่อลดการไหลเวียนของก๊าซร้อน ซึ่งเข้าไปในแก้วหุ้มลวดนำไฟฟ้าและบริเวณขั้วหลอด ท่อไล่อากาศออกที่บรรจบกับแก้วหุ้มลวดนำไฟฟ้าใช้สำหรับไล่อากาศออกและบรรจุก๊าซเข้าไปยังหลอดไฟก่อนปิดผนึงขณะทำการผลิตหลอดไฟ

ขั้วหลอดทำด้วยทองเหลืองหรืออลูมิเนียม ขั้วหลอดทำหน้าที่ต่อวงจรของไส้หลอดให้ครบวงจร เพราะลวดนำไฟฟ้าเส้นหนึ่งจะเชื่อมติดกับด้านหนึ่งของขั้วหลอด ส่วนอีกเส้นหนึ่งจะเชื่อมติดกับจุดเชื่อมที่ศูนย์กลางของขั้วหลอด

2.2 ผลตอบสนองของหลอดไส้ภายใต้แรงดันไฟกะพริบ [5]

ไฟกะพริบของหลอดไส้เกิดขึ้นจากซับฮาร์มอนิก (Subharmonics) และอินเตอร์ฮาร์มอนิก (Interharmonics) ของแรงดันไซโคลคอนเวอร์เตอร์ (Cycloconverter) เครื่องเชื่อม (Welders) เตาหลอม (Arc furnaces)

วงจรสมมูลของหลอดไส้แสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของหลอดไส้

ไส้หลอดจะมีแบบจำลองเป็นตัวความต้านทานที่แปรผันตามอุณหภูมิ R_θ ที่ต่อขนานกับตัวเก็บประจุที่แปรผันตามอุณหภูมิ C_θ ซึ่งอุณหภูมิของไส้หลอดที่สูงขึ้นจะเท่ากับแรงดันที่ตกคร่อมตัวความต้านทาน R_θ และแหล่งกำเนิดที่จ่ายกระแสให้โหลด R_θ และ C_θ จะมีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้า $p = v^2 / R$ โดยที่ v เป็นค่าแรงดันของหลอดไฟและ R เป็นค่าความต้านทานทั้งหมดของไส้หลอด ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองของหลอดไส้จะสมมติให้ค่าความต้านทานทั้งหมดของไส้หลอด R มีค่าคงที่

การวิเคราะห์ผลตอบสนองของหลอดไส้สามารถแบ่งออกเป็น 5 ข้อ ได้แก่

1. ผลตอบสนองของหลอดไส้เมื่อได้รับแรงดันรูปคลื่นไซน์

ฟลักซ์ส่องสว่าง (Luminous flux) ของหลอดไส้มีค่าเท่ากับ

$$\lambda = \lambda_0 - m\Delta T \cos(2\omega t - \beta_2) \tag{2.1}$$

โดยที่ λ_0 เป็นค่าเฉลี่ยของฟลักซ์ส่องสว่าง

$m\Delta T \cos(2\omega t - \beta_2)$ เป็นค่าฟลักซ์ส่องสว่างเมื่ออุณหภูมิของไส้หลอดเพิ่มขึ้น

$\tan \beta_2 = 2\omega\tau_\vartheta$ เมื่อ τ_ϑ เป็นค่าคงที่เวลาของไส้หลอด

ดังนั้นผลตอบสนองของหลอดไส้เมื่อได้รับแรงดันรูปคลื่นไซน์จะพบว่าไม่สามารถมองเห็นไฟกะพริบได้ เพราะจากสมการที่ (2.1) ในเทอมหลังมีความถี่ 120 Hz (ความถี่หลักมูลเท่ากับ 60 Hz) ซึ่งไม่ใช่อินเตอร์ฮาร์มอนิก

2. ผลตอบสนองของหลอดไส้เมื่อได้รับแรงดันรูปคลื่นนอนไซน์

แรงดันของรูปคลื่นนอนไซน์ประกอบด้วย 4 องค์ประกอบคือ 1.รูปคลื่นแรงดันที่ความถี่หลักมูล 2.รูปคลื่นแรงดันที่มีองค์ประกอบฮาร์มอนิก 3.รูปคลื่นแรงดันที่มีองค์ประกอบอินเตอร์ฮาร์มอนิก (คูณด้วยตัวคูณที่มีค่ามากกว่า 1 และไม่เป็นจำนวนเต็ม) 4.รูปคลื่นแรงดันที่มีองค์ประกอบซับฮาร์มอนิก (คูณด้วยตัวคูณที่มีค่าน้อยกว่า 1)

ฟลักซ์ส่องสว่างของหลอดไส้ มีค่าเท่ากับ

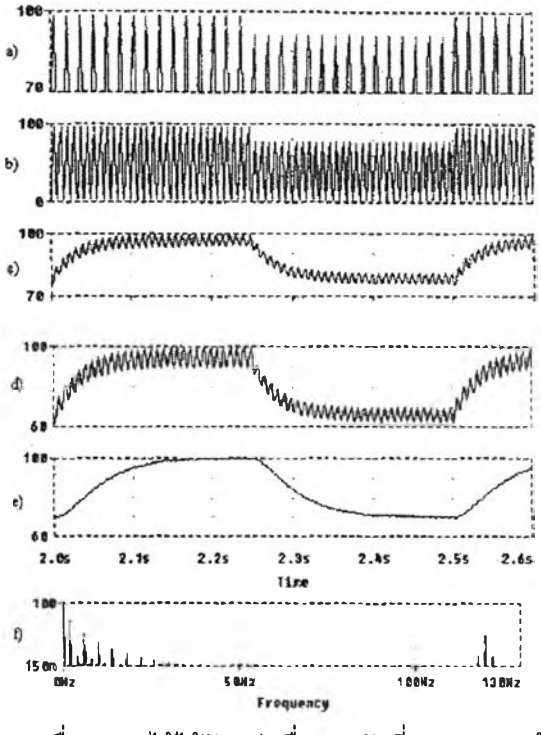
$$\lambda = \lambda_0 + \lambda_t \tag{2.2}$$

โดยที่ λ_0 เป็นค่าเฉลี่ยของฟลักซ์ส่องสว่าง และ $\lambda_t = m(T_{IH} + T_{SH})$ เป็นตัวแปรเวลาที่มีองค์ประกอบอินเตอร์ฮาร์มอนิกและองค์ประกอบซับฮาร์มอนิก ถ้าตัวแปรเวลามีค่ามากจะทำให้เกิดไฟกะพริบได้ เพราะมีองค์ประกอบอินเตอร์ฮาร์มอนิกและองค์ประกอบซับฮาร์มอนิกรวมอยู่ด้วย

ผลลัพธ์จากการทดสอบพบว่ารูปคลื่นแรงดันไฟกะพริบจะประกอบด้วยฮาร์มอนิกที่ไม่ใช่จำนวนเต็มทั้งคูณด้วยตัวคูณที่มีค่ามากกว่า 1(อินเตอร์ฮาร์มอนิก) และน้อยกว่า 1 (ซับฮาร์มอนิก)

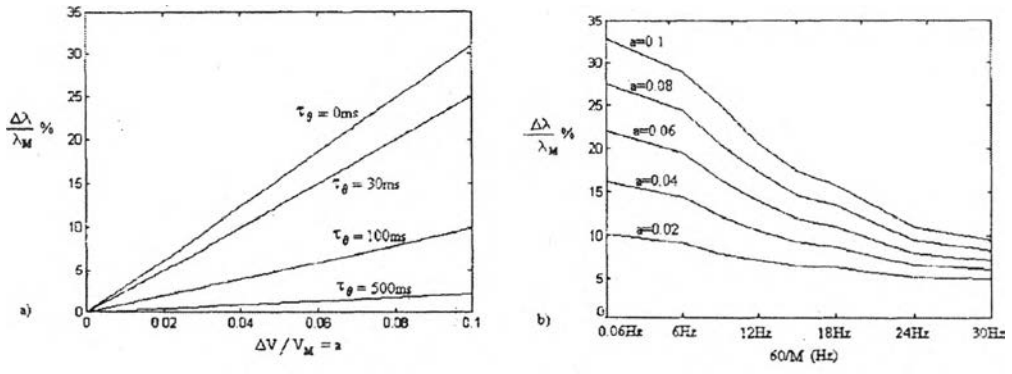
3. ผลตอบสนองของหลอดไส้เมื่อได้รับแรงดันไซน์ที่ถูกมอดูเลตด้วยรูปคลื่นสี่เหลี่ยม

เมื่อให้คอมพิวเตอร์จำลองผลที่ความถี่ไฟกะพริบเท่ากับ 2 Hz จะได้ผลการจำลองดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การจำลองเมื่อหลอดไส้ได้รับรูปคลื่นแรงดันที่ถูกมอดูเลตด้วยรูปคลื่นสี่เหลี่ยม
a) แรงดัน b) กำลังไฟฟ้าของไส้หลอด P c) อุณหภูมิ T d) ฟลักซ์ส่องสว่าง λ
e) ฟลักซ์ส่องสว่างที่ตามองเห็น f) ฟูริเยร์ของสเปกตรัม λ

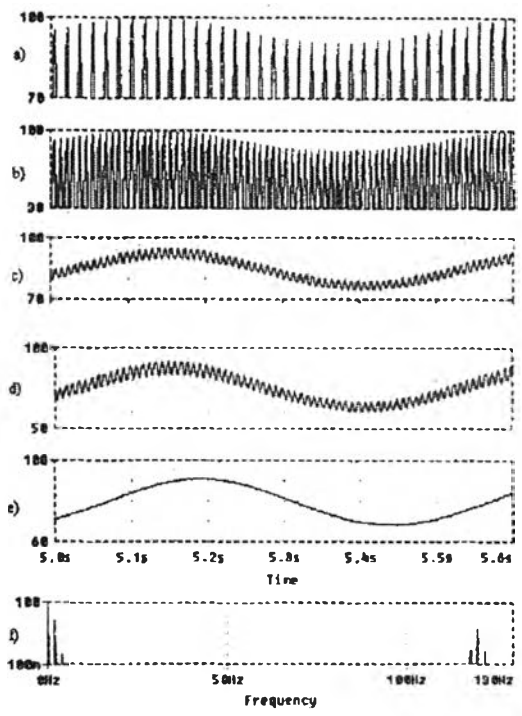
การคำนวนความสัมพันธ์ของการกระเพื่อมของฟลักซ์ส่องสว่าง $\Delta\lambda / \lambda_M$ แสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งจะพบว่าเมื่อค่าคงที่เวลาของอุณหภูมิ (Thermal time constant) สูงขึ้นจะทำให้ลดการเกิดไฟกะพริบ



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ส่องสว่าง
เมื่อหลอดไส้ได้รับแรงดันรูปคลื่นไซน์ที่ถูกมอดูเลตด้วยรูปคลื่นสี่เหลี่ยม
a) ผลของหลอดไส้เมื่อมีแรงดันกระเพื่อมกับค่าคงที่เวลาของอุณหภูมิ
b) ผลของความถี่ไฟกะพริบกับการกระเพื่อมของแรงดัน

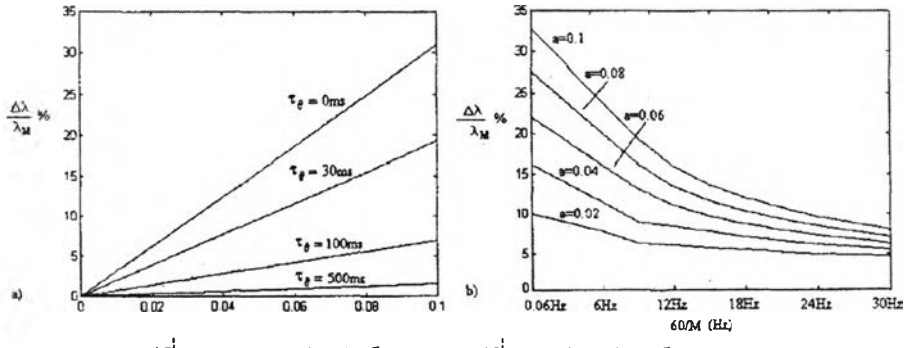
4. ผลตอบสนองของหลอดไส้เมื่อได้รับแรงดันรูปคลื่นไซน์ที่ถูกมอดูเลตด้วยรูปคลื่นไซน์

เมื่อตั้งค่าให้คอมพิวเตอร์จำลองผลที่ความถี่ไฟกะพริบเท่ากับ 2 Hz จะได้ผลการจำลองดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การจำลองผลเมื่อหลอดไส้ได้รับแรงดันรูปคลื่นไซน์ที่ถูกมอดูเลตด้วยรูปคลื่นไซน์
a) แรงดัน b) กำลังไฟฟ้าของไส้หลอด P c) อุณหภูมิ T d) ฟลักซ์ส่องสว่าง λ
e) ฟลักซ์ส่องสว่างที่ตามองเห็น f) ฟูริเยร์ของสเปกตรัม λ

การคำนวนความสัมพันธ์ของการกระเพื่อมของฟลักซ์ส่องสว่าง $\Delta\lambda / \lambda_M$ แสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งจะพบว่าเมื่อค่าคงที่เวลาของอุณหภูมิ (Thermal time constant) สูงขึ้นจะทำให้ลดการเกิดไฟกะพริบ



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ส่องสว่าง
เมื่อหลอดไส้ได้รับแรงดันรูปคลื่นไซน์ที่ถูกมอดูเลตด้วยรูปคลื่นไซน์
a) ผลของหลอดไส้เมื่อมีแรงดันกระเพื่อมกับค่าคงที่เวลาของอุณหภูมิ
b) ผลของความถี่ไฟกะพริบกับการกระเพื่อมของแรงดัน

เมื่อเปรียบเทียบสเปกตรัมในรูปที่ 2.3f และรูปที่ 2.5f จะพบว่าการมอดูเลตรูปคลื่นสี่เหลี่ยมจะมีพลังงานมากกว่าการมอดูเลตด้วยรูปคลื่นไซน์

5. ผลตอบสนองของหลอดไส้เมื่อได้รับแรงดันที่มีอินเตอร์ฮาร์มอนิก 2 ส่วนหรือซับฮาร์มอนิกที่ใกล้เคียงกัน

สมการแรงดันอาร์เอ็มเอสของอินเตอร์ฮาร์มอนิกที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาแสดงในสมการที่ (2.3) และรูปคลื่นแสดงในรูปที่ 2.7 a)

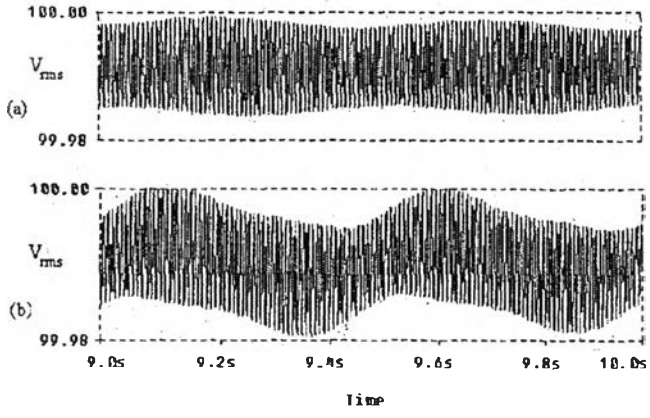
$$v = 100\sin(2\pi 60t) + 5\sin(2\pi 182t) \tag{2.3}$$

ในกรณีนี้ไม่สามารถสังเกตไฟกะพริบได้ด้วยตา

สมการแรงดันของอินเตอร์ฮาร์มอนิกที่มี 2 ส่วน และมีรูปคลื่นแสดงในรูปที่ 2.7 b)

$$v = 100\sin(2\pi 60t) + 5\sin(2\pi 182t) + 5\sin(2\pi 184t) \tag{2.4}$$

ในกรณีนี้สามารถสังเกตไฟกะพริบที่ความถี่ 2 Hz ได้



รูปที่ 2.7 แรงดันอาร์เอ็มเอสที่มีอินเตอร์ฮาร์มอนิก
a) มอดูเลตที่ความถี่ 182 Hz b) มอดูเลตที่ความถี่ 182 Hz และ 184 Hz

ดังนั้นซับฮาร์มอนิกหรืออินเตอร์ฮาร์มอนิกสามารถทำให้เกิดไฟกะพริบได้ และผลตอบสนองตา - สมองต่อไฟกะพริบไม่เพียงแต่ขึ้นกับความถี่ของไฟกะพริบและแรงดันไฟกะพริบยังขึ้นกับรูปคลื่นที่ใช้ในการมอดูเลตด้วย ค่า ΔV ของการมอดูเลตรูปคลื่นไซน์จะมีไฟกะพริบน้อยกว่าการมอดูเลตรูปคลื่นสี่เหลี่ยม

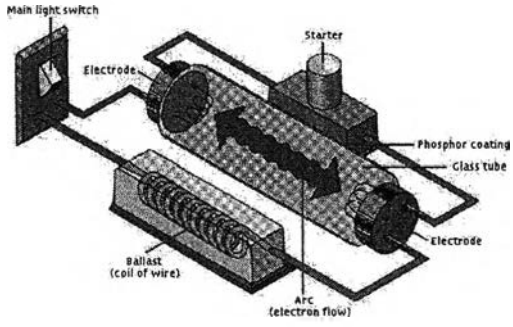
2.3 หลักการทำงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์ [6]

หลอดฟลูออเรสเซนต์ เป็นหลอดที่ต้องอาศัยการอุ่นไส้อิเล็กโทรด โดยใช้เวลาประมาณ 2 ถึง 3 วินาที หลอดจึงจะสว่าง ดังนั้น จึงต้องใช้อุปกรณ์เสริมทำงานร่วมกับหลอดชนิดนี้ อุปกรณ์เสริม คือ ตัวเริ่มสตาร์ตหรือสตาร์เตอร์ (Starter) และบัลลาสต์(Ballast)

สตาร์ทเตอร์ทำหน้าที่ต่อวงจรระหว่างไส้หลอดทั้งสองด้านในช่วงเริ่มต้น และเปิดวงจรออกเมื่อไส้หลอดมีอุณหภูมิสูงพอ สตาร์เตอร์ที่นิยมใช้เป็นสตาร์เตอร์แบบคายประจุเรืองแสง (Glow discharge starter) สตาร์เตอร์แบบนี้ประกอบด้วย ตัวเก็บประจุ (Capacitor) และกระเปาะแก้ว (Glass bulb) ที่มีสวิทช์โลหะคู่ (Bimetal switch; ประกอบด้วยหน้าสัมผัสที่อยู่กับที่และหน้าสัมผัสที่เคลื่อนที่) และมีก๊าซอาร์กอนบรรจุอยู่ภายใน

บัลลาสต์ทำหน้าที่สร้างแรงดันไฟฟ้าสูงตกคร่อมหลอดไฟและควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่โดยไม่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านหลอดมากเกินไป บัลลาสต์พื้นฐานทำด้วยแกนเหล็กแผ่นบางที่มีลวดตัวนำพันอยู่

วงจรพื้นฐานของหลอดฟลูออเรสเซนต์ เป็นดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 วงจรพื้นฐานของหลอดฟลูออเรสเซนต์

โดยหลักการแล้วหลอดฟลูออเรสเซนต์สามารถทำงานได้โดยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและการเรืองแสงที่ปราศจากการปลดปล่อยความร้อน หลอดฟลูออเรสเซนต์จะประกอบด้วยเส้นลวดที่ส่วนปลายของหลอด และวัสดุเรืองแสงจะถูกเคลือบอยู่ที่ผิวแก้วด้านในของหลอด ภายในหลอดจะมีสภาพสูญญากาศและมีการบรรจุก๊าซบางชนิดเข้าไปในปริมาณเล็กน้อย ได้แก่ ไอปรอทและก๊าซอาร์กอน

เมื่อเปิดหลอดฟลูออเรสเซนต์ กระแสจะอยู่ที่ขั้วทั้งสองของหลอด จากนั้นจะมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากด้านหนึ่ง (Cathode) สู่อีกด้านหนึ่ง (Anode) เกิดการกระตุ้นให้ก๊าซอาร์กอนเข้าสู่สถานะพลาสมา ซึ่งจะไปกระตุ้นอะตอมของปรอทต่อไปตามลำดับ ทำให้ปรอท

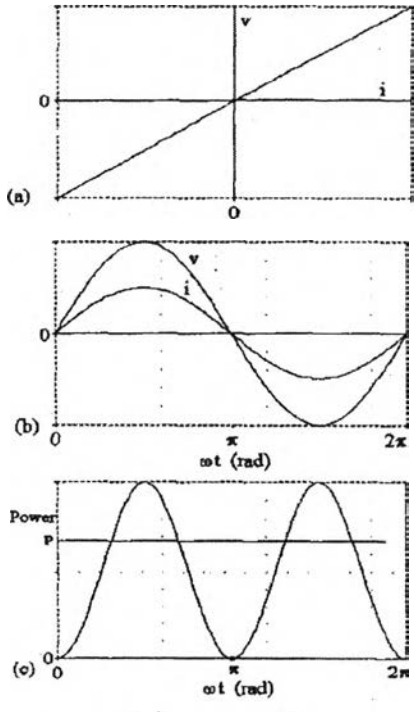
เปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นก๊าซ ในที่สุดอิเล็กตรอนและอะตอมที่มีประจุบางส่วนจะชนกับอะตอมของไอปรอท การชนกันดังกล่าวจะทำให้อิเล็กตรอนในอะตอมเหล่านั้นถูกกระตุ้นให้เข้าสู่ระดับพลังงานที่สูงขึ้น และเมื่ออิเล็กตรอนกลับมาอยู่ในระดับพลังงานเดิม จะมีการปล่อยโฟตอนของแสงออกมาในช่วงอัลตราไวโอเลต (254 nm) ออกมา ซึ่งเป็นช่วงคลื่นแสงที่ตาของคนเราสามารถมองเห็นได้ กระบวนการหลอดฟลูออเรสเซนต์นี้เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างวัสดุเรืองแสงที่เคลือบไว้ภายในหลอดกับโฟตอนของแสง แล้วมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานออกมาในรูปสเปกตรัมของแสงในช่วงต่าง ๆ

2.4 ผลตอบสนองของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้บัลลาสต์แกนเหล็กภายใต้แรงดันที่ผิดเพี้ยน [7]

หลอดฟลูออเรสเซนต์จะปล่อยฟลักซ์ส่องสว่างที่มีความแตกต่างจากหลอดไส้ หลอดไส้โดยใช้กระบวนการ Joule-heating และหลอดไส้จะมีคุณลักษณะของ v/i เป็นเส้นตรง แสดงในรูปที่ 2.9

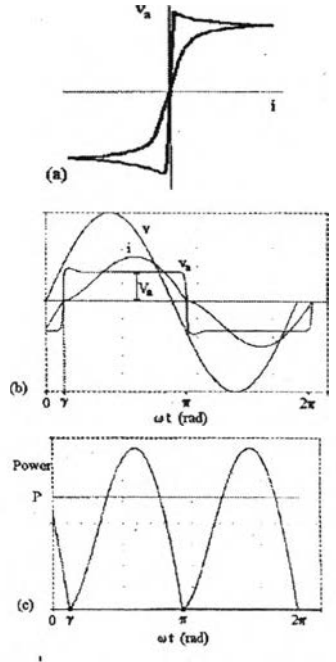
เมื่อรวมความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกทั้งหมดของแรงดัน $THD_v < 0.1\%$ และค่าแรงดันอาร์เอ็มเอสคงที่ (Vrms) จะทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของไส้หลอดจะเป็นสัดส่วนกับค่าแรงดันอาร์เอ็มเอสยกกำลังสอง ซึ่งค่าแรงดันที่ผิดเพี้ยนก็ไม่ส่งผลกระทบต่อฟลักซ์ส่องสว่าง ไฟกะพริบสามารถเกิดขึ้นได้กับหลอดไส้ถ้าค่าความถี่น้อยกว่า 30 Hz

หลอดฟลูออเรสเซนต์จะเกี่ยวกับการดิสชาร์จของหลอดและเป็นการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานแสงซึ่งใช้การถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานจลน์ โดยการเคลื่อนที่ของอิเลกตรอนและไอออน คุณลักษณะของแรงดันอาร์ค v_a กับกระแสของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ทำงานที่ความถี่ 60 Hz จะมีลักษณะไม่เป็นเส้นตรงซึ่งแสดงในรูปที่ 2.10 กำลังไฟฟ้าชั่วขณะจะเท่ากับ $p = v_a i$ ค่าแรงดันอาร์ค v_a เกือบจะคงที่ในช่วงแต่ละครึ่งไซเคิลของรูปคลื่นกระแสในรูปที่ 2.10b ค่าแรงดันอาร์คขึ้นกับรูปร่างของหลอดฟลูออเรสเซนต์ (ความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลาง) และคุณสมบัติทางกายภาพของพลาสมา (ชนิดของก๊าซและความดัน)



รูปที่ 2.9 หลอดไส้

a) คุณลักษณะ v/i b) รูปคลื่น v, i c) กำลังไฟฟ้าชั่วขณะ



รูปที่ 2.10 หลอดฟลูออเรสเซนต์

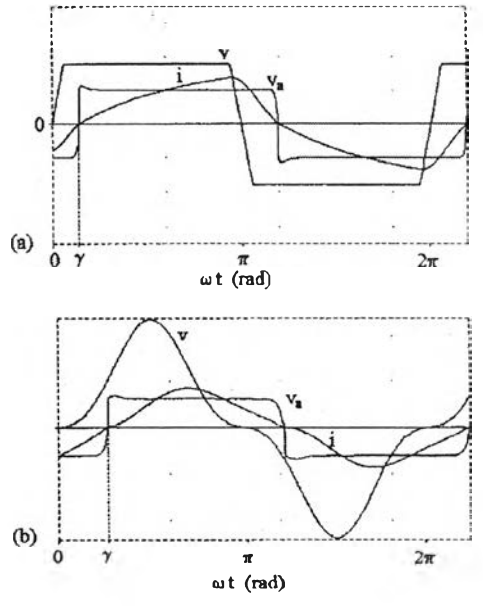
a) คุณลักษณะ v_a/i b) รูปคลื่น v, v_a, i c) กำลังไฟฟ้าชั่วขณะ

กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่เกิดในหลอดในรูปที่ 2.10c สามารถหาได้จากสมการที่ (2.5)

$$p = \frac{1}{\pi} \int_{\gamma}^{\pi+\gamma} v_a i d(\omega t) \tag{2.5}$$

โดยที่ γ เป็นมุม Ignition โดยมุม γ ขึ้นกับรูปคลื่น ขนาดของแรงดันที่จ่ายและความเข้มของกระแสไฟฟ้า ถ้าค่ามุม γ มีค่ามากจะทำให้รูปคลื่นกระไฟฟ้าเล็กลง

สำหรับรูปคลื่นแรงดันอาร์เอ็มเอสที่มีรูปร่างแบนราบในรูปที่ 2.11a จะให้ค่ามุม γ น้อยและมีรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าจะใหญ่กว่าเมื่อรูปคลื่นแรงดันเป็นรูประฆังในรูป 2.11b ฟลักซ์ส่องสว่างที่สร้างโดยหลอดฟลูออเรสเซนต์ขึ้นกับกำลังไฟฟ้า P และมุม γ ด้วย



รูปที่ 2.11 ผลของความผิดเพี้ยนแรงดันกับมุม γ และกระแส

a) รูปคลื่นแรงดันแบบแบนราบ

b) รูปคลื่นแรงดันแบบระฆัง

ดังนั้นไฟกะพริบสามารถเกิดได้จาก

1. การจ่ายแรงดันที่มีไฟกะพริบ เช่น รูปคลื่นที่ถูกมอดูเลตด้วยรูปคลื่นสี่เหลี่ยม หรือการเกิดแรงดันตกหรือเกินซึ่งเกิดได้จากการเปิด/ปิดโหลดซ้ำๆ ทำให้ส่งผลต่อขนาดของแรงดัน

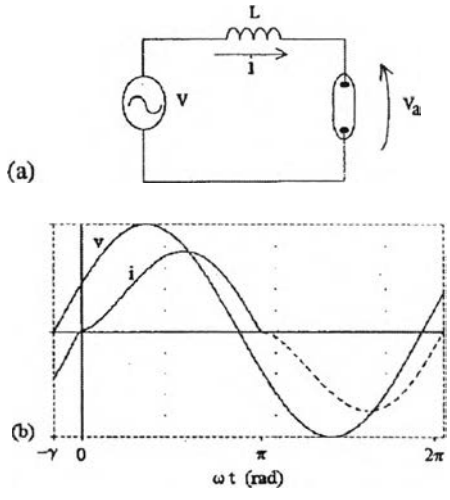
2. การกระเพื่อมของรูปคลื่นแรงดันสาเหตุจากอาร์มอนิกที่ไม่ใช่จำนวนเต็ม

ความเฉื่อยของอุณหภูมิของหลอดไส้จะช่วยลดการกระเพื่อมของอุณหภูมิของไส้หลอดได้เมื่อได้รับแรงดันกระเพื่อม หลอดไส้มีค่าคงที่เวลาของอุณหภูมิในช่วง 20 ถึง 150 วินาที หลอดฟลูออเรสเซนต์จะมีค่าคงที่เวลาต่ำ น้อยกว่า 5 วินาที

บัลลาสต์ของหลอดฟลูออเรสเซนต์จะมีความสามารถในการเก็บพลังงานและทำงานได้เมื่อเกิดแรงดันตกซึ่งจะไม่เห็นไฟกะพริบ แบบจำลองบัลลาสต์ของหลอดไฟจะทำงานที่ความถี่เกิน 20 kHz และคุณลักษณะ v_a / i เกือบเป็นเส้นตรง

แรงดันที่มีฮาร์มอนิกที่ความถี่ 180 Hz จะไม่เกิดไฟกะพริบเพราะรูปคลื่นแรงดันยังคงเหมือนทุกๆ ครึ่งไซเคิล ดังนั้นฮาร์มอนิกที่เป็นจำนวนเต็มเท่าจะไม่เกิดไฟกะพริบ ถ้าเป็นฮาร์มอนิกที่ไม่ใช่จำนวนเต็มเท่าเช่นที่ความถี่ 187 Hz จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องทุก ๆ ครึ่งไซเคิล การเปลี่ยนแปลงจะไม่ส่งผลต่อหลอดไส้แต่จะส่งผลต่อหลอดฟลูออเรสเซนต์

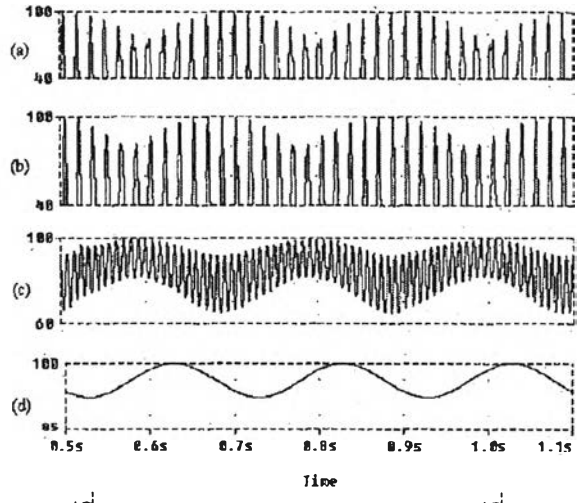
วงจรที่ใช้เป็นแบบจำลองหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้บัลลาสต์แกนเหล็กแสดงในรูปที่ 2.12 ถ้าสมมติให้แรงดันที่จ่ายเป็นรูปคลื่นไซน์และแรงดันอาร์ค V_a มีค่าคงที่



รูปที่ 2.12 หลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้บัลลาสต์แกนเหล็ก
a) วงจร b) รูปคลื่นแรงดันและกระแส

รูปที่ 2.13 แสดงคุณลักษณะรูปคลื่นของวงจรโดยจ่ายแรงดันตามสมการที่ (2.6) ซึ่งสามารถสังเกตว่ามีความถี่ไฟกะพริบที่ความถี่ 5 Hz

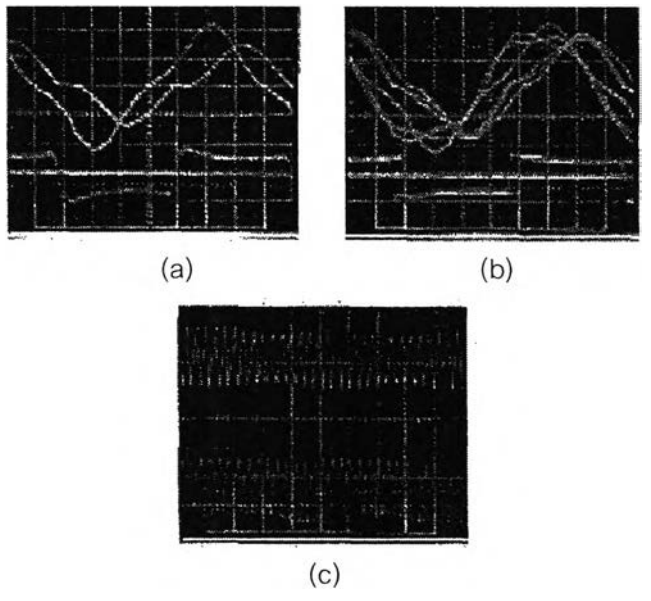
$$v = 100\sin(2\pi 60t) - 20\sin(2\pi 185t) \qquad (2.6)$$



รูปที่ 2.13 ผลตอบสนองของวงจรตามรูปที่ 2.12

a) แรงดันที่จ่าย b) กระแสของหลอดไฟ c) กำลังไฟฟ้าชั่วขณะ d) ฟลักส์ส่องสว่างที่ตามองเห็น

จากการจำลองและใช้ทฤษฎีในการวิเคราะห์ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 2.14 โดยสมมติว่าในการวิเคราะห์หลอดฟลูออเรสเซนต์จะให้ค่าแรงดันอาร์คคงที่ แสดงในรูปที่ 2.14a เมื่อมีอินเตอร์ฮาร์มอนิกที่ความถี่ 185 Hz จะทำให้เกิดมุม γ แสดงในรูปที่ 2.14b ผลตอบสนองของไฟกะพริบแสดงในรูปที่ 2.14c



รูปที่ 2.14 การทดสอบของหลอดฟลูออเรสเซนต์

a) รูปคลื่นแรงดันและกระแส b) เมื่อป้อนอินเตอร์ฮาร์มอนิกที่ความถี่ 185 Hz ทำให้เกิดมุม γ

c) ผลตอบสนองของไฟกะพริบ

ความแตกต่างระหว่างผลตอบสนองของหลอดไส้กับหลอดฟลูออเรสเซนต์เมื่อแรงดันเกิดการกระเพื่อม ถ้าค่าแรงดันอาร์เอ็มเอสมีค่าคงที่ขณะที่รูปคลื่นมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องภายในคาบ หลอดไส้จะไม่เกิดไฟกะพริบแต่หลอดฟลูออเรสเซนต์เกิดไฟกะพริบ แสดงว่าการกระเพื่อมของกำลังไฟฟ้าในหลอดฟลูออเรสเซนต์จะปรากฏมุม γ

ดังนั้นหลอดฟลูออเรสเซนต์สามารถเกิดไฟกะพริบได้จาก

1. การจ่ายแรงดันที่มีไฟกะพริบ เช่น รูปคลื่นที่ถูกมอดูเลตด้วยรูปคลื่นสี่เหลี่ยม หรือการเกิดแรงดันตกหรือเกินซึ่งเกิดได้จากการเปิด/ปิดโหลดซ้ำๆ ทำให้ส่งผลต่อขนาดของแรงดัน
2. การกระเพื่อมของรูปคลื่นแรงดันสาเหตุจากอาร์มอนิกที่ไม่ใช่จำนวนเต็ม
3. การจ่ายแรงดันที่มีอินเตอร์ฮาร์มอนิก โดยที่ค่าแรงดันอาร์คคงที่จะทำให้เกิดมุม γ ซึ่งส่งผลให้เกิดไฟกะพริบได้

2.5 ผลกระทบของหลอดไฟของผู้อยู่อาศัยภายใต้แรงดันไฟกะพริบ [8]

ความไวในการเปลี่ยนแปลงโหลดจะทำให้เกิดแรงดันไฟกะพริบได้ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อหลอดไฟที่ใช้งานอยู่ โดยแรงดันไฟกระพริบขนาดเล็ก 0.3% ถึง 0.5% ที่ความถี่ 7 Hz ถึง 10 Hz จะส่งผลต่อสายตาคนเราทำให้รู้สึกไม่สบายตา

ในการทดสอบสามารถทำให้ง่ายขึ้น โดยใช้รูปคลื่นแรงดันที่มอดูเลตที่แรงดัน 20 V และความถี่ 10 Hz สมการที่ใช้ในการมอดูเลตแสดงในสมการที่ (2.7)

$$V(t) = \sqrt{2}V_{rms}[1 + \frac{1}{2}\sum_{n}\Delta\overline{V}_n \sin(2\pi f_n t + \varphi_n)] \times \sin(2\pi 60t) \qquad (2.7)$$

โดยที่ f_n คือ ความถี่ที่ใช้ในการมอดูเลต

$\Delta\overline{V}_n$ คือ แรงดันที่ใช้ในการมอดูเลตที่ความถี่ f_n

φ_n คือ มุมเฟสที่ใช้ในการมอดูเลตที่ความถี่ f_n

ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta\overline{V}_n$ และ f_n สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\Delta\overline{V}_n = kf_n^{-x} \qquad (2.8)$$

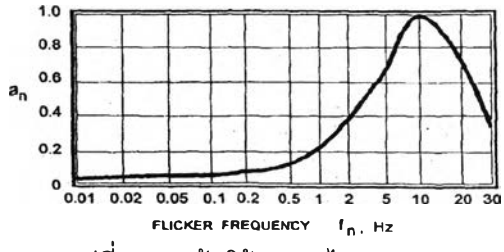
โดยที่ k เป็นค่าคงที่และ x มีค่าอยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 1 และสามารถสังเกตได้ว่าเมื่อ f_n มีค่ามากขึ้นจะทำให้ $\Delta\overline{V}_n$ มีค่าน้อยลง

จากสมการที่ (2.7) UIE (International Union for Electroheat) ได้กำหนดให้ค่าแรงดันไฟกะพริบที่ 10 Hz คือ ΔV_{10} และสามารถเขียนเป็นสมการได้ สมการที่ (2.9)

$$\Delta V_{10} = [\sum_{n=1}^{k} (a_n \Delta \overline{V}_n)^2]^{1/2} \quad (2.9)$$

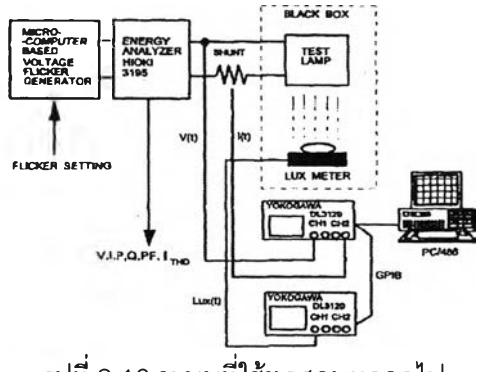
โดยที่ a_n คือ สัมประสิทธิ์ความไวของ UIE ที่ความถี่ f_n

สัมประสิทธิ์ความไวของไฟกะพริบ a_n จะแปรผันตามความถี่ f_n แสดงในรูปที่ 2.15 โดยจะเป็นความสัมพันธ์ของความไวของสายตาคนกับไฟกะพริบ เช่น a_n เท่ากับ 1.0 ที่ความถี่ 10 Hz เนื่องจากไฟกะพริบส่วนมากจะเกิดที่ความถี่นี้



รูปที่ 2.15 เส้นโค้งความไวของ UIE

การวิเคราะห์หาผลกระทบของหลอดไฟของผู้อยู่อาศัยโดยการป้อนแรงดันไฟกะพริบนั้น จำเป็นที่จะต้องมีเครื่องมือในการสร้างแรงดันไฟกะพริบ โดยจะใช้คอมพิวเตอร์ในการสร้างแรงดันไฟกะพริบ (Microcomputer-based voltage flicker generator) เนื่องจากเส้นโค้งความไวของ UIE ให้คนส่วนมากมีความไวต่อไฟกะพริบที่ความถี่ 10 Hz ดังนั้นความถี่ที่ใช้ในการมอดูเลต f_n จะตั้งไว้ที่ 10 Hz และในระหว่างการทดสอบ ΔV_{10} มีค่า 0% 0.45% 1% และ 3% ตามลำดับ เครื่องมือวัดลักส์จะถูกติดตั้งในกล่องดำเพื่อใช้วัดรูปคลื่นลักส์ที่ออกมาจากหลอดไฟและยังวัดรูปคลื่นกระแสและแรงดันด้วย แล้วส่งไปให้เครื่องบันทึกรูปคลื่นแบบดิจิตอลตามลำดับ เครื่องบันทึกรูปคลื่นแบบดิจิตอลจะใช้เทคนิค Fast Fourier Transform (FFT) ในการคำนวนหาสเปกตรัมความถี่ของรูปคลื่นลักส์ ข้อมูลที่ถูกบันทึกทั้งหมดจะส่งผ่านบัส General Purpose Interface (GPIB) ไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป รูประบบที่ใช้ทดสอบหลอดไฟแสดงรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ระบบที่ใช้ทดสอบหลอดไฟ

การประเมินผลกระทบของหลอดไฟต่อไฟกะพริบนั้น จะใช้สมการที่ (2.10)

$$\Delta Lux(\%)=\frac{Lux_{10}}{Lux_{DC}}\times 100 \qquad (2.10)$$

โดยที่ Lux_{10} คือ องค์ประกอบความถี่ 10 Hz ของลักส์

Lux_{DC} คือ องค์ประกอบดีซีของลักส์

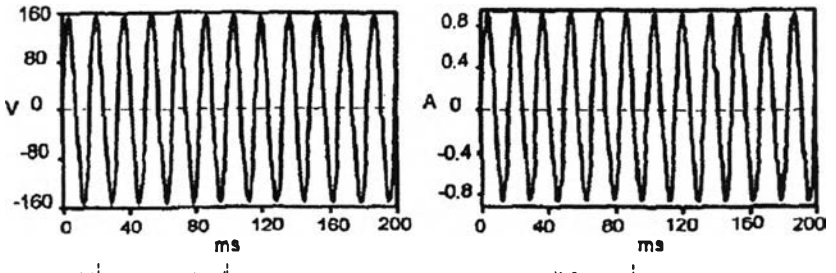
องค์ประกอบที่ความถี่ 10 Hz ของลักส์ เป็นผลตอบสนองโดยตรงที่เกิดจากแรงดันไฟกะพริบที่ความถี่ 10 Hz เนื่องจากองค์ประกอบความถี่ 10 Hz ของลักส์ มีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบดีซีของลักส์ ดังนั้นจะคำนวนเป็นค่าสเปกตรัมความถี่ $Lux(f)$ แล้วคำนวนเป็นค่า dB ตามสมการที่ (2.11)

$$Lux(f)_{dB} = 20\log_{10}[\frac{Lux(f)}{Lux_{DC}}] \qquad (2.11)$$

หลอดไฟที่ใช้ในการทดสอบมีอยู่ 5 ชนิด ตามตารางที่ 2.1 คือ 1. หลอดไส้ (I1 ถึง I6) 2. หลอดฟลูออเรสเซนต์ทั่วไปที่ใช้บัลลาสต์แกนเหล็ก (F1 ถึง F2) 3. หลอดฟลูออเรสเซนต์รูปกระเปาะที่ใช้บัลลาสต์แกนเหล็ก (F3 ถึง F4) 4. หลอดไฟที่ใช้บนโต๊ะที่ทำงานที่มีความถี่สูง (C1 ถึง C3) 5. หลอดไฟประหยัดพลังงาน (D1 ถึง D7)

1.การทดสอบหลอดไส้

รูปคลื่นแรงดันและกระแสของหลอดไส้ I1 ที่ $\Delta V_{10} = 0\%$ แสดงในรูปที่ 2.17 จากรูปจะเห็นได้ว่าหลอดไส้เป็นโหลดที่มีเฉพาะค่า R อย่างเดียว และสามารถยืนยันได้ในตารางที่ 2.1 ส่วนหลอดไส้แบบอื่นๆ ก็มีคุณลักษณะเช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.17 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของหลอดไส้ I1 ที่ $\Delta V_{10} = 0\%$

รูปที่ 2.18 ได้แสดงผลตอบสนองลักส์ของหลอดไส้ I1 ที่ค่า ΔV_{10} เท่ากับ 0% และ 3% ตามลำดับ สามารถเห็นได้ว่าหลอดไส้ทำงานได้ดีที่ $\Delta V_{10} = 0\%$ และเมื่อ ΔV_{10} มีการเปลี่ยนแปลงไปถึง 3% ที่ความถี่ 10 Hz สามารถเห็นถึงการเปลี่ยนแปลงได้ในรูป รูปที่ 2.19 ได้

แสดงสเปกตรัมความถี่ของรูปคลื่นลักส์ของหลอดไส้ I1 ที่ค่า ΔV_{10} เท่ากับ 0% 0.45% 1% และ 3% ตามลำดับ องค์ประกอบความถี่ที่ 10 Hz จะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเพิ่มแรงดันไฟกะพริบ

ตารางที่ 2.1 หลอดไฟที่ใช้ในการทดสอบ

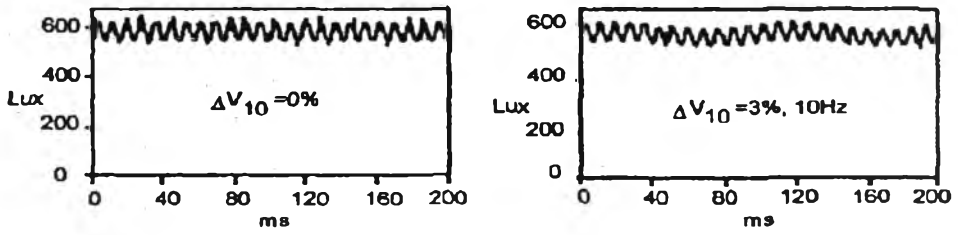
No.	Type	Watt	Rate Volt.	Ballast
I1	Incandescent	60	115	Non
I2	Incandescent	60	120	Non
I3	Incandescent	60	115	Non
I4	Incandescent	60	120	Non
I5	Incandescent	60	115	Non
I6	Incandescent	60	115	Non
F1	General Fluorescent	20	110	Electromagnetic
F2	General Fluorescent	20	110	Electromagnetic
F3	Bulbous Fluorescent	17	120	Electromagnetic
F4	Bulbous Fluorescent	15	110	Electromagnetic
C1	Desk Light	13	110	Electronic
C2	Desk Light	18	110	Electronic
C3	Desk Light	18	110	Electronic
D1	Energy-Saving	25	110	Electronic
D2	Energy-Saving	25	110	Electronic
D3	Energy-Saving	16	110	Electronic
D4	Energy-Saving	16	110	Electronic
D5	Energy-Saving	16	110	Electronic
D6	Energy-Saving	16	110	Electronic
D7	Energy-Saving	15	120	Electronic

ตารางที่ 2.2 ข้อมูลกำลังไฟฟ้าของหลอดไส้

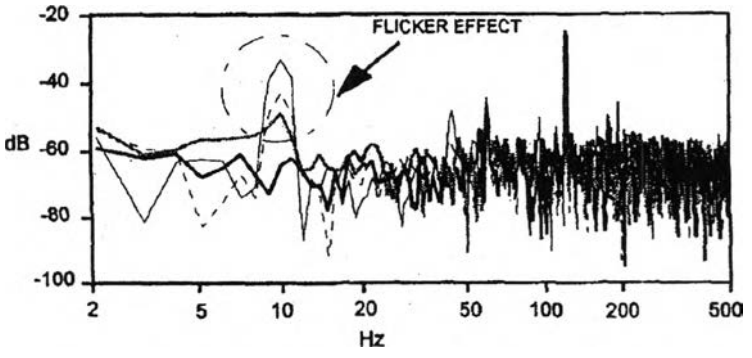
No	S (VA)	P (W)	Q (VAR)	P.F.	I_{THD} (%)
I1	56.73	56.73	0.45	1.0	0.6
I2	53.22	53.22	0.4	1.0	0.6
I3	57.85	57.85	0.52	1.0	0.8
I4	52.55	52.55	0.28	1.0	0.6
I5	56.89	56.89	0.36	1.0	0.9
I6	56.62	56.61	0.48	1.0	0.7

ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta \text{Lux}(\%)$ และ $\Delta V_{10}(\%)$ ของหลอดไส้ แสดงในรูปที่ 2.20 พบว่าจะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น

หอสมุดกลาง สำนักงานวิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

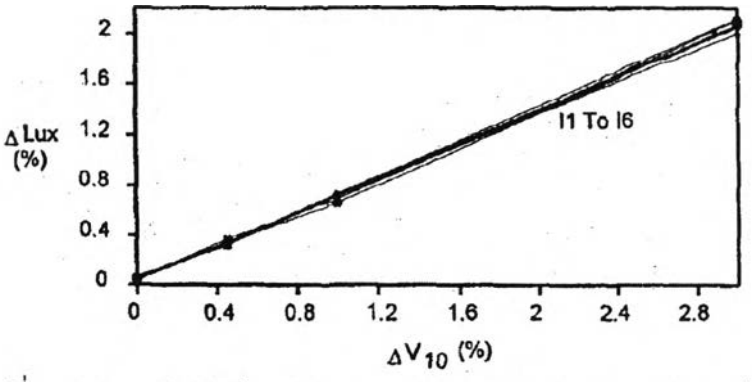


รูปที่ 2.18 รูปคลื่นลักส์ของหลอดไส้ I1 ที่ค่า ΔV_{10} แตกต่างกัน



——— : 0%, ——— : 0.45%, - - - - : 1%, ——— : 3%

รูปที่ 2.19 สเปกตรัมความถี่ของรูปคลื่นลักส์ของหลอดไส้ I1 ที่ค่า ΔV_{10} แตกต่างกัน



รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง ΔLux(%) และ ΔV_{10}(%) ของหลอดไส้

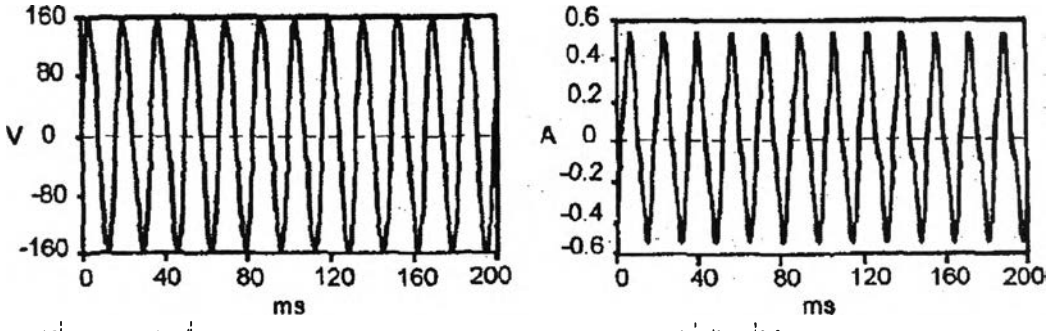
2. การทดสอบหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้บัลลาสต์แกนเหล็ก

รูปคลื่นแรงดันและกระแสของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้บัลลาสต์แกนเหล็ก F2 ที่ $\Delta V_{10} = 0\%$ แสดงในรูปที่ 2.21 และในรูปสามารถบอกได้ว่ากระแสหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้บัลลาสต์แกนเหล็กมีกระแสฮาร์มอนิกปานกลาง ส่วนในหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้บัลลาสต์แกนเหล็กแบบทั่วไปหรือแบบรูปกระเปาะมีรูปคลื่นเหมือนกัน ตารางที่ 2.3 แสดงข้อมูลกำลังไฟฟ้าของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้บัลลาสต์แกนเหล็ก เนื่องจากบัลลาสต์แกนเหล็กจะให้ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าแบบล้าหลัง (Lagging)

รูปที่ 2.22 แสดงรูปคลื่นลักส์ของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้บัลลาสต์แกนเหล็ก F2 ที่ค่า ΔV_{10} เท่ากับ 0% และ 3% สามารถสังเกตได้ว่าหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้บัลลาสต์แกนเหล็กจะสร้างความถี่สูง ($2f_s = 120$ Hz) หลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้บัลลาสต์แกนเหล็กทั้งหมดจะทำงานที่ความถี่หลักมูลและมีคุณลักษณะเหมือนกันทั้งหมด

รูปที่ 2.23 แสดงสเปกตรัมความถี่ของรูปคลื่นลักส์ของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้บัลลาสต์แกนเหล็ก F2 ที่ค่า ΔV_{10} เท่ากับ 0% 0.45% 1% และ 3% ตามลำดับ องค์ประกอบความถี่ที่ 10 Hz จะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเพิ่มแรงดันไฟกะพริบ

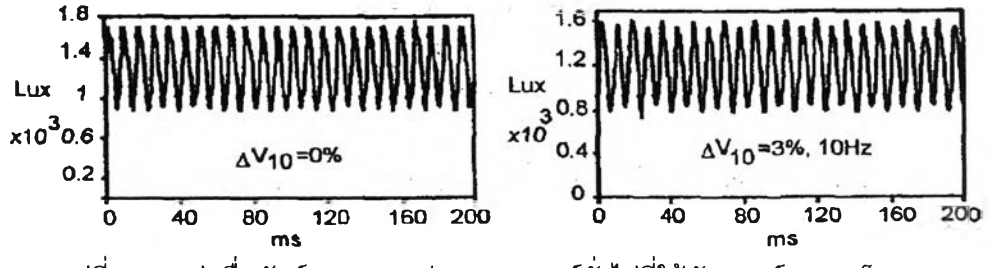
ความสัมพันธ์ระหว่าง ΔLux(%) และ ΔV_{10}(%) ของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้บัลลาสต์แกนเหล็กแสดงในรูปที่ 2.24 ความสัมพันธ์เป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้นและมีความแตกต่างกันมาก เนื่องจากความแตกต่างของก๊าซที่บบรจุภายในหลอดและความดันภายในหลอด



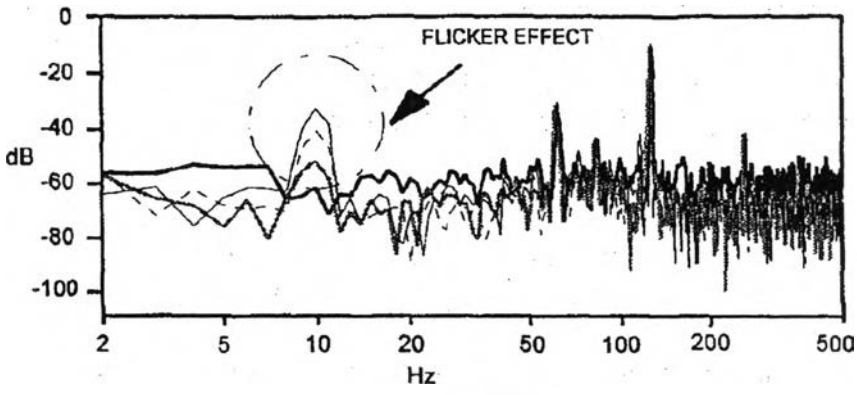
รูปที่ 2.21 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของหลอดฟลูออเรสเซนต์ทั่วไปที่ใช้บัลลาสต์แกนเหล็ก F2 ที่ $\Delta V_{10} = 0\%$

ตารางที่ 2.3 ข้อมูลกำลังไฟฟ้าของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้บัลลาสต์แกนเหล็ก

No	S (VA)	P (W)	Q (VAR)	P.F.	I_{THD} (%)
F1	33.93	17.85	28.86	0.526	14.1
F2	31.71	17.5	26.44	0.552	16.0
F3	27.23	14.39	23.12	0.528	12.2
F4	27.15	13.34	23.64	0.491	9.5

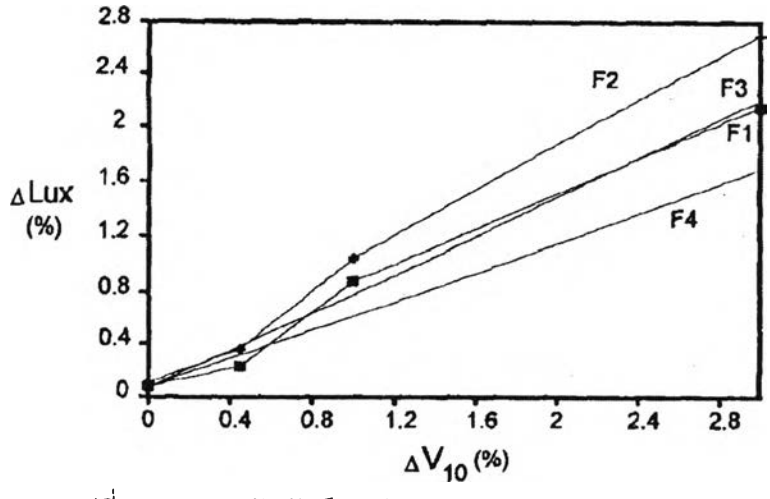


รูปที่ 2.22 รูปคลื่นลักส์ของหลอดฟลูออเรสเซนต์ทั่วไปที่ใช้บัลลาสต์แกนเหล็ก F2 ที่ค่า ΔV_{10} แตกต่างกัน



——— : 0%, ——— : 0.45%, - - - - : 1%, ——— : 3%

รูปที่ 2.23 สเปกตรัมความถี่ของรูปคลื่นลักษ์ของหลอดฟลูออเรสเซนต์ทั่วไป ที่ใช้บัลลาสต์แกนเหล็ก F2 ที่ค่า ΔV_{10} แตกต่างกัน



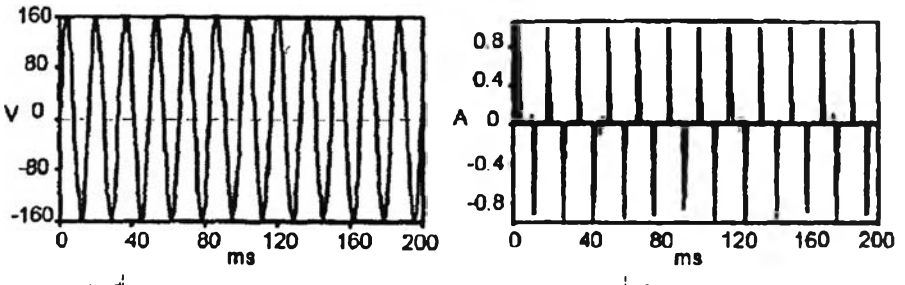
รูปที่ 2.24 ความสัมพันธ์ระหว่าง ΔLux(%) และ ΔV_{10}(%) ของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้บัลลาสต์แกนเหล็ก

3. **การทดสอบหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์** (CFLs)

รูปคลื่นแรงดันและกระแสของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ C2 ที่ $\Delta V_{10} = 0\%$ แสดงในรูปที่ 2.25 จากรูปสามารถเห็นได้ว่า หลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ C2 มีกระแสฮาร์มอนิกสูง ส่วนหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์แบบอื่นๆ มีรูปคลื่นที่เหมือนกันเพราะหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ใช้ Converter ข้อมูลกำลังไฟฟ้าของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์แสดงในตารางที่ 2.4 ความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์ทั้งหมดมีปริมาณมาก

รูปที่ 2.26 แสดงรูปคลื่นลักส์ของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ C2 ที่ค่า ΔV_{10} เท่ากับ 0% และ 3% ตามลำดับ เมื่อลองเปรียบเทียบผลจากหลอดไส้และหลอดฟลูออเรสเซนต์ใช้บัลลาสต์แกนเหล็กและหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ พบว่าหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์มีคุณภาพของแสงดีที่สุด

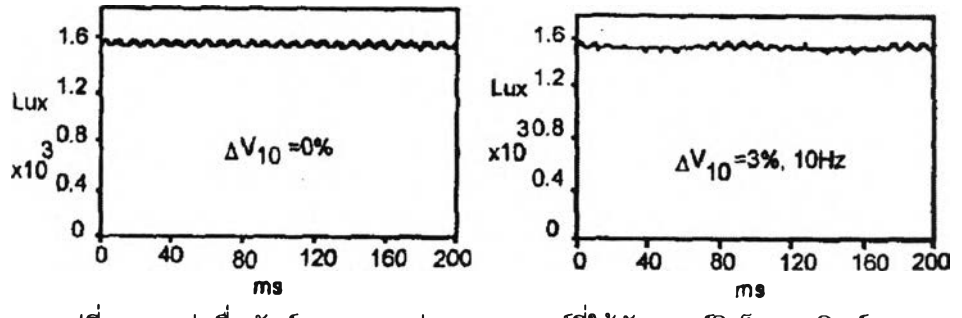
รูปที่ 2.27 แสดงสเปกตรัมความถี่ของรูปคลื่นลักส์ของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ C2 ที่ค่า ΔV_{10} เท่ากับ 0% 0.45% 1% และ 3% ตามลำดับ องค์ประกอบความถี่ที่ 10 Hz จะมีค่าน้อยลงกว่าหลอดไฟสองชนิดแรก



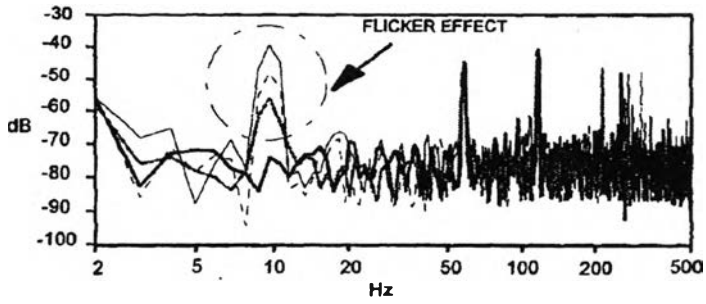
รูปที่ 2.25 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ C2 ที่ $\Delta V_{10} = 0\%$

ตารางที่ 2.4 ข้อมูลกำลังไฟฟ้าของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

No	S (VA)	P (W)	Q (VAR)	P.F.	I_{THD} (%)
C1	25.53	16.03	19.86	0.628	113.7
C2	24.18	12.87	20.47	0.532	145.4
C3	23.79	12.46	20.26	0.524	149.7
D1	39.8	22.4	32.8	0.564	130.8
D2	36.4	22.6	28.6	0.621	113.1
D3	28.3	17.9	21.9	0.633	103.7
D4	27.99	17.46	21.88	0.624	105.0
D5	21.88	13.27	17.39	0.607	120.1
D6	26.77	16.62	20.98	0.621	106.9
D7	23.87	12.31	20.45	0.516	140.8



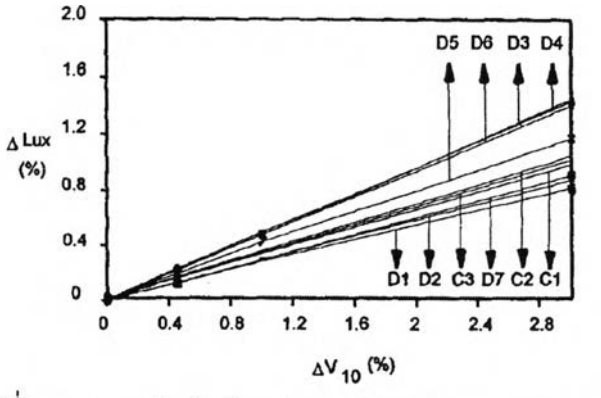
รูปที่ 2.26 รูปคลื่นลักส์ของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ C2 ที่ค่า ΔV_{10} แตกต่างกัน



——— : 0%, ——— : 0.45%, - - - - : 1%, ——— : 3%

รูปที่ 2.27 สเปกตรัมความถี่ของรูปคลื่นลักษ์ของหลอดฟลูออเรสเซนต์
ที่ใช้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ C2 ที่ค่า ΔV_{10} แตกต่างกัน

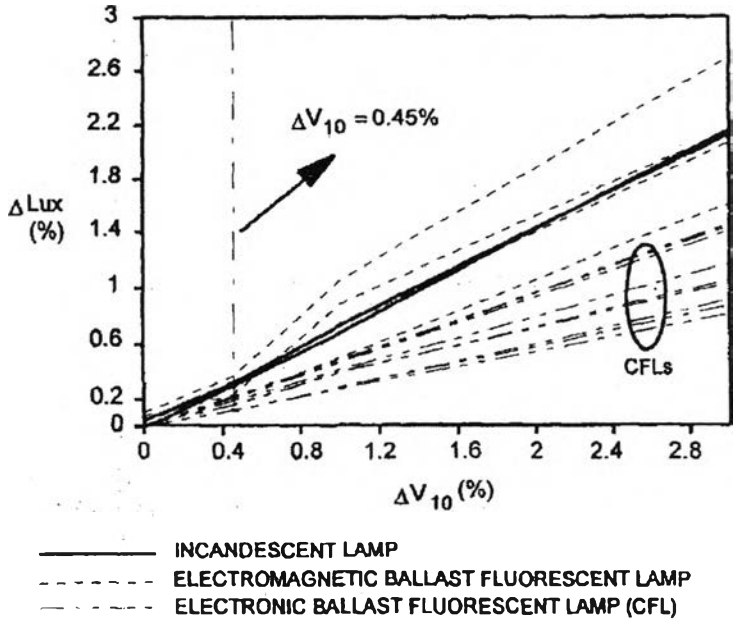
รูปที่ 2.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ΔLux(%) และ ΔV_{10}(%) ของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ จากความสัมพันธ์จะมีความแตกต่างสูง เนื่องจากความถี่ที่ใช้ในการทำงานมีความแตกต่างกันและโครงวงจรของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์มีความแตกต่างกัน



รูปที่ 2.28 ความสัมพันธ์ระหว่าง ΔLux(%) และ ΔV_{10}(%)
ของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

4. การเปรียบเทียบหลอดไฟทั้ง 3 ชนิด

ความสัมพันธ์ระหว่าง ΔLux(%) และ ΔV_{10}(%) ของทุกหลอดไฟที่ได้ทดสอบแสดงในรูปที่ 2.29 ข้อจำกัดของไฟกะพริบที่ประเทศใต้หวัน กำหนดไว้ที่ 0.45% ซึ่งใช้เป็นขอบเขตในการประเมินความสามารถในการรับแรงดันไฟกะพริบของหลอดแต่ละแบบ จากรูปที่ 2.29 พบว่าหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้บัลลาสต์แกนเหล็กเป็นหลอดที่มีความสามารถในการรับแรงดันไฟกะพริบต่ำสุด และหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ความสามารถในการรับแรงดันไฟกะพริบดีที่สุด ดังนั้นในพื้นที่ระบบจำหน่ายที่มีแรงดันไฟกะพริบสูงควรจะใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ถึงจะดี



รูปที่ 2.29 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของลักส์ของหลอดไฟที่ได้รับแรงดันไฟกะพริบ