

บทที่ 2

ทฤษฎีการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์และสมการความไวการเปลี่ยนแปลงของ กำลังออกต่อการเปลี่ยนแปลง V_{dc} , f_s , L , และ C_{ig}

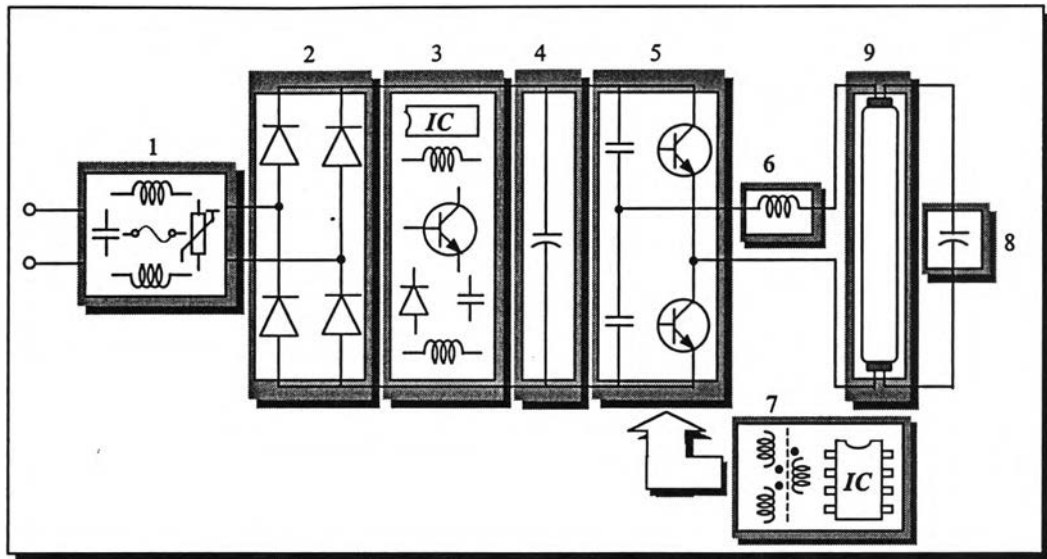
2.1 บทนำ

การศึกษาผลกระทบจากปัจจัยภายนอก และค่าอุปกรณ์ภายในวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ต่อกำลังออกของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ในรูปแบบของความไวการเปลี่ยนแปลงของกำลังออกต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟตรงด้านเข้า (V_{dc}), ความถี่การทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ (f_s), ค่าความเหนี่ยวนำ (L) และค่าความจุของตัวเก็บประจุ (C_{ig}) เพื่อนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์นั้น ก่อนอื่นต้องรู้และเข้าใจโครงสร้างการทำงานเบื้องต้นของหลอดฟลูออเรสเซนต์ และบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์เสียก่อน ซึ่งประกอบด้วย พฤติกรรมการทำงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่มีลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) และมีความต้านทานพลวัตในภาวะการทำงานปรกติเป็นลบ (negative dynamic resistance; $r_{lamp} = dv_{lamp} / di_{lamp}$) (ยุทธนา กุลวิฑิต, 2535) ,(E. Deng, 1997) โดยค่าความต้านทานของหลอด (R_{lamp}) จะมีการเปลี่ยนแปลงกับกำลังออกของหลอดฟลูออเรสเซนต์ ในบทนี้จะกล่าวถึงความรู้พื้นฐาน, ทฤษฎีการทำงาน, วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของหลอดฟลูออเรสเซนต์, วงจรอินเวอร์เตอร์, นิยามทั่วไปของความไว, ตัวแปรที่จะศึกษาความไวการเปลี่ยนแปลงของกำลังออกต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่างๆ และสมการความไวการเปลี่ยนแปลงของกำลังออกต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟตรงด้านเข้า (V_{dc}), ความถี่การทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ (f_s), ค่าความเหนี่ยวนำ (L) และค่าความจุของตัวเก็บประจุ (C_{ig})

2.2 โครงสร้างบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ และการต่อกับหลอดฟลูออเรสเซนต์

บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้คู่กับหลอดฟลูออเรสเซนต์เพื่อทดแทนบัลลาสต์แบบขดลวดพันบนแกนเหล็ก โดยอาศัยหลักการใช้ไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง เพื่อลดกำลังสูญเสียของบัลลาสต์แต่ยังสามารถจุดหลอดให้ติดสว่างได้ในตอนเริ่มต้น และควบคุมกระแสผ่านให้มีค่าตามที่กำหนด

บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับหลอดฟลูออเรสเซนต์โดยทั่วไปจะประกอบไปด้วยวงจรหรือส่วนประกอบที่สำคัญ ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ และลักษณะการต่อกับโหลดฟลูออเรสเซนต์

รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งประกอบไปด้วยวงจรต่างๆ และลักษณะการต่อโหลดฟลูออเรสเซนต์โดยส่วนต่างๆของวงจร มีหน้าที่ ดังนี้

2.2.1 วงจรกรองค่านเข้า และวงจรป้องกัน (Input filter and Protection Circuit) มีหน้าที่ ลด EMI จากภายนอกที่จะเข้ามารบกวนบัลลาสต์และจากบัลลาสต์ที่จะออกไปยังสายกำลัง และช่วยป้องกันกระแสกระชาก (Surge current) แรงดันเกินชั่วขณะในคอนเปิดไฟ

2.2.2 วงจรเรียงกระแส (Rectifier) มีหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อจ่ายให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง

2.2.3 วงจรปรับรูปคลื่นของกระแสค่านเข้า (Power Factor Correction Circuit ; PFC) มีหน้าที่ ปรับรูปคลื่นของกระแสค่านเข้าให้มีลักษณะใกล้เคียง (Sine) เพื่อลดกระแสฮาร์มอนิกส์ และเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังค่านเข้า

2.2.4 วงจรกรองผ่านต่ำ (Lowpass filter) มีหน้าที่ ลดแรงดันกระเพื่อมของแรงดันไฟตรง (V_{dc}) ค่านเข้าของวงจรอินเวอร์เตอร์

2.2.5 วงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง (High frequency inverter) มีหน้าที่ เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง ส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างแบบกึ่งบริดจ์ที่ใช้สวิตช์เรโซแนนซ์ภาคแรงดันศูนย์ (Zero Voltage Switch ; ZVS)

2.2.6 ตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในการควบคุมกระแส (Inductor) มีหน้าที่เป็นองค์ประกอบหนึ่งของวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมที่สร้างแรงดันสูงในคอนสแตร์ท และควบคุมกระแสผ่านโหลดให้มีค่าตามที่กำหนดในการทำงานปกติ

2.2.7 วงจรขับนำสวิตช์ (Drive) มีหน้าที่ กำเนิดสัญญาณขับนำสวิตช์ อาจจำแนกตามลักษณะการกำเนิดสัญญาณได้ 2 ชนิด คือชนิดที่กำเนิดสัญญาณขับนำอย่างอิสระโดยใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ และชนิดที่ต้องอาศัยการป้อนกลับของกระแสหรือแรงดันด้าน โหลดผ่านหม้อแปลง

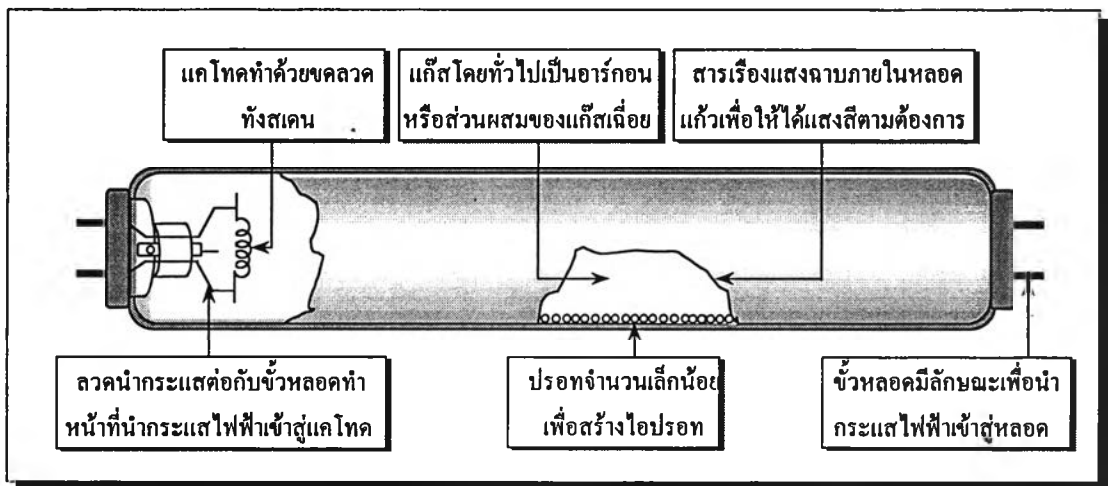
2.2.8 ตัวเก็บประจุที่ใช้เป็นทางผ่านของกระแสช้อน ไล่หลอด (Capacitor) ทำหน้าที่ร่วมกับตัวเหนี่ยวนำในคอนสตาท์เป็นวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมเพื่อสร้างแรงดันสูงในการจุดหลอด และยัง เป็นทางผ่านของกระแสที่ใช้ในการอุ่น ไล่หลอดในภาวะปรกติ

2.2.9 หลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent lamp) เป็นอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นแสงสว่างซึ่งมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าคือ ต้องการแรงดันสูงในการจุดหลอด, ต้องการแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่ลักษณะเป็นแหล่งกระแส, ในขณะที่ทำงานมีความต้านทานพลวัตเป็นลบ และปริมาณแสงแปรตามกระแสผ่านหลอด

2.3 หลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent lamp)

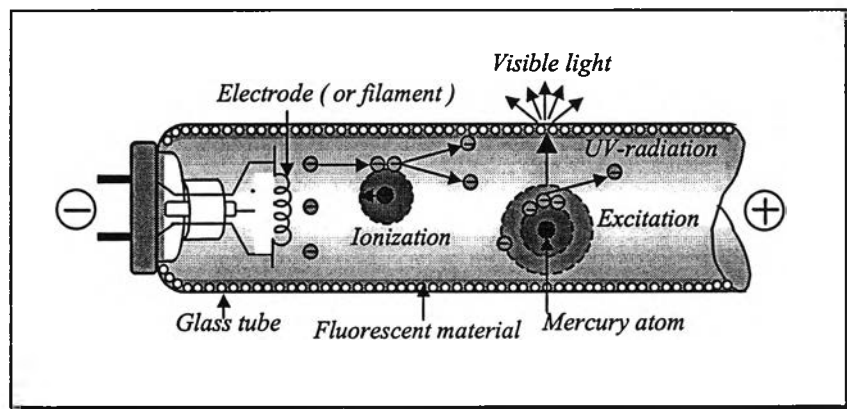
2.3.1 โครงสร้างของหลอดฟลูออเรสเซนต์

หลอดฟลูออเรสเซนต์เป็นหลอดแก๊สดีสชาร์จไอปรอทความดันต่ำ (low pressure mercury vapour discharge lamp) นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน เพราะเป็นหลอดที่มีประสิทธิภาพการส่องสว่าง (luminous efficacy) สูงถึงประมาณ 90 ลูเมนต่อวัตต์ (lm/w) และมีอายุในการใช้งานนานถึง 20,000 ชั่วโมง โครงสร้างและส่วนประกอบที่สำคัญของหลอดฟลูออเรสเซนต์แสดงอยู่ในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของหลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิดอุ่น ไล่ (preheat lamp)

ปริมาณแสงสว่างของหลอดไฟฟ้าโดยส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับปริมาณของกระแสที่ไหลผ่านหลอด และปริมาณกระแสที่ไหลผ่านหลอดจะถูกกำหนดโดยความต้านทานของหลอด สำหรับหลอดแบบไส้ (Incandescent lamp) ค่าความต้านทานของไส้หลอดจะขึ้นอยู่กับลักษณะของไส้หลอด กระแสที่ไหลผ่านหลอดถูกควบคุมโดยค่าความต้านทานของไส้หลอด แต่สำหรับหลอดแก๊สคิซาร์จ (gas discharge lamp) ที่ใช้หลักการเปล่งแสงสว่างจากการนำกระแสของแก๊ส เช่น หลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent lamp) การจุดติดของหลอดฟลูออเรสเซนต์นั้นจะอาศัยการปล่อยประจุไฟฟ้าระหว่างขั้วทั้งสองของอิเล็กโทรดภายในหลอดแก้วที่บรรจุด้วยแก๊สอาร์กอน และไอปรอทที่มีความดันไอต่ำ (low pressure mercury vapour) ในขณะที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะเกิดการปล่อยประจุในแก๊ส (gas discharge) ซึ่งการปล่อยประจุในแก๊สดังกล่าวจะทำให้เกิดรังสีอัลตราไวโอเล็ต (แสงเหนือม่วง) โดยที่รังสีอัลตราไวโอเล็ตนี้ถูกปล่อยออกมาโดยการกระตุ้นอะตอมของไอปรอท เนื่องจากการกระแทกของอิเล็กตรอนที่ได้รับการปล่อยออกมาจากขั้วอิเล็กโทรดและถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า ในขณะเดียวกันรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV-radiation) ที่มีความยาวคลื่น 253.7 nm (เป็นความยาวคลื่นที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า) จะไปกระตุ้นสารเรืองแสง (phosphor) ที่ฉาบไว้ด้านในของหลอดแก้ว ให้แสงในช่วงที่ตามองเห็นออกมาดังในรูปที่ 2.3 ซึ่งสีของแสงที่เปล่งออกมาขึ้นอยู่กับสารเรืองแสงที่ใช้เคลือบผิวในของหลอด สารเรืองแสงแต่ละชนิดไม่เพียงแต่ทำให้แสงที่เปล่งออกมาจากหลอดฟลูออเรสเซนต์มีสีแตกต่างกัน แต่ยังสามารถทำให้หลอดมีประสิทธิภาพการส่องสว่างแตกต่างกันได้ด้วย



รูปที่ 2.3 แสดงหลักการให้แสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิดอุ่นไส้ (preheat lamp)

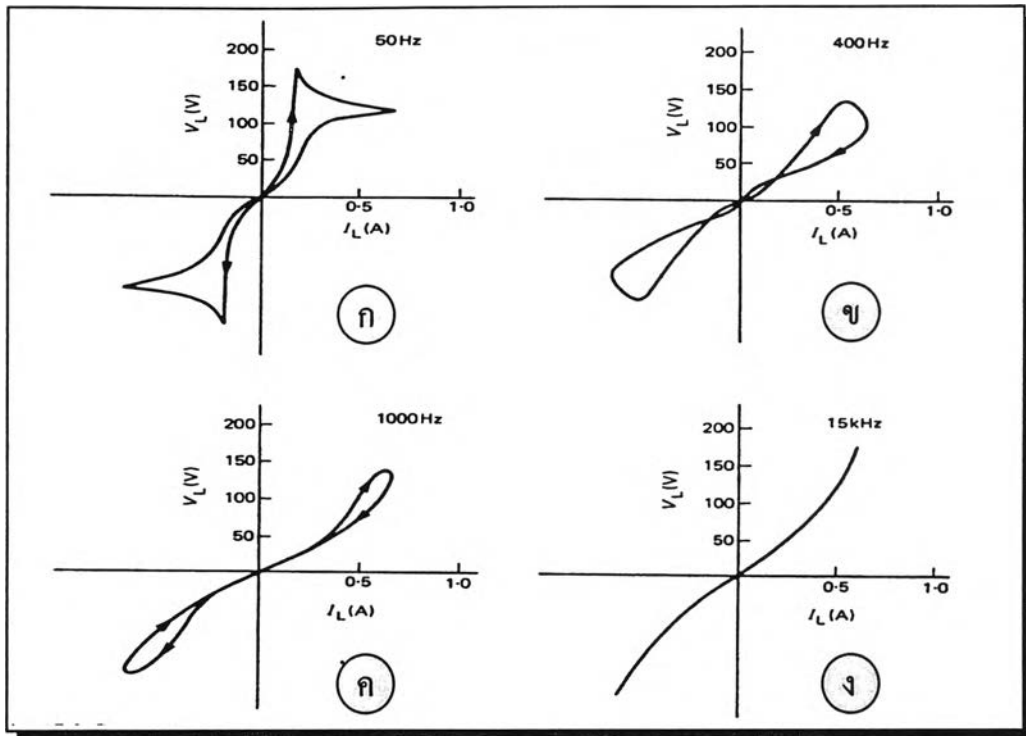
2.3.2 การทำงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์แบ่งออกเป็น 2 สภาวะ คือ

1. ช่วงก่อนจุดหลอดให้ติดสว่าง
2. ช่วงทำงานปรกติ

ในช่วงก่อนจุดหลอดให้ติดสว่าง ค่าความต้านทานของหลอดฟลูออเรสเซนต์ (R_{lamp}) จะมีค่าสูงมาก ดังนั้นในการจุดหลอดให้ติดสว่างจะต้องใช้แรงดันที่มีขนาดสูง (Striking voltage; V_{ig}) เพื่อจุดหลอดให้ติดสว่าง ซึ่งค่าของแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการจุดหลอดจะขึ้นอยู่กับ เส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของหลอด, อุณหภูมิ และชนิดของขั้วอิเล็กโทรด เมื่อหลอดฟลูออเรสเซนต์ติดสว่างความต้านทานของหลอดจะลดต่ำลง หลังจากหลอดฟลูออเรสเซนต์จุดติดแล้วจึงมีกระแสไหลผ่านหลอด และแรงดันคร่อมหลอดจะมีค่าลดลงเท่ากับแรงดันที่พิกัดทำให้ค่าความต้านทานของหลอดลดลงที่พิกัด

2.3.3 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของหลอดฟลูออเรสเซนต์

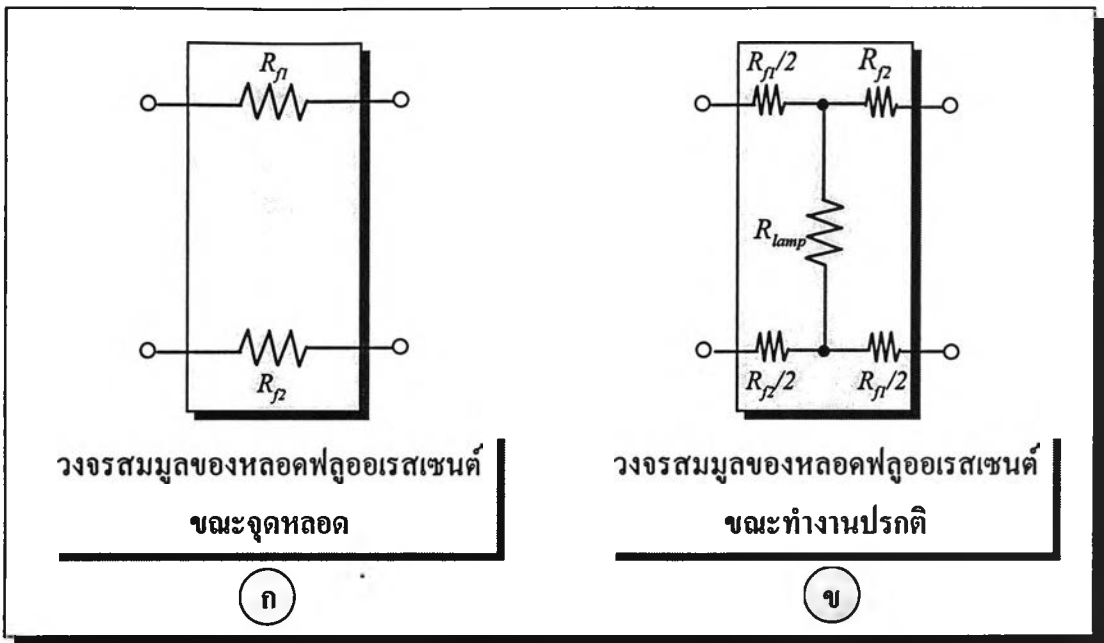
คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหลอดแก๊สดีสชาร์จจะขึ้นอยู่กับลักษณะอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย, ความถี่ของแหล่งจ่าย และชนิดของบัลลาสต์ โดยที่อิมพีแดนซ์ประสิทธิผล (effective impedance) ของหลอดฟลูออเรสเซนต์สามารถประมาณเป็นตัวต้านทานสมมูลไม่เชิงเส้นที่ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ (E. Gluskin, 1987)เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของกระแสจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด เมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ที่มีรูปคลื่นเป็นไซน์ป้อนให้กับหลอด ความต้านทานของหลอดจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องใน 1 รอบ (cycle) ส่งผลให้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของหลอดไม่เป็นเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 1.4 (ก-ค) แต่เมื่อเพิ่มความถี่ให้กับหลอดทำให้ขบวนการไอออนไนเซชัน (ionization) สั้นมากและรวดเร็วตามการเปลี่ยนแปลงของกระแส ทำให้ความหนาแน่นของพลาสมา (plasma) เกือบคงที่อิมพีแดนซ์ประสิทธิผลทุกๆขณะเกือบคงที่ จะทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ไหลผ่านหลอด และแรงดันคร่อมหลอดมีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้น (linear) โดยประมาณ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ง) (E. Gluskin, 1990)



รูปที่ 2.4 แสดงคุณลักษณะกระแส-แรงดันพลวัตของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ความถี่ต่างๆ

2.3.4 วงจรสมมูลหลอดฟลูออเรสเซนต์

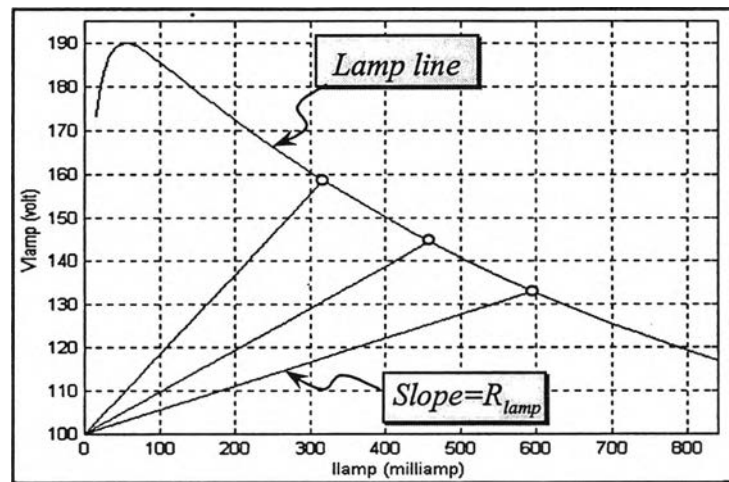
เมื่อใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงเราสามารถประมาณคุณสมบัติของหลอดฟลูออเรสเซนต์เป็นควัตถุต้านทานได้ เนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านหลอดและแรงดันคร่อมหลอดมีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้น โดยประมาณทำให้สามารถเขียนวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้ ดังรูปที่ 2.5 เนื่องจากไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์ในขณะที่จุดหลอดดังนั้นจึงแทนความต้านทานสมมูลของหลอดฟลูออเรสเซนต์ (R_{lamp}) ด้วยวงจรเปิด แต่จะมีความต้านทานไส้หลอด (R_{f1} , R_{f2}) ที่แต่ละข้างของขั้วหลอด ดังนั้นจึงสามารถเขียนวงจรสมมูลของหลอดฟลูออเรสเซนต์ขณะจุดหลอดได้ดังแสดงในรูป 2.5 (ก) และเมื่อหลอดติดสว่าง ค่าความต้านทานสมมูลของหลอด (R_{lamp}) จะมีค่าลดลงเท่ากับค่าที่พิกัด จึงสามารถเขียนวงจรสมมูลเมื่อหลอดติดสว่างได้ดังแสดงในรูป 2.5 (ข)



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของหลอดฟลูออเรสเซนต์

ถึงแม้หลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้งานกับความถี่สูงจะมีลักษณะสมบัติโดยประมาณเป็นความต้านทานแบบเชิงเส้น แต่ค่าความต้านทานสมมูลของหลอด (R_{lamp}) จะมีค่าไม่คงที่ โดยจะขึ้นอยู่กับกำลังต้านออกของหลอดฟลูออเรสเซนต์ เมื่อกำลังต้านออกมีการเปลี่ยนแปลงความชัน (Slope) ของกราฟลักษณะ สมบัติกระแส-แรงดันของหลอดฟลูออเรสเซนต์จะเปลี่ยนแปลง ดังรูปที่

2.6



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของหลอดเมื่อใช้กับไฟฟ้ากระแสลับความถี่สูง แสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานพลวัตของหลอดฟลูออเรสเซนต์กับกำลังที่หลอด

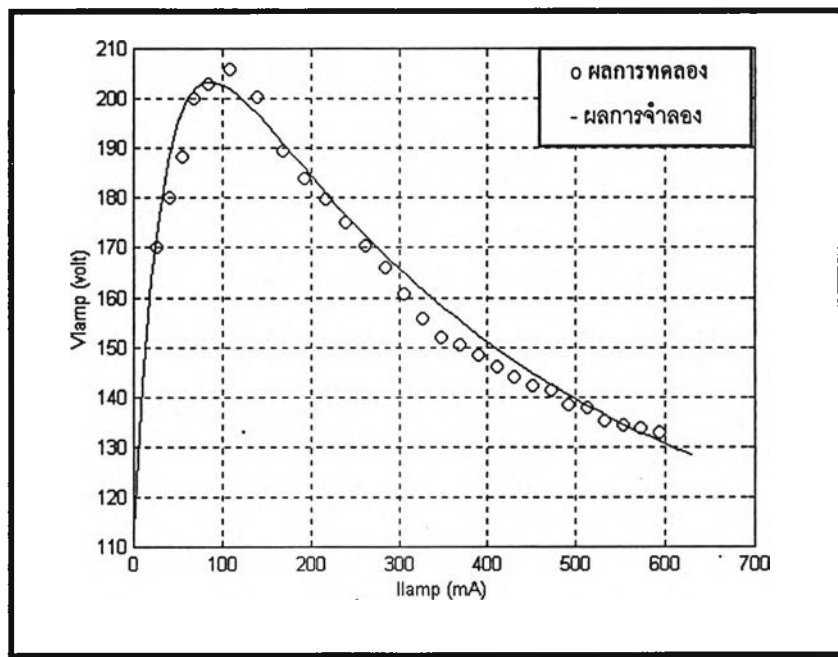
ความสัมพันธ์ระหว่างค่ายอดของแรงดันคร่อมหลอด และค่ายอดของกระแสผ่านหลอด สำหรับกำลังออกต่าง ๆ กันดังรูปที่ 2.7 ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดลองจะสามารถหาสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ายอดของแรงดัน และค่ายอดของกระแส โดยวิธี Curve-fitting (Naoki Onishi, 1999) ได้ดังสมการที่ 2.1 โดยที่

$$V_{lamp} = A_0 + A_1 e^{-A_2 I_{lamp}} - A_3 e^{-A_4 I_{lamp}} - \frac{9900}{\left(100 + 100 \left(\frac{I_{lamp}}{4}\right)^5\right)} \quad (2.1)$$

(ดูสัญลักษณ์และความหมายของตัวแปรต่างๆจากภาคผนวก)

เมื่อ $A_0=85$; $A_1=105$; $A_2=6.5$; $A_3=136$; $A_4=36.5$

ความสัมพันธ์ดังกล่าว จะใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีหลอดฟลูออเรสเซนต์เป็นโหลด

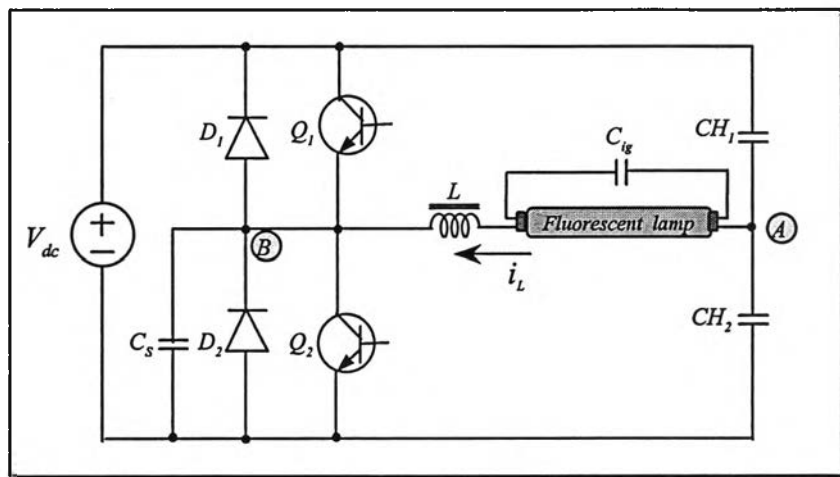


รูปที่ 2.7 กราฟลักษณะสมบัติของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ได้จากการทดลอง และเส้นกราฟที่ได้จากการใช้ Curve-fitting

2.4 อินเวอร์เตอร์ (Inverter)

วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ หรืออินเวอร์เตอร์ (inverter) เป็นวงจรที่ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงจากวงจรเรียงกระแสให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง (ซึ่งโดยทั่วไปจะมีความถี่อยู่ในช่วง 20 – 50 กิโลเฮิรตซ์) เพื่อป้องกันให้กับหลอดฟลูออเรสเซนต์ วงจรอินเวอร์เตอร์มีหลายชนิดแต่ส่วนใหญ่นิยมใช้วงจรบริดจ์ หรือกึ่งบริดจ์ที่มี BJT หรือ FET เป็นสวิตช์ไวงานซึ่งในแต่ละกิ่งของวงจรจะประกอบด้วยสวิตช์ 2 ตัว ต่ออนุกรมกันและจะสลับกันนำกระแส เนื่องจากกระแสและแรงดันของโหนดมีเฟสต่างกัน ดังนั้นสวิตช์ที่ใช้จะต้องเป็นสวิตช์ที่นำกระแสได้ 2 ทาง ซึ่งทำได้โดยการต่อไดโอดขนานกับสวิตช์ ดังในรูปที่ 2.8 ทรานซิสเตอร์จะทำหน้าที่ส่งผ่านพลังงานไปสู่โหลดส่วนพลังงานจากโหนดที่ไหลย้อนกลับไปยังแหล่งจ่ายไฟตรงจะไหลผ่านไดโอด อย่างไรก็ตามในปัจจุบันนี้ทรานซิสเตอร์ที่ใช้สำหรับอินเวอร์เตอร์ทั่วไปมักจะมีไดโอดต่ออยู่แทบทั้งสิ้น การทำงานของสวิตช์ไวงานมักเป็นการสวิตช์แบบนุ่ม (Soft Switching) ที่มีกำลังสูญเสียในสวิตช์ต่ำ เนื่องจากกำลังออกของอินเวอร์เตอร์สำหรับหลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาด 36 วัตต์ 1 หลอด มีค่าไม่สูงนักจึงเลือกใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีโครงสร้างแบบกึ่งบริดจ์ (Half-bridge inverter) ดังในรูปที่ 2.8

วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรมที่ต่อโหลดขนานมีโครงสร้างแบบกึ่งบริดจ์โดยสวิตช์ทำงานในภาคแรงดันศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

2.4.1 การทำงานในภาวะปกติของอินเวอร์เตอร์ที่กระแสล้าหลังแรงดัน

สมมุติให้ทรานซิสเตอร์ Q_2 นำกระแสก่อน กระแสไหล (i_L) มีค่าเป็นบวก เมื่อ Q_2 นำกระแสได้ระยะหนึ่งวงจรจับนำสวิตช์จะหยุดจับนำ Q_2 แต่ Q_2 จะไม่หยุดนำกระแสทันที เนื่องจากผลของเวลาประจุสะสม (Storage time; t_s) ของทรานซิสเตอร์ หลังจากช่วงเวลาประจุสะสม Q_2 จะหยุดนำกระแสอย่างสมบูรณ์ กระแสไหล (i_L) ซึ่งล้าหลังแรงดันจะย้ายไปไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_s ซึ่งทำหน้าที่เป็นสแน็บเบอร์ช่วยลดอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดัน (dv/dt) ทำให้กำลังสูญเสียของสวิตช์ในช่วงที่ Q_2 หยุดนำกระแสลดลง กระแสไหล (i_L) ไหลผ่านตัวเก็บประจุจนกว่าศักดาที่เอาโนดของไดโอด D_1 สูงกว่าคาโทดของไดโอด D_1 , ไดโอด D_1 จึงเริ่มนำกระแส และให้การทำงานของสวิตช์เป็นแบบเรโซแนนซ์ภาคแรงดันศูนย์ ทรานซิสเตอร์ Q_1 จะต้องถูกจับนำในช่วงเวลานี้ แต่ยังไม่มีการไหล (i_L) ไหลผ่าน จนกว่ากระแสไหล (i_L) จะเปลี่ยนทิศทางและทำให้ Q_1 เริ่มนำกระแส เมื่อ Q_1 นำกระแสได้ระยะหนึ่งวงจรจับนำสวิตช์จะหยุดจับนำ Q_1 แต่ Q_1 จะยังไม่หยุดนำกระแสทันทีเนื่องจากผลของเวลาประจุสะสมของทรานซิสเตอร์ Q_1 หลังจากช่วงเวลาประจุสะสม Q_1 จะหยุดนำกระแสอย่างสมบูรณ์และกระแสไหล (i_L) ย้ายไปไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_s กระแสไหล ไหลผ่านตัวเก็บประจุจนกว่าศักดาที่คาโทดของไดโอด D_2 ต่ำกว่าเอาโนดของไดโอด D_2 , ไดโอด D_2 จึงจะเริ่มนำกระแสและเพื่อให้การทำงานของสวิตช์เป็นแบบเรโซแนนซ์ภาคแรงดันศูนย์ Q_2 ต้องถูกจับนำในช่วงเวลานี้ แต่ยังไม่มีการไหล (i_L) ไหลผ่านจนกว่ากระแสไหล (i_L) จะเปลี่ยนทิศทางและทำให้ Q_2 เริ่มนำกระแส การทำงานจะเป็นวัฏจักรอย่างนี้ไปเรื่อยๆ ในภาวะอยู่ตัว (T.J. Liang, 1997), (M.K. Kazimierczuk, 1995), (T.F.Wu, 1994), (Y.R. Yang, 1998)

2.4.2 การวิเคราะห์และการพัฒนางจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์

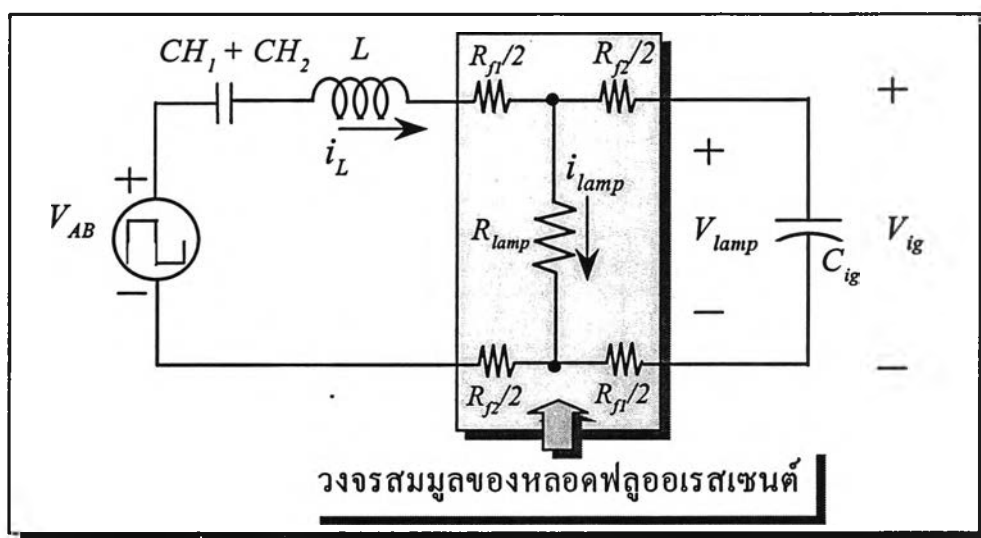
วงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ในรูปที่ 2.8 ให้แรงดันด้านออก (V_{AB}) เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ โดยมีวงจรโหลดเป็นวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมที่ต่อโหลดขนาน (โหลดเป็นหลอดฟลูออเรสเซนต์) แรงดันด้านออกอินเวอร์เตอร์ที่เวลาต่างๆมีค่าดังนี้คือ

$$V_{AB} = \begin{cases} \frac{V_{dc}}{2} & \text{.....for } 0 \leq \omega t \leq \pi \\ -\frac{V_{dc}}{2} & \text{.....for } \pi \leq \omega t \leq 2\pi \end{cases} \quad (2.2)$$

โดยใช้การกระจายอนุกรมฟูรีเยร์ (Fouries series expansion)

$$v_s(t) = \frac{V_{dc}}{2} \left\{ \frac{4}{\pi} \sum_{n=odd}^{\infty} \frac{\sin(n\omega t)}{n} \right\} = \sum_{n=odd}^{\infty} V_{sn} \sin(n\omega t) \quad (2.3)$$

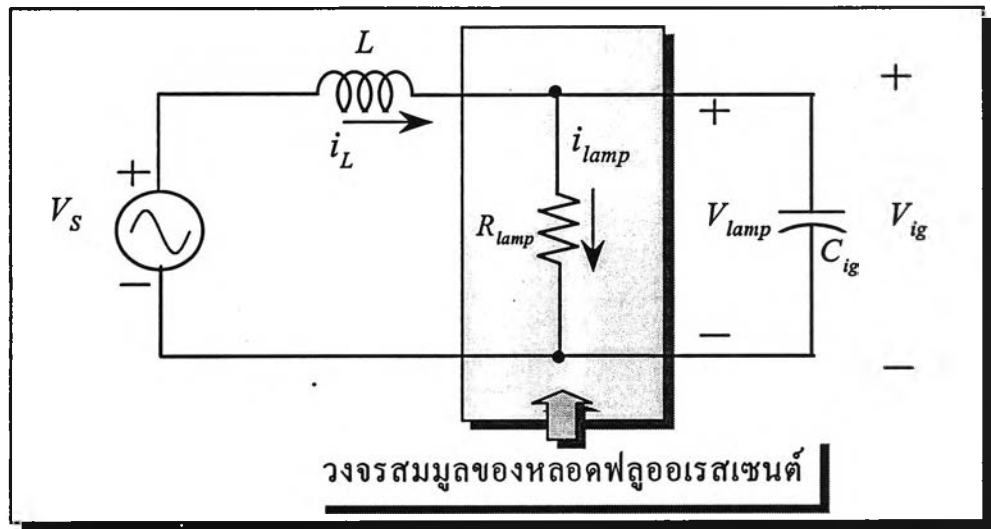
จากวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ที่มีโหลดเป็นหลอดฟลูออเรสเซนต์ รูปที่ 2.8 เราสามารถเขียนวงจรสมมูลไฟฟ้ากระแสสลับของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ และวงจรสมมูลของหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้ ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์และ
วงจรสมมูลของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่เป็นโหลด

เนื่องจากโครงสร้างของวงจร โหลดที่ต่อเข้ากับอินเวอร์เตอร์มีลักษณะเป็นวงจรกรองแบบผ่านต่ำ (Low-pass filter) ทำให้แรงดันที่โหลดมีรูปคลื่นใกล้เคียงไซน์ และมีความถี่เท่ากับความถี่ของแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมด้านนอกของอินเวอร์เตอร์ และถ้า Q_p ของวงจร โหลดมีค่าสูงเพียงพอ กระแสและแรงดันคร่อม โหลดจะมีรูปคลื่นใกล้เคียงไซน์ ดังนั้นในการวิเคราะห์จะใช้แรงดันรูปคลื่นไซน์ (Sine) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักมูลของรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Melvinn C. Cosby, 1993) ซึ่งทำได้ง่ายกว่า เนื่องจากจุดผ่านศูนย์กลางของแรงดันรูปคลื่นไซน์องค์ประกอบหลักมูลของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมจะตรงกับจุดผ่านศูนย์กลางของรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ดังนั้นในการวิเคราะห์จะประมาณแรงดันออกรูปคลื่นสี่เหลี่ยมของอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นหลอดฟลูออเรสเซนต์ด้วยแรงดันรูปคลื่นไซน์ โดยมีสมมุติฐานดังต่อไปนี้

- ละเอียดผลของการสูญเสียในสวิทช์ไวงาน
- ละเอียด reverse recovery ของไดโอด
- CH1 และ CH2 มีค่าสูงทำให้การกระเพื่อมของแรงดันด้านออกมีค่าน้อย
- ค่าตัวประกอบคุณภาพของวงจรโหลด (Q_p) มีค่าสูงเพียงพอทำให้สามารถละเอียดผลของกระแสฮาร์มอนิก
- ค่า CH₁ และ CH₂ มีค่าใหญ่มากจนสามารถละเอียดได้ โดยถือว่าเป็นวงจรลัดสำหรับไฟฟ้ากระแสสลับ
- ละเอียด R_{π} และ R_2 เพื่อง่ายต่อการคำนวณ และการวิเคราะห์



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์และวงจรสมมูลของหลอดฟลูออเรสเซนต์พัฒนา

ได้วงจรสมมูลของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ และหลอดฟลูออเรสเซนต์ดังในรูปที่ 2.10 เมื่อ V_s คือ ค่ายอดของแรงดันด้านออกของความถี่หลักมูลของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมซึ่งมีค่าเท่ากับ $(2V_{dc}/\pi)$ โดยทั่วไปหลอดฟลูออเรสเซนต์จะมีลักษณะสมบัติแบบไม่เชิงเส้น แต่เมื่อใช้หลอดกับความถี่สูง กระแสผ่านหลอดและแรงดันคร่อมหลอดจะสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้นโดยประมาณ ดังในรูปที่ 2.4 ง ดังนั้นจึงแทนหลอดด้วยความต้านทานสมมูล $\left(R_{lamp} = \frac{V_{lamp}}{I_{lamp}} \right)$

จากวงจรสมมูลของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ในรูปที่ 2.10 สามารถเขียนสมการของกำลังที่หลอด (P_{lamp}) (ภาคผนวก ก) ได้ดังในสมการที่ 2.4 และ 2.6

$$P_{lamp} = \frac{V_{lamp}^2}{R_{lamp}} \quad (2.4)$$

$$\text{เมื่อ} \quad R_{lamp} = \frac{\omega_s L}{\sqrt{\left(\frac{V_s}{V_{lamp}}\right)^2 - (1 - \omega_s^2 LC_{ig})^2}} \quad (2.5)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad P_{lamp} = \frac{V_{lamp}^2}{\omega_s L} \sqrt{\left(\frac{V_s}{V_{lamp}}\right)^2 - (1 - \omega_s^2 LC_{ig})^2} \quad (2.6)$$

$$\text{เมื่อ} \quad V_s = \frac{\sqrt{2}}{\pi} V_{dc} \quad (2.7)$$

2.5 ความไว(Sensitivity)

2.5.1 นิยามทั่วไปของความไว

ความไว (Sensitivity) หมายถึง อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรหนึ่งซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงของอีกตัวแปรหนึ่ง

2.5.2 สมการพื้นฐานของความไว

นิยามทั่วไปของความไว (Stanley M. Shinnars, 1972) การเปลี่ยนแปลงของ Y เทียบกับ X (S_x^Y) (Urs Mader, 1996) จะเป็นดังในสมการที่ (2.8)

$$S_x^Y = \frac{\partial Y}{\partial X} \cdot \frac{X}{Y} \quad (2.8)$$

2.5.3 ตัวแปรที่จะศึกษาความไวของการเปลี่ยนแปลงของกำลังออก

ต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่างๆ

ในวิทยานิพนธ์นี้ศึกษาความไวการเปลี่ยนแปลงของกำลังออกต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ แรงดันไฟตรงด้านเข้า (V_{dc}), ความถี่การทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ (f_s), ค่าความเหนี่ยวนำ (L), และค่าความจุของตัวเก็บประจุ (C_{ig}) เนื่องจากตัวแปรทั้ง 4 มีผลกระทบต่อพฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ และจากคำจำกัดความของความไว (S_X^Y) ในสมการที่ 2.8 และสมการของกำลังออกของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ (P_{lamp}) ในสมการที่ 2.6 สามารถคำนวณหาสมการความไวการเปลี่ยนแปลงของกำลังออกต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟตรงด้านเข้า (V_{dc}), ความถี่การทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ (f_s), ค่าความเหนี่ยวนำ (L) และค่าความจุของตัวเก็บประจุ (C_{ig}) (ภาคผนวก ค) ได้ดังในสมการที่ 2.10, 2.12, 2.14, และ 2.16 ตามลำดับ

$$S_{V_{dc}}^{P_{lamp}} = \frac{\partial P_{lamp}}{\partial V_{dc}} \cdot \frac{V_{dc}}{P_{lamp}} \quad (2.9)$$

$$S_{V_{dc}}^{P_{lamp}} = \frac{\frac{2 \left(\frac{V_{dc}}{V_{lamp}} \right)^2}{\pi^2} + \frac{\left[\frac{1 \left(\frac{V_{dc}}{V_{lamp}} \right)^2 - (1 - \omega_n^2)^2}{\pi^2} \right] \left(\frac{2V_{dc}}{V_{lamp}} \right) \frac{\partial V_{lamp}}{\partial V_{dc}}}{\left[\frac{2 \left(\frac{V_{dc}}{V_{lamp}} \right)^2 - (1 - \omega_n^2)^2}{\pi^2} \right] \left[\frac{2 \left(\frac{V_{dc}}{V_{lamp}} \right)^2 - (1 - \omega_n^2)^2}{\pi^2} \right]} \quad (2.10)$$

$$S_{\omega_s}^{P_{lamp}} = \frac{\partial P_{lamp}}{\partial \omega_s} \cdot \frac{\omega_s}{P_{lamp}} \quad (2.11)$$

$$S_{\omega_s}^{P_{lamp}} = \frac{\left[\frac{2 \left(\frac{V_{dc}}{V_{lamp}} \right)^2 - (1 - \omega_n^2)^2}{\pi^2} \right] \left[\frac{1 \left(\frac{V_{dc}}{V_{lamp}} \right)^2 - (1 - \omega_n^2)^2}{\pi^2} \right] \left(\frac{2\omega_s}{V_{lamp}} \right) \frac{\partial V_{lamp}}{\partial \omega_s}}{\left[\frac{2 \left(\frac{V_{dc}}{V_{lamp}} \right)^2 - (1 - \omega_n^2)^2}{\pi^2} \right] \left[\frac{2 \left(\frac{V_{dc}}{V_{lamp}} \right)^2 - (1 - \omega_n^2)^2}{\pi^2} \right]} \quad (2.12)$$

$$S_L^{P_{lamp}} = \frac{\partial P_{lamp}}{\partial L} \cdot \frac{L}{P_{lamp}} \quad (2.13)$$

$$S_L^{P_{lamp}} = - \frac{\left[\frac{2}{\pi^2} \left(\frac{V_{dc}}{V_{lamp}} \right)^2 - (1 - \omega_n^2) \right]}{\left[\frac{2}{\pi^2} \left(\frac{V_{dc}}{V_{lamp}} \right)^2 - (1 - \omega_n^2)^2 \right]} + \frac{\left[\frac{1}{\pi^2} \left(\frac{V_{dc}}{V_{lamp}} \right)^2 - (1 - \omega_n^2)^2 \right]}{\left[\frac{2}{\pi^2} \left(\frac{V_{dc}}{V_{lamp}} \right)^2 - (1 - \omega_n^2)^2 \right]} \left(\frac{2L}{V_{lamp}} \right) \frac{\partial V_{lamp}}{\partial L} \quad (2.14)$$

$$S_{C_{ig}}^{P_{lamp}} = \frac{\partial P_{lamp}}{\partial C_{ig}} \cdot \frac{C_{ig}}{P_{lamp}} \quad (2.15)$$

$$S_{C_{ig}}^{P_{lamp}} = \frac{\omega_n^2 (1 - \omega_n^2)}{\left[\frac{2}{\pi^2} \left(\frac{V_{dc}}{V_{lamp}} \right)^2 - (1 - \omega_n^2)^2 \right]} + \frac{\left[\frac{1}{\pi^2} \left(\frac{V_{dc}}{V_{lamp}} \right)^2 - (1 - \omega_n^2)^2 \right]}{\left[\frac{2}{\pi^2} \left(\frac{V_{dc}}{V_{lamp}} \right)^2 - (1 - \omega_n^2)^2 \right]} \left(\frac{2C_{ig}}{V_{lamp}} \right) \frac{\partial V_{lamp}}{\partial C_{ig}} \quad (2.16)$$

- เมื่อ $S_{V_{dc}}^{P_{lamp}}$ = ความไวการเปลี่ยนแปลงของกำลังออก (P_{lamp})
 ต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟตรงด้านเข้า (V_{dc})
- $S_{\omega_s}^{P_{lamp}}$ = ความไวการเปลี่ยนแปลงของกำลังออก (P_{lamp})
 ต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่การทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ($f_s = \frac{\omega_s}{2\pi}$)
- $S_L^{P_{lamp}}$ = ความไวการเปลี่ยนแปลงของกำลังออก (P_{lamp})
 ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำ (L)
- $S_{C_{ig}}^{P_{lamp}}$ = ความไวการเปลี่ยนแปลงของกำลังออก (P_{lamp})
 ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความจุของตัวเก็บประจุ (C_{ig})

$$\omega_n = \frac{\omega_s}{\omega_0} ; \text{ ความถี่พัสดาน} \quad (2.17)$$

$$\omega_s = 2\pi f_s ; \text{ ความเร็วเชิงมุมของความถี่การทำงานของ} \\ \text{บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์} \quad (2.18)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_{ig}}} \quad ; \text{ ความเร็วเชิงมุมของความถี่ธรรมชาติไม่หน่วง} \quad (2.19)$$

เมื่อได้สมการความไวการเปลี่ยนแปลงของกำลังออกต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟตรงด้านเข้า (V_{dc}), ความถี่การทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ (f_s), ค่าความเหนี่ยวนำ (L), และค่าความจุของตัวเก็บประจุ (C_{ig}) แล้ว นำเอาสมการที่ได้ไปคำนวณค่าความไวการเปลี่ยนแปลงของกำลังออกต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟตรงด้านเข้า (V_{dc}), ความถี่การทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ (f_s), ค่าความเหนี่ยวนำ (L), และค่าความจุของตัวเก็บประจุ (C_{ig}) ที่พิกัดแรงดันไฟตรงด้านเข้า (V_{dc}) 3 ค่า คือ 230V, 280V และ 350V ตามลำดับ โดยรายละเอียดจะกล่าวในบทต่อไป