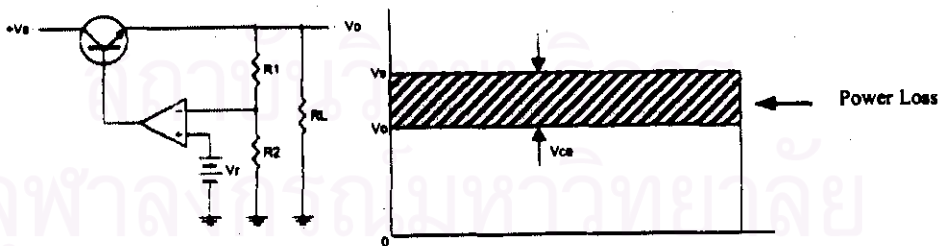


## บทที่ 2

### แหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์

#### 2.1 หลักการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตชิ่ง (Switching Power Supply)

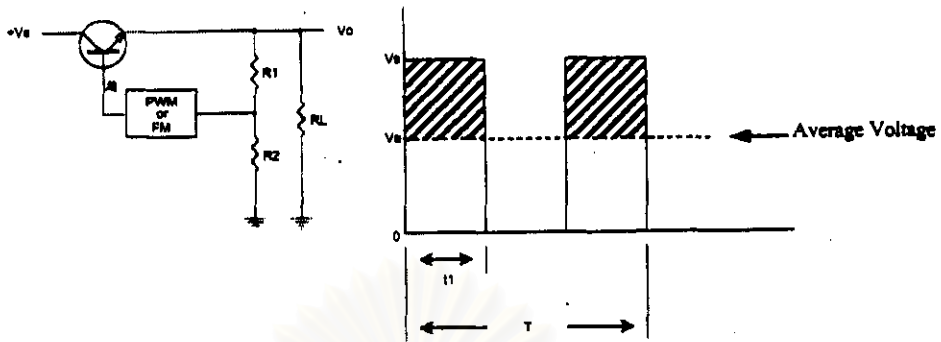
แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบเชิงเส้น (Linear Power Supply) เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้กันทั่วไปในงานด้านอิเล็กทรอนิกส์ยุคต้นมีลักษณะการทำงานดังแผนภาพรูปที่ 2.1 ก. การควบคุมศักดาไฟฟ้าทางด้านทางออกให้คงที่ใช้อุปกรณ์ควบคุมสารกึ่งตัวนำชนิดทรานซิสเตอร์ ซึ่งไบอัสให้ทำงานเป็นวงจรขยายแบบคอมมอนคอลเลกเตอร์ อุปกรณ์ควบคุมจะรับภาระการปรับศักดาไฟฟ้าให้คงที่ต่อเนื่อง ทำให้มีการสูญเสียกำลังไฟฟ้ามก ดังสมการศักดาไฟฟ้าทางด้านทางออกที่ 2.1 และ 2.2 จึงมีประสิทธิภาพต่ำ ปัจจุบันแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงได้มีการนำเทคนิคการสวิตช์อุปกรณ์ควบคุมที่อินคืบกับโหลดเป็นจิงหวะ (Chopper) เพื่อปรับค่าศักดาไฟฟ้าทางด้านทางออกเฉลี่ยให้คงที่ตามความต้องการของโหลด ดังแสดงการทำงานเปรียบเทียบในรูปที่ 2.1 ข. และการควบคุมศักดาไฟฟ้าทางด้านทางออกให้คงที่ สามารถปรับจิงหวะการสวิตช์ของอุปกรณ์ควบคุมได้ทั้งการแปรเปลี่ยนความถี่ ( $f$ ) หรือความกว้างของพัลส์ ( $t_1$ ) ดังสมการที่ 2.3 ด้วยกระบวนการผสมสัญญาณป้อนกลับแบบผสมความถี่ (Frequency Modulation; FM) หรือแบบผสมความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation; PWM)



รูปที่ 2.1 ก. แผนภาพการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบเชิงเส้น

$$V_O = V_S - V_{CE} \quad (2.1)$$

$$\text{และ } V_O = V_E = V_R \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.1 ข. แผนภาพการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบสวิตชิง

$$V_O = V_a = \frac{1}{T} \int_0^{t_1} V_S dt = \frac{t_1}{T} V_S = f t_1 V_S \quad (2.3)$$

จากโครงสร้างและเทคนิคการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงทั้งสองแบบทำให้มีการนำไปใช้งานที่แตกต่างกันไป โดยเฉพาะแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูงมักจะเลือกแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตชิงเสมอ ขณะที่แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ต้องการศักดาไฟฟ้าทางด้านทางออกคงที่มากและมีสิ่งรบกวนน้อยจะใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบเชิงเส้น ซึ่งพอจะสรุปข้อเปรียบเทียบทางเทคนิคของแหล่งจ่ายไฟฟ้าทั้งสองแบบได้ตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อเปรียบเทียบระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบเชิงเส้นและแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตชิง[3]

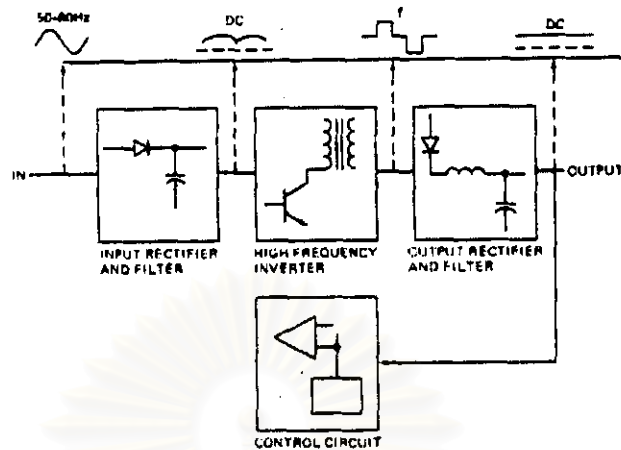
Linear Power Supply	Switching Power Supply
Constant current source	Constant power source
Low noise (EMI)	High noise (EMI) generator requires heavy output filters
No active switching elements	Active switching elements
Fast response	Fast response
Precise regulation	Good regulation
Low efficiency	High efficiency (depends on switching frequency)

(ต่อ) ตารางที่ 2.1 ข้อเปรียบเทียบระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบเชิงเส้นและแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตซิง[3]

Linear Power Supply	Switching Power Supply
Medium-high weight	Low weight (depends on switching frequency)
Series element must dissipate excess power; high thermal dissipation	Increase switching frequency, and decrease weight  Low thermal dissipation because of switching mode operation of series pass transistor
Simple circuitry	Complex circuitry
Low piece parts count	High piece parts count
Medium output impedance	Low output impedance
Complex circuitry required for current limiting Should be used for applications having widely varying input voltage	Most widely used power supply
Efficiencies 30 to 60%	Efficiencies 68 to 90%

แหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตซิงประกอบด้วยวงจรหลัก 4 ส่วนได้แก่ วงจรเรียงกระแสและวงจรกรองแรงดันทางด้านทางเข้า วงจรอินเวอร์เตอร์ วงจรควบคุมและวงจรเรียงกระแสและกรองแรงดันทางด้านทางออก ดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 2.2

กระบวนการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตซิง คือ การแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งอาศัยหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสวิตซิงและอุปกรณ์สวิตซ์ชนิดสารกึ่งตัวนำ หลังจากนั้นจึงแปลงไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวงจรเรียงกระแสและวงจรกรองแรงดันความถี่สูง



รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงส่วนประกอบของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตชิง [3]

จากแผนภาพในรูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นถึงส่วนประกอบของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตชิงแต่ละส่วนมีหน้าที่ดังต่อไปนี้

**วงจรเรียงกระแสและวงจรกรองแรงดันทางด้านทางเข้า (Input Rectifier and Filter Circuit)** เป็นส่วนที่ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ความถี่ต่ำ (50 Hz) เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ด้วยไดโอดและคาปาซิเตอร์ นอกจากนี้ทางด้านทางเข้าจำเป็นต้องใส่วงจรกรองแรงดัน (Line Filter) เพื่อลดสัญญาณรบกวน (Noise) ที่อาจปะปนมาจากสายไฟฟ้า (AC Line)

**วงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter Circuit)** ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสวิตชิงร่วมกับอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่สวิตช์ โดยอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่สวิตช์จะทำการสวิตช์ตามความถี่ที่วงจรควบคุมกำหนดและหม้อแปลงไฟฟ้าจะทำหน้าที่เปลี่ยนขนาดของศักดาไฟฟ้าให้มากขึ้น (Step Up) หรือน้อยลง (Step Down) ตามการออกแบบเพื่อใช้งาน

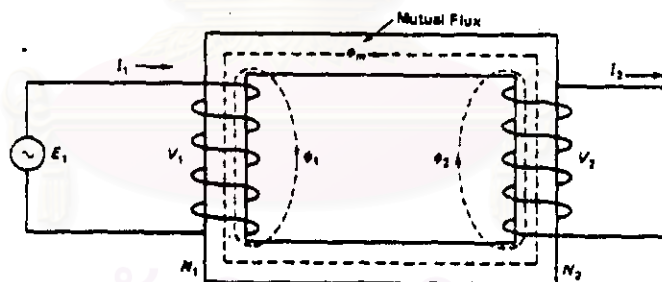
**วงจรควบคุม (Control Circuit)** ควบคุมศักดาไฟฟ้าทางด้านทางออกให้คงที่ (Regulate) ด้วยการตรวจสอบระดับศักดาไฟฟ้าทางด้านทางออกป้อนย้อนกลับมาควบคุมการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ (Feedback Control) การควบคุมระดับศักดาไฟฟ้าทางด้านทางออกอาจจะแปรเปลี่ยนความถี่หรือความกว้างพัลส์ที่ใช้ควบคุมอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่สวิตช์ (Switching Element)

วงจรเรียงกระแสและวงจรกรองแรงดันทางด้านทางออก (Output Rectifier and Filter Circuit) ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อจ่ายให้กับโหลดด้วย คาปาซิเตอร์และไดโอดสวิตช์ (Diode Switching) สำหรับการกรองสัญญาณรบกวนนี้จะต้องป้องกันถึงรบกวนที่เกิดจากวงจรสวิตช์ในแหล่งจ่ายเองมิให้รบกวนโหลด

## 2.2. ส่วนประกอบของชุดแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตชิง

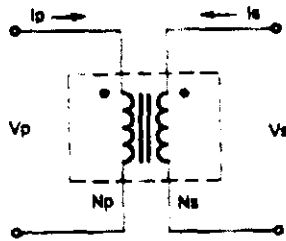
### 2.2.1. หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ทำหน้าที่แปลงขนาดของศักดาไฟฟ้า โดยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ทางไฟฟ้า โครงสร้างทางแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วยขดลวดหนึ่งขดหรือมากกว่า ซึ่งเชื่อมโยงกันทางแม่เหล็ก โดยวงจรแม่เหล็กหรือแกน ซึ่งอาจจะเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กหรือวัสดุที่ไม่มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็ก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 2.3 แผนภาพการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า

จากแผนภาพรูปที่ 2.3 ขดลวดทางด้านทางเข้า  $N_1$  เรียกว่า “ขดลวดปฐมภูมิ” และขดลวดทางด้านทางออก  $N_2$  เรียกว่า “ขดลวดทุติยภูมิ” ถ้าหม้อแปลงไฟฟ้ามีจำนวนรอบของขดลวด  $N_p > N_s$  จะได้ศักดาไฟฟ้าเหนี่ยวนำทางด้านทางออกน้อยกว่าศักดาไฟฟ้าทางด้านทางเข้า หม้อแปลงไฟฟ้าจะทำงานแบบลดศักดาไฟฟ้า เรียกว่า “Step Down Transformer” ขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้ามีจำนวนรอบ  $N_s > N_p$  ศักดาไฟฟ้าเหนี่ยวนำทางด้านทางออกจะมากกว่าศักดาไฟฟ้าทางด้านทางเข้า หม้อแปลงไฟฟ้าจะทำงานแบบเพิ่มศักดาไฟฟ้า เรียกว่า “Step Up Transformer”



รูปที่ 2.4 สัญลักษณ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติ

ถ้าหม้อแปลงไฟฟ้านั้นเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติ (Ideal Transformer) จะไม่มีการสูญเสียกำลังไฟฟ้าระหว่างการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าทางด้านทางเข้าและทางออกในแกนหม้อแปลงไฟฟ้า นั่นคือ กำลังไฟฟ้าทางด้านทางเข้าและทางออกจะเท่ากัน ขณะที่ศักดาไฟฟ้าทางด้านทางออกจะขึ้นกับจำนวนรอบของขดลวด ดังนั้น สมการของหม้อแปลงไฟฟ้าจะเป็น

$$\text{กำลังไฟฟ้า} \quad P_o = P_i \text{ และ } V_s I_s = V_p I_p \quad (2.4)$$

$$\text{ศักดาไฟฟ้า} \quad V_p = a V_s \text{ และ } \frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} = a \quad (2.5)$$

$$\text{จากสมการที่ 2.4 และ 2.5 จะได้ } \frac{V_p}{V_s} = \frac{I_s}{I_p} = \frac{N_p}{N_s} \quad (2.6)$$

โดยที่

$P_o, P_i$  คือ กำลังไฟฟ้าทางด้านทางออกและทางด้านทางเข้า (W)

$V_s, V_p$  คือ ศักดาไฟฟ้าทางด้านทางออกและทางด้านทางเข้า (V)

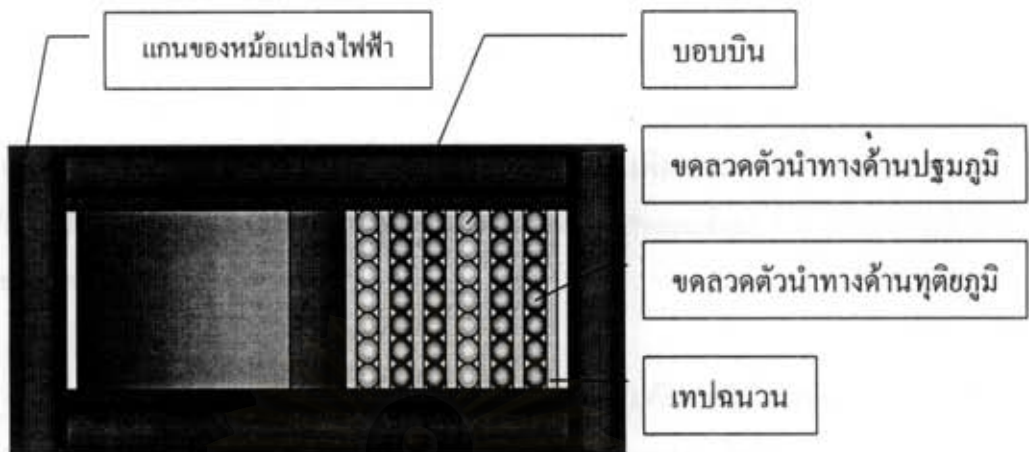
$I_s, I_p$  คือ กระแสไฟฟ้าทางด้านทางออกและทางด้านทางเข้า (A)

$a$  คือ อัตราจำนวนรอบของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า (Turn Ratio)

### ก. โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้าโดยทั่วไปประกอบไปด้วย ขดลวดอย่างน้อยจำนวนสองชุด คือ ขดลวดตัวนำปฐมภูมิและขดลวดตัวนำทุติยภูมิ แกนของหม้อแปลงไฟฟ้า บอบบิ้นและเทปฉนวน เป็นต้น ในรูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า





รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบของหม้อแปลงไฟฟ้า

ก.1 ขดลวดปฐมภูมิ (Primary Winding,  $N_p$ ) ขดลวดที่รับศักดาไฟฟ้าเข้าสู่หม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อทำให้เกิดการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าและสร้างฟลักซ์แม่เหล็กในแกนตัวนำ

ก.2 ขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Winding,  $N_s$ ) ขดลวดที่ทำหน้าที่จ่ายศักดาไฟฟ้าออกไปสู่วงจรภายนอก โดยศักดาไฟฟ้านี้เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำฟลักซ์และสนามแม่เหล็กจากขดลวดปฐมภูมิผ่านแกนหม้อแปลงไฟฟ้า

ก.3 แกนหม้อแปลงไฟฟ้า (Core) แกนของหม้อแปลงไฟฟ้าอาจทำมาจากวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็ก (Magnetic Material) หรือวัสดุที่ไม่มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็ก (Non-Magnetic Material) วัสดุที่ใช้ทำเป็นแกนของหม้อแปลงไฟฟ้า (Core Material) มีหลายชนิด โดยแต่ละชนิดก็มีความแตกต่างกันไปทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับวัตถุประสงค์ของการใช้งานดังต่อไปนี้[3]

**Air Core** แกนชนิดนี้ใช้สำหรับแก้ปัญหาเรื่องสนามแม่เหล็กที่มีความผิดเพี้ยน โดยขดลวดตัวนำจะพันอยู่บนแกนที่สร้างขึ้นด้วยการออกแบบโดยเฉพาะ วัสดุที่ใช้ทำเป็นแกนจะต้องมีค่าความเป็นตัวนำต่ำ (Low Conductivity) และมีความสูญเสียน้อย (Low Dielectric Loss) ค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance) และความสามารถปรับความเหนี่ยวนำได้โดยจำนวนรอบที่พันบนแกน โดยปกติเหมาะสำหรับใช้งานกับความถี่สูง

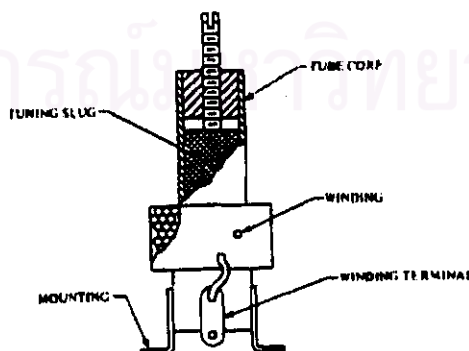
**Laminated Iron Core** แกนชนิดนี้เหมาะกับการใช้งานที่ความถี่ต่ำ แกนจะทำจาก Soft Iron Alloy ซึ่งจะเป็นแผ่นบางๆ (Laminations Stamped) หนาประมาณ 0.003 ถึง 0.014 นิ้ว และเคลือบด้วยสารที่เป็นฉนวน (Electrical Insulation) เพื่อลดกระแสไหลวน (Eddy Current) ค่าฮิสเตอร์ซิส (Hysteresis) และค่าความซึมซาบของแกน (Permeability) สามารถปรับได้จากช่องว่างของแกน (Air Gap)

**Powdered Iron Core** แกนชนิดนี้เหมาะสมกับการใช้งานที่ความถี่ประมาณ 5 Hz ถึง 500 kHz แกนจะทำจากวัสดุประเภท Ferromagnetic Particles โดยความถี่ที่ตอบสนองในการใช้งานจะขึ้นอยู่กับรูปลักษณะของแกน (Core Geometry) ซึ่งผลของความชื้น (Humidity) และอุณหภูมิจะมีผลต่อค่าฮิสเตอร์ซิสและค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กของแกน

**Ferrite Core** แกนชนิดนี้เหมาะสมกับการใช้งานที่ความถี่สูงถึง 100 MHz สามารถใช้แทนแกน Laminated Iron และแกน Powdered Iron ได้ แกนชนิดนี้ทำจากวัสดุประเภท Nonconductive Mixed Crystals of Manganese Ferrite ( $MnFe_2O_4$ ) และ Nickel Ferrite ( $NiFe_2O_4$ ) ซึ่งมีค่า ฟลักซ์อิ่มตัวต่ำ (Saturation Flux) กว่า และสามารถลดกระแสไหลวนได้มากกว่า แกน Laminated Iron และแกน Powdered Iron

ชนิดของแกนหม้อแปลงไฟฟ้า (Core Types) มีหลายชนิดด้วยกัน ดังต่อไปนี้ [3]

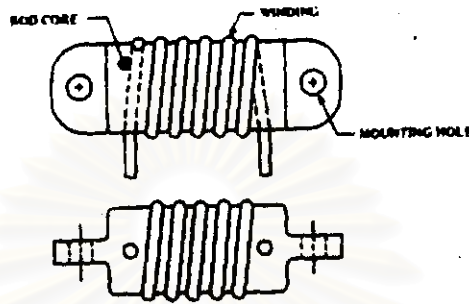
**Tube Core** แกนหม้อแปลงไฟฟ้าทำจากวัสดุประเภท Nonmagnetic จะมีค่า Inductance ต่ำ และสามารถเปลี่ยนค่า Inductance ได้โดยการปรับแกนลงใน Tube แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แกนหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด Tube Core

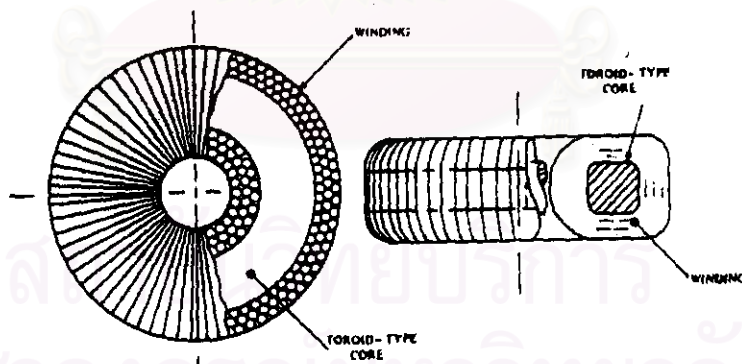


**Rod Core** แกนหม้อแปลงไฟฟ้าทำจากวัสดุประเภท Nonmagnetic และ Magnetic จะมีค่า Inductance สูงเมื่อเทียบกับปริมาณของแกน ไม่สามารถปรับค่า Inductance ได้ เหมาะสำหรับการใช้เครื่องพันขดลวดตัวนำ แสดงดังรูปที่ 2.7



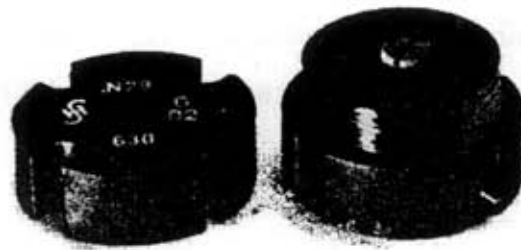
รูปที่ 2.7 แกนหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด Rod Core

**Toroid Core** แกนหม้อแปลงไฟฟ้าทำจากวัสดุประเภท Powdered Iron และ Ferrite Iron เหมาะกับการใช้งานความถี่ 5 Hz ถึง 50 kHz แกนชนิดนี้มีค่า Permeability สูง และมีค่า Dielectric Loss ต่ำกว่า Rod Core เหมาะสำหรับการใช้งานในวงจร Converter และวงจร Inverter โดยจะสามารถช่วยลด EMI (Electromagnetic Interference) นอกจากนี้แล้ว แกนชนิดนี้ยังสามารถทำจากแกนแบบ Laminate และแกนแบบ Ferrite ได้ แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แกนหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด Toroid Core

**Pot Core** แกนหม้อแปลงไฟฟ้าทำจากวัสดุประเภท Powdered Iron เหมาะกับการใช้งานความถี่ 50 Hz ถึง 500 kHz และถ้าเป็นแกน Ferrite จะเหมาะกับการใช้งานความถี่ 1 kHz ถึง 20 MHz สามารถปรับค่า Inductance ได้ประมาณ  $\pm 10\%$  ด้วยการปรับ Air Gap และการเลื่อนแกนตัวนำ แกนชนิดนี้มีคุณสมบัติในการช่วยลดค่า Hysteresis Loss และค่า Temperature Coefficient มีค่า Permeability ต่ำและลดการเกิดปัญหาแกนอิ่มตัวแรงแม่เหล็ก แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แกนหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด Pot Core

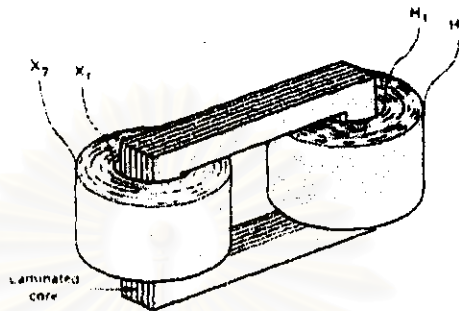
**Fabricated Core** แกนหม้อแปลงไฟฟ้าทำจากวัสดุประเภท Soft Iron และ Molded Solid ของ Iron หรือ Ferrite แกนมีหลายรูปแบบ เช่น E, I, U, F และ C เป็นต้น ความถี่ในการใช้งานขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาใช้ทำเป็นแกนตัวนำ สามารถปรับ Air Gap เพื่อควบคุมค่าความซึมซาบและการเกิดการอิ่มเส้นแรงแม่เหล็ก แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แกนหม้อแปลงชนิด Fabricated Core

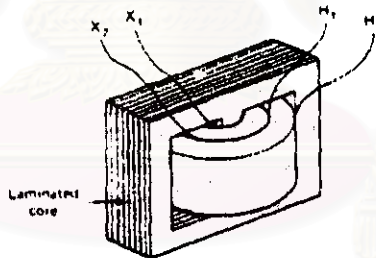
โดยทั่วไปแล้วแกนหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่ต่ำแบบแกนเหล็กมักทำจากแผ่นลามิเนตบางๆ เพื่อลดความสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสที่ไหลวน แกนหม้อแปลงไฟฟ้าทำหน้าที่เป็นตัวนำหรือทางเดินของฟลักซ์ สามารถแบ่งชนิดของแกนได้สองประเภทตามลักษณะการพันขดลวดดังนี้

**ชนิดคอร์ (Core Type)** การพันขดลวดบนแกนชนิดนี้มักพันขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิแยกกันดังรูปที่ 2.11 การพันขดลวดเช่นนี้ทำให้เกิดการรั่วไหลของฟลักซ์ (Flux Leakage) น้อย



รูปที่ 2.11 แกนหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดคอร์

**ชนิดเชลล์ (Shell Type)** การพันขดลวดบนแกนชนิดนี้มักพันขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิตั้งรวมกันดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แกนหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดเชลล์

**ก.4 บอบบิน (Bobbin)** ทำหน้าที่เป็นโครงสำหรับพันขดลวดเพิ่มความสะดวกในการพันขดลวดตัวนำและป้องกันการถ่วงจรระหว่างขดลวดตัวนำกับแกนตัวนำ โดยปกติแล้วบอบบินจะทำจากวัสดุที่มีคุณสมบัติความเป็นฉนวนที่ดี ทนความร้อนได้สูง ไม่ติดไฟและมีความมันคงแข็งแรง นอกจากนี้แล้ววัสดุที่ใช้ทำบอบบินต้องเป็นไปตามมาตรฐานของ IEC [3] บอบบินส่วนมากจะออกแบบมาให้มีขนาดมาตรฐานตามขนาดของแกนตัวนำและมีความสะดวกในการใช้งาน เช่น มีขาสำหรับยึดติดกับแผ่น PCB หรือยึดกับฐานแท่นเครื่อง เป็นต้น

ก.5 เทปฉนวน (Insulation Tape) เทปฉนวนทำหน้าที่เป็นฉนวนหรือเพิ่มความเป็นฉนวนให้กับระหว่างลวดตัวนำด้วยกันและลวดตัวนำกับแกนตัวนำ ใช้พันเป็นตัวรองระหว่างชั้นของขดลวดและบอบบิน โดยทำมาจากวัสดุที่มีคุณสมบัติคล้ายกับบอบบิน คือ มีความเป็นฉนวนที่ดี ทนอุณหภูมิได้สูงและไม่ติดไฟ เป็นต้น เช่น ไมลาร์ (Mylar) โพลีเอสเตอร์ (Polyester) และกระดาษฉนวน เป็นต้น เทปฉนวนจะแบ่งออกเป็นกลุ่มได้ตามวัสดุที่ใช้และความสามารถในการทนอุณหภูมิขณะใช้งาน แสดงในตารางที่ 2.2 และตารางที่ 2.3 การเลือกใช้เทปฉนวนก็ควรเลือกให้เหมาะสมกับการใช้งานไม่ควรพันเทปฉนวนมากเกินไปเพราะจะทำให้ความสามารถในการระบายความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้าลดลงและอาจทำให้มีการสะสมความร้อนในหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งอาจจะทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าเสียหายได้

ตารางที่ 2.2 การจัดกลุ่มของเทปฉนวนตามความสามารถในการทนอุณหภูมิ[3]

Class of Insulation	Typical Ambient Temperature in °C	Maximum Operating Temperature in °C
O	40	90
A	40	105
B	75	130
F	75	155
H	85	180

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติเทปฉนวนชนิดต่างๆ [3]

Product Number	Description	Thickness (mm)	Length (m)	Adhesion (Kg/V)	Tensile Strength (Kg/V)	Elongation (%)	Break-down Voltage (kV)	Insulation class (°C)	Features
IF5X	PVC WIRE HARNESS TAPE	0.13	20	0.5	5	200	5	80	Soft and flexible, good workability on automotive wiring harness. Black color.
IU79	PVC WIRE HARNESS TAPE	0.13	10	0.5	5	200	5	80	Mat surface, black color. High elongation and maximum conformability for wiring harness.
33946	PVC ELECTRICAL INSULATING TAPE	0.13	10	0.5	5	200	5	80	Extremely flexible, good adhesion. For wire and cable insulation, bundling and reinforcing, assorted colors for color coding of cables.
		0.15			6		6		
		0.18			7		7		
		0.20			8		8		
33946FR	PVC ELECTRICAL INSULATING TAPE	0.15 0.20	20	0.5	6 8	200	6 8	80	Flame retardant version 33946, meets British standard BS-3924.
33546	PVC ELECTRICAL INSULATING TAPE	0.18 0.20	20	0.5	7 8	200	7 8	80	Good conformability, no flagging or deterioration. 7 colors available. Same uses as 33946. Meets UL & CSA standards.
33146	PVC ELECTRICAL INSULATING TAPE	0.18	20	0.5	7	200	7	80	Good adhesion, flame retardant. Black color. Same uses as 33946. Meets UL, Semko, Nemko, Demko standards.
		0.20			8		8		
		0.25			10		10		
33146+	PVC ELECTRICAL INSULATING TAPE	0.20	20	0.5	8	200	8	80	Excellent adhesion even in cold weather, flame retardant. Black color Meets Semko standard.
33646	PVC ELECTRICAL INSULATING TAPE	0.18	20	0.5	7	200	7	80	Flame retardant, cold and weather resistant. Black color. Same uses as 33946. Meets UL & CSA standards.
		0.19			7.5		7.5		
		0.20			8		8		
33647	PVC ELECTRICAL INSULATING TAP	0.15	33	0.39	6	200	6	90	Meets VDE 0340 type K-10 German standard, special tape for electrical installations. Black and grey colors at present.
		0.20			8		8		
SF07	SELF FUSING TAPE	0.50	10	—	—	600	14	80	Butyl rubber tape suitable for electrical insulation, cable splicing and terminating. Meets UL-510 standard.
SF06	SELF FUSING TAPE	0.76	10	—	—	500	15	80	Same uses as SF07 but with flame retardant property.
ACO	ACETATE CLOTH TAPE	0.22	25	0.8	9.5	8	1.7	105	Thermosetting rubber adhesive, applications in the Construction of electrical equipments for insulation.
GL06%	GLASS CLOTH TAPE	0.19	55	1.0	50	5	3	180	Silicone adhesive, good solvent resistant, high dielectric strength. Flame retardant.
GL15%	GLASS CLOTH TAPE	0.19	55	0.8	50	5	2	155	Acrylic adhesive, good ageing characteristic, solvent resistant.
GL27%	GLASS CLOTH TAPE	0.19	55	1.2	50	5	2.5	130	Rubber adhesive, edge-tear resistance, good conformability.
KA00	KAPTON* TAPE	0.06	33	0.7	14	50	6.5	180	Silicone adhesive, for high temp masking, insulating, component packaging.
MY0	POLYESTER TAPE	0.065	66	1.3	9	70	5	120	0.025mm polyester film, rubber adhesive, most suitable for use with greased wires.
MY1	POLYESTER TAPE	0.06	20	0.6	9	80	4	130	0.025mm polyester film, acrylic adhesive, good solvent resistant.
			50						
MY7	POLYESTER TAPE	0.093	66	0.8	18	70	8	130	0.05mm polyester film, light dielectric strength, good solvent resistant.
MY9%	POLYESTER TAPE	0.063	66	0.8	9	80	4	130	Acrylic adhesive, solvent resistant, flame retardant.
NM10	NOMEX* PAPER TAPE	0.10	50	1.0	10	5	2	155	Excellent solvent resistant, economical, thin, high dielectric strength.



## ข. สมการพื้นฐานของหม้อแปลงไฟฟ้า

จากโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าในทางปฏิบัติพบว่า การทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าจะไม่เป็นไปตามอุดมคติ มีการรั่วไหลของฟลักซ์แม่เหล็กและการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในแกนตามกฎการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและสร้างกระแสไหลวนขึ้นรวมทั้งมีพารามิเตอร์แฝงที่ต้องนำมาคิดคำนวณ เพื่อชดเชยในการออกแบบให้หม้อแปลงไฟฟ้าทำงานได้เต็มพิกัด

จากการคำนวณหาความสัมพันธ์ของจำนวนรอบของขดลวดและศักดาไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดทางด้านปฐมภูมิเริ่มจากกฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) เมื่อขดลวดตัวนำถูกเหนี่ยวนำด้วยฟลักซ์แม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำ (emf) ขึ้นดังสมการที่ 2.7 [1,2,3,4]

$$e = -N \times 10^{-8} \frac{d\phi}{dt} \quad (2.7)$$

จากสมการที่ 2.7 ในกรณีที่รูปคลื่นไฟฟ้ากระแสสลับเป็นรูปคลื่นไซน์ (Sine Wave) สามารถหาศักดาไฟฟ้าที่หม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายให้ได้ ดังสมการที่ 2.8 และสมการที่ 2.9

$$E_{rms} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \phi_m N f \times 10^{-8} \quad (2.8)$$

$$\text{หรือ } E_{rms} = 4.44 B_{max} A_p N f \times 10^{-8} \quad (2.9)$$

โดยที่

$e$  คือ ศักดาไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ( $V$ )

$E_{rms}$  คือ ค่าศักดาไฟฟ้า rms ( $V$ )

$\phi_m$  คือ ค่าฟลักซ์สูงสุด ( $Wb$ )

$B_{max}$  คือ ค่าความหนาแน่นฟลักซ์สูงสุด ( $G$ )

$A_p$  คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนตัวนำ ( $cm^2$ )

$N$  คือ จำนวนรอบของขดลวดตัวนำ ( $Turns$ )

$f$  คือ ความถี่ทางไฟฟ้า ( $Hz$ )



จากสมการที่ 2.9 สามารถเขียนในรูปของการหาจำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิได้เป็น

$$N_p = \frac{E_{rms} \times 10^8}{4.44 B_{max} A_e f} \quad (2.10)$$

### ข.1 ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด

ขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าจากการคำนวณตามกฎการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของศักดาไฟฟ้าและจำนวนรอบของขดลวด

$$E = N \frac{d\phi}{dt} = L \frac{di}{dt} \quad (2.11)$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์รั่วไหลกับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดตัวนำ เป็นไปดังสมการที่ 2.13

$$L = \frac{\lambda}{i} \quad (2.12)$$

จากสมการที่ 2.11 และ 2.12 เมื่อพิจารณากระบวนการสร้างฟลักซ์สนามแม่เหล็กตามทฤษฎีสถานะไฟฟ้าจะพบว่า ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กและฟลักซ์แม่เหล็กจะสัมพันธ์กันตามสมการที่ 2.13 ถึง 2.18

$$B = \mu H \quad (2.13)$$

$$H = \frac{Ni}{l_c} \quad (2.14)$$

$$B = \frac{\mu_c Ni}{l_c} \quad (2.15)$$

$$\phi = BA_e = \frac{\mu_c A_e Ni}{l_c} \quad (2.16)$$

$$\lambda = NBA_e = \frac{\mu_c A_e N^2 i}{l_c} \quad (2.17)$$

$$\text{จะหาค่าของ } L \text{ ได้จาก } L = \frac{\mu_c A_e N^2}{l_c} \quad (2.18)$$

โดยที่

- $E$  คือ ศักดาไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวด ( $V$ )
- $N$  คือ จำนวนรอบของขดลวดตัวนำ ( $Turns$ )
- $L$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำ ( $H$ )
- $\lambda$  คือ Leakage Flux ( $Wb \cdot Turns$ )
- $i$  คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวด ( $A$ )
- $B$  คือ ความหนาแน่นฟลักซ์ ( $G$ )
- $\mu_c$  คือ ความซึมซาบของแกนตัวนำ ( $\mu_c = \mu_r \mu_o$ )
- $H$  คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก ( $A \cdot Turns / m$ )
- $l_c$  คือ Magnetic path Length ( $m$ )
- $\phi$  คือ ค่าฟลักซ์ ( $Wb$ )
- $A_e$  คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนตัวนำ ( $m^2$ )

และเมื่อนำสมการของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของศักดาไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า จำนวนรอบของขดลวดจากสมการที่ 2.6 และสมการที่ 2.11 โดย  $E_{rms}$  คือ  $V_p$  จะสามารถคำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิได้ดังความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.19

$$a = \frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} = \frac{I_s}{I_p} = \sqrt{\frac{L_p}{L_s}} \quad (2.19)$$

โดยที่

- $a$  คือ อัตราจำนวนรอบของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า
- $V_s, V_p$  คือ ศักดาไฟฟ้าทางด้านทางออกและทางด้านทางเข้า ( $V$ )
- $N_s, N_p$  คือ จำนวนรอบของขดลวดทางด้านทุติยภูมิและปฐมภูมิ ( $Turns$ )
- $I_s, I_p$  คือ กระแสไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิและปฐมภูมิ ( $A$ )
- $L_p, L_s$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำทางด้านทุติยภูมิและปฐมภูมิ ( $H$ )

## ข.2 ตัวเก็บประจุแฝงในหม้อแปลง (Transformer Capacitance)

หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้งานที่ความถี่สูงๆ มีกำลังไฟฟ้าสูงและใช้งานเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Step Up ขณะทำงานหม้อแปลงไฟฟ้าจะเสมือนมีตัวเก็บประจุอยู่ระหว่างชั้นของขดลวดที่มีจำนวนมาก สามารถหาค่าตัวเก็บประจุแฝงได้ดังสมการ [2]

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon A_S}{l_1} \quad (2.20)$$

โดยที่

- $C_0$  คือ ค่าความจุแฝง ( $F$ )
- $\epsilon_0$  คือ  $8.85 \times 10^{-12}$  ( $F/m$ )
- $\epsilon$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฉนวน
- $A_S$  คือ พื้นที่สำหรับพันขดลวดตัวนำ ( $m^2$ )
- $l_1$  คือ ความหนาของฉนวน ( $m$ )

## ข.3 การสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้า

ในทางปฏิบัติการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าไม่ได้อยู่ในรูปของหม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติ เส้นลวดของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิมีความต้านทานในเส้นลวดขณะมีกระแสไหลผ่านจะเกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าขึ้น ขณะที่การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กในแกนหม้อแปลงไฟฟ้าจะทำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำไหลวนขึ้นเกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในแกน ดังนั้นในหม้อแปลงไฟฟ้าขณะทำงานจึงเกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าขึ้นดังนี้

**ข.3.1 Copper Loss** คือ การสูญเสียกำลังไฟฟ้าในขดลวดตัวนำเนื่องจากความต้านทานของขดลวดตัวนำเอง ความต้านทานของขดลวดตัวนำจะเล็กน้อยเพียงใดก็ขึ้นอยู่กับจำนวนรอบและขนาดของขดลวดตัวนำ โดยความสูญเสียจากขดลวดตัวนำนี้จะเกิดขึ้นทั้งในขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้าทำงานเมื่อไม่มีโหลดและขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้าทำงานเมื่อมีโหลด กล่าวคือ ในขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้าไม่มีโหลดจะเกิดความสูญเสียเฉพาะในส่วนของขดลวดตัวนำทางด้านปฐมภูมิและเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้ามีโหลด ความสูญเสียที่เกิดขึ้นจะเกิดจากความสูญเสียขดลวดตัวนำทั้งทางด้านปฐมภูมิและทางด้านทุติยภูมิด้วย

โดยพลังงานที่สูญเสียจะถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นความร้อน ดังสมการ

$$P_{Cu} = i^2 R_N \quad (2.21)$$

โดยที่

$P_{Cu}$  คือ Copper Loss ( $W$ )

$i$  คือ กระแสที่ไหลผ่านขดลวดตัวนำ ( $A$ )

$R_N$  คือ ความต้านทานของขดลวดตัวนำ ( $\Omega$ )

**ข.3.2 Core Loss** คือ ความสูญเสียเนื่องจากการแกนตัวนำ ซึ่งจะประกอบไปด้วย ความสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอร์ซิสและความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน

**Hysteresis Loss** คือ ความสูญเสียเนื่องจากการเสียดสีแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกนตัวนำ เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าจะทำงานเมื่อมีไฟฟ้ากระแสสลับจ่ายให้ เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมีการสลับทิศทางทุกครั้งตามขนาดและทิศทางของไฟฟ้ากระแสสลับที่จ่ายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า และทุกครั้งที่เส้นแรงแม่เหล็กกลับทิศทาง เส้นแรงแม่เหล็กเองจะต้องใช้พลังงานในการกลับทิศทางกับสนามแม่เหล็กที่หลงเหลือจากอีกทิศทางหนึ่ง ดังนั้น พลังงานบางส่วนจะสูญเสียไปในขณะนั้น ซึ่งพลังงานที่สูญเสียไปจะอยู่ในรูปของความร้อน

**Eddy Current Loss** คือ ความสูญเสียที่เกิดจากกระแสไหลวน เพราะว่าขณะที่กระแสไฟฟ้าสลับมีการเปลี่ยนแปลงของขนาดและทิศทางนั้น เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงและตัดกับแกนตัวนำทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในแกนตัวนำและเนื่องจากตัวแกนตัวนำเองก็มีความต้านทานอยู่ กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแกนตัวนำจึงเปลี่ยนมาในรูปของความร้อน

โดยพลังงานที่สูญเสียจะถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นความร้อน ดังสมการ

$$P_{core} = i^2 R_{core} \quad (2.22)$$

โดยที่

$P_{core}$  คือ Core Loss ( $W$ )

$i$  คือ กระแสไฟฟ้า ( $A$ )

$R_{core}$  คือ ความต้านทานของแกนตัวนำ ( $\Omega$ )

#### ข.4 อุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า

อุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะทำงานเมื่อมีโหลดสูงสุดเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบ เพราะความร้อนที่เกิดขึ้นจากหม้อแปลงไฟฟ้าล้วนแล้วแต่เกิดจากกำลังงานที่หม้อแปลงไฟฟ้าสูญเสียไป อันเนื่องมาจาก Copper Loss และ Core Loss และเป็นอุณหภูมิที่ต้องระบายออก ซึ่งอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นขณะทำงานสามารถหาได้จากสมการนี้

$$\Delta T = \frac{23.5 \times (P_{Cu} + P_{core})}{\sqrt{A_c \times A_w}} \quad (2.23)$$

โดยที่

$\Delta T$  คือ อุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิห้อง ( $^{\circ}C$ )

$P_{Cu}$  คือ กำลังสูญเสียภายในขดลวดตัวนำ ( $W$ )

$P_{core}$  คือ กำลังสูญเสียภายในแกนตัวนำ ( $W$ )

$A_c$  คือ พื้นที่หน้าตัดของแกน ( $mm^2$ )

$A_w$  คือ พื้นที่ช่องทันขดลวดตัวนำบนบอบบิน ( $mm^2$ )

#### ค. ประสิทธิภาพ (Efficiency, $\eta$ )

ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า ( $\eta$ ) คิดจากอัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าด้านทางออก (Output Power,  $P_o$ ) ต่อกำลังไฟฟ้าด้านทางเข้า (Input Power,  $P_i$ ) ดังสมการ

$$\eta(\%) = \frac{P_o}{P_i} \times 100\% \quad (2.24)$$

$$\text{ซึ่ง } P_i = P_o + P_{loss} = P_o + (P_{Core} + P_{Cu}) \quad (2.25)$$

โดยที่

$\eta$  คือ ประสิทธิภาพ (%)

$P_o$  คือ กำลังไฟฟ้าด้านทางออก ( $W$ )

$P_i$  คือ กำลังไฟฟ้าด้านทางเข้า ( $W$ )

### ง. การฉนวนและการระบายความร้อน (Insulated and Cooling Methods)

ในขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้าทำงานนั้นกระบวนการระบายความร้อนและการฉนวนเป็นสิ่งจำเป็นที่จะทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าทำงานได้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพสูง โดยเฉพาะหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทำงานในระดับศักดาไฟฟ้าสูงและกำลังไฟฟ้าสูง

#### ง.1 การฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้า

การฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้าได้แก่ การใส่ฉนวนกันระหว่างขดลวดตัวนำเอง การฉนวนระหว่างขดลวดตัวนำกับแกนหม้อแปลงไฟฟ้าและการฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากับตัวถังบรรจุหม้อแปลงไฟฟ้า การฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถแบ่งออกเป็นสามแบบตามชนิดของการฉนวนได้ดังนี้

**หม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้ง (Dry Type Transformer)** คือ หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีพิทต์กำลังไฟฟ้าและศักดาไฟฟ้าไม่สูงมากนัก ส่วนมากมักใช้ในอาคารใช้วัสดุที่เป็นฉนวนกันระหว่างขดลวดตัวนำ แกนหม้อแปลงไฟฟ้าและตัวถังบรรจุหม้อแปลงไฟฟ้า เช่น อากาศ น้ำมันวานิช (Varnish) เทปฉนวน Epoxy Resin และฉนวนของลวดอบน้ำยาเอง เป็นต้น มีความสะดวกในการบำรุงรักษาและซ่อมแซม

**หม้อแปลงไฟฟ้าแบบน้ำมัน (Oil Type Transformer)** คือ หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีพิทต์กำลังไฟฟ้าและศักดาไฟฟ้าสูง ส่วนมากมักใช้ภายนอกอาคารใช้น้ำมันร่วมกับกระดาษเป็นฉนวนกันระหว่างขดลวดตัวนำ แกนหม้อแปลงไฟฟ้าและตัวถังบรรจุหม้อแปลงไฟฟ้าโดยตัวหม้อแปลงไฟฟ้าจะแช่อยู่ในน้ำมัน ซึ่งจะต้องไม่มีฟองอากาศหรือความชื้นอยู่ในน้ำมันหรือส่วนใดๆ ของ



หม้อแปลงไฟฟ้า เพราะอาจทำให้เกิด Partial Discharge หรือ Break Down ขึ้นเป็นสาเหตุให้หม้อแปลงไฟฟ้าเกิดความเสียหาย น้ำมันที่ใช้เป็นฉนวนจะมีหลายประเภทขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้งาน หม้อแปลงไฟฟ้าแบบน้ำมันนี้มีความต้องการบำรุงรักษาบ่อยเนื่องจากความชื้นของน้ำมันซึ่งทำให้ยุ่งยากในการบำรุงรักษาและซ่อมแซม

หม้อแปลงไฟฟ้าแบบก๊าซ (Gas Type Transformer) หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้าและศักดาไฟฟ้าสูงกว่าหม้อแปลงไฟฟ้าแบบน้ำมัน สามารถใช้ทั้งภายในอาคารและภายนอกอาคาร นิยมใช้ก๊าซ SF<sub>6</sub> เป็นฉนวนกั้นระหว่างขดลวดตัวนำ แกนหม้อแปลงไฟฟ้าและตัวถังบรรจุหม้อแปลงไฟฟ้า โดยตัวถังบรรจุหม้อแปลงไฟฟ้าต้องเป็นถังปิดสนิทที่สามารถทนแรงดันก๊าซได้ ต้องคอยตรวจสอบเรื่องแรงดันก๊าซและความชื้นในก๊าซ หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดนี้มีราคาและค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาสูง

## ง.2 การระบายความร้อนหม้อแปลงไฟฟ้า

การระบายความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้า สามารถทำได้หลายวิธีส่วนมากมักอาศัยคุณสมบัติของฉนวนในการช่วยระบายความร้อนด้วย ซึ่งหลักการระบายความร้อนของหม้อแปลงแบ่งตามตัวกลางที่ทำหน้าที่ระบายความร้อนได้ดังต่อไปนี้

อากาศ (Air) คือ หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้อากาศเป็นตัวช่วยในการระบายความร้อน โดยส่วนมากตัวถังที่ใช้บรรจุหม้อแปลงไฟฟ้าจะออกแบบมาโดยเฉพาะ คือ มีครีระบายความร้อนที่ตัวถังบรรจุหม้อแปลงไฟฟ้าและภายในมีช่องว่างสำหรับให้อากาศไหลผ่านมาก ซึ่งทำให้มีความสามารถในการระบายความร้อนด้วยอากาศได้ดี

หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีพิกัดสูงตัวถังที่ใช้บรรจุหม้อแปลงไฟฟ้าจะปิดมิดชิดอาศัยหลักการไหลเวียนของอากาศภายในตัวถังที่ใช้บรรจุหม้อแปลงไฟฟ้าหมุนวนระบายความร้อนให้กับตัวถังที่ใช้บรรจุหม้อแปลงไฟฟ้าและให้อากาศรอบข้างตัวถังที่ใช้บรรจุหม้อแปลงไฟฟ้าระบายความร้อนจากตัวถังที่ใช้บรรจุหม้อแปลงไฟฟ้า สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีพิกัดไม่สูงมากนักตัวถังที่ใช้บรรจุหม้อแปลงไฟฟ้าก็จะมีรูพรุนเพื่อให้อากาศจากภายนอกไหลผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าทำให้ระบายความร้อนได้ดียิ่งขึ้น

น้ำมัน (Oil) คือ หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้น้ำมันเป็นตัวช่วยระบายความร้อน ตัวถังที่ใช้บรรจุหม้อแปลงไฟฟ้าจะปิดมิดชิด มีลักษณะคล้ายกันกับตัวถังที่ใช้บรรจุหม้อแปลงไฟฟ้าที่ระบายความร้อนด้วยอากาศ เพียงแต่อาศัยน้ำมันในการระบายความร้อนจากหม้อแปลงไฟฟ้าสู่ตัวถังที่ใช้บรรจุหม้อแปลงไฟฟ้าและให้อากาศภายนอกระบายความร้อนผ่านครีระบายความร้อนของตัวถังที่ใช้บรรจุหม้อแปลงไฟฟ้า การระบายความร้อนด้วยน้ำมันเหมาะสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีความร้อนออกมาในขณะทำงานมาก เพราะน้ำมันเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าอากาศ

นอกจากนี้แล้วยังมีการติดตั้งพัดลมเพิ่มเติมให้กับตัวถังที่บรรจุหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองแบบ เพื่อเพิ่มความสามารถในการระบายความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้าให้เร็วยิ่งขึ้นอีก ซึ่งจะเหมาะกับหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีพิกัดสูงๆ

## จ. ขั้นตอนการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้านั้นจะต้องคำนึงปัจจัยต่างๆ หลายประการ อาทิเช่น วัสดุและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งได้แก่ ขดลวดตัวนำ แกนหม้อแปลงไฟฟ้า เพลงนวน และอุปกรณ์ป้องกันเพื่อความปลอดภัย เป็นต้น ทั้งนี้จะต้องพิจารณาถึงวัสดุและอุปกรณ์ต่างๆ ที่มีความเป็นไปได้ในเชิงวิศวกรรมที่จะนำมาใช้กับงานชนิดนั้นๆ ขั้นตอนการออกแบบก็เป็นส่วนที่สำคัญเช่นกัน ซึ่งจะกล่าวดังต่อไปนี้

### จ.1 พิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer Rating)

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าต้องมีพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าดังต่อไปนี้

1. ศักยภาพไฟฟ้าด้านทางเข้า (Input Voltage)
2. ศักยภาพไฟฟ้าด้านทางออก (Output Voltage)
3. กระแสไฟฟ้าด้านทางเข้า (Input Current)
4. กระแสไฟฟ้าด้านทางออก (Output Current)
5. กำลังไฟฟ้า (Power)
6. ความถี่ในการใช้งาน (Hz)
7. รูปแบบในการใช้งาน

## จ.2 การเลือกแกนหม้อแปลงไฟฟ้า (Core Selection)

การเลือกแกนหม้อแปลงไฟฟ้าควรให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานและควรเลือกใช้แกนหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพและคุณภาพสูง ซึ่งพิจารณาจากความถี่และพิกัดของแกนตัวนำ ปกติแล้วจะสามารถประมาณขนาดของแกนหม้อแปลงไฟฟ้าได้ดังสมการ[1,2,3,4]

$$A_p = A_e A_w = \frac{0.68 \times P_o \times D \times 10^8}{f \times B_{\max}} \quad (2.26)$$

เมื่อค่าความปลอดภัย (Safety factor) ของ  $A_p$  ใหม่เท่ากับสองเท่าของ  $A_p$  เดิม ( $A_{p, \text{new}} = 2 \times A_{p, \text{old}}$ ) เลือกใช้แกนที่มี  $A_e A_w$  มากกว่าหรือเท่ากัน

## จ.3 หาจำนวนรอบของขดลวดตัวนำทางด้านปฐมภูมิ

สามารถหาจำนวนรอบของขดลวดตัวนำทางด้านปฐมภูมิในกรณีที่รูปคลื่นเป็นสัญญาณรูปเหลี่ยม (Square Wave) ได้ดังสมการ[2,3,4]

$$N_p = \left( \frac{V_p \times \tau_m \times 10^3}{A_e \times B_{\max}} \right) \quad (2.27)$$

โดยที่

$\tau_m$  คือ ความกว้างพัลส์สูงสุด ( $\mu s$ )

## จ.4 หาจำนวนรอบของขดลวดตัวนำทางด้านทุติยภูมิ

การหาจำนวนรอบของขดลวดตัวนำทางด้านทุติยภูมิหาได้ดังสมการ

$$N_s = \frac{N_p \times V_s}{V_p} \quad (2.28)$$

### จ.5 การหาขนาดของขดลวดตัวนำ

การหาขนาดของขดลวดตัวนำทำได้โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสและกระแสไฟฟ้า ดังสมการ[1,2,3,5]

$$d_{wire} = I \times D \quad (2.29)$$

โดยที่

$d_{wire}$  คือ ขนาดของขดลวดตัวนำ (circular mil)

$I$  คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน ( $A$ )

$D$  คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าประมาณ 400 circular mil per amp

เลือกขนาดขดลวดจากตารางเทียบเบอร์ขดลวดตัว โดยให้มีค่าเท่ากับหรือมากกว่า  $d_{wire}$  ที่ได้จากการคำนวณ

### จ.6 การพันขดลวดตัวนำและการฉนวน

การพันขดลวดตัวนำมีอยู่ด้วยกันหลายแบบทั้งนี้ควรคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อหม้อแปลงไฟฟ้า เช่น ศักดาไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ความถี่ในการใช้งาน และความร้อนที่เกิดขึ้นขณะใช้งาน การเลือกขดลวดตัวนำและฉนวนในการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า สามารถเลือกจากความเป็นฉนวนและความสามารถในการทนอุณหภูมิของขดลวดตัวนำ ฉนวนน้ำยาและวัสดุที่ใช้เป็นฉนวนซึ่งมีหลายแบบ ทั้งนี้ควรเลือกเผื่อค่าความปลอดภัยในการใช้งานไว้ด้วย

สำหรับการพันขดลวดตัวนำสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าโดยทั่วไปมีดังนี้

1. ออกแบบวิธีการพันขดลวดตัวนำและการฉนวน โดยพิจารณาถึงการนำไปใช้งานและความปลอดภัยในการใช้งานหลัก
2. ก่อนการพันขดลวดตัวนำ ควรตรวจสอบความเรียบร้อยของบอบบิ้นและขดลวดตัวนำทุกครั้งและไม่ควรนำขดลวดตัวนำที่ชำรุด เช่น ถลอกและมีรอยหักงอมาทำการพัน
3. พันขดลวดตัวนำลงบนบอบบิ้นตามทีออกแบบไว้ โดยการพันขดลวดตัวนำแต่ละรอบและแต่ละชั้นควรเรียงชิดติดกันและแน่นพอประมาณและควรเผื่อระยะห่างระหว่างขดลวดตัวนำกับบอบบิ้นเพื่อป้องกันการอาร์คลงแกนตัวนำ

4. การพันเทปฉนวนควรพันให้ครอบคลุมทั่วขวดขวดตัวนำและตามจำนวนชั้นที่ได้ออกแบบไว้ ในกรณีที่หม้อแปลงไฟฟ้ามีอุณหภูมิสูงขณะใช้งานไม่ควรพันเทปฉนวนมากเกินไปจนเกินไป เพราะอาจจะทำให้เกิดความร้อนสะสมในหม้อแปลงไฟฟ้าได้

### 2.2.2 วงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter)

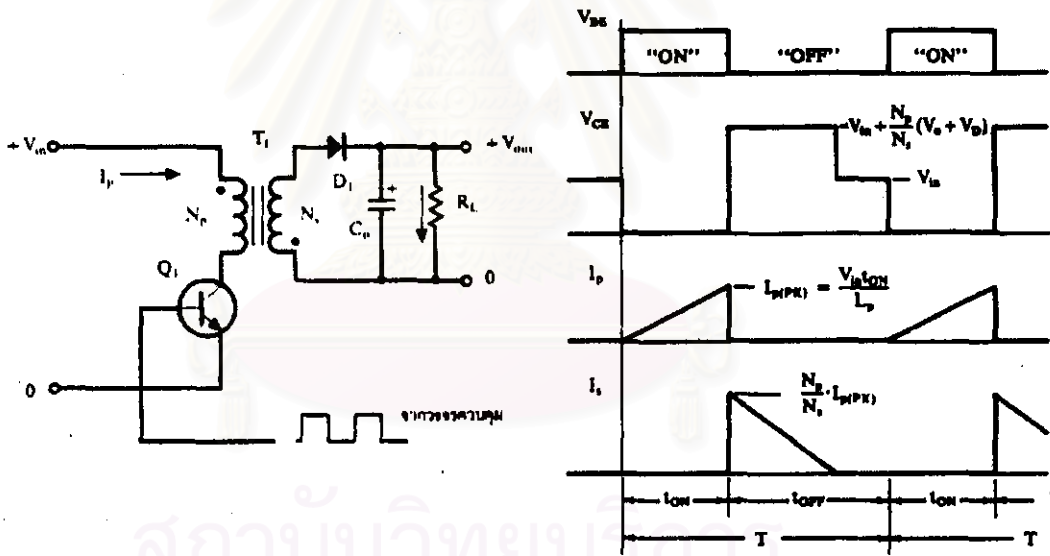
วงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับมักเรียกว่า “วงจรอินเวอร์เตอร์” การแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ อาศัยกระบวนการสวิตช์ของอุปกรณ์ควบคุมชนิดสารกึ่งตัวนำตามความถี่และความกว้างพัลส์ที่ออกแบบไว้ ขนาดของศักดาไฟฟ้าขึ้นอยู่กับอัตรารอบของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสวิตชิงรวมทั้งกระบวนการเรียงกระแส ในทางเทคนิคเมื่อ วงจรอินเวอร์เตอร์ทำงานร่วมกับวงจรเรียงกระแสมีการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับกลับมาเป็นไฟฟ้ากระแสตรงอีกครั้ง มักเรียกวงจรรวมนี้ว่า “วงจรคอนเวอร์เตอร์ (Converter)” รูปแบบของวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้กับการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบ่งได้ดังนี้

- ก. ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ (Flyback Converter)
- ข. ฟอว์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ (Forward Converter)
- ค. พูช-พูลคอนเวอร์เตอร์ (Push-Pull Converter)
- ง. ฮาล์ฟ-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (Half-Bridge Converter)
- จ. ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (Full-Bridge Converter)

รูปแบบการทำงานของแต่ละวงจรจะมีลักษณะเฉพาะ ใช้จำนวนอุปกรณ์ต่างกัน และมีประสิทธิภาพต่างกันไปตามลักษณะการใช้งานดังต่อไปนี้

ก. ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์มีรูปแบบดังรูปที่ 2.13 ก. จะมีการทำงานดังนี้ เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ ( $Q_1$ ) จะทำงานโดยนำกระแสและหยุดนำกระแสสลับกันตามความถี่ของสัญญาณไฟฟ้จากวงจรควบคุม ขณะที่  $Q_1$  ทำงานกระแส ( $I_m$ ) จะไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิ ( $N_p$ ) สังเกตเห็นว่าขดลวดปฐมภูมิ ( $N_p$ ) และขดลวดทุติยภูมิ ( $N_s$ ) ของหม้อแปลงจะพันอยู่กลับทิศทาง เมื่อเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ ( $Q_1$ ) ทำงาน ไดโอด ( $D_1$ ) จะไม่ทำงานเนื่องจากถูกไบอัสกลับ (Reverse Bias) กระแสจะไม่ไหลผ่านโหลด ( $R_L$ ) ขดลวดปฐมภูมิ ( $N_p$ ) จึงสะสมพลังงานไว้และเมื่อเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ ( $Q_1$ ) หยุดทำงาน ไดโอด ( $D_1$ ) ก็ะทำงานเนื่องจากขดลวดปฐมภูมิ ( $N_p$ ) จะทำการถ่ายพลังงานที่สะสมไว้ไปยังขดลวดทุติยภูมิ ( $N_s$ ) และจะทำให้มีกระแสไหลผ่านไปทำการประจุบนคาปาซิเตอร์ ( $C_o$ ) และจ่ายให้โหลด ( $R_L$ ) ดังแสดงสัญญาณที่ได้ในรูปที่ 2.13 ข.



ก. รูปแบบวงจร

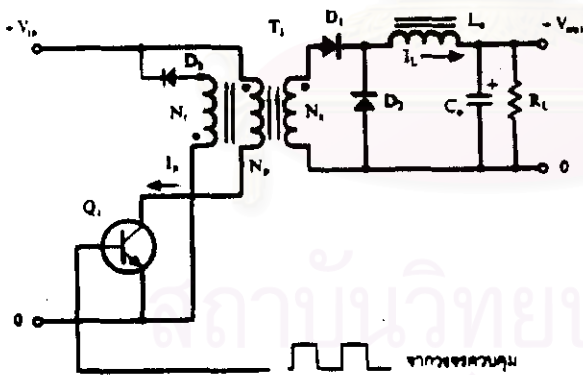
ข. รูปสัญญาณ

รูปที่ 2.13 รูปแบบวงจรพื้นฐานและการทำงานของฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

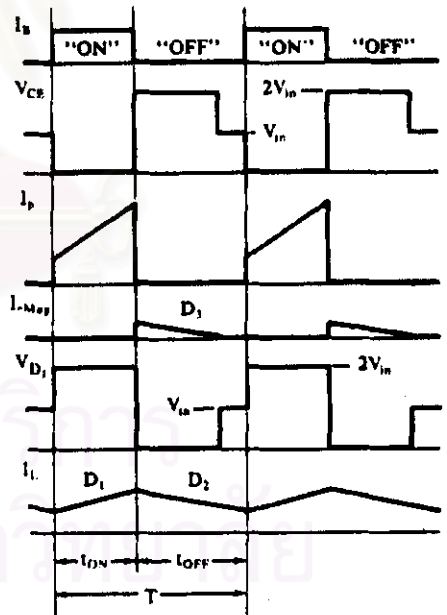


**ข. ฟอว์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์**

รูปแบบวงจรฟอว์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์แสดงในรูปที่ 2.14 ก. เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ ( $Q_1$ ) จะทำงานโดยนำกระแสและหยุดนำกระแสสลับกันตามความถี่ ( $f$ ) ของสัญญาณทางไฟฟ้า จากวงจรควบคุม ขณะที่ เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ ( $Q_1$ ) ทำงานกระแส ( $I_p$ ) จะไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิ ( $N_p$ ) จากวงจรจะเห็นว่าขดลวดปฐมภูมิ ( $N_p$ ) และขดลวดทุติยภูมิ ( $N_s$ ) ของหม้อแปลงจะพันอยู่ในทิศเดียวกันแต่ขดลวดดีแมกนีโตซิ่ง ( $N_r$ ) จะถูกพันไว้ในลักษณะกลับทิศกันและเมื่อ เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ ( $Q_1$ ) ทำงาน ไดโอด ( $D_1$ ) ก็จะทำงาน กระแสจะไหลผ่านขดลวดตัวเหนี่ยวนำ ( $L_o$ ) ผ่านไปยังโหลด ( $R_L$ ) จะมีการสะสมพลังงานในขดลวดตัวเหนี่ยวนำ ( $L_o$ ) ไดโอด ( $D_2$ ) และไดโอด ( $D_3$ ) ไม่ทำงาน เมื่อ เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ ( $Q_1$ ) หยุดทำงาน ไดโอด ( $D_1$ ) ก็จะไม่ทำงานเนื่องจากถูกไบอัสกลับและไม่มีการไหลผ่านขดลวดทุติยภูมิ ( $N_s$ ) ขดลวดดีแมกนีโตซิ่ง ( $N_r$ ) จะทำการถ่ายพลังงานที่สะสมไว้ผ่านไป ไดโอด ( $D_2$ ) จะทำให้มีกระแสไหลผ่านไปทำการประจุคาปาซิเตอร์ ( $C_o$ ) และโหลดได้ ดังแสดงรูปสัญญาณในรูปที่ 2.14 ข.



ก. รูปแบบวงจร

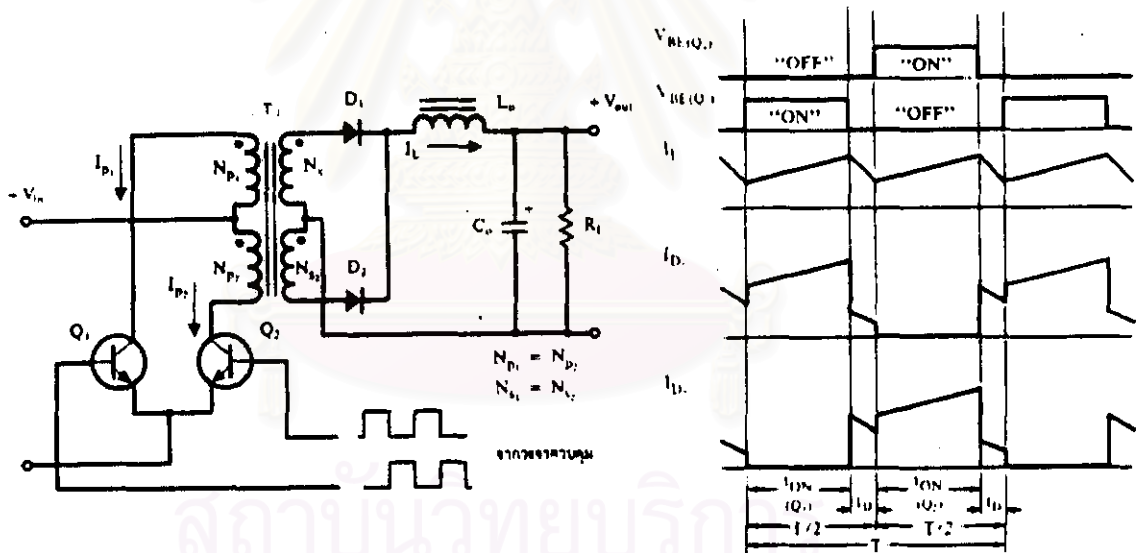


ข. รูปสัญญาณ

รูปที่ 2.14 รูปแบบวงจรพื้นฐานและการทำงานของฟอว์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์

ก. พุช-พุดคอนเวอร์เตอร์

วงจรพื้นฐานของพุช-พุดคอนเวอร์เตอร์ แสดงในรูปที่ 2.15 ก. จะประกอบไปด้วย เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ 2 ตัว ซึ่งจะทำงานสลับกันโดยขณะที่ เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ ( $Q_1$ ) ทำงาน จะมีกระแสไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิ ( $N_{p1}$ ) ส่วนไดโอด ( $D_1$ ) จะไม่ทำงานเนื่องจากถูกไบอัสกลับ ไดโอด ( $D_2$ ) จะทำงานทำให้มีกระแสไหลผ่านขดลวดทุติยภูมิ ( $N_{s2}$ ) ผ่านไดโอด ( $D_2$ ) และขดลวดตัวเหนี่ยวนำ ( $L_o$ ) ไปทำการประจุคาปาซิเตอร์ ( $C_o$ ) และโหลดได้ ซึ่งศักดาไฟฟ้าคกร้อม เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ ( $Q_2$ ) จะมีค่าเป็นสองเท่าของศักดาไฟฟ้าขาเข้าและในขณะที่ เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ ( $Q_2$ ) ทำงาน เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ ( $Q_1$ ) และไดโอด ( $D_2$ ) จะไม่ทำงาน ไดโอด ( $D_1$ ) จะทำงานทำให้กระแสไหลผ่านขดลวดทุติยภูมิ ( $N_{s1}$ ) ผ่านขดลวดตัวเหนี่ยวนำ ( $L_o$ ) ไปทำการประจุคาปาซิเตอร์ ( $L_o$ ) และโหลด ดังแสดงรูปสัญญาณดังรูปที่ 2.15 ข.



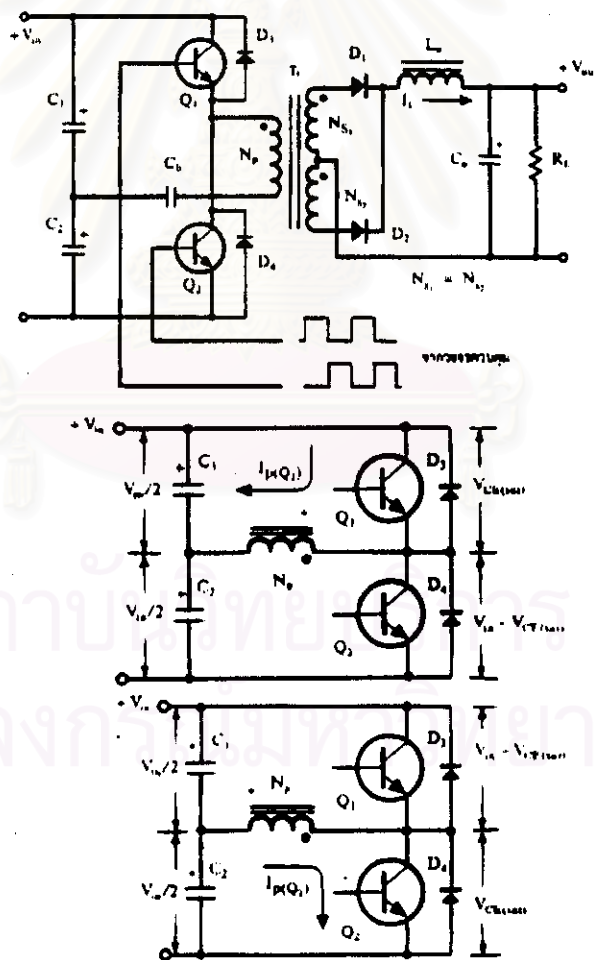
ก. รูปแบบวงจร

ข. รูปสัญญาณ

รูปที่ 2.15 รูปแบบวงจรพื้นฐานและการทำงานของพุช-พุดคอนเวอร์เตอร์

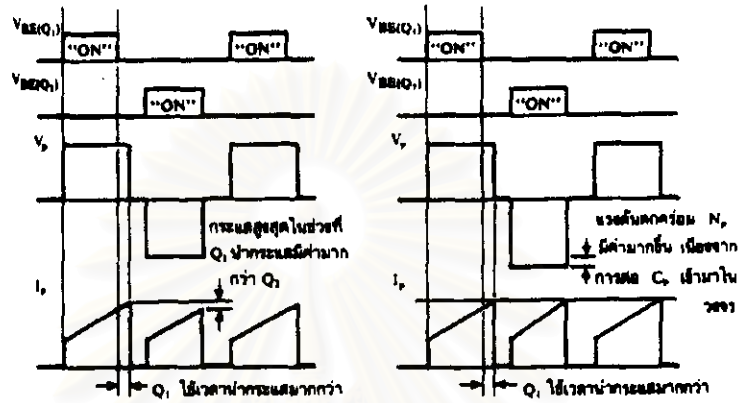
### ง. ฮา์ฟ-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์

รูปแบบของวงจรฮา์ฟ-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์แสดงในรูปที่ 2.16 ก. เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ ( $Q_1$ ) และเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ ( $Q_2$ ) จะสลับกันทำงาน เมื่อเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ ( $Q_1$ ) ทำงาน ศักคาไฟฟ้าตกคร่อมของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ ( $Q_2$ ) จะมีค่าเท่ากับ  $V_{in} - V_{CE(sat)}$  ส่วนศักคาไฟฟ้าที่ตกคร่อมขดลวดปฐมภูมิ ( $N_p$ ) จะมีค่าเท่ากับ  $V_{C1} - V_{CE(sat)}$  หรือมีค่าเท่ากับ  $V_{in}/2 - V_{CE(sat)}$  ในลักษณะเดียวกัน เมื่อเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ ( $Q_2$ ) ทำงาน เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ ( $Q_1$ ) จะไม่ทำงาน ศักคาไฟฟ้าตกคร่อมของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ ( $Q_1$ ) จะมีค่าเท่ากับ  $V_{in} - V_{CE(sat)}$  ส่วนศักคาไฟฟ้าที่ตกคร่อมขดลวดปฐมภูมิ ( $N_p$ ) จะยังคงมีค่าเท่าเดิมโดยจะมีค่าเท่ากับ  $V_{C1} - V_{CE(sat)}$  หรือมีค่าเท่ากับ  $V_{in}/2 - V_{CE(sat)}$



ก. รูปแบบและขั้นตอนการทำงานของฮา์ฟ-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์

จะพบว่าฮาล์ฟ-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์จะเป็นคอนเวอร์เตอร์ในลักษณะเดียวกับ พุช-พูลคอนเวอร์เตอร์ แต่จะต่างกันตรงที่ฮาล์ฟ-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์จะทำให้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์มีศักดาไฟฟ้าตกคร่อมขณะหยุดนำกระแสเพียงค่าของศักดาไฟฟ้าด้านทางเข้าเท่านั้น

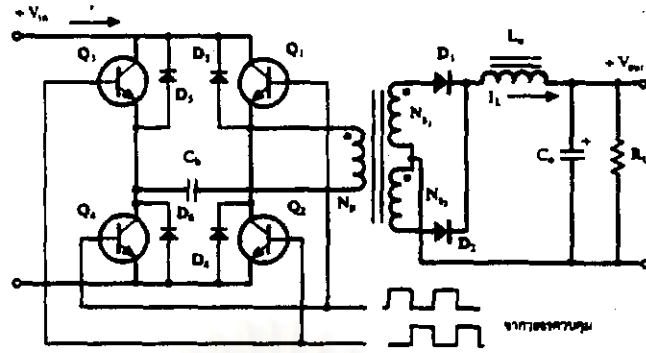


ข. รูปสัญญาณ

รูปที่ 2.16 รูปแบบวงจรพื้นฐานและการทำงานของฮาล์ฟ-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์

จ. พูชบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

รูปแบบวงจรพื้นฐานของพุชบริดจ์คอนเวอร์เตอร์แสดงในรูปที่ 2.17 ซึ่งจะประกอบไปด้วยเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ 4 ตัว ซึ่งจะทำงานสลับกันเป็นคู่ ๆ โดย เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ ( $Q_1$ ) และ เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ ( $Q_2$ ) จะทำงานพร้อมกันในครึ่งคาบเวลาและเมื่อหยุดทำงาน เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ ( $Q_3$ ) และ เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ ( $Q_4$ ) ก็จะทำงาในครึ่งคาบเวลาที่เหลือ โดยจะทำงานสลับกันไปอย่างนี้ ลักษณะการทำงานของวงจรพุชบริดจ์คอนเวอร์เตอร์จะเป็นเช่นเดียวกับการทำงานของวงจรฮาล์ฟ-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ แตกต่างกันตรงที่ศักดาตกคร่อมขดลวดปฐมภูมิ ( $N_p$ ) จะมีค่าเท่ากับ  $V_m - 2V_{CE(sat)}$  การทำงานในส่วนนี้จะเหมือนการทำงานของคอนเวอร์เตอร์แบบพุช-พูลคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.17 รูปวงจรพื้นฐานของฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

ตารางที่ 2.4 เป็นตารางแสดงคุณสมบัติและประสิทธิภาพการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบต่างๆ เพื่อใช้งานในสภาวะของกำลังไฟฟ้าต่างกัน

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบต่างๆ [3].

Converter Type	Advantages	Disadvantages
Flyback	Simply circuitry Low component count Useful in high voltage multiple output voltage applications	Requires large core inductors Low power out put levels
Forward	Low output voltage ripple Needs only single switching transistor Useful in low power applications	Requires addition of transformer for line isolation Extra winding and components required for multiple outputs
Push-pull	Low output voltage ripple High power output capability	High component count Complex circuitry Extra winding and components required for multiple outputs
Half bridge and Full bridge	Low output voltage ripple Useful in high power high performance single output applications	High component count Complex circuitry Extra winding and components required for multiple outputs

### 2.2.3 วงจรเรียงกระแสและวงจรกรองแรงดัน (Rectifier and Filter Circuit)

วงจรเรียงกระแสและวงจรกรองแรงดันประกอบไปด้วย คาปาซิเตอร์และไดโอด ซึ่งจะใช้คุณสมบัติของไดโอดในการเรียงกระแสทำหน้าที่ในการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงและคุณสมบัติของคาปาซิเตอร์ในการกรองแรงดันด้วยการสะสมประจุระหว่างไดโอดนำกระแสและคายประจุให้ไหลลง ขณะไดโอดหยุดนำกระแสและยังช่วยกรองสิ่งรบกวนที่ปนมากับไฟฟ้ากระแสสลับทิ้งไป เพื่อลดสัญญาณรบกวน อันเนื่องมาจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลัก สัญญาณรบกวนจากภายนอกหรือสัญญาณรบกวนที่วงจรเป็นตัวสร้างขึ้นเอง เป็นต้น

ก. วงจรเรียงกระแส จะต้องเลือกไดโอดที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการใช้งาน เช่น มีความสามารถทนศักดาไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าได้มากกว่าศักดาไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขณะใช้งานจริง เมื่อค่าความปลอดภัยไว้ (Safety Factor) รวมถึงความไวในการสวิตช์ต่อความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับที่จะต้องเรียงกระแส เป็นต้น

ข. วงจรกรองแรงดัน จะต้องเลือกค่าความจุของคาปาซิเตอร์ให้เหมาะสมกับการรักษา ระดับการกระเพื่อมของศักดาไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าโดยต้องคำนึงถึงความถี่ในการใช้งานนั้นๆ ด้วย และควรเลือกคาปาซิเตอร์ที่มีค่า ESR (Equivalent Series Resistor) ต่ำ เพราะจะทำให้ไม่ไหลตก กระแส (Surge) มากขณะเริ่มทำงาน สำหรับการหาค่าความจุของคาปาซิเตอร์ที่จะนำมาใช้สามารถหาได้ดังสมการ [2,3,5]

$$C = \frac{\omega CR_L}{2\pi f \left( \frac{V_{C(DC)}}{I_o} \right)} \quad (2.28)$$

โดยที่

$C$  คือ ค่าความจุของคาปาซิเตอร์ (F)

$\omega CR_L$  คือ ค่าคงที่จากกราฟ

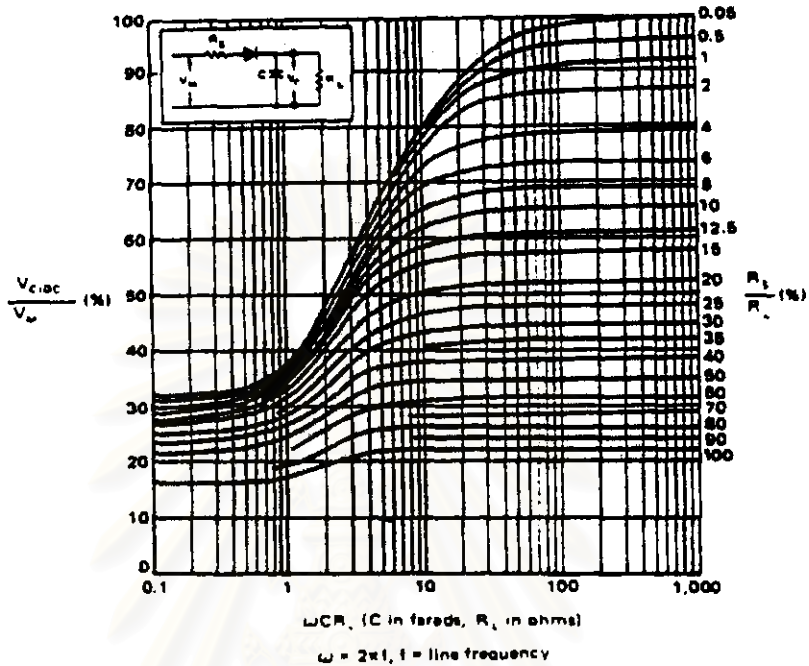
$f$  คือ ความถี่ (Hz)

$V_{C(DC)}$  คือ ศักดาไฟฟ้ากระแสตรงที่ตกคร่อมคาปาซิเตอร์ (V)

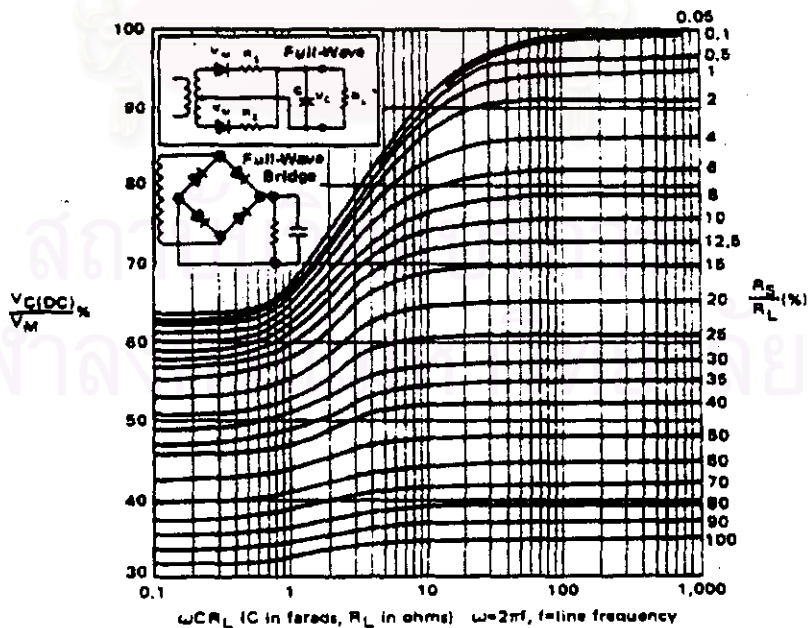
$I_o$  คือ กระแสไฟฟ้าด้านทางออก (A)



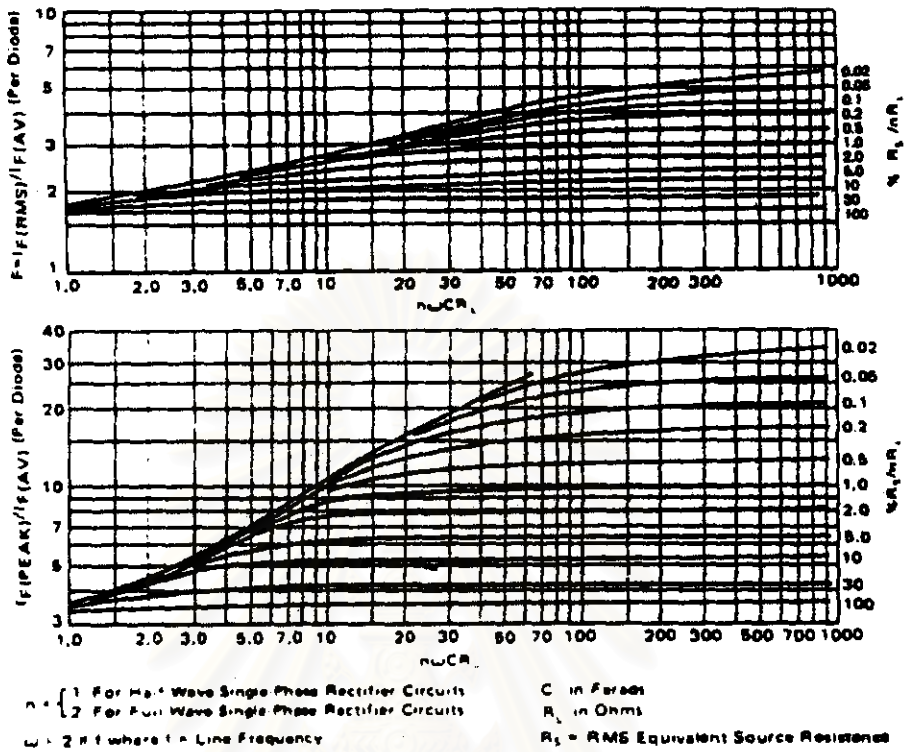
ค่า  $\omega CR_L$  ในทางปฏิบัติสามารถหาได้จากกราฟสำเร็จรูป ดังนี้



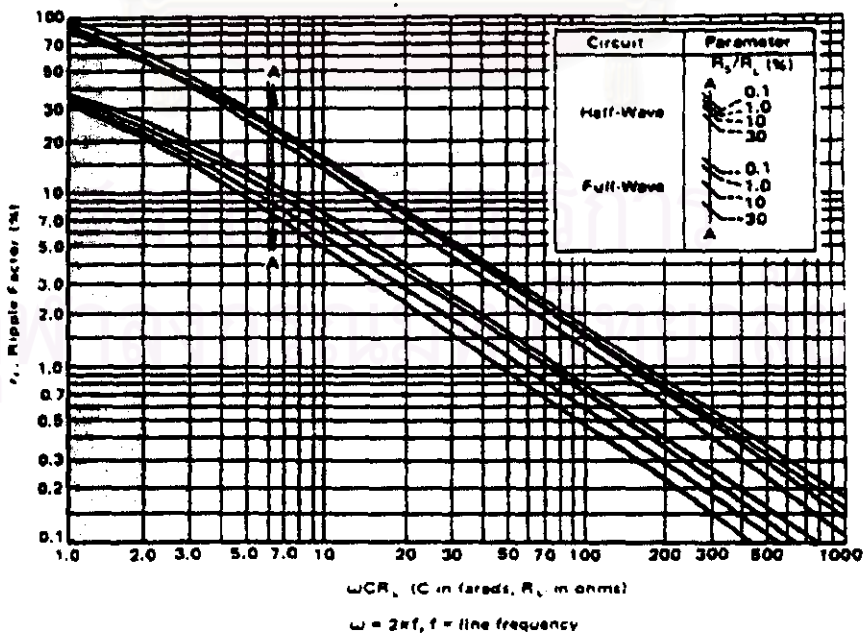
รูปที่ 2.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{V_{C(DC)}}{V_M}$  % กับ  $\omega CR_L$  ของ Half Wave Rectifier [2]



รูปที่ 2.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{V_{C(DC)}}{V_M}$  % กับ  $\omega CR_L$  ของ Full Wave Rectifier [2]



รูปที่ 2.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{I_F(PEAK)}{I_F(AV)}$  และ  $\frac{I_F(RMS)}{I_F(AV)}$  กับ  $\omega CR_L [2]$

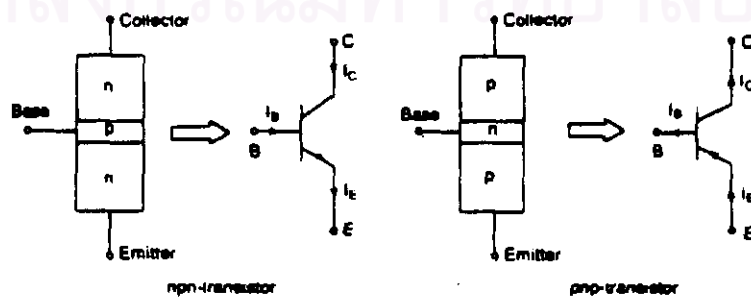


รูปที่ 2.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Ripple Factor กับ  $\omega CR_L [2]$

## 2.2.4 อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่สวิตช์ (Switching Element)

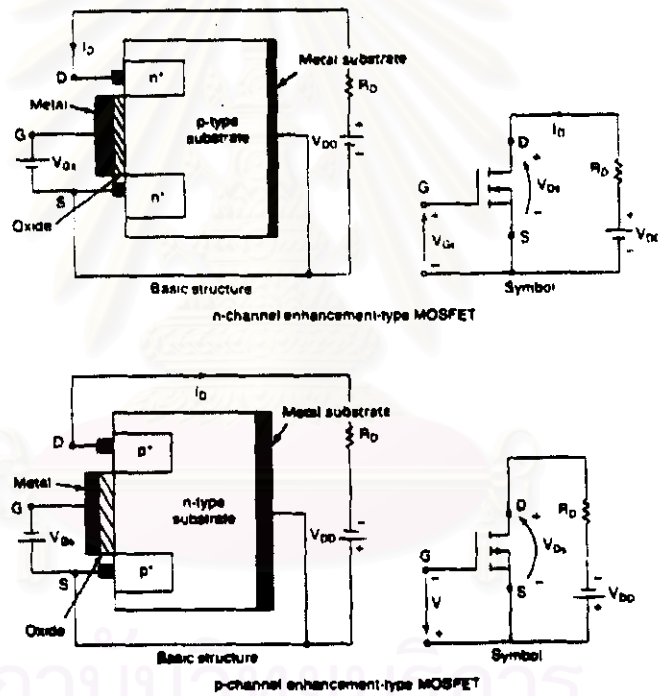
อุปกรณ์ซึ่งทำหน้าที่เป็นสวิตช์ของวงจรคอนเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำงานคล้ายสวิตช์ โดยจะทำการสวิตช์ตามความถี่ที่วงจรควบคุมสร้างขึ้น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำงานคล้ายสวิตช์ที่สามารถทำหน้าที่เป็นสวิตช์ในวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตชิง ได้แก่ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดสารกึ่งตัวนำประเภททรานซิสเตอร์ เช่น ทรานซิสเตอร์ (Bipolar Power Transistor) มอสเฟต (MOSFET Power Transistor) และ IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) เป็นต้น และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทไทรสเตอร์ (Thyristor) เช่น SCR (Silicon Controlled Rectifier) และ GTO (Gate Turn-off Thyristor) เป็นต้น

ก. ทรานซิสเตอร์ (BJTs) อุปกรณ์ชนิดสารกึ่งตัวนำซึ่งมีโครงสร้างแบ่งออกเป็นสามชั้น โดยชั้นที่อยู่ตรงกลางกั้นระหว่างสารกึ่งตัวนำที่ประกอบจะต่างชนิดกันเรียกว่า เบส (Base; B) และส่วนชั้นที่เหลือเรียกว่า อิมิตเตอร์ (Emitter; E) และคอลเลกเตอร์ (Collector; C) ทรานซิสเตอร์แบ่งออกเป็นสองแบบ คือ แบบพีเอ็นพี (PNP) และแบบเอ็นพีเอ็น (NPN) ดังรูปที่ 2.22 การควบคุมกระแสในวงจรหลัก (C-E) ควบคุมด้วยกระแส  $I_B$  ด้านทางเข้า เรียกว่า ไบอัส การไบอัสให้ทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพลาร์ทำงานแบ่งได้สองรูปแบบ คือ การไบอัสให้ทำงานเป็นวงจรขยายสัญญาณนั้นรอยต่อ B-E จะจัดไบอัสทางตรงและรอยต่อ B-C จะจัดเป็นไบอัสกลับทาง ส่วนการไบอัสให้ทำงานเป็นสวิตช์รอยต่อ B-E และ B-C จะจัดเป็นไบอัสทางตรงทั้งคู่ขณะควบคุมให้ทรานซิสเตอร์อยู่ในสถานะนำกระแสจะจัดให้ไบอัสอิมิตต์และการหยุดนำกระแสจะต้องหยุดตันทในภาวะทำงานแบบสวิตช์นี้เมื่อจะต้องทำงานในเวลาที่ค่อนข้างสูง จะต้องคอยควบคุมไม่ให้รอยต่อ B-C อิมิตต์สูงมากไปเนื่องจากจะทำให้มีประจุค้างบริเวณรอยต่อมากทำให้มีเวลากลับตัวช้า (Storage Time)



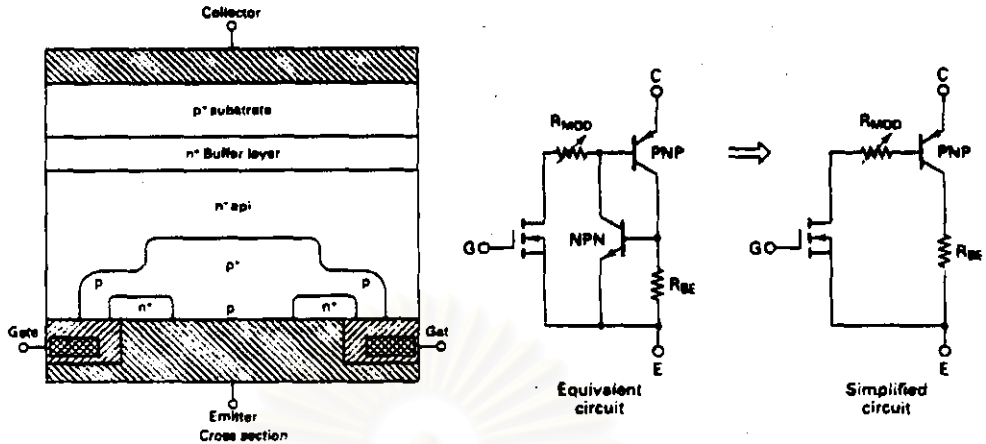
รูปที่ 2.22 ไบโพลาร์จันชันทรานซิสเตอร์

ข. มอซเฟต (MOSFETs) เป็นอุปกรณ์ชนิดสารกึ่งตัวนำประเภททรานซิสเตอร์ที่มีโครงสร้างทั้งแบบ N-Channel และ P-Channel ดังในรูปที่ 2.23 มีขาสามขาเช่นเดียวกับทรานซิสเตอร์แต่จะมีชื่อเรียกต่างกัน คือ ขาเกต (Gate; G) ขาเดรน (Drain; D) และขาซอร์ส (Source; S) มีการควบคุมการทำงานด้วยการเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิตผ่านเกตควบคุมให้แขนเนกการไหลของกระแสในวงจรหลัก (D-S) นำกระแสเล็กน้อยหรือหยุดไหล ไม่มีการไบอัสกระแสที่เกิดการสะสมประจุมากเช่น BJT มีคุณสมบัติที่สามารถทำงานที่ความถี่สูงได้ดีกว่าทรานซิสเตอร์เหมาะกับการใช้งานในวงจรไฟฟ้าที่เป็นแบบสวิตชิง แต่ขณะนำกระแสมีความต้านทานระหว่าง D-S ค่อนข้างสูง ทำให้มีศักดาไฟฟ้าตกคร่อมทางวงจรหลักสูงกว่า BJT จึงเกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าค่อนข้างสูง



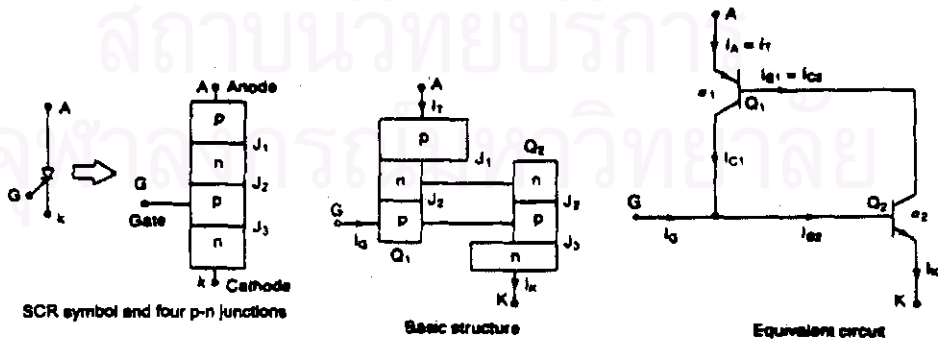
รูปที่ 2.23 ทรานซิสเตอร์ประเภทมอซเฟต

ค. IGBTs เป็นอุปกรณ์ชนิดสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อนซึ่งรวมเอาคุณลักษณะของ BJTs และ MOSFETs เข้าด้วยกัน โดยมีอิมพีแดนซ์ทางด้านอินพุตสูงเหมือน MOSFETs และมีความสูญเสียขณะทำงานน้อยเหมือน BJTs ประกอบไปด้วยขาเกต (Gate; G) ขาคอลเลกเตอร์ (Collector; C) และขาอิมิตเตอร์ (Emitter; E) การทำงานเหมือน MOSFETs มีความสามารถทนศักดาไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าได้สูงกว่า MOSFETs ดังแสดงโครงสร้างในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 ทรานซิสเตอร์ประเภท IGBTs

ง. SCR อุปกรณ์ชนิดสารกึ่งตัวนำมีโครงสร้างที่ซับซ้อนเหมือนการนำเอาทรานซิสเตอร์ PNP และ NPN จัดแบบ Regeneration Latch ประกอบไปด้วยขาคควบคุมการทำงาน 3 ขา คือ ขาเกต (Gate; G) ขาแอนด (Anode; A) และขาแคโทด (Cathode; K) มีหลักการทำงานคล้ายไดโอดที่ควบคุมการนำกระแสและหยุดนำได้ เมื่อต้องการให้ SCR นำกระแสทำได้โดยไบอัสวงจรเกตทางตรงให้กระแสไฟฟ้าที่ขาเกตให้สูงกว่าค่า Threshold ของ SCR นั้น และตัดคาไฟฟ้าทางด้านวงจรหลัก แอนดต้องสูงกว่าศักดาไฟฟ้าทางด้านแคโทด SCR จะหยุดนำกระแสได้ต่อเมื่อลดกระแสไฟฟ้าด้านแอนดให้ต่ำกว่า Holding Current ด้วยวงจรสลับขั้วไฟฟ้าเพื่อสร้างภาวะหยุดนำกระแส (Commutation) SCR มีคุณสมบัติเหมาะกับการนำไปใช้เป็นสวิทซ์ในงานควบคุมกำลังไฟฟ้าขนาดใหญ่ ซึ่งมีความสามารถทนศักดาไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าได้สูง มีศักดาไฟฟ้าดกคร่อมแอนดและแคโทดขณะนำกระแสต่ำ แต่ไม่เหมาะกับงานความถี่สูงๆ ดังแสดงโครงสร้างในรูปที่ 2.25



Two-transistor model of thyristor.

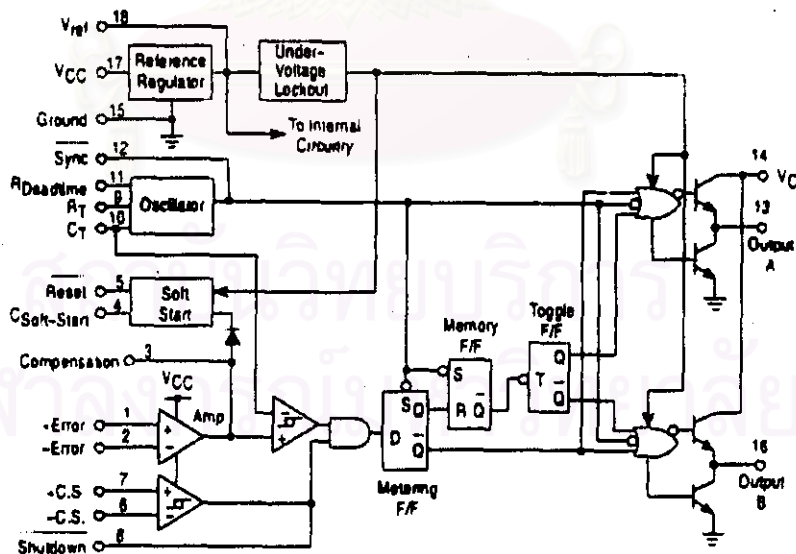
รูปที่ 2.25 ไทริสเตอร์ประเภท SCR

## 2.2.5 วงจรควบคุม

วงจรควบคุม คือ วงจรที่ทำหน้าที่สร้างความถี่หรือความกว้างพัลส์ เพื่อควบคุมการสวิทช์ของอุปกรณ์ชนิดสารกึ่งตัวนำที่ทำหน้าที่สวิทช์ ให้รักษาระดับศักดาไฟฟ้าทางด้านทางออกให้คงที่ ซึ่งวงจรควบคุมบางวงจรอาจมีการออกแบบไว้เพื่อให้ความสามารถในการป้อนกลับระดับการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณด้านทางออกจากวงจรคอนเวอร์เตอร์ นอกจากนี้ยังทำหน้าที่เป็นวงจรตรวจจับและป้องกันความเสียหาย เช่น มีการตรวจจับระดับของศักดาไฟฟ้าทางด้านทางเข้าและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่สวิทช์ เป็นต้น

วงจรควบคุมส่วนมากนิยมใช้วงจรประเภท Pulse Width Modulation (PWM) ในการควบคุมวงจรคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งมีไอซีสำเร็จรูปหลายแบบที่เป็นวงจรประเภท PWM และมีความสามารถในการ Monitor หรือ Sensing เพื่อการป้องกันความเสียหายของวงจร ได้แก่ TL494 และ SG3526 เป็นต้น โดย IC บางแบบจะมีฟังก์ชันพิเศษเพิ่มเติมเข้ามาเพื่อให้ความปลอดภัยในการใช้งานยิ่งขึ้น เช่น ฟังก์ชันการ shutdown และฟังก์ชันการ Reset เป็นต้น ดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 2.26

Representative Block Diagram

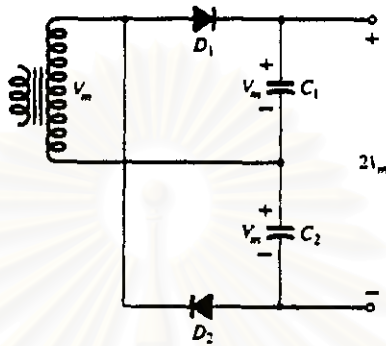


รูปที่ 2.26 แผนภาพของ IC SG3526 และฟังก์ชันต่างๆ



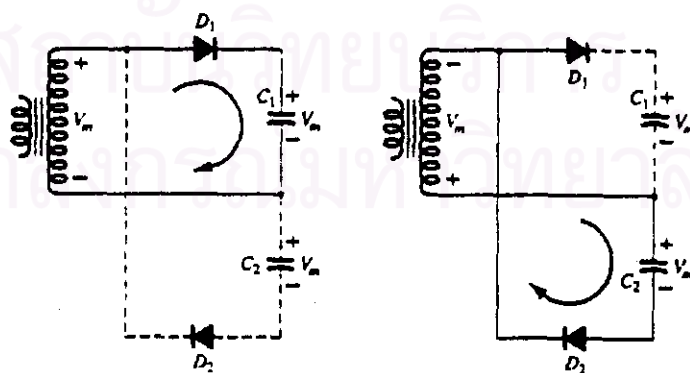
2.2.6 วงจรทวิตักดาสองเท่าแบบฟูลเวฟ

วงจรทวิตักดาสองเท่าแบบฟูลเวฟอาศัยคุณสมบัติของไดโอดและคาปาซิเตอร์ในการเพิ่มศักดาไฟฟ้า โดยวงจรพื้นฐานของวงจรทวิตักดาสองเท่าแบบฟูลเวฟ แสดงดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 วงจรพื้นฐานของวงจรทวิตักดาสองเท่าแบบฟูลเวฟ

หลักการทํางานของวงจรทวิตักดาสองเท่าแบบฟูลเวฟ เริ่มจากเมื่อสัญญาณทางซีกบวกเข้ามากระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านไดโอด  $D_1$  และทํากการ Charge ประจุให้กับ  $C_1$  สร้างศักดาไฟฟ้าตกคร่อม  $C_1$  เป็น  $+V_m$  ส่วนไดโอด  $D_2$  ไม่ทํางานเนื่องจากรับไบอัสกลับทางจึงไม่มีการ Charge ประจุให้กับ  $C_2$  และเมื่อสัญญาณทางซีกลบจะมีกระแสไหลผ่านไดโอด  $D_2$  เข้ามาก็จะทํากการ Charge ประจุให้กับ  $C_2$  สร้างศักดาไฟฟ้าตกคร่อม  $C_2$  เป็นศักดาไฟฟ้าตกคร่อม  $C_1$  และ  $C_2$  จะต่ออันดับกันทําให้ศักดาไฟฟ้าทางด้านทางออกเป็นสองเท่าของศักดาไฟฟ้าของขดลวดทางด้านทุติยภูมิ ( $2V_m$ ) แสดงดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 การทํางานของวงจรทวิตักดาสองเท่าแบบฟูลเวฟ

## 2.3 หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ (x-ray Tube)

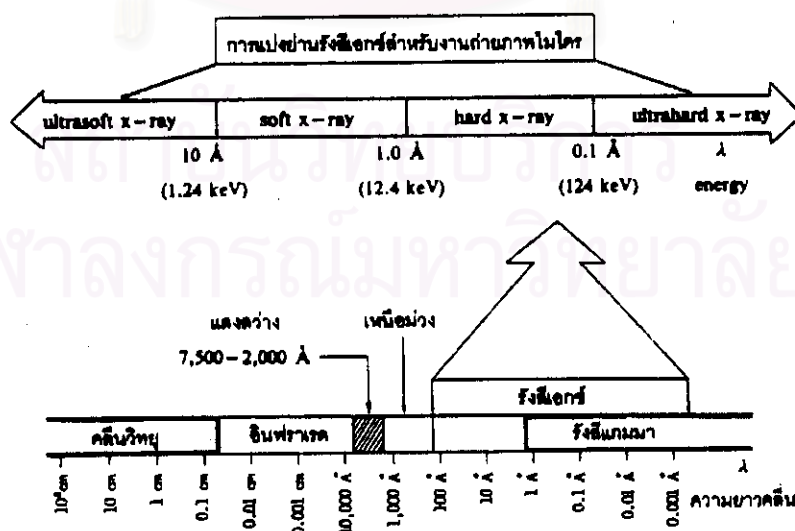
### 2.3.1 คุณสมบัติของรังสีเอกซ์

รังสีเอกซ์ถูกค้นพบโดย Roentgen เมื่อปี พ.ศ. 2438 บางครั้งจึงเรียกรังสีเอกซ์ว่า รังสีเรินเกน (Roentgen Ray) รังสีเอกซ์เป็นรังสีที่มีคุณสมบัติเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Radiation) เกิดขึ้นจากการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินภายหลังจากเกิดอันตรกิริยาทางนิวเคลียร์ของอะตอมของธาตุที่บริเวณชั้นโคจรของอิเล็กตรอน (Electron Shell) มักจะมีความยาวคลื่นในช่วงประมาณ 0.0001 ถึง 100 Å (อังสตรอม) ในแถบสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สำหรับงานถ่ายภาพไมโครด้วยรังสีเอกซ์นั้นนักวิทยาศาสตร์ได้จัดแบ่งย่านของรังสีเอกซ์จากลักษณะการใช้งานไว้ตามความสามารถในการทะลุทะลวงหรือระดับพลังงานที่ใช้ถ่ายภาพไมโครไว้ ดังในรูปที่ 2.29 คือ[6,7]

ก. รังสีเอกซ์พลังงานสูงมาก (Ultrahard x-ray) จัดอยู่ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 0.1 Å (124 keV) ขึ้นไป

ข. รังสีเอกซ์พลังงานสูง (Hard x-ray) จัดอยู่ในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 1.0 Å ถึง 0.1 Å (12.4 keV ถึง 124 keV)

ค. รังสีเอกซ์พลังงานต่ำ (Soft x-ray) จัดอยู่ในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 10 Å ถึง 1 Å (1.24 keV ถึง 12.4 keV)



รูปที่ 2.29 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและการแบ่งย่านรังสีเอกซ์สำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสี [8]

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีคุณสมบัติที่เป็นได้ทั้งคลื่นและอนุภาค (Wave-Particle Duality) แล้วแต่กรณี และสำหรับคุณสมบัติที่เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีชื่อเรียกตามลักษณะว่า “โฟตอน (Photon)” เช่น โฟตอนแสง (Light Photon), โฟตอนรังสีเอกซ์ (X-Rays Photon) พลังงานโฟตอนของรังสีเอกซ์สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และค่าคงที่ของ Planck ดังสมการที่ 2.29 และ 2.30

$$E = h\nu \quad (2.29)$$

เมื่อแทนค่า  $\nu$  ด้วย  $\frac{c}{\lambda}$  จะได้

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

หรือ

$$\lambda = \frac{hc}{E} \quad (2.30)$$

โดยที่

$E$  คือ พลังงานของรังสีเอกซ์ ( $keV$ )

$h$  คือ ค่าคงที่ของ Planck มีค่า  $4.135 \times 10^{-15} eV \cdot s$

$\nu$  คือ ความถี่ของคลื่น ( $f$ )

$c$  คือ ความเร็วของแสง มีค่า  $2.998 \times 10^8 m/s$

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่น ( $\text{\AA}$ )

จากสมการที่ 2.30 เมื่อแทนค่า  $hc$  และจัดหน่วยความยาวคลื่นเป็นอังสตรอม ( $\text{\AA}$ ,  $1 \text{\AA} = 10^{-8} cm. = 0.1nm = 0.0001\mu m$ ) จัดหน่วยพลังงานเป็นกิโลอิเล็กตรอนโวลต์ สามารถเขียนสมการแปลงความสัมพันธ์ของพลังงานและความยาวคลื่นได้เป็น

$$E(keV) = \frac{12.4}{\lambda} \quad (2.31)$$

โดยที่

$E$  คือ พลังงานของรังสีเอกซ์ ( $keV$ )

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่น ( $\text{\AA}$ )

โมเมนตัมของโฟตอน ( $p$ ) สามารถหาได้ในเทอมการแปรพลังงานจลน์ของมวล ( $K$ ) เชิงทฤษฎีสัมพัทธ์ของ โอน์สไตน์ ดังสมการที่ 2.32

$$K = mc^2 - m_0c^2 \quad (2.32)$$

โดยที่

$K$  คือ พลังงานจลน์ ( $J$ )

$c$  คือ ความเร็วของแสง ( $m/s$ )

$m$  คือ มวลที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วแสง ( $kg$ )

$m_0$  คือ มวลที่หยุดนิ่ง ( $kg$ )

เนื่องจากค่า  $m_0$  ของโฟตอนในเชิงสัมพัทธ์มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจากสมการที่ 2.32  $m$  จะเท่ากับ  $K/c^2$  ในขณะที่โมเมนตัมของมวลจะเท่ากับผลคูณของมวล  $m$  และความเร็ว  $v$  ดังสมการที่ 2.33

$$p = mv \quad (2.33)$$

โดยที่

$p$  คือ โมเมนตัมของมวล ( $kg \cdot m/s$ )

$m$  คือ มวล ( $kg$ )

$v$  คือ ความเร็วของมวล ( $m/s$ )

ในสมการที่ 2.32 เป็นการคำนวณการแปรพลังงานจลน์ของโฟตอน ดังนั้น  $K$  จึงเท่ากับ  $h\nu$  เมื่อแทนค่าสมการที่ 2.33 ด้วย  $m$  เท่ากับ  $h\nu/c^2$  และ  $v$  เท่ากับความเร็วของโฟตอนซึ่งเท่ากับความเร็วของแสง โมเมนตัมของโฟตอนจะเป็นดังสมการ

$$p = \left(\frac{h\nu}{c^2}\right)c = \frac{h\nu}{c} \quad (2.34)$$

หรือ

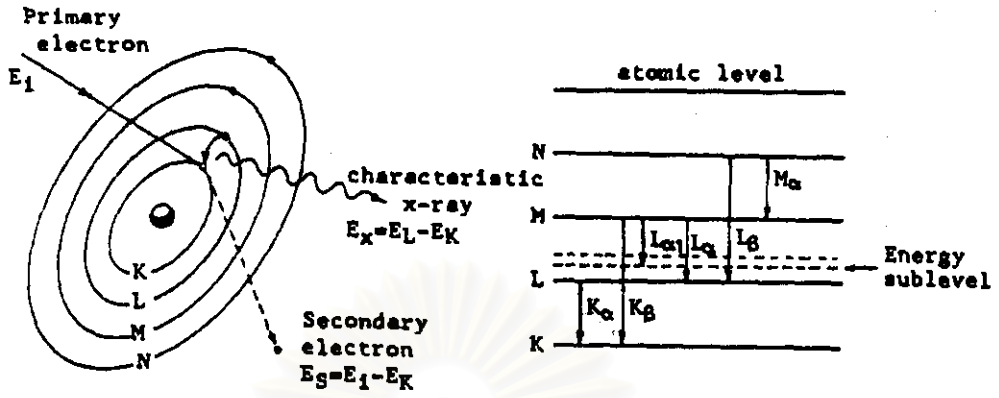
$$p = \frac{h}{\lambda} \quad (2.35)$$

### 2.3.2. กระบวนการเกิดรังสีเอกซ์

รังสีเอกซ์สามารถเกิดได้จากสภาวะการเปลี่ยนระดับพลังงานของอะตอมได้หลายวิธี ทั้งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติจากการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีและที่มนุษย์ผลิตขึ้นจากกลไกทางอิเล็กทรอนิกส์ กล่าวคือ เมื่ออะตอมได้รับการกระตุ้น (Excite) ให้เปลี่ยนระดับพลังงานที่มีผลกระทบโดยตรงต่อบริเวณชั้นโคจรอิเล็กทรอนิกส์ของอะตอมซึ่งเป็นบริเวณนอกนิวเคลียสออกมากการลดระดับพลังงานสู่สภาวะปกติ โดยมวลของอะตอมไม่เปลี่ยนแปลงนั้นเป็นกระบวนการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือโฟตอนออกมาในลักษณะพัลส์ (Pulse) จากอะตอมทุกครั้งที่ได้รับการกระตุ้น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปลดปล่อยออกมานี้ว่า "รังสีเอกซ์" สำหรับรังสีเอกซ์ยังแบ่งออกเป็นสองชนิดตามกระบวนการของการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินจากอะตอมบริเวณชั้นโคจรอิเล็กทรอนิกส์ คือ

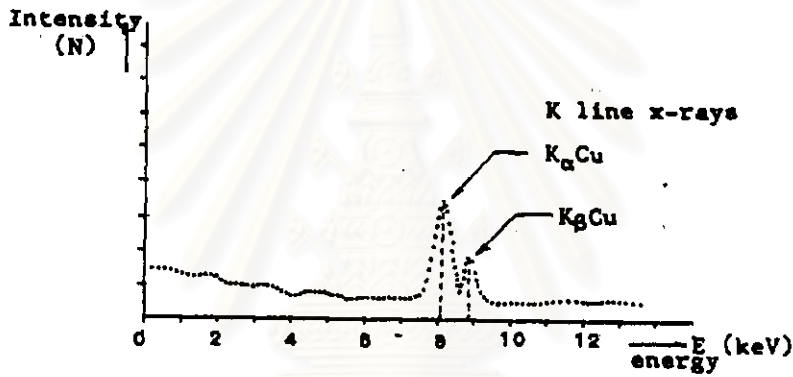
#### ก. รังสีเอกซ์เฉพาะตัว (Characteristics x-ray)

มีลักษณะเป็นรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานเดียว (Monochromatic) เนื่องจากเกิดจากการลดระดับพลังงานที่แน่นอน ปรากฏการณ์ของการเกิดรังสีเอกซ์ชนิดนี้ เกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนหรืออนุภาคที่มีประจุชนิดอื่นๆ หรือโฟตอน พลังงานสูงเคลื่อนที่เข้าชนอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นในของอะตอม เช่น ชั้น K หรือชั้น L แล้วโอนถ่ายพลังงานให้อิเล็กตรอน อิเล็กตรอนในชั้นโคจรที่ได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นเกินพลังงานยึดเหนี่ยวของชั้นโคจร (Binding Energy) จะหลุดจากวงโคจรเกิดที่ว่างของอิเล็กตรอนในชั้นโคจรนั้นทำให้อะตอมอยู่ในสภาวะที่ถูกกระตุ้น และจะลดระดับพลังงานลงสู่สภาวะปกติในช่วงระยะเวลาอันสั้น ( $10^{-15}$  วินาที) โดยอิเล็กตรอนของวงโคจรชั้นถัดออกไปจะลดระดับพลังงานลงมาให้เท่ากับพลังงานยึดเหนี่ยวของวงโคจรชั้นในด้วยการปล่อยพลังงานส่วนเกินในรูปของรังสีเอกซ์ออกไปแล้วเข้ามาแทนที่วงโคจรชั้นใน พลังงานส่วนเกินนี้จะมีพลังงานเท่ากับความต่างระดับพลังงานยึดเหนี่ยวเฉพาะชั้นโคจรของอิเล็กตรอนและเฉพาะชนิดของธาตุนั้นๆ จึงมีพลังงานเฉพาะค่า ดังนั้นรังสีเอกซ์ชนิดนี้จึงมีชื่อเรียกว่า "รังสีเอกซ์เฉพาะตัว"



ก. ชั้นตริภิวารของอะตอม

ข. การเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่ระดับพลังงานของชั้นโคจรต่างๆ



ค. สเปกตรัมของรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของทองแดง

รูปที่ 2.30 แสดงการเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัว

จากรูปที่ 2.30 ก. ถ้าอิเล็กตรอนปฐมภูมิที่มีพลังงาน  $E_i$  เคลื่อนชนอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้น K ซึ่งมีพลังงานยึดเหนี่ยว  $E_k$  พลังงานของอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะมีพลังงานเป็น  $E_s$

$$E_s = E_i - E_k \quad (2.36)$$

โดยที่

$E_s$  คือ พลังงานของอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (keV)

$E_i$  คือ พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (keV)

$E_k$  คือ พลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้น K (keV)



และในกรณีนี้ถ้าอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้น L ซึ่งมีระดับพลังงานเท่ากับ  $E_L$  ลดระดับพลังงานลงมาแทนที่ในวงโคจรชั้น K พลังงานของรังสีเอกซ์เฉพาะตัว  $E_X$  จะมีค่าเป็น

$$E_X = E_L - E_K \quad (2.37)$$

โดยที่

$E_X$  คือ พลังงานของรังสีเอกซ์เฉพาะตัว ( $keV$ )

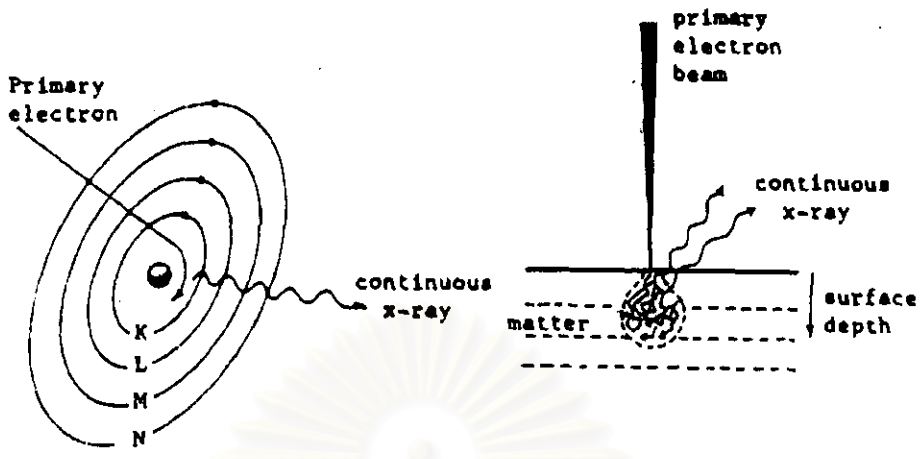
$E_L$  คือ พลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้น L ( $keV$ )

$E_K$  คือ พลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้น K ( $keV$ )

วงโคจรอิเล็กตรอนของอะตอมในแต่ละชั้นยังมีวงโคจรย่อย เรียกว่า "Subshell" และการที่อิเล็กตรอนในวงโคจรถัดออกไปจากชั้นใดจะลดระดับพลังงานเข้ามาแทนที่นั้นมีกระบวนการที่ซับซ้อนสามารถอธิบายได้โดยอาศัยกฎเกณฑ์ทางกลศาสตร์ควอนตัม (Quantum Mechanics) รังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่เกิดจากการแทนที่ของอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นนอกไปยังชั้น K L และ M มีชื่อเรียกเฉพาะดังนี้ ถ้ารังสีเกิดจากการแทนที่ของอิเล็กตรอนจากชั้น L มา K จะเรียกว่า "รังสีเอกซ์  $K_\alpha$  ( $K_\alpha$  x-ray)" และถ้ามาจากชั้น M จะเรียกว่า "รังสีเอกซ์  $M_\beta$  ( $K_\beta$  x-ray)" รังสีเอกซ์ที่เกิดจากการแทนที่ของอิเล็กตรอนในชั้น M มาชั้น L และ N มาชั้น M ก็จะเรียกว่า "รังสีเอกซ์  $L_\alpha$  ( $L_\alpha$  x-ray)" และ "รังสีเอกซ์  $M_\alpha$  ( $M_\alpha$  x-ray)" ตามลำดับ ดังแสดงการลดระดับพลังงานในรูปที่ 2.30 ข. ในกรณีที่เกิดการแทนที่ของอิเล็กตรอนจากวงโคจรชั้นนอกมายังชั้นย่อย เช่น จาก M มาชั้นย่อย L ก็จะเรียกชื่อรังสีเอกซ์  $L_{\alpha_1}$  และ  $L_{\alpha_2}$  เป็นต้น

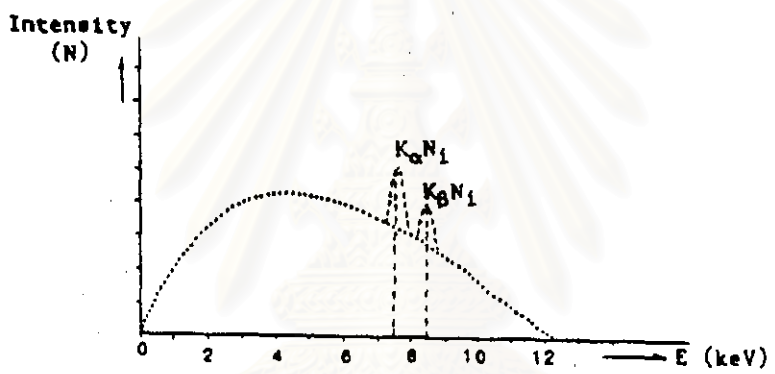
#### ข. รังสีเอกซ์ต่อเนื่อง

มีลักษณะเป็นรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานต่อเนื่องกระจายจากค่าต่ำสุดถึงค่าสูงสุดบางครั้งเรียกว่า "Polychromatic หรือ White x-ray" ปรากฏการณ์ของการเกิดรังสีเอกซ์ต่อเนื่องเกิดจากอิเล็กตรอนพลังงานสูงเคลื่อนเข้าสู่สนามคูลอมบ์ (Coulomb Field) บริเวณใกล้นิวเคลียสความหนาแน่นของสนามไฟฟ้าสถิตทำให้อิเล็กตรอนสูญเสียพลังงานอย่างรวดเร็วและปล่อยรังสีเอกซ์ออกมาเรียกว่า "Bremsstrahlung หรือ Braking Radiation" ดังแสดงในรูปที่ 2.31 ก.



ก. อันตรกิริยาของอะตอม

ข. การกระเจิงของอิเล็กตรอนปฐมภูมิขณะทำอันตรกิริยากับอะตอม



ค. สเปกตรัมของรังสีเอกซ์ต่อเนื่องจากเป้าหมายเกิด

รูปที่ 2.31 แสดงการเกิดรังสีเอกซ์ต่อเนื่อง

2.3.3 โครงสร้างของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์

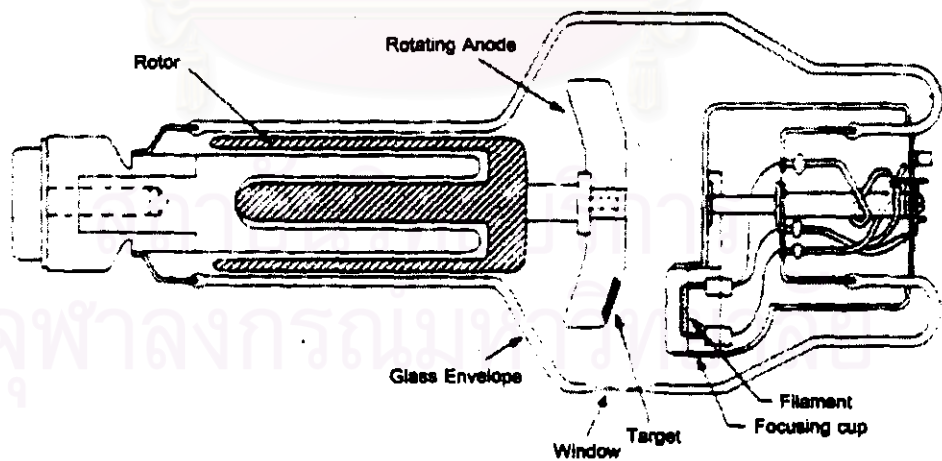
ในทางปฏิบัติการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ที่ต้องการคุณภาพของภาพสูงจะใช้แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ผลิตจากกลไกทางอิเล็กทรอนิกส์ เช่น รังสีเอกซ์พลังงานสูงมากผลิตจากเครื่องเร่งอนุภาค (Accelerator) และรังสีเอกซ์พลังงานสูงผลิตจากเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ (X-ray Machine) เนื่องจากรังสีเอกซ์ที่ผลิตจากกลไกทางอิเล็กทรอนิกส์มีจุดโฟกัสขนาดเล็กและสามารถปรับพลังงานของรังสีเอกซ์ได้จากอุปกรณ์ควบคุมจึงให้ความชัด (Sharpness) และความเปรียบต่าง (Contrast) ของภาพที่ดีกว่าการใช้แหล่งกำเนิดรังสีแกมมาจากสารกัมมันตรังสี

อุปกรณ์สำคัญในการผลิตรังสีเอกซ์พลังงานสูงแบบอิเล็กทรอนิกส์ คือ หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ ซึ่งเริ่มมีการพัฒนาเมื่อปี พ.ศ. 2456 โดย Coolidge เพื่อใช้งานทางการแพทย์ จนกระทั่งในปี พ.ศ. 2473 การถ่ายภาพชิ้นส่วนในงานอุตสาหกรรมด้วยรังสีเอกซ์จากเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ได้เริ่มขึ้นเมื่อกองทัพอศหรืออเมริกาขอรับการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ในการตรวจสอบรอยเชื่อมของ Boiler Drum ของเรือรบ

หลักการผลิตรังสีเอกซ์ด้วยกลไกทางอิเล็กทรอนิกส์นั้นอาศัยองค์ประกอบที่สำคัญสามประการ คือ

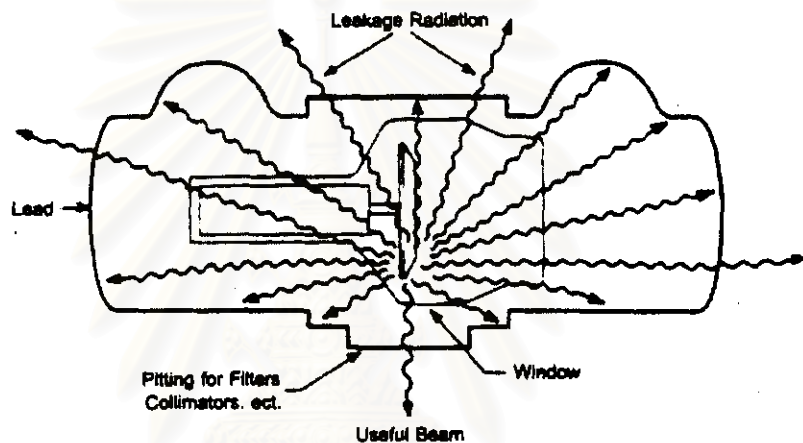
1. จะต้องมีแหล่งผลิตอิเล็กตรอนอิสระที่บังคับให้แปรเปลี่ยนปริมาณอิเล็กตรอนได้
2. จะต้องมีศักดาไฟฟ้าเร่ง (Acceleration Voltage) สำหรับเร่งพลังงานของอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกันสู่เป้าหมายผลิตรังสีเอกซ์และระหว่างทางอิเล็กตรอนจะต้องไม่สูญเสียพลังงานรวมทั้งสามารถแปรเปลี่ยนพลังงานของอิเล็กตรอนได้
3. ต้องมีเป้ารองรับการทำอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนพลังงานสูงและอะตอมเพื่อผลิตรังสีเอกซ์

จากหลักการผลิตรังสีเอกซ์ที่กล่าวมา โครงสร้างของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์จึงประกอบด้วยส่วนต่างๆ ในรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์

ก. **Protective Housing** เป็นส่วนซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวถังบรรจุหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ อีกทั้งยังเป็นส่วนที่ป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดกับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์และป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นขณะใช้งานเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ด้วย โครงสร้างส่วนใหญ่ของ Protective Housing จะบุหรือทำด้วยตะกั่ว เพื่อป้องกันไม่ให้รังสีเอกซ์ในทิศทางที่ไม่ต้องการเล็ดลอดออกไป หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ติดตั้งภายในจะแช่อยู่ในน้ำมัน ซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าและถ่ายเทความร้อนให้กับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ การถ่ายเทความร้อนภายนอกอาจใช้พัดลมช่วยในกรณีที่หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ทำงานที่ก่้างไฟฟ้าสูง ดังในรูปที่ 2.33



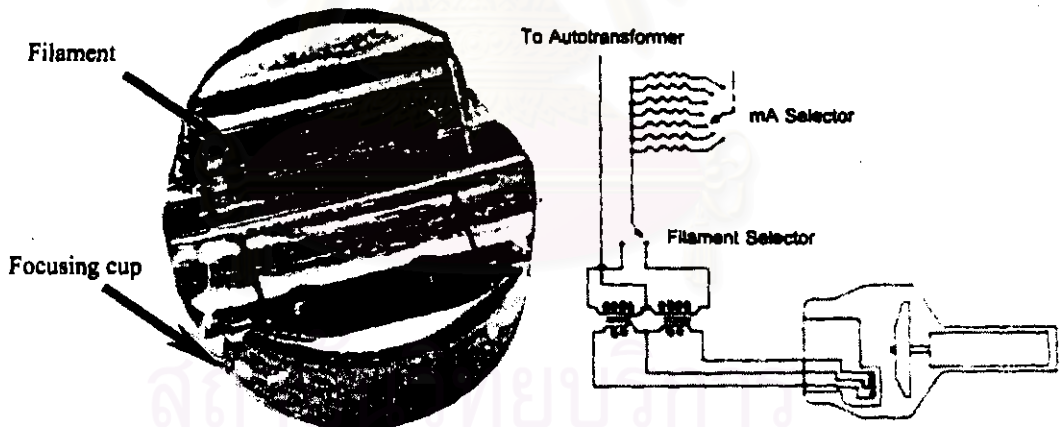
รูปที่ 2.33 Protective Housing

ข. **Glass Envelope** เป็นโครงภายนอกของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ซึ่งห่อหุ้มสภาพสุญญากาศและทำหน้าที่ยึดชิ้นส่วนประกอบหลักของการผลิตรังสีเอกซ์ ได้แก่ ใต้หลอดและเป่าให้อยู่ในตำแหน่งทำงาน สภาพสุญญากาศจะช่วยให้ใต้หลอดที่เผาร้อนไม่กร่อนจากปฏิกิริยาของอากาศ พร้อมทั้งเป็นฉนวนเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการอาร์ค (Arc) ระหว่างเป่ากับใต้หลอดและช่วยให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระที่ถูกเร่งด้วยไฟฟ้าศักดาสูงโดยไม่สูญเสียพลังงานก่อนถึงเป่า ซึ่งภาชนะนี้อาจจะทำด้วยแก้วหรือเซรามิกที่มีความสามารถทนความดันสุญญากาศได้ถึง  $10^{-7}$ - $10^{-8}$  มิลลิเมตรปรอทได้ ในปัจจุบันมีการผลิตหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ขนาดเล็กบางประเภทภายในจะไม่มีสภาพเป็นสุญญากาศ แต่จะอาศัยการควบคุมปริมาณของก๊าซภายในหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์แทนสร้างภาวะดิสชาร์จของก๊าซ (Gas Discharge) และกำเนิดอิเล็กตรอนทำอันตรกิริยากับเป่าขนาดเล็กที่ระบายความร้อนด้วยระบบหล่อเย็นอุณหภูมิต่ำผลิตรังสีเอกซ์ขึ้น

บริเวณที่สำคัญส่วนหนึ่งบนภาชนะสุญญากาศ คือ ช่องทางออกของรังสีเอกซ์ที่ผลิตได้ (Window) บริเวณนี้จะเป็นบริเวณที่ทำให้บางและมีรูปร่างที่สามารถรับความดันสุญญากาศเพื่อลดการสูญเสียปริมาณรังสีเอกซ์ ถ้าเป็นการผลิตรังสีเอกซ์พลังงานต่ำช่องทางนี้จะใช้โลหะเบริลเลียม (Beryllium) ซึ่งมีเลขอะตอมต่ำแทน

ก. Cathode เป็นขั้วไฟฟ้าด้านลบของหลอดกำเนิดรังสีประกอบด้วยส่วนสำคัญสองส่วนคือ ไส้หลอดและโฟกัสซิงค์

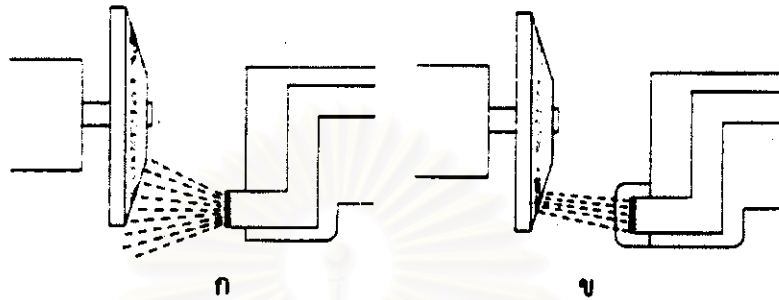
ก.1 ไส้หลอด (Filament) ประกอบไปด้วยขดลวดที่มีความสามารถทนกระแสไฟฟ้าและอุณหภูมิได้สูงโดยไม่มีการหลอมละลายหรือกลายเป็นไอ โดยทั่วไปขดลวดไส้หลอดจะถูกเคลือบหรือทำด้วยทั้งสแตนเลส ไส้หลอดทำหน้าที่เป็นแหล่งผลิตกลุ่มอิเล็กตรอนอิสระด้วยการปล่อยอิเล็กตรอนจากผิวเส้นลวดทั้งสแตนเลสที่ถูกเผาให้ร้อนด้วยกระแสไฟฟ้า ซึ่งเมื่อไส้หลอดอยู่ในสภาวะผลิตรังสีเอกซ์จะทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าลบไปในตัว แสดงดังรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.34 แคโทดของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ [6]

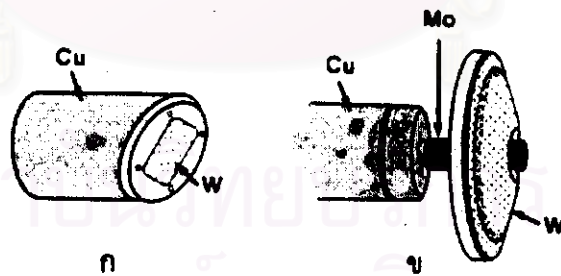
ก.2 โฟกัสซิงค์ (Focusing Cup) เป็นโลหะที่มีลักษณะเป็นแอ่งรองรับไส้หลอด ทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้าสถิตมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบบังคับให้กลุ่มอิเล็กตรอนรวมตัวกันเป็นแนวไปบรรจบกันที่เป้า แสดงดังรูปที่ 2.34 ในรูปที่ 2.35 แสดงการทำงานของโฟกัสซิงค์ รูปที่ 2.35 ก. ถ้าปราศจากโฟกัสซิงค์แล้วลำอิเล็กตรอนจะกระจายไปยังขั้วแอโนดในรูปที่ 2.35 ข. คือเมื่อมี

โฟกัสซิงค์จะทำให้ลำอิเล็กตรอนเดินทางไปยังขั้วแอโนดอย่างมีระเบียบ โดยความสามารถในการบังคับลำอิเล็กตรอนจะขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของโฟกัสซิงค์ ปริมาณประจุ ขนาดและรูปร่างของไส้หลอดและรวมทั้งตำแหน่งของไส้หลอดกับโฟกัสซิงค์



รูปที่ 2.35 การทำงานของโฟกัสซิงค์

ง. แอโนดหรือเป้า (Anode or Target) เป็นบริเวณที่ทำหน้าที่ผลิตรังสีเอกซ์เมื่ออิเล็กตรอนพลังงานสูงเคลื่อนที่เข้าชนอะตอมของเป้าและทำอันตรกิริยา ปกติเป้าจะทำด้วยโลหะที่มีเลขอะตอมสูง เป็นตัวนำและระบายความร้อนที่ดี มีจุดหลอมละลายสูงและไม่กลายเป็นไอง่าย ซึ่งส่วนมากมักใช้ทั้งสแตนดีอัมอยู่บนทองแดง แสดงดังรูปที่ 2.36 เมื่อเป้าอยู่ในสภาวะผลิตรังสีเอกซ์จะทำหน้าที่เป็นขั้วบวกไปในตัว



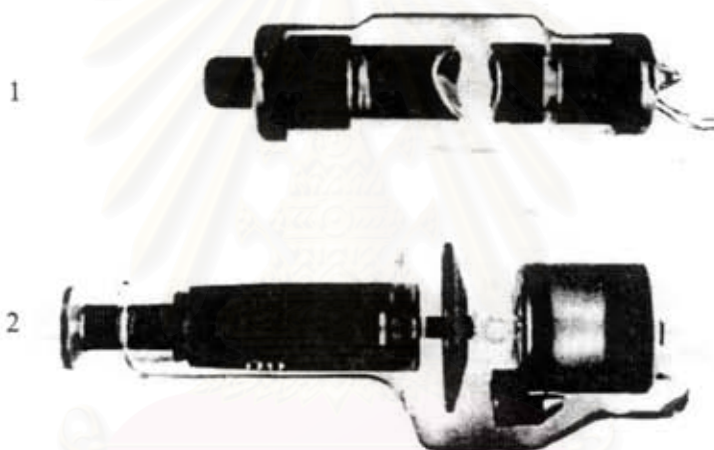
รูปที่ 2.36 เป้าหรือแอโนดของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ [6]

แอโนดของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ในรูปที่ 2.36 ก. เรียกว่า "Stationary Anode" ส่วนแอโนดในรูปที่ 2.36 ข. เรียกว่า "Rotating Anode" แอโนดทั้งสองแบบมีลักษณะการใช้งานแตกต่างกันดังนี้



3.1 Stationary Anode หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ชนิดนี้จะใช้งานที่กัลังไฟฟ้าไม่สูงมากนัก จึงเหมาะสำหรับเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ทางด้านอุตสาหกรรม ทางด้านการแพทย์ที่ถ่ายภาพระยะสั้นและทางด้านทันตกรรม

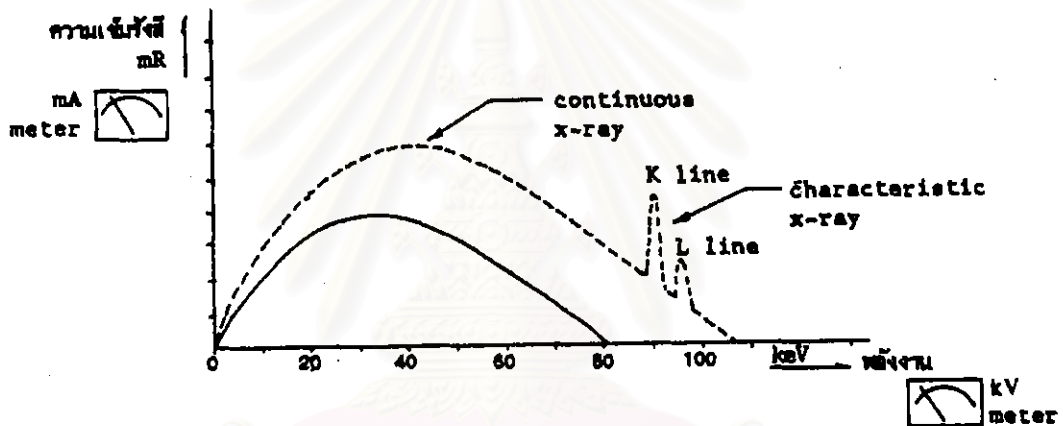
3.2 Rotating Anode เป็นหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ใช้งานที่กัลังไฟฟ้าสูงต่อเนื่องเป็นเวลานาน เนื่องจากแอโนดที่หมุนได้จะมีการกระจายบริเวณทำอันตรกิริยาของลำอิเล็กตรอน รวมถึงการระบายความร้อนที่เกิดขึ้น ใช้กับงานทางการแพทย์ที่ตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่องรังสีบนฉาก (Fluorescence Screen) ซึ่งต้องใช้เวลานานและกระแสแอโนดสูง



รูปที่ 2.37 หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ชนิดแอโนดนิ่งและแอโนดหมุน

ในการผลิตรังสีเอกซ์จะต้องมีแหล่งจ่ายกัลังไฟฟ้าสองชุด ชุดแรกเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาต่ำสำหรับจุดไส้หลอด การแปรเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าของชุดแหล่งจ่ายชุดนี้จะมีผลโดยตรงต่อการควบคุมปริมาณการผลิตรังสีเอกซ์หรือความเข้มรังสี อีกชุดหนึ่งเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงสำหรับจ่ายศักดาไฟฟ้าแรงให้กับไส้หลอดและเป่าด้วยขั้วลบและบวกตามลำดับ การแปรเปลี่ยนค่าศักดาไฟฟ้าของแหล่งจ่ายชุดนี้จะมีผลต่อการควบคุมพลังงานของอิเล็กตรอนหรือพลังงานของรังสีเอกซ์ต่อเนื่องที่ผลิตขึ้น และยังมีผลต่อกระแสไฟฟ้าของวงจรแอโนดหรือปริมาณความเข้มของรังสีอีกด้วย

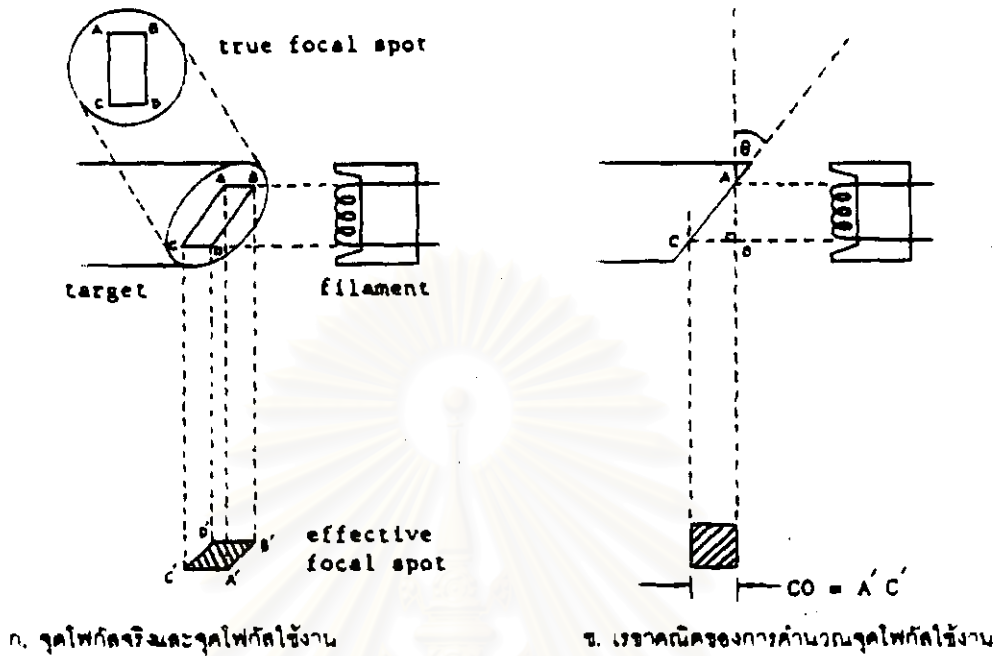
ขั้นตอนการทำงานของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์เริ่มจากอิเล็กตรอนอิสระจากไส้หลอดได้รับการเร่งให้มีพลังงานสูงเท่ากับไฟฟ้าศักดาสูงที่จ่ายแก่ขั้วไฟฟ้าของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ทั้งสองขั้ว กล่าวคือ ถ้าจ่ายศักดาไฟฟ้าสูง 80 กิโลโวลต์ อิเล็กตรอนจะมีพลังงาน 80 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ เมื่ออิเล็กตรอนพลังงานสูงนี้ชนเป้าจะทำอันตรกิริยากับอะตอมของเป้าในชั้นความลึกจากผิวของเป่าต่างๆ กันตามลักษณะการกระเจิงของอิเล็กตรอนและปลดปล่อยรังสีเอกซ์จากช่วงพลังงาน 0-80 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ออกมา ดังแสดงการกระจายของพลังงานในรูปของสเปกตรัมเส้นทึบของรูปที่ 2.38 ในกรณีที่เพิ่มศักดาไฟฟ้าเร่งให้สูงขึ้นเกินกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นในก็จะมีปลดปล่อยรังสีเอกซ์เฉพาะตัวปนออกมาด้วย ดังแสดงด้วยเส้นสเปกตรัมเส้นประในรูปที่ 2.38



รูปที่ 2.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการแปรเปลี่ยนศักดาไฟฟ้าเร่งกับสเปกตรัมของรังสีเอกซ์

#### 2.3.4 จุดโฟกัสของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์

จากที่กล่าวมาแล้วว่า ขนาดของจุดโฟกัสมีผลต่อความคมชัดของภาพถ่ายรังสีเอกซ์ ดังนั้นการออกแบบหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์จึงพยายามควบคุมให้มีจุดโฟกัสเล็กโดยเฉพาะงานถ่ายภาพที่ต้องการรายละเอียดของภาพสูง จะต้องใช้หลอดแบบไมโครโฟกัส แต่เมื่อพิจารณาจากโครงสร้างของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์จะเห็นว่า มีข้อจำกัดที่มุมเอียงของเป้าและขนาดของไส้หลอด



รูปที่ 2.39 แสดงจุดโฟกัสของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์

จากรูปที่ 2.39 ก. การตกกระทบของลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงบนเป้าในแนวขนานระหว่างเป้าและไส้หลอดจะเกิดจุดโฟกัสจริง (True Focus Spot) รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ABCD บนเป้า แต่ในสภาพการใช้งานจริงหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์จะวางขนานกับชิ้นงาน ดังนั้น จุดโฟกัสใช้งาน (Effective Focus Spot) ในแนวตั้งฉากระหว่างชิ้นงานกับเป้าจึงมีขนาด  $A'B'C'D'$

จากรูปที่ 2.39 ข. จากภาพฉายเรขาคณิตของแนวตกกระทบของอิเล็กตรอนสามารถคำนวณหาขนาดของจุดโฟกัสใช้งาน ได้ตามสมการที่ 2.38 ดังนี้

$$\tan \theta = \frac{CO}{AO} \quad \text{ดังนั้น} \quad CO = AO \tan \theta \quad (2.38)$$

โดยที่

$AO$  คือ ขนาดความยาวของขดลวดไส้หลอดในแนวขนานกับเป้า

$CO$  คือ ขนาดความยาวของขดลวดไส้หลอดในแนวตั้งฉากกับเป้า

$\theta$  คือ มุมของเป้าผลิตรังสีเอกซ์

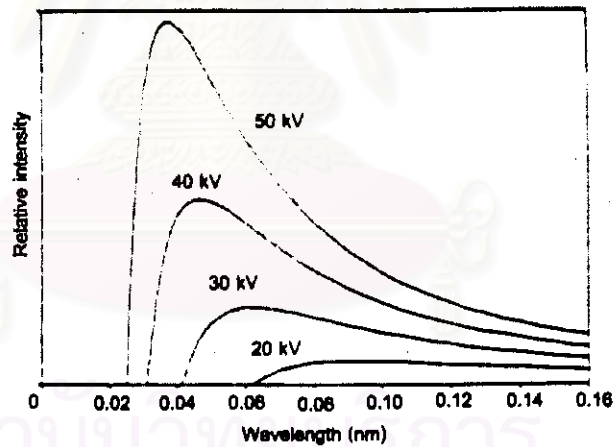
ปริมาณรังสีเอกซ์ที่ผลิตจากอันตรกิริยาของลำอิเล็กตรอนและเป้าขึ้นอยู่กับเลขอะตอมพลังงานของอิเล็กตรอนและปริมาณของอิเล็กตรอน ซึ่งเขียนได้ในรูปของสมการ [7]

$$I_\nu \approx CZ(\nu_{\max} - \nu) \quad (2.39)$$

จากสมการที่ 2.39 สามารถเปลี่ยนความเข้มของรังสีให้อยู่ในรูปของความยาวคลื่นได้ดังสมการที่ 2.40

$$I_\lambda \approx Cc^2Z \frac{\lambda - \lambda_{\min}}{\lambda^3 \lambda_{\min}} \quad (2.40)$$

และจากสมการที่ 2.40 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีและความยาวคลื่นให้อยู่ในรูปของกราฟได้ดังรูปที่ 2.40



รูปที่ 2.40 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีกับความยาวคลื่นสำหรับเป้าที่ทำด้วยทังสเตน [6]

จากรูปที่ 2.40 สามารถหาความเข้มของรังสีทั้งหมดตลอดช่วงความยาวคลื่นได้โดยการอินทิเกรต ดังสมการที่ 2.41 [7]

$$I = CZ \int_0^{v_{\max}} (v_{\max} - v) dv = \frac{CZ}{2} v_{\max}^2 = \frac{CZ}{2} \left( \frac{eV}{h} \right)^2 \quad (2.41)$$

โดยที่

$I_v, I_x$  คือ ความเข้มของรังสีเอกซ์อยู่ในรูปของความถี่และความยาวคลื่น

$C$  คือ ค่าคงที่ของธาตุที่เป็นเป้า

$Z$  คือ เลขอะตอมของธาตุที่เป็นเป้า

$v$  คือ ความถี่ของโฟตอน

สามารถหาประสิทธิภาพ ( $\eta$ ) ของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ (เฉพาะหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ใช้ทั้งสแตนเป็นเป้า) ได้ดังสมการที่ 2.42

$$\eta = \frac{X - ray \cdot power}{electron - beam \cdot power}$$

$$\eta = \frac{CZ}{2} \left( \frac{eV}{h} \right)^2 \frac{1}{neV} \approx 0.92 \times 10^{-9} ZV \quad (2.42)$$

ปริมาณของอิเล็กตรอนที่ผลิตจากไส้หลอดจะถูกเปลี่ยนเป็นปริมาณรังสีเอกซ์ประมาณร้อยละ 1 เท่านั้น ที่เหลือร้อยละ 99 จะเปลี่ยนเป็นความร้อนที่เกิดจากการดูดกลืนพลังงานของอิเล็กตรอนบนผิวของเป้า จึงจำเป็นต้องมีการระบายความร้อนจากเป้าเพื่อป้องกันมิให้เป่าหลอมละลายเป็นไอภายในหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ ดังนั้น จากสมการที่ 2.42 กำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนเป็นปริมาณรังสีเอกซ์ขึ้นกับตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการผลิตรังสีเอกซ์ได้แก่ กระแสในวงจรแอโนด เลขอะตอมของเป้า และศักดาไฟฟ้าแรง ดังความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.43

$$I_C \propto iZV^2 \quad (2.43)$$

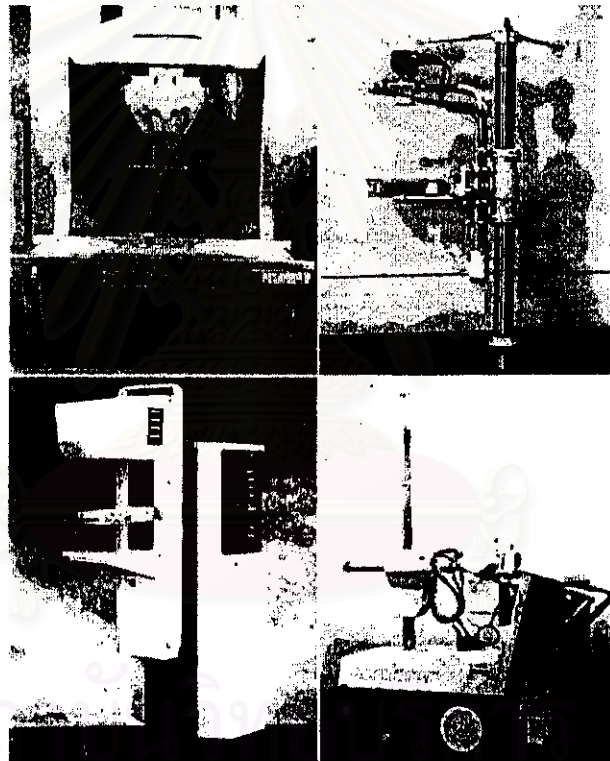
โดยที่

$I_C$  คือ ความเข้มรังสีเอกซ์ที่ผลิตได้

$i$  คือ กระแสไฟฟ้าในวงจรแอโนด

## 2.4 เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์

เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์มีขนาดและอุปกรณ์ประกอบที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ทางการแพทย์จะมีทั้งที่ออกแบบให้สามารถเคลื่อนย้ายได้และติดตั้งอยู่กับที่ เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ที่เคลื่อนย้ายได้นั้นจะต้องออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงให้มีขนาดเล็กและมีประสิทธิภาพสูง นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาอุปกรณ์ประกอบต่างๆ ให้สะดวกต่อการถ่ายภาพด้วยรังสี เช่น อุปกรณ์สำหรับจัดหมุนตำแหน่งของหัวกำเนิดรังสี กลักฟิล์ม รวมทั้งเตียงผู้ป่วยในแต่ละกรณีของการใช้งานดังแสดงในรูปที่ 2.41

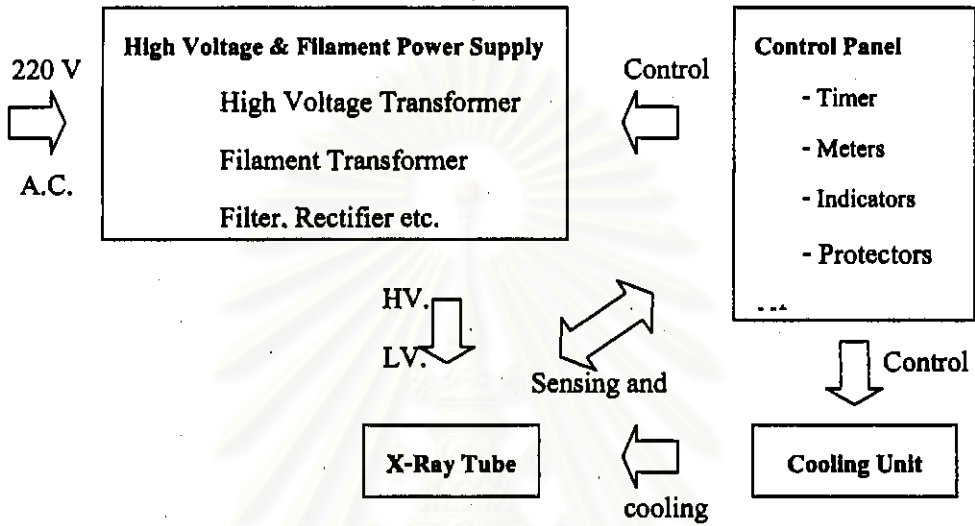


รูปที่ 2.41 เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ชนิดต่างๆ

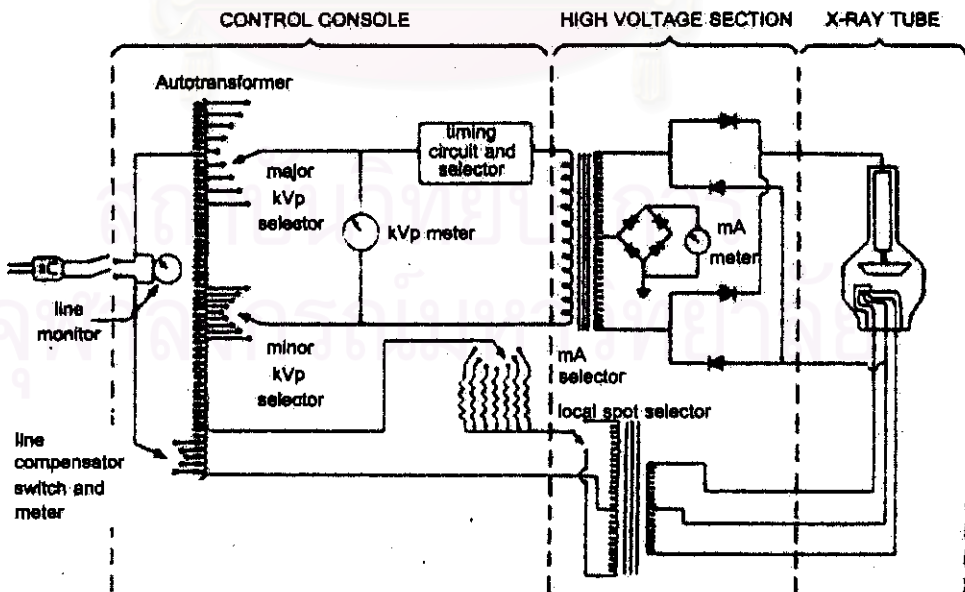
เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ทั่วไปประกอบไปด้วยส่วนหลัก 3 ส่วนที่แยกกันอย่างเห็นได้ชัด คือ หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ แหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power Supply Unit) และแผงควบคุม (Control Console) ดังแผนภาพรูปที่ 2.42 และวงจรพื้นฐานในรูปที่ 2.43 แต่เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์บางชนิดจะมีส่วนประกอบทั้งสามส่วนรวมอยู่ในตัวถึงเดียวกัน เรียกว่า แบบแทงค์ (Tank Type) เช่น เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ใช้งานทางด้านทันตกรรม (Dental X-ray Machines) และ Portable X-ray Machines สำหรับงานอุตสาหกรรม เป็นต้น



ปัญหาสำคัญของการออกแบบเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ คือ ส่วนของแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง และการควบคุมให้ได้คุณภาพของความเปรียบต่างภาพที่ดีและมีความคงทนต่อสภาพของแหล่งจ่ายไฟฟ้า 220V/50Hz



รูปที่ 2.42. แผนภาพส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์



รูปที่ 2.43 ส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์