

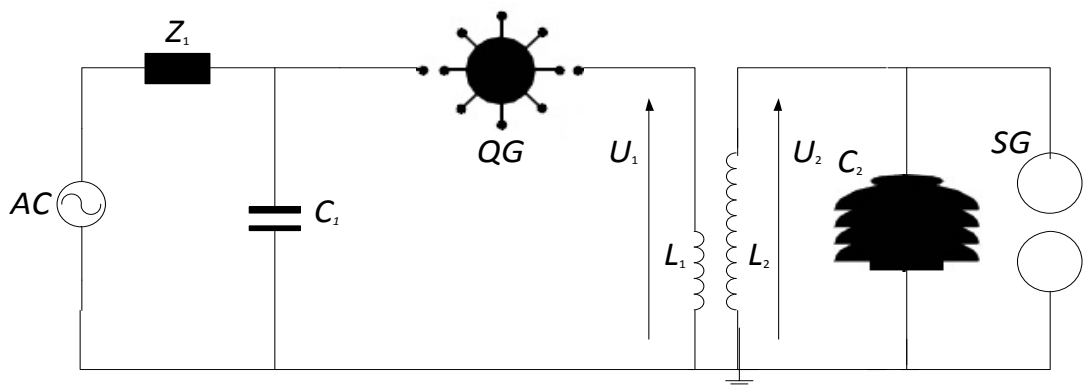
## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของหม้อแปลงเทสลาแบบดั้งเดิมและหลักการทำงาน รวมไปถึงองค์ประกอบพื้นฐานเกี่ยวกับส่วนประกอบต่าง ๆ ของหม้อแปลงเทสลาแบบดั้งเดิม อธิบายเกี่ยวกับการออสซิลเลทของควมถี่และความเหนี่ยวนำร่วมของขดลวดทั้งสอง คุณสมบัติของตัวนำ ลูกถ้วย ฉนวน การทดสอบลูกถ้วยฉนวน เทคนิคการวัดแรงสูงและส่วนประกอบของวงจรอินเวอร์เตอร์ ที่นำมาประยุกต์ใช้ในหม้อแปลงเทสลา

### 2.1 หม้อแปลงเทสลาแบบดั้งเดิม

หม้อแปลงเทสลาจัดได้ว่าเป็นหม้อแปลงชนิดพิเศษ โดยที่ใช้แกนของหม้อแปลงเป็นแกนอากาศ และขดลวดทั้งสอง คือ ขดปฐมภูมิ (Primary) และขดทุติยภูมิ (Secondary) จะติดตั้งอยู่ในแกนร่วมกันการสร้างความถี่ไฟฟ้าแรงสูง และความถี่สูงของหม้อแปลงจะอาศัยหลักการเกิดออสซิลเลท (Oscillate) ในวงจร LC เมื่อ  $L$  คือ ความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Inductance) และ  $C$  คือ ความจุไฟฟ้า (Capacitance) ของวงจรหม้อแปลงเทสลา โดยขดลวดทั้งสองจะคัปปลิง (Coupling) กันด้วยสนามแม่เหล็กที่เดินทางผ่านอากาศ ดังนั้น ค่าความเหนี่ยวนำร่วมจะต่ำมาก ขดลวดด้านทุติยภูมิจะเป็นตัวรับพลังงานจากขดปฐมภูมิที่ความถี่เรโซแนนซ์ จะส่งผลให้เกิดแรงดันเพิ่มขึ้นอย่างมากที่ความถี่เรโซแนนซ์ และถ้ามีแรงดันเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้เกิดการสปาร์ก (Spark) ซึ่งจะนำไปใช้ทดสอบความบกพร่องภายในเนื้อฉนวนลูกถ้วย (Insulator) ถ้าลูกถ้วยที่ดี ก็จะเกิดการวาบไฟตามผิว (Flashover) เหตุที่ต้องใช้ความถี่สูงนั้นเพื่อให้สามารถสังเกตเห็นการเกิดวาบไฟได้ชัดเจน

#### 2.1.1 หลักการของหม้อแปลงเทสลาแบบดั้งเดิม



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลของหม้อแปลงเทสลาแบบดั้งเดิม

โดยที่	$AC$ คือ	ตัวจ่ายกำลังเป็นแหล่งจ่ายไฟอัดประจุ
	$Z_1$ คือ	อิมพีแดนซ์จำกัดกระแส
	$C_1$ คือ	ค่าความจุไฟฟ้าของวงจรทางด้านปฐมภูมิ
	$C_2$ คือ	ค่าความจุไฟฟ้ารวมทางด้านทุติยภูมิ
	$L_1$ คือ	ค่าความเหนี่ยวนำทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเตสลา
	$L_2$ คือ	ค่าความเหนี่ยวนำทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเตสลา
	$QG$ คือ	Quenching gap เป็นชุดสปาร์กแกปแบบกั้นหนูน

จากรูปที่ 2.1 เป็นวงจรสมมูลและส่วนประกอบของหม้อแปลงเตสลาแบบดั้งเดิม เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ  $AC$  ให้กับตัวเก็บประจุ  $C_1$  และเมื่อ  $C_1$  ถูกอัดประจุจนได้รับแรงดันไฟฟ้าถึงระดับที่ทำให้อากาศที่อยู่ระหว่างช่องอากาศ (Air gap) สูญเสียความเป็นฉนวนจะทำให้เกิดการเบรกควานระหว่างช่องอากาศที่ตัวแกปดับอาร์ค ทำให้วงจรทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเตสลาครบวงจร เป็นผลให้  $C_1$  ทำการคายประจุที่เก็บไว้ในรูปของสนามไฟฟ้าไปสู่ขดลวดปฐมภูมิ  $L_1$  และ  $L_1$  ก็จะเก็บพลังงานไว้ในรูปของสนามแม่เหล็ก เมื่อเก็บพลังงานเต็มที่แล้ว  $L_1$  ก็จะถ่ายทอดพลังงาน (Transfer energy) ที่เก็บไว้กลับไปให้  $C_1$  ใหม่ ลักษณะของการถ่ายทอดพลังงานกลับไปกลับมาจะเกิดขึ้นระหว่าง  $L_1$  และ  $C_1$  ทำให้เกิดการออสซิลเลท (Oscillate) ต่อเนื่องแบบ Damped oscillation ที่ความถี่สูง สำหรับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่มีความถี่ 50Hz หรือ 1/50 วินาทีใน 1 Cycle ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ  $C_1$  ใน 1 Cycle จะทำให้เกิดการอัดประจุและการคายประจุในช่วงครึ่งไซเคิลบวกและครึ่งไซเคิลลบ ค่าโดยประมาณของความถี่ที่ทำให้เกิดการออสซิลเลท นั้นสามารถหาได้จากสมการ

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad (2.1)$$

เมื่อ

$L_1$	คือ	ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดปฐมภูมิ (H)
$C_1$	คือ	ค่าความจุไฟฟ้าของวงจรทางด้านปฐมภูมิ (F)
$f$	คือ	ความถี่ออสซิลเลท (Hz)

การเกิดออสซิลเลท (Oscillation) ในวงจรด้านปฐมภูมิ (Primary) ของหม้อแปลงเตสลาจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดทางด้านทุติยภูมิ (Secondary) ของหม้อแปลงเตสลา ซึ่งมีความถี่เช่นเดียวกันกับทางด้านปฐมภูมิ (Primary) ดังนั้น วงจรทางด้านปฐมภูมิจะส่งพลังงานไปยังวงจรทางด้านทุติยภูมิ (Secondary)  $L_2 C_2$  ในลักษณะการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าซึ่ง

แรงดันที่เหนี่ยวนำขึ้นทางด้านทุติยภูมิ (Secondary) จะขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์แรงดัน  $\rho_1$  ดังสมการที่ (2.5) ในเทอมของอัตราส่วนการจูน ( $a$ ) ดังสมการที่ (2.6) และมีสัมประสิทธิ์การคลี่ปลั่ง ( $K$ ) เป็นพารามิเตอร์ประกอบดังรูปที่ 2.2 เมื่อผลคูณค่าความเหนี่ยวนำทางด้านทุติยภูมิ (Secondary Inductance,  $L_2$ ) และค่าประจุแฝง (Stray capacitance,  $C_2$ ) ทางด้านทุติยภูมิมีค่าเท่ากับผลคูณของวงจรทางด้านปฐมภูมิ (Primary) คือ  $L_1 C_1 = L_2 C_2$  จะทำให้เกิดการออสซิลเลทแบบหน่วง (Damped Oscillation) แบบต่อเนื่องและพลังงานที่เกิดขึ้นสามารถดูได้จากสมการที่ (2.2)

$$W = \frac{1}{2} CV^2 \quad (2.2)$$

เมื่อ  $W$  คือ พลังงานที่เกิดขึ้น

$C$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

$V$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้ตัวเก็บประจุ

และสามารถพิจารณาค่าแรงดันทางด้านขาออกของวงจรสร้างแรงดันสูง และความถี่สูงได้ตามสมการที่ (2.3)

$$U_2 = \sqrt{\eta \frac{C_1}{C_2}} x U_1 \quad (2.3)$$

เมื่อ  $U_2$  คือ แรงดันไฟฟ้าทางด้านขาออก

$U_1$  คือ แรงดันไฟฟ้าทางด้านขาเข้า

$\eta$  คือ ประสิทธิภาพการถ่ายทอดพลังงานของวงจรหม้อแปลงเตสลา

แรงดันสูงสุดด้านแรงสูงอาจประมาณได้จากความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.4)

$$U_{2\max} = \rho_1 \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} x U_1 \quad (2.4)$$

เมื่อ  $\rho_1$  คือ สัมประสิทธิ์แรงดัน ซึ่งมีค่าเป็น

$$\frac{2\sqrt{1-\sigma}}{\sqrt{(1+a)^2 - 4\sigma a}} \quad (2.5)$$

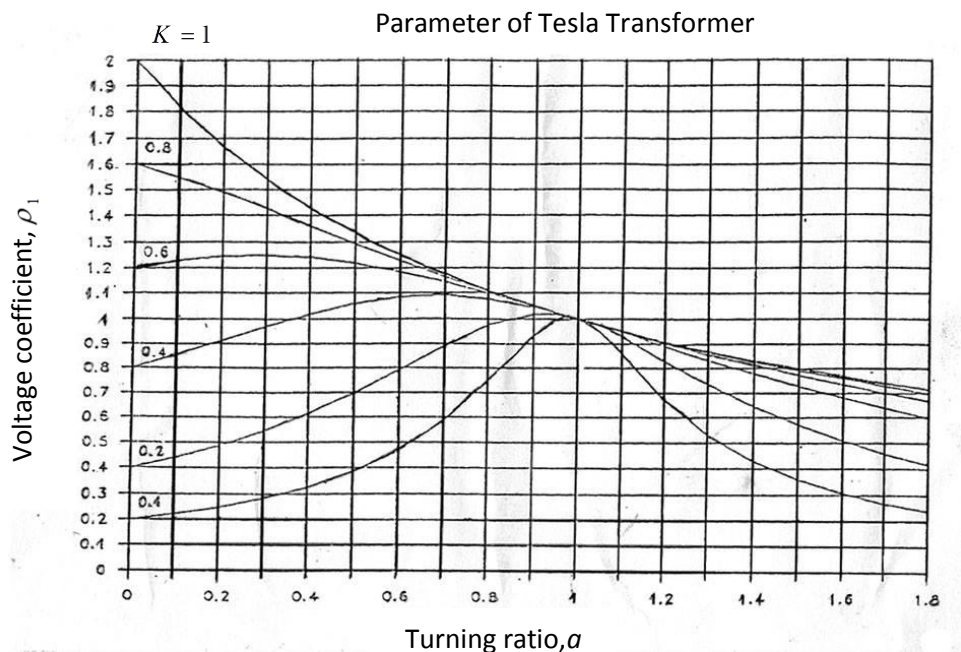
โดยที่  $a$  คือ อัตราส่วนการจูน มีค่าเป็น

$$a = \frac{L_2 C_2}{L_1 C_1} \tag{2.6}$$

ซึ่งจะมีค่าสูงสุดเมื่อ  $\alpha = 1 - 2K^2$  และ  $K$  คือสัมประสิทธิ์คัปปลิงของขดลวดด้านแรงต่ำและแรงดันสูง มีค่าเท่ากับ  $\sqrt{1 - \sigma}$  โดยที่เทอม  $\sigma$  สามารถหาได้จากสมการที่ (2.7)

$$\sigma = \frac{1 - M^2}{L_1 L_2} = 1 - K^2 \tag{2.7}$$

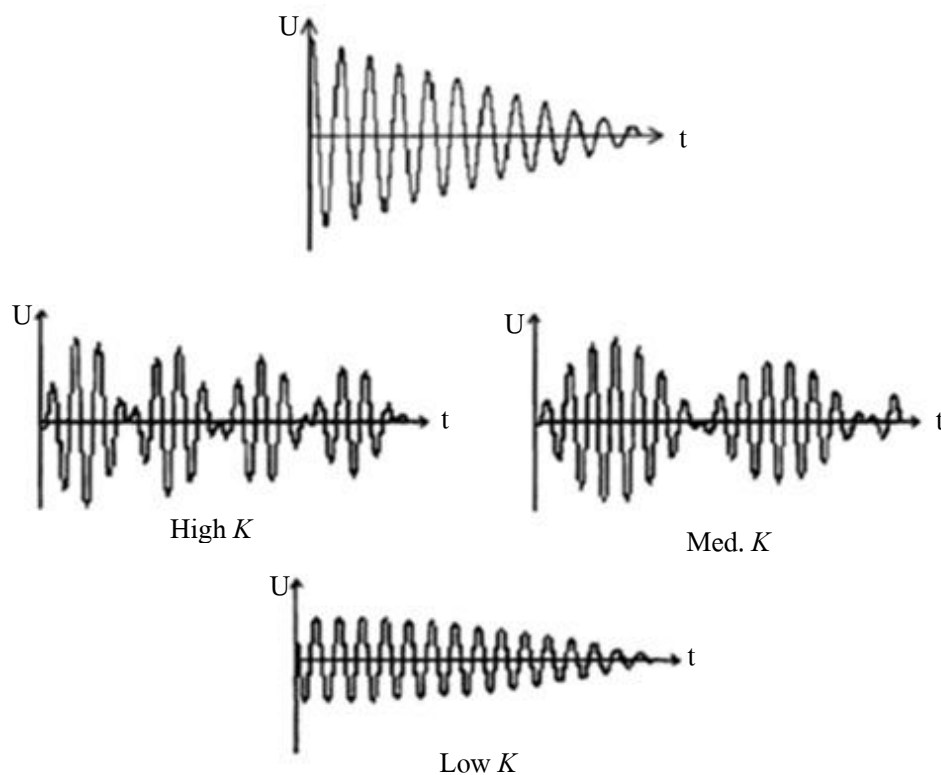
เมื่อ  $M$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual inductance) ด้านแรงต่ำและแรงสูง เมื่อแรงดันทางด้านแรงสูงมีค่ามากพอจะทำให้การเบรกดาวน์ หรือมีการวาบไฟตามผิววัสดุทดสอบตามต้องการ เช่น ลูกถ้วยฉนวน การเกิดการวาบไฟนี้จะเกิดได้ก็ต่อเมื่อมีการสปาร์คอย่างต่อเนื่อง โดยลักษณะการเกิดวาบไฟตามผิวจะบ่งบอกถึงความสมบูรณ์หรือบกพร่องของลูกถ้วยที่ทำการทดสอบได้



รูปที่ 2.2 สัมประสิทธิ์แรงดันในเทอมอัตราจูน  $a$  มี  $K$  เป็นพารามิเตอร์

### 2.1.2 ลักษณะรูปคลื่น (waveforms) ของแรงดันไฟฟ้า

วงจรทางด้านปฐมภูมิ (Primary) จะรับพลังงานเข้ามาและส่งผ่านไปยังวงจรทางด้านทุติยภูมิ (Secondary) ในขณะที่แรงดันของวงจรด้านปฐมภูมิ (Primary) เริ่มลดลง ในขณะที่เดียวกันแรงดันทางด้านทุติยภูมิ (Secondary) จะเริ่มเพิ่มขึ้น ขบวนการเช่นนี้จะเกิดขึ้นซ้ำ ๆ ทำให้เกิดการอสซิลเลทแบบหน่วงอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากในวงจรทั้งปฐมภูมิ (Primary) และวงจรทุติยภูมิ (Secondary) มีการสูญเสียพลังงานเกิดขึ้น โดยค่าความต้านทาน ถ้าเกิดการสปาร์คในระหว่างช่องว่างของอากาศของ (Quenching gap) หยุด คือการทำให้การอาร์ก (Arc) เกิดหยุดหลังจากที่ขดลวดทางด้านปฐมภูมิ (Primary) ได้รับพลังงานจากคาปาซิเตอร์ จะทำให้พลังงานสามารถส่งผ่านไปยังขดลวดทุติยภูมิ (Secondary) จะได้รูปคลื่น ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ลักษณะรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่ค่า  $K$  ต่างๆ

## 2.2 อุปกรณ์หลักของหม้อแปลงเตสลาแบบดั้งเดิม

หม้อแปลงเตสลาที่มีอุปกรณ์หลัก ๆ ดังต่อไปนี้

### 2.2.1 หม้อแปลง

ทำหน้าที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับหม้อแปลงเตสลาเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงหรือแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับก็ได้ โดยมีสิ่งสำคัญสองสิ่งที่ต้องพิจารณาคือ ค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงจ่ายพลังงาน เพราะเป็นตัวกำหนดขนาดของตัวเก็บประจุทางด้านแรงต่ำที่จ่ายพลังงานได้สูงสุด โดยที่ไม่ทำให้หม้อแปลงจ่ายพลังงานเกิดความเสียหาย และชนิดของหม้อแปลงจ่ายพลังงานที่จะนำมาใช้ จากวงจรของหม้อแปลงเตสลาจะเห็นได้ว่า เมื่อสปาร์กเกปทำงานหม้อแปลงจ่ายพลังงานจะถูกลัดวงจรอยู่ตลอดเวลา ดังนั้น อาจต้องใส่ขดลวดอิมพีแดนซ์เพิ่มไปในวงจร เพื่อลดกระแสลัดวงจร แต่ก็จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมในขดลวดทำให้ขนาดแรงดันที่จ่ายให้กับตัวเก็บประจุทางด้านแรงต่ำลดลง หรือเลือกใช้หม้อแปลงชนิดที่ออกแบบมาเพื่อให้ทนกระแสลัดวงจรได้

### 2.2.2 ตัวเก็บประจุทางด้านแรงต่ำ

หม้อแปลงเตสลาเป็นหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าสูงและความถี่สูง ดังนั้น ตัวเก็บประจุที่ใช้จึงต้องพิจารณาทั้งสองประเด็น คือ ต้องออกแบบให้ทนแรงดันไฟฟ้าสูงได้ และตอบสนองได้ที่ความถี่สูง สิ่งแรกที่จะพิจารณาถึงคือ ชนิดของตัวเก็บประจุที่นำมาใช้ ถ้าเป็นชนิด โพลีโพรพิลีน (Polypropylene) เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นตัวเก็บประจุทางด้านแรงต่ำ เพราะมีค่าความสูญเสียต่ำ การออกแบบตัวเก็บประจุให้สามารถทนแรงดันได้ต้องนำตัวเก็บประจุชนิดโพลีโพรพิลีนมาอนุกรมกัน เพื่อให้เกิดการกระจายของแรงดัน และต้องมีการขนานกันเพิ่มเติมในแต่ละแถว เพื่อช่วยเสริมไม่ให้ตัวเก็บประจุเสียหายทั้งหมดในกรณีที่มีตัวเก็บประจุตัวใดตัวหนึ่งเกิดความเสียหาย

### 2.2.3 ขดลวดแรงต่ำ

การเหนี่ยวนำแรงดันของหม้อแปลงเตสลาเกิดจากการเหนี่ยวนำระหว่างขดแรงต่ำ และขดลวดแรงดันสูงผ่านแกนอากาศ ดังนั้น ขดลวดทั้งสองต้องวางร่วมแกนกัน เพื่อให้เกิดการเหนี่ยวนำเกิดได้ดีที่สุด เนื่องจากปรากฏการณ์การไหลของกระแสไฟฟ้าบนผิวตัวนำ ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลเฉพาะบริเวณผิวของขดลวด หม้อแปลงเตสลาเป็นหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าสูง ดังนั้น ขนาดกระแสจะมีค่าต่ำ การออกแบบขดลวดทางด้านแรงดันไฟฟ้าต่ำ จึงไม่มีความจำเป็นต้องใช้ตัวนำที่มีพื้นที่หน้าตัดกว้าง แต่

สามารถใช้ตัวนำที่มีลักษณะกลวง เช่น ท่อโลหะต่าง ๆ ได้โดยการออกแบบขดลวดด้านแรงต่ำจะ ออกแบบได้ 4 ลักษณะ ดังนี้

### 1) Single Turn

การพันแบบนี้ขดลวดทางด้านแรงต่ำมีเพียงรอบเดียว โดยพันรอบแกนร่วมกับขดลวดทางด้านแรงสูง รัศมีของการพันต้องมีความกว้างมาก ทำให้ประสิทธิภาพในการเหนี่ยวนำมีค่าต่ำ

### 2) Helical Coil

การพันแบบนี้ขดลวดแรงต่ำจะพันเป็นขดทรงกระบอกพันแกนร่วมกับขดลวดทางด้านแรงสูง และค่า ความเหนี่ยวนำหาได้จากสมการที่ (2.8)

$$L = \frac{(NR)^2}{9R + 10H} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $L$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด (uH )  
 $N$  คือ จำนวนรอบของขดลวด (รอบ)  
 $R$  คือ รัศมีของขดลวด (นิ้ว)  
 $H$  คือ ความสูงของขดลวด (นิ้ว)

การออกแบบขดลวดด้านแรงต่ำแบบ Helical coil มีข้อดีคือ ประสิทธิภาพของการเหนี่ยวนำระหว่าง ขดลวดทางด้านแรงสูง และแรงต่ำจะมีค่าสูง แต่สิ่งที่จะต้องระมัดระวังเป็นพิเศษ คือ จะเกิดการ สปาร์กระหว่างขดลวดแรงสูง และแรงต่ำได้ง่าย เนื่องจากระยะห่างระหว่างขดลวดทั้งสองขดมีค่าคงที่ แต่แรงดันของขดลวดด้านแรงดันไฟฟ้าสูงจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบที่พัน

### 3) Archimedes Coil หรือ Flat Plate Spiral

การพันแบบนี้ขดลวดทางด้านแรงต่ำ จะพันร่วมแกนกับขดลวดทางด้านแรงสูง เป็นลักษณะก้นหอย แบนราบ ประสิทธิภาพของการเหนี่ยวนำระหว่างขดลวดด้านแรงสูง และแรงต่ำจะมีค่าน้อยกว่าแบบ Helical Coil แต่จะช่วยลดปัญหาการสปาร์กระหว่างขดลวดแรงดันไฟฟ้าสูงและแรงดันไฟฟ้าต่ำ ค่า ความเหนี่ยวนำของขดลวดจะมีค่าดังสมการที่ (2.9)

$$L = \frac{(NR)^2}{8R + 11W_r} \quad (2.9)$$

เมื่อ	$L$	คือ	ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด (uH)
	$N$	คือ	จำนวนรอบขดลวด (รอบ)
	$R$	คือ	รัศมีเฉลี่ยของขดลวด (นิ้ว)
	$W_r$	คือ	ความกว้างของขดลวด (นิ้ว)

#### 4) Inverse Conical Coil หรือ Saucer Coil

การพันแบบนี้ขดลวดด้านแรงต่ำ จะพันร่วมแกนกับขดลวดด้านแรงสูง คล้ายกับแบบ Helical coil และแบบ Flat Plate Spiral โดยจะมีมุมเอียงของการพันขดลวดมีลักษณะเป็นตัว V และค่าความเหนี่ยวนำมีค่าตามสมการที่ (2.10)

$$L = \sqrt{(L_1 \sin(x))^2 + (L_2 \cos(x))^2} \quad (2.10)$$

เมื่อ	$L$	คือ	ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด (uH )
	$L_1$	คือ	ตัวประกอบการพันแบบ Helical coil
	$L_2$	คือ	ตัวประกอบการพันแบบ Flat Plate Spiral
	$X$	คือ	มุมเอียงของการพัน (องศา)

การพันแบบนี้จะนำทั้งข้อดีและข้อเสียของขดลวดแบบ Helical Coil และ Flat Plate Spiral มาปรับปรุง ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการเหนี่ยวนำระหว่างขดลวดแรงดันไฟฟ้าสูง และแรงดันไฟฟ้าต่ำ มีค่าสูง และช่วยลดปัญหาการเกิดสปาร์กกระหว่างขดลวดแรงดันไฟฟ้าสูง และขดลวดแรงดันไฟฟ้าต่ำ ได้ แต่จะมีข้อเสียคือ มีความยุ่งยากในการออกแบบ และการสร้างมากกว่าทุกแบบที่กล่าวมา

#### 2.2.4 ขดลวดทางด้านแรงสูง

ขดลวดด้านแรงสูงพันบนรูปทรงกระบอกแบบ Helical Coil เช่นเดียวกับการออกแบบขดลวดทางด้านแรงต่ำ แต่ตัวนำที่จะนำมาใช้จะมีขนาดเล็กกว่า และมีจำนวนรอบมากกว่าการพันขดลวดด้านแรงต่ำ

#### 2.2.5 ตัวเก็บประจุทางด้านแรงสูง

ตัวเก็บประจุทางด้านแรงสูงของหม้อแปลงเตสลา คือผลรวมของค่าความจุไฟฟ้าลูกถ้วย อุปกรณ์วัด และ ของขดลวดทางด้านสูง หัวลดความเครียดสนามฟ้าหรือทอรอยด์ (Toroid) ทุกตัวเป็นค่าจากการประมาณอยู่ระหว่าง 30 pF – 90 pF

## 2.2.6 โรตารีสปาร์กแกป

ทำหน้าที่เป็นสวิตช์เปิด – ปิด วงจรทางด้านขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงเตสลา เพื่อตัดและถ่ายประจุไฟฟ้าออกจากตัวเก็บประจุทางด้านแรงต่ำ การหมุนอยู่ตลอดเวลาของโรตารีสปาร์กแกปจะสร้างแรงลมขึ้นมา ซึ่งจะทำหน้าที่ดับอาร์คไปในตัวความถี่ของการ เปิด – ปิด สปาร์กแกปด้วยความถี่สูง จะทำให้แรงดันขาออกเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นประโยชน์ในการทดสอบวาวไฟตามผิวของวัสดุฉนวน จะทำให้เห็นวาวไฟได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น

## 2.2.7 ความถี่ในการทดสอบ

หม้อแปลงเตสลาที่ใช้ในการทดสอบลูกถ้วยนั้น จะต้องออกแบบให้เกิดการเรโซแนนซ์ที่ความถี่สูง ซึ่งความถี่ที่ใช้ ประมาณ 200 kHz ตามมาตรฐาน ANSI C 29.1-1988 [11] การทดสอบด้วยแรงดันและความถี่สูงจะใช้ทดสอบแบบประจำ (Routine Test) ถ้าลูกถ้วยไฟฟ้าที่ดีจะเกิดวาวไฟตามผิว แต่ถ้าลูกถ้วยไฟฟ้าบกพร่องแรงดันที่ความถี่สูง จะทำให้เกิดความร้อนเกาะทะลุลูกถ้วยไฟฟ้าและไม่เกิดวาวไฟตามผิว

## 2.3 การคำนวณเกี่ยวกับออสซิลเลตของความถี่และความเหนี่ยวนำร่วมของขดลวดทั้งสอง

กำหนดให้  $M$  เป็นค่าเหนี่ยวนำร่วม ระหว่างขดลวดทั้งสองและ  $\omega = 2\pi f$

สมการแรงดันไฟฟ้า (Voltage equation) สำหรับวงจรทางด้านปฐมภูมิ (Primary)

$$I_1[j\omega L_1 - (j/\omega C_1)] - j\omega M I_2 = 0 \quad (2.11)$$

สมการแรงดันไฟฟ้า (Voltage equation) สำหรับวงจรทางด้านทุติยภูมิ (Secondary)

$$I_2[j\omega L_2 - (j/\omega C_2)] - j\omega M I_1 = 0 \quad (2.12)$$

$$I_1 / I_2 = j\omega M / [j\omega L_1 - (j/\omega C_1)] \quad (2.13)$$

$$I_1 / I_2 = [j\omega L_2 - (j/\omega C_2)] / j\omega M \quad (2.14)$$

$$\omega^2 M^2 - \omega^2 L_1 L_2 - (1/\omega^2 C_1 C_2) + (L_2 / C_1) + (L_1 / C_2) = 0 \quad (2.15)$$

$$\omega^2 (M^2 - L_1 L_2) + (L_2 / C_1)(L_1 / C_2) - (1/\omega^2 C_1 C_2) = 0 \quad (2.16)$$

ให้  $K^2 = M^2 / L_1 L_2$  โดยที่  $K$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการคัปปลิง (Coupling)

$$K^2 = \frac{M^2}{L_1 L_2} \quad (2.17)$$

$$\omega^2 (K^2 L_1 L_2 - L_1 L_2) + (L_2 / C_1) + (L_1 / C_2) - (1/\omega^2 C_1 C_2) = 0 \quad (2.18)$$

$$\omega^2(1-K^2) - (1/L_1C_1) - (1/L_2C_2) + (1/\omega^2 L_1L_2C_1C_2) = 0 \quad (2.19)$$

ในสถานะเรโซแนนซ์  $L_1C_1 = L_2C_2$  ดังนั้น

$$[\omega(1-K) - (1/\omega L_1C_1)][\omega(1+K) - (1/\omega L_2C_2)] = 0 \quad (2.20)$$

$$\omega^2 = \frac{1}{L_1C_1(1-K)} \quad (2.21)$$

ดังนั้น

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1(1-K)}} \quad (2.22)$$

โดยที่ค่า  $f_1$  เป็นค่าๆหนึ่งของความถี่

$$\omega^2 = \frac{1}{L_1C_1(1+K)} \quad (2.23)$$

และ

$$= \frac{1}{L_2C_2(1+K)} \quad (2.24)$$

ดังนั้น

$$f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_2(1+K)}} \quad (2.25)$$

โดยที่ค่า  $f_2$  เป็นค่าอีกค่าหนึ่งของความถี่ และเนื่องจากค่า  $K$  โดยปกติมีค่าน้อยกว่าค่า  $L_1C_1$  และ  $L_2C_2$  มาก ดังนั้น ค่าของความถี่สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}} \quad (2.26)$$

$$f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_2}} \quad (2.27)$$

เมื่อเกิดการออสซิลเลชัน ด้านแรงดันต่ำก็จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำกับวงจรด้านแรงสูง  $L_2C_2$  เมื่อ  $L_1C_1 = L_2C_2$  จะได้ค่าความถี่ทั้งสองด้านมีค่าเท่ากัน ซึ่งจะได้สมการที่ (2.28) คือ

$$f_1 = f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_2}} \quad (2.28)$$

ซึ่งในสภาวะดังกล่าวนี้เองจะถือว่าอยู่ในสถานะเรโซแนนซ์

## 2.4 คุณสมบัติของตัวนำ

ในการออกแบบหม้อแปลงเทสลา (Tesla transformer) จะมีตัวประกอบหลายอย่างที่สำคัญเข้ามาเกี่ยวข้องเป็นพื้นฐานหรือเกณฑ์ในการพิจารณาและตัดสินใจเลือกใช้ เช่น คุณสมบัติของตัวนำและอื่นๆ เป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบ หรืออาจจะพูดได้อีกนัยหนึ่งว่าการตัดสินใจเลือกใช้คุณสมบัติของวัสดุต่างๆ อย่างไม่เหมาะสมจะเป็นผลทำให้การออกแบบได้ไม่ดีที่ควร

### 2.4.1 ค่าความต้านทานในตัวนำทางไฟฟ้า

ไม่มีวัสดุตัวนำทางไฟฟ้าใดจะเป็นตัวนำสมบูรณ์ที่อุณหภูมิใดๆ ไป อย่างน้อยย่อมจะต้องมีความต้านทานอยู่บ้าง ค่าความต้านทานของวัสดุตัวนำ ซึ่งขึ้นอยู่กับความยาว ขนาดของพื้นที่หน้าตัดและอุณหภูมิ สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.29)

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.29)$$

โดย  $\rho$  = ความต้านทานจำเพาะมีหน่วยเป็น  $\Omega\text{-cm}$

$l$  = ความยาวของตัวนำมีหน่วยเป็น cm

$A$  = พื้นที่หน้าตัดของตัวนำมีหน่วยเป็น  $\text{cm}^2$

สมการนี้จะเป็นจริงได้ก็ต่อเมื่อ กระแสไหลกระจายแบบสม่ำเสมอ รอบผิวของพื้นที่หน้าตัดของวัสดุตัวนำ

### 2.4.2 ผลของอุณหภูมิต่อค่าความต้านทาน

โดยส่วนมากวัสดุที่เป็นโลหะ ค่าสัมประสิทธิ์ของความต้านทานมักจะมีค่าสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$R_T = R_{20} [1 + \alpha_{20}(T-20)] \Omega\text{-cm} \quad (2.30)$$

โดย  $R_{20}$  = ค่าความต้านทานที่ 20 องศาเซลเซียส

$T$  = อุณหภูมิมีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส

$\alpha_{20}$  = ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานจำเพาะมีหน่วยเป็นองศาเซลเซียสที่

20 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 2.1 ค่าสภาพต้านทานของวัสดุต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง (20°C) [12]

ชนิดของวัสดุ	สาร	$\rho$ ( $\Omega\cdot\text{m}$ )
Conductors	Silver	$1.47 \times 10^{-8}$
	Copper	$1.72 \times 10^{-8}$
	Gold	$2.44 \times 10^{-8}$
	Aluminum	$2.75 \times 10^{-8}$
	Tungsten	$5.25 \times 10^{-8}$
	Steel	$20 \times 10^{-8}$
	Lead	$22 \times 10^{-8}$
	Mercury	$95 \times 10^{-8}$
	Manganin ( Cu 84%,Mn 12%,Ni 4% )	$44 \times 10^{-8}$
	Constantan ( Cu 60%,Ni 40% )	$49 \times 10^{-8}$
	Nichrome	$100 \times 10^{-8}$
Semiconductors	Pure Carbon ( graphite )	$3.5 \times 10^{-5}$
	Pure Germanium	0.6
	Pure Silicon	2300
Insulators	Amber	$5 \times 10^{14}$
	Glass	$10^{10} - 10^{14}$
	Lucite	$>10^{13}$
	Mica	$10^{11} - 10^{15}$
	Quartz (fused)	$75 \times 10^{16}$
	Sulfur	$10^{15}$
	Teflon	$>10^{13}$
	Wood	$10^8 - 10^{11}$

### 2.4.3 ผลของความถี่ต่อความต้านทาน

ค่าความต้านทานของวัสดุตัวนำเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากความถี่ของกระแสที่ไหลในตัวนำซึ่งอธิบายได้ดังนี้คือ ลวดเส้นหนึ่งมีพื้นที่หน้าตัดเป็นแบบทรงกลม ค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในตัวนำเส้นลวดในส่วนกลาง จะมีค่ามากกว่าค่าความเหนี่ยวนำบริเวณผิว เนื่องจากจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่ Linkage อยู่ในส่วนกลางมากกว่า จึงทำให้ค่าความเหนี่ยวนำตรงบริเวณส่วนกลางของตัวนำ มีค่า

มากกว่าและทำให้กระแสส่วนมากไหลในบริเวณผิวของลวดตัวนำ ซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำกว่า ทำให้พื้นที่หน้าตัดของขดลวดตัวนำมีขนาดเล็กลงจากค่าจริงๆของตัวนำ และผลของค่าความต้านทานของตัวนำจะมีค่าสูงตามความถี่ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Skin effect ความถี่ที่ใช้ใน Power system (Power frequency) ถ้าเป็นกรณีลวดตัวนำขนาดเล็ก จะไม่ค่อยคำนึงถึงผล Skin effect แต่ถ้าเป็นตัวนำที่มีขนาดใหญ่ จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องคำนึงถึงผลของ Skin effect ในการแก้ปัญหาที่เกิดจาก Skin effect โดยสามารถใช้ตัวนำได้สามขนาด ขนาดแรกคือ ขนาดเล็กมารวมกันเป็นขนาดใหญ่ ขนาดที่สองคือ ใช้ลวดตัวนำแบบกลวง และขนาดสุดท้ายคือ ลวดตัวนำแบบแบน ซึ่งมีลักษณะคล้าย Bar หรือ Ribbon สามารถลดผลของ Skin effect ลงได้

#### 2.4.4 Skin depth or depth of penetration (S)

คือ ค่าของความหนาของขดลวดตัวนำที่ให้ความหนาแน่นของกระแสลดลงเป็น 0.36 หรือ 36 % ของกระแสที่ผิวขนาดของความหนาหรือความลึกของขดลวดตัวนำแสดงได้ดังสมการที่ (2.31)

$$S = 5.033 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \quad (2.31)$$

โดยที่  $\rho$  = ความต้านทานจำเพาะมีหน่วยเป็น  $\Omega\text{-cm}$

$f$  = ความถี่มีหน่วยเป็น Hz

$\mu$  = ค่าความซึมซาบของตัวนำ

สำหรับทองแดง อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสจะได้ค่า

$$S = \frac{6.62}{\sqrt{f}} \quad (2.32)$$

ในระบบกระแสสลับ ค่าของ skin depth จึงเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงซึ่งจะแปลค่าตามความถี่เป็นข้อคำนึงถึงในการพิจารณาเลือกขนาดของตัวนำที่จะนำมาใช้ในค่าความถี่ต่างๆ และเลือกวัสดุของตัวนำให้เหมาะสม โดยปกติค่าความหนาที่สามารถให้กระแสผ่านไปได้ต้องน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของความหนาของตัวนำ ค่าของ skin depth สามารถนำไปใช้คำนวณหาค่า effective ของค่าความต้านทานหรือ a.c. resistance ของตัวนำซึ่งแสดงโดยสมการที่ (2.33)

$$R_{ac} = 83.2 \sqrt{\frac{f}{d}} \times 10^{-9} \quad \Omega\text{-cm} \quad (2.33)$$

โดยที่  $d$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ มีหน่วยเป็น cm  
 $f$  = ความถี่มีหน่วยเป็น Hz

## 2.5 ลูกถ้วยฉนวน [2]

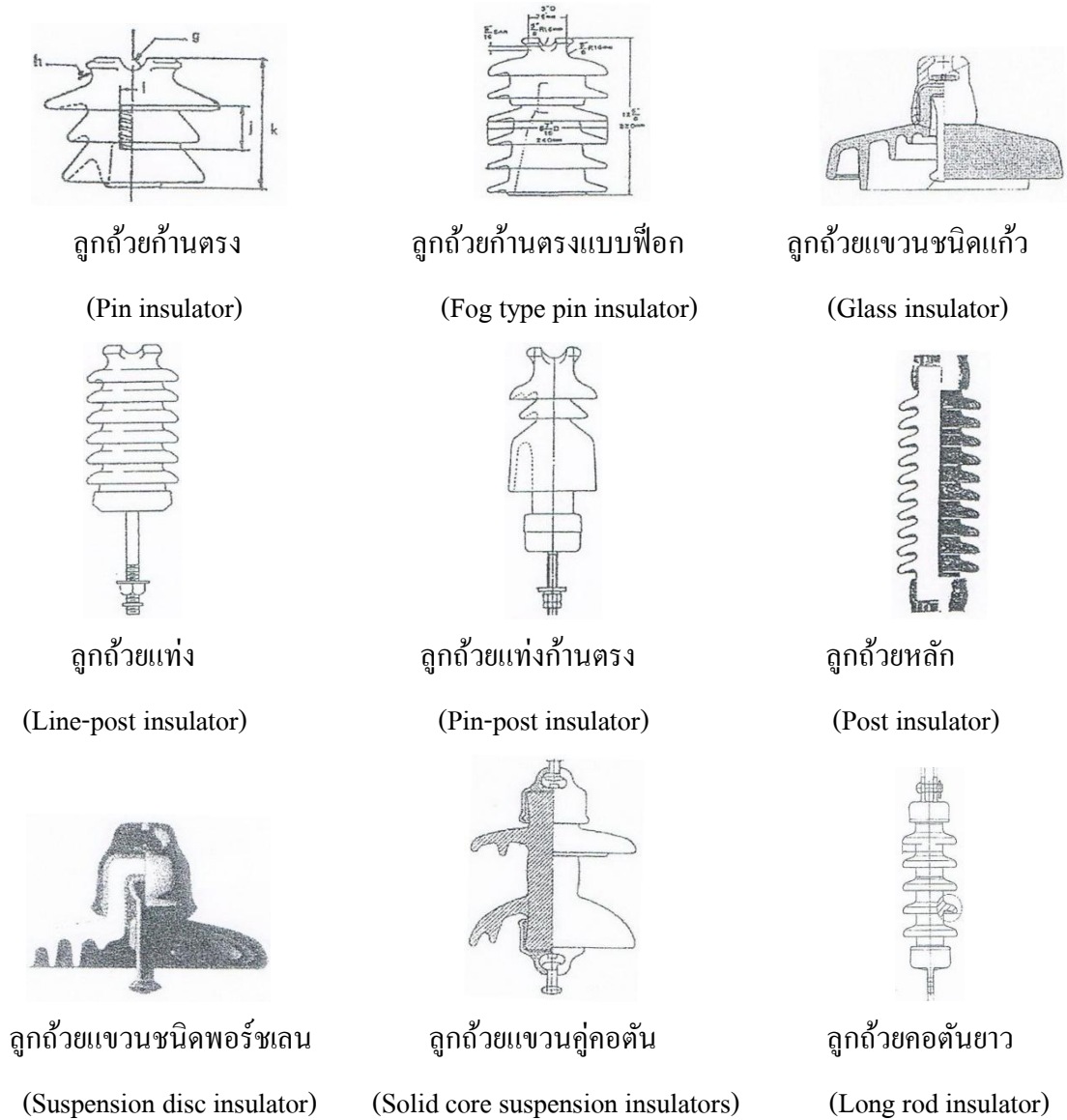
ลูกถ้วยฉนวนหมายถึง อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับยึดหรือรองรับตัวนำไฟฟ้า ที่มีแรงดันหรือศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าศักย์ดิน ยึดตัวนำไฟฟ้าให้อยู่ห่างกันอย่างมั่นคงพอที่จะไม่ทำให้แกว่ง หรือเคลื่อนไหวเข้าใกล้กันจนทำให้เกิดสปาร์คหรือเบรกควานน์ นำไปสู่การเกิดลัดวงจรระหว่างตัวนำที่มีศักย์ไฟฟ้าต่างกัน โดยมีตัวกลางอื่นเป็นฉนวนกัน คือ อากาศ ก๊าซ หรือฉนวนเหลว ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้านอกจากทำหน้าที่ยึดสายไฟแรงสูง บัสบาร์ หรือสวิตช์ตัดตอน

### 2.5.1 ชนิดของลูกถ้วยฉนวนแรงสูง [2]

การฉนวนสายส่งกำลังในระบบส่งจ่ายแรงสูง ในระบบจำหน่ายแรงดันสูงไม่เกิน 50 kV มักใช้ลูกถ้วยก้านตรง (Pin insulators) ส่วนในระบบแรงดันสูงกว่า 50 kV เช่น ในสายส่งมักยึดสายไฟด้วยลูกถ้วยแขวน (Suspension insulators) ลูกถ้วยคอตัน (Solid core insulators) ลูกถ้วยคอตันยาว (Long rod insulators) ซึ่งลูกถ้วยชนิดต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 2.4

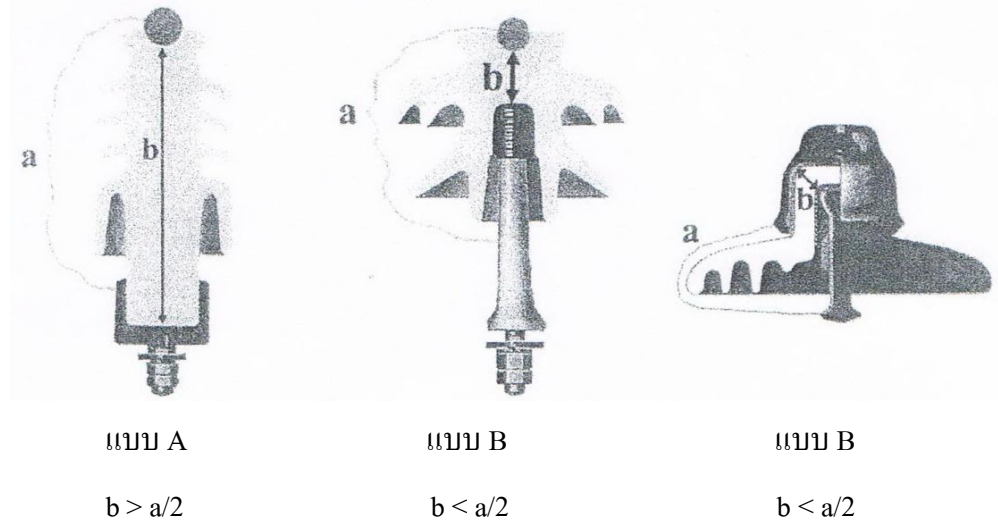
ลูกถ้วยที่ใช้ยึดตัวนำในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง ในปัจจุบัน แบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ

1. ลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน (Porcelain) สำหรับประเทศไทยปัจจุบันใช้ลูกถ้วยชนิดนี้มากกว่า 80% มีประวัติการใช้งานนาน อายุใช้งาน > 50 ปี ตรวจหาจุดบกพร่องยาก เกิดวาทไฟง่ายที่สุดในสภาวะเปราะเปื้อน
2. ลูกถ้วยแก้วเหนียว (Toughened glass) ในประเทศไทยมีใช้อยู่ปัจจุบันน้อยกว่า 20% อายุการใช้งาน > 50 ปี เมื่อผิวดร้งตรวจหาได้ง่าย เกิดวาทไฟง่ายที่สุดในสภาวะเปราะเปื้อน
3. ลูกถ้วยเนื้อสารสังเคราะห์ (Composite หรือ Nonceramic) มีคุณสมบัติผิวไม่เปียกน้ำ ได้แก่ Silicone rubber, Ethylene propylene rubber (EPR) น้ำหนักเบา ทนต่อสภาวะเปราะเปื้อน ลูกถ้วยชนิดนี้ยังไม่เป็นที่นิยมใช้ในประเทศไทย เพราะยังไม่มั่นใจในเรื่องคุณภาพ และอายุการใช้งาน ที่มีใช้อยู่ในชั้นการศึกษาวิจัย และการทดสอบใช้งาน



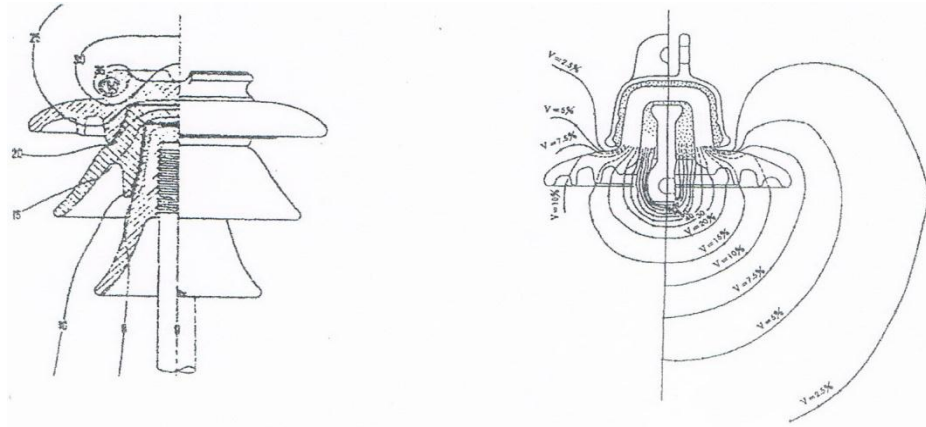
รูปที่ 2.4 ลูกถ้วยฉนวนแรงสูงแบบต่างๆ IEC 60383-1 (1993) [8]

ลูกถ้วยฉนวนรูปแบบต่างๆ แสดงในรูปที่ 2.4 มาตรฐาน IEC60383-1 (1993) [8] ได้แบ่งลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าแรงสูงออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภท A และประเภท B ลูกถ้วยประเภท A หมายถึงลูกถ้วยที่มีความหนาของเนื้อฉนวนตามแนวตรงระหว่างอิเล็กโทรดมากกว่าครึ่งหนึ่งของระยะอาร์ค หรือระยะวางไฟตามผิว ได้แก่ ลูกถ้วยแท่ง ลูกถ้วยแท่งก้านตรง ลูกถ้วยคอตันยาว ลูกถ้วยแขวนคู่คอตัน ลูกถ้วยหลัก เป็นต้น ส่วนลูกถ้วยประเภท B หมายถึง ลูกถ้วยที่มีความหนาของเนื้อฉนวนตามแนวตรงระหว่างอิเล็กโทรดมีค่าน้อยกว่า ครึ่งหนึ่งของระยะอาร์ค หรือระยะวางไฟตามผิว ได้แก่ ลูกถ้วยแขวน (Suspension disc insulator) และลูกถ้วยก้านตรง



รูปที่ 2.5 ประเภทลูกถ้วยฉนวนตามมาตรฐาน IEC 60383-1 (1993) [8]

การทำรูปร่างลักษณะของลูกถ้วย จะทำให้ครีบหรือชั้นลูกถ้วยมีผิวโค้งไปตามเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า เพื่อให้ความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวลูกถ้วยมีค่าน้อยที่สุดดังในรูปที่ 2.6 แสดงถึงสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าของลูกถ้วยก้านตรงและลูกถ้วยแขน ที่ผิวลูกถ้วยด้านบนที่ติดอยู่กับตัวนำหรือฝาครอบโลหะ จะมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณอื่น จะเป็นเหตุให้เกิดโคโรนาขึ้นในบริเวณนี้ได้ง่าย และนำไปสู่การเกิดวาบไฟตามผิว (Flashover) ฉะนั้น แรงดันใช้งานจึงต้องต่ำกว่าค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด (Corona inception voltage) ความกว้างของปีกชั้นลูกถ้วย และความหนาของเนื้อลูกถ้วย (ระหว่างตัวนำกับก้านโลหะ หรือ ระหว่างฝาครอบบนกับก้านยึดส่วนล่าง) ต้องออกแบบให้มีความสัมพันธ์กันในด้านความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า คือ ความคงทนต่อแรงดันวาบไฟตามผิว จะต้องน้อยกว่าความคงทนต่อแรงดันเจาะทะลุ (Puncture voltage) ค่าแรงดันเจาะทะลุนี้ทดลองหาได้จากการป้อนแรงดันให้กับลูกถ้วยจุ่มน้ำมันหม้อแปลง หรือทดสอบเจาะทะลุด้วยแรงดันอิมพัลส์ หน้าคลื่นชัน (Steep front impulse voltage) ฉนวนมีความคงทนต่อแรงดันสูง จึงทำให้ไม่เกิดวาบไฟตามผิวลูกถ้วย แต่จะเจาะผ่านทะลุเนื้อลูกถ้วย ซึ่งเกิดขึ้นในกรณีทดสอบที่เป็นลูกถ้วยก้านตรง ลูกถ้วยแขนแต่จะไม่เกิดขึ้นในกรณีที่เป็นลูกถ้วยคอดัน ครีบใต้ผิวลูกถ้วยนั้นทำไว้เพื่อเพิ่มระยะรั่ว (Leakage distance) ซึ่งเป็นระยะที่สั้นที่สุดที่วัดตามผิวลูกถ้วย ระหว่างอิเล็กโทรด จะเป็นส่วนกันไม่ให้ผิวเปียกได้ง่ายเมื่ออยู่ในสภาพฝนตก เป็นผลให้ทนต่อแรงดันวาบไฟตามผิวได้สูงขึ้น



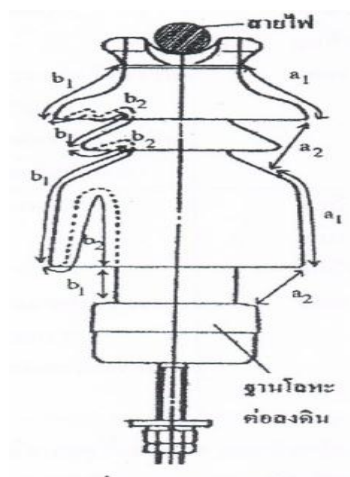
a) ลูกถ้วยก้านตรง

b) ลูกถ้วยแขน

รูปที่ 2.6 เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าของลูกถ้วยก้านตรงและลูกถ้วยแขน [9]

### 2.5.2 ลักษณะสมบัติทางมิติที่สำคัญของลูกถ้วยฉนวน [2]

ลักษณะทางมิติที่เกี่ยวข้อง และมีผลต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยที่ควรทราบความหมายมีดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.7 ลักษณะสมบัติทางมิติของลูกถ้วย [2]

1. ระยะรั้ว (Leakage distance) คือระยะที่สั้นที่สุดที่วัดตามผิวลูกถ้วยระหว่างอิเล็กโทรด โดยส่วนหนึ่งของระยะรั้วจะเป็นส่วนกั้นมิให้เปียกได้ง่ายเมื่ออยู่ในสภาพฝนตก ซึ่งจะช่วยให้ลูกถ้วยมีความคงทนต่อแรงดันวาบไฟตามผิวได้สูงขึ้น ดังระยะ  $b$  คือ  $(b_1 + b_2)$  ในรูปที่ 2.7
2. ระยะรั้วป้องกัน (Protective leakage distance) คือระยะที่ไม่เปียกฝนซึ่งปกติจะหมายถึงระยะในปีกลูกถ้วย ดังรูปที่ 2.7 คือระยะผลรวมของ  $b_2$

3. ระยะอาร์ค (Arcing distance) คือระยะสั้นที่สุดที่วัดระหว่างอิเล็กโตรดผ่านอากาศหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ระยะที่วัดตามแนวที่เกิดอาร์คนั่นเอง ระยะอาร์คแบ่งเป็นระยะอาร์คแห้ง (Dry arcing distance) และระยะอาร์คเปียก (Wet arcing distance)

- ระยะอาร์คแห้ง หมายถึง ระยะอาร์คที่วัดในสถานะลูกถ้วยแห้ง ซึ่งจะมีทั้งลักษณะที่วัดตามผิว และส่วนที่เป็นอากาศ คือระยะผลรวมของ  $a_1$  และ  $a_2$  ในรูปที่ 2.7
- ระยะอาร์คเปียก หมายถึง ระยะอาร์คที่วัดในลักษณะลูกถ้วยเปียก ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นความเปรอะเปื้อนระยะอาร์คเปียกก็ คือระยะผลรวมของ  $a_2$  ในรูปที่ 2.7

## 2.6 การทดสอบลูกถ้วยฉนวน

ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 354-2528 : ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าชนิดปอร์ซเลน ได้แบ่งการทดสอบลูกถ้วยฉนวนออกเป็น 3 ประเภท คือ

- 1) การทดสอบเฉพาะแบบ (Type Test)
- 2) การทดสอบรองรับ (Acceptance Test)
- 3) การทดสอบประจำ (Routine Test)

### 2.6.1 การทดสอบเฉพาะแบบ

หมายถึง การทดสอบเพื่อตรวจสอบหรือพิสูจน์ว่า ลักษณะการออกแบบคุณภาพเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดหรือไม่ การทดสอบเฉพาะแบบทางไฟฟ้าประกอบด้วย

- 1) การทดสอบแรงดันไฟฟ้าตามผิวในสภาพแห้งและเปียกด้วยแรงดันกระแสสลับ ความถี่ต่ำ
- 2) การทดสอบแรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตด้วยแรงดันอิมพัลส์ชั่ววอก และชั่วลบ
- 3) การทดสอบแรงดันไฟฟ้ารอบกวนคลื่นวิทยุ จัดเป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย เป็นการทดสอบเพื่อหาคุณภาพลูกถ้วย เพื่อใช้รองรับและยึดสายไฟแรงสูง จะทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงบริเวณสายไฟพาดยึดติดกับลูกถ้วย ถ้าหากความเครียดสนามไฟฟ้าสูงเกินกว่าขีดความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของอากาศ ก็จะทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วนหรือโคโรนา และส่งคลื่นนั้นในย่านความถี่วิทยุสื่อสารแผ่กระจายออกไปรบกวนระบบสื่อสาร ฉะนั้น ลูกถ้วยฉนวนที่นำมายึดสายในระบบส่งจำหน่าย โดยเฉพาะในย่านชุมชนหรือในเมืองย่อมมีคลื่นรบกวน (RIV) ได้ไม่เกินค่าที่มาตรฐานกำหนดตามมาตรฐาน ANSI กำหนดค่า RIV เป็น  $\mu V$

### 2.6.2 การทดสอบรองรับ

หมายถึง การตรวจสอบควัสดุอุปกรณ์ ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ว่ายังมีคุณภาพได้มาตรฐานกำหนดหรือไม่ การทดสอบรับรอนทางไฟฟ้า ก็คือ การทดสอบความแข็งแรงร่วมทางกลและทางไฟฟ้าเป็นการทดสอบที่เลียนแบบการใช้งานจริง เพราะลูกถ้วยในขณะที่ใช้งานจะต้องรับแรงกล และความเครียดสนามไฟฟ้า การทดสอบรับรอนทางไฟฟ้าอีกประการหนึ่งคือ การทดสอบเจาะผ่าน (Puncture) เป็นการทดสอบแตกสลายเพื่อต้องการตรวจสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของเนื้อลูกถ้วย

### 2.6.3 การทดสอบประจำ

หมายถึง การทดสอบที่ทำเป็นประจำในโรงงาน เป็นการทดสอบกับลูกถ้วยฉนวนทุกลูก เพื่อตรวจสอบว่าลูกถ้วยนั้น มีความบกพร่องจากการผลิตหรือไม่ การทดสอบประจำทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวน ได้แก่ การทดสอบวาบไฟตามผิว ซึ่งอาจจะใช้แรงดันความถี่สูงแบบหน่วง (Damped high frequency voltage) มีความถี่ประมาณ 200kHz ซึ่งจากหม้อแปลงเตสลาให้เกิดวาบไฟตามผิวต่อเนื่องกันเป็นเวลา 3 ถึง 5 วินาที [11]

## 2.7 เทคนิคการวัดแรงดันสูง

เทคนิคการวัดแรงดันสูงขึ้นอยู่กับชนิดของแรงดันซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ แรงดันกระแสสลับ แรงดันกระแสตรง และแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งสองชนิดหลังนี้มักหมายถึงแรงดันที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการทดลอง ส่วนชนิดแรก (แรงดันกระแสสลับ) จะมีการวัดทั้งภายในห้องปฏิบัติการและในระบบส่งจ่าย

### 2.7.1 การวัดแรงดันสูงด้วยช่องว่างทรงกลม [2]

หลักการวัดการวัดแรงดันสูงด้วยช่องว่างทรงกลม เป็นวิธีที่ง่ายและมีความแน่นอนเชื่อถือได้ อาศัยการเกิดสปาร์ค หรือเบรกดาวนระหว่างทรงกลมโลหะที่อยู่ในอากาศหรือก๊าซ ซึ่งเป็นไปตามกฎการเกิดดิซชาร์จของก๊าซ คือ สปาร์คหรือเบรกดาวนจะเกิดขึ้นเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าถึงค่าหนึ่ง นั่นคือ จะเกิดการเบรกดาวนขึ้นเมื่อแรงดันสูงถึงค่าหนึ่ง ซึ่งเป็นค่าแรงดันเบรกดาวนสถิต (Static breakdown voltage) ที่ทราบค่าความคลาดเคลื่อนแน่นอนทำซ้ำเดิมได้ ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดสปาร์คหรือเบรกดาวน นั้นขึ้นอยู่กับความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของอากาศหรือก๊าซ ระยะห่างระหว่างทรงกลมและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลม นั่นคือ

$$U_b = f(d, D, \delta)$$

- เมื่อ  $U_b$  คือ แรงดันที่ทำให้เกิดสปาร์คที่แกปทรงกลม  
 $d$  คือ ระยะช่องว่างระหว่างทรงกลม  
 $D$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลม  
 $\delta$  คือ ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของอากาศขึ้นอยู่กับความดันบรรยากาศและอุณหภูมิ

ตามมาตรฐานสากล IEC 60052-2002 [10] จะกำหนดค่าแรงดันเบรกดาวนของอากาศระหว่างทรงกลมไว้ที่สภาวะมาตรฐาน คือความดันอากาศ 760 มม.ปรอท และอุณหภูมิ 20 °C ฉะนั้น ค่าแรงดันเบรกดาวน ที่วัดได้กับความดันใด อุณหภูมิใด เมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานจะต้องแปลงค่าที่วัดได้ไปเป็นค่าที่สภาวะมาตรฐานคือ

$$U_{bn} = U_b / k_d \quad (2.34)$$

- เมื่อ  $U_{bn}$  คือ ค่าแรงดันเบรกดาวนที่สภาวะมาตรฐาน  
 $U_b$  คือ แรงดันที่ทำให้เกิดสปาร์คที่แกปทรงกลม (ค่าที่วัดได้ที่อุณหภูมิและความดันห้อง)  
 $K_d$  คือ ตัวประกอบแปลงผันความหนาแน่นของอากาศและมีค่าเท่ากับ  $\delta$  เมื่อ  $\delta$  ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.9 – 1.05 โดยความหนาแน่นสัมพัทธ์ของอากาศ  $\delta$  คำนวณได้จากสมการ

$$\delta = \frac{b}{b_n} \frac{273+t_n}{273+t} \quad (2.35)$$

- โดยที่  $b$  เป็นความดันของอากาศอ่านจากบาโรมิเตอร์เป็น มม.ปรอท  
 $t$  เป็นอุณหภูมิของห้องในขณะที่วัดได้เป็น °C

การวัดแรงดันด้วยแกปทรงกลมตามมาตรฐาน IEC 60052-2002 ให้คำนึงถึงผลของความชื้นในบรรยากาศด้วยคือค่าแรงดันเบรกดาวนของแกปทรงกลมจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความชื้นสัมบูรณ์ด้วยอัตรา 0.2% ต่อ  $g/m^3$

โดยที่ค่าแรงดันเบรกดาวนหาจากความชื้นสัมบูรณ์เฉลี่ย  $8.5 g/m^3$  ดังนั้น ค่าแรงดันเบรกดาวนที่สภาวะห้อง  $U_b$  จึงต้องแก้ด้วยตัวประกอบแปลงผันความชื้น  $k_h$  คือ

$$U_b = U_{bn} \cdot k_d \quad (2.36)$$

ค่าตัวประกอบแปลงผันความชื้น คำนวณได้จากความสัมพันธ์ ตามมาตรฐาน IEC 60052-2002

$$K_h = 1 + [0.002 (h/\delta - 8.5)] \quad (2.37)$$

โดยที่  $h$  คือ ความชื้นสัมบูรณ์เป็น  $g/m^3$  สามารถอ่านได้จากกราฟความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศใน  
เทอมอุณหภูมิตอร์โมมิเตอร์กระเปาะแห้งและเปียกของ Psychrometer

### 2.7.2 ลักษณะสมบัติของช่องว่างทรงกลม [2]

1. สนามไฟฟ้าระหว่างทรงกลมที่เท่ากันจะมีลักษณะเกือบสม่ำเสมอ ถ้าระยะแคบ  $d$  น้อยกว่าครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลาง  $D$  ( $d < D/2$ )
2. เป็นการวัดค่ายอด เพราะการเบรกดาวน ในอากาศจะเกิดขึ้นที่ค่ายอดของแรงดันกระแสสลับ
3. เป็นอุปกรณ์ที่ไม่มีตัวชี้ สังกัดได้จากการเกิดสปาร์คหรือเบรกดาวน เวลาใช้จึงต้องทำการเปรียบเทียบมาตรฐาน (Calibration)
4. วัดได้ทั้ง DC และ AC และอิมพัลส์
5. ความถูกต้องเที่ยงตรง  $\pm 3\%$
6. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมาตรฐานตั้งแต่ 2 ซม. ถึง 200 ซม. ดังแสดงในตาราง 2.2

### 2.7.3 ข้อพึงปฏิบัติในการใช้ช่องว่างทรงกลม [2]

1. การติดตั้งและการยึดควรปฏิบัติตามที่ IEC 60052-2002 แนะนำไว้ ถ้าทรงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $\leq 25$  cm. มักจะติดตั้งในแนวนอนถ้าใหญ่กว่า 25 cm มักจะติดตั้งในแนวตั้งดังรูป ในรัศมี 3.5 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลม ( $D$ ) โดยวัดจากพื้นผิวทรงกลมที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด จะต้องไม่มีโลหะหรือตัวนำใด ๆ
2. ระยะห่างระหว่างทรงกลม จะต้องไม่เกินครึ่งหนึ่งของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลม ( $d \leq D/2$ )
3. กระแสที่เกิดจากการสปาร์คไม่ควรเกิน 1 แอมแปร์ โดยต่อความต้านทานอันดับไว้กับทรงกลม เพื่อจำกัดกระแสและความต้านทานตัวนี้จะทำหน้าที่หน่วง (damp) ความถี่สูงอันเนื่องจากมี  $L$  และ  $C$  ในวงจรวัดแรงดัน
4. ควรตัดวงจรที่ป้อนให้กับช่องว่างทรงกลมทันที หลังจากเกิดสปาร์คแล้ว

5. ค่าที่ถือว่าถูกต้องได้จากการหาค่าเฉลี่ย ที่ได้จากการวัดหลาย ๆ ครั้ง (ประมาณ 5 ครั้ง) ค่าที่ วัดได้ ครั้งแรกมักจะมีค่าต่ำ อันเนื่องมีฝุ่นละอองที่ช่องว่างทรงกลม ดังนั้น ก่อนใช้ควรทำการขัดมันและทำความสะอาดพื้นผิวทรงกลมก่อนเสมอ

ตารางที่ 2.2 ขนาดทรงกลมมาตรฐานและระยะแกปวัดแรงดัน [2]

ที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง D ตามมาตรฐาน (cm)	ระยะช่องว่าง d ห่างไม่เกิน (cm)	วัดแรงดัน ได้สูงสุด (kV)
1	2	1	30.7
2	5	1.4	65.5
3	6.25	3.0	79.5
4	10	5	123.0
5	12.5	6	146
6	15	7.5	177
7	25	12	275
8	50	25	515
9	75	36	750
10	100	50	1010
11	150	75	1440
12	200	100	1840

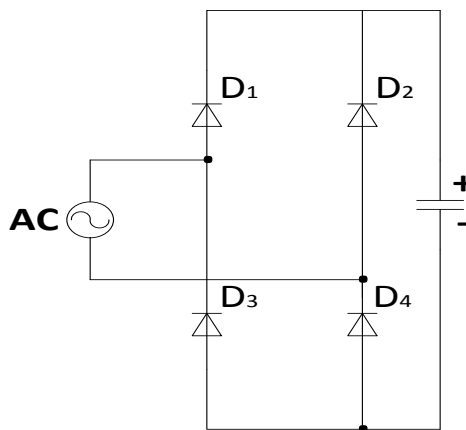


## 2.8 ส่วนประกอบของหม้อแปลงเตสลาแบบใช้สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

มีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วนด้วยกันคือ

### 2.8.1 วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ (Bridge Rectifier)

หน้าที่หลักของวงจรในส่วนนี้ก็คือทำหน้าที่สำหรับแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยมีอุปกรณ์ไดโอดจำนวน 4 ตัว คือเป็นวงจรฟูลบริดจ์เพื่อเรียงกระแสไฟสลับให้เป็นไฟตรงแบบเต็มคลื่นและมีตัวเก็บประจุสำหรับกรองสัญญาณกระแสไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.9 ในงานวิจัยนี้จะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์



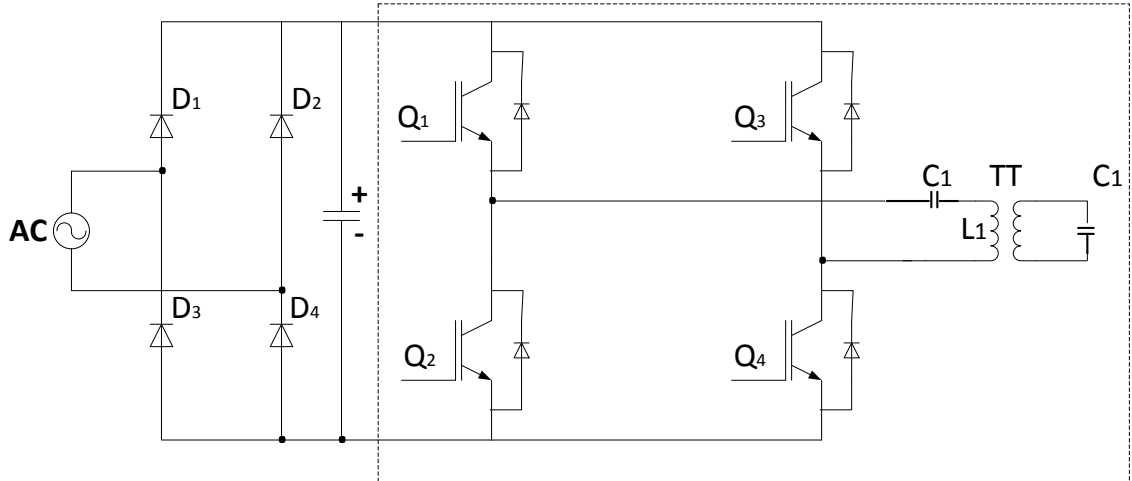
รูปที่ 2.9 วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ (Bridge Rectifier)

### 2.8.2 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ (Full Bridge Inverter)

อินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่แปลงกำลังจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับรูปที่ 2.10 ซึ่งจะเรียกว่าเป็นวงจรเรโซแนนซ์ แบบอนุกรมเพราะมีตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุอนุกรมกันกับโหลดความต้านทาน การสวิตช์จะทำให้เกิดแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมโดยที่ตัวเหนี่ยวนำ ( $L_1$ ) และตัวเก็บประจุ ( $C_1$ ) จะทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับความถี่สวิตช์ซึ่งที่ความถี่เรโซแนนซ์ ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุจะหักล้างกันจึงมองเห็นเป็นโหลดมีค่าเฉพาะความต้านทานเท่านั้น และเพื่อให้เกิดแรงดันพัลส์สลับที่โหลด การทำงานของสวิตช์จะต้องทำงานในลักษณะคู่ประกอบดังนี้

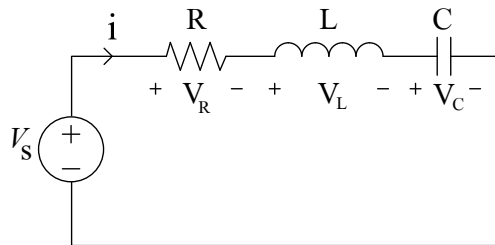
$$Q1, Q4 \text{ ON, } S2, S3 \text{ OFF} \quad v = +V \quad 0 < t < T/2 \quad (2.38)$$

$$Q1, Q4 \text{ OFF, } S2, S3 \text{ ON} \quad v = -V \quad T/2 < t < T \quad (2.39)$$



รูปที่ 2.10 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์

สำหรับกระแสที่ไหลคมีลักษณะเกือบจะเป็น Sine Wave ในกรณีที่ไหลคมีค่า Damping Factor ที่ต่ำ และความถี่ในการทำงานใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์ เพื่อให้สะดวกในการวิเคราะห์สามารถเขียนเป็น วงจรสมมูลอย่างง่าย ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ห้วงจร

**2.8.2.1 การวิเคราะห์ผลตอบสนองของโหนดอนุกรมเรโซแนนซ์ ที่มีต่อแรงดันพัลส์ สี่เหลี่ยม**

จากวงจรรูปที่ 2.11 ใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟจะได้

$$V_R + V_L + V_C = V_S \tag{2.40}$$

จากความสัมพันธ์กระแสกับแรงดันจะได้

$$iR + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t idt = V_S \tag{2.41}$$

จัดรูป Integrodifferential equation

$$\frac{Ld^2i}{dt^2} + \frac{Rdi}{dt} + \frac{i}{C} = \frac{di}{dt}V_s \tag{2.42}$$

จัดรูป

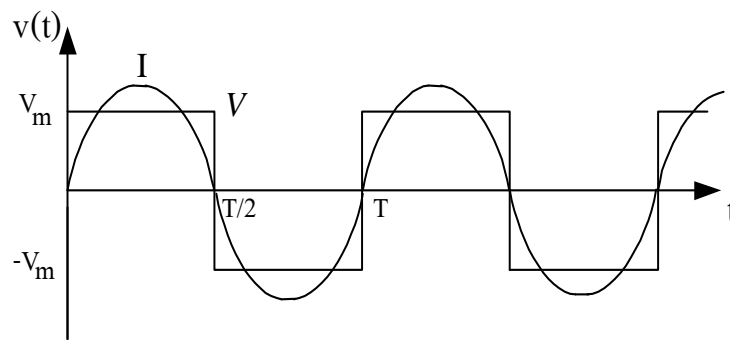
$$\frac{d^2i}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{di}{dt} + \frac{i}{LC} = \frac{1}{L} \frac{di}{dt}V_s \tag{2.43}$$

จากสมการที่ (2.28) จะได้ค่า natural angular frequency และ damping coefficient

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = f = \frac{1}{2} \frac{R}{\sqrt{L/C}}$$

### 2.8.2.2 การวิเคราะห์หาค่ากำลังไฟฟ้าที่โหลดเรโซแนนซ์

สัญญาณกระแสของอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ จะมีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์ เมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานใกล้กับความถี่เรโซแนนซ์ โหลดมีค่า Damping Factor ต่ำ โดยสัญญาณแรงดัน จะมีลักษณะเป็นรูปคลื่นพัลส์สลับ ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 รูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดันที่โหลด

จากรูปที่ 2.12 รูปคลื่นของแรงดันมีลักษณะเป็นฟังก์ชันคือองค์ประกอบฮาร์มอนิกต่างๆ ของแรงดันพัลส์สี่เหลี่ยมเป็นดังนี้

$$v(t) = V_1 \sin \omega t + V_3 \sin 3\omega t + \dots + V_n \sin n\omega t + \dots \tag{2.44}$$

โดยที่

$$V_1 = \frac{4V_m}{\pi} \quad \text{และ} \quad V_n = \frac{4V_m}{n\pi} \quad n = \text{เลขจำนวนเต็มคี่} \tag{2.45}$$

ดังนั้น

$$V_{1,rms} = \frac{4V_m}{\pi\sqrt{2}}$$

ส่วนกระแสที่โหลดมีลักษณะเป็นไซน์ ดังนั้นจึงสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าได้จาก

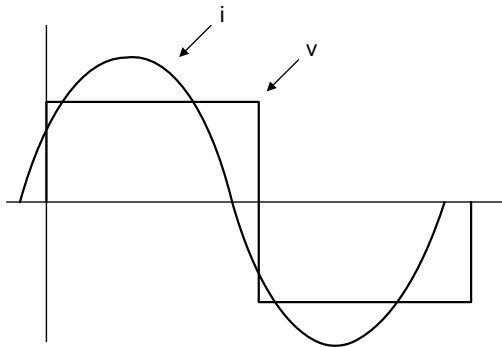
$$P_{load} = I_{1,rms} \times V_{1,rms} \quad (2.47)$$

เมื่อแทนค่า  $I_{1,rms}$  และ  $V_{1,rms}$  จะได้

$$P_{load} = \frac{2I_m V_m}{\pi} \quad (2.48)$$

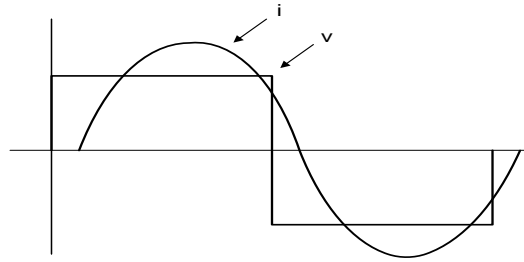
### 2.8.2.3 ลักษณะการทำงานของสวิตช์ในวงจรอินเวอร์เตอร์

การทำงานของอุปกรณ์สวิตช์ในวงจรอินเวอร์เตอร์ สามารถแบ่งออกได้เป็นสองกรณีขึ้นอยู่กับลักษณะของโหลดว่าเป็นแบบคาปาซิทีฟหรือแบบอินดักทีฟซึ่งลักษณะการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์จะไม่เหมือนกัน การควบคุมก็จะแตกต่างกันไปด้วย โดยที่สามารถควบคุมอุปกรณ์สวิตช์ในช่วงเริ่มนำกระแส หรือเพียงแค่ช่วงหยุดนำกระแสได้เท่านั้น



รูปที่ 2.13 รูปคลื่นกระแสและแรงดัน เมื่อความถี่ในการสวิตช์ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์

การทำงานของอุปกรณ์สวิตช์เมื่อมีภาระเป็นคาปาซิทีฟ ( $f < f_0$ ) ถ้าความถี่ในการสวิตช์ มีค่าต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์ค่าภาระจะเป็นคาปาซิทีฟ กระแสโหลดจะหยุดไหลได้เองดังนั้นการควบคุมอุปกรณ์สวิตช์ จะสามารถควบคุมได้เฉพาะช่วงเริ่มนำกระแสได้เท่านั้น ดังนั้น จึงสามารถควบคุมอุปกรณ์สวิตช์ให้เริ่มนำกระแสได้ตามต้องการ แต่การหยุดนำกระแสเป็นไปตามธรรมชาติของโหลดสถานะโหลดเช่นนี้ จึงเหมาะสำหรับการใช้เอส ซี อาร์ มาเป็นอุปกรณ์ในการสวิตช์ เนื่องจากไม่ยุ่งยากในการทำให้ เอส ซี อาร์ หยุดนำกระแส



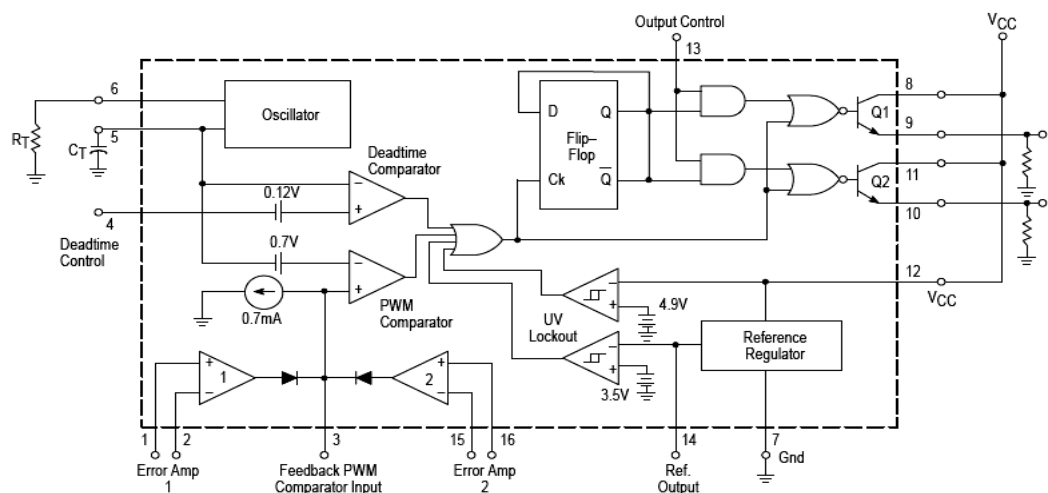
รูปที่ 2.14 รูปคลื่นกระแสและแรงดัน เมื่อความถี่ในการสวิตช์สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์

การทำงานของอุปกรณ์สวิตช์เมื่อมีภาระเป็นอินดักทีฟ ( $f > f_0$ ) ถ้าความถี่ในการสวิตช์มีค่าสูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์ของระบบ ภาระจะอยู่ในของอินดักทีฟ จะควบคุมได้เฉพาะการหยุดนำกระแส ดังนั้นการควบคุมอุปกรณ์สวิตช์ให้หยุดนำกระแสที่ตำแหน่งที่ต้องการได้ สภาวะโหลดลัคนะนี้จึงเหมาะสมกับอุปกรณ์สวิตช์ที่ควบคุมการหยุดนำกระแสได้ง่ายเช่น ทรานซิสเตอร์กำลัง มอสเฟส ไอจีบีที

### 2.8.3 ไอซีสร้างสัญญาณควบคุมอินเวอร์เตอร์ (Control Inverter)

#### 2.8.3.1 คุณสมบัติของไอซีเบอร์ TL494

ไอซีเบอร์ TL494 เป็นไอซีที่ออกแบบมาเพื่อใช้ควบคุมการทำงานคอนเวอร์เตอร์ โดยทำงานด้วยโหมคควบคุมแรงดัน ซึ่งจะได้นำมาเป็นตัวอย่างการทำงานสำหรับวงจรควบคุมด้วยวิธีควบคุมแรงดัน โครงสร้างของไอซีเบอร์ TL494 แสดงในรูปที่ 2.15

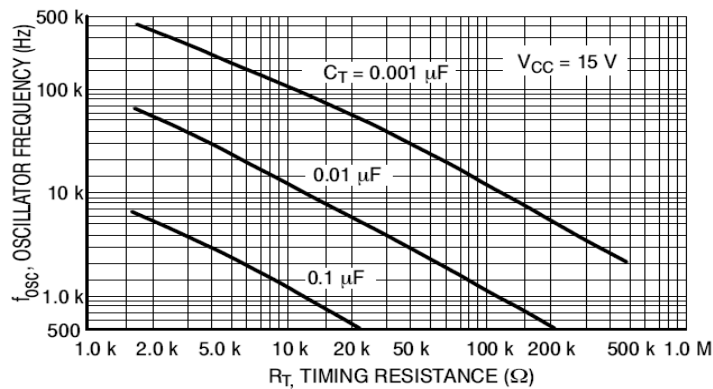


รูปที่ 2.15 โครงสร้างภายในและการจัดขาของไอซีเบอร์ TL494

### 2.8.3.2 การกำหนดคาบเวลาการทำงาน

วงจรของไอซีเบอร์ TL494 เป็นวงจร PWM ที่มีความถี่คงที่ คาบเวลาการทำงานของเอาต์พุตพัลส์ กำหนดโดยค่าของ  $R_T$  และ  $C_T$  จากภายนอกที่ขา 6 และขา 5 ของไอซี ค่าคาบเวลาการทำงานจะกำหนดได้ดังนี้

จากสมการ 
$$T = \frac{R_T C_T}{1.1} \quad (2.49)$$

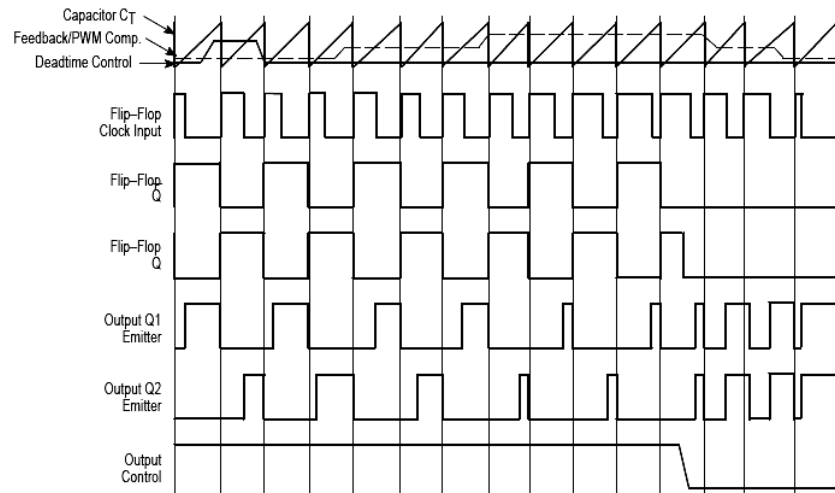


รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ของค่า  $R_T$  และ  $C_T$  ในการกำหนดความถี่

### 2.8.3.3 การทำงานของไอซีในการคงค่าแรงดันของอินเวอร์เตอร์

ความกว้างของเอาต์พุตพัลส์ของไอซีจะได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณฟันเลื่อยที่ขา 3 กับแรงดันที่ได้จากวงจรขยายความแตกต่างทั้ง 2 ตัวที่ PWM Comparator ส่วน NOR เกตที่ควบคุมทรานซิสเตอร์เอาต์พุต  $Q_1$  และ  $Q_2$  จะทำงานก็ต่อเมื่อ  $C_k$  ของ Flip-Flop อยู่ในสถานะ Low เท่านั้น ซึ่ง  $C_k$  จะเป็น Low ได้ก็ต่อเมื่อแรงดันของสัญญาณฟันเลื่อยมีค่ามากกว่าแรงดันที่มาจาก Error Amp ทั้ง 2 ตัว นั่นคือแรงดันป้อนกลับของคอนเวอร์เตอร์หากมีค่าสูงขึ้น ความกว้างเอาต์พุตพัลส์ของไอซีจะลดลง ในทางกลับกันแรงดันป้อนกลับหากมีค่าลดลง ความกว้างเอาต์พุตพัลส์จะเพิ่มขึ้น

ความกว้างเอาต์พุตพัลส์ของไอซีนีสามารถกำหนดให้มีค่ามากที่สุดหรือมีค่าเท่ากับศูนย์ได้ด้วยการเปลี่ยนแรงดันที่ขา 3 จาก 0.5 V จนถึง 3.5 V ส่วน Error Amp ทั้ง 2 ตัวจะมีช่วงของอินพุตคอมมอน โหมดตั้งแต่ 0-0.3 V และสามารถใช้ตรวจจับแรงดันหรือกระแสที่เอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ได้ Error Amp ทั้ง 2 ตัวจะให้เอาต์พุตในลักษณะให้สถานะ High โดยต่อกันอยู่ในลักษณะ OR ที่ขาอินเวอร์ตของ PWM Comparator การต่ออินลักษณะนี้ Error Amp ตัวที่ทำให้เกิดความกว้างเอาต์พุตพัลส์ต่ำสุด จะเป็นตัวควบคุมความกว้างของเอาต์พุตพัลส์ไอซี



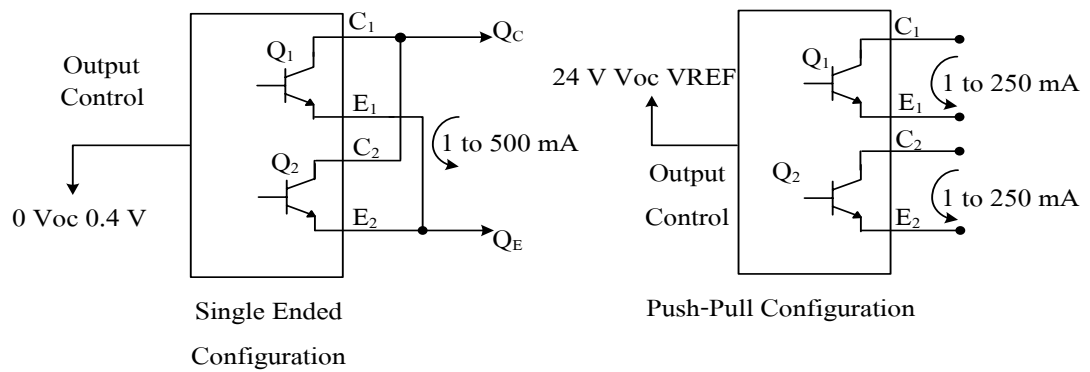
รูปที่ 2.17 รูปคลื่นลักษณะการทำงานของไอซีเบอร์ TL494

### 2.8.3.4 การกำหนดค่าเวลาเพื่อ $T_D$

ไอซีเบอร์ TL494 สามารถให้ผู้ใช้งานกำหนดค่าเวลาเพื่อ  $T_D$  ของวงจรเองได้ด้วยการต่อแรงดันระหว่าง 0 ถึง 3.3 V ที่ขา 4 ของไอซี อย่างไรก็ตามหากแรงดันที่ขา 4 มีค่าเท่ากับ 0 V ค่าเวลาเพื่อต่ำสุดของไอซีจะไม่ต่ำกว่า 4 % ของค่าคาบเวลาการทำงาน เนื่องจากมี แรงดันออฟเซต 120 mV ต่ออยู่ใน ดังนั้น ช่วงเวลา  $t_{on}$  สูงสุดของคอนเวอเตอร์ที่ได้จากไอซีจะเท่ากับ 48 % ของค่าคาบเวลาเมื่อต่อขา 13 เข้ากับขา 14 และมีค่าเท่ากับ 96 % ของค่าคาบเวลาเมื่อต่อขา 13 ลงกราวด์

### 2.8.3.5 การเลือกใช้ $Q_1$ และ $Q_2$ ที่เอาต์พุตของไอซี

เอาต์พุต  $Q_1$  และ  $Q_2$  ของไอซีสามารถทำงานได้ 2 โหมดคือ ทำงานพร้อมกันหรือสลับกันทำงานซึ่งสามารถเลือกการทำงานได้ที่ขา 13 โดยที่  $C_T$  ดิซชาร์จเอาต์พุตของ Dead-time comparator จะให้พัลส์ออกมา  $C_k$  จะมีสถานะเป็น High และหยุดการทำงานของ  $Q_1$  และ  $Q_2$  กำหนดให้ขา 13 มีสถานะเป็น High โดยต่อเข้ากับขา 4  $Q_1$  และ  $Q_2$  จะสลับกันทำงานตามจังหวะของ Flip-Flop เพื่อใช้ขับคอนเวอเตอร์แบบพุก-พุล ในกรณีนี้คาบเวลาการทำงานจะเป็นสองเท่าของคาบเวลาสัญญาณพื้นฐานของไอซี แต่ถ้ากำหนดให้ขา 13 มีสถานะเป็น Low โดยต่อลงกราวด์  $Q_1$  และ  $Q_2$  จะทำงานพร้อมกัน และสามารถขนาน  $Q_1$  และ  $Q_2$  เข้าด้วยกันในกรณีที่ต้องการให้นำกระแสได้มากขึ้น ซึ่งคาบเวลาการทำงานจะมีค่าเท่ากับค่าคาบเวลาของสัญญาณพื้นฐานของไอซี



รูปที่ 2.18 การเลือกเอาต์พุตของไอซีเบอร์ TL494

ไอซีเบอร์ TL494 ต้องการไฟเลี้ยงในช่วง 7-40V มีแรงดันอ้างอิงภายใน 5V และสามารถจ่ายกระแสได้ถึง 10 mA เพื่อใช้กับวงจรภายนอกได้โดยมีค่าความถูกต้อง  $\pm 1.5\%$  ความคลาดเคลื่อนทางอุณหภูมิมีค่าน้อยกว่า 50 mV เมื่อทำงานในช่วง  $0-70^\circ\text{C}$