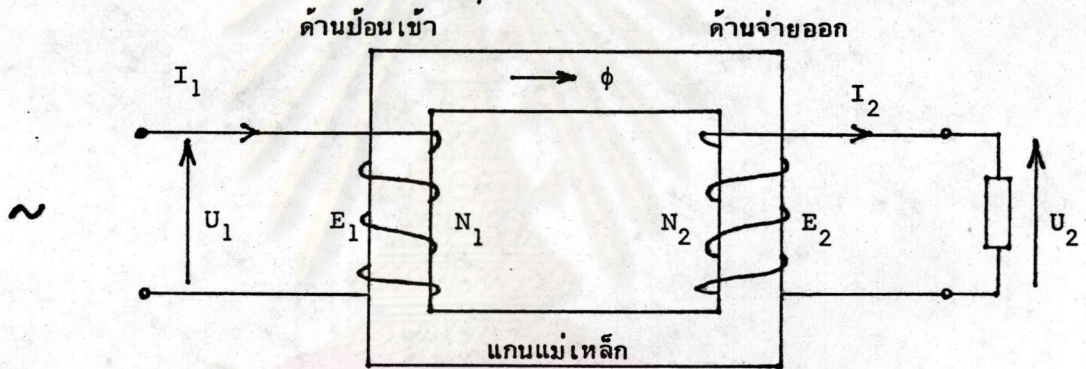




ภาคทฤษฎีของหม้อแปลงทดสอบและการฉนวนด้วยก๊าซ SF₆

2.1 หลักการทำงานของหม้อแปลงทดสอบ

หม้อแปลงทดสอบโดยปกติจะเป็นหม้อแปลงเฟสเดียว ซึ่งมีหลักการเช่นเดียวกับหม้อแปลงทั่วไป คือ ประกอบด้วยขดลวดอย่างน้อย 2 ชุด พันอยู่บนแกนแม่เหล็ก โดยด้านหนึ่งเป็นด้านที่ป้อนกำลังไฟฟ้าเข้า อีกด้านหนึ่งเป็นด้านที่จ่ายกำลังไฟฟ้าออก ดังรูปที่ 2.1



- ϕ = เส้นสนามแม่เหล็ก
- U_1 = แรงดันที่ป้อนเข้า
- U_2 = แรงดันที่จ่ายออก
- I_1 = กระแสด้านป้อนเข้า
- I_2 = กระแสด้านจ่ายออก
- N_1 = จำนวนรอบขดลวดด้านป้อนเข้า
- N_2 = จำนวนรอบขดลวดด้านจ่ายออก
- E_1 = แรงดันเหนี่ยวนำด้านป้อนเข้า
- E_2 = แรงดันเหนี่ยวนำด้านจ่ายออก

รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของหม้อแปลง

เมื่อป้อนแรงดันกระแสสลับให้กับขดลวดด้านป้อนกำลังเข้าโดยขดลวดด้านจ่ายกำลังออกยังไม่ต่อโหลด จะทำให้เกิดกระแสไหลในขดลวดนั้น และสร้างเส้นสนามแม่เหล็กในแกนแม่เหล็ก มีการเปลี่ยนแปลงเป็นรูปคลื่นไซน์ช้ากว่าแรงดันที่ป้อน 90 องศา และทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดนี้ช้ากว่าเส้นสนามแม่เหล็กอีกเป็นมุม 90 องศา แรงดันเหนี่ยวนำ

ที่เกิดขึ้นในขดลวดจะมีขนาดเท่าแต่มีทิศทางตรงข้ามกับแรงดันที่ป้อน ดังเฟสเซอร์ไดอะแกรมในรูปที่ 2.3 ถ้าเส้นสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์เขียนได้ว่า

$$\phi = \phi_m \cos \omega t$$

จะได้แรงดันเหนี่ยวนำในขดลวดซึ่งเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับจำนวนรอบของขดลวด

$$e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} = N_1 \omega \phi_m \sin \omega t$$

$$E_1 = 4.44 f N_1 \phi_m$$

เมื่อ E เป็นค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันเหนี่ยวนำ

f เป็นความถี่

ϕ_m เป็นค่ายอดของเส้นสนามแม่เหล็ก

ขณะเดียวกันแรงดันเหนี่ยวนำในขดลวดจ่ายกำลังออกจะได้

$$E_2 = 4.44 f N_2 \phi_m$$

แรงดันเหนี่ยวนำในเทอมของความหนาแน่นเส้นสนามแม่เหล็ก B_m จะได้ว่า

$$E_1 = 4.44 f N_1 B_m A$$

$$E_2 = 4.44 f N_2 B_m A$$

เมื่อ A เป็นพื้นที่ภาคตัดขวางแกนแม่เหล็ก

B_m เป็นค่ายอดของความหนาแน่นเส้นสนามแม่เหล็ก

ฉะนั้นอัตราส่วนของแรงดันเหนี่ยวนำในเทอมของจำนวนรอบของขดลวดจะได้

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

2.2 วงจรสมมูลของหม้อแปลง

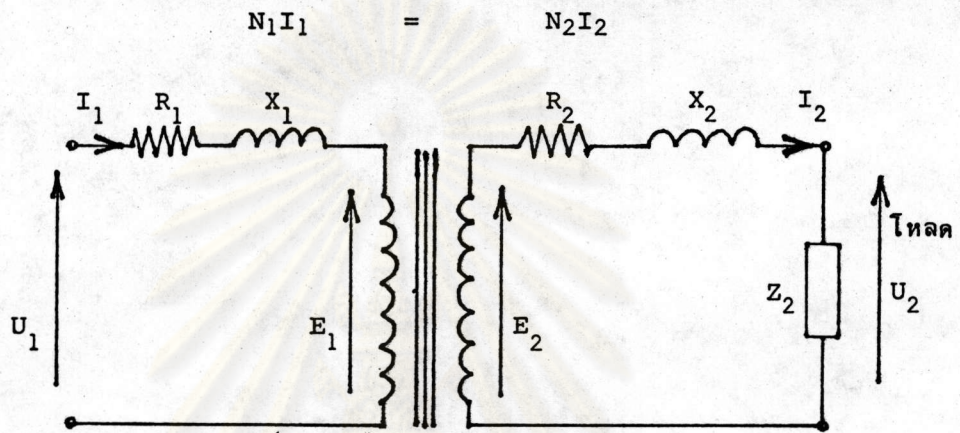
เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วยขดลวดที่ให้กระแสไหลผ่านจะมีคุณสมบัติของความต้านทานและความเหนี่ยวนำอยู่ในตัว ส่วนแกนแม่เหล็กเป็นทางเดินผ่านของเส้นสนามแม่เหล็ก ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นในแกนแม่เหล็กเช่นกัน จึงเป็นผลให้เกิดกระแสไหลวน (Eddy Current) ขึ้นในแกนแม่เหล็ก ทำให้เกิดกำลังสูญเสียในแกนแม่เหล็ก เนื่องจากกระแสไหลวนที่สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสสลับจะมีช่วงกลับไปกลับมาตามการเปลี่ยนแปลงของกระแส เป็นผลให้เกิดกำลังสูญเสียในแกนแม่เหล็ก เนื่องจากความเสียดทานเรียกว่าฮีสเตอร์ซิส ฉะนั้นหม้อแปลงไฟฟ้าจึงอาจเขียนแทนด้วยวงจรสมมูล ที่ประกอบด้วยความต้านทาน R_1 , R_2 และรีแอคแตนซ์ X_1 , X_2 ของขดลวดด้านป้อนกำลังเข้า และด้านจ่ายกำลังออกตามลำดับ ส่วนค่ากำลังสูญเสียในแกนแม่เหล็ก เนื่องจากกระแสไหลวนและฮีสเตอร์ซิสแทนด้วยความต้านทาน R_0 ดังวงจรสมมูล ในรูปที่ 2.2

การวิเคราะห์ท้าวางจรสมมูล จริงๆ ของหม้อแปลง จะเกิดปัญหาในเรื่องความไม่เป็นเชิงเส้นของแกนแม่เหล็ก ทำให้กระแสเมื่อไม่มีโหลดหรือกระแสกระตุ้น I_0 ไม่ใช่คลื่นรูปไซน์อย่างแท้จริง จึงไม่สามารถเขียนแทนวงจรสมมูล ด้วยองค์ประกอบที่มีค่าแน่นอน แต่ในทางปฏิบัติเนื่องจากขนาดของ I_0 มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับกระแสที่กำหนดของหม้อแปลง ฉะนั้นจึงถือเสมือนว่า I_0 เป็นคลื่นรูปไซน์ ทำให้สามารถเขียนแทนวงจรสมมูล ของแกนแม่เหล็กเป็น R_0 และ X_0 ได้ ดังในรูปที่ 2.2

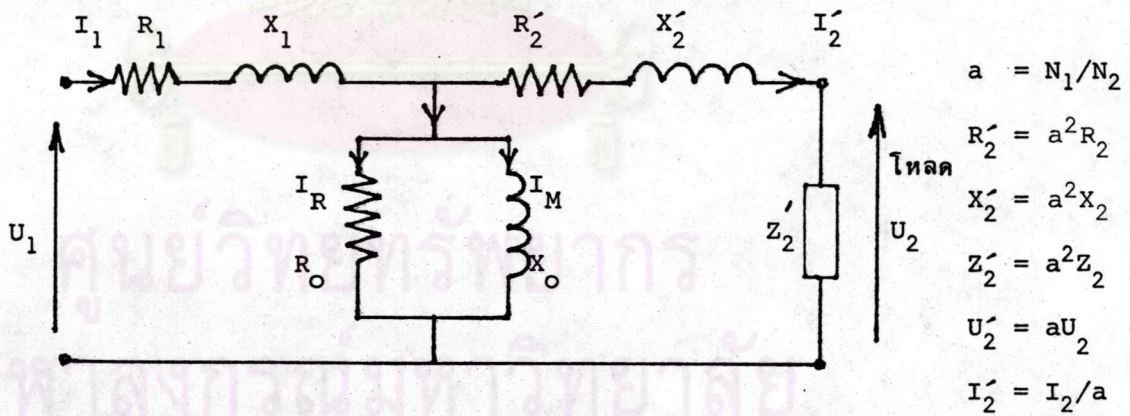
เมื่อต่อโหลดด้านจ่ายกำลังออก กระแสไหล I_2 จะไหลในขดลวดด้านจ่ายกำลังออก และสร้างเส้นสนามแม่เหล็กในแกนแม่เหล็กจำนวนหนึ่งขึ้นมา แต่ขดลวดด้านป้อนกำลังเข้าต้องรักษาเส้นสนามแม่เหล็กให้คงที่เหมือนขณะที่ยังไม่จ่ายโหลด เนื่องจากแรงดันป้อนเข้า U_1 คงที่ ดังนั้นขดลวดป้อนกำลังเข้าจะดึงกระแส I_2 จากแหล่งจ่ายไฟอีกจำนวนหนึ่ง เพื่อสร้างเส้นสนามไฟฟ้าที่มีทิศทางตรงกันข้ามขึ้นมาหักล้างกับเส้นสนามไฟฟ้าที่สร้างจากขดลวดด้านจ่ายกำลังออกพอดี ดังนั้น

แอมแปร์-เทิร์นระหว่าง $N_1 I_1'$ กับ $N_2 I_2$ จะมีขนาดเท่ากัน แต่มีทิศทางตรงกันข้าม ดัง
 ในรูปที่ 2.3

โดยปกติกระแสกระตุ้น I_0 น้อยกว่ากระแส I_2 มาก ดังนั้นสามารถประมาณ
 ได้ว่า



ก) แสดงของแต่ละด้าน



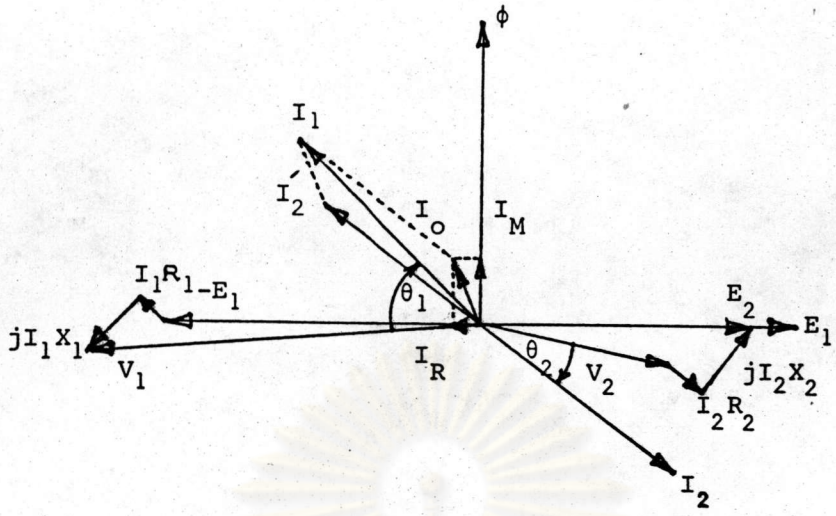
I_0 คือ กระแสกระตุ้น

I_M คือ กระแสสร้างเส้นสนามแม่เหล็ก

I_R คือ กระแสการสูญเสียกำลังไฟฟ้ารวมในแกนแม่เหล็ก

ข) คิดเทียบทางด้านป้อนเข้า

รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของหม้อแปลง



$\cos \theta_1 =$ เทาเวอร์แฟกเตอร์ของโหลดค่านมือนกำลังไฟฟ้าเข้า

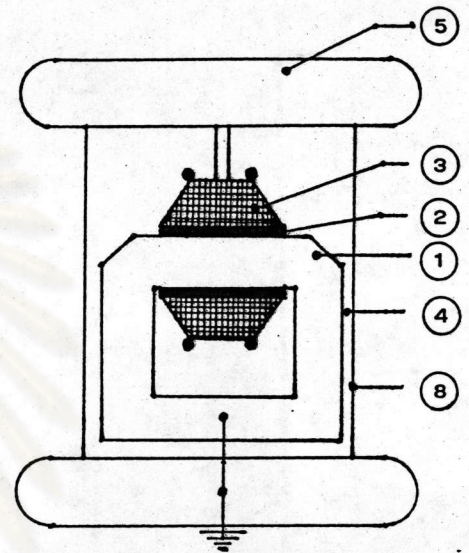
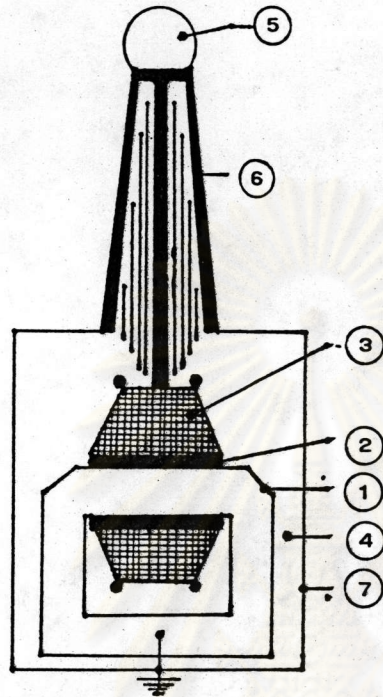
$\cos \theta_2 =$ เทาเวอร์แฟกเตอร์ของโหลดค่านจ่ายกำลังไฟฟ้าออก

รูปที่ 2.3 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของหม้อแปลง [27]

2.3 โครงสร้างและการฉนวนของหม้อแปลงทดสอบ

ปัญหาของหม้อแปลงทดสอบที่นอกเหนือไปจากหม้อแปลงธรรมดา คือ การฉนวน สำหรับแรงดันไม่เกิน 100 kV การฉนวนอาจเป็นแบบแห้ง หรือเทหุ้มขดลวดและแกนแม่เหล็กด้วยสารสังเคราะห์ ถ้าหม้อแปลงที่มีแรงดันสูงกว่านี้ การฉนวนจะเป็นกระดาษชุบน้ำมัน แกนแม่เหล็กและขดลวดจะจุ่มอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงที่บรรจุอยู่ในถังโลหะหรือถังฉนวน ถ้าใช้ถังเหล็กจะมีข้อดีในการระบายความร้อน แต่ต้องใช้อุปกรณ์นำสายไฟฟ้าแรงสูง นั่นคือ เหมาะสำหรับหม้อแปลงที่ต้องใช้กระแสทดสอบและกำลังไฟฟ้าสูงๆ ถ้าตัวถังเป็นฉนวน เช่น เบกกาไลต์ อีพอกซี หรืออีพอกซีเสริมแก้วไฟเบอร์ไม่ต้องใช้อุปกรณ์นำสายไฟ แต่จะระบายความร้อนได้น้อยกว่าแบบถังโลหะ

หม้อแปลงทดสอบโดยทั่วไปซึ่งแรงดันไม่สูงมากนักแกนแม่เหล็กจะต่อลงดิน และขดลวดแรงต่ำจะพันติดกับแกนแม่เหล็ก แรงดันของขดลวดแรงต่ำอยู่ระหว่าง 100 V ถึง 2000 V ขดลวดแรงสูงจะพันทับขดลวดแรงต่ำอีกต่อหนึ่ง นั่นคือ ขดลวดแรงสูงจะอยู่ห่างจากแกนแม่เหล็ก ขดลวดรอบที่มีแรงดันสูงขึ้นก็จะอยู่ห่างจากแกนแม่เหล็กหรือส่วนที่ต่อลงดินมากขึ้น การฉนวนจะเพิ่มความแรงดัน ดังในรูปที่ 2.4 ก) สำหรับโครงสร้างหม้อแปลงทดสอบ แกนแม่เหล็กต่อลงดินแบบจุ่มน้ำมันแสดงไว้ในรูปที่ 2.5



ก) ถัง เหล็ก

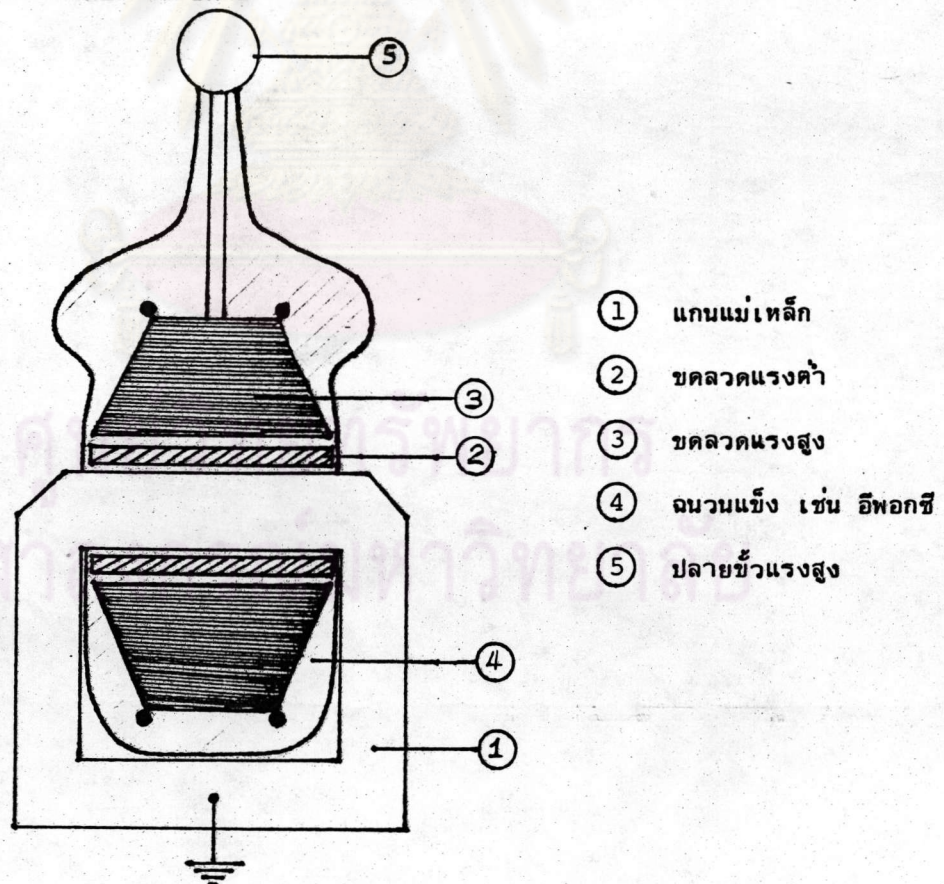
ข) ถัง ฉนวน

- ① แกนแม่เหล็ก
- ② ขดลวดแรงต่ำ
- ③ ขดลวดแรงสูง
- ④ น้ำมัน เป็นฉนวน
- ⑤ ปลายขั้วแรงสูง
- ⑥ ปลอกฉนวนนำสายแบบคอนเดนเซอร์
- ⑦ ถังโลหะ
- ⑧ ถังฉนวน

รูปที่ 2.5 โครงสร้างของหม้อแปลงทดสอบแกนเหล็กต่อลงดินแบบจุ่มน้ำมัน

2.3.1 หม้อแปลงแบบแห้งและแบบหุ้มด้วยฉนวนแข็ง

หม้อแปลงแบบแห้ง หมายถึง แบบที่ใช้อากาศเป็นฉนวนระบายความร้อน ฉนวนแข็งที่ใช้ อาจจะเป็นกระดาษหรือเทปผ้า ซึ่งเมื่อผ่านการอบไล่ความชื้นแล้วจะใช้วารินชเคลือบขดลวด เพื่อป้องกันความชื้นในอากาศ ส่วนอีกแบบหนึ่ง คือ แบบหุ้มด้วยฉนวนแข็ง ซึ่งก็ใช้อากาศเป็นฉนวนระบายความร้อน เช่นเดียวกัน แต่จะใช้สารสังเคราะห์ เช่น อีพอกซีหล่อหุ้มขดลวดไว้ ดังในรูปที่ 2.6 ซึ่งจะมีความแข็งแรงทางกลและความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ามากกว่าแต่ราคาจะแพงกว่า หม้อแปลงทดสอบที่ใช้การฉนวนแบบแห้งและแบบหุ้มด้วยฉนวนแข็ง จะมีข้อเสียในเรื่องการระบายความร้อนของขดลวด (โดยเฉพาะแบบหุ้มด้วยฉนวนแข็งของอีพอกซีซึ่งหุ้มหนาพอควร) เนื่องจากใช้อากาศระบายความร้อน ดังนั้นหม้อแปลงทดสอบแบบนี้จะมีกำลังไฟฟ้าที่กำหนดค่า และขนาดจะใหญ่มากขึ้น เนื่องจากความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของอากาศมีค่าต่ำ และจะใช้ภายในบริเวณอาคารเท่านั้น แต่ก็มีข้อดี คือ ไม่ต้องการการบำรุงรักษา และไม่เกิดเพลิงไหม้หากเกิดระเบิดขึ้น จึงสามารถใช้ภายในบริเวณอาคารได้อย่างปลอดภัย



รูปที่ 2.6 หม้อแปลงทดสอบแบบหุ้มด้วยฉนวนแข็ง

2.3.2 หม้อแปลงแบบน้ำมัน

การฉนวนของหม้อแปลงแบบน้ำมันนี้จะใช้กระดาษพันหุ้มรัศขดลวดแรงสูงไว้เพื่อเป็นฉนวนแข็ง แล้วจุ่มในน้ำมันหม้อแปลงเพื่อเป็นฉนวนบริเวณช่องว่าง และเป็นตัวระบายความร้อน ซึ่งมีโครงสร้างที่ได้กล่าวแล้ว ดังในรูปที่ 2.5

หม้อแปลงทดสอบแบบนี้มีข้อเสีย คือ ต้องการการบำรุงรักษา เช่น เปลี่ยนน้ำมันใหม่ ระเบิดและติดไฟได้ง่ายหากเกิดระเบิดขึ้น แต่มีข้อดี คือ ระบายความร้อนได้ดีกว่าอากาศ และขนาดของขดลวดจะเล็กกว่า เนื่องจากน้ำมันมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าอากาศ และสามารถใช้งานภายนอกอาคารได้

2.3.3 หม้อแปลงแบบฉนวนด้วยก๊าซ SF₆

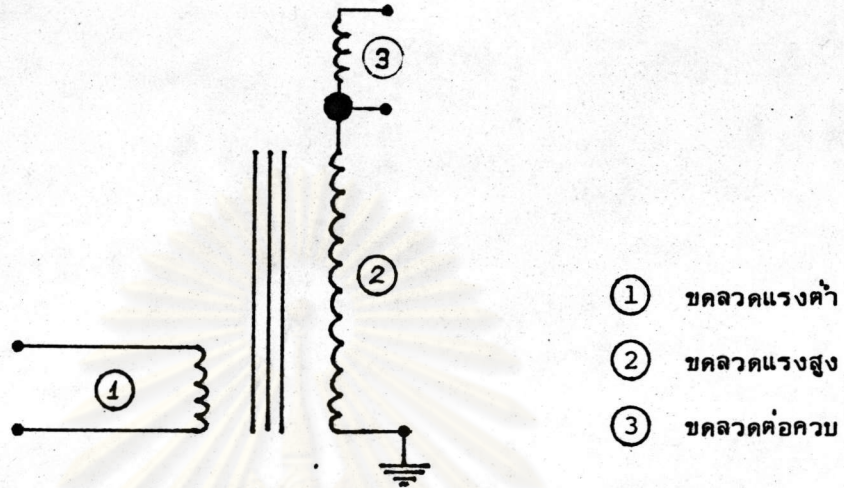
หม้อแปลงทดสอบแบบนี้บรรจุก๊าซ SF₆ ที่ความดันตามที่ได้ออกแบบไว้เพื่อเป็นฉนวนและตัวระบายความร้อน ซึ่งโครงสร้างคล้ายกับหม้อแปลงทดสอบแบบฉนวนด้วยน้ำมัน ดังแสดงในรูปที่ 2.5 แต่จะแตกต่างกันตรงฉนวนที่ใช้ จะใช้ฟิล์มโพลีเอสเตอร์พันหุ้มรัศขดลวดแรงสูงแทนกระดาษ เนื่องจากไม่ดูดความชื้นซึ่งจะเป็นสาเหตุให้ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซ SF₆ ลดลงไป ซึ่งรายละเอียดเกี่ยวกับฟิล์มโพลีเอสเตอร์และก๊าซ SF₆ จะได้กล่าวต่อไปในข้อ 2.6

หม้อแปลงทดสอบฉนวนด้วยก๊าซ SF₆ นี้ จะมีข้อเสียเพียงเล็กน้อย คือ ในเรื่องการถ่ายเทความร้อนได้น้อยกว่าน้ำมัน ทำให้ต้องออกแบบพื้นที่ผิวในการระบายความร้อนของขดลวดแกนแม่เหล็ก และตัวถังมากกว่าน้ำมัน ทำให้ขนาดของหม้อแปลงทดสอบฉนวนด้วยก๊าซ SF₆ จะใหญ่กว่าแบบน้ำมัน แต่อย่างไรก็ตามขนาดของหม้อแปลงก็จะเล็กกว่าแบบฉนวนแห้ง เนื่องจากการระบายความร้อนและความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซ SF₆ ที่ความดันเท่ากันจะมีค่ามากกว่าของอากาศ ส่วนข้อดี คือ ไม่ต้องบำรุงรักษามาก ไม่เกิดเพลิงไหม้ถ้าหากเกิดระเบิดขึ้น ในกรณีที่เกิดการรั่วของก๊าซ SF₆ ก็ไม่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต

2.4 การต่อชั้นบันได

ในกรณีที่ต้องการใช้แรงดันทดสอบสูงกว่า 500-600 kV ขึ้นไป มักจะใช้หม้อแปลงหลายๆ ตัวมาต่อเสริมกัน เรียกว่า ต่อแบบชั้นบันได หม้อแปลงที่สามารถใช้ต่อชั้นบันไดได้จะ

ต้องมีขลวด 3 ชุด ดังรูปที่ 2.7 คือ จะมีชุดขลวดต่อควมเพิ่มเติมจากขลวดแรงสูงและขลวดแรงต่ำตามธรรมดา สำหรับทำหน้าที่บ่อนแรงดันให้กับขลวดแรงต่ำของหม้อแปลงทดสอบตัวถัดไป โดยขลวดนี้จะต่ออยู่กับปลายขลวดแรงสูงของตัวก่อน



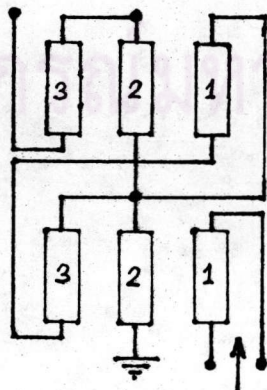
รูปที่ 2.7 หม้อแปลงทดสอบสำหรับต่อแบบชั้นบันได

ในรูปที่ 2.8 แสดงตัวอย่างการต่อแบบชั้นบันได 2 ชั้น

- ① ขลวดแรงต่ำ
- ② ขลวดแรงสูง
- ③ ขลวดต่อควม

กำลังไฟฟ้าของขลวด

③	②	①	
0	50	50	%
50	50	100	%



ต่อแบบชั้นบันได 2 ชั้น จะได้แรงดันจ่ายออกเป็น 2 เท่า แต่จะได้กำลังจ่ายออกเท่ากับกำลังที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบตัวล่างสุด

รูปที่ 2.8 ตัวอย่างการต่อแบบชั้นบันได 2 ชั้น

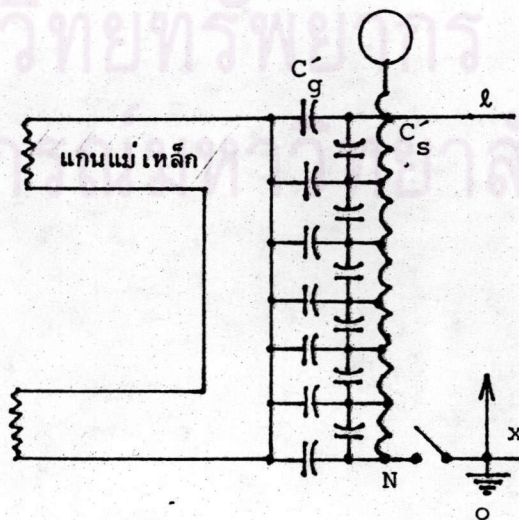
2.5 พฤติกรรมของหม้อแปลงทดสอบต่อแรงดันขั้วคู่และแรงดันอิมพัลส์

หม้อแปลงในภาวะคงตัว แรงดันกระจายบนขดลวดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความยาวของขดลวด แต่ในภาวะทรานเซียนต์หรือแรงดันเลิร์จ การกระจายแรงดันบนขดลวดหม้อแปลงจะไม่สม่ำเสมอตามแนวความยาวขดลวด โดยเฉพาะอย่างยิ่งแรงดันอิมพัลส์ที่มีความชันสูงอันเนื่องมาจากคลื่นจร จากฟ้าผ่าหรือเกิดคลื่นตัด จากการทดสอบซึ่งเป็นสิ่งหนึ่งที่จะต้องพิจารณาค่านี้ถึงในการออกแบบจัดวางขดลวดแรงสูง

ในกรณีหม้อแปลงทดสอบปกติจะไม่มีโอกาสได้รับแรงดันอิมพัลส์จากคลื่นจรฟ้าผ่า หรือจากแรงดันเลิร์จสวิตชิง แต่อาจเกิดขึ้นได้ในกรณีทดสอบแรงดันผสมระหว่างแรงดันกระแสสลับซ้อนด้วยแรงดันอิมพัลส์ หรือการทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซ การออกแบบการฉนวนและการจัดวางขดลวดแรงสูงของหม้อแปลงทดสอบ ต้องกระทำให้ดีเป็นพิเศษ เพื่อให้สามารถทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าจากแรงดันอิมพัลส์หรือแรงดันเกินที่มีความชันช่วงหน้าคลื่นสูง

2.5.1 วงจรสมมูลของขดลวดหม้อแปลง

การวิเคราะห์ผลของแรงดันอิมพัลส์ที่มีต่อขดลวดหม้อแปลงทดสอบ อาจเขียนวงจรสมมูลของขดลวดหม้อแปลงในช่วงเวลาสั้นๆ เท่าๆ กับเวลาช่วงหน้าคลื่นอิมพัลส์ แทนด้วยตาข่ายเคแปซิ-แดนซ์ ดังในรูปที่ 2.9 [3]



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลของขดลวดหม้อแปลง

สมมติว่าเป็นขลวดที่ทันสมัยเสมอตลอดช่วงความยาว l ให้คะแพซิแตนซ์ระหว่างขลวดกับดิน (แกนแม่เหล็ก ตัวถังโลหะหรือขลวดที่ต่อลงดิน) ต่อหนึ่งหน่วยความยาวขลวดเท่ากับ C'_g คะแพซิแตนซ์ระหว่างขลวดต่อหน่วยความยาวขลวดเท่ากับ C'_s จากรูปที่ 2.9 จะเห็นได้ว่า C'_g จะค่อนข้างกันตลอดแนวความยาวขลวด ฉะนั้นคะแพซิแตนซ์ระหว่างขลวดกับดิน

$$C_g = C'_g \cdot l$$

ส่วนคะแพซิแตนซ์ C'_s นั้นจะค่อนข้างอยู่แบบอันดับจากปลายข้างหนึ่งของขลวดไปถึงอีกปลายหนึ่งของขลวด ดังนั้น คะแพซิแตนซ์ระหว่างขลวด

$$C_s = C'_s / l$$

ถ้าให้

$$\alpha = \sqrt{\frac{C_g}{C_s}}$$

แรงดันแบ่งกระจายของขลวดคือแรงดันรูปไซน์ ซึ่งมีขนาดเท่ากับ U คือ $E(x)$ ซึ่งเป็นแรงดันของจุดที่ระยะ x ใดๆ ในขลวดเทียบกับดิน ซึ่งแยกเป็น 2 กรณี ดังต่อไปนี้ [5]

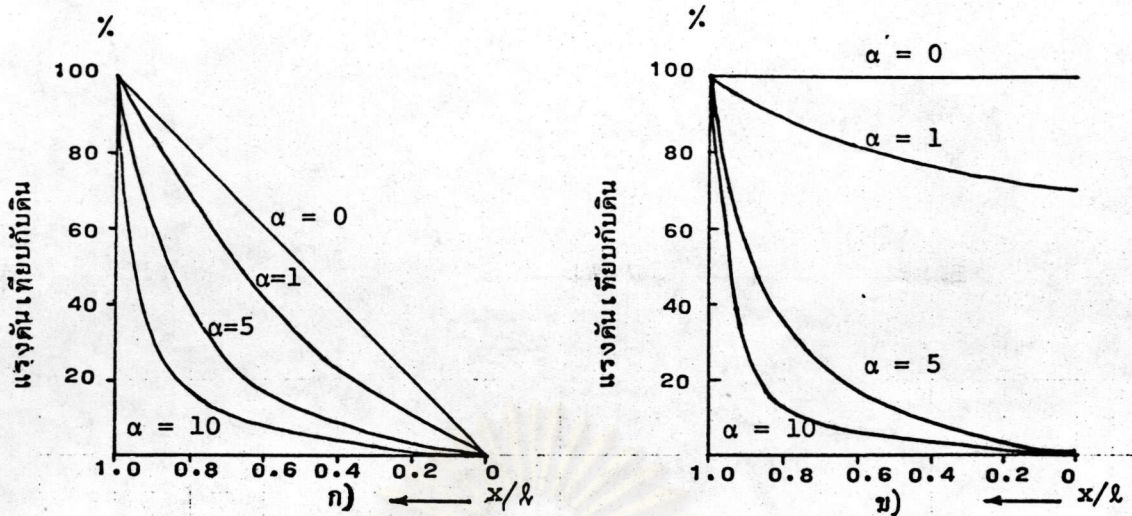
ถ้าจุดนิวทรัล N ต่อลงดิน จะได้

$$E(x) = \frac{U \sinh (\alpha x / l)}{\sinh \alpha}$$

ถ้าจุดนิวทรัล N ปลอยลอยไม่ต่อลงดิน จะได้

$$E(x) = \frac{U \cosh (\alpha x / l)}{\cosh \alpha}$$

แรงดันแบ่งกระจายของขลวดขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ $\sqrt{\frac{C_g}{C_s}}$ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 จะเห็นว่าขลวดครอบแรกๆ จะรับแรงดันสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ α มีค่าสูง เช่น $\alpha = 5$ ขลวดช่วงบน (ปลายแรงสูง) เพียง 10 % ของความยาวทั้งหมดต้องรับแรงดันถึง 40 %

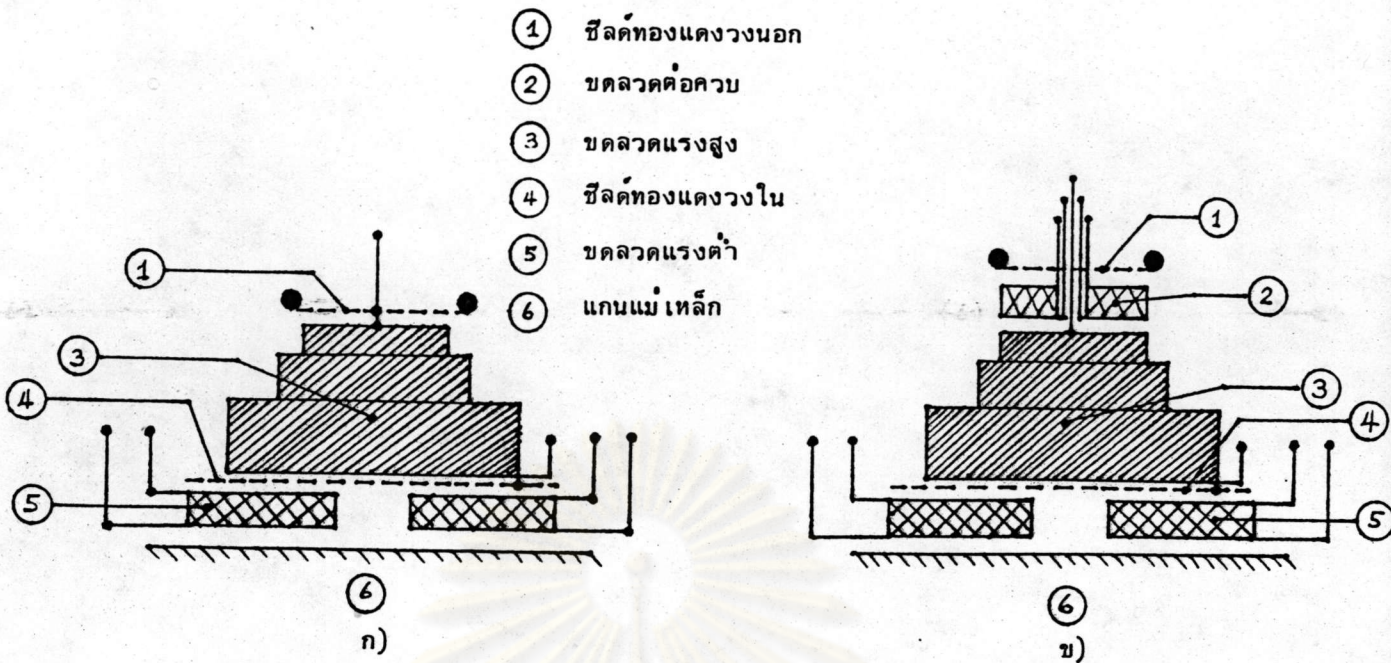


รูปที่ 2.10 แรงดันแบ่งกระจายบนขดลวดหม้อแปลง

- ก) จุด N ค่อยลงดิน
ข) จุด N ปลอยลอยไม่ต่อลงดิน

ด้วยสาเหตุดังกล่าวข้างต้น ทำให้การออกแบบลักษณะการวางและการฉนวนของขดลวดแรงสูงต้องระมัดระวังเป็นพิเศษ คือ ต้องมีการจัดลำดับขดลวดแรงสูงเพื่อเพิ่มการฉนวนตามแรงดัน รวมทั้งมีการใส่ซิลด์ทองแดงตรงปลายขดลวดแรงสูงด้านแรงสูง และตรงปลายขดลวดแรงสูงด้านที่ลงดิน ซึ่งจะอยู่ระหว่างขดลวดแรงต่ำกับขดลวดแรงสูง ดังในรูปที่ 2.11 และพันขดลวดแรงสูงเป็นแบบขดลวดชั้นทรงกระบอก เพราะว่าการพันแบบนี้ C_s จะมีค่าสูงกว่า C_g ทำให้ $\alpha < 1$ ฉะนั้นแรงดันแบ่งกระจายจะสม่ำเสมอขึ้น





รูปที่ 2.11 ภาพตัดแสดงการจัดวางขดลวด

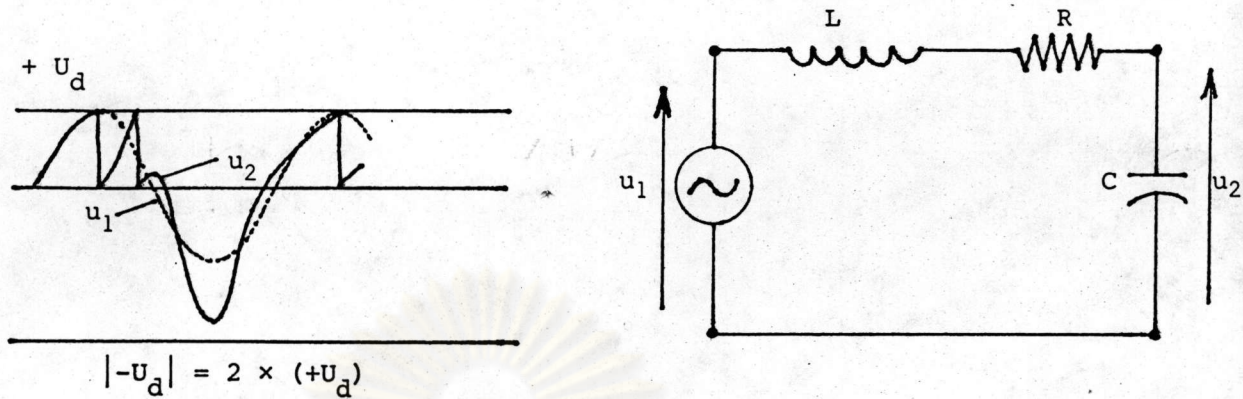
ก) หม้อแปลงทดสอบแบบ 2 ขดลวด

ข) หม้อแปลงทดสอบแบบ 3 ขดลวด

การใช้ความต้านทานในวงจรภาคแรงสูงในการทดสอบ การรวมไฟตามผิวหรือเจาะทะลุ จะช่วยทำให้คลื่นแรงดันที่ยุบตัวจากวัสดุทดสอบวิ่ง เข้าหาหม้อแปลงทดสอบมีอัตราการยุบตัวช้าลง ตามค่าคงตัวเวลา RC เมื่อ R คือ ความต้านทานที่ใช้ป้องกันมีค่าประมาณ $2-10 \text{ k}\Omega$ และ C คือ ค่าคาปาซิแตนซ์ในตัวเองของหม้อแปลงทดสอบ ซึ่งจะลดอันตรายต่อหม้อแปลงลง

2.5.2 แรงดันเกินทรานเซียนต์

เมื่อเกิดควาไฟหรือเบรกคาวนที่วัสดุทดสอบแล้วช่วงเวลา $2-3$ มิลลิวินาที ต่อมาก่อนที่อุปกรณ์ป้องกันของสายจ่ายกำลังจะตัดวงจรออกจากวงจรทดสอบ ปรากฏการณ์แรงดันเกินทรานเซียนต์ที่อาจจะเกิดขึ้นอธิบายได้ดังนี้ หลังจากอาร์กบนวัสดุทดสอบดับลงแล้ว พิจารณาจากวงจรสมมูล ของหม้อแปลงจากรูปที่ 2.2 จะพบว่า วงจรทดสอบจะมีลักษณะเป็นวงจร RLC (C เป็นค่าคาปาซิแตนซ์ของวัสดุทดสอบ) จึงอาจจะเกิดแรงดันเกินทรานเซียนต์ เนื่องจากวงจรรีโซแนนซ์แบบอนุกรม ดังในรูปที่ 2.12 ซึ่งอาจจะเป็นอันตรายต่อหม้อแปลงทดสอบได้ถ้าแรงดันเกินนี้สูงพอ



ก) รูปคลื่นแรงดันเกิน

ข) วงจรสมมูลการเกิดแรงดันเกิน
ทรานเซียนต์

รูปที่ 2.12 แรงดันเกินทรานเซียนต์

แต่จากประสบการณ์ของบริษัทผู้ผลิตหม้อแปลงทดสอบที่มีชื่อเสียงของต่างประเทศ ให้ข้อเสนอแนะว่า ค่ายอดแรงดันเกินทรานเซียนต์นี้จะประมาณ 110-120 % ของค่าแรงดันกำหนดของหม้อแปลงทดสอบ [25] (เป็นค่าที่ได้จากการทดลอง) ขึ้นกับการออกแบบโครงสร้างของขดลวด และการใช้อุปกรณ์ป้องกันในวงจรทดสอบ

2.6 การฉนวนหม้อแปลงทดสอบด้วยก๊าซ SF₆

หม้อแปลงทดสอบที่ฉนวนด้วยก๊าซ SF₆ หมายถึง หม้อแปลงทดสอบที่ใช้ก๊าซ SF₆ เป็นฉนวนแวดล้อมโครงสร้าง และทำหน้าที่เป็นตัวระบายความร้อนด้วย ส่วนฉนวนที่ใช้หุ้มขดลวดแรงสูงนั้นจะเป็นฟิล์มโพลีเอสเตอร์

ก๊าซ SF₆ เป็นก๊าซที่มีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ ทางเคมี และทางไฟฟ้าแห่งการเป็นฉนวนครบถ้วนทุกประการ เหมาะที่จะใช้เป็นฉนวนในหม้อแปลงและอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

2.6.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของก๊าซ SF₆

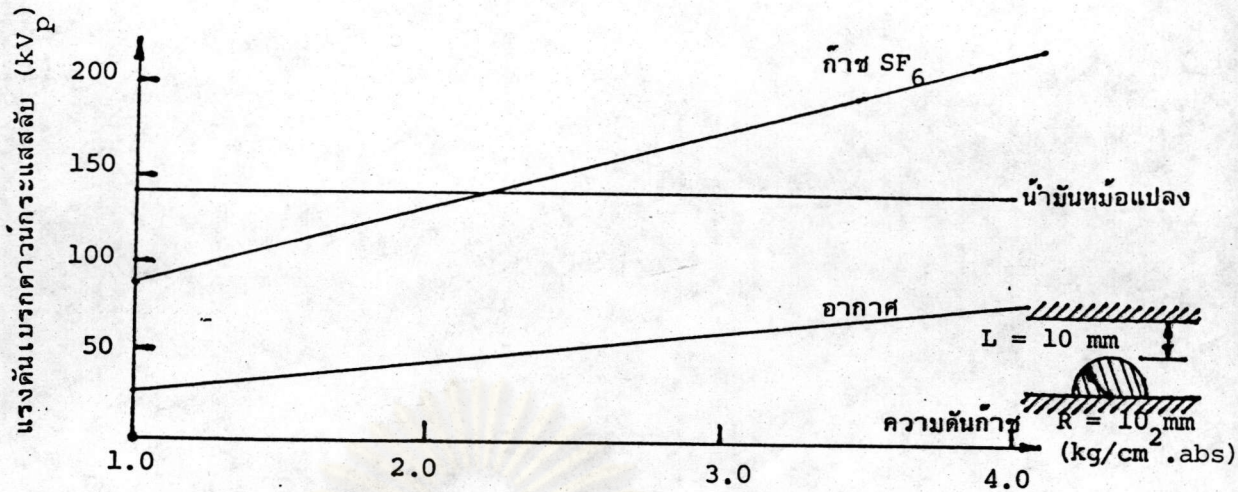
ก๊าซ SF₆ เป็นสารประกอบโปรสโธอไมกโมเลกุลของกำมะถันและฟลูออรีน เป็นก๊าซไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่มีพิษ ไม่ติดไฟ และไม่ช่วยให้ไฟติด เป็นก๊าซที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีกับสารอื่นแม้ว่าจะถูกทำให้ร้อนถึง 500°C ภายในถังปิดมิดชิดปราศจากออกซิเจนและความชื้น คุณสมบัติต่างๆ ไปของก๊าซ SF₆ อาจสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 2.1 [2]

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทั่วไปของก๊าซ SF₆

น้ำหนักโมเลกุล	146.06
จุดหลอมที่ 2.29 atm	- 50.8 °C
อุณหภูมิของจุด Sublimation ที่ 1 atm	- 63.6 °C
ความหนาแน่นไอที่ 20°C, 1 atm	6.16 กรัมต่อลิตร
สภาพนำความร้อนที่ 25°C	7.15×10^{-5} cal/cm/°C/sec
ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกที่ 27.5°C	1.00191
แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก (tg δ)	$< 2 \times 10^{-7}$
ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (E _c)	87.8 kV/cm.bar

2.6.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของก๊าซ SF₆

จากคุณสมบัติทางฟิสิกส์ในตารางที่ 2.1 ก๊าซ SF₆ มีความหนาแน่นประมาณ 5 เท่าของอากาศ จึงทำให้ก๊าซ SF₆ มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้สูงกว่าอากาศและก๊าซชนิดอื่นๆ ที่ใช้เป็นฉนวนอีกหลายชนิด เช่น N₂, CO₂ ที่ความดันเท่ากัน ดังเส้นกราฟเปรียบเทียบในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แรงดันเบรกดาวนกระแสสลับของก๊าซ SF₆ [6]

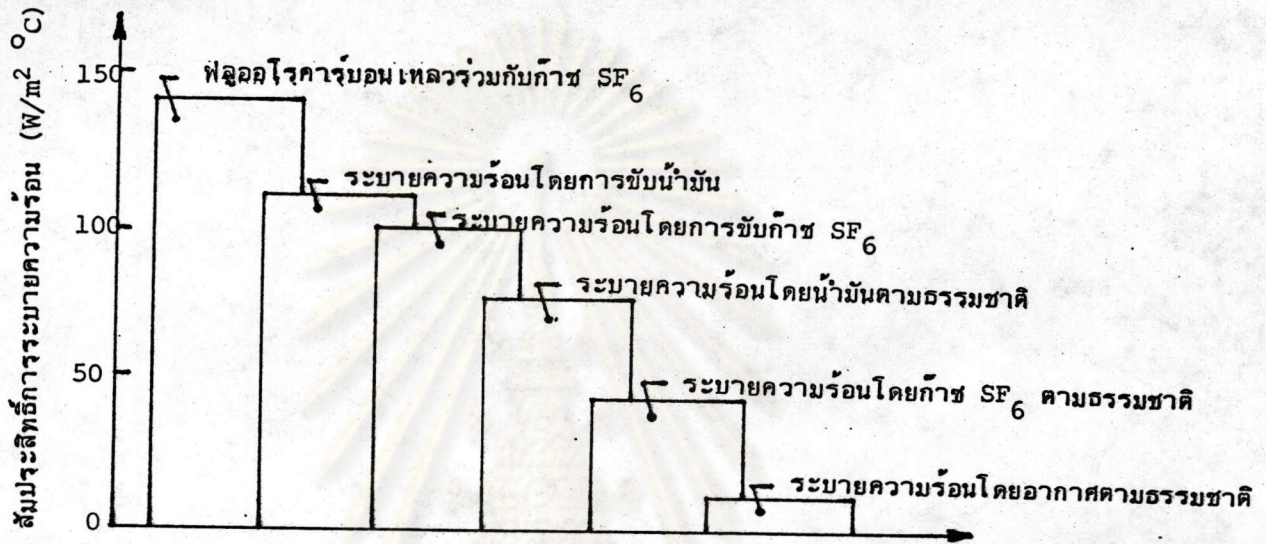
จากรูปที่ 2.13 จะเห็นว่าแรงดันเบรกดาวนกระแสสลับของก๊าซ SF₆ มีค่าประมาณ 2-3 เท่าของอากาศ และจะมีค่าเกือบเท่ากับของน้ำมันหม้อแปลงที่ความดันประมาณ 2.2 kg/cm² abs และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซ SF₆ จะขึ้นกับความดันโดยจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อความดันสูงขึ้น จากคุณสมบัติของก๊าซ SF₆ อันนี้ทำให้การออกแบบสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังของบริษัทต่างประเทศจะใช้ก๊าซ SF₆ อัดที่ความดันประมาณ 2.1-2.3 kg/cm² abs ซึ่งมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าประมาณเท่ากับของน้ำมันหม้อแปลง [7]

2.6.3 คุณสมบัติการระบายความร้อนของก๊าซ SF₆

คุณสมบัติการระบายความร้อนเป็นสิ่งสำคัญประการหนึ่งของฉนวนที่ใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งจะต้องระบายความร้อนสู่บรรยากาศแวดล้อมเพียงพอ เพื่อจำกัดอุณหภูมิของขดลวดไม่ให้สูงเกิน อุณหภูมิใช้งานของฉนวนแข็งที่ใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้า ในรูปที่ 2.14 แสดงสัมประสิทธิ์การระบายความร้อนของก๊าซ SF₆ เปรียบเทียบกับสารฉนวนอื่นที่ใช้เป็นฉนวนในหม้อแปลงไฟฟ้า

จะเห็นว่าสัมประสิทธิ์การระบายความร้อนของก๊าซ SF₆ ประมาณ 3 เท่าของอากาศ ดังนั้นถ้ากำลังสูญเสียต่อหน่วยพื้นที่ของขดลวดเท่ากัน อุณหภูมิของผิวหน้าขดลวดของหม้อแปลงฉนวนด้วยก๊าซ SF₆ จะประมาณ 1/3 ของหม้อแปลงที่ฉนวนด้วยอากาศ และเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันหม้อแปลง สัมประสิทธิ์การระบายความร้อนของก๊าซ SF₆ ประมาณ 1/2 ของน้ำมันหม้อแปลง

ที่ระบายความร้อนตามธรรมชาติ แต่สัมประสิทธิ์การระบายความร้อนของก๊าซ SF_6 สามารถจะทำให้เพิ่มขึ้นโดยเกือบจะเท่ากับน้ำมันหม้อแปลงที่มีการระบายความร้อนด้วยการขับน้ำมัน โดยการระบายความร้อนด้วยการขับก๊าซ SF_6

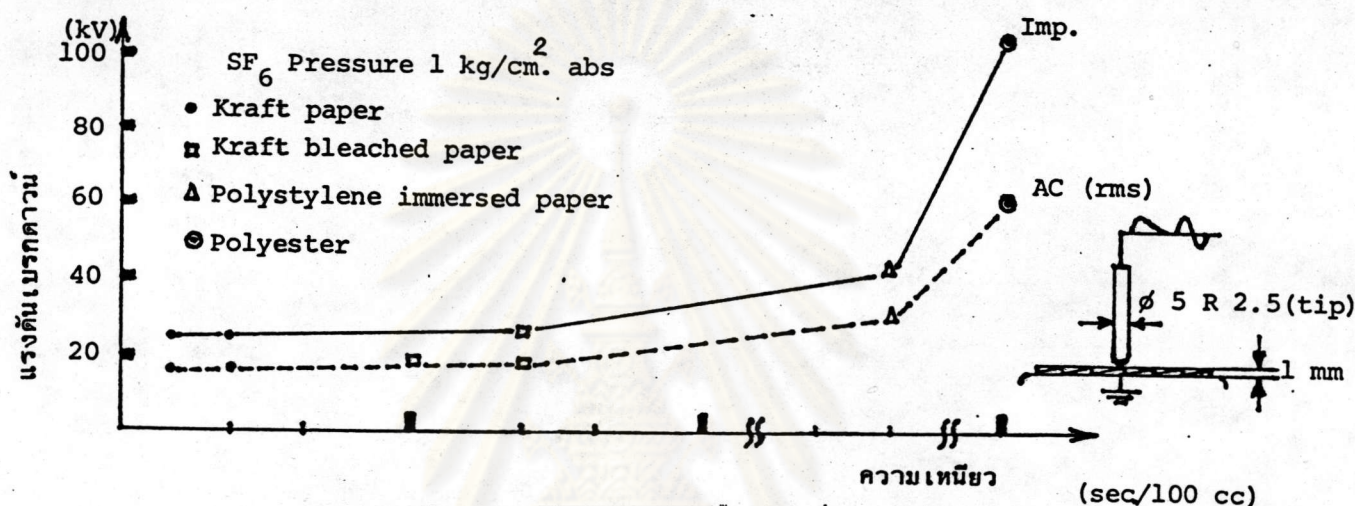


รูปที่ 2.14 สัมประสิทธิ์การระบายความร้อนของก๊าซ SF_6 เปรียบเทียบกับสารฉนวนอื่น [6]

หม้อแปลงไฟฟ้าที่ฉนวนด้วยก๊าซ SF_6 โดยปกติแล้วจะออกแบบให้อุณหภูมิเพิ่มของขดลวดไม่เกิน 75°C ซึ่งเป็นการฉนวนในชั้น E [6] เนื่องจากฟิล์มโพลีเอสเตอร์เป็นวัสดุฉนวนที่ทนความร้อนได้สูง คือ มีอุณหภูมิใช้งานยอมให้ได้สูงสุดถึง 150°C และอุณหภูมิเพิ่มของก๊าซ SF_6 ด้านบนของตัวถังไม่เกิน 55°C [6] เพื่อป้องกันอันตรายจากความร้อนเมื่อมีคนไปสัมผัสตัวถังหม้อแปลงโดยบังเอิญ ซึ่งในการออกแบบกำลังสูญเสียต่อหน่วยพื้นที่ของขดลวดจะประมาณ 400 W/m^2 [7] และกำลังสูญเสียต่อหน่วยพื้นที่ของตัวถัง (แบบคิกคริบระบายความร้อน) ประมาณ 158 W/m^2 [6,9] ซึ่งตัวเลขทั้งสองค่านี้เป็นตัวเลขที่ได้จากการทดลองโดยใช้ความดันของก๊าซ SF_6 เท่ากับ $2.2 \text{ kg/cm}^2 \text{ abs}$

2.6.4 วัสดุฉนวนในก๊าซ SF₆

ฉนวนแข็งที่ใช้ในหม้อแปลงฉนวนด้วยก๊าซ SF₆ ส่วนมากจะใช้พวกพลาสติก โดยเฉพาะฟิล์มโพลีเอสเตอร์ เหตุผลที่ไม่ใช้กระดาษฉนวนที่ใช้ในหม้อแปลงน้ำมัน คือ กระดาษฉนวนจะดูดความชื้นทำให้ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซ SF₆ ลดลง ดังในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ลักษณะแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนต่างๆ ในก๊าซ SF₆ [7]

จากรูปที่ 2.15 จะเห็นว่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนในก๊าซ SF₆ จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเหนียวของวัสดุฉนวน วัสดุจำพวกพลาสติกจะมีความเหนียวมากกว่าวัสดุจำพวกเส้นใย เช่น กระดาษคราฟต์ กระดาษโพลีเอสเตอร์ เป็นต้น และมักจะใช้พลาสติกประเภทฟิล์มโพลีเอสเตอร์เป็นฉนวนแข็งในหม้อแปลงฉนวนด้วยก๊าซ SF₆ เนื่องจากมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงและทนความร้อนได้สูง อีกทั้งยังมีคุณสมบัติที่เหมาะสมอีกหลายอย่าง ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.2

คุณสมบัติของฟิล์มโพลีเอสเตอร์ที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.2 ข้างล่างนี้ เป็นคุณสมบัติของเมลินเอกซ์ 226 (Melinex 226) ซึ่งเป็นชื่อผลิตภัณฑ์ของ ICI* สำหรับใช้เป็นฉนวนไฟฟ้า มีความหนาในเชิงการค้าหลายขนาด เช่น ความหนา 125, 190, 250 และ 350 μm เป็นต้น

* ICI ย่อมาจาก Imperial Chemical Industries

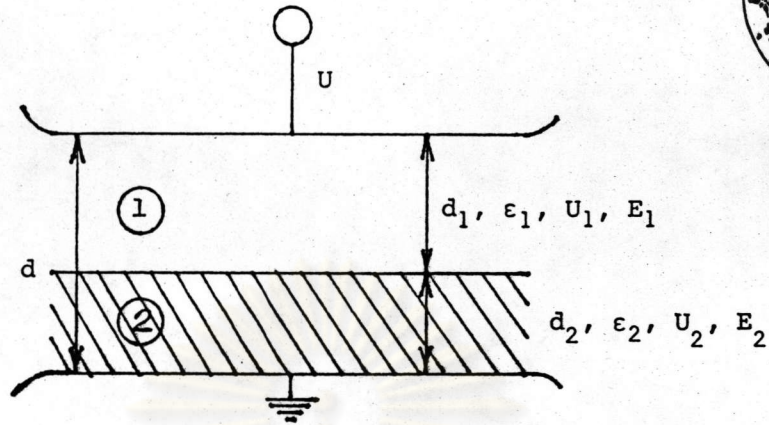
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทั่วไปของฟิล์มเมลิเน็กซ์ 226 [11]

ความคงทนต่อแรงดึง	$\geq 20,000$ psi
ความหนาแน่น	1.3850-1.399 g/cm ³
การดูดความชื้น	ไม่ดูดความชื้น
เสถียรภาพทางมิติ ที่ 150°C	2 %
200°C	7 %
จุดหลอมเหลว	265°C
ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกที่ 23°C, 50 Hz	3.26
100°C, 50 Hz	3.35
แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก (tg δ) ที่ 23°C, 50 Hz	0.002
100°C, 50 Hz	0.007
ค่าแรงดันเบรกควานซ์ของ ความหนา 75 μm	12 kV
ความหนา 125 μm	16 kV
ความหนา 350 μm	26 kV

2.6.4.1 ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างฟิล์มโพลีเอสเตอร์กับก๊าซ SF₆

การฉนวนด้วยฟิล์มโพลีเอสเตอร์ในก๊าซ SF₆ เป็นการใช้นวนแข่งร่วมกับก๊าซ ซึ่งเป็นฉนวนต่างชนิดกันรวมทั้งมีเปอร์มิตติวิตี (Permittivity) และค่าความต้านทานจำเพาะต่างกันย่อมทำให้เกิดรอยต่อของชั้นฉนวน อันเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือหักเหของเส้นทางสนามไฟฟ้าและความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field stress) ในชั้นฉนวนต่างกัน ในกรณีที่เป็ฉนวนไฟฟ้าจากแรงดันกระแสสลับ การกระจายของสนามไฟฟ้าจะกำหนดด้วยค่า เปอร์มิตติวิตีของฉนวนที่ใช้ร่วมกัน ซึ่งจะต้องระวังในการออกแบบว่าความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นก๊าซ SF₆ จะต้องไม่เกินความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของก๊าซ SF₆ ที่ความดันที่ได้ออกแบบไว้ เพื่อมิให้เกิดคิสซาร์จบางส่วนตลอดเวลาใช้งาน อันจะท

ให้เกิดพลังงานสูญเสีย และอายุการใช้งานของหม้อแปลงสั้นลง

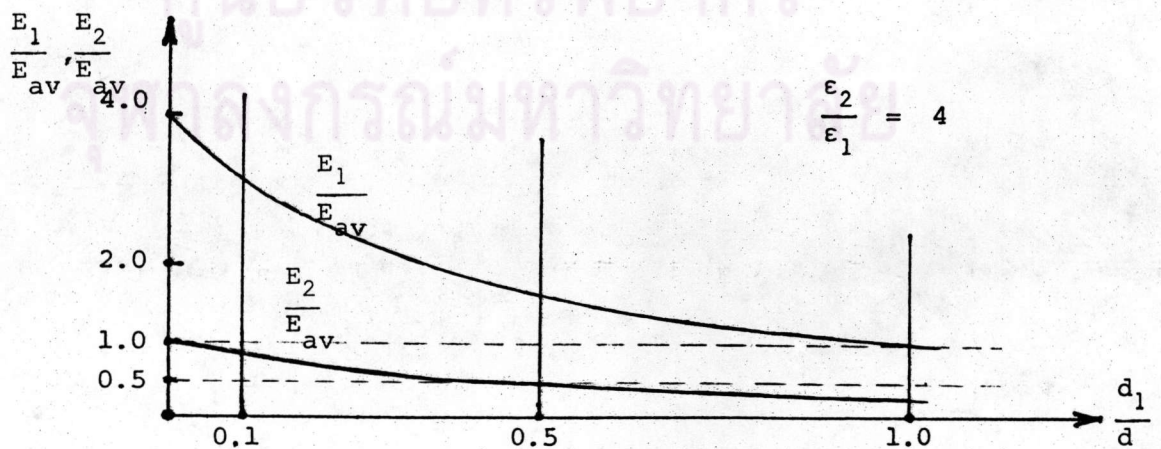


รูปที่ 2.16 ชั้นฉนวนวางซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

จากรูปที่ 2.16 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนทั้งสอง ดังนี้ [3]

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$$

จะเห็นว่าความเครียดสนามไฟฟ้า E_1 จะมากกว่า E_2 ตามอัตราส่วน $\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$ เมื่อ $\epsilon_2 > \epsilon_1$ ถ้าเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าในส่วนฉนวนแต่ละชั้น จะเห็นได้ว่าถ้าในส่วนฉนวนที่มีค่า ϵ ต่ำยิ่งบาง สนามไฟฟ้าจะยิ่งสูงมากยิ่งขึ้น ดังในรูปที่ 2.17

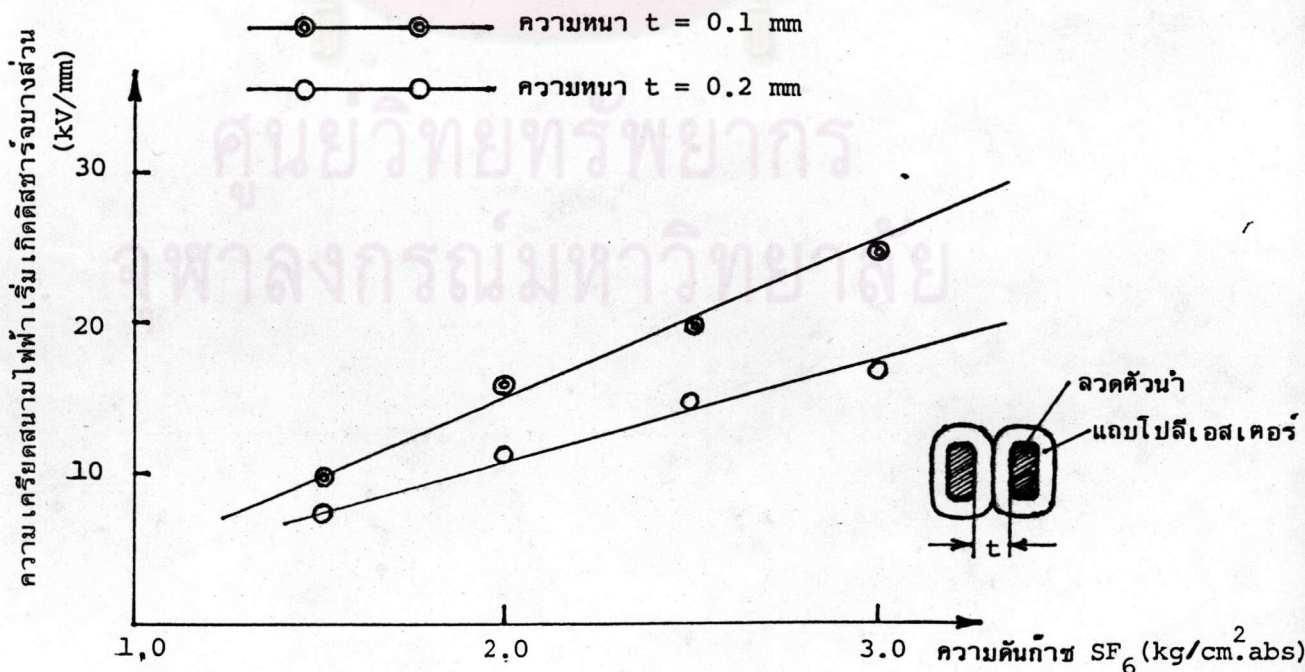


รูปที่ 2.17 เปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้นกับค่าเฉลี่ย

ฟิล์มโพลีเอสเตอร์มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประมาณ 3.3 และของก๊าซ SF₆ ประมาณ 1.0 ดังนั้นต้องระวังความเครียดสนามไฟฟ้าในส่วนที่เป็นก๊าซ SF₆ ไม่ให้เกินค่าความเครียดสนามไฟฟ้าคงทนของก๊าซ SF₆ อันเนื่องมาจากอัตราส่วนของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกระหว่างฟิล์มโพลีเอสเตอร์และก๊าซ SF₆ ประมาณ 3.3 รายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างชั้นฉนวนของโพลีเอสเตอร์กับก๊าซ SF₆ ที่วางสลับกันในแรงดันกระแสสลับของอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบ ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก.

2.6.4.2 ลักษณะสมบัติของดิสชาร์จบางส่วนของฟิล์มโพลีเอสเตอร์ในก๊าซ SF₆

ดิสชาร์จบางส่วนของฟิล์มโพลีเอสเตอร์ในก๊าซ SF₆ เกิดจากการวางฟิล์มโพลีเอสเตอร์ตัดเส้นศักย์ไฟฟ้า, ความสกปรกรวมทั้งสิ่งเจือปนต่างๆ ที่ทำให้ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซ SF₆ ลดลง และฟิล์มบางของก๊าซ SF₆ ระหว่างชั้นของโพลีเอสเตอร์เป็นต้น ทำให้ก๊าซ SF₆ เกิดดิสชาร์จและแตกตัวให้สารประกอบชนิดใหม่ เช่น SF₂, S₂F₂ เป็นต้น ซึ่งสารเหล่านี้จะทำลายฟิล์มโพลีเอสเตอร์ และสารฉนวนอื่นอีกหลายชนิดรวมทั้งโลหะบางชนิดด้วย ดังนั้นในการออกแบบต้องหลีกเลี่ยงการเกิดดิสชาร์จบางส่วนเสมอที่แรงดันใช้งาน รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะของดิสชาร์จบางส่วน ของฟิล์มโพลีเอสเตอร์ในก๊าซ SF₆ ที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 2.18 ลักษณะสมบัติของดิสชาร์จบางส่วนของฟิล์มโพลีเอสเตอร์

ระหว่างลวดตัวนำในก๊าซ SF₆ [7]

จากรูปที่ 2.18 สามารถสรุปได้ว่าลักษณะสมบัติของดิสชาร์จบางส่วนของฟิล์มโพลี-เอสเทอร์ในก๊าซ SF₆ จะเกิดได้ง่ายขึ้น ถ้าใช้ฟิล์มโพลีเอสเทอร์ที่มีความหนามากขึ้น (ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มต้นต่ำลง) และค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มต้นนี้จะแปรโดยตรงกับความดันของก๊าซ SF₆ ซึ่งเป็นผลมาจากค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของก๊าซ SF₆ ที่สลับกับชั้นของฟิล์มโพลีเอสเทอร์ที่มีความมากขึ้นในกรณีที่ใช้ฟิล์มโพลีเอสเทอร์ที่มีความหนามากขึ้น (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก.) ค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของก๊าซ SF₆ ตรงบริเวณฟิล์มบางระหว่างชั้นของโพลีเอสเทอร์จะเพิ่มขึ้นจากค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของช่องแกปที่เป็นก๊าซกว้างๆ สำหรับกรณีของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของก๊าซ SF₆ จะเป็นไปตามสมการ [3]

$$E_b = 87.8 p + \frac{0.67}{d}$$

เมื่อ E_b = ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกควาน์ของก๊าซ SF₆ ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (kV/cm)

p = ความดันก๊าซ SF₆ (bar)

d = ความกว้างของช่องแกป (cm)

2.7 ค่ากำหนดของหม้อแปลงทดสอบโดยทั่วไป

หม้อแปลงทดสอบจะกำหนดด้วย

- แรงดันที่ป้อนเข้าและแรงดันที่จ่ายออก
- กระแสที่ป้อนเข้าและกระแสที่จ่ายออก
- กำลังที่กำหนดของหม้อแปลง
- แรงดันลัดวงจร* (Short circuit voltage or Impedance voltage)
- ระดับแรงดันที่เริ่มเกิดโคโรนา
- ความถี่และรูปคลื่นแรงดัน
- ลักษณะการฉนวนและโครงสร้าง

* แรงดันลัดวงจร หมายถึง อัตราส่วนระหว่างแรงดันป้อนเข้าที่ค่ากระแสที่กำหนดขณะที่ด้านจ่ายออกลัดวงจร กับแรงดันที่กำหนดด้านป้อนเข้า

2.7.1 ขนาดแรงดันของหม้อแปลงทดสอบ

การกำหนดขนาดแรงดันของหม้อแปลงทดสอบขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันทดสอบสูงสุดที่มีโอกาสจะใช้ อย่างน้อยที่สุดจะต้องสูงกว่าค่าแรงดันคงอยู่ได้ (Withstand Voltage) ของวัสดุทดสอบที่ใช้กับระบบแรงดันที่กำหนดให้ ดังตัวอย่างในตารางที่ 1.1 ที่ได้กล่าวแล้ว และยิ่งในกรณีที่ต้องการทดสอบให้เกิดความไหม้ตามผิว เกิดเบรกดาว์น หรือเจาะผ่านทะลุ แรงดันที่ใช้ทดสอบจะต้องสูงมากขึ้นให้เพียงพอที่จะทำให้เกิดปรากฏการณ์นั้น และเมื่อคำนึงถึงประสิทธิภาพและอายุการใช้งาน แรงดันที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบควรจะสูงกว่าแรงดันทดสอบประมาณ 10 ถึง 20 %

ทางด้านแรงดันป้อนเข้าของหม้อแปลงทดสอบ (แรงดันค่า) ควรเลือกกำหนดตามระบบแรงดันที่มีใช้กันอยู่ทั่วไป เช่น 220, 380 หรือ 500 V

รูปคลื่นแรงดันทดสอบกระแสสลับที่เปลี่ยนไปตามเวลา $u(t)$ อาจจะไม่แตกต่างไปจากรูปคลื่นไซน์ได้ ฉะนั้นลักษณะของแรงดันทดสอบอาจอธิบายได้ด้วยค่ายอด (Peak Value) และค่าอาร์ เอ็ม เอส (rms value) ซึ่งหาได้จาก

$$U_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}$$

เมื่อ T คือ เวลาช่วงคาบของแรงดัน

อย่างไรก็ตามรูปคลื่นแรงดันนี้อาจแตกต่างไปจากรูปคลื่นไซน์ได้ไม่เกิน 5 % ของค่ายอดรูปคลื่นพื้นฐาน

2.7.2 กระแสที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบ

กระแสที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบขึ้นอยู่กับวัสดุทดสอบ กล่าวคือ วัสดุทดสอบบางอย่างใช้กระแสเล็กน้อย บางอย่างใช้กระแสมาก ฉะนั้นหม้อแปลงทดสอบจะต้องสามารถจ่ายกระแสให้กับวัสดุทดสอบได้ ตัวอย่างกระแสสูงสุดที่ใช้ทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 กระแสสูงสุดที่ใช้ทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่กำลัง [3]

วัสดุทดสอบ	กระแสที่ต้องการใช้ทดสอบ
ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า (Insulators) ปลอกฉนวนนำสายไฟ (Bushings) หม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับมิเตอร์ (CT, PT) เครื่องตัดต่อวงจร (CB)	0.1 ถึง 0.5 A
หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กะแปซิเตอร์	0.5 ถึง 1 A
เคเบิล	1 A หรือมากกว่า

2.7.3 ขนาดกำลังของหม้อแปลงทดสอบ

การฉนวนทั้งหลายในค่านไฟฟ้าแรงสูงอาจถือได้ว่าเป็นลักษณะของค่าความจุไฟฟ้า คือ กะแปซิแตนซ์ ฉะนั้นโวลตจของหม้อแปลงทดสอบจึงเป็นแบบกะแปซิเตอร์ หากการฉนวนไม่ดีพอ ทนต่อแรงดันไม่ได้ก็จะเกิดเบรคควาน์ สปาร์ก เจาะทะลุ ลัดวงจร กระแสลัดวงจรจะตองสูง มากพอ เพื่อให้สามารถสังเกตเห็นความบกพร่องของการฉนวนได้ชัดเจน แต่กำลังไฟฟ้าลัดวงจร ก็ไม่ควรสูงเกินไป เพราะจะทำให้เกิดการระเบิดขึ้นได้ ฉะนั้นกำลังของหม้อแปลงและกำลังไฟฟ้า ลัดวงจรต้องให้สอดคล้องกัน กำลังไฟฟ้าที่จะต้องใช้ในการทดสอบอาจคำนวณได้จากสมการ

$$\begin{aligned}
 S_t &= \omega C U_t^2 \\
 &= 2\pi f C U_t^2 \times 10^{-9} \quad \text{kVA}
 \end{aligned}$$

เมื่อ C คือ ค่ากะแปซิแตนซ์รวม เป็น pF

U_t คือ แรงดันทดสอบ เป็น kV_{rms}

f คือ ความถี่ของแรงดัน เป็น Hz

แต่กำลังไฟฟ้าที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบจะต้องมีค่าสูงกว่ากำลังไฟฟ้าที่จะต้องป้อนให้กับโหลด นั่นคือ ควรจะต้องคำนึงถึงแฟกเตอร์ปลอดภัย (Safety Factor) ด้วย เพื่อให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงทดสอบยาวนานขึ้น

ค่าคะแบริแดนซ์ของวัสดุทดสอบอาจประมาณได้ดังต่อไปนี้ [3]

- ลูกถ้วยฉนวนธรรมดา	10 100	pF
- ปลอกฉนวนนำสายไฟ	150 400	pF
- หม้อแปลงกระแส	200 600	pF
- เคเบิลแรงสูง (ต่อความยาว 1 เมตร)	150 300	pF
- หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง	1 MVA ประมาณ 1,000	pF
	100 MVA ประมาณ 10,000	pF
- อุปกรณ์วัดแรงดันโวลเตจดีไวเคอร์แบบคะแบริเตอร์	50 500	pF
- สายค่อวงจรแรงสูง (ต่อเมตร)	5 15	pF

2.7.4 กำลังและแรงดันไฟฟ้าลัดวงจร

กำลังไฟฟ้าลัดวงจรของหม้อแปลงทดสอบจะขึ้นอยู่กับแรงดันลัดวงจร (ϵ_{sc}) ของหม้อแปลงทดสอบ ซึ่งมักจะแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์มีค่าประมาณเท่ากับรีแอคแตนซ์และไม่ควรเกิน 30 % ฉะนั้นในการค่อขึ้นบันได หม้อแปลงแต่ละตัวควรจะต้องออกแบบให้ ϵ_{sc} มีค่าต่ำพอเพื่อว่าเมื่อค่อขึ้นบันไดแล้ว ϵ_{sc} จะไม่เกิน 30 % เช่น ใช้หม้อแปลง 3 ตัว แต่ละตัวจะมี ϵ_{sc} ประมาณ 5 % การที่จำกัด ϵ_{sc} ไม่ให้สูงมากเกินไปเพื่อป้องกันอันตรายจากแรงดันเกิน และการเกิดรีโซแนนซ์ เนื่องจากโหลดของหม้อแปลงทดสอบส่วนมากมักจะเป็นคะแบริแดนซ์ แต่อย่างไรก็ตาม ϵ_{sc} ก็ไม่ควรค่าเกินไป ทั้งนี้เพื่อมิให้กระแสลัดวงจรและกำลังไฟฟ้าลัดวงจรสูงมากเกินไป ซึ่งจะเป็นอันตรายค่อหม้อแปลงทดสอบได้

เมื่อกำหนดกระแสที่กำหนด I_n และค่าแรงดันลัดวงจร ϵ_{sc} ให้ จะสามารถคำนวณกระแสลัดวงจร I_{sc} ที่ค่าแรงดันกำหนด U_n ได้

$$I_{sc} = \frac{I_n}{\epsilon_{sc}} \times 100$$

หม้อแปลงทดสอบส่วนมากจะจำกัด I_{sc} ประมาณไม่เกิน 20 เท่าของ I_n

กระแสเสิร์จไดนามิก (Dynamic Surge Current) I_{dy} อาจคำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} I_{dy} &= \sqrt{2} \times 1.8 \times I_{sc} \\ &= 2.5 I_{sc} \end{aligned}$$

ซึ่งจะเป็นตัวชี้บอกให้รู้ถึงขนาดแรงระเบิดออกที่เกิดขึ้นแก่ขดลวด ค่ากำลังไฟฟ้าลัดวงจรจะประมาณได้จาก

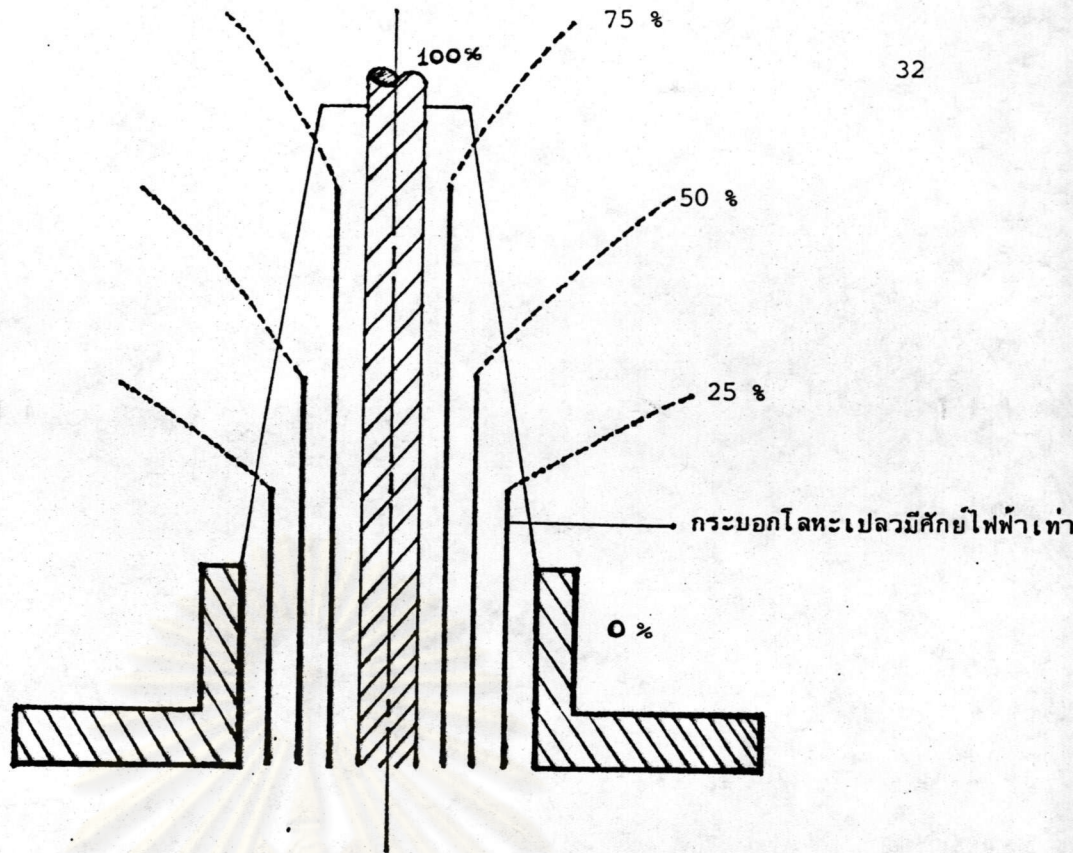
$$S_{sc} = \frac{S_n}{\epsilon_{sc}} \times 100$$

2.8 ปลอกฉนวนนำสายแบบคอนเดนเซอร์

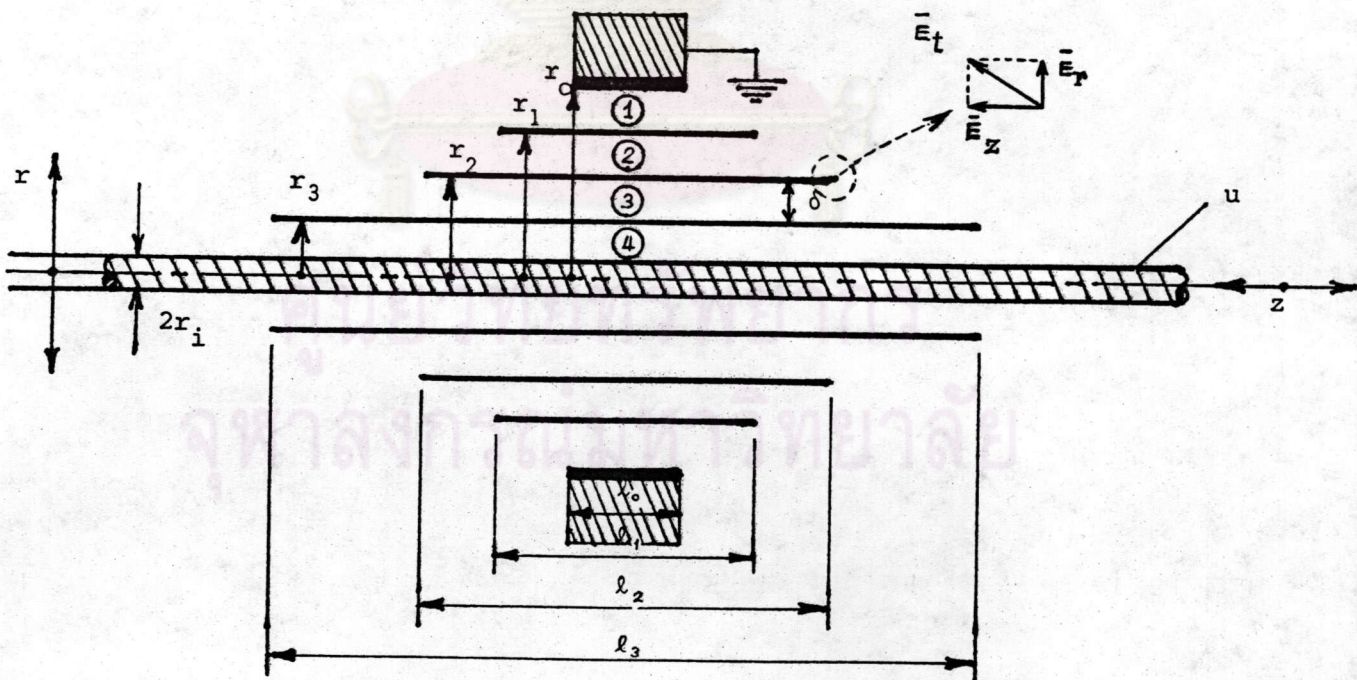
ในกรณีที่ตัวถังเป็นโลหะต้องใช้ปลอกฉนวนนำสายสำหรับทางออกของสายแรงสูงและสายของขดลวดค้ำควม ถ้าแรงดันสูงกว่า 30 kV ขึ้นไป ปลอกฉนวนนำสายจะเป็นแบบคอนเดนเซอร์ เพื่อลดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงที่บริเวณปลอกฉนวนนำสายยึดกับปากช่องของตัวถัง

หลักการโดยย่อของปลอกฉนวนนำสายแบบคอนเดนเซอร์ คือ ในเนื้อฉนวนของปลอกฉนวนนำสายแบบนี้ จะมีแผ่นโลหะเปลวสังแทรกเป็นชั้นๆ ในลักษณะทรงกระบอกแกนร่วมกับตัวนำ นั่นคือ แผ่นโลหะเปลววางมันไปตามผิวฉนวนศักย์ไฟฟ้าเท่า (Equipotential Surface) แผ่นโลหะเปลวที่ใส่สังเข้าไปในเนื้อฉนวนนี้ทำให้เกิดคะแพซิแตนซ์เป็นชั้นๆ เป็นตัวควบคุมการกระจายแรงดันตามผิวฉนวนให้สม่ำเสมอ ดังในรูปที่ 2.19 ก. เพื่อป้องกันมิให้เกิดคิสซาร์จบางส่วนตามผิวฉนวนในขณะที่ใช้งาน โดยตำแหน่งความยาวของแผ่นโลหะเปลวที่จะฝังในเนื้อฉนวนนั้น จะต้องให้พอเหมาะ ดังในรูปที่ 2.19 ข. ตามเงื่อนไขต่อไปนี้ [17]

$$\frac{l_0}{\ln(r_0/r_1)} = \frac{l_1}{\ln(r_1/r_2)} = \dots \dots \frac{l_n}{\ln(r_n/r_{n+1})} \quad (2.1)$$



ก) แรงดันกระจายของปลอกฉนวนนำสาย



ข) การวางตำแหน่งและความยาวของเปลวโลหะทรงกระบอก

รูปที่ 2.19 ปลอกฉนวนนำสายแบบคอนเดนเซอร์

ถ้าความหนาแน่นระหว่างชั้นของแผ่นโลหะเปลว δ มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับรัศมีของปลอกฉนวนนำสาย สมการ (2.1) สามารถเขียนอย่างประมาณเพื่อให้ง่ายขึ้นดังสมการ (2.2)

$$r_0 \ell_0 = r_1 \ell_1 = r_n \ell_n \quad (2.2)$$

ในการออกแบบสร้างปลอกฉนวนนำสายแบบคอนเดนเซอร์ จะต้องคำนึงถึงความเครียดสนามไฟฟ้า ดังต่อไปนี้

1) ความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวรัศมี จะเป็นตัวกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปลอกฉนวนนำสาย เพื่อให้ทนต่อแรงดันเจาะทะลุที่ค่าแรงดันกำหนดได้ และความหนาของฉนวนแต่ละชั้นจะขึ้นกับความคงทนของฉนวนคือความเครียดสนามไฟฟ้า จากรูปที่ 2.19 ข. จะคำนวณค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเฉลี่ยของแต่ละชั้นตามแนวรัศมีได้จากสมการ (2.3) ความเครียดสนามไฟฟ้าเฉลี่ยของแต่ละชั้นตามแนวรัศมี

$$\bar{E}_r = \frac{U}{(r_0 - r_i)} \quad (2.3)$$

2) ความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวน (ตามแนวแกนของฉนวน) จะเป็นตัวกำหนดความยาวของปลอกฉนวนนำสาย เพื่อไม่ให้เกิดความไหม้ตามผิวหรือเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามผิวฉนวนที่แรงดันกำหนด และความยาวของปลอกฉนวนนำสายในฉนวนเหลวหรือก๊าซจะขึ้นกับความคงทนของฉนวน คือความเครียดสนามไฟฟ้า จากรูปที่ 2.19 ข. จะคำนวณค่าความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวนที่ปลายกระบอกโลหะเปลวได้จากสมการ (2.4)

ความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวนที่ปลายกระบอกโลหะเปลว

$$\bar{E}_z = \frac{U}{(r_0 - r_i)} \times \frac{r^2}{r_0 \ell_0} = \bar{E}_r \times \frac{r}{r_0 \ell_0} \quad (2.4)$$

ความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวนเฉียง

$$\bar{E}_t = \sqrt{\bar{E}_r^2 + \bar{E}_z^2}$$