บทที่ 2

ทฤษฎีของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่าย

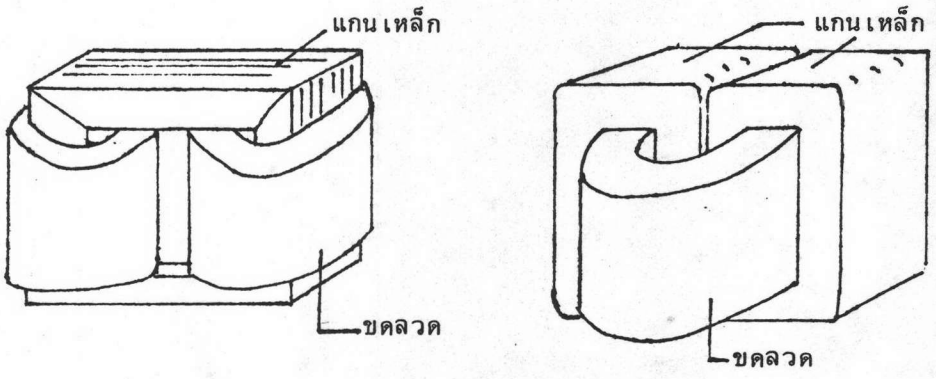
หม้อแปลง เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงกระแสหรือแรงดันในวงจรกระแสสลับให้มีขนาดสูงขึ้นหรือต่ำลง ส่วนสำคัญของหม้อแปลงคือ วงจรแม่เหล็ก ประกอบขึ้นจากแผ่น เหล็กซิลิคอน เป็นแกนแม่ เหล็ก วงจรไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วยขดลวดพันรอบแกนแม่ เหล็ก และการฉนวนซึ่งประกอบด้วยฉนวนแข็งร่วมกับฉนวน เหลว หรือฉนวนแข็งร่วมกับฉนวนก๊าซ ทั้งฉนวน เหลวและฉนวนก๊าซนี้นอกจากจะทำหน้าที่ เป็นฉนวนแล้วยังทำหน้าที่ เป็นตัวระบายความร้อนด้วย

หม้อแปลงที่ใช้ในระบบจำหน่ายมักจะมีขนาดตั้งแต่ 5 kVA จนถึง 2000 kVA ตัว เล็กจะเป็น เฟส เดียว ตัวใหญ่จะ เป็น 3 เฟส (ใหญ่กว่า 50 kVA) ใช้ในการลดแรงดันลงมาจากระบบแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่ายมา เป็นขนาดแรงดันที่ใช้ตามบ้าน หรืออาจแปลงแรงดันจากระบบสายส่งมา เป็นแรงดันในระบบจำหน่ายก็ได้ ด้านแรงดันสูงอาจมีขนาดแรงดัน 12, 22(24), 33 และ 69 kV

2.1 โครงสร้างของหม้อแปลง

2.1.1 แกน เหล็ก

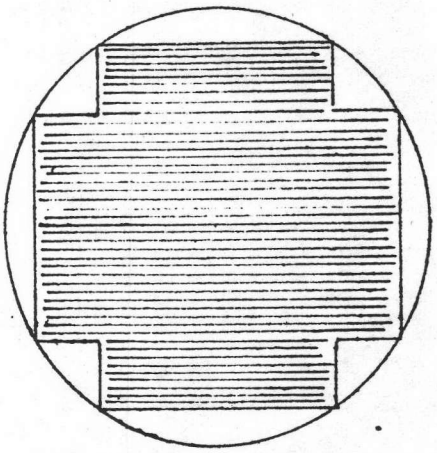
แกน เหล็กของหม้อแปลงสร้างจากแผ่น เหล็กซิลิคอนบาง ๆ นำมา เรียง กัน มีโครงสร้างหลายชนิด แต่ทุกชนิดก็จะออกแบบให้ฟลักซ์แม่ เหล็กผ่านแผ่น เหล็กในแนวที่ทำให้คุณสมบัติของแม่ เหล็กดีที่สุด ชนิดของแกน เหล็กที่นิยมใช้กันมีอยู่ 2 ชนิด คือ แบบคอร์กับแบบ เชลล์ดังแสดงในรูป 2.1



รูป 2.1 ชนิดของแกนเหล็ก

แกนเหล็กแบบคอร์นั้นขดลวดจะหุ้มแกนเหล็กและมีขดลวดมากกว่า 1 ขดขึ้นไป ส่วนแกนเหล็กแบบเชลล์นั้นแกนเหล็กจะหุ้มขดลวดและแกนเหล็กจะมีตั้งแต่สองวงขึ้นไป ลักษณะสมบัติของแกนเหล็กแบบคอร์คือ จะมีความยาวของวงจรแม่เหล็กยาวและความยาวรอบโดยเฉลี่ยของขดลวดสั้น โครงสร้างแกนเหล็กแบบคอร์ทำให้ใช้แกนเหล็กที่มีพื้นที่ภาคตัดขวางเล็กกว่า และสามารถมีจำนวนรอบได้มากกว่าแบบเชลล์ ส่วนแกนเหล็กแบบเชลล์จะกลับกัน

หม้อแปลงที่แกนเหล็กเป็นแบบคอร์ รูปร่างของพื้นที่ภาคตัดขวางอาจเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือสี่เหลี่ยมจัตุรัสสำหรับหม้อแปลงขนาดเล็ก ส่วนหม้อแปลงที่มีขนาดใหญ่ขึ้นแรงดันสูงขึ้นจะมีพื้นที่ภาคตัดขวางเป็นแบบรูปเหลี่ยมอัดในวงกลม หรือที่เรียกว่าแบบครูซิฟอร์ม (cruciform) ดังแสดงในรูป 2.2 เป็นแบบ 2 ขั้น สำหรับแกนเหล็กที่มีพื้นที่ภาคตัดขวางใหญ่ขึ้นจะมีการแบ่งขั้นดีขึ้น เพื่อลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสำหรับพื้นที่ค่าหนึ่งให้มีขนาดเล็กลง ทำให้ประหยัดเหล็กและลวดทองแดง ลดพลังงานสูญเสียในทองแดงด้วย นอกจากนี้การทำให้แกนเหล็กมีลักษณะกลมมากขึ้นจะมีผลดีในแง่ของขดลวด มีเสถียรภาพทางด้านแรงกลดีขึ้นสำหรับหม้อแปลงขนาดใหญ่ เพราะขดลวดจะต้องทนต่อความเครียดทางด้านแรงกลแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดการลัดวงจร และแรงนี้จะมีทิศในแนวรัศมีของขดลวดถ้าขดลวดเป็นวงกลม ทำให้รูปร่างของขดลวดไม่เปลี่ยนแปลง เพราะมีแรงเท่ากันทุก ๆ ด้าน แต่ถ้าขดลวดพันในลักษณะสี่เหลี่ยมผืนผ้าแรงที่เกิดขึ้นจะตั้งฉากกับขดลวด มีผลทำให้รูปร่างของขดลวดเปลี่ยนไป



รูป 2.2 แกนเหล็กแบบรูปเหลี่ยมอัดในวงกลม

ในการที่จะหาขนาดแต่ละส่วนของรูปเหลี่ยมอัดในวงกลมเพื่อที่จะได้พื้นที่มากที่สุดสำหรับเส้นผ่านศูนย์กลางที่กำหนดให้ค่าหนึ่งนั้น รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก. การคำนวณหาขนาดของเหล็กซิลิคอนที่จะใช้จริงนั้นมีแฟกเตอร์ 2 ประการที่ควรทราบคือ แฟกเตอร์พื้นที่แกนเหล็ก (core space factor) K_{cs} และแฟกเตอร์เนื้อเหล็กแผ่น (laminating factor) K_l K_{cs} คืออัตราส่วนพื้นที่ภาคตัดขวางของแกนเหล็กอัดในวงกลมต่อพื้นที่ของวงกลมนั้น K_l คืออัตราส่วนของพื้นที่ภาคตัดขวางของเนื้อเหล็กซิลิคอนจริงต่อพื้นที่ที่วัดได้ของแกนเหล็กนั้น

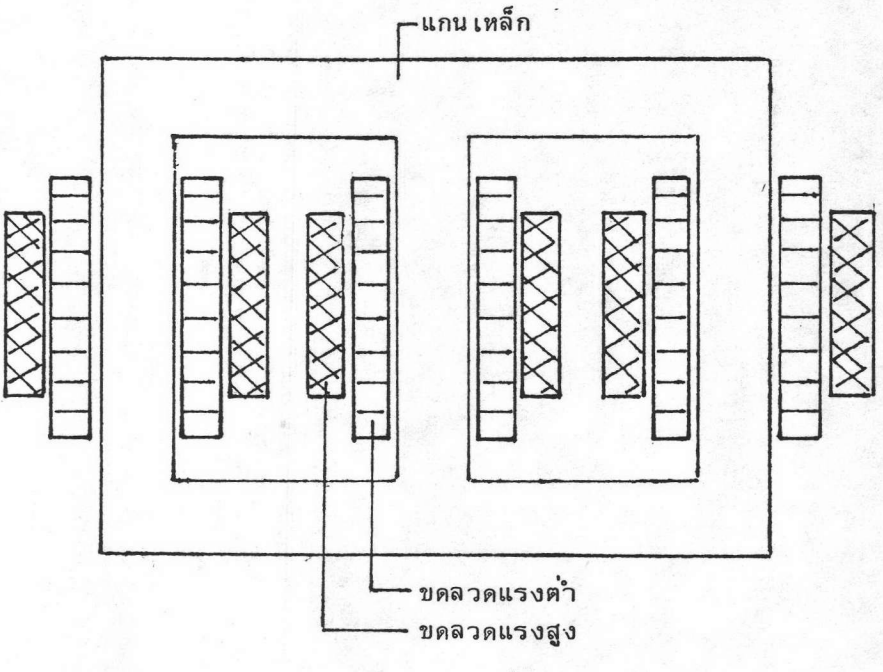
2.1.2 <u>ขดลวด</u>

ขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วยขดลวดแรงต่ำและขดลวดแรงสูงจะต้องออกแบบให้มีคุณสมบัติทางด้านไฟฟ้าดีที่สุดเท่าที่จะทำได้ และในขณะเดียวกันจะต้องมีความแข็งแรงทางกลพอที่จะทนต่อแรงที่เกิดขึ้นขณะเกิดลัดวงจร มีการระบายความร้อนที่ดีเพื่อที่จะไม่เกิดปัญหาอุณหภูมิสูงเกินไป หรือมีจุดใดจุดหนึ่งร้อนผิดปกติหรือเกินขีดจำกัดตามมาตรฐาน IEC Publ.No. 76-1976 ที่กำหนดไว้ว่า อุณหภูมิเพิ่มขึ้นของขดลวดหม้อแปลงจะต้องไม่เกิน $55^{\circ}C$ สำหรับฉนวนคลาสเอ และไม่เกิน $75^{\circ}C$ สำหรับฉนวนคลาสอี อุณหภูมิของหม้อแปลงนี้สามารถทราบได้โดยวิธีวัดค่าความต้านทานหรือโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์วัด

วิธีการพันขดลวดนั้นส่วนใหญ่จะเป็นแบบที่เรียกว่า คอนเซนตริก (concentric type) โดยทั่วไปจะพันขดลวดแรงต่ำหนึ่งชั้นและพันอยู่วงในติดกับแกนเหล็ก ถ้าจะพันมากกว่าหนึ่งชั้นมักจะใช้ประโยชน์ในแง่ต้องการระบายความร้อน ส่วนขดลวดแรงสูงก็จะพันรอบนอกของขดลวดแรงต่ำอีกทีหนึ่ง วิธีการนั้นมีหลายแบบแล้วแต่ระดับแรงดันของขดลวดด้วย ถ้าเป็นแรงดันไม่สูงมากนักขดลวดแรงสูงก็จะพันยาวตลอดหลาย ๆ ชั้น แต่ความหนาของขดลวดจะต้องไม่มากเกินไปเพื่อให้มีการระบายความร้อนได้ดี โดยแบ่งขดลวดเป็นตอน ๆ แยกด้วยช่องระบายความร้อนก็ได้ หรืออาจจะพันยาวแบบทรงกระบอกท่อนสั้น ๆ แต่ละท่อนแยกด้วยช่องระบายความร้อน แบบหลังนี้แรงดันตกคร่อมระหว่างชั้นของขดลวดจะมีน้อยกว่า ทำให้ใช้ฉนวนระหว่างชั้นลดลง

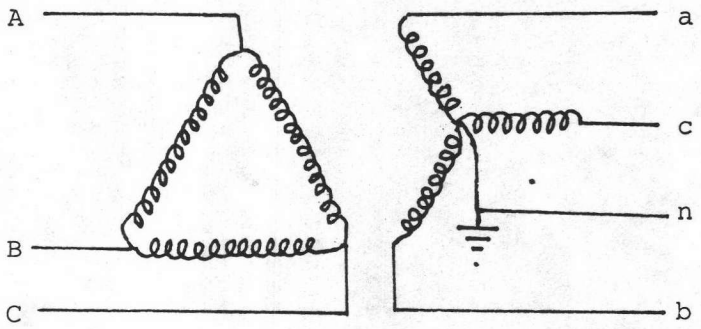
ขนาดพื้นที่ภาคตัดขวางของขดลวดกำหนดด้วยความหนาแน่นของกระแส ถ้ากระแสสูงมากพื้นที่ภาคตัดขวางก็ต้องโตมากขึ้น ในกรณีเช่นนี้มักจะใช้ลวดตัวนำหลายเส้นขนานกันเพื่อป้องกันการสูญเสีย เนื่องจากกระแสไหลวน ดังนั้นในเวลาพันขดลวดเพื่อที่จะให้ตัวนำที่อยู่ข้างนอกและข้างในมีค่ารีแอกแตนซ์เท่ากันโดยการให้กระแสไหลเฉลี่ยเท่า ๆ กัน จึงต้องมีการพันสลับที่ขดลวดในขณะพันด้วย เป็นการสลับตำแหน่งให้ขดลวดที่อยู่ข้างในออกมาข้างนอก และขดลวดข้างนอกย้ายไปอยู่ข้างใน โดยทั่วไปจะมีการสลับที่เมื่อพันขดลวดไปได้ครึ่งหนึ่งของจำนวนรอบทั้งหมด

หม้อแปลง 3 เฟสแต่ละเฟสทั้งขดลวดแรงต่ำและแรงสูงจะพันอยู่บนแต่ละขาของแกนเหล็ก ดังรูป 2.3



รูป 2.3 แกนเหล็กและขดลวดของหม้อแปลง 3 เฟส

การต่อขดลวดของหม้อแปลง 3 เฟสอาจต่อได้หลายแบบ สำหรับหม้อแปลงที่มีแรงดันสูงระดับขั้นต้นจะเป็นแบบ Y-Δ โดยด้านแรงสูงต่อเป็น Δ ด้านแรงต่ำต่อเป็น Y ดังแสดงในรูป 2.4



รูป 2.4 การต่อขดลวดหม้อแปลง 3 เฟส แบบ Y-Δ

ข้อดีของการต่อแบบ Y-Δ คือมีจุดที่ต่อลงดินของทางด้านที่ต่อแบบ Y ผลดีอีกข้อหนึ่งคือขจัดปัญหาเรื่องฮาร์โมนิกที่ 3 ของแรงดัน และกระแสเนื่องจากฮาร์มอนิกที่ 3 นี้จะไหลวนในขดลวดที่ต่อแบบเดลตา ไม่รบกวนระบบที่หม้อแปลงต่ออยู่

2.1.3 <u>ฉนวน</u>

การฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าเท่าที่ใช้กันในปัจจุบันนี้ ถ้าเป็นหม้อแปลงแบบน้ำมันจะเป็นฉนวนผสมระหว่างน้ำมันหม้อแปลงกับกระดาษอัด ถ้าเป็นหม้อแปลงแบบก๊าซจะเป็นฉนวนผสมระหว่างก๊าซ SF_6 กับโพลีเอสเตอร์ฟิล์ม นอกจากนี้ยังมีเบกไลต์เป็นส่วนรองรับโครงสร้างทำช่องระบายความร้อน

การฉนวนดังกล่าวมีวัตถุประสงค์หลักอยู่ 3 ประการ คือ

ก. เพื่อเป็นฉนวนทางไฟฟ้าระหว่างรอบขดลวดและระหว่างชั้นขดลวด

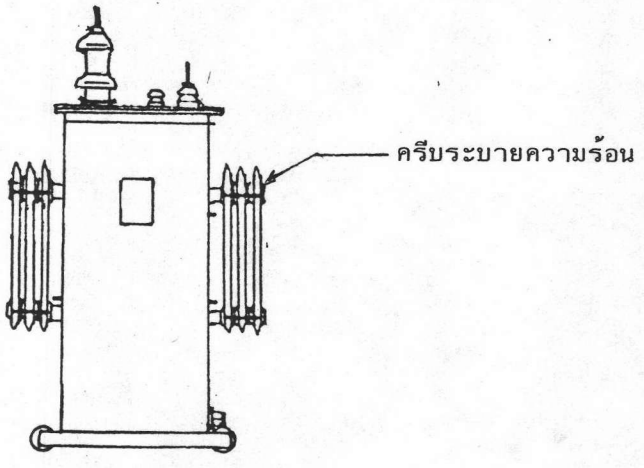
ข. รับแรงกลจากน้ำหนักโครงสร้างและแรงกลไดนามิกส์ที่เกิดจากการลัดวงจร

ค. เป็นตัวระบายความร้อน

ฉนวนส่วนสำคัญในหม้อแปลงอีกแห่งหนึ่งคือ ฉนวนระหว่างขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรงต่ำ เพราะฉนวนส่วนนี้จะต้องทนต่อแรงดันสูงที่สุด และใช้เนื้อที่ในการฉนวนมากทำให้ขนาดของหม้อแปลงต้องใหญ่ขึ้นตาม

2.1.4 <u>ตัวถัง</u>

หม้อแปลงชนิดที่ใช้ฉนวนเหลวหรือก๊าซอัดความดันเป็นฉนวนแทรกซึมและเป็นตัวระบายความร้อนจำเป็นต้องใช้ถังบรรจุฉนวนเหลวหรือก๊าซอัดความดันรวมทั้งส่วนประกอบโครงสร้างภายในทั้งหมด นอกจากนี้แล้วยังใช้ตัวถังของหม้อแปลงเป็นส่วนป้องกันหม้อแปลงจากแรงภายนอกอื่น ๆ ที่อาจทำให้หม้อแปลงเสียหาย และเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยระบายความร้อนออกไปสู่อากาศโดยรอบจึงใช้ตัวถังเป็นไลหะ ถ้าเป็นหม้อแปลงขนาดเล็กตัวถังส่วนใหญ่จะใช้แบบเรียบ แต่ถ้าขนาดของหม้อแปลงใหญ่ขึ้นพื้นที่ผิวในการระบายความร้อนของตัวถังแบบเรียบจะไม่เพียงพอ เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นมากอาจทำให้อุณหภูมิของตัวหม้อแปลงสูงเกินขีดจำกัด ดังนั้นเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการระบายความร้อน อาจทำตัวถังเป็นแบบลอนลูกคลื่นหรือใช้วิธีติดครีบระบายความร้อนรอบตัวถังดังรูป



ตัวถังที่ติดครีบระบายความร้อน

2.2 <u>ลักษณะสมบัติการทำงานและวงจรสมมูล</u>

2.2.1 <u>แรงดันเหนี่ยวนำ</u>

แรงดันเหนี่ยวนำในขดลวดเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่เกิดจากการป้อนกระแสสลับเข้าทางขดลวดปฐมภูมิ และจะมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณ

ฟลักซ์สนามแม่เหล็ก ความถี่ และจำนวนรอบของขดลวดดังสมการ

$$E = 4.44 \times 10^{-8} A_c BfN \qquad (2.1)$$

โดยที่ A_c คือ พื้นที่ภาคตัดขวางของแกนเหล็ก

f คือ ความถี่

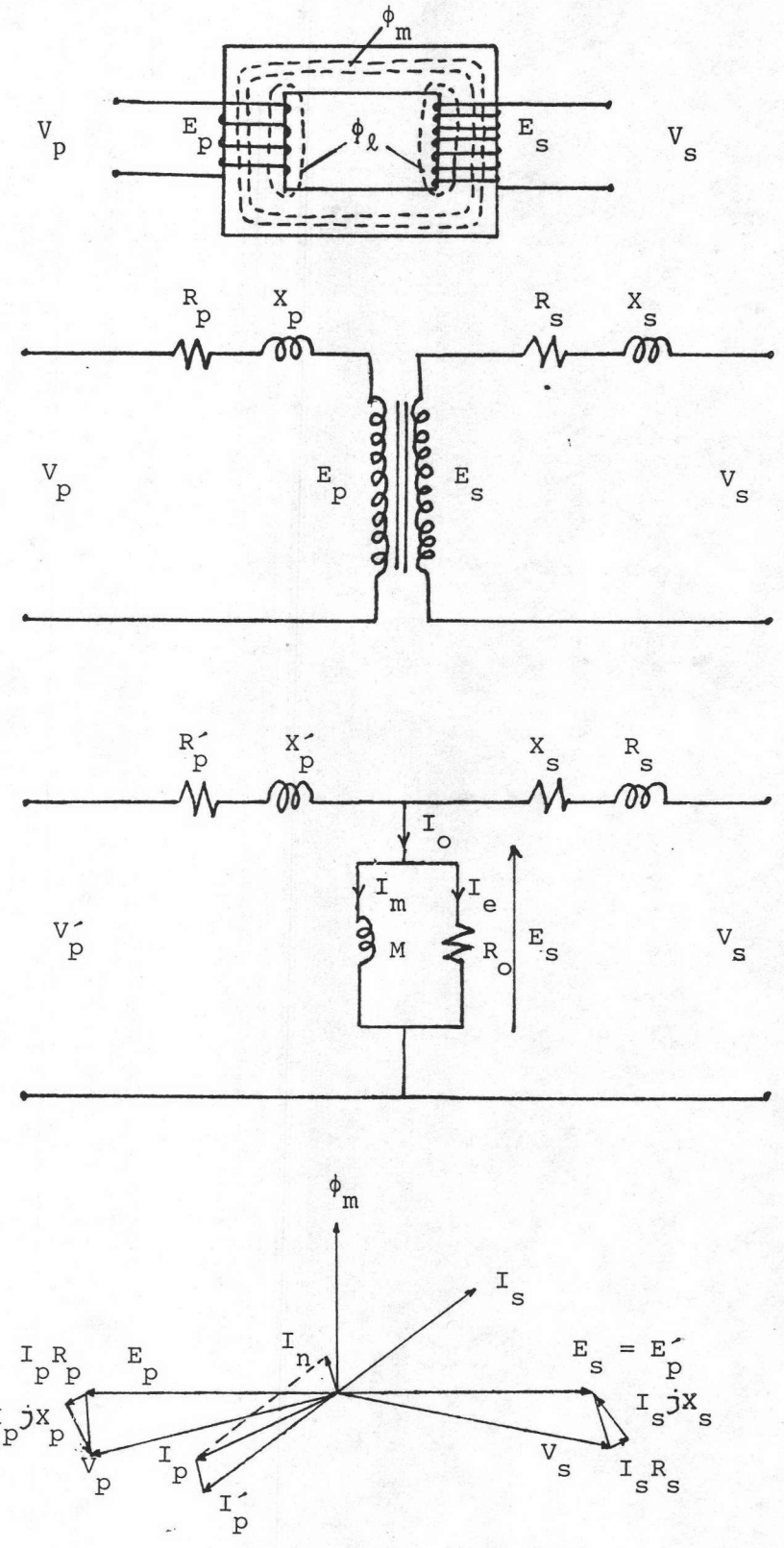
B คือ ค่ายอดของความหนาแน่นฟลักซ์

N คือ จำนวนรอบของขดลวด

อัตราส่วนแรงดันเหนี่ยวนำในขดลวดทั้งสองจึงเป็นอัตราส่วนของจำนวนรอบของขดลวด ฉะนั้นหม้อแปลงจึงสามารถแปลงแรงดันให้สูงขึ้น (ต่ำลง) โดยการพันจำนวนขดลวดทางด้านทุติยภูมิให้มากขึ้น (น้อยลง)

2.2.2 <u>วงจรสมมูลของหม้อแปลง</u>

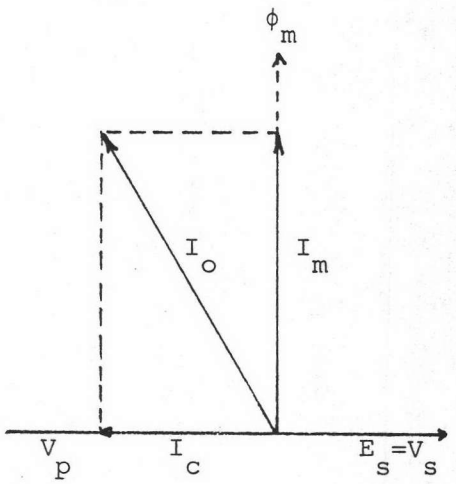
วงจรสมมูลแบบง่ายของหม้อแปลงเขียนได้ดังในรูป 2.5 ขดลวดทางด้านปฐมภูมิมีจำนวนรอบเท่ากับ N_p พันอยู่บนแกนเหล็กร่วมกับขดลวดทางด้านทุติยภูมิ ซึ่งมีจำนวนรอบเท่ากับ N_s เมื่อป้อนแรงดันกระแสสลับ V_p ให้กับขดลวดทางด้านปฐมภูมิ จะมีกระแสไหลในขดลวด กระแสสลับนี้จะสร้างฟลักซ์ซึ่งมีขนาดเปลี่ยนแปลงตามเวลา ฟลักซ์ที่ถูกสร้างขึ้นนี้จะคล้องขดลวดเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดัน E_p' ซึ่งมีขนาดเท่ากับแรงดันที่ขั้วแต่มีเฟสตรงข้าม และเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดัน E_s ในขดลวดทุติยภูมิ เมื่อมีกระแสไหลในขดลวดทางด้านทุติยภูมิขณะมีโหลด กระแสจำนวนนี้จะสร้างฟลักซ์ซึ่งมีขนาดเปลี่ยนแปลงตามเวลา ในทางปฏิบัติฟลักซ์ทั้งสองส่วนนี้จะมีบางส่วนซึ่งมีทิศทางร่วมกัน เรียกว่าฟลักซ์ร่วม, ϕ_m และบางส่วนทิศตรงข้ามกัน ผลต่างของฟลักซ์นี้ทำให้เกิดฟลักซ์ในช่องว่างของแกนเหล็กซึ่งเรียกว่า ฟลักซ์รั่ว, ϕ_ℓ การเปลี่ยนแปลงตามเวลาของฟลักซ์รั่วนี้เหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันในขดลวดทั้งสอง ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดค่าแรงดันตกคร่อมในขดลวดเนื่องจากค่ารีแอกแตนซ์ของขดลวด ผลของค่ารีแอกแตนซ์และความต้านทานของขดลวดทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมในหม้อแปลง วงจรสมมูลและเฟสเซอร์ไดอะแกรมแสดงในรูป 2.5



รูป 2.5 วงจรสมมูลและเฟสเซอร์ไดอะแกรมของหม้อแปลง

2.2.2.1 <u>ลักษณะสมบัติของหม้อแปลงขณะไม่มีโหลด</u>

หม้อแปลงขณะที่ไม่ได้จ่ายโหลดต้องการกระแสจำนวนหนึ่ง กระแสค่านี้เรียกว่า กระแสกระตุ้น (exciting current) และมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียจำนวนหนึ่ง ซึ่งเรียกว่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก กระแสกระตุ้นของหม้อแปลงจะประกอบด้วยฮาร์มอนิกต่าง ๆ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าเพอร์มีบิลิตีของเหล็ก โดยทั่วไปเพื่อให้สะดวกในการศึกษาจะละเลยค่าฮาร์โมนิกเหล่านี้ และสมมติว่ากระแสกระตุ้นเป็นแบบไซน์โดยให้ประสิทธิผลเท่ากัน กระแสกระตุ้นประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนหนึ่งเป็นกระแสสร้างฟลักซ์จะมีเฟสล้าหลังเฟสของแรงดันที่ป้อน 90^{o} แต่มีเฟสร่วมกับฟลักซ์ที่สร้างขึ้น อีกส่วนหนึ่งเป็นกระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กเนื่องจากค่า R_o ในวงจรสมมูล รูป 2.5 กระแสส่วนนี้จะมีเฟสร่วมกับแรงดันที่ป้อน ดังแสดงในรูป 2.6



V_p แรงดันที่ป้อนทางด้านปฐมภูมิ

I_o กระแสกระตุ้น

I_c กระแสส่วนพลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก

I_m กระแสที่สร้างฟลักซ์

ϕ_m ฟลักซ์ร่วม

$I_o = \sqrt{I_m^2 + I_c^2}$

รูป 2.6 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของกระแสกระตุ้น

ในบางกรณีจำเป็นต้องพิจารณาฮาร์มอนิกของกระแสกระตุ้นเพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนทางด้านการเหนี่ยวนำในวงจร ส่วนประกอบของฮาร์มอนิกในกระแสกระตุ้นจะเพิ่มขึ้นตามค่ายอดของความหนาแน่นฟลักซ์ ค่าเหล่านี้จะสามารถทราบได้โดยการวัดจากหม้อแปลงที่ประกอบเสร็จแล้ว ฮาร์มอนิกที่สามเป็นส่วนที่ใหญ่ที่สุดของฮาร์มอนิกทั้งหมดในกระแสกระตุ้น สำหรับหม้อแปลงแบบ 3 เฟสที่สมดุล ฮาร์มอนิกที่สามจะประกอบกันขึ้นเป็นระบบลำดับเฟสศูนย์ (Zero-Phase-Sequence System) กระแสฮาร์มอนิกที่สามจะไหลวนภายในของขดลวดที่ต่อแบบเดลตา และไหลออกสู่ระบบภายนอกในรูปของลำดับเฟสศูนย์ เมื่อหม้อแปลงต่อเป็นแบบ Y ที่นิวตรัลต่อลงดิน

2.2.2.2 <u>ลักษณะสมบัติของหม้อแปลงขณะลัดวงจรทางด้านทุติยภูมิ</u>

วงจรสมมูลในรูปที่ 2.5 สามารถเขียนค่า R_p และ X_p อยู่ในเทอมของขดลวดทางด้านทุติยภูมิได้ เป็น R_p' และ X_p' ดังนั้นจะได้ค่าความต้านทาน และค่ารีแอกแตนซ์รวมได้ คือ

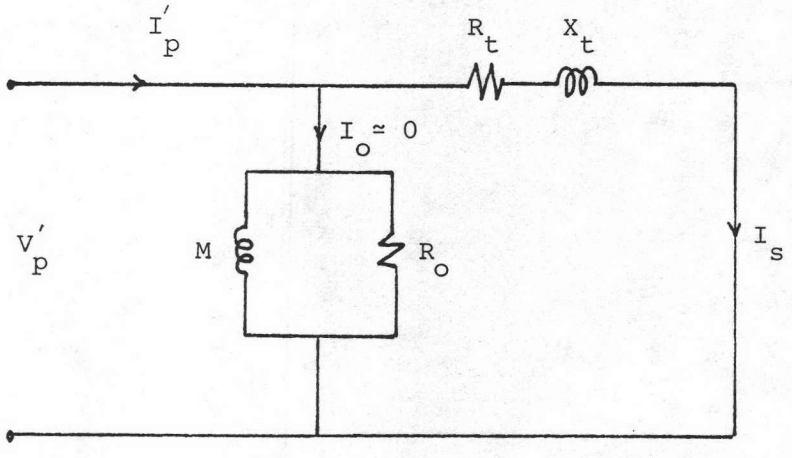
$$R_t = R_s + R_p'$$

$$X_t = X_s + X_p'$$

เมื่อลัดวงจรขดลวดทางด้านทุติยภูมิดังในรูป 2.7 และคิดว่ากระแสกระตุ้นมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับกระแส I_s จะเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$E_p' = I_s (R_t + jX_t) = I_p' Z \quad ; \quad I_s \simeq I_p' \qquad (2.2)$$

โดยที่ Z คือ ค่าอิมพิแดนซ์ทั้งหมดของหม้อแปลง ค่าแรงดันที่วัดได้นี้คือค่าแรงดันอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงนี้



รูป 2.7 วงจรสมมูล เมื่อลัดวงจรทางด้านทุติยภูมิ

(I_o มีค่าน้อย เมื่อเทียบกับ I_s ดังนั้น $I_p' \simeq I_s$)

2.2.2.3 <u>ความต้านทานและกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลด</u>

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$p'_t = 2.37\ J^2\ \frac{234.5 + T}{309.5} \qquad (2.3)$$

$$P_t = W_t p'_t \qquad (2.4)$$

โดยที่ P_t คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานในขดลวด, watts

J คือ ค่าความหนาแน่นกระแส , A/mm^2

W_t คือ น้ำหนักของทองแดงในขดลวด , kg

T คือ อุณหภูมิของขดลวด , ^oC

p'_t คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานในขดลวดต่อหน่วยน้ำหนัก , watts/kg.

ในการคิดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจะแปลงค่าที่คิดได้หรือวัดได้ไปที่อุณหภูมิอ้างอิง 75^oC ดังนั้นสมการ (2.3) เขียนได้ใหม่เป็น

$$p'_t = 2.37\ J^2 \qquad (2.5)$$

นอกจากนี้ยังมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากกระแสวน ค่านี้คำนวณให้ถูกต้องยากจึงมักจะคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของกำลังไฟฟ้าสูญเสีย P_t แทน โดยทั่วไปจะอยู่ในช่วง 15-25 เปอร์เซ็นต์

ผลรวมของกำลังไฟฟ้าสูญเสียในความต้านทานของขดลวด กำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากกระแสวน และกำลังไฟฟ้าสูญเสียสเตรย์เป็นค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลด และค่านี้สามารถวัดได้โดยการทดสอบแบบลัดวงจรที่ค่ากระแสที่กำหนด ค่าที่วัดได้ก็จะเป็นกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดของหม้อแปลง ความต้านทานของขดลวดแต่ละขดหาได้จากค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่วัดหรือคำนวณได้หารด้วยกำลังสองของกระแสที่กำหนด ซึ่งเป็นค่าความต้านทานที่ 75^oC คือ

$$R_p = \frac{P_p}{I_p^2} \text{ ohms} \quad , \quad R_s = \frac{P_s}{I_s^2} \text{ ohms}$$

ความต้านทานทั้งหมดของหม้อแปลงคิดในเทอมขดลวดทางด้านทุติยภูมิ คือ

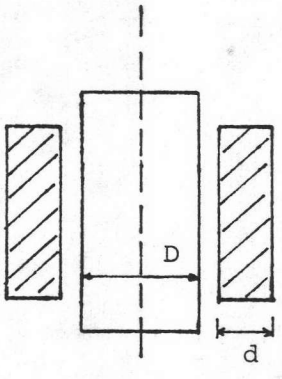
$$R_t = R_s + R_p \frac{(N_s)^2}{(N_p)^2} = \frac{P_p + P_s}{I_s^2} \quad \text{ohms} \qquad (2.6)$$

เปอร์เซ็นต์แรงดันตกเนื่องจากความต้านทานในหม้อแปลง คือ

$$PC_r = \frac{I_s R_t}{E_s} \times 100 \qquad (2.7)$$

2.2.2.4 <u>รีแอกแตนซ์</u>

ค่ารีแอกแตนซ์ของหม้อแปลง หรือที่เรียกว่า รีแอกแตนซ์รั่ว (leakage reactance) นั้น สามารถคำนวณได้โดยประมาณเท่านั้น เพราะมาจากการประมาณความยาวและพื้นที่ที่คิดว่าฟลักซ์นั้นผ่าน ก่อนที่จะคำนวณรีแอกแตนซ์จะต้องทราบความยาวของรอบโดยเฉลี่ยของขดลวด ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้



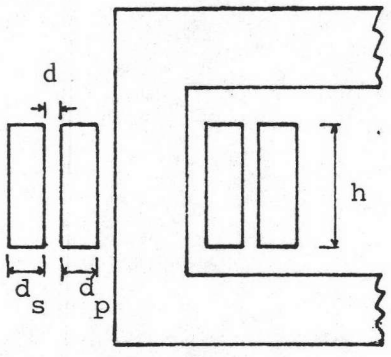
D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของแกนเหล็ก

d คือ ความหนาของขดลวด

∴ ความยาวของรอบโดยเฉลี่ย $L_{av} = (D+d)\pi$

รูปแบบในการคำนวณรีแอกแตนซ์ของหม้อแปลงที่มีแกนเหล็กเป็นแบบคอร์และขดลวดพันแบบร่วมศูนย์กลาง แสดงในรูป 2.8

011994
117362131



รูป 2.8 รูปแบบการคำนวณค่ารีแอกแตนซ์

ค่ารีแอกแตนซ์ทั้งหมดรวมด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ โดยคิดในเทอมของขดลวดด้านทุติยภูมิ สำหรับ 1 แกนของหม้อแปลงมีค่า [6]

$$X_t = \frac{0.846\ fN_s^2}{h \times 10^8} \left(d_s + d_p + d\right) \frac{L_s + L_p}{2} \quad \text{ohms} \qquad (2.8)$$

โดยที่ N_s คือ จำนวนรอบของขดลวดด้านทุติยภูมิ

L_s, L_p คือ ความยาวรอบโดยเฉลี่ยของขดลวดทั้งสอง

หน่วยความสูง ความกว้าง ความยาว เป็น mm

เปอร์เซ็นต์แรงดันตกเนื่องจากรีแอกแตนซ์ คือ

$$PC_x = \frac{X_t I_s}{E_s} \times 100 \qquad (2.9)$$

สมการที่ (2.8) แสดงให้เห็นว่ารีแอกแตนซ์ของหม้อแปลงแปรโดยตรงกับกำลังสองของจำนวนรอบความหนาของขดลวด ที่ว่างระหว่างขดลวด ความยาวรอบโดยเฉลี่ย และแปรผกผันกับความยาวของขดลวด

ดังนั้นจากสมการ (2.7) และ (2.9) จะได้เปอร์เซ็นต์ของอิมพีแดนซ์

$$PC_z = \sqrt{PC_x^2 + PC_r^2} \qquad (2.10)$$

เมื่อทราบค่าเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์ก็จะสามารถคำนวณค่ากระแสลัดวงจรสำหรับแรงดันค่าปกติ คือ

$$I_{sc} = \frac{E_s}{Z} = \frac{I_s \times 100}{PC_z} \quad A \qquad (2.11)$$

แรงที่กระทำต่อขดลวดขณะลัดวงจรขึ้นกับกำลังสองของกระแสจึงมีค่าสูงสามารถทำให้ขดลวดและฉนวนเกิดความเสียหายได้

2.2.3 <u>ค่าปรับแรงดัน (Voltage regulation)</u>

ค่าปรับแรงดันหรือเปอร์เซ็นต์เรกูเลชันของหม้อแปลงสามารถคำนวณได้โดยประมาณดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์เรกูเลชัน} = PC_r + \frac{PC_x^2}{200} \quad ; \quad \text{เพาเวอร์แฟกเตอร์} = 1 \qquad (2.12)$$

สำหรับโหลดชนิดความเหนี่ยวนำที่มีค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์เท่ากับ $\cos\phi$ จะได้

$$\text{เปอร์เซ็นต์เรกูเลชัน} = \cos\phi PC_r + \sin\phi PC_x + \frac{(\cos\phi PC_x - \sin\phi PC_r)^2}{200} \qquad (2.13)$$

2.2.4 <u>ประสิทธิภาพของหม้อแปลง</u>

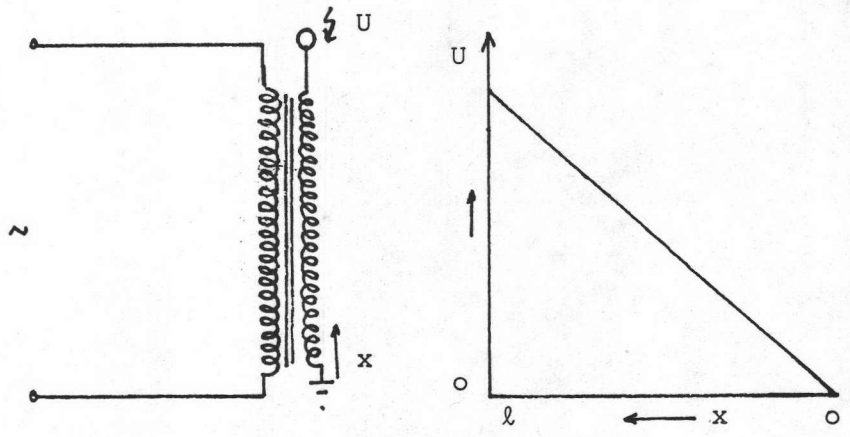
ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลด รายละเอียดดังได้กล่าวมาแล้ว ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียนี้จะเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพของหม้อแปลง , η ดังสมการ

$$\eta = \frac{\text{kW output}}{\text{kW output} + \text{kW losses}} \qquad (2.14)$$

โดยที่ kW output = kVA output x $\cos\phi$

2.2.5 <u>แรงดันกระจายบนขดลวดและผลเนื่องจากแรงดันเกิน</u>

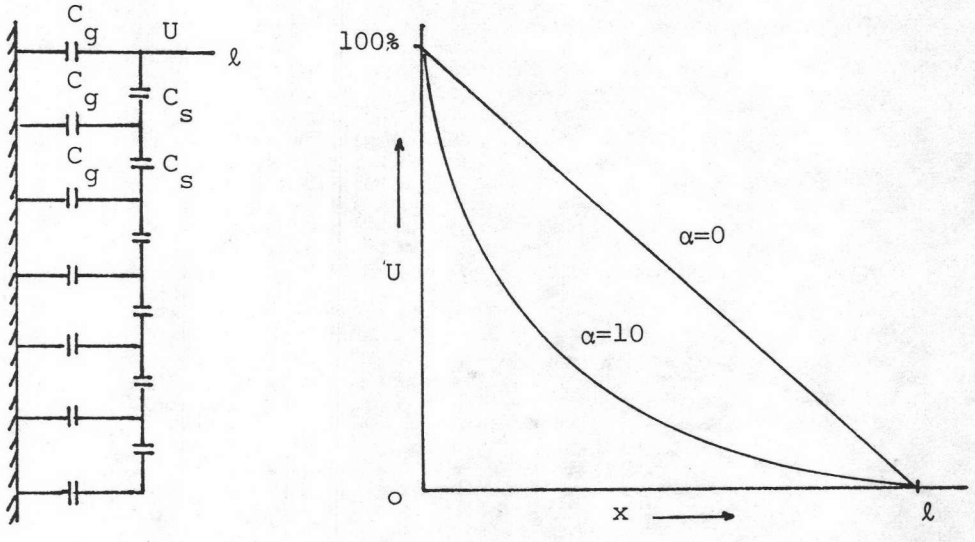
หม้อแปลงในภาวะคงตัว (steady state) แรงดันบนขดลวดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความยาวของขดลวด ดังแสดงในรูป 2.9



รูป 2.9 แรงดันกระจายบนขดลวดหม้อแปลงในภาวะคงตัว

หม้อแปลงในระบบจำหน่ายมีโอกาสได้รับแรงดันเกินเนื่องจากการปิดเปิดวงจร การกระจายของแรงดันบนขดลวดหม้อแปลงจะไม่สม่ำเสมอตามแนวความยาวขดลวด ทั้งนี้เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดกับดิน C_g กับค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวด C_s แรงดันแบ่งกระจายของขดลวดขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ C_g/C_s ถ้า C_g มีค่าต่ำเมื่อเทียบกับ C_s จะทำให้แรงดันแบ่งกระจายของขดลวดสม่ำเสมอเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความยาวของขดลวด แต่ถ้า C_g มีค่าสูงเทียบเท่ากับ C_s แรงดันแบ่งกระจายของขดลวดจะไม่สม่ำเสมอ คือไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความยาวของขดลวด ถ้าให้ $\alpha = \sqrt{\frac{C_g}{C_s}}$

แรงดันแบ่งกระจายจะเป็นดังในรูป 2.10



รูป 2.10 แรงดันแบ่งกระจายบนขดลวดที่ปลายข้างหนึ่งต่อลงดิน

จากรูปจะเห็นได้ว่าขดลวดรอบแรก ๆ ของหม้อแปลงมีโอกาสรับแรงดันสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่ α มีค่าสูง ดังนั้นในการวางขดลวดและการใส่ฉนวนระหว่างชั้นของขดลวดจะต้องคำนึงถึงกรณีนี้ด้วย โดยทั่วไปรอบแรก ๆ ของขดลวดทั้งหัวท้ายจะมีการฉนวนเป็นพิเศษเพื่อรับแรงดันเกินในกรณีข้างต้น สำหรับระดับแรงดันที่ไม่เกิน 15 kV จะมีฉนวนเป็นพิเศษประมาณ 2.5 เปอร์เซ็นต์ของจำนวนรอบ และเพิ่มขึ้นครึ่งเปอร์เซนต์ทุกระดับแรงดันที่เพิ่มขึ้น 10 kV ทั้งนี้ยังขึ้นกับลักษณะการวางขดลวดอีกด้วย [6]

2.3 ระบบระบายความร้อน

ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงเนื่องจากกำลังไฟฟ้าสูญเสีย จำเป็นจะต้องมีการถ่ายเทสู่อากาศภายนอกโดยรวดเร็วเพื่อป้องกันมิให้อุณหภูมิของขดลวดสูงเกินไป โดยทั่วไปวิธีการระบายความร้อนของหม้อแปลงแบบใช้ก๊าซเป็นฉนวนมี 3 วิธี คือ [1]

ก. การระบายความร้อนโดยวิธีธรรมชาติ วิธีนี้จะมีการติดครีบระบายความร้อนรอบ ๆ ตัวถัง ก๊าซซึ่งเป็นตัวกลางจะพาความร้อนผ่านครีบจากครีบจะระบายความร้อนสู่อากาศภายนอกอีกทีหนึ่ง วิธีนี้ใช้กับหม้อแปลงขนาดเล็กจนถึงขนาด 5,000 kVA

ข. การระบายความร้อนโดยการเป่าก๊าซให้หมุนเวียน วิธีนี้จะช่วยให้ก๊าซพาความร้อนสู่ภายนอกได้เร็วขึ้น ใช้กับหม้อแปลงขนาดกลางถึงขนาด 20,000 kVA

ค. การระบายความร้อนโดยการเป่าก๊าซให้หมุนเวียน และการใช้พัดลมช่วยให้อากาศพาความร้อนไปได้ดีขึ้น วิธีนี้เหมาะกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังขนาดกลางถึงขนาด40,000 kVA

วิธีหมุนเวียนโดยธรรมชาติของก๊าซ SF_6 สามารถทำได้เนื่องจากการลอยตัวของก๊าซร้อนอันเป็นผลมาจากความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของก๊าซที่มีอุณหภูมิสูงในขดลวด และความหนาแน่นของก๊าซที่มีอุณหภูมิต่ำในครีบระบายความร้อน

การระบายความร้อนจากพื้นผิวของขดลวดจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของก๊าซและความเร็วของก๊าซในการหมุนเวียน ความหนาแน่นของก๊าซพิจารณาได้จากความดันที่ใช้ในการบรรจุก๊าซ ความสามารถในการระบายความร้อนของหม้อแปลงจึงสัมพันธ์กับความดันก๊าซที่บรรจุด้วย ถ้าหม้อแปลงที่ใช้ก๊าซ SF_6 เป็นฉนวนเกิดมีก๊าซรั่วสู่ภายนอกเล็กน้อยก็จะมีผลทำให้ความดันภายในตัวถังลดลง กรณีนี้จะมีปัญหา 2 ประการคือ ประการแรกฉนวนทางด้านไฟฟ้าของก๊าซจะมีค่าลดลง ประการที่สองประสิทธิภาพในการระบายความร้อนลดลงเนื่องจากความหนาแน่นของก๊าซ

มีค่าต่ำลง รายละเอียดการคำนวณของวิธีการระบายความร้อนแบบธรรมชาติ และอุณหภูมิเพิ่มในขดลวดแสดงในภาคผนวก ข.

2.4 ข้อกำหนดของหม้อแปลง

ในการออกแบบและสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีข้อกำหนดต่าง ๆ เพื่อให้การออกแบบอยู่ในขอบเขตที่วางไว้ ขั้นต้นจะต้องกำหนดมาตรฐานที่ใช้เพื่อให้การออกแบบเป็นไปตามนั้นและทดสอบหม้อแปลงได้ตามมาตรฐานกำหนด ในการวิจัยนี้ใช้มาตรฐาน IEC Publ. No.76-1976 Power Transformers ค่าที่กำหนดของหม้อแปลงจะต้องระบุ เฟส ความถี่ ขนาดกี่ kVA แรงดันทั้งทางด้านแรงสูงและแรงต่ำ การต่อกลุ่มเวกเตอร์ของขดลวด คลาสของอุณหภูมิที่ใช้ เช่น คลาส E อุณหภูมิของขดลวดจะต้องเพิ่มไม่เกิน $75^{\circ}C$ นอกจากนี้จะต้องระบุสภาพการใช้งานเป็นแบบใช้ภายนอกหรือภายในอาคาร ระบบระบายความร้อนที่ใช้ นอกจากนี้ค่าที่สำคัญอีกค่าหนึ่งคือ ค่าแรงดันอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงซึ่งเป็นตัวกำหนดค่ากระแสลัดวงจร