



หม้อแปลงแยกขดลวด 150 กิโลโวลต์ สำหรับเครื่องกำเนิดนิวตรอน

ชาญชัย เศรษฐมรรงค์⁺ พิจิตร ประทุมทิพย์⁺ โฉม ทองเหลื่อม^{*}

ปถม วิชัยมงคล[#] ราเชนทร์ เจริญนุกูล[#] และฉิรพัฒน์ วิลัยทอง^{*}

+ แผนกช่างไฟฟ้ากำลัง คณะวิชาช่างไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคพายัพ จ.เชียงใหม่ 50300

สถาบันวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 50200

* อาคารวิจัยนิวตรอนพลังงานสูง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 50200

บทคัดย่อ

ได้ทำการศึกษาการออกแบบและสร้างหม้อแปลงแยกขดลวด ชนิดใช้ฉนวนกันแรงดันสูง กระแสตรง 150 กิโลโวลต์ สำหรับเครื่องกำเนิดนิวตรอน การออกแบบหม้อแปลง ขดลวดเป็นแบบ ชั้นทรงกระบอกแกนร่วมพันด้วยลวดทองแดงอาบน้ำยาชนิดพื้นที่หน้าตัดวงกลม การฉนวนของหม้อแปลงเป็นแบบแห้ง โดยใช้ฉนวนของแข็งจำพวกอีพอกซี เรซิน เป็นฉนวนหุ้มขดลวด ซึ่งมีคุณสมบัติ ในการไม่ติดไฟที่อุณหภูมิต่ำกว่า 350 องศาเซลเซียส มีความทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงถึงประมาณ 10-18 กิโลโวลต์ต่อมิลลิเมตร จึงเหมาะที่จะนำมาใช้ในการฉนวนไฟฟ้าแรงสูง และในการออกแบบหม้อแปลงแบบแห้งนี้ ได้กำหนดอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดไว้ไม่เกิน 65 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันความ แตกกร้าวของอีพอกซี เรซินอันเนื่องมาจากการขยายตัวของขดลวด

A 150 kV Isolation Transformer for a Neutron Generator

Chanchai Dechthummarong⁺ Pijit Pratumtip⁺ Chome Thongleurm^{*}

Pathom Vichaimongkol[#] Rachain Charoennugul[#] and Thiraphat Vilaithong^{*}

+ Department of Electrical Power, Rajamangala Institute of Technology, Chiang Mai 50300

Institute for Science and Technology Research and Development, Chiang Mai University, Chiang Mai

* Fast Neutron Research Facility Department of Physics, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai

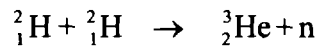
ABSTRACT

The work aims at the design and construction of a 150 kV isolation transformer for a neutron generator. The transformer windings are designed to use cylindrical layers with circular enamel copper wires. The insulation of the dry type transformer uses the epoxy resin for encapsulated winding. This insulation is non-flammable under temperature 350°C and the breakdown voltage is 10-18 kV/mm. This insulation is suitable for insulating high voltage. The design of provides the temperature rise of winding not exceeding 65°C for protection of the cracking of epoxy resin due to the expansion of winding.

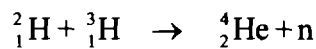
บทนำ

ในปัจจุบันการผลิตรังสีนิวตรอนพลังงานสูง อย่างต่อเนื่องและแบบห้วง สามารถกระทำได้ 2 ระดับพลังงานคือ

ที่นิวตรอนพลังงาน 3 MeV ทำได้จากปฏิกิริยา

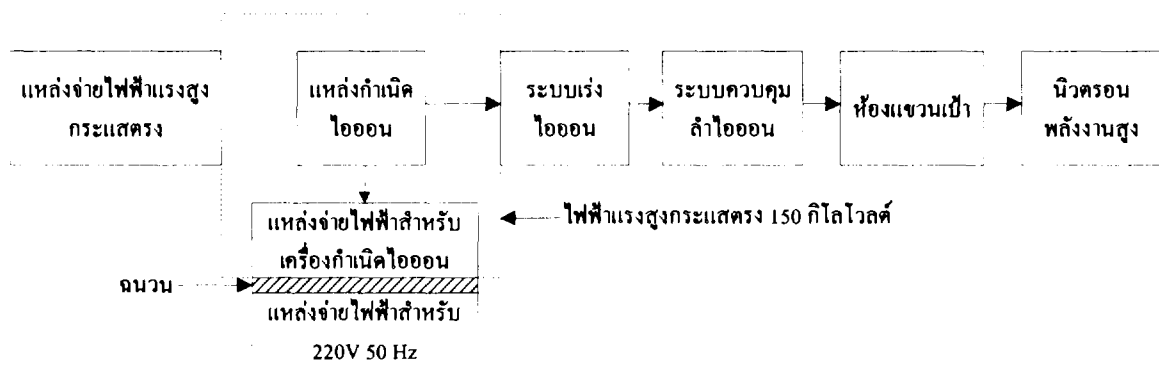


และนิวตรอนพลังงาน 14 MeV จากปฏิกิริยา



ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวทั้งสองชนิดสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นได้ โดยใช้เครื่องเร่งอนุภาค ขนาดแรงดันเร่ง 100-150 kV เร่งให้คิวเทอรอน(${}^2_1\text{H}$ - ions) พุ่งเข้าชนเป้าที่เป็นคิวเทอริยม(${}^2_1\text{H}$)และตรีเตริยม(${}^3_1\text{H}$) ตามลำดับ ก็จะทำให้นิวตรอนออกมาจากปฏิกิริยาดังกล่าว ซึ่งทั้งหมดนี้เรียกว่า การกำเนิดนิวตรอน

ระบบของเครื่องกำเนิดนิวตรอนมีส่วนประกอบที่สำคัญพอสรุปได้ดังรูปที่ 1 คือ แหล่งกำเนิดไอออนและแหล่งจ่ายไฟ ระบบเครื่องเร่งไอออน(พร้อมแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงเพื่อใช้กับระบบเร่งไอออน) ระบบควบคุมลำไอออน และห้องแชนเป่า[1]



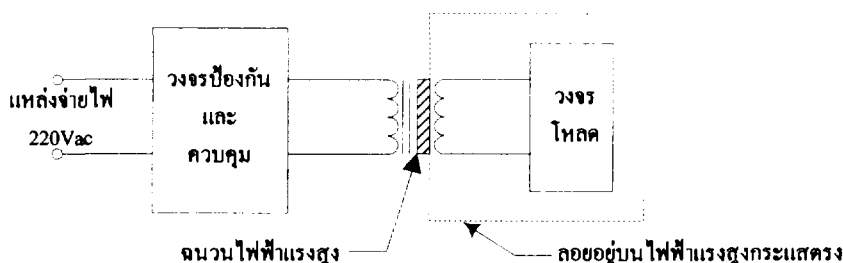
รูปที่ 1 ส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่องกำเนิดนิวตรอน

หลักการทำงานของระบบนี้ คือ ภายใต้อุณหภูมิที่เหมาะสม เมื่อป้อนคลื่นวิทยุซึ่งเป็นตัวจุด แก๊สให้กับแหล่งกำเนิดไอออนมากพอ ก็จะทำให้แก๊สไฮโดรเจนแตกตัวเป็นไอออน ในสภาวะพลาสมา

แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงจะทำหน้าที่สร้างแรงดันสูงกระแสตรง เพื่อใช้ในการเร่งไอออนให้มีพลังงานเพิ่มขึ้นถึง 150 keV โดยเคลื่อนที่ผ่านความต่างศักย์ในสนามไฟฟ้าค้ำคงที่ของระบบเร่งไอออน

ระบบควบคุมลำไอออนจะทำหน้าที่คัดไอออนเฉพาะชนิดที่ต้องการและปรับขนาดของลำไอออน ก่อนที่จะนำเข้าหาเป้าในห้องแวนเป่า เมื่อกระทบกับเป้า จะก่อให้เกิดนิวตรอนพลังงานสูงเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ทางด้านต่างๆ เช่น การวิเคราะห์ธาตุเชิงนิวเคลียร์ การศึกษาการใช้ปฏิกิริยานิวเคลียร์ เป็นต้น

ในส่วนของระบบจ่ายไฟให้กับแหล่งกำเนิดไอออนจะต้องแยกวงจรออกจากระบบ เพื่อป้องกันมิให้ไฟฟ้าลัดวงจรลงดินนั้น มีหลายวิธีการด้วยกัน แต่วิธีที่ประหยัด สะดวก ไม่มีปัญหาเรื่องของการสั้นสะพานหรือเสียดังรบกวนขณะทำงาน และมีการสูญเสียทางไฟฟ้าน้อยที่สุดก็คือ หม้อแปลงที่มีฉนวนภายในซึ่งสามารถกันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงได้เราเรียกว่า หม้อแปลงแยกขดลวดชนิดใช้ฉนวนกันแรงดันสูงกระแสตรง ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ผังวงจรที่ใช้หม้อแปลงแยกขดลวดชนิดใช้ฉนวนกันแรงดันสูงกระแสตรง

หม้อแปลงแยกขดลวดชนิดใช้ฉนวนกันแรงดันสูงกระแสตรงนี้ เป็นหม้อแปลงที่ใช้งานเฉพาะด้านและยังไม่มีการผลิตขายภายในประเทศ เมื่อต้องการใช้หรือตัวที่ใช้อยู่เดิมเกิดความเสียหาย จะต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศซึ่งมีราคาแพงมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาการออกแบบและสร้างหม้อแปลงแยกขดลวดชนิดใช้ฉนวนกันแรงดันสูงกระแสตรงขนาด 150 กิโลโวลต์ เพื่อนำไปใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟในส่วนกำเนิดไอออนของเครื่องกำเนิดนิวตรอนต่อไป

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

วัสดุที่ใช้ประกอบด้วยส่วนสำคัญดังนี้คือ Araldite F และ Hardener HY905 ของ Ciba Specialty Chemicals (Thailand) Ltd. กาวซิลิโคน ชนิดทนความร้อนสูง 150-200 องศาเซลเซียส แผ่นเหล็กซิลิกอนสำหรับทำแกนเหล็กหม้อแปลง ลวดทองแดงอบน้ำยาเบอร์ 20 SWG, 18 SWG และ 16 SWG สายไฟฟ้าแรงสูงทนแรงดันได้ 150 กิโลโวลต์ แผ่นสแตนเลส หนา 1 มม. ไม้สำหรับทำแกนพันขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ ปลอกหุ้มลวดทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 มม. และ 1.5 มม. ผ้าเทปพันขดลวด แบบมีกาวสำหรับพันขดลวดโดยเฉพาะ และแท่งไนลอนตันขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สำหรับทำแบบพันขดลวดปฐมภูมิ

อุปกรณ์ที่ใช้ในงานนี้ประกอบด้วย อุปกรณ์ในการสร้างหม้อแปลงและอุปกรณ์ทดสอบหม้อแปลงซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

(i) อุปกรณ์ในการสร้างหม้อแปลงประกอบด้วย

ปั๊มสุญญากาศ ปั๊มได้ถึงความดัน 20 mbar ถึงผสม Araldite F และ Hardener และเครื่องกวน เครื่องตัดเหล็ก เครื่องพับและเครื่องม้วนโลหะ เตอบหม้อแปลง มีอุณหภูมิสูงถึง 150°C เครื่องพันขดลวด และเครื่องกลึง

(ii) อุปกรณ์ทดสอบหม้อแปลงประกอบด้วย

มัลติมิเตอร์ มิลลิโอห์มมิเตอร์ แอมมิเตอร์ โวลต์มิเตอร์ วัตต์มิเตอร์ นาฬิกาจับเวลา ออสซิลโลสโคป เทอร์โมมิเตอร์ แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง ขนาดแรงดัน 150 กิโลโวลต์ และเครื่องวัดค่าความต้านทานของฉนวน แรงดันทดสอบ 5-10 กิโลโวลต์

วิธีการ

ในการทำหม้อแปลงแยกขดลวดจะประกอบด้วยขั้นตอนการทำงาน 2 ขั้นตอน คือ การออกแบบและการสร้าง ซึ่งมีรายละเอียดตามลำดับดังนี้คือ

การออกแบบหม้อแปลงแยกขดลวด

(i) รวบรวมรายละเอียดเชิงเทคนิคของหม้อแปลง

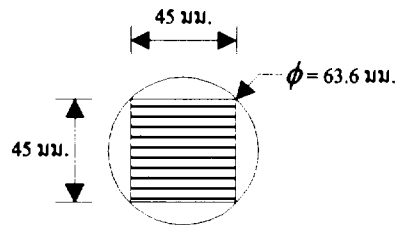
ในการออกแบบหม้อแปลงแยกขดลวด สำหรับที่จะใช้ในเครื่องกำเนิดนิวตรอน จะต้องมียาละเอียดเชิงเทคนิค ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลเชิงเทคนิคของหม้อแปลงแยกขดลวด

| ลำดับที่ | รายการ | พิกัด | หน่วย |
|----------|-------------------------|----------------|-------|
| 1 | แรงดันปฐมภูมิ | 110/130/240 | V |
| 2 | แรงดันทุติยภูมิ | 130 | V |
| 3 | ความถี่ | 50 | Hz |
| 4 | จำนวนเฟส | 1 | - |
| 5 | กระแสปฐมภูมิ | 2.73/2.30/1.36 | A |
| 6 | กระแสทุติยภูมิ | 2.30 | A |
| 7 | กำลังไฟฟ้า | 300 | VA |
| 8 | ความสูญเสียขณะไม่มีโหลด | 6 | W |
| 9 | ความสูญเสียขณะมีโหลด | 15 | W |
| 10 | แรงดันอิมพีแดนซ์ | 10 | % |
| 11 | การกั้นแรงดันของฉนวน | 150 | KVdc |

(ii) การหาขนาดของแกนเหล็ก

การหาขนาดของแกนเหล็กในขั้นต้น จะเป็นการหาพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก (A_{FC}) และเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของแกนเหล็กดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 หน้าตัดของแกนเหล็กที่ใช้ในการพันขดลวด

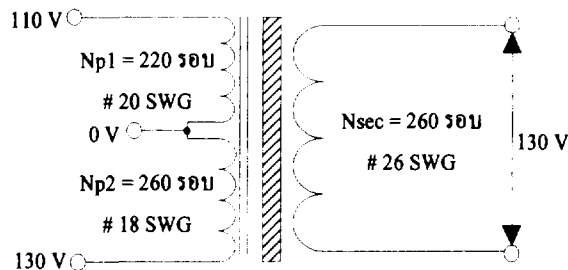
การออกแบบจะต้องคำนึงถึงค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กในแกนเหล็ก ซึ่งหาได้จาก B-H Curve และตัวประกอบแผ่นชั้นอัด (Lamination Factor) ซึ่งผู้ผลิต[8] จะเป็นผู้กำหนดให้ การเลือกค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ควรเลือกค่าที่ไม่เกินกว่าจุดอิ่มตัวของแกนเหล็ก ซึ่งในการออกแบบหม้อแปลงนี้ เลือกใช้ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดในแกนเหล็ก (B_{max}) อยู่ที่ 1.1 wb/m^2 และค่าที่ได้นี้ จะนำไปคำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดต่อไป

(iii) จำนวนรอบของขดลวด

จำนวนรอบของขดลวด (N) ทั้งขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ หาได้จากสูตร[6]

$$N = \frac{V \times 10^8}{4.44 \cdot f \cdot B_{max} \cdot A_{FC}}$$

แต่ละด้านจะมีจำนวนรอบดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 จำนวนรอบของขดลวดหม้อแปลงระหว่างปฐมภูมิและทุติยภูมิ

(iv) การเลือกขนาดพื้นที่หน้าตัดของลวดทองแดง

เนื่องจากภายในลวดทองแดงจะมีความต้านทานอยู่ และจะมีผลต่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นของหม้อแปลง ซึ่งปกติความหนาแน่นของกระแสจะอยู่ในราว 1-3 A/mm² [6] สำหรับขดลวดปฐมภูมิ ไม่ได้ถูกหล่อหุ้มด้วยฉนวนเรซิน การถ่ายเทความร้อนสู่อากาศได้สะดวก จึงออกแบบให้ความหนาแน่นของกระแสอยู่ที่ 2.07 และ 1.971 A/mm² ส่วนขดลวดทุติยภูมิจะมีฉนวนหุ้มหนาราว 20-25 mm ในแต่ละด้าน การถ่ายเทความร้อนไปสู่อากาศทำได้ไม่ดี จึงเลือกใช้ความหนาแน่นของกระแสอยู่ที่ 1.109 A/mm² ดังนั้น ลวดทองแดงที่ใช้กับขดลวดปฐมภูมิจะมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 0.656 mm² และ 1.167 mm² ส่วนขดลวดทุติยภูมิ ใช้พื้นที่หน้าตัดขนาด 2.674 mm²

(v) การคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กและขดลวด

การคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กนั้น จะใช้วิธีการคำนวณโดยประมาณจากน้ำหนักของแกนเหล็กหม้อแปลง แล้วจึงไปหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กจากกราฟ ซึ่งบริษัทผู้ผลิตแกนเหล็กเป็นผู้กำหนดมาให้[8] ส่วนความสูญเสียในขดลวดใช้วิธีคำนวณจากน้ำหนักของขดลวดด้วยเช่นกัน ในขั้นตอนนี้เมื่อคำนวณค่าที่ได้แล้วจะต้องนำไปเทียบกับข้อมูลที่ได้กำหนดไว้ในหัวข้อ (i) ถ้าไม่ตรงกันจะต้องเริ่มต้นออกแบบใหม่ ตั้งแต่หัวข้อ (ii) จนถึง หัวข้อที่ (v)

(vi) การคำนวณหาแรงดันอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง

การคำนวณหาแรงดันอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง ก็เพื่อที่จะต้องการทราบแรงดันตกคร่อมภายในหม้อแปลงว่ามีกี่เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ขั้วเอาต์พุตขณะมีโหลด ถ้าแรงดันตกมากเกินไปอาจมีผลเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าได้ ตัวแปรหนึ่งซึ่งเข้ามาเกี่ยวข้องกับแรงดันอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง คือ ระยะห่างระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ ซึ่งระยะห่างต่ำสุดนี้ จะหาได้จากการคำนวณค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของหม้อแปลงแยกขดลวด

(vii) ความเครียดสนามไฟฟ้าของหม้อแปลงแยกขดลวด

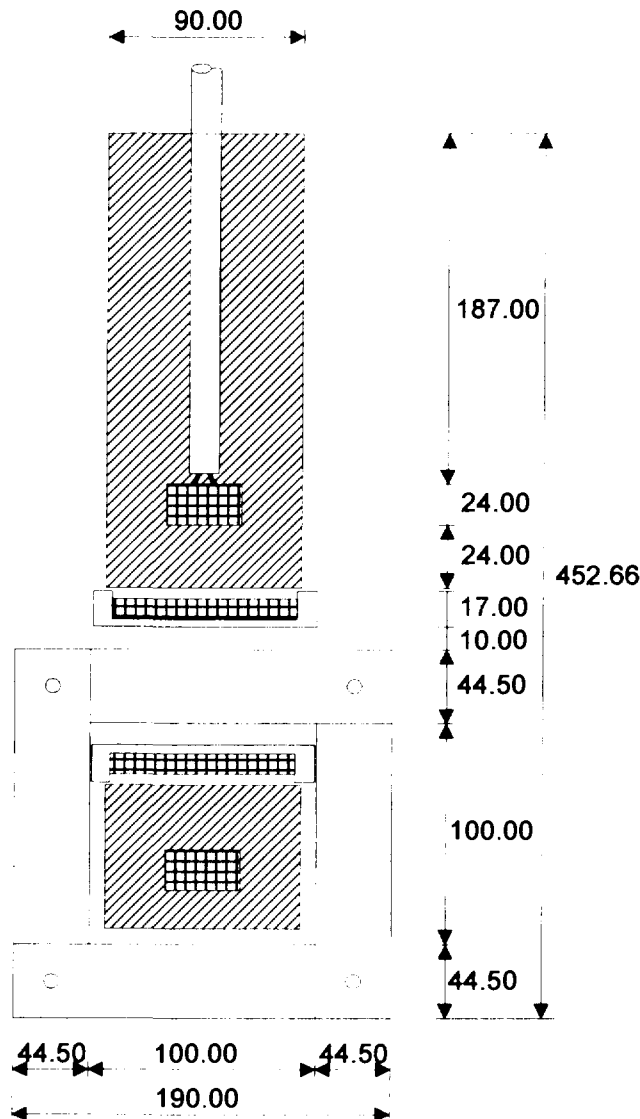
เนื่องจากทางด้านทุติยภูมิจะได้รับศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงจากภายนอก กำหนดให้มีขนาดสูงสุดเท่ากับ 150 กิโลโวลต์ เมื่อเทียบกับกราวด์ ถ้าค่าความเครียดของสนามไฟฟ้า[3] มีค่ามากกว่า ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนคือ 10 kV/mm [7] อาจเกิดการเสียดสภาพฉนวนของฉนวนทันทีทันใดหรืออาจจะทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพและนำไปสู่การเสียดสภาพฉนวนฉนวนในที่สุด[2] ดังนั้นการฉนวนจึงควรคำนึงถึงค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าในบริเวณชั้นฉนวนระหว่างขดลวดปฐม

ภูมิกับทุติยภูมิ และบริเวณด้านข้างของขดลวดทุติยภูมิกับแกนเหล็ก ต้องมีระยะห่างอย่างเพียงพอ สำหรับระยะห่างที่ใช้ในการสร้างหม้อแปลงนี้ แสดงดังรูปที่ 5

(viii) การคำนวณอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของขดลวด

ขดลวดทุติยภูมิถูกหุ้มด้วยฉนวนเรซิน ซึ่งมีสัมประสิทธิ์ในการนำความร้อนเพียง $0.8-0.9 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$ [7] ดังนั้นจึงต้องคำนวณหาปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นในขดลวด การถ่ายเทปริมาณความร้อน และความร้อนสะสมภายในมิให้เกินกว่าที่กำหนดไว้ คือ 65 องศาเซลเซียส ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นจะสัมพันธ์กับการหาขนาดของลวดทองแดงในหัวข้อ (iv) และความหนาของฉนวนที่หาได้ในหัวข้อที่ (vii)

ถ้าการคำนวณในหัวข้อต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ได้ตามค่าที่กำหนดไว้ในหัวข้อ (i) แล้ว ก็นำเอาค่าที่คำนวณได้มาวัดเป็นหน้าตัดของหม้อแปลงดังรูปที่ 5

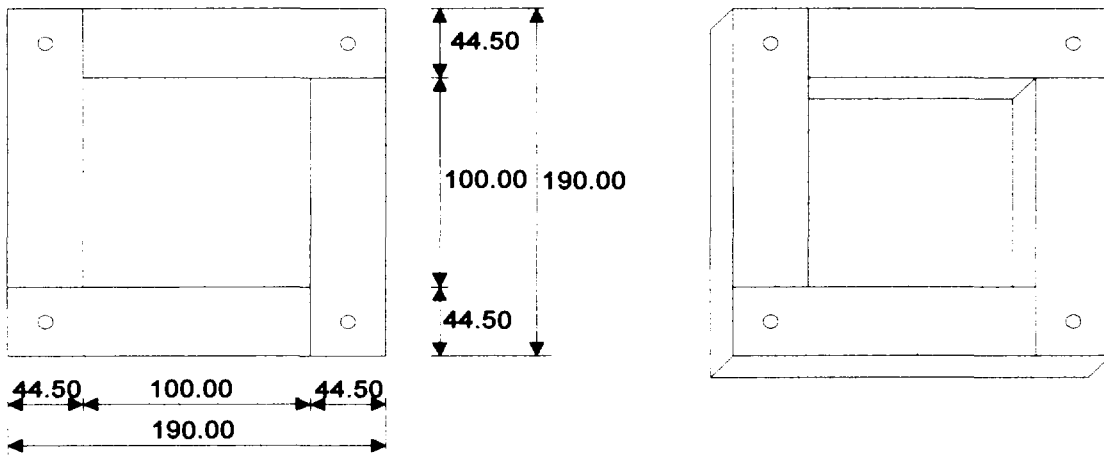


รูปที่ 5 ภาพตัดของหม้อแปลงและระยะต่างๆ ของขดลวดกับแกนเหล็ก

ขั้นตอนการประกอบและสร้างหม้อแปลงแยกขดลวด

(i) การตัดแผ่นเหล็กและการประกอบ

แผ่นเหล็กที่ใช้เป็นเหล็กซิลิกอน นำมาตัดตามขนาดดังรูปที่ 6 (ก) และนำแต่ละแผ่นมาวางเรียงซ้อนกันเป็นชั้นๆ ดังรูปที่ 6 (ข) การวางต่อกันระหว่างแผ่นเหล็กอยู่ในลักษณะการต่อแบบตั้งฉากเพื่อความแข็งแรงเชิงกลและลดความต้านทานทางแม่เหล็กบริเวณรอยต่อ ทำให้มีความสูญเสียในแกนเหล็กลดลง[5]



รูปที่ 6 ขนาดของแผ่นเหล็กและการจัดเรียงแผ่นเหล็ก

(ii) การพันขดลวดปฐมภูมิ

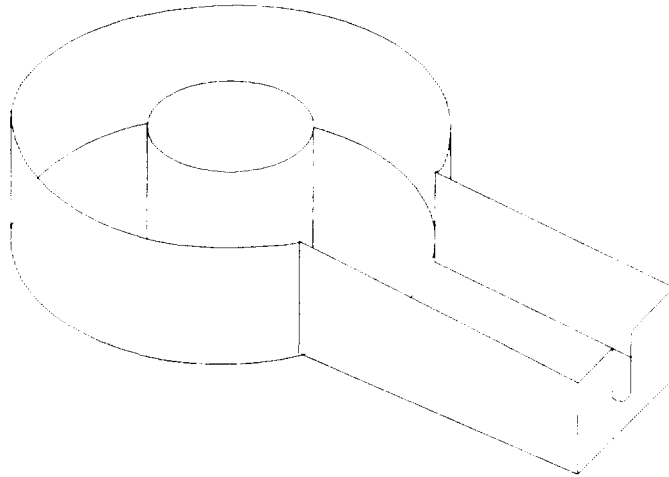
ทำแบบไม้ทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลางวงนอก 65 มม. เจาะรูแกนกลางขนาด 10 มม. เพื่อสวมเข้ากับเครื่องพันขดลวด ต่อจากนั้นกลึงไนลอนเพื่อทำฟอร์มพันขดลวด และนำแบบไนลอนสวมเข้ากับแบบไม้ แล้วประกอบเข้ากับเครื่องพัน เพื่อพันขดลวดตามจำนวนรอบที่ได้ออกแบบไว้

(iii) การพันขดลวดทุติยภูมิ

ทำแบบไม้เป็นวงแหวนวงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร หนา 3 เซนติเมตร และมีแผ่นประกบทั้งสองด้าน เจาะรูตรงแกนกลางเพื่อสวมเข้ากับเครื่องพันขดลวด ทำการพันขดลวดทุติยภูมิตามจำนวนรอบที่ได้ออกแบบไว้ โดยจะต้องพันเรียงเส้นอย่างเป็นระเบียบ และในขณะที่ถอดขดลวดออกจากแบบไม้จะต้องระมัดระวังมิให้ขดลวดหลุดกระจายออกจนเสียรูป

(iv) การทำแบบหล่อหม้อแปลง

การทำแบบหล่อหม้อแปลงแสดงในรูปที่ 7 จากการทดลองพบว่าการใช้แผ่นเหล็กสแตนเลส ซึ่งมีรูพรุนน้อยจะไม่เกิดฟองอากาศขึ้นในขณะที่ที่อบด้วยอุณหภูมิสูง การอุดรอยรั่วในบริเวณรอยต่อต่างๆ ควรใช้กาวซิลิโคนทนอุณหภูมิสูงในการอุด



รูปที่ 7 แบบหล่อหม้อแปลง

(v) การผสมเรซินและการอบหม้อแปลง

ทำการผสม Aradife F และ Hardener HY 905 ในอัตราส่วน 1:1 แล้วนำเข้าเตาอบเพื่ออุ่นเรซินที่อุณหภูมิ 80°C ให้มีความหนืดลดลง และทำการกวนเรซินให้เข้ากันเป็นเวลาครึ่งชั่วโมง ในช่วงที่อุ่นเรซินนี้สามารถนำแบบหล่อและขดลวดทุติยภูมิที่ประกอบไว้แล้วเข้าไปอบด้วยก็ได้ เพื่อเป็นการไล่ความชื้นภายในตัวแบบและขดลวดออก เมื่อครบเวลาที่กำหนดแล้ว เทเรซินลงในแบบหล่อและทำการอบต่อที่อุณหภูมิ 90°C โดยมีปั๊มสุญญากาศดูดอากาศออกภายใต้ความดัน 5-20 mbar [7] เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หรือจะทำการอบที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลาหนึ่งวันเต็ม เพื่อให้อากาศหลงเหลืออยู่ในเนื้อเรซินน้อยที่สุด เมื่ออุ่นเรซินภายใต้เวลาที่กำหนดแล้ว ทำการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นถึง 150°C และอบไม่น้อยกว่า 5-10 ชั่วโมง หลังจากครบเวลาที่กำหนดแล้ว จึงลดอุณหภูมิลง และทิ้งไว้ให้เย็นตัว หลังจากนั้นจึงทำการถอดหม้อแปลงออกจากแบบหล่อ และทำการทดสอบต่อไป

ผลการทดสอบ

เพื่อเป็นการตรวจสอบว่าหม้อแปลงว่ามีคุณสมบัติเป็นไปตามที่ออกแบบไว้ และเพื่อตรวจสอบสภาพของหม้อแปลงนั้นว่ามีความเหมาะสมต่อการจะนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพหรือไม่ วิธีการทดสอบมีอยู่ 2 ประการ คือ การทดสอบทั่วไปและการทดสอบเฉพาะ[5]

(i) การทดสอบทั่วไปประกอบด้วย

การวัดความต้านทานของขดลวด การวัดอัตราส่วนจำนวนรอบและขั้ว การตรวจสอบรูปคลื่นแรงดัน การวัดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสขณะไม่มีโหลด การวัดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและแรงดันอิมพีแดนซ์ขณะมีโหลด

(ii) การทดสอบเฉพาะประกอบด้วย

การทดสอบอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของขดลวด และ การทดสอบความทนต่อไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

ซึ่งจากผลการทดสอบพอจะสรุปได้ ดังแสดงในตารางที่ 2 และรูปที่ 8 และ 9 โดยที่แสดงผลการทดสอบหม้อแปลงแยกขดลวด และรูปที่ 8 แสดงถึงความสูญเสียภายในหม้อแปลง จากรูปที่ 8 ก) เป็นการทดสอบขณะไม่มีโหลดเพื่อหาลำดับไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กที่แรงดันพิกัด 240 โวลต์ มีค่าเท่ากับ 2.12 W ส่วนในรูปที่ 8 ข) เป็นการทดสอบขณะมีโหลด เพื่อหาลำดับไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดที่กระแสเต็มพิกัด 1.25 A มีค่าเท่ากับ 2.44 W ส่วนรูปที่ 9 แสดงผลของค่าความต้านทานของขดลวดในขณะที่ทำการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของหม้อแปลง โดยจ่ายกระแสเต็มพิกัดต่อเนื่องเป็นเวลา 14 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงตัด โหลดออกเพื่อวัดค่าความต้านทานของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิที่เวลาต่าง ๆ กัน ดังรูปที่ 9 (ก) และ(ข) ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบหม้อแปลงแยกขดลวด

| | | | | | | |
|---|--------------------------|--------|-------------------|----------------|--------------------|--------|
| พิกัดกำลัง | 300 VA | เฟส | 1 | ความถี่ | 50 Hz | |
| แรงดันอินพุต | 240 V | | | แรงดันเอาต์พุต | 130 V | |
| กระแสอินพุต | 1.25 A | | | กระแสเอาต์พุต | 2.31 A | |
| ความต้านทานของฉนวนหม้อแปลง | LV-E(M Ω) | | HV-E(M Ω) | | LV-HV(M Ω) | |
| | 10000 | | 100000 | | 100000 | |
| การทดสอบความคงทนของฉนวนต่อไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง | ไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง (kV) | | | | เวลา(วินาที) | |
| | 150 | | | | 60 | |
| อัตราส่วนจำนวนรอบ | การวัด | | การคำนวณ | | ความผิดพลาด | |
| | LV | HV | LV | HV | LV | HV |
| | 220V | 118.5V | 220V | 120V | - | 1.25% |
| ความต้านทานของขดลวดที่อุณหภูมิ 75 °C | 3.36 | 1.56 | 3.65 | 1.44 | 8.63% | -8.33% |
| แรงดันอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง | 5.41% | | 9.75% | | 44.51% | |

หลังจากการทดสอบจนเป็นที่น่าพอใจ ก็ติดตั้งหม้อแปลงแยกขดลวดเข้ากับเครื่องกำเนิดนิวตรอนเป็นที่เรียบร้อย ดังแสดงในรูปที่ 10

สรุปและวิจารณ์

จากการออกแบบและสร้างหม้อแปลงแยกขดลวด โดยใช้ฉนวนจำพวกเรซินเป็นฉนวนกันแรงดันสูงกระแสตรง จะมีปัญหาในเรื่องของการอบเรซินที่อุณหภูมิสูงๆ เพื่อให้แข็ง ในขณะที่ลดอุณหภูมิให้เย็นตัวลง จะเกิดการแตกร้าวของเรซินเมื่อใกล้ถึงอุณหภูมิห้อง สาเหตุอันหนึ่งก็เนื่องมาจากสัมประสิทธิ์การขยายตัวและหดตัวของลวดทองแดงกับฉนวนเรซินมีค่าไม่เท่ากัน ถ้านำไปอบที่อุณหภูมิต่ำๆ เช่น 90°C จะต้องใช้เวลายาวนานมาก ประมาณ 1 เดือน เรซินจึงจะแข็งตัว และเมื่อนำไปทดสอบด้วยไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงพบว่า ค่าความคงทนต่อแรงดันของฉนวนน้อยกว่าที่ต้องการคือ อยู่ที่ 50-60 กิโลโวลต์เท่านั้น ประการที่สองคือ การผสม Araldite F กับ Hardener HY905 ในอัตราส่วน 1:1 เพียง อย่างเดียวยังไม่พอ ควรมีการเติมสารจำพวกซิลิกาเข้าไป เพื่อลดความเสี่ยงในการแตกร้าวของเรซินในขณะที่เย็นตัวลง และจากการทดลองพบว่าถ้าอบเรซินเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 150°C แล้วปล่อยให้เย็นตัวลงจนใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง แล้วนำเข้าไปอบอีกครั้ง ตามเวลาที่กำหนดไว้[7] จะมีความเสี่ยงเรื่องการแตกร้าวของเรซินน้อยมาก

สำหรับการออกแบบหม้อแปลงนี้ ขดลวดทุกขดลวดควรมีการเผื่อขนาดพื้นที่หน้าตัดของลวดทองแดง ให้มีขนาดใหญ่กว่าที่กำหนด เนื่องจากขดลวดนี้ถูกห่อหุ้มด้วยฉนวนเรซินที่หนามาก จึงทำให้เกิดความร้อนสะสมภายในขดลวดมาก และอาจเป็นสาเหตุทำให้ฉนวนในหม้อแปลงเกิดการเสียหายฉีกขาดได้ หรือทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงสั้นลงด้วย จากรูปที่ 9(ข) เมื่อทดสอบอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของขดลวดที่สะสมอยู่ในขดลวดทุกขดลวด โดยให้หม้อแปลงจ่ายกระแสเต็มพิกัดอย่างต่อเนื่อง เป็นเวลา 14 ชั่วโมง เมื่อหาค่าความต้านทานของขดลวดที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ $1.422\ \Omega$ ได้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นของขดลวดเท่ากับ 47.19°C ซึ่งถือว่ามีค่าที่ไม่สูงมากนัก เมื่อเทียบกับค่าที่กำหนดไว้

การทดสอบหม้อแปลงส่วนอื่นๆ เมื่อเทียบกับที่คำนวณไว้ มีค่าใกล้เคียงกัน และสามารถทนต่อแรงดันสูงกระแสตรงตามที่กำหนดไว้คือ 150 กิโลโวลต์

ในการออกแบบและสร้างหม้อแปลงแยกขดลวดนี้ เป็นเพียงหม้อแปลงต้นแบบเท่านั้น มีพิกัดกำลังเพียง 300 วัตต์ ซึ่งจากการทดลองติดตั้งใช้งานในเบื้องต้น สามารถใช้งานได้ดีพอสมควร แต่ก็เป็นเพียงหนึ่งในหกตัวที่ใช้งานอยู่กับเครื่องกำเนิดนิวตรอน รองศาสตราจารย์ ดร. สมศรี สิงขรัตน์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และผู้ใช้งานเครื่องกำเนิดนิวตรอนหลายๆ ท่านได้เสนอแนะว่า ควรมีสร้างหม้อแปลงขนาดใหญ่เพียงตัวเดียว เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในส่วนของ ตัวกำเนิดไอออนในเครื่องกำเนิดนิวตรอน ดังนั้นจึงควรมีการพัฒนาออกแบบและสร้างในโอกาสต่อไป

กิติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บุคลากร ของอาคารวิจัยนิวตรอนพลังงานสูง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำและให้ความอนุเคราะห์ทั้งวัสดุและอุปกรณ์ต่างๆ ในการสร้างหม้อแปลงแยกขดลวดชนิดใช้ฉนวนกันแรงดันสูงกระแสตรง รวมไปถึงการอำนวยความสะดวกในการทดสอบเพื่อติดตั้งใช้งานจริง

ขอขอบคุณ คุณเสวต อินทศิริ จากสถาบันวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่และคณะ ที่ได้คำปรึกษาและข้อแนะนำต่างๆ เกี่ยวกับเรื่องเครื่องกำเนิดนิวตรอนและตรวจสอบการเขียนให้เข้าใจได้ง่ายยิ่งขึ้น ขอขอบคุณ คณาจารย์ คณะวิชาไฟฟ้า แผนกวิชาไฟฟ้ากำลัง สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคพายัพ ที่ได้กรุณาให้ข้อแนะนำทางด้านการฉนวนไฟฟ้าแรงสูง ขอขอบคุณ คุณสมงคล อนันตเสรี บริษัท Ciba Specialty Chemical (Thailand) ที่ได้ให้คำแนะนำในการใช้และอบเรซิน และขอขอบคุณคุณกุสุมาลย์ อุดตมะเวทิน ที่ช่วยพิมพ์เอกสารและท่านอื่นๆ ที่มีส่วนในการปฏิบัติงานครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ธีรพัฒน์ วิไลทอง, ฟิสิกส์ขั้นพื้นฐานของเครื่องเร่งอนุภาค, พิมพ์ครั้งที่ 1, เชียงใหม่, 2540.
- [2] สุรพล คำรงกิตติกุล, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, พิมพ์ครั้งที่ 1, 2535.
- [3] สำราญ สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, 2528.
- [4] อาคารวิจัยนิวตรอนพลังงานสูง, “เอกสารแนะนำอาคารวิจัยนิวตรอนพลังงานสูง” , ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, หน้า 1-2.
- [5] A. Stigant , J & P Transformer, 10th Edition, Butter worth & Co. Publishing, 1973.
- [6] H. Banspash, Transformer Design, Lecture Notes, Thai German Technical Teacher College, Bangkok, 1st. ed., 1975.
- [7].Instruction Manual, Araldite Casting and Impregnating Resin System, Ciba Specialty Chemical (Thailand) Ltd, June 1980.
- [8] Catalogue No. exe 320, Nippon Steel Corporation, Tokyo, 1988.