

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การประยุกต์ใช้หม้อแปลงฟลายแบคสำเร็จรูปสำหรับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง

ยุทธนา กันทะพะเยา และ เฉลิมพล เรืองพัฒนาวิวัฒน์*

คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
217 ถนนนนทบุรี ตำบลสวนใหญ่ อำเภอเมืองนนทบุรี จังหวัดนนทบุรี 11000

รับบทความ 7 กันยายน 2563 แก้ไขบทความ 16 กุมภาพันธ์ 2564 ตอรับบทความ 5 พฤษภาคม 2564

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง โดยใช้หม้อแปลงฟลายแบคสำเร็จรูปเป็นแหล่งจ่ายด้านอินพุตให้หม้อแปลงเทสลา เพื่อเป็นชุดสวิตติงการเบรกดาว์นผ่านอากาศของอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อยืนยันวิธีการที่นำเสนอจึงออกแบบการควบคุมวงจรแปลงผันแบบฟลายแบค โดยใช้หม้อแปลงฟลายแบคสำเร็จรูปพิกัดแรงดันเอาต์พุต 10-15 กิโลโวลต์ จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับวงจรหม้อแปลงเทสลาขนาด 30 กิโลโวลต์ 120 กิโลเฮิรตซ์ การทดสอบการเบรกดาว์นด้านเอาต์พุต ได้ออกแบบอิเล็กทรอนิกส์กำหนดระยะแกป 1 เซนติเมตร ประกอบด้วยอิเล็กทรอนิกส์ ทรงกลม-ทรงกลม ระนาบ-ระนาบ ทรงกลม-ระนาบ และปลายแหลม-ระนาบ พบว่าเกิดการเบรกดาว์นที่อิเล็กทรอนิกส์ด้านเอาต์พุตทุกกรณี สำหรับกรณีเกิดการเบรกดาว์นที่อิเล็กทรอนิกส์ทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร เมื่ออ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60052-2002 เทียบกับตารางมาตรฐานและปรับเปลี่ยนค่าบรรยากาศและอุณหภูมิ ณ ห้องทดลองได้แรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 31.5 กิโลโวลต์

คำสำคัญ : หม้อแปลงฟลายแบคสำเร็จรูป; หม้อแปลงเทสลา; เบรกดาว์น; อิเล็กทรอนิกส์; แกปทรงกลม

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 7977 9032, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: chalerm.pol.r@rmutp.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Application of a Commercial Flyback Transformer for a High Frequency High Voltage Source

Yutthana Kanthaphayao and Chalernpol Rueangepattanawiwat*

Faculty of Engineering and Achitecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi
217 Nonthaburi Road, Suanyai, District Nonthaburi, Nonthaburi 11000

Received 7 September 2020; Revised 16 February 2021; Accepted 5 May 2021

Abstract

In this article, the construction of a high-frequency, high-voltage commercial flyback transformer to supply an input voltage for a tesla transformer is proposed. The purpose of a demonstration is a breakdown through the air gap of electrode. To confirm the proposed method, the design of control of a flyback converter by using a commercial flyback transformer is rated with a 10 to 15 kV output voltage to supply a tesla transformer at a rated 30 kV and 120 kHz. The experimental results of an output breakdown, design of the electrode, and the setting for a 1 cm space are constructed. The electrodes consisted of the following: sphere–sphere electrode, plane–plane electrode, sphere–plane electrode, and rod–plane electrode. It was found that there was a breakdown at the output electrode in all cases. Accordingly, there was a breakdown with a 2 cm sphere diameter with reference to the IEC 60052-2002 standard; after that, it was compared with the standard table, and the atmospheric and temperature at the laboratory were adjusted, resulting to a high voltage equal to 31.5 kV.

Keywords : Commercial Flyback Transformer; Breakdown; Tesla Transformer; Electrode; Sphere Gap

* Corresponding Author. Tel.: +668 7977 9032, E-mail Address: chalernpol.r@rmutsb.ac.th

1. บทนำ

แหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ใช้หลักการเรโซแนนซ์เพื่อสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงถูกพัฒนามาตั้งแต่ในอดีตถึงปัจจุบัน [1]-[7] และถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย ยกตัวอย่างเช่น การทดสอบปรากฏการณ์ดิสชาร์จของฉนวน การสร้างโอโซน กระบวนการฆ่าเชื้อในอาหาร เป็นต้น ใน [1] ได้ศึกษาผลกระทบของตัวเก็บประจุที่แฝงอยู่ในขดลวดแรงต่ำและแรงสูง ใน [2], [3] ได้นำเสนอหลักการควบคุมสวิตช์แทนสปาร์กแกปสำหรับ

การสร้างแรงดันสูงความถี่สูง ในการวิเคราะห์การตอบสนองด้านเอาต์พุต เกี่ยวกับไฟฟ้าสถิตย์และการตอบสนองภาวะชั่วคราวได้อธิบายไว้ใน [4], [5] ส่วนใน [6] ได้ออกแบบขดลวดด้านแรงต่ำและแรงสูงรวมถึงการวิเคราะห์การรั่วของความเหนียวนำและตัวเก็บประจุแฝงทั้งด้านอินพุตและเอาต์พุต และใน [7] ได้อธิบายข้อดีของหม้อแปลงเทสลาเมื่อเทียบกับการสร้างแรงดันสูงด้วยวิธีของมาร์ก สำหรับการวิเคราะห์การเบรกดาวน์ของอิเล็กทรอนิกส์ได้นำเสนอไว้ใน [8], [9] ประเด็นที่

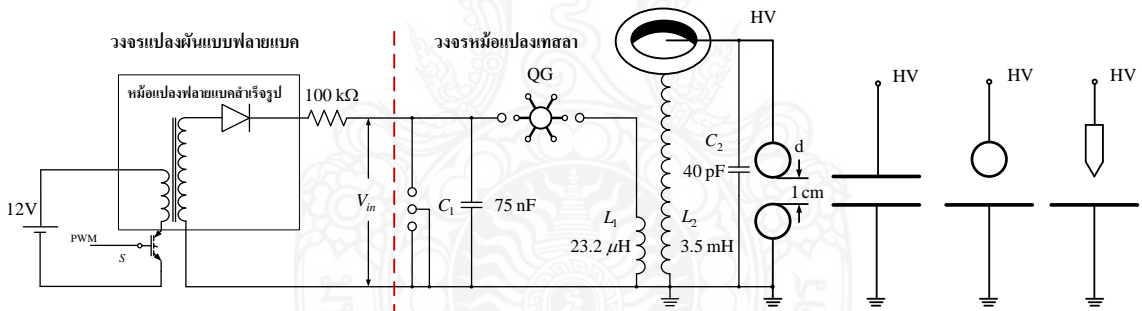
นำเสนอการเกิดเบรกดาวน์ของอิเล็กทรอนิกส์รูปทรงต่างๆ เช่น ทรงกลม-ทรงกลม ปลายแหลม-ระนาบ เป็นต้น

ในบทความนี้ได้ศึกษาและนำเสนอแหล่งจ่าย ด้านอินพุตของวงจรหม้อแปลงเทสลา โดยใช้วงจรแปลง ผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงเป็นตัวสร้างแรงดัน สูงให้กับวงจร ซึ่งแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันใช้ แบตเตอรี่ขนาดแรงดัน 12 โวลต์ ผลลัพธ์ที่ได้ของ แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงโดยใช้หลักการของ วงจรหม้อแปลงเทสลาสามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวกและ เป็นต้นแบบขนาดเล็กสำหรับการศึกษาการเกิดเบรก ดาวน์ของอิเล็กทรอนิกส์ และมีต้นทุนการสร้างต่ำ รวมถึง วงจรการสร้างไม่ยุ่งยากและซับซ้อน สำหรับการสร้าง วงจรการสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงด้วยหลักการ ของวงจรหม้อแปลงเทสลาประกอบด้วย 2 ส่วน คือ วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบฟลายแบค [10] ทำ หน้าที่เป็นแหล่งจ่ายด้านอินพุตของวงจรหม้อแปลงเท สลา และการออกแบบอิเล็กทรอนิกส์สำหรับทดสอบการ เกิดเบรกดาวน์ของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ไม่สม่ำเสมอ

เล็กน้อย และไม่สม่ำเสมอสูง เพื่อยืนยันความถูกต้องการ สร้างแรงดันสูงมีรายละเอียดดังหัวข้อต่อไปนี้

2. วิธีดำเนินการวิจัย

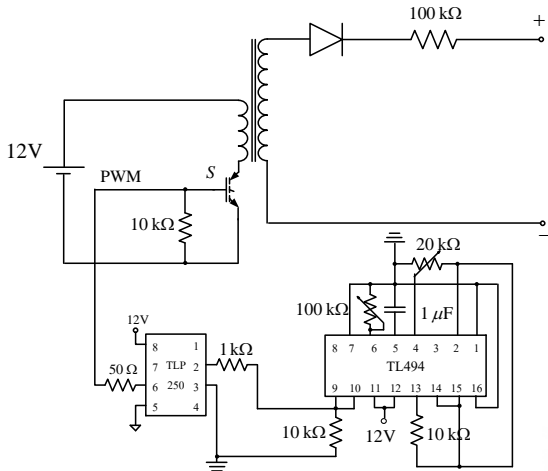
หลักการออกแบบการสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้า แรงดันสูงความถี่สูง ด้วยการนำหม้อแปลงฟลายแบค สำเร็จรูปมาทำหน้าที่แทนหม้อแปลงในวงจรแปลงผัน แบบฟลายแบค ซึ่งแรงดันเอาต์พุตสามารถนำมาทำ หน้าที่สำหรับเป็นแหล่งจ่ายให้กับวงจรหม้อแปลงเทสลา ซึ่งต้องการแรงดันอินพุตประมาณ 10-15 กิโลโวลต์ ใน บทความนี้ได้ทดสอบการเบรกดาวน์ผ่านอากาศของ อิเล็กทรอนิกส์โดยกำหนดตำแหน่งของอิเล็กทรอนิกส์มีระยะ แยกห่างกัน 1 เซนติเมตร สำหรับการทดสอบการเบรก ดาวน์ ประกอบด้วยอิเล็กทรอนิกส์ ทรงกลม-ทรงกลม ทรง กลม-ระนาบ และปลายแหลม-ระนาบ สำหรับ รายละเอียดการออกแบบจะแสดงดังหัวข้อต่อไปนี้



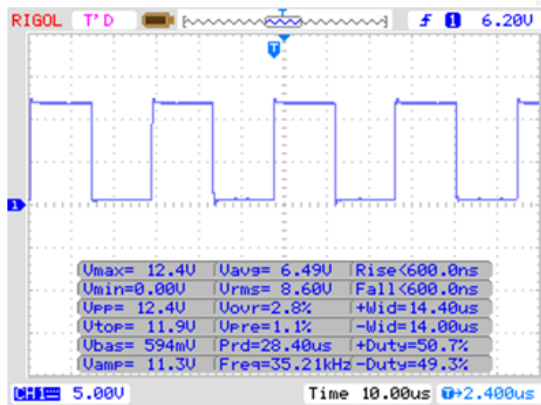
รูปที่ 1 วงจรแปลงผันแบบฟลายแบคและวงจรหม้อแปลงเทสลาที่นำเสนอ

2.1 การออกแบบวงจรแปลงผันแบบฟลายแบค

ในรูปที่ 1 แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือวงจรแปลง ผันแบบฟลายแบค [10] และวงจรหม้อแปลงเทสลา ออกแบบที่พิกัดแรงดัน 30 กิโลโวลต์ ความถี่ 120 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งทำหน้าที่สร้างแรงดันสูงความถี่สูงสำหรับ การทดสอบการเบรกดาวน์ สำหรับรายละเอียดการ ออกแบบของแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2 วงจรแปลงผันแบบฟลายแบค



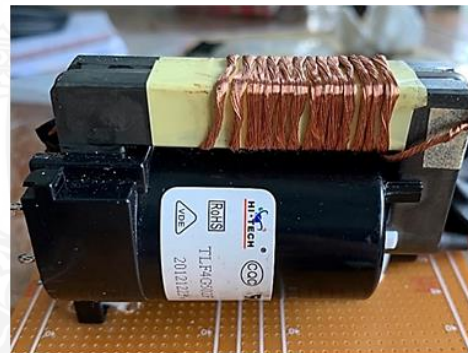
รูปที่ 3 รูปคลื่นสัญญาณวัฏจักรงานเท่ากับร้อยละ 50

ในรูปที่ 2 แสดงวงจรแปลงผันแบบฟลายแบค รายละเอียดการออกแบบในงานวิจัยนี้ใช้หม้อแปลงฟลายแบคสำเร็จรูป รุ่น TLF4G502F กำหนดให้แรงดันอินพุต 12 โวลต์ ความถี่การสวิตช์ 35 กิโลเฮิร์ตซ์ และแรงดันเอาต์พุต เพื่อเป็นแหล่งจ่ายให้กับวงจรหม้อแปลงเตสลาซึ่งต้องการไฟฟ้าแรงดันสูงประมาณ 10-15 กิโลโวลต์ [11] สำหรับการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบฟลายแบคเป็นระบบควบคุมแบบวงรอบเปิดโดยการสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานด้วยไอซีสำเร็จรูป TL494 ซึ่งแรงดันเอาต์พุต (V_o) เป็นไปตามสมการที่ 1 เมื่อ D คือ วัฏจักรงาน N_1 คือ จำนวนรอบขดลวดด้านปฐมภูมิ N_2 คือ จำนวนรอบขดลวดด้านทุติยภูมิ และ V_{in} คือ แรงดันอินพุตใช้แบตเตอรี่ 12 โวลต์

$$V_o = V_{in} \frac{D}{1-D} \left(\frac{N_2}{N_1} \right) \quad (1)$$

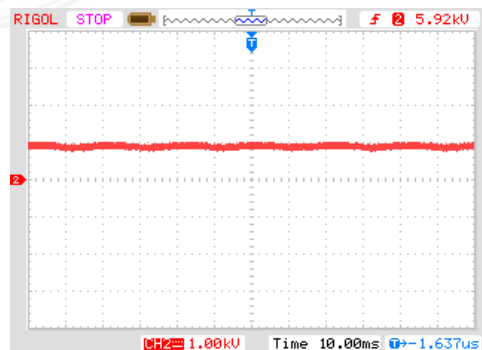
$$F_{sw} = \frac{1.1}{R_T C_T} \quad (2)$$

การสร้างความถี่การสวิตช์ออกแบคด้วยการปรับค่าความต้านทานที่ขา 6 ของไอซี TL494 ซึ่งความถี่ที่ได้รับเป็นไปตามสมการที่ 2 เมื่อกำหนดให้ตัวเก็บประจุ C_T เท่ากับ $1 \mu F$ และสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมสามารถปรับค่าวัฏจักรงานที่ความต้านทานที่ขา 4 ของไอซี TL494 และเมื่อปรับวัฏจักรงานไปที่ร้อยละ 50 แสดงดังรูปที่ 3 ถูกลำนำมาใช้สำหรับการขับสวิตช์กำลังของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า เมื่อได้สัญญาณควบคุมจากไอซี TL494 จะผ่านการแยกโดดด้วยไอซี TLP250 แสดงดังรูปที่ 2

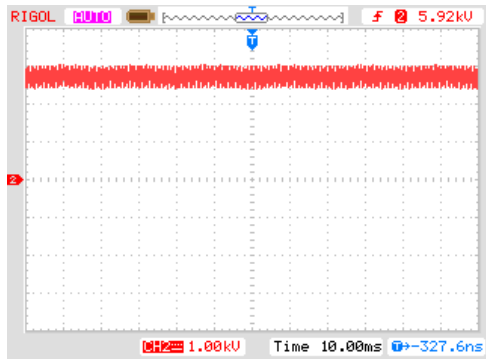


รูปที่ 4 หม้อแปลงฟลายแบคสำเร็จรูป

เนื่องจากการใช้หม้อแปลงฟลายแบคสำเร็จรูปไม่ทราบจำนวนรอบขดลวดทั้งด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิดังนั้นจึงทดสอบด้วยการพันขดลวดด้านปฐมภูมิจำนวน 13 รอบ ด้วยตัวนำแบบเส้นตัวนำตีขนานแบบลิตซ์วาย (Litz wire) แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 5 แรงดันด้านเอาต์พุตเมื่อกำหนดให้วัฏจักรงานเท่ากับร้อยละ 10



รูปที่ 6 แรงดันด้านเอาต์พุตเมื่อกำหนดให้วัฏจักรงานเท่ากับร้อยละ 80

ทดสอบป้อนแรงดันอินพุตไฟฟ้ากระแสตรงเท่ากับ 1 โวลต์ ให้กับวงจรแปลงผันแบบฟลายแบคและกำหนดให้ค่าวัฏจักรงานเท่ากับร้อยละ 10 ไปจนถึงร้อยละ 80 เพื่อประเมินแรงดันเอาต์พุตให้ได้ตามเงื่อนไขประมาณ 10-15 กิโลโวลต์ บันทึกผลแสดงดังตารางที่ 1 สำหรับ เครื่องมือ การ วัด ผล ทด ส อ บ ใช้ ออสซิลโลสโคป RIGOL โมเดล DS 1102E และดิจิตอลมัลติมิเตอร์ PROTEK ผ่าน โพรบ X 1000 PINTEK รุ่น HVP 40 มีอัตราส่วน 1 โวลต์ : 1000 โวลต์ ผลการวัดแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ค่าวัฏจักรงานร้อยละ 50 เท่ากับ 2.1 กิโลโวลต์ ขณะไม่มีโหลด ดังนั้น จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตกับเอาต์พุต มีค่าเท่ากับ 1 โวลต์ : 2.1 กิโลโวลต์ และตัวอย่างแรงดันด้านเอาต์พุตของวัฏจักรงานร้อยละ 10 และ 80 แสดงดังรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า เมื่อป้อนแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันเท่ากับ 12 โวลต์ และกำหนดวัฏจักรงานเท่ากับร้อยละ 50 จะได้แรงดันเอาต์พุตเพื่อป้อนให้กับหม้อแปลงเตสลาประมาณ 25.2 กิโลโวลต์ จากผลที่ได้รับการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันแบบฟลายแบคจึงออกแบบให้สามารถปรับค่าวัฏจักรงานที่ขา 4 ของไอซี TL494 ได้โดยการปรับความต้านทานเพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุต สำหรับการทดสอบการเบรกควานด้านเอาต์พุตของวงจรหม้อแปลงเตสลา

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบการทำงานของวงจรแปลงผันแบบฟลายแบคเมื่อป้อนแรงดันอินพุตเท่ากับ 1 โวลต์

ที่	วัฏจักรงาน (%)	แรงดันเอาต์พุต (kV)
1	10	1
2	20	1.5
3	30	1.6
4	40	1.9
5	50	2.1
6	60	2.1
7	70	2.2
8	80	2.9

2.2 วงจรหม้อแปลงเตสลา

จากรูปที่ 1 ในส่วนของวงจรหม้อแปลงเตสลา [11] เป็นวงจรสำหรับการสร้างไฟฟ้าแรงสูงความถี่สูง ในห้องทดสอบ ใช้หลักการทำงานของวงจรหม้อแปลงเตสลาใช้แรงดันอินพุตประมาณ 10-15 กิโลโวลต์ การทำงานของวงจรหม้อแปลงเตสลาเมื่อป้อนแรงดันอินพุตผ่านตัวความต้านทานเพื่อจำกัดกระแส ตัวเก็บประจุ C_1 จะทำหน้าที่อัดประจุซึ่งขนาดแรงดันจะถูกจำกัดด้วยระยะห่างของสปาร์กแกปและการดับอาร์คที่สปาร์กแกป จะอาศัยหลักการยึดล่ออาร์คให้ห่างออกจากกันด้วยการดับอาร์ค แบบกึ่งตัน เมื่อเกิดที่สปาร์กที่แกป แรงดันที่ตัวเก็บประจุ C_1 จะถูกป้อนให้กับขดลวดด้านปฐมภูมิ (L_1) จึงทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานระหว่างตัวเก็บประจุ L_1 กับ C_1 ซึ่งมีลักษณะเกิดการแกว่งกวัดด้วยความถี่สูง และ เกิด การ ถ่าย เท พ ล ง งาน ทาง ส น า ม แม่เหล็กผ่านแกนอากาศไปขดลวดด้านทุติยภูมิ (L_2) ซึ่งถูกต่อขนานด้วยตัวเก็บประจุ C_2 ซึ่งเป็นค่าความจุไฟฟารวมของขดลวดแรงสูง อุปกรณ์การวัด และวัสดุทดสอบ สำหรับความถี่การแกว่งกวัดด้านปฐมภูมิ (f_{01}) และด้านทุติยภูมิ (f_{02}) ของวงจรหม้อแปลงเตสลาแสดงดังสมการที่ 3 และ 4 และในกรณีที่ปรับวงจรให้ $L_1 C_1 = L_2 C_2$ จะเป็นผลให้ความถี่ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิเท่ากัน ขนาดของวงจรหม้อแปลงเตสลาที่ออกแบบมีขนาดแรงดันเอาต์พุต 30 กิโลโวลต์ ความถี่ 120 กิโลเฮิรตซ์ รายละเอียดการออกแบบสามารถพิจารณาได้จาก [11], [12]

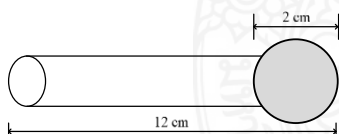


รูปที่ 7 ต้นแบบวงจรหม้อแปลงเทสลา

สำหรับภาพถ่ายวงจรหม้อแปลงเทสลาแสดงดังรูปที่ 7 มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบการเบรกดาวนผ่านอากาศของอิเล็กโทรดที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย และไม่สม่ำเสมอสูง ซึ่งความเครียดสนามไฟฟ้าประมาณ 30 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร จะเกิดไอออนในเซชัน ดังนั้นการทดสอบการเบรกดาวนจะกำหนดระยะแกปของอิเล็กโทรด 1 เซนติเมตร สำหรับทดสอบการเบรกดาวน

$$f_{01} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}} \quad (3)$$

$$f_{02} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_2}} \quad (4)$$

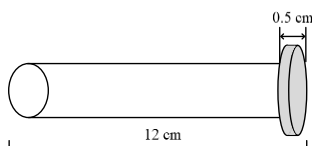


ก) แบบอิเล็กโทรดแบบทรงกลม



ข) ภาพถ่ายอิเล็กโทรดแบบทรงกลม

รูปที่ 8 อิเล็กโทรดแบบทรงกลม

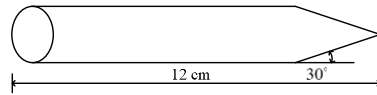


ก) แบบอิเล็กโทรดแบบกระสวย



ข) ภาพถ่ายอิเล็กโทรดแบบกระสวย

รูปที่ 9 อิเล็กโทรดแบบกระสวย



ก) แบบอิเล็กโทรดแบบปลายแหลม



ข) ภาพถ่ายอิเล็กโทรดแบบปลายแหลม

รูปที่ 10 อิเล็กโทรดแบบปลายแหลม

3. การออกแบบอิเล็กโทรด

สำหรับอิเล็กโทรดเพื่อวัดขนาดแรงดันด้านเอาต์พุตของวงจรหม้อแปลงเทสลาตามมาตรฐานของ IEC 600052-2002 [13] ในบทความนี้ได้ออกแบบเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลมขนาด 2 เซนติเมตร ส่วนการทดสอบการเบรกดาวนผ่านอากาศของอิเล็กโทรดที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย และไม่สม่ำเสมอสูง [11] ได้ออกแบบอิเล็กโทรดดังต่อไปนี้ ทรงกลม กระสวย และปลายแหลม แสดงดังรูปที่ 8 ถึง 10

4. ผลการวิจัย

4.1 การวัดแรงดันสูงด้วยอิเล็กโทรดทรงกลม – ทรงกลม ที่ระยะแกป 1 เซนติเมตร

สำหรับการวัดไฟฟ้าแรงสูงด้วยแกปทรงกลมตามมาตรฐาน IEC60052-2002 โดยออกแบบให้แกปทรงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร และวางระยะแกปห่าง 1 เซนติเมตร มีค่าแรงดันที่ทำให้เกิดการสปาร์กที่แกปทรงกลมเท่ากับ 30.7 กิโลโวลต์ เมื่อปรับค่าแรงดันเบรกดาวนให้ตรงกับสภาพแวดล้อมขณะที่วัด ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่าแรงดันเบรกดาวนที่แท้จริงได้ดังสมการที่ 5 ถึง 7

$$U_b = U_{bn} \times k_h \quad (5)$$

$$k_h = 1 + \left[0.002 \left(\frac{h}{\delta} - 8.5 \right) \right] \quad (6)$$

$$\delta = \frac{b}{b_n} \frac{273 + t_n}{273 + t} \quad (7)$$

โดยที่

U_b คือ แรงดันที่ทำให้เกิดการสปาร์กที่แกปทรงกลม

U_{bn} คือ ค่าแรงดันเบรกดาวนที่สภาวะมาตรฐาน

h คือ ความชื้นสัมบูรณ์เป็น (กรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

t_n คือ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

t คือ อุณหภูมิของห้องในขณะที่วัด (องศาเซลเซียส)

b คือ ความดันบรรยากาศ 1013 mbar

b_n คือ ความดันของอากาศอ่านจากบาริโอมิเตอร์ (bar)

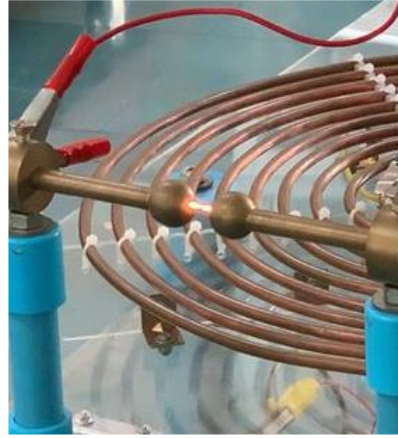
จากข้อมูลที่ได้รับขณะทำการวัดแรงดันด้วยแกปทรงกลม สถานที่ทดสอบวัดอุณหภูมิได้เท่ากับ 26 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศเท่ากับ 1014 mbar ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศในทอมอุณหภูมิเทอร์โมมิเตอร์กระเปาะแห้งมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 26 องศาเซลเซียส และกระเปาะเปียกมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 24 องศาเซลเซียส และสามารถอ่านค่าจากกราฟความชื้นสัมบูรณ์อากาศได้เท่ากับ 21 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ดังนั้นค่าแรงดันเบรกดาวนที่แท้จริงมีค่าเท่ากับ 31.5 กิโลโวลต์ มีรายละเอียดการคำนวณดังนี้

$$\delta = \frac{1013}{1014} \frac{273 + 20}{273 + 26} = 0.98 \quad (8)$$

$$k_h = 1 + \left[0.002 \left(\frac{21}{0.98} - 8.5 \right) \right] = 1.026 \quad (9)$$

$$U_b = 30.7 \times 1.026 = 31.5 \text{ kV} \quad (10)$$

และรูปที่ 11 แสดงภาพถ่ายขณะเกิดการสปาร์กที่แกปทรงกลม



รูปที่ 11 ปรากฏการณ์ขณะเกิดสปาร์กที่แกปทรงกลม

4.2 การทดสอบการเบรกดาวนของสนามไฟฟ้า

สำหรับการทดสอบการเบรกดาวนของสนามไฟฟ้ากำหนดระยะแกประหว่างอิเล็กโทรดห่างกัน 1 เซนติเมตร ตามเงื่อนไขของอิเล็กโทรดทรงกลม และวัสดุฉนวนเท่ากับร้อยละ 60 เพื่อให้ได้แรงดันสูงเป็นแหล่งจ่ายให้กับหม้อแปลงทดสอบ การทดสอบการเบรกดาวนของสนามไฟฟ้า กรณีสนามไฟฟ้ามีความเข้มสม่ำเสมอ ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย และไม่สม่ำเสมอสูง ถูกแทนด้วยรูปทรงอิเล็กโทรด [11] ดังต่อไปนี้

4.2.1 อิเล็กโทรดแบบระนาบ-ระนาบ

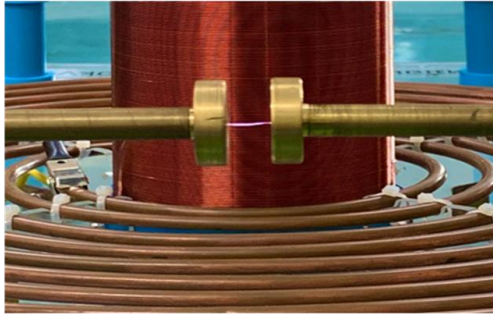
ในกรณีที่สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอจะแทนด้วยอิเล็กโทรดแบบระนาบ-ระนาบ ผลการทดสอบการเกิดเบรกดาวนแสดงปรากฏการณ์ขณะเกิดการสปาร์กที่แกปแสดงดังรูปที่ 12

4.2.2 อิเล็กโทรดแบบทรงกลม-ระนาบ

ในกรณีที่สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยจะแทนด้วยอิเล็กโทรดทรงกลม-ระนาบ ผลการทดสอบการเกิดเบรกดาวนขณะเกิดการสปาร์กที่แกปแสดงดังรูปที่ 13

4.2.3 อิเล็กโทรดแบบปลายแหลม-ระนาบ

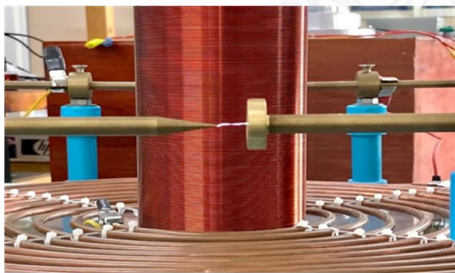
ในกรณีที่สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง จะแทนด้วยอิเล็กโทรดปลายแหลม-ระนาบ ผลการทดสอบการเกิดเบรกดาวนขณะเกิดการสปาร์กที่แกป ดังรูปที่ 14



รูปที่ 12 ปรากฏการณ์ขณะเกิดการสปาร์กที่อเล็กโทรด
ระนาบ-ระนาบ



รูปที่ 13 ปรากฏการณ์ขณะเกิดการสปาร์กที่อเล็กโทรด
ทรงกลม-ระนาบ



รูปที่ 14 ปรากฏการณ์ขณะเกิดการสปาร์กที่อเล็กโทรด
ปลายแหลม-ระนาบ

5. สรุปผล

บทความนี้นำเสนอการสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง สำหรับทดสอบการเบรกดาวนระหว่างอเล็กโทรด ประกอบด้วยวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบฟลายแบค สำหรับเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงให้วงจรหม้อแปลงเทสลา ผลการทดสอบเมื่อกำหนดให้วัฏจักรงานเท่ากับร้อยละ 60 เพื่อควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันแบบฟลายแบค และใช้

แกปทรงกลมขนาด 2 เซนติเมตร กำหนดระยะแกปเท่ากับ 1 เซนติเมตร เพื่อวัดขนาดไฟฟ้าแรงสูงตามมาตรฐาน IEC60052-2002 พบว่าขณะเกิดการสปาร์กมีไฟฟ้าแรงสูงเมื่อปรับเทียบตามมาตรฐานได้แรงดันเท่ากับ 31.5 กิโลโวลต์ ในกรณีทดสอบการเกิดเบรกดาวนที่อเล็กโทรดกำหนดระยะแกป 1 เซนติเมตร ประกอบด้วยอเล็กโทรดระนาบ-ระนาบ ทรงกลม-ระนาบ และปลายแหลม-ระนาบ เกิดการสปาร์กที่แกปทุกกรณี ยิ่งกว่านั้นวงจรหม้อแปลงเทสลาที่สร้างขึ้นมีต้นทุนต่ำ และยังสามารถนำมาสาธิตการเกิดเบรกดาวนสำหรับการเรียนการสอนในรายวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง เพื่อให้นักศึกษาเห็นภาพกระบวนการเบรกดาวนผ่านอากาศ ของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย และไม่สม่ำเสมอสูง

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ นายธงชัย พันธุ์เลิศสกุล นายธนารักษ์ ฤทธิ์นาคา และนายธีรภัทร์ ศุภมณี ที่ประกอบชุดการทดสอบ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Eduard M. M. Costa, "Resonance on Coils Excited by Square Waves: Explaining Tesla Transformer," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 46, no. 5, pp. 1186-1192, May 2010.
- [2] Y. Liu, L. Lee, Y. Bing, Y. Ge, W. Hu and F. Lin, "Resonant Charging Performance of Spiral Tesla Transformer Applied in Compact High-Voltage Repetitive Nanosecond Pulse Generator," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 41, no. 12, pp. 3651-3658, Dec. 2013.
- [3] L. Li, M. Ning, C. Dehuai, L. Lun, K. Qiang, L. Mingjia, C. Yong and P. Yuan, "Study on Double Resonant Performance of Air-core Spiral Tesla Transformer Applied in Repetitive Pulsed Operation," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical*

- Insulation*, vol. 22, no. 4, pp. 1916-1923, Aug. 2015.
- [4] R. M. Craven, I. R. Smith and B. M. Novac, "Optimizing the Secondary Coil of a Tesla Transformer to Improve Spectral Purity," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 42, no. 1, pp. 1-4 Jan. 2014.
- [5] B. M. Novac, M. Wang, I. R. Smith and P. Senior, "A 10 GW Tesla-Driven Blumlein Pulsed Power Generator," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 42, no. 10, pp. 2876-2885, Oct. 2014.
- [6] L. Pécastaing, M. Rivaletto, A. S. de Ferron, R. Pecquois and B. M. Novac, "Development of a 0.6-MV Ultracompact Magnetic Core Pulsed Transformer for High-Power Applications," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 46, no. 1, pp. 156-166, Jan. 2018.
- [7] Y. Zhao, W. Xie, J. Jiang, L. Chen, S. Feng, M. Wang and Z. Wang, "Replacement of Marx Generator by Tesla Transformer for Pulsed Power System Reliability Improvement," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 47, no. 1, pp. 574-580, Jan. 2019.
- [8] A. Denat, O. Lesaint and F. M. Cluskey, "Breakdown of Liquids in Long Gaps: Influence of Distance, Impulse Shape, Liquid Nature, and Interpretation of Measurements," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 22, no. 5, pp. 2581-2591, Oct. 2015.
- [9] T. Namhormchan, "Field Utilization Factor of Electrode for Breakdown Voltage Test for Liquid Insulation According to IEC 60156 Standard," *The Journal of KMUTNB*, vol. 21, no. 3, pp. 541-548, Sep. - Dec. 2011.
- [10] A. Yawootti and P. Wimonthanasit, "High Voltage Power Supply from Commercial Flyback Transformer," *Journal of Engineering RMUTT*, vol. 16, no. 2, pp. 107-118, Jul. - Dec. 2018.
- [11] Samruay Sangkasaad, *High Voltage Engineering*, 3rd edition, 2006.
- [12] M. Tilbury, *The ultimate Tesla Coil Design and Construction Guide*, United States of America: McGraw-Hill Companies, 2008.
- [13] *Voltage measurement by means of standard air gap*, IEC 2002-60052.