

การออกแบบและวิเคราะห์แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับกำลังต่ำ แรงดันสูง ความถี่สูง สำหรับการสร้างไอซอนด้วยสนามไฟฟ้าที่มีความไม่สม่ำเสมอสูง

สุดาพร ชาทาพุทธิสุวรรณค์¹⁾ จักรกฤษณ์ จันทร์เขียว²⁾ และ วิจิตร กิณเรศ³⁾

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอหลักการวิเคราะห์และออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับกำลังต่ำ แรงดันสูง ความถี่สูง ในการผลิตไอซอน โดยใช้แหล่งพลังงานหลักจากแบตเตอรี่ ระดับแรงดัน 12 โวลต์ 12 A-hr วงจรหลักประกอบด้วยวงจร กระดบแรงดันที่รักษาแรงดันให้คงที่ 100 V_{DC} และวงจรฟลายแบ็คคอนเวอร์เตอร์โดยมีอุปกรณ์หลักคือสวิตช์ตัวเดียวกับ หม้อแปลงความถี่สูงเพื่อสร้างแรงดันสูงจ่ายให้กับแท่งอิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกซ้อนกันร่วมที่มีค่าแฟกเตอร์ของ สนามไฟฟ้า $\eta^* \leq 20\%$ อนุวสองชั้นเพื่อให้รูปแบบของสนามไฟฟ้ามีความไม่สม่ำเสมอสูงที่ระดับแรงดัน 2.391-2.808 kV ในตอนแรกได้ออกแบบและสร้างแท่งอิเล็กโทรด จากนั้นได้มีการจำลองการทำงานของวงจรแหล่งจ่ายไฟที่ได้ออกแบบ ขึ้นด้วย MATLAB/SIMULINK เพื่อยืนยันการทำงานที่ถูกต้องเปรียบเทียบกับ การทดลอง ได้มีการทดสอบสมรรถนะของ เครื่องต้นแบบภายใต้สภาวะการเปลี่ยนระดับแรงดันเอาท์พุท ซึ่งจะมีผลต่อปริมาณไอซอนที่เกิดขึ้น

คำสำคัญ : แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับกำลังต่ำ, สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง, หม้อแปลงแรงดันสูง

*

1), 2) อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยสยาม 10163, E-mail : nong_mppt@yahoo.com

3) รองศาสตราจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 10520

Design and Analysis of a Low-Power, High-Voltage, High-Frequency AC Power Supply for Ozone Generation with Highly Non-Uniform Electric Field

Sudaporn Chataputtisawan^{* 1)} Jrukkrit Chankiew²⁾ and Vijit Kinnares³⁾

ABSTRACT

This paper presents the design and analysis of a low power, high voltage, high frequency AC power supply for ozone generation, which energy is converted from a 12V, 12A-hr battery are proposed in this paper. The main circuit consists of, a constant 100V_{DC} for DC boost regulator, a fly back converter with a step-up transformer and only one switching device and two insulator coaxial cylindrical electrodes with electric field factor $\eta^* \leq 20\%$ for highly non uniform electric field and voltages range between 2.391-2.808kV. The study, design and construction of electrode are proposed. Then simulated of the design is using MATLAB/SIMULINK verifies correct operation compared with the experiment is given. Performance of the prototype under various operating conditions such as variations of output voltage, which affects generated ozone level, has been investigated.

Keywords: a low power AC power supply, highly non uniform electric field, step up transformer

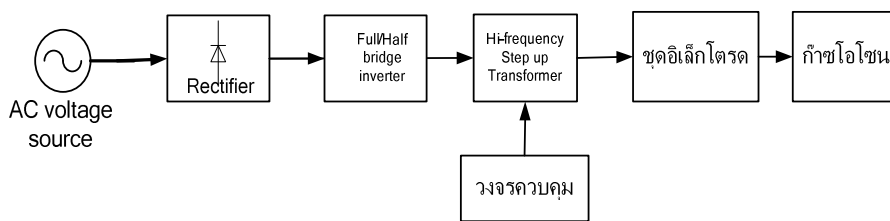
^{* 1), 2)} Lecturer, Department of Electrical Engineering, Siam University 10163, E-mail: nong_mppt@yahoo.com

³⁾ Associate Professor, Department of Electrical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang 10520

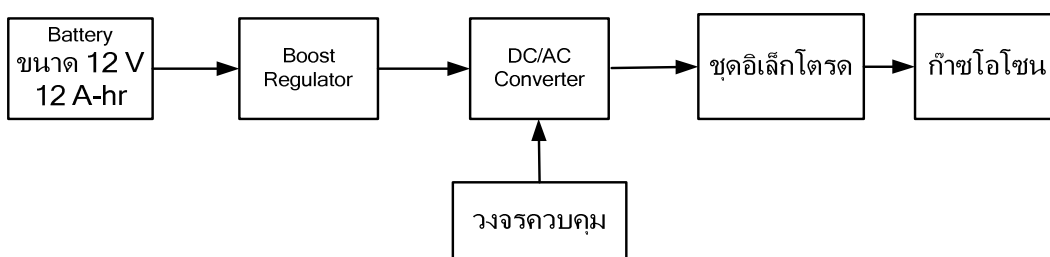
1. บทนำ

การนำสารเคมีจำพวก คลอรีนต่างทับทิม เข้ามาใช้ในการฆ่าเชื้อโรคสารเหล่านี้จะทิ้งสารตกค้างที่เป็นอันตรายเอาไว้ในผลิตภัณฑ์จนเกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมเป็นพิษ ไอซอน เป็นก๊าซที่นำเข้ามาเพื่อใช้ในการฆ่าเชื้อโรคแทนสารเคมีเหล่านี้ ด้วยคุณสมบัติทางเคมีที่สามารถทำความสะอาดให้กับน้ำและอากาศที่มีสิ่งเจือปนได้เป็นอย่างดีเมื่อเทียบกับสารเคมีชนิดอื่นๆ และสลายตัวได้ตามธรรมชาติโดยไม่ทิ้งสารตกค้างเอาไว้ แต่ก๊าซไอซอนก็มีคุณสมบัติเป็นก๊าซพิษดังนั้นการนำไปใช้จึงต้องมีการควบคุมปริมาณให้เหมาะสมกับลักษณะงาน

การนำก๊าซไอซอนไปใช้นั้นต้องทำการผลิตก๊าซ ณ ตำแหน่งใช้งานเท่านั้น เนื่องจากไอซอนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียรจึงไม่สามารถเก็บไว้ได้ หลักการการผลิตไอซอนในบทความนี้เกี่ยวข้องกับตรงกับการสร้างปรากฏการณ์การแตกตัวแบบโคโรนา (Corona Discharge) ในอากาศงานวิจัยที่นำเสนอส่วนมากจะนำเสนอการสร้างแหล่งจ่ายแบบฟูลบริดจ์และแบบฮาร์ฟบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (อนุรักษ์ มั่นสุข, 2550) ดังแสดงการเปรียบเทียบวิธีเก่าและวิธีที่นำเสนอในรูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ



รูปที่ 1 โครงสร้างเครื่องสร้างไอซอนโดยใช้เทคนิคฟูลบริดจ์หรือฮาร์ฟบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ในการสร้างกำลังสูง แรงดันสูง ความถี่สูง



รูปที่ 2 โครงสร้างเครื่องสร้างไอซอนโดยใช้เทคนิคฟลายแบ็คคอนเวอร์เตอร์ ในการสร้างกำลังต่ำ แรงดันสูง ความถี่สูง

จากรูปที่ 1 ข้อดีของเทคนิคนี้ คือ สะดวกในการใช้งานเพราะสามารถใช้กับไฟฟ้าทั่วๆไปได้ สร้างปริมาณไอซอนได้มาก ข้อเสียคือมีโครงสร้างขนาดใหญ่ ต้นทุนในการผลิตสูง การนำไปใช้ต้องมีการควบคุมและนำไปใช้งานอย่างถูกต้องเพื่อไม่ให้เกิดอันตราย จึงเหมาะกับงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่

จากรูปที่ 2 เป็นเทคนิคที่นำเสนอในบทความนี้มีข้อดี คือ มีขนาดโครงสร้างเล็กกว่าแบบที่ 1 ต้นทุนในการสร้างต่ำกว่าและได้ออกแบบโดยนำแบตเตอรี่เข้า

มาใช้เป็นแหล่งพลังงานหลักซึ่งจะสามารถนำไปใช้กับสถานที่ที่ไม่มีไฟฟ้าและสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับแหล่งพลังงานทดแทนอื่นได้ เช่น พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น ข้อเสีย คือ เครื่องที่นำเสนอจะผลิตไอซอนได้ในปริมาณน้อยในบทความจึงเน้นการนำไปใช้ภายในครัวเรือน และเนื่องจากปริมาณไอซอนที่ผลิตได้น้อยจึงไม่ก่อให้เกิดอันตรายแต่เพียงพอดต่อการนำไปใช้เพื่อให้เกิดประโยชน์ตามลักษณะงาน

2. ทฤษฎีไอโซน

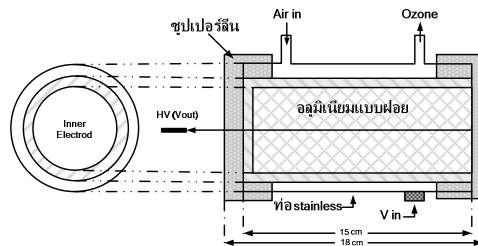
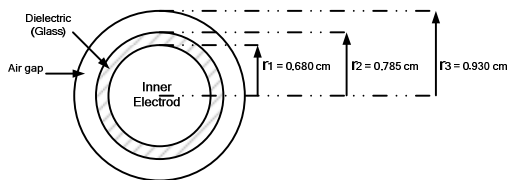
2.1 การหาค่าพลังงานและสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตก๊าซไอโซน

การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของแท่งอิเล็กโทรดมีความจำเป็นเพื่อนำไปออกแบบแหล่งจ่ายให้สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้เพียงพอต่อการเกิดไอโซนจากทฤษฎีก๊าซไอโซนเป็นก๊าซที่เกิดจากการจับตัวกันของออกซิเจน 3 อะตอม ขึ้นตอนการผลิตก๊าซไอโซน คือ ต้องป้อนพลังงานจากภายนอกเข้าไปกระตุ้นให้ก๊าซออกซิเจน (Oxygen gas:O₂) แตกพันธะออกเป็นอะตอมอิสระของออกซิเจน (O) แล้วจึงรวมกลับเป็น O₂ กลายเป็น O₃ ดังสมการ O₂ + O = O₃ ซึ่งพลังงานพันธะของ O₃ น้อยกว่า O₂ มาก ดังนั้นในการออกแบบแหล่งจ่ายจึงต้องคำนวณหาระดับพลังงานที่จ่ายให้กับระบบแล้วไม่ทำให้เกิดความร้อนขึ้นในช่องว่างอากาศมากเกินไป โดยต้องระวังการเกิดการเบรกดาวนในระบบ ในย่านพลังงานทางเคมีที่สามารถทำให้เกิดก๊าซไอโซนจะอยู่ในย่านพลังงาน

ช่วง 493.2 - 682.8 kJ/mol ดังนั้นสามารถคำนวณย่านพลังงานทางไฟฟ้าที่คิดจากออกซิเจน 21 %ในอากาศโดยประมาณ ย่านพลังงานไฟฟ้าที่ต้องใช้ในการสลายพลังงานพันธะออกซิเจนคือช่วง 1.172 - 1.62 kWh/m³ จึงจะสามารถทำให้เกิดไอโซนขึ้นในช่องว่างอากาศได้

2.2 การออกแบบแท่งอิเล็กโทรดและการคำนวณแรงดันที่ใช้ในการแตกตัวของออกซิเจน

ในการออกแบบส่วนกำเนิดไอโซนจะใช้หลักการของสนามไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้ในการสร้างแท่งอิเล็กโทรด โดยออกแบบให้แท่งอิเล็กโทรดมีลักษณะเป็นทรงกระบอกซ้อนกันสามชั้นมีขนาดสองชั้น ซึ่งจะก่อให้เกิดสนามไฟฟ้าที่มีความไม่สม่ำเสมอสูง ($\eta^* \leq 20\%$) ภายในช่องว่างอากาศโดยมีขนาดของแท่งและการออกแบบดังแสดงในรูปที่ 3 และสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้ตามสมการที่ (1), (2)



รูปที่ 3 ขนาดและลักษณะแท่งอิเล็กโทรดสำหรับผลิตไอโซน

ฉนวนชั้นที่ 1 เลือกใช้แก้วเป็นฉนวนมีค่าคงที่ฉนวนสัมพัทธ์ (ϵ_1) = 8 ฉนวนชั้นที่ 2 เป็นอากาศมีค่าคงที่ฉนวนสัมพัทธ์ (ϵ_2) = 1,

$$r_1 = 0.680 \text{ cm} . r_2 = 0.785 \text{ cm} . r_3 = 0.930 \text{ cm} .$$

ยาว $l = 15 \text{ cm}$. ค่าปริมาตรอากาศภายในช่องว่างอากาศ (V) = 11.7185 cm³ นำมาคำนวณหาค่าย่านสนามไฟฟ้าได้ดังสมการที่ (1)

$$E = \sqrt{\frac{2W}{\epsilon_2 V}} \tag{1}$$

เมื่อ E คือค่าความเครียดสนามไฟฟ้า, W คือพลังงานไฟฟ้า, V คือปริมาตรอากาศภายในช่องว่างอากาศจะได้ย่านสนามไฟฟ้าที่ใช้ต่ำสุด

$$E_{\min} = \sqrt{\frac{2(0.0137)}{(8.854 \times 10^{-12})(11.7185)}} = 16.250 \text{ kV / cm}$$

และย่านสนามไฟฟ้าที่ใช้สูงสุดคือ

$$E_{\max} = \sqrt{\frac{2(0.0189)}{(8.854 \times 10^{-12})(11.7185)}} = 19.087 \text{ kV / cm}$$

จากสมการที่ (1) นำมาคำนวณหาค่าช่วงของแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดไอโซนและไม่ทำให้เกิดการเบรกดาวนในระบบได้จากสมการที่ (2)

$$V = \frac{E_{max} r_2 \left(\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)}{\epsilon_1 \cdot \epsilon_2} \quad (2)$$

เมื่อ V คือ ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดไอซอน, E_{MAX} คือค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด

เมื่อ $E_{max} = 16.250 \text{ kV} / \text{cm}$

ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดไอซอน (V) =

$$\frac{(16.250 \times 10^3)(0.785) \left(8 \ln \frac{0.785}{0.930} + \ln \frac{0.785}{0.680} \right)}{8} = 2.391 \text{ kV}$$

เมื่อ $E_{max} = 19.087 \text{ kV} / \text{cm}$

ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดไอซอน (V) =

$$\frac{(19.087 \times 10^3)(0.785) \left(8 \ln \frac{0.785}{0.930} + \ln \frac{0.785}{0.680} \right)}{8} = 2.808 \text{ kV}$$

ดังนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต้องจ่ายให้กับแท่งอิเล็กโทรดอยู่ในช่วง 2.391 – 2.808 kV จึงออกแบบวงจรสำหรับสร้างแรงดันสูงเพื่อการผลิตไอซอนให้สามารถจ่ายแรงดันได้ 0-4 kV เลือกความถี่ใช้งานที่ 25 kHz เนื่องจากต้องการเลี่ยงการเกิดสัญญาณรบกวนต่อระบบความถี่อื่นๆ

3. การออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ กำลังต่ำ แรงดันสูง ความถี่สูง

3.1 การออกแบบวงจรยกและรักษาระดับแรงดัน (Boost Regulator)

แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 12 V จากแบตเตอรี่จะถูกยกและรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็น 100 V ก่อนในช่วงแรกซึ่งแบตเตอรี่ที่ใช้จะเป็นแบบตะกั่ว - กรดจ่ายกระแสได้ 12 A-hr การออกแบบวงจรยกระดับแรงดันค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นในการออกแบบ คือ ค่า L, ค่า C, และอุปกรณ์สวิทช์ที่ใช้ ดังนั้น เราสามารถหาอัตราส่วนระหว่างช่วงสวิทช์ทำงาน (t_{on}) และช่วงสวิทช์ไม่ทำงาน (t_{off}) (Duty cycle) ได้จากสมการที่ (3)

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{1-D} \quad (3)$$

จากสมการที่ (3) แทนค่าตัวแปรเพื่อคำนวณหาตัวคูณไซเคิลได้ดังนี้

$$\frac{100}{12} = \frac{1}{1-D}, \quad 1-D = \frac{3}{25}, \quad D = 1-0.12 = 0.88$$

คำนวณหาค่า L ที่มีขนาดเล็กที่สุดของวงจรที่ทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องจากสมการที่ (4) และกำหนดให้ความถี่เท่ากับ 25 kHz

$$L_{min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f} \quad (4)$$

$$L_{min} = \frac{0.88(1-0.88)^2 100}{2(25000)}, \quad L_{min} = 25.34 \mu\text{H}$$

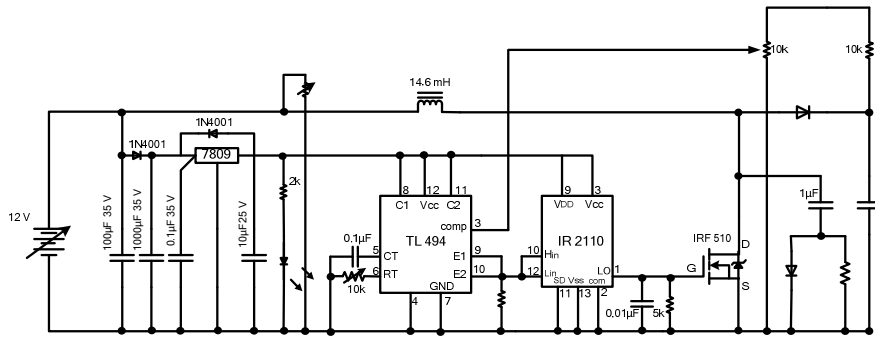
ดังนั้นจึงต้องออกแบบค่า L ขั้นต่ำคือ 25.34 μH ในงานวิจัยใช้ค่า L = 14.6 mH คำนวณหาค่า C ที่กำหนดให้มีอัตราระลอกคลื่นเท่ากับ 1% จากสมการที่ (5) และกำหนดให้ ความถี่เท่ากับ 25 kHz

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{RCf} \quad (5)$$

$$C = \frac{D}{Rf \frac{\Delta V_o}{V_o}}, \quad C = \frac{0.88}{100 \times 25000 \times 0.01}$$

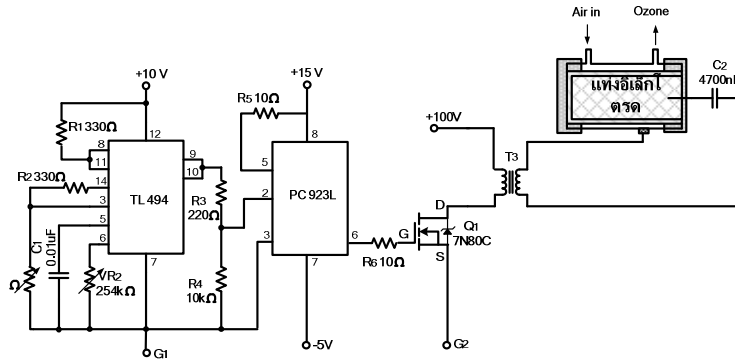
ดังนั้นจึงต้องออกแบบค่า C น้อยสุดคือ 35.20 μF ในงานวิจัยใช้ค่า C = 50 μF

จากการคำนวณค่า L, C ที่ได้และการใช้จริงในวงจรที่มีค่าแตกต่างกันมากเนื่องจากในบทความได้ออกแบบค่า L, C เพื่อให้สามารถรองรับในกรณีที่ต้องศึกษาค่าอินพุตหลายระดับจึงออกแบบให้ใช้ค่าที่มากกว่าการคำนวณหรือจะใช้ค่าที่คำนวณก็ได้เช่นกัน จากการปรับตัวดีไซเคิลค่าต่างๆแล้วทำการวัดหาแรงดันที่ขา 5 ของ TL494 ทำให้ทราบว่าที่ตัวดีไซเคิล 0.88 ปรับค่าแรงดันที่ขา 5 ไว้ที่ 1.35V ดังนั้นเมื่อต้องการรักษาระดับแรงดันจึงใช้ ตัวต้านทานปรับค่าได้ 10k ปรับเพื่อจำกัดแรงดันไว้ที่ 1.35V ป้อนกลับมาที่ขา 3 เพื่อให้วงจรมีเอาต์พุตคงที่ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 การออกแบบวงจรยกและรักษาระดับแรงดัน

3.2 การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูง



รูปที่ 5 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับกำลังต่ำ แรงดันสูง ความถี่สูง สำหรับผลิตโอโซน

จากการคำนวณหาค่าแรงดันที่จ่ายให้กับแผงอิเล็กโทรไลต์สามารถนำมาออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงได้จากสมการที่ (6)

$$N = \frac{V}{4fAB_m} \tag{6}$$

เมื่อ N คือจำนวนรอบของหม้อแปลง, V แรงดันไฟฟ้า, f คือความถี่, ในบทความนี้เลือกใช้แกนเฟอร์ไรท์ EE-55 A = 3.54 × 10⁻⁴ m², B_m = 0.2T กำหนดให้เลือกขนาดขดลวดขนาด 450 เซอร์คูลาร์มิล ต่อกระแส 1A

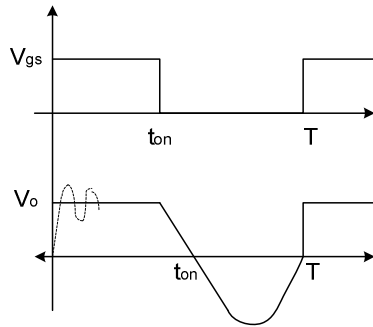
3.3 การออกแบบวงจรควบคุมสวิตช์มอสเฟตกำลัง

ในบทความนี้ใช้มอสเฟตกำลังเป็นอุปกรณ์สวิตช์ทั้งในส่วนของหม้อแปลงแรงดันสูง ความถี่สูงและวงจรรักษาระดับแรงดันซึ่งจะใช้ไอซี TL494 สร้างสัญญาณพัลส์เพื่อควบคุมการสวิตช์ของมอสเฟตกำลัง ในส่วนของหม้อแปลงแรงดันสูงใช้ IC PC923L เป็นตัวแยกกราวด์ทางไฟฟ้าของวงจรกำลังและวงจรขับเคลื่อนแสดงในรูปที่ 5 ส่วนวงจรรักษาระดับแรงดันใช้ IR 2110 เป็นตัวขับเคลื่อน

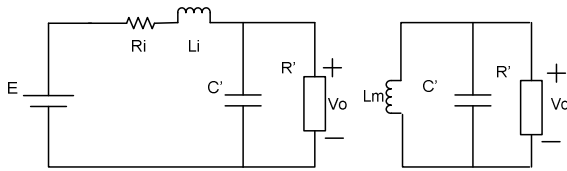
3.4 การวิเคราะห์วงจรหม้อแปลงความถี่สูง

ข้อกำหนดในการวิเคราะห์วงจรสมมูลย์ คือ

1. อุปกรณ์ทุกส่วนในวงจรกำหนดให้ทำงานเชิงอุดมคติ
2. ผลของค่าความเหนี่ยวนำ L_m ในวงจรจะละเว้นไม่พิจารณาในช่วง 0-t_{on}
3. กระแสที่ไหลผ่าน L_i ที่เวลา t = 0 และที่เวลา t = t_{on} จะมีค่าน้อยมาก จึงละเว้นไม่พิจารณา
4. แรงดันเอาต์พุต ที่ได้จากการวิเคราะห์วงจรได้ส่งผ่านมาทางอินพุตแล้วจะอยู่ในรูปแบบสมการเชิงอนุพันธ์กำลังสองซึ่งสามารถแบ่งได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 6 สัญญาณของการสวิตช์ (V_{gs}) และสัญญาณแรงดันเอาต์พุต (V_o) ในอุดมคติ



ช่วงเวลา $0-t_{on}$

ช่วงเวลา $t_{on}-T$

รูปที่ 7 วงจรสมมูลยห้อมแปลงความถี่สูง

3.5 การวิเคราะห์แรงดันเอาต์พุต

จากรูปที่ 7 นำมาวิเคราะห์แรงดันเอาต์พุตได้ดังนี้

สถานะที่ 1 ช่วงเวลา $0-t_{on}$

$$\frac{d^2v_o}{dt^2} + \left[\frac{1}{\tau_{Li}} + \frac{1}{\tau'} \right] \frac{dv_o}{dt} + \left[\omega_i^2 + \frac{1}{\tau_{Li}\tau'} \right] v_o = \omega_i^2 E \quad (7)$$

จากนั้นแก้สมการเชิงอนุพันธ์กำลังสองสมการที่ (7)

จะทำให้ได้สมการแรงดันเอาต์พุตดังสมการที่ (8)

$$V_o(t) = \frac{E}{1+r_i} + \left[V_{oi} - \frac{E}{1+r_i} \right] \exp(-\alpha_i t) \cos \omega_{ri} t \quad (8)$$

$$+ \frac{1}{\omega_{ri}} \left[\alpha_i (V_{oi} - E) - \frac{V_{oi}}{\tau} \right] \exp(-\alpha_i t) \sin \omega_{ri} t$$

การวิเคราะห์หาค่ากระแสอินพุตเพื่อใช้สำหรับการ

ออกแบบอุปกรณ์สวิตช์วิเคราะห์ได้จากสมการที่ (9)

$$\frac{d^2i}{dt^2} + \left[\frac{1}{\tau_{Li}} + \frac{1}{\tau'} \right] \frac{di}{dt} + \left[\omega_i^2 + \frac{1}{\tau_{Li}\tau'} \right] i = \frac{\omega_i^2 E}{R'} \quad (9)$$

จากนั้นแก้สมการเชิงอนุพันธ์กำลังสองสมการที่ (9) จะทำ

ให้ได้สมการกระแสอินพุตดังสมการที่ (10)

$$i(t) = \frac{E/R'}{1+r_i} [1 - \exp(-\alpha_i t) \cos \omega_{ri} t] + \frac{1}{\omega_{ri}} \left[\frac{E - V_{oi}}{L_i} - \frac{\alpha_i E}{R'} \right] \exp(-\alpha_i t) \sin \omega_{ri} t \quad (10)$$

ผลของการวิเคราะห์สมการแสดงไว้ในรูปที่ 8 ก และ 8 ข

สถานะที่ 2 ช่วงเวลา $t_{on}-T$ นำมาวิเคราะห์หาสมการ

แรงดันทางด้านเอาต์พุตได้ดังสมการที่ (11), (12)

$$\frac{d^2v_o}{dt^2} + \frac{1}{\tau_i} \frac{dv_o}{dt} + \omega_{om} v_o = 0 \quad (11)$$

$$V_o(t-t_{on}) = \frac{E}{1+r_i} \exp[-(t-t_{on})/2\tau'] \cos \omega_{rm}(t-t_{on}) \quad (12)$$

$$+ \frac{E}{\omega_{rm}} \left[\frac{1}{2\tau'} - \frac{1}{\tau' + \tau_{ci}} \right] \exp[-(t-t_{on})/2\tau'] \sin \omega_{rm}(t-t_{on})$$

ผลการวิเคราะห์สมการแสดงไว้ในรูปที่ 8 ก เมื่อ

$V_{oi} = V_o(t=0) = V_o(t=T)$ คือแรงดันเอาต์พุตที่เวลา

$t=0$ และเวลา $t=T$

โดยกำหนดให้ $\tau' = R'C'$, $\tau_{Li} = \frac{L_i}{R'}$, $\alpha_i = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\tau'} + \frac{1}{\tau_{Li}} \right]$,

$$\omega_{ri} = \sqrt{\omega_{oi}^2 - \alpha_i^2}, \quad \omega_{oi} = \sqrt{\omega_i^2 - \frac{1}{\tau_{Li}\tau'}}$$

$$\omega_i = \frac{1}{\sqrt{L_i C'}}, \quad r_i = \frac{R_i}{R'}, \quad \tau_{ci} = R_i C'$$

3.6 ผลการจำลอง

นำสมการที่ (8) (10) (12) นำมาทำการจำลองเพื่อ

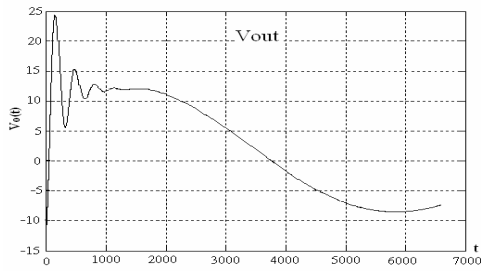
วิเคราะห์โดยใช้ MATLAB SIMULINK ผลที่ได้จากการ

วิเคราะห์แสดงในรูปที่ 8 ก และ 8 ข โดยกำหนด

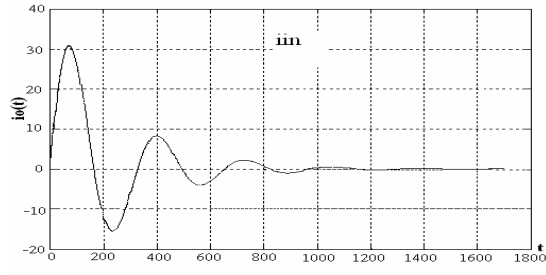
ค่าพารามิเตอร์ในการจำลองคือ $E = 12$, $n = 24.5$, $t_{on} =$

$17\mu s$, $f = 15$ kHz, $R_i = 0.23\Omega$, $L_i = 0.3\mu H$, $L_m =$

$230\mu H$, $R' = 70\Omega$, และ $C' = 0.87\mu F$



ก



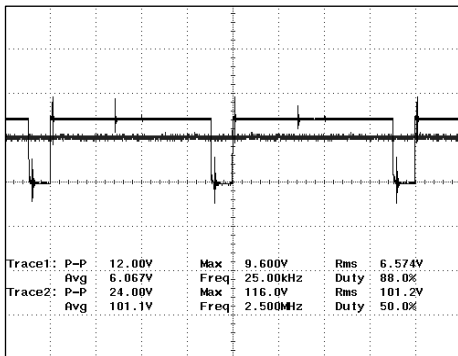
ข

รูปที่ 8 ก) ผลการวิเคราะห์สมการแรงดันเอาต์พุต ข) ผลการวิเคราะห์สมการกระแสอินพุต

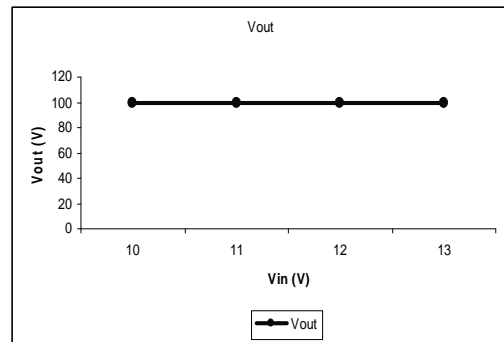
4. ผลการทดลอง

การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การทดสอบเก็บผลทางไฟฟ้าและทางเคมี โดยการเก็บผลทางไฟฟ้า ซึ่งจะเก็บผลของวงจรถูกและรักษาระดับแรงดัน แสดงไว้ดังรูปที่ 9ก, 9ข และทำการวัดแรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตของหม้อแปลงแสดงไว้ในรูปที่ 10ก, 10ข, 11, โดยในการเก็บผลการทดลองเนื่องจากแท่งอิเล็กโทรดแบบทรงระบอบซ้อนกันรวมเปรียบเสมือนมี C ต่ออนุกรมกันอยู่

และสามารถคำนวณค่า C (สำรวจ สังข์สะอาด, 2547) จากแท่งอิเล็กโทรดได้คือ 0.0445nF จึงใช้ค่า C ค่าความจุ 4700nF ต่ออนุกรมกับแท่งอิเล็กโทรดเพื่อลดระดับแรงดันสูงให้มีระดับแรงดันที่วัดได้ประมาณ 1:100 เท่า ส่วนที่สองวัดผลทางเคมีโดยการวัดปริมาณไอโซนที่ระดับแรงดันเอาต์พุต 2.4 kV, 2.6 kV, 28 k.V ผลของปริมาณไอโซนแสดงไว้ในตารางที่ 1



ก



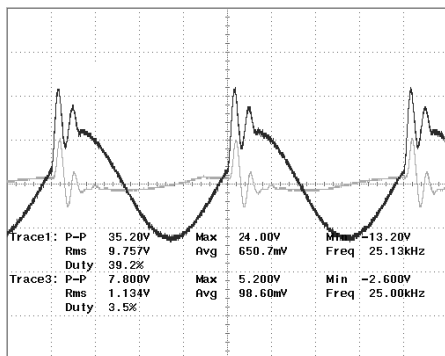
ข

รูปที่ 9 ก) แรงดันเอาต์พุตวงจรถูกระดับแรงดันที่ออกแบบ

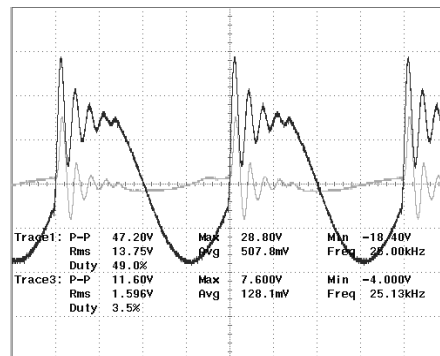
ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์แรงดันอินพุตกับแรงดันเอาต์พุต

จากรูปที่ 9ข ได้ตั้งค่าสมมุติฐานให้ทดสอบค่าแรงดันแบตเตอรี่ที่มีการเปลี่ยนแปลงได้ 10 -13 โวลต์ โดยแรงดัน

10 โวลต์เป็นแรงดันน้อยสุดที่วงจรทำงานได้และ 13 โวลต์คือแรงดันมากที่สุดเมื่อแบตเตอรี่ถูกประจุจนเต็ม

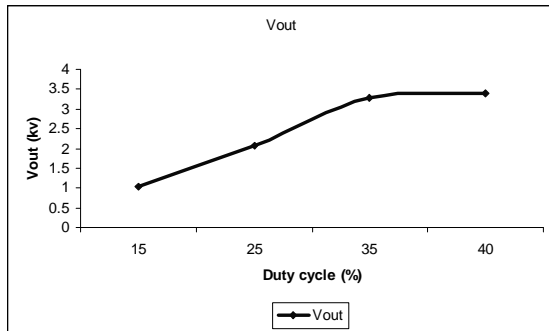


ก



ข

รูปที่ 10 ผลการทดลองระดับแรงดันเอาต์พุต ก) $V_o = 2.40 \text{ kV}, D = 0.17$ ข) $V_o = 2.88 \text{ kV}, D = 0.35$
แรงดันอินพุต $100V_{DC}$, ความถี่ในการสวิตช์ 25 kHz



รูปที่ 11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับค่าดีวตี้ไซเคิล

จากการทดลองทางไฟฟ้าเมื่อแรงดันเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงการวัดการเกิดปริมาณก๊าซโอโซนมีค่าเพิ่มขึ้นโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ทางเคมีที่เรียกว่า ไตเตรชัน (Titration) หลักการคือ การเกิดปฏิกิริยาระหว่างก๊าซโอโซนกับสารละลายโปแตสเซียมไอโอไดด์ (KI) 100 mL ได้สารใหม่เกิดขึ้นจากนั้นนำไปไตเตรทกับสารละลายที่เป็นตัวรีดิวซ์ คือ โซเดียมไทโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) แล้วเติมน้ำแป้งเป็นอินดิเคเตอร์ สารละลายจะกลายเป็นสีน้ำเงินทำการไตเตรทจนสีน้ำเงินจางหายไป ทำการบันทึกค่าปริมาณโซเดียมไทโอซัลเฟต เพื่อนำมาหาค่าปริมาณโอโซนต่อไปตามสมการที่ (13)

$$0.1N * \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 * \frac{24000}{100\text{mL}(\text{KI})} = \text{mgO}_3 / \text{L} \quad (13)$$

ตารางที่ 1 แสดงผลปริมาณการเกิดก๊าซโอโซนเทียบกับระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

ค่าดีวตี้ไซเคิล (%)	แรงดันทุติยภูมิ (kV _{rms})	ปริมาณก๊าซโอโซน (mg/h)
0.17	2.40	50
0.26	2.60	85
0.35	2.88	150

5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองวงจรระดับแรงดันจากแบตเตอรี่ 12V 12 A-hr สามารถรักษาระดับแรงดันทางด้านเอาต์พุตได้ 100 V ดังแสดงในรูปที่ 9ก, 9ข ผลการจำลองวงจรหม้อแปลงความถี่สูงดังแสดงในรูปที่ 8ก, 8ข เมื่อเทียบกับผลการทดลองที่ได้ในรูปที่ 10ก, 10ข จะเห็นได้ว่ามีการทำงานที่สอดคล้องกันและเมื่อนำแหล่งจ่ายที่ออกแบบมาจ่ายแรงดันให้กับแท่งอิเล็กโทรดที่ออกแบบแท่งอิเล็กโทรดสามารถสร้างแรงดันได้ในช่วง 2.391 – 2.808 kV ตามที่คำนวณไว้และเพียงพอในการทำให้เกิดปริมาณโอโซนดังแสดงในตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าที่ระดับแรงดันเอาต์พุตต่างกันโดยการปรับค่าดีวตี้ไซเคิลเมื่อระดับแรงดันเอาต์พุตมากขึ้นส่งผลให้ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้มากขึ้น สิ่งที่ต้องระวังคือการปรับให้แหล่งจ่ายจ่ายแรงดันมากเกินไปที่คำนวณไว้จะทำให้เกิดการเบรกดาวนในระบบขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- สำรวจ สังข์สะอาด. 2547 “วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง”, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อนุรักษ์ มั่นสุข. 2550 “เครื่องผลิตก๊าซโอโซนแบบเฟสซีฟท์พีดับบลิวเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์”. วิศวกรรมสารลาดกระบัง ปีที่ 24 มิถุนายน หน้า 49 – 54.
- J. Marcos Alonso, Jesus Cardesin, Emilio Lopez Corominas, Manuel Rico-Secades, Jorge Garcia. 2004. “Low-Power High-Frequency Power Supply for Ozone Generation” in IEEE Transection on Industry Application. Volume 40, No. 2. 414-421.