

การสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงจากหม้อแปลงฟลายแบคสำเร็จรูป

High Voltage Power Supply from Commercial Flyback Transformer

อาทิตย ยาวุฒิ^{1*} และ พิสิษฐ์ วิมลธนสิทธิ์²
Artit Yawootti^{1*} and Pisit Wimonthanasit²
yartit@rmutl.ac.th^{1*} and pisitwimonthanasit@gmail.com²

^{1,2} คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

^{1,2} Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology LANNA

Received: September 7, 2017
Revised: November 1, 2017
Accepted: March 16, 2018

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงระหว่าง 3 – 27 kV ด้วยหม้อแปลงฟลายแบคสำเร็จรูป สำหรับการประยุกต์ใช้ไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสต่ำ วิธีการสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงด้วยหม้อแปลงฟลายแบคที่นำเสนอนี้มีการใช้วงจรควบคุมแบบลูเปิดเพื่อให้ได้ไฟฟ้าแรงดันสูงคงที่โดยที่กระแสใช้งานเปลี่ยนแปลงไปตามเงื่อนไขภาวะโหลดทางไฟฟ้าและมีการใช้วงจรควบคุมแบบลูปิดที่มีการตรวจสอบกระแสดีสชาร์จกลับมาช่วยกำหนดการสร้างสัญญาณ PWM เพื่อใช้สำหรับงานที่ต้องการควบคุมการปล่อยประจุไฟฟ้าแรงดันสูงให้คงที่ มีการควบคุมสวิทช์นำกระแสขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงฟลายแบคอย่างง่าย มีการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยไอซีสำเร็จรูป NE555 และ TL494 นอกจากนี้ยังมีการใช้วงจรไอซี TLP250 สำหรับขยายสัญญาณขั้วเกต มีการใช้ไอซีออปแอมป์ LM741 ทำหน้าที่แปลงและขยายกระแสดีสชาร์จเป็นสัญญาณแรงดันเพื่อควบคุมการสร้างสัญญาณ PWM ร่วมกับไอซี UC3842 ในการควบคุมแบบลูปิด ผลการทดสอบการสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงแบบต่าง ๆ พบว่าแต่ละวิธีสามารถสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงได้จริงและยังแสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นของไฟฟ้าแรงดันสูงที่ได้ต่อความถี่ที่เปลี่ยนแปลง ผลการตรวจสอบกำลังทางไฟฟ้าของหม้อแปลงฟลายแบคสำเร็จรูป พบว่ามีค่าประมาณ 20 W

คำสำคัญ: หม้อแปลงฟลายแบค ไฟฟ้าแรงดันสูง การควบคุมแบบลูเปิด การควบคุมแบบลูปิด

Abstract

This paper presents a method for generating a high voltage between 3 – 27 kV from a commercial flyback transformer. It's useful in high voltage fields such as ionization or plasma applications. This high voltage generation method has consisted of an open-loop control that depends on the electric load and closed-loop control for setting a discharge current constantly. The high voltage is generated from the conventional switch circuit and use a PWM control signal from NE555 and TL494 controller. In addition, it had a gate drive circuit from the TLP250 controller. The LM741 is used for converting and amplify a discharge current to voltage signal for closed-loop control by UC3842 controller. The results show that every method can generate a high voltage and show the nonlinear characteristic between high voltage output and frequency changes. The electrical power of the commercial flyback transformer has about 20 W.

Keywords: Flyback transformer, high voltage electrical, open loop control, closed loop control.

1. บทนำ

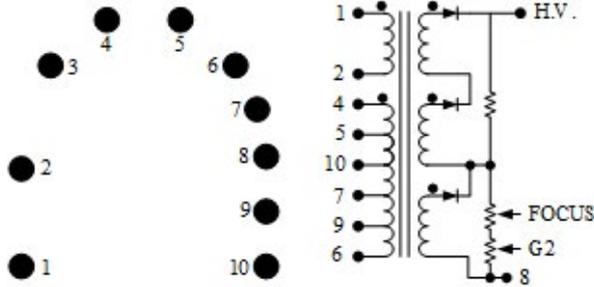
ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ไฟฟ้าแรงดันสูงในเครื่องใช้ไฟฟ้าหรืออุปกรณ์ทำงานในชีวิตประจำวันของมนุษย์มีหลากหลายงานโดยที่เราอาจจะไม่ได้สังเกต เช่นในเครื่องถ่ายภาพเอกซเรย์ จอภาพของเครื่องรับโทรทัศน์หรือคอมพิวเตอร์แบบ Crystal Ray Tube (CRT) โคมไฟดัก/ฆ่าแมลง หลอดไฟแสงสว่างในรถแบบซินอนเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator; ESP) เครื่องฟอกอากาศ เครื่องกระตุ้นเซลล์หรือฆ่าเชื้อโรคแบบ Pulse Electric Field (PEF) รวมถึงหม้อแปลงในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าตามหมู่บ้าน เป็นต้น การสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงอาจทำได้โดยการใช้หม้อแปลงไฟฟ้าสเต็ปอัพ (Step Up Transformer) แปลงแรงดันต่ำให้เป็นแรงดันสูง หากใช้ความถี่ต่ำในการแปลงเช่น 50 Hz จะทำให้ต้องใช้จำนวนรอบทั้งขาเข้าและขาออกมารอบเพื่อให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) ที่สอดคล้องกับกระแสใช้งานทางด้านอินพุต ดังนั้นหม้อแปลงที่ใช้ความถี่ต่ำจึงมีขนาดใหญ่ น้ำหนักมากและราคาแพง ส่วนหม้อแปลงแบบความถี่สูงอย่างหม้อแปลงฟลายแบค (Flyback Transformer) ถูกพัฒนามาใช้สำหรับงานที่ต้องการสร้างแรงดันสูงส่วนใหญ่ใช้กับงานที่ไม่ต้องการกำลังไฟฟ้าที่สูงมากนัก และสร้างแรงดันได้สูงระหว่าง 10 – 50 kV ตัวอย่างเช่น ชุดสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงของ Leybold Didactic โมเดล 521721 และของ BERTAN แต่บางชนิดที่ออกแบบมาพิเศษเช่นของ Gamma High Voltage Research รุ่น ES100P-20W อาจจะสามารถสร้างได้ถึง 100 kV ซึ่งจะต้องคำนึงถึงฉนวนป้องกันไฟฟ้าแรงดันสูงเป็นอย่างดีด้วย นอกจากนี้ยังมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงอย่างของ Spellman ที่ประยุกต์รวมทั้งหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงและวงจรทวีแรงดัน (Cockroft-Walton) สำหรับการสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงจากหม้อแปลงฟลายแบคสำเร็จรูปที่มีขายเชิงพาณิชย์ทั่วไปนั้น ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในหลากหลายงานเช่นงานบำบัดน้ำเสีย เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์เป็นต้น [1, 2, 3]

2. หม้อแปลงฟลายแบคและวงจรใช้งาน

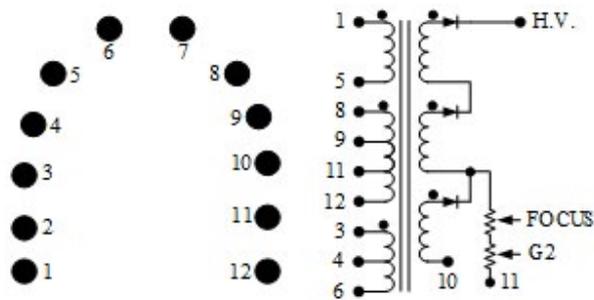
โดยทั่วไปแล้วหม้อแปลงฟลายแบคที่อยู่ในวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้าแบบฟลายแบค (Flyback Converter) จะความสามารถที่แปลงผันแรงดันไฟฟ้าได้หลากหลายลักษณะ แต่ในบทความนี้จะกล่าวถึงหม้อแปลงฟลายแบคเฉพาะที่ใช้ในการสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงดังแสดงในรูปที่ 1(ก) และ(ข) เป็นตำแหน่งขาและขดลวดภายในหม้อแปลงฟลายแบครุ่น HR8545 และ HR8457 ที่มีแบบ 10 ขาและแบบ 12 ขาตามลำดับ [4] ขดลวดที่สำคัญภายในคือขั้วไฟฟ้าแรงดันสูง (High Voltage) ทางด้านทุติยภูมิ (Secondary) ที่จะมีลักษณะเป็นสายไฟสี่แดงเส้นใหญ่ซึ่งขั้วกราวด์ของไฟฟ้าแรงดันสูงนี้จะเป็นขา 8 (แบบ 10 ขา) และขา 10 (ในแบบ 12 ขา) ส่วนขั้วการใช้งานขดลวดปฐมภูมินั้นพบว่ามีความแตกต่างกันมาก (ศึกษาเพิ่มเติมจากเอกสารรายละเอียดในแต่ละรุ่นที่ผู้ผลิต) หากไม่สามารถหาเอกสารรายละเอียดรุ่นนั้นๆ ได้ อาจใช้วิธีการพันขดลวดปฐมภูมิขึ้นใหม่บนแกนหม้อแปลง แต่จะต้องคำนึงถึงความสูญเสียเนื่องจากปรากฏการณ์ทางผิว (Skin Effect) ของตัวนำและความถี่ใช้งาน โดยเฉพาะการใช้งานในความถี่ที่สูงควรใช้ตัวนำแบบเส้นลวดตีขนาน (Litzendraht: Litz Wire) หรือลวดตัวนำเส้นเล็กหุ้มฉนวนหลายเส้นพันตีเกลียวให้มีพื้นที่หน้าตัดรวมเท่ากับพื้นที่หน้าตัดของขดลวดเส้นใหญ่แบบตัน [5]

วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์เป็นวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง (DC-to-DC Converter) นิยมใช้ในแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาดเล็กไม่เกิน 100 W โดยพัฒนามาจากวงจรบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์ (Buck-Boost Converter) [6, 7] ที่มีการแทนส่วนของตัวเหนี่ยวนำ (วงจรบัค-บูสต์) ด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า (ฟลายแบค) ทำให้สามารถมีเอาต์พุตได้หลากหลายลักษณะ ทั้งแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำกว่าหรือสูงกว่าแรงดันแหล่งจ่ายที่ใช้และยังสามารถมีขดลวดทางด้านทุติยภูมิออกหลายๆ ขดแยกกันทำให้มีเอาต์พุตหลายระดับแรงดันได้

การทำงานของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์สามารถแบ่งเป็นโหมดนำกระแสต่อเนื่อง (Continuous Conduction Mode;



(ก) แบบ 10 ขาเช่นในรุ่น HR8545



(ข) แบบ 12 ขาเช่นในรุ่น HR8457

รูปที่ 1 ขดลวดภายในหม้อแปลงฟลายแบค

CCM) และโหมดนำกระแสไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Conduction Mode; DCM) โดยการกำหนดค่าความเหนี่ยวนำร่วมของหม้อแปลงฟลายแบค (Mutual Inductance) หรือ L_M ตามสมการที่ (1) เมื่อ D คือรอบวัฏจักรการทำงาน (Duty Cycle), R_L คือค่าความต้านทานที่โหลด f คือความถี่ใช้งาน N_1 และ N_2 คือจำนวนรอบของขดลวดทางปฐมภูมิและทุติยภูมิตามลำดับ [5, 8] วงจรฟลายแบคในรูปที่ 2 ทำงานโดยอาศัยหลักการแปลงพลังงานไฟฟ้าให้เป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำร่วม L_M ในขดลวดปฐมภูมิตามช่วงเวลา DT_S (เมื่อ T_S เป็นคาบเวลาในแต่ละ

วัฏจักรการทำงาน D) ซึ่งปกติทั่วไปจะกำหนดที่ $D=50\%$ หรือมากกว่าเล็กน้อย และในขณะที่อุปกรณ์สวิตช์หยุดการทำงานจะทำให้พลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าใน L_M ส่งผ่านแกนเฟอร์ไรต์ ไปยังขดลวดทางทุติยภูมิทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตามจำนวนรอบ N_2 ส่งไปยังโหลด R_L [9]

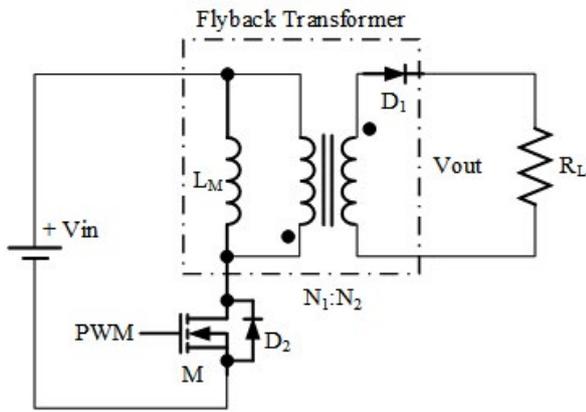
$$L_M = \frac{(1-D)^2 R_L}{2f} \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad (1)$$

3. วงจรขับหม้อแปลงฟลายแบคและการทดสอบ

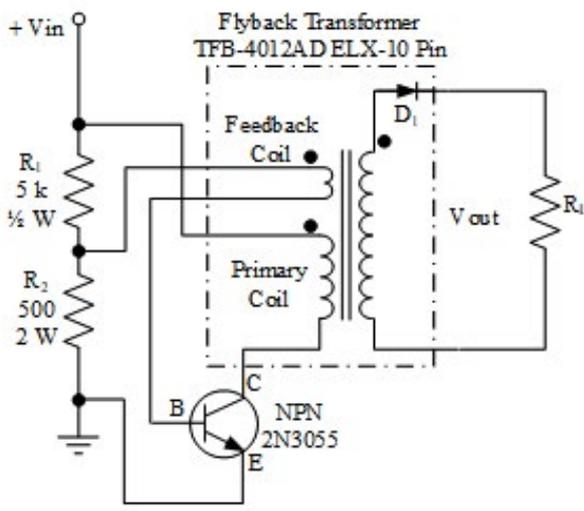
หลักการจ่ายกระแสไฟฟ้าเป็นจังหวะให้กับตัวเหนี่ยวนำร่วมเพื่อเก็บสะสมพลังงานในรูปแบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้าก่อนที่จะส่งผ่านไปยังขดลวดทุติยภูมินั้น สามารถใช้สวิตช์ขั้วเล็กทรานซิสเตอร์ทรานซิสเตอร์หรือมอสเฟตที่มีการควบคุมหลายรูปแบบดังนี้

3.1 วงจรขับด้วยสวิตช์ธรรมดา

รูปที่ 3 เป็นวงจรทั่วไปของการใช้สวิตช์ธรรมดาแบบตัวเดียวในการขับนำกระแสขดลวดทางด้านปฐมภูมิแบบขั้วเดียว (Unipolar) ซึ่งใช้ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN ทำหน้าที่เป็นสวิตช์และใช้สัญญาณกระแสชนิดบวกจากขดลวดป้อนกลับ (Feedback Coil) มาขับขาเบส (B) โดยปกติจะกำหนดอัตราส่วนความต้านทาน R_1/R_2 ที่ระหว่าง 8 – 25 และจำเป็นต้องใช้ R_1 ที่มีกำลังวัตต์สูงเนื่องจากใช้ในการจ่ายกระแสขับขาเบส ส่วน R_2 สามารถเลือกใช้ตัวต้านทานที่มีกำลังวัตต์น้อยกว่าได้ สำหรับจำนวนขดลวดที่พันบนแกนของหม้อแปลงฟลายแบคจะกำหนดเป็น 2T และ 4T สำหรับขดลวดป้อนกลับและขดลวดปฐมภูมิตามลำดับ เช่นหากใช้จำนวนรอบของขดลวดป้อนกลับเท่ากับ 8 รอบจะต้องใช้ขดทางด้านปฐมภูมิจำนวน 16 รอบ (ค่า $T=4$) และในขณะใช้งานวงจรจะต้องมีการใส่แผงระบายความร้อน (Heat Sink) ที่ตัวทรานซิสเตอร์เสมอเพื่อระบายความร้อนที่สะสมบนตัวทรานซิสเตอร์



รูปที่ 2 วงจรทั่วไปของฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

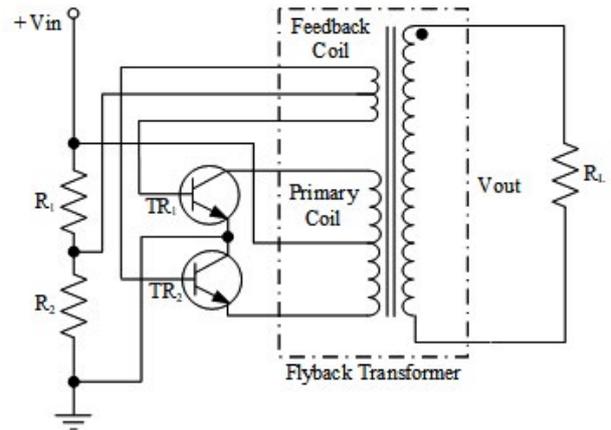


รูปที่ 3 วงจรขับหม้อแปลงฟลายแบคด้วยสวิตช์ตัวเดียว

รูปที่ 4 เป็นวงจรทั่วไปของการใช้สวิตช์ธรรมดาแบบ 2 ตัวในการขับนำกระแสให้ขดลวดปฐมภูมิแบบพุช-พูล (Push-Pull) สลับกันทำให้เกิดการยุบตัวของขั้วแม่เหล็กภายในในทิศทางตรงกันข้ามกัน ขดลวดป้อนกลับจะทำหน้าที่ขับขาเบสของทรานซิสเตอร์ TR_1 และ TR_2 สลับกัน ตัวต้านทาน R_1 และ R_2 ที่ใช้กำหนดอัตราส่วนการสวิตช์ยังกำหนดตามแบบสวิตช์ตัวเดียวและการทำงานลักษณะนี้หากใช้กับหม้อแปลงฟลายแบคที่ไม่มีไดโอดภายในแล้วจะทำให้ได้ไฟฟ้แรงดันสูงทางเอาต์พุตเป็นสองเท่าของการขับด้วยสวิตช์เพียงตัวเดียว

3.2 การควบคุมสัญญาณ PWM แบบรูปเปิด

เนื่องจากวงจรขับสวิตช์ธรรมดาทั้งแบบตัวเดียวและแบบ 2 ตัวที่กล่าวมานั้นยังมีข้อจำกัดเรื่องความผิดเพี้ยนของสัญญาณขับที่แตกต่างจากทางอุดมคติมากจนมีการสูญเสียและเกิดความร้อนสูงที่ตัวสวิตช์ อีกทั้งประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าหม้อแปลงฟลายแบคควรใช้ค่า Duty Cycle ที่ประมาณ 50% ซึ่งวิธีการขับโดยสวิตช์ธรรมดาไม่สามารถกำหนดให้มีค่า Duty Cycle ที่ความต้องการดังกล่าวได้ วิธีการขับสวิตช์แบบใช้สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (Pulse Width Modulation; PWM) จากภายนอก จึงถูกนำมาใช้เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว อีกทั้งยังสามารถกำหนดความถี่ทำงานให้คงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามค่าแรงดันอินพุต (V_{in})



รูปที่ 4 วงจรขับหม้อแปลงฟลายแบคด้วยสวิตช์ 2 ตัว

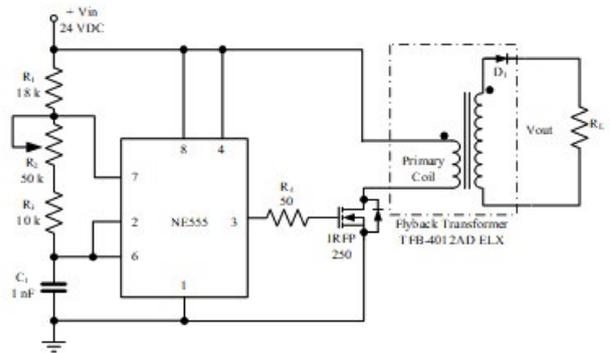
ไอซีสำเร็จรูป NE555 [10] ถูกพัฒนาโดยฮันส์ อาร์ คาเมนซินด์ (Hans R. Camenzind) เมื่อปี 2514 ซึ่งได้รับความนิยมใช้งานเกี่ยวกับการตั้งเวลาหรือสร้างพัลส์แบบสี่เหลี่ยม (Square Wave) รูปที่ 5 เป็นลักษณะของวงจรขับสวิตช์หม้อแปลงฟลายแบคที่กำหนดการขับนำกระแสขดลวดปฐมภูมิด้วยไอซี NE555 ตัวต้านทาน R_1 R_2 R_3 และตัวเก็บประจุ C_1 ถูกต่อร่วมกับขา 7 2 และ 6 เพื่อกำหนดความถี่และสามารถปรับความกว้างของพัลส์ (R_2) สัญญาณพัลส์ที่ได้จะถูกนำไปใช้ขับขาเบสของสวิตช์ (มีการจำกัด

กระแสด้วย R_4) ซึ่งอาจจะเป็นทรานซิสเตอร์หรือ มอสเฟตก็ได้ โดย NE555 สามารถจ่ายกระแสสูงสุด ได้ถึง 225 mA หรือทรานซิสเตอร์ PNP และ NPN ต่อขา E ร่วมกัน (Common Emitter) เป็นวงจรแบบ Totem Pole Push-Pull Output Stages หรืออาจ จะใช้ไอซี TLP250 [11] เพื่อช่วยเพิ่มกระแสขับให้มากขึ้นได้

TL494 [12] เป็นไอซีสำเร็จรูปราคาถูกที่นิยม นำมาสร้างสัญญาณ PWM ที่ความถี่ต่างๆ ให้กับแหล่ง จ่ายไฟแบบสวิตชิง รูปที่ 6 เป็นตัวอย่างการใช้ไอซี TL494 สร้างสัญญาณ PWM ให้กับมอสเฟตที่ทำหน้าที่ เป็นสวิตช์ควบคุมการนำกระแสของขดลวดปฐมภูมิ บนแกนหม้อแปลงฟลายแบค วงจรนี้เป็นการควบคุม แบบลูปเปิด (Open Loop Control) คือไม่มีการนำ สัญญาณจากแรงดันเอาต์พุตกลับมาใช้ร่วมในการสร้าง สัญญาณควบคุม PWM วงจรนี้สามารถกำหนดความถี่ ใช้งานจาก R_T และ C_T ในส่วนของวงจร Oscillator ภายในของไอซี TL494 ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (2) ตัว ต้านทาน R_1 ทำหน้าที่กำหนดความกว้างของ Duty Cycle หรือช่วงเวลา T_{ON} ซึ่งจะเริ่มมีสัญญาณ Duty Cycle ที่ค่าแรงดันประมาณ 3.66 V และเมื่อลดแรงดัน ลงไปที่ประมาณ 1 V จะมี Duty Cycle ที่มากที่สุด (Duty Cycle = 50 % ที่แรงดันประมาณ 2.24 V) นอกจากนี้ยังมีทรานซิสเตอร์แยกจากกันสำหรับใช้ ขับสวิตช์เช่นมอสเฟตหรือทรานซิสเตอร์ได้ 2 ตัว ซึ่ง สามารถต่อขนานกันเพื่อเพิ่มพิกัดกระแสขับสวิตช์ ส่วน R_3 และ R_4 ทำหน้าที่จำกัดกระแสขับและ ป้องกันขาเกต Turn ON เองจากไฟฟ้าสถิตในระบบ ตามลำดับ และเนื่องจากตัว TL494 สามารถขับกระแส เกล็ดได้สูงสุดเพียง 250 mA เท่านั้น ในกรณีที่มีความ ต้องการใช้กระแสในการขับเกตที่มากกว่านี้ สามารถใช้ ทรานซิสเตอร์ 2 ตัวต่อแบบ Common Emitter หรือ อาจเลือกใช้ไอซีสำเร็จรูปอย่าง TLP250 ที่มีกระแสขับ เกล็ดสูงถึง 1.5 A มาช่วยในการขับเกตได้

3.3 การควบคุมสัญญาณ PWM แบบลูปปิด

การใช้วงจรขับด้วยสัญญาณ PWM จากไอซี สำเร็จรูปในโหมดควบคุมแบบลูปเปิดนั้นเป็นรูปแบบ ที่ง่าย โดยค่าไฟฟ้าแรงดันสูงที่ได้จะขึ้นอยู่กับขนาด Duty Cycle จำนวนรอบของขดลวดและแรงดันทาง ปฐมภูมิ การนำไฟฟ้าแรงดันสูงที่ได้จากการควบคุม แบบเปิดนี้ไปสร้างพลาสมาหรือคอโรนาดีสชาร์จที่ไม่ สามารถควบคุมเงื่อนไขของสิ่งแวดล้อมทั้งอุณหภูมิ และความต้านทานระหว่างขั้ว

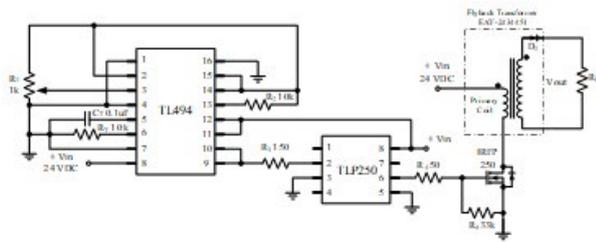


รูปที่ 5 วงจรขับหม้อแปลงฟลายแบคด้วยไอซี NE555

$$f(\text{Hz}) = \frac{1.1}{R_T \cdot C_T} \quad (2)$$

อิเล็กทรอนิกส์นั้น จะทำให้กระแสดีสชาร์จเปลี่ยนแปลง ตลอดเวลา การควบคุมให้ชุดสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงมีการ ปรับเปลี่ยนระดับแรงดันได้ตามเงื่อนไขสิ่งแวดล้อมเพื่อ ให้รักษากระแสดีสชาร์จให้คงที่จึงมีความจำเป็นมาก ซึ่งสามารถใช้การควบคุมแบบลูปปิด (Closed Loop Control) โดยการตรวจเช็คกระแสดีสชาร์จแล้วนำมา ใช้ควบคุมการสร้างสัญญาณ PWM ที่ใช้ในการขับเกต กระบวนการดังกล่าวสามารถประยุกต์ใช้อุปกรณ์ LM741 [13] ในการรับค่ากระแสดีสชาร์จ โดยมีวงจร การทำงานตามรูปที่ 7 ซึ่งออปแอมป์ตัวที่ 1 ทำหน้าที่ รับกระแสดีสชาร์จจากขั้วอิเล็กทรอนิกส์จากนั้นแปลงเป็น แรงดันไฟฟ้าและขยายสัญญาณด้วยอัตราขยายตาม สมการที่ (3) ส่วนออปแอมป์ตัวที่ 2 ทำหน้าที่กลับเฟส ของสัญญาณ เมื่อได้สัญญาณแรงดันจากการแปลง กระแสดีสชาร์จแล้ว จะง่ายต่อการนำไปใช้ควบคุม

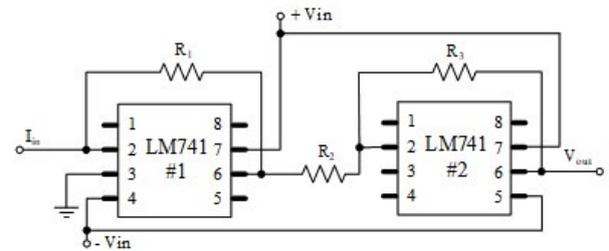
การสร้างสัญญาณ PWM เช่นในกรณีที่ใช้อิซี TL494 ที่สามารถนำสัญญาณแรงดันที่ได้ไปเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิงที่ Error Amp ภายใน โดยหากค่าแรงดันที่ตรวจวัดได้ มีค่ามากกว่าแรงดันอ้างอิงแล้ว Error Amp จะสั่งให้หยุดการสร้าง PWM ดังวงจรที่แสดงในรูปที่ 8 ความต้านทาน R_1 และ R_2 ทำหน้าที่แบ่งแรงดันจากแรงดันอ้างอิง 5 V ที่ขา 14 จากนั้นแรงดัน 1 V ที่ได้ถูกนำไปอ้างอิงที่ขา 2 ของ Error Amp ซึ่งหากขา 1 ตรวจพบแรงดันที่มีค่ามากกว่า 1 V จะทำให้ชุด Error Amp สั่งหยุดการสร้างสัญญาณ PWM และเมื่อไม่มีการจ่ายกระแสที่ขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลง ฟลายแบคจะทำให้แรงดันที่ขา 1 ไม่ถึง 1 V ทำให้ไอซี TL494 กลับมาสร้างสัญญาณ PWM อีกครั้ง



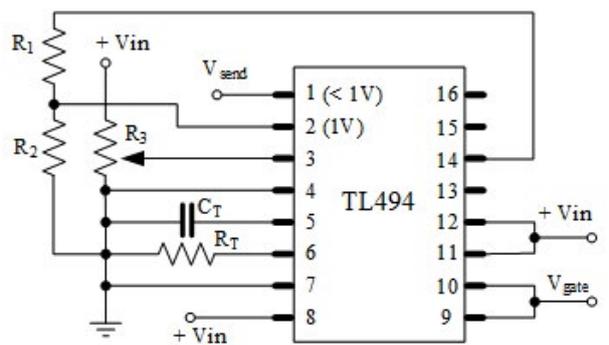
รูปที่ 6 การใช้งาน TL494 ร่วมกับ TLP250

นอกจากการใช้ Error Amp ในไอซี TL494 มาประยุกต์ใช้ในการควบคุมแบบลูปปิดแล้ว ยังมีไอซี UC3842 [14] ที่มีทั้งลูปแรงดันและลูปกระแส อีกทั้งยังทำงานเร็วกว่าและมีกระแสขั้วเกตที่สูงกว่าถึง 1 A สามารถกำหนดความถี่ใช้งานได้จากค่า R_T และ C_T เหมือนกับไอซี TL494 โดยเป็นไปตามสมการที่ (4) วงจรขับหม้อแปลงฟลายแบคที่แสดงในรูปที่ 9 พบว่าลูปแรงดันป้อนกลับขา 2 (Feedback Voltage) ที่ใช้สำหรับตรวจสอบแรงดันใน Error Amp นั้น หากมีแรงดันมากกว่าระดับ 2.5 V จะสั่งให้หยุดสร้างสัญญาณ PWM นอกจากนี้ยังมีลูปกระแสขา 3 ที่ต่อกับ Current Sense Comparator โดยตรง สำหรับใช้ตรวจสอบกระแสที่ไหลในสวิตช์ (ขดปฐมภูมิ) ซึ่งปกติแล้วการตรวจจับกระแสที่สวิตช์จะใช้ Current Transformer ร่วมกับวงจรเรียงกระแสที่ใช้ไดโอดแบบกลับตัวเร็ว (Fast Recovery Diode) แล้วแปลงค่ากระแสเป็นแรง

ดันที่สามารถปรับระดับได้ด้วยตัวต้านทาน R_3 (ตรวจจับที่ประมาณ 0.3 V) ส่วน R_1 และ C_1 เป็นการกำหนดค่าความไว Comparator ในการตรวจวัดลูปแรงดัน ซึ่งอาจจะประยุกต์ใช้การควบคุมแบบ Proportional Integral Derivative (PID) หรืออาจใช้ PI หรือ PD ได้



รูปที่ 7 การแปลงสัญญาณกระแสดีสชาร์จด้วย LM741



รูปที่ 8 วงจรใช้งาน TL494 แบบลูปปิด

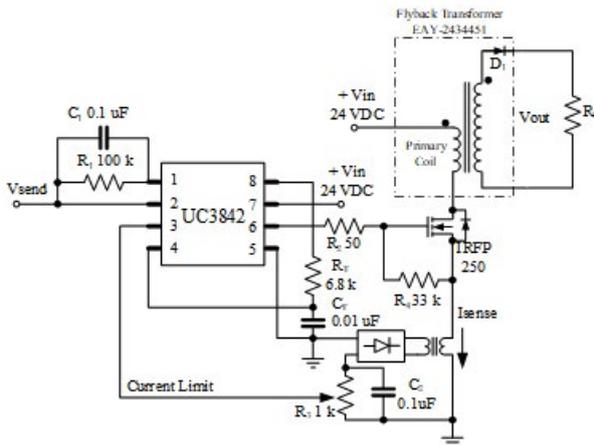
$$V_o = I \cdot R_f \quad (3)$$

3.4 การวัดกระแสดีสชาร์จของหม้อแปลงฟลายแบค

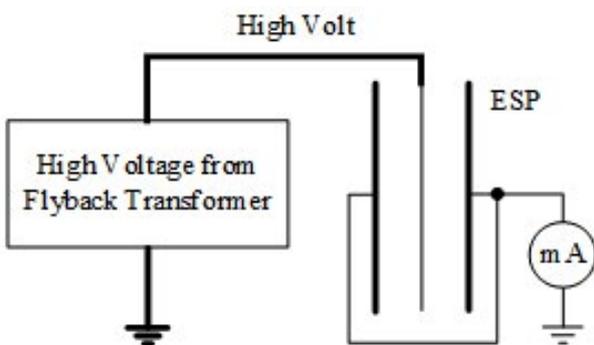
เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Precipitator; ESP) ตามรูปที่ 10 [2] ถูกนำมาใช้ประมาณความสามารถในการจ่ายกระแสดีสชาร์จเพื่อหากำลังวัตต์ของหม้อแปลงฟลายแบค ไฟฟ้าแรงดันสูงค่าต่างๆ ที่จ่ายให้เส้นลวดอิเล็กโทรดจะเกิดการดีสชาร์จไปยังอิเล็กโทรดแบบแผ่นแบน 2 แผ่น (มีพื้นที่แผ่นแบนรวม 0.27 m²) ทำการวัดกระแสดีสชาร์จนี้ด้วยแอมมิเตอร์แบบเข็ม โดยกำหนดระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเส้นลวดกับอิเล็กโทรดแผ่นแบนเท่ากับ 50 mm คงที่

3.5 เทคนิคการปรับแต่งสัญญาณชับเกต

เนื่องจากการใช้สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ (เช่น MosFET) ในการควบคุมการทำงานของโหลดที่เป็นตัวเหนี่ยวนำอย่างขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงฟลายแบคจะมีผลของสัญญาณรบกวนทั้งในช่วงขอบขาขึ้นและขอบขาลงไม่เป็นไปตามอุดมคติตามที่ต้องการ รวมถึงอาจมี



รูปที่ 9 วงจรขับหม้อแปลงฟลายแบคแบบรูปปิด



รูปที่ 10 การทดสอบกระแสดีสชาร์จในเครื่องตกตะกอน

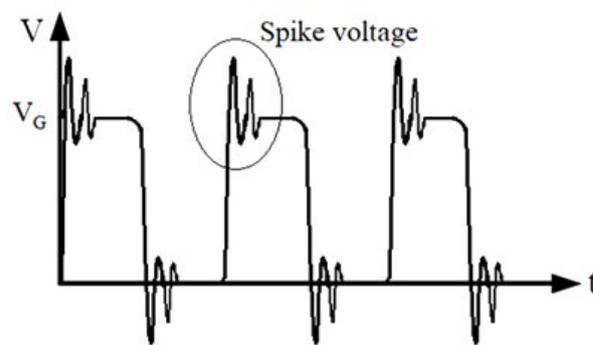
$$f(\text{Hz}) = \frac{1.72}{R_T \cdot C_T} \quad (4)$$

การแกว่งในช่วงที่สวิตช์หยุดนำกระแส ซึ่งสัญญาณแรงดันสไปค์ (Spike) ที่สูงขึ้นมหาศาลอย่างเฉียบพลันในช่วงสั้นและสัญญาณที่ผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นในขณะสวิตช์ทำงานและหยุดทำงานดังแสดงในรูปที่ 11 นี้ จะส่งผลให้เกิดความร้อนสะสมที่ตัวสวิตช์และทำให้การสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงของหม้อแปลงฟลายแบค

ไม่เป็นไปตามที่ต้องการ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วสามารถลดการเกิดสัญญาณ สไปค์ในขณะที่สวิตช์ทำงานได้ด้วยการเพิ่มค่าความต้านทานที่ขาเกต ทำให้ช่วงเวลาขอบขาขึ้น (Rise time) ยาวนานขึ้นและยังสามารถใช้ซีเนอร์ไดโอด (แยกกราวด์วงจรควบคุมกับวงจรกำลัง) ดึงสัญญาณฐานให้ต่ำกว่าระดับศูนย์ เพื่อให้แรงดันสไปค์ไปเกิดในช่วงซิกแรงดันลบและเพื่อให้แน่ใจว่าอุปกรณ์สวิตช์มีการหยุดทำงานอย่างแน่นอน

3.6 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลงฟลายแบค

หม้อแปลงฟลายแบคสำเร็จรูปมีหลากหลายผู้ผลิตซึ่งทำให้มีความแตกต่างกัน ทั้งโครงสร้างภายในและการตอบสนองต่อแรงดันที่ความถี่ใช้งานต่างๆ อีกทั้งในบางรุ่นยังอาจจะเป็นแบบที่ไม่มีไดโอดภายในที่สามารถสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงแบบกระแสสลับได้ในบทความนี้มีการตรวจสอบการตอบสนองต่อแรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตด้วยการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่างๆ ระหว่าง 20 – 60 kHz และการปรับปรุงสัญญาณแรงดันคร่อมสวิตช์ด้วยตัวคาปาซิเตอร์ที่พบว่าสามารถเปลี่ยนแปลงย่านความถี่ในการทำงานของหม้อแปลงฟลายแบคได้ ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป



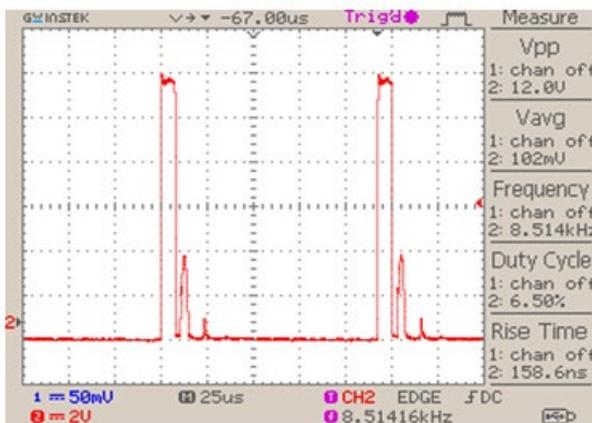
รูปที่ 11 ลักษณะสัญญาณสไปค์

4. ผลการทดสอบวงจรและวิจารณ์ผล

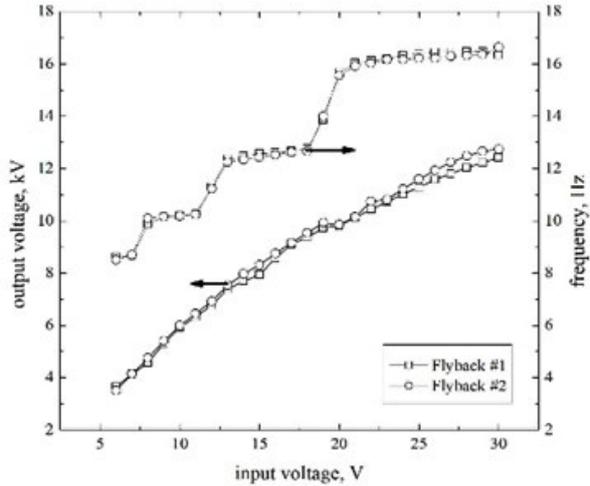
วงจรขับด้วยสวิตช์ตัวเดียวตามรูปที่ 3 ใช้ลวดทองแดงหุ้มฉนวนพันบนแกนหม้อแปลงฟลายแบครุ่น TFB4012AD จำนวน 30 รอบเป็นขดปฐมภูมิ

ส่วนขดลวดป้อนกลับใช้ลวดทองแดงพันบนแกนหม้อแปลงจำนวน 15 รอบ ในขณะที่สวิตช์ที่ใช้เป็นทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N3055 ชนิด NPN โดยติดยึดบนแผงระบายความร้อนอะลูมิเนียม มีการทดสอบกับหม้อแปลงฟลายแบค 2 ตัวชนิดเดียวกัน ผลการทดสอบแสดงสัญญาณการขับสวิตช์ที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์เทียบกับกราวด์ตามรูปที่ 12 โดยพบว่ามีค่า Duty Cycle ที่ใช้ขับมีประมาณ 6.5 % และมีการแกว่ง (Oscillate) หลังจากช่วงหยุดนำกระแส ซึ่งพฤติกรรมนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้ทรานซิสเตอร์ที่ใช้เป็นสวิตช์เกิดความร้อนกว่าปกติ เมื่อเพิ่มค่าแรงดันอินพุตในวงจร พบว่าแรงดันเอาต์พุตเพิ่มขึ้นต่อเนื่องตั้งแต่ 3–13 kV ส่วนความถี่ใช้งานอยู่ในช่วง 9–17 kHz ตามแรงดันอินพุตที่ป้อนดังแสดงในรูปที่ 13 ขณะที่กระแสอินพุตอยู่ระหว่าง 0.04 – 0.25 A

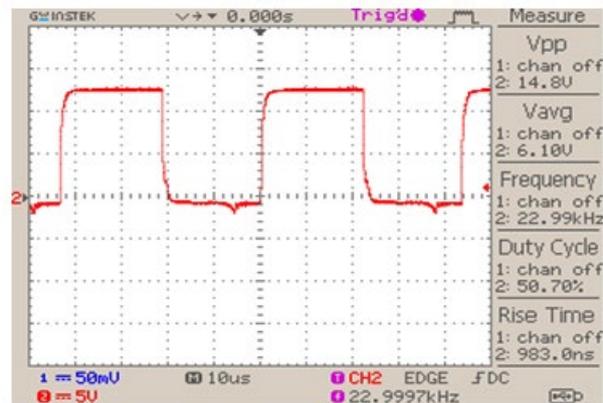
วงจรขับด้วยสัญญาณ PWM จากไอซี NE555 ตามรูปที่ 5 มีสัญญาณขับเป็นแบบยูนิโพลาร์ซีกเดียวตามรูปที่ 14 ในการทดสอบนี้ใช้ลวดทองแดงพันตีเกลียว 15 รอบบนแกนหม้อแปลงฟลายแบครุ่น TFB4012AD และทำการปรับค่าตัวต้านทาน R_2 เพื่อกำหนดความถี่ได้ระหว่าง 10 – 35 kHz ค่า Duty Cycle เท่ากับ 50 % พบว่าแรงดันเอาต์พุตมีการเพิ่มและลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 12 ลักษณะสัญญาณขับสวิตช์



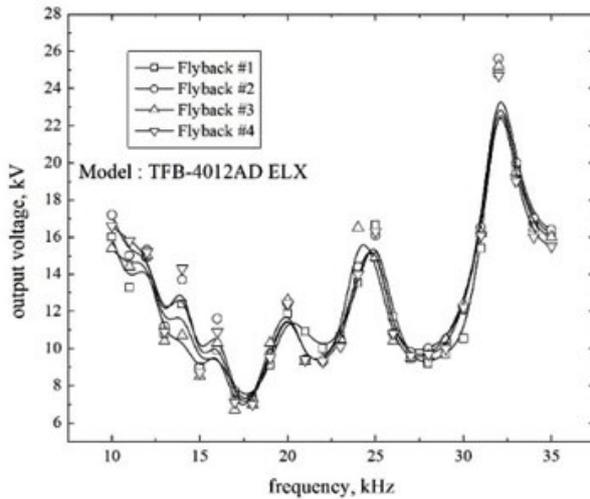
รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ของแรงดันและ ความถี่



รูปที่ 14 ลักษณะของสัญญาณขับของไอซี NE555

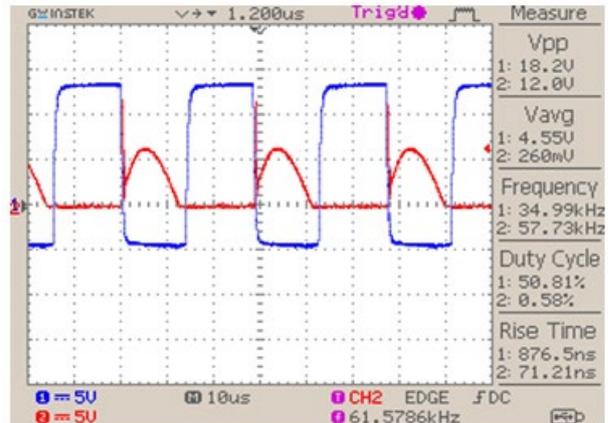
ตามรูปที่ 15 โดยจะมีค่าสูงที่ความถี่ประมาณ 10, 25 และ 33 kHz ซึ่งเป็นผลจากคุณสมบัติที่ไม่เป็นเชิงเส้นของค่าความซาบซึมแม่เหล็ก (Magnetic Permeability) ในวัสดุแกนหม้อแปลงแบบเฟอร์ไรต์ [5] ในแต่ละรุ่นที่แตกต่างกัน โดยจะมีความคล้ายกันในระดับเดียวกัน ส่วนค่ากระแสอินพุตพบว่ามีความสอดคล้องกับแรงดันเอาต์พุตซึ่งสังเกตได้ว่ามีค่ากระแสที่ความถี่ประมาณ 17 kHz หากต้องการใช้งานแรงดันเอาต์พุตที่ประมาณ 16 kV สามารถใช้ความถี่ที่ประมาณ 10 หรือ 25 kHz ได้ แต่หากต้องการแรงดันที่สูงกว่าในระดับ 20 kV ขึ้นไป ควรใช้ความถี่ที่ประมาณ 32 kHz

วงจรขับด้วยสัญญาณ PWM จากไอซี TL494 ตามรูปที่ 6 ขดลวดปฐมภูมิใช้ลวดทองแดงพันตีเกลียวบนแกนหม้อแปลงฟลายรุ่น EAY2434451 จำนวน

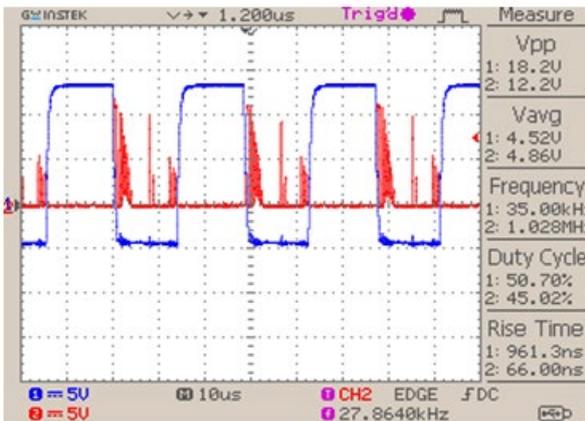


รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุตต่อความถี่

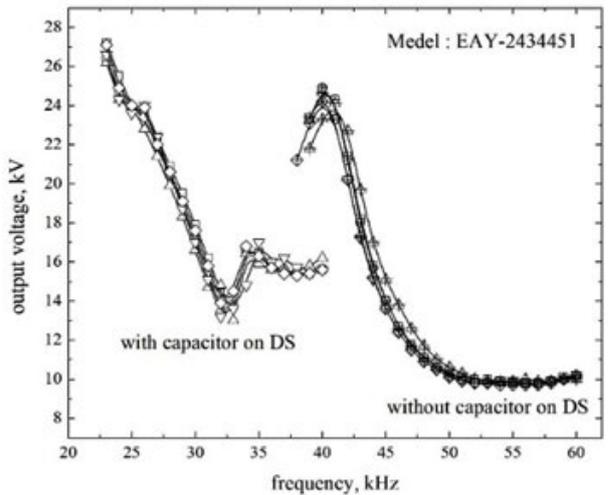
ขึ้นกว่าปกติ โดยสามารถต่อตัวเก็บประจุแบบไม่มีขั้ว
ค่าน้อยเช่น 0.1 μ F กรองความถี่สูงระหว่างขาเดรน



รูปที่ 17 การแก้ไขรูปคลื่นแรงดันสไปค์
ที่ขาเดรนและขาซอสของสวิตช์



รูปที่ 16 ลักษณะสัญญาณที่ขาเกตและสัญญาณ
สไปค์ที่ขาเดรนและขาซอสของสวิตช์

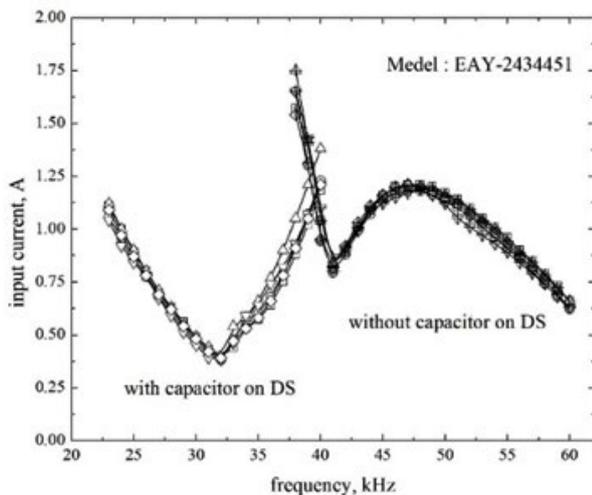


รูปที่ 18 การตอบสนองของแรงดันเอาต์พุต
ที่ความถี่ต่างๆ

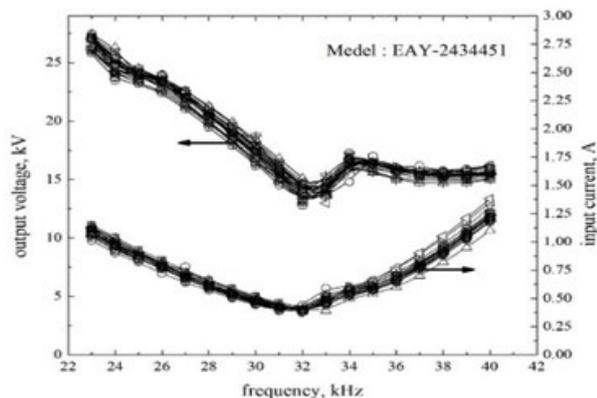
9 รอบ (เพื่อแสดงคุณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นของ
แกนเฟอร์ไรต์เช่นเดียวกับรุ่น TFB4012AD) ปรับค่า
ตัวต้านทาน R_T เพื่อกำหนดความถี่ได้ระหว่าง 37–60
kHz ค่า Duty Cycle เท่ากับ 50 % มีการใช้ซีเนอร์
ไดโอดเพื่อตั้งฐานสัญญาณให้ต่ำกว่าศูนย์ตามรูปที่ 16
พบว่าสัญญาณซบเกิดในช่องที่ 1 มีลักษณะใกล้เคียง
กับสัญญาณออดมคติมากและแรงดันคร่อมสวิตช์ระหว่าง
ขาเดรน (D) และขาซอส (S) ในช่องวัดที่ 2 มีสัญญาณ
สไปค์มาก ส่วนแรงดันเอาต์พุตในรูปที่ 18 (ที่ไม่มีการ
ต่อตัวเก็บประจุคร่อมสวิตช์) พบว่ามีค่ามากถึง 25 kV
ที่ความถี่ประมาณ 40 kHz การซบสวิตช์มอสเฟต
ที่มีสัญญาณสไปค์รบกวนแบบนี้ส่งผลให้มอสเฟตร้อน

และซอส เพื่อลดสัญญาณสไปค์ได้ตามรูปที่ 17 ซึ่ง
ยังส่งผลให้ได้แรงดันเอาต์พุตสูงถึง 27 kV และ
มีการตอบสนองต่อความถี่ที่ต่ำลงดังแสดงในรูปที่ 18
นอกจากนี้ยังพบว่า การตอบสนองของกระแสอินพุต
ที่ความถี่ต่างๆ มีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น
ดังแสดงในรูปที่ 19 จากนั้นเมื่อทดสอบกับหม้อแปลง
ฟลายแบคชนิดเดียวกันจำนวน 20 ลูก พบว่ามี
การตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุต
คล้ายกันมากดังแสดงในรูปที่ 20

การทดสอบวงจรขับด้วยสัญญาณ PWM จะใช้ไอซีเบอร์ UC3842 ควบคุมแบบลูปิดในการจ่ายกระแสดีเอสชาร์จ์ให้คงที่ โดยในลูปิดของกระแสขา 3 ที่ใช้ตรวจเช็คและป้องกันไม่ให้สวิตช์ทำงานเกินพิกัดนั้นจะสั่ง Shutdown เมื่อแรงดันเกินค่า 0.3 V และลูปิดแรงดันขา 2 ที่ใช้ตรวจเช็คแรงดันเอาต์พุต จะถูกประยุกต์ใช้ในการตรวจเช็คให้มีการจ่ายกระแสดีเอสชาร์จ์



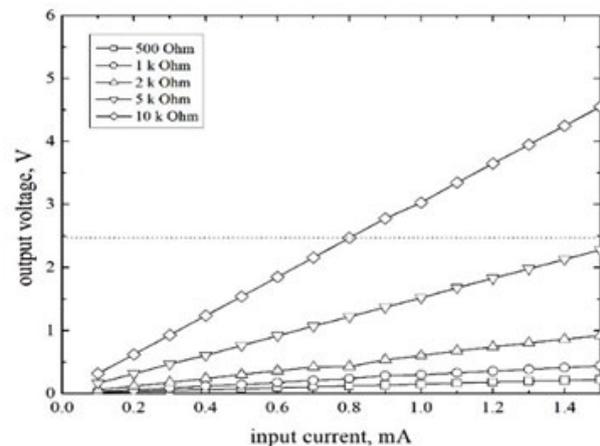
รูปที่ 19 การตอบสนองของกระแสอินพุต ที่ความถี่ต่างๆ



รูปที่ 20 การตอบสนองต่อแรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่างๆ

ให้คงที่ โดยในการทดสอบนี้จะกำหนดให้มีการจ่ายกระแสดีเอสชาร์จ์คงที่ที่ 1 mA ซึ่งมีความจำเป็นที่จะต้องใช้ออปแอมป์ LM741 แปลงค่ากระแสดีเอสชาร์จ์เป็นค่าแรงดัน ตามวงจรในรูปที่ 8 ซึ่งพบว่าควรเลือกใช้ตัว

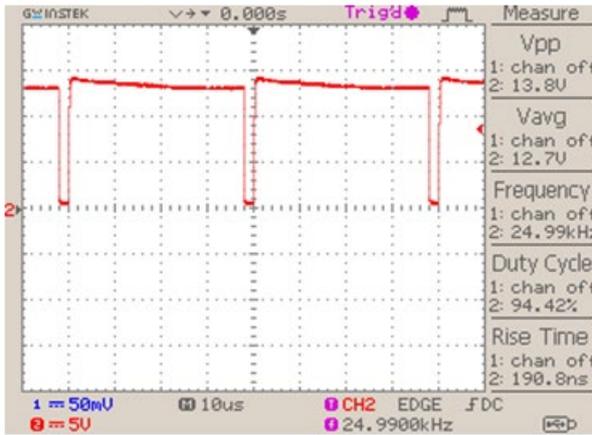
ต้านทานป้อนกลับค่า 10 kΩ ที่จะทำให้ได้สามารถตรวจวัดกระแสดีเอสชาร์จ์ได้ระหว่าง 0.8 – 1.5 mA ตามรูปที่ 21 จากนั้นทำการทดสอบวงจรทำงานของไอซี UC3842 และหม้อแปลงฟลายแบคตามรูปที่ 10 ซึ่งมีการต่อวงจรตามรูปที่ 22 ที่ทำให้ได้ความถี่ใช้งานประมาณ 25 kHz โดยเมื่อยังไม่มีสัญญาณแรงดันเข้ามาที่ลูปิดแรงดันขา 2 และลูปิดกระแสขา 3 จะทำให้ได้สัญญาณขับตามรูปที่ 23 ที่หมายความว่าเป็นการจ่าย Duty Cycle เต็มพิกัด ให้กับสวิตช์ในวงจรฟลายแบคคอน



รูปที่ 21 การแปลงกระแสดีเอสชาร์จ์เป็นแรงดันไฟฟ้า

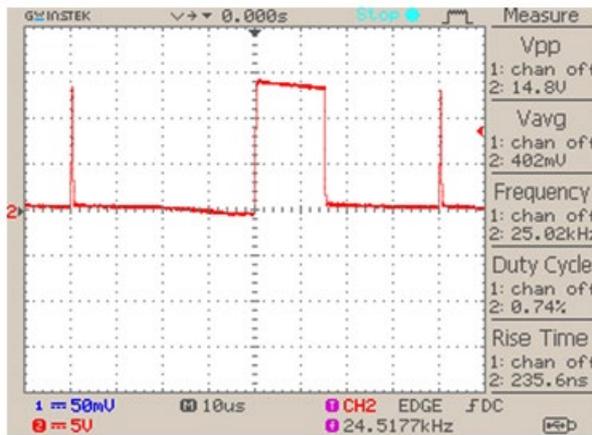


รูปที่ 22 ลักษณะการต่ออุปกรณ์ควบคุมแบบลูปิด

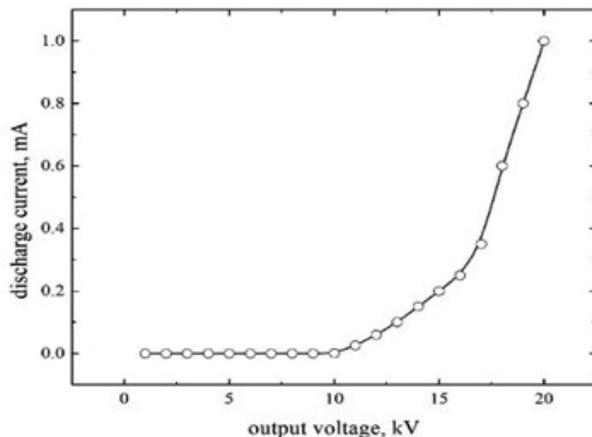


รูปที่ 23 สัญญาณก่อนขับเคลื่อนของไอซี UC3842

เวอร์เตอร์และเมื่อมีการสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงจนเกิดกระแสดีสชาร์จ ที่ระดับ 1 mA จะถูกออปแอมป์ LM741 แปลงค่ากระแสดีสชาร์จนี้เป็นแรงดันที่ระดับ 2.5 V ส่งมาที่ขา 2 ทำให้หยุดการสร้างสัญญาณ PWM



รูปที่ 24 สัญญาณขับเคลื่อนของการควบคุมแบบลูปปิด



รูปที่ 25 กระแสดีสชาร์จในชุดตกตะกอนไฟฟ้าสถิต

และเมื่อระบบในวงจรทำงานต่อเนื่องไปตลอด จะสามารถวัดค่าสัญญาณขับที่ไม่เป็นรูปแบบที่แน่นอนตามรูปที่ 24 อย่างนี้ตลอดไป

สำหรับการตรวจสอบหาพิกัดกำลังวัตต์ของหม้อแปลงฟลายแบคตามรูปที่ 11 ใช้การขับด้วยสัญญาณ PWM จากไอซี TL494 โดยการใช้ความถี่ที่ 35 kHz จากนั้นปรับแรงดันอินพุตจาก 0 – 24 V ให้ได้แรงดันสูงทางด้านเอาต์พุตเพิ่มขึ้นต่อเนื่อง จากนั้นทำการวัดกระแสดีสชาร์จที่อิเล็กทรอนิกส์แบบแผ่นแบนทั้งสองด้วยแอมมิเตอร์แบบเข็ม โดยมีการปรับค่าแรงดันสูงเพิ่มขึ้นจนไม่สามารถปรับได้เพิ่มอีก (หรือที่เอาต์พุตเกิดแรงดันไฟตก) ผลการทดสอบพบว่าหม้อแปลงฟลายแบครุ่น TFB-4012AD ELX ที่ใช้ทดสอบนี้สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้ายุติสชาร์จได้สูงสุดประมาณ 1 mA ที่แรงดัน 20 kV ตามรูปที่ 25 ซึ่งสามารถคิดเป็น 3.7 mA/m^2 หรือ ประมาณ 20 W

5. สรุป

บทความนี้เป็นการนำเสนอวิธีการสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงจากหม้อแปลงฟลายแบคสำเร็จรูปที่มีขายเชิงพาณิชย์ทั่วไป เนื่องจากเป็นหม้อแปลงที่ออกแบบมาสำหรับการสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงโดยเฉพาะ ทำให้มีคุณสมบัติความเป็นฉนวนไฟฟ้าแรงดันสูงอยู่ในตัว อีกทั้งยังคงหาซื้อได้ในราคาไม่แพงนัก จึงเหมาะต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานหรือพัฒนาเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงในงานปล่อยประจุไฟฟ้าหรืองานพลาสมากำลังต่ำ วงจรการสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงที่กล่าวถึงในบทความนี้มีทั้งแบบอย่างง่ายต้นทุนต่ำที่ใช้สวิตช์เพียงตัวเดียว หรือการใช้ไอซีสำเร็จรูปอย่าง NE555 นอกจากนี้ยังมีการใช้ไอซี TL494 และ UC3842 เป็นไอซีสำหรับงานสร้างสัญญาณ PWM ขับสวิตช์โดยตรงและมี Error Amp สำหรับใช้ในการควบคุมแบบลูปปิดแบบอัตโนมัติ สามารถเพิ่มกระแสขับได้ด้วยวงจร Totem Pole หรือการใช้ไอซีสำเร็จรูปอย่าง TLP250 การทดสอบความสามารถในการจ่ายกระแสดีสชาร์จแสดงให้เห็นว่าหม้อแปลงฟลายแบค

ทั่วไปมีพิกัดกำลังไฟฟ้าประมาณ 20 W นอกจากนี้ การทดสอบหม้อแปลงฟลายแบคที่ความถี่ต่างๆ ทั้ง 2 รุ่น แสดงให้เห็นคุณสมบัติของแกนเฟอร์ไรต์ที่มีการตอบสนองต่อความถี่ที่ไม่เป็นเชิงเส้นเหมือนกัน แต่ยังคงมีความคล้ายกันในหม้อแปลงรุ่นเดียวกัน ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการต่อขนานหม้อแปลง เพื่อเพิ่มกำลังวัตต์ได้ การทดสอบการจ่ายกระแสดีสชาร์จ ที่ด้วยการควบคุมแบบลูปิดสามารถใช้งานได้ดี เหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานลักษณะต่างๆ ได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์กิตติกร สาสุจิตต์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Chatchai S, Boonme T, Danai P, and Nattapong P. Design and Development of the Corona Discharge Generator for Waste Water Treatment. Electrical Engineering Network 5th. 2013 (in Thai)
- [2] Artit Y, Panich I, and Wisut A. Design and Development of High Voltage Generator for the Electrostatic Precipitator, MFU Academic ChiangRai. 2010 (in Thai)
- [3] Artit Y, Visut A, Suttichai P, and Panich I. The Low Cost of High Voltage Pulse Electric Field Generator for Electrostatic Work Application. Academic Conference "Science Research" 3th. Phitsanulok Province. 2011 (in Thai)
- [4] HR Series. Flyback Transformer. [cited 2017 Jun 18]; Available from: <http://www.donberg.ie>

- [5] Weerachat K, and Woothipol T. Power Electronic. V J Printing. ISBN 974-92440-9-5. 6th. 2007 (in Thai)
- [6] Daniel M. M., DC-DC Switching Regulator Analysis. McGraw-Hill. Inc. United States of America. 1988.
- [7] Simon S. A., Power Switching Converters. Marcel Dekker. Inc. New York. 1995.
- [8] Supachai H, and Chanin B. The Comparison of Flyback Converter Circuit in CCM and DCM. Lat Krabang Academic. 20th. 2003. Vol. 1 (in Thai)
- [9] Sung-Soo H. Sang-Keun J. Young-Jin J. and Chung-Wook R., Analysis and Design of a High Voltage Flyback Converter with Resonant Elements. Journal of Power Electronics. 2010. Vol. 10. No. 2. 107-114.
- [10] Timer IC555. Timer and Pulse Wave Generator. [cited 2017 Jun 18]; Available from: <https://en.wikipedia.org>
- [11] TLP250. Photocoupler. TOSHIBA. [cited 2017 Jun 18]; Available from: <https://toshiba.semicon-storage.com>
- [12] TL494. Switch Mode Pulse Width Modulation Control Circuit. ON Semiconductor. [cited 2017 Jun 18]; Available from: <http://onsemi.com>
- [13] LM741. Operational Amplifier. Texas Instruments. [cited 2017 Jun 18]; Available from: www.ti.com
- [14] UC3842, Current Mode PWM Controller. Texas Instrument. [cited 2017 Jun 18]; Available from: www.ti.com