

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงแบบบริดจ์ ขนาด 40 kV 5 mA *

กิตติพงษ์ ดันมิตร¹⁾ อำนาจ สุขศรี²⁾ และชัยพร อัดโดดดร³⁾

¹⁾ รองศาสตราจารย์

²⁾ อาจารย์

³⁾ นักศึกษาปริญญาโท

ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงแบบบริดจ์ขนาด 40 kV 5 mA โดยใช้วงจรทวิคูณแรงดันแบบบริดจ์ 2 ชั้นบนไดซึ่งได้ทำการสร้างขึ้นที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงแบบนี้พัฒนาขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาแรงดันตกในวงจรทวิคูณแรงดันแบบ Cockcroft-Walton ซึ่งใช้จำนวนขั้นสูงตั้งแต่สองขั้นขึ้นไป จากการออกแบบและทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงที่สร้างขึ้นพบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงแบบบริดจ์จะมีค่าแรงดันตกในวงจรน้อยกว่าแบบ Cockcroft-Walton 25% ที่ 2 ขั้น 25% ที่ 3 ขั้น และ 37% ที่ 4 ขั้น ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้จากการคำนวณและการทดสอบจริงสอดคล้องกันและมีค่าใกล้เคียงกัน

คำสำคัญ : เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง , วงจรทวิคูณแรงดันแบบบริดจ์ , วงจรทวิคูณแรงดันแบบ Cockcroft-Walton

HVDC BRIDGE GENERATOR 40 kV 5 mA *

K. Tonmitra ¹⁾ A. Suksri ²⁾ and C. Addoddorn ³⁾

¹⁾ Associate professor

²⁾ Lecturer

³⁾ Master degree student

High Voltage Laboratory , Khonkaen University , Thailand 40002

ABSTRACT

This paper presents the design and construction of HVDC Bridge generator rated 40 kV at 5 mA by using voltage multiplier bridge type comprising of 2 stages operation which is constructed at high voltage laboratory in the faculty of electrical engineering , Khonkaen University . This HVDC generator has improved the voltage drop in the circuit which is better than the case of using voltage multiplier Cockcroft-Walton type that employed higher stage than 2 stages .From the design and tests, this HVDC generator confirms that HVDC Bridge generator has voltage drop less than HVDC Cockcroft-Walton generator 25% at 2 stages , 25% at 3 stages and 37% at 4 stages respectively . The results obtained from calculations and measurements have been shown to agree well with each other .

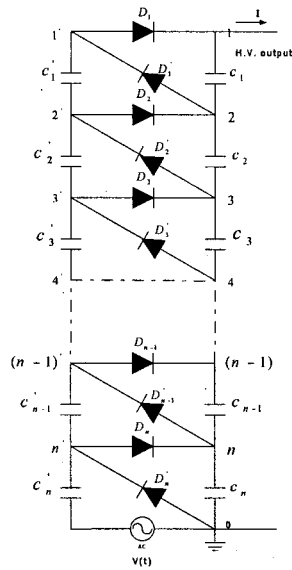
KEYWORD : HVDC GENERATOR , VOLTAGE MULTIPLIER BRIDGE , VOLTAGE MULTIPLIER COCKCROFT-WALTON

บทนำ

ในปัจจุบันมีความต้องการใช้ไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงอย่างมากในหลายอาชีพทั้งในด้าน การค้าและการทดลองต่างๆ อาทิเช่น การใช้ประโยชน์สำหรับเครื่องมือพิเศษทางฟิสิกส์ เช่น เครื่องเร่ง ประจุ เครื่องผลิตรังสีเอกซ์ซึ่งได้จากการยิงอิเล็กตรอนที่ผ่านเครื่องเร่งอัตราเร็วลงบนแผ่นโลหะ เครื่อง อิเลคตรอนไมโครสโคปซึ่งใช้ประโยชน์ในทางพลัสมากายภาพ โดยการสร้างพลาสมาด้วยอุณหภูมิสูง เพื่อทำฟิวชั่นนิวเคลียร์ ในทางการแพทย์ใช้สำหรับเครื่องฉายรังสีต่างๆ ในทางอุตสาหกรรมใช้สร้าง เครื่องผลิตไอออน และใช้ประโยชน์ทางด้านเทคนิคโดยใช้ทำการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีและ ฟิสิกส์ เช่นการทำคริสตัลโพลีเอสเตอร์โดยการฉายรังสีลงบนวัสดุนั้น การพ่นสีโดยใช้อิเล็กโตรสแตติกส์ ใช้กับเครื่องกรองเขม่าควัน ใช้กับหลอด CRT ในโทรทัศน์ เป็นต้น ส่วนในทางไฟฟ้าจะใช้ทดสอบ อุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีค่าความจุไฟฟ้าสูงๆ เช่น เคปิลแรงสูง หรือ ตัวคาปาซิเตอร์ที่ใช้ในระบบส่งจ่าย ซึ่ง ขนาดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้มีขนาดกำลังตั้งแต่วัตต์ต่ำๆ ขึ้นไปจนถึง 100 kW และมีแรงดัน เอาท์พุทขนาดตั้งแต่ 1 kV ขึ้นไปจนถึง 100 kV ในการสร้างไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงจะประกอบด้วย แหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับความถี่ 50 Hz หม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง วงจรเรกติไฟเออร์พร้อมด้วยคาปาซิเตอร์ฟิลเตอร์ จากการใช้งานทั่วไปเมื่อต้องการแรงดันกระแสตรงที่มีค่าสูงๆ จะต้องใช้หม้อแปลงและ อุปกรณ์อื่นที่มีขนาดใหญ่มากซึ่งปัญหานี้เราสามารถแก้ไขได้โดยลดขนาดของหม้อแปลงลงแล้วเพิ่มวงจร ทวิคูณแรงดันเข้าไปเพื่อเพิ่มแรงดันในระดับที่ต้องการได้สำหรับวงจรทวิคูณแรงดันที่ใช้ในวงจรเป็นที่รู้จัก และพัฒนาการสร้างกันมาตั้งแต่ปี พ.ศ.2455 โดย Cockcroft-Walton แล้วซึ่งยังคงใช้กันอยู่จนถึงปัจจุบัน และในทำนองเดียวกันเมื่อเราต้องการแรงดันกระแสตรงที่มีค่าสูงๆ เราจำเป็นต้องเพิ่มวงจรทวิคูณแรงดัน เพิ่มขึ้นไปอีกเป็นจำนวนมากซึ่งในทางปฏิบัติจะพบว่า การเพิ่มวงจรทวิคูณแรงดันมากขึ้นจะทำให้แรงดัน ตกมาก แรงดันที่ได้ออกมาที่โหลดกลับต่ำลง ซึ่งจะทำให้สิ้นเปลืองอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรโดยใช่เหตุ ดังนั้น เพื่อเป็นการประหยัดจำนวนอุปกรณ์ในวงจรดังกล่าวและลดแรงดันตกให้น้อยลง เราจึงหันมาใช้วงจร ทวิคูณแรงดันแบบบริดจ์แทน ซึ่งจะทำให้แรงดันเอาท์พุทที่ได้สูงขึ้นกว่าเดิม ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึง ทำการศึกษาและสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงโดยใช้วงจรทวิคูณแรงดันเป็นแบบบริดจ์เป็น ส่วนสำคัญ

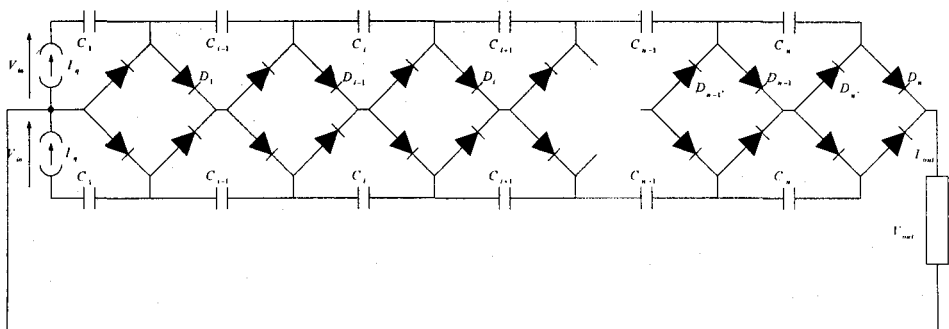
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

วงจรที่แสดงในรูปที่ 1 เป็นวงจรเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงที่ใช้วงจรทวิคูณแรงดัน ตามหลักการของวงจร Cockcroft – Walton ซึ่งมีจำนวน n ชั้น โดยแต่ละชั้นจะประกอบด้วยตัวเก็บประจุ 2 ตัว และไดโอด 2 ตัว โดยที่ตัวเก็บประจุตัวหนึ่งเป็นตัวเก็บพักประจุ และอีกตัวหนึ่งเป็นตัวกรองให้ได้ แรงดันกระแสตรง



รูปที่ 1 วงจรทวีคูณแรงดันตามหลักการของวงจร Cockcroft-Walton

ต่อมาเราจะขยายไปสู่วงจรเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงที่ใช้วงจรทวีคูณแรงดันเป็นแบบบริดจ์ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งเป็นรูปแบบที่พัฒนาแล้ว ซึ่งมีจำนวน n ชั้นเช่นกัน โดยแต่ละชั้นประกอบด้วยตัวเก็บประจุ 2 ตัว และไดโอด 4 ตัวต่อกันในลักษณะวงจบบริดจ์



รูปที่ 2 วงจรทวีคูณแรงดันแบบบริดจ์

การพิจารณาเบื้องต้น

กระแสเฉลี่ยเอาต์พุต $\bar{I}_{out}$ เป็นกระแสที่ไหลผ่านไดโอดในวงจรทวิคูณแรงดัน สำหรับวงจรทวิคูณแรงดันแบบบริดจ์กระแสเฉลี่ยเอาต์พุตจะถูกแบ่งโดยไดโอด 2 ตัวในแต่ละชั้นบันได นั้นหมายความว่าไดโอดแต่ละตัวได้รับกระแสเฉลี่ยเหมือนกันเท่ากับ

$$\bar{I}_{D_i} = 0.5 \bar{I}_{out} \quad (1)$$

และจะได้รับประจุ

$$Q = \bar{I}_{out} \cdot \frac{1}{2f} \quad (2)$$

โดยทั่วไปตัวเก็บประจุ C_i ของวงจรทวิคูณแรงดันจะได้รับการเก็บประจุและคายประจุ เท่ากับ

$$Q_{C_i} = (n + 1 - i) \cdot Q \quad (3)$$

โดยที่จะได้รับแรงดันสวิงที่ C_i เท่ากับ

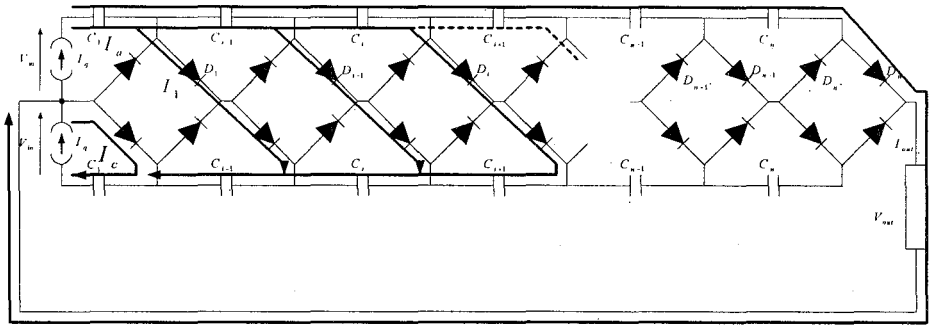
$$\Delta V_i = V_{i_{max}} - V_{i_{min}} = \frac{(n + 1 - i)}{C_i} \cdot Q \quad (4)$$

และจะได้รับความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุตสูงสุดและกระแสเฉลี่ยเอาต์พุตเท่ากับ

$$\bar{I}_{out} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{n} I_{q_{max}} \quad (5)$$

คุณลักษณะของวงจรทวิคูณแรงดันแบบบริดจ์

1. กระแสอินพุต $I_q(t)$ สามารถแยกออกเป็น 3 ส่วน คือ I_a , I_b และ I_c ดังแสดงในรูปที่ 3
2. ส่วนของกระแส I_a จะไหลผ่านไดโอด $D_1, D_2, \dots, D_{n-1}$
3. ส่วนของกระแส I_b จะไหลผ่านไดโอด D_n ซึ่งจะเริ่มนำกระแสทันทีภายในครึ่งไซเคิลแรก ส่วนของกระแส I_c จะไหลกลับแหล่งจ่ายกระแสตัวล่างโดยผ่านไดโอดและตัวเก็บประจุที่อยู่ใกล้ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3

รูปที่ 3 วงจรวัดแรงดันแบบบริดจ์จำนวน n ชั้น

การคำนวณหาแรงดันสูงสุด

ค่าแรงดันสูงสุดของตัวเก็บประจุ C_i สามารถแทนได้ด้วย

$$\max \{V_i(t)\} = VH_i \quad (6)$$

ค่าแรงดันเหล่านี้จะปรากฏในขณะเริ่มจ่ายกระแสบวกอินพุท และในท้ายสุดกระแสบวกอินพุทก็จะทำให้แรงดันที่ตัวเก็บประจุเหล่านี้ลดลงต่ำสุดซึ่งเท่ากับ

$$\min \{V_i(t)\} = VH_i - (n+1-i) \frac{Q}{C_i} \quad (7)$$

ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 3 กระแส I_a และ I_b ไหลขนานกันในสาย ถ้าในกรณีไดโอด D_i และ D_n นำกระแสจะได้แรงดันที่เปลี่ยนแปลงเป็น

$$\Delta V_i = Q \cdot \sum_{j=2}^{i+1} \frac{1}{C_j} = q_i^* \cdot Q \cdot \sum_{j=i+1}^n \frac{1}{C_j} \quad (8)$$

ซึ่งตัวประกอบ q_i^* แทนด้วยประจุปกติที่ไหลผ่านไดโอด D_n เมื่อ Q ไหลผ่านไดโอด D_i

$$q_i^* = \frac{\sum_{j=2}^{i+1} \frac{1}{C_j}}{\sum_{j=i+1}^n \frac{1}{C_j}} \quad (9)$$

การนำกระแสของ D_i เราสามารถแบ่งได้ออกเป็น 3 กรณี คือ

ถ้าไดโอด D_n นำกระแสในเวลาเดียวกัน $q_i = q_i^*$

ถ้าไดโอด D_n ไม่นำกระแส ($I_b = 0$) $q_i = 0$

ถ้าไดโอด D_n เริ่มนำกระแสภายในเวลา $q_i = 1 - \sum_{j=1}^{i-1} q_j^*$

ต่อมาจะใช้ประจุปกติ q_i เมื่อกระแส I_a เปลี่ยนแปลงจากไดโอด D_i ไปยังไดโอด D_{i-1} แรงดันที่ตัว

เก็บประจุ C_i ตัวบนจะเท่ากับแรงดันที่ตัวเก็บประจุ C_{i+1} ตัวล่าง ดังรูปที่ 3 ในกรณีนี้ตัวเก็บประจุตัวล่างเก็บประจุจนเต็มในขณะที่ตัวเก็บประจุตัวบน C_i กำลังคายประจุบางส่วน ซึ่งเราสามารถแทนได้ด้วย

$$VH_{i+1} = VH_i - \frac{Q}{C_i} \cdot \left((n-i) + \sum_{j=i}^{n-1} q_j \right) \quad \text{สำหรับ } i=2 \dots (n-1) \quad (10)$$

และท้ายที่สุดกระแสบวก $I_q(t)$ จะไหลผ่านไดโอด $D_1 (I_a = I_1)$ และ D_n นำกระแสพิจารณาจากกฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้ผลลัพธ์ ดังนี้

$$V_{out} = VH_2 + \sum_{j=2}^n \left(VH_j - \frac{(n+1-j)}{C_j} \right) Q \quad (11)$$

สำหรับวงจรที่คูณแรงดันแบบบรีดจ์ n ชั้น สมการ $n-1$ อีสาระสามารถคำนวณแรงดันสูงสุด $VH_i (i=2 \dots n)$ โดยใช้สมการ (10) และ (11) อ้างอิง สุดท้ายจะได้รับสูตรสำหรับแรงดันสูงสุด ดังนี้

$$VH_2 = \frac{V_{out}}{n} + \frac{Q}{n} \cdot \sum_{j=2}^n \frac{n+1-j}{C_j} + \frac{Q}{n} \sum_{i=3}^n \sum_{j=2}^{i-1} \frac{1}{C_j} \left(n-j + \sum_{v=j}^{n-1} q_v \right) \quad (12)$$

$$VH_i = VH_2 - Q \cdot \sum_{j=2}^{i-1} \frac{1}{C_j} \left(n-j + \sum_{v=j}^{n-1} q_v \right) \quad i=3 \dots n \quad (13)$$

ในทำนองเดียวกันการคำนวณแรงดันสูงสุดของตัวเก็บประจุ C_1 สามารถแทนได้ด้วย

$$VH_1 = V_{out} - \frac{VH_2}{2} - \sum_{j=2}^n VH_j - \frac{Q}{2} \cdot \frac{n}{C_1} + Q \sum_{j=1}^n \frac{n+1-j}{C_j} \quad (14)$$

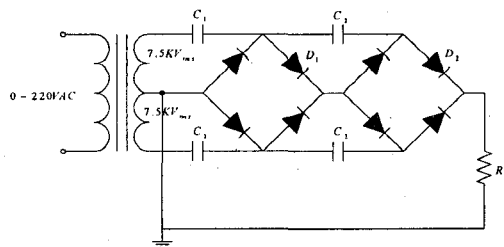
การออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

ในการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงนั้น มีข้อกำหนดดังนี้

แรงดันจ่ายออก 40 kV

กระแสโหลด 5 mA

1. วงจรที่ใช้สร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง



รูปที่ 4 วงจรเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงแบบบรีดจ์ 2 ชั้นบันได

2. การคำนวณค่าตัวเก็บประจุและแรงดันสูงสุด

2.1 การคำนวณค่าตัวเก็บประจุ

กำหนดให้แรงดันสวิงที่ C_i เท่ากับ 7 % ของ $V_{in_{max}}$

$$\therefore \Delta V_i = 10,000 \times 0.07 = 700V$$

$$\text{จาก } \Delta V_i = \frac{(n+1-i)}{C_i} \cdot Q$$

$$\text{จะได้ } C_i = \frac{(n+1-i)}{\Delta V_i} \cdot Q = \frac{(n+1-i)}{\Delta V_i} \cdot \bar{I}_{out} \cdot \frac{1}{2f}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{(2+1-1)}{700} \cdot 5 \times 10^{-3} \cdot \frac{1}{2 \times 50} \\ &= \frac{10^{-3}}{700} = 142.86 \times 10^{-9} F \end{aligned}$$

ในทำนองเดียวกัน

$$\begin{aligned} C_2 &= \frac{(2+1-2)}{700} \cdot 5 \times 10^{-3} \cdot \frac{1}{2 \times 50} \\ &= \frac{10^{-3}}{14000} = 71.43 \times 10^{-9} F \end{aligned}$$

2.2 การคำนวณแรงดันสูงสุด

$$\text{จากสมการ } VH_2 = \frac{V_{out}}{n} + \frac{Q}{n} \cdot \sum_{j=2}^n \frac{n+1-j}{C_j} + \frac{Q}{n} \sum_{i=3}^n \sum_{j=2}^{i-1} \frac{1}{C_j} \left(n-j + \sum_{v=j}^{n-1} q_v \right) \quad \text{เทอม}$$

สุดท้ายตัดทิ้ง เนื่องจาก $n=2$

จะได้

$$\begin{aligned} VH_2 &= \frac{40 \times 10^3}{2} + \frac{50 \times 10^{-6}}{2} \cdot \frac{2+1-2}{71.43 \times 10^{-9}} \\ &= 20 \times 10^3 + 0.35 \times 10^3 \\ &= 20.35 \times 10^3 V \end{aligned}$$

ในทำนองเดียวกันจากสมการที่(14)จะได้

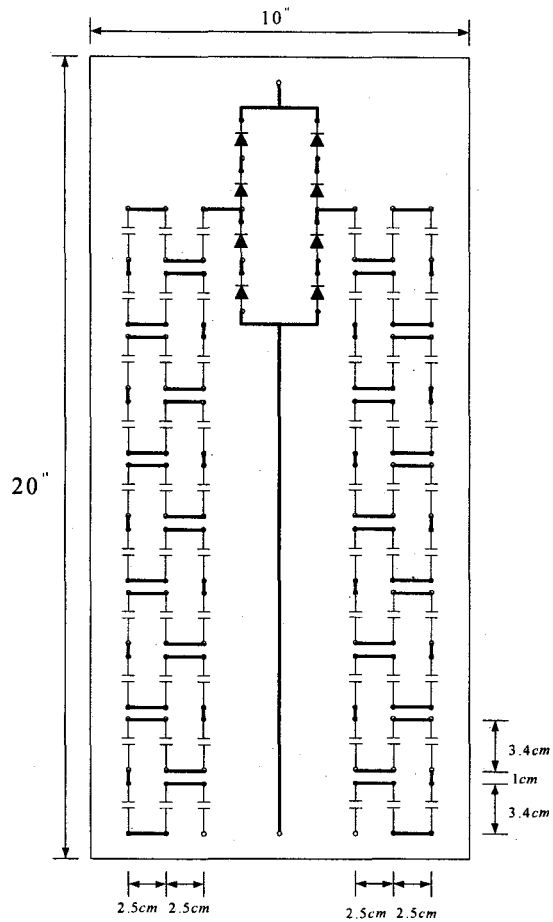
$$\begin{aligned}
 VH_1 &= 40 \times 10^3 - \frac{20.35 \times 10^3}{2} - 20.35 \times 10^3 - \frac{50 \times 10^{-6}}{2} \cdot \frac{2}{142.86 \times 10^{-9}} \\
 &+ 50 \times 10^{-6} \cdot \left[\frac{2+1-1}{142.86 \times 10^{-9}} + \frac{2+1-2}{71.43 \times 10^{-9}} \right] \\
 &= 9.475 \times 10^3 - 0.35 \times 10^3 + 50 \times 10^{-3} [0.014 + 0.014] \\
 &= (9.125 + 1.4) \times 10^3 \\
 &= 10.525 \times 10^3 V
 \end{aligned}$$

ตัวเก็บประจุ	ค่าความจุ (nF)	ค่าแรงดันสูงสุด (kV)
ตัวเก็บประจุ C_1	142.86	10.525
ตัวเก็บประจุ C_2	71.43	20.35

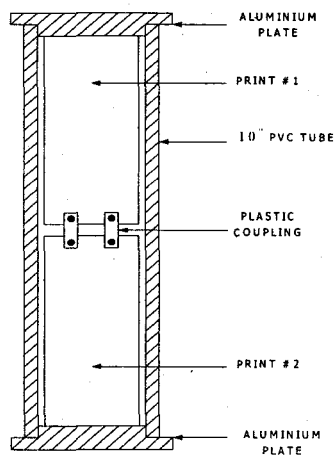
ตารางที่ 1 แสดงค่าตัวเก็บประจุและแรงดันสูงสุดที่ใช้ในวงจรทวิคูณแรงดันแบบบรติจ 2 ขั้นบันได

3. การออกแบบตัวเก็บประจุและไดโอด

จากการคำนวณค่าตัวเก็บประจุในข้างต้นทำให้ทราบว่าตัวเก็บประจุจะต้องทนแรงดันที่ใช้
งานได้สูงสุดเท่ากับ 20.35 kV แต่ตัวเก็บประจุที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงมีขนาด 4.75
 μF 250 VAC เมื่อนำมาต่ออนุกรมกันจำนวน 30 ตัว จะได้ค่าความจุเท่ากับ 158.33 nF และทนแรงดัน
ได้ 10.605 KV ซึ่งตัวเก็บประจุชุดนี้ได้สร้างเป็นตัวเก็บประจุ C_1 และเมื่อนำตัวเก็บประจุขนาด 4.75
 μF 250 VAC มาต่ออนุกรมกันจำนวน 60 ตัว จะได้ค่าความจุเท่ากับ 79.16 nF และทนแรงดันได้
21.21 KV ซึ่งตัวเก็บประจุชุดนี้ได้สร้างเป็นตัวเก็บประจุ C_2 ส่วนไดโอดที่ต่อในวงจรจะต้องทนแรงดัน
กลับทางได้อย่างน้อยที่สุดเท่ากับ 20.35 kV ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ไดโอดเบอร์ ESJC13 ที่มีจำหน่ายใน
ท้องตลาดซึ่งทนแรงดันกลับทางได้สูงสุด 9 KV และทนกระแสได้ถึง 30 A โดยนำมาต่ออนุกรมกัน 2 ตัว
ทำให้ทนแรงดันได้ถึง 25.45 KV จากนั้นจะทำการจัดวางบนแผ่นปรินขนาด 10" x 20" ซึ่งมีระยะห่าง
ระหว่างจุดบัดกรี 3.4 ซม. และระยะห่างระหว่างแถว 2.5 ซม. โดยแต่ละชั้นจะอยู่บนแผ่นปริน 1 แผ่น ดัง
แสดงในรูปที่ 5 แล้วนำไปบรรจุอยู่ในท่อ PVC ขนาด 10 นิ้ว ยาว 45 นิ้ว จำนวน 1 ท่อน จากนั้นทำการ
ปิดหัวท้ายด้วยเพลทอลูมิเนียมกลมเพื่อลดแรงดันโคโรนาที่เกิดขึ้น เมื่อสร้างเสร็จแล้วจะมีรูปร่างดังแสดง
ไว้ในรูปที่ 6



รูปที่ 5 แสดงการจัดวางตัวเก็บประจุและไดโอดบนแผ่นปริ้นขนาด 10" × 20"



รูปที่ 6 แสดงการจัดวางแผ่นปริ้นในท่อ PVC ขนาด 10 นิ้ว

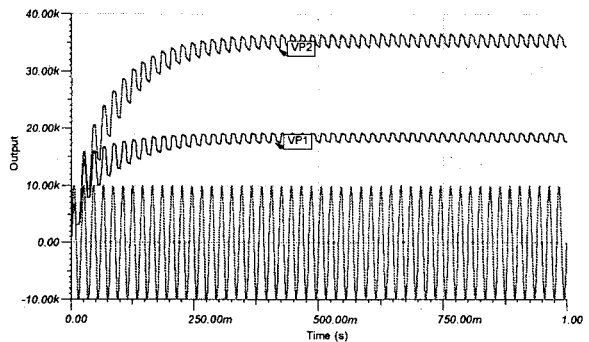
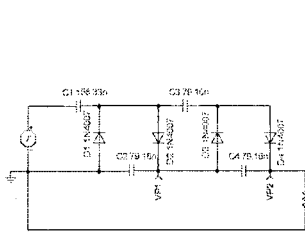
การทดสอบ

การทดสอบวงจรเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง จะมีขั้นตอนดังนี้ คือ อันดับแรกจะทำการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของวงจรและผลที่คาดว่าจะได้รับ อันดับสอง คือ การทดสอบจริงจากการต่อวงจรและวัดผล ดังจะได้อธิบายต่อไปนี้

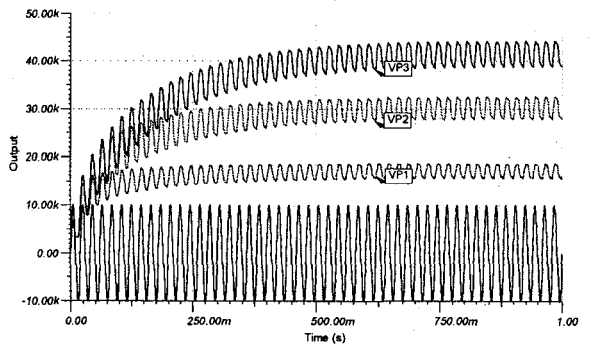
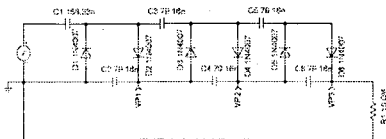
1. ทดสอบโดยโปรแกรม TINA (Toolkit for Interaction Network Analysis) โดยมีเงื่อนไขดังนี้

- ก. แรงดันอินพุตที่ป้อนให้เท่ากับ 10 kV
- ข. ขนาดของตัวเก็บประจุมีค่าดังที่ได้ออกแบบไว้
- ค. จำนวนชั้นบันไดมีค่าตั้งแต่ 2 ชั้น , 3 ชั้น และ 4 ชั้น
- ง. ไดโอดที่ใช้ในการทดสอบ คือ 1N4007 ประกอบโดยใช้เทคนิค TGCC
- จ. ช่วงเวลาที่ใช้ในการทดสอบ คือ 1 วินาที
- ฉ. โหลดที่ใช้ในการทดสอบมีขนาด 10 M Ω

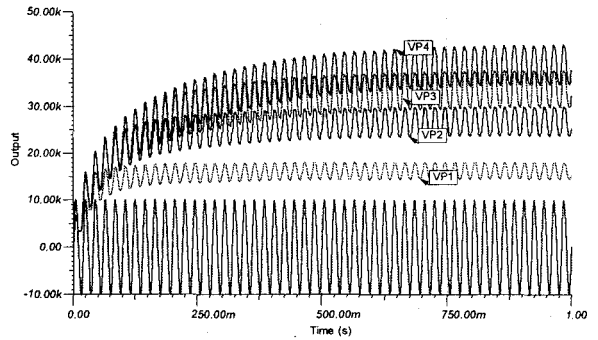
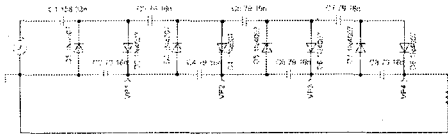
1.1 ทดสอบแรงดันที่ชั้นต่างๆของวงจรทวิคูณแรงดันแบบ Cockcroft-Walton



รูปที่ 7 แสดงวงจรและแรงดันเอาต์พุตของวงจรจำนวน 2 ชั้น

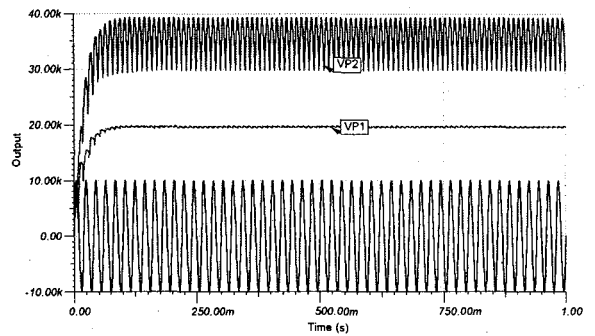
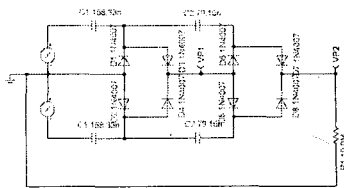


รูปที่ 8 แสดงวงจรและแรงดันเอาต์พุตของวงจรจำนวน 3 ชั้น

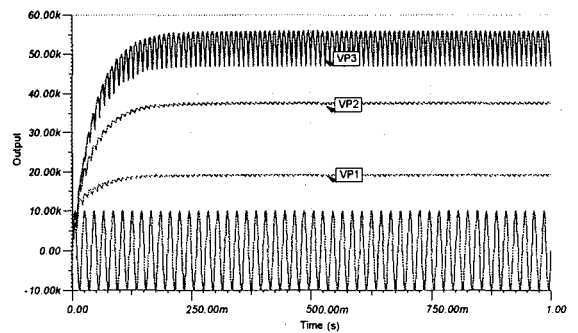
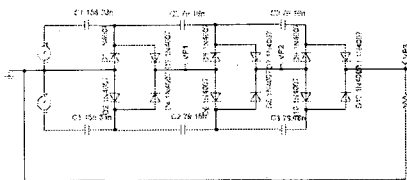


รูปที่ 9 แสดงวงจรและแรงดันเอาต์พุตของวงจรจำนวน 4 ชั้น

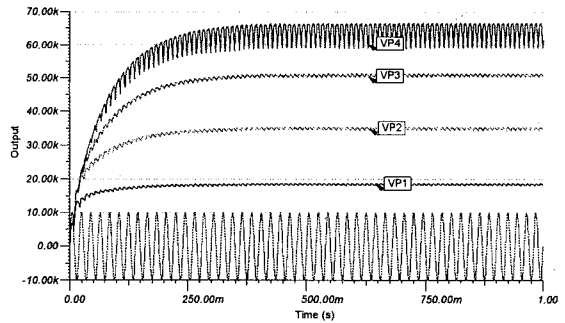
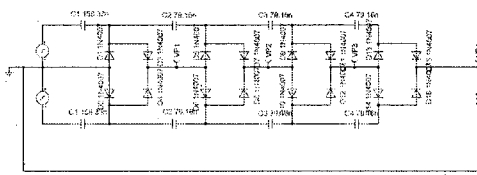
1.2 ทดสอบแรงดันที่ชั้นต่างๆของวงจรทวิคูณแรงดันแบบบริดจ์



รูปที่ 10 แสดงวงจรและแรงดันเอาต์พุตของวงจรจำนวน 2 ชั้น



รูปที่ 11 แสดงวงจรและแรงดันเอาต์พุตของวงจรจำนวน 3 ชั้น

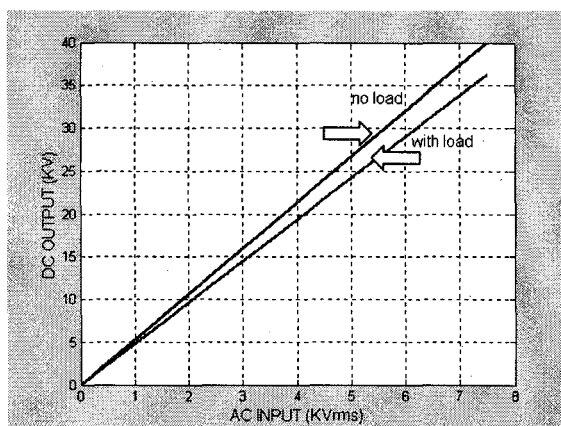


รูปที่ 12 แสดงวงจรและแรงดันเอาต์พุตของวงจรจำนวน 4 ชั้น

	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง					
	แบบ Cockcroft-Walton (kV)			แบบบริดจ์ (kV)		
	2 ชั้นบันได	3 ชั้นบันได	4 ชั้นบันได	2 ชั้นบันได	3 ชั้นบันได	4 ชั้นบันได
$2nV_{\max}$	40	60	80	40	60	80
$V_{o(\max)}$	36	44	45	39	56	67
$V_{o(\min)}$	34	38	34	30	47	58
ΔV_o	4	16	35	1	4	13
$2\delta V$	2	6	11	9	9	9

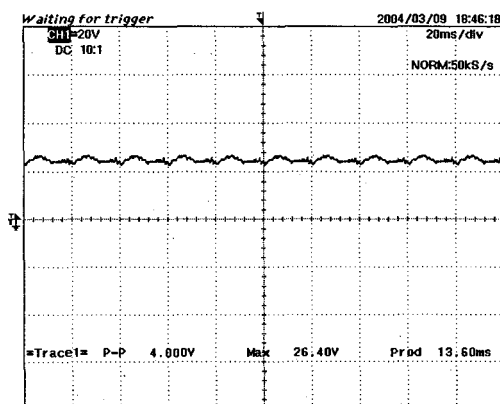
ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้ระหว่างวงจรที่คูณแรงดันแบบ Cockcroft-Walton และแบบบริดจ์จากการทดสอบโดยโปรแกรม TINA

2. ทดสอบโดยการทดลองจริงจากการวัดที่ได้จากวงจรที่คูณแรงดันแบบบริดจ์ตามรูปที่ 4 โดยใช้ค่าตัวเก็บประจุตามที่ได้ออกแบบไว้ในข้อ 3 และค่าที่วัดได้นั้นใช้ Digital Oscilloscope 8 bits 200 MS/s 150 MHz Yokogawa ทำการวัดโดยวัดผ่านโวลต์เตจดีไวเดอร์ชนิดความต้านทานโดดๆ ที่มีอัตราส่วน 1:1600 และผลการทดลองได้แสดงไว้ดังรูปที่ 14 จนถึงรูปที่ 17 โดยมีค่าที่วัดได้ คือ 42.24 kV , 24.32 kV , 40.96 kV และ 23.04 kV ตามลำดับ

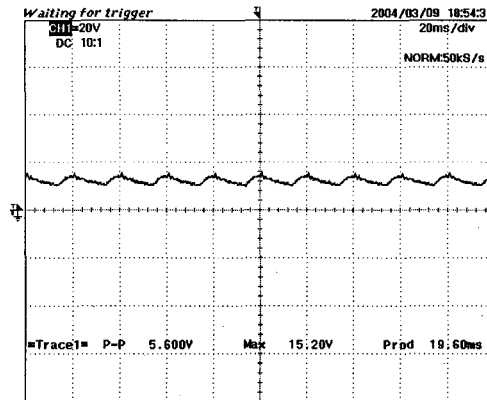


รูปที่ 13 แสดงแรงดันเอาร์ทพุทที่ได้ในขณะมีโหลดและไม่มีโหลดโดยทำการจ่ายแรงดันอินพุทเข้าตั้งแต่ 0 -

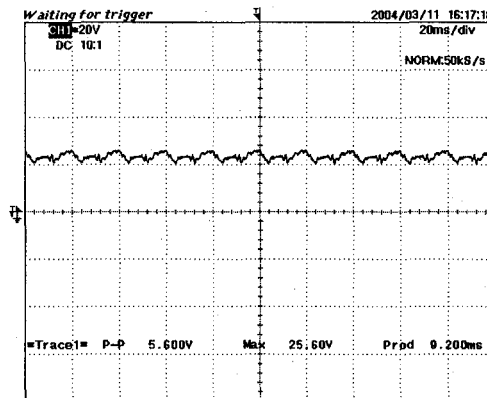
7.5 kV_{rms}



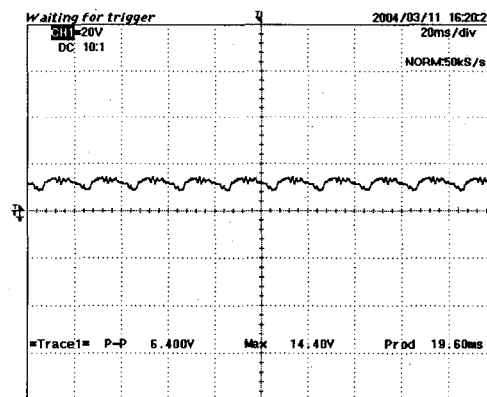
รูปที่ 14 แสดงแรงดันเอาร์ทพุทที่ขึ้นบันไดที่ 2 ขณะไม่มีโหลด



รูปที่ 15 แสดงแรงดันเอาต์พุตที่ขึ้นบันไดที่ 1 ขณะไม่มีโหลด



รูปที่ 16 แสดงแรงดันเอาต์พุตที่ขึ้นบันไดที่ 2 ขณะมีโหลด



รูปที่ 17 แสดงแรงดันเอาต์พุตที่ขึ้นบันไดที่ 1 ขณะมีโหลด

บทสรุป

จากการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงที่ใช้วงจรทวีคูณแรงดันเป็นแบบบริดจ์ เทียบกับแบบ Cockcroft-Walton โดยโปรแกรม TINA จะเห็นว่าที่ขั้นบันไดสูงขึ้นแบบ Cockcroft-Walton จะเกิดแรงดันตกในวงจรมากกว่าแบบบริดจ์โดยเฉพาะขั้นที่ 2 ขึ้นไป ซึ่งจะเห็นว่าการเพิ่มจำนวนขั้นของวงจรทวีคูณแรงดันแบบ Cockcroft-Walton ขึ้นไปไม่ช่วยให้แรงดันเอาท์พุทที่ได้เพิ่มขึ้นเลย ดังนั้นเพื่อเป็นการลดแรงดันตกในวงจรให้น้อยลงเราจึงหันมาใช้วงจรทวีคูณแรงดันแบบบริดจ์แทน นอกจากนี้ยังสามารถลดจำนวนขั้นของวงจรลงได้ด้วยเมื่อเทียบกับวงจรทวีคูณแรงดันแบบ Cockcroft-Walton และจากการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงแบบบริดจ์ขนาด 40 kV 5 mA จากการทดลองจริงนั้นได้ผลใกล้เคียงกับค่าที่ออกแบบไว้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเครื่องมือเครื่องใช้ในการทดสอบจากห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่นที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัยครั้งนี้ด้วย

เอกสารอ้างอิง

- กิตติพงษ์ ตันมิตร. (และคณะ). 2547. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงขนาด 200 kV 5 mA. งานสัมมนานวัตกรรมทางวิศวกรรมสำหรับการจัดการทรัพยากรอย่างยั่งยืน; 24 มกราคม 2547 ;ตึกเพียรวิจิตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- พงษ์เทพ เกิดดอนแฝก , และคณะ. 2547. แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แรงดันสูง แบบฉนวนแข็ง. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 25 (EECON-25); 21-22 พฤศจิกายน 2545; มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- J.S. Brugler .1971 .Theoretical Performance of Voltage Multiplier Circuits. **IEEE Journal of Solid-State Circuits** . (June)
- P.M. LIN . 1977. Topological Generation and Analysis of Voltage Multiplier Circuits. **IEEE Trans. on circuits and systems** . CAS-24 , 10 (October)
- Heinz van der Broeck . 2002 . Analysis of a current fed voltage multiplier bridge for high voltage applications. **University of Applied Sciences Cologne** . IEEE