

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงแบบไบโพลาร์ขนาด ± 100 กิโลโวลต์ 5 มิลลิแอมป์

กิตติพงษ์ ตันมิตร และ อำนาจ สุขศรี
ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงแบบไบโพลาร์ ± 100 กิโลโวลต์ 5 มิลลิแอมป์ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงขนาด 200 กิโลโวลต์ 5 มิลลิแอมป์ สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงแรงสูงขนาด 200 กิโลโวลต์ 5 มิลลิแอมป์นั้น สร้างโดยใช้วงจรพื้นฐานของ Cockcroft-Walton สองชั้นบันได ส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงแบบไบโพลาร์ ± 100 กิโลโวลต์ 5 มิลลิแอมป์นั้นได้ดัดแปลงจากวงจรพื้นฐานของ Cockcroft-Walton หนึ่งชั้นบันไดสองชุดนำมาต่อกันเพื่อให้ได้ไฟฟ้าแรงสูงชนิดขั้วบวกและขั้วลบ โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงดังกล่าว ทางห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงได้ทำการพัฒนาไดโอดไฟฟ้าแรงสูงและตัวเก็บประจุไฟฟ้าแรงสูงขึ้นเองทั้งหมด จากการสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงทั้งสองแบบพร้อมทั้งทำการทดสอบ จะพบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงชนิดไบโพลาร์มีประสิทธิภาพทางแรงดันสูงกว่าแบบ Cockcroft-Walton ซึ่งอยู่ที่ 86.24% ในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงแบบไบโพลาร์จะได้ 94.3% ในขณะเดียวกันแรงดันระลอกและแรงดันตกนั้นมีค่าน้อยกว่า ที่แรงดันป้อนจ่ายเข้าค่าเดียวกัน

Bipolar High Voltage DC Generator ± 100 kV 5 mA

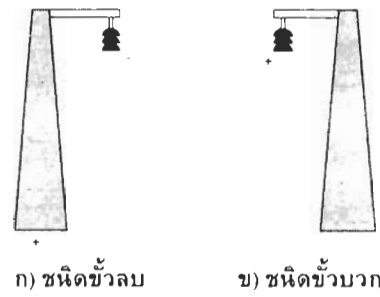
K. Tonmitra and A. Suksri
High Voltage Laboratory, Khon Kaen University

Abstract

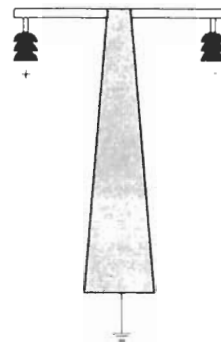
This paper presents the design and construction of Bipolar high voltage DC generator rated ± 100 kV 5 mA. The high voltage DC generator rated 200 kV 5 mA is constructed by using the basic of 2 stage Cockcroft-Walton circuit for a verification test against the Bipolar high voltage DC generator. The bipolar high voltage DC generator ± 100 kV 5 mA is constructed by altering the connection of the single stage Cockcroft-Walton into bipolar circuit. The high voltage diode and capacitor were developed at high voltage laboratory specifically for this research. Test and results confirms that the bipolar high voltage DC generator has the higher voltage efficiency than the DC generator as much as 94.3% while the conventional Cockcroft-Walton was able to achieve at 86.24%. In the same time, the ripple voltage as well as the voltage drop has reduced much further at the same input voltage value.

บทนำ

ในการใช้งานของไฟฟ้าแรงสูงทางด้านอุตสาหกรรมนั้นนิยมใช้ไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง เพื่อเป็นแหล่งจ่ายพลังงานเช่น หลอด CRT ในเครื่องรับโทรทัศน์ เครื่องพ่นสี เครื่องกำจัดฝุ่นควัน เครื่องฟอกอากาศ และในทางการแพทย์ใช้ในเครื่องเอกซเรย์ เครื่องสลายนิวไนด์ เป็นต้น ซึ่งล้วนแล้วแต่ต้องการแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 1,000 โวลต์ จนถึง 100,000 โวลต์ สำหรับวิศวกรไฟฟ้านั้นต้องการไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงเพื่อใช้ในการทดสอบฉนวนเช่น สายเคเบิลใต้ดินชนิด HXLP หรือ XLPE ที่มีความยาวมากๆ และมีค่าคาปาซิแตนซ์สูงได้เป็นอย่างดีโดยไม่มีข้อจำกัดของขนาด kVA ของเครื่องทดสอบ และในการส่งกำลังไฟฟ้าเป็นระยะทางไกล ๆ เกินกว่าพันกิโลเมตรขึ้นไปนั้น นิยมส่งด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบไบโพลาร์ ซึ่งสามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้มากกว่าแบบโมโนโพลาร์ถึงสองเท่าโดยใช้เสาส่ง Tower ตันเดียวกัน ทำให้ส่งผลต่อการประหยัดค่าก่อสร้างในเรื่องสายส่งแรงสูงได้เป็นอย่างดี ดังได้แสดงในรูปที่ 1 และ 2



รูปที่ 1 แสดงเสาส่งไฟฟ้าแรงสูงชนิดโมโนโพลาร์



รูปที่ 2 แสดงเสาส่งไฟฟ้าแรงสูงชนิดโพลาร์

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

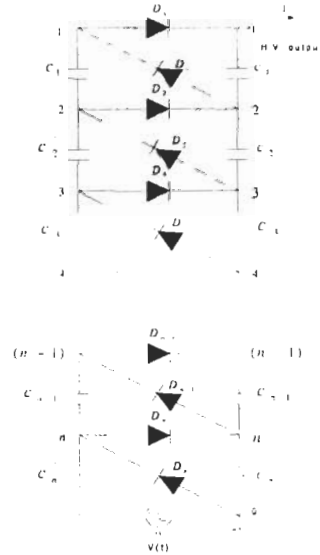
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงที่มีใช้ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทั่วไปนั้นจะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดโมโนโพลาร์และขั้วของแรงดันที่ใช้ทดสอบจะเป็นขั้วบวกหรือขั้วลบเพียงอย่างเดียว ซึ่งใช้วงจรพื้นฐาน Cockcroft-Walton เป็นตัวสร้าง เมื่อต้องการแรงดันทดสอบที่สูงๆ จะต้องใช้จำนวนชั้นบันไดหลายๆ ชั้น ทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าลดลง พิจารณาจากวงจรพื้นฐานของ Cockcroft-Walton ตามรูปที่ 3 โดยมีวิธีการออกแบบ ตามขั้นตอนต่อไปนี้

1. ขนาดของแรงดันจ่ายออก V_0 คำนวณจาก [E. Kuffler, W. S. Zaengl. 1984]

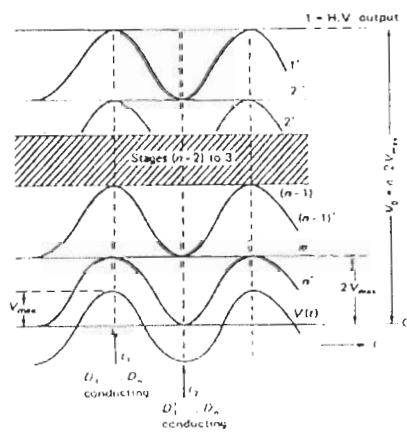
$$\text{ขนาดของแรงดันจ่ายออก } V_0 = 2nV_{\max} \quad (1)$$

- เมื่อ V_0 เป็นขนาดของแรงดันจ่ายออก
 V_i เป็นขนาดของแรงดันจ่ายเข้า
 n เป็นจำนวนชั้นบันได
 $V_{\max}$ เป็นแรงดันค่าสูงสุดที่จ่ายเข้าวงจร Cockcroft-Walton

สำหรับแรงดันที่จุดต่าง ๆ ของวงจร Cockcroft-Walton นั้นแสดงไว้ในรูปที่ 4



รูปที่ 3 วงจรพื้นฐานจำนวน n ชั้นบันไดของ Cockcroft-Walton



รูปที่ 4 รูปคลื่นของแรงดันที่จุดต่าง ๆ ของวงจร Cockcroft-Walton ขณะยังไม่จ่ายโหลด

2. แรงดันระลอก (ripple voltage) δv คำนวณจาก

$$\delta v = \frac{I}{2f} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{2}{C_2} + \frac{3}{C_3} + \dots + \frac{n}{C_n} \right) \quad (2)$$

เมื่อ δv เป็นแรงดันระลอก (ripple voltage) หน่วยเป็น Volts
 f เป็นความถี่ หน่วยเป็น Hz
 C เป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าแรงสูง หน่วยเป็น Farads
 I เป็นกระแสที่จ่ายไปยังโหลด หน่วยเป็น Amperes

ในทางปฏิบัตินิยมเลือกให้ค่า $C_1 = C_2 = C_3 = \dots = C_n = C$ เพื่อให้แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุแต่ละตัวเท่าๆ กัน จึงทำให้

$$\delta v = \frac{I}{fc} \frac{n(n+1)}{4} \quad (3)$$

3. การคำนวณแรงดันตก ΔV_0 คำนวณจาก

$$\Delta V_0 = \frac{I}{fc} \left(\frac{2n^3}{3} + \frac{n^2}{2} - \frac{n}{6} \right) \quad (4)$$

เมื่อ ΔV_0 เป็นแรงดันตก หน่วยเป็น Volts

ในทางปฏิบัตินิยมเพิ่มค่า C''_n ขึ้นเป็นสองเท่า เนื่องจากตัวเก็บประจุแรงสูง C''_n ได้รับแรงดันสูงสุดเท่ากับ $V_{\max}$ โดยประมาณ ซึ่งน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของแรงดันสูงสุดของตัวเก็บประจุตัวอื่นๆ ดังนั้น จะได้

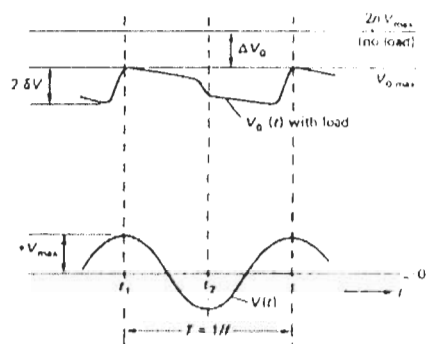
$$\Delta V_0 = \frac{I}{fc} \left(\frac{2n^3}{3} - \frac{n}{6} \right) \quad (5)$$

จากรูปที่ 3

$$V_{0\max} = 2nV_{\max} - \Delta V_0 \quad (6)$$

และ

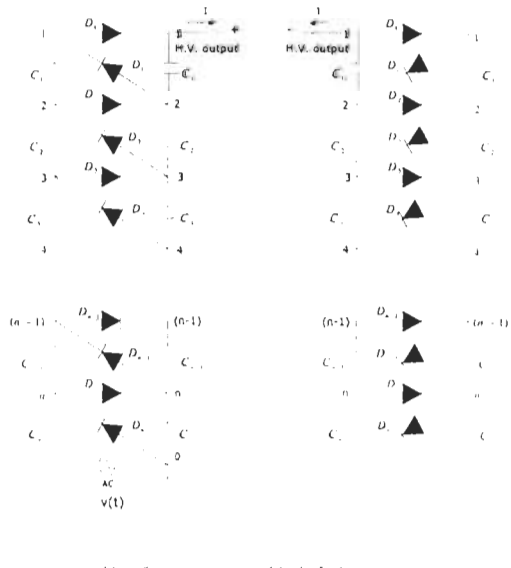
$$V_{0\min} = 2nV_{\max} - \Delta V_0 - 2\delta v \quad (7)$$



รูปที่ 5 แรงดันระลอก δv และแรงดันตก ΔV_0

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงแบบไบโพลาร์

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงแบบไบโพลาร์นี้ได้ดัดแปลงจากวงจรของ Cockcroft-Walton จำนวนสองชุด ชุดหนึ่งสร้างขั้วบวกและอีกชุดหนึ่งสร้างขั้วลบ ซึ่งจะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สร้างขึ้นนี้จ่ายแรงดันเป็นแบบไบโพลาร์ วงจรเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงแบบไบโพลาร์มีวงจรดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 แสดงวงจรเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงแบบไบโพลาร์

เมื่อต่อวงจรเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงแบบไบโพลาร์แล้ว จะทำให้เครื่องกำเนิดชนิดนี้มีประสิทธิภาพของแรงดันสูงกว่าแบบ Cockcroft-Walton ดังเดิม และตัวเก็บประจุ C_n ที่ชั้นบันไดแรกสามารถทนแรงดันได้ครึ่งหนึ่งของตัวเก็บประจุตัวอื่นๆ ซึ่งจะมีถึงสองตัว โดยวงจรเดิมมีเพียงตัวเดียวจึงทำให้ตัวเก็บประจุสามารถจ่ายพลังงานได้มากขึ้น

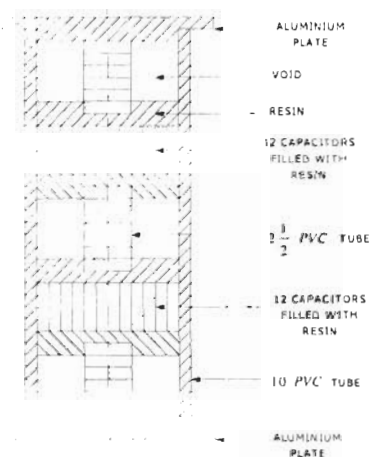
1. การออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงแบบไบโพลาร์
ในการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงนั้นมีข้อกำหนดดังนี้
แรงดันจ่ายออก ≥ 200 กิโลโวลต์
สามารถจ่ายโหลดแบบไบโพลาร์ ± 100 กิโลโวลต์
กระแสโหลด 5 มิลลิแอมป์
หม้อแปลงแรงดันจ่ายเข้า 50 kV_{rms}

สำหรับตัวเก็บประจุและตัวไดโอดแรงสูงได้พัฒนาจากเอกสารอ้างอิง [Wels Hylten-Cavalius. 1986, Dieter Kind, 1978] โดยภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มีขนาดดังนี้

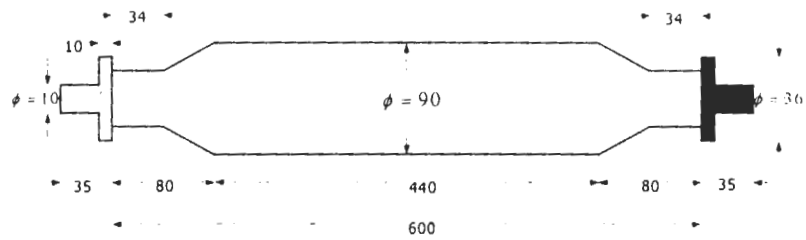
ตัวเก็บประจุแรงสูงขนาด $42.42\text{ nF } 50\text{ kV}_{rms}$

และตัวเก็บประจุแรงสูงขนาด $21.21\text{ nF } 100\text{ kV}_{rms}$

ตัวไดโอดแรงสูงขนาด $100\text{ kV}_{rms} 1,000\text{ mA}$



รูปที่ 7 แสดงตัวเก็บประจุไฟฟ้าแรงสูงที่สร้างขึ้นเองโดยใช้การฉนวนแบบเรซินแข็ง



รูปที่ 8 แสดงไดโอดแรงสูงที่สร้างขึ้นเองโดยใช้เทคนิค TGCC

ไดโอดที่สร้างขึ้นเองโดยใช้เทคนิค TGCC (Tube Gap Capacitor Compensated) ซึ่งเป็นผลงานวิจัยของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขณะนี้กำลังอยู่ในระหว่างการขอรับสิทธิบัตรหมายเลข No 054288 ซึ่งเมื่อสร้างเสร็จเรียบร้อยแล้วจะมีวงจรเทียบเคียงกับวงจรไฟฟ้ารูปที่ 9 โดยที่ค่า R และ C จะมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ

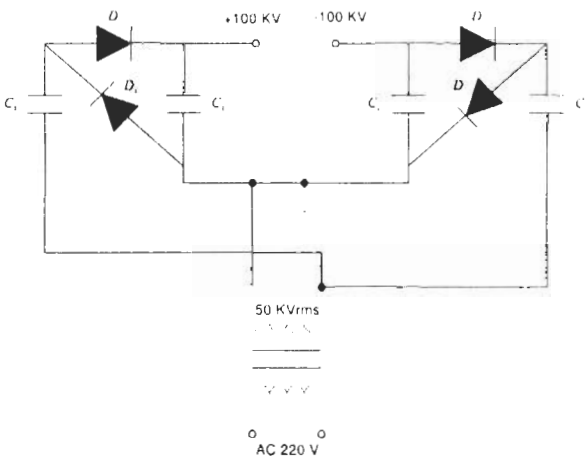


รูปที่ 9 แสดงวงจรเทียบเคียงของไดโอดไฟฟ้าแรงสูงชนิด TGCC

2. การคำนวณหาแรงดันระลอก δv และแรงดันตก ΔV_0

เนื่องจากเงื่อนไขข้างต้น เราต้องการแรงดันจ่ายออก 200 กิโลโวลต์ เมื่อต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงแบบไบโพลาร์แล้ว จะมีวงจรดังรูปที่ 10

จากสมการที่ 3 ทำการคำนวณ δv และ ΔV_0 ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงแบบ Cockcroft-Walton ดั้งเดิมและแบบไบโพลาร์ได้ผลตามตารางที่ 1

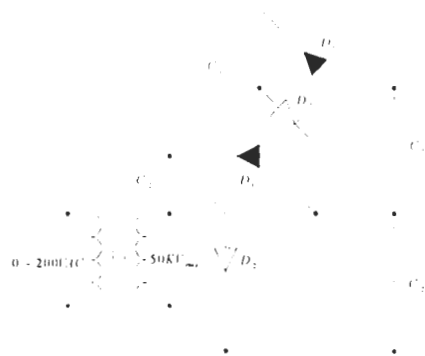


รูปที่ 10 แสดงวงจรเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงแบบไบโพลาร์ขนาด ± 100 kV

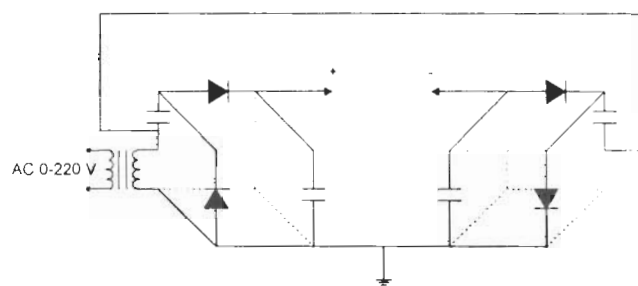
ตารางที่ 1 แสดงผลการคำนวณ ΔV_0 , δv , $V_{o(min)}$, $V_{o(max)}$ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงแบบ Cockcroft-Walton 2 ขั้นตอนได้เปรียบเทียบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงแบบไบโพลาร์ [R.S. Jha 1985]

ตัวแปร	ชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง	
	แบบ Cockcroft-Walton 2 ขั้นตอนได้ (volts)	แบบไบโพลาร์ (volts)
$2nV_{max}$	280,000	280,000
ΔV_0	23,573	4,714
$2\delta v$	14,144	9,428
$V_{o(min)}$	242,283	265,858
$V_{o(max)}$	256,427	275,286
$\eta_v = V_0/V_i$	86.52 %	94.94 %

หมายเหตุ η_v เป็นประสิทธิภาพของแรงดัน



รูปที่ 11 แสดงการจัดวางอุปกรณ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงแบบ Cockcroft-Walton 2 ขั้นตอนได้



รูปที่ 12 แสดงการจัดวางเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงแบบไบโพลาร์

วงจรควบคุมการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูง กระแสตรง

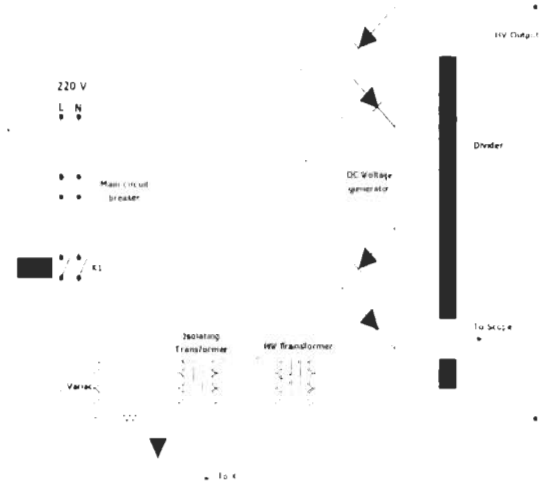
ในการควบคุมการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง เพื่อความ
สะดวกและปลอดภัยต่อการใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงนั้นจะต้องประกอบ
ไปด้วยวงจรจ่ายกำลังให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งวงจรจ่ายกำลังประกอบไปด้วย

1. Variac ขนาด 0-220 Volts 50Hz 10 แอมป์
2. หม้อแปลงแรงสูงขนาด 0-200 Volts $50kV_{rms}$ 2kVA
3. ชุด Circuit Breaker ขนาด 15 แอมป์
4. ชุด Magnetic Control
5. ชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงแบบ Cockcroft-Walton สองขั้น

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงแบบไบโพลาร์ขนาด ± 100 กิโลโวลต์ 5 มิลลิแอมป์ 371

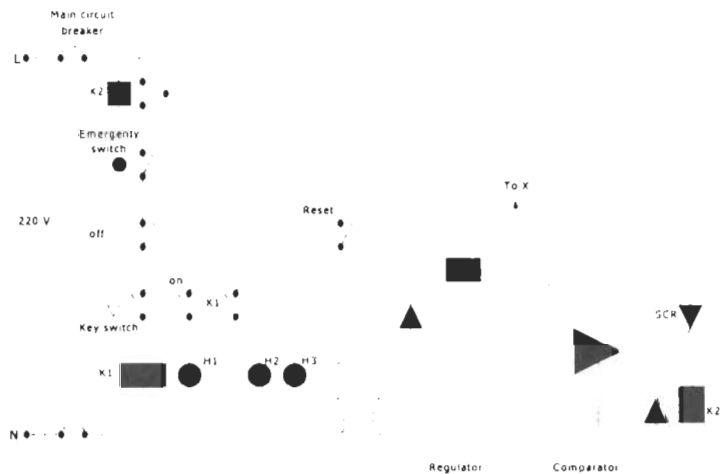
บันได

- 6. ชุด RCR Voltage divider ขนาด 609:I 500 kv ของบริษัท Hypotronic จำกัด (ประเทศ USA)
- 7. Isolating transformer



รูปที่ 13 วงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

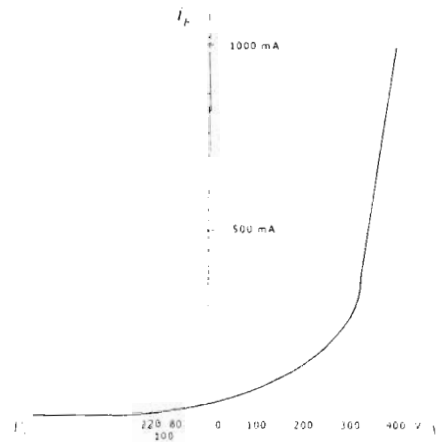
วงจรควบคุมและจำกัดกระแสขณะจ่ายโหลดหรือเมื่อเกิดการลัดวงจร จะมีวงจรดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 วงจรควบคุมและจำกัดกระแสขณะจ่ายโหลดหรือเกิดลัดวงจร

การทดสอบ

1. ทำการทดสอบไดโอดไฟฟ้าแรงสูงขนาด 140 kV โดยทำการทดสอบแรงดัน Forward Bias และ Reverse Bias นำผลการทดสอบมาพล็อตกราฟ V-I ได้ดังรูปที่ 15



รูปที่ 15 แสดงกราฟ V-I ของไดโอดไฟฟ้าแรงสูงขนาด 140 kV

2. ทดสอบตัวเก็บประจุไฟฟ้าแรงสูง
 - 2.1 ทดสอบวัดค่าความจุของตัวเก็บประจุไฟฟ้าแรงสูง ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าความจุของตัวเก็บประจุไฟฟ้าแรงสูง

ตัวเก็บประจุไฟฟ้าแรงสูง	ค่าความจุที่ออกแบบไว้	ค่าความจุที่วัดได้ (nF)					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
C ₂	42.42	42.90	42.90	42.50	42.45	42.45	42.64
C ₁	21.21	21.25	21.25	21.24	21.26	21.25	21.25
C ₂	21.21	21.24	21.23	21.38	21.40	21.35	21.32
C ₁	21.21	21.25	21.23	21.23	21.30	21.28	21.26

2.2 ทดสอบแรงดัน rated ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าแรงสูง โดยการจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงให้ตกคร่อมตัวเก็บประจุไฟฟ้าแรงสูง ได้ผลการทดสอบตามตารางที่ 3

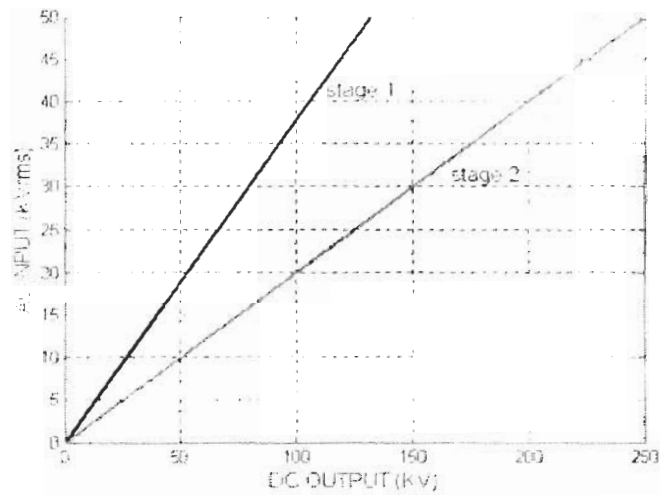
ตารางที่ 3 แสดงผลการทดสอบแรงดันของตัวเก็บประจุไฟฟ้าแรงสูง

ตัวเก็บประจุ	ค่าแรงดันกระแสตรงที่จ่ายให้กับตัวเก็บประจุไฟฟ้าแรงสูงเท่ากับ 70 kV					แรงดัน rated ที่ออกแบบไว้ kV
	ค่าแรงดันที่วัดได้ (kV)					
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	
C ₂	71	72	71	73	72	70.7
C ₁	142	145	144	142	143	141.14
C ₂	144	142	145	143	142	141.14
C ₁	145	144	142	143	142	141.14

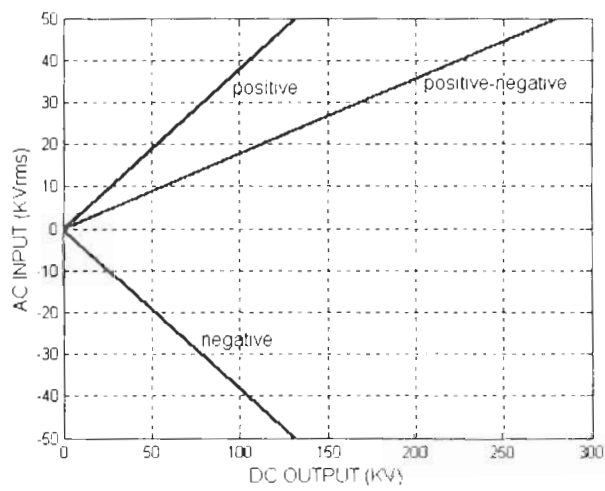
3. ทดสอบวัดแรงดันที่จ่ายออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบ Cockcroft-Walton โดยทำการจ่ายแรงดันขาเข้าตั้งแต่ 0-50 kV_{rms} ได้ผลการทดสอบดังกราฟรูปที่ 16
4. ทดสอบวัดแรงดันที่จ่ายออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบไบโพลาร์ โดยทำการจ่ายแรงดันขาเข้าตั้งแต่ 0-50 kV_{rms} ได้ผลการทดสอบที่ชั่ววอกและชั่วลบ ดังรูปที่ 17

บทสรุป

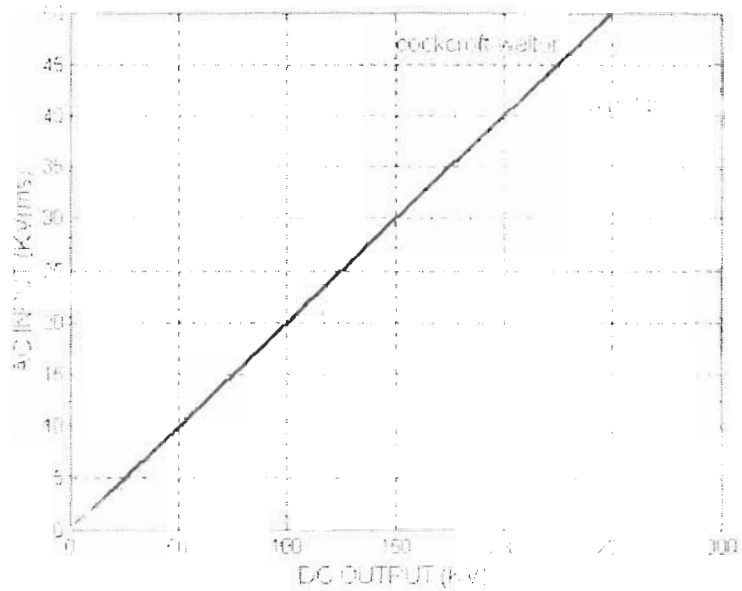
จากผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงแบบ Cockcroft-Walton และแบบไบโพลาร์เมื่อทำการจ่ายโหลดด้วยกระแส 5 มิลลิแอมป์ 200 กิโลโวลต์ นั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบไบโพลาร์และแบบ Cockcroft-Walton นั้นต้องการแรงดันขาเข้า 37.5 และ 41.0 kV_{rms} จะเห็นว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไบโพลาร์และ Cockcroft-Walton นั้นมีประสิทธิภาพของการจ่ายแรงดันเป็น 94.3 % และ 86.24 % ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับที่ได้ออกแบบไว้ และพบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไบโพลาร์ที่ดัดแปลงจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบ Cockcroft-Walton นั้น มีประสิทธิภาพดีกว่าแบบ Cockcroft-Walton ดั้งเดิม



รูปที่ 16 แสดงแรงดันขาออกที่ขึ้นบันไดที่ 2 ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบ Cockcroft-Walton เมื่อทำการจ่ายโหลดขนาด 5 มิลลิแอมป์ ที่แรงดัน 200 กิโลโวลต์



รูปที่ 17 แสดงแรงดันขาออกที่ขั้วบวกและขั้วลบอย่างเดี่ยวและแรงดันรวมของขั้วบวกลบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบโมโนโพลาร์เมื่อจ่ายโหลดขนาด 5 มิลลิแอมป์ ที่แรงดัน 200 กิโลโวลต์



รูปที่ 18 แสดงแรงดันขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบ Cockcroft-Walton เทียบกับแบบโบโลลาร์ เมื่อจ่ายโหลด 5 มิลลิแอมป์

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ได้ให้การสนับสนุนเงินทุนในการวิจัย จากงานวิจัยกลุ่ม ปี พ.ศ.2545 และห้องปฏิบัติการวิจัยวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือ และอุปกรณ์ ที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- Dieter Kind. 1978. An Introduction to High Voltage Engineering Technique. **Vieweg**.
- E. Kuffle, W.S. Zaengl. 1984. High Voltage Engineering. **Pergamon press**.
- R.S. Jha 1985. A course in High Voltage Engineering. **Dhanpat Rai & Son**.
- Wels Hylten-Cavalius. 1986. Voltage Laboratory Planning. **Krschgaten Druckerei AG**.