



เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง
HIGH VOLTAGE DC. GENERATOR

โดย
นายชัยวัฒน์ สังข์ทอง
นายรัฐ อุ่นจิตร
นายพรชัย กิ่งพันธ์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า,
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2534

007752

ปริญญาโทบริหารการศึกษา 2534

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

| | | | |
|----------|-----------------|-----------|---------|
| ผู้จัดทำ | 1. นาย ชัยวัฒน์ | สังข์ทอง | 31.1067 |
| | 2. นาย รัญ | อันจิตร | 31.1222 |
| | 3. นาย พรชัย | กิ่งวัฒน์ | 31.1167 |

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ศิริวัฒน์ โพธิ์เวชกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(จงรักษ์ บุญเลี้ยง)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

อาจารย์ที่ปรึกษา

อ. ศิริวัฒน์ โททิเวชกุล

อ. จงรักษ์ บุญเสียง

ผู้จัดทำโครงการ

นาย ชัยวัฒน์ สังข์ทอง

นาย วัฏ อ่อนจิตร

นาย พรชัย กิ่งพันธ์

ปีการศึกษา 2534

บทคัดย่อ

โครงการนี้จะแสดงถึงโครงร่างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง โดยที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงนี้จะประกอบด้วย หม้อแปลงไฟฟ้า, วงจรพหุคูณแรงดันซึ่งอาศัยหลักการพื้นฐานของวงจรพหุคูณคือครอพอ์ วอลตัน ซึ่งสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ทั้ง DC+ และ DC- โดยแบ่งเป็นชั้นๆ สามารถประกอบได้

และอุปกรณ์แบ่งแรงดัน

จากทฤษฎีวงจรพหุคูณแรงดัน โครงการนี้เราจะสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC+) ให้ได้ถึง 42.42 KV (สร้างทั้งหมด 5 ชั้น) และยังจะได้อธิบายหลัก

การวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงโดยอาศัยหลักการให้ความต้านทานมากกับความต้านทานน้อย มาต่ออันดับกัน

HIGH VOLTAGE DC. GENERATOR

Advisor

Siriwat Potiwechakul

Jongrug Boonseng

Producer

Chaipat Sungtong

Run Unjit

Ponchai Kengpat

1991

Abstract

This thesis presents the construction of High voltage DC generator. This High voltage DC generator consist of a Transformer, Voltage multiplier circuit which employs the principle of Cockcroft Walton voltage multiplier which can generate DC+ and DC- that can divide to many layers to compose them, and Voltage divider.

According to the Voltage multiplier circuit theory. This Project, We are generate High voltage DC(DC+)output 42.42 Kv (5 states), and explain the principle of the High voltage measurement by series with High impedance.

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| บทที่ 2 การผลิตไฟฟ้าแรงสูงและการใช้ประโยชน์ | 3 |
| บทที่ 3 TRANSFORMER และ การออกแบบ TRANSFORMER | 7 |
| บทที่ 4 การสร้างแรงดันสูงกระแสตรง | 23 |
| บทที่ 5 VOLTAGE MULTIPLIER | 34 |
| บทที่ 6 การออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง | 43 |
| บทที่ 7 เทคนิคการวัดแรงดันสูง | 44 |
| บทที่ 8 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง | 49 |
| บทที่ 9 สรุปและวิจารณ์ผลการทดสอบ | 51 |
| ภาคผนวก | |
| ก. ตัวอย่างอุปกรณ์และการวัดแรงดันกระแสตรง | 52 |
| ข. การทดสอบและการวัดแรงดัน | 53 |
| ค. การทดลองการสร้างแรงดันสูงกระแสตรง | 57 |

บทนำ

ในการวิจัยทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงนี้ มีการนำมาประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวางทั้งในระบบการผลิตและจำหน่ายไฟฟ้า ในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ การพัฒนาอุปกรณ์ทางไฟฟ้า ฯลฯ

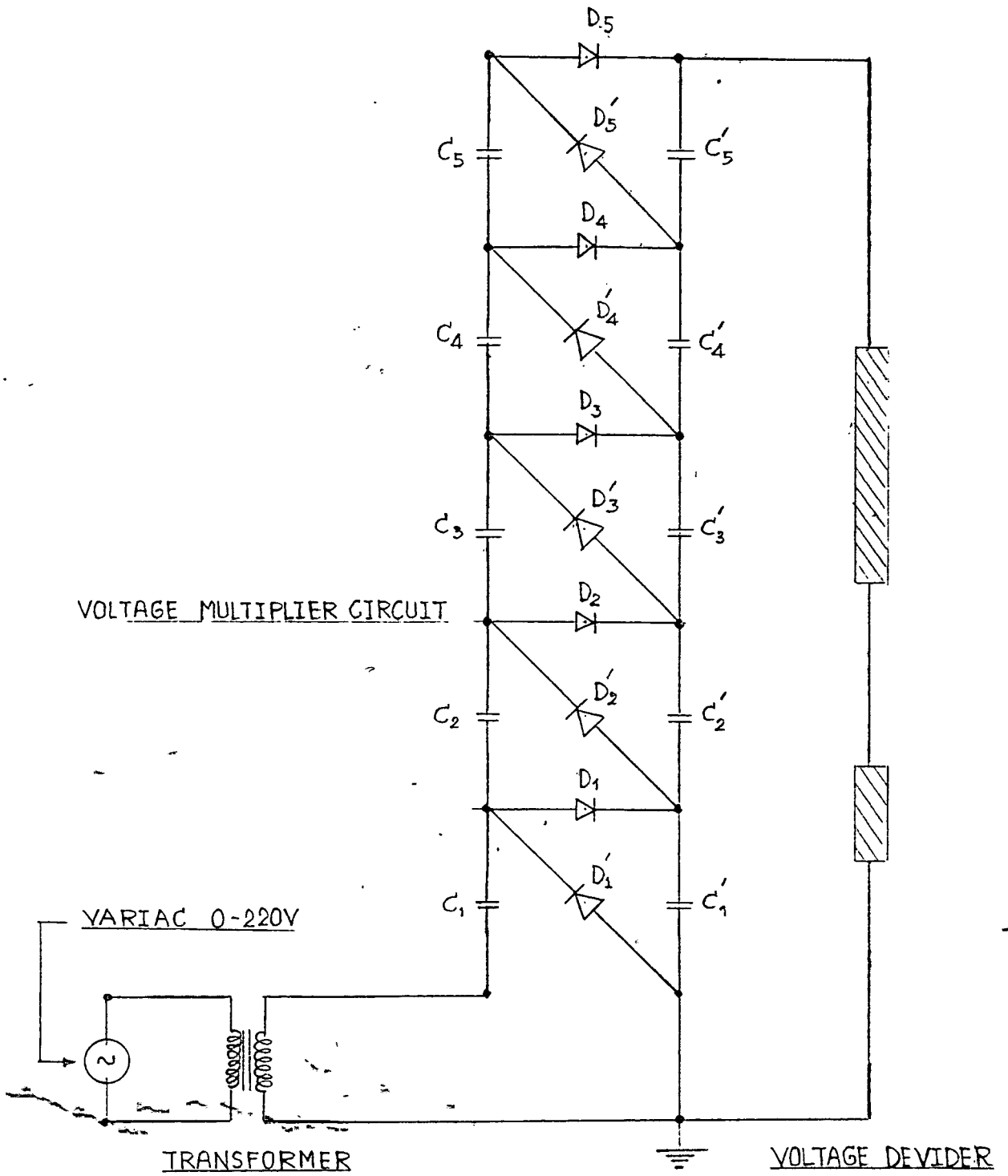
ในการผลิตไฟฟ้าแรงสูงนั้น สามารถแบ่งเป็นประเภทต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. ไฟฟ้าแรงสูง กระแสตรง (High Voltage DC)
2. ไฟฟ้าแรงสูง กระแสสลับ ความถี่ปกติ (High Voltage AC of Power Frequency)
3. ไฟฟ้าแรงสูง กระแสสลับ ความถี่สูง (High Voltage AC of High Frequency)
4. ไฟฟ้าแรงสูงทรานเซียน-อิมพัลส์ ช่วงเวลาสั้นๆ เช่น แรงดันเกินเนื่องจากฟ้าผ่า (High Transient of Impulse Voltage of Very Short Duration Such As Lightning)
5. ไฟฟ้าแรงสูงทรานเซียน ช่วงเวลายาว เช่น สวิตชิง-เซอร์จ (Transient Voltage of Longer Duration Such As Switching Surges)

ซึ่งในปริณญาปริญญ์ฉบับนี้ จะได้กล่าวถึงการออกแบบและการสร้างเครื่องผลิตไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง โดยอาศัยหลักการของวงจรแรงดันพหุคูณของ คือครอพอวอลตัน (Cockcroft-Walton Voltage Multiplier Circuit) ซึ่งมีส่วนประกอบดังนี้

1. แวรีแอก (Variac) ที่ปรับค่าได้ 0-220 โวลต์
2. หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) ขนาด 220/3000 โวลต์
3. วงจรแรงดันพหุคูณแบบ คือครอพอวอลตัน (Cockcroft-Walton Voltage Multiplier Circuit)
4. Voltage Divider

ซึ่งหลักการทำงานจะได้กล่าวโดยละเอียดในบทต่อไป และรูปแบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงแสดงดังรูปที่ 1-1



รูปที่ 1-1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

บทที่ 2

การผลิตไฟฟ้าแรงสูงและการใช้ประโยชน์

ไฟฟ้าแรงสูงตามความหมายที่ระบุไว้ในมาตรฐานสากล หมายถึงแรงดันไฟฟ้าที่สูงตั้งแต่ 1,000 โวลต์ขึ้นไป มนุษย์ได้คุ้นเคยกับไฟฟ้าแรงสูงในชีวิตประจำวันมาแล้วตั้งแต่สมัยดึกดำบรรพ์โดยไม่รู้ตัว นั่นก็คือ ไฟฟ้าแรงสูงที่เป็นปรากฏการณ์ฟ้าผ่าตามธรรมชาติอันเป็นผลของการดิสชาร์จหรือคายประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่ในก้อนเมฆ ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าสูงตั้งแต่ 10 ถึง 100 เมกกะโวลต์ จัดเป็นแรงดันสูงมากที่มนุษย์ยังไม่เคยสร้างได้สูงขนาดนี้ แรงดันสูงที่มนุษย์สร้างขึ้นด้วยเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จำลองแรงดันฟ้าผ่าเพื่อใช้ในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าก็มีแรงดันสูงเพียง 6 เมกกะโวลต์ ส่วนแรงดันสูงที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการส่งพลังงานไฟฟ้าในปัจจุบัน (2527) สูงเพียง 1,500 กิโลโวลต์แรงดันกระแสตรง และ 765 กิโลโวลต์แรงดันกระแสสลับ แม้จะเป็นที่ทราบกันดีว่าไฟฟ้าแรงสูงนั้นมีอันตรายมากเมื่อเทียบกับแรงดันต่ำที่ใช้ภายในบ้าน แต่ความจำเป็นทำให้ต้องนำเอาระบบไฟฟ้าแรงสูงมาใช้ในการส่งพลังงานไฟฟ้า ทั้งนี้เนื่องจากความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นทุกวัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศอุตสาหกรรมมีความต้องการพลังงานไฟฟ้าขึ้นในอัตราสูง ตามปกติจะเพิ่มขึ้นเท่าตัวในเวลา 10 ปี สำหรับประเทศไทยแม้จะไม่ใช่ว่าประเทศอุตสาหกรรมก็ตาม จากสถิติพบว่า ความต้องการพลังงานไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเท่าตัวในเวลาเพียง 7-8 ปี

เมื่อความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นเช่นนี้ จึงเป็นหน้าที่ของผู้ผลิตที่จะต้องหาทางผลิตเพิ่มขึ้นให้เพียงพอกับความต้องการ สรรวจแสวงหาแหล่งกำเนิดพลังงานที่เหมาะสมมาใช้ พลังงานที่จะนำมาใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้านั้น โดยทั่วไปได้แก่ พลังน้ำ น้ำมัน ถ่านหิน ก๊าซ นิวเคลียร์ และพลังงานแสงอาทิตย์ สำหรับประเทศไทยในปัจจุบันนี้ (2527) ที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ถึง 5855.22 เมกกะวัตต์ ได้จากแหล่งกำเนิดพลังงานหลัก 4 ประเภทคือ

| | |
|-------------------------------------|-------------------|
| 1. พลังน้ำ | 1509.1 MW (25.8%) |
| 2. พลังไอน้ำ (น้ำมันและถ่านลิกไนท์) | 2827.5 MW (56.8%) |
| 3. ก๊าซเทอร์ไบน์ (รวมคอมไบน์ไซเคิล) | 985.0 MW (16.6%) |
| 4. ดีเซล | 33.6 MW (0.6%) |

การตั้งโรงจักรผลิตพลังงานไฟฟ้า มักจะถูกกำหนดด้วยแหล่งกำเนิดพลังงาน ความเหมาะสม สภาพแวดล้อม และความเป็นไปได้ตามหลักเศรษฐศาสตร์ กล่าวคือ เราไม่สามารถเลือกตั้งโรงไฟฟ้าให้อยู่ใกล้กับศูนย์กลางผู้ใช้ไฟฟ้าได้ตามที่ต้องการเสมอไป โดยทั่วไปมักจะตั้งโรงจักรผลิตที่ใกล้ แหล่งกำเนิดพลังงาน เช่น พลังงานน้ำตกซึ่งอยู่ในภูมิประเทศที่เป็นภูเขา

หรือเหมืองถ่านหินในภูมิภาคที่ห่างไกลย่านชุมชน นั่นคือ จะต้องส่งพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าเป็นระยะทางไกล การส่งพลังงานปริมาณมาก ๆ และเป็นระยะทางไกล ๆ ย่อมจะเกิดกำลังงานสูญเสีย P_c เนื่องจากความต้านทาน R ในสายส่ง กำลังงานสูญเสียดังกล่าวนี้นี้จะแปรตามกำลังสองของกระแส I คือ $P_c = I^2 R$

การลดกำลังงานสูญเสียในสายส่งให้น้อยลง ทำได้โดยลดกระแสให้น้อยลง แต่ต้องเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้น เพื่อให้สามารถส่งกำลังงานได้เท่าเดิม นี่คือเหตุผลที่ต้องใช้ระบบแรงดันสูงในการส่งพลังงาน (High Voltage Transmission System) ผลดีของการส่งพลังงานไฟฟ้าด้วยระบบแรงดันสูงก็คือ จะทำให้แรงดันตกในสายส่งลดน้อยลง ประสิทธิภาพของสายส่งดีขึ้น เสถียรภาพความเชื่อถือได้ของระบบสายส่งสูงขึ้น

ระดับแรงดันสูงที่ใช้ส่งพลังงานไฟฟ้าอยู่ในปัจจุบันนี้ อาจแบ่งออกได้เป็นช่วงด้วยกันคือ

1. แรงดันสูง (High Voltage = HV) หมายถึงแรงดันตั้งแต่ 1 KV ขึ้นไปจนถึง 230 KV
2. แรงดันสูงพิเศษ (Extra High Voltage = EHV) หมายถึงแรงดันสูงกว่า 230 KV จนถึง 765 KV
3. แรงดันสูงอุลตรา (Ultra High Voltage = UHV) หมายถึงแรงดันสูงกว่า 765 KV ขึ้นไป

การใช้ประโยชน์แรงดันสูงกระแสตรง

แรงดันสูงกระแสตรงที่สร้างขึ้นมีที่ใช้ประโยชน์คือ

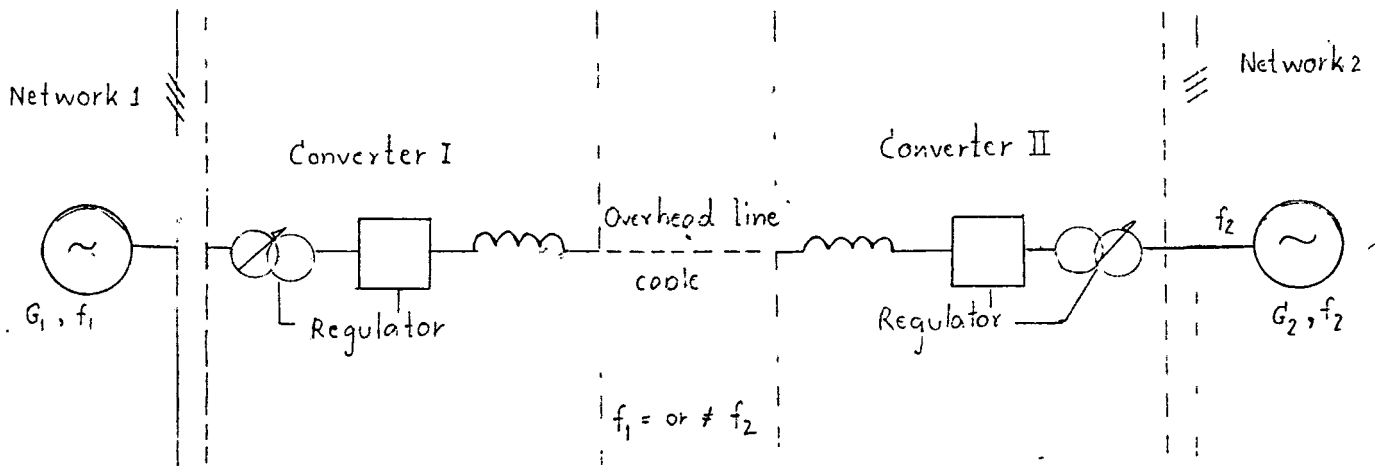
1. ใช้ส่งพลังงานไฟฟ้า
2. ใช้ทางฟิสิกส์และการแพทย์
3. ใช้ทดสอบวัสดุทนทานและอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

1. ใช้ส่งพลังงานไฟฟ้า

การสร้างแรงดันสูงกระแสตรงสำหรับส่งพลังงานไฟฟ้า นับเป็นประโยชน์สำคัญประการแรก ปัจจุบันจะเห็นได้ว่าการสร้างระบบสายส่งแรงสูงแบบกระแสตรงเพิ่มขึ้นมากมาย เพิ่มขึ้นถึงสามเท่าตัวในช่วงระยะเวลา 10 ปี เมื่อเทียบกับระบบแรงดันสูงกระแสสลับจะเพิ่มขึ้นเท่าตัวในระยะ 10 ปี การพัฒนาระบบสายส่งแรงดันสูงกระแสตรงจะเป็นส่วนสำคัญยิ่งของการส่งพลังงานไฟฟ้าในอนาคต

วงจรหลักของระบบสายส่งแรงสูงกระแสตรง ประกอบด้วยสถานีเปลี่ยน AC เป็น DC และอีกสถานีหนึ่งเปลี่ยน DC กลับให้เป็น AC ในสถานีเปลี่ยนกระแสนี้ประกอบด้วยหม้อแปลงแรง

คัน อุปกรณ์เปลี่ยนกระแส (Converter) ซึ่งอาจจะเป็น Mercury Arc Valve หรือ Thyristor ก็ได้ และรีแอคเตอร์ทำหน้าที่กรอง ดังในรูปที่ 2-1



รูปที่ 2-1 วงจรสายส่งแรงสูงกระแสตรง

ข้อดีของระบบสายส่งกระแสตรงก็คือ ไม่มีกำลังงานสูญเสียในฉนวนที่เกิดจากการสลับขั้วของรูปคลื่นแรงดัน ยิ่งกว่านั้นยังสามารถใช้ดินหรือน้ำทะเลเป็นสายกลับของระบบได้อีกด้วย

- สายส่งแรงดันกระแสสลับระยะทางไกล ๆ จำเป็นต้องใช้คัปเพซิเตอร์ รีแอคเตอร์หรือเครื่องจักรกลเชิงโคโรน่า เพื่อชดเชยหรือแก้แผลคเตอร์กำลังงาน (Power Factor) ถ้าเป็นสายส่งแรงดันกระแสตรงไม่จำเป็นต้องมีการชดเชย ด้วยเหตุนี้เองจึงสามารถใช้เคเบิลเป็นสายส่งพลังงานในระยะทางไกล ๆ ได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งสายเคเบิลที่เดินในทะเล ซึ่งในลักษณะเช่นนี้ไม่อาจใช้ตัวชดเชยดังกล่าวได้

ในกรณีเชื่อมโยงระหว่างระบบใหญ่ๆ ที่มีความถี่ของระบบแรงดันกระแสสลับต่างกัน ทำได้โดยเชื่อมด้วยสายส่งแรงสูงกระแสตรง ดังเช่นการเชื่อมโดยระบบส่งจ่ายระหว่างประเทศ อังกฤษกับฝรั่งเศส

ส่งพลังงานด้วยระบบแรงดันเท่ากัน ลักษณะสายส่งเหมือนกัน จะเกิดโคโรนาในระบบสายส่งกระแสสลับมากกว่า จึงทำให้เกิดคลื่นรบกวนต่อระบบสื่อสารมากกว่า

ข้อเสียของสายส่งแรงดันกระแสตรงก็คือ สถานีเปลี่ยนกระแส (Converter Station) นั้นราคาแพงมาก เฉพาะอุปกรณ์เปลี่ยนกระแสราคาประมาณ 30-40 % การแปลงแรงดันให้สูงขึ้นหรือต่ำลงทำไม่ได้ด้วยระบบกระแสสลับ ที่สามารถแปลงแรงดันได้ด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า การ

ตัดวงจรโดยเซอร์กิตเบรกเกอร์ต้องมีคุณลักษณะพิเศษ เพราะกระแสไม่ลดลง เป็นศูนย์สองครั้ง ในหนึ่งไซเคิลเหมือนอย่างกระแสสลับ ถึงทำให้เกิดความยุ่งยากในการตัดวงจรขณะที่มีโหลด ปัญหาที่สำคัญอีกประการหนึ่งก็คือเทคนิคการฉนวนซึ่งยังมีปัญหาที่แก้ไม่ได้ การฉนวนแรงดันสูง กระแสตรงในปัจจุบันยังไม่มี ความมั่นใจได้เหมือนอย่างระบบสายส่งกระแสสลับ

ในห้องทดลองวิจัยโดยทั่วไป มักจะทำการทดลองหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของ ฉนวนด้วยแรงดันกระแสตรง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทดลองกับฉนวนที่เป็นก๊าซ คุณลักษณะทาง กายภาพ ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ความถี่ พลังงาน อาจวิเคราะห์ด้วยแรงดัน กระแสตรงได้เช่นเดียวกัน สามารถหาผลการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากข้อของแรงดันได้อีกด้วย

2. ใช้ทางฟิสิกส์และทางการแพทย์

การใช้ประโยชน์สำหรับเครื่องมือพิเศษทางฟิสิกส์ เช่น ปฏิกรณ์เร่งอนุภาค เครื่อง ผลิตรังสีเอกซ์ ซึ่งได้จากการยิงอิเล็กตรอนที่ผ่านเครื่องเร่งอัตราเร็วลงบนแผ่นโลหะ (วุลแฟรม และทองแดง เป็นต้น) เครื่องอิเล็กโตรไมโครสโคป อุปกรณ์ดังกล่าวในปัจจุบันใช้แรงดันสูง อาจถึง 1,000 KV ใช้ประโยชน์ในทางพลาสมากายภาพ (Plasmaphysics) คือ สร้างพลาสมา ด้วยอุณหภูมิสูง เพื่อทำการมิวชันนิวเคลียร์

ทางการแพทย์ใช้สำหรับฉายรังสีต่าง ๆ เครื่องทำไอโซน ประโยชน์ทางด้านเทคนิค ใช้ทดลองเกี่ยวกับวัสดุเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ เช่น ทำคริสตัลลิโพลิทีน โดยการฉายรังสีลงบนวัสดุนั้น การพ่นสีโดยใช้อิเล็กโตรสแตติกส์ ใช้กับเครื่องกรองเขม่าควัน เป็นต้น

3. ใช้ทดสอบวัสดุและอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

ทางด้าน การทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้กับระบบแรงดันกระแสตรง ก็มีความจำเป็น ต้องทดสอบการฉนวนด้วยกระแสตรง เช่นเดียวกับการทดสอบด้วยแรงดันกระแสสลับ แม้แต่อุปกรณ์ บางอย่างที่ใช้กับแรงดันกระแสสลับยังต้องทดสอบด้วยแรงดันกระแสตรงก็มี โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อุปกรณ์ที่มีค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) สูงๆ เช่น เคเบิลแรงสูงหรือคาปาซิเตอร์ที่ใช้ใน ระบบส่งจ่าย ในกรณีของเคเบิลแรงสูงจำต้องทดสอบด้วยแรงดันกระแสตรง เพราะว่าเคเบิล นั้นได้วางเสร็จเรียบร้อยแล้ว และมีความจุสูง ซึ่งไม่สามารถจะจัดหาตัวจ่ายกระแสสลับที่มี กำลังงานเพียงพอแก่การทดสอบได้ หากทดสอบด้วยแรงดันกระแสตรงสามารถทำได้ เพราะ การทดสอบด้วยแรงดันกระแสตรงใช้กำลังไฟฟ้าน้อย เนื่องจากความต้านทานกระแสตรงของเค บิลมีค่าสูงมาก การอัดประจุจึงเป็นไปอย่างช้าๆ จึงสามารถจัดหาตัวจ่ายกระแสตรงได้ง่ายกว่า

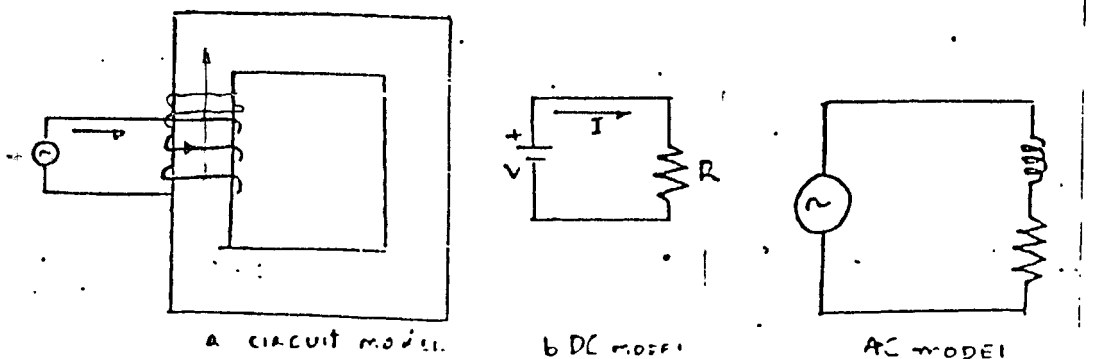
บทที่ 3

TRANSFORMER และ การออกแบบ TRANSFORMER

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นเครื่องมือหรืออุปกรณ์ชนิดหนึ่งในการเพิ่มหรือลด (step up or step down) ระดับของแรงเคลื่อนไฟฟ้า (electromotive force = e.m.f.) จากระดับหนึ่งไปสู่อีกระดับหนึ่ง โดยมีข้อแม้ว่า ระดับของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปได้นั้นต้องเกิดจาก กระแสไฟฟ้าสลับ (alternating current = a.c.) ดังนั้นจึงนำคุณสมบัตินี้ไปใช้ประโยชน์ในระบบสายส่ง (Transmission line) เพื่อส่งกำลังไฟฟ้าจำนวนมหาศาลไปสู่สถานที่ซึ่งอยู่ไกลมากได้ โดยการทำให้มีระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงมาก ๆ ทั้งนี้เพื่อประหยัดขนาดของสายไฟและเสาแรงสูง ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในระบบสายส่งที่ต้องลงทุนมาก มีบางประเทศ เช่น ในยุโรป หรืออเมริกาได้ทำการส่งแรงเคลื่อนไฟฟ้ากำลังสูงถึง 287 KV ไว้ใช้ในระบบสายส่ง และได้สร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้สูงถึง 1,500 KV เพื่อใช้ในการทดสอบบางอย่าง เช่นการทดสอบความสามารถต้านทานแรงเคลื่อนไฟฟ้าของลูกถ้วยหรือน้ำมันที่ใช้เป็นตัวฉนวน ซึ่งใช้เป็นตัวระบายความร้อนในหม้อแปลงที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูง ๆ ด้วย ปกติแล้วหม้อแปลงไฟฟ้าได้ออกแบบไว้ใช้งานให้มีค่าของแรงเคลื่อนไฟฟ้าคงที่เสมอที่ค่าของ load ต่าง ๆ กัน แต่ก็มีหม้อแปลงอีกชนิดหนึ่งที่ออกแบบให้มีค่าของกระแสไฟคงที่ (constant current) ที่ load หนึ่ง ๆ เมื่อเปลี่ยนไปแต่ที่ขั้วของหม้อแปลงชนิดนี้มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเปลี่ยนไปตาม load หม้อแปลงชนิดนี้ต้องต่ออนุกรมเข้ากับวงจรเพื่อใช้วัดกระแสไฟที่มีค่าสูง ๆ ได้ โดยที่ตัวมันได้ลดกระแสไฟที่สูง ๆ ลง แล้วต่อเข้ากับ a.c. ammeter อีกทีหนึ่งหรือใช้กับเครื่องวัดกำลังไฟฟ้า (wattmeter) ก็ได้

AC EXCITATION OF MAGNETIC CIRCUITS

เมื่อ DC VOLTAGE คล่อม COIL ซึ่งพันรอบ MAGNETIC CORE กระแสที่ไหลจะถูกจำกัดโดย RESISTANCE ของขดลวด VOLTAGE (R_1) ที่คล่อมความต้านทาน จะเท่ากับ VOLTAGE ที่ SUPPLY และรูปที่ 3-19a จะถูกแทนโดย CIRCUIT MODEL ดังรูปที่ 3-1b



รูปที่ 3-1

MAGNETIC FLUX (ϕ) จะถูกสร้างขึ้นใน CORE โดยขึ้นอยู่กับค่าต่าง ๆ ดังนี้
MAGNETIZING FORCE (H) มีหน่วยเป็น AMPERE-TURNS PER METER, คุณสมบัติของ
CORE ซึ่งถูกกำหนดโดย B-H CURVE และพื้นที่หน้าตัด (A) ของ CORE

ในทางตรงข้ามเมื่อ AC VOLTAGE คล่อม COIL ที่เหมือนกันกระแสจะถูกจำกัด
โดยค่า IMPEDANCE ของขดลวด VOLTAGE DROP เนื่องจาก RESISTANCE น้อย
มากและ VOLTAGE DROP เนื่องจาก INDUCTIVE REACTANCE จะประมาณเท่ากับ
APPLIED VOLTAGE MAGNETIC FLUX ใน CORE ที่ต้องการเพื่อที่จะนำไปสร้าง
VOLTAGE เหนี่ยวนำ ประมาณว่าเท่ากับ APPLIED VOLTAGE ใน CIRCUIT MODEL
รูปที่ 3-1c ผลอันนี้จะถูกแทนโดย INDUCTANCE (L)

ศักดาไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (INDUCED VOLTAGE)

จากพื้นฐานของการทดลองของ ฟาราเดย์ สรุปว่า VOLTAGE ที่ถูกเหนี่ยวนำใน
COIL หลาย COIL ที่คล้องการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับจำนวนรอบ N
ของ COIL และอัตราการเปลี่ยนแปลง FLUX (ϕ)

$$V = N d\phi/dt = d\lambda/dt \quad \text{-----[1]}$$

เมื่อ λ เป็นจำนวนของ FLUX LINKAGE มีหน่วยเป็น WESER-TURNS ตัวอย่างเช่น ถ้า
ใน 10 รอบของ COIL มี 8 รอบ ที่คล้อง FLUX 1 wb และ 2 รอบคล้อง FLUX 0.9
wb-t POLARITY ของ INDUCED VOLTAGE สามารถอธิบายโดย LENZ'S LAW ว่า

"VOLTAGE ที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นจะมีทิศทางในทิศที่ตรงกันข้ามกับการเปลี่ยนแปลง
ของ FLUX LINKAGE ที่สร้างมันขึ้นมา"

ถ้าเตรียม CLOSE PATH ไว้ กระแสซึ่งเกิดจาก INDUCED VOLTAGE จะมี
ทิศทางในลักษณะเพิ่ม FLUX

-- โดยทั่วไป ความสัมพันธ์ระหว่าง FLUX และกระแสเป็นแบบ NON-LINEAR
อย่างไรก็ตามเราจะคิดว่า ความสัมพันธ์ของมันเป็น LINEAR โดยไม่มี ERROR ถ้า
FLUX ในวงจรมแม่เหล็กเป็น SINE ดังนั้น

$$\phi = \phi_m \sin \omega t \quad \text{----- 2}$$

INDUCED VOLTAGE ใน N รอบของ COIL เป็น

$$V = N d\phi/dt = N\omega \phi_m \cos \omega t \quad \text{-----[3]}$$

ค่า RMS ของ SINUSOIDAL จะเป็น

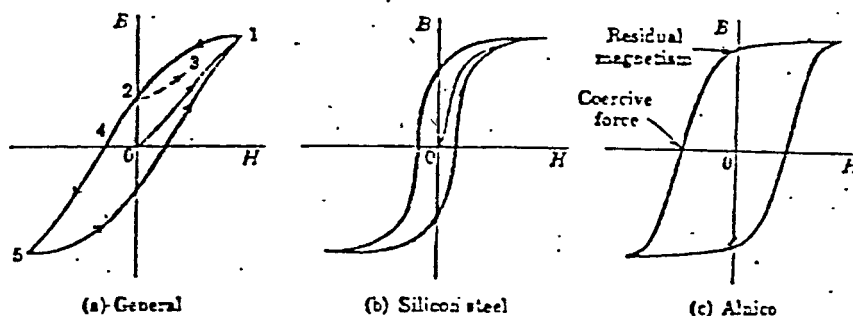


$$\begin{aligned}
 V &= V_m / \sqrt{2} = 2\pi f N \phi_m / \sqrt{2} \\
 &= 2\pi / \sqrt{2} \text{ nf} \phi_m \\
 &= 4.44 \text{ nf} \phi_m \qquad \text{-----[4]}
 \end{aligned}$$

สำหรับ AC EXCITATION FLUX (ϕ) ขึ้นอยู่กับความถี่ และขนาดของ APPLIED VOLTAGE ถ้าไม่คิด RESISTANCE DROP กระแสที่ไหลจะเป็นตัวสร้าง FLUX ที่ระบุใน EQUATION

HYSTERESIS

ในการเป็นแม่เหล็กของ สสารพวก FERROMAGNETIC ผลที่เกิดขึ้นทั้งหมดเป็นแบบไม่ยืดหยุ่น เมื่อเอาสนามภายนอกออก สสารแม่เหล็กจะไม่สามารถกลับไปอยู่สถานะเริ่มต้นได้ ถ้าขึ้นเหล็กถูกทำให้อิ่มตัว (SATURATE) จุดที่ 1 ในรูปที่ 3-2a แล้วเอาสนามออก (H=0) เจ็อนไขของแม่เหล็กจะเลื่อนตามเส้นจาก 1 ไป 2 ORDINATE ที่จุด 2 ถูกเรียกว่า RESIDUAL MAGNETISM



(a) General

(b) Silicon steel

(c) Alnico

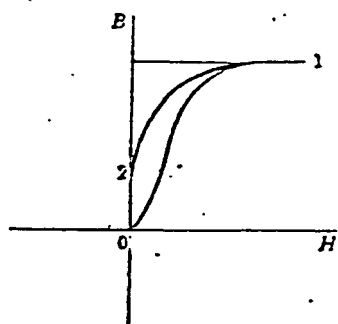
รูปที่ 3-2

ถ้าค่า H ที่เป็นบวกถูกให้อีกครั้งหนึ่ง เจ็อนไขก็จะเคลื่อนตามทางจาก 2 ไป 3 NEGATIVE MAGNETIZING FORCE (COERCIVE FORCE) ถูกต้องการเพื่อจะทำให้ความหนาแน่นของ FLUX เป็นศูนย์ที่จุด 4 H ที่เป็นลบจำนวนมาก จะทำให้เกิดการอิ่มตัว (SATURATE) ในทิศทางตรงกันข้าม (จุด 5) และเมื่อให้ REVERSING MAGNETIZING FORCE จะทำให้เ็อนไขแม่เหล็กเคลื่อนตามทางจาก 5 ไป 1 ถ้า MAGNETIZING FORCE เกิดเนื่องมาจากไฟกระแสลัดวงจรของทางเดินจะเรียกว่า HYSTERESIS LOOP

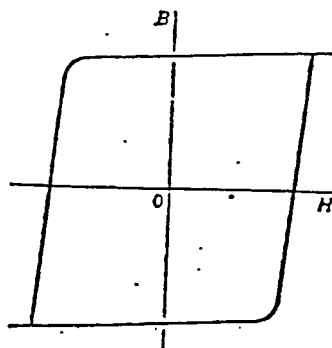
ในขณะที่แผ่นโลหะถูกทำให้ร้อนโดยวงจรที่ส่งออกไปมา สารแม่เหล็กถูกทำให้ร้อน เมื่อมันถูกทำให้เป็นแม่เหล็กครบเป็นวงรอบ ในกรณีทั้งสองพลังงานจะปรากฏในรูปของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น พลังงานที่ใส่เข้าไปให้กับตัวอย่าง เริ่มต้นที่ยังไม่ได้รับการทำให้เป็นแม่เหล็ก จะเท่ากับพื้นที่ระหว่าง CURVE 1 และแกน B พลังงานย้อนกลับจะเท่ากับพื้นที่ระหว่าง CURVE 1-2 และแกน B ตามรูปที่ 3-3 ผลต่างของพื้นที่ทั้งสองนี้จะแปลงไปเป็นความร้อนของกระบวนการผันกลับไม่ได้ตามแนวเส้นของวงรอบที่สมบูรณ์ พื้นที่ของ HYSTERESIS LOOP จะเท่ากับพลังงานที่สูญเสียไปใน หนึ่งรอบสำหรับ SILICON STEEL LOOP จะพอม รูปที่ 3-2b และ HYSTERESIS จะน้อยสำหรับแม่เหล็กถาวร COERCIVE FORCE จะกว้าง และ HYSTERESIS LOSS จะกว้าง รูปที่ 3-2c พื้นที่ของ LOOP จะเพิ่มอย่างไม่เป็นเชิงเส้นกับความหนาแน่นของ FLUX ที่มากที่สุด สูตรอย่างง่ายสำหรับหาค่า HYSTERESIS LOSS ในหน่วยวัตต์ คือ

$$P_h = K_h f B_m^n$$

ที่ซึ่งค่า K_h เป็นค่าคงที่ n เปลี่ยนแปลงไปตามสสารที่ใช้ทำ CORE ปรกติ n จะสมมติให้เท่ากับ 1.6



(a) Hysteresis loss



(b) Square hysteresis loop

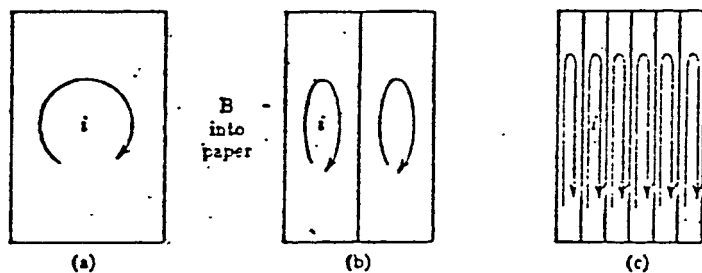
รูปที่ 3-3

สารแม่เหล็กบางชนิด HYSTERESIS LOOP เกือบจะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า (รูปที่ 3-3 b)

EDDY CURRENT

ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ายุคแรก เกือบจะสามในสี่ของพลังงานผลที่ใส่เข้าไปจะเปลี่ยนเป็นความร้อนในวงจรมแม่เหล็ก ส่วนเล็กน้อยของพลังงานที่สูญเสียนี้เนื่องมาจาก HYSTERESIS แต่ส่วนใหญ่เกิดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของ ฟลักแม่เหล็กเหนี่ยวนำให้

เกิด VOLTAGE ขึ้นใน CORE ของมันเองใน IRON CORE VOLTAGE ที่ถูกเหนี่ยวนำนี้จะ เป็นสาเหตุให้เกิดกระแสเฉพาะที่เรียกว่า EDDY CURRENT และเป็นผลทำให้พลังงาน $I^2R = V^2/R$ เปลี่ยนไปเป็นความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 3-4a



รูปที่ 3-4 Eddy currents and the effect of core lamination

การเปลี่ยนแปลงของ ฟลัก (มีทิศทางพุ่งเข้าไปในกระดาษ) จะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสลู่ภายใน CORE กำลังที่สูญเสียสามารถทำให้ลดลงโดยการลดค่า V และเพิ่มค่า R ถ้าแผ่น IRON CORE ทำด้วยแผ่นบาง ดังรูปที่ 3-4b ผลของ VOLTAGE ที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้น จะถูกทำให้ลดน้อยลงและความต้านทานของ EFFECTIVE PATH จะถูกทำให้เพิ่มขึ้น การทำให้เป็นแผ่นบาง บางที่ 0.02 นิ้ว และแต่ละชั้นจะมีฉนวนกันซึ่งส่วนใหญ่จะใช้วานิช

กำลังที่สูญเสียเนื่องมาจาก EDDY CURRENT สามารถแทนโดย

$$P_e = K_e f^2 B_m^2 \text{ -----[5]}$$

เพราะว่า VOLTAGE เหนี่ยวนำขึ้นโดยตรงกับค่า fB_m และการสูญเสียแปรตามกำลังสองของขนาด VOLTAGE เราคาดว่ากำลังที่สูญเสียจะแปรตามค่า $f^2 B_m^2$

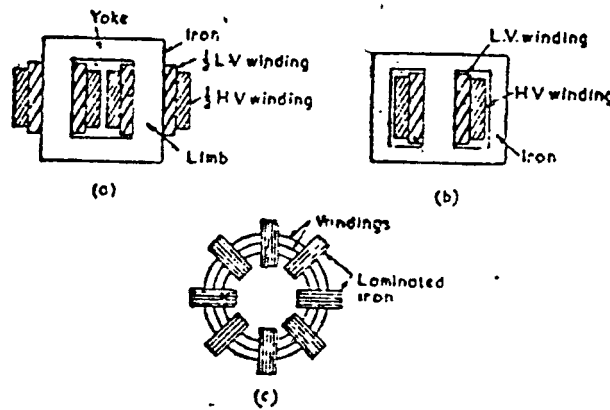
โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า (TRANSFORMER CONSTRUCTION)

หม้อแปลงไฟฟ้าแบบธรรมดาที่ใช้กันอยู่ทั่วไปนั้น เป็นแบบที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าคงที่ (Constant-potential transformer) มีขดลวดพันอยู่รอบ ๆ แกนเหล็ก 2 ชุด โดยแต่ละชุดอาจจะมีจำนวนรอบเท่ากัน หรือไม่เท่ากันก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของการนำไปใช้งาน แกนเหล็กนั้นเป็นแผ่นเหล็กบาง ๆ ที่แต่ละแผ่นถูกเคลือบไว้ด้วยสารบางอย่างที่เป็นฉนวนไฟฟ้า ทั้งนี้เพื่อไม่ให้มีการสูญเสีย (Loss) ภายในแกนเหล็กอันเนื่องมาจากผลการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า หม้อแปลงที่ใช้ปรับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่มีอยู่ทั่วไป มี 2 ชนิด คือ แบบแรกนั้นใช้สำหรับเพิ่มแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ำให้กลายเป็น

แรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงเรียกว่า "Step-up transformer" ส่วนอีกแบบหนึ่งนั้นใช้เปลี่ยนจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงให้ลดลงเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ำเรียกว่า "Step-down transformer" ขดลวดที่รับกำลังไฟฟ้าเข้าไปเรียกว่า ขดลวดปฐมภูมิ (Primary winding) ขดลวดที่จ่ายกำลังไฟออกมาเรียกว่า ขดลวดทุติยภูมิ (Secondary winding)

หม้อแปลงไฟฟ้าแบ่งเป็นชนิดใหญ่ ๆ ได้ 3 ชนิด โดยพิจารณาจากลักษณะของการวางหรือการจัดรูปของแกนเหล็ก แบ่งได้ดังนี้คือ

1. "Core Type" เป็นแบบที่มีวงจรมแม่เหล็กวงจรมเดียว
2. "Shell Type" เป็นแบบที่มีวงจรมแม่เหล็ก 2 วงจรม
3. "Berry Type" เป็นแบบที่มีวงจรมแม่เหล็กกระจาย (distributed) ออกไปโดยรอบ ทั้ง 3 แบบนี้ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 3-5 (a, b และ c)



(a) Core Type

(b) Shell Type

(c) Berry Type

รูปที่ 3-5 ชนิดของหม้อแปลงไฟฟ้าตามลักษณะการวางแกนเหล็ก

แบบ Core Type (รูปที่ 3-5a) นั้นครึ่งหนึ่งของขดลวดทาง primary และ secondary พันไว้รอบขาแต่ละข้างของแกนเหล็ก การพันแบบนี้ทำให้ลดการรั่วไหลของเส้นแรงแม่เหล็ก (flux leakage) ที่เกิดจากขดลวดทั้งสองลงไป ซึ่งทำให้ได้เส้นแรงแม่เหล็กที่คล้อง (linkage flux or mutual flux) ขดลวดทั้งสองมากยิ่งขึ้น แต่ถ้าพันขด primary และ secondary แยกกันไว้บนขาของแกนเหล็กแต่ละข้างแล้วจะทำให้เกิดการรั่วไหลของ flux มากยิ่งขึ้น (รูป 3-8) ซึ่งมีผลต่อการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าอย่างจริงจัง (seriously) ปกติแล้วแบบ Core Type นี้มักใช้กับหม้อแปลงที่เป็นขนาดใหญ่

แบบ Shell Type (รูป 3-5b) นี้มีขดลวดทั้ง primary และ secondary พันไว้ที่แกนกลางของแกนเหล็ก ส่วนที่เหลือของแกนเหล็กอีก 2 ขานี้ก็ทำหน้าที่เป็น low reluctance flux path นั้นเอง

สำหรับแบบ Berry Type (รูปที่ 3-5c) นั้นมีแกนเหล็กวางเป็นวงอยู่รอบ ๆ

ขดลวด แกนเหล็กนี้จำเป็นที่จะต้องมีโครงสร้างเป็นแบบ shell โดยที่แกนเหล็กกระจายออกไปรอบ ๆ ขดลวดเหล่านั้น แบบนี้เป็นแบบที่ไม่นิยมเพราะมีโครงสร้างที่ยุ่งยาก

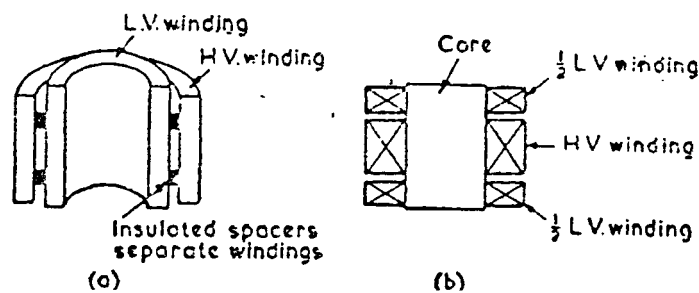
การพันขดลวด (Winding)

การพันขดลวดหม้อแปลงแบ่งได้ 2 แบบใหญ่ ๆ คือ

1. แบบ concentric ที่เป็นรูปทรงกระบอก (concentric cylinder) รูปที่ 3-6a แบบนี้มีขดลวดแรงต่ำอยู่ภายใน ทั้งนี้เนื่องจากปัญหาการทำฉนวนหุ้มเส้นลวดที่ใช้ทำขดลวดนั่นเอง ลวดที่ใช้ในการทำ coil นั้นเป็นลวดทองแดงที่หุ้มฉนวน ฉนวนนี้อาจมีรอยขีดข่วนอันเนื่องมาจากการใส่ winding เข้าไปใน core ฉนวนเมื่อให้ด้านแรงต่ำ (L.V. side = Low voltage side) อยู่ข้างในจึงปลอดภัยกว่าและยังระบายความร้อนได้ดีกว่าอีกด้วย

2. แบบประกบซ้อนกัน (sandwich) แบบนี้(รูปที่ 3-6b)ช่วยในการลดเส้นแรงแม่เหล็กที่รั่วไหล (leakage flux) ให้ลดลงไป ขดลวดแรงต่ำแบ่งเป็น 2 ส่วนแต่ละครึ่งของขดลวดแรงต่ำนั้นประกบหัวท้ายของขดลวดแรงสูง(รูปที่ 3-6b)

ขดลวดที่ใช้ทั้งแรงสูงและแรงต่ำนั้นส่วนใหญ่เป็นขดลวดทองแดงที่อาบน้ำยาวานิช (vanish) ซึ่งเป็นฉนวนและเป็นเส้นด้าย(cotton) พันรอบ ๆ ลวดทองแดงอีกทีหนึ่ง



(a) แบบ concentric

b)แบบ Sandwich

รูปที่ 3-6 แบบของการพันขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า

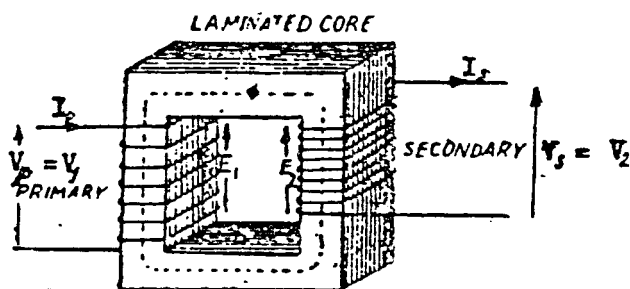
ทฤษฎีและหลักการของหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer Theory and Principle)

1. หลักการของหม้อแปลง (Transformer's Principle)

หม้อแปลงประกอบด้วยขดลวด 2 ชุดที่พันอยู่บนแกนเหล็ก (รูปที่ 3-7) ที่ต่อไปยังแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเรียกว่าชุดปฐมภูมิ (primary winding) โดยมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมอยู่ V_p (v_p) volts อีกชุดหนึ่งที่ต่อไปยังภาระทางไฟฟ้า (load) เรียกว่าชุดทุติยภูมิ (secondary winding) โดยมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมที่ load

เป็น v_2 (V_2) volts จำนวนขดลวดทาง primary และ secondary มีจำนวนรอบเป็น N_1 (N_1) และ N_2 (N_2) ตามลำดับ ด้านที่ได้รับกำลังไฟฟ้า อาจจะเป็นแรงดันต่ำหรือแรงดันสูงก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการใช้งาน

เมื่อหม้อแปลงได้รับแรงเคลื่อนไฟฟ้า V_1 volts เข้าไปที่ขด primary (pri.) จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้า V_2 ทางด้าน secondary (sec.) (รูปที่ 3-7) ขึ้นถึงแม้ว่าจะไม่มี load มาตรฐานก็ตามในกรณีเช่นนี้ $V_1 = E_1 = V_2$



รูป 3-7 หลักการเบื้องต้นของหม้อแปลง

อัตราส่วนของแรงเคลื่อนและกระแสไฟ (Voltage and Current Ratio) จากรูป 3-7 เมื่อมี load มาตรฐานทางด้าน sec. ทำให้เกิดกระแส I_2 ไหลอยู่ทางด้าน sec. และมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อม load $= V_2$ ($V_2 = E_2$) ส่วนทางด้าน pri. นั้นก็มีกระแส I_1 และมีแรงเคลื่อนไฟฟ้า V_1 ออกมาจาก source เมื่อทำการสังเกตต่อไปก็พบว่าอัตราส่วน V_2/V_1 นั้นมีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วนของ N_2/N_1 และมีค่าใกล้เคียงกับส่วนกลับของอัตราส่วน I_1/I_2 นั่นก็คือ $V_2 I_1$ มีค่าใกล้เคียงกับ $V_1 I_2$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของ I_1 เกิดขึ้นทาง sec. นั้นมีผลทำให้ I_2 เปลี่ยนแปรด้วยนั่นคือ

$$V_2 I_1 \propto V_1 I_2$$

เส้นแรงส่วนใหญ่ (ϕ) นี้คล้อง (link) ขดลวดของ pri. และ sec. ดังนั้นจึงทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นทั้ง 2 ขด (E_1 และ E_2) ซึ่งค่าแรงเคลื่อนที่เกิดขึ้นนี้เป็นสัดส่วนกับจำนวนรอบของขดลวดของแต่ละขด ซึ่งได้จากความสัมพันธ์ตามกฎของการเหนี่ยวนำดังสมการ

$$e = \frac{Nd\phi}{dt} \quad \text{-----[6]}$$

เมื่อ $e =$ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำขึ้นในขณะใดขณะหนึ่ง

$N =$ จำนวนรอบขดลวดที่ได้รับอัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กต่อ

หน่วยเวลา

$$\frac{d\phi}{dt} = \text{อัตราเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กต่อหน่วยเวลา}$$

นั่นคือ $\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_p}{N_s} = a = \text{อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของหม้อแปลง}$

(Transformation Ratio)-----[7]

เมื่อ E_1 และ E_2 คือแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขดลวด pri. และ sec. ตามลำดับ N_p กับ N_s ก็คือจำนวนรอบของขดลวดทาง Pri. และ Sec. เช่นกัน สำหรับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้วของ Pri. และ Sec. ทั้ง 2 ข้างนั้น แตกต่างจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดจากการเหนี่ยวนำก็เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ฉะนั้นจึงไม่ทำให้ Vector ของ V_p และ V_s มีมุมแตกต่างไปจาก Vector ของ E_1 และ E_2 มากนัก ดังนั้น ถ้าหากจะพิจารณาว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้ว (terminal voltage) นี้เป็นส่วนโดยตรงกับจำนวนขดลวดของแต่ละด้านโดยประมาณแล้ว ก็จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ [7]

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} = \text{Transformation ratio} \quad \text{-----}[7]$$

ถ้าหากว่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าจากภายในหม้อแปลงนั้นมีเป็นจำนวนเล็กน้อย ก็ตัดค่าที่เสียนั้นทิ้งไปได้ นั่นก็คืออาจพิจารณาได้ว่ากำลังที่ได้รับ (power output) กับกำลังที่ใส่เข้าไป (power input) มีค่าเท่ากัน นั่นก็คือ

$$V_p I_p \cos \theta_p = V_s I_s \cos \theta_s \quad \text{-----}[8]$$

ค่า $\cos \theta_p$ นั้นหาได้จากชนิดของ load แต่เนื่องจากว่า Power factor ของทาง Pri. และ Sec. มีความแตกต่างเพียงเล็กน้อย ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า

$$V_p I_p = V_s I_s \quad \text{-----}[9]$$

หรือ $\frac{V_p}{V_s} = \frac{I_s}{I_p} = \frac{N_p}{N_s} \quad \text{-----}[10]$

จาก [9] ได้

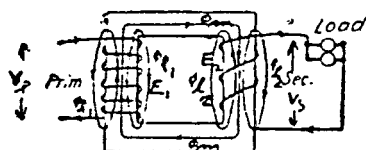
$$I_p N_p = I_s N_s \quad \text{-----}[11]$$

หม้อแปลงนี้จะทำหน้าที่ต่อเมื่อไฟที่ใส่เข้าไปทางด้าน pri. นั้นเป็นไฟสลับหรือไฟที่มีการเปลี่ยนแปลงเป็นจังหวะ ๆ (plus) ถ้าเป็นไฟตรงก็เป็นแบบที่มีการเปลี่ยนแปลงการกระเพื่อมขึ้นลง (fluctuating) หรือมีฉะนั้นก็ให้มีการเปิดปิดไฟตรงด้วยอัตราเร็ว อัตราใดอัตราหนึ่งหรือหลายอัตราก็ได้ จึงจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นทาง sec. อันเนื่องมาจากมีการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรง (flux change) นั้น ฉะนั้นถ้าไฟตรงที่ใส่เข้าไปทาง pri. มีค่าคงที่ตลอดเวลาจะทำให้ไม่มีไฟเกิดขึ้นทาง sec. ดังนั้นจึงทำให้หม้อแปลงมีลักษณะเด่นในการเปลี่ยนค่าของแรงเคลื่อน และกระแสไฟในวงจรกระแสไฟสลับเท่านั้น

2. ทฤษฎีการทำงาน (Theory of Operation)

เพื่อความเข้าใจง่ายในทฤษฎีการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า จึงใคร่ที่จะเริ่มต้นจากทฤษฎีที่ได้วางแนวความคิด (concept) ที่เป็นพื้นฐานไว้ก่อน ฉะนั้นจึงจะกล่าวถึงหม้อแปลงไฟฟ้าตามความคิดฝัน (Ideal Transformer) หม้อแปลงชนิดนี้ไม่คิดการสูญเสียต่าง ๆ (loss) ที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง ดังนั้นจึงเป็นการวาดภาพจน์ของหม้อแปลงไฟชนิดนี้ขึ้นในความคิดเท่านั้น

หม้อแปลงไฟฟ้าตามความคิดฝันหรือตามอุดมการณ์ (Ideal Transformer) ทำให้เกิดมีหลักการการทำงานดังนี้ (รูปที่ 3-7)



รูปที่ 3-8 Flux distribution ใน Transformer

เมื่อใส่ไฟ V_p เข้าไปทำให้เกิดกระแส I_p กระแสนี้ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมด ϕ เส้นแรงนี้จะเหนี่ยวนำขดลวดของมันเองและขดลวดของทุติยภูมิให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็น E_1 และ E_2 ขึ้นพร้อม ๆ กัน นั่นคือ E_1 และ E_2 ที่เกิดขึ้นนี้เป็นไปตามกฎของ Lenz และ Faraday ตามลำดับนั่นคือ $V_p = E_1$ และ $E_2 = V_s$ ในกรณีที่เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าตามอุดมการณ์เท่านั้น ส่วนหม้อแปลงจริง ๆ (Actual Transformer) นั้นมีหลักการการทำงานดังรูป 3-8 ดังนี้คือ

เมื่อใส่ไฟสลับ V_p เข้าไปที่ด้านปฐมภูมิทำให้มีกระแส I_p ไหลผ่านขดลวดนี้ไปยังวงจรภายนอก (วงจรภายนอกนี้คือ ตัวจ่ายไฟหรือ Source นั้นเอง) ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก (Flux) ϕ_1 ขึ้นที่ขดลวด Primary

ϕ_1 นี้ประกอบด้วย Mutual Flux (ϕ_{1m}) และ leakage Flux ϕ_{1l} ขณะที่ ϕ_1 เปลี่ยนแปรไปตามการเปลี่ยนแปลงของกระแสทำให้เกิดการเหนี่ยวนำ e.m.f. (electromotive force) ขึ้นภายในขด primary และมีทิศทางตรงกันข้ามกับ V_p (ตามกฎของ Lenz) ให้ไฟที่จ่ายเข้าไปเป็น sinusoidal waveform เพราะฉะนั้น ϕ เป็น sine wave ด้วย (ไม่คิด loss ต่าง ๆ และ lag impressed Voltage V_p ไป 90°) นั่นคือ

$$\phi_1 = \phi_{1max} \cos \omega t = \phi_{1m} + \phi_{1l}$$

ตามกฎของ lenz ได้

$$e_1 = -N_1 \frac{d\phi_1}{dt} \text{ -----[12]}$$

$$e_1 = N_1 \omega \phi_{1max} \sin \omega t$$

$$E_{1max} = N_1 \omega \phi_{1max} \text{ -----(sin t = 1)}$$

$$E_1 = \frac{N_1 2\pi f \phi_{1max}}{\sqrt{2}}$$

$$E_1 = 4.44 N_1 f_1 \phi_{1max} \text{ -----[13]}$$

เมื่อ E_1 = effective value หรือ r.m.s. value ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำขึ้นใน primary และมีทิศทางตรงกันข้ามกับ V_p (volts) = back e.m.f. (โวลท์)

N_1 = จำนวนขดลวดทาง primary (รอบ)

f_1 = ความถี่ของไฟสลับที่จ่ายให้กับขดลวด pri. (รอบ/วินาที = CPS)

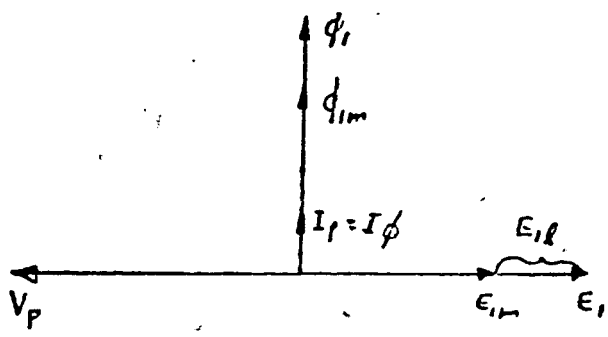
ϕ_{1max} = Flux ทั้งหมดที่เกิดขึ้นทาง primary ขณะที่มีค่าสูงสุด (เวเบอร์) (1 waber = 10^8 lines)

ϕ_{1m} = เส้นแรงแม่เหล็กร่วมที่ขดปฐมภูมิ (Primary mutual flux)(เวเบอร์)

ϕ_m = เส้นแรงแม่เหล็กร่วมที่เกิดขึ้นทั้งทางปฐมภูมิและทุติยภูมิ (mutual flux)(เวเบอร์)

$$= \phi_{1m}$$

แรงเคลื่อนไฟฟ้า E_1 นี้ประกอบด้วย E_{1m} และ E_{1l} ซึ่งเกิดจาก ϕ_{1m} และ ϕ_{1l} ทั้ง E_{1m} และ E_{1l} นี้ inphase กันดังรูป 3-9



รูปที่ 3-9 การเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับ Ideal Transformer เมื่อไม่มี load

$$E_{1m} + E_{1l} = V_p$$

เมื่อ E_{1m} = การเหนี่ยวนำที่เกิดจาก Mutual Flux
 E_{1l} = การเหนี่ยวนำที่เกิดจาก Self inductance หรือ เส้นแรงแม่เหล็กรั่ว (leakage flux)

สำหรับทางด้านทุติยภูมิ (secondary winding) นั้นก็เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้า E_2 ขึ้นในขณะเดียวกันกับที่ E_1 เกิดขึ้น และมีทิศทางไปทางเดียวกันด้วย แต่ E_2 นี้เกิดจาก ϕ_m เท่านั้น ดังนั้นขนาดของ E_2 จึงขึ้นอยู่กับจำนวน N_2 และ ϕ_m ที่มาคล้องขดลวด secondary E_2 ที่เกิดขึ้นนี้เกิดขึ้นตามกฎของ Faraday

$$E_2 = 4.44 N_2 f_1 \phi_{m \max} \quad \text{----- 143}$$

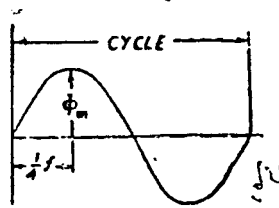
เมื่อ E_2 = induce e.m.f. ทาง secondary = V_s (เมื่อ no load)
 $\phi_{m \max}$ = maximum mutual flux ที่มา link หรือคล้องขด (sec.)
 = $\phi_{im \max}$ (สำหรับ Ideal Transformer)
 N_2 = จำนวนรอบของขดลวดทางด้าน secondary

ขณะ no load นี้ก็จะได้ความสัมพันธ์ของกระแสดังนี้

$I_p = I_0$ (no load current) = I_m (magnetizing current) โดยที่ I_m นี้ lag V_p ไป 90 และ inphase กับ ϕ_1, ϕ_m (เมื่อเป็นหม้อ

แปลงตามอุดมการณ์) ขณะที่ทาง secondary ไม่มี load นั้น $I_p = I_o$ แต่เมื่อมี load เพิ่มขึ้น I_p ไม่เท่ากับ I_o แล้ว แต่ I_o ก็ยังคงที่อยู่ตลอดเวลาแม้ว่า load ทาง secondary จะเปลี่ยนแปลงไปก็ตาม

ในการหาสมการการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงนี้ สามารถหาได้จากคำจำกัดความของ Faraday ได้เช่นเดียวกัน โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของ Flux ที่เกิดขึ้นต่อหน่วยเวลา จากการพิจารณาจากรูปของ sine wave (รูป 3-10) พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กจาก 0 ถึงค่าสูงสุดคือ ϕ_{max} ภายในเวลา $1/4f$ วินาที



รูปที่ 3-10 แสดง flux wave ที่เปลี่ยนแปลงไปตามกำลังไฟที่เป็น sine wave ภายในหม้อแปลง

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเฉลี่ยในช่วงเวลา $1/4f$ สำหรับตัวนำ 1 turn มีค่าเท่ากับ $\frac{\phi_{max}}{1/4f}$

$$\therefore \text{average e.m.f./turn} = \frac{\phi_{max}}{1/4f} \text{ -----[15]}$$

$$= 4 f \phi_{max}$$

$$\text{average e.m.f. for N turn} = 4 N f \phi_{max} \text{ -----[16]}$$

สำหรับ sine wave นั้นมีค่า form factor = 1.11

$$\text{form factor} = 1.11 = \frac{\text{R.M.S. value}}{\text{average value}}$$

$$\therefore \text{R.M.S. value of e.m.s. for N turn} = 4.44 N f \phi_{max} \text{ -----[17]}$$

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า

ในปริศยานี้พจน์กับนี้ เราจะสร้างหม้อแปลงชนิด Shell Type แบบ Single Phase ขนาดพิกัด 5 KVA และมีขนาดของแรงดันด้าน Primary (E_1)/ด้าน Secondary (E_2) เท่ากับ 220/3000 V โดยจะมีการนำเอา Output ด้าน Secondary (3000 V) ไปต่อเข้ากับวงจร Voltage Multiplier เพื่อ Step แรงดันขึ้นเป็น 30 KV ซึ่งเป็นวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ และในการออกแบบหม้อแปลงในครั้งนี้ เราจะใช้ค่าของความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้า (B) เท่ากับ 1 เทสลา เพื่อป้องกันการอิ่มตัวของแกนแม่เหล็กเล็กก่อน

การออกแบบหม้อแปลงในครั้งนี้ เราจะใช้สมการข้างล่างนี้เป็นหลัก คือ

$$E = 4.44fNBA$$

โดยที่

$$E = \text{แรงดัน (Volt)}$$

$$f = \text{ความถี่ (Hz) ในการออกแบบใช้ } f = 50 \text{ Hz}$$

$$N = \text{จำนวนรอบ (รอบ)}$$

$$B = \text{ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้า (Tesla) ในการออกแบบใช้}$$

$$B = 1 \text{ Tesla}$$

$$A = \text{พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก (m}^2\text{)}$$

ขั้นตอนในการออกแบบ

1. หาพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก จาก

$$\begin{aligned} A &= \sqrt{VA} / 5.58 \quad \text{ตารางนิ้ว} \\ \text{จะได้} \quad A &= \sqrt{5 \times 10^3} / 5.58 \quad \text{ตารางนิ้ว} \\ &= 12.67 \quad \text{ตารางนิ้ว} \\ \text{หรือประมาณ} \quad &13 \quad \text{ตารางนิ้ว} \\ \text{หรือ} \quad &0.0084 \quad \text{ตารางเมตร} \end{aligned}$$

2. หาจำนวนรอบของขดลวดทางด้าน Primary (N_1) และด้าน Secondary (N_2)

จาก

$$E = 4.44fNBA$$

เพราะฉะนั้น $N_1 = E1/4.44fBA$

$$= 220/4.44 \times 50 \times 1 \times 0.0084$$

$$= 118 \text{ รอบ}$$

และ $N_2 = E2/4.44 \times 50 \times 1 \times 0.0084$

$$= 1609 \text{ รอบ}$$

หรือประมาณ 1600 รอบ

3. หาขนาดของกระแสในขดลวดด้าน Primary (I_1) และด้าน Secondary (I_2)

จาก

$$I = VA/V$$

เพราะฉะนั้น $I_1 = 5000 \text{ VA}/220 \text{ V}$

$$= 22.73 \text{ A}$$

และ $I_2 = 5000 \text{ VA}/3000 \text{ V}$

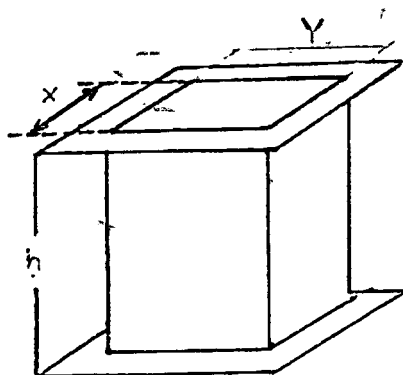
$$= 1.66 \text{ A}$$

4. หาขนาดของขดลวด โดยการเปิดตารางของขดลวดที่สามารถทนกระแสได้ตามค่า I_1 และ I_2 จากข้อ 3 เราจะได้ว่า

ด้าน Primary $N_1 = 118$ รอบ, $I_1 = 22.73 \text{ A}$ ใช้ลวด # 14 SWG

ด้าน Secondary $N_2 = 1600$ รอบ, $I_2 = 1.66 \text{ A}$ ใช้ลวด # 21 SWG

5. หาขนาดของ Bobbin แลดงคั่งรูปข้างล่าง



เพราะฉะนั้นเราจะได้ว่า

$$\begin{aligned} X = Y &= \sqrt{A} \\ &= \sqrt{13} \\ &= 3.6 \text{ นิ้ว} \end{aligned}$$

แต่เนื่องจากแกน EI ที่เรามีอยู่นั้นมีเพียง 3.5 นิ้ว และ 4 นิ้ว ดังนั้นเราจะเลือกแกน EI ขนาด 3.5 นิ้ว ในการสร้างหม้อแปลง

เพราะฉะนั้น $X = Y = 3.5$ นิ้ว
และ $h = 5.25$ หรือประมาณ 5.3 นิ้ว

บทที่ 4

การสร้างแรงดันสูงกระแสตรง

แรงดันสูงกระแสตรงอาจเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น ในขณะที่เกิดพายุฝนฟ้าคะนองมีการเก็บสะสมประจุไฟฟ้าในก้อนเมฆ ทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างก้อนเมฆกับพื้นดิน ในทางภาคปฏิบัติเราสร้างแรงดันสูงกระแสตรงขึ้นเพื่อใช้ประโยชน์ได้โดย

1. เครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic generator)
2. เปลี่ยนแรงดันกระแสสลับเป็นแรงดันกระแสตรง ด้วยเรกติฟายเออร์

ลักษณะของแรงดันกระแสตรง อาจกำหนดหรืออธิบายได้ด้วย

- ชั่ว คือ ชั่วบวกหรือชั่วลบ
- ค่าเฉลี่ย
- ค่าสูงสุด
- แฟคเตอร์คลื่นระลอก (Ripple factor)

1. เครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้าสถิตย์

เป็นวิธีการเปลี่ยนพลังงานกลไปสู่พลังงานไฟฟ้าโดยอาศัยสนามไฟฟ้าเก็บประจุไฟฟ้าไว้บนพื้นโลหะที่ยึดอยู่บนฉนวน ฉะนั้นถ้าใส่พลังงานกลเข้าไปทำการเคลื่อนย้ายประจุไฟฟ้าไปรวมกันอยู่ในที่ที่กำหนดให้ได้มากๆ ก็จะทำให้ศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้น ซึ่งอาจหาได้จากความล้มพันธ์

$$U = Q/C$$

เมื่อ U คือ ศักย์ไฟฟ้า

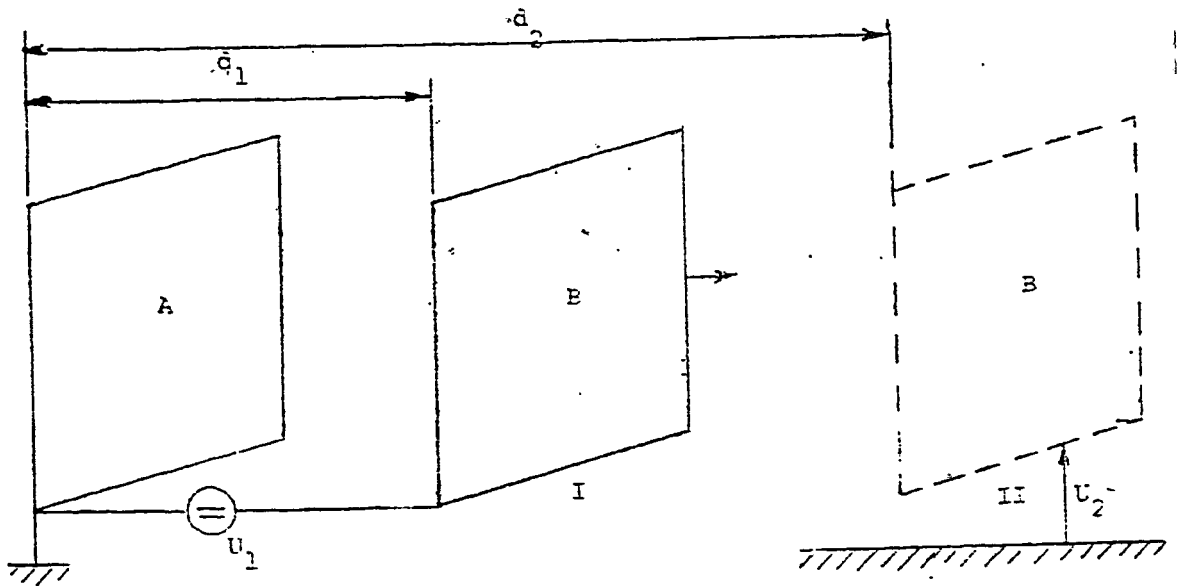
Q คือ ประจุไฟฟ้า

C คือ ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

จะเห็นว่าศักย์ไฟฟ้านั้นขึ้นอยู่กับปริมาณของประจุ และถ้าหากสามารถทำให้ค่าความจุไฟฟ้าลดลงได้ โดยรักษาปริมาณประจุให้คงที่อยู่เท่าเดิมก็จะทำให้ศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นได้

1a. ไฟฟ้าสถิตย์ระหว่างแผ่นตัวเก็บประจุ

ในรูปมีแผ่นโลหะ A และ B ยึดอยู่บนฉนวนรองรับทำหน้าที่เป็นแผ่นตัวเก็บประจุ แผ่น A อยู่กับที่แผ่น B เคลื่อนที่ได้ ป้อนแรงดันกระแสตรง U_1 เพื่ออัดประจุเข้าไประหว่างแผ่น A และ B ซึ่งวางห่างกันเท่ากับ d_1 แล้วเคลื่อนแผ่นโลหะ B ให้ห่างออกไปเป็นระยะ d_2 ถ้าหากประจุที่อัดกันอยู่บนแผ่นโลหะทั้งสองไม่สูญหายไปไหน จะทำให้ศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้น ถ้า d_2 มากกว่า d_1



รูปที่ 4-1 การสร้างไฟฟ้าสถิตย์ด้วยแผ่นเก็บประจุ

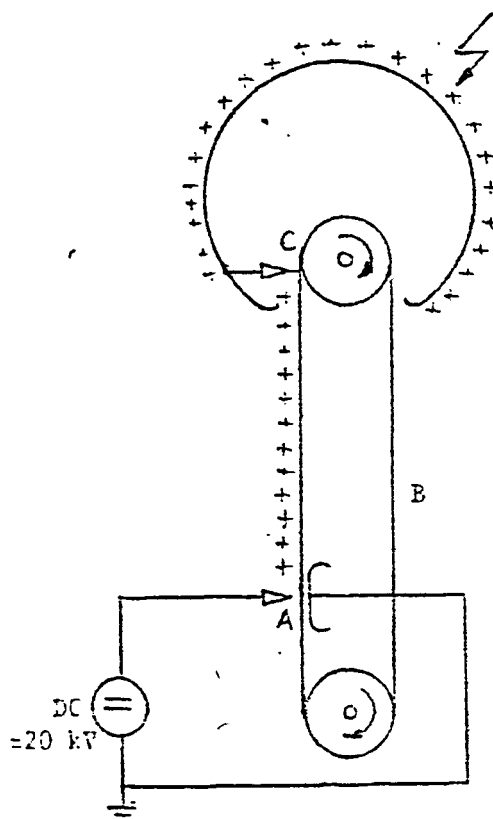
1b. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสถิตย์ Van de graeff

เป็นเครื่องสร้างแรงดันสูงไฟฟ้าสถิตย์ โดยวิธีเก็บสะสมประจุไว้บนพื้นผิวโลก (Van de graeff 1930) ดังในรูปที่ 4-2 ประกอบด้วยอิเล็กทรอนิกส์ A แบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (Highly nonuniform) เป็นตัวทำให้เกิดโคโรนาแยกประจุ มีอิเล็กทรอนิกส์ระยะถ่างลงบนสายพานจนวนที่หมุนเคลื่อนที่รอบล้อ ประจุจะเคลื่อนที่ตามสายพานและถ่ายให้กับอิเล็กทรอนิกส์แรงสูง HV โดยผ่านอิเล็กทรอนิกส์เก็บประจุ C

เครื่องกำเนิด Van de graeff มีข้อจำกัด ดังนี้

- ความหนาแน่นของประจุบนสายพาน (ประมาณ 1.6 nC/cm^2)
- ความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวยาวของสายพาน E_c ถ้าสายพานอยู่ในอากาศจะกำหนดด้วยความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของอากาศ คือ $E_c < 10 \text{ Kv/cm}$ ถ้าต้องการให้สามารถใช้กับ E_c สูงขึ้นต้องบรรจุไว้ในถังอากาศความดัน เช่น N_2 หรือ CO_2 ซึ่งมีความดันในช่วง 10 - 30 บาร์ หรือ SF_6 ความดัน 2.5 - 5 บาร์
- ความเร็วของสายพานน้อยกว่า 40 m/sec

ตัวอย่างเครื่องกำเนิดลักษณะนี้ที่มีข้อดีสามารถสร้างแรงดันได้ถึง 16 MV กระแส 1 mA
ในสหรัฐอเมริกาที่ Burlington Mass

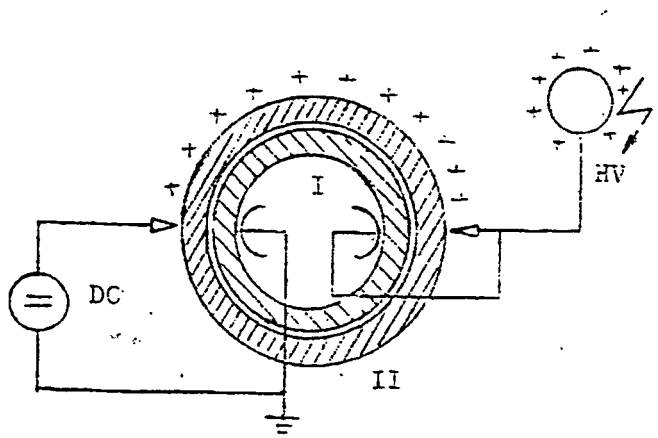


รูปที่ 4-2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสถิตย์ Van de Graeff

1c. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสถิตย์ Trommel

เป็นเครื่องกำเนิดแรงสูงไฟฟ้าสถิตย์ ประดิษฐ์โดย Felici เมื่อปี 1951 โดยเหตุที่เครื่องกำเนิดแบบ Van de graeff ใช้สายพาน มีข้อเสียเกี่ยวกับการลื่นของสายพานในขณะที่ใช้ความเร็วสูงๆ และความเครียดกลนามไฟฟ้าตามแนวสายพานกระจายไม่สม่ำเสมอ ปัญหาเหล่านี้อาจแก้ได้โดยกระบอกฉนวนร่วมสองชั้นตามแบบของ Felici ดังในรูปที่ 4-3 ประกอบด้วยกระบอกฉนวน I อยู่ที่ที่มีแกนร่วมกับกระบอกฉนวนนอก II ซึ่งหมุนได้ ประจักษ์ที่สร้างขึ้นในทำนองเดียวกับเครื่อง Van de graeff จะถ่ายเทอผ่านตัวเก็บประจุออกไปสู่อิเล็กโตรดแรงสูง HV

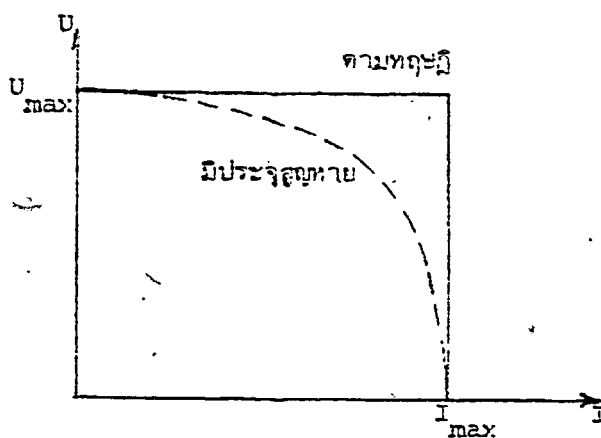
เครื่องกำเนิดแบบนี้ทนความเครียดกลนามไฟฟ้าตามแนวผิวกระบอกฉนวนได้ 20 Kv/cm (โดยบรรจุอากาศ) ความเร็ว 45 m/sec เท่าที่สร้างขึ้นใช้งานในประเทศฝรั่งเศส สร้างแรงดันได้ถึง 400 Kv กระแส 4 mA



รูปที่ 4-3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ Trommel

1d. ลักษณะของเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้าสถิต

โดยหลักการแล้วอาจถือได้ว่าเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้าสถิต เป็นตัวจ่ายที่มีค่ากระแสคงที่ ถ้าหากว่าการถ่ายเทของประจุเป็นไปอย่างต่อเนื่องและคงตัว ดังนั้นการที่จะให้ได้แรงดันคงที่ได้นั้นจะต้องให้ตัวสร้างประจุป้อนให้กับสายพานฉนวนหรือกระบอกฉนวนปรับค่าได้ เส้นกราฟของแรงดันที่ผลิตสัมพันธ์กับกระแสจะแสดงดังรูปที่ 4-4



รูปที่ 4-4 เส้นกราฟแสดงลักษณะของเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้าสถิต

โดยที่ I_{max} คือ กระแสเมื่ออิ่มตัวหรือลัดวงจร

U_{max} คือ แรงดันสูงสุดที่เครื่องกำเนิดสามารถสร้างขึ้น

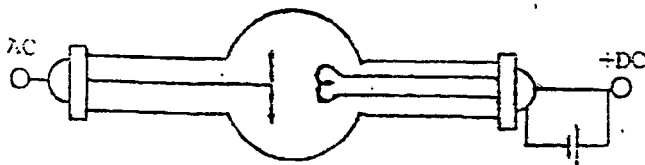
แฟคเตอร์ที่ระดับลอกของแรงดันกระแสตรงมีค่าต่ำมาก คือ น้อยกว่า 1% ข้อสังเกตเนื่อง
จากกระแสลัดวงจรมีค่าต่ำ ฉะนั้นอันตรายจากกระแสจึงมีน้อย

2. การสร้างแรงดันสูงกระแสตรงด้วยวิธีเรกติฟายเออร์

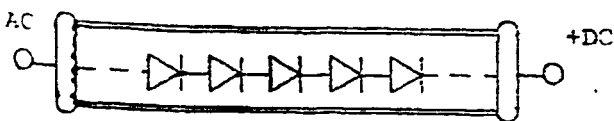
การสร้างแรงดันสูงกระแสตรง ด้วยวิธีเรกติฟายเออร์ที่ใช้กันในห้องทดลองไฟฟ้าแรงสูง
นั้นในสมัยก่อนนั้นใช้หลอดสุญญากาศ ดังรูปที่ 4-5a. เป็นตัวเรียงกระแส แต่ในปัจจุบันนี้โดยทั่วไปจะใช้
ไดโอดสารกึ่งตัวนำมาต่ออันดับกัน ดังรูปที่ 4-5b. นอกเสียจากในกรณีที่ต้องการใช้กระแสสูง ๆ หลาย
แอมแปร์และแรงดันไม่เกิน 10 Kv มักจะใช้เรกติฟายเออร์ไอปรอท

หลอดไดโอดสุญญากาศแรงดันสูงนี้ทำงานเหมือนไดโอดทั่วไป คืออิเล็กตรอนจะถูกปล่อยออก
มาจากไส้แคโทด แล้วถูกเร่งเข้าหาแอโนดด้วยอำนาจสนามไฟฟ้า หลอดสุญญากาศดังกล่าวนี้สามารถ
ทนแรงดันกลับทางค่าขอดได้ถึง 200 KV แต่มีค่าพิกัดกระแสต่ำประมาณ 0.1 Amp. เมื่อเปรียบเทียบ
ระหว่างหลอดสุญญากาศกับไดโอดสารกึ่งตัวนำ แบบหลังมีข้อดีตรงที่ไม่ต้องมีไส้หลอดร้อน

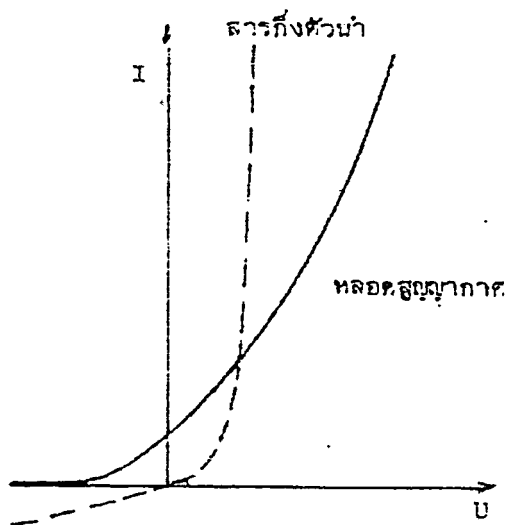
แต่อย่างไรก็ดีไดโอดสารกึ่งตัวนำก็ยังมิกระแสไหลในขณะที่แรงดันกลับทาง และมีปัญหาใน
เรื่องแรงดันกระจายไม่สม่ำเสมอขณะที่แรงดันกลับทาง



a) หลอดไดโอดสุญญากาศ



b) ไดโอดสารกึ่งตัวนำ



c) เส้นลักษณะ I-U

รูปที่ 4-5 ไดโอดแรงสูงและเส้นลักษณะ

ไดโอดควรจะนำกระแสอย่างเต็มที่ในทิศทางนำ แต่จะกันไม่ให้กระแสไหลในทิศทางแรง

ด้นกลับทาง ในทางภาคปฏิบัติทำได้เพียงใกล้เคียงเท่านั้นดังในรูปที่ 4-5c. ไดโอดสารกึ่งตัวนำจะเกิดแรงดันตกคร่อมเล็กน้อยในทิศทางนำกระแสและยอมให้กระแสไหลเล็กน้อยในทิศทางที่แรงดันกลับทาง การพิจารณาเลือกใช้ไดโอดนั้นจะคำนึงถึงค่าพิกัดของ

- แรงดันกลับทาง (Peak reverse voltage)
- กระแสที่กำหนด (Permissible load current)
- กระแสเสอร์จ (Surge current)

3. วงจรสร้างแรงดันกระแสตรง

วงจรทั้งหลายที่ใช้แรงคัพไฟเออร์ล่าเรียงกระแสสร้างแรงดันกระแสตรง ทั้งแรงดันต่ำและแรงดันสูง จะมีวงจรพื้นฐานเป็นแบบ

- วงจรแรงคัพไฟเออร์ครึ่งคลื่น (Half wave rectifier)
- วงจรแรงคัพไฟเออร์เต็มคลื่น (Full wave rectifier)

ในกรณีที่มีตัวจ่ายกระแสกลับแรงดันไม่สูงนัก จะสร้างแรงดันกระแสตรงสูงมากๆได้โดยใช้วงจรพื้นฐานมาต่อกันบันได ในห้องทดลองแรงสูงทั่วไปจะใช้วงจรแรงคัพไฟเออร์ครึ่งคลื่น

3a. วงจรแรงคัพไฟเออร์ครึ่งคลื่น (Half wave rectifier)

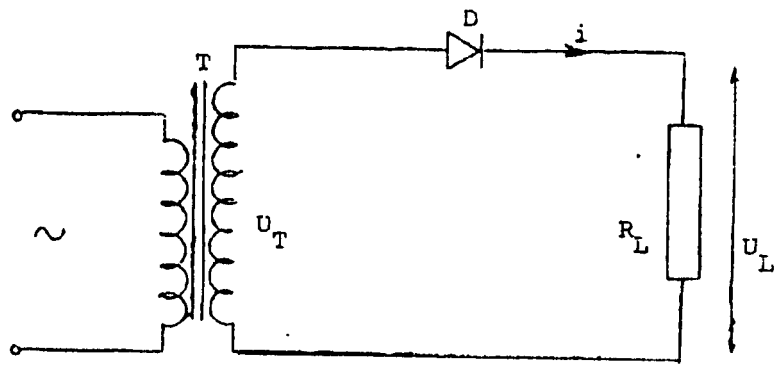
วงจรที่ใช้สร้างแรงดันสูงกระแสตรงที่ง่ายที่สุดเป็นแบบเรียงกระแสเพียงครึ่งหนึ่งของคลื่นที่ป้อนเข้าไป อาจจะเป็นครึ่งบวกหรือครึ่งลบขึ้นอยู่กับขั้วของไดโอดที่ต่อไว้ ดังรูปที่ 4-6. เป็นวงจรเรียงกระแสช่วงครึ่งบวก วงจรประกอบด้วยหม้อแปลงแรงสูง T เป็นตัวจ่ายคลื่นรูปไซน์ (Sine wave) มีค่าแรงดันทางด้านจ่ายกำลังออกเท่ากับ U_T ต่อผ่านไดโอด D เรียงกระแสจ่ายให้กับโหลด R_L

จากรูปที่ 4-6a. สมมติว่าไดโอดมีความต้านทานภายในเมื่อนำกระแส R_D ถ้าแรงดันที่ได้จากหม้อแปลงด้านจ่ายกำลังออกเป็นรูปคลื่นไซน์ คือ

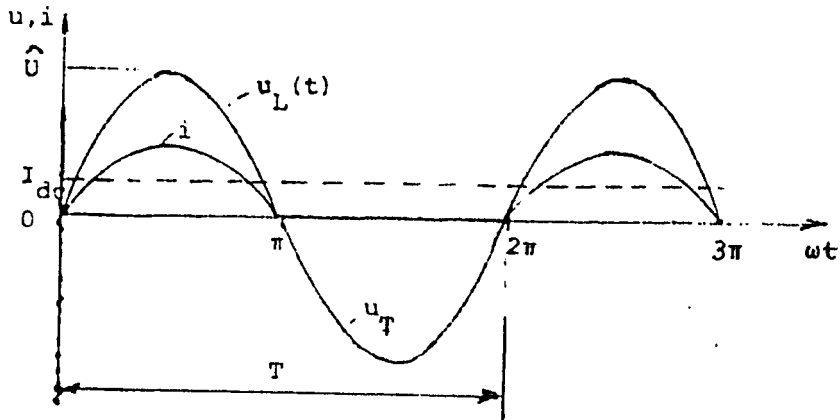
$$U_T = \hat{U} \cdot \text{sine}(wt)$$

ฉะนั้นกระแสในวงจร

$$\begin{aligned}
 i &= [U_T(t)] / [R_{D0} + R_L] \\
 &= [\hat{U}_T \cdot \text{sine}(wt)] / [R_D + R_L] \dots 0 < t < \pi \\
 &= 0 \dots \pi < t < 2\pi
 \end{aligned}$$



a)



b)

รูปที่ 4-6 วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่น

a. วงจร

b. รูปคลื่นแรงดันกระแส

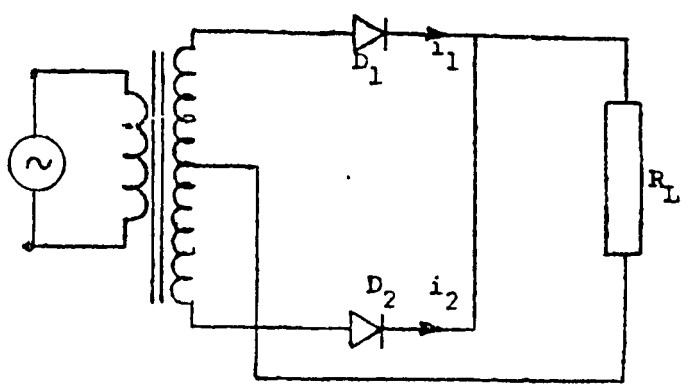
เมื่อผ่านไดโอดกระแสจะไหลทางเดียวเป็นกระแสตรงได้ค่าเฉลี่ย

$$\begin{aligned}
 I_{dc} &= 1/2\pi \int_0^{2\pi} i_d(wt) \\
 &= 1/2\pi \int_0^{\pi} [\hat{U} \cdot \sin(wt)] / [R_D + R_L] d(wt) + 0 \\
 &= \hat{U} / \pi (R_D + R_L) \\
 &= \hat{I} / \pi
 \end{aligned}$$

เมื่อแรงดันกระแสตรงคร่อม R_L คือ \bar{U}_L

$$\begin{aligned}
 \bar{U}_L &= I_{dc} \cdot R_L \\
 &= \hat{U} / \pi
 \end{aligned}$$

3b. วงจรเรกติฟายเออร์เต็มคลื่น (Full wave rectifier)



รูปที่ 4-7 วงจรเรกติฟายเออร์เต็มคลื่น

ในวงจรเรกติฟายเออร์เต็มคลื่นรูปที่ 4-7 เป็นวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นซึ่งประกอบด้วย ไดโอด 2 ตัว ซึ่งทำหน้าที่เรียงกระแสแต่ละตัวครึ่งคลื่น โดยได้รับแรงดันมาจากหม้อแปลงที่มีที่ต่อตรงกลางขดลวด วงจรแบบนี้จะมีประสิทธิภาพสูง แรงดันที่ได้จากหม้อแปลงตัวจ่ายกำลังออกที่ป้อนให้กับ ไดโอดทั้งสองจะมีเฟสต่างกัน 180 องศา คือข้างหนึ่งเป็นบวกอีกข้างหนึ่งเป็นลบ นั่นคือขณะที่ v_1 เป็นบวก กระแสอัดประจุจะไหลผ่านไดโอด D_1 จนถึงช่วงคลื่นลบไดโอด D_1 จะไม่นำกระแส แต่ v_2 เป็นบวกไดโอด D_2 จึงนำกระแส กระแสอัดประจุจะไหลผ่าน D_2 ไปยังโหลด R_L จะเท่ากับผลรวม $i_1 + i_2$

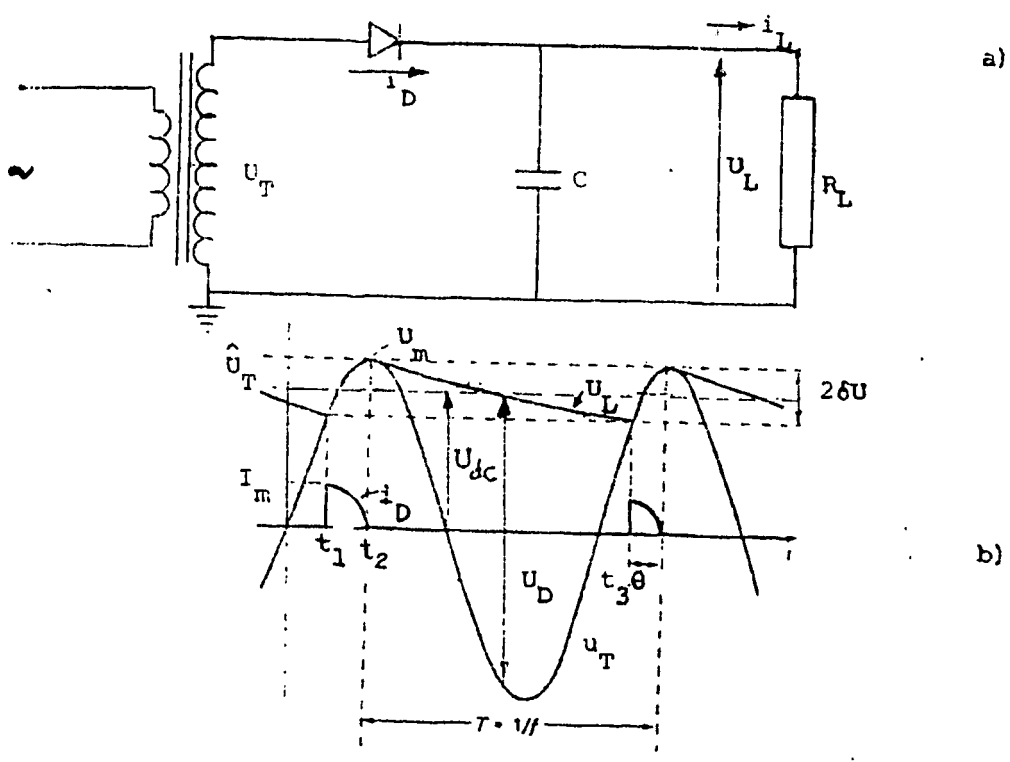
เพราะฉะนั้นเราจะได้

$$I_{dc} = 2\hat{i}/\pi$$

$$I_{rms} = \hat{i}/\sqrt{2}$$

4. ตัวเก็บประจุกรองกระแส (Capacitor filter)

แรงดันไฟเออร์เต็มคลื่นทำให้แพลเตอร์ระลอกลดลงเมื่อเทียบกับแรงดันไฟเออร์ครึ่งคลื่น คือ จะลดลงจาก 121% ลดเหลือ 48% แต่ก็ยังนับว่ามีค่าสูงต่อการใช้งาน ปัญหาแก้ไขได้โดยใช้วิธีการกรองกระแส ในที่นี้จะกล่าวถึงการใช้ตัวเก็บประจุกรองกระแสเพื่อลดแพลเตอร์ระลอกให้น้อยลง ตัวเก็บประจุดังกล่าวนี้จะต่อคร่อมหรือขนานกับโหลด จึงอัดประจุในช่วงที่ไดโอดนำกระแสและจะปล่อยหรือคายประจุให้กับโหลดในช่วงที่ไดโอดไม่นำกระแส



รูปที่ 4-8 วงจรแรงดันไฟเออร์ที่มีตัวเก็บประจุกรองกระแส

- a. วงจร
- b. รูปคลื่นแรงดัน

ในรูปที่ 4-8a. แสดงถึงแรงดันไฟเออร์ครึ่งคลื่น มีตัวเก็บประจุกรองกระแสให้คลื่นเรียบได้แรงดันออกมาดังในรูปที่ 4-8b. สมมติว่าไดโอดมีความต้านทานน้อย และวงจรทำงานถึงสภาพอยู่ที่ $t=0$ แรงดันตัวจ่าย $U_T=0$ แต่แรงดันคร่อมโหลด R_L กับ C เป็น U_L และ U_C จะลดลงตามเวลา เนื่องจากคายประจุให้กับ R_L ในขณะที่แรงดันตัวจ่าย U_T เพิ่มขึ้น จนกระทั่ง U_T เริ่มจะสูงกว่า U_L เล็กน้อยที่ $t_1=0$ ไดโอดจะนำกระแส กระแสอัดประจุ i_D จะพุ่งขึ้นอย่างรวดเร็วเพื่อให้สอดคล้องกับความ

สัมพันธ์

$$i_c = C du/dt$$

กระแสอัดประจุนี้จะค่อยๆ ลดลงจนเป็นศูนย์เมื่อแรงดันตัวจ่ายขึ้นสูงถึงค่ายอด ขณะนั้น แรงดันอัดประจุรวม C จะเท่าค่ายอดของแรงดันตัวจ่าย \hat{U}_T กระแส i_c จะหยุดไหล เมื่อแรงดันตัวจ่าย U_T เริ่มลดลงต่ำกว่า U_L ที่ t_2 ในช่วงอัดประจุ $t_1 < t < t_2$

$$U_L = \hat{U} \cdot \text{sine}(wt)$$

ในช่วงคายประจุ $t_2 < t < t_3$

$$U_L = U_m \cdot e^{-((t-t_2)/RC)}$$

$$\text{ในที่นี้ } U_m = \hat{U}_T$$

เมื่อถึง t_3 แรงดันตัวจ่ายเริ่มจะมากกว่า U_L ไดโอดเริ่มนำกระแส ครอบรอบและซ้ำเดิมต่อไป

กระแสที่ไหลผ่านโหลด R_L จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ U_L แต่จะไม่เป็นศูนย์ เพราะเมื่อ C หยุดอัดประจุ C จะคายประจุให้กับ R_L ต่อไป ค่าเฉลี่ยของกระแสจะสูงขึ้นมากเมื่อเทียบกับวงจรเรกติฟายเออร์ครึ่งคลื่นที่ไม่มีตัวเก็บประจุรองกระแสและคลื่นกระแสกลับก็จะต่ำลง แพลเตอร์ะลอกก็ จะต่ำลงด้วย

5. การคำนวณหาแพลเตอร์ะลอกเมื่อใช้วงจรมีตัวเก็บประจุรองกระแส

เมื่อมีตัวเก็บประจุรองกระแส แรงดันเรียงกระแสแล้วหรือแรงดันกระแสตรงจะเรียบมากขึ้น มีค่าสูงสุด U_m เท่ากับค่ายอดของแรงดันตัวจ่าย คือ $\hat{U}_T = U_m$ แรงดันคลื่นระลอกหรือคลื่นกระแสกลับที่ซ่อนอยู่ คือ ΔU ฉะนั้นแรงดันเฉลี่ยของแรงดันกระแสตรง U_{dc} จะได้

$$U_{dc} = \hat{U}_T - \Delta U$$

ช่วงระยะอัดประจุ $t_2 - t_1$ ยิ่งน้อยจะทำให้แรงดันที่เรียงกระแสแล้วเรียบมากขึ้น ไดโอดจะนำกระแสในช่วงสั้น แต่ไดโอดจะต้องรับแรงดันในช่วงแรงดันกลับทาง หรือในช่วงที่ไดโอดไม่นำ กระแสมีค่า 2 เท่าของค่ายอดแรงดันตัวจ่าย คือ

$$\hat{U}_D = 2\hat{U}_T$$

เมื่อ U_D คือ แรงดันคร่อมไดโอด

เนื่องจากช่วงระยะเวลาอัดประจุ $t_{dc} = t_2 - t_1 \dots \ll T$ ฉะนั้นอาจคิดได้ว่าช่วง
ระยะเวลาที่แรงดันกลับทางเท่ากับ $T = 1/f$ และเพราะว่าแรงดันระลอก ΔU มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับ
 U_{dc} ($\Delta U \ll U_{dc}$) ฉะนั้นกระแสที่ตัวเก็บประจุ C จ่ายให้กับโหลดคิดเป็นประจุถ่ายเท Q หาได้จาก

$$\begin{aligned} Q &= I_{dc} \cdot T \\ &= \Delta U \cdot C \\ \Delta U &= Q / 2C \\ &= I_{dc} / 2fC \end{aligned}$$

.....

บทที่ 5

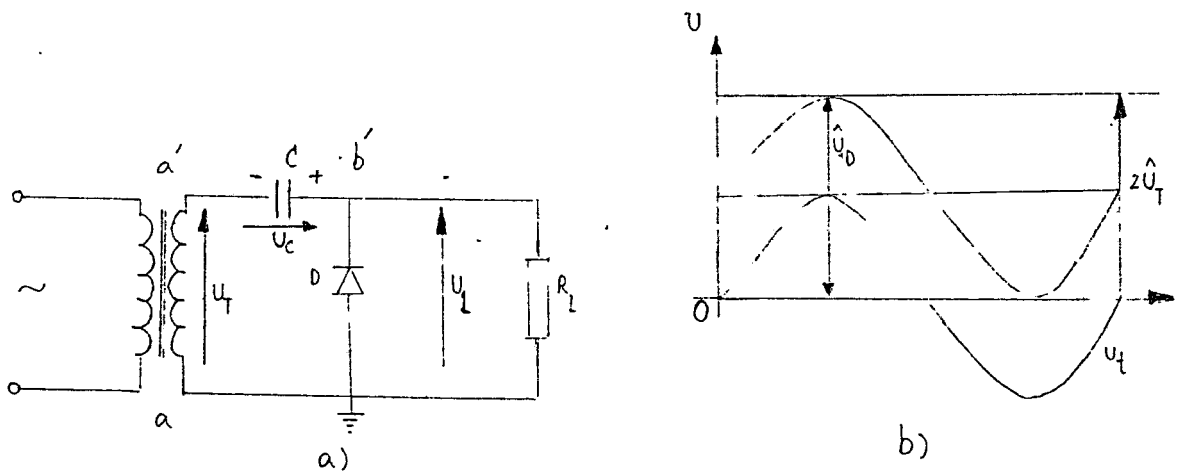
VOLTAGE MULTIPLIER

วงจรชั้นบันไดสร้างแรงดันกระแสตรง (Cascade Circuit for DC High Voltage)

การสร้างแรงดันกระแสตรงสูงมากๆ นั้น เราสามารถทำได้โดยอาศัยวงจรพื้นฐานจากวงจรสร้างแรงดันสองเท่า (จากรูปที่ 5-1) มาต่อซ้อนกันเข้าเป็นวงจรชั้นบันไดตามหลักของวงจร GRIGNANCI หรือ Cockcroft-Walton

วงจรแรงดันสองเท่า (Voltage Doubler Circuit)

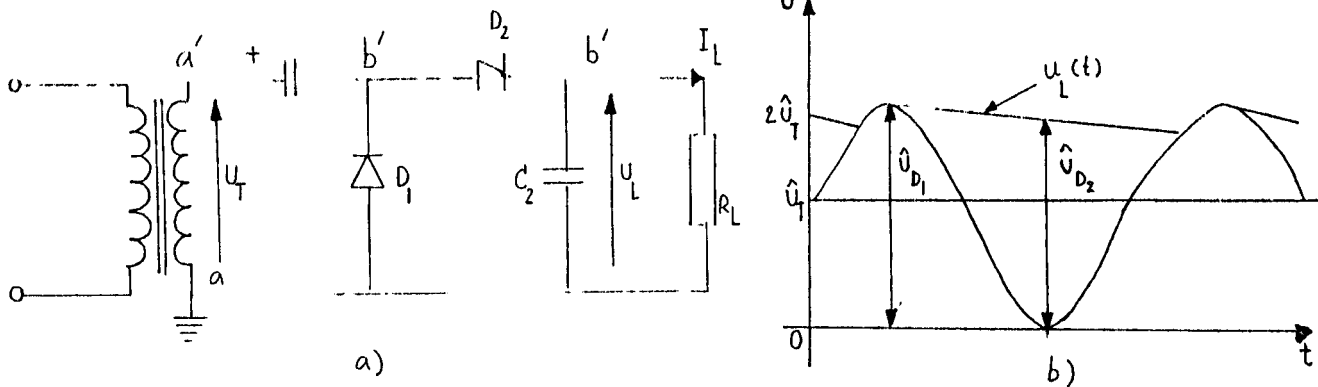
ตามวงจรของ Villard ดังแสดงในรูป 5-1a ซึ่งประกอบด้วยไดโอดและตัวเก็บประจุอย่างละตัว จะช่วยให้สามารถสร้างแรงดันขึ้นเป็นสองเท่าของค่ายอดแรงดันค้ำจายออกของหม้อแปลงดังในรูป 5-1b



รูปที่ 5-1 วงจรสร้างแรงดันสองเท่า

จากรูป 5-1a เมื่อจุด a' เป็นลบ (ครึ่งไซเคิลลบ) ตัวเก็บประจุ C จะอัดประจุจนถึงค่ายอดของแรงดันค้ำจายหม้อแปลง คือ $U_C = U_T$ เมื่อจุด a' เป็นศูนย์และเพิ่มขึ้น (ในครึ่งไซเคิลบวก) จะทำให้แรงดันจุด b' ซึ่งเท่ากับผลรวมของแรงดันค้ำจายหม้อแปลงกับแรงดันคร่อม C ถ้าแรง

ต้นหม้อแปลงเพิ่มจนถึงค่ายอด U_T แรงดันที่จุด b' คือ U_L จะมีค่าสูงสุดเป็น 2 เท่า คือ $2U_T$ ดังนั้น ไดโอดจะต้องทนแรงดันได้อย่างน้อยเท่ากับ $2U_T$ แรงดันที่ได้ที่โหลดจะแปรค่าตั้งแต่ 0 ถึง $2U_T$ ฉะนั้นถ้าเอาแรงดันนี้ไปผ่านเรกติฟายเออร์และตัวเก็บประจุกรองกระแสดังในรูป 5-2a ก็จะทำให้ได้แรงดันกระแสสูงเป็น 2 เท่าของแรงดันค่ายอดของหม้อแปลงด้านจ่ายกำลังออก



รูป 5-2 วงจรสร้างแรงดันกระแสตรงแบบแรงดันสองเท่า

ในขณะที่ไม่มีโหลด จะได้แรงดันกระแสตรงคร่อมตัวเก็บประจุ C_2 ซึ่งมีโอกาสขึ้นถึง $2\hat{U}_T$ ฉะนั้นไดโอด D_1 และ D_2 จะต้องรับแรงดันสูงถึงสองเท่าเช่นเดียวกัน คือ

$$\hat{U}_{D1} = \hat{U}_{D2} = 2\hat{U}_T$$

การอัดประจุ C_2 เป็นไปดังนี้ คือ เมื่อตัวเก็บประจุ C_2 ได้รับอัดประจุเนื่องจากแรงดันจากหม้อแปลงผ่านไดโอด D_1 ($q_1 = U_{C1}$) แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ C_2 (คือ U_{C2}) รวมเข้ากับแรงดันของหม้อแปลงที่ a

ถ้าเมื่อใด $U_{C2} = U_{C1} + U_T$ มีค่าสูงกว่า U_T เนื่องจากแรงดันของหม้อแปลงเพิ่มขึ้น ไดโอด D_2 จะนำกระแส และ C_2 จะได้รับอัดประจุจาก C_1 กระบวนการจะดำเนินต่อไปจนกระทั่งถึงภาวะอยู่ตัว ขณะที่ไม่มีโหลด ศักย์ไฟฟ้าที่จุด b คือแรงดันคร่อม C_2 เป็นสองเท่า คือ

$$U_{C2} = 2\hat{U}$$

และที่จุด b จะมีศักย์ไฟฟ้า U_{C2} มีค่าเป็น

$$U_{C2} = \hat{U}(1 + \cos \omega t) !$$

วงจรขึ้นบันไดสร้างแรงดันกระแสตรง

การสร้างแรงดันสูงกระแสตรงสูงมากๆ ทำได้โดยอาศัยวงจรพื้นฐานสร้างแรงดันสองเท่า (จากรูป 5-2a) มาต่อซ้อนกันเข้าเป็นขึ้นบันไดตามหลักการของวงจร Greinach หรือ Cockcroft-Walton

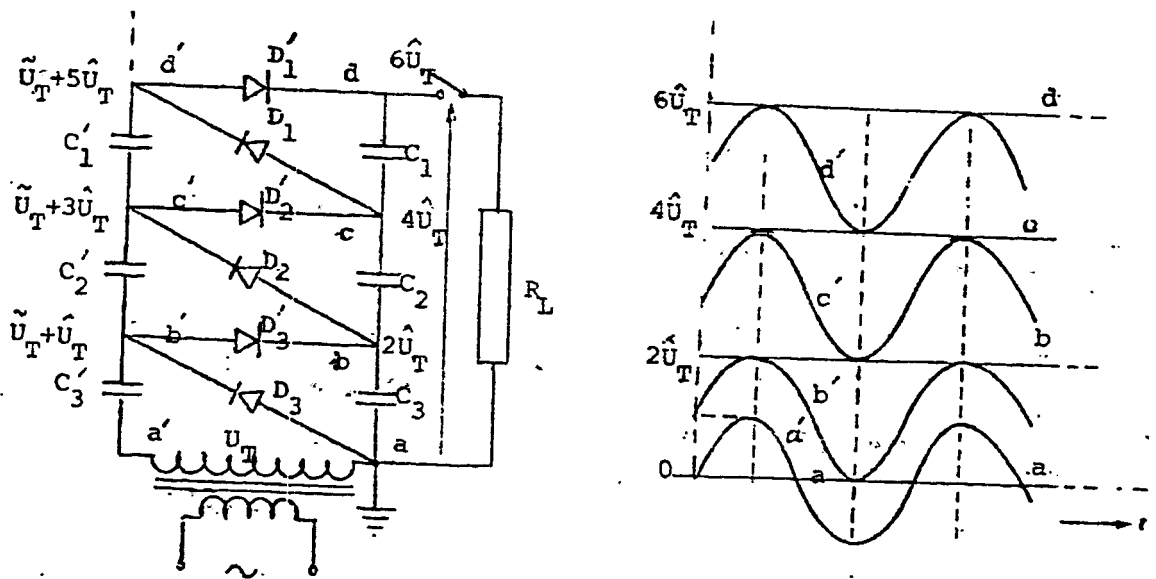
a) แรงดันวงจรขึ้นบันไดเมื่อไม่มีโหลด

ในรูป 5-3a แสดงถึงวงจรขึ้นบันไดที่ได้จากการเอาวงจรสร้างแรงดันกระแสตรงสองเท่ามาต่อซ้อนกัน 3 ชั้น คือ แต่ละชั้นจะประกอบด้วยตัวเก็บประจุ 2 ตัว และไดโอด 2 ตัว โดยที่ตัวเก็บประจุตัวหนึ่งเป็นตัวเก็บพักประจุ และอีกตัวหนึ่งเป็นตัวกรองให้ได้แรงดันกระแสตรง ดังเช่นวงจร a a' b b' เป็นวงจรสร้างแรงดัน 2 เท่าหนึ่งชั้น C'_1, C'_2, C'_3 และ C_1, C_2, C_3 เป็นตัวเก็บประจุพักประจุ และตัวกรองกระแสตามลำดับ แต่ละชั้นจะสร้างแรงดันได้สองเท่าของค่ายอดแรงดันที่ได้จากหม้อแปลงตัวจ่าย คือเป็น $2\hat{U}_T$ ขั้วของไดโอดที่ต่อไว้ในวงจร D'_1, D'_2, D'_3 จะนำกระแสในช่วงครึ่งลบ ศักย์ไฟฟ้าที่จุด b' เมื่อเทียบกับดินจะเปลี่ยนแปลงระหว่างศูนย์กับ $2\hat{U}_T$ และ C_3 จะได้รับแรงดันอัดประจุเป็น $2\hat{U}_T$ ผ่านไดโอด D'_3 จุด b จะมีศักย์ไฟฟ้าคงตัว $2\hat{U}_T$ และแรงดันอัดประจุให้ C'_2 ผ่านไดโอด D_2 จะเปลี่ยนแปลงระหว่าง $2\hat{U}_T$ กับศูนย์ ฉะนั้น C_2 จะได้รับแรงดันอัดประจุถึง $2\hat{U}_T$ คือไฟฟ้าที่จุด c จะเปลี่ยนแปลงระหว่าง $2\hat{U}_T$ ถึง $4\hat{U}_T$ และ C_2 จะได้รับแรงดันอัดประจุผ่านไดโอด D'_2 เท่ากับ $2\hat{U}_T$ ซึ่งจะทำให้จุด c มีศักย์ไฟฟ้าสูงถึง $4\hat{U}_T$ เมื่อเทียบกับดิน วงจรชั้นที่สามตัวเก็บประจุแต่ละตัวก็จะได้รับแรงดันอัดประจุถึง $2\hat{U}_T$ เช่นกัน นั่นคือจุด d จะมีศักย์ไฟฟ้าเมื่อเทียบกับดินจะเท่ากับ $6\hat{U}_T$

จะเห็นได้ว่า การที่เราใช้หลายๆ ชั้นต่อกัน จะช่วยให้สามารถสร้างแรงดันสูงมากๆ ได้ โดยที่ตัวเก็บประจุและไดโอดแต่ละตัวจะต้องทนแรงดันเพียงสองเท่าของค่ายอดแรงดันหม้อแปลงตัวจ่าย ยกเว้นตัวเก็บประจุตัวล่างสุด (ในที่นี้คือ C_3) จะได้รับแรงดันสูงสุดเพียง \hat{U}_T เท่านั้น แรงดัน ณ. จุดต่างๆ ในขณะที่ไม่มีโหลดแสดงอยู่ในเทอมของเวลาจะได้อิงในรูป 5-3b

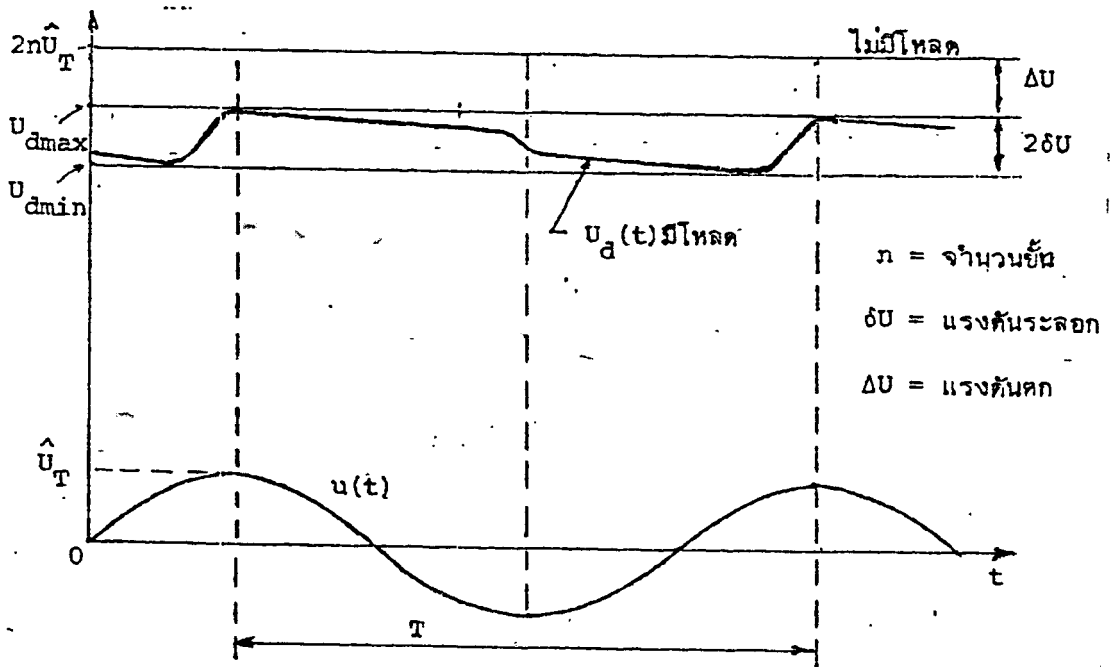
b) แรงดันวงจรขึ้นบันไดเมื่อมีโหลด

วงจรขึ้นบันไดสร้างแรงดันกระแสตรงจะสามารถสร้างได้ประมาณสองเท่าของค่ายอดแรงดันด้านจ่ายออกของหม้อแปลงตัวจ่ายคูณด้วยจำนวนชั้น ถ้าหากไม่มีโหลดหรือไม่มีแรงดันตก แต่เมื่อมีโหลดจะมีแรงดันตกในไดโอด ในหม้อแปลง และในตัวเก็บประจุเอง ฉะนั้นในในวงจรรูป 5-3 จะได้แรงดันที่จุด d น้อยกว่า $6\hat{U}_T$



รูป 5-3 วงจรขั้วขึ้นบันไดสร้างแรงดันกระแสตรงตามวงจรของ Greinach

- a) รูปวงจรขั้วขึ้นบันได
- b) รูปคลื่นแรงดัน ณ จุดต่าง ๆ ขณะที่ไม่มียโหลด



รูป 5-4 รูปคลื่นแรงดันกระแสตรงที่ได้จากวงจรขั้วขึ้นบันไดในขณะมีโหลด

ในรูป 5-4 แสดงถึงรูปคลื่นแรงดันกระแสตรงที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา $U_c(t)$ ของ วงจรขึ้นบันไดเมื่อมีโพลต์ แรงดันที่ได้ที่ปลายแรงสูงจะต่ำกว่าค่าอุดมการ ทั้งนี้เนื่องจากแรงดัน ตก ΔU และแรงดันระลอก ΔU

1. การคำนวณหาแรงดันระลอก

แรงดันกระแสตรงที่ได้จากการเรคตินไฟจากแรงดันกระแสสลับ โดยใช้ไดโอด เรียงกระแส และมีตัวเก็บประจุกรองกระแสเพื่อให้ได้คลื่นเรียบ แต่คลื่นที่ได้ก็ยังเป็นระ ลอกที่ได้กล่าวแล้วในวงจรพื้นฐาน แรงดันระลอกของวงจรขึ้นบันไดก็อาจหาได้เช่นเดียวกับ วงจรที่มีไดโอดและตัวเก็บประจุกรองกระแสอย่างละตัว (รูปที่ 5-1) ซึ่งมีความสัมพันธ์ คือ

$$\Delta U = I_u / 2fC$$

เมื่อ I_u คือ กระแสที่จ่ายให้โพลต์

f คือ ความถี่ของแรงดันกระแสสลับที่จะแปลงเป็นกระแสตรง

C คือ ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุกรองกระแส

ในการดีวงจรขึ้นบันไดดังในรูปที่ 5-3. ตัวเก็บประจุกรองกระแส C_1, C_2 และ C_3 ซึ่ง มีความจุไฟฟ้าทุกตัวเท่ากับ C สมมุติว่าทุกๆ ไชเคิลวงจรจ่ายกระแสให้กับโพลต์ที่ปลายแรง สูงที่สุด d เท่ากับ I_u นั่นคือ C_1 จะจ่ายประจุออกไปเท่ากับ $Q = I_u$ จึงทำให้เกิดแรงดันตก ไป

$$\Delta U_1 = I_u / 2fC_1$$

ในขณะเดียวกัน C_2 ต้องจ่ายประจุให้กับโพลต์เท่ากับ Q และถ่ายถอดประจุให้ตัวเก็บประจุ C_1 เท่ากับ Q ฉะนั้น C_2 จะจ่ายประจุออกไปเท่ากับ $2Q = 2I_u / fC$ จึงทำให้แรงดันตกไป

$$\Delta U_2 = 2I_u / 2fC_2$$

และ C_3 ก็ต้องถ่ายประจุออกไปให้โพลต์เท่ากับ Q และให้กับ C_2 เท่ากับ Q และถ่ายถอด ให้ C_2 เท่ากับ Q ฉะนั้นแรงดันตกไปใน C_3 คือ

$$\Delta U_3 = 3I_u / 2fC_3$$

แรงดันตกในตัวเก็บประจุรอกกระแสเหล่านี้ทำให้แรงดันระลอกทั้งหมดรวมเป็น

$$\begin{aligned}\delta U &= \delta U_1 + \delta U_2 + \delta U_3 \\ &= I_u / 2f \cdot (1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3)\end{aligned}$$

ถ้าตัวเก็บประจุทุกตัวมีค่าความจุเท่ากับ C ฉะนั้น

$$\delta U = I_u / 2fC \cdot (1+2+3)$$

ถ้าวงจรขึ้นบันไดมี n ชั้น จะได้แรงดันระลอกรวม

$$\begin{aligned}\delta U &= I_u / 2fC \cdot (1+2+3+\dots+n) \\ &= I_u / 2fC \cdot (n) \cdot [(n+1)/2] \\ &= n(n+1)/4 \cdot I_u / fC\end{aligned}$$

จะเห็นว่าตัวเก็บประจุล่างสุดเป็นตัวที่ถ่ายทอดออกหรือจ่ายประจุออกไปมากที่สุด จึงนับว่าเป็นตัวที่มีผลต่อแรงดันระลอกอย่างยิ่ง ฉะนั้นความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุรอกกระแสตัวล่างสุดควรมีค่าสูงกว่าตัวถัดไป

2. การคำนวณแรงดันตก ΔU

ในขณะที่ยังจ่ายโหลดกระแส I_u (หรือประจุ $q = I_u/f$) ทุกๆ ไชเคิลจะมีการถ่ายทอดประจุจากตัวเก็บประจุ (C'_1, C'_2, C'_3) ไปให้กับตัวเก็บประจุรอกกระแส (C_1, C_2, C_3) จึงทำให้เกิดแรงดันตกในตัวเก็บประจุพัก (C'_1, C'_2, C'_3) ในทำนองเดียวกันการถ่ายทอดประจุจากตัวเก็บประจุรอกกระแสไปยังตัวเก็บประจุพัก (C'_1, C'_2, C'_3) ก็ย่อมทำให้เกิดแรงดันตกเช่นเดียวกัน สรุปแล้วตัวเก็บประจุทุกตัวจะได้รับแรงดันอัดประจุน้อยกว่าค่าอุดมการ ยกเว้นตัวเก็บประจุพักตัวล่างสุดที่มีโอกาสได้รับแรงดันอัดประจุเท่ากับค่ายอดของแรงดันจ่ายออกของหม้อแปลงตัวจ่าย

จากวงจรขึ้นบันไดในรูปที่ 5-3. ถ้าจ่ายโหลดกระแส I_u ออกไปที่จุด d หรือประจุ q ทุกๆ ไชเคิล ในช่วงครึ่งไชเคิลบวกไดโอด D'_1, D'_2 และ D'_3 นำกระแส ตัวเก็บประจุ C'_3 จะถ่ายทอดประจุออกไปทั้งหมด $3I_u/f$ จึงทำให้แรงดันตกใน C_3 ดังนั้น C_3 จะได้รับแรงดันอัดประจุสูงสุดเพียง

$$2U_T - 3I_d/fC$$

แรงดันนี้ที่ C_2' จะได้รับประจุจาก C_3 ถ่ายทอดประจุให้ C_2' เท่ากับ $2I_d/f$ และให้โหนด I_d/f จะทำให้เกิดแรงดันตกใน C_3 เอง ฉะนั้น C_2' จะได้รับประจุจาก C_3 ด้วยแรงดันอัดประจุเพียง

$$(U_{C_2'})_{\max} = 2U_T - 3I_d/fC - 3I_d/fC$$

ในครึ่งไซเคิลต่อมา C_2' จะต้องถ่ายทอดประจุออกไปให้ C_2 จึงทำให้เกิดแรงดันตกไปอีก $2I_d/fC$ แรงดันของ C_2' จะเหลือเพียง

$$(U_{C_2'})_{\min} = 2\hat{U}_T - 6I_d/fC - 2I_d/fC$$

ทำนองเดียวกันกับแรงดันที่ C_2 จะได้รับ

$$(U_{C_2})_{\max} = 2\hat{U}_T - 6I_d/fC - 2I_d/fC$$

$$(U_{C_2})_{\min} = (U_{C_2'})_{\max} - 2I_d/fC$$

$$= 6U_T - 8I_d/fC$$

ฉะนั้นแรงดันตกทั้งหมดจะเท่ากับผลรวมของแรงดันตกในตัวเก็บประจุแต่ละตัว ถ้าวงจรขึ้นบันไดมี n ชั้น จะได้

$$\Delta U = I_d/fC \cdot (2/3 \cdot n^3 + 1/2 \cdot n^2 + 1/6 \cdot n)$$

เมื่อตัวเก็บประจุทุกตัวมีค่าความจุไฟฟ้าเท่ากันหมด คือ C แรงดันที่ผลิตออกมาได้ที่ปลายแรงสูงจะเพือมอยู่ระหว่างค่าสูงและค่าต่ำ คือ

$$(U_d)_{\max} = 2n\hat{U}_T - \Delta U$$

$$(U_d)_{\min} = 2n\hat{U}_T - \Delta U - 2\Delta U$$

ถ้าจำนวนชั้นของวงจรรีซันันต์มีมากพอ คือ $n^3 > n^2$ เช่น $n > 3$ ค่าแรงดันตกอาจคำนวณค่าโดยประมาณจากความสัมพันธ์

$$\Delta U = I_d / fC \cdot 2/3 \cdot n^3$$

ฉะนั้นแรงดันกระแสตรงที่ได้จากวงจรรีซันันต์จึงหาค่าโดยประมาณได้จากสมการ

$$U_d = 2n\hat{U}_T - 2/3 \cdot n^3 \cdot I_d / fC$$

จะเห็นได้ว่าถ้าต้องการลดแรงดันตกให้น้อยลง หรืออีกนัยหนึ่งก็คือเพิ่มแรงดันกระแสตรงได้โดยการเพิ่มค่าความจุไฟฟ้า หรือเพิ่มความถี่ของแรงดันกระแสลับที่จ่ายออกหม้อแปลงตัวจ่าย

3. จำนวนชั้นรีซันันต์ที่เหมาะสม

การสร้างแรงดันกระแสตรงด้วยวงจรรีซันันต์ เราอาจสร้างแรงดันให้สูงขึ้นได้โดยการเพิ่มจำนวนชั้น ในทางภาคปฏิบัติถ้าหากกำหนดค่ากระแสไหล I_d ให้ จากค่าความจุไฟฟ้าที่มี ความถี่ของตัวจ่ายที่กำหนด จะพบว่าถ้ายิ่งเพิ่มจำนวนชั้นสูงมากเกินไป จะทำให้แรงดันตกมาก แรงดันที่ได้ออกมาที่โหลดกลับต่ำลง แสดงว่าชั้นของวงจรมีขีดจำกัดหรือมีค่าที่เหมาะสมที่สามารถสร้างแรงดันได้สูงสุด ซึ่งหาได้จาก

$$dU_d / dn = 0$$

เมื่อ U_d เป็นแรงดันกระแสตรงที่โหลด

จำนวนชั้นที่เหมาะสม คือ

$$n_{out} = [(U_T \cdot f \cdot C) / I_d]^{1/2}$$

ฉะนั้น

$$\begin{aligned} (U_d)_{out} &= 4/3 \cdot n_{out} \cdot \hat{U}_T \\ &= 2/3 \cdot (2n_{out} \cdot \hat{U}_T) \end{aligned}$$

นั่นคือแรงดันกระแสตรงที่สร้างได้จะมีค่าเพียง 67% ของค่าทฤษฎีเท่านั้น และยัง
กว่านั้นตามความเป็นจริงแล้ว ยังมีแรงดันตกเนื่องจากไดโอดอีก แรงที่ได้ออกมาจะยิ่งต่ำลง
ไปอีก

บทที่ 6
การออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูง

เครื่องกำเนิดแรงดันกระแสตรงที่ออกแบบสร้าง มีวงจรถึงแสดงในรูปที่ 1-1 ซึ่งเราทราบแล้วว่าตัวเก็บประจุและไดโอดแต่ละตัวจะต้องทนแรงดันเพียงสองเท่าของค่ายอดแรงดันหม้อแปลงตัวจ่าย ยกเว้นตัวเก็บประจุตัวล่างสุดคือ C_1 จะรับแรงดันสูงสุดเท่ากับค่ายอดของแรงดันหม้อแปลงตัวจ่ายเท่านั้น นั่นคือจะต้องทนได้อย่างน้อย 8486 โวลต์

ไดโอดที่เราหาซื้อได้มีขนาด 5000 โวลต์ 200 mA นำมาต่ออนุกรมกัน ดังนั้น ไดโอดจะทนแรงดันได้ 10000 โวลต์ 200 mA

ตัวเก็บประจุที่สามารถซื้อได้มีขนาด $1.02 \mu\text{F}$, 2100 V. นำมาต่ออนุกรมกัน 5 ตัว ดังนั้นตัวเก็บประจุจะทนแรงดันได้ 10500 V. และมีค่า $0.204 \mu\text{F}$.

เรากำหนดให้เครื่องจ่าย load ได้ไม่เกิน 0.1 mA

คำนวณหาแรงดันระลอก

จาก
$$\delta U = \frac{n(n+1)I_d}{4fc}$$

แทนค่า
$$\delta U = \frac{5(5+1)(0.1 \times 10^{-3})}{4(50)(0.204 \times 10^{-6})}$$

$$= 73.5 \text{ V.}$$

เพราะฉะนั้นจะได้แรงดันระลอก 73.5 V. เมื่อเราจ่าย load เต็มพิกัด

คำนวณแรงดันตก

จาก
$$\Delta U = \frac{2 I_d n^2}{3fc}$$

แทนค่า
$$\Delta U = \frac{2(0.1 \times 10^{-3})(5^2)}{3(50)(0.204 \times 10^{-6})}$$

$$= 817 \text{ V.}$$

เพราะฉะนั้นจะเกิดแรงดันตก 817 V. เมื่อเราจ่าย load ที่พิกัด

บทที่ 7

เทคนิคการวัดแรงดันสูง

การวัดแรงดันสูงมีข้อแตกต่างจากการวัดแรงดันต่ำ ที่สำคัญคือ อุปกรณ์ตัวชี้ (Indicators) หรือผู้สังเกตจะต้องอยู่ห่างจากจุดที่ต้องการวัดมากพอที่จะไม่เกิดอันตราย และต้องอาศัยการคำนวณที่ถูกต้องเหมาะสม ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันที่จะวัด ถ้าแรงดันสูงมากขึ้น ระยะการคำนวณและระยะห่างของผู้วัดจะต้องมากขึ้น การวัดแรงดันสูงจึงต้องใช้เทคนิคพิเศษบางประการ โดยอาศัยอุปกรณ์และเครื่องวัดช่วย ลักษณะสมบัติที่ต้องการของอุปกรณ์และเครื่องวัดที่สำคัญได้แก่ ความถูกต้องเที่ยงตรง ความไวต่อสัญญาณที่ต้องการวัด ความเชื่อถือได้ ชัด ความสามารถของเครื่องวัด ความเร็วของเครื่องวัดที่จะติดตามการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการวัดแรงดันที่เกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาสั้นๆ เช่น แรงดันอิมพัลส์ เป็นต้น

MEASUREMENT OF HIGH VOLTAGES

(Note "+" means "in combination with")

| Type of voltage Quantity | d.c. voltages | a.c. voltages | Impulse voltages |
|-----------------------------|---|--|--|
| Mean value | 3.3 (3.6.4 A) 3.4 | not applicable | not applicable |
| r.m.s. value | 3.2 3.6.4 A + 3.2 | 3.2 3.6.4 B } + 3.2 3.6.4 C } | not applicable |
| Crest values | 3.1 3.4 (special des.) | 3.1 3.4 (special des.) | 3.1 3.6.4 (spec. des.) + 3.5.2 B } 3.5.3 } |
| Voltage shape | Mean value + Ripple by CRO + 3.6.4 B { 3.6.4 C } | 3.4 (special des.) CRO + { 3.6.4 C 3.6.4 B | CRO + 3.6.4 (spec. des.) |

ตารางที่ 7-1

เทคนิคการวัดแรงดันสูงขึ้นอยู่กับชนิดของแรงดัน ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ชนิดคือ แรงดัน กระแสสลับ แรงดันกระแสตรง และแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งสองชนิดหลังนี้มักจะหมายถึงแรงดันที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการทดลอง ส่วนชนิดแรก (แรงดันกระแสสลับ) นั้นจะมีการวัดทั้งภายในห้องปฏิบัติการและในระบบส่งจำหน่าย ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะการวัดแรงดันกระแสตรงและกระแสสลับ

การวัดแรงดันสูงกระแสสลับและการวัดแรงดันสูงกระแสตรง

การวัดแรงดันกระแสสลับภายในห้องปฏิบัติการอาจวัดได้ด้วยวิธีดังต่อไปนี้ คือ

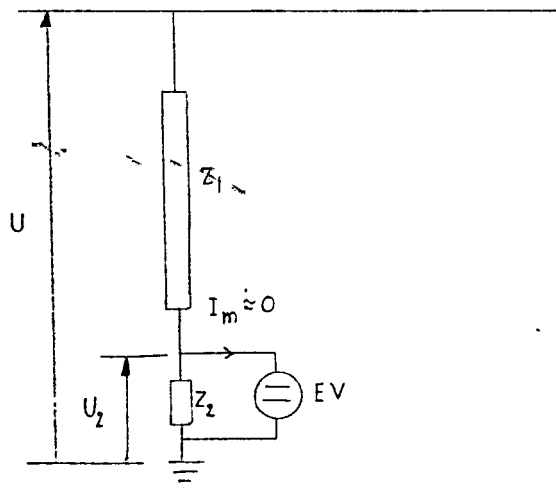
1. โวลท์มิเตอร์แบบอิเล็กทรอนิกส์สถิตย์ (Electrostatic Voltmeter)
2. ช่องว่างทรงกลม (Sphere Gap)
3. อิมพีแดนซ์ต่ออันดับ (Series Impedance)
4. โวลเตจดีไวเดอร์ (Voltage Divider)

ในการทดลองวิจัยครั้งนี้ เราใช้วิธีการวัดโดยวิธีการ Voltage Divider โดยใช้ อิมพีแดนซ์ค่าสูงมาต่ออันดับกัน ซึ่งมีวิธีการและรายละเอียดดังนี้

โวลเตจดีไวเดอร์วัดแรงดันสูง

โวลเตจดีไวเดอร์เป็นอุปกรณ์วัดแรงดัน ทำหน้าที่แบ่งทอนแรงดันสูงๆ ออกเป็นส่วนแรงดันต่ำพอที่จะใช้โวลท์มิเตอร์ หรือเครื่องมือวัดแรงดันต่ำๆ วัดค่าได้ โดยใช้อิมพีแดนซ์แรงสูงต่อเข้ากับแรงดันที่จะวัดแล้วแบ่งเอาแรงดันที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์แต่เพียงส่วนน้อยออกมาวัด ฉะนั้นโวลเตจดีไวเดอร์จึงแบ่งออกเป็นภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำ อีกข้างหนึ่งมักจะต่อกับดิน ตรงรอยต่อระหว่างภาคแรงสูงกับภาคแรงต่ำนี้เองจะเป็นจุดที่ต่อออกมาเข้าเครื่องวัดแรงต่ำ โวลท์มิเตอร์หรือเครื่องมือวัดแรงต่ำที่จะนำมาต่อเข้ากับดีไวเดอร์นี้ จะต้องเป็นเครื่องมือที่ใช้พลังงานน้อยที่สุด นั่นคือจะต้องมีค่าอิมพีแดนซ์ทางเข้าสูงมากๆ เช่น อิเล็กทรอนิกส์สถิตย์โวลท์มิเตอร์ กล่าวคือ อิมพีแดนซ์ของเครื่องมือวัดจะต้องไม่มีผลกระทบต่ออัตราส่วนของอิมพีแดนซ์ของดีไวเดอร์

ดังรูป 7-2



รูป 7-2 โวลเตจดีไวเดอร์

- Z_1 เป็น อิมพีแดนซ์ภาคแรงดันสูง
 Z_2 เป็น อิมพีแดนซ์ภาคแรงดันต่ำ
 U คือ แรงดันที่ต้องการวัด
 U_2 คือ แรงดันที่แบ่งออกมาวัด ซึ่งเป็นแรงดันคร่อมภาคแรงต่ำ Z_2
 EV เป็น เครื่องวัดที่มีอิมพีแดนซ์ทางเข้าค่าสูง เมื่อวัด U_2 ด้วยเครื่องวัด จึงคำนวณหาแรงดันที่ต้องการวัด ได้จากสมการสัมพันธ์

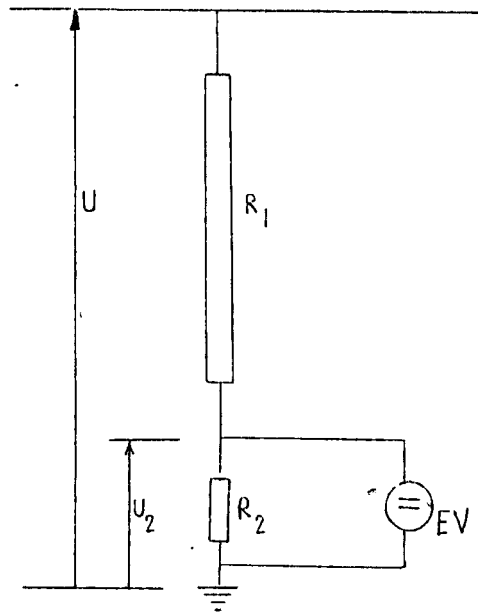
$$U = U_2 \cdot (Z_1 + Z_2) / Z_2$$

วัดแรงดันสูงด้วยโวลเตจดีไวเดอร์ ความผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ เนื่องจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจะหมดไป เมื่ออิมพีแดนซ์ Z_1 และ Z_2 เป็นวัตถุหรือสารประเภทเดียวกัน ความถูกต้องจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของอิมพีแดนซ์ ซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงไปเมื่อความถี่เปลี่ยน ความเที่ยงตรงของเครื่องวัด ปัญหาที่ทำให้ผลของการวัดผิดพลาดอีกประการหนึ่งก็คือ องค์ประกอบเปลี่ยนแปลงไม่เป็นเชิงเส้น เช่น ผลกระทบจากความร้อน อิมพีแดนซ์ที่ใช้ทำโวลเตจดีไวเดอร์อาจเป็นความต้านทานหรือคาปาซิเตอร์ก็ได้ แบบความต้านทานมักใช้วัดแรงดันสูงกระแสตรง ใช้วัดแรงดันกระแสสลับได้ในย่านไม่เกิน 20-30 KV การวัดแรงดันกระแสสลับด้วยโวลเตจดีไวเดอร์ใช้แบบคาปาซิเตอร์

โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน

โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานประกอบด้วย ความต้านทานภาคแรงสูง R_1 และความต้านทานภาคแรงต่ำ R_2 ดังในรูปที่ 7-3 ความต้านทานที่ใช้จะเป็นทำนองเดียวกับความต้านทานที่ใช้ต่ออันดับกับแอมมิเตอร์วัดแรงดันสูงดังกล่าวแล้ว คือ จะต้องคำนึงถึงขีดจำกัดของกระแสที่ไหลผ่าน การฉนวน เป็นต้น สารที่ใช้ทำความต้านทาน R_1 และ R_2 ควรเป็นสารชนิดเดียวกัน เพื่อมิให้เกิดความผิดพลาดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานอันเนื่องมาจากอุณหภูมิ นั่นคือแรงดันที่วัดได้จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของความต้านทานทั้งสอง คือ

$$U = U_2 (R_1 + R_2) / R_2$$



รูป 7-3 โวลต์เจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน

ความถูกต้องก็จะขึ้นอยู่กับความถูกต้องของค่าความต้านทาน และขึ้นอยู่กับความเที่ยงตรงของเครื่องวัดแรงดันคร่อมความต้านทานภาคแรงต่ำ R_2 ซึ่งจะต้องเป็นโวลมิเตอร์หรือเครื่องวัดที่มีอินพุตอิมพีแดนซ์สูง เช่น โวลท์มิเตอร์แบบอิเล็กทรอนิกส์ หรือโวลท์มิเตอร์แบบอิเล็กทรอนิกส์ ปัญหาสำคัญที่ควรให้ความสนใจประการหนึ่งก็คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวเนื่องจากศักย์แรงสูง ฉะนั้นฉนวนที่หุ้มความต้านทานจะต้องทนต่อแรงดันสูงได้ ในขณะเดียวกัน กระแสต่ำที่ไหลตามผิว ทำให้ความวิตถลผลลัดได้ถ้าหากความต้านทานที่ใช้วัดแรงดันนั้นสูงเกินไป ฉะนั้นค่าความต้านทานจึงมีขีดจำกัดบน คือ จะต้องไม่สูงจนเกินไป กล่าวคือ กระแสที่วัดจะต้องไม่ต่ำจนเกินไป ($I \geq 0.1 \text{ mA}$, $R \leq 10 \text{ M-ohm/KV}$) ฉะนั้น การเลือกฉนวนที่จะนำมาใช้ยึดความต้านทานหรือบรรจุความต้านทานต้องเลือกให้เหมาะสม และอาจจะช่วยแก้ปัญหานี้ได้โดยออกแบบการจัดวางความต้านทานและการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าในบริเวณล้อมรอบความต้านทานซึ่งอาจใช้ความต้านทานย่อย มาต่ออันดับกันบนแท่งฉนวนในลักษณะเป็นเกลียวสว่านจุ่มในน้ำมัน หรือ

ใช้ก๊าซอัดความดัน เช่น ก๊าซ SF₆ เป็นต้น

สำหรับในงานวิจัยนี้ ได้ออกแบบโวลเตจดีไวเดอร์ความต้านทานขนาด 300 M-ohm โดยใช้ค่า R ตัวละ 1 M-ohm จำนวน 300 ตัว มาต่ออนุกรมกันและติดตั้งบนแผ่นเบกาไลต์ เพื่อป้องกันการเกิดโคโรนา จึงต้องนำไปชุบน้ำยาเรซินอีกทีหนึ่ง

บทที่ 8.

การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

จากการศึกษาขั้นตอนต่างๆในการออกแบบวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง พร้อมกับสร้างเครื่องต้นแบบขึ้นมา เพื่อศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง ดังนั้นจะทำการทดสอบเครื่องนี้โดยทำการทดสอบ 2 ขั้นตอน คือ

1. ทำการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า
2. ทำการทดสอบวงจร VOLTAGE MULTIPLIER ($n = 5$ ชั้น)

ซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวต่อไป

1. การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า : ผลการทดสอบแสดงดังตารางข้างล่างนี้

| V_{in} (volt) | V_{out} (volt) |
|-------------------|--------------------|
| 0 | 0 |
| 30 | 420 |
| 60 | 800 |
| 90 | 1,250 |
| 120 | 1,600 |
| 150 | 2,000 |
| 180 | 2,350 |
| 210 | 2,800 |
| 220 | 2,900 |

ตารางแสดงผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า

2. ผลการทดสอบวงจร VOLTAGE MULTIPLIER : ผลการทดสอบแสดงดังตารางข้างล่างนี้

| $U_T (IN)$ | $U_T (OUT)$ | I_d | U_d | U_{max} | U_{min} | $U_{no load}$ | ΔU | $\%U$ |
|------------|-------------|-------|-------|-----------|-----------|---------------|------------|-------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 30 | 420 | 19 | 5854 | 5854 | 4953 | 5940 | 86 | 451 |
| 60 | 800 | 31 | 10657 | 10657 | 9757 | 11314 | 657 | 450 |
| 90 | 1250 | 48 | 16511 | 16511 | 15761 | 17678 | 1116 | 375 |
| 120 | 1600 | 67 | 22140 | 22140 | 21014 | 22627 | 487 | 563 |
| 150 | 2000 | 85 | 28144 | 28144 | 27393 | 28284 | 140 | 376 |
| 180 | 2350 | 103 | 33022 | 33022 | 32272 | 33234 | 212 | 375 |
| 210 | 2800 | 121 | 39026 | 39026 | 37900 | 39598 | 572 | 563 |
| 220 | 2900 | 127 | 40902 | 40902 | 39401 | 41012 | 110 | 750 |

ตารางแสดงผลการทดสอบวงจร VOLTAGE MULTIPLIER

เมื่อ

$U_T (IN)$ คือ แรงดันที่จ่ายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า (volt)

$U_T (OUT)$ คือ แรงดันของหม้อแปลงที่จ่ายให้กับวงจร VOLTAGE MULTIPLIER (volt)

I_d คือ กระแส OUTPUT ของวงจร VOLTAGE MULTIPLIER (mA)

U_d คือ แรงดันที่ OUTPUT ของวงจร VOLTAGE MULTIPLIER (volt)

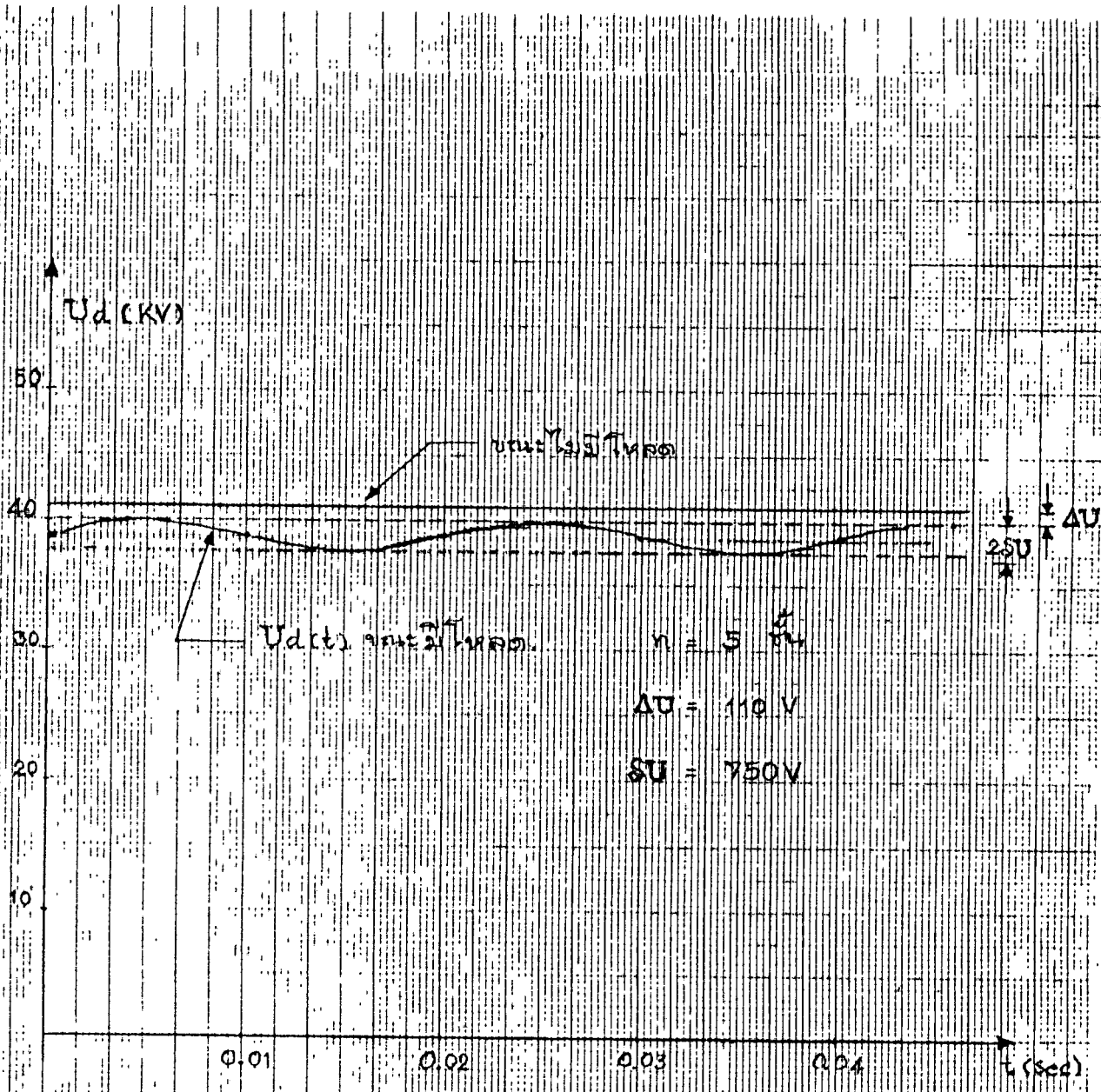
ΔU คือ แรงดันตกเนื่องจาก Loss ต่างๆ : $U_{no load} - U_{max}$ (volt)

$\%U$ คือ แรงดันระลอก : $(U_{max} - U_{min})/2$ (volt)

U_{max} คือ แรงดันที่ OUTPUT ของวงจรที่มีค่าสูงที่อ่านได้

U_{min} คือ แรงดันที่ OUTPUT ของวงจรที่มีค่าต่ำที่อ่านได้

$U_{no load}$ คือ $U_T (OUT) \cdot (2)^{1/2} \cdot (10)$



กราฟแสดงแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ 5 พัลส์และ 2 พัลส์

บทที่ 9

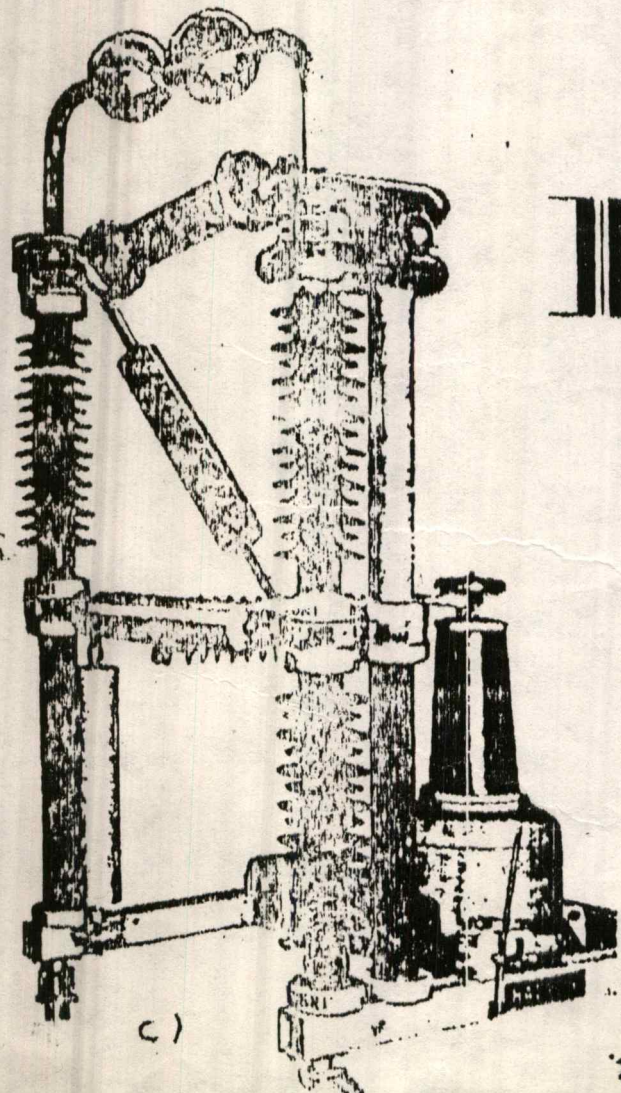
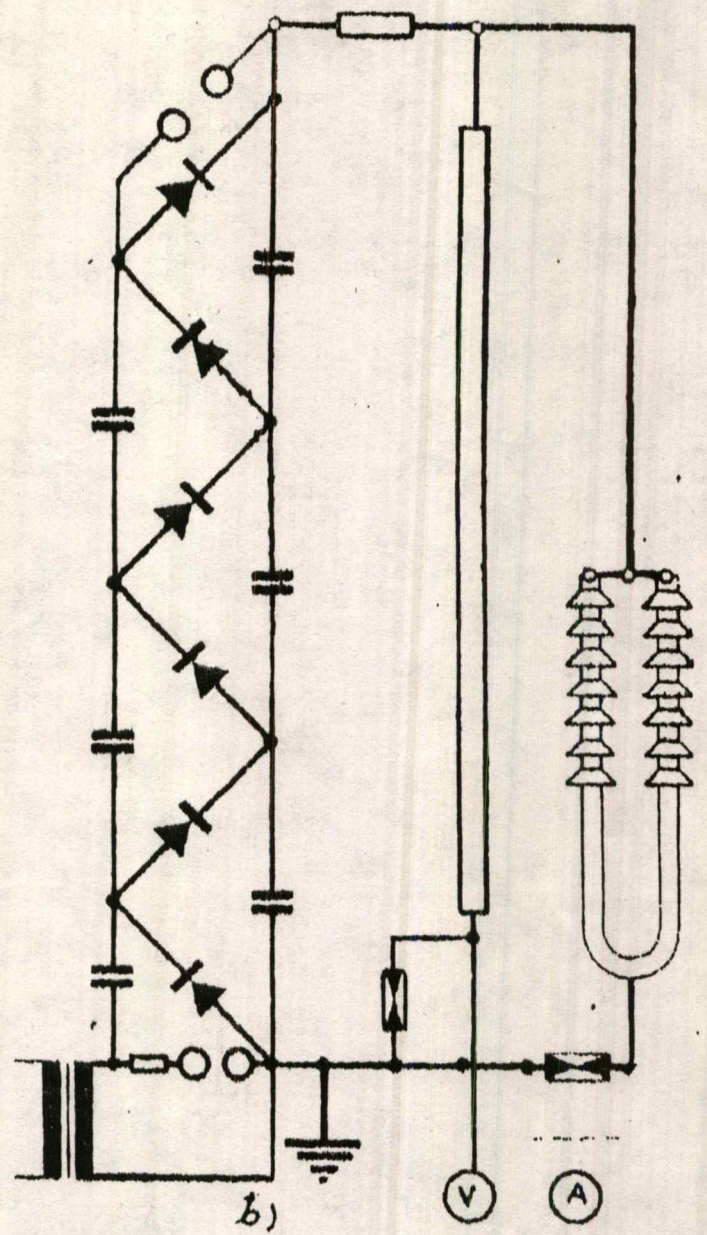
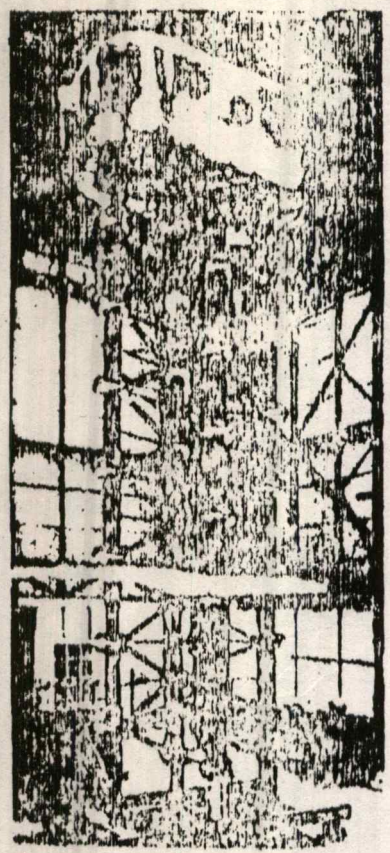
ปัญหาและวิจารณ์ผลการทดสอบ

จากการออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง ในปริภูมิตฤษฎีฉบับนี้ เราอาศัยหลักการแรงดันสองเท่ามาต่อกันหลายๆ ชั้นเพื่อเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้น โดยเราใช้วงจรแรงดันสองเท่ามาต่อกัน 5 ชั้น ซึ่งถ้าเป็นตามทฤษฎีแล้วเครื่องนี้จะสามารถสร้างแรงดันได้ถึง 42,426 โวลต์ หรือประมาณ 42.42 กิโลโวลต์ แต่จากการทดสอบเครื่องนี้สามารถสร้างได้เพียง 40,902 โวลต์ หรือประมาณ 40 กิโลโวลต์ สำหรับเทคนิคในการวัดนั้น เราจะใช้หลักการของโวลต์เตจดีไวเดอร์ซึ่งใช้โหลดความต้านทาน 300 เมกกะโอห์ม ต่ออนุกรมกับแอมป์มิเตอร์ขนาด 0-300 ไมโครแอมป์ ซึ่งได้กระแสออกมา 127 ไมโครแอมป์ เกิดแรงดันตกไป 110 โวลต์ และแรงดันระลอก 750 โวลต์

จากการทดสอบหม้อแปลง เราจะได้เอาท์พุทเพียง 2,900 โวลต์ ซึ่งถ้าตามทฤษฎีแล้ว จะได้ 3,000 โวลต์ ซึ่งค่าที่ผิดเพี้ยนไปนั้นเราคิดว่าน่าจะเกิดมาจากความสูญเสียต่างๆที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงเอง

จากการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงที่ผ่านมา ถ้าเราพิจารณาตามทฤษฎีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงแล้ว เราจะได้แรงดันที่ผลิตออกมาถึง 42.42 กิโลโวลต์ แต่ในปริภูมิตฤษฎีฉบับนี้ สามารถสร้างได้เพียง 40 กิโลโวลต์เท่านั้น ซึ่งทางผู้จัดทำก็คิดว่าน่าจะมาจากแรงดันตกและแรงดันระลอกที่เกิดขึ้นในเครื่องเอง

ในการจัดทำปริภูมิตฤษฎีฉบับนี้ แม้ว่าจะได้ผลการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่เป็นจริงก็ตาม แต่ถ้าเราพิจารณาดูแล้ว จะเห็นว่าประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงที่สร้างขึ้นมา นั้น ยังมีประสิทธิภาพที่ไม่ค่อยจะดีนักยังมีแรงดันตกและแรงดันระลอกสูงอยู่ ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่พึงปรารถนา ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง แต่อย่างไรก็ตามคณะผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลการทดลองค้นคว้าโครงการวิจัยสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงในครั้งนี้ พอลที่จะเป็นประโยชน์และเป็นแนวทางสำหรับผู้อ่านและผู้สนใจในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งสามารถนำไปศึกษาค้นคว้าทดลองเพื่อที่จะได้พัฒนาให้ได้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงที่มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นไปในอนาคต



a) อุปกรณ์ผลิตแรงดัน DC 2500 kV 200 mA
Haefely 1974

b) วัดแรงดัน DC ด้วยความต้านทานต่ออินคัส
กับแอมมิเตอร์

c) อุปกรณ์ผลิตแรงดัน DC แบบขั้นบันได 2 ชั้น
400 kV 8 mA

$C = 15 \text{ nF } 200 \text{ kVDC}$

และวัดแรงดันด้วยคีโวลต์แบบความต้านทาน

$R_m = 2 \times 800 \text{ M}\Omega \text{ } 400 \text{ kVDC}$

charging times of several minutes may be required. The source, including the storage capacitance, should be adequate to supply the leakage and absorption currents and any internal and external partial discharge currents without excessive voltage drops which might influence the test results. For tests on internal insulation, these currents are usually small; but when testing wet insulators, leakage currents of the order of tens of milliamperes, or predischARGE pulses of the order 10^{-2} C can be encountered.

For tests on contaminated insulators, special circuits giving large output currents are necessary. Provisionally, it is recommended that the source should be such that when a pulse current of 500 mA is drawn for a duration of 500 ms the voltage drop during each pulse or a sequence of pulses should not exceed 5 percent when the repetition rate is once per second.

2.2.2.3 Measurement of the Test Voltage.

2.2.2.3.1 *Measurement with Approved Devices.* The measurement of the arithmetic mean value, the maximum value, the ripple factor, and any transient drop in the test voltage should, in general, be made with devices which have passed the approval procedure referred to in Section 3, Measuring Devices. Attention is drawn to the requirements on response characteristics of devices used for measuring ripple or transients.

2.2.2.3.2 *Measurement with Sphere-Gaps, in Accordance with Section 5.* The measurement of only the maximum values of the test voltage can be made with a sphere-gap. The procedure usually consists in establishing a relationship between the spacing at which disruptive discharges occur and some other circuit variable (voltage or current) related to

the test voltage (see Section 5: Voltage Measurement by Means of Sphere Gaps).

The relationship may be dependent on the presence of the test object and the sphere-gap, the precipitation in wet tests, etc. Hence, it is important that these conditions are the same during the sphere-gap calibration and the actual test, except that during the test, the sphere-gap may be opened sufficiently to prevent sparkover. Attention is drawn also to the possibility of erratic sphere-gap measurements with direct voltage due to contamination in the atmosphere.

The calibration is preferably made at 100 percent of the test voltage, but for tests on objects with non-self-restoring insulation, extrapolation may be made from a value not lower than 80 percent of this voltage. Extrapolation may be unsatisfactory if the current in the test circuit varies nonlinearly with the applied voltage.

2.2.2.4 *Measurement of the Test Current.* When measurements of current through the test object are made, a number of separate components may be recognized which differ from each other by several orders of magnitude for the same test object and test voltage. They are:

(1) The capacitance current, due to the initial application of the test voltage and to any ripple or other fluctuations imposed on it.

(2) The dielectric absorption current, due to slow charge displacements within the insulation and persisting for periods of a few seconds up to several hours. This process is partially reversible; currents of opposite polarity being observed when the test object is discharged and short-circuited.

(3) The continuous leakage current, which is the final steady direct current

attained at constant applied voltage after the above components have decayed to zero.

(4) Partial discharge currents.

Measurement of the first three components necessitates the use of instruments covering a wide range of current magnitudes. It is important to ensure that the instrument, or the measurement of any one component of the current, is not adversely affected by the other components. From the observed current variation with time, in non-destructive tests, information may sometimes be obtained concerning the condition of the insulation.

The relative magnitude and the importance of each component of current depend on the type and the condition of the test object, the purpose for which the test is being made, and the duration of the test. Accordingly, the measurement procedures should be specified by the committee developing equipment standards, especially when it is required to distinguish a particular component.

Measurements of partial-discharge pulse currents are made with special instruments which are dealt with in IEEE Std 454-1973, Recommended Practice for the Detection and Measurement of Partial Discharges (Corona) During Dielectric Tests.

2.2.3 Test Procedures. The disruptive discharge voltage of a test object is subject to statistical variations. Some guidance on methods for determining voltages giving a specified disruptive discharge probability is presented in the Appendix.

2.2.3.1 Rated Withstand Voltage Tests. The voltage should be applied to the test object starting at a value sufficiently low to prevent any effect of overvoltage due to switching transients. It should be raised sufficiently slowly to permit ac-

curate reading of the instruments, but not so slowly as to cause unnecessary prolongation of stressing of the test object near to the test voltage. Generally, these requirements are met if the rate of rise above 75 percent of the estimated final voltage is about 2 percent of the test voltage per second. It should be maintained for the specified time and then reduced by discharging the smoothing capacitor through a suitable resistor. The requirements of the test are generally satisfied if no disruptive discharge occurs on the test object.

The polarity of the voltage or the order in which voltages of each polarity are applied, and any deviation required from the above, should be specified by the appropriate apparatus standard.

2.2.3.2 Assured Disruptive Discharge Voltage Tests. The voltage should be applied and raised in the manner described in 2.2.3.1 until a disruptive discharge occurs on the test object. The value of the test voltage reached just prior to the disruptive discharge should be recorded. The requirements of the test are generally satisfied if this voltage is not higher than the assured disruptive discharge voltage on each one of a specified number of voltage applications.

2.3 Tests with Alternating Voltage

2.3.1 Definitions for Alternating-Voltage Tests.

2.3.1.1 Peak Value. The peak value of an alternating voltage is the maximum value, except that small high-frequency oscillations arising, for instance, from partial discharges are disregarded.

2.3.1.2 Root Mean Square Value. The rms value of an alternating voltage is the square root of the mean value of the

or on request in connection with a particular test, to ensure:

(a) That the scale factor of the measuring system has not changed from the value determined in accordance with 3.1.4.2.

(b) That the interference level is sufficiently low.

3.2 Measuring Systems for Direct Voltage

3.2.1 Quantities to be Measured, Accuracies Required, and Requirements of the Measuring System. The general requirements for direct voltage measurement are as follows:

to measure the mean value of the voltage with an error of not more than 3 percent

to measure the peak-to-peak ripple amplitude with an error not more than 10 percent of the actual ripple amplitude or not more than 1 percent of the mean value of the direct voltage, whichever is the larger.

NOTE: In certain cases, it may be necessary to detect and measure transient components. No requirements for this are given here, but some guidance may be obtained from the subsection of Section 4 dealing with impulse voltage measurements.

These requirements will be met if the system meets the general requirements of 3.1.4 and the performance tests specified show that:

(a) The voltage ratio of the voltage divider or the value of the high-voltage measuring impedance is stable and known with an error of not more than 1 percent.

(b) The current drawn by the voltage divider or the high-voltage impedance is

not less than 0.05 mA (but see Note).

(c) The frequency response of the system used for measuring ripple voltage is adequate and known to within 10 percent for frequencies from the fundamental of the ripple frequency up to five times this frequency.

NOTE: In the case of high-impedance systems involving either a voltage divider or high-voltage measuring impedance, it may not be possible to comply with (a) and (b). In this case, an error of up to 3 percent is permitted if a standard instrument according to 3.1.4.1 is used for the measurement of the mean value, but this may result in the overall error slightly exceeding 3 percent which is still acceptable. This should be noted in the test report.

3.3 Measuring Systems for Alternating Voltages

3.3.1 Quantities to be Measured, Accuracies Required, and Requirements of the Measuring System. The general requirements for alternating voltage measurement are as follows:

to measure the peak or rms value of the voltage with an error of not more than 3 percent

to measure the amplitude of harmonics with an error not more than 10 percent of the harmonic amplitude or not more than 1 percent of the fundamental, whichever is the larger.

NOTE: In certain cases, it may be necessary to measure voltage transients superimposed on an alternating voltage. No requirements for this are given here, but some guidance may be obtained from the subsection of Section 4 dealing with impulse voltage measurements.

These requirements will be met if the system meets the general requirements of 3.1.4 and the performance tests specified show that:

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

การทดลอง

เรื่อง การสร้างแรงดันสูงกระแสตรง

วัตถุประสงค์ เพื่อให้นักศึกษาได้ศึกษาถึงเทคนิคการสร้างแรงดันสูงกระแสตรง โดยอาศัยหลักการของวงจรพื้นฐานจากวงจรแรงดันสองเท่ามาต่อซ้อนกันเข้าเป็นขั้นบันไดตามหลักการของวงจร COCKCROFT-WALTON

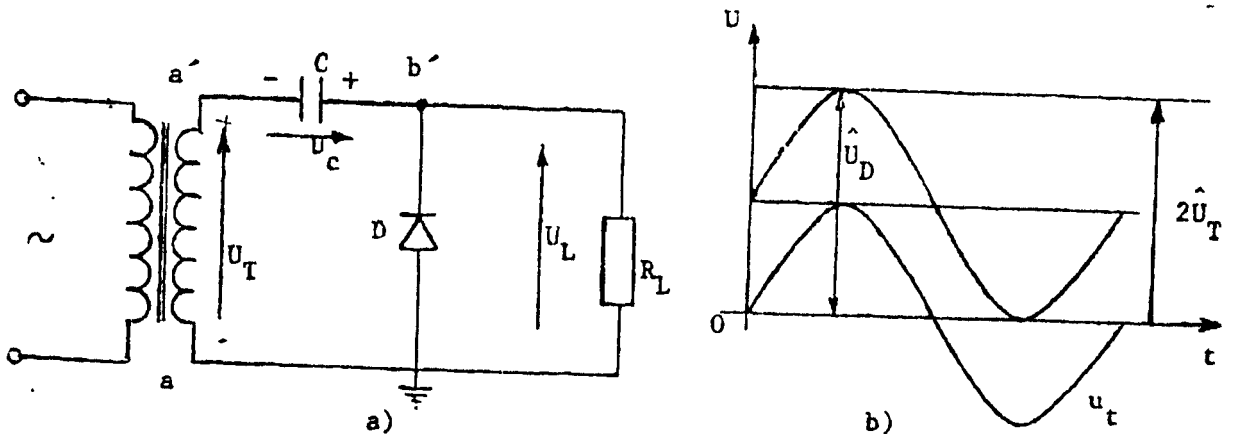
อุปกรณ์การทดลอง

| | |
|--|-----------|
| 1. Variac | 1 ตัว |
| 2. VOM | 1 ตัว |
| 3. Micro ammeter (0-300 uA) | 1 ตัว |
| 4. Oscilloscope | 1 เครื่อง |
| 5. สายไฟแบบหัว Jack สองข้างขนาดสั้น | 15 เส้น |
| 6. สายไฟแบบหัว Jack สองข้างขนาดยาว | 5 เส้น |
| 7. สายไฟแบบหัว Jack และหางปลาในตัวเดียวกัน | 3 เส้น |

ทฤษฎี

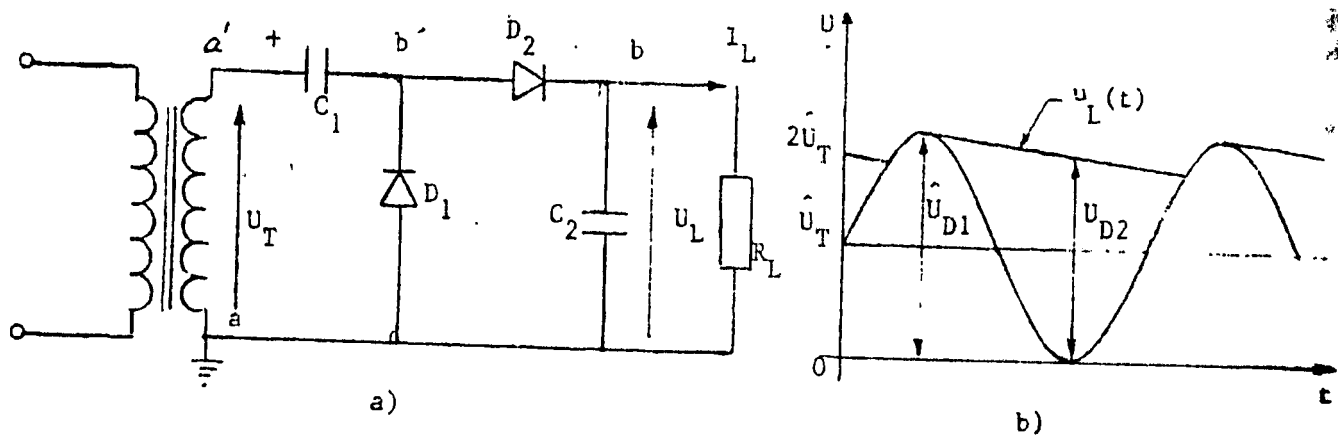
การสร้างแรงดันสูงกระแสตรง

การสร้างแรงดันสูงกระแสตรงนั้น สามารถทำได้โดยอาศัยวงจรพื้นฐานจากวงจรแรงดันสองเท่ามาต่อซ้อนกันเข้าเป็นวงจรขั้นบันไดตามหลักการของวงจร COCKCROFT-WALTON ซึ่งลักษณะของวงจรและทฤษฎีการทำงานของวงจรแสดงดังรูปที่ 1.



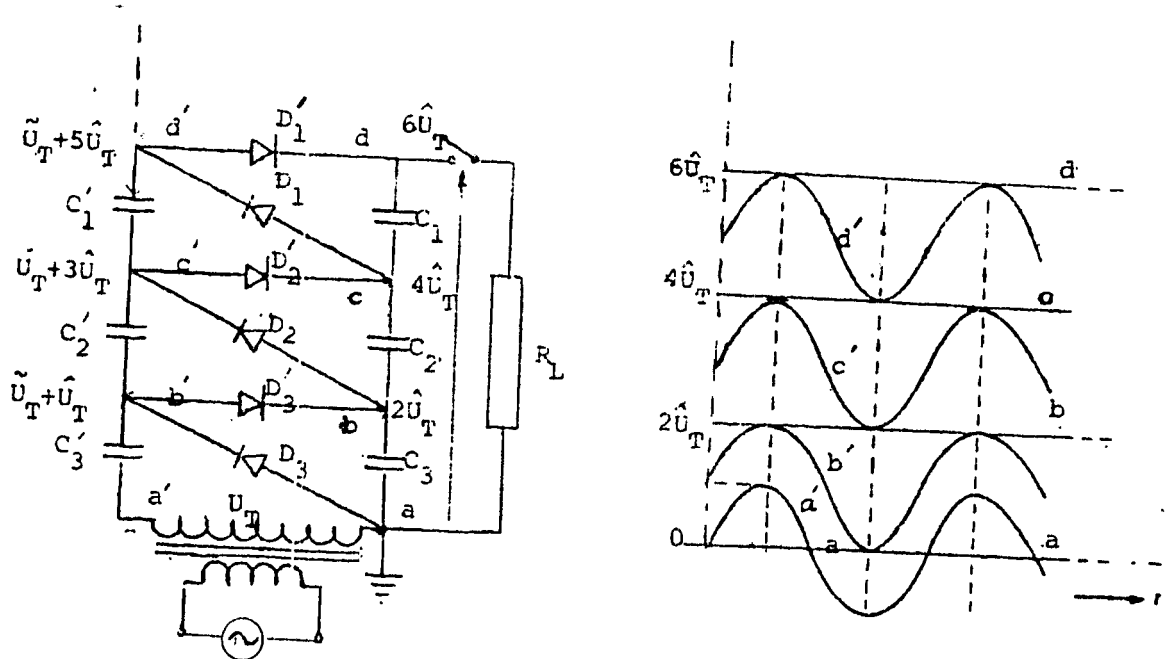
รูปที่ 1. วงจรแรงดันสองเท่า

จากรูปที่ 1a. เมื่อจุด a' เป็นลบ (ครึ่งไซเคิลลบ) ตัวเก็บประจุ C จะอัดประจุจนถึงค่ายอดของแรงดันหม้อแปลง คือ $U_T = U_C$ เมื่อจุด a เป็น 0 และเพิ่มขึ้นเป็นบวก (ในครึ่งไซเคิลบวก) จะทำให้แรงดันที่จุด b' ซึ่งเท่ากับผลรวมของแรงดันหม้อแปลงกับแรงดันคร่อม C ($U_T + U_C$) ถ้าแรงดันของหม้อแปลงขึ้นจนถึงค่ายอด U_T แรงดันที่จุด b' คือ U_L จะมีค่าสูงสุดเป็น 2 เท่า คือ $2\hat{U}_T$ ดังนั้น ไดโอดจะตัดทอนแรงดันได้อ่างน้อยเท่ากับ $2\hat{U}_T$ แรงดันที่ได้ที่โหลดจะแปรค่าตั้งแต่ $0 - 2\hat{U}_T$ ฉะนั้น ถ้าเอาแรงดันนี้ไปผ่านเวกต์ฟายเออร์และตัวเก็บประจุกรองกระแสดังรูปที่ 2. ก็จะทำให้ได้แรงดันกระแสตรงสูงเป็น 2 เท่าของแรงดันค่ายอดของหม้อแปลงด้านจ่ายกำลังออก



รูปที่ 2. วงจรสร้างแรงดันกระแสตรงแบบแรงดันสองเท่า

เมื่อนำวงจรดังรูปที่ 2. มาต่อซ้อนกันเป็นรูปขั้นบันไดดังรูปที่ 3. ก็จะได้แรงดันกระแสตรงสูงสุดเป็นทวีคูณดังรูป (ในรูปที่ 3. แสดงการต่อเพียง 3 ชั้นเท่านั้น)



รูปที่ 3. วงจรขึ้นบันไดสร้างแรงดันกระแสตรงตามวงจรของ COCKCROFT WALTON

วิธีการทดลอง

1. ทดสอบวงจรในการทดลอง

1.1. ก่อนจะทำการต่อวงจรควรตรวจสอบสายไฟภายในกล่องก่อนว่าขาดหรือว่าทับกันหรือเปล่าหรือไม่ ถ้ามีควรขยับออกให้ห่างกันอย่างน้อย 1.5 cm.

1.2. ถ้า Terminal กล่องไหนไม่แน่นกรุณาขันให้แน่นและจัดสายไฟใหม่

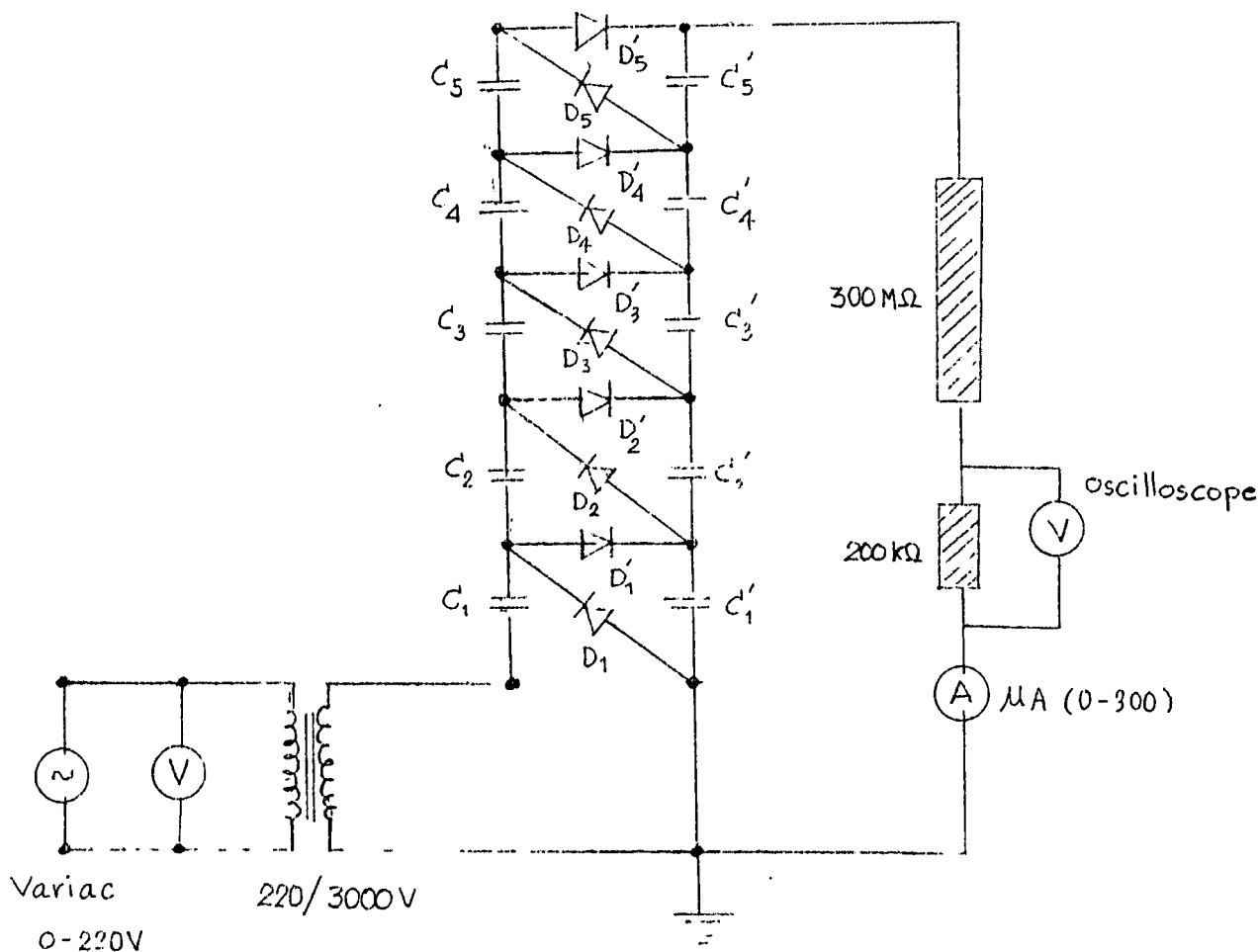
1.3. เวลาต่อวงจรเสร็จควรตรวจเช็คคลิกครั้งว่าสายไฟขาดหรือลัดกันหรือไม่ ถ้ามี กรุณาขยับออกให้ห่างกันอย่างน้อย 1.5 cm. มิฉะนั้นอาจมีการ leak เกิดขึ้น อาจเกิดการ spark ชั้นที่ C ทำให้ไดโอดพังได้

1.4. ขณะทำการทดลองกรุณาอยู่ห่างจากเครื่องประมาณ 50 cm. เพราะในระยะใกล้ๆ จะมีผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

1.5. ถ้ามีการ spark เกิดขึ้นทำการดูที่ไดโอดและทำการเปลี่ยนใหม่เพื่อที่จะทำให้เครื่องทำงานใหม่ได้

2. ขั้นตอนการทดลอง

2.1. ต่อวงจรตามรูปที่ 4 โดยตั้ง range ของ voltmeter (ใช้ VOM) ไปที่ 0-250V และ range ของ micro ammeter ไปที่ 0-300 uA



อนุกรมแรงดัน : C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 } เป็นอนุกรมแรงดัน Doubler
 D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 }

: $C'_1, C'_2, C'_3, C'_4, C'_5$ } เป็นอนุกรมแรงดัน Rectifier
 $D'_1, D'_2, D'_3, D'_4, D'_5$ }

วงจรรูปที่ 4

2.2. ค่าๆ ปรับแรงดัน U_T (IN) ที่หัวของหม้อแปลงด้าน Input ให้มีค่า 0, 30, 60, ตารางที่ 5.

| U_T (IN) | U_T (OUT) | I_d | U_d | U_{max} | U_{min} | U_{noload} | ΔU | ΔU |
|------------|-------------|-------|-------|-----------|-----------|--------------|------------|------------|
| 0 | 0 | | | | | | | |
| 30 | 420 | | | | | | | |
| 60 | 800 | | | | | | | |
| 90 | 1250 | | | | | | | |
| 120 | 1600 | | | | | | | |
| 150 | 2000 | | | | | | | |
| 180 | 2350 | | | | | | | |
| 210 | 2800 | | | | | | | |
| 220 | 2900 | | | | | | | |

ตารางแสดงผลการทดลองวงจร VOLTAGE MULTIPLIER

เมื่อ

- U_T (IN) คือ แรงดันที่จ่ายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า (volt)
- U_T (OUT) คือ แรงดันของหม้อแปลงที่จ่ายให้กับวงจร VOLTAGE MULTIPLIER (volt)
- I_d คือ กระแส OUTPUT ของวงจร VOLTAGE MULTIPLIER (μA)
- U_d คือ แรงดันที่ OUTPUT ของวงจร VOLTAGE MULTIPLIER (volt)
- ΔU คือ แรงดันตกเนื่องจาก Loss ต่างๆ : $U_{noload} - U_{max}$ (volt)
- ΔU คือ แรงดันระลอก : $(U_{max} - U_{min})/2$ (volt)
- U_{max} คือ แรงดันที่ OUTPUT ของวงจรที่มีค่าสูงที่อ่านได้
- U_{min} คือ แรงดันที่ OUTPUT ของวงจรที่มีค่าต่ำที่อ่านได้
- U_{noload} คือ U_T (OUT) $\cdot (2)^{1/2} \cdot (10)$

ตารางที่ 5. ตารางบันทึกผลการทดลอง

2.3. คำนวณหาค่าของ ΔU , σU , และ U_{average} พร้อมกับบันทึกค่าลงในตารางที่ 5.

2.4. คำนวณหาแรงดันตกและแรงดันระลอกจากสูตรการคำนวณและเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากรายการ

2.5. วาด Wave form (ดูจาก Oscilloscope) ที่ $U_T(1N) = 120 \text{ V}$ พร้อมกับบันทึกค่า U_{max} , U_{min} ที่อ่านได้จริงๆ ลงไปด้วย

2.6. สรุปผลการทดลอง

คำถามท้ายการทดลอง

1. เปรียบเทียบแรงดันตกและแรงดันระลอกที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณว่าเหมือนหรือต่างกันอย่างไร

2. อธิบายลักษณะของ Wave form ที่ $U_T(1N) = 120 \text{ v}$ กับที่ $U_T(1N) = 220 \text{ v}$ ว่าเหมือนหรือต่างกันอย่างไร

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์เรื่องเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงฉบับนี้ ได้รับความสำเร็จ
อย่างดียิ่ง ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณอย่างสูงยิ่งต่อ อาจารย์ ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล และอาจารย์
จงวัชร์ ญูเส็ง ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาของเราตลอดจนคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่ได้ให้
ความรู้ข้อเสนอนแนะและแนวทางการแก้ไขจุดบกพร่องพร้อมกับปัญหาที่เกิดขึ้น และก็ขอขอบคุณพิเศษเจ้า
หน้าที่สัตรีที่อำนวยความสะดวกในการเก็บเครื่องมือและพื้นที่ศูนย์วิจัยที่กรุณาให้ใช้สถานที่ในการประกอบ
กล่อง ตลอดจนเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน

สุดท้ายนี้ก็ขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่ให้กำลังใจและขอคืนหนี้บางประการ

ขอขอบพระคุณ

คณะผู้จัดทำ



บรรณานุกรม

1. ดร.สำรวย สังกัสะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, คณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 434, 2528
2. รศ.สัมพันธ์ หาญทะเล, เครื่องกลไฟฟ้า 1, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, พิมพ์ครั้งที่ 7., 2532
3. ปรินซ์ยานินพนธ์ เรื่องเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง ปีการศึกษา 2530
4. ปรินซ์ยานินพนธ์ เรื่องเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง ปีการศึกษา 2533
5. Kuffle, E., Abdullah, M, Pergamon Press, 1977
6. Aaidu, M.S. Kamaraju, V, Highvoltage Engineering, Tata McGraw - Hill Publishing Co., Ltd. 1982
7. K B Raina, K C Singnal, Y K Anand, Transmission and Distribution of Electrical Power, Tata McGraw-Hill Publishing Co., Ltd. 1985
8. A, Text Book of Electrical Technology by B.L. Theriaia, Nirag Prakashan, Ram Nagar New Delhi, 1986