



ปีการศึกษา 2530

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง

และ

เครื่องมือวัดกระแสไฟฟ้าแรงสูง

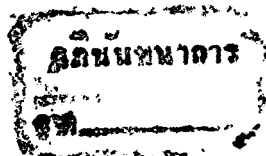
โดย

นายประเสริฐ แซ่จิว

นายประเสริฐ เมฆีกุล

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร. นิพนธ์ สุขุม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2530

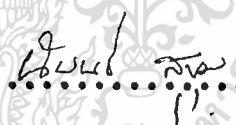
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

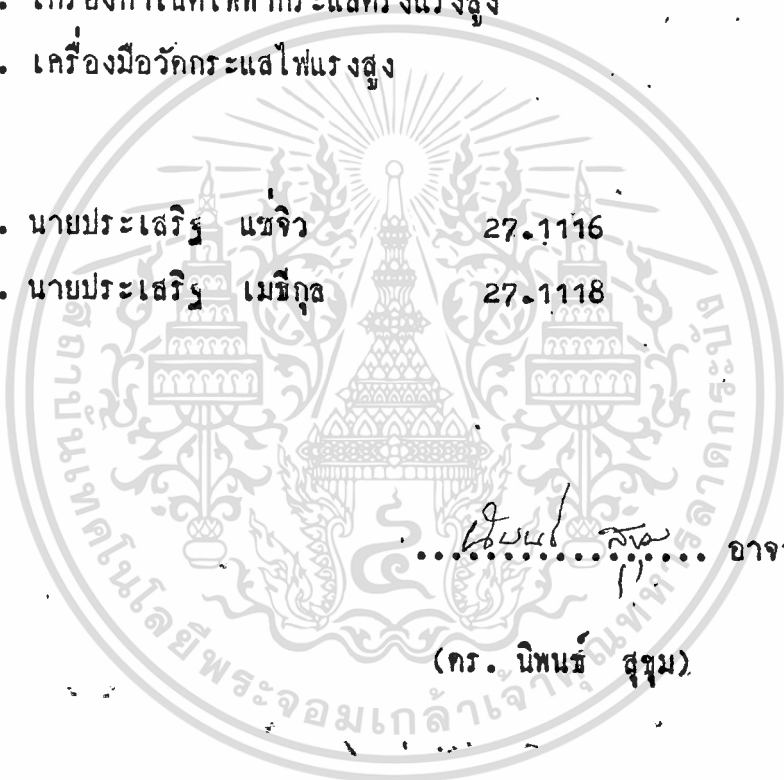
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

- เรื่อง 1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง
2. เครื่องมือวัดกระแสไฟแรงสูง

ผู้จัดทำ

1. นายประเสริฐ แซ่จิว 27.1116
2. นายประเสริฐ เมธิกุล 27.1118


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(คร. นิพนธ์ สุขุม)



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	1
บทที่ 1. บทนำ	3
บทที่ 2. การผลิตไฟฟ้าแรงสูงและการนำไปใช้ประโยชน์	7
บทที่ 3. VACUUM-TUBE OSCILLATORS	12
บทที่ 4. ทรานส์ฟอร์มเมอร์ (TRANSFORMERS)	17
บทที่ 5. VOLTAGE MULTIPLIER	31
บทที่ 6. สรุปผลการทดสอบ	40
บทที่ 7. เครื่องมือวัดกระแสไฟแรงสูง (THE ELECTROMETER VALVE)	41
7.1 จุดมุ่งหมาย และ ทฤษฎี	41
7.2 อุปกรณ์การทดลอง	46
7.3 ขั้นตอนการทดลอง	47
7.4 ผลการทดลอง	48
7.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง	52
7.6 สรุปผลการทดลอง	55
กิตติกรรมประกาศ	56
หนังสืออ้างอิง	57

สารบัญ

	หน้า
1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง	6
2. วงจรสายส่งแรงสูงกระแสตรง	9
3. FEEDBACK-OSCILLATOR CIRCUIT	13
4. TUNED-PLATE OSCILLATOR	16
5. HYSTERESIS LOSS	20
6. SQUARE HYSTERESIS LOOP	20
7. EDDY CURRENTS AND THE EFFECT OF CORE LAMINATION.	21
8. การแบ่งชนิดของหม้อแปลงไฟฟ้าตามลักษณะการวางแกนเหล็ก	22
9. แบบของการพันขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า	24
10. การเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับ IDEAL TRANSFORMER เมื่อไม่มี LOAD	28
11. การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก	29
12. วงจรสร้างแรงดันสองเท่า	31
13. วงจรสร้างแรงดันกระแสตรงสองเท่า	32
14. วงจรชั้นมันโคสร้างแรงดันกระแสตรงตามวงจรของ CREINACH	34
15. รูปคลื่นแรงดันกระแสตรงที่ได้จากวงจรชั้นมันโคขณะที่มีโหลด	35
16. กราฟแสดงคุณสมบัติของ I_a ต่อ E_g เมื่อให้ E_a คงที่	44
17. รูปวงจรการทดลอง THE ELECTROMETER VALVE	45
18. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log V$ กับเวลา	49
19. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคอนเดนเซอร์ค่าต่าง ๆ กับเวลา	50
20. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_a กับ E_g ที่ $E_a = 60$ โวลต์	51

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ แสดงถึงโครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูง และศึกษาเกี่ยวกับหลอดอิเล็กทรอนิกส์โทรมิเตอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงนี้อาศัยหลักการพื้นฐานของวงจรพหุคูณ คือคครอฟ-วอลตัน ซึ่งประกอบด้วย ส่วนออกสซิลเลเตอร์ , หม้อแปลงไฟฟ้า , ส่วนเพ้าเวอร์ แอมพลิฟายเออร์ และอุปกรณ์แบ่งแรงดัน จากทฤษฎี เราสามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าแรงสูงได้ถึง 50 กิโลโวลต์

หลอดอิเล็กทรอนิกส์โทรมิเตอร์ เป็นการศึกษาเกี่ยวกับอินพุทอิมพีแดนซ์โดยไร้หลักการคายประจุของตัวคอนเดนเซอร์ผ่านอินพุทอิมพีแดนซ์ของหลอดอิเล็กทรอนิกส์โทรมิเตอร์ตามกฎการทดลองที่รู้จักกันดีมากกว่า

$$v = v_0 \exp\left(-\frac{t}{R_g C}\right)$$

โดยที่ v เป็นแรงดันตกคร่อมตัวคอนเดนเซอร์ที่เวลา t

v_0 เป็นแรงดันเริ่มต้น

C เป็นค่าความจุไฟฟ้า

R_g เป็นค่าเอฟเฟ็คทีฟ อินพุท อิมพีแดนซ์ ของหลอดอิเล็กทรอนิกส์โทรมิเตอร์

ค่าอินพุท อิมพีแดนซ์ที่ได้จะมีขนาดเป็น 10^{10} โอห์ม

Abstract

This thesis presents the construction of a High Voltage Unit and the study of the Electrometer Valve. The High Voltage Unit employs the principle of the Cockcroft Walton voltage multiplier. It consists of an oscillator, a transformer, a power amplifier, a multiplier and a potential divider chain. The theoretical output of the High Voltage Unit is 50 KV. The Electrometer Valve is studied as regards its input impedance by the principle of the discharge of a condenser through the Electrometer input impedance according to the well-known experimental law : $V = V_0 \exp \left(-\frac{t}{R_g C} \right)$; where V is the condenser voltage at time t, V_0 the initial voltage, C the capacitance and R_g the effective input impedance of the Electrometer Valve. The results showed an input impedance of the order of $10^{10} \Omega$.

บทที่ 1

บทนำ

ในการวิจัยทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงนี้ มีการนำมาประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวางทั้งในระบบการผลิตและจำหน่ายไฟฟ้า ในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ การพัฒนาอุปกรณ์ทางไฟฟ้า ฯลฯ

ในการผลิตไฟฟ้าแรงสูงนั้นสามารถแบ่งเป็นประเภทต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. ไฟฟ้าแรงสูง กระแสตรง (HIGH D.C. VOLTAGES)
2. ไฟฟ้าแรงสูง กระแสสลับ ความถี่ปกติ (HIGH A.C. VOLTAGES OF POWER FREQUENCY)
3. ไฟฟ้าแรงสูง กระแสสลับ ความถี่สูง (HIGH A.C. VOLTAGES OF HIGH FREQUENCY)
4. ไฟฟ้าแรงสูงทรานเซียน-อิมพัลซ์ ช่วงเวลาสั้น ๆ เช่น แรงดันเกินเนื่องจากฟ้าผ่า (HIGH TRANSIENT OF IMPULSE VOLTAGES OF VERY SHORT DURATION SUCH AS LIGHTNING)
5. ไฟฟ้าแรงสูงทรานเซียน ช่วงเวลายาว เช่น สวิตชิง-เสริจ (TRANSIENT VOLTAGES OF LONGER DURATION SUCH AS SWITCHING SURGES)

ซึ่งในปฏิญานีพนธ์ฉบับนี้ จะกล่าวถึงการออกแบบและการสร้างเครื่องผลิตไฟฟ้าแรงสูง กระแสตรง โดยอาศัย หลักการของวงจรแรงดันพหุคูณของ ค็อคครอฟ-วอลตัน (COCKCROFT-WALTON VOLTAGE MULTIPLIER CURCUIT) ซึ่งมี ส่วนประกอบดังนี้

1. แวรีแอค (VARIAC) ที่ปรับค่าได้ 0 - 220 v.
2. วงจรบริดจ์-เรกติไฟเออร์ (BRIDGE-RECTIFIER)
3. วงจรออสซิลเลเตอร์แบบจูน เพลท เซอร์กิต (TUNED PLATE CIRCUIT OSCILLATOR) ซึ่งสามารถผลิตความถี่ 16 KHz
4. วงจร เพาเวอร์ แอมพลิไฟเออร์ (POWER AMPLIFIER) 100 W. OTL ขนาด 90 v. 2.5 A.
5. หม้อแปลงไฟฟ้า (TRANSFORMER) ขนาด 45/3500 v.
6. วงจรแรงคูณพหุคูณแบบ ค็อคครอฟ-วอลตัน (COCKCROFT-WALTON VOLTAGE MULTIPLIER CIRCUIT)
7. ส่วนภาระแบบตัวต้านทาน (RESISTIVE LOAD)

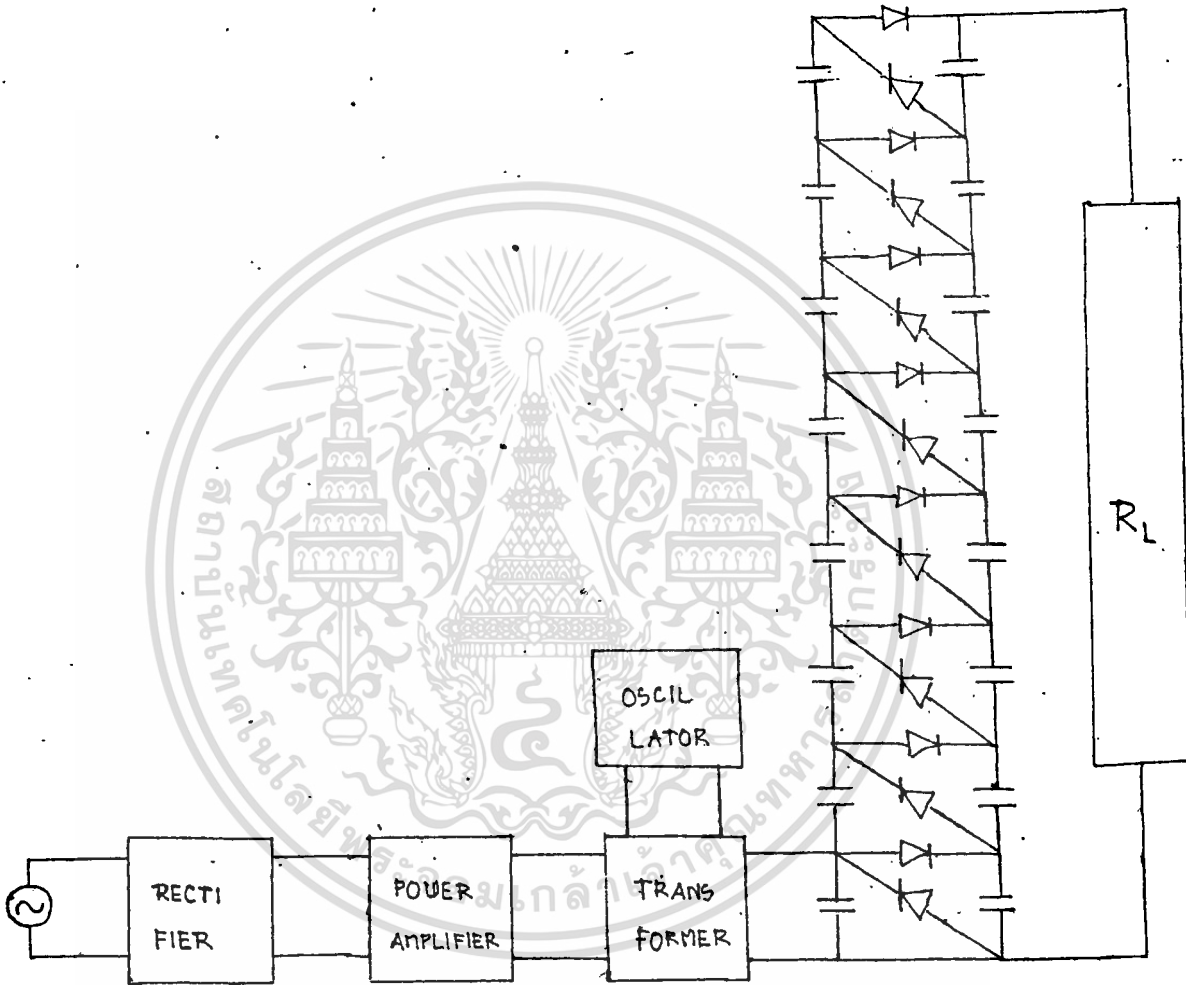
ซึ่งหลักการทำงานจะใกล้เคียงกันโดยละเอียดในบทต่อไป

ในการที่อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้วัดทางคานไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้กันอยู่ในประเทศไทยในปัจจุบันนี้ จะต้องซื้อจากต่างประเทศ ซึ่งมีราคาแพงมาก ถ้าเราสามารถสร้างขึ้นใช้เองได้จะเป็นการประหยัดทางด้านเศรษฐกิจเป็นอย่างมาก เมื่อตระหนักถึงข้อนี้ จึงได้มีการออกแบบสร้างอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดค่ากระแสไฟฟ้าแรงสูงขึ้น โดยใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์แอมพลิไฟเออร์ (ELECTROMETER AMPLIFIER) เป็นมาตรฐานในการสร้างเครื่องมือวัดขึ้นมา โดยค่าของกระแสไอออไนซ์ (IONISATION CURRENT) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 10^{-13} - 10^{-7} แอมแปร์ จะถูกวัดได้โดยวงจรอิเล็กทรอนิกส์แอมพลิไฟเออร์ แบบกระแสตรง (D.C. ELECTROMETER AMPLIFIER) ซึ่งใช้การทำงานของหลอดอิเล็กทรอนิกส์โทรมิเตอร์ เบอร์ ME. 1400 ซึ่งผลิตโดยบริษัท มุลลาร์ด จำกัด ของประเทศอังกฤษ (MULLARD CO.,Ltd.)

จากการที่หลอดอิเล็กทรอนิกส์ เบอร์ ME. 1400 (THE ME. 1400 ELECTROMETER VALVE) นี้มีคุณลักษณะพิเศษเฉพาะตัวหลายประการด้วยกัน ทั้งนี้เราจึงต้องศึกษาถึงลักษณะของหลอดนี้เสียก่อน ซึ่งในการทําวิจัยครั้งนี้ การทดสอบหาคุณลักษณะของหลอดอิเล็กทรอนิกส์ เบอร์ ME. 1400 เราใช้ส่วนประกอบต่าง ๆ ดังนี้ คือ

1. หลอดอิเล็กทรอนิกส์ เบอร์ ME. 1400
(THE ME. 1400 ELECTROMETER VALVE)
2. กริด-ไบแอส แบตเตอรี่ ขนาด 0 - 9 v.
(GRID-BIAS BATTERY 0 - 9 v.)
3. แอมป์-มิเตอร์ กระแสตรง ขนาด 0 - 3 mA.
(AMP-METER D.C. 0 - 3 mA.)
4. โวลต์-มิเตอร์ กระแสตรง ขนาด 0 - 5 v.
(D.C. VOLT-METER 0 - 5 v.)
5. ไฮ-เทนชัน แบตเตอรี่ ขนาด 0 - 80 v.
(HIGH-TENSION BATTERY 0 - 80 v.)
6. โปเทนเชียลมิเตอร์ ขนาด 0 - 20 K Ω .
(POTENTIALMETER 0 - 20 K Ω .)
7. ตัวความต้านทาน ขนาด 1 M Ω .
(RESISTORS 1 M Ω .)
8. ตัวคอนเดนเซอร์ ชนิดต่าง ๆ ค่าต่าง ๆ
(CONDENSERS)

ซึ่งหลักการทำงานจะไ้กล่าวโดยละเอียดในหัวข้อหลัง ๆ ต่อไป



รูป เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

การผลิตไฟฟ้าแรงสูง และการใช้ประโยชน์

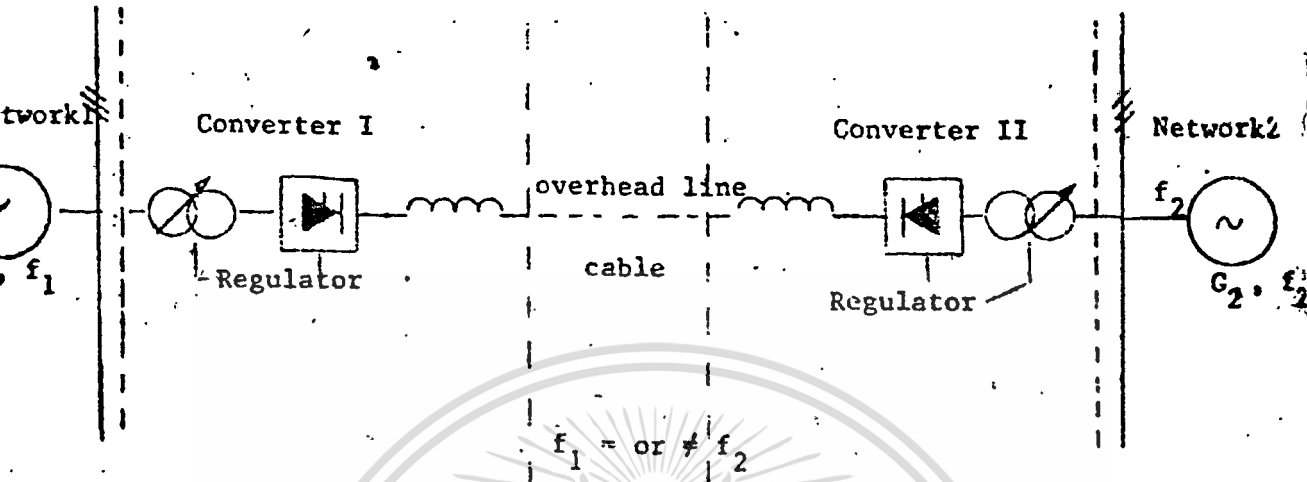
ไฟฟ้าแรงสูงตามความหมายที่ระบุไว้ในมาตรฐานสากล หมายถึง แรงดันไฟฟ้าที่สูงตั้งแต่ 100 โวลต์ ขึ้นไป มนุษย์ได้คุ้นเคยกับไฟฟ้าแรงสูงในชีวิตประจำวันมาแล้วตั้งแต่สมัยดึกดำบรรพ์โดยไม่รู้ตัว นั่นก็คือ ไฟฟ้าแรงสูงที่เป็นปรากฏการณ์ฟ้าผ่าตามธรรมชาติ อันเป็นผลของการเกิดกิสซาร์จหรือคายประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่ในก้อนเมฆ ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าสูงตั้งแต่ 10 ถึง 100 เมกกะโวลต์ จักเป็นแรงกดดันมากที่มนุษย์ยังไม่เคยสร้าง ไก่สูงขนาดนี้ แรงดันสูงที่มนุษย์สร้างขึ้นด้วยเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จำลองแรงดันฟ้าผ่า เพื่อใช้ในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีแรงดันสูงเพียง 6 เมกกะโวลต์ ส่วนแรงดันที่สูงที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการส่งพลังงานไฟฟ้าในปัจจุบัน (2527) สูงเพียง 1500 กิโลโวลต์แรงดันกระแสตรง และ 765 กิโลโวลต์แรงดันกระแสสลับ

การตั้งโรงจักรผลิตพลังงานไฟฟ้านักจะถูกกำหนดกวดยแหล่งกำเนิดพลังงาน ความเหมาะสมกับสภาวะแวดล้อม และเป็นไปตามหลักเศรษฐศาสตร์ กล่าวคือ เราไม่สามารถเลือกตั้งโรงไฟฟ้าให้อยู่ใกล้กับศูนย์กลางผู้ใช้ไฟฟ้าได้ความที่ต้องการเสมอไป โดยทั่วไปมักจะตั้งโรงจักรผลิตที่ไกล ๆ แหล่งกำเนิดพลังงาน เช่น พลังงานน้ำตกซึ่งอยู่ในภูมิประเทศที่เป็นภูเขาหรือเหมืองถ่านหินในภูมิภาคที่ห่างไกลบ้านชุมชน นั่นคือจะก่อสร้างพลังงานที่ผลิตได้ไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าเป็นระยะทางไกล การส่งพลังงานปริมาณมาก ๆ และเป็นระยะทางไกล ๆ ย่อมจะเกิดกำลังงานสูญเสีย P_c เนื่องจากความต้านทาน R ในสายส่ง กำลังงานสูญเสียจึงกล่าวนี้จะแปรตามกำลังสองของกระแส I คือ $P_c = I^2 R$

การลดกำลังงานสูญเสียในสายส่งให้น้อยลง ทำได้โดยลดกระแสให้น้อยลงแต่ต้องเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้น เพื่อให้สามารถส่งกำลังงานได้เท่าเดิม นี่คือเหตุผลที่ต้องใช้ระบบแรงดันสูงในการส่งพลังงาน (High Voltage Transmission System) ผลดีของการส่งพลังงานไฟฟ้าด้วยระบบแรงดันสูงก็คือ จะทำให้แรงดันตกในสายส่งลดน้อยลง ประสิทธิภาพของสายส่งก็ขึ้น เสถียรภาพความเชื่อถือได้ก็ดีขึ้น

ระดับแรงดันสูงที่ใช้ส่งพลังงานไฟฟ้าอยู่ในปัจจุบันนี้ อาจแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงด้วยกันคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะวิธีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 1 - 2 วงจรสายส่งแรงสูงกระแสตรง

ข้อดีของระบบสายส่งกระแสตรงก็คือ ไม่มีกำลังงานสูญเสียในฉนวนที่เกิดจากการสลับขั้วของรูปคลื่นแรงดัน ยิ่งกว่านั้นยังสามารถใช้ดินหรือน้ำทะเลเป็นสายกลับของระบบได้อีกด้วย

สายส่งแรงดันกระแสสลับระยะทางไกล ๆ จำเป็นต้องใช้เคเบิลเซ็คเตอร์, รีแอกเตอร์ หรือเครื่องจักรกลเชิงโคโรนา เพื่อชดเชยหรือแก้แผลกเคอร์กำลังงาน (power factor) ถ้าเป็นสายส่งแรงดันกระแสตรงไม่จำเป็นต้องมีการชดเชย ด้วยเหตุนี้เองจึงสามารถใช้เคเบิลเป็นสายส่งพลังงานในระยะทางไกล ๆ ได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งสายเคเบิลที่เดินในทะเล ซึ่งในลักษณะเช่นนั้นไม่อาจใช้ตัวชดเชยดังกล่าวได้

ในกรณีเชื่อมโยงระหว่างระบบใหญ่ ๆ ที่มีความถี่ของระบบแรงดันกระแสสลับต่างกันทำได้โดยเชื่อมด้วยสายส่งแรงสูงกระแสตรง ดังเช่นการเชื่อมโยงระบบส่งจ่ายระหว่างประเทศอังกฤษกับประเทศฝรั่งเศส

ส่งพลังงานด้วยระบบแรงดันเท่ากันลักษณะสายส่งเหมือนกัน จะเกิดโคโรนาในระบบสายส่งกระแสสลับมากกว่า จึงทำให้เกิดคลื่นรบกวนต่อระบบสื่อสารมากกว่า

ข้อเสียของสายส่งแรงดันกระแสตรงก็คือ สถานีเปลี่ยนกระแส (converter station) นั้นราคาแพงมาก เฉพาะอุปกรณ์เปลี่ยนกระแสราคาประมาณ 30 - 40% การแปลงแรงดันให้สูงขึ้นหรือต่ำลงทำไม่ได้อย่าง ระบบกระแสสลับ ที่สามารถแปลงแรงดันได้ด้วยการหม้อแปลงไฟฟ้า การคักวงจรโดยเซอริกทิเบรคเกอร์ก็ยังมีคุณลักษณะพิเศษ เพราะกระแสไม่ลัดลงเป็นศูนย์สองครั้งในหนึ่งไซเคิลเหมือนอย่างกระแสสลับ ซึ่งทำให้เกิดความยุ่งยากในการคักวงจรขณะที่มีไหลอด ปัญหาที่สำคัญอีกประการหนึ่งก็คือ เทคนิคการฉนวนซึ่งยังมีปัญหาที่แก้ไม่ไค การฉนวนแรงดันสูง กระแสตรงนั้นยุ่งมาก ความคงทนต่อแรงดันกระแสตรงของฉนวนแข็งและเหลวขึ้นอยู่กับแฟคเตอร์หลายประการ การค้นคว้าวิจัยในค่านี้นี้ยังมีน้อย ฉะนั้นความรู้ในค่านเทคนิคสายส่งแรงสูงกระแสตรงในปัจจุบันยังไม่มีความมั่นใจได้เหมือนอย่าง ระบบสายส่งแรงดันกระแสสลับ

ในห้องทดลองวิจัยโดยทั่วไปมักจะทำการทดลองหาความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนด้วยแรงดันกระแสตรง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทดลองกับฉนวนที่เป็นก๊าซ คุณลักษณะทางกายภาพ ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่พลังงานอาจรูเพราะห้ด้วยแรงดันกระแสตรงไคเช่นเดียวกัน สามารถหาผลการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากชัยของแรงดันไคอีกด้วยการใช้ประโยชน์สำหรับเครื่องมือพิเศษทางฟิสิกส์ เช่น ปฏิกรณ์เร่งอนุภาค

เครื่องมือผลิตรังสีเอกซ์ ซึ่งไคจากการยิงอิเล็กตรอนที่ฉนวนเครื่องเร่งอิคราเร็วลงบนแผ่นโลหะ (วูดแพรม และ ทองแดง เป็นต้น) เครื่องอิเล็กโตรไมโครสโคป อุปกรณ์ดังกล่าวในปัจจุบันใช้แรงดันสูงออกถึง 1000 KV ใช้ประโยชน์ในทางพลาสมากายภาพ (Plasma-physics) คือ สร้างพลาสมาที่อุณหภูมิสูงเพื่อทำการพิวรีนนิวเคลียร์

ทางการแพทย์ใช้สำหรับเครื่องฉายรังสีค่าง ๆ เครื่องทำไอโซทอป ประโยชน์ทางค่านเทคนิค ใช้ทดลองเกี่ยวกับวัสดุเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ เช่น ทำครอสลิงโพลิทีลีน โดยการฉายรังสีลงบนวัสดุนั้น การพ่นสีโดยใช้อิเล็กโตรสเปคตริกส์ ใช้กับเครื่องกรองเขม่าควัน เป็นต้น

ทางควมการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้กับระบบแรงดันกระแสตรง ก็มีความจำเป็นคองทดสอบการฉนวนด้วยแรงดันกระแสตรง เช่น เกี่ยวกับการทดสอบด้วยแรงดันกระแสสลับ แม้แต่อุปกรณ์บางอย่างที่ใช้กับแรงดันกระแสสลับยังคองทดสอบด้วยแรงดันกระแสตรงก็มี โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุปกรณ์ที่มีค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) สูง ๆ เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคเบิลแรงสูง หรือเคเบิลใยแก้ว ที่ใช้ในระบบส่งจ่าย ในกรณีของเคเบิลแรงสูงจำต้องทดสอบควมแรงดันกระแสตรง เพราะว่าเคเบิลนั้นโค้งงอ เสรีจเรียบร้อมแล้ว และมีความสูง ซึ่งไม่สามารถจะจำกัดตัวจ่ายกระแสสลับที่มีกำลังงานเพียงพอแก่การทดสอบได้ หากทดสอบควมแรงดันกระแสตรงสามารถทำได้ เพราะการทดสอบควมแรงดันกระแสตรงใช้กำลังไฟฟ้าน้อย เนื่องจากความต้านทานกระแสตรงของเคเบิลมีค่าสูงมาก การฉีกประจุจึงเป็นไปอย่างช้า ๆ จึงสามารถจำกัดตัวจ่ายกระแสตรงได้ง่ายกว่า



VACUUM-TUBE OSCILLATORS

ในแอมพลิฟายเออร์ (AMPLIFIER) กำลังไฟกระแสตรงจาก กำลังที่ในที่ ขั้ว PLATE ถูกแปลงโดยหลอดอิเล็กตรอนไปเป็นกำลังไฟกระแสสลับที่โหลด ขบวนการนี้ถูกควบคุมโดย แหล่งจ่ายภายนอกที่คือที่วางจร GRID แม้ว่าการควบคุม โวลเตจที่ GRID จะมีความจำเป็นเพื่อที่จะควบคุมกำลังไฟแต่กำลังไฟที่เอาท์พุทนั้นได้รับจากแหล่งจ่ายไฟตรงไม่ใช่จาก แหล่งของ โวลเตจที่ GRID

หลอดอิเล็กตรอน ที่ใช้ในการแปลงกำลังไฟตรงให้เป็นกำลังไฟสลับในวงจร ถูกเรียกว่า VACUUM TUBE OSCILLATORS วิจารณ์ก็ตามการแปลง จะถูกกระทบกระเทือนถ้าปราศจากการช่วยเหลือจากแหล่งควบคุม โวลเตจภายนอก ความถี่และรูปร่างของคลื่นของการ OSCILLATION ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของวงจร และวิธีการต่อวงจร

VACUUM-TUBE OSCILLATOR สามารถผลิตไฟกระแสสลับจากไฟกระแสตรง ด้วยความถี่ที่คงที่ และมันสามารถทำงานที่ความถี่ ตั้งแต่ 2-3 ไซเคิล ต่อ ชั่วโมง จนถึงความถี่ สูงถึงสามร้อยรอบต่อวินาที ด้วยความเสถียรพอ ๆ กัน และผลิตกำลังเอาท์พุทได้ ไม่เกิน 100 กิโลวัตต์

1. ชนิดของ OSCILLATORS (TYPES OF OSCILLATORS) วงจรออสซิลเลเตอร์ ที่ได้อาศัยส่วนใหญ่ใช้ในการแปลงกำลังไฟกระแสตรงให้เป็นกำลังไฟกระแสสลับตามต้องการ อุปกรณ์นี้ไม่สามารถเป็น LINEAR RESISTANCE, CAPACITANCE, SELF INDUCTANCE หรือ MUTUAL INDUCTANCE ธรรมดา สำหรับหลักการพื้นฐานของทฤษฎีของวงจรที่บรรจุ ส่วนประกอบเหล่านี้คือข้างเดียว ในสถานะ STEADY กระแสและโวลเตจทั้งหมดที่เกิดจากแหล่งจ่ายไฟตรงเดียว หรือ กระแสสลับรูป SINE ต้องมีความถี่เดียวกับแหล่งจ่าย

จำพวกแรกประกอบด้วย NEGATIVE RESISTANCE OSCILLATORS ซึ่ง บรรจุส่วนประกอบของวงจร ซึ่งมี กราฟแสดงคุณสมบัติทางกระแสและโวลเตจมีความชัน เป็นลบภายในบางช่วงของการทำงาน และที่ NEGATIVE DYNAMIC RESISTANCE ในช่วงนี้ในการเปรียบเทียบ เวลามจริงที่ว่า กำลังไฟที่ถูกดูดกลืนโดย POSITIVE RESISTANCE และถูกส่งโดย NEGATIVE RESISTANCE เพราะว่าแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงไม่สามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกำลังไฟกระแสสลับ NEGATIVE RESISTANCE ในออสซิลเลเตอร์ถูกผลิตขึ้นโดย แหล่งจ่ายกำลังไฟตรง หลอดและวงจร ในฐานะที่เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟกระแสสลับมันแปลงกำลังไฟตรงเป็นกำลังไฟสลับ ที่ความถี่ที่ถูกพิจารณาโดยตรง

จำนวนสอง FEEDBACK OSCILLATORS อุปกรณ์เฉพาะที่ทำการออสซิลเลตคือ แอมพลิฟายเออร์ การต่อวงจรคือให้ เอาท์พุทของ แอมพลิฟายเออร์กลับไปอินพุทของวงจร การต่อแบบนี้เพื่อที่จะเป็นแหล่งจ่ายไฟสลับแก่ อินพุทโวลเตจ ที่จะช่วยกำลังไฟสลับของเอาท์พุททั้งโวลเตจและกำลังทั้งขนาดและเฟส แอมพลิฟายเออร์จะทำการกระตุ้นตัวมันเองและกำลังการออสซิลเลตของตัวมันเอง

2. SELF-EXCITATION

เงื่อนไข สำหรับการกระตุ้นตัวเองใน FEEDBACK ออสซิลเลเตอร์

FEEDBACK ออสซิลเลเตอร์ ชนิดต่าง ๆ ทั้งหมด ใช้หลักการที่ว่า อุปกรณ์ใดก็ตามที่มีเอาท์พุทเป็นคาบ และมีกำลังที่เอาท์พุทมากกว่า กำลังที่ใช้ควบคุมที่อินพุท ที่สองสามารถทำให้เกิดการ กระตุ้นตัวเองได้ ถ้าส่วนของเอาท์พุทหนึ่งขนาดและเฟสนี้กำหนดเอาไว้ ถูกนำกลับมาที่อินพุท มีการวิเคราะห์หลายอย่างที่ทำให้เงื่อนไขอย่างเหมาะสม สำหรับการกระตุ้นตัวเอง อันหนึ่งที่ง่าย ๆ ประกอบด้วยคำพิจารณา เงื่อนไขที่ว่า DAMPING TERM จะเป็นศูนย์ ในสมการ คิฟเฟอเรนเชียล ของวงจร ส่วนอื่น ๆ ก็อยู่บนพื้นฐานของกฎของ เดอร์ฮอฟ สำหรับเงื่อนไขที่สถานะ STEADY ของวงจร เพราะว่าวงจรไม่มีแหล่งจ่ายโวลเตจกระแสสลับการกำหนดค่า สัมประสิทธิ์ของ สมการชั่วขณะโดยขณะหนึ่ง สำหรับกระแส จะต้องเป็นผลทำให้ค่ากระแสสลับมากกว่าศูนย์ยังคงอยู่ในวงจร โดยปรกติ วงจรออสซิลเลเตอร์แบบป้อนกลับ โดยใช้หลอดเดี่ยว (SINGLE-TUBE FEEDBACK OSCILLATOR CIRCUIT) สามารถแทนได้ดังรูปข้างล่างนี้

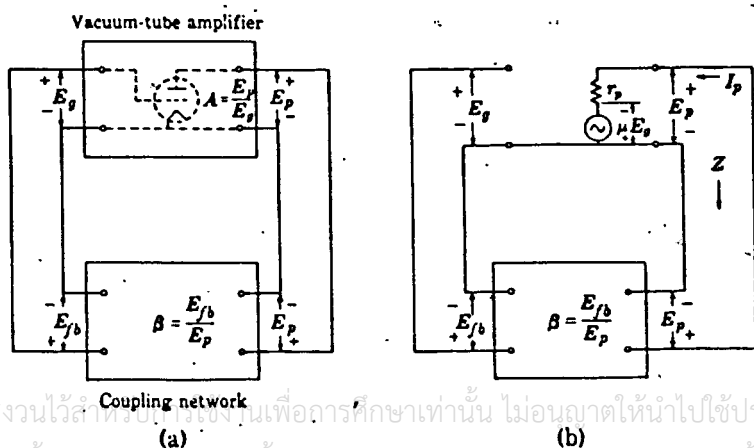


Fig. 1. Feedback-oscillator circuit.

การออกแบบวงจร Oscillators

Oscillators จะใช้เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณไฟกระแสสลับ โดยการแปลงไฟกระแสตรง (Direct Current) ที่อินพุทให้เป็นไฟกระแสสลับที่ Output โดยที่เอาท์พุทมีขนาดที่ปรับค่าได้ ตั้งแต่ 2-200 v_p โดยให้ความถี่ของการออสซิลเลต 16 KHz วงจรที่ใช้คือวงจร Tuned-plate Oscillator ดังรูป เป็นวงจรที่มี feedback จากขั้ว plate ของหลอดไปยังขั้ว Grid ผ่านวงจร Parallel Resonant สำหรับความถี่ของการออสซิลเลตจะเท่ากับความถี่ resonant ของวงจร Parallel Resonant

การออกแบบวงจร Parallel Resonant ให้ความถี่ resonant เท่ากับ 16 KHz ทำได้ดังนี้คือ

1. คำนวณค่า L ของ Tuned circuit

f. เป็นความถี่ resonant เท่ากับ 16 KHz

จาก

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_2 C_2}}$$

$$C_2 = 0.022 \mu F$$

$$f_0^2 = \frac{1}{4\pi^2} \frac{1}{L_2 C_2}$$

$$L_2 = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 C_2}$$

$$L_2 = 1/222$$

$$= 4.5mH$$

เส้นผ่าศูนย์กลางของขดลวด $L_2 = 9 \text{ cm.}$

ความยาวของขดลวด เท่ากับ 45.5 cm.

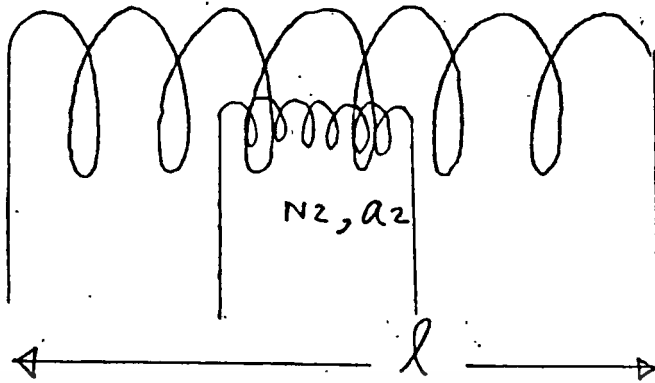
จาก

$$L_2 = \frac{\mu_0 \mu_r N_1^2 \pi d^2}{4 l}$$

$$N_1 = 506 \text{ turn}$$

2. สูตรสำหรับ M ของ SEARCH COIL และ LONG SOLENOID

N_1, a_1



$$M = \frac{\mu N_1 N_2 a_2}{l} = \frac{\mu N_1 N_2 \frac{d_2^2}{4}}{l}$$

คำนวณค่า M น้อยที่สุด สำหรับการออกแบบ

$$M = -2 L / \mu$$

$$= -2 \times 4.5 \times 10^{-3} / 20$$

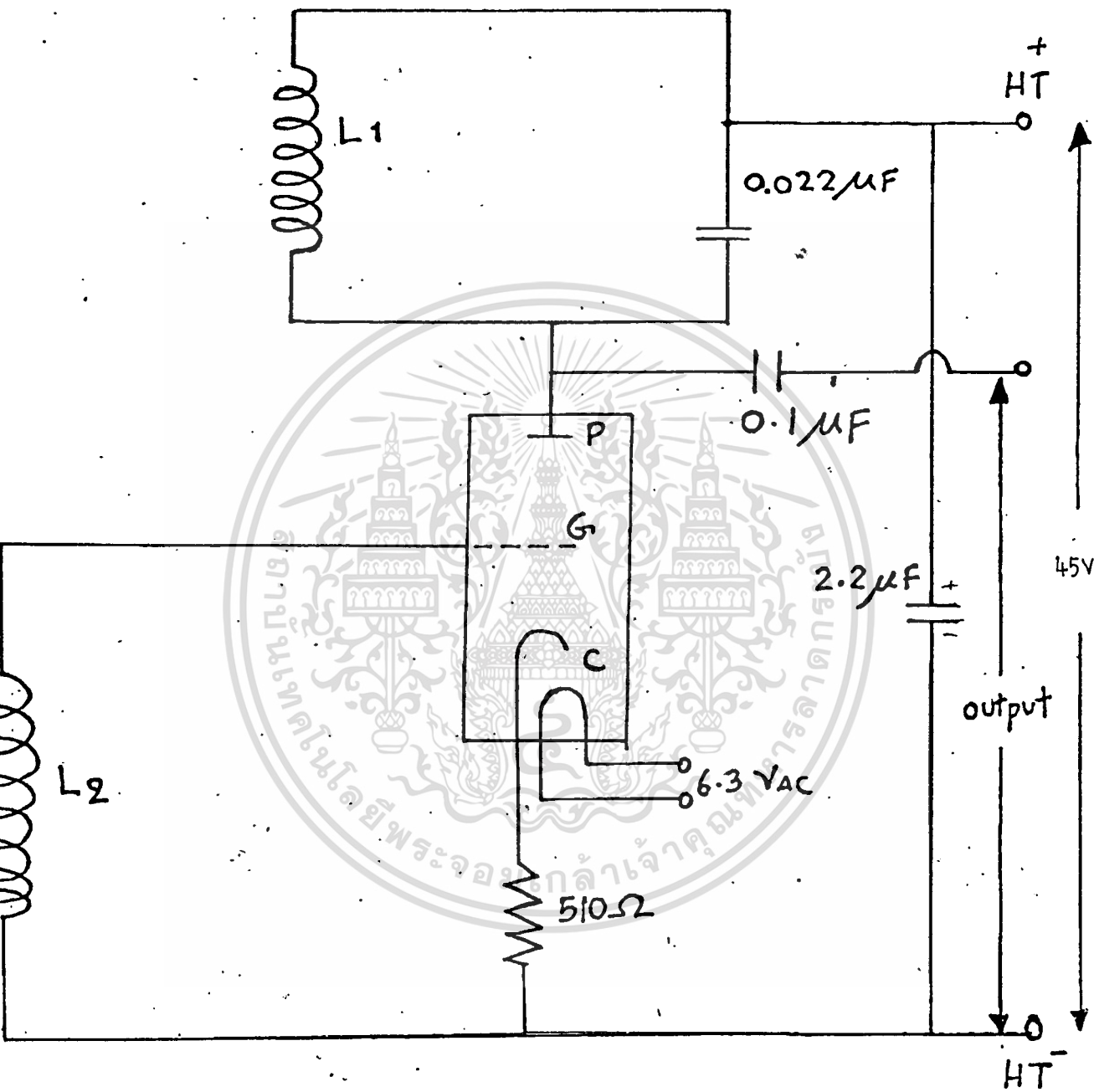
$$= -0.45 \times 10^{-3}$$

$$N_2 = \frac{4l M}{\mu N_1 d_2^2}$$

$$= 114$$

$l = 45.5 \text{ cm. ; } M = 0.45 \text{ mH.}$

$N_1 = 506 \text{ turn ; } d_2 = 6 \text{ cm.}$



TUNED - PLATE OSCILLATOR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

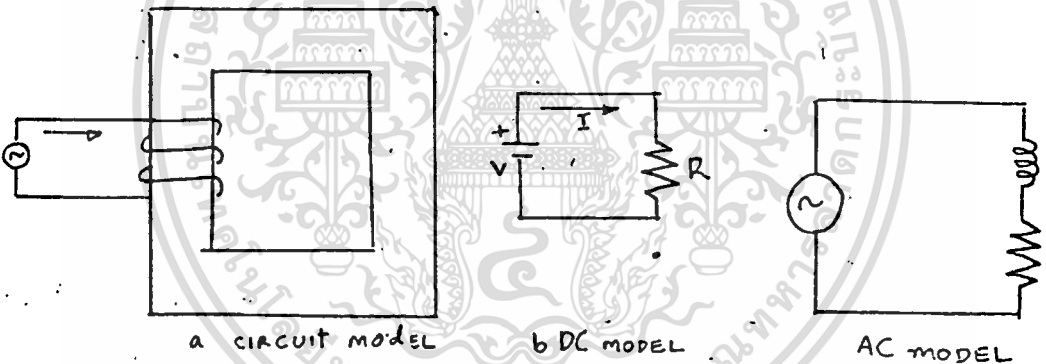
บทที่ 4

ทรานส์ฟอร์มเมอร์ (TRANSFORMER)

ทรานส์ฟอร์มเมอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้โยกย้ายพลังงานไฟฟ้าจากวงจรหนึ่งไปยังอีกวงจรหนึ่งโดยอาศัยสนามแม่เหล็กที่ลัดวงจรทั้งสองนั้น ทรานส์ฟอร์มเมอร์อาศัยหลักการของวงจรแม่เหล็กในการแปลงพลังงานมันเป็นตัวอย่างอันดีของการเพิ่มขึ้นของ VOLTAGE โดยการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก

AC EXCITATION OF MANETIC CIRCUITS

เมื่อ DC VOLTAGE ล้อม COIL ซึ่งพันรอบ MAGNETIC CORE กระแสที่ไหลจะถูกจำกัดโดย RESISTANCE ของขดลวด VOLTAGE (RI) ที่ล่อมความต้านทานจะเท่ากับ VOLTAGE ที่ SUPPLY และวงจรรูป 2.1 A จะถูกแทนโดย-CIRCUIT MODEL ดังรูป 2.1 B



MAGNETIC FLUX (Φ) จะถูกสร้างขึ้นใน CORE โดยขึ้นอยู่กับค่าต่างๆ ดังนี้ MAGNETIZING FORCE (H) มีหน่วยเป็น AMPERE-TURNS PER METRE, คุณสมบัติของ CORE ซึ่งถูกกำหนดโดย B-H CURVE และพื้นที่หน้าตัด (A) ของ CORE ในทางตรงข้ามเมื่อ AC VOLTAGE ล้อม COIL ที่เหมือนกันกระแสจะถูกจำกัดโดยค่า IMPEDANCE ของขดลวด VOLTAGE DROP เนื่องจาก RESISTANCE นั้นมากและ VOLTAGE DROP เนื่องจาก INDUCTIVE REACTANCE จะประมาณเท่ากับ APPLIED VOLTAGE MAGNETIC FLUX ใน CORE ที่ต้องการเพื่อที่จะนำไปสร้าง VOLTAGE เพิ่มขึ้นว่า เท่ากับ APPLIED VOLTAGE ใน CIRCUIT MODEL รูป 2.1 C ผลอันนี้จะถูกแทนโดย INDUCTANCE (L)

ศักดาไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (INDUCED VOLTAGE)

จากพื้นฐานของการทดลองของ ฟาราเดย์ สรุปว่า VOLTAGE ที่ถูกเหนี่ยวนำใน COIL ใดๆ COIL ที่คล้องการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับจำนวนรอบ N ของ COIL และอัตราการเปลี่ยนแปลงของ FLUX (Φ)

$$V = N \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d\lambda}{dt} \quad (2-1)$$

เมื่อ λ เป็นจำนวนของ FLUX LINKAGE มีหน่วยเป็น WEBER-TURNS ตัวอย่างเช่น ถ้าใน 10 รอบของ COIL มี 8 รอบที่คล้อง FLUX 1 Wb และ 2 รอบที่คล้อง FLUX 0.9 Wb FLUX LINKAGE ทั้งหมดเท่ากับ $(8 \times 1) + (0.9 \times 2)$ เท่ากับ 9.8 Wb-t POLARITY ของ INDUCED VOLTAGE สามารถอธิบายโดย LENZ'S LAW ว่า

" VOLTAGE ที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นจะมีทิศทางในทิศที่ตรงข้ามกับการเปลี่ยนแปลงของ FLUX LINKAGE ที่สร้างมันขึ้นมา"

ถ้าเตรียม CLOSED PATH ใดกระแสวิ่งเกิดจาก INDUCED VOLTAGE จะมีทิศทางในลักษณะเพิ่ม FLUX

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

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t$$

INDUCED VOLTAGE ใน N รอบของ COIL เป็น

$$V = N \frac{d\Phi}{dt} = N\omega \Phi_m \cos \omega t \quad (2-2)$$

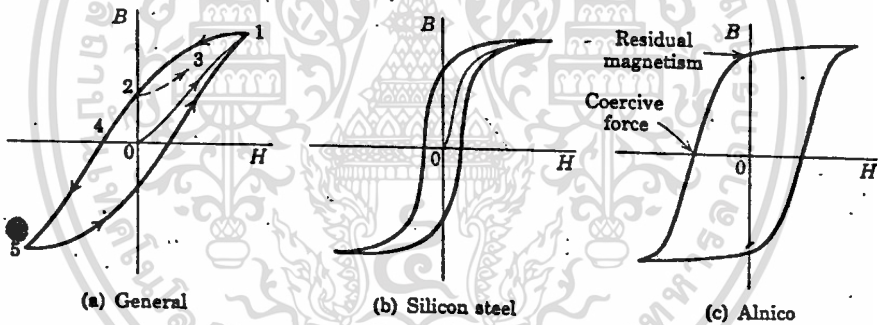
ค่า RMS ของ SINUSOIDAL จะเป็น

$$\begin{aligned} V &= \frac{V_m}{\sqrt{2}} = \frac{N\omega\Phi_m}{\sqrt{2}} \\ &= \frac{2\pi}{\sqrt{2}} Nf\Phi_m \\ &= 4.44 Nf\Phi_m \end{aligned} \quad (2-3)$$

สำหรับ AC EXCITATION, FLUX (ϕ) ขึ้นอยู่กับความถี่และขนาด
 ของ APPLIED VOLTAGE ถ้าไม่คิด RESISTANCE DROP กระแสที่ไหล
 จะเป็นตัวสร้าง FLUX ที่ระบุใน EQUATION (2-3)

HYSTERESIS

ในการเป็นแม่เหล็กของ สสารพวก FERROMAGNETIC ผลที่เกิดขึ้นทั้งหมดเป็นแบบไม่ยืดหยุ่น เมื่อเอาสนามภายนอกออก สสารแม่เหล็กจะไม่สามารถกลับไปอยู่สถานะเริ่มต้นได้ ถ้าขึ้นเหล็กถูกทำให้อิ่มตัว (SATURATE) จุดที่ 1 ในรูป-2224 A และแล้วเอาสนามออก ($H=0$) เงามโซของแม่เหล็กจะเลื่อนตามเส้นจาก 1 ไป 2 ORDINATE ที่จุด 2 ถูกเรียกว่า RESIDUAL MAGNETISM



ถ้าลด H ที่เป็นบวกถูกเอาออกครึ่งหนึ่ง เงามโซจะเลื่อนตามทางจาก 2 ไป 3 NEGATIVE MAGNETIZING FORCE (COERCIVE FORCE) ถูกต้องการเพื่อจะทำให้ ความหนาแน่นของ FLUX เป็นศูนย์ที่จุด 4 H ที่เป็นลบจำนวนมาก จะทำให้เกิดการอิ่มตัว (SATURATE) ในทิศทางตรงกันข้าม (จุด 5) และเมื่อให้ REVERSING MAGNETIZING FORCE จะทำให้ เงามโซแม่เหล็กเลื่อนตามทางจาก 5 ไป 1 ถ้า MAGNETIZING FORCE เกิดเนื่องมาจากไฟกระแสสลับวงรอบของทางเดินจะเรียกว่า HYSTERISIS LOOP

ในขณะที่แผ่นโลหะถูกทำให้ร้อนโดยการหักงอไปมา สสารแม่เหล็กถูกทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่าจะวิธีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อนเมื่อมันถูกทำให้เป็นแม่เหล็กครบเป็นวงรอบ ในกรณีทั้งสองหลังจากจะปรากฏในรูปของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นพลังงานที่ใส่เข้าไปให้กับตัวอย่างเริ่มตันที่ยังไม่ได้รับการทำให้เป็นแม่เหล็กจะเท่ากับพื้นที่ระหว่าง CURVE 0-1 และแกน B พลังงานย้อนกลับจะเท่ากับพื้นที่ระหว่าง CURVE 1-2 และแกน B ตามรูป 22.5 แลต่างของพื้นที่ทั้งสองนี้จะแปลงไปเป็นความร้อนของกระบวนการผันกลับไม่ได้ตามแนวเส้นของวงรอบที่สมบูรณ์พื้นที่ของ HYSTERESIS LOOP จะเท่ากับพลังงานที่สูญเสียไปในหนึ่งรอบสำหรับ SILICON STEEL LOOP จะห่อม(รูป 22.4.B) และ HYSTERESIS จะน้อยสำหรับแม่เหล็กถาวร COERCIVE FORCE จะกว้างและ HYSTERESIS LOSS จะกว้าง(รูป 22.4C) พื้นที่ของ LOOP จะเพิ่มอย่างไม่เป็นเชิงเส้นกับความหนาแน่นของฟลักซ์ที่มากที่สุด สูตรอย่างง่ายสำหรับหาค่า HYSTERESIS LOSS ในหน่วย วัตต์ คือ

$$P_h = K_h f B_m^n$$

ที่ซึ่งค่า K_h เป็นค่าคงที่ N เปลี่ยนแปลงไปตามสสารที่ใช้ทำ CORE

ปรกติ N จะสัมพันธ์ในเท่ากับ 1.6

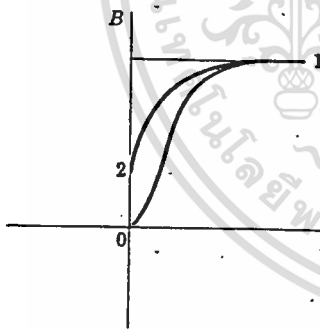


Figure 22.5 Hysteresis loss.

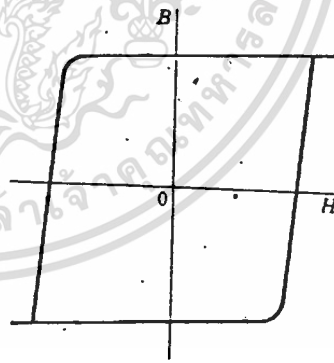


Figure 22.6 Square hysteresis loop.

สำหรับแม่เหล็กบางชนิด HYSTERESIS LOOP เกือบจะเป็นสี่เหลี่ยมผืน

ผ้า (รูป 22.6)

EDDY CURRENT

ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขดลวดแรก ๆ เกือบจะสามในสี่ของพลังงานเฉลี่ยใส่เข้าไปจะเปลืองเป็นความร้อนในวงจรแม่เหล็ก ส่วนเล็กน้อยของพลังงานที่สูญเสียนี้ ใ่อะ

เอกสาจากนั้น HYSTERESIS วนไว้แก่ส่วนในนี้เกิดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหนี่ยวนำให้เกิด VOLTAGE ขึ้นใน CORE ของมันเองใน IRON CORE VOLTAGE ที่ถูกเหนี่ยวนำนั้นจะเป็นสาเหตุให้เกิดกระแสเฉพาะที่เรียกว่า EDDY CURRENT และ เป็นผลทำให้พลังงาน $I^2 R = V^2/R$ เปลี่ยนไปเป็นความร้อน ดังแสดงในรูป 22.7A

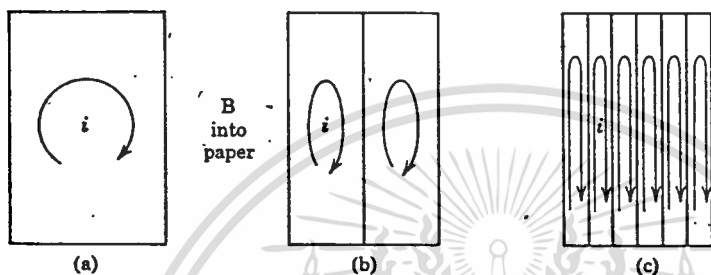


Figure 22.7 Eddy currents and the effect of core lamination.

การเปลี่ยนแปลงของ ฟลักซ์ (มีทิศพุ่งเข้าไปในกระดาษ) จะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสสุทธิภายใน CORE กำลังที่สูญเสียสามารถถูกทำให้ลดลงโดยการลดค่า V และเพิ่มค่า R ถ้าแทน IRON CORE กับด้วยแผ่นบาง ๆ ดังรูป 22.7 B ผลของ VOLTAGE ที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นจะถูกทำให้ลดน้อยลงและความต้านทานของ EFFECTIVE PATH จะถูกทำให้เพิ่มขึ้นการทำให้เป็นแผ่นบาง ๆ บางที 0.02 นิ้วและแต่ละชั้นจะมีขนาดกัน ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้วานิช

กำลังที่สูญเสียเนื่องมาจาก EDDY CURRENT สามารถแทนโดย

$$P_c = K_c f^2 B_m^2$$

เพราะว่า VOLTAGE จะเหนี่ยวนำขึ้นโดยตรงกับค่า $f B_m$ และการสูญเสียแปรตามกำลังสองของขนาด VOLTAGE เราคาดว่ากำลังที่สูญเสียจะแปรตามค่า $f^2 B_m^2$ ค่าคงที่ K_c ขึ้นอยู่กับ ค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุใช้ทำ CORE และความหนาของแผ่น

โครงสร้าง(CONSTRUCTION)

ทรานส์ฟอร์มเมอร์เป็นตัวแปลงพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งการทำงานสามารถ

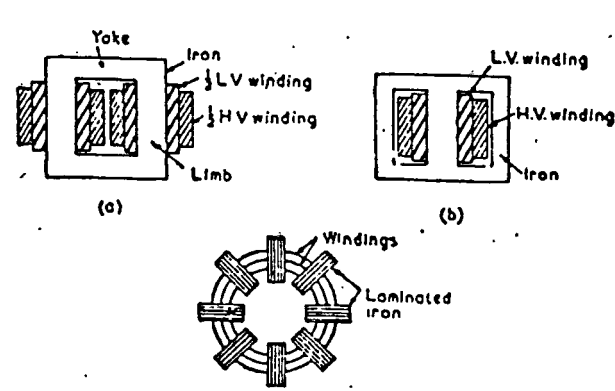
อธิบายในเทอมของการแสดงพฤติกรรมจริงแม่เหล็กซึ่งถูกกระตุ้นโดยไฟกระแส
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม ข้าพทั้งหม่อมมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องขออนุญาตเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สลับในรูปแบบที่ธรรมดาที่สุด ทรานส์ฟอร์มเมอร์ประกอบไปด้วย สองขดลวดซึ่งมีจำนวนรอบหลาย ๆ รอบพันอยู่บน CORE แม่เหล็กอันเดียวกัน แต่มีฉนวนแยกจากกันการเปลี่ยนแปลงของ ฟลักซ์ โวลเตจที่ให้ที่อินพุทหรือขดลวดอินพุท (PRIMARY) เป็นสาเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสไหล เป็นผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของ ฟลักซ์ แม่เหล็กใน CORE เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ โวลเตจจะถูกเหนี่ยวนำขึ้นทางด้านเอาต์พุท หรือ SECONDARY สิ่งจำเป็นก็คือจะไม่มีการเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าระหว่างอินพุทและเอาต์พุท ทรานส์ฟอร์มเมอร์อาจจะใช้เป็นฉนวนกันระหว่างวงจรหนึ่งกับวงจรอื่นโดยอนุญาตให้มีการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างกันได้

โดยการปรับจำนวนรอบของขดลวดทั้งสอง เราสามารถทำให้โวลเตจเพิ่มขึ้น หรือลดลงได้ในอุปกรณ์เดียวกันสามารถใช้เป็นทั้งการเพิ่มขึ้น (STEP UP) หรือลดลง (STEP DOWN) ก็ได้ นอกจากการแปลงโวลเตจหรือกระแส ทรานส์ฟอร์มเมอร์อาจจะใช้ในการแปลง อิมพีแดนซ์ เพื่อที่จะได้รับกำลังงานมากที่สุดส่งผ่าน IMPEDANCE MATCHING จากหลักการทำงานของทรานส์ฟอร์มเมอร์จะเห็นว่านี่เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงพลังงานที่สำคัญจึงควรศึกษารายละเอียดอย่างระมัดระวัง

หม้อแปลงไฟฟ้า แบ่งเป็นชนิดใหญ่ ๆ ได้ 3 ชนิดโดยพิจารณาจากลักษณะของการวางหรือการจัดรูปของแกนเหล็ก แบ่งได้ดังนี้คือ

1. " CORE TYPE " เป็นแบบที่มีวงจรแม่เหล็กวงเดียว
 2. " SHELL TYPE " เป็นแบบที่มีวงจรแม่เหล็ก 2 วงจร
 3. " BERRY TYPE " เป็นแบบที่มีวงจรแม่เหล็ก กระจายออกไปโดยรอบ
- ทั้ง 3 แบบก็ได้แสดงดังรูปข้างล่าง



แบบ CORE TYPE นั้นเรียงหนึ่งของขลวดทาง PRIMARY และ SECONDARY หันไว้รอบขาแต่ละข้างของแกนเหล็ก การหันแบบนี้ลดการรั่วไหลของเส้นแรงแม่เหล็ก (FLUX LEAKAGE) ที่เกิดจากขลวดทั้งสองลงไปซึ่งทำให้ได้เส้นแรงแม่เหล็กที่คล้อง (LINKAGE FLUX OR MUTUAL FLUX) ขลวดทั้งสองมากยิ่งขึ้นแต่ถ้าหันขด ปฐมภูมิและทุติยภูมิ แยกกันไว้รอบขาของแกนเหล็กแต่ละข้างแล้วทำให้เกิดการรั่วไหลของ FLUX มากยิ่งขึ้น ซึ่งมีผลต่อการทำงานของหม้อแปลงอย่างจริงจัง ปรกติแล้วแบบ CORE TYPE นี้มักใช้กับหม้อแปลงขนาดใหญ่

แบบ SHELL TYPE นี้มีขลวดทั้งปฐมภูมิและทุติยภูมิหันไว้ที่แกนกลางของแกนเหล็ก ส่วนที่เหลืออีก 2 ขานี้ก็ทำหน้าที่เป็น LOW RELUCTANCE-FLUX PATH

สำหรับ BERRY TYPE นี้มีแกนเหล็กวางอยู่เป็นวงรอบ ๆ ขลวดแกนเหล็กนี้จำเป็นต้องมีโครงสร้างเป็นแบบ SHELL โดยมีแกนเหล็กกระจายออกไปรอบ ๆ ขลวดเหล่านั้น

การพันขลวด(WINDING)

การพันขลวดของหม้อแปลงแล่งได้เป็น 2 แบบใหญ่ ๆ คือ

1. แบบ CONCENTRIC ที่เป็นรูปทรงกระบอก(CONCENTRIC CYLINDER) ดังรูปข้างล่าง แบบนี้มีขลวดแรงต่ำอยู่ภายในทั้งนี้เนื่องจากปัญหาการทำฉนวนหุ้มเส้นลวดที่ใช้หุ้มขลวดนั่นเอง ลวดที่ใช้ในการทำ COIL นั้นเป็นลวดทองแดงที่หุ้มฉนวน ฉนวนนี้อาจมีรอยฉีกฉนวนเนื่องมาจากการใส่ WINDING เข้าไปใน CORE ฉะนั้นเมื่อให้ด้านแรงต่ำ (L.V. SIDE) อยู่ข้างในจึงปลอดภัยกว่าและยังระบายความร้อนได้ดีอีกด้วย

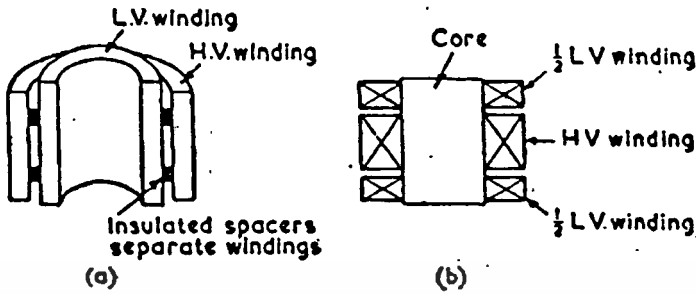
2. แบบประกอบซ้อนกัน (SAND WICH) แบบนี้ช่วยในการลดเส้นแรงแม่เหล็กที่รั่วไหล (LEAKAGE FLUX) ไขลกลงไป ขลวดแรงต่ำแบ่งเป็น 2 ส่วน แต่ละครึ่งของขลวดแรงต่ำนั้นประกบหัวท้ายของขลวดแรงสูง

ทฤษฎีและหลักการของหม้อแปลงไฟฟ้า

หลักการของหม้อแปลง (TRANSFORMER'S PRINCIPLE)

หม้อแปลงประกอบด้วยขลวด 2 ชุดที่พันอยู่บนแกนเหล็กดังรูปข้างล่างนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.2 แบบของการพันขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า
 a) แบบ Concentric
 b) แบบ Sandwich

ชุดที่ต่อไปยังแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเรียกว่า ชุดปฐมภูมิ (PRIMARY WINDING) โดยมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมอยู่ $V_p (V_1)$ โวลต์อีกชุดหนึ่งที่ต่อไปยังภาระไฟฟ้า (LOAD) ที่เรียกว่า ชุดทุติยภูมิ (SECONDARY WINDING) โดยมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมที่โวลต์เป็น $V_s (V_2)$ โวลต์จำนวนของขดลวดทาง ปฐมภูมิและทุติยภูมิ มีจำนวนรอบเป็น $N_p (N_1)$ รอบและ $N_s (N_2)$ ตามลำดับตามที่รับกำลังไฟฟ้าอาจจะเป็นด้านแรงต่ำหรือแรงสูงก็ได้ทั้งนี้ขึ้นกับการใช้งาน

เมื่อหม้อแปลงได้รับแรงเคลื่อนไฟฟ้า V_p โวลต์เข้าไปที่ชุด ปฐมภูมิจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้า V_s ทางด้าน ทุติยภูมิขึ้นถึงแม้ว่าจะไม่มีโหลดมาต่อก็ตาม ในกรณีนี้ $V_s = E_2 = V_2$

อัตราส่วนของแรงเคลื่อนและกระแสไฟฟ้า

เมื่อมีโหลดมาต่อทางด้าน ทุติยภูมิ ทำให้เกิดกระแส I_s โหลดอยู่ทางด้าน ทุติยภูมิ และมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมโวลต์เท่ากับ $V_s (V_s \neq E_2)$ ส่วนทางด้านปฐมภูมินั้นก็มีกระแส I_p และแรงเคลื่อนไฟฟ้า V_p ออกมาจากแหล่งจ่ายเมื่อทำการสังเกตุออกไปก็พบว่า อัตราส่วน $\frac{V_p}{I_p}$ นั้นมีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วนของ $\frac{N_p}{N_s}$ และมีค่าใกล้เคียงกับส่วนกลับของอัตราส่วน $\frac{I_s}{I_p}$ นั่นก็คือ $V_p I_p$ มีค่าใกล้เคียงกับ $V_s I_s$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของ I_s เกิดขึ้นทางด้านทุติยภูมินั้นมีผลทำให้ I_p เปลี่ยนแปรควายนั่นคือ

$$V_p I_p \propto V_s I_s$$

เส้นแรงใหญ่ (Φ) นี้ล่อง (LINK) ขดลวดของปฐมภูมิและทุติยภูมิตั้งนั้น

จึงทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นทั้ง 2 ชุด (E_1 & E_2) ซึ่งค่าใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่มีการวัดใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และตั้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้เป็นสัดส่วนกับจำนวนรอบของขดลวดแต่ละขดซึ่งได้จาก
ความสัมพันธ์ตามกฎของ การเหนี่ยวนำลึงสมการ (2.1)

$$E = N \frac{d\phi}{dt}$$

เมื่อ E เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในขณะใดขณะหนึ่ง

N เป็นจำนวนรอบของขดลวดที่ได้รับอัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กต่อ
หน่วยเวลา

$\frac{d\phi}{dt}$ เป็นอัตราเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กต่อหน่วยเวลา

นั่นคือ $\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_p}{N_s} = A =$ อัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงของหม้อแปลง

A เรียกว่า TRANSFORMER RATIO

เมื่อ E_1 และ E_2 คือแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขดลวดปฐมภูมิและ
ทุติยภูมิตามลำดับ N_p กับ N_s ก็คือจำนวนรอบของขดลวดทางปฐมภูมิและทุติยภูมิทั้ง 2
ข้างนั้น แตกต่างจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ ก็เพียงเล็กน้อยเท่านั้น
ฉะนั้นจึงไม่ทำให้ เวกเตอร์ของ v_p และ v_s มีมุมแตกต่างไปจาก เวกเตอร์ของ E_1
และ E_2 มากนัก ดังนั้นถ้าหากจะพิจารณาว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้วนั้นเป็นสัดส่วนโดย-
ตรงกับจำนวนรอบของขดลวดโดยประมาณแล้วก็จะได้ความสัมพันธ์ว่า

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} = \text{TRANSFORMER RATIO}$$

ถ้าหากว่ากระแสสูญเสียกำลังไฟจากภายในหม้อแปลงนั้นมีจำนวนเล็กน้อย
ก็คิดว่าที่เสียนั้นทิ้งไปได้ นั่นก็คืออาจจะพิจารณาได้ว่ากำลังไฟที่ได้รับ (POWER OUTPUT)
กับกำลังไฟที่ใส่เข้าไป (POWER INPUT) มีค่าเท่ากัน นั่นคือ

$$V_p I_p \cos \theta_p = V_s I_s \cos \theta_s$$

ถ้า $\cos \theta_s$ นั้นหาได้จากชนิดของโหลดแต่เนื่องจากว่า POWER FACTOR
ของปฐมภูมิและทุติยภูมิ มีความแตกต่างกันเล็กน้อยดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า

$$V_p I_p = V_s I_s$$

หรือ $\frac{V_p}{V_s} = \frac{I_s}{I_p} = \frac{N_p}{N_s}$

ถ้าเป็นเอกสารที่เรียนไว้สำหรับใช้ $I_s N_s$ คือการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

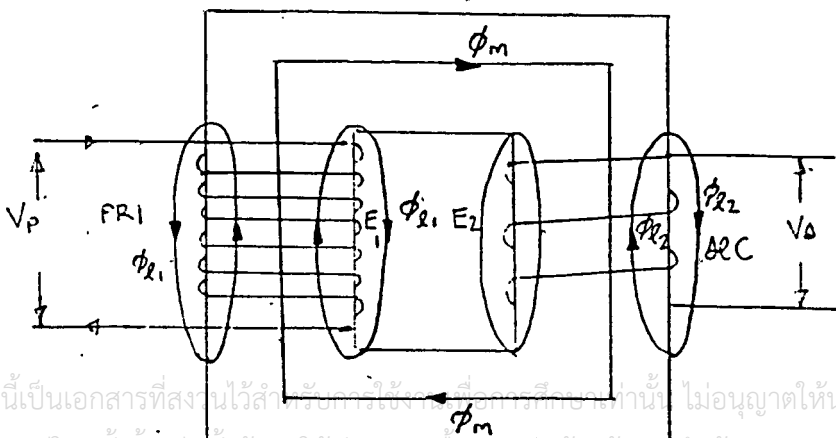
หม้อแปลงนี้จะทำหน้าที่ต่อเมื่อไฟฟ้าใส่เข้าไปทางด้านปฐมภูมิมันต้องเป็นไฟสลับหรือไฟที่มีการเปลี่ยนแปลงเป็นจังหวะ (PULSE) ถ้าเป็นไฟสลับก็แบบที่มีการเปลี่ยนแปลงการกระเพื่อมขึ้นลง หรือมีฉะนั้นก็ให้มีการเปิดปิดไฟตรงทิวอัตราเร็วอัตราใดอัตราหนึ่งหรือหนายัตราก็ได้ จึงจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นทางทุติยภูมิอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก

ทฤษฎี การทำงาน (THEORY OF OPERATION)

เพื่อความเข้าใจง่ายในทฤษฎีการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า จึงใคร่ที่จะเริ่มกันจากทฤษฎีที่ได้อ้างแนวคิดที่เป็นพื้นฐานไว้ก่อน ฉะนั้นจึงจะกล่าวถึงหม้อแปลงไฟฟ้าตามความคิดฝัน (IDEAL TRANSFORMER) หม้อแปลงชนิดนี้ไม่มีการสูญเสียชนิดต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงจริงจึงเป็นการวาดภาพของหม้อแปลงไฟชนิดนี้ขึ้นในความฝันเท่านั้น

หม้อแปลงตามความคิดฝัน (IDEAL TRANSFORMER) ทำให้เกิดมีหลักการทำงานดังนี้

เมื่อใส่ไฟ V_p เข้าไปทำให้เกิดกระแส I_p กระแสนี้ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมด ϕ เส้นแรงแม่เหล็กนี้จะเหนี่ยวนำขดลวดของมันเองและขดลวดของทุติยภูมิให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า E_1 และ E_2 ขึ้นพร้อม ๆ กัน นั่นคือ E_1 และ E_2 นี้เกิดขึ้นที่เป็นไปตามกฎของ LENZ และ FARADAY นั่นคือ $V_p = E_1$ และ $E_2 = V_2$ ในกรณีที่เป็น IDEAL TRANSFORMER เท่านั้นส่วนหม้อแปลงจริง ๆ นั้นมีหลักการทำงานดังรูปข้างล่างนี้คือ



เมื่อใส่ไฟสลับ v_p เข้าไปที่แกนปฐมภูมิทำให้เกิดกระแส I_p ไหลผ่านขดลวด
 นี้ไปยังวงจรรภายนอก ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก (ϕ_1) ขึ้นที่ขดลวด PRIMARY ϕ_1 นี้
 ประกอบไปด้วย MUTUAL FLUX (ϕ_{1m}) และ LEAKAGE FLUX ϕ_{1l} ขณะที่ ϕ_1 เปลี่ยน
 แปรไปตามการเปลี่ยนแปลงของกระแสทำให้เกิดการเหนี่ยวนำ E.M.F (ELECTROMOTIVE
 FORCE) ขึ้นภายในขดลวดปฐมภูมิและมีทิศทางตรงข้ามกับ v_p (ตามกฎของ LENZ)
 ให้ไฟที่จ่ายเข้าไปเป็น SINUSOIDAL WAVEFORM เฉพาะขณะนั้น ϕ_1 เป็น SIN WAVE
 ทั่ว(ไม่คิด LOSS ทาง ๆ และ LAG IMPRESSED VOLTAGE v_p ไป 90) นั่นคือ

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

ตามกฎของ LENZ ได้

$$C_1 = -N_1 \frac{d\phi_1}{dt}$$

$$C_1 = N_1 \omega \phi_{1max} \sin \omega t$$

$$E_{1max} = N_1 \omega \phi_{1max}$$

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

$$E_1 = 4.44 N_1 f \phi_{1max}$$

เมื่อ E_1 = EFFECTIVE VALUE หรือ R.M.S. VALUE ของแรงเคลื่อน
 ไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำขึ้นใน PRIMARY และมีทิศทางตรงกันข้ามกับ v_p

= BACK E.M.F

N_1 = จำนวนขดลวดทางปฐมภูมิ (รอบ)

F_1 = ความถี่ของไฟสลับที่จ่ายให้กับขดลวดปฐมภูมิ (รอบ/นาที)

ϕ_{1max} = FLUX ทั้งหมดที่เกิดขึ้นทางปฐมภูมิขณะที่มีค่าสูงสุด (WEBER)

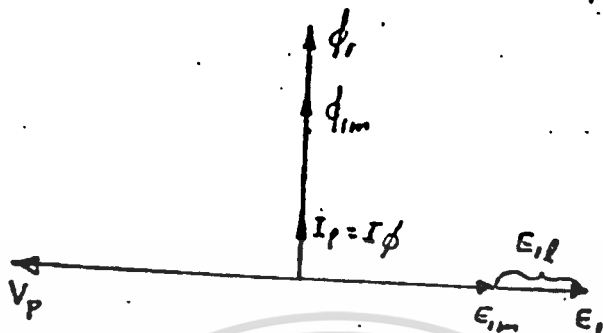
ϕ_{1m} = เส้นแรงแม่เหล็กร่วมที่ขดปฐมภูมิ (PRIMARY MUTUAL FLUX)

ϕ_m = เส้นแรงแม่เหล็กร่วมที่เกิดขึ้นทั้งทางปฐมภูมิและทุติยภูมิ (MUTUAL FLUX) WEBER

$$= \phi_{1m}$$

แรงเคลื่อนไฟฟ้า E_1 นี้ประกอบด้วย E_{1m} และ E_{1l} ซึ่งเกิดจาก ϕ_{1m}

และ ϕ_{11} ทั้ง E_{1m} และ E_{11} นี้มีเฟสเดียวกันดังรูปข้างล่างนี้



รูป 2.4-3 การเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับ Ideal Transformer เมื่อไม่มี load

เพราะฉะนั้น $E_{1m} + E_{11} = V_p$

เมื่อ E_{1m} = การเหนี่ยวนำที่เกิดจาก MUTUAL FLUX

E_{11} = การเหนี่ยวนำที่เกิดจาก SELF INDUCTANCE หรือเส้นแรงแม่เหล็กรั่ว (LEAKAGE FLUX)

สำหรับทางคานทุติยภูมิ นั้นก็เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้า E_2 ขึ้นในขณะเดียวกันกับที่ E_1 เกิดขึ้นและมีทิศทางไปทางเดียวกันด้วยแค่ E_2 นี้ก็เกิดขึ้นจาก ϕ_m เท่านั้น ดังนั้นขนาดของ E_2 จึงขึ้นอยู่กับจำนวน N_2 และ ϕ_m ที่มาตลอดจาก SECONDARY E_2 ที่เกิดขึ้นตามกฎของ FARADAY

$$E_2 = 4.44 N_2 f_1 \phi_{1mmax}$$

เมื่อ E_2 = INDUCE EMF ทาง SECONDARY = V_s (ไม่มีโหลด)

ϕ_{1mmax} = MAXIMUM MUTUAL FLUX. ที่มา LINK หรือคอลล่วงขด SECONDARY

$$= \phi_{1max} \quad (\text{สำหรับ IDEAL TRANSFORMER})$$

N_2 = จำนวนรอบของขดลวดทางคาน SECONDARY

ขณะไม่มีโหลดนี้ก็จะได้อัตราสัมพันธ์ของกระแสดังนี้

$$I_p = I_0 \text{ (NO LOAD CURRENT) } = I\phi \text{ (MAGNETIZING CURRENT)}$$

โดยที่ $I\phi$ นี้ LAG V_p ไป 90 องศาและ INPHASE กับ ϕ_1, ϕ_m สำหรับหม้อ

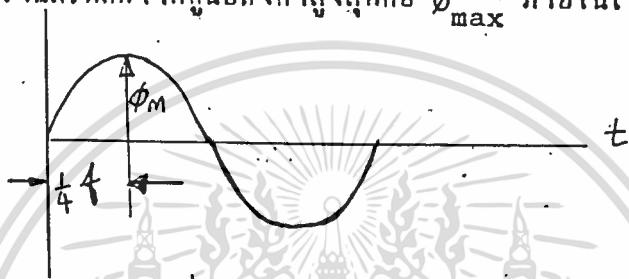
แปลงออกมคิตขณะมีทาง SECONDARY ไม่มี LOAD นั้น $I_p = I_0$ แต่เมื่อมีโหลดเพิ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้น I_p ไม่เท่ากับ I_o แล้วแต่ I_o ก็ยังคงที่อยู่ตลอดเวลาแม้ว่าโหลดทาง SECONDARY จะเปลี่ยนแปลงไปก็ตาม

ในการหาสมการเหนี่ยวนำ แรงเคลื่อนไฟฟ้า ที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงนี้สามารถหาได้จากค่าจำกัดความของ ฟาราเดย์ ได้เช่นเดียวกันโดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของ FLUX ที่เกิดขึ้นต่อหนึ่งหน่วยเวลาจากการพิจารณาจากรูปของ SINE WAVE พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กจากศูนย์ถึงค่าสูงสุดคือ ϕ_{max} ภายในเวลา $\frac{1}{4f}$ วินาที



รูป การเปลี่ยนแปลงของ flux แม่เหล็ก

เพราะฉะนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเฉลี่ยในช่วงเวลา $\frac{1}{4f}$ สำหรับตัวนำ 1 รอบมีค่าเท่ากับ

$$\phi_{max} / \frac{1}{4f}$$

$$\text{เพราะฉะนั้น E.M.F./รอบ} = \phi_{max} / \frac{1}{4f}$$
$$= 4f \phi_{max}$$

$$\text{ค่าเฉลี่ยของ E.M.F. สำหรับ N รอบ} = 4Nf \phi_{max}$$

$$\text{สำหรับ SINE WAVE นั้นมีค่า FORM FACTOR} = 1.11$$

$$\text{FORM FACTOR} = 1.11 = \frac{\text{R.M.S VALUE}}{\text{AVERAGE VALUE}}$$

$$\text{เพราะฉะนั้น R.M.S VALUE OF E.M.F สำหรับ N รอบ} = 4.44f \phi_{max}$$

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า

เนื่องจากหม้อแปลงที่ใช้เป็น หม้อแปลงที่ความถี่วิทยุ (AUDIO FREQUENCY TRANSFORMER) มีความถี่สูง 16 KHz และสามารถแปลงแรงดันเพิ่มได้จาก 45 v เป็น 3500 v. โดยที่ไฟกระแสสลับเข้าที่ขดปฐมภูมิ (PRIMARY WINDING) มีกระแสค่ากึ่งนั้น แกนเหล็กที่ใช้จึงต้องใช้เป็นแกนเฟอร์ไรท์ (FERRITE .) โดยที่คุณสมบัติของเฟอร์ไรท์มีค่า H ค่า และมีค่าของ B ค่าด้วย B_m ที่เหมาะสมที่จะใช้ประมาณ 0.04 เทสลา จากสูตร

$$E = 4.44 * N * f * A * B$$

โดยที่

E เป็นแรงดันภายในขดแต่ละขด มีหน่วยเป็น V.

N เป็นจำนวนรอบของขดลวดในแต่ละขด มีหน่วยเป็น รอบ

f เป็นความถี่ของออสซิลเลเตอร์ มีหน่วยเป็น Hz

B เป็นความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่ใช้ มีหน่วยเป็น TESLA

A เป็นพื้นที่หน้าตัดของแกนเฟอร์ไรท์ มีหน่วยเป็น ตารางเมตร

จากการทดลองเราให้

$$f = 16 \text{ KHz}$$

$$B = 0.04 \text{ TESLA}$$

$$A = 3.61 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$E_1 = 45 \text{ V.}$$

$$E_2 = 3500 \text{ V.}$$

ดังนั้น เราจะได้

$$N_1 = 43.867 \quad \text{เราใช้ 45 รอบ}$$

$$N_2 = 3411.9 \quad \text{เราใช้ 3500 รอบ}$$

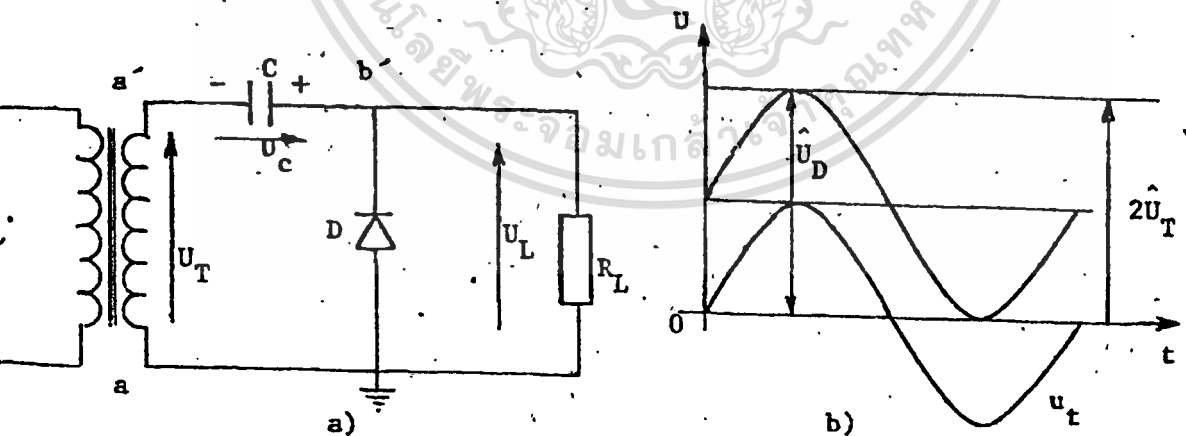
VOLTAGE MULTIPLIER

วงจรขั้นบันไดสร้างแรงดันกระแสตรง (Cascade circuit for DC high voltage)

การสร้างแรงดันสูงกระแสตรงสูงมาก ๆ ทวีคูณโดยอาศัยวงจรพื้นฐานสร้างแรงดันสองเท่า จากรูป 1 - 26 a) มาต่อซ้อนกันเข้าเป็นขั้นบันไดตามหลักการของวงจร GRIGNACH (1920) หรือ COCKCROFTWALTON

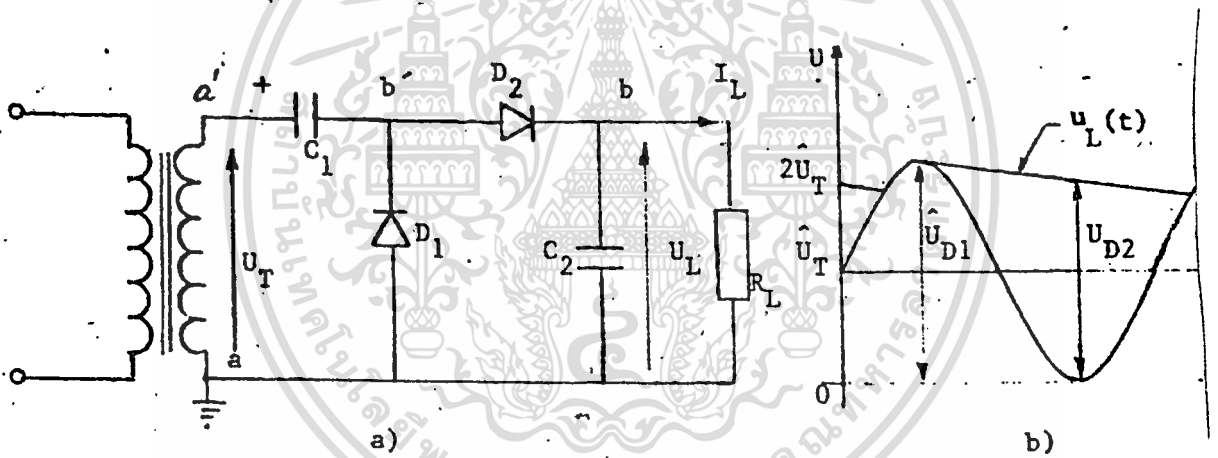
วงจรแรงดันสองเท่า (Voltage doubler circuit)

ทามวงจรของ Villard ดังแสดงในรูป 1 - 25 a) ซึ่งประกอบด้วย ไทโอดและตัวเก็บประจุอย่างละตัวจะช่วยให้สามารถสร้างแรงดันขึ้นเป็น 2 เท่าของค่า ยอดแรงดันที่จ่ายออกของหม้อแปลง ดังในรูป 1 - 25 b)



รูป 1 - 25 วงจรสร้างแรงดันสองเท่า

จากรูป 1 - 25 a) เมื่อจุด a เป็นลบ (ครึ่งไซเกิลลบ) ตัวเก็บประจุ C_1 จะอัดประจุจนถึงค่าออกของแรงดันหม้อแปลง คือ $U_C = U_T$ เมื่อจุด a เป็นศูนย์ และเพิ่มขึ้น (ในครึ่งไซเกิลบวก) จะทำให้แรงดันจุด b' ซึ่งเท่ากับผลรวมของแรงดันหม้อแปลงกับแรงดันคร่อม C_1 ถ้าแรงดันหม้อแปลงเพิ่มจนถึงค่าออก U_T แรงดันที่จุด b' คือ U_T จะมีค่าสูงสุดเป็น 2 เท่า คือ $2U_T$ ดังนั้นไดโอดจะต้องทนแรงดันไดโอดอย่างน้อยเท่ากับ $2U_T$ แรงดันที่ไดโอดไหลจะแปรค่าตั้งแต่ 0 ถึง $2U_T$ ฉะนั้นถ้าเอาแรงดันนี้ไปผ่าน เวกติฟายเออร์ และตัวเก็บประจุรอง กระแสทั้งในรูป 1 - 26 a) ก็จะทำให้ไดโอดกระแสตรงเป็น 2 เท่าของแรงดันค่าออกของหม้อแปลงตามจ่ายกำลังออก



รูป 1 - 26 วงจรสร้างแรงดันกระแสตรงแบบแรงดันสองเท่า

ในขณะที่ไม่มีโหลดจะได้อะไรตรงคร่อมตัวเก็บประจุ C_2 ซึ่งมีโอกาสขึ้นถึง $2U_T$ ฉะนั้นไดโอด D_1 และ D_2 จะต้องรับแรงดันสูงถึงสองเท่าเช่นเดียวกันคือ

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

การอัดประจุ C_2 เป็นไปดังนี้ คือ เมื่อตัวเก็บประจุ C_1 จะได้รับอัดประจุเนื่องจากแรงดันจากหม้อแปลงผ่านไดโอด D_1 ($Q_1 = UC_1$) แรงดันคร่อมตัวเก็บเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประจุ C_1 (คือ U_b a) รวมเข้ากับแรงคนของหม้อแปลงที่ a

ถ้าเมื่อใด $U_b = U_b a + U_a$ มีค่าสูงกว่า U_b เนื่องจากแรง
ดันของหม้อแปลงเพิ่มสูงขึ้น ไคโอค D_2 จะนำกระแส และ C_2 จะได้รับอีกประจุจาก
 C_1 กระบวนการจะดำเนินต่อไปจนกระทั่งถึงภาวะอยู่ตัว ขณะที่ไม่มีไหลออก ศักย์ไฟฟ้าที่จุด
b คือ แรงดันคร่อม C_2 จะเป็นสองเท่า คือ

$$U_b = 2\hat{U}$$

และที่จุด b จะมีศักย์ไฟฟ้า U_b มีค่าเป็น

$$U_b = \hat{U} (1 + \cos wt)$$

a) แรงดันวงจรชั้นบันไดเมื่อไม่มีไหล

ในรูป 1 - 27 แสดงถึงวงจรชั้นบันไดที่ไคจากถาวรเอาวงจรสร้างแรงดัน
กระแสตรง 2 เท่ามาต่อซ้อนกัน 3 ชั้น คือ แต่ละชั้นจะประกอบด้วยตัวเก็บประจุ 2 ตัวและ
ไคโอค 2 ตัว โดยที่ตัวเก็บประจุตัวหนึ่งเป็นตัวเก็บตักประจุ และอีกตัวหนึ่งเป็นตัวกรองให้ไค
แรงดันกระแสตรง ทั้งเซววงจร a a' b b' เป็นวงจรสร้างแรงดัน 2 เท่าหนึ่งชั้น
 C_1 C_2 C_3 และ C_1, C_2, C_3 เป็นตัวเก็บประจุตักประจุและตัว
กรองกระแสตามลำดับ แต่ละชั้นจะสร้างแรงดันไคสองเท่าของค่าขออกแรงดันที่ไคจากหม้อแปลง
ตัวจ่าย คือเป็น $2\hat{U}_T$ ชั้นของไคโอคที่ค่อไว้ในวงจร D_1, D_2, D_3 จะนำ
กระแสในช่วงคลื่นครึ่งบวก และ D_1, D_2, D_3 จะนำกระแสในช่วงคลื่นครึ่งลบ ศักย์ไฟฟ้า
ที่จุด b' เมื่อเทียบกับดินจะเปลี่ยนแปลงระหว่างศูนย์กับ $2\hat{U}_T$ และ C_3 จะได้รับแรง
ดันอีกประจุเป็น $2\hat{U}_T$ ผ่านไคโอค D_3 จุด b จะมีศักย์ไฟฟ้าคงตัว $2\hat{U}_T$ และแรง
ดันอีกประจุให้ C_2 ผ่านไคโอค D_2 จะเปลี่ยนแปลงระหว่าง $2\hat{U}_T$ กับศูนย์ ฉะนั้น C_2
จะได้รับแรงดันอีกประจุถึง $2\hat{U}_T$ คือ ไฟฟ้าที่จุด c จะเปลี่ยนแปลงระหว่าง $2\hat{U}_T$ ถึง $4\hat{U}_T$
และ C_2 จะได้รับแรงดันอีกประจุผ่านไคโอค D_2 เท่ากับ $2\hat{U}_T$ ซึ่งจะทำให้จุด c มีศักย์
ไฟฟ้าสูงถึง $4\hat{U}_T$ เมื่อเทียบกับดิน วงจรชั้นที่สามตัวเก็บประจุแต่ละตัวก็จะได้รับแรงดัน
อีกประจุถึง $2\hat{U}_T$ เช่นกัน นั่นคือจุด a จะมีศักย์ไฟฟ้าเมื่อเทียบกับดินจะเท่ากับ $6\hat{U}_T$

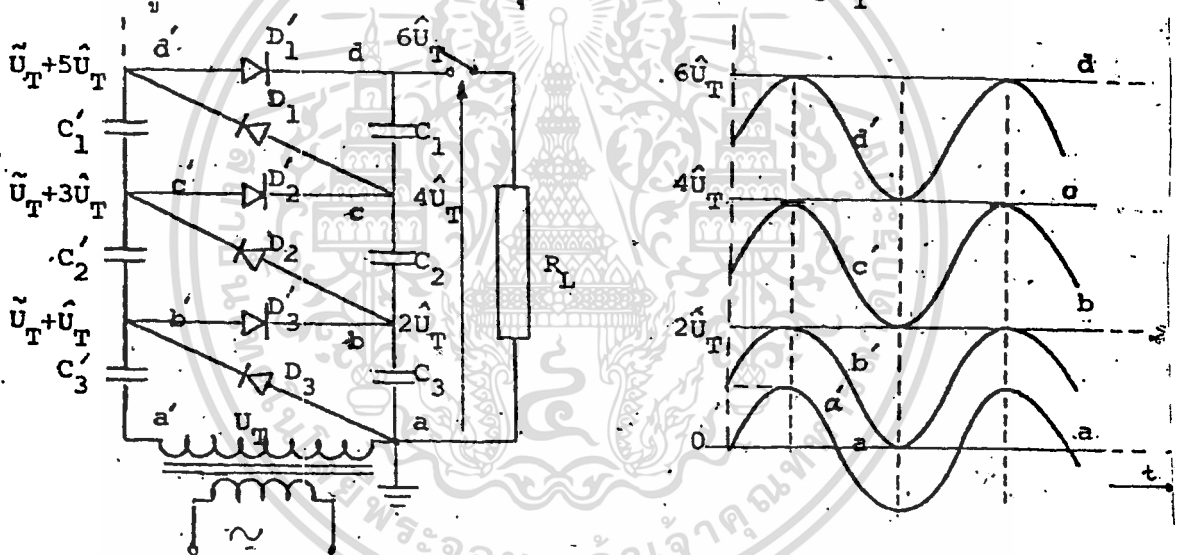
จะเห็นไคว่าการที่เราใช้หลาย ๆ ชั้นต่อกันจะช่วยให้สามารถสร้างแรงดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

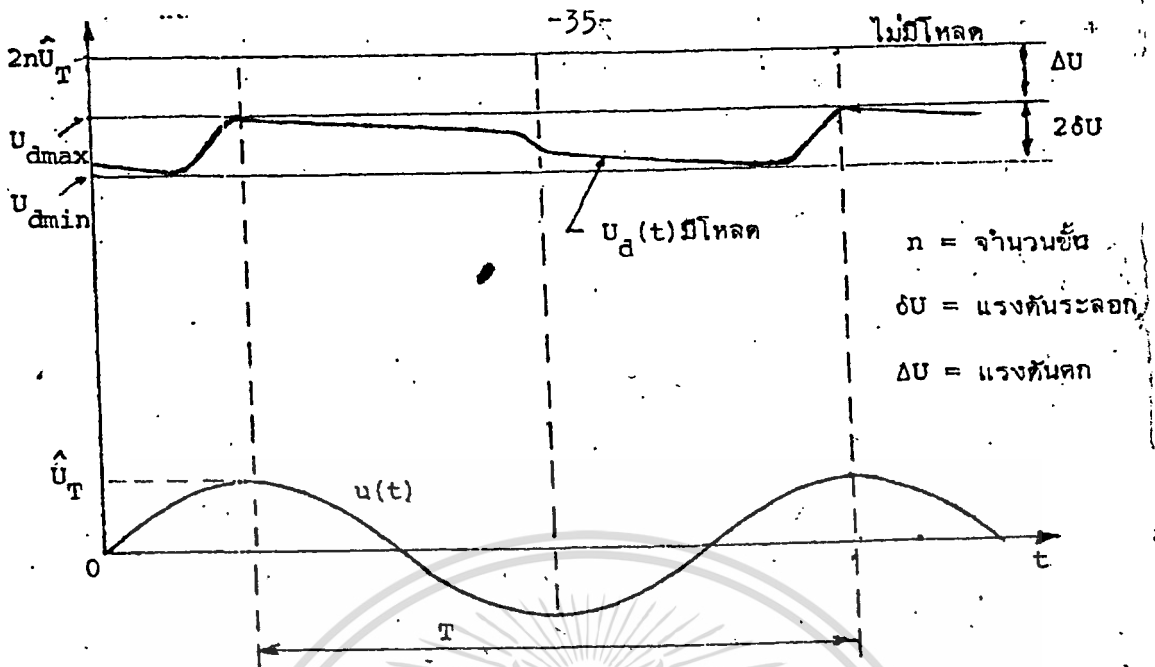
มาก ๆ ใด โดยที่ตัวเก็บประจุและไดโอดและไดโอดแต่ละตัวจะต้องทนแรงดันเพียงสองเท่าของค่าออกแรงดันหม้อแปลงตัวจ่าย ยกเว้นตัวเก็บประจุตัวล่างสุด (ในที่นี้คือ C_3) จะได้รับแรงดันสูงสุดเพียง \hat{U}_T เท่านั้น แรงดัน ณ จุดต่าง ๆ ในขณะที่ไม่มีการโหลดแสดงอยู่ เหนือของเวลาจะได้อ้างในรูป 1 - 27 b

b) แรงดันวงจรชั้นบันไดเมื่อมีโหลด

วงจรชั้นบันไดสร้างแรงดันกระแสตรงจะสามารถสร้างได้ประมาณสองเท่าของค่าออกแรงดันค่านำจ่ายออกของหม้อแปลงตัวจ่ายคุณด้วยจำนวนชั้น ถ้าหากไม่มีโหลดหรือไม่มีแรงดันตก แต่เมื่อมีโหลดจะมีแรงดันตกในไดโอด ในหม้อแปลง และในตัวเก็บประจุเอง ฉะนั้นในวงจรรูป 1 - 27 จะได้แรงดันที่จุด a น้อยกว่า $6\hat{U}_T$



รูป 1 - 27 วงจรชั้นบันไดสร้างแรงดันกระแสตรงตามวงจรของ Creinach
 a) รูปวงจรชั้นบันได
 b) รูปคลื่นแรงดัน ณ จุดต่าง ๆ ขณะไม่มีโหลด



รูป 1 - 28 รูปคลื่นแรงดันกระแสตรงที่ไต่จากวงจรชั้นบันไดในขณะที่มีโหลด

ในรูป 1 - 34 แสดงถึงรูปคลื่นแรงดันกระแสตรงที่เปลี่ยนไปตามเวลา $U_d(t)$ ของวงจรชั้นบันไดเมื่อมีโหลด แรงดันที่ไต่ที่ปลายแรงสูงจะต่ำกว่าค่าอุทกการ ทั้งนี้เนื่องจากแรงดันตก ΔU และแรงดันระลอก δU

(1) การคำนวณหาแรงดันระลอก

แรงดันกระแสตรงที่ไต่จากการเรคทิฟายจากแรงดันกระแสสลับ โดยใช้ไดโอดเรียงกระแสและมีตัวเก็บประจุกรองกระแสเพื่อให้ได้อัตโนมัติ แต่คลื่นที่ไต่ก็ยังเป็นระลอกกึ่งที่ไต่แล้วแล้วในวงจรพื้นฐาน แรงดันระลอกของวงจรชั้นบันไดอาจหาได้เช่นเดียวกับวงจรที่มีไดโอดและตัวเก็บประจุกรองกระแสอย่างละตัว (รูป 1-24) ซึ่งมีความสัมพันธ์ คือ

$$U = \frac{I_d}{2fC}$$

เมื่อ I_d คือ กระแสตรงที่จ่ายให้โหลด

f คือ ความถี่ของแรงดันกระแสสลับที่จะแปลงเป็นกระแสตรง

C คือ ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุกรองกระแส

ในกรณีวงจรชั้นบันไดในรูป 1 - 27 ตัวเก็บประจุรองกระแส C_1, C_2 และ C_3 ซึ่งมีความจุไฟฟ้าทุกตัวเท่ากับ C สมมุติว่าทุก ๆ โขเคลวงจรจ่ายกระแสให้กับโหลดที่ปลายแรงสูงจุด a เท่ากับ I_a นั่นคือ C_1 จะจ่ายประจุออกไปเท่ากับ $Q = \frac{I_a}{f}$ จึงทำให้เกิดแรงดันตกไป

$$\delta U_1 = \frac{I_a}{2fC_1}$$

ในขณะที่เกี่ยวกับ C_2 ต้องจ่ายประจุให้กับโหลดเท่ากับ Q และถ่ายเทอกประจุให้ตัวเก็บประจุ C_1 เท่ากับ Q ฉะนั้น C_2 จะจ่ายประจุออกไปเท่ากับ $2Q = \frac{2I_a}{fC}$ จึงทำให้แรงดันตกไป

$$\delta U_2 = \frac{2I_a}{2fC_2}$$

และ C_3 ก็ต้องถ่ายเทอกประจุไปให้โหลดเท่ากับ Q และให้กับ C_2 เท่ากับ Q และถ่ายเทอกให้ C_2 เท่ากับ Q ฉะนั้นแรงดันจะตกไปใน C_3 คือ

$$\delta U_3 = \frac{3I_a}{2fC_3}$$

แรงดันตกในตัวเก็บประจุรองกระแสเหล่านี้ทำให้แรงดันระลอกทั้งหมดรวมเป็น

$$\begin{aligned} \delta U &= \delta U_1 + \delta U_2 + \delta U_3 \\ &= \frac{I_a}{2f} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{2}{C_2} + \frac{3}{C_3} \right) \end{aligned}$$

ถ้าตัวเก็บประจุทุกตัวมีค่าความจุไฟฟ้าเท่ากับ C

$$\delta U = \frac{I_a}{2fC} (1 + 2 + 3)$$

ถ้าวงจรชั้นบันไดมี n ชั้น จะได้แรงดันระลอกรวม

$$\begin{aligned} \delta U &= \frac{I_a}{2fC} (1+2+3+\dots+n) \\ &= \frac{I_a}{2fC} n \left(\frac{n+1}{2} \right) \end{aligned}$$

จะเห็นได้ว่าตัวเก็บประจุกลาง ถูก เป็นตัวถ่ายเทออกหรือจ่ายประจุออกไปมากที่สุด จึงนับว่าเป็นตัวที่มีผลต่อแรงดันระลอกอย่างยิ่ง ฉะนั้นความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุรองกระแส ตัวกลางสุดควรมีค่าสูงกว่าตัวถัดไป

(2) การคำนวณแรงดันตก ΔU

ในขณะที่วงจรจ่ายโพลกกระแส I_d (หรือประจุ $Q = \frac{I_d}{f}$ ทุก ๆ ไซเคิล จะมีการถ่ายเทประจุจากตัวเก็บประจุ (C'_1, C'_2, C'_3) ไปให้กับตัวเก็บประจุกรองกระแส (C_1, C_2, C_3) จึงทำให้เกิดแรงดันตกในตัวเก็บประจุพัก (C'_1, C'_2, C'_3) ในทำนองเดียวกันการถ่ายเทประจุจากตัวเก็บประจุกรองกระแสไปยังตัวเก็บประจุพัก (C'_1, C'_2, C'_3) ก็ย่อมทำให้เกิดแรงดันตกเช่นกัน สรุปแล้วตัวเก็บประจุทุกตัวจะได้รับแรงดันอีกประจุน้อยกว่าค่าอุดมการ ยกเว้นตัวเก็บประจุพักตัวกลางสุดที่มีโอกาสได้รับแรงดันอีกประจุ เท่ากับค่าออกของแรงดันจ่ายออกของหม้อแปลงตัวจ่าย

จากวงจรชั้นบนโคไทรบูล 1-27 ถ้าจ่ายโพลกกระแส I_d ออกไปที่จุด a หรือ ประจุ Q ทุก ๆ ไซเคิล ในช่วงครึ่งไซเคิลบวกโคไทรบูล D_1, D_2 และ D_3 นำกระแส ตัวเก็บประจุ C_3 จะถ่ายเทประจุออกไปทั้งหมด $\frac{3I_d}{f}$ จึงทำให้เกิดแรงดันตกใน C_3 ดังนั้น C_3 จะได้รับแรงดันอีกประจุสูงสุดเพียง

$$2U_T - \frac{3I_d}{fC}$$

แรงดันนี้ที่ C_2 จะได้รับประจุจาก C_3 แต่เมื่อ C_3 ถ่ายเทประจุให้ C_2 เท่ากับ $\frac{2I_d}{f}$ และให้โพล $\frac{I_d}{f}$ จึงทำให้เกิดแรงดันตกใน C_3 เอง ฉะนั้น C_2 จะได้รับประจุจาก C_3 ภายแรงดันอีกประจุเพียง

$$(U_{C'_2})_{max} = 2U_T - \frac{3I_d}{fC} - \frac{3I_d}{fC}$$

ในครึ่งไซเคิลต่อมา C'_2 จะต้องถ่ายเทประจุออกไปให้ C_2 จึงทำให้แรงดันตกไปอีก $\frac{2I_d}{fC}$ แรงดันของ C'_2 จะเหลือเพียง

$$(U_{C_2})_{min} = 2U_T - \frac{6I_d}{fC} - \frac{2I_d}{fC}$$

ทำนองเดียวกับแรงดันที่ C_2 จะได้รับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$\begin{aligned} (U_{C_2})_{\min} &= (U_{C_2})_{\max} - \frac{2I_d}{fC} \\ &= 6U_T - \frac{8I_d}{fC} \end{aligned}$$

ฉะนั้นแรงดันตกทั้งหมดจะเท่ากับผลรวมของแรงดันตกในตัวเก็บประจุแต่ละตัว ถ้าวงจรชั้นบันไดมี n ชั้นจะได้

$$\Delta U = \frac{I_d}{fC} \left(\frac{2}{3} n^3 + \frac{1}{2} - \frac{1}{6} n \right)$$

เมื่อตัวเก็บประจุทุกตัวมีค่าความจุไฟฟ้าเท่ากันหมด คือ C แรงดันที่ผลิตออกมาได้ที่ปลายแรงสูงจะกระเพื่อมอยู่ระหว่างค่าสูงและค่าต่ำ คือ

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

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

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

$$\Delta U = \frac{I_d}{f \cdot C} \cdot \frac{2}{3} n^3$$

ฉะนั้นแรงดันกระแสดร้งที่ได้อาจหาได้จากวงจรชั้นบันไดจึงหาค่าโดยประมาณได้จากสมการ

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

จะเห็นได้ว่าถ้าต้องการลดแรงดันตกให้น้อยลง หรืออีกนัยหนึ่งก็คือเพิ่มแรงดันกระแสดร้งได้โดยการเพิ่มค่าความจุไฟฟ้า หรือเพิ่มควมถี่ของแรงดันกระแสดร้งที่จ่ายออกจากหม้อแปลงตัวจ่าย

จำนวนชั้นบันไดที่เหมาะสม

การสร้างแรงดันกระแสดร้งด้วยวงจรชั้นบันได เราอาจสร้างแรงดันให้สูงขึ้นได้โดยการเพิ่มจำนวนชั้นในทางภาคปฏิบัติถ้าหากกำหนดค่ากระแสไหลกลับ I_d ให้ จากค่าความจุไฟฟ้าที่มี ความถี่ของตัวจ่ายที่กำหนด จะพบว่าถ้ายังเพิ่มจำนวนชั้นสูงมากเกินไป จะ

ทำให้แรงดันตกมาก แรงดันที่ได้ออกมาที่โหลดกลับตกลง แสดงว่าจำนวนชั้นของวงจรมีขีจจำกัด
หรือมีค่าที่พอเหมาะสมควรสร้างแรงดันโคสูงสุค ซึ่งหาได้จาก

$$\frac{dU_d}{dn} = 0$$

เมื่อ U_d เป็นแรงดันกระแสตรงที่โหลด
จำนวนชั้นที่พอเหมาะ คือ

$$n_{opt} = \sqrt{\frac{\hat{U}_T \cdot f \cdot C}{I_d}}$$

$$\begin{aligned} \text{ฉะนั้น } (U_d)_{opt} &= \frac{4}{3} n_{opt} \hat{U}_T \\ &= \frac{2}{3} (2n_{opt} \hat{U}_T) \end{aligned}$$

นั่นคือแรงดันกระแสตรงที่สร้าง ได้จะมีค่าเพียง 67% ของค่าทฤษฎีเท่านั้น และยิ่งกว่านั้น
ตามความเป็นจริงแล้ว ยังมีแรงดันตกเนื่องจากไดโอดอีก แรงดันที่ได้ออกมาจะยิ่งต่ำลงไปอีก

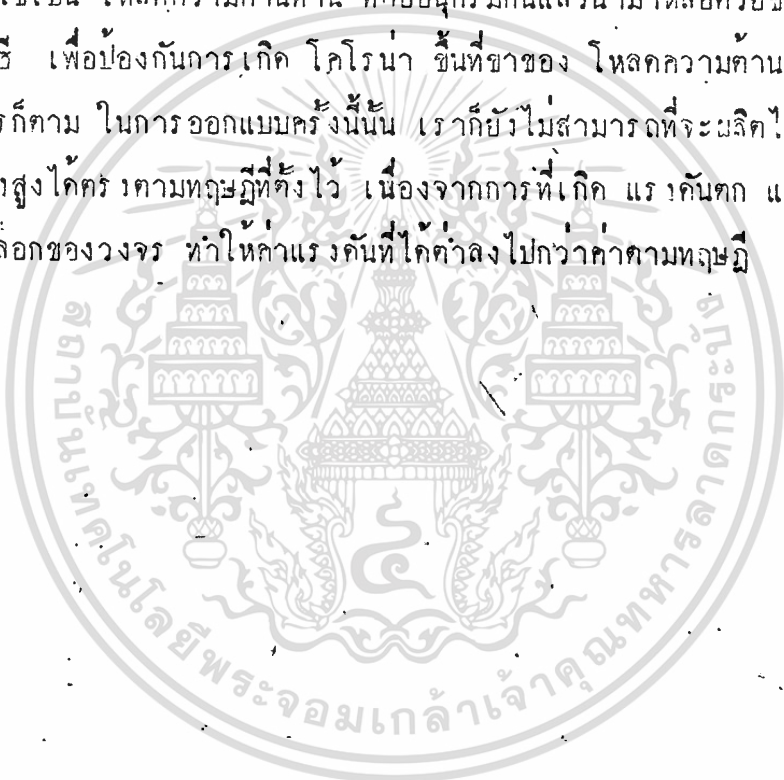
ในการวิจัยครั้งนี้เราได้ออกแบบ COCKROFT - WALTON
VOLTAGE MULTIPLIER CIRCUIT ไว้ดังนี้

- C = 0.25 MF
- PIPE WORKING VOLTAGE = 800 V.
- N = 9 STAGES
- R₁ = 280 M

บทที่ 6

สรุปผลการทดสอบ

จากการออกแบบและสร้างเครื่องผลิตไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง ใน
ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นั้น เราสามารถที่จะผลิตไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงได้ ประมาณ
30 กิโลโวลต์ ซึ่งเราได้ใช้เทคนิคการวัดโดยใช้หลักของ โวลเทจ คิวเคอร์
ซึ่งโวลต์ที่ใช้เป็น โวลต์ความต้านทาน ที่ช้อนุกรมกันแล้วนำมาห่อด้วยซีเมนต์ไว้ใน
ท่อ พี วี ซี เพื่อป้องกันการเกิด โครโรน่า ชั้นที่สามของ โวลต์ความต้านทาน
แต่อย่างไรก็ตาม ในการออกแบบครั้งนี้นั้น เราก็คงไม่สามารถที่จะผลิตไฟฟ้ากระแส-
ตรงแรงสูงได้คร้ ตามทฤษฎีที่ตั้งไว้ เนื่องจากการที่เกิด แร่ คันทก และเกิด
แรงดันระลอกของวงจร ทำให้ค่าแรงดันที่ได้น่าจะต่ำกว่าค่าตามทฤษฎี



เครื่องมือวัดกระแสไฟแรงสูง

(THE ELECTROMETER VALVE)

จุดมุ่งหมาย

เพื่อที่จะวัดค่าความต้านทานอินพุตที่มีประสิทธิภาพ (EFFECTIVE INPUT RESISTANCE) ของหลอดอิเล็กโตรมิเตอร์ (ELECTROMETER VALVE) เบอร์ ME.1400 เมื่อค่อแบบไตรโอด (TRIODE) (นี่เป็นเพียง " กึ่งหนึ่ง " (SEMI) มากกว่าที่จะเป็นหลอดอิเล็กโตรมิเตอร์แบบสมบูรณ์ คุณสมบัติของมันเป็นเสมือนข้อตกลงระหว่างไตรโอดธรรมดา กับหลอดอิเล็กโตรมิเตอร์)

ทฤษฎี

ตามหลักการพื้นฐานแล้ว หลอดอิเล็กโตรมิเตอร์ จะมีการออกแบบและการทำงานเช่นเดียวกับหลอดความร้อนประเภทไตรโอด, เตตระโอด (TETRODE) หรือ เพนโอด (PENTODE) ทั่ว ๆ ไป มันจะแตกต่างกันก็เพียงแต่ว่า หลอดอิเล็กโตรมิเตอร์นั้นจะถูกออกแบบมาให้มีค่ากระแสกริด (GRID CURRENT) ที่ค่ามาก ๆ เมื่อเทียบกับค่ากระแสกริดในหลอดทั่ว ๆ ไป และถึงแม้ค่ากระแสกริดนี้จะมีค่าต่ำมากจนกระทั่งสามารถตัดทิ้งไปได้ในการใช้งานส่วนมาก แต่ก็ยังมีค่ากำลังถึง 10^{-6} ถึง 10^{-9} แอมแปร์ กระแสเหล่านี้เกิดจากองค์ประกอบหลาย ๆ อย่าง องค์ประกอบที่สำคัญ ๆ มีดังนี้ คือ

- 1) การลัดกันของกริด (GRID) คออิเล็กตรอน (ELECTRON) ซึ่งเคลื่อนที่จากแคโทด (CATHODE) ไปยังแอโนด (ANODE)
- 2) การจับไอออนบวก (POSITIVE IONS) ในก๊าซ หรือที่ถูกปลดปล่อยมาจากแคโทด
- 3) มีปรากฏการณ์ โฟโต-อิมิสชัน (PHOTO-EMISSION) ของอิเล็กตรอน เกิดขึ้น

4) เกิดการรั่วไหลทางไฟฟ้า (ELECTRICAL LEAKAGE) ซ้ำม
หลอกแก้วที่เป็นฉนวน

ผลขององค์ประกอบทั้ง 4. ข้อนี้ สามารถลดลงให้ค่าที่สุด โดยการ

1) ออกแบบกริดให้มีโครงสร้างเปิด (OPEN STRUCTURE)
มากขึ้น

2) ใช้งานค้ำยศักดิ์ค่าที่ขั้วอิเล็กโทรด (ELECTRODE) ค่า ๆ
(เพื่อที่จะป้องกันการจับอออนบวกให้เป็นไปได้อย่างที่สุด)

3) บรรจุขั้วอิเล็กโทรดทั้งหมดไว้ในกล่องทึบแสง (LIGHT-TIGHT
BOX) และใช้งานค้ำยค่าอุณหภูมิของไส้หลอด (FILAMENT) ที่ค่าลง

4) ทำให้ทางเดินของการรั่วไหลทางไฟฟ้ายาวที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้
ในปัจจุบัน เราสามารถได้กระแสกริดซึ่งมีค่าต่ำกว่า 10^{-14} แอมแปร์
โดยการยอมลดค่าอัตราขยายของหลอด (VALVE AMPLIFICATION) เพื่อที่
จะได้ค่าความนำร่วม (MUTUAL CONDUCTANCE; G_m) ประมาณ 0.01 mA/V
นั่นก็คือ การปรับปรุงค่าของกระแสกริดขนาด 10^7 เท่า ต่อการสูญเสียของค่าอัตรา
ขยายของหลอด 10^3 เท่า

ตามที่ได้อธิบายเอาไว้ จะมีค่าของกระแสตกค้าง (RESIDUAL
CURRENT) น้อย ๆ ที่เปลี่ยนแปลงตลอดอายุการใช้งานของหลอด แล้วก็ยังขึ้นอยู่กับ
ขั้นตอนการใช้งานอีกด้วย (ยกตัวอย่างเช่น การรั่วไหลทางไฟฟ้า จะขึ้นอยู่กับ
อุณหภูมิห้องและความชื้น) โดยทั่วไปแล้วที่ค่าของอาโนดโวลเตจ (ANODE
VOLTAGE) ที่ตั้งที่ค่าหนึ่ง, ค่ากระแสอาโนด (ANODE CURRENT) จะเปลี่ยนแปลง
เป็นความสัมพันธ์กับแรงคั่นกริด (GRID VOLTAGE) ดังรูปที่ 1. สำหรับการ
ไบแอส (BIAS) ค้ำยค่าลมน้อย ๆ จะมีกระแสอิเล็กตรอนจากองค์ประกอบ
ที่ 1) เป็นส่วนประกอบที่มากที่สุด และสำหรับการไบแอสค้ำยค่าสูง ๆ องค์ประกอบ
ที่ 2), 3) และ 4) จะมีความสำคัญมากขึ้น สำหรับการไบแอสค้ำยค่าลมน้อย ๆ

ซึ่งเป็นการใช้งานปกตินั้น ผลของกระแสกริดนี้จะทำให้เสมือนว่ามีความต้านทาน (RESISTANCE) ค่าสูง ๆ มาต่อระหว่างขาอินพุท (INPUT TERMINAL)

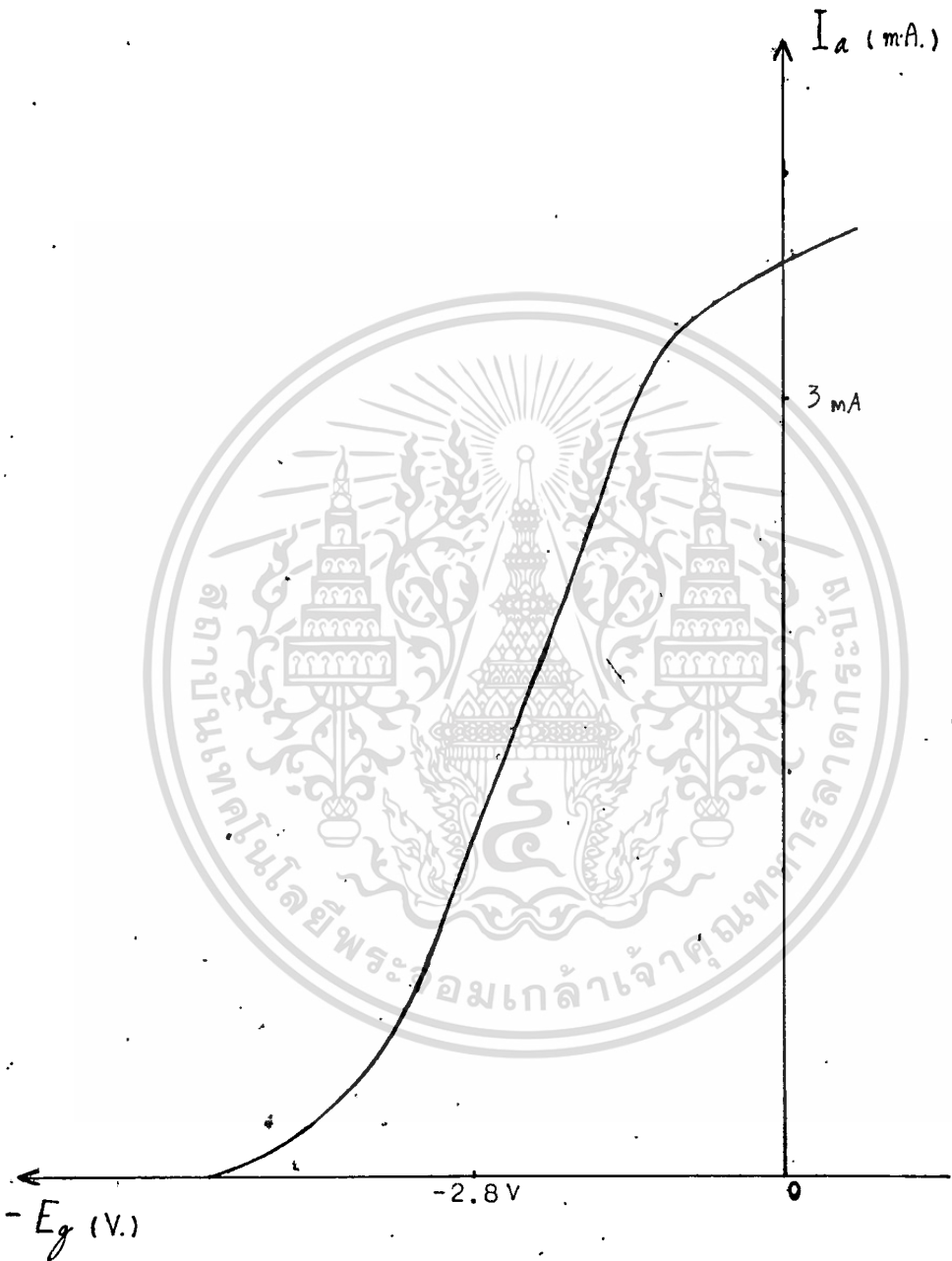
จุดมุ่งหมายหลักของการทดลองนี้ก็เพื่อจะหาค่า ประสิทธิภาพของความต้านทานดังกล่าวนี้ รูปที่ 2. จะสามารถอธิบายถึงเทคนิค (TECHNIQUES) ที่นำมาใช้ โดยการใส่ไบแอสแบทเตอรี (BIAS BATTERY) ตัวคอนเดนเซอร์ (CONDENSER) ที่เรารู้ค่าแล้วจะถูกอัด (CHARGED) ให้มีค่าแรงดันเป็น V_0 แล้วก็จะถูกปลดออกจากแหล่งจ่ายไฟ (SUPPLY) หลังจากที่ถูกปลดออกแล้วนั้น ตัวคอนเดนเซอร์จะคายประจุ (DISCHARGE) ผ่าน ความต้านทานอินพุทของ หลอดอิเล็กโตรมิเตอร์ (ELECTROMETER INPUT RESISTANCE; R_g) ตามสมการดังต่อไปนี้

$$V = V_0 \text{Expo}(-t/R_g C)$$

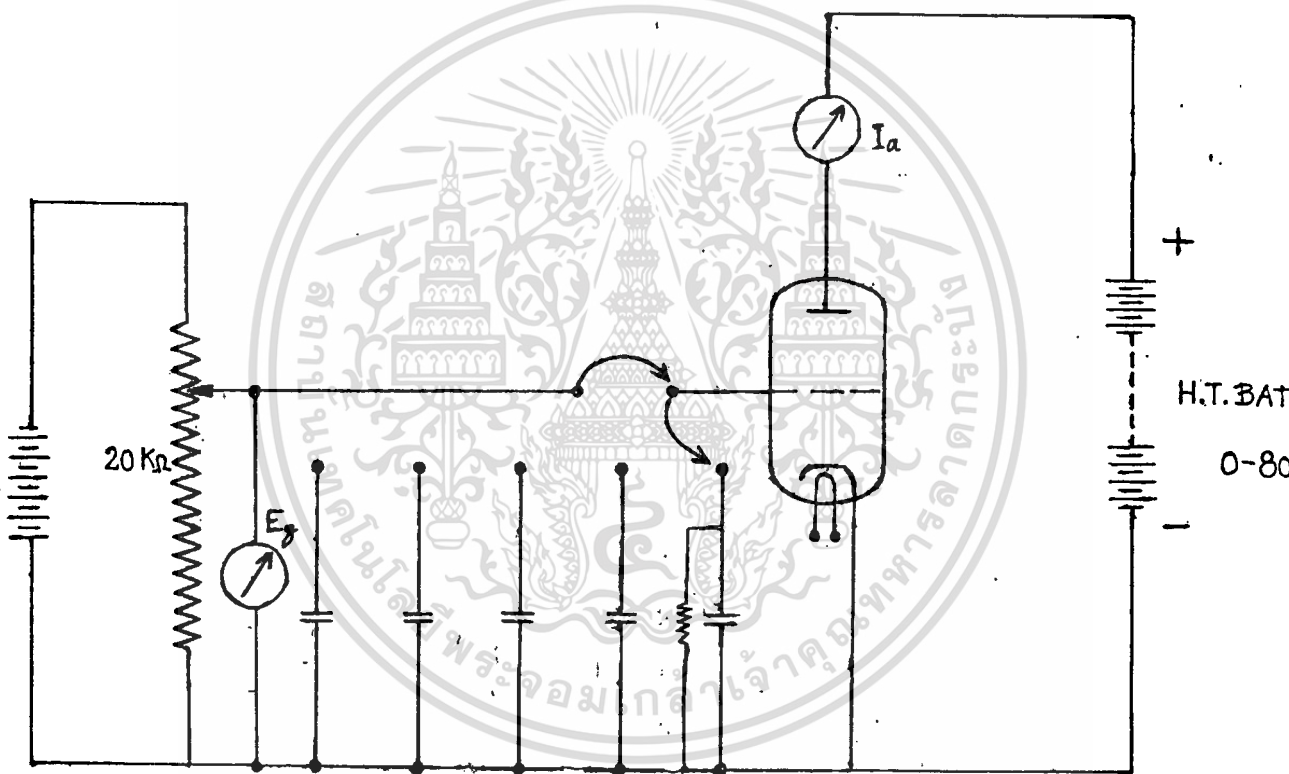
จะได้ว่า $\text{Log}_e V = \text{Log}_e V_0 - \frac{t}{R_g C}$

โดยการวัดอัตราการลดลงของแรงดันที่คร่อมคอนเดนเซอร์ (V) และการเขียนกราฟของ $\text{Log}_e V$ เทียบกับเวลา เราจะสามารถหาค่าของผลคูณของ $R_g C$ นี้ได้

หมายเหตุ แรงดันที่ตกคร่อมคอนเดนเซอร์ซึ่งมีค่าเท่ากับแรงดันของการไบแอสกริด (GRID BIAS BATTERY) ของหลอด นั้นจะสามารถหาได้โดยการวัดค่ากระแสแอโนด (I_a) ของหลอดอิเล็กโตรมิเตอร์และนำมาเทียบกับกราฟเส้นโค้ง (CURVE) ของ I_a ต่อ E_g ในรูปที่ 1.



รูปที่ 1. กราฟแสดงคุณสมบัติของ I_a ต่อ E_g เมื่อให้ E_a คงที่



รูปที่ 2. วงจรที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์การทดลอง

บอร์ดชุดการทดลองหลอดอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ อันประกอบด้วย

- 1) หลอดอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ เบอร์ ME.1400 1 หลอด
(THE ME.1400 ELECTROMETER VALVE)
- 2) แอมป์-มิเตอร์ กระแสตรง 0 - 3 มิลลิแอมป์ 1 ตัว
(D.C. AMP-METER 0 - 3 mA.)
- 3) โวลต์-มิเตอร์ กระแสตรง 0 - 5 โวลต์ 1 ตัว
(D.C. VOLT-METER 0 - 5 V.)
- 4) กริด-ไบแอส แบตเตอรี่ 9 โวลต์ 1 ตัว
(GRID-BIAS BATTERY 9 V.)
- 5) ไฮ-เทนชัน แบตเตอรี่ 80 โวลต์ 1 ตัว
(HIGH-TENSION BATTERY 80 V.)
- 6) โพลเทนเชียล-มิเตอร์ 20 กิโลโอห์ม 1 ตัว
(POTENTIAL-METER 20 K Ω)
- 7) ทั่วความต้านทาน 1 เมกกะโอห์ม 3 ตัว
(RESISTORS 1 M Ω)
- 8) ทั่วคอนเดนเซอร์ ชนิดต่าง ๆ ค่าต่าง ๆ
(CONDENSERS)

ขั้นตอนการทดลอง

- ตอน 1.
- 1) คอวงจรตามรูปที่ 2 วัด I_a โดยเทียบกับ E_g โดยใช้ช่วงกระแสระหว่าง 0 - 2 mA.
 - 2) ต่อ คอนเดนเซอร์ค่า 3000 pf. ระหว่างกริดและแคโทดของหลอด ตั้งแรงดันไบแอสกริดที่ค่า -2.8 V. (0.5 VOLTS เหนือจุดตัด-ออฟ (CUT-OFF) ของหลอด -3.3 VOLTS)
 - 3) ปลดแหล่งจ่ายไฟให้กริด (GRID-SUPPLY) ออก สังเกตการเปลี่ยนแปลงของกระแสแอนอด ในช่วงเวลาหนึ่งจนกระทั่งถึงช่วงที่เป็นสถานะสม่ำเสมอ (STEADY-STATE)
 - 4) ต่อแหล่งจ่ายไฟให้กริดเข้าไปอีกครั้งหนึ่ง ตั้ง I_a ที่ 3 mA.
 - 5) ปลดแหล่งจ่ายไฟให้กริดออกอีก สังเกตผลของการเปลี่ยนแปลงของ I_a
 - 6) ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 2) ถึง ข้อ 4) โดยให้ใช้ตัวคอนเดนเซอร์ค่า 1000 pf. แทน

ตอน 2. การนำหลอดอิลีคโตรมิเตอร์มาประยุกต์ใช้งาน

- 1) แทนที่ตัวคอนเดนเซอร์ 1000 pf. ด้วยชุดตัวต้านทานขนานตัวคอนเดนเซอร์ (PARALLEL CONDENSER-RESISTOR UNIT) ดังรูปที่ 2. ทำการทดลองตามข้อ 2) และ 3) ในตอน 1.
- 2) ทดลองตามข้อ 1) ตอน 2. ซ้ำ โดยใช้ตัวคอนเดนเซอร์แบบอิลีคโตรไลต์ (ELECTROLYTIC-CONDENSER) แทน
- 3) ทำการทดลองเหมือนข้อ 1), ข้อ 2) ตอน 2. โดยใช้ตัวคอนเดนเซอร์ค่าต่าง ๆ อีก 2 ตัว

ผลการทดลอง

ทอม 1. GRID CUT-OFF VOLTAGE = -3.3 V.

I_a mA	0	0	0	0	0.025	0.05	0.12	0.39		1.60	1.75	1.925	2.0
E_g VOLTS	-5.0	-4.5	-4.0	-3.5	-3.0	-2.8	-2.5	-2.0	-1.5	-1.0	-0.9	-0.8	-0.75

C 3000 pf.

I_a mA	0.05	0.062	0.095	0.16	0.32	0.41	1.79	1.75	1.75	1.75	1.75
time mins.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

C 1000 pf.

I_a mA	0.045	0.05	0.07	0.095	0.13	0.21	0.35	0.72	1.75	1.79	1.75
time SECS.	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150

ทอม 2. $E_g = -2.8$ V.

R = 1 M Ω

I_a mA	0.05	0.	1.40	2.00	2.40	2.71	2.82	2.88	2.88	2.88	2.88
time SECS.	0	30	60	90	120	160	190	220	240	270	300

C = 50 Mf.

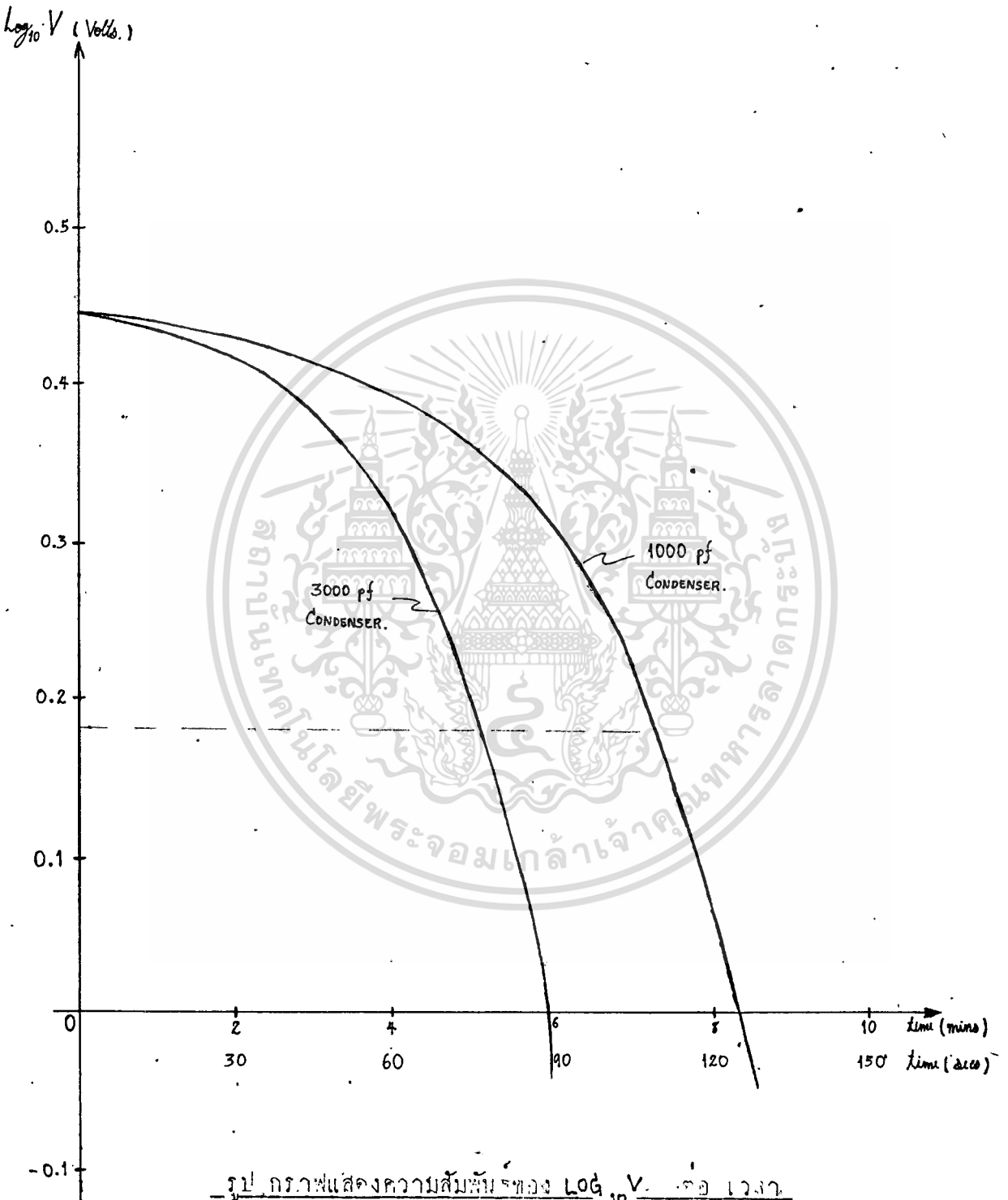
C = 100Mf.

I_a mA	0.05	0.27	0.53	0.78	1.05	1.40	1.71	1.85	2.00	2.00	2.00
time MINS.	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40

C = 0.1Mf.

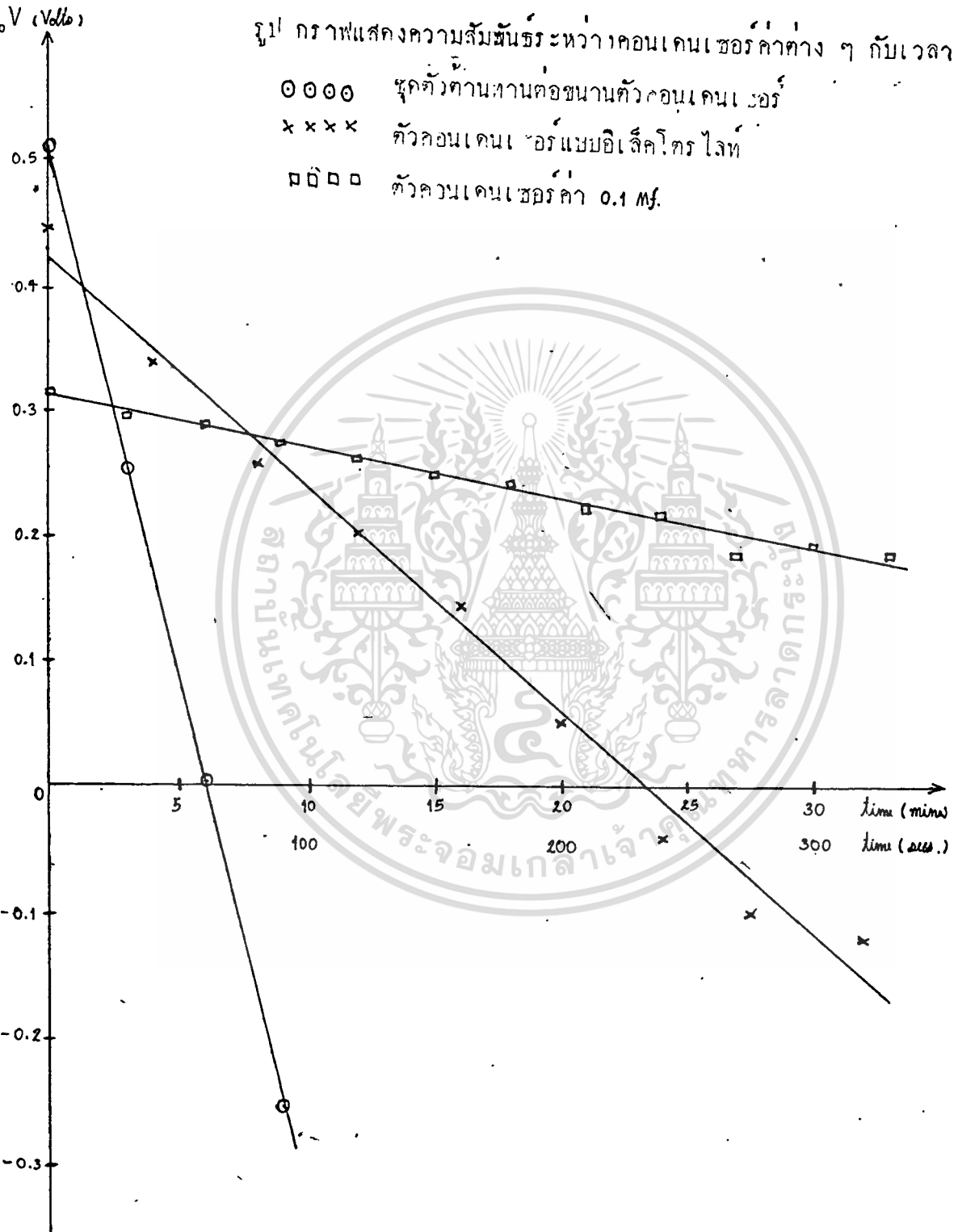
I_a mA	0.365	0.395	0.43	0.47	0.515	0.565	0.625	0.70	0.725	0.86	0.86
time MINS.	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30

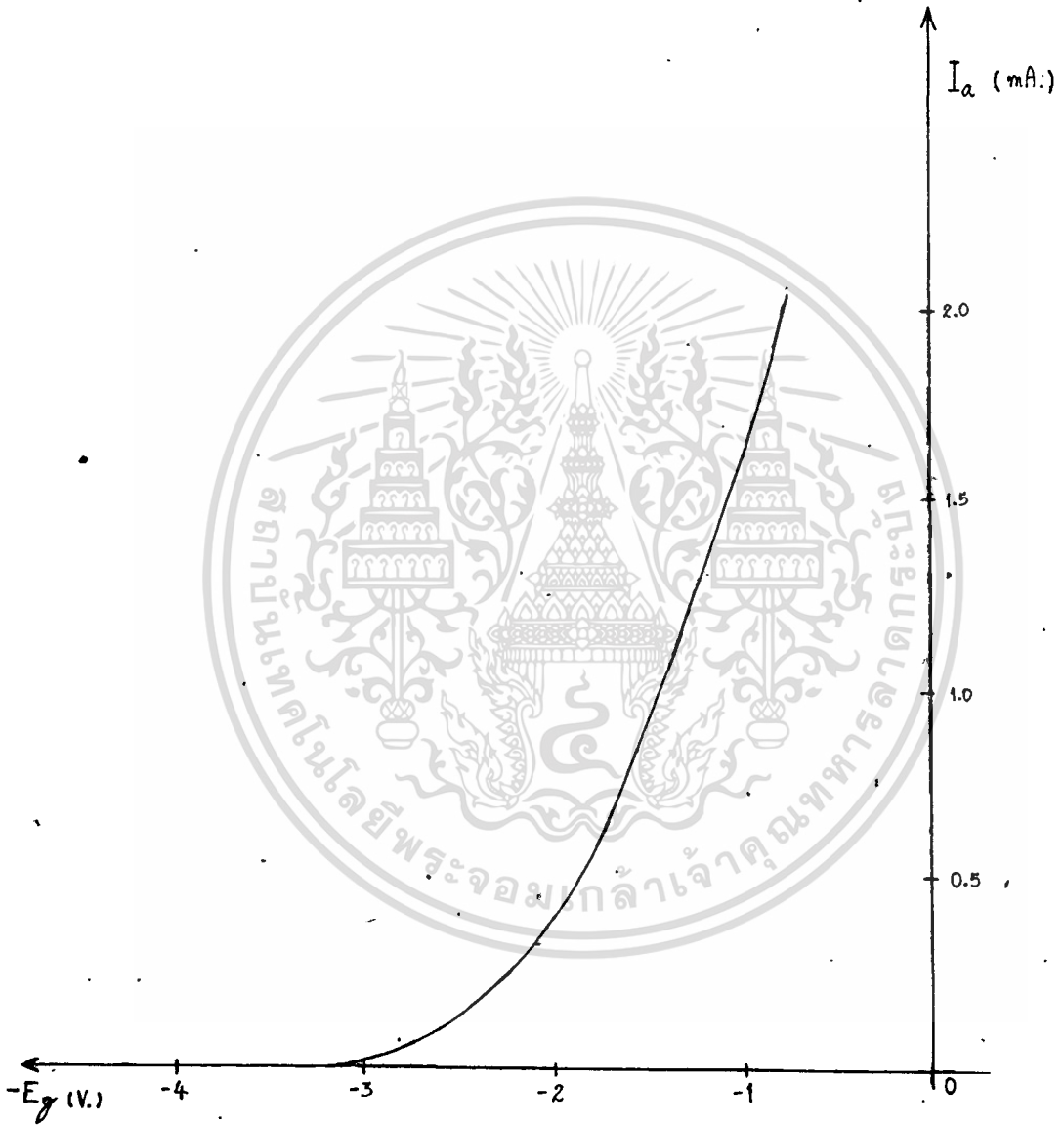
$E_g = -2$ V.



รูป กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ $\text{Log}_{10} V$ กับ เวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูป กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_a กับ E_g ที่ $E_a = 60$ โวลต์
(ขวมนผลการทดลอง)

วิเคราะห์ผลการทดลอง

ตอน 1.

- 1) ทันทีที่ปลั๊กแหล่งจ่ายไฟไบแอสกริด (GRID-BIAS SUPPLY) ออกคอนเดนเซอร์จะเริ่มคายประจุผ่านความต้านทานอินพุทของหลอด (ELECTROMETER INPUT RESISTANCE) อัตราการคายประจุในช่วงตอนต้นจะมีค่าต่ำมากจนแทบจะวัดหาค่าไม่ได้ จากนั้นอัตราการคายประจุจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงสถานะสม่ำเสมอ ในเวลาต่อมากระแสจะเพิ่มจนถึงค่าที่เสถียร (STABLE) เมื่อแรงดันกริดที่ตกคร่อมขานินพุทของหลอดไครโอมีค่าลดลงเรื่อย ๆ เราจะพบว่าตัวคอนเดนเซอร์ค่าน้อย ๆ จะคายประจุได้เร็วกว่า
- 2) เราจะโคจรกราฟแสดงคุณสมบัติของ I_a ต่อ E_g จากการทดลองข้างต้นซึ่งแสดงให้เห็นว่า คอนเดนเซอร์จะไม่มีผลต่อแรงดันกริด ในขณะที่ไม่มีแรงดันตกคร่อมตัวคอนเดนเซอร์เลยสำหรับ อินพุทที่เป็นกระแสตรง (D.C. INPUT)
- 3) เมื่อต่อแหล่งจ่ายไฟให้กริดเข้าที่ขากกริดอีกและตั้งค่า I_a เป็น 3 mA. และถอดแหล่งจ่ายไฟนี้ออกไปอีก ในขณะที่คอนเดนเซอร์ถูกต่อเข้ากับขากกริด จะพบว่ากระแสแอโนด I_a จะตกลงอย่างรวดเร็วจนกระทั่งถึงค่า ๆ หนึ่ง ทั้งนี้เนื่องจากว่า คอนเดนเซอร์คายประจุจนมีค่าต่ำลงและศักย์ที่กริด (ซึ่งเท่ากับแรงดันค่าสุดท้าย (FINAL VOLTAGE) ของคอนเดนเซอร์) ไม่ต่ำพอที่จะทำให้กระแสแอโนดคงค่าอยู่ที่ 3 mA. จริง ๆ แล้ว ศักย์นี้จะสามารถทำให้ I_a มีค่าไม่สูงกว่า 2 mA. สำหรับคอนเดนเซอร์ 2 ตัว

กริด-ไบแอส = 1.5 V. $\left\{ \begin{array}{l} \text{สำหรับ } C \text{ 3000 pf. ; } \frac{-1}{R C \cdot \text{Log}_e 10} = \text{Slope} = \frac{-0.16}{60} \\ \therefore R_g = \frac{2.3 \cdot 0.16 \cdot 3000 \cdot 10^{-12}}{-0.305} = 5.43 \cdot 10^{10} \Omega \\ \text{สำหรับ } C \text{ 1000 pf. ; } \frac{-1}{R C \cdot \text{Log}_e 10} = \frac{-0.305}{30} \\ \therefore R_g = \frac{2.3 \cdot 0.305 \cdot 1000 \cdot 10^{-12}}{-0.305} = 4.27 \cdot 10^{10} \Omega \end{array} \right.$

กราฟคุณสมบัติของ Log V - เวลา

ความชัน (SLOPE) ของกราฟจะมีค่าน้อยในตอนแรกเริ่ม และจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งกราฟพุ่งอยู่ในแนวตั้ง (VERTICAL) นั่นก็คือ Log V ไม่ขึ้นกับ เวลา

ตอน 2.

- 1) เพื่อที่จะวัดค่าความต้านทานรั่วไหล (LEAKAGE RESISTANCE) ของตัวคอนเดนเซอร์แบบอิเล็กโทรไลต์

$$\text{Slope of Graph} = \frac{-1}{R C} = \frac{-0.18}{600}$$

$$\therefore R_g = \frac{600}{0.8 \cdot 100 \cdot 10^{-3}} = 7.5 \cdot 10^3 \Omega$$

- 2) คุณสมบัติในการคายประจุของชุดตัวต้านทานกอนานตัวคอนเดนเซอร์

$$\frac{-1}{R C \cdot \text{Log}_e 10} = \text{Slope} = \frac{-0.362}{50}$$

$$\therefore \frac{1}{R C} = \frac{50}{0.362 \cdot 2.3} = 60$$

เนื่องจากกราฟ Log V ต่อ เวลา เป็นเส้นตรง เพราะฉะนั้น สมการระหว่าง Log V และ t จะอยู่ในรูป

$$\text{Log}_{10} V = K + m \cdot t$$

โดยที่ K เป็นค่าคงที่ และ m เป็นความชันของกราฟ

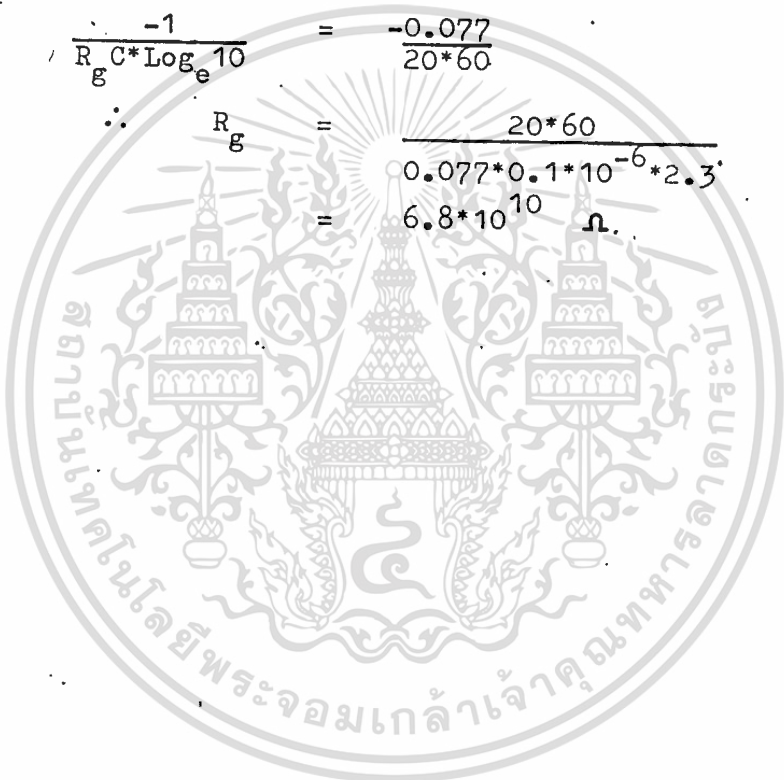
แต่ K เป็นจุดตัดแกนตั้ง (VERTICAL-AXIS INTERCEPT) = $\text{Log}_{10} V_0$

$$\therefore \text{Log}_{10} V = \text{Log}_{10} V_0 + m \cdot t$$

$$\begin{aligned} \text{นั่นคือ} \quad \text{Log}_{10} \frac{V}{V_0} &= m \cdot t \\ \text{หรือ} \quad \frac{V}{V_0} &= 10^{m \cdot t} \\ \text{หรือ} \quad V &= V_0 \cdot 10^{m \cdot t} \end{aligned}$$

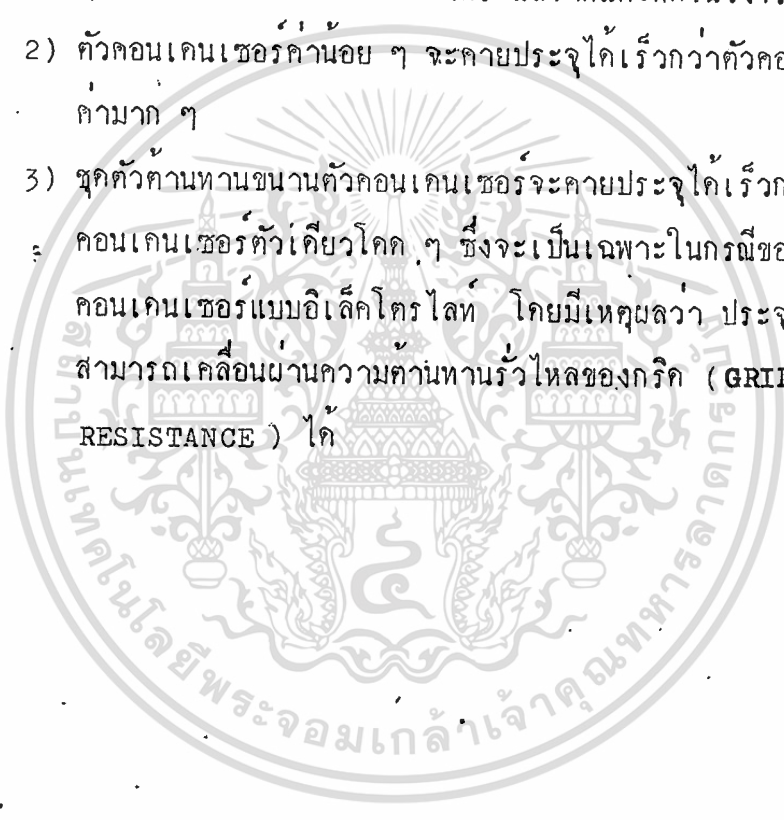
สมการนี้จะแสดงให้เห็นว่า ลักษณะการคายประจุของชุดตัวต้านทานขนาน
ตัวคอนเดนเซอร์เป็นการแปรแบบเอ็กโปเนนเชียล (EXPONENTIAL)

$$\begin{aligned} \frac{-1}{R_g C \cdot \text{Log}_e 10} &= \frac{-0.077}{20 \cdot 60} \\ \therefore R_g &= \frac{20 \cdot 60}{0.077 \cdot 0.1 \cdot 10^{-6} \cdot 2.3} \\ &= 6.8 \cdot 10^{10} \text{ ๓.} \end{aligned}$$



สรุปผลการทดลอง

- 1) สำหรับตัวคอนเดนเซอร์ค่าน้อย ๆ ซึ่งต่ออยู่ระหว่างขาคืนพุทนั้น ค่าความต้านทานอินพุทของหลอดอิเล็กโตรมิเตอร์จะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาตามแรงคัมกริกที่ทุก ๆ ค่า ทั้งนี้เนื่องจากว่าไม่มีกระแสจากคอนเดนเซอร์ที่จะสามารถผ่านลงดินได้เลย ดังนั้น กระแสนี้จะรบกวนการไหลของกระแสจากแคโทดในวงจกริก
- 2) ตัวคอนเดนเซอร์ค่าน้อย ๆ จะคายประจุได้เร็วกว่าตัวคอนเดนเซอร์ค่ามาก ๆ
- 3) ชุดตัวต้านทานขนานตัวคอนเดนเซอร์จะคายประจุได้เร็วกว่าตัวคอนเดนเซอร์ตัวเดียวโดด ๆ ซึ่งจะเป็นเฉพาะในกรณีของตัวคอนเดนเซอร์แบบอิเล็กโตรไลต์ โดยมีเหตุผลว่า ประจุ (CHARGES) สามารถเคลื่อนผ่านความต้านทานรั่วไหลของกริด (GRID LEAK RESISTANCE) ได้

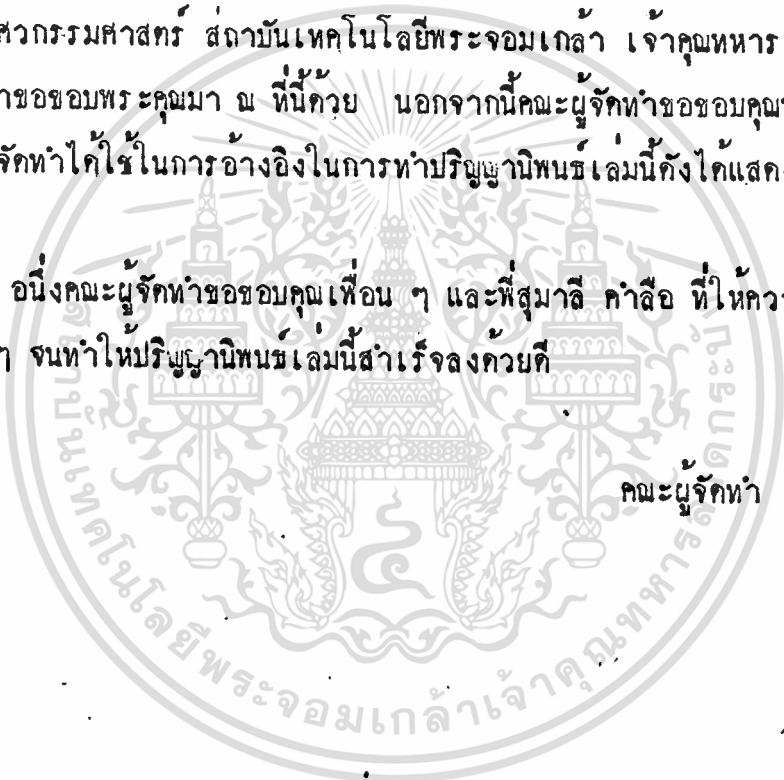


กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรนี้เรื่องเครื่องผลิตไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง (High Voltage Unit) และการศึกษาเรื่องหลอดอิเล็กทรอนิกส์ (The Electrometer Valve) เล่มนี้ สามารถสำเร็จลงได้ด้วยดีโดยคณะผู้จัดทำได้รับความร่วมมือและการสนับสนุนในด้านการให้คำปรึกษาอธิบายจาก รศ.ดร. นิพนธ์ สุขุม ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ตลอดจนคณาจารย์ที่สอนทางด้านวิชา High Voltage Engineering ของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ซึ่งคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย นอกจากนี้คณะผู้จัดทำขอขอบคุณท่านผู้แต่งตำราที่คณะผู้จัดทำได้ใช้ในการอ้างอิงในการทำปริญญาบัตรเล่มนี้ทั้งได้แสงไว้หน้าถัดไป

อนึ่งคณะผู้จัดทำขอขอบคุณเพื่อน ๆ และพี่สูมาลี คำลือ ที่ให้ความช่วยเหลือในต่าง ๆ จนทำให้ปริญญาบัตรเล่มนี้สำเร็จลงด้วยดี

คณะผู้จัดทำ



หนังสืออ้างอิง

1. กร. สํารวย สังข์สะอาด, "วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง", คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 434 หน้า, 2528
2. Eugene R Hnatek, Design of Solid-state Power Supplies, Van
Nostrand Reinhold Company Inc. 1981
3. K B Raina, K C Singal, Y K Anand, Transmission and Distribution
of Electrical Power, Tata McGraw-Hill Publishing Co., Ltd. 1985
4. Kuffle, E., Abdullah, M, Pergamon Press, 1977
5. Naidu, M.S. Kamaraju, V, High Voltage Engineering, Tata McGraw-
Hill Publishing Co., Ltd. 1982
6. Nathan R. Grossner, Transformers for Electronic Circuits,
McGraw-Hill Book Company, 1982
7. Samuel Seely, Electron-tube Circuits, McGraw-Hill Book Company
Inc. 1982