



เครื่องผลิตไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง

HIGH VOLTAGE DIRECT CURRENT GENERATOR



โดย
นาย ชูศักดิ์ พงศ์วาท
นาย นพดล จันทสิทธิ์
นาย สุรชัย มณี

ปริญญาบัตรฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ปีการศึกษา 2535 นี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

032644

ปริญญาโทปีการศึกษา 2535

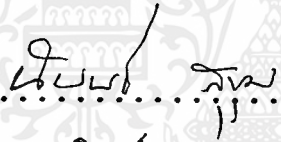
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องผลิตไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง

ผู้จัดทำ

1. นาย ชูศักดิ์ พงศาวดาร ✓
2. นาย นพดล จันทโสภณ ✓
3. นาย สุรัชย์ มนัส ✓


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ.ดร. นิพนธ์ สุขุม)

I

สารบัญ

	หน้า
สารบัญรูปภาพ	III
บทคัดย่อ	V
Abstract	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 วงจรจูนเพลทออสซิลเลเตอร์	4
2.1 ส่วนประกอบของหลอดอิเล็กทรอนิกส์	4
2.2 ชนิดของหลอดอิเล็กทรอนิกส์	5
2.3 คุณสมบัติของหลอดไตรโอด	6
2.4 คุณสมบัติทางสถิติกส์	7
2.5 คุณสมบัติทางไดนามิก	8
2.6 ค่าคงที่ต่างๆของหลอดไตรโอด	8
2.7 วงจรจูนเพลทออสซิลเลเตอร์	10
2.8 เงื่อนไขการกระตุ้นตัวเอง	10
2.9 การไบอัสคงตัวและคุณสมบัติการสตาร์ท	17
2.10 การไบอัสกริดด้วยตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ	18
2.11 วงจรจูนเพลทออสซิลเลเตอร์	19
2.12 การออกแบบวงจรจูนเพลทออสซิลเลเตอร์	21
บทที่ 3 หม้อแปลง	23
3.1 การกระตุ้นวงจรแม่เหล็กด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ	23
3.2 ศักดาไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	24
3.3 อีส์เตอร์เรลีส	25
3.4 กระแสไหลวน	26
3.5 โครงสร้าง	28
3.6 การพันขดลวด	30
3.7 ทฤษฎีและหลักการของหม้อแปลง	30
3.8 ทฤษฎีการทำงาน	32

3.9	การออกแบบหม้อแปลง	36
บทที่ 4	วงจรค็อคโรฟต์ - วอลตันโวลเตจมัลติพลายเออร์	38
4.1	วงจรโวลเตจมัลติพลายเออร์	38
4.2	วงจรสร้างแรงดันสองเท่า	38
4.3	วงจรเรกติฟายเออร์	38
4.4	ตัวเก็บประจุกรองกระแส	41
4.5	วงจรสร้างแรงดันกระแสตรงแบบแรงดันสองเท่า	44
4.6	การคำนวณแรงดันระลอก	46
4.7	การคำนวณแรงดันตก	48
4.8	จำนวนชั้นบันไดที่เหมาะสม	49
บทที่ 5	ปรากฏการณ์โคโรน่าและซีลด์	51
5.1	ปรากฏการณ์โคโรน่า	51
5.2	ผลจากโคโรน่า	53
5.3	การออกแบบโคโรน่าซีลด์	53
บทที่ 6	เทคนิคการวัดแรงดันสูงกระแสตรง	55
6.1	ลักษณะและสมบัติที่ต้องมีของอุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่สำคัญ	55
6.2	วิธีการวัด	55
6.3	วิธีใช้งาน	56
บทที่ 7	ผลการทดลอง บทวิจารณ์ และ สรุป	57
7.1	ผลการทดลอง	57
7.2	บทวิจารณ์และสรุป	59
กิตติกรรมประกาศ		VII
เอกสารอ้างอิง		VIII

III

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1	แสดงสัญลักษณ์และวงจรสมมูลของหลอดไตรโอด	6
รูปที่ 2.2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเพลทและแรงดันกริดของไตรโอด	8
รูปที่ 2.3	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเพลทและแรงดันเพลท	9
รูปที่ 2.4	แสดงความสัมพันธ์ของค่าคงที่ของหลอดไตรโอด	11
รูปที่ 2.5	แสดงวงจรป้อนกลับของออสซิลเลเตอร์	11
รูปที่ 2.6	แสดงรูปการหา G_m	14
รูปที่ 2.7	แสดงกราฟถ่ายทอดในอุดมคติที่เป็นเชิงเส้น	15
รูปที่ 2.8	แสดงค่า G_m กับการไบอัสวงจรออสซิลเลเตอร์	17
รูปที่ 2.9	แสดงการไบอัสที่กริดโดยใช้ R_g , C_g แบบกราฟ Build up	18
รูปที่ 2.10	แสดงวงจรจูนเพลทออสซิลเลเตอร์	19
รูปที่ 2.11	แสดงวงจรจูนเพลทออสซิลเลเตอร์	22
รูปที่ 3.1	แสดงรูปแบบวงจร	23
รูปที่ 3.2	แสดง Hysteresis loop ของโลหะต่าง ๆ	25
รูปที่ 3.3	แสดง Hysteresis loop	27
รูปที่ 3.4	แสดงกระแสไหลวนและผลของชนิดของแกนเหล็ก	27
รูปที่ 3.5	แสดงการแบ่งชนิดของหม้อแปลงไฟฟ้าตามลักษณะการวางแกนเหล็ก	29
รูปที่ 3.6	แสดงแบบของการพันขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า	30
รูปที่ 3.7	แสดง Magnetic circuit of ideal transformer	33
รูปที่ 3.8	แสดงการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับ ideal transformer เมื่อไม่มีโหลด	34
รูปที่ 3.9	แสดงการเปลี่ยนแปลงของฟลักแม่เหล็ก	36
รูปที่ 4.1	แสดงวงจรสร้างแรงดันสองเท่า	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่แสดงวงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่น เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่	4.3	แสดงวงจรเรกติฟายเออร์เต็มคลื่น	41
รูปที่	4.4	แสดงวงจรเรกติฟายเออร์มีตัวเก็บประจุกรองกระแส	42
รูปที่	4.5	แสดงวงจรสรี้งแรงดันกระแสตรงแบบแรงดันสองเท่า	44
รูปที่	4.6	แสดงวงจรสรี้งแรงดันกระแสตรงตามมวงจรของค็อคครีฟ- วอลตันพร้อมรูปคลื่นแรงดันที่จุดต่าง ๆ ขณะไม่มีโหลด	45
รูปที่	4.7	แสดงคลื่นแรงดันกระแสตรงที่ได้จากวงจรขึ้นบันไดในขณะมีโหลด	47
รูปที่	5.1	แสดงโคโรน่าซีลด์ที่ใช้ในปริกฏยานพนธ์	54
รูปที่	6.1	แสดงโพเทนเชียลดิไวเดอร์ เช่น	56



เครื่องผลิตไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง

ผู้คิด พงศาวดาร
 นพดล จันโทสุทธิ์
 สุรชัย มนัส
 รศ.ดร.นิพนธ์ สุขุม อาจารย์ที่ปรึกษา

บทคัดย่อ

ในโลกแห่งเทคโนโลยีไฟฟ้าแรงสูง เครื่องผลิตไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงนับว่ามีความจำเป็นอย่างมากในการวิจัยพัฒนาและทดสอบอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบไฟฟ้าแรงสูง ในปริณิธานิพนธ์นี้กล่าวถึงการออกแบบและสร้างเครื่องผลิตไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงโดยใช้วงจรพหุคูณศักดาไฟฟ้าแบบคือครีฟ - วอลตัน (cockcroft - walton voltage multiplier circuit) ซึ่งใช้ออสซิลเลเตอร์ (oscillator) ความถี่สูงแบบจูนเพลท (tune - plate) เป็นตัวจ่ายศักดาไฟฟ้าและมีหม้อแปลงที่แปลงศักดาให้สูงขึ้นก่อนจ่ายให้กับวงจรคือครีฟ - วอลตัน และได้อธิบายหลักการวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงโดยใช้โพเทนเชียลโวลเตจดีไวเดอร์

HIGH VOLTAGE DIRECT CURRENT GENERATOR

Mr. Chusak Pongsawadarn

Mr. Noppadol Jantosuth

Mr. Surachai Manus

Associate Professor Dr. Nipon Sukhum Advisor

1992

Abstract

In the world of high-voltage technology, High voltage direct current generator is very necessary in research and testing of H.V. equipment. This thesis discuss about designing and assembling High voltage direct current generator by using Cockcroft - Walton voltage multiplier circuit which is supplied by Tune - plate oscillator circuit with step up transformer. Principle of high voltage direct current measurment by potential voltage divider is discussed.

ในปัจจุบันงานด้านวิศวกรรมไฟฟ้า ได้มีการนำไฟฟ้าแรงสูงมาประยุกต์ใช้ในหลาย ๆ ด้านด้วยกันซึ่งเกี่ยวข้องกับเราในชีวิตประจำวัน เช่น นำมาใช้ในงานวิจัยเครื่องมือแพทย์ หรือใช้ในห้องวิจัยและพัฒนาอุปกรณ์ไฟฟ้า หรือนำไปใช้ในระบบผลิตและส่งจ่ายไฟฟ้า หรือนำไปประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมเหล่านี้ล้วนนำความเจริญ ความสะดวกสบายมาสู่มนุษย์ยุคปัจจุบัน ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดเช่น เครื่องมือเอกซเรย์ (X-ray) การทดสอบความคงทนของฉนวนของสายเคเบิล และ ตัวเก็บประจุที่ใช้ในงานในระบบไฟฟ้าแรงสูง งานวิจัยทางด้านนิวเคลียร์ และ เครื่องเร่งอนุภาค เป็นต้น ไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงตามความหมายที่ระบุไว้ในมาตรฐานสากล หมายถึงแรงดันไฟฟ้าที่สูงตั้งแต่ 1000 โวลต์ขึ้นไป มนุษย์ได้ค้นเคยกับไฟฟ้าแรงสูงในชีวิตประจำวันมาแล้วตั้งแต่สมัยดึกดำบรรพ์โดยที่ไม่รู้ตัว นั่นก็คือไฟฟ้าแรงสูงที่เป็นปรากฏการณ์ฟ้าผ่าตามธรรมชาติ อันเป็นผลของการเกิดดีสชาร์จ หรือคายประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่ในก้อนเมฆ ซึ่งมีศักดาไฟฟ้า สูงตั้งแต่ 10 ถึง 100 เมกกะโวลต์ จัดเป็นแรงดันสูงมากที่มนุษย์ยังไม่เคยสร้างได้สูงขนาดนี้ แรงดันสูงที่มนุษย์สร้างขึ้นด้วยเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จำลองแรงดันฟ้าผ่า เพื่อใช้ในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าก็มีแรงดันสูงเพียง 6 เมกกะโวลต์ ส่วนแรงดันสูงที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการส่งพลังงานไฟฟ้าในปัจจุบัน (พ.ศ. 2527) สูงเพียง 1500 กิโลโวลต์แรงดันกระแสตรง และ 765 กิโลโวลต์แรงดันกระแสสลับ

แม้จะเป็นที่ทราบกันดีว่าไฟฟ้าแรงสูงมีอันตรายมากเมื่อเทียบกับแรงดันต่ำที่ใช้ภายในบ้าน แต่ความจำเป็นทำให้ต้องนำเอาระบบไฟฟ้าแรงสูงมาใช้ในการส่งพลังงานไฟฟ้า ทั้งนี้เนื่องจากความต้องการใช้ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นทุกวัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศอุตสาหกรรมมีความต้องการพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในอัตราที่สูงตามปกติจะเพิ่มขึ้นเท่าตัวในเวลา 10 ปี สำหรับประเทศไทยแม้จะไม่ใช่ว่าประเทศอุตสาหกรรมก็ตามจากสถิติพบว่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเท่าตัวในเวลาเพียง 7-8 ปี เมื่อความต้องการเพิ่มขึ้นมากเช่นนี้ จึงเป็นหน้าที่ของผู้ผลิตจะต้องหาทางผลิตเพิ่มขึ้นให้เพียงพอกับความต้องการสำรวจหาแหล่งพลังงานที่เหมาะสมมาใช้พลังงานที่นำมาผลิตไฟฟ้านั้นโดยทั่วไปได้แก่ พลังน้ำ น้ำมัน ถ่านหิน ก๊าซ นิวเคลียร์ และพลังงานแสงอาทิตย์ สำหรับในประเทศไทยใช้พลังงานน้ำ ใช้น้ำมันและถ่านหิน

แม้ว่าการผลิตไฟฟ้าในประเทศไทยใช้พลังงานน้ำ ใช้น้ำมันและถ่านหินไม่ใช่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หิน) ก๊าซเทอร์ไบน์ ดีเซล การตั้งโรงจักรผลิตพลังงานไฟฟ้ามักจะถูกกำหนดด้วยแหล่งกำเนิดพลังงาน ความเหมาะสมกับสภาพแวดล้อม และเป็นไปตามหลักเศรษฐศาสตร์กล่าวคือเราไม่สามารถเลือกตั้งโรงงานให้อยู่ใกล้ศูนย์กลางผู้ใช้ไฟฟ้าได้ตามที่ต้องการเสมอไป โดยทั่วไปแล้วมักตั้งโรงจักรผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ใกล้แหล่งพลังงานเช่น พลังงานน้ำตก ซึ่งอยู่ในภูมิภาคที่เป็นภูเขาหรือเหมืองถ่านหินในภูมิภาคที่ห่างไกลย่านชุมชน นั่นคือจะต้องส่งพลังงานที่ผลิตได้ไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าเป็นระยะทางไกล ๆ การส่งพลังงานปริมาณมาก ๆ และระยะทางไกล ๆ ย่อมจะเกิดปัญหาการสูญเสียพลังงาน P_c เนื่องจากความต้านทาน R ในสายส่งกำลังงานสูญเสียดังกล่าวนี้จะแปรตามกำลังสองของกระแส I คือ $P_c = I^2 R$ ในเมื่อเป็นเช่นนี้เราต้องลดกำลังงานที่สูญเสียในสายส่งให้น้อยลงโดยการลดกระแสให้น้อยลงโดยเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้นเพื่อให้สามารถส่งกำลังงานได้เท่าเดิม นี่คือเหตุผลที่ต้องใช้ระบบแรงดันสูงในการส่งพลังงาน (High voltage transmission system) ผลดีของการส่งพลังงานไฟฟ้าด้วยระบบแรงดันสูงก็คือจะทำให้แรงดันตกในสายส่งน้อยลง ประสิทธิภาพการส่งดีขึ้น เสถียรภาพความเชื่อถือได้ต่อระบบสายส่งสูงขึ้น

ระดับแรงดันสูงที่ใช้ในการส่งพลังงานไฟฟ้าอยู่ในปัจจุบันแบ่งได้ 3 ช่วงคือ

1. แรงดันสูง (High voltage, HV) หมายถึงแรงดันตั้งแต่ 1kV ขึ้นไปจนถึง 230 kV
2. แรงดันสูงพิเศษ (Extra high voltage, EHV) หมายถึงแรงดันสูงกว่า 230 kV จนถึง 765 kV
3. แรงดันสูงอัลตรา (Ultra high voltage, UHV) หมายถึงแรงดันสูงกว่า 765 kV ขึ้นไป

หากจะพูดถึงไฟฟ้าแรงสูงเราสามารถแบ่งออกได้ 5 ประเภทดังนี้

1. แรงดันสูงกระแสตรง (High D.C. voltages)
 2. แรงดันสูงกระแสสลับความถี่ต่ำ (High A.C. voltage of lower frequency)
 3. แรงดันสูงกระแสสลับความถี่สูง (High A.C. voltage of high frequency)
 4. แรงดันสูงทรานเซียนท์หรืออิมพัลส์ช่วงสั้นอย่างคลื่นฟ้าผ่า (High transient or impulse voltages of very short duration such as lightning)
- ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ning over voltages)

5. แรงดันสูงทรานเซียนท์ช่วงยาวอย่างสวิตชิ่ง เลิร์จ (High transient voltages of longer duration such as switching surge)

สำหรับในปรวิญานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงวิธีผลิตไฟฟ้าแรงสูงประเภทที่หนึ่ง คือ High D.C. voltages หรือไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงซึ่งหากเทียบกับแรงดันสูงประเภทอื่นที่กล่าวมาแล้วข้างต้นจะเห็นได้ว่าการนำไปประยุกต์ใช้งานมากที่สุด

ในวงจรสร้างแรงดันสูงกระแสตรงแบบคือคคร็อฟ - วอลตันนั้นค่าแรงดันตกจะมีค่าแปรผกผันกับความถี่ตามความสัมพันธ์

$$\Delta U = (I_u / f \cdot C) \cdot (2n^3 / 3)$$

ซึ่งได้อธิบายที่มาของสมการโดยละเอียดในบทที่ 4 จึงได้พิจารณาสร้างวงจรออสซิลเลเตอร์ความถี่สูงขึ้นมาเพื่อลดแรงดันตกดังกล่าว

ในทางภาคปฏิบัตินั้นเราสามารถสร้างแรงดันสูงกระแสตรงขึ้นใช้ได้โดยใช้หลักการของวงจรคือคคร็อฟต์-วอลตันโวลเตจมัลติพลายเออร์ซึ่งมีส่วนประกอบต่างๆ ดังนี้

1. วงจรจูนเพลท ออสซิลเลเตอร์ 200 โวลต์ 16 กิโลเฮิร์ต (Tuned-plate Oscillator circuit 200 V 16 kHz)
2. หม้อแปลง 200 โวลต์/3.5 กิโลโวลต์ 16 กิโลเฮิร์ต (Transformer 200 V/3.5 kV 16kHz)
3. วงจรคือคคร็อฟต์- วอลตันโวลเตจมัลติพลายเออร์ (Cockcroft- Walton voltage multiplier circuit)
4. โครโน่าชีลด์ (Corona sheild)
5. วงจรวัดโวลเตจและโหลดความต้านทาน (Measurement and resistive load)

และเรียกว่าหลอดเตตระโทรด (tetrode) สกรีนกริดจะตั้งอยู่ระหว่างคอนโทรลกริดกับเพลต ซึ่งเป็นตัวสร้างสนามไฟฟ้าบวกเพื่อช่วยในการลดค่าความจุระหว่างเพลตกับคอนโทรลกริด ที่จะทำให้เกิดการออสซิลเลตและใช้กับความถี่สูงได้ไม่ดี เมื่อนำสกรีนกริดมาใส่แล้วจะเสมือนทำให้เกิดเป็นตัวเก็บประจุสองตัวอนุกรมกันทำให้ค่าความจรวมลดลง

2.1.5 ชัฟเพรสเซอร์กริด (suppressor grid) เป็นกริดที่ตั้งอยู่ระหว่างเพลตกับสกรีนกริดในหลอดเพนโทด (pentode) มีไว้เพื่อช่วยลดการเกิดปรากฏการณ์แพร้อิเลคตรอนขั้นที่สอง (secondary emission) ที่เกิดขึ้นในหลอดไตรโอด ซึ่งการเกิดปรากฏการณ์นี้เกิดจากอิเล็กตรอนวิ่งจากแคโทดไปยังเพลต บางตัวจะชนเพลตแล้วสะท้อนกลับมายังสกรีนกริดทำให้อัตราขยายของหลอดลดลงโดยปกติแล้วชัฟเพรสเซอร์กริดจะต่อไว้กับกราวด์หรือ แคโทด

2.2 ชนิดของหลอดอิเล็กตรอน

หลอดอิเล็กตรอนมีมากมายหลายชนิดแต่หลักการทำงานโดยรวมยังคงเหมือนเดิม คือต้องให้ความร้อนแก่แคโทด เพื่อให้อิเล็กตรอนหลุดจากผิวโดยมีศักย์ไฟบวกที่เพลตเป็นตัวดึงดูด

หลอดไดโอด มี 2 ขั้วประกอบด้วย เพลต และ แคโทด

หลอดไตรโอด (triode) เป็นหลอด 3 ขั้ว ประกอบด้วยเพลต แคโทด และคอนโทรลกริด

หลอดเตตระโทรด (tetrode) เป็นหลอด 4 ขั้ว เหมือนไตรโอดแต่เพิ่มสกรีนกริดขึ้นมา

หลอดเพนโทด (pentode) เป็นหลอด 5 ขั้วเพิ่มชัฟเพรสเซอร์กริดเข้ามา

หลอดเฮกโซด (hexode) เป็นหลอด 6 ขั้ว มีส่วนประกอบคือ แคโทด คอนโทรลกริด ชัฟเพรสเซอร์กริด เพลต สกรีนกริดและส่วนที่เพิ่มขึ้นมาคือ อินเจคเตอร์กริด (injector grid)

หลอดเซปโทด (heptode) มี 7 ขั้วประกอบด้วยกริด 5 กริด เพลต และ แคโทด

หลอดเพนตากริด (Pentagrid) มีขั้ว 8 ขั้วซึ่งนำเอาหลอดเซปโทดมาเพิ่มกริดอีก 1 กริด หลอดชนิดนี้สามารถใช้กับความถี่สูงได้ดี

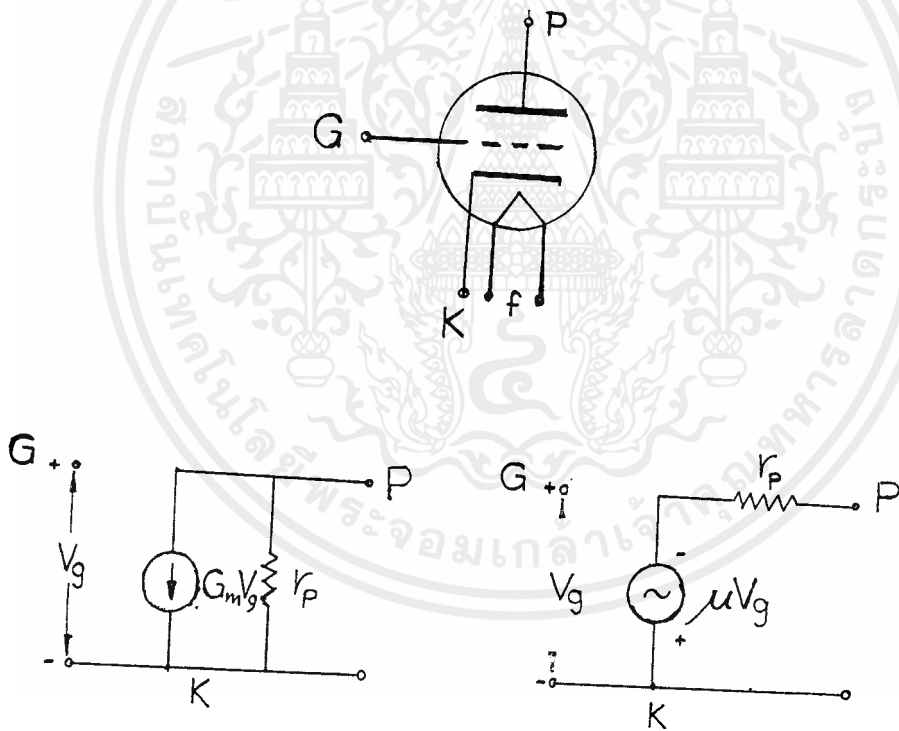
หลอดบีมเพาเวอร์กริด (beam-power) เป็นหลอดที่ปรับปรุงจากหลอดเพนโทด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยเป็นอย่างสูงและต้องอภัยถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และหลอดเทตโรด เนื่องจากหลอดชนิดนี้ให้กำลังสูง จึงถูกนำไปใช้กับวงจรขยายเสียงในภาคเอาต์พุตเสียส่วนใหญ่หลอดชนิดนี้จะสามารถบังคับให้อิเล็กตรอนวิ่งไปยังเพลตให้เป็นลำ เพื่อเพิ่มความสามารถด้านกำลังงานของหลอดให้สูงขึ้น ในหลอดบีมเพาเวอร์มีส่วนประกอบคือ แคโทด คอนโทรลกริด สกรีนกริด และบีมฟอร์มมิงเพลต (beam forming plate) ซึ่งบังคับให้อิเล็กตรอนวิ่งเป็นลำเข้าสู่เพลตอย่างเต็มที่โดยปกติ บีมฟอร์มมิงเพลตมักจะต่ออยู่กับแคโทด

ในวงจรจูนเพลตออสซิลเลเตอร์นั้นใช้หลอดซึ่งจะมาตามคุณสมบัติของหลอดไตรโอด

2.3 คุณสมบัติของหลอดไตรโอด

หลอดไตรโอดเป็นหลอด 3 ขั้วประกอบด้วย แคโทด เพลต และคอนโทรลกริด ซึ่งมีคุณสมบัติและวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สัญลักษณ์และวงจรสมมูลย์ของหลอดไตรโอด

- เมื่อ V_p : แรงดันที่ขาเพลต
- V_c : แรงดันที่ขาคอนโทรลกริด
- V_g : แรงดันที่จ่ายให้หลอด
- μ : ค่าอัตราขยาย (amplification factor)
- G_m : ค่าสภาพความนำ (transconductance)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนสำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่ควรนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

r_{p1} : ความต้านทานภายในของเพลต

จากรูปที่ 2.1 ซึ่งเป็นสัญลักษณ์และวงจรสมมุติของหลอดไตรโอดจะเห็นว่าวงจรสมมุติของหลอดไตรโอดจะเป็นลักษณะทิวพอร์ตเนทเวอร์ค (two port - network) โดยมีอินพุตอิมพีแดนซ์ (input impedance) สูงมาก (ระหว่างกริดกับแคโทด) และส่วนทางเอาต์พุตจะเป็นลักษณะของแหล่งกำเนิดแรงดัน (voltage - source) ต่ออนุกรมอยู่กับความต้านทานเพลต (r_p) หรือแหล่งกำเนิดกระแส (current source) ต่อขนานกับความต้านทานเพลต ดังรูป 2.1

2.4 คุณสมบัติทางสถิตติกส์ (static characteristics)

เป็นคุณสมบัติของหลอด เมื่อป้อนแรงดันไฟตรงให้กับหลอดโดยที่ไม่มีสัญญาณไฟสลับทางอินพุตซึ่งอาจแบ่งเป็นคุณสมบัติระหว่างกระแสเพลตกับแรงดันที่กริด ดังในรูปที่ 2.2 กระแสเพลตในไตรโอดจะขึ้นกับทั้งแรงดันที่กริดและแรงดันที่เพลตและยังขึ้นกับแรงดันที่ป้อนให้หลอดด้วยแต่ในที่นี้มักจะป้อนแรงดันแก่ให้หลอดคงที่จึงอธิบายได้ว่ากระแสของไตรโอดจะขึ้นกับแรงดันที่เพลตและแรงดันที่กริดเท่านั้น

จากสมการของ space current ของ ไตรโอด

$$I_p = I_g + I_p = G_m (V_g + V_p/\mu) \quad (2-1)$$

เมื่อ I_p : กระแสสเปซ (space current)

I_g : กระแสกริด

I_p : กระแสเพลต

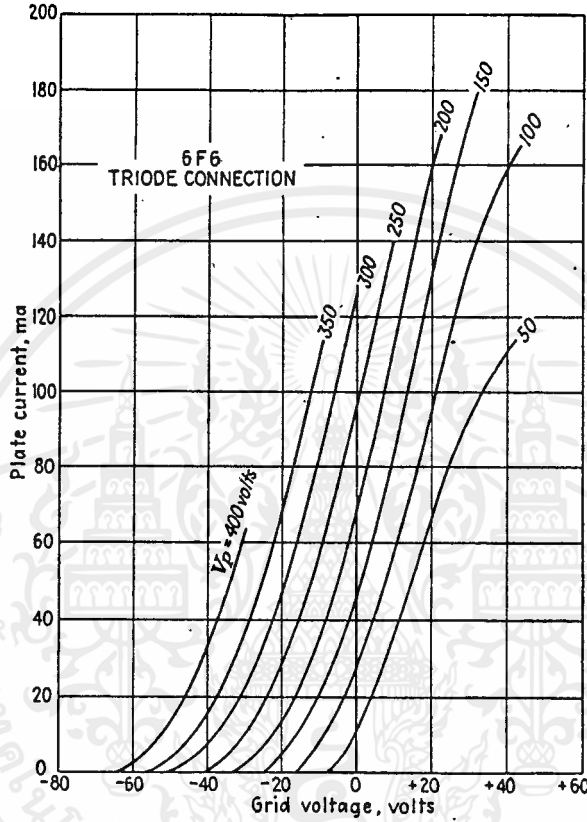
μ : ค่าคงที่ มีค่าประมาณ 3/2

เมื่อแรงดันที่กริดเป็นลบกระแสสเปซจะเข้าสู่เพลตทั้งหมดแม้เมื่อแรงดันที่กริดเป็นบวกจะมีกระแสสเปซเพียงจำนวนน้อยที่เข้าสู่กริด ดังนั้นจากสมการที่ (2-1) จึงอธิบายกระแสเพลตได้ทุกกรณี ยกเว้นเมื่อแรงดันที่เพลตต่ำและแรงดันที่กริดเป็นบวกมากและมีคุณสมบัติดังรูปที่ 2.2

จากรูปที่ 2.2 จะเห็นว่ากระแสเพลตจะมากขึ้นถ้าแรงดันที่เพลตมากขึ้นในกรณีที่แรงดันที่กริดเท่ากัน และจะมากขึ้นถ้าแรงดันกริดเป็นลบน้อยลงที่แรงดันเพลตเดียวกัน และในช่วงที่แรงดันกริดเป็นลบคุณสมบัติของการเพิ่มกระแสเพลตจะดีกว่าช่วงที่แรงดันกริดเป็นบวก ซึ่งอัตราการเพิ่มของกระแสลดลงเนื่องจากกริดจะดึงกระแสไปบางส่วนและจะมีการอ้อมตัวที่แรงดันเพลตมาก ๆ และคุณสมบัติอีกอย่างคือความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเพลตกับแรงดันเพลต ดังกราฟในรูปที่ 2.3

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.3 จะเห็นว่าถ้าแรงดันกริดมีค่าคงที่ต่าง ๆ กันจะได้ว่าถ้าแรงดันกริดมีค่าเป็นลบมาก กระแสเพลตจะน้อยเพราะการทำงานของหลอดเข้าใกล้ช่วงคัทออฟ (cutoff) และมีค่าอัตราส่วนขยาย (μ) น้อยกว่าที่แรงดันกริดเป็นศูนย์



รูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเพลตและแรงดันกริด

2.5 คุณสมบัติทางไดนามิก (dynamic characteristics)

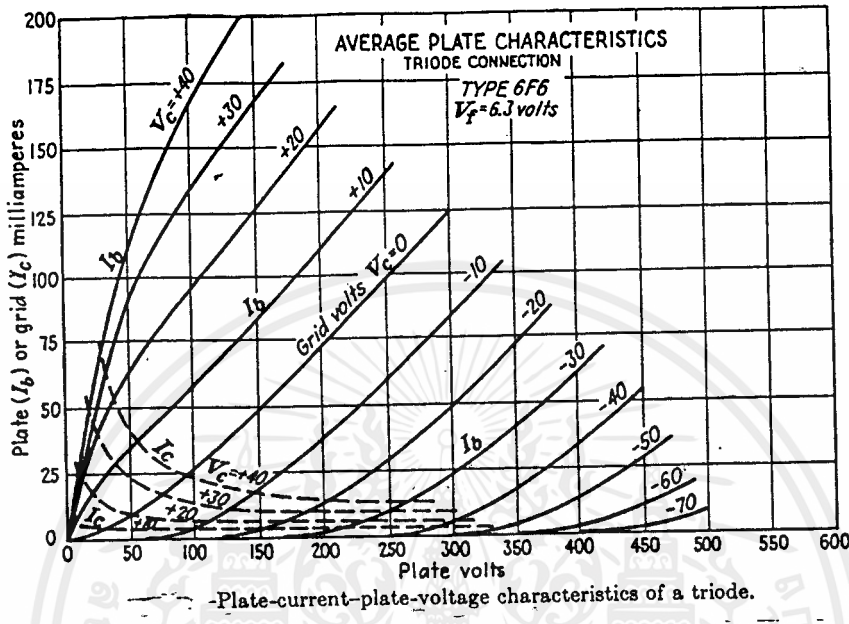
เป็นคุณสมบัติการทำงานของหลอดเมื่อมีการป้อนสัญญาณไฟสลับเข้าทางอินพุต และใส่โหลดทางด้านเอาต์พุตของหลอด หลังจากนั้นมีการเปรียบเทียบค่าโหลดต่างๆ สังเกตการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนการขยาย ค่าความต้านทานของเพลตและค่าความนำซึ่งจะได้ทราบการทำงานที่จุดต่าง ๆ

2.6 ค่าคงที่ต่าง ๆ ของหลอดไตรโอด

2.6.1 ค่าสภาพความนำของหลอด (transconductance : G_m)

สภาพความนำของหลอดเป็นอัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงของกระแส

เพลตกับแรงดันที่ขาคอนโทรลกริด เมื่อแหล่งจ่ายมีค่าคงที่ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเพลตและแรงดันเพลต

การทางคณิตศาสตร์คือ

$$G_m = \left(\frac{dI_p}{dV_g} \right)_{V_p \text{ const.}} \quad (2-2)$$

เมื่อ dI_p คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเพลต
 dV_g คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตที่คอนโทรลกริด

ค่าสภาพความนำจะเป็นสัดส่วนกับรากที่สองของแรงดันสมมูลย์ของหลอดและยังเป็นสัดส่วนกับรากที่สามของ space current และมีหน่วยเป็นไมโครโมห์ โดยทั่วไปค่าความนำ (G_m) ของหลอดไตรโอดอยู่ระหว่าง 100 ถึง 10,000 ไมโครโมห์

2.6.2 ค่าอัตราส่วนการขยาย (amplification factor : μ)

คืออัตราส่วนระหว่างแรงดันที่เพลตกับแรงดันที่กริด โดยการควบคุมให้กระแสเพลตคงที่ซึ่งเขียนสมการทางคณิตศาสตร์คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mu = - (dv_p / dv_s)_{I_p \text{ const.}} \quad (2-3)$$

ค่า μ บ่งบอกถึงความสามารถในการขยายแรงดันของหลอดไตรโอดโดยส่วนมากจะบอกค่า μ เทียบกับแรงดันที่ขาคอนโทรลกริดปกติค่า μ ในหลอดไตรโอดมีค่าประมาณ 2.5 ถึง 200

2.6.3 ค่าความต้านทานภายในเพลต (plate resistance : r_p)

คือความต้านทานภายในเพลต (r_p) คือส่วนกลับของอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของกระแสเพลตกับแรงดันเพลต ดังสมการทางคณิตศาสตร์

$$r_p = (dv_p / dI_p)_{v_s \text{ const.}} \quad (2-4)$$

โดยทั่วไปค่า r_p ของไตรโอดจะมีค่าระหว่าง 1 ถึง 50 กิโลโอห์ม และจากคุณสมบัติของ G_m , μ , r_p จะได้ความสัมพันธ์ว่า

$$G_m r_p = - (dv_p / dv_s)_{I_p \text{ const.}} = \mu \quad (2-5)$$

ดังจะเห็นได้ในรูปที่ 2.4

และเมื่อเรานำหลอดไตรโอดสองตัวมาขนานกันจะได้ค่าคงที่ต่าง ๆ ใหม่คือ

$$\begin{aligned} G_{m \text{ eq.}} &= G_{m1} + G_{m2} \\ 1/r_{p \text{ eq.}} &= 1/r_{p1} + 1/r_{p2} \end{aligned} \quad (2-6)$$

$$\mu_{\text{eq}} = \mu_1 r_{p2} + \mu_2 r_{p1} / r_{p1} + r_{p2}$$

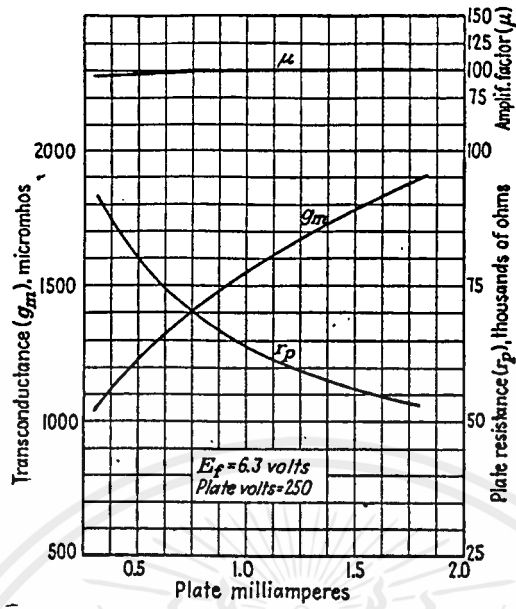
2.7 วงจรจูนเพลตออสซิลเลเตอร์

เป็นวงจรขยายสัญญาณป้อนกลับ (feedback amplifier) ที่ป้อนกลับโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำและวงจรป้อนกลับนี้จะออสซิลเลต คงที่ถ้าให้อัตราขยายลูป (loop gain) ที่ความถี่มูลฐานมีค่าเป็นหนึ่งโดยวงจรป้อนกลับจะนำไปเป็นอินพุตแรงดันกระแสลบให้สามารถคำนวณเฟสลับของเอาต์พุตทั้งขนาดและเฟส

2.8 เงื่อนไขการกระตุ้นตัวเอง (condition for excitation)

เพื่อเป็นการประกันว่าจะเกิดการออสซิลเลตขึ้นในวงจรออสซิลเลเตอร์

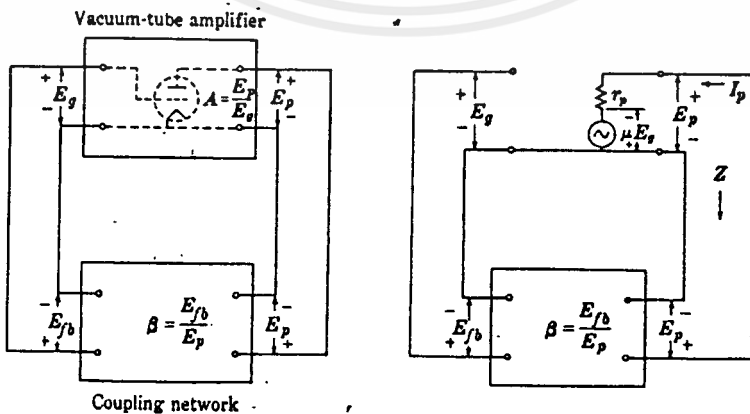
ดังในรูปที่ 2.5



Variation with plate current of G_m , R_p , μ

รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ของค่าคงที่ของหลอดไตรโอด

จากวงจรสมมติให้ศักดา V_{in} ป้อนที่ขาคอนโทรลกริดของหลอดโดยไม่พิจารณาถึงแหล่งจ่ายของศักดานี้ กระแสเอาก์พุทจะมีค่าเป็น $G_m V_{in}$ โดยสมมติให้ทำงานอยู่ในช่วงลิเนียร์ (linear) ของวงจร และ I คือกระแสที่เข้าวงจรคัปปลิง (coupling) และมีศักดาที่แน่นอนคร่อมเอาก์พุทถ้าแรงดันที่ป้อนกลับไปยังอินพุทมีค่าเท่ากันทั้งขนาดและเฟสกับ V_{in} วงจรก็สามารถเชื่อมต่อกันได้โดยตรง และระบบก็ทำงานต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ โดย วังจรป้อนกลับของออสซิลเลเตอร์ ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการพิจารณาเบื้องต้นของการออสซิลเลตนั้นจะพูดในรูปของอัตราขยาย
 ลูปทั้งขนาดและเฟสรอบ ๆ ลูจากอินพุทผ่านแอมพลิฟายเออร์และผ่านวงจรคัปปลิง
 (coupling) การออสซิลเลตจะเกิดเมื่ออัตราขยายลูปมีค่าเป็นหนึ่ง และเฟสเปลี่ยน
 ไปเป็นศูนย์ หรือเปลี่ยนไปจากเดิมเท่ากับจำนวนเท่าของ 2π

เพื่อตรวจสอบเกณฑ์ในการออสซิลเลต อันดับแรกจะพิจารณาทรานสเฟอร์
 อิมพีแดนซ์ (transfer impedance) ของวงจรคัปปลิง (coupling) แทนด้วย
 Z_T ซึ่งคืออัตราส่วนของแรงดันเอาต์พุทที่พบกับกระแสอินพุท จากรูปที่ 2.5 จะเห็นว่า

$$Z_T = -V_x / I$$

โดย I มีค่าเป็น $G_m V_x + V_p / r_p$ จะได้ว่า

$$(G_m V_x + V_p / r_p) Z_T = -V_x \quad (2-7)$$

หรือ

$$G_m Z_T (V_x + V_p / \mu) = -V_x \quad (2-8)$$

แต่เพราะว่าแรงดันเอาต์พุทของวงจรแอมพลิฟายเออร์นั้นมีความสัมพันธ์

กับแรงดันอินพุทและค่าเกน (gain) A ดังนั้น

$$V_p = AV_x \quad (2-9)$$

สมการที่ (8) จะกลายเป็น

$$G_m Z_T V_x (1 + A/\mu) = -V_x \quad (2-10)$$

ดังนั้นสำหรับการออสซิลเลตที่สามารถคำนวณตัวเองได้จำเป็นต้องมีค่าดังนี้

$$G_m Z_T (1 + A/\mu) = -1 \quad (2-11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และถ้ามองที่ V_2 จะได้ไดรว์พอยท์อิมพีแดนซ์ (driving point impedance) ของวงจร คัปปลิง (coupling) แทนด้วย $Z = -V_p / I$ เงื่อนไขของการออสซิลเลตที่สามารถคำนวณตัวเองได้คือ

$$(G_m V_x + V_p / r_p) Z = -V$$

กลายเป็น

$$\begin{aligned} (G_m V_x + A G_m V_x / \mu) Z &= -A V_x \\ G_m Z (1/A + 1/\mu) &= -1 \end{aligned} \quad (2-12)$$

$$\text{หรืออาจเขียนในรูป } 1/G_m Z + 1/\mu = -1/A \quad (2-13)$$

ซึ่งเป็นรูปหนึ่งของบาร์คัวเซนครีเตอ์เรียน (Barkhausen criterion) ในการออสซิลเลต จะสังเกตว่าอัตราส่วน V_x / V_2 นั้นจะวัดในรูปของเอาก์พุทที่ป้อนกลับสู่วงจรอินพุทโดยผ่านวงจรคัปปลิง (coupling) อัตราส่วนป้อนกลับคือ β และ

$$1/G_m Z + 1/\mu = -\beta \quad (2-14)$$

จากสมการ (2-13) และ (2-14) จะเห็นว่าส่วนขยายของวงจรป้อนกลับ และวงจรขยายมีความสัมพันธ์กันคือ

$$\beta A = 1 \quad (2-15)$$

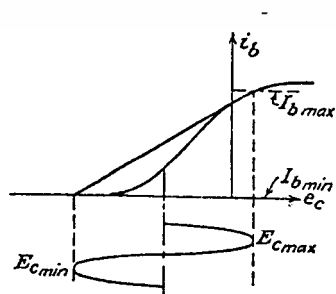
นั่นคือลูปรเกน (loop gain) มีค่าเท่ากับหนึ่งนั่นเอง เงื่อนไข $\beta A = 1$ นี้เป็นกรณีต่ำสุดของเงื่อนไขการออสซิลเลต และต้องไม่มีส่วนที่เพิ่มขึ้นมาในหลอด และวงจรของออสซิลเลเตอร์ โดยปกติในทางปฏิบัติจะเผื่อค่า βA ไว้มากกว่าหนึ่งเล็กน้อย นิยมเผื่อไว้เป็น 105 %

จากอิทธิพลของค่าความนำ (transconductance) G_m เกิดขึ้นในการออสซิลเลตในสมการ (2-11), (2-13) และ (2-14) นั้นจะใช้ได้ในช่วงคุณสมบัติหลอดไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นเชิงเส้น (linear) เพราะช่วงนี้เท่านั้นที่ใช้แหล่งกำเนิดกระแสสมมูลย์ได้ แม้จะมีข้อจำกัดนี้ก็ตาม สมการอาจจะใช้ได้ในช่วงไม่เป็นเชิงเส้น (non linear) ของหลอดได้

ย้อนไปสมการ (2-11) จากการประมาณครั้งแรกค่า A/μ สำหรับค่า μ คงที่จะขึ้นอยู่กับค่า G_m และแพคเตอร์อื่น ๆ จะไม่ขึ้นกับขนาดของ คัดดา และค่ากระแส นั่นคือมีเพียง G_m เท่านั้นในสมการที่ขึ้นอยู่กับการใช้หลอดในลักษณะใด เหมือนกันในสมการ (2-13) และ (2-14) ถ้าให้สมมติ μ รักษาให้คงที่แม้การเปลี่ยนแปลง ช่วงกว้างของขนาดสัญญาณ และเพราะ A ประกอบด้วยค่าของ μ และ r_p หรือ G_m ด้วย ดังนั้น G_m เท่านั้นที่แปรเปลี่ยนจนระหว่างการทำงาน ค่า G_m เป็นความชันของกราฟ $e_c - i_b$ จะไม่ on ที่ที่การเปลี่ยนแปลงคัดดาที่ถี่ดมาก ๆ สำหรับวงจรที่ให้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ มา การออสซิลเลตจะสร้างขึ้น จนกระทั่งค่าของ G_m มีค่าตามเงื่อนไขในสมการ (2-11), (2-13), (2-14) และสามารถคำนวณการออสซิลเลตได้ถ้าค่า G_m ไม่มีค่ามากพอตามสมการเหล่านี้ จะทำให้แรงดันที่ป้อนกลับจากเอาต์พุตให้กับอินพุต จะไม่เพียงพอที่จะรักษาการออสซิลเลต และการออสซิลเลตจะหายไป ถ้าค่า G_m มีค่ามากเกินไป แรงดันป้อนกลับจากเอาต์พุตให้กับอินพุตจะไม่เพียงพอที่จะรักษาการออสซิลเลตและการออสซิลเลตจะหายไป ถ้าค่า G_m มีค่ามากเกินไป แรงดันป้อนกลับก็จะมากเกินไปที่ต้องการในการออสซิลเลต จะทำให้เกิดการออสซิลเลตเพิ่มขนาดขึ้นเรื่อย ๆ

ถ้าค่าเฉลี่ยของค่า G_m คือ ความชันของเส้นที่ต่อระหว่างจุดปลายของสองจุดของคุณสมบัติถ่ายทอด ของสัญญาณอินพุต ดังรูปที่ 2.6



Sketch for defining the average transconductance \bar{g}_m .

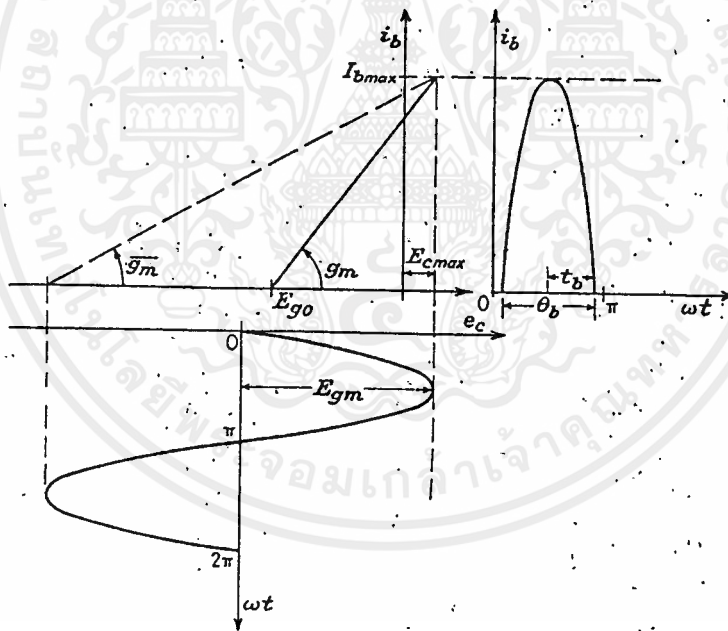
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 2.6 รูปนี้แสดงการหา \bar{G}_m ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{G}_m = \frac{I_{b \max} - I_{b \min}}{E_{c \max} - E_{c \min}} \quad (2-16)$$

บาร์คิวเซนคริเตอร์เรียน (Barkhausen criteria) สำหรับการออสซิลเลต ค่าจุนตัวเอง (sustained oscillations) จะเป็น

- $\bar{G}_m Z_T (1 + A/\mu) < 1$ decaying oscillations
- $1/\beta (1/\bar{G}_m Z + 1/\mu) = 1$ sustained oscillations (2-17)
- $A (1/\bar{G}_m Z + 1/\mu) > 1$ growing oscillations

การประมาณค่าของ \bar{G}_m จากสมการ (2-16) นั้นให้กราฟถ่ายทอดเป็นเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งเป็นเงื่อนไขของ class C



รูปที่ 2.7 แสดงกราฟถ่ายทอดในอุดมคติที่เป็นเชิงเส้น

$$\bar{G}_m = \frac{I_{b \max}}{2 E_{xm}} \quad (2-18)$$

$$G_m = \frac{I_{b \max}}{\dots} \quad (2-19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$\frac{\bar{G}_m}{G_m} = \frac{-E_{x0} + E_{c \max}}{2 E_{xm}} \quad (2-20)$$

ให้ θ_p เป็น เฟลทคอนดัคชันแองเกิ้ล (plate conduction angle) จะได้ เฟลทเคอร์เร็นพัลส์ (plate-current pulse) เป็น

$$i_p = G_m (-E_{x0} + E_{c \max} - E_{xm} + E_{xm} \cos wt) \quad \text{ที่ } i_p \geq 0 \quad (2-21)$$

ที่ $t = t_p$ นั้น $i_p = 0$ จะได้ว่า

$$-E_{x0} + E_{c \max} = E_{xm} (1 - \cos wt_p) \quad (2-22)$$

จะได้ว่า

$$\frac{\bar{G}_m}{G_m} = \sin^2(\theta_p/4) \quad (2-23)$$

เงื่อนไขของขนาดและความถี่จากสมการที่ (2-17) จะต้องเป็นจริงนั่นคือ ส่วนจริงและส่วนจินตภาพของสมการทั้งสองข้างต้องเท่ากัน นั่นคือ เท่ากันทั้งขนาด และมุม

$$\left| \frac{1}{\bar{G}_m Z} + \frac{1}{\mu} \right| = \left| \frac{1}{A} \right|$$

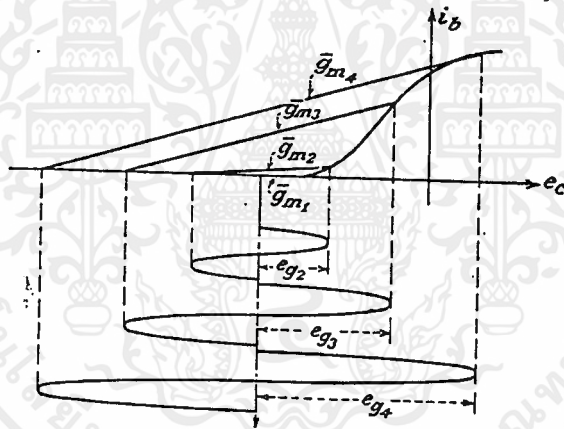
(2-24)

จากสมการ (2-24) เนื่องจาก μ เป็นตัวส่วน เมื่อค่า μ มาก ค่า \bar{G}_m กับ A จะตอบสนองกันในอัตรา 1:1 เพราะ \bar{G}_m สามารถแปรเปลี่ยนได้ในวงกว้างจาก ศูนย์ไปถึงค่ามาก ๆ ดังนั้นเงื่อนไขต้องทำให้ Z มีค่ามาก ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปรงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(A เข้าใกล้ค่าคงที่) จะทำให้สอดคล้องเงื่อนไขง่ายขึ้น นั่นคือโดยทั่วไป $Z > r_o$ วงจรแอนติเรโซแนนซ์ (antiresonante) จะมีค่าอิมพีแดนซ์สูงที่ความถี่เรโซแนนซ์ และอิมพีแดนซ์จะตกลงอย่างรวดเร็วถ้าความถี่เคลื่อนออกจากเรโซแนนซ์ นั่นคือวงจรออสซิลเลเตอร์ต้องให้ความถี่ที่มีความเสถียรภาพ

2.9 การไบอัสคงตัวและคุณสมบัติการสตาร์ท

ก่อนที่จะทดสอบส่วนต่าง ๆ ของวงจรออสซิลเลเตอร์นั้นควรตรวจสอบผลกระทบของการไบอัสที่กริด เพื่อดูการป้อนกลับของวงจร สมมติให้วงจรไบอัสในรูปที่ 2.6 นั่นคือตั้งค่าเกินช่วงคัทออฟของหลอด จำนวนเงื่อนไขการทำงานที่เป็นไปได้นั้นอธิบายในรูปที่ 2.8



A feedback oscillator biased to the left of cutoff, and the corresponding secants for determining the average transconductance.

รูปที่ 2.8 ค่า \bar{G}_m กับ การไบอัส วงจรออสซิลเลเตอร์ป้อนกลับ

รูปที่ 2.8 แสดงค่า \bar{G}_m ต่าง ๆ กับ การไบอัส วงจรออสซิลเลเตอร์ป้อนกลับ เริ่มต้น $\bar{G}_m = \bar{G}_{m1}$ เป็นศูนย์ สมการที่ (2-17) จะเป็นลักษณะออสซิลเลตลดขนาด (decaying oscillations) ซึ่งจะไม่สามารถสร้างการออสซิลเลตขึ้นมาและคงอยู่ได้ ต่อมาให้ศักดา e_{x2} ไม่ว่าจะมาจากแหล่งภายนอก หรือ ปรากฏการณ์ชั่วขณะแก่กริด ถ้าค่าเฉลี่ยของ \bar{G}_{m2} ยังน้อยไม่พอที่จะเกิดการออสซิลเลตแบบค่าจุนได้ ถ้าป้อนสัญญาณ e_{x3} แก่กริดและมีค่ามากพอที่จะเกิดออสซิลเลตแบบค่าจุนได้ ไม่ว่าจะกรณีใด ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยค้อย ๆ โด (ขนาด) ขึ้นไปจนถึงค่าที่สามารถคำนวณได้ สำหรับออสซิลเลเตอร์ที่ไบอัสใกล้หรือเลยช่วงคัทออฟวงจรถะไม่สามารถสตาร์ทด้วยตัวเองได้ เห็นได้ชัดจากการเปรียบเทียบรูปที่ 8 กับรูปที่ 6 ว่าขนาดของการออสซิลเลตจะมากถ้าได้รับการไบอัสมาก นั่นคือ เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรออสซิลเลเตอร์

2.10 การไบอัสกริดด้วยตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ

การไบอัสแบบนี้ไม่เพียงแต่ให้สตาร์ทด้วยตัวเองได้เท่านั้นยังช่วยการทำงานไบอัสที่หรือเกินช่วงคัทออฟมีหลักการการทำงานคือ ตอนแรก ๆ ไบอัสกริดเป็นศูนย์และจุดทำงานจะอยู่สูงในกราฟคุณสมบัติ เมื่อ G_m มีค่ามากจึงเป็นลักษณะที่ 3 ของสมการที่ (2-17) ซึ่งจะออสซิลเลตให้ขนาดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ที่ช่วงบวกของการแกว่งแรงดันกริดจะเป็นบวก ดังนั้นจะอัดประจุเข้าไปยังตัวเก็บประจุ ค่าเวลาคงที่ (time - constant) ของ R_g และ C_g จะรักษาการไบอัสที่คงที่ไว้ การไบอัสนี้จะย้ายจุดทำงานมาทางซ้ายซึ่งเป็นการเพิ่มขนาดของการออสซิลเลตเพิ่มไปจนถึงเงื่อนไข

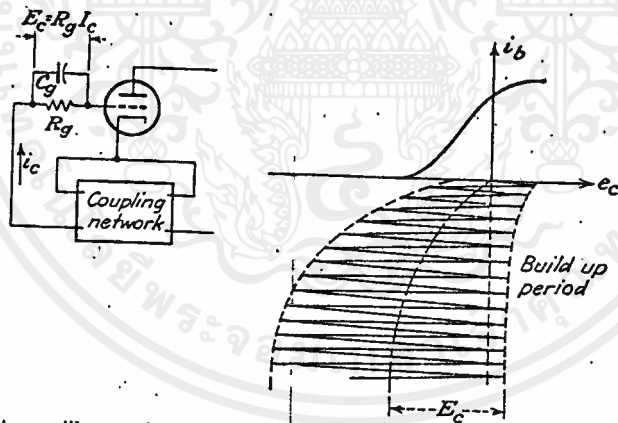


Fig. 13-5. An oscillator with grid-resistor and grid-capacitor biasing. The build-up conditions are sketched.

รูปที่ 2.9 การไบอัสที่กริดโดยใช้ R_g , C_g แบบกราฟ build up ไชสมดุลย์ระหว่างขนาดกับความถี่ไบอัส (E_c) การควบคุมไบอัสทำได้โดยเลือก R_g และ C_g ตัว C_g จะเป็นตัวรับกระแสในช่วงที่แรงดันกริดเป็นบวก เพราะมีกระแสไหลสู่กริดในช่วงนี้แต่ไม่มากนัก ทำให้ขจัดความขรุขระไม่เรียบของคลื่นได้

ถ้าค่าเวลาคงที่ $R_g C_g$ มีค่ามากแรงดันไบอัสคร่อม C_g จะปรับตัวช้าเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงขนาดทันทีทันใดและถ้าปรับตัวช้ามากการออสซิลเลตก็อาจจะหาย
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือที่ละเมิดลิขสิทธิ์โดยผู้จัดทำเอกสารนี้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

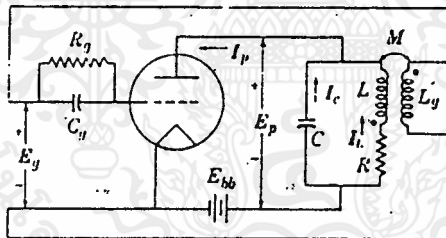
ไปก่อนที่แรงดันไบอัสจะเปลี่ยนกัน ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงกันใดนั้นในเรื่องขนาดจะมากนั้นก็กับการไบอัสคงตัว การออสซิลเลตจะหายไป นั่นคือต้องไบอัสให้เพียงพอที่มันจะสร้างขนาดจนเข้าสู่สมดุได้ ถ้าค่า $R_x C_x$ น้อยก็จะเกิดฯ หยุดยๆควรเลือกค่า $C_x R_x$ ที่เหมาะสม คือต้องให้ไบอัสลดลงเมื่อขนาดของการออสซิลเลตลดลง

2.11 วงจรจูนเพลทออสซิลเลเตอร์

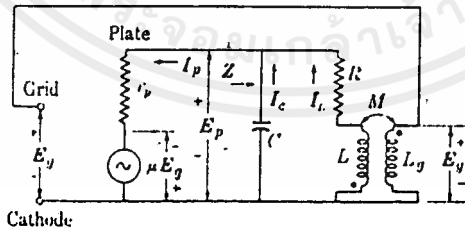
เป็นวงจรที่เอาวงจรแอนตี้เรโซแนนซ์ต่อเข้าโดยตรงกับวงจรเพลตของหลอดไตรโอด การกระตุ้นที่กริดได้รับจากการคัปปลิงจากตัวเหนี่ยวนำวงจรที่สมบูรณ์ดังในรูปที่ 2.10

วงจรเป็นวงจรแอมพลิฟายเออร์คลาส C แต่กระตุ้นกริดเอง เพื่อเป็นไปตามเงื่อนไขการออสซิลเลตค่าจูนตัวเอง สมการ (2-17) นั้นสมมุติตัดกระแสกริดทิ้ง การกระตุ้นกริดจะเป็น

$$E_x = j \omega M I_L + Z_M I_L$$



(a) Circuit diagram



(b) Incremental equivalent circuit for Class A₁ operation

รูปที่ 2.10 วงจรจูนเพลทออสซิลเลเตอร์

และ transfer impedance จะเป็น

$$Z_T = \frac{-E_x}{I_L} = - \frac{Z_M I_L}{I_L} \quad (2-25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ IPU เพื่อการศึกษาเท่านั้น I_L ไม่เอา + I_C ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ $Z_L I_L = I_C Z_C$ จะได้

$$Z_T = \frac{-Z_M I_L}{I_L + I_L (Z_L/Z_C)} = -\frac{Z_M Z_C}{Z_L + Z_C} \quad (2-26)$$

$$\text{และ } 1 + \frac{A}{\mu} = 1 - \frac{Z}{r_p + Z} = \frac{r_p}{r_p + Z} \quad (2-27)$$

$$\text{เมื่อ } Z = \frac{Z_L Z_C}{Z_L + Z_C} \quad (2-28)$$

เงื่อนไขสำหรับการออสซิลเลตแบบค่าจุนตัวเอง

$$\bar{G}_m \frac{Z_M Z_C}{Z_L + Z_C} \frac{r_p}{r_p + Z_L Z_C / Z_L + Z_C} = 1 \quad (2-29)$$

เมื่อ

$$\bar{G}_m Z_M Z_C = (Z_L + Z_C) + \frac{Z_L Z_C}{r_p}$$

$$\text{หรือ } \bar{G}_m \frac{M}{C} = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) - j \frac{R}{\omega C r_p} + \frac{L}{C r_p} \quad (2-30)$$

แยกเป็น ส่วนจริงและส่วนจินตภาพ

$$\bar{G}_m \frac{M}{C} = R + \frac{L}{C r_p} \quad \text{เงื่อนไขขนาด} \quad (2-31)$$

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} - \frac{R}{\omega C r_p} = 0 \quad \text{เงื่อนไขเฟส}$$

สมการแรกจะเป็นขนาด

$$\bar{G}_m = \frac{\mu R C}{\mu M - L} \quad (2-32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการหลังจะเป็น

$$\omega^2 = \frac{1}{L_2 C_2} \left(1 + \frac{R}{r_p} \right) \quad (2-33)$$

ถ้า ω_0 ของวงจรแอนตี้เรโซแนนซ์ คือ

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$$

จะได้

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 + R/r_p} \quad (2-34)$$

จากสมการที่ (2-34) จะเห็นว่าความถี่ที่ออสซิลเลตจะประมาณความถี่เรโซแนนซ์เพราะอัตราส่วน R/r_p เล็กมาก

2.12 การออกแบบวงจรจูนเพลทออสซิลเลเตอร์

ออสซิลเลเตอร์จะใช้เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณไฟกระแสสลับ โดยแปลงกระแสตรงที่อินพุทให้เป็นกระแสสลับที่เอาต์พุทของหลอดไตรโอด และให้ความถี่ 16 kHz โดยความถี่เกิดจากวงจรแอนตี้เรโซแนนซ์ขนาน LC และป้อนกลับโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำจากเพลตไปยังกริด

2.12.1 การออกแบบวงจรเรโซแนนซ์ LC

f : ความถี่ 16 kHz

C_2 : ค่าตัวเก็บประจุ 0.022 μF

จาก

$$\omega^2 = 1/L_2 C_2 \quad (2-35)$$

$$(2\pi f)^2 = 1/L_2 C_2$$

$$L_2 = 1/(4(\pi f)^2 C_2)$$

$$L_2 = 4.5 \text{ mH}$$

หาขนาดของ L ซึ่งเป็นแบบโซลีนอยด์แกนอากาศ

เส้นผ่าศูนย์กลาง $d = 9 \text{ cm}$

ความยาวของขดลวด $l = 45 \text{ cm}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ค่า permeability ของอากาศ $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก

$$L = N^2 \mu_0 A / l = N^2 \mu_0 \pi d^2 / (4l) \quad (2-36)$$

จำนวนรอบของขดลวด

$$(N_2) = 503 \text{ รอบ}$$

ค่าความเหนี่ยวนำระหว่างกัน (Mutual inductance) ที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดออสซิลเลต

$$L_1 = -2 L_2 / \mu \quad (2-37)$$

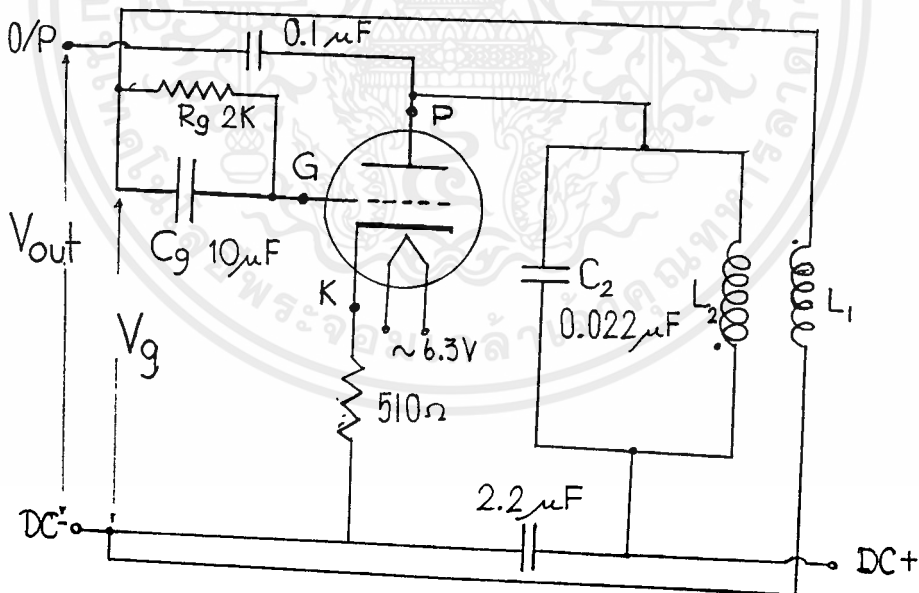
เมื่อ μ คือ ค่าอัตราขยายของหลอดไตรโอด (หลอด 6C5 $\mu = 20$)

$$L_1 = 0.45 \text{ mH}$$

เส้นผ่าศูนย์กลาง $d_1 = 6 \text{ cm}$ จะได้

$$N_1 = 114 \text{ รอบ}$$

ลักษณะของวงจรมีรายละเอียดดังรูป



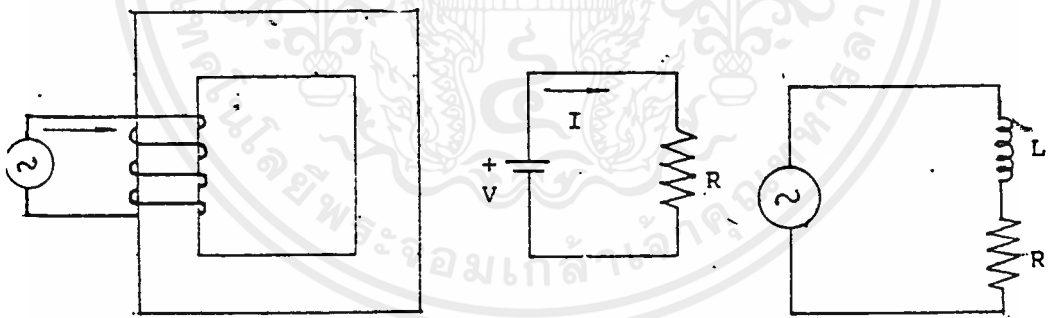
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ 2.11 วงจรจูนเพลตออสซิลเลเตอร์ นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หม้อแปลง (Transformer)

หม้อแปลงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้โยกย้ายพลังงานไฟฟ้า จากวงจรหนึ่งไปยังอีกวงจรหนึ่งโดยอาศัยสนามแม่เหล็กที่คล้องวงจรทั้งสองนั้น ทราานพอร์เมอร์อาศัยหลักการของการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก

3.1 การกระตุ้นวงจรแม่เหล็กด้วยไฟกระแสสลับ (AC EXCITATION OF-MAGNETIC CIRCUITS)

เมื่อแรงดันกระแสตรง (D.C. VOLTAGE) ครอบมคอยล์ (COIL) ซึ่งพันรอบแกนแม่เหล็ก (MAGNETIC CORE) กระแสที่ไหลจะถูกจำกัดโดยค่าความต้านทานของขดลวดแรงดัน (VOLTAGE (RI)) ที่ล้อมความต้านทานจะเท่ากับแรงดันที่จ่ายให้ (SUPPLY) และวงจรรูป 3.1 A จะถูกแทนโดยรูปแบบวงจร (CIRCUIT MODEL) ดังรูป 3.1 B



(A)

(B)

(C)

A. Circuit model

B. DC model

C. AC model

รูป 3.1 แสดงรูปแบบวงจร

ฟลักซ์แม่เหล็ก (MAGNETIC FLUX) (ϕ) จะถูกสร้างขึ้นในแกนแม่เหล็ก โดยขึ้นอยู่กับค่าต่าง ๆ ดังนี้ แรงแม่เหล็ก (MAGNETIZING FORCE (H)) มีหน่วยเป็นไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แอมแปร์เทิร์นต่อเมตร (AMPERE-TURNS PER METRE) คุณสมบัติของแกนแม่เหล็ก ซึ่งถูกกำหนดโดย B-H CURVE และพื้นที่หน้าตัด (A) ของแกนแม่เหล็ก

ในทางตรงข้ามเมื่อแรงดันไฟสลับคร่อมขดลวดที่เหมือนกันกระแสจะถูกจำกัด โดยค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดแรงดันตกคร่อม (VOLTAGE DROP) เนื่องมาจากความ- จะน้อยมากและแรงดันตกคร่อมเนื่องมาจากค่าความเหนี่ยวนำ (INDUCTIVE - REACTANCE) จะประมาณเท่ากับฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดจากแรงดันที่ป้อน (APPLIED VOLTAGE MAGNETIC FLUX) ในแกนแม่เหล็กที่ต้องการเพื่อที่จะนำไปสร้างแรง- เหนี่ยวนำซึ่งประมาณว่าเท่ากับแรงดันที่ป้อนในรูปแบบวงจรรูป 3.1 C ผลอันนี้จะถูก แทนโดยความเหนี่ยวนำ (L)

3.2 ศักดาไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (INDUCED VOLTAGE)

จากพื้นฐานของการทดลองของฟาราเดย์ สรุปว่าแรงดันที่ถูกเหนี่ยวนำใน ขดลวดหลาย ๆ ขดที่คล้องกัน การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กของสนามแม่เหล็ก จะขึ้นอยู่กับจำนวนรอบ N ของขดลวดและอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ (ϕ)

$$V = N d\phi/dt = d\lambda/dt \quad (3-1)$$

เมื่อ λ เป็นจำนวนของฟลักซ์เกี่ยวคล้อง (FLUX LINKAGE) มีหน่วยเป็น WEBER-TURNS ตัวอย่างเช่นถ้าใน 10 รอบของขดลวดมี 8 รอบที่คล้องฟลักซ์ 1 Wb และ 2 รอบคล้องฟลักซ์ 0.9 Wb ฟลักซ์เกี่ยวคล้องทั้งหมดเท่ากับ

$$(8 \times 1) + (0.9 \times 2) = 9.8 \text{ Wb - turn}$$

ขั้ว (POLARITY) ของแรงดันเหนี่ยวนำ (INDUCE VOLTAGE) สามารถอธิบายโดย กฎของเลนซ์ (LENZ'S LAW) ว่า "แรงดัน" ที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นจะมีทิศทางในทิศที่ ตรงข้ามกับการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์เกี่ยวคล้องที่สร้างมันขึ้นมา

ถ้าเตรียมทางเดินปิด (CLOSED PATH) วัฏกระแสซึ่งเกิดจากแรงดันเหนี่ยวนำ จะมีทิศทางในลักษณะเพิ่มฟลักซ์

โดยทั่วไปความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์และกระแสเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น - (NON-LINEAR) อย่างไรก็ตามเราจะคิดว่า ความสัมพันธ์ของมันเป็นเชิงเส้น (LINEAR) โดยไม่มี ERROR ถ้า ฟลักซ์ในวงจรแม่เหล็กเป็นรูปไซน์ (SINE) ดังนั้น

$$\phi = \phi_{max} \sin \omega t \quad (3-2)$$

แรงดันเหนี่ยวนำใน N รอบของขดลวดเป็น

$$V = N d\phi/dt = N \omega \phi_{max} \cos \omega t \quad (3-3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้ส่วนตัวเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือใช้ประโยชน์อื่นใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

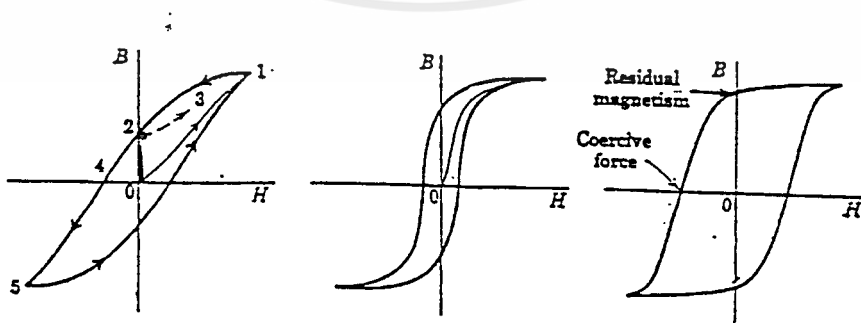
ค่า RMS ของคลื่นรูปไซน์ (SINUSOIDAL) จะเป็น

$$\begin{aligned}
 V_{rms} &= V_{max} / \sqrt{2} = (N w \phi_{max}) / \sqrt{2} \quad (3-4) \\
 &= N f \phi_{max} * (2\pi / \sqrt{2}) \\
 &= 4.44 N f \phi_{max}
 \end{aligned}$$

สำหรับฟลักซ์กระตุ้นกระแสตรง (A.C EXCITATION FLUX (ϕ_m)) ขึ้นอยู่กับความถี่และขนาดของแรงดันที่ป้อนถ้าไม่คิดแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานกระแสที่ไหลจะเป็นตัวสร้างฟลักซ์ที่ระบุในสมการ.

3.3 ฮีทเตอเรซิส (HYSTERESIS)

ในการเป็นแม่เหล็กของสสารพวกเฟอร์โรแมกเนติก (FERROMAGNETIC) ผลที่เกิดขึ้นทั้งหมดเป็นแบบไม่ยืดหยุ่น เมื่อเอาสนามภายนอกออกสสารแม่เหล็กจะไม่สามารถกลับไปอยู่ในสถานะเริ่มต้นได้ ถ้าชั้นเหล็กถูกทำให้อิ่มตัว (SATURATE) จุดที่ 1 ในรูป 3.2A และแล้วเอาสนามออก ($H = 0$) เงื่อนไขของแม่เหล็กจะเลื่อนตามเส้นจาก 1 ไป 2 ORDINATE ที่จุด 2 ถูกเรียกว่าเรซิดวลแมกเนติกไคซึม (RESIDUAL MAGNETISM)



(a) General

(b) Silicon steel

(c) Alnico

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ที่ 3.2 ใช้ Hysteresis loop ของโลหะต่างๆ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าค่า H ที่เป็นบวกถูกให้อีกครั้งหนึ่ง เงามโซลก็จะเคลื่อนตามทางจาก 2 ไป 3 แรงดันแม่เหล็กลบ (NEGATIVE MAGNETIZING FORCE (COERCIVE FORCE) ถูกต้องเพื่อจะทำให้ ความหนาแน่นของฟลักซ์เป็นศูนย์ที่จุด 4 H ที่เป็นลบจำนวนมาก จะทำให้เกิดการอ้อมตัวในทิศทางตรงกันข้าม (จุด 5) และเมื่อให้ REVERSING MAGNETIZING FORCE จะทำให้เงามโซลแม่เหล็กเคลื่อนตามทางจาก 5 ไป 1 ถ้าแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (MAGNETIZING FORCE) เกิดเนื่องจากไฟกระแสสลับวงรอบของทางเดินจะเรียกว่าฮิสเตอเรซิสลูป (HYSTERESIS LOOP)

ในขณะที่แผ่นโลหะถูกทำให้ร้อนโดยการหักงอไปมา สารแม่เหล็กถูกทำให้ร้อนเมื่อมันถูกทำให้เป็นแม่เหล็กครบเป็นวงรอบ ในกรณีทั้งสองพลังงานจะปรากฏในรูปของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น พลังงานที่ใส่เข้าไปให้กับตัวอย่าง เริ่มต้นที่ยังไม่ได้รับการทำให้เป็นแม่เหล็กจะเท่ากับพื้นที่ระหว่างเคิร์ฟ (CURVE) 0-1 และแกน B ตามรูป 22.5 ผลต่างของพื้นที่ทั้งสองนี้ จะแปลงไปเป็นความร้อนของกระบวนการผันกลับไปได้ตามแนวเส้นของวงรอบที่สมบูรณ์พื้นที่ฮิสเตอเรซิสลูปจะเท่ากับพลังงานที่สูญเสียไปในหนึ่งรอบสำหรับซิลิกอนสตีลลูป (SILICON STEEL LOOP) จะพอม (22.4 B) และฮิสเตอเรซิสจะน้อยสำหรับแม่เหล็กถาวรโคเออร์ซีฟฟอร์ซ (COERCIVE FORCE) จะกว้างและฮิสเตอเรซิสลอส (HYSTERESIS LOSS) จะกว้างรูป 3.2C พื้นที่ของลูปจะเพิ่มอย่างไม่เป็นเชิงเส้นกับความหนาแน่นของฟลักซ์ที่มากที่สุด สูตรอย่างง่ายสำหรับหาค่าฮิสเตอเรซิสในหน่วยวัตต์ คือ

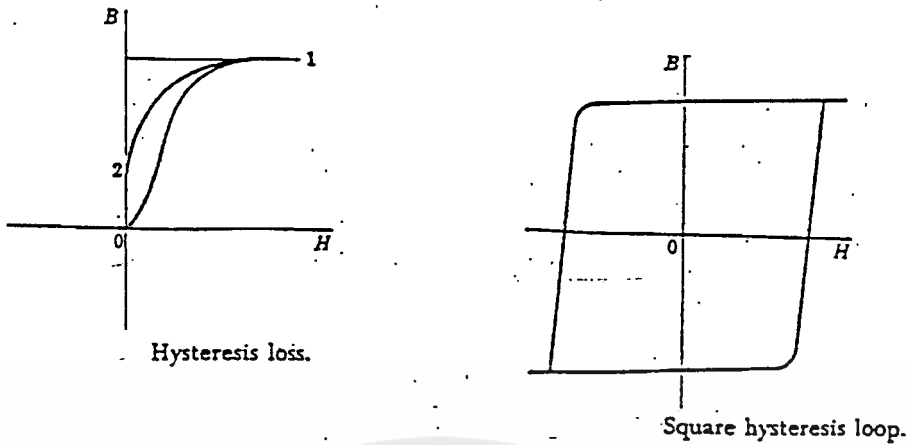
$$P_h = K_h f B_{max}^n \quad (3-5)$$

ที่ซึ่งค่า K_h เป็นค่าคงที่ n เปลี่ยนแปลงไปตามสสารที่ใช้ทำแกนปรกติ n จะสมมติให้เท่ากับ 1.6

สารแม่เหล็กบางชนิดฮิสเตอเรซิสลูปเกือบจะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าดังในรูปที่ 3.3

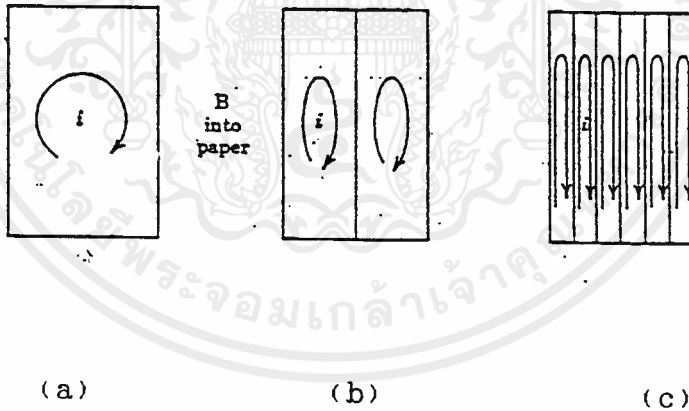
3.4 กระแสไหลวน (EDDY CURRENT)

ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชุดแรก ๆ เกือบจะสามในสี่ของพลังงานกลที่ใส่เข้าไปจะเปลี่ยนเป็นความร้อนในวงจรแม่เหล็กส่วนเล็กน้อยของพลังงานที่สูญเสียนี้เนื่องมาจากฮิสเตอเรซิส แต่ส่วนใหญ่เกิดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กเหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงดันขึ้นในแกนแม่เหล็กของมันเองใน ไอรอนคอร์โวลเตจ - เอ (IRON CORE VOLTAGE) การที่ถูกเหนี่ยวนำนั้นจะเป็นสาเหตุให้เกิดกระแสเฉพะที่ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แสดงฮีสเตอริซิสลูป

เรียกว่ากระแสไหลวนและเป็นผลที่ให้อำนาจงาน $I^2R = V^2/R$ เปลี่ยนไปเป็นความร้อนดังแสดงในรูป 3.4 A



รูปที่ 3.4 กระแสไหลวนและผลของชนิดแกนแม่เหล็ก

การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ (มีทิศพุ่งเข้าไปในกระดาษ) จะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสสุทธิภายในแกนแม่เหล็ก กำลังที่สูญเสียสามารถถูกทำให้ลดลงโดยการลดค่า V และเพิ่มค่า R ถ้าแทนแกนเหล็กตันด้วยแผ่นบาง ๆ ดังในรูป 3.4 B ผลของแรงดันที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นจะถูกทำให้ลดน้อยลง และค่าความต้านทานของเอฟเฟคตีฟพาท (EFFECTIVE PATH) จะถูกทำให้เพิ่มขึ้น การทำให้เป็นแผ่นบางๆ บางถึง 0.02 นิ้วและแต่ละชั้นจะมีจำนวนกัน ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้วานิช

เอกสารนี้เป็นเอกสารกำลังที่สูญเสียเนื่องมาจากเอ็ดดี้เคอร์เรนต์ (EDDY CURRENT) ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถแทนโดย

$$P_c = K_c f^2 B^2 m$$

เพราะว่าแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นโดยตรงกับค่า $f B_m$ และการสูญเสียแปรตามกำลังสองของขนาดแรงดัน เราคาดว่ากำลังที่สูญเสียจะแปรตามค่า $f^2 B^2 m$ ค่าคงที่ K_c ขึ้นอยู่กับ ความต้านทานจำเพาะของวัสดุที่ใช้ทำแกนเหล็กและความบางของแผ่น

3.5 โครงสร้าง (CONSTRUCTION)

ทรานฟอร์เมอร์เป็นตัวแปลงพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งการทำงานสามารถอธิบายในเทอมของการแสดงพฤติกรรม วงจรแม่เหล็กซึ่งถูกกระตุ้นโดยไฟฟ้ากระแสสลับในรูปแบบที่ขั้วรวมค่าที่สุด ทรานฟอร์เมอร์ประกอบไปด้วยสองขดลวดซึ่งมีจำนวนรอบหลาย ๆ รอบพันอยู่บนแกนแม่เหล็กอันเดียวกัน แต่มีฉนวนแยกจากกันการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์โวลเตจที่ทำให้ที่อินพุทหรือขดลวดปฐมภูมิ (PRIMARY) เป็นสาเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ไหลเป็นผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กในแกนแม่เหล็กเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์โวลเตจ จะถูกเหนี่ยวนำขึ้นทางด้านเอาต์พุท หรือทางทุติยภูมิ (SECONDARY) สิ่งจำเป็นก็คือจะไม่มี การเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าระหว่างอินพุทและเอาต์พุทของทรานฟอร์เมอร์ อาจใช้ฉนวนกันระหว่างวงจรหนึ่งกับวงจรอื่น โดยอนุญาตให้มีการแลกเปลี่ยนของพลังงานระหว่างกันได้

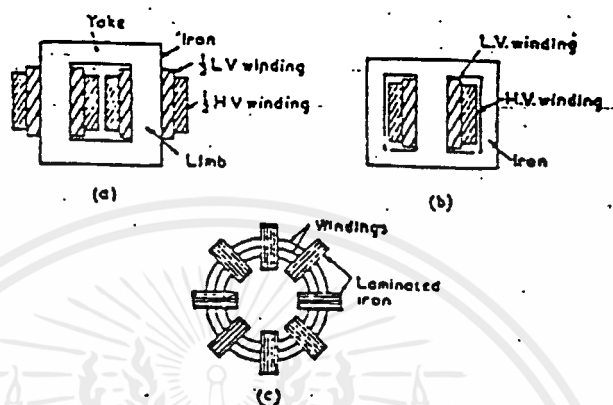
โดยการปรับแต่งจำนวนรอบของขดลวดทั้งสอง เราสามารถทำให้โวลเตจเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ในอุปกรณ์เดียวกัน สามารถจะใช้เป็นทั้งการเพิ่มขึ้น (STEP-UP) หรือ ลดลง (STEP-DOWN) ก็ได้ นอกจากการแปลงโวลเตจหรือกระแส ทรานฟอร์เมอร์อาจจะใช้ในการแปลงอิมพีแดนซ์เพื่อที่จะได้รับกำลังงานมากที่สุดส่งผ่านอิมพีแดนซ์แมชชิง (IMPEDANCE MATCHING) จากหลักการทำงานของทรานฟอร์เมอร์ จะเห็นว่ามันเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงพลังงานที่สำคัญควรแก่การศึกษาอย่างระมัดระวัง .

หม้อแปลงไฟฟ้า แบ่งเป็นชนิดใหญ่ ๆ ได้ 3 ชนิด โดยพิจารณาจากลักษณะของการวางหรือการจัดรูปของแกนเหล็ก แบ่งได้ดังนี้คือ

1. แบบคอร์ไทป์ (CORE TYPE) เป็นแบบที่มีวงจรแม่เหล็กวงเดียว ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แบบเชลไทป์ (SHELL TYPE) เป็นแบบที่มีวงจรมแม่เหล็ก 2 วงจร

3. แบบเบอร์รี่ไทป์ (BERRY TYPE) เป็นแบบที่มีวงจรมแม่เหล็ก กระจายออกไปโดยรอบการจัดรูปของแกนเหล็กทั้ง 3 แบบนี้ได้แสดงดังรูปข้างล่าง



รูป 3.5 การแบ่งชนิดของหม้อแปลงไฟฟ้าตามลักษณะการวางแกนเหล็ก

a) Core Type

(b) Shell Type

c) Berry Type

แบบคอร์ไทป์ นั้นครึ่งหนึ่งของขดลวดทางปฐมภูมิ และทุติยภูมิพันรอบขาแต่ละข้างของแกนเหล็ก การพันแบบนี้ลดการรั่วไหลของเส้นแรงแม่เหล็ก (FLUXLEAKAGE) ที่เกิดจากขดลวดทั้งสองลงไปที่ทำให้ได้เส้นแรงแม่เหล็กที่คล้อง (LINKAGE FLUX OF MUTUAL FLUX) ขดลวดทั้งสองมากยิ่งขึ้นแต่ถ้าพันขดปฐมภูมิและทุติยภูมิ แยกกันไว้บนขาของแกนเหล็กแต่ละข้างแล้วทำให้เกิดการรั่วไหลของฟลักซ์ (FLUX) มากยิ่งขึ้นซึ่งมีผลต่อการทำงานของหม้อแปลงอย่างจริงจัง ปรกติแล้วแบบคอร์ไทป์นี้มักใช้กับหม้อแปลงขนาดใหญ่

แบบเชลไทป์ นี้มีขดลวดทั้งปฐมภูมิและทุติยภูมิพันไว้ที่แกนกลางของแกนเหล็ก ส่วนที่เหลืออีก 2 ขานี้ก็ทำหน้าที่เป็นโลว์รีลัคแตนซ์ฟลักซ์ (LOW RELUCTANCE FLUX PATH)

สำหรับเบอร์รี่ไทป์ (BERRY TYPE) นี้มีแกนเหล็กวางอยู่เป็นวงรอบ ๆ ขดลวดแกนเหล็กนี้จำเป็นต้องมีโครงสร้างเป็นแบบเชล โดยมีแกนเหล็กกระจายออกไปรอบ ๆ ขดลวดเหล่านั้น

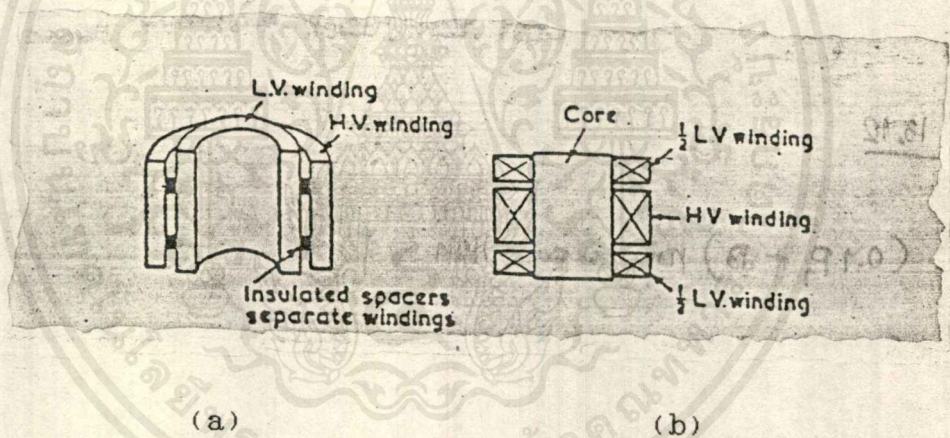
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การพันขดลวด (WINDING)

การพันขดลวดของหม้อแปลงแบ่งได้เป็น 2 แบบใหญ่ ๆ คือ

3.6.1 แบบคอนเซ็นตริก (CONCENTRIC) ที่เป็นรูปทรงกระบอก (CONCENTRIC CYLINDER) ดังรูปข้างล่าง การพันแบบนี้มีขดลวดแรงต่ำอยู่ภายในทั้งนี้เนื่องจากปัญหาการทำฉนวนหุ้มเส้นลวดที่ใช้ทำขดลวดนั่นเอง ลวดที่ใช้ในการทำคอล์ย (COIL) นั้นเป็นลวดทองแดงที่หุ้มฉนวน ฉนวนนี้อาจมีรอยขีดข่วนเนื่องจากการใส่ขดลวด (WINDING) ฉะนั้นเมื่อให้ด้านแรงต่ำ (L.V. SIDE) อยู่ข้างในจึงปลอดภัยกว่าและยังระบายความร้อนได้ดีอีกด้วย

3.6.2 แบบประกบซ้อนกัน (SANDWICH) แบบนี้ช่วยในการลดเส้นแรงแม่เหล็กที่รั่วไหล (LEAKAGE FLUX) ให้ลดลงไปขดลวดแรงดันต่ำแบ่งเป็น 2 ส่วน แต่ละครึ่งของขดลวดแรงต่ำนั้นประกบหัวท้ายของขดลวดแรงสูง



รูป 3.6 แบบของการพันขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า

a) แบบ Concentric

b) แบบ Sandwich

3.7 ทฤษฎีและหลักการของหม้อแปลงไฟฟ้า

3.7.1 หลักการของหม้อแปลง (TRANSFORMER'S PRINCIPLE)

หม้อแปลงประกอบด้วยขดลวด 2 ชุด ที่พันอยู่บนแกนเหล็กดังรูปข้างล่างนี้ชุดที่ต่อไปยังแหล่งกำเนิดไฟฟ้า เรียกว่า ชุดปฐมภูมิ (PRIMARY WINDING) โดยมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมอยู่ V_p (V_1) โวลต์ อีกชุดหนึ่งที่ต่อไปยังภาระไฟฟ้า (LOAD) ที่เรียกว่า ชุดทุติยภูมิ (SECONDARY WINDING) โดยมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมที่โวลต์เป็น N_p (N_1) รอบและ N_s (N_2) รอบตามลำดับด้านที่รับกำลังไฟ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟ้าอาจจะเป็นด้านแรงต่ำหรือแรงสูงก็ได้ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการใช้งาน

เมื่อหม้อแปลงได้รับแรงเคลื่อนไฟฟ้า V_p โวลต์ เข้าไปที่ขดปฐมภูมิจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้า V_s ทางด้านทุติยภูมิขึ้น ถึงแม้ว่าจะไม่มีโหลดมาต่อก็ตาม ในกรณีนี้ $V_s = E_2 = V_2$

3.7.2 อัตราส่วนของแรงเคลื่อนและกระแสไฟฟ้า

เมื่อมีโหลดมาต่อทางด้านทุติยภูมิ ทำให้เกิดกระแส I_s ไหลอยู่ทางด้านทุติยภูมิ และมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมโหลดเท่ากับ V_s ($V_s = E_2$) ส่วนทางด้านปฐมภูมินั้นก็มีกระแส I_p และแรงเคลื่อนไฟฟ้า V_p ออกมาจากแหล่งจ่ายเมื่อทำการสังเกตต่อไปก็พบว่า อัตราส่วน V_p/V_s นั้นมีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วนของ N_p/N_s และมีค่าใกล้เคียงกับส่วนกลับของอัตราส่วน I_p/I_s นั่นก็คือ $V_p I_p$ มีค่าใกล้เคียงกับ $V_s I_s$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของ I_s เกิดขึ้นทางทุติยภูมินั้นมีผลทำให้ I_p เปลี่ยนแปรด้วยนั่นคือ

$$V_p I_p \propto V_s I_s$$

เส้นแรงแม่เหล็ก (ϕ) นี้คล้อง (LINK) ขดลวดของขดปฐมภูมิและทุติยภูมิดังนั้นจึงทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นทั้ง 2 ขด (E_1 & E_2) ซึ่งค่าของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้ เป็นสัดส่วนกับจำนวนรอบของขดลวดแต่ละขดวงได้จากความสัมพันธ์ตามกฎของการเหนี่ยวนำดังสมการ (2.1)

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

เมื่อ E เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในขณะใดขณะหนึ่ง

N เป็นจำนวนรอบของขดลวดที่ได้รับอัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กต่อหน่วยเวลา

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A เรียกว่า TRANSFORMER RATIO

เมื่อ E_1 และ E_2 คือแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิตามลำดับ N_p กับ N_s ก็คือจำนวนรอบของขดลวดทางปฐมภูมิและทุติยภูมิ ทั้ง 2 ข้างนั้น แตกต่างจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดจากการเหนี่ยวนำก็เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ฉะนั้นจึงไม่ทำให้เวคเตอร์ของ V_p และ V_s มีมุมแตกต่างไปจากเวคเตอร์ของ E_1 และ E_2 มากนักดังนั้นถ้าหากจะพิจารณาว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้วนั้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนรอบของขดลวด โดยประมาณแล้วก็จะได้ความสัมพันธ์ว่า

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

ถ้าหากว่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าจากภายในหม้อแปลงนั้น มีจำนวนเล็กน้อยก็ตัดค่าที่เสียนั้นทิ้งไปได้ นั่นก็คืออาจจะพิจารณาได้ว่ากำลังไฟฟ้าที่ได้รับ (POWER OUTPUT) กับกำลังที่ใส่เข้าไป (POWER INPUT) มีค่าเท่ากันนั่นก็คือ

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

ค่า $\cos \theta_s$ นั้นหาได้จากชนิดของโหลด แต่เนื่องจากว่า power factor ของปฐมภูมิและทุติยภูมิ มีความแตกต่างกันเล็กน้อยดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{หรือ} \quad V_p I_p &= V_s I_s \\ \frac{V_p}{V_s} &= \frac{I_s}{I_p} = \frac{N_p}{N_s} \\ \text{ได้} \quad I_p N_p &= I_s N_s \end{aligned}$$

หม้อแปลงนี้จะทำหน้าที่ต่อเมื่อไฟที่ใส่เข้าไปทางด้านปฐมภูมินั้นต้องเป็นไฟสลับหรือไฟที่มีการเปลี่ยนแปลงเป็นจังหวะ (PULSE)

3.8 ทฤษฎีการทำงาน (THEORY OF OPERATION)

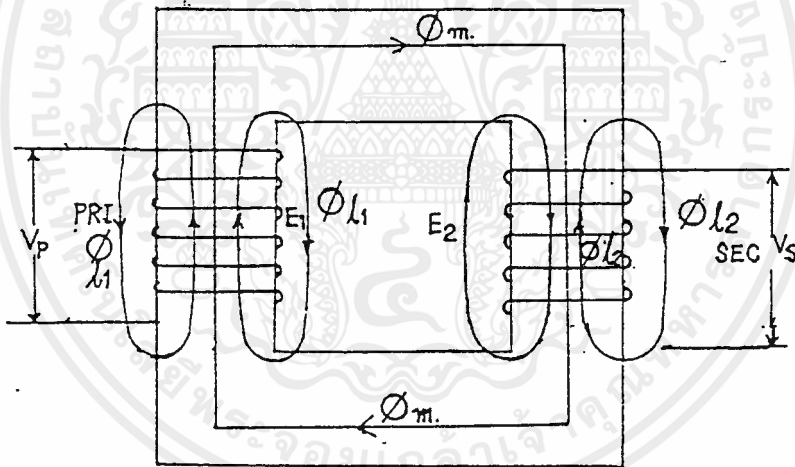
เพื่อความเข้าใจง่ายในทฤษฎีการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า จึงใคร่ที่จะเริ่มต้นจากทฤษฎีที่ได้วางแนวคิดที่เป็นพื้นฐานไว้ก่อน ฉะนั้นจึงจะกล่าวถึงหม้อแปลงแม้ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟฟ้าตามความคิดฝัน (IDEAL TRANSFORMER) หม้อแปลงชนิดนี้ไม่คิดการสูญเสียชนิดต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงดังนั้นจึงเป็นการวาดภาพพจน์ของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดนี้ขึ้นในความฝันเท่านั้น

3.8.1 หม้อแปลงตามความคิดฝัน (IDEAL TRANSFORMER)

ทำให้เกิดมีหลักการทำงาน ดังนี้

เมื่อใส่ไฟ V_p เข้าไปทำให้เกิดกระแส I_p กระแสนี้ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมด ϕ เส้นแรงนี้จะเหนี่ยวนำขดลวดของมันเองและขดลวดของทุติยภูมิให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า E_1 และ E_2 ขึ้นพร้อม ๆ กัน นั่นคือ E_1 และ E_2 ที่เกิดขึ้นที่เป็นไปตามกฎของเลนซ์ (LENZ) และฟาราเดย์ (FARADAY) นั่นคือ $V_p = E_1$ และ $E_2 = V_s$ ในกรณีที่นี้เป็นหม้อแปลงตามความคิดฝันเท่านั้นส่วนหม้อแปลงจริง ๆ นั้นมีหลักการทำงานดังรูปข้างล่างนี้ คือ



รูป 3.7 Magnetic circuit of Ideal transformer

เมื่อใส่ไฟสลับ V_p เข้าไปที่ด้านปฐมภูมิทำให้มีกระแส I_p ไหลผ่านขดลวดนี้ไปยังวงจรรภายนอก ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก (ϕ_1) ขึ้นที่ขดลวดปฐมภูมิ ϕ นี้ประกอบไปด้วยมิวชวลฟลัก (MUTUAL FLUX) (ϕ_{1m}) และ ลีคเกจฟลัก (LEAKAGE FLUX) ขณะที่ ϕ_{1m} เปลี่ยนแปรไปตามการเปลี่ยนแปลงของกระแสทำให้เกิดการเหนี่ยวนำ E.M.F. (ELECTROMOTIVE FORCE) ขึ้นภายในขดลวดปฐมภูมิ และมีทิศทางตรงข้ามกับ V_p (ตามกฎของเลนซ์) ให้ไฟที่จ่ายเข้าไปเป็นคลื่นรูปไซน์ (SINUSOIDAL WAVEFORM) ฉะนั้นที่ ϕ_1 เป็น SIN WAVE ด้วย (ไม่คิดความสูญเสียไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสีย (LOSS) ต่าง ๆ และ แล็กอิมเพรส โวลเตจ (LAG IMPRESSED VOLTAGE) V_p ไป 90 องศา) นั่นคือ

$$\phi_1 = \phi_{1\max} \cos \omega t = \phi_{1m} + \phi_{11}$$

ตามกฎของเลนซ์ได้

$$e_1 = -N_1 d\phi/dt$$

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

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

$$E_1 = N_1 2F_1 \phi_{\max}$$

$$E_1 = 4.44 N_1 f_1 \phi_{1\max}$$

เมื่อ E_1 = ค่าเอฟเฟคทีฟ (EFFECTIVE VALUE) หรือ ค่า อาร์ เอ็ม เอส (R.M.S. VALUE) ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำขึ้นใน ปรุหมุ่ และทิศทางตรงกันข้ามกับ V_p = แบค อี เอ็ม เอฟ (BACK E.M.F.)

N_1 = จำนวนรอบของขดลวดทางปรุหมุ่ (รอบ)

F_1 = ความถี่ของไฟสลับที่จ่ายให้กับขดลวดปรุหมุ่ (รอบ/นาที)

ϕ_{\max} = ฟลักซ์ทั้งหมดที่เกิดขึ้นทางปรุหมุ่ขณะที่มีค่าสูงสุด (WEBER)

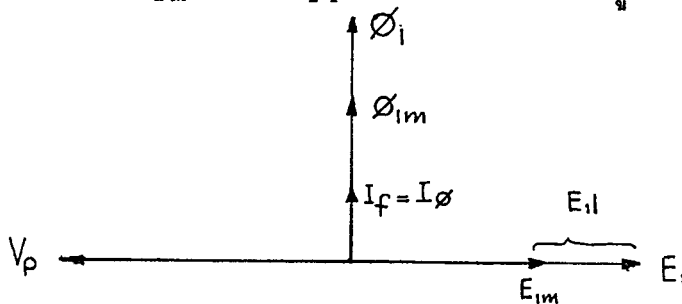
$\phi_{1\max}$ = เส้นแรงแม่เหล็กร่วมที่ขดปรุหมุ่ (PRIMARY MUTUAL FLUX)

ϕ_m = เส้นแรงแม่เหล็กร่วมที่เกิดขึ้นทั้งทางปรุหมุ่และทุติยภูมิตั้ง

(MUTUAL FLUX WEBER)

$$= \phi_{1m}$$

แรงเคลื่อนไฟฟ้า E_1 นี้ประกอบด้วย E_{1m} และ E_{11} ซึ่งเกิดจาก C_{1m} และ ϕ_{11} ทั้ง E_{1m} และ E_{11} นี้มีเฟสเดียวกันดังรูปข้างล่างนี้



รูป 3.8 การเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับ Ideal Transformer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะฉะนั้น

$$E_{1m} + E_{11} = V_p$$

เมื่อ E_{1m} = การเหนี่ยวนำที่เกิดจากมีวชวลพลิก

E_{11} = การเหนี่ยวนำที่เกิดจากเซล์ฟอินดักแตนซ์ (SELF INDUC-TANCE หรือ เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล (LEAKAGE FLUX)

สำหรับทางด้านทุติยภูมินั้นก็เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้า E_2 ขึ้นในขณะเดียวกันกับที่ E_1 เกิดขึ้นและมีทิศทางไปทางเดียวกันด้วยแต่ E_2 นี้ เกิดขึ้นจาก ϕ_m เท่านั้น ดังนั้นขนาดของ E_2 จึงขึ้นอยู่กับจำนวน N_2 และ ϕ_2 ที่มาคล้องขดลวดทุติยภูมิ E_2 ที่เกิดขึ้นตามกฎของฟาราเดย์

$$E_2 = 4.44 N_2 f \phi_{m \max}$$

เมื่อ E_2 = อินดิวิร์ อีเอ็มเอฟ (INDUCE EMF) ทางทุติยภูมิ = V_m (ไม่มีโหลด)

$\phi_{1m \max}$ = ฟลักซ์เกี่ยวคล้องสูงสุด (MAXIMUM MUTUAL FLUX) ที่มาลิงค์ (LINK) หรือคล้องขดทุติยภูมิ

$$= \phi_{1m \max} \text{ (สำหรับหม้อแปลงในความคิดฝัน IDEAL TRANS-FORMER)}$$

$$N_2 = \text{จำนวนรอบขดลวดทางด้านทุติยภูมิ}$$

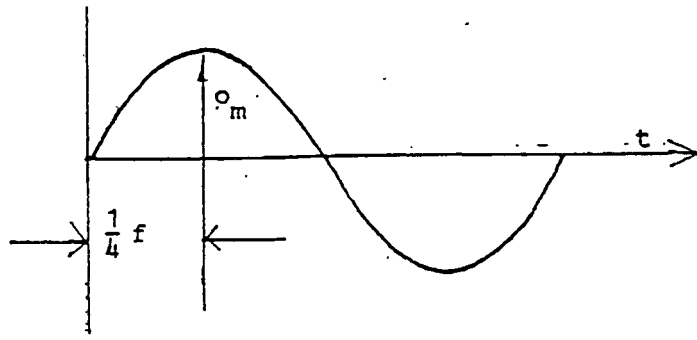
ขณะไม่มีโหลดนั้นก็จะได้ความสัมพันธ์ของกระแสดังนี้

$$I_p = I_o \text{ (NO LOAD COURRENT) } = I_\phi \text{ (MAGNETIZING CURRENT)}$$

โดยที่ I_ϕ นี้ แล็ก (LAG) V_p ไป 90 องศาและอินเฟส (INPHASE) กับ ϕ_1 , ϕ_m สำหรับหม้อแปลงอุดมคติขณะที่ทางทุติยภูมิไม่มีโหลดนั้น $I_p = I_o$ แต่เมื่อมี โหลดเพิ่มขึ้น I_p ไม่เท่ากับ I_o แล้ว แต่ I_o ก็ยังคงที่อยู่ตลอดเวลา แม้ว่า โหลดทางทุติยภูมิ จะเปลี่ยนแปลงไปก็ตาม

ในการหาสมการเหนี่ยวนำ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงนี้ สามารถหาได้จากค่าจำกัดความของฟาราเดย์ ได้เช่นเดียวกันโดยพิจารณาจากคลื่น รูปไซน์ พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กจากศูนย์ถึงค่าสูงสุด คือ $\phi_{m \max}$ ภาย

ในเวลา $1/4f$ วินาที สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก

เพราะฉะนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเฉลี่ยในช่วงเวลา $1/4f$ สำหรับตัวนำ 1 รอบมีค่าเท่ากับ $\frac{\phi_{max}}{4f}$

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

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

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

สำหรับคลื่นรูปไซน์ นี้มีค่าฟอร์มแฟคเตอร์ (FORM FACTOR) = 1.11

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

เพราะฉะนั้นค่า อาร์ เอ็ม เอส ของอี เอ็ม เอฟ (R.M.S. VALUE OF E.M.F.)

สำหรับ N รอบ = $4.44f \phi_{max}$

3.9 การออกแบบหม้อแปลง

เนื่องจากเป็นหม้อแปลงที่ใช้ในย่านความถี่สูงจึงใช้แกนเฟอร์ไรท์

(ferrite) ซึ่งใช้ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux density :

B) ต่ำ โดยพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก และ

ความเข้มสนามแม่เหล็ก (B-H curve) ซึ่งใช้ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า (B_{max}) 200 มิลลิเทสลา (mT)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ

$$E_{max} = w \cdot N \cdot B_{max} \cdot A$$

เมื่อ

E_{max} : ค่าแรงดันเหนี่ยวนำค่ายอด (peak voltage)

w : อัตราเร็วเชิงมุม ($w = 2\pi \cdot f$)

N : จำนวนรอบของขดลวด

A : พื้นที่หน้าตัดของแกนแม่เหล็ก (m^2)

สำหรับหม้อแปลงที่ใช้มีขนาดดังนี้คือ

พิกัดแรงดันด้านปฐมภูมิ (V_{1p}) = 200 V_p

พิกัดแรงดันด้านทุติยภูมิ (V_{2p}) = 3500 V_p

พื้นที่แกนแม่เหล็ก (A) = $89.9 \cdot 10^{-6} m^2$

ความถี่ (f) = 16000 Hz

พิกัดกระแสทางปฐมภูมิ (I_1) = $150 \cdot 10^{-3} A$

แทนค่าในสูตร หาจำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิ

$$N_1 = V_{1p} / (2\pi \cdot f \cdot B_{max} \cdot A)$$

$$N_1 = 200 / (2\pi \cdot 16000 \cdot 200 \cdot 10^{-3} \cdot 89.9 \cdot 10^{-6})$$

$$N_1 = 110 \text{ รอบ}$$

จำนวนรอบของขดลวดทางทุติยภูมิคือ

$$N_2 = (3500/200) \cdot 110$$

$$N_2 = 1936 \text{ รอบ}$$

ด้านปฐมภูมิใช้ลวดเบอร์ 31 # SWG

ด้านทุติยภูมิใช้ลวดเบอร์ 40 # SWG

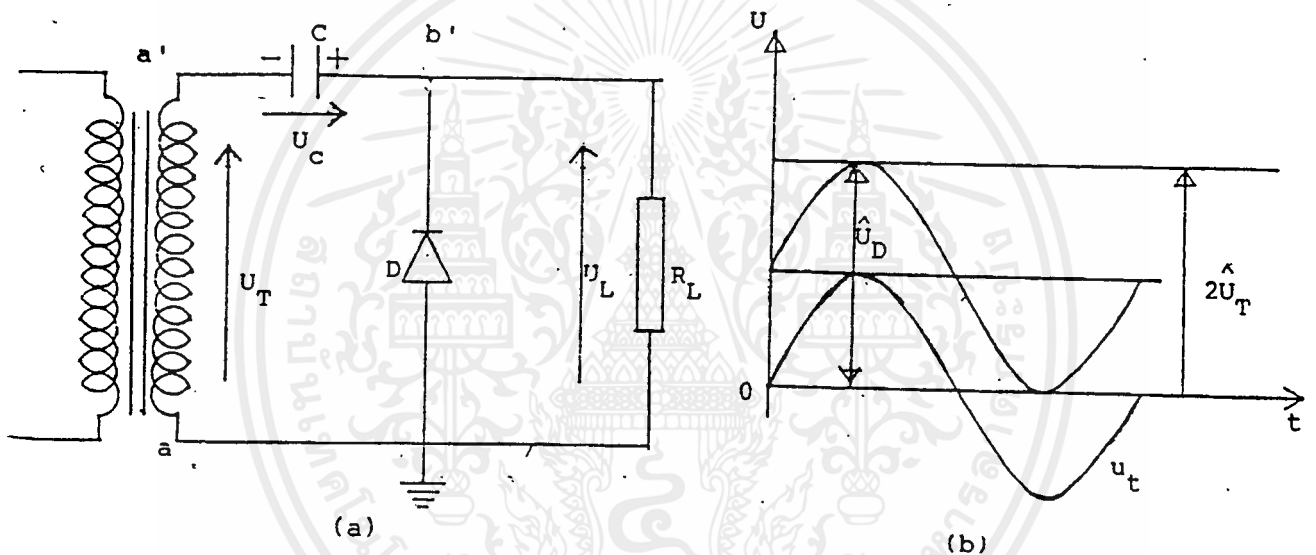
วงจรค็อคครีฟต์ - วอลตันโวลเตจมัลติพลายเออร์

(Cockcroft - Walton voltage multiplier circuit)

4.1 วงจรโวลเตจมัลติพลายเออร์

ในส่วนการสร้างแรงดันสูงกระแสตรงมาก ๆ นี้จะใช้หลักการของวงจรสร้างแรงดันสองเท่ามาต่อซ้อนกันหลายๆชุดเป็นวงจรขั้นบันได สำหรับวงจรสร้างแรงดันสองเท่าแสดงในรูปข้างล่าง

4.2 วงจรสร้างแรงดันสองเท่า



รูป 4.1 แสดงวงจรสร้างแรงดันสองเท่า

จากรูป เมื่อจุด a' เป็นลบ ตัวเก็บประจุ C_1 จะอัดประจุจนถึงค่ายอดของแรงดันหม้อแปลง คือ $u_{C1} = u_T$ เมื่อจุด a' เป็น 0 และเพิ่มเป็นบวกจะทำให้แรงดันจุด b' ซึ่งเท่ากับผลรวมของแรงดันหม้อแปลงและแรงดันตกคร่อม C_1 ถ้าแรงดันหม้อแปลงเพิ่มจนถึงค่ายอด u_T แรงดันที่จุด b' คือ $u_{b'}$ จะมีค่าสูงสุดเป็นสองเท่าของแรงดันหม้อแปลง $= 2u_T$ ดังนั้นไดโอด D_1 จะต้องทนแรงดันเป็นสองเท่าของแรงดันหม้อแปลง $= 2u_T$ แรงดัน $u_{b'}$ จะแปรค่าจาก 0 ถึง $2u_T$ ที่จุด b' จะให้แรงดันสูงเป็นสองเท่าของแรงดันค่ายอดของหม้อแปลง

4.3 วงจรเรกติฟายเออร์

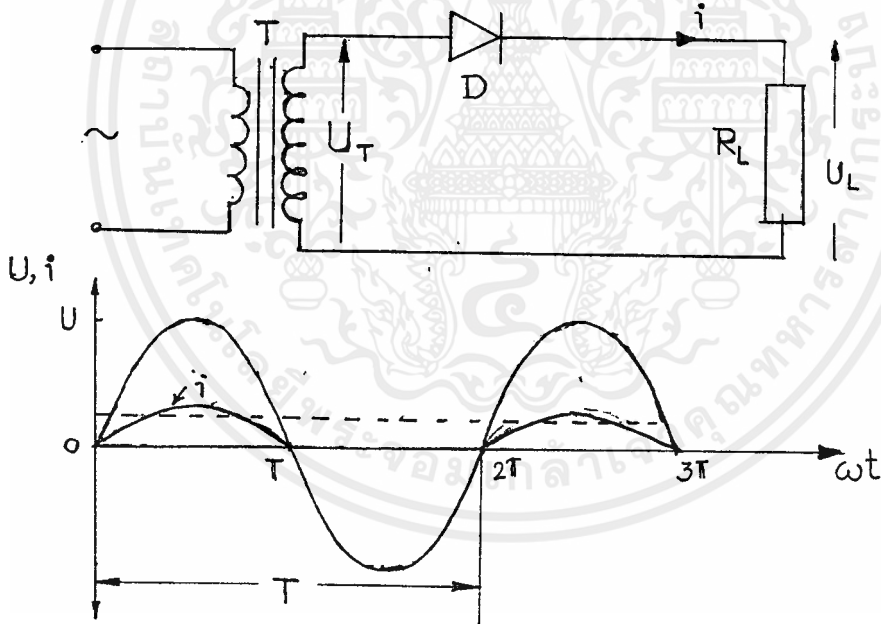
ในการสร้างแรงดันกระแสตรงด้วยวงจรเรกติฟายเออร์ที่ใช้ในห้องทดลองไฟฟ้าแรงสูงนั้น ในสมัยก่อนนั้นใช้หลอดสูญญากาศที่เป็นตัวเรียงกระแส แต่ในปัจจุบันไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นี้โดยทั่วไปจะใช้ไดโอดสารกึ่งตัวนำมาต่ออันดับ นอกเสียจากในกรณีที่ต้องการกระแสสูงๆหลายๆแอมแปร์และแรงดันไม่เกิน 10 kV มักจะใช้เรกติฟายเออร์ไวยโปรท

ในการสร้างแรงดันกระแสโดยใช่วงจรเรกติฟายเออร์ สำหรับเรียงกระแส เพื่อให้ได้แรงดันกระแสตรง ทั้งแรงดันต่ำและแรงดันสูง จะมีวงจรพื้นฐานสองแบบด้วยกันคือ วงจรเรกติฟายเออร์ครึ่งคลื่น วงจรเรกติฟายเออร์เต็มคลื่นในห้องทดลองแรงสูงที่ต่างๆไปจะใช่วงจรเรกติฟายเออร์ครึ่งคลื่น

4.3.1 วงจรเรกติฟายเออร์ครึ่งคลื่น

วงจรที่ใช้สร้างแรงดันสูงกระแสตรงที่จัดวางง่ายที่สุด เป็นแบบเรียงกระแสเพียงครึ่งหนึ่งของคลื่นที่ป้อน เข้าไปอาจจะเป็นครึ่งบวกหรือครึ่งลบขึ้นอยู่กับหัวของไดโอดที่ต่อไว้ ดังในรูปเป็นวงจรรีเรียงกระแสช่วงครึ่งบวก วงจรประกอบด้วยหม้อแปลงแรงสูง T เป็นตัวจ่ายแรงดันคลื่นรูปไซน์ มีค่าแรงดันทางด้านกำลังออกเท่ากับ u_T ต่อผ่านไดโอด D เรียงกระแสจ่ายให้กับโหลด R_L



รูป 4.2 แสดงวงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่น

จากรูปวงจร สมมติว่าไดโอดมีค่าความต้านทานภายในเมื่อนำกระแส R_D ถ้าแรงดันที่ได้จากหม้อแปลงด้านจ่ายกำลังออกเป็นคลื่นรูปไซน์ คือ

$$u_T = U_T \sin \omega t \tag{4-1}$$

ฉะนั้นกระแสในวงจร

$$i = u_T(t) / R_{total} = U_T \sin \omega t / (R_D + R_L)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน, $0 < t < \pi$ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i = 0, \pi < t < 2\pi \quad (4-2)$$

เมื่อผ่านไดโอดกระแสจะไหลทางเดียวเป็นกระแสตรงได้ค่าเฉลี่ย

$$\begin{aligned} I_{dc} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i d(\omega t) \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} [U_T \sin \omega t / (R_D + R_L)] d(\omega t) + 0 \\ &= U_T / [\pi(R_D + R_L)] = I / \pi \end{aligned} \quad (4-3)$$

แรงดันกระแสตกคร่อม R_L คือ

$$\begin{aligned} U_L &= I_{dc} R_L \\ U_L &= U / \pi \end{aligned} \quad (4-5)$$

4.3.1.1 แฟคเตอร์ระลอก r (Ripple factor)

จากรูปคลื่นแรงดันกระแส จะเห็นว่ากระแสเรียงที่ได้แม้จะไหลทางเดียว แต่ยังไม่เรียบคุณภาพของแรงดันหรือกระแสที่เรียงแล้วนั้นจะเรียบเพียงใดกำหนดด้วยค่าแฟคเตอร์ระลอกซึ่งนิยามไว้ว่า $r = I_{ac} / I_{dc} = U_{ac} / U_{dc} = \text{rms value of ac component} / \text{dc component}$ เนื่องจากพลังงานกระจายหายไปในความต้านทานคิดจากกระแสค่า อาร์ เอ็ม เอส ซึ่งเป็นผลรวม พลังงานกระแสตรง และ กระแสสลับ นั่นคือ

$$(I_{rms})^2 R_L = (I_{dc})^2 R_L + (I_{ac})^2 R_L \quad (4-6)$$

จะได้

$$I_{ac} = \sqrt{[(I_{rms})^2 - (I_{dc})^2] / I_{dc}} \quad (4-7)$$

$$\text{ค่าแฟคเตอร์ระลอก } r = \sqrt{[(I_{rms} / I_{dc})^2 - 1]} \quad (4-8)$$

ฉะนั้นค่าแฟคเตอร์ระลอกของกระแสเรียงแบบครึ่งคลื่นจะหาได้ดังนี้

ค่า อาร์ เอ็ม เอส ของกระแสเรียง

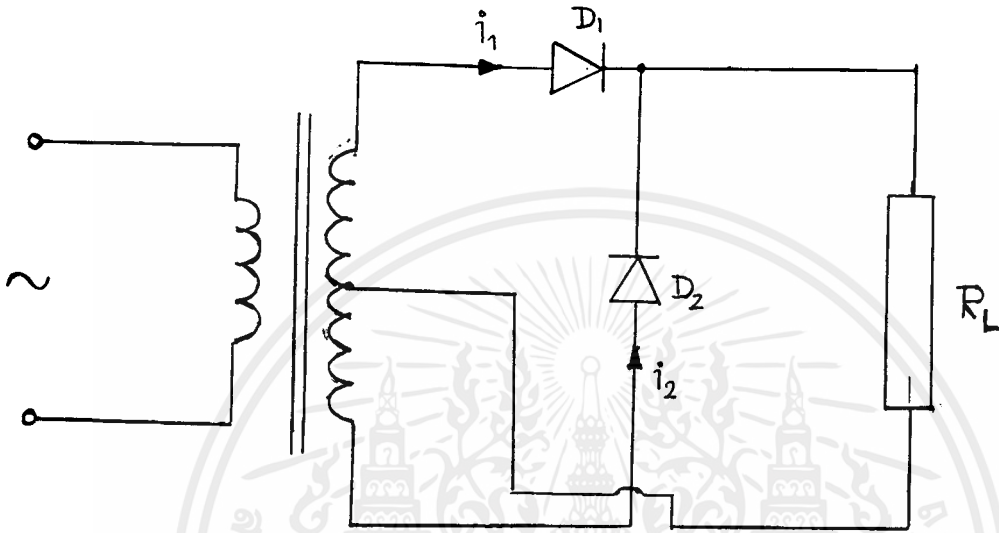
$$\begin{aligned} I_{rms} &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i^2 d(\omega t)} \\ &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} (I \sin \omega t)^2 d(\omega t)} \end{aligned}$$

$$= I \sqrt{[(I/2)/2\pi]} = I/2 \quad (4-9)$$

$$I_{rms} / I_{dc} = (I/2)/(I/\pi) = \pi/2$$

ดังนั้น $r = \sqrt{[(\pi/2)^2 - 1]} = 1.21$ หรือ 121%

4.3.2 วงจรเรกติฟายเออร์เต็มคลื่น



รูป 4.3 แสดงวงจรเรกติฟายเออร์เต็มคลื่น

ในวงจรเรกติฟายเออร์ในรูปแบบเป็นวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น ซึ่งประกอบด้วยไดโอดสองตัว ซึ่งทำหน้าที่เรียงกระแสตัวละครึ่งคลื่นโดยได้รับแรงดันมาจากหม้อแปลงที่มีต่อตรงกลางขดลวด วงจรแบบนี้จะมีประสิทธิภาพสูง แรงดันที่ได้จากหม้อแปลงด้านจ่ายกำลังออกที่ป้อนให้กับไดโอดทั้งสองจะมีเฟสต่างกัน 180 องศา คือข้างหนึ่งเป็นบวกอีกข้างหนึ่งเป็นลบ นั่นคือ ขณะที่ U_1 เป็นบวกกระแสอัดประจุจะไหลผ่านไดโอด D_1 พอถึงช่วงคลื่นลบไดโอด D_1 จะไม่นำกระแส แต่ U_2 เป็นบวกไดโอด D_2 จึงนำกระแสกระแสอัดประจุจะไหลผ่าน D_2 ไปยังโหลด R_L จะเท่ากับผลรวม $i_1 + i_2$

$$I_{dc} = 2I/\pi$$

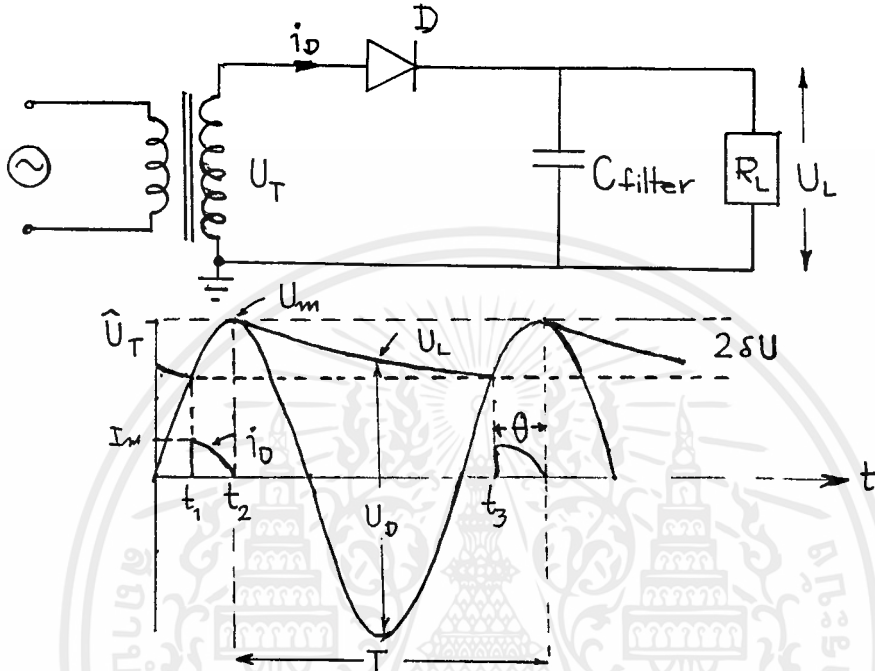
$$I_{rms} = I/\sqrt{2}$$

เพราะฉะนั้นแฟคเตอร์ระลอก $r = \sqrt{[(1.11)^2 - 1]} = 0.48$ หรือ 48 %

4.4 ตัวเก็บประจุกรองกระแส

เรกติฟายเออร์เต็มคลื่นทำให้แฟคเตอร์ระลอกคลื่นลดลงเมื่อเทียบกับเรกติฟายเออร์ครึ่งคลื่นคือ จะลดลงจาก 121% ลดเหลือ 48% ปรากฏแต่ก็ยังนับว่ามีค่าสูงต่อค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้งาน ปัญหาที่แก้ได้โดยใช้วิธีการกระแส ในที่นี้จะกล่าวถึงการใช้ตัวเก็บประจุกรองกระแสเพื่อลดแฟลตเตอร์ระลอกให้น้อยลง ตัวเก็บประจุดังกล่าวนี้จะต่อคร่อมหรือขนานกับโหลด จึงอัดประจุในช่วงที่ไดโอดนำกระแสและจะปล่อยหรือคายประจุให้กับโหลดในช่วงที่ไดโอดไม่นำกระแส



รูป 4.4 แสดงวงจรเรกติฟายเออร์มีตัวเก็บประจุกรองกระแส

ในรูปแสดงถึงวงจรเรกติฟายเออร์ครึ่งคลื่น มีตัวเก็บประจุกรองกระแสให้คลื่นเรียบ ได้แรงดันออกมามีลักษณะเป็น สมมติว่าไดโอดมีความต้านทานน้อย และวงจรทำงานถึงสภาวะอยู่ตัว ที่ $t=0$ แรงดันตัวจ่าย u_T เป็น 0 แต่แรงดันคร่อมโหลด R_L กับ C เป็น u_L และ u_L จะลดลงตามเวลาเนื่องจากคายประจุให้ R_L ในขณะที่แรงดันตัวจ่าย u_T เพิ่มขึ้น จนกระทั่ง u_T เริ่มจะสูงกว่า u_L เล็กน้อยที่ t_1 ไดโอดจะนำกระแส กระแสอัดประจุ i_D จะพุ่งขึ้นรวดเร็วเพื่อให้สอดคล้องกับความสัมพันธ์

$$i_D = c (du/dt) \tag{4-10}$$

กระแสอัดประจุนี้จะค่อยๆ ลดลงจนเป็น 0 เมื่อแรงดันตัวจ่ายขึ้นถึงค่ายอดขณะนั้นแรงดันอัดประจุคร่อม C จะเท่ากับค่ายอดของแรงดันตัวจ่าย U_T กระแส i_D จะหยุดไหล เมื่อแรงดันตัวจ่าย u_T เริ่มลดลงต่ำกว่า u_L ที่ t_2 ในช่วงอัดประจุ $t_1 < t < t_2$

$$u_L = U \sin \omega t$$

ในช่วงคายประจุ $t_2 < t < t_3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ (4-11)

$$\text{ในทันที } U_m = U_T$$

เมื่อถึง t_0 แรงดันตัวจ่ายเริ่มจะมากกว่า u_L ไตโอดก็เริ่มนำกระแสอีก ครอบรอบและซ้ำเติมต่อไป กระแสที่ไหลผ่านโหลด R_L จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ U_T แต่จะไม่เป็น 0 เพราะเมื่อ C หยุดอัดประจุ C จะคายประจุให้ R_L ต่อไปค่าเฉลี่ยของกระแสจะสูงขึ้นมากเมื่อเทียบกับวงจรเรกติฟายเออร์ครึ่งคลื่นที่ไม่มีตัวเก็บประจุรองกระแสและคลื่นกระแสสลับ (ระลอก) ก็จะต้องลงแฟลคเตอร์ระลอกจะต่ำมากด้วย

การคำนวณหาแฟลคเตอร์ระลอกเมื่อใช้วงจรมีตัวเก็บประจุรองกระแสเมื่อมีตัวเก็บประจุรองกระแส แรงดันเรียงกระแสแล้วหรือแรงดันกระแสตรงจะเรียบมากขึ้น มีค่าสูงสุด U_m เท่ากับค่ายอดของแรงดันตัวจ่าย คือ

$$U_m = U_T$$

แรงดันคลื่นระลอกหรือคลื่นกระแสสลับที่ซ้อนอยู่ คือ δU

ฉะนั้นแรงดันเฉลี่ยของแรงดันกระแสตรง U_{dc} จะได้

$$U_{dc} = U_T - \delta U \quad (4-12)$$

ช่วงระยะอัดประจุ $t_1 - t_2$ ยิ่งน้อยจะทำให้แรงดันที่กระแสแล้วเรียบมากขึ้น ไตโอดจะนำกระแสในช่วงสั้น แต่ไตโอดจะต้องรับแรงดันในช่วงแรงดันกลับทางหรือในช่วงที่ไตโอดไม่นำกระแสมีค่า 2 เท่าของค่ายอดของแรงดันตัวจ่าย คือ

$$U_D = 2U_T \quad (4-13)$$

เมื่อ U_D คือแรงดันคร่อมไตโอด

เนื่องจากช่วงระยะเวลาอัดประจุ $t_2 - t_1 \ll T$

ฉะนั้นอาจคิดว่าช่วงระยะเวลาที่แรงดันกลับทางเท่ากับ $T = 1/f$ และเพราะว่าแรงดันระลอก มีค่าน้อยเทียบกับ U_{dc} ($\delta U \ll U_{dc}$) ฉะนั้นกระแสที่ตัวเก็บประจุ C จ่ายให้กับโหลด คิดเป็นประจุถ่ายทอด Q หาได้จาก

$$Q = I_{dc} T = 2C\delta U \left(I_{dc} = \frac{1}{T} \int_0^T i_L dt \right) \quad (4-14)$$

$$\delta U = I_{dc} / 2fC \quad (4-15)$$

ฉะนั้นแฟลคเตอร์ระลอกคำนวณได้จากความสัมพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (4-16) คำ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนชั้นของวงจรมีขีดจำกัดหรือมีค่าที่พอเหมาะที่สามารถสร้างแรงดันได้สูงสุดซึ่งหาได้จาก

$$dU_d/dn = 0 \quad (4-35)$$

เมื่อ U_d เป็นแรงดันกระแสตรงที่โหลด

จำนวนชั้นบับไดที่เหมาะสม คือ

$$n_{optimum} = \sqrt{(U_T \cdot f \cdot C / I_d)} \quad (4-36)$$

แทน สมการ (4-36) ใน สมการ (4-34)

$$\begin{aligned} \text{แทนฉะนั้น} \quad (U_d)_{optimum} &= 4 \cdot n_{optimum} \cdot U_T / 3 \\ &= (2/3) \cdot (2n_{optimum} \cdot U_T) \end{aligned}$$

นั่นคือ แรงดันกระแสตรงที่สร้างได้มีค่าเพียง 67% ของค่าทางทฤษฎีเท่านั้น และยิ่งกว่านั้นตามความเป็นจริงแล้ว ยังมีแรงดันตกเนื่องจากไดโอดอีก แรงดันที่ได้ออกมาจะยิ่งต่ำลงไปอีก

ในส่วนของวงจรถูกคือกรร็อฟ-วอลต์นโวลเตจมีลติพลายเออร์ที่ใช้มีอุปกรณ์ดังนี้

ค่าความจุของตัวเก็บประจุ $C = 0.25 \mu F$

ไดโอดทนโวลเตจได้ 8000 V

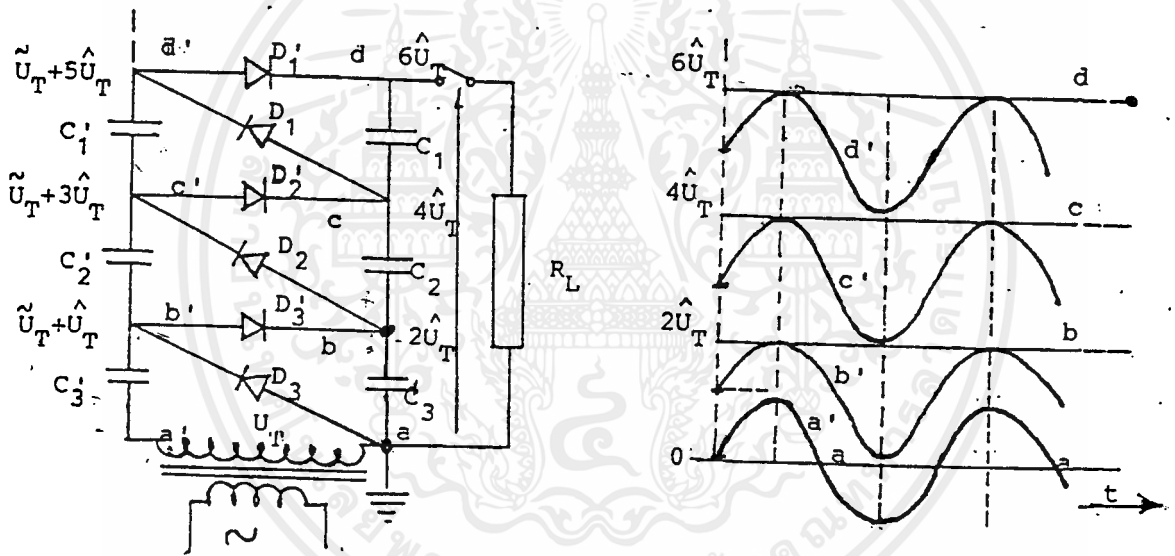
จำนวนชั้น 9 ชั้น

$$U_b = U(1 + \cos \omega t) \tag{4-17}$$

4.5.1 วงจรชั้นบันไดสร้างแรงดันกระแสตรง (Cascade circuit for DC high voltage)

ดังได้กล่าวแล้วว่า การสร้างแรงดันสูงมาก ๆ กระแสตรงทำได้โดยอาศัยวงจรพื้นฐานสร้างแรงดันสองเท่า ดังได้กล่าวมาแล้ว เช่นกัน มาต่อซ้อนกันเป็นชั้นบันไดตามหลักการของวงจรค็อกคร็อฟ-วอลตัน (Cockroft-Walton)

4.5.1.1 แรงดันวงจรชั้นบันไดขณะไม่มีโหลด



รูป 4.6 แสดงวงจรชั้นบันไดสร้างแรงดันกระแสตรงตามวงจรของ Cockroft-Walton พร้อมรูปคลื่นแรงดันที่จุดต่าง ๆ ขณะไม่มีโหลด

วงจรชั้นบันไดที่ได้จากการนำเอาวงจรสร้างแรงดันกระแสตรงสองเท่ามาซ้อนกัน 3 ชั้น เพื่อการพิจารณา คือ แต่ละชั้นจะประกอบด้วยตัวเก็บประจุ 2 ตัว และไดโอด 2 ตัว โดยที่ตัวเก็บประจุตัวหนึ่งเป็นตัวเก็บประจุพักประจุ และอีกตัวหนึ่งเป็นตัวกรองให้ได้แรงดันกระแสตรง ดังเช่นวงจร a, a', b, b', เป็นวงจรสร้างแรงดันสองเท่าหนึ่งชั้น

C_1', C_2', C_3' และ C_1, C_2, C_3 เป็นตัวเก็บประจุพักประจุและตัวอาร์คาเอ็กสตรานเป็นเอ็กสตรานที่ฉนวนหรือใช้ฉนวนเพื่อป้องกันไม่ให้อายุการใช้งานสั้นลง ไม่ว่การณใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เก็บประจุรอกกระแสตามลำดับ แต่ละชั้นจะสร้างแรงดันได้สองเท่าของค่ายอดแรงดันที่ได้จากหม้อแปลงตัวจ่าย คือ เป็น $2U_T$ ขั้วของไดโอดที่ต่อไว้ในวงจร D_1', D_2', D_3' จะนำกระแสในช่วงคลื่นครึ่งบวก และ D_1, D_2, D_3 จะนำกระแสในช่วงคลื่นครึ่งลบศักย์ไฟฟ้าที่จุด b' เมื่อเทียบกับดินจะเปลี่ยนแปลงระหว่าง 0 กับ $2U_T$ และ C_3 จะได้รับแรงดันอัดประจุเป็น $2U_T$ ผ่านไดโอด D_3' จุด b จะมีศักย์ไฟฟ้าคงตัว $2U_T$ และแรงดันอัดประจุให้ C_2' ผ่านไดโอด D_2 จะเปลี่ยนแปลงระหว่าง $2U_T$ กับ 0 ฉะนั้น C_2 จะได้รับแรงดันอัดประจุถึง $2U_T$ คือไฟฟ้าที่จุด c จะเปลี่ยนแปลงระหว่าง $2U_T$ ถึง $4U_T$ และ C_2 จะได้รับแรงดันอัด

ประจุผ่านไดโอด D_2' เท่ากับ $2U_T$ ซึ่งทำให้จุด c มีศักย์ไฟฟ้าสูงถึง $4U_T$ เมื่อเทียบกับดิน วงจรชั้นที่ 3 ตัวเก็บประจุแต่ละตัวก็จะได้รับแรงดันอัดประจุถึง $2U_T$ เช่นกัน นั่นคือ จุด d จะมีศักย์ไฟฟ้าเมื่อเทียบกับดินจะเท่ากับ $6U_T$

จะเห็นได้ว่าการที่เราใช้หลาย ๆ ชั้นต่อกันจะช่วยให้สามารถสร้างแรงดันสูงมาก ๆ ได้ โดยที่ตัวเก็บประจุและไดโอดแต่ละตัวจะต้องทนแรงดันเพียงสองเท่าของค่ายอดของหม้อแปลงตัวจ่าย ยกเว้นตัวเก็บประจุตัวล่างสุด (ในที่นี้คือ C_3) จะได้รับแรงดันสูงสุดเพียง U_T เท่านั้นแรงดัน ณ จุดต่าง ๆ ในขณะที่ไม่มีการไหลแสดงอยู่ในเทอมของเวลาจะได้ดังในรูปข้างบน

4.5.1.2 แรงดันวงจรชั้นบันไดขณะมีโหลด

จากรูปข้างล่างจะเห็นว่าแรงดันที่ได้ที่ปลายแรงสูงจะต่ำกว่าค่าในอุดมคติ ทั้งนี้เนื่องมาจากแรงดันตก ΔU และแรงดันระลอก δU

4.6 การคำนวณหาแรงดันระลอก

แรงดันกระแสตรงที่ได้จากการเรคตีฟายจากแรงดันกระแสสลับ โดยใช้ไดโอดเรียงกระแสและมีตัวเก็บประจุรอกกระแสเพื่อให้ได้คลื่นเรียบแต่คลื่นที่ได้ก็ยังเป็นระลอกดังที่ได้กล่าวแล้วในวงจรพื้นฐาน แรงดันระลอกของวงจรชั้นบันไดก็อาจหาได้เช่นเดียวกับวงจรที่มีไดโอดและตัวเก็บประจุรอกกระแสอย่างละตัวซึ่งมีความสัมพันธ์คือ

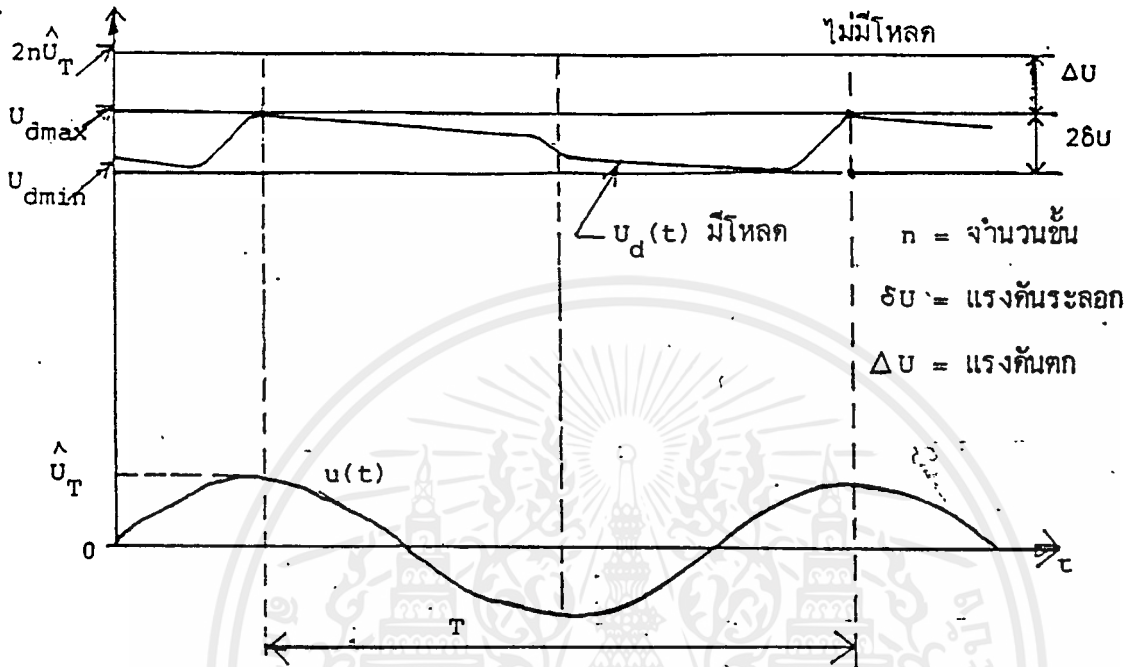
$$\delta U = I_a / 2fC \quad (4-18)$$

เมื่อ I_a คือ กระแสตรงที่จ่ายให้โหลด

f คือ ความถี่ของแรงดันกระแสสลับที่จะแปลงเป็นกระแสตรง

C คือ ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุรอกกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ตีพิมพ์ในหนังสือพิมพ์และนิตยสารอิเล็กทรอนิกส์ชั้นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.7 แสดงคลื่นแรงดันกระแสตรงที่ได้จากวงจรขึ้นบันไดในขณะมีโพลก

ในกรณีวงจรขึ้นบันไดตั้งในรูป ตัวเก็บประจุกรองกระแส C_1 , C_2 และ C_3 ซึ่งมีความจุไฟฟ้าทุกตัวเท่ากับ C สมมติว่าทุก ๆ ไซเคิลวงจรจ่ายกระแสให้กับโหลดที่ปลายแรงสูงจุด d เท่ากับ I_d นั่นคือ C_1 จะจ่ายประจุออกไปเท่ากับ $Q = I_d / f$ จึงทำให้เกิดแรงดันตกไป

$$\delta U_1 = I_d / 2fC_1 \quad (4-19)$$

ในขณะเดียวกัน C_2 ต้องจ่ายประจุให้กับโหลดเท่ากับ Q และถ่ายถอดประจุให้ตัวเก็บประจุ C_1 เท่ากับ Q ฉะนั้น C_2 จะต้องจ่ายประจุออกไปเท่ากับ $2Q = 2I_d / f$ จึงทำให้แรงดันตกไป

$$\delta U_2 = 2I_d / 2fC_2 \quad (4-20)$$

และ C_3 ก็จะต้องถ่ายถอดประจุไปให้โหลดเท่ากับ Q และให้กับ C_2 เท่ากับ Q และถ่ายถอดให้ C_2 เท่ากับ Q ฉะนั้นแรงดันตกไปใน C_3 คือ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\delta U_3 = 3I_d / 2fC_3 \quad (4-21)$$

แรงดันตกในตัวเก็บประจุรอกกระแสเหล่านี้ ทำให้แรงดันระลอก ทั้งหมดรวมเป็น

$$\begin{aligned} \delta U &= \delta U_1 + \delta U_2 + \delta U_3 \\ &= (I_d / 2f) \cdot (1/C_1 + 2/C_2 + 3/C_3) \end{aligned} \quad (4-22)$$

ถ้าตัวเก็บประจุทุกตัวมีค่าความจุไฟฟ้าเท่ากับ C

$$\text{ฉะนั้น} \quad \delta U = (I_d / 2fC) \cdot (1+2+3) \quad (4-23)$$

ถ้าวงจรขึ้นบันไดมี n ชั้น จะได้แรงดันระลอกรวม

$$\delta U = (I_d / 2fC) \cdot (1+2+3+\dots+n) \quad (4-24)$$

$$= (I_d / 2fC) \cdot n[n+1]/2$$

$$\delta U = n(n+1)/4 \cdot (I_d / fC) \quad (4-25)$$

จะเห็นได้ว่า ตัวเก็บประจุล่างสุดเป็นตัวที่ถ่ายทอดออกหรือจ่ายประจุออกไปมากที่สุด จึงนับว่าเป็นตัวที่มีผลต่อแรงดันระลอกอย่างยิ่ง ฉะนั้นความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุรอกกระแสตัวล่างสุดควรมีค่าสูงกว่าตัวถัดไป

4.7 การคำนวณหาแรงดันตก ΔU

ในขณะที่วงจรจ่ายโหลดกระแส I_d (หรือประจุ $Q = I_d/f$) ทุก ๆ ไซเคิลจะมีการถ่ายทอดประจุจากตัวเก็บประจุ (C_1', C_2', C_3') ไปให้กับตัวเก็บประจุรอกกระแส (C_1, C_2, C_3) จึงทำให้เกิดแรงดันตกในตัวเก็บประจุ (C_1', C_2', C_3') ในทำนองเดียวกันการถ่ายทอดประจุจากตัวเก็บประจุรอกกระแสไปยังตัวเก็บประจุ (C_1', C_2', C_3') ก็ย่อมทำให้เกิดแรงดันตกเช่นกัน สรุปแล้วตัวเก็บประจุทุกตัวจะได้รับแรงดันอัดประจุน้อยกว่าค่าอุดมการณ์ ยกเว้นตัวเก็บประจุตัวล่างสุดที่มีโอกาสได้รับแรงดันอัดประจุเท่ากับค่ายอดของแรงดันจ่ายออกของหม้อแปลงตัวจ่าย

จากวงจรขึ้นบันไดในรูป ถ้าจ่ายโหลดกระแส I_d ออกไปที่จุด d หรือประจุ Q ทุก ๆ ไซเคิล ในช่วงครึ่งไซเคิลบวกไดโอด D_1', D_2', D_3' นำกระแสตัวเก็บประจุ C_3' จะถ่ายทอดประจุ ออกไปทั้งหมด $3I_d/f$ จึงทำให้เกิดแรงดันตกใน C_3' ดังนั้น C_3' จะได้รับแรงดันอัดประจุสูงสุดเพียง

$$2U_T - 3I_d/fC$$

ค่าแรงดันนี้ที่ C_2' จะได้รับประจุจาก C_3' แต่เมื่อ C_3' ถ่ายทอดประจุให้ C_2'

เท่ากับ $2I_d/f$ และให้โหลดใช้งาน I_d/f การจึงทำให้เกิดแรงดันตกใน C_2' เอง ฉะนั้นค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C_2' จะได้รับประจุจาก C_3 ด้วยแรงดันอัดประจุเพียง

$$(U_{C_2'})_{\max} = 2U_T - 3I_d/fC - 3I_d/fC \quad (4-26)$$

ในครึ่งไซเคิลต่อมา C_2' จะต้องถ่ายประจุออกไปให้ C_2 จึงทำให้แรงดันตกไปอีก $2I_d/fC$ แรงดันของตัวเก็บประจุ C_2' จะเหลือเพียง

$$(U_{C_2'})_{\min} = 2U_T - 6I_d/fC - 2I_d/fC \quad (4-27)$$

ทำนองเดียวกับแรงดันที่ C_2 จะได้รับ

$$(U_{C_2})_{\max} = 2U_T - 6I_d/fC - 2I_d/fC \quad (4-28)$$

$$\begin{aligned} (U_{C_2})_{\min} &= (U_{C_2})_{\max} - 2I_d/fC \\ &= 6U_T - 8I_d/fC \end{aligned} \quad (4-29)$$

ฉะนั้นแรงดันตกทั้งหมด จะเท่ากับผลรวมของแรงดันตกในตัวเก็บประจุแต่ละตัว ถ้าวงจรขึ้นบันไดมี n ชั้นจะได้

$$\Delta U = (I_d/fC) \cdot (2n^3/3 + 1n^2/2 + 1n/6) \quad (4-30)$$

เมื่อตัวเก็บประจุทุกตัวมีค่าความจุไฟฟ้าเท่ากันหมด คือ C แรงดันที่ผลิตออกมาได้ที่ปลายแรงสูงจะกระเพื่อมอยู่ระหว่างค่าสูงและค่าต่ำ คือ

$$(U_d)_{\max} = 2nU_T - \Delta U \quad (4-31)$$

$$(U_d)_{\min} = 2nU_T - \Delta U - 2\delta U \quad (4-32)$$

ถ้าจำนวนชั้นของวงจรขึ้นบันไดมีมากพอ คือ เช่น $n > 3$ ค่า $n^3 \gg n^2$ ค่าแรงดันตกอาจคำนวณค่าโดยประมาณจากความสัมพันธ์

$$\Delta U = (I_d/fC) \cdot (2n^3/3) \quad (4-33)$$

ฉะนั้นแรงดันกระแสตรงที่ได้จากวงจรขึ้นบันไดจึงหาค่าโดยประมาณได้จากสมการ

$$U_d = 2nU_T - (2n^3/3) \cdot I_d/fC \quad (4-34)$$

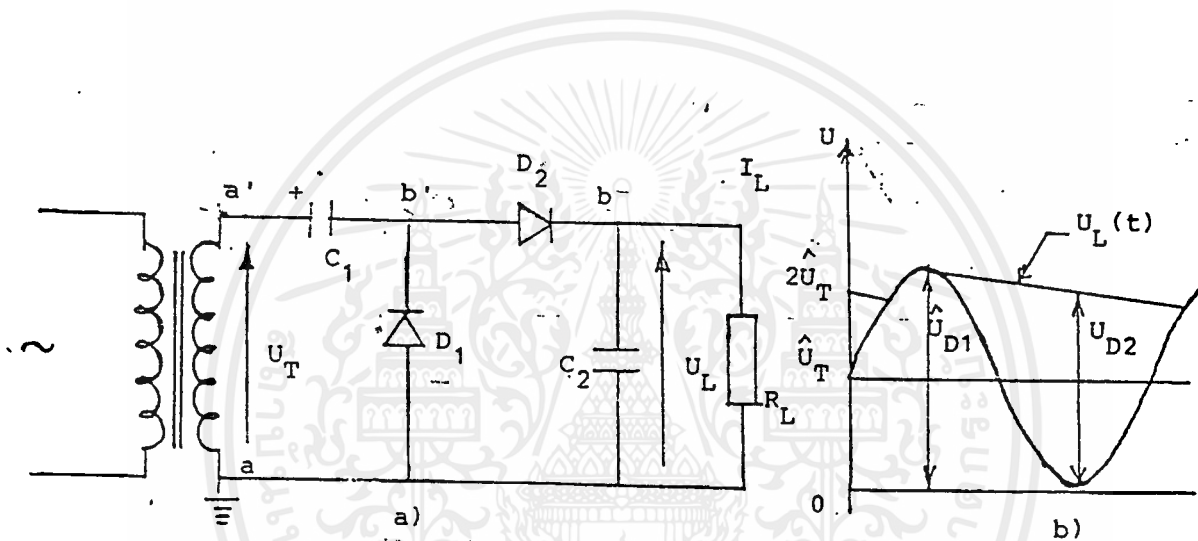
จะเห็นได้ว่าถ้าต้องการลดแรงดันตกให้น้อยลง หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ เพิ่มแรงดันกระแสตรงได้โดยการเพิ่มค่าความจุไฟฟ้า หรือเพิ่มความถี่ของแรงดันกระแสสลับที่จ่ายออกจากหม้อแปลงตัวจ่าย

4.8 จำนวนชั้นบันไดที่เหมาะสม

การสร้างแรงดันกระแสตรงด้วยวงจรขึ้นบันได เราอาจสร้างแรงดันให้สูงขึ้นได้โดยการเพิ่มจำนวนชั้น ในทางภาคปฏิบัติถ้าหากกำหนดค่ากระแสไหล I_d ให้จากค่าความจุไฟฟ้าที่มี ความถี่ของตัวจ่ายที่กำหนด จะพบว่า ถ้ายังเพิ่มจำนวนชั้นสูงมากเกินไป จะทำให้แรงดันตกมาก แรงดันที่ได้ออกมาที่โหลดกลับต่ำลง โหลดจะยิ่งร้อนขึ้นเรื่อยๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 วงจรสร้างแรงดันกระแสตรงแบบแรงดันสองเท่า

เมื่อนำวงจรสร้างแรงดันสองเท่าที่กล่าวมาแล้วตอนต้นมาต่อเข้ากับ วงจรเรกติฟายเออร์ และตัวเก็บประจุกรองกระแส ดังในรูปก็จะทำให้แรงดันกระแสสูงเป็นสองเท่าของแรงดันค่ายอดของหม้อแปลงด้านจ่ายกำลังออก ในขณะที่ไม่มีโหลดจะได้แรงดันกระแสตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_2 ซึ่งมีโอกาสที่จะขึ้นถึง $2U_T$ ฉะนั้นไดโอด D_1 และ D_2 จะต้องรับแรงดันสูงถึงสองเท่าเช่นเดียวกัน คือ



รูป 4.5 แสดงวงจรสร้างแรงดันกระแสตรงแบบแรงดันสองเท่า

$$U_{D1} = U_{D2} = 2U_T$$

การอัดประจุ C_2 เป็นไปดังนี้ คือเมื่อตัวเก็บประจุ C_1 จะได้รับอัดประจุเนื่องจากแรงดันจากหม้อแปลงผ่านไดโอด D_1 ($Q_1 = UC_1$) แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ C_1 (คือ $U_{b,c1}$) รวมเข้ากับแรงดันของหม้อแปลงที่ a'

ถ้าเมื่อใดที่ $U_{b,c1} = U_{b,c1} + U_{a'}$ มีค่าสูงกว่า U_b เนื่องจากแรงดันของหม้อแปลงเพิ่มสูงขึ้นไดโอด D_2 จะนำกระแส และ C_2 จะได้รับการอัดประจุ จาก C_1 กระบวนการจะดำเนินต่อไปจนกระทั่งถึงภาวะอยู่ตัว ขณะที่ไม่มีโหลด ศักย์ไฟฟ้าที่จุด b คือ แรงดันคร่อม C_2 จะเป็นสองเท่า คือ

$$U_b = 2U$$

และที่จุด b จะมีศักย์ไฟฟ้า U_b มีค่าเป็น

และไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรากฏการณ์โคโรน่าและชีลด์ (Corona effect and shield)

5.1 ปรากฏการณ์โคโรน่า (Corona effect)

5.1.1 ลักษณะทางกายภาพของ โคโรน่า (Corona) เมื่อสายตัวนำ

ไฟฟ้าถูกนำมาใช้ในการส่งพลังงานไฟฟ้าในระดับตึกดาแรงสูง ถ้าสนามไฟฟ้ารอบตัวนำเมื่อเทียบกับดินหรือระหว่างสายตัวนำด้วยกันมีลักษณะสม่ำเสมอ การเพิ่มค่าระดับตึกดาไฟฟ้าขึ้นเรื่อย ๆ จะทำให้เกิดการเบรคดาวน์ (Breakdown) ในลักษณะการสปาร์ค (spark) หรือ แฟลตโอเวอร์ (flashover) โดยปราศจากการดิสชาร์จ (discharge) ขึ้นก่อน หรืออีกลักษณะหนึ่งคือ เมื่อสนามไฟฟ้ารอบตัวนำมีลักษณะไม่สม่ำเสมอซึ่งจะเกิดขึ้นกับสายตัวนำที่มีผิวไม่เรียบ เช่น สายชนิดแอสตรนด์ คอนดักชัน (stranded conduction) หรือสายที่มีผิวขรุขระเมื่อเพิ่มระดับตึกดาขึ้นเรื่อย ๆ เริ่มแรกจะเกิดดิสชาร์จ (discharge) ที่จุดซึ่งมีลักษณะเป็นปลายแหลมซึ่งจะมีความหนาแน่นของสนามไฟฟ้าหรือมีประจุสูง ซึ่งลักษณะการดิสชาร์จเช่นนี้เรียกว่าโคโรน่า ดิสชาร์จ (corona discharge) โดยสามารถสังเกตเห็นได้จากการเรืองแสงสีน้ำเงินจาง ๆ รอบ ๆ สายที่จุดนั้น ปรากฏการณ์นี้จะเกิดร่วมกับเสียง ฮิสซิง นอยส์ (hissing noise) และอากาศรอบ ๆ ตัวนำตรงจุดที่เกิด โคโรน่าจะเกิดการแตกตัวเป็นก๊าซ สายตัวนำโดยทั่ว ๆ ไป จะใช้งานโดยอยู่ในสภาพแวดล้อมที่เป็นอากาศซึ่งอากาศจะมี ไดอิเล็กตริก สเตรนธ์ (dielectric strength) ที่ระดับความดันและอุณหภูมิปกติ จะมีค่าประมาณ 30 kV/cm ดังนั้นเมื่อสายตัวนำที่ใช้งานในระดับตึกดาสูง ๆ จะต้องหาทางป้องกันการเกิดโคโรน่าเพราะว่าการเกิดโคโรน่า นี้เป็นการสูญเสียกำลังงานไฟฟ้าและจะทำให้ฉนวนที่ใช้เสื่อมลง และรบกวนระบบการสื่อสารโทรคมนาคมด้วย

5.1.2 ภาวะที่มีผลทำให้เกิดโคโรน่า

1. ภาวะของสภาพอากาศ สภาพอากาศที่เป็นมลพิษหรือ มีความชื้นหรือมีความดันต่าง ๆ กันจะมีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอากาศเช่น ที่สภาพอากาศที่มีพายุฝนโคโรน่า จะเกิดที่ระดับตึกดาต่ำกว่าสภาพอากาศปกติ

2. ภาวะทางกายภาพ ปัจจัยที่มีผลทางกายภาพของสายตัวนำที่จะทำให้เกิดโคโรน่า ได้มีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ใช้งานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อัตราส่วน d/r ในที่นี้ d คือ ระยะห่างระหว่างสายตัวนำ และ r คือ รัศมีของสายตัวนำ

- ลักษณะของผิวสายตัวนำ
- สภาพของผิวสายตัวนำ
ผลที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดโคโรนา
- เกิดการสูญเสียกำลังงานในสาย
- ทำให้ฉนวนที่ใช้งานเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว
- ทำให้เกิดการรบกวนระบบการสื่อสารโทรคมนาคม

5.1.3 การแก้ไขโคโรนาไม่ให้เกิดขึ้น

ณ จุดที่ โวลเตจ ที่สามารถทำให้เกิด โคโรนา ในอากาศรอบ ๆ ผิวสายตัวนำ คือสนามไฟฟ้าเริ่มแรกที่ทำให้เกิดโคโรนา สามารถหาค่าประมาณได้ ในกรณีสายตัวนำเป็นสายคู่ขนานโดยที่แต่ละสายมีรัศมี r จากสูตร

$$E_w = 30 md [1 + 0.301/\sqrt{(d/r)}] \quad (5-1)$$

m = ค่าเซอร์เฟซเออร์เรกกูลาร์ริตีแฟคเตอร์ (surface irregularity factor)

d = ความสัมพันธ์ แฟคเตอร์ความถูกต้องของความหนาแน่นอากาศ (relative air density correction factor) = $3.92b/(273 + t)$

b คือ ระดับความดันของอากาศมีหน่วยเป็น ซม. ของปรอท (Hg)

t คือ อุณหภูมิมีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส

หรือหาได้จากสูตร

$$V = 2F_{max} r \ln (d/r) \quad \text{สำหรับ ซิงเกิ้ลเฟส (single phase)}$$

V = โพลเทนเชียลดิฟเฟอเรนซ์ (potential difference) ระหว่างสายตัวนำ

d = ระยะห่างระหว่างสายตัวนำ

เมื่อ V ถูกเพิ่มขึ้นจน F_{max} มีค่าเกิน ไดอิเล็กทริกสเตรส (dielectric stress) ของอากาศรอบสายตัวนำโคโรนา จะเกิดขึ้นจากสมการที่เราแสดงไว้เราสามารถวิเคราะห์ได้ว่า การสูญเสียกำลังงานเนื่องจากโคโรนาสามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มเส้นผ่านศูนย์กลางของสายตัวนำ หรือเพิ่มระยะห่างระหว่างสายตัวนำ แต่เนื่องจากการเพิ่มระยะห่างระหว่างสายตัวนำจะมีปัญหาทางด้านโครงสร้างของอุปกรณ์และจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น โดยผู้จัดทำเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายทางด้านออกแบบและโครงสร้างเพิ่มขึ้น ดังนั้นการเพิ่มขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของสายตัวนำจะเป็นทางออกที่ดีที่สุดในการแก้ปัญหาการเกิดโคโรน่า การเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสายตัวนำสามารถทำได้ โดยใช้ท่ออลูมิเนียมทรงกระบอกกลวงแล้วสอดสายตัวนำเข้าไป

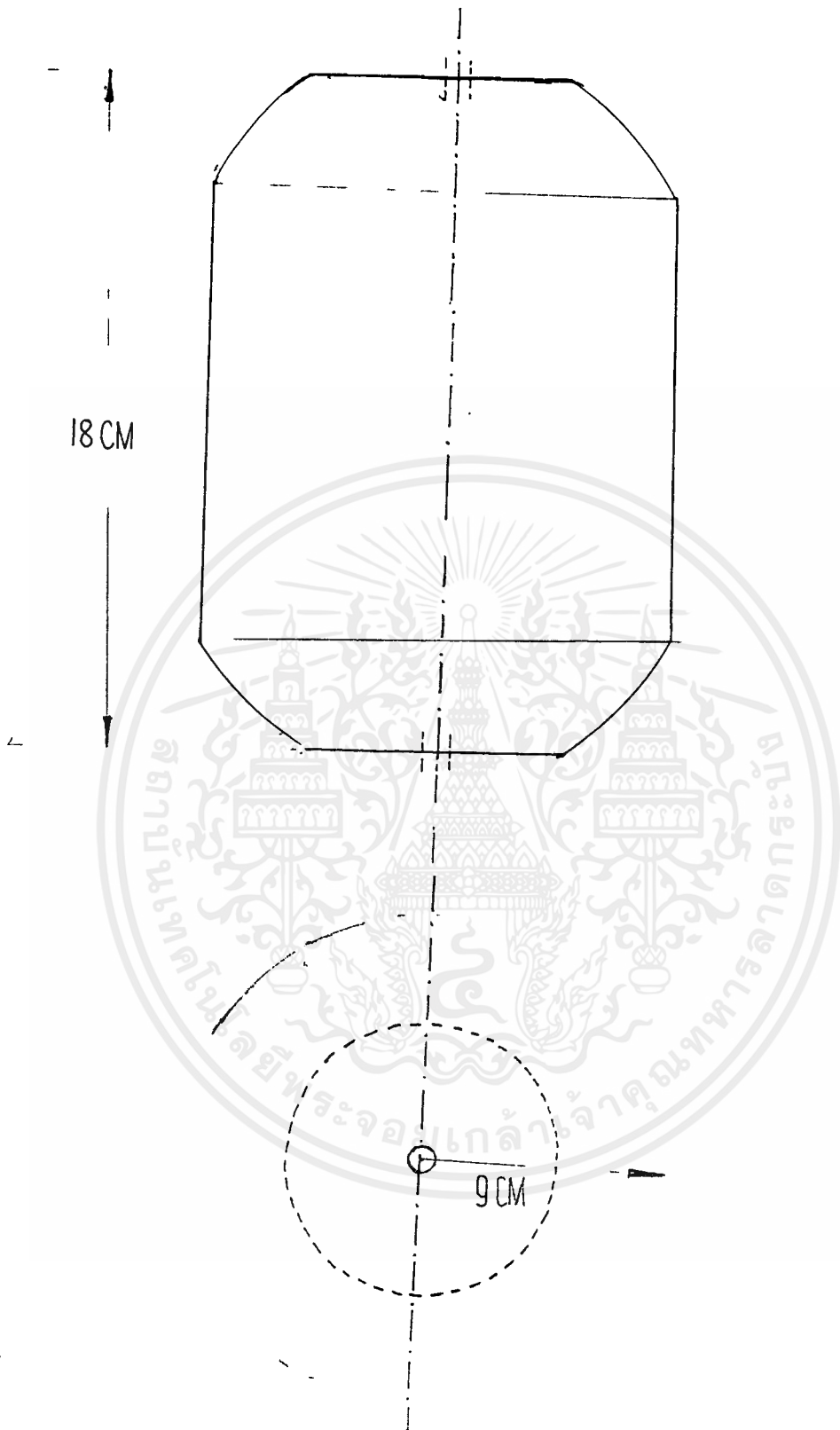
การผลิตอุปกรณ์ที่ใช้ในงานทางด้านไฟฟ้าศักดาแรงสูง ควรออกแบบให้มีผิวเรียบที่สุดเท่าที่จะทำได้

5.2 ผลจากโคโรน่า ผลเนื่องจากโคโรน่า คือ

1. เมื่อเกิดโคโรน่าในอากาศอาจสังเกตเห็น หรือสัมผัสได้ด้วยร่างกายคน คือ จะได้ยินเสียงฮิสซี มีกลิ่นโอโซน ในยามมืดสนิทจะเห็นแสงเรือง
2. โคโรน่าเกิดขึ้นในรูปพัลส์สั้น ๆ ซึ่งมีสเปคตรัมความถี่สูงถึง 100 MHz คลื่นความถี่สูงนี้จะเครื่องรับส่งระบบสื่อสาร เรียกว่า คลื่นรบกวนวิทยุ (RIV = radio influence voltage)
3. การเกิดโคโรน่าย่อมหมายถึงมีพลังงาน สูญเปล่าเกิดขึ้นตลอดเวลา จึงเป็นสิ่งไม่พึงปรารถนาการออกแบบสายส่งจึงหลีกเลี่ยงมิให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าค่าวิกฤติ

5.3 การออกแบบโคโรน่าชิลด์ (corona shield)

ใช้ท่ออะลูมิเนียมกลวงมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 cm ความยาว 18 cm โดยที่ปลายท่อจะมีลักษณะปิดหัวท้าย จะรูตรงกลางทั้งสองด้านเพื่อสอดสายตัวนำผ่านเข้าไปได้



รูป 5.1 แสดงโคโรนาชีลด์ที่ใช้ในปฏิญยานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคการวัดแรงดันสูงกระแสตรง

การวัดแรงดันสูงมีข้อแตกต่างจากการวัดแรงดันต่ำที่สำคัญก็คือ อุปกรณ์ตัวชี้ (Indicator) ผู้สังเกตจะต้องอยู่ห่างจากจุดที่ต้องการวัดมากพอที่จะไม่เกิดอันตราย และการฉนวนต้องอาศัยการฉนวนที่ถูกต้องเหมาะสมซึ่งขึ้นอยู่กับ ขนาดแรงดันที่ต้องการจะวัดถ้าแรงดันมากขึ้นระยะการฉนวนและระยะห่างของผู้วัดจะต้องมากขึ้น การวัดแรงดันสูงจึงต้องใช้เทคนิคพิเศษบางประการ โดยอาศัยอุปกรณ์ และ เครื่องวัดช่วย

6.1 ลักษณะและสมบัติที่ต้องมีของอุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่สำคัญ ได้แก่

- ความถูกต้องเที่ยงตรง
 - ความไวต่อสัญญาณที่ต้องการวัด
 - ความเชื่อถือได้
 - ชัดความสามารถ ของเครื่องมือวัด
 - ความเร็วของเครื่องมือวัดที่จะติดตามความเปลี่ยนแปลงของแรงดันโดยเฉพาะแรงดันที่เกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ เช่น แรงดันอิมพัลส์ เป็นต้น
- สำหรับการวัดแรงดันสูงกระแสตรงที่สร้างได้นั้นใช้วิธีโพเทนเชียลเชียน ดิไวเดอร์ เช่น (Potential divider chain) ในโพเทนเชียลเชียน ดิไวเดอร์ เช่น (Potential divider chain) นั้นประกอบไปด้วย 2 ส่วนด้วยกันคือ

1. ส่วนวัด (Measurement)
2. ส่วนดิไวเดอร์ (Divider)

ส่วนวัดจะประกอบไปด้วย

- ความต้านทานเปลี่ยนค่าได้ (Variable resistor) 10 กิโลโอห์ม
- แสตนด์าร์ด เซล (Standard Cell) 1.018 โวลต์
- กัลวานอมิเตอร์ ที่มีความไวสูงมาก คือ 20 ซม/ไมโครแอมป์

6.2 วิธีการวัด

1. ปรับความต้านทานเปลี่ยนค่าได้ (variable resistor) ให้ โวลเตจ (voltage) ที่คร่อม ตัวต้านทาน (resistor) มีค่าเท่ากับ แสตนด์าร์ด เซล โดยดูจากเข็มของกัลวานอมิเตอร์ชี้ที่ 0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I = V/R$$

(6-1)

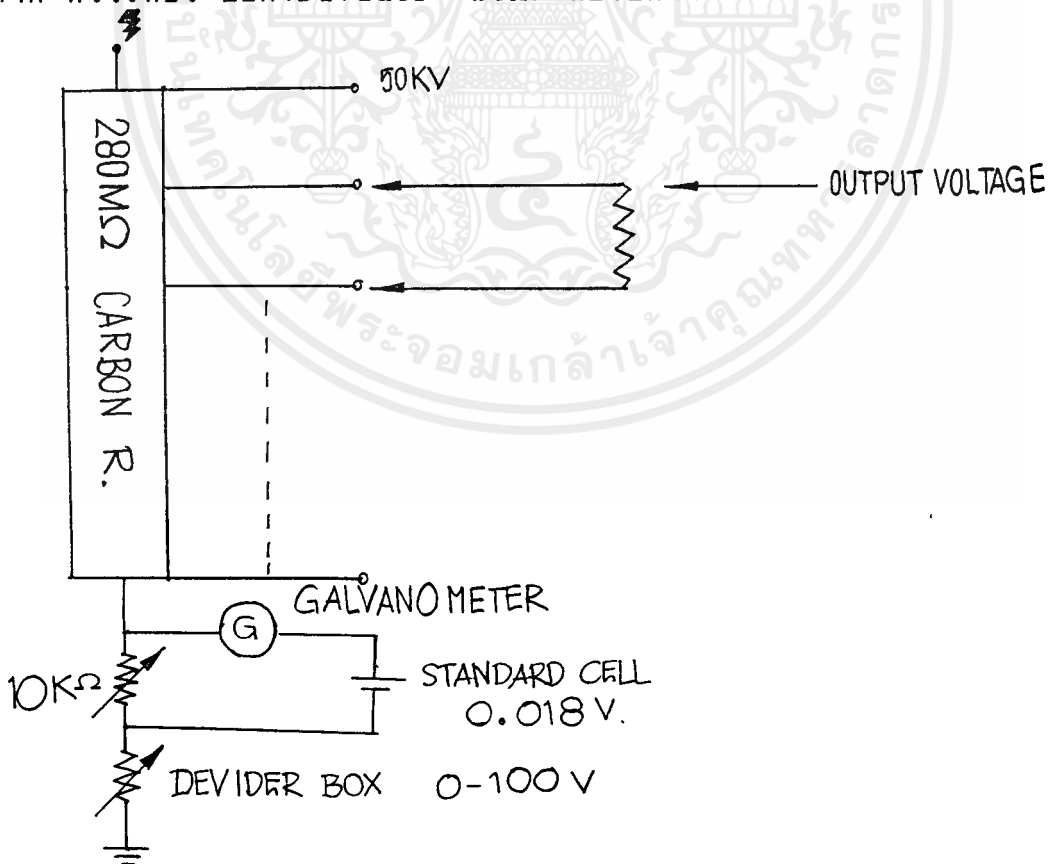
$$; V = 1.018$$

R = ค่าที่อ่านได้จาก Variable resistor

ส่วน ดิไวเดอร์ (Divider) จะประกอบไปด้วย คาร์บอนฟิล์มรีซิสเตอร์ (Carbon film resistor) มีค่า 280 เมกกะโอห์ม ฉาบด้วยซีฟิง เพื่อป้องกันความเครียดทางสนามไฟฟ้า (Electrical field stress) ที่เกิดขึ้นที่ผิวของตัวต้านทาน เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่สูงมากในช่วงของความต้านทานตัวนี้จะทำจุดต่อออกมาโดยแต่ละจุดจะมีค่าความต้านทาน 10 เมกกะโอห์ม ความต่างศักย์ 2 กิโลโวลต์

6.3 วิธีใช้งาน

เมื่อต้องการนำ Voltage ไปใช้งานจะมีส่วนประกอบนำมาต่อเข้ากับจุดต่อเหล่านี้ ซึ่งส่วนนี้จะเป็นค่าความต้านทานมีค่า 10 เมกกะโอห์ม แบ่งออกเป็น 10 ส่วน แต่ละส่วนมีค่า 100 โวลต์ และเมื่อต้องการค่าละเอียดยิ่งขึ้นก็สามารถปรับค่าได้จาก ดิไวเดอร์ บ็อก (Divider box) ที่ปรับค่าได้จาก 0-100 โวลต์



รูป 6.1 แสดงโพเทนเชียลดิไวเดอร์เชน (Potential divider chain) ค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง บทวิจารณ์ และสรุป

7.1 ผลการทดลอง

ผลการทดสอบวงจรจูนเพลทออสซิลเลเตอร์

ลำดับที่	โวลเตจอินพุท $V_{in} (V_{dc})$	โวลเตจเอาต์พุท $V_o (V_{ac})$	ความถี่ f (kHz)
1	80	72	16
2	100	95	16
3	120	113	16
4	140	131	16
5	160	152	16
6	180	170	16
7	200	190	16
8	210	200	16

ผลการทดสอบหม้อแปลง ตัวที่ 1

รายละเอียดของหม้อแปลงตัวที่ 1 แสดงไว้ในหัวข้อ 3.9 เมื่อป้อนแรงดันที่ได้จากออสซิลเลเตอร์เข้าทางด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลง แรงดันจะเป็นดังในตาราง

แรงดันป้อนเข้า ออสซิลเลเตอร์	โวลเตจป้อนเข้า $V_{in} (V_{ac})$	โวลเตจเอาต์พุท $V_o (V_{ac})$
100	14	250
120	18	320
140	22	400
160	26	470

แรงดันป้อนเข้า ออสซิลเลเตอร์	โวลเตจป้อนเข้า $V_{in} (V_{ac})$	โวลเตจเอาต์พุต $V_o (V_{ac})$
180	30	530
200	35	610

ผลการทดสอบหม้อแปลงตัวที่ 2 ซึ่งออกแบบหลังจากที่ได้ทดสอบหม้อแปลงตัวที่ 1 แล้วไม่ได้ผลตามที่ต้องการ โดยมีรายละเอียดดังนี้

แกนเฟอร์ไรท์ อี-ไอ พื้นที่หน้าตัด $2.1 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ด้านปฐมภูมิใช้ลวดเบอร์ 40 SWG จำนวน 1000 รอบ ด้านทุติยภูมิใช้ลวดเบอร์ 40 SWG จำนวน 5000 รอบ ได้ผลการทดลองดังนี้

แรงดันป้อนเข้า ออสซิลเลเตอร์	โวลเตจป้อนเข้า $V_{in} (V_{ac})$	โวลเตจเอาต์พุต $V_o (V_{ac})$
110	100	500
135	120	610
160	140	700
180	160	810
200	180	900
220	200	1000

ก่อนที่จะออกแบบหม้อแปลงตัวที่ 2 นั้นได้ลองใช้แกนที่ใหญ่กว่าหม้อแปลงตัวที่ 1 พบหม้อแปลงตัวอื่น ๆ อีก แต่ก็ไม่ได้ผลตามที่ต้องการจึงได้ออกแบบตัวที่ 2 ดังกล่าว

7.2 บทวิจารณ์และสรุป

จากการออกแบบและสร้างเครื่องผลิตไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงในปริภูมิตฤษฎีฉบับนี้อาศัยหลักการของหลายส่วนคือส่วนแรกเป็นวงจรจูนเพลตออสซิลเลเตอร์ ซึ่งจะออสซิลเลตให้ความถี่ออกมา 16 กิโลเฮิร์ตและแรงดัน $200 V_p$ และเป็นตัวป้อน (Supply) ให้แก่หม้อแปลง (Step-up Transformer) ซึ่งใช้แกนเฟอร์ไรท์เป็นแกนแม่เหล็กโดยแปลงแรงดันให้สูงขึ้นเป็น $3500 V_p$ แล้วจ่ายเข้าวงจรมัลติพลายเออร์ซึ่งอาศัยหลักการของวงจรแรงดันสองเท่ามาต่อกันหลายๆขั้นในที่นี้ใช้ 9 ขั้นซึ่งการวัดเอาต์พุตแรงดันสูงใช้หลักการของโวลเตจดีไวเดอร์ซึ่งใช้ความต้านทานขนาด 280 เมกกะโอห์มต่ออนุกรมกับไมโครแอมมิเตอร์

ในที่นี้มีข้อจำกัดอยู่สองประการคือประการแรกกำลังของวงจรออสซิลเลเตอร์ไม่เพียงพอกับการเป็นตัวป้อนให้แก่หม้อแปลง โดยวงจรออสซิลเลเตอร์มีกระแสสูงสุดไม่ถึง 150 mA ซึ่งไม่เหมือนกับวงจรแรงดันคงที่ (Constant Voltage) ของการไฟฟ้าบ้านเรา จึงทำให้ไม่สามารถรักษาระดับแรงดันให้อยู่ที่ระดับคงที่หรือใกล้เคียง $200 V_p$ ได้เพราะความต้านทานทางปฏิกิริยาของขดลวดหม้อแปลงมีค่าน้อยเมื่อไม่สามารถจ่ายกระแสที่มาก ๆ ได้ จึงทำให้แรงดันคร่อมหม้อแปลงวงจรออสซิลเลเตอร์ตกลง ทำให้แรงดันที่เหนี่ยวนำทางทุติยภูมิลดลงด้วย อีกประการหนึ่งก็คือแกนเฟอร์ไรท์ของหม้อแปลง ซึ่งมีขนาดเล็กมากในท้องตลาด ถ้าหากต้องการให้ความต้านทานของขดลวดหม้อแปลงเพิ่มขึ้นให้รักษาแรงดันที่ปฏิกิริยาเป็น $200 V_p$ ได้นั้น โดยอัตราส่วนจำนวนรอบ N_1/N_2 คงที่โดยไม่คำนึงถึงค่าความหนาแน่นฟลักซ์นั้นต้องพันลวดให้จำนวนรอบมากขึ้น และจะต้องใช้แกนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นด้วยซึ่งหาซื้อขายยากมาก แม้จะใช้แกนแม่เหล็กที่ใหญ่ขึ้น เพื่อให้สามารถเพิ่มจำนวนรอบของขดลวดเพื่อจะเพิ่มความต้านทานของลวดให้เพียงพอในการที่จะรักษาแรงดันออสซิลเลเตอร์ที่จ่ายให้กับหม้อแปลงให้คงที่ได้ แต่ก็ไม่มีกำลังพอที่จะขับวงจรคือครีออฟ-วอลตันโวลเตจมัลติพลายเออร์ได้ จากแกนที่มีอยู่สามารถพันหม้อแปลงได้แค่หม้อแปลงตัวที่ 2 ดังที่ได้กล่าวรายละเอียดแล้วในผลการทดลอง ซึ่งหม้อแปลงตัวที่ 2 ก็ไม่มีกำลังพอที่จะขับวงจรคือครีออฟ-วอลตัน ทั้งนี้เป็นผลสืบเนื่องมาจากออสซิลเลเตอร์มีกำลังไม่พอ ซึ่งถูกจำกัดโดยคุณสมบัติของหลอดนั้นเอง จึงไม่มีผลการทดสอบวงจรคือครีออฟ-วอลตันและการวัดแรงดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีของแรงดันตกหาวงจรมีเป็นไปได้อาจมีแค่ 24.3 V คำนวณจากสมการ 4-33 โดยกำหนดค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$I_d = 200 \mu A$$

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

$$c = 0.25 \mu F$$

$$n = 9 \text{ ชั้น}$$

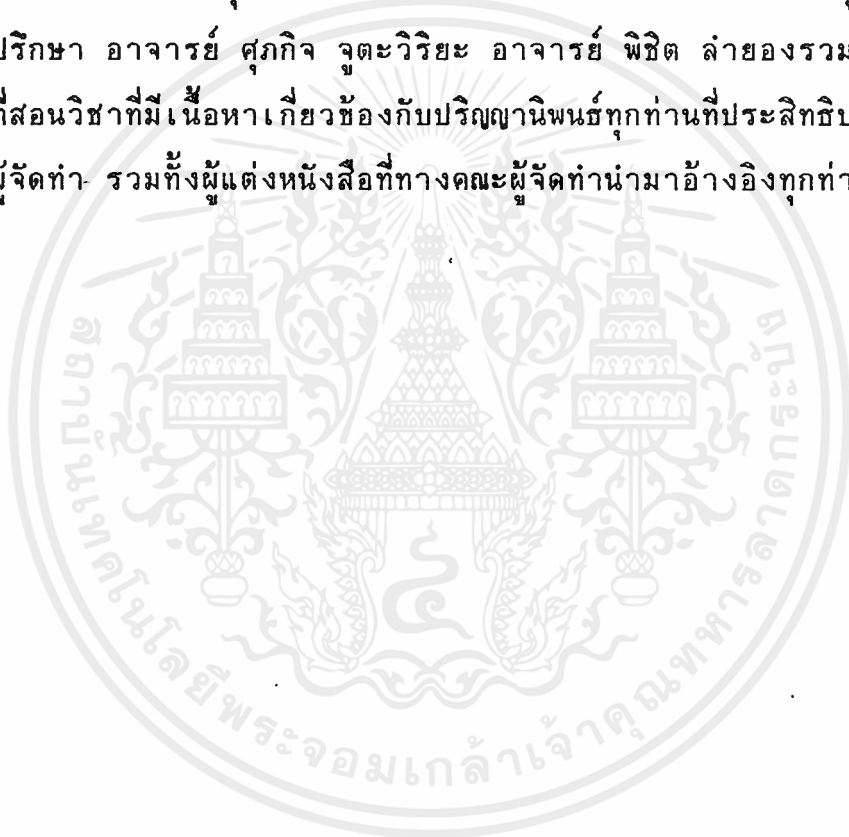
ซึ่งหากใช้ไฟบ้านซึ่งมีความถี่ 50 Hz จะมีแรงดันตกถึง 7776 V

สำหรับแรงดันระลอกของวงจรมีเท่ากับ 1.125 V แต่ถ้าใช้ไฟบ้าน (50 Hz) จะมีแรงดันระลอก 360 V คำนวณตามสมการ 4-25 ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบของวงจรมีที่มอดูลเลเตอร์ความถี่สูง



กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่องเครื่องผลิตไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีทั้งนี้โดยความอนุเคราะห์และให้คำปรึกษาจาก ดร.นิพนธ์ สุขุม ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ศุภกิจ จูตะวิริยะ อาจารย์ พิธิต ล้ายองรวมทั้งอาจารย์ท่านอื่น ๆ ที่สอนวิชาที่มีเนื้อหาเกี่ยวข้องกับปริญญานิพนธ์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับคณะผู้จัดทำ รวมทั้งผู้แต่งหนังสือที่ทางคณะผู้จัดทำนำมาอ้างอิงทุกท่าน



VIII

เอกสารอ้างอิง

1. Samuel seely, Electron - tube Circuit, McGraw-Hill Book Company Inc.
2. Nathan R. Grossner, Transformer for Electronic Circuits, McGraw-Hill Book Company , 1982.
3. Kuffle E., Abdullah M., Perggamonn Press, 1977.
4. ดร. สำรวาย สังข์สะอาด , "วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง", คณะวิศวกรรม-ศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 434 หน้า , 2528 .
5. ชินรัตน์ บำรุงชีพ , "คุยเฟื่องเรื่องหลอด ตอน 1", วารสารเคมี-คอนดักเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ ฉบับที่ 121 , 2535, หน้า 52-57.
6. ชินรัตน์ บำรุงชีพ , "คุยเฟื่องเรื่องหลอด ตอน 2" วารสารเคมี-คอนดักเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ ฉบับที่ 122, 2535 , หน้า 99-104 .
7. ชัยวัฒน์ ลัมพรจิตรวิไล , "คุยเฟื่องเรื่องหลอด ตอน 3 " , วาร-สารเคมีคอนดักเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ ฉบับที่ 123 , 2535, หน้า 77-80.