



เครื่องฟอกอากาศชนิดไอออนบวก
POSITIVE ION AIR CLEANER



ปฏิญานี้เป็นหนึ่งในส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2534

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ผ่านการคำ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

008514

ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2534

ภาควิชา เทคโนโลยีวัดคุมทางอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง POSITIVE ION AIR CLEANER

ผู้จัดทำ

1. นาย จิรพงศ์ ไนศาล
2. นาย สมพงษ์ เหลืองเจริญวัฒนา



.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อ. ภากร หตะสังภาค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องฟอกอากาศชนิดไอออนบวก

นาย จิรพงศ์ ไผศาล

นาย สมพงษ์ เหลืองเจริญวัฒนา

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ ภากร หตะสังกาศ

ปีการศึกษา 2534

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้กล่าวถึง โครงการที่เกี่ยวกับเครื่องฟอกอากาศชนิดไอออนบวก โดยการแพร่ประจุบวกให้แก่อากาศ แล้วใช้แผ่นโลหะมาทำการล่อให้ฝุ่นมาเกาะ การแพร่กระจายประจุไฟฟ้าให้แก่อากาศ โดยการป้อนไฟแรงดันสูงผ่านเข้าไปในโลหะปลายแหลมหรือโลหะเส้นเล็ก ๆ และแผ่นโลหะที่ใช้ล่อฝุ่นก็จะมีศักย์ไฟฟ้าที่วางสลับกันระหว่างขั้วบวกกับขั้วลบ อากาศที่ไหลผ่านลวดโลหะก็จะมีศักย์เป็นบวกรวมทั้งฝุ่นด้วย เมื่อผ่านแผ่นโลหะฝุ่นก็จะมาเกาะที่แผ่นโลหะ อากาศที่ผ่านออกมาจะเป็นอากาศที่สะอาด

POSITIVE ION AIR CLEANER

JIRAPONG PAISAL

SOMPONG LEUNGCHAROENWATTANA

ADVISER

PHAKORN HUTASANGKAS

1991

ABSTRACT

THIS THESIS IS CONCERNING THE POSITIVE ION AIR CLEANER BY
DISTRIBUTE THE POSITIVE ION TO THE AIR AND USED THE PLATE FOR THE DUST
TO HOLD ON THIS. THE DISTRIBUTION OF ION TO THE AIR BY FEED THE ELEC-
TRICAL HIGH VOLTAGE PASS THROUGH THE SMALL WIRE OR SHAPE WIRE. THE PATE
USED TO TEMPTED THE DUST TO LAY DOWN IS HAS POLARITY OF ELECTRICAL
ALTERNATE BETWEEN POSITIVE AND NEGATIVE POLE. THE AIR IS PASS THROUGH
THE WIRE, IT HAS POLARITY TO POSITIVE TO COMBINE THE DUST. WHEN PASS
THROUGH THE PLATE, THE DUST IS TO HOLD THE PLATE. THE AIR THROUGH OUT IS

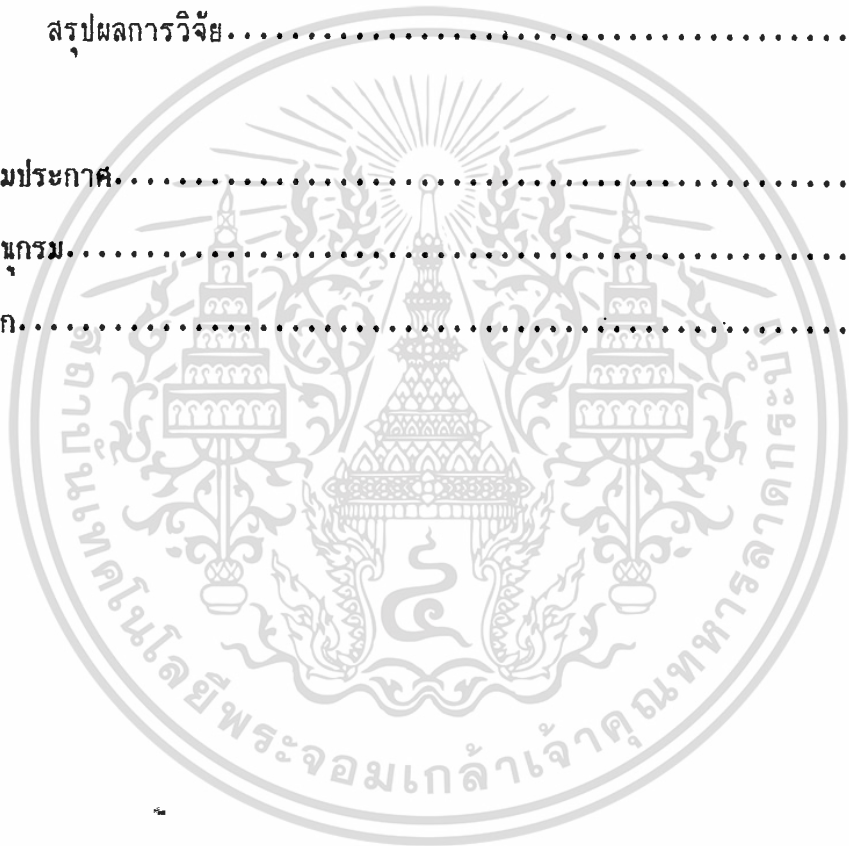
CLEAR.

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ.....	1
หลักการของไฟฟ้าแรงดันสูง.....	1
บทที่ 2 ลักษณะกราฟของกระแสในฟังก์ชันแรงดัน.....	4
ไอออนไนเซชัน.....	6
สัมประสิทธิ์การไอออนไนเซชันในก๊าซ.....	10
อะวานลานซ์ของอิเล็กตรอน.....	13
การเกิดไอออนลบ.....	18
การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะ.....	22
การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากคathode โดยสนามไฟฟ้า.....	23
กลไกการเกิดเบรคดาวน์.....	26
คำนวณแรงดันเบรคดาวน์ในอากาศ.....	32
แรงดันเริ่มต้นช้าลงต่ำกว่าช้าบวก.....	35
ผลของแผ่นฉนวนบางกั้น.....	45
บทที่ 3 การออกแบบหม้อแปลง.....	47
หลักการของสนามแม่เหล็ก.....	47
พื้นฐานระบบขั้วของหม้อแปลง.....	52
แกนเหล็กและวิธีการเลือก.....	54
การออกแบบหม้อแปลงแบบ Pulse-width modulated- half-bridge converter.....	55
การออกแบบหม้อแปลงแบบ Chock Flyback.....	57

บทที่ 4	ตัวเปลี่ยนกำลัง (Power converter).....	63
	การแยกส่วนของวงจรเปลี่ยนสัญญาณแบบ Flyblack.....	65
	สวิทซ์ซิ่ง ทรานซิสเตอร์ ของวงจรเปลี่ยนสัญญาณแบบ Flyblack.....	66
	วงจรเปลี่ยนสัญญาณแบบ Flyblack ที่ใช้หม้อแปลงแบบ Chock.....	68
บทที่ 5	วงจรผลิตความถี่.....	71
	หลักการทํางาน LC 555 TIMER.....	71
	วงจรมัลติไวเบรเตอร์ แบบไม่เสถียร.....	72
บทที่ 6	ฟอสต์ รีฟเวอร์ไดโอด.....	75
	เอปิตาเซียลเทคโนโลยี.....	75
	การใช้ไดโอดกับแหล่งจ่ายแรงดันแบบ สวิทซ์ซิ่ง.....	81
	การลดกระแสรีเวิร์ส-รีคัพเวอรี.....	86
	การเลือกไดโอดใช้งาน.....	88
บทที่ 7	สวิทซ์ซิ่ง ทรานซิสเตอร์.....	92
	สวิทซ์ซิ่ง ทรานซิสเตอร์ ในทางอุดมคติ.....	92
	สวิทซ์ซิ่ง ทรานซิสเตอร์ ที่ใช้งาน.....	94
	การเปิด-ปิด สวิทซ์ซิ่ง ของ ทรานซิสเตอร์ ในทางอุดมคติ.....	96
	การวิเคราะห์วงจรสวิทซ์ของ ทรานซิสเตอร์ ในทางอุดมคติ.....	97
	การเปิด-ปิด สวิทซ์ของ ทรานซิสเตอร์ ในทางปฏิบัติ.....	98
	สปีด อั้น คาปาซิเตอร์.....	104

บทที่ 8 หลักการทำงาน.....	108
หลักการทำงานของวงจร.....	108
การทดลองและผลการทดลอง.....	113
การปรับแต่งวงจร.....	114
แนวความคิดในการพัฒนางานต่อ.....	114
วิธีใช้งาน.....	115
วิธีทำความสะอาด.....	115
สรุปผลการวิจัย.....	117
กิจกรรมประกาศ.....	118
บรรณานุกรม.....	119
บทแทรก.....	120



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

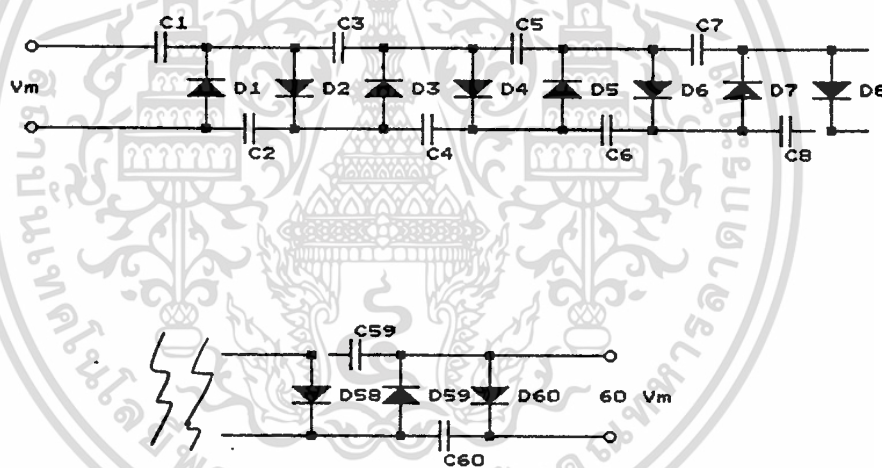
ในปัจจุบันมลภาวะทางอากาศกำลังเป็นปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งอากาศเองก็เป็นปัจจัยที่สำคัญในการดำรงชีวิตของมนุษย์ ถ้าหากว่าเราได้รับอากาศที่ไม่บริสุทธิ์เข้าไปก็จะมีผลทำให้ร่างกายเราเจ็บป่วย อาทิเช่น โรคทางเกี่ยวกับเดินหายใจ หัวใจ โรคภูมิแพ้ เป็นต้น อากาศที่ไม่บริสุทธิ์มักจะมีสิ่งแปลกปลอมปนอยู่มาก อาทิเช่น ฝุ่นละออง เกสรดอกไม้ เชื้อโรค ซึ่งสิ่งปนเปื้อนเหล่านี้เองที่เป็นสาเหตุของอากาศเจ็บป่วยต่างๆ จึงได้มีการพยายามหาวิธีการที่จะทำให้อากาศสะอาดขึ้นหลายๆวิธีการด้วยกัน เช่นได้มีการนำเอากระดาษกรองบุตามผนังและช่องระบายอากาศเพื่อป้องกันฝุ่นละอองไม่ให้เข้ามาในห้องได้ แต่วิธีการนี้มีความยุ่งยาก ลงทุนสูงและเสียค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาสูงมากด้วย จึงไม่เป็นที่นิยมใช้ โดยส่วนใหญ่มักจะใช้ในห้องทดลองที่ปลอดเชื้อ หรือเลี้ยงเชื้อที่ไม่ต้องการให้สิ่งอื่นแปลกปลอม ต่อมาได้มีการค้นคว้าพบว่าไอโซนซึ่งถือว่าเป็นอากาศที่มีความบริสุทธิ์นั้นจะมีปริมาณของประจุลบสูงกว่าประจุบวก จึงได้มีการพยายามแพร่กระจายประจุลบสู่อากาศให้มากโดยทำการสร้างสนามไฟฟ้าลบที่มีแรงดันสูง แล้วทำการป้อนศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูงนี้ผ่านโลหะที่มีปลายแหลมเล็ก เพื่อให้ประจุไฟฟ้าที่ออกันอยู่ที่ปลายนี้สามารถหลุดออกสู่อากาศได้ง่ายยิ่งขึ้น ทำให้อากาศที่อยู่ใกล้กับปลายโลหะมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบและฝุ่นที่อยู่ในอากาศมีศักย์เป็นลบด้วย ส่วนผนังห้องจะศักย์ไฟฟ้าเป็นบวก ทำให้ฝุ่นจะเข้าไปเกาะติดกับผนัง จึงทำให้ฝุ่นละอองในอากาศลดลง

โครงการนี้เป็นผลการวิจัยเกี่ยวกับหลักการทำงานของเครื่องฟอกอากาศแบบไอออนบวก ซึ่งทำการแพร่ประจุบวกให้แก่อากาศโดยการป้อนไฟฟ้าที่มีแรงดันสูงๆ ประมาณ 25 กิโลโวลท์ ผ่านลวดเส้นเล็กๆ ทำให้มีประจุไฟฟ้ามาออกันบริเวณเส้นลวดและหลุดออกสู่อากาศจึงทำให้อากาศมีศักย์เป็นบวก แล้วให้อากาศที่ได้รับการแพร่ประจุเหล่านี้ไหลผ่านแผ่นโลหะที่ถูกจัดวางให้มีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกและลบสลับกัน ฝุ่นที่ติดมากับอากาศซึ่งมีศักย์เป็นบวก เนื่องจากการแพร่กระจายประจุก็วิ่งไปเกาะกันบริเวณแผ่นโลหะที่ศักย์เป็นลบซึ่งทำให้อากาศที่ไหลผ่านออกมา มีความสะอาดขึ้น

1.1 หลักการของไฟฟ้าแรงดันสูง

เอกสารนี้โดยปกติแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายตามบ้านเรื่อนั้นจะ เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่มีค่าอยู่ประมาณ 220 โวลท์ ไม่ว่าจะเป็นใครๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

50 Hz หรือ 110 โวลต์ 60 Hz ซึ่งก็แล้วแต่ว่ามาตรฐานของประเทศใด (สำหรับประเทศไทยนั้นจะใช้แรงดันที่ 220 โวลต์ 50 Hz) แต่แรงดันที่ใช้ในเครื่องฟอกอากาศจะมีค่าประมาณ 25 กิโลโวลต์ ฉะนั้นเราจะต้องทำการเพิ่มแรงดัน 220 โวลต์ให้สูงขึ้น สำหรับการเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้นนั้นทำได้หลายวิธี เช่น ใช้วงจรทวีแรงดันแบบที่ใช้ไดโอดกับตัวเก็บประจุ ใช้หม้อแปลงชนิดแปลงขึ้น ใช้หม้อแปลงฟลายแบคซึ่งใช้ความถี่สูง



รูปที่ 1.1 วงจรทวีแรงดันแบบที่ใช้ ไดโอด และ ตัวเก็บประจุ

การทำงานของวงจรทวีแรงดันในรูปที่ 1.1 จะใช้ไดโอดเป็นตัวกำหนดทิศทางการไหลของกระแสที่จะเก็บประจุไว้ในตัวเก็บประจุ ซึ่งจะมีหลักการทำงานดังนี้ ในช่วงไซเคิลแรกสมมุติให้แรงดันเป็นลบ (รูปที่ 1.1 ก) ตัวเก็บประจุ C_1 จะทำการเก็บประจุผ่านทาง ไดโอด D_1 ทำให้ที่ตัวเก็บประจุไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C1 มีแรงดันตกคร่อมตัวมันเท่ากับ V_m เมื่อแรงดันทางด้านอินพุตมีคีย์เป็นบวก (รูปที่ 1.1 b) แรงดันที่ตกคร่อม C2 จะมีค่าเท่ากับแรงดันที่ตกคร่อม C1 ขวักกับแรงดันอินพุตผ่านทางไดโอด D2 ในทำนองเดียวกัน เมื่อแรงดันทางด้านอินพุตเปลี่ยนเป็นลบใหม่ แรงดันจาก C2 จะไหลมายัง C3 ผ่านทางไดโอด D3 และเมื่อแรงดันทางด้านอินพุตกลับเป็นบวกอีก แรงดันที่ C3 จะไหลมาตกคร่อมที่ C4 ผ่านทางไดโอด D4 ทำให้แรงดันที่ออกทางเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ $4 V_m$ แต่วิธีการนี้จะมีกระแสสูญเสียในตัวเก็บประจุสูงมาก

สำหรับการใช้หม้อแปลงทำการแปลงไฟขึ้นนั้นก็ใช้หม้อแปลงธรรมดาที่มีอัตราส่วนดังนี้

$$V_p / V_s = N_p / N_s$$

แต่วิธีนี้นอกจากจะมีน้ำหนักมากแล้วหม้อแปลงที่ใช้ก็ยังมีราคาแพง เนื่องจากต้องใช้ฉนวนที่ทนแรงดันได้สูงๆ อีกด้วย

การใช้ฟลายแบคนั้นจะทำการแปลงไฟกระแสสลับให้เป็นไฟกระแสตรง แล้วทำการสวิตช์ด้วยความถี่ประมาณ 16 kHz (ความถี่ที่ใช้งานกับฟลายแบคโดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ 15.625 kHz) ดังในรูปที่ 1.2

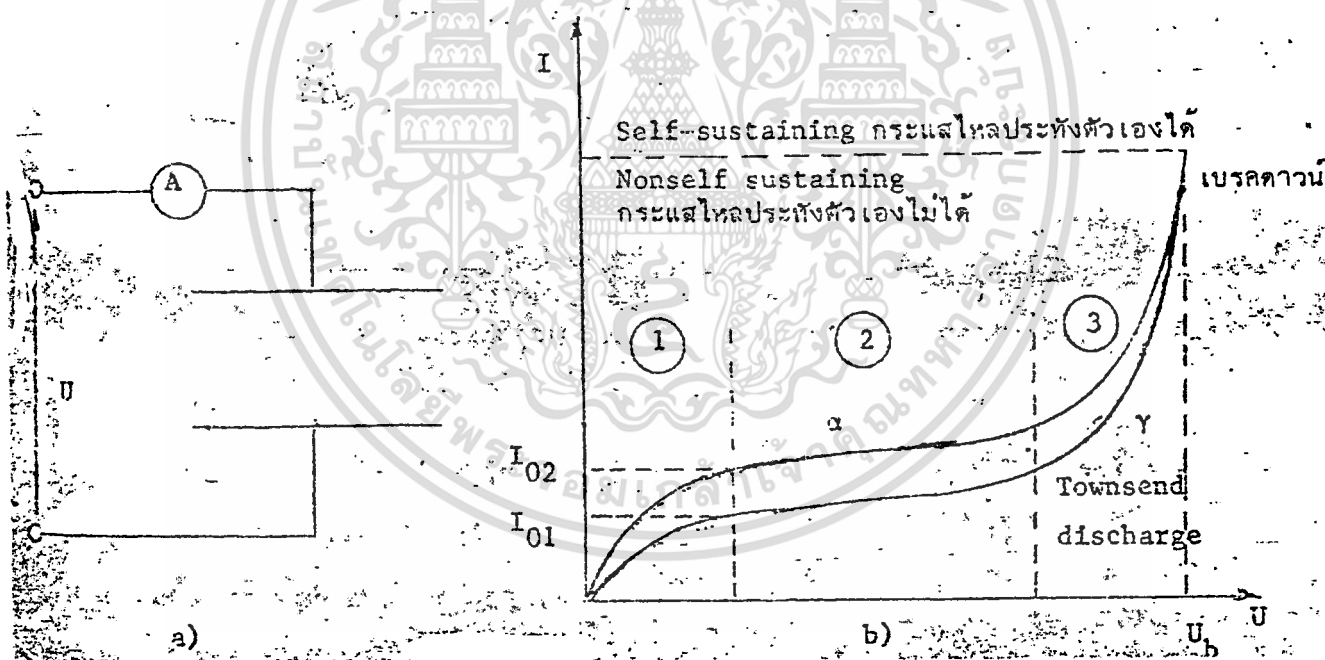


รูปที่ 1.2 วงจรทวีแรงดันแบบที่ใช้หม้อแปลงฟลายแบค

บทที่ 2

2.1 ลักษณะกราฟของกระแสในฟังก์ชันแรงดัน

สภาพการนำไฟฟ้าของก๊าซแต่ละชนิดอาจต่างกัน โดยเปรียบเทียบกับด้วยลักษณะกราฟของกระแสแรงดันอากาศประกอบด้วย N_2 75% และ O_2 21% ก๊าซเฉื่อย (Ar, N_2, He) 1% และ CO_2, SO_2, H_2O และ อื่น ๆ เนื่องจากในบรรยากาศมีรังสีแผ่กระจายในระดับสูง และเนื่องจากมีรังสีจากสารกัมมันตภาพรังสี จึงมีอนุภาคประจุอยู่เสมอ นั้นหมายความว่าอากาศมีสภาพนำไฟฟ้าจำกัดโดยปกติสภาวะบรรยากาศ อากาศจะมีความต้านทานจำเพาะประมาณ $4 \times 10^{15} \text{ Ohm/cm}$ ความต้านทานจำเพาะของทองแดงเท่ากับ $1.6 \times 10^{-6} \text{ Ohm/cm}$ และกราฟไฟฟ้มีความต้านทานจำเพาะราว $2.2 \times 10^{-3} \text{ Ohm/cm}$



รูปที่ 2.1 a. อิเล็กโทรดแผ่นระนาบคathode-แอโนดในอากาศ
b. ลักษณะกราฟกระแส-แรงดัน

* Nonselfsustaining หมายถึงกระบวนการเพิ่มทวีคูณของอิเล็กตรอน หรือไอออน
 เอมวกไม่สามารถดำเนินต่อไปเองได้ถ้าไม่มีต้นกำเนิดอิเล็กตรอนเริ่มต้น คือนำไป จะหายไปเมื่อไม่มี
 I_0 ซึ่งโดยทั่วไปจะได้จากการฉายแสง UV ลงไปที่แคโทด

ด้วยเหตุที่อากาศมีสภาพนำไฟฟ้าอยู่บ้าง ฉะนั้นเมื่อป้อนแรงดันเข้าไปจึงทำให้มีกระแสไหลที่ค่าจำกัดอันหนึ่ง สมมุติว่าป้อนแรงดันกระแสตรงเข้าไประหว่างแผ่นระนาบของคัพแคปซิเตอร์มีอากาศเป็นฉนวนดังในรูปที่ 2.1 a. ก็จะมีกระแสไหลดังในรูป b. ซึ่งเป็นช่วง 1 ของรูปที่ 2

ในรูป 2.1 b. ที่แรงดันต่ำ ความเครียดสนามไฟฟ้า E ต่ำ ๆ จะมีเพียงบางส่วนที่เกิดไอออนในเซชันตามธรรมชาติ เกิดอิเล็กตรอนอิสระและไอออนวิ่งเข้าหาอิเล็กโตรดโดยอิเล็กตรอนวิ่งเข้าหาอะโนด และ ไอออนบวกวิ่งเข้าแคโทด การเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุเช่นนี้จึงมีกระแสไหลตามกฎของโอห์ม คือกระแสเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียดสนามไฟฟ้าอยู่ในย่าน 1

ในย่าน 2 อนุภาคประจุอิสระมีอยู่ที่ผิวแคโทดหรือออกจากแคโทดจะวิ่งไปหาอะโนดหมด แม้จะเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้นแต่กระแสจะไม่เพิ่มตาม เพราะอิเล็กตรอนถูกดึงไปหมดแล้ว

ที่ความดันบรรยากาศจะพบว่าความหนาแน่นของกระแสเริ่มคงตัว มีค่าประมาณ 10^{-9} A/cm² ที่ความเครียดสนามไฟฟ้า 10 V/cm ถ้าเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้นไปอีก กระแสจะไม่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งแรงดันเพิ่มขึ้นให้ความเครียดสนามไฟฟ้าเพิ่มถึง 20 kV/cm กระแสจะเพิ่มขึ้นอีกอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เพราะมีอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นจากการชนแตกตัวหรือไอออไนเซชัน (collision ionisation) นั่นคืออิเล็กตรอน วิ่งเข้าชนโมเลกุลเป็นกลาง เกิดอิเล็กตรอนอิสระและไอออนบวกเพิ่มขึ้นมากมายเป็นสภาพที่อิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นได้เอง (selfsustained) เกิดเป็นอะวาลันช์ (avalanche) ในย่าน 3

ความหนาแน่นของกระแสอิ่มตัว J_{∞} ในสนามไฟฟ้ามำเสมอขึ้นอยู่กับอนุภาคประจุ และระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด d คือ

$$J_{\infty} = e \cdot J \cdot d$$

$$\text{โดยที่ } J = eN^+ \cdot N^- \quad \text{cm}^{-3} \text{ sec}^{-1}$$

ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ทำให้กระแสอิ่มตัวคือ E_{∞} อาจคำนวณได้จาก {Zaengli}

$$E_{\infty} = (4.25 d / J \cdot p) / (b^+ + b^-) \quad 2.1$$

ตัวอย่าง

$$d = 100 \text{ cm}$$

$$N^+ = N^- = 1000 \text{ cm}^{-3}$$

$$b^+ = b^- = 1.5 \text{ cm}^2 \cdot \text{Vsec}^{-1}$$

$$p = 2.10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ sec}^{-1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Asec}$$

$$\begin{aligned} \text{ฉะนั้น } J &= p \cdot N^+ \cdot N^- \text{ cm}^{-3} \text{ sec}^{-1} \\ &= 2 \times 10^{-6} \times 10^6 = 2 \text{ cm}^{-3} \text{ sec}^{-1} \end{aligned}$$

ความหนาแน่นกระแสอิเล็กตรอน

$$\begin{aligned} J_e &= e \cdot J \cdot d \\ &= 1.6 \times 10^{-19} \times 2 \times 10 = 3.2 \times 10^{-17} \text{ A/cm}^2 \end{aligned}$$

ความหนาแน่นของกระแสขนาดนี้จะต้องใช้ความเค้นสนามไฟฟ้า

$$E_0 = (4.25 \times 100 / \sqrt{2 \times 2 \times 10^{-6}}) / (1.5 + 1.5) = 0.3 \text{ V/cm}$$

E_0 มีค่าค่อนข้างต่ำ

2.2 ไอออไนเซชัน (Ionization)

อะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซเมื่อได้รับพลังงานเพียงพอ จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกไปหนึ่งอิเล็กตรอน อะตอมหรือโมเลกุลนั้นจะมีประจุเป็นบวก เช่นนี้เรียกว่าเกิดไอออไนซ์ กระบวนการที่แยกอิเล็กตรอนออกจากอนุภาคของก๊าซและมีไอออนบวกเพิ่มขึ้น เรียกว่า ไอออไนเซชัน หรือการแตกตัวของอิเล็กตรอนจากโมเลกุล ส่วนกระบวนการที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากของแข็ง (solid) เรียกว่า การปล่อยอิเล็กตรอน (electron emission) ในที่นี้อิเล็กตรอนจะหลุดออกจากอิเล็กโทรด ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญอย่างยิ่งที่ทำให้ก๊าซมีสภาพนำไฟฟ้าขึ้นมาได้

อาจกล่าวได้ว่าก๊าซจะมีสภาพนำไฟฟ้าได้เมื่อมีอนุภาคประจุอิสระจำนวนมากๆ โดยกระบวนการทวีคูณเพิ่มขึ้นของอิเล็กตรอนและไอออนในแก๊สที่แตกออกเป็น 2 กระบวนการคือ กระบวนการแตกตัวของอิเล็กตรอนออกจากโมเลกุลของก๊าซ อันเกิดจากการชนของอนุภาคกับโมเลกุล (อิเล็กตรอน, ไอออน และ โฟตอนชนกับโมเลกุล) และกระบวนการปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวอิเล็กโทรดเมื่อได้รับความเค้นสนามไฟฟ้าสูงหรือได้รับพลังงานความร้อน รังสีหรือไอออนวิ่งมากระทบผิวอิเล็กโทรด

2.3 ไอออไนเซชันโดยการชน (collision ionization)

เมื่ออนุภาคมีมวล m (อิเล็กตรอน, ไอออนหรืออะตอมเป็นกลาง) เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีศักย์แปลงเป็นความร้อน และด้วยอำนาจดึงดูดของอนุภาคที่มีการนำไปใช้ และชนกัน อะตอมมีมวล M จะมีการถ่ายโอนพลังงานจลน์ ถ้าไม่มีผลให้เกิดการคืนกระตุ้น (excita-

ation) หรือไอออนไนเซชัน เรียกรวมกันว่าชนแบบยืดหยุ่น (elastic collision) แต่ถ้าชนแล้วอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซที่ถูกชน ได้รับพลังงานจากอนุภาคที่มาชนเกิดตื่นกระตุกหรือ ไอออนไนเซชันขึ้น เรียกรวมกันว่า ชนแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic) นั้นหมายความว่าพลังงานจลน์ได้เปลี่ยนไปเป็นพลังงานศักย์ (potential energy) จึงอาจกล่าวอย่างทั่วไปได้ว่า เมื่อมีการเปลี่ยนจากพลังงานจลน์เป็นพลังงานศักย์หรือกลับกันเรียกรวมกันนั้นเป็นแบบไม่ยืดหยุ่น

อาศัยกฎของโมเมนตัมและกฎอนุรักษ์พลังงานสามารถคำนวณพลังงาน และความเร็วของอนุภาคหลังการชนได้ ถ้าทราบเงื่อนไขก่อนการชนเกิดขึ้น ในรูป 2.1 แสดงถึงสองอนุภาคมีมวล m และ M ชนกันในแนวมุมใด ๆ และเวกเตอร์ความเร็วของอนุภาคก่อนชนเป็น \vec{v} และ \vec{V} ตามลำดับ เวกเตอร์ความเร็วแตกออกในแนวแกน x (แนวเชื่อมโยงผ่านจุดศูนย์กลาง) และแกน y (ตั้งฉากกับแกน x) ในแนวแกน y คือ v_y และ V_y จะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการชน ฉะนั้นจึงให้ v_x เป็นความเร็วขั้นสุดท้ายของมวล m (ในแนวแกน x) เมื่อชนมวล M อยู่นิ่ง ($V = 0$)

$$v_x = \frac{m - M}{m + M} \cdot v$$

2.2

ไอออนไนเซชันเกิดจากอิเล็กตรอนวิ่งชนโมเลกุล หรืออะตอมของก๊าซ โดยที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้า E ในขณะที่วิ่งเข้าหาอะตอม พลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับจะเป็นพลังงานจลน์ (Kinetic energy) ถ้าพลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับจากสนามไฟฟ้านี้ มากกว่าพลังงานไอออนไนเซชัน (Ionization energy) ของโมเลกุลของก๊าซเป็น w_i ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ก็จะทำให้เกิดไอออนไนเซชันขึ้น

สมมติว่าอิเล็กตรอนเริ่มต้นเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับศูนย์ในทิศทางของสนามไฟฟ้า $E^+(x)$ เป็นระยะทางเท่ากับระยะอิสระ λ จะได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้า

$$W = e \int_0^{\lambda} E^+(x) dx = eU \quad 2.3$$

จะเกิดไอออนไนซ์เมื่อ $W \geq w_i$ (E คงที่)

นั่นคือ $\lambda = \lambda_c$

ถ้าความถี่ของสนามไฟฟ้า E คงที่ การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$e \cdot E \cdot \lambda_e \geq W_t = eU_t \quad 2.4$$

เมื่อ U_t คือ แรงดันไอออไนเซชัน V

eU_t คือพลังงานที่ทำให้เกิดไอออไนเซชัน eV

ถ้าพลังงานที่ได้จากสนามไฟฟ้าไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดไอออไนซ์ได้ ก็อาจจะทำให้โมเลกุลที่ถูกชน (แบบไม่ยืดหยุ่น = inelastic) นั้นอยู่ในสภาวะตื่นกระตุ้น (excitation) ได้ พลังงานที่ทำให้โมเลกุลตื่นกระตุ้นได้นี้เรียกว่าพลังงานตื่นกระตุ้น W_{ex}

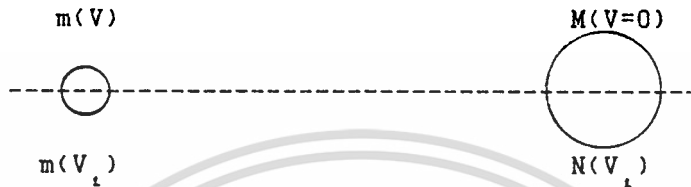
ตารางที่ 2.1 พลังงานไอออไนเซชันและพลังงานตื่นกระตุ้นของโมเลกุล

ก๊าซ	W_{ex} {eV}	W_t {eV}
H ₂	7	15.4
H	10.16	13.59
N ₂	6.3	15.6
N	10.33	14.54
O ₂	7.9	12.5
O	9.15	13.61
Hg	4.9	10.4
He	19.8	24.5
N ₂ O	-	11
NO	5.4	9.5
H ₂ O	7.6	12.59
CO ₂	10	14.4
SF ₆	-	19.3
ก๊าซเฉื่อย	-	10-24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก่อนชน



หลังชน

รูปที่ 2.2 อนุภาคชนกัน

ถ้าชนแบบไม่ยืดหยุ่น พลังงานสูงสุดที่อะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซซึ่งอยู่นิ่งขณะก่อนถูกชน ได้รับหาได้จากกฎของโมเมนตัมและอนุรักษ์พลังงานดังนี้

$$mv + MV = mv_1 + MV_1$$

แต่มวล M อยู่นิ่งจึงได้

$$mv = mv_1 + MV_1$$

จากกฎอนุรักษ์พลังงานที่กล่าวไว้ว่า พลังงานรวมก่อนและหลังการชนย่อมคงเดิม ฉะนั้นจะได้

$$1/2 mv^2 = 1/2 mv_1^2 + 1/2 MV_1^2 + W_p$$

เมื่อ W_p คือ พลังงานศักย์ที่อนุภาค M (ที่อยู่นิ่ง) ได้รับจากความสั่นพ้อง $mv = mv_1 + MV_1$ จะขจัด v_1 ได้

$$1/2 mv^2 = 0.5mv_1^2 + 0.5m^2/M(V - v_1)^2 + W_p \tag{2.5}$$

พลังงานศักย์ W_p จะมีค่าสูงสุด ถ้าสมมติว่าพลังงานจลน์ของอนุภาคที่วิ่งมาชนมีค่าคงที่ จึงดิฟเฟอเรนเชียลเทียบกับ v_1 แล้วให้เท่ากับศูนย์จะได้ $W_{p \max}$ คือ

$$dW_p/dv_1 = m/M\{mv - (m + M)v_1\} = 0$$

$$mv = (m + M)v_1$$

ถ้า m เป็นมวลของอิเล็กตรอนซึ่งน้อยกว่ามวลของโมเลกุลมาก $m \ll M$ ฉะนั้น

$$V_1 = (m/M)v$$

นั่นคือความเร็ว v_1 มีค่าน้อยเป็นเพียงส่วนหนึ่งของความเร็วต้นของอนุภาควิ่งมาชน แสดงว่าอนุภาควิ่งมาชนในที่นี้คืออิเล็กตรอนจะให้พลังงานจลน์เกือบทั้งหมดให้กับโมเลกุล หลังจากชนแล้วความเร็วของทั้งสองอนุภาคเท่า ๆ กันคือ $v_1 = v_1$ (เพื่อให้เป็นไปตามกฎอนุรักษ์)

พลังงานถ่ายทอดสูงสุดได้จากการแทนค่า v_1 อนุภาคที่อยู่หนึ่งจะได้รับพลังงานค้ำยสูงสุด คือ

$$W_p(\max) = (M/(m+M)) \cdot mv^2/2 \quad 2.6$$

ฉะนั้นอิเล็กตรอนวิ่งชนโมเลกุลจะถ่ายทอดพลังงานจลน์ให้กับโมเลกุลทั้งหมด เมื่อความเร็วหลังชนของอิเล็กตรอน $v_1 = 0$ ส่วนไอออนหนัก ($m = M$) จะมีการถ่ายทอดพลังงานจลน์ครึ่งหนึ่งเป็นพลังงานค้ำย และถ่ายทอดพลังงานจลน์เพียง 25 % ($v_1 = 1/2v$) นั่นคือจะมีการถ่ายทอดพลังงานเพียง 75% ของพลังงานเริ่มต้น

การเกิดไอออไนเซชันโดยอิเล็กตรอนวิ่งชน อิเล็กตรอนจะต้องมีพลังงานจลน์เท่ากัน หรือมากกว่าพลังงานไอออไนเซชันของโมเลกุลหรืออะตอมเป็นกลาง นั่นคือ

$$1/2mv^2 \geq W_i$$

2.4 สัมประสิทธิ์การไอออไนเซชันในก๊าซ

ในระหว่างที่อนุภาคประจุเคลื่อนที่ไประหว่างอิเล็กโตรด อาจชนและเกิดไอออไนเซชันได้หลายครั้งหลายหนก่อนที่จะถึงอิเล็กโตรด

ทาวนด์เซนต์ (Townsend) ได้ชี้ให้เห็นว่าจำนวนการชนเกิดไอออไนเซชันต่อหนึ่งหน่วยระยะที่อนุภาคประจุเคลื่อนที่ไปนั้นกำหนดด้วยแฟคเตอร์ที่เรียกว่า สัมประสิทธิ์การเกิดไอออไนเซชันของทาวนด์เซนต์ โดยอนุภาคประจุวิ่งชนโมเลกุลในแก๊สแบ่งเป็นสัมประสิทธิ์ α β โดยที่ α เป็นสัมประสิทธิ์การชนแตกตัวด้วยอิเล็กตรอนวิ่งชนโมเลกุล ส่วน β เป็นสัมประสิทธิ์การชนของไอออน สัมประสิทธิ์การชนแตกตัวทั้งสองค่าจำกัดความดังนี้

α : (สัมประสิทธิ์การชนไอออไนเซชันที่หนึ่งของทาวนด์เซนต์) เป็นค่าเฉลี่ยของการชนไอออไนเซชันของอิเล็กตรอน 1 ตัวที่เคลื่อนที่ไปในแก๊สเป็นระยะ 1 Cm มีหน่วยเป็น cm^{-1}

β : คือ จำนวนการชนของไอออนบวกกับโมเลกุลเป็นกลาง ทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระและไอออนบวกต่อหนึ่งหน่วยระยะทางในแก๊สตามแนวสนามไฟฟ้าเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่เนื่องจากไอออนมีมวลมาก ฉะนั้นการได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าจึงน้อย และการถ่ายทอดพลังงานเมื่อชนก็น้อยด้วย นั่นคือ $\alpha \ll \beta$ ฉะนั้นการชนแตกตัวในก๊าซจึงมักเนื่องจากกระบวนการ α ค่าสัมประสิทธิ์การชนไอออนในเซชัน α ขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นของ

ก๊าซซึ่งมีความสัมพันธ์

$$\frac{\alpha}{P} = f\left(\frac{E}{P}\right) \quad 2.7$$

ความสัมพันธ์สมการ (2.7) สำหรับก๊าซต่าง ๆ มีลักษณะคล้าย ๆ กัน ซึ่งอาจเขียนได้ด้วยสมการ

$$\frac{\alpha}{P} = A \cdot \frac{B}{E/P} \quad 2.8$$

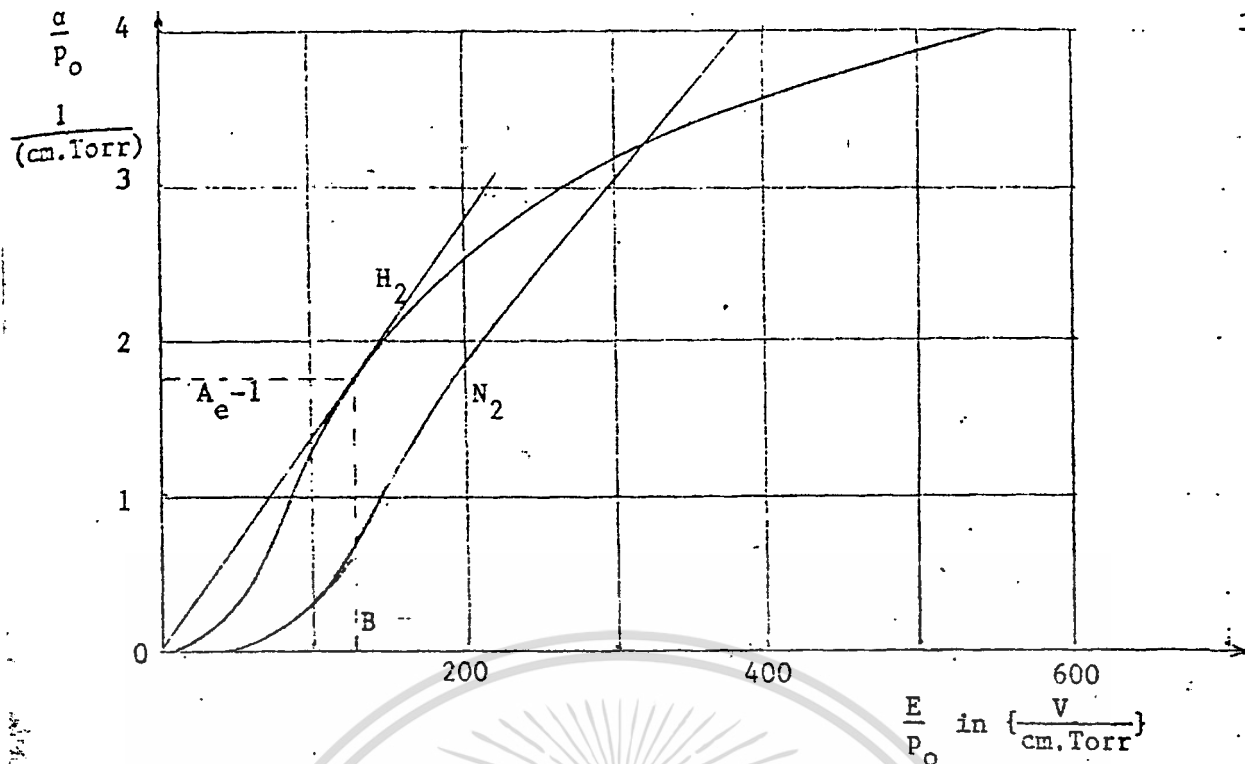
โดยที่ $B = A \cdot U_i$ และ $A = A(T)$

A และ B เป็นค่าคงตัวขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซ และฟังก์ชันดังกล่าวใช้ได้ภายในจำกัดของ E/P ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ก๊าซ	A (cm - Torr) ⁻¹	B (cm - Torr) ⁻¹	ย่านที่ใช้ได้ $\frac{E}{P}$ ($\frac{V}{cm - Torr}$) ^P
Air	15	365	100 - 800
N ₂	12	342	100 - 600
H ₂	5.1	138.8	20 - 600
He	3	34	20 - 150
Ne	4	100	100 - 400
A	14	180	100 - 600
Kr	17	240	100 - 1000
Xe	26	350	200 - 800
CO ₂	20	466	500 - 1000
H ₂ O	12.9	289	150 - 1000

ตารางที่ 2.2

ค่าของ $\alpha = f(E/p)$ เป็นแฟคเตอร์สำคัญที่กำหนดการเพิ่มทวีคูณของอนุภาคประจุ และนำไปสู่การเบรคดาวน์ในก๊าซ ตัวอย่างความสัมพันธ์ของ $\alpha = f(E/p)$ ของ N₂ และ H₂ ดังกราฟในรูปที่ 2.3 [Nasser]



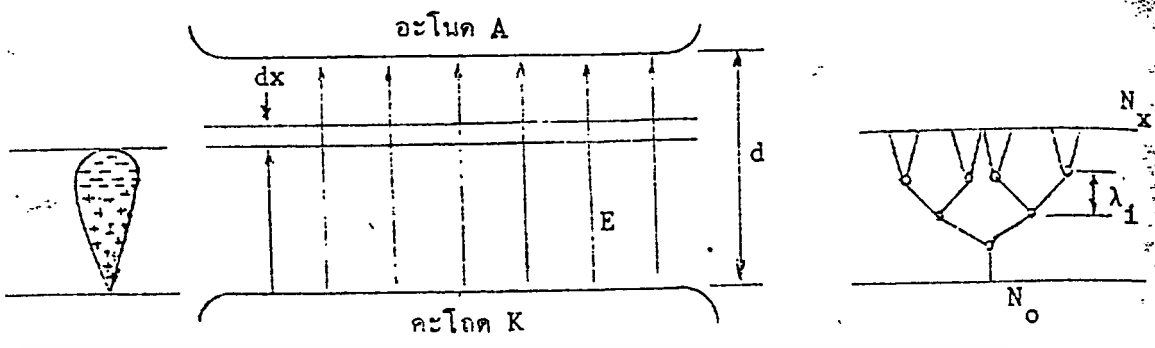
รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ของ $\frac{\alpha}{p_0} = f(E/p_0)$ ของ H_2 และ N_2 (Nasser)

p_0 เป็นความดันที่ $C p_0 = p \cdot T_0 / T$ และ $T_0 = 273 K$

ข้อสังเกตจากเส้นกราฟในรูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นว่า α/p นั้นมิได้เริ่มต้นที่แกนศูนย์ หากแต่เริ่มต้นที่ค่า E/p ค่าหนึ่งซึ่งแสดงถึงค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า E_c มีค่าต่ำสุด เกิดในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอที่อิเล็กโตรดวางห่างกันมาก ๆ ทั้งนี้เนื่องจากที่ความเครียดสนามต่ำ ๆ และเส้นทางเดินของอิเล็กตรอนมีระยะไกลจึงมีโอกาสที่โมเลกุลของก๊าซจับอิเล็กตรอนไว้ได้กลายเป็นไอออนลบ เคลื่อนที่ได้ช้า ไอออนในเซชั่นเกิดได้ยาก เป็นการหน่วงการเกิดเบรคดาว์น ปฏิกิริยาการ เช่นนี้จะเห็นได้ชัดในก๊าซอนุภาคประจุลบ (Electro negative gas)

2.5 อะวาลานซ์ของอิเล็กตรอน (electron avalanche)

พิจารณาจากไฟฟ้าสม่ำเสมอที่ได้จากอิเล็กโตรดแผ่นระนาบวางขนานกันดังในรูป 2.4 เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้า E จะถูกเร่งให้วิ่งไปหาอะโนด พลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ ถ้าสูงมากพอจะทำให้เกิดไอออนเซชั่นเมื่ออิเล็กตรอนวิ่งชนโมเลกุลของก๊าซ (ดังที่กล่าวแล้วในข้อก่อน) นั่นคือทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากโมเลกุลเป็นกลาง ที่เหลือก็เป็นไอออนบวก อิเล็กตรอนตัวใหม่ก็จะวิ่งไปชนโมเลกุลเกิดอิเล็กตรอนตัวใหม่เพิ่มขึ้นต่อ ๆ ไปจนกระทั่งเป็นอะวาลานซ์ของอิเล็กตรอนขึ้น การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 อะวาลานซ์ของอิเล็กตรอน

ในช่องแคบ dx ต่างจากระยะเป็นระยะ x มีจำนวนอิเล็กตรอนเป็น

$$dN_x = \alpha \cdot N_x dx$$

ที่ x = 0 จำนวนอิเล็กตรอนเริ่มต้น N₀

ที่ระยะ x จำนวนอิเล็กตรอนเป็น N_x

แต่เนื่องจาก E มีค่าเท่ากันตลอดแกป ฉะนั้น α จึงมีค่าคงตัว

ที่ระยะ x จะมีอิเล็กตรอนในอะวาลานซ์เป็น N_x คือ

$$N_x = N_0 e^{\alpha x} \tag{2.9}$$

จำนวนอิเล็กตรอนและไอออนบวกจะเพิ่มขึ้นเป็นเอกซ์โปเนนเชียล อิเล็กตรอนที่วิ่งไปถึงอะโนด

จะมีจำนวน

$$N_d = N_0 e^{\alpha d} \tag{2.9a}$$

เมื่อคูณด้วยค่าประจุของอิเล็กตรอนจะได้กระแส

$$I = I_0 e^{\alpha d} \tag{2.9b}$$

I₀ คือกระแสเริ่มต้น เป็นผลมาจากอิเล็กตรอนเริ่มต้นที่หลุดออกมาจากแคโทด เรียกว่า กระแสโฟโต(photo current) ไม่สามารถจะไอออไนซ์ในบริเวณใกล้ ๆ แคโทดได้ เพราะอิเล็กตรอนเหล่านั้นยังมีพลังงานจลน์ต่ำอยู่ คือยังน้อยกว่า φ_k ในบริเวณตั้งแต่ผิวแคโทดออกมาจนถึงระยะ δ ที่ไม่มีการไอออไนซ์หาได้จากความสัมพันธ์

$$\delta = U_i / E$$

เมื่อวัดกระแส I และ I₀ (จากสมการ 2.10) ที่ระยะระหว่างอิเล็กโทรด d มีค่าต่างๆ กัน จะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การชนไอออไนซ์ชั้นแรกได้ เมื่อเขียนกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราค่า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วน I/I_0 บนสเกลลอ็อกกันค่าระยะแกป d สเกลเชิงเส้นตรงจะได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง

จากสมการ 2.10 คือ $I = I_0 e^{-\alpha d}$ ที่ระยะแกป $d = d_1$ จะได้

$$\alpha_1 = (1/d_1) \cdot \ln(I_1/I_0)$$

และที่ $d = d_2$ จะได้

$$\alpha_2 = (1/d_2) \cdot \ln(I_2/I_0)$$

เมื่อรักษาให้อัตราส่วน E/P มีค่าคงตัว

$$\alpha_1 = \alpha_2$$

และกระแสเริ่มต้น I_0 อาจคำนวณได้จาก

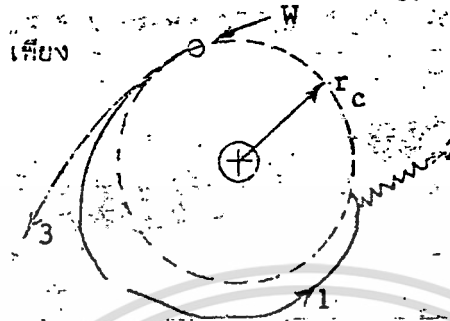
$$\ln I_0 = (d_2 \ln I_1 - d_1 \ln I_2) / (d_2 - d_1)$$

กระแส I_0 มักได้จากการฉายแสง UV บนคะโทด จึงมักเรียกว่ากระแสโฟโต การใช้ความร้อน อาจทำได้แต่ไม่นิยมใช้ เพราะจะให้อิเล็กตรอนเริ่มต้นมีความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอ

2.6 โฟโตไอออไนเซชัน

ในรูป 2.5 แสดงถึงอะตอมไฮโดรเจน มีอิเล็กตรอนหลุดออกมาจากนิวเคลียสซึ่งมีประจุบวก เมื่อป้อนพลังงานให้อะตอมมากขึ้น จะทำให้อิเล็กตรอนแยกตัวห่างออกไปมากขึ้น ทำให้วงโคจรมีรัศมี r_0 โตขึ้นอย่างไรก็ตามอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่อยู่ในวงโคจรที่แน่นอนวงหนึ่ง ในลักษณะเช่นนี้ เรียกว่าอะตอมอยู่ในสภาวะกระตุ้น (excitation) พลังงานจะคงสภาพอยู่ในช่วงเวลาสั้นเพียง 10^{-10} ถึง 10^{-7} วินาทีเท่านั้น แล้วอะตอมก็กลับสู่สภาวะต้นปกติ และขณะเดียวกันก็ปล่อยพลังงานที่ได้รับมาในตอนแรกออกไปในรูปของโฟตอน (Photon) ถ้าวิ่งไปกระทบเข้ากับอะตอมหรือโมเลกุลเป็นกลาง อาจทำให้ตีกระตุกหรือไอออไนเซชัน

การเกิดไอออไนเซชันเนื่องจากโมเลกุลรับพลังงานรังสีโฟตอน เรียกว่า โฟตอนไอออไนเซชัน (photoionization) พลังงานโฟตอนที่ทำให้โมเลกุลของก๊าซเกิดไอออไนเซชันได้คือ



รูปที่ 2.5 อะตอมไฮโดรเจน

1. วงโคจรโตขึ้นเมื่ออยู่ในสภาวะที่กระตุ้น
2. พลังงานโฟตอน
3. ไอออนไนเซชัน อิเล็กตรอนหลุดออกไป

W คือ พลังงานที่ให้กับอะตอม

r_c คือ รัศมีของวงโคจรของอิเล็กตรอน $\sim 10^{-8}$ cm

$$h\nu \leq We \text{ หรือ } W_e$$

เมื่อ h = ค่าคงตัวของ Plank

$$= 6.6257 \times 10^{-34} \text{ Joule-see}$$

ν = ความถี่ของรังสี

จำเป็นต้องใช้แสงที่มีระยะอิสระ λ นั่นคือ

$$\lambda \leq (c_0 \cdot h) / W_e \text{ หรือ } \leq c_0 \cdot h / W_e$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 เทอร์มัลไอออไนเซชัน (thermal ionization)

เทอร์มัลไอออไนเซชันเป็นการไอออไนซ์อะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซด้วยพลังงานความร้อน ในก๊าซที่มีอุณหภูมิสูง ๆ ไอออไนเซชันอาจเกิดขึ้นได้จาก

1. ไอออไนเซชันโดยการชนกันเองของโมเลกุลหรืออะตอม เนื่องจากอุณหภูมิสูงทำให้ความเร็วสูง จึงได้พลังงานจลน์สูง ทำให้เกิดไอออไนเซชันได้
2. ก๊าซร้อนทำให้มีโฟตอนปล่อยออกมา และเกิดโฟตอนไอออไนเซชันขึ้นได้
3. การชนของอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงข้อ 1 และ 2

ตามความเร็วกระจายของแมกซ์เวลล์ อะตอมมีความเร็วต่าง ๆ กัน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของก๊าซที่อุณหภูมิห้อง การเกิดไอออไนเซชันด้วยพลังงานจลน์ที่ได้จากการเคลื่อนไหวของโมเลกุลอากาศเป็นไปได้ยาก จากการคำนวณจะพบว่า ที่บรรยากาศบนพื้นโลกเทอร์มัลไอออไนเซชันจากการชนอาจเกิดที่อุณหภูมิห้องได้สักครั้งทุก ๆ 10^{500} ปี (1) ฉะนั้นส่วนใหญ่จากไอออไนเซชันแบบเทอร์มัลจะเป็นผลสืบเนื่องจากโฟตอน ไอออไนเซชันเกิดที่อุณหภูมิสูง หรือจากอิเล็กตรอนชนโมเลกุล Saha ได้แสดงการคำนวณหาขีดขึ้นการเกิดไอออไนเซชันการชน ในเทอมของความดัน p และอุณหภูมิสัมบูรณ์ดังนี้ $\{10\}$

$$a^2 / 1 - a^2 = 2.4 \times 10^{-4} / p \cdot T^{2.5} e^{-w_i / kT}$$

- เมื่อ T = อุณหภูมิสัมบูรณ์
 p = ความดัน เป็น Torr
 w_i = พลังงานไอออไนเซชัน เป็น eV
 k = ค่าคงตัวของโบลท์ซมันน์ เป็น $eV/^{\circ}K$

และนิยาม a เป็นอัตราส่วนของจำนวนอนุภาคไอออไนซ์ N_i ต่อจำนวนอนุภาคทั้งหมด N นั่นคือ

$$a = N_i / N$$

ที่อุณหภูมิเท่า a มีค่าต่ำกว่า 1 เช่น ไอปรีทอุณหภูมิ $6300^{\circ}K$ และความดัน 760 Torr จากสมการของสฮาจะได้

$$a = 2.4 \times 10^{-4} / p \cdot T^{2.5} e^{-w_i / kT}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 การเกิดไอออนลบ (negative ion formation)

ที่กล่าวมาแล้วไอออนในเซชันเป็นกระบวนการที่อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากโมเลกุลของก๊าซและที่เหลือเป็นไอออนบวก ในโอกาสเดียวกันไอออนลบ อาจเกิดได้โดยอิเล็กตรอนไปเกาะยังโมเลกุล (electron attachment) ทำให้กลายเป็นอนุภาคประจุที่มีมวลเพิ่มขึ้นมีค่าเท่า ๆ กับไอออนบวก เป็นผลให้เคลื่อนที่ได้ช้า นั่นคือ ไอออนลบจะได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าน้อย คือน้อยกว่า W_i โอกาสจะเกิดไอออนในเซชันจากการวิ่งชนของไอออนลบ จึงมีน้อยจึงเท่ากับเป็นการหน่วงการเกิด ไอออนในเซชัน การหน่วงนี้จะมีผลอย่างยิ่งถ้าเกิดขึ้นในบริเวณใกล้คะโทดอันเป็นที่เริ่มต้นของอิเล็กตรอน กล่าวคือ อิเล็กตรอนที่เป็นตัวเริ่มต้นสร้างอะวาลานซ์จะลดลงไป

โมเลกุลก๊าซประเภทฮาโลเจน คือ พวกที่มีองค์ประกอบของ F, Cl, Br, I และ At จะจับอิเล็กตรอนไว้ได้ง่ายและทำให้เป็นไอออนลบที่มั่นคงขึ้น ก๊าซที่มีอิตรอนเหล่านี้รวมอยู่ด้วยจึงเรียกว่า ก๊าซไฟฟ้าลบ (electronegative gasses)

พลังงานทั้งหมดของอะตอมและของไอออนลบจะหาได้จาก ผลรวมของพลังงานเห็นยวดยิตของอิเล็กตรอนทั้งหมดที่อยู่ในอนุภาค พลังงานในอะตอมเป็นกลาง W_z^0 เขียนได้ว่า

$$W_z^0 = \sum_{j=1}^z W_j^0 \tag{2.10}$$

เมื่อ z คือ จำนวนอะตอมมิคนัมเบอร์ (คือ จำนวนของอิเล็กตรอนหรือจำนวนโปรตอน) และเครื่องหมาย 0 แสดงถึงเป็นกลาง

พลังงานของไอออนลบจะได้

$$W_z^- = \sum_{j=1}^z W_j^- + W_{z+1} \tag{2.10a}$$

เครื่องหมาย - แสดงถึงประจุลบของไอออนลบเดี่ยว และ W_{z+1} แสดงถึงพลังยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนที่มากเกาะ

ไอออนลบจะมั่นคงเมื่อ W_z^- มีค่าต่ำกว่า W_z^0 นั่นคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sum_{j=1}^z = W_j^- + W_{z+1} < W_e^{\circ}$$

หรือ

$$\sum_{j=1}^z (W_j^{\circ} - W_j^-) - W_{z+1} > 0 \quad 2.11$$

ด้านซ้ายมือของสมการ 2.11 คือผลต่างของ $(W_e^{\circ} - W_e^-)$ ซึ่งเป็นผลต่างของพลังงานทั้งหมดระหว่างไอออนลบและอะตอมเป็นกลางที่ไม่ตื่นกระตุ้นเรียกว่า พลังงานเกาะตัวของอิเล็กตรอน (electron affinity) บนอะตอมเป็น W_e

$$W_a = \sum_{j=1}^z (W_j^{\circ} - W_j^-) - W_{z+1} \quad 2.12$$

อิเล็กตรอนที่เกาะอยู่จะหลุดออกจากไอออนลบได้เมื่อได้รับควันทัมเท่ากับ $h\nu$ คือ



โดยที่ $h\nu = W_a$

พลังงานเกาะตัวหรือทำให้อิเล็กตรอนที่เกาะออกมาได้มีค่าอยู่ในย่านตั้งแต่ 0.075 eV ถึง

3.8 ดังในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 พลังงานเกาะของอิเล็กตรอนบนอะตอมต่าง ๆ

อะตอม	พลังงานเกาะตัว W_e {eV}
H^-	0.75
F^-	2.0
Cl^-	3.8
O^-	1.465
S^-	2.07

2.9 รูปแบบของการเกิดไอออนลบ (Modes of negative ion formation)

1. ดังที่กล่าวมาแล้วว่า ไอออนลบเกิดขึ้นโดยอิเล็กตรอนไปเกาะบนอะตอม อนุภาคใหม่นี้จะอยู่ในสภาพดังกล่าวชั่วระยะเวลาหนึ่งได้ พลังงานของไอออนลบจะต้องมีค่าน้อยกว่าของอนุภาคเป็นกลาง การเปลี่ยนสถานะภาพจะเกิดขึ้นเมื่อพลังงานถูกแบ่งออกไปจากอนุภาค ดังนั้นไอออนลบเสถียร มีพลังงานน้อยกว่าของอนุภาคก่อนที่อิเล็กตรอนจะมาเกาะ พลังงานส่วนเกินจะถูกปล่อยออกมาเป็นคว้นตัม ในขณะที่อิเล็กตรอนไปเกาะอะตอม กลไกการก่อตัวของไอออนลบในลักษณะนี้เรียกว่า การเกาะของอิเล็กตรอนโดยการปล่อยรังสี (radiative attachment) และกระบวนการนี้กลับสภาพเดิมได้นั้นคืออิเล็กตรอนที่เกาะอยู่จะหลุดออกได้เมื่อได้รับพลังงานรังสีซึ่งเรียกว่า ปลดอิเล็กตรอนด้วยโฟตอน (photodetachment) กระบวนการนี้อาจเขียนได้ว่า



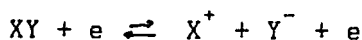
2. การเกาะของอิเล็กตรอนบนอะตอมเป็นไอออนลบโดยกระบวนการแยก (dissociative attachment) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนวิ่งชนโมเลกุล พลังงานส่วนที่เกินในที่นี้จะไม่ปล่อยออกไป แต่ทำให้เกิดแยกออกเป็น 2 อะตอม คือ เป็นอนุภาคเป็นกลางหนึ่ง และ อีกอะตอมหนึ่งเป็นไอออนลบ กระบวนการนี้ย้อนกลับได้และเขียนได้ว่า



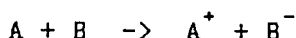
กระบวนการย้อนกลับเรียกว่า การปลดอิเล็กตรอนแบบแยก (accoeiative detachment)

* = ตื่นกระตุ้น (excitation)

3. ไอออนลบอาจเกิดจากผลของการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับโมเลกุล โดยที่โมเลกุลแยกออกเป็นอนุภาคบวกและอนุภาคลบ โดยไม่มีอิเล็กตรอนวิ่งไปเกาะบนอะตอม แบบนี้เรียกว่า แบบไอออนคู่ (ion pair) และเป็นกระบวนการที่ย้อนกลับไม่ได้ คือ



4. ไอออนลบเกิดจากการที่อนุภาคหนึ่ง ๆ วิ่งชนกันเอง โดยไม่มีอิเล็กตรอนอิสระจะมีการถ่ายเทประจุเกิดขึ้น แยกออกเป็นไอออนคู่ คือ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 สัมประสิทธิ์การเกาะตัวของอิเล็กตรอนเป็นไอออนลบ (Attachment coefficient)

การเกาะตัวของอิเล็กตรอนบนอะตอมกลายเป็นไอออนลบมีผลอย่างมากต่อลักษณะการเกิดเบรคดาวซึ่งกำหนดหรืออธิบายได้ด้วยสัมประสิทธิ์การเกาะตัวของอิเล็กตรอน n ซึ่งมีนิยามว่าเป็นความสัมพัทธ์ของการลดจำนวนอิเล็กตรอน N_e เมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนอิเล็กตรอนต่อหน่วยระยะทางเคลื่อนที่ในปริมาตรของก๊าซ นั่นคือ

$$dN_e = -N_e n dx$$

$$n = -(1/N_e) \cdot dN_e / dx$$

ดังนั้นสัมประสิทธิ์ n จึงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับสัมประสิทธิ์การเกิดไอออนในแก๊สประจุลบ (electro negative gas) จะมีอิเล็กตรอนไปเกาะจับบนอะตอม ค่าสัมประสิทธิ์ไอออนในแก๊สซึ่งผลจะเขียนได้ว่า

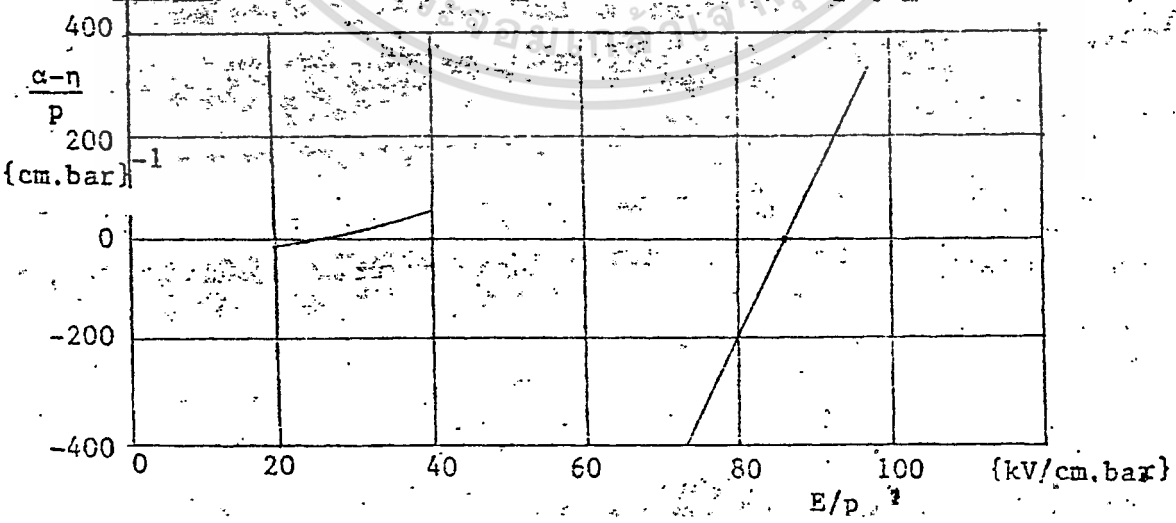
$$\bar{\alpha} = \alpha - n$$

ซึ่งเขียนในรูปสมการทั่วไป คือ

$$\bar{\alpha}/P = (\alpha - n)/p \tag{2.13}$$

ตัวอย่างการเกาะของอิเล็กตรอนกลายเป็นไอออนลบ ดังตัวอย่างแก๊ส SF_6 ซึ่งเป็นแก๊สที่มีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงเมื่อเทียบกับของอากาศ

- ในแก๊ส SF_6 ค่า $\bar{\alpha} = 0$ เกิดขึ้นที่ $E/P = 87 \text{ kV/cm.bar}$
- ในอากาศ (มี O_2) $\bar{\alpha} = 0$ เมื่อ $E/P = 27 \text{ kV/cm.bar}$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนรูปที่ 2.6 สัมประสิทธิ์ไอออนในแก๊สซึ่งผลของ SF_6 นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11 การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะ

การเกิดไอออไนเซชันโดยการที่อิเล็กตรอนวิ่งชนโมเลกุลหรืออะตอมของก๊าซ ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากโมเลกุลซึ่งจัดเป็นกระบวนการเบื้องต้นหรือกระบวนการ α นับเป็นกระบวนการที่สำคัญในการสร้างจำนวนอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มทวีคูณ แต่ตามลำดับกระบวนการเบื้องต้นนั้นไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดเบรคดาวนได้ หากแต่ต้องมีกระบวนการอื่นเสริมจำนวนอิเล็กตรอนรวมอยู่ด้วย การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะ Electron emission from metallic surface ถือได้ว่าเป็นกระบวนการที่สำคัญที่ช่วยเพิ่มทวีคูณจำนวนอิเล็กตรอนอิสระนำไปสู่การเกิดเบรคดาวนได้

กลไกการปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะนั้นมีด้วยกันมากหลายวิธี การจะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาได้นั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และสนามไฟฟ้าที่ผิวของโลหะ ซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดของแต่ละกลวิธีดังต่อไปนี้

2.12 การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะโดยการชนของไอออนบวก

อิเล็กตรอนจะหลุดกระจายออกจากโลหะได้ จะต้องได้รับพลังงานอย่างน้อย เท่ากับ $W_u = eU_u$ (เวอรัคฟังก์ชัน) ของโลหะที่ใช้ทำแคโทดนั้น พลังงานดังกล่าวได้จาก

1. ไอออนบวกอันเกิดจากกระบวนการเบื้องต้น ที่อิเล็กตรอนวิ่งชนโมเลกุลหรืออะตอมทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมา เหลือไอออนบวกวิ่งเข้าหาขั้วโนด โดยเหตุที่ไอออนบวกมีมวลมาก (ประมาณ 1836 เท่าของมวลอิเล็กตรอน) จึงเคลื่อนที่ได้ช้า พลังงานเฉลี่ยที่ไอออนบวกได้จากสนามไฟฟ้าจึงมีน้อย ไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดไอออไนเซชัน โดยการชนของไอออนบวกกับโมเลกุลของก๊าซได้ แต่ไอออนบวกมีพลังงานค้ำยพอที่จะทำให้ อิเล็กตรอนหลุดกระจายออกจากผิวแคโทดได้เมื่อไอออนบวกวิ่งกระทบ เงื่อนไขที่จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาได้ดังกล่าว พลังงานที่ไอออนบวกมีอยู่นั้นจะต้องมากกว่า W_a คือ

$$1/2 mv^2 \geq W_a = eU_u$$

เมื่อ $W_a =$ เวอรัคฟังก์ชันของโลหะแคโทด

2. โมเลกุลที่อยู่ในสภาพตื่นกระตุนในอะวาลานซ์ปล่อยพลังงานโฟตอนออกมาในขณะที่อะตอมคืนเข้าสู่สถานะภาพพื้นฐาน (Ground status) โดยอิเล็กตรอนกลับเข้าสู่วงโคจรเดิม พลังงานโฟตอนตกลงบนแคโทดทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากแคโทด และอาจทำให้เกิดอะวาลานซ์ใหม่ได้ กลวิธีการปล่อยอิเล็กตรอนด้วยพลังโฟตอน (photon emission)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ด้วยลิขสิทธิ์ของหน่วยงานนี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. โมเลกุลที่อยู่ในสถานะภาพเมตาเสถียร (metastable) อาจแพร่กระจายกลับไปหา
 คะโถดแล้วทำให้อิเลคตรอนหลุดออกมาได้เมื่อโมเลกุลนั้นวิ่งไปกระทบกะโถด

อิเลคตรอนที่เกิดขึ้นใหม่ตามกลวิธีทั้งสามนี้จัดเป็นผลสืบเนื่อง จึงเรียกระบวนการเหล่านี้ว่าเป็น
 กระบวนการเบื่องสอง (secondary process)

กระบวนการทั้งสามกลวิธีนี้กำหนดด้วยสัมประสิทธิ์ δ ซึ่งนิยามได้ว่าเป็นจำนวนอิเลคตรอนเฉลี่ย
 ที่ได้จากระบวนการเบื่องต้น (primary collisional process) นั่นคือต่อการชนไอออนไนซ์ใน
 แก๊พหนึ่งครั้ง

$$\delta = \delta_1 + \delta_{ph} + \delta_m$$

โดยที่ δ_1 เป็นผลจากการชนของไอออนบวก

δ_{ph} เป็นผลจากโฟตอน

δ_m เป็นผลจากเมตาเสถียร

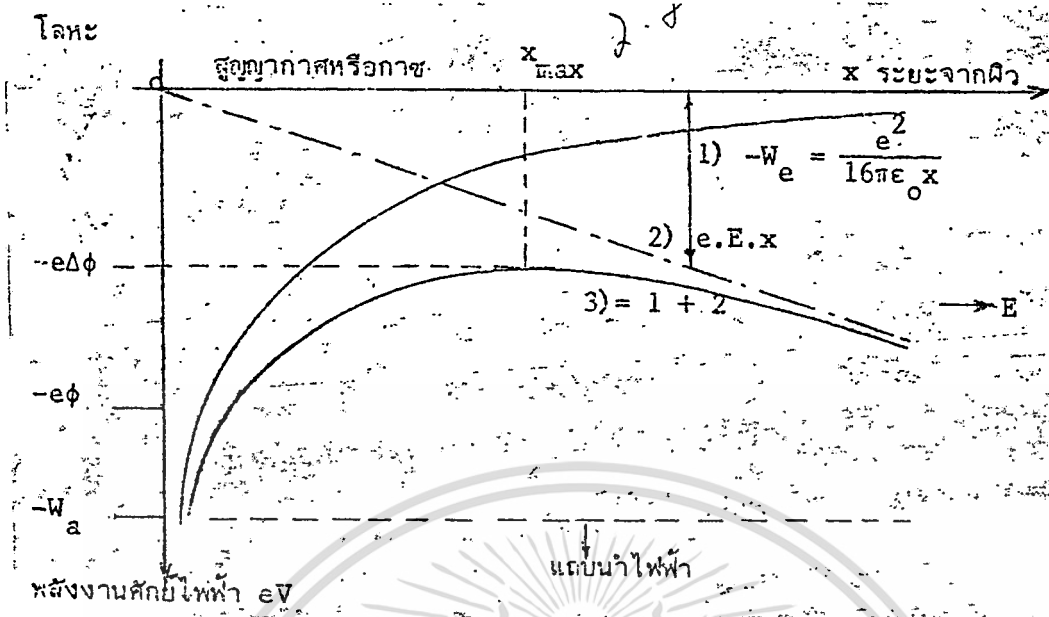
(δ นี้เรียกว่าสัมประสิทธิ์ไอออนไนซ์ขั้นที่สองของทาวน์เซนต์ (Townsend ionization
 coefficient))

2.13 การปล่อยอิเลคตรอนออกจากกะโถดโดยสนามไฟฟ้า

ผลจากสนามไฟฟ้าที่ป้อนจากภายนอกเข้าไปจะทำให้ อิเลคตรอนหลุด หรือปล่อยออกมาจากผิว
 โลหะได้นั้นจะต้องมีพลังงานมากพอ นั่นคือสนามไฟฟ้าจะต้องมากกว่าค่าที่ต้องใช้สำหรับรวบรวมหรือดึง
 อิเลคตรอนที่ปล่อยออกมาด้วยพลังงานความร้อน (thermionic emission)

เมื่อพิจารณากำแพงศักย์ที่แนวต่อระหว่างโลหะกับสุญญากาศ ที่ปราศจากสนามไฟฟ้าภายนอก E
 ศักย์ไฟฟ้าจะเป็นศูนย์ที่ระยะห่างจากผิวโลหะมาก ๆ ดังในรูปที่ 2.7 ลักษณะของเส้นกราฟศักย์ไฟฟ้า

สามารถคำนวณได้



รูปที่ 2.7 กำแพงศักย์ต่ำลงเนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอก

1. พลังงานเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้าภายนอก
2. พลังงานเนื่องจากสนามไฟฟ้าที่ป้อน
3. พลังงานทั้งหมด

ถ้าคำนวณสนามไฟฟ้าของอิเล็กตรอนมีประจุ $-e$ ที่หลุดออกมาจากผิวโลหะกับประจุ $+e$ ที่อยู่ลึกลงในเนื้อโลหะที่อยู่ห่างจากผิวโลหะ x นั่นคือผิวโลหะเป็นผิวศักย์ไฟฟ้าเท่า โดยอาศัยกฎของคูลอมบ์ จะได้แรงระหว่างอิเล็กตรอนเป็น

$$F(x) = -e^2 / 4\pi\epsilon_0 (2x)^2 = -e^2 / 16\pi\epsilon_0 \cdot x^2 \tag{2.14}$$

เมื่อ $x \rightarrow \infty$ จะได้ $F = 0$ เรียกว่าอิเล็กตรอนอยู่ที่ตำแหน่งมีพลังงานศักย์เป็นศูนย์ $W_e = 0$ ที่ระยะ x จะมีพลังงานศักย์ไฟฟ้า

$$W_e = \int_{\infty}^0 F(x) dx = -e^2 / 16\pi\epsilon_0 \cdot x^2 \tag{2.15}$$

ซึ่งจะได้เส้นกราฟเป็นรูปไฮเพอร์โบลิก

ผลของสนามไฟฟ้าคงตัว E ที่มีแนวตั้งฉากกับผิวโลหะ จะได้พลังงานศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากสนามไฟฟ้านี้

$$W_e = -eEx \tag{2.16}$$

เอกสารนี้จะมีลักษณะกราฟเป็นเส้นตรง (เส้นที่ 2 ในรูป 2.7) จะได้พลังงานศักย์ไฟฟ้าทั้งหมดจากสองไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงนี้เป็น

$$W_{\text{e}} = W_{\text{e}} + W_{\text{e}}$$

นั่นคือ

$$W_{\text{e}} = -e^2 \sqrt{16\pi\epsilon_0} x - eEx \quad 2.17$$

ค่า W_{e} แสดงในกราฟเส้นที่ 3 ในรูป 2.7 ซึ่งเป็นผลบวกของ $W_{\text{e}} + W_{\text{e}}$ จะเห็นได้ว่าถ้ากำแพงศักย์ ลดลงเท่ากับ $-\Delta(e\phi)$ จะได้ค่า W_{e} จะมีค่าสูงสุด $e\phi - \Delta(e\phi)$ เป็นที่ระยะ $x = x_{\text{max}}$ หาได้โดยดิฟเฟอเรนเชียล W_{e}/dx แล้วให้เท่ากับศูนย์ จะได้ค่า x_{max} และ $\Delta(e\phi)$ คือ

$$dW_{\text{e}}/dx = \frac{e^2 \sqrt{16\pi\epsilon_0} x^2}{m} - eE = 0$$

$$\text{จะได้ } x_{\text{max}} = \frac{e\sqrt{16\pi\epsilon_0} E}{m} \quad 2.18$$

และพลังงานศักย์สูงสุดได้จากการแทนค่า x_{max} ลงในสมการ 4.32 เป็น

$$W_{\text{e(max)}} = -e\sqrt{\frac{eE}{4\pi\epsilon_0}}$$

$$W_{\text{e(max)}} = -e\sqrt{2 \frac{eE}{\pi\epsilon_0}} \quad 2.19$$

ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\Delta(e\phi)$ ตามนิยาม ดังนั้นค่าของเวอร์คฟังก์ชันยังผลเมื่อมีสนามไฟฟ้า E จะได้

$$e\phi - \Delta(e\phi) = e\{\phi - \frac{eE}{4\pi\epsilon_0}\}$$

และความหนาแน่นกระแสในตัวเนื่องจากอิเล็กตรอนที่ปล่อยออกมาตามสมการ 4.28 จะได้

$$-(e\sqrt{kT})\{\phi - \frac{eE}{4\pi\epsilon_0}\}$$

$$J = AT^2 e \quad 2.20$$

ซึ่งเรียกว่าสมการของช็อตทกี (Schottky equation)

ถ้าให้กระแสที่เป็น J_0 ที่ $E = 0$ กระแสในสมการ 2.20 จะเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$e\sqrt{kT} \cdot eE\sqrt{4\pi\epsilon_0}$$

$$J = J_0 e \quad 2.20a$$

ถ้าให้กระแสที่เป็น J มีค่ามากกว่า J_0 ที่อุณหภูมิห้องได้ สนามไฟฟ้า E จะต้องมีค่าสูงถึง 10... ถึง 100..... MV/cm ซึ่งในทางปฏิบัติลักษณะของอิลคโตรดใช้งานที่จะมีความเครียดสนามไฟฟ้านั้นอาจเกิดขึ้นที่สนามไฟฟ้าต่ำกว่าที่แสดงไว้ข้างต้นได้ Fowler และ Nordheim* ได้อธิบายปรากฏการณ์นี้เป็นผลของลักษณะสมบัติทางเวฟเมคานิกส์ของอิลคตรอน สามารถวิ่งทะลุกำแพงศักย์ที่ x_{tunnel} ที่

เหลือเพียงบางๆ เนื่องจากสนามไฟฟ้าที่ข้อนเข้าไป ซึ่งเรียกว่าผลอุโมงค์ (Tunnel effect) จึงเป็นไปได้ว่าอิลคตรอนในของแข็งสามารถอาศัยผลอุโมงค์วิ่งทะลุกำแพงศักย์ออกมาได้เมื่ออิลคตรอนมีพลังงานมากกว่า ψ_0 หรือมากกว่าระดับเฟอร์มี (Fermi level) ในสภาวะภาคความเครียดสนามไฟฟ้า เพียง 1 MV/cm ก็สามารถทำให้อิลคตรอนหลุดกระจายออกมาได้ เบรคดาวนในกาซอาจเกิดขึ้นเนื่องจากสนามไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นเฉพาะแห่ง เนื่องจากไอออนก่อตัวเป็นสตรีมเมอร์ขึ้นที่คะโกล

2.14 กลไกการเกิดเบรคดาวน (Breakdown mechanisms)

การเกิดเบรคดาวนในกาซ หมายถึงการเปลี่ยนสภาวะการฉนวนไปสู่สภาวะนำไฟฟ้า คือ เป็นช่วงต่อ (transition) ระหว่างสภาวะที่กระแสไหลประทังตัวเองไม่ได้ (nonself-sustained) ไปสู่สภาวะที่กระแสไหลประทังตัวเองได้ (self-sustained) ช่วงต่อดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้เมื่อในแกปมีจำนวนอิลคตรอนหรือไอออนในอะวานลานซ์มากพอ จนทำให้แกปมีสภาพนำไฟฟ้าสูง และโดยทฤษฎีแล้วกระแสไหลเป็นค่าอนันต์ คือ กระแสจะถูกจำกัดด้วยค่าของวงจรรภายนอกเท่านั้น และกระแสที่ไหลในแกปนี้จะไหลต่อไปได้ถึงแม้ว่าจะตัดต้นกำเนิดรังสีส่องคะโกล (เช่น รังสีอัลตราไวโอเลต) เพื่อสร้าง N_0 และ I_0 ออก หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ แรงดันที่ทำให้เกิดเบรคดาวนคงเดิมไม่ว่า N_0 หรือ I_0 จะต่างกันก็ตามดังในรูป 4.6 b. ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ของกระแสไหลในแกปกับแรงดันที่ป้อน จะเห็นได้ว่าระดับกระแสอิมิตัว I_{01}, I_{02} มีระดับต่างกันขึ้นอยู่กับความเข้มของรังสีส่องคะโกลที่ระดับกระแสอิมิตัว I_0 ค่าหนึ่ง ขนาดแรงดันที่ป้อนไม่มีผลต่อค่ากระแสที่ไหลในแกป จนถึงค่าแรงดันหนึ่งกระแสจะเริ่มเพิ่มขึ้นเป็นเอกซิไปแนนเซียลในย่านนี้เรียกว่า ทาวนเซนต์เอติสซาร์จ ถ้าเพิ่มแรงดันต่อไปอีกกระแสเพิ่มขึ้นเกินเอกซิไปแนนเซียลยูติลิตีจนแรงดันถึงค่าหนึ่งเรียกว่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เบรคคาว์น เกิดขึ้นที่แรงดันเดียวกันไม่ว่า I_0 จะเป็นเท่าใด และกระแสไหลในแก๊ปประทั้งตัวเองได้ จำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นทำให้กระแสไหลประทั้งตัวเองอยู่ได้นั้น เกิดจากกระบวนการต่าง ๆ ที่กล่าวแล้วข้างต้น ซึ่งมีกระบวนการที่สำคัญได้แก่

1. อิเล็กตรอนขั้นที่สอง (Secondary electron) เป็นอิเล็กตรอนปล่อยจากคะโทดโดยการวิ่งชนของไอออนบวก

2. ไอออนไนเซชันในแก๊สเนื่องจากพลังฟิโตน

3. ปล่อยอิเล็กตรอนออกจากคะโทดโดยฟิโตนไฟฟ้า (Photoelectric emission)

2.15 ชนิดโลหะอิเล็กโตรดมีผลต่อแรงดันเบรคคาว์น

เบรคคาว์นในสูญญากาศต้องอาศัยการปล่อยอิเล็กตรอนจากคะโทดด้วยสนามไฟฟ้า และนั่นชนิดของโลหะที่เป็นอิเล็กโตรดจึงมีผลอย่างมากต่อค่าแรงดันเบรคคาว์น ดังเช่นค่าที่แสดงในตารางที่ 2.4

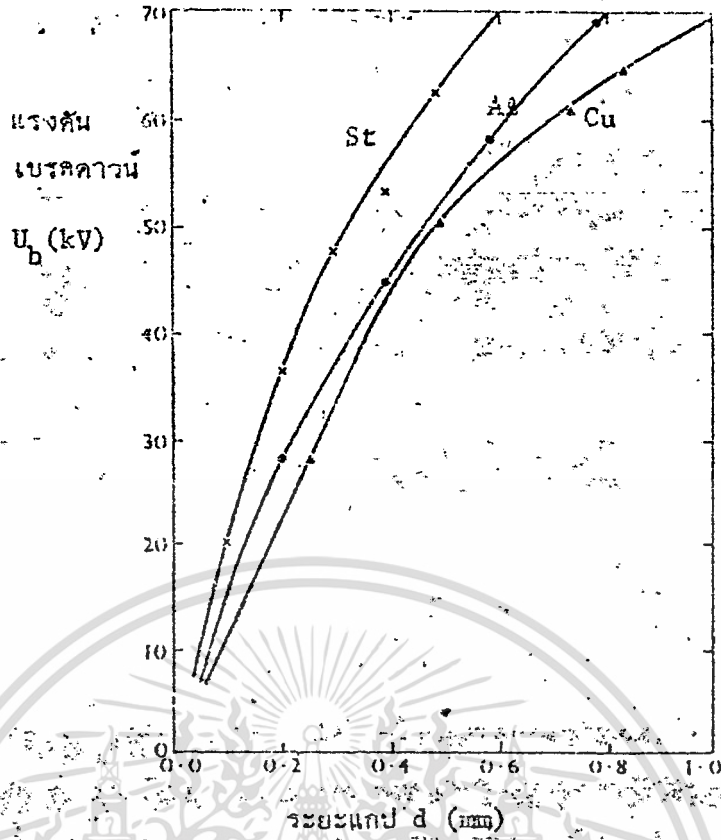
ตารางที่ 2.4 แรงดันเบรคคาว์นในสูญญากาศขึ้นอยู่กับชนิดโลหะ

ชนิดโลหะที่ทำเป็นอิเล็กโตรด	แรงดันเบรคคาว์นที่ระยะแก๊ป 1 mm. เป็น kV
Steel	122
Stainless steel	120
Nickel	96
Aluminium	41
Copper	37

ตัวเลขจาก Alston , L.L., p.67

ในรูปที่ 2.8 แสดงค่าแรงดันเบรคคาว์นกระแสสลับในเทอมของระยะแก๊ป ที่อิเล็กโตรดทำด้วยโลหะต่างชนิดที่จะเห็นได้เด่นชัดว่าแรงดันเบรคคาว์นในสูญญากาศ ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่ทำค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กโตรด



รูป 2.8 แรงดันเบรคควานในสูญญากาศในเทอมของระยะแกปขึ้นอยู่กัชนิดของโลหะอิเล็กโตรด

2.16 เบรคควานในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (Breakdown in nonuniform field)

ในแกปที่มีแฟคเตอร์สนามไฟฟ้า (field utilization factor $n^* = E_{uv}/E_{max}$)

มากกว่า 20 % ขึ้นไป การเกิดเบรคควานในอากาศจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับที่เกิดในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ' แต่ถ้านสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากกว่านี้ ($n^* < 20\%$) จะมีปรากฏการณ์แตกต่างไปจากสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอเกิดขึ้นจะมีโคโรนาเกิดขึ้นในบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงและเกิดขึ้นที่แรงดันต่ำกว่าแรงดันเบรคควานโคโรนานี้อาจคงสภาพอยู่ได้ในบางจุดโดยไม่เกิดเบรคควาน จากการวิจัยลักษณะเบรคควานในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอของกาซ SF₆ ที่ความดันตั้งแต่ 0.2 บาร์ ถึง 6 บาร์ จะพบว่าในสนามไฟฟ้าทุกรูปแบบทุกความดันกาซ ถ้าแฟคเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่ามากกว่า 40 % ($n^* \geq 40\%$) โคโรนาจะไม่เกิดขึ้นก่อนเบรคควานคือจะเกิดเบรคควานโดยตรง'

สนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดที่มี n^* ยิ่งต่ำความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (E_{max}) ที่ผิวอิเล็กโตรดรัศมีน้อยจะยิ่งมีค่ามาก และความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็ว ฉะนั้นไอออนเซชันจะเกิดขึ้นได้เฉพาะบริเวณผิวอิเล็กโตรดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงเท่านั้น ที่ระยะห่างออกไปความ

เครียดสนามไฟฟ้าต่ำเกินไปที่จะเกิดไอออนเซชัน จึงไม่อาจเกิดเบรคควานได้ ฉะนั้นจะมีโคโรนาไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดขึ้นที่บริเวณผิวอิเล็กโตรดที่มีรัศมีเล็ก ก่อนที่เกิดเบรคดาวน และจัดเป็นเบรคดาวนแบบโคโรนา (corona breakdown)

เมื่อมีโคโรนาเกิดขึ้น สนามไฟฟ้าในแก๊สจะบิดเบือนไปจากสนามไฟฟ้าที่เป็นแบบอิเล็กโตรสแตติกส์หรือสนามไฟฟ้าที่คำนวณจากเรขาคณิตของแก๊ส แรงดันเบรคดาวนแบบโคโรนา จะยุ่งยากต่อการคำนวณ อาจกล่าวได้ในเชิงสัมพันธ์เปรียบเทียบทั่ว ๆ ไปได้ ซึ่งจะได้กล่าวในข้อต่อ ๆ ไป อย่างไรก็ตามแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดนั้นสามารถคำนวณได้ ถ้าทราบรูปลักษณะของสนามไฟฟ้าในแก๊สในที่นี้จะได้แสดงวิธีการคำนวณแรงดันเบรคดาวนโดยตรง หรือแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดในอากาศและก๊าซ SF_6 ให้ดูเป็นตัวอย่างในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมีความสัมพันธ์ของแรงดันเบรคดาวนกับผลคูณ $p \cdot d$ (กฎของพาสเซน) ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอความสัมพันธ์ลักษณะนี้จะเป็น $U_{pr} = f(p, r)$ ซึ่งเรียกว่ากฎแห่งความคล้ายคลึงกัน และจะชี้ให้เห็นว่าในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอแรงดันเริ่มต้นขึ้นอยู่กับชั่วแรงดันที่ป้อนให้อิเล็กโตรดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด

2.17 ค่าแรงดันเบรคดาวนในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

จากที่ได้แสดงมาในสมการ (2.9) จะเห็นได้ว่า อยะวานลานซ์ของอิเล็กตรอนได้จากการอินทิเกรต $\int \alpha dx$ ถ้าสนามไฟฟ้าเป็นแบบสม่ำเสมอ คือ E มีค่าเท่ากันตลอดแก๊ส และ α ก็มีค่าคงตัว การอินทิเกรตจะทำได้ง่าย โดยมีขอบเขตของการอินทิเกรตเท่ากับระยะของแก๊ส d นั่นคือ

$$\int_0^d \alpha dx = \alpha d$$

ตามเงื่อนไขเบรคดาวนของทาวน์เซนต์ คือ $\delta(e^{\alpha d} - 1) = 1$ และเงื่อนไขการเกิดสตรีมเมอร์ของ Rathar เมื่อจำนวนอิเล็กตรอนในอยะวานลานซ์วิกฤตเท่ากับ N_c จึงเขียนได้ว่า

$$\int_0^d \alpha dx = \alpha d = \ln(1/\delta + 1) = \ln N_c = K \quad 2.21$$

N_c ตามข้อเสนอของ Rathar เท่ากับ 10^{11} ฉะนั้น K มีค่าเท่ากับ 18 แต่ความเป็นจริงค่า K อยู่ในช่วง 10 ถึง 20 ขึ้นอยู่กับความดันก๊าซ อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงของค่า K ในน้ำไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงนี้ไม่มีผลสำคัญต่อแรงดันเบรคตาวร์น ค่า $K = 18$ จึงเป็นที่ยอมรับและใช้ในการคำนวณกันอยู่ทั่วไป

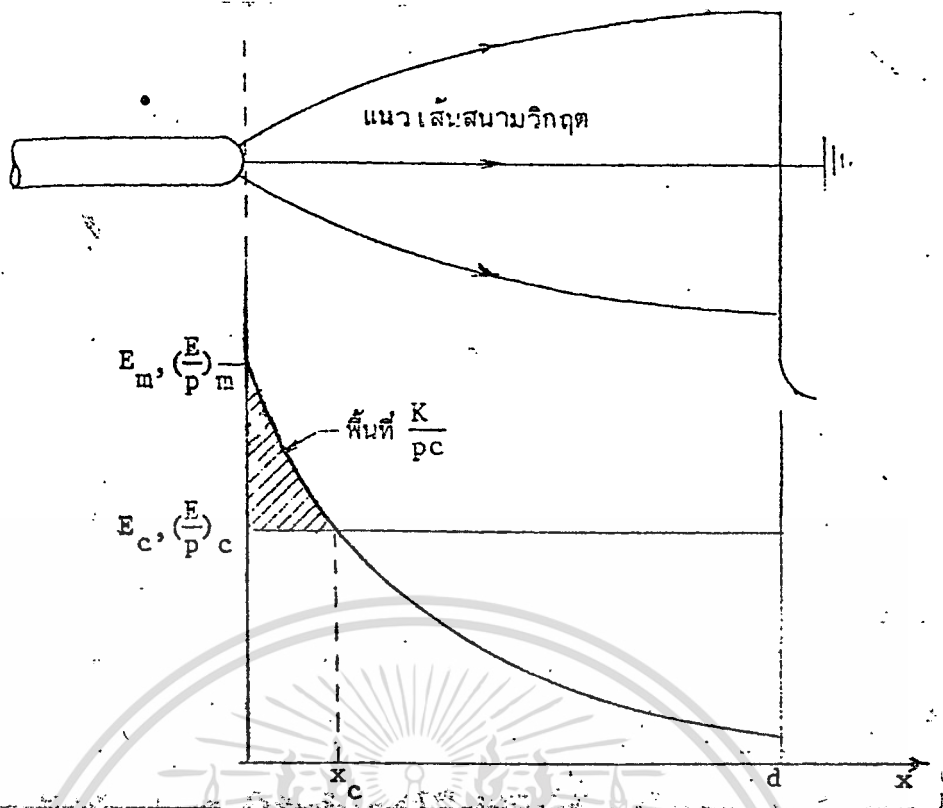
ในกรณีของสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (slightly nonuniform field) เป็นที่ยอมรับกันทั่วไปแล้วว่าสมการ 2.21 นี้สามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าแรงดันเบรคตาวร์นของก๊าซในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอได้ ถ้าหากทราบสนามไฟฟ้ากระจาย (field distribution) $E(x)$ ของแกปการอินทีเกรทจะไปตามแนวเส้นสนามไฟฟ้าที่มีความเครียดสูงสุด และเนื่องจาก α ขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้าคือ $\alpha = f\{E(x)\}$ ฉะนั้นขอบเขตการอินทีเกรทจะเท่ากับความยาวของเส้นสนามไฟฟ้าที่สั้นที่สุดระหว่างอิเล็กโตรด หรือเท่ากับอะวอลานซ์วิกฤต x_c ดังนั้น สมการ 2.22 จึงเป็น

$$\int_0^{x_c} \alpha dx = \ln N_c = K \tag{2.22}$$

และแทนค่า α อยู่ในฟังก์ชันของ $E(x)$ และ p (ความดันก๊าซ) จึงเขียนได้ว่า

$$\int_0^{x_c} \alpha\{E(x), p\} dx = K \tag{2.23}$$

จุดเริ่มต้นอินทีเกรทจะเริ่มจากจุดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด E_m โดยทั่วไปก็คือที่ผิวของอิเล็กโตรดนั่นเอง จุดปลายของการอินทีเกรทก็คือที่ $\alpha = 0$ เป็นจุดที่ความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤต E_c ดังในรูป 2.9



รูปที่ 2.9 ระยะอวาลานซ์วิกฤตในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ที่ความดันอากาศเท่ากับบรรยากาศ โคโรนาจะเบรคดาว์น ฉะนั้น การหาตามเงื่อนไขในรูปที่ 2.9 นั้นใช้หาได้เฉพาะแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด U_c เท่านั้น (corona inception voltage) และความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด E_m ก็คือ E_c ส่วนแรงดันโคโรนาเบรคดาว์นนั้นหาตามวิธีนี้ไม่ได้ เพราะประจุต่างจากโคโรนาทำให้สนามไฟฟ้าในแถบปิดเบี่ยงไปจากค่า ตามเรขาคณิต

ค่า α มีความสัมพันธ์กับความดัน p และสนามไฟฟ้า E คือ $\alpha/p = f(E/p)$ ดังในสมการ 2.8 ซึ่งค่าแต่ละชนิดจะมีฟังก์ชันต่างกัน เช่น ฟังก์ชันของอากาศและก๊าซเอกซาฟลูออไรด์ (SF_6) อาจเขียนความสัมพันธ์ α/p แบบทั่วไปได้ว่า

$$\alpha/p = c \{ (E/p) - (E/p)_c \}^n \tag{2.24}$$

* E_c ความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤต หมายถึง ค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของก๊าซเมื่อ c เป็นค่าคงตัว

$(E/p)_c$ เป็นสนามไฟฟ้าวิกฤตต่อความดัน (ดูรูปที่ 2.9)

n เป็นเลขยกกำลังขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซ เช่นอากาศ $n = 2$ และของ SF_6 $n = 1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่าแรงดันเบรคดาวنهاได้จากค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเบรคดาวน E_b ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะสนามไฟฟ้าในแก๊ป โดยใช้สมการ 2.6 คือ

$$U_b = E_b \cdot d \cdot n^* \quad 2.25$$

เมื่อ d คือ ระยะแก๊ป

n^* คือ แฟคเตอร์สนามไฟฟ้า

2.18 ค่าแรงดันเบรคดาวนในอากาศ

๑) ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ $n^* = 1$ ฉะนั้นจากสมการ 2.25 จะได้

$$U_b = E_b \cdot d$$

ค่า E_b ของอากาศ ซึ่งเขียนแทนได้ด้วยสมการ

$$d(E_b - E_c)^2 = K/C \quad 2.26$$

โดยที่ $E_c = 24.4 \text{ kV/cm}$

$$K/C = 45.1 \text{ kV}^2/\text{cm}$$

ฉะนั้นจะได้ $E_b = 24.4 + 6.72\sqrt{d} \text{ kV/cm}$ 2.27

d เป็น cm

จากเงื่อนไขเบรคดาวน

$$\alpha d = K$$

ฉะนั้นจากสมการ 2.26 จะได้

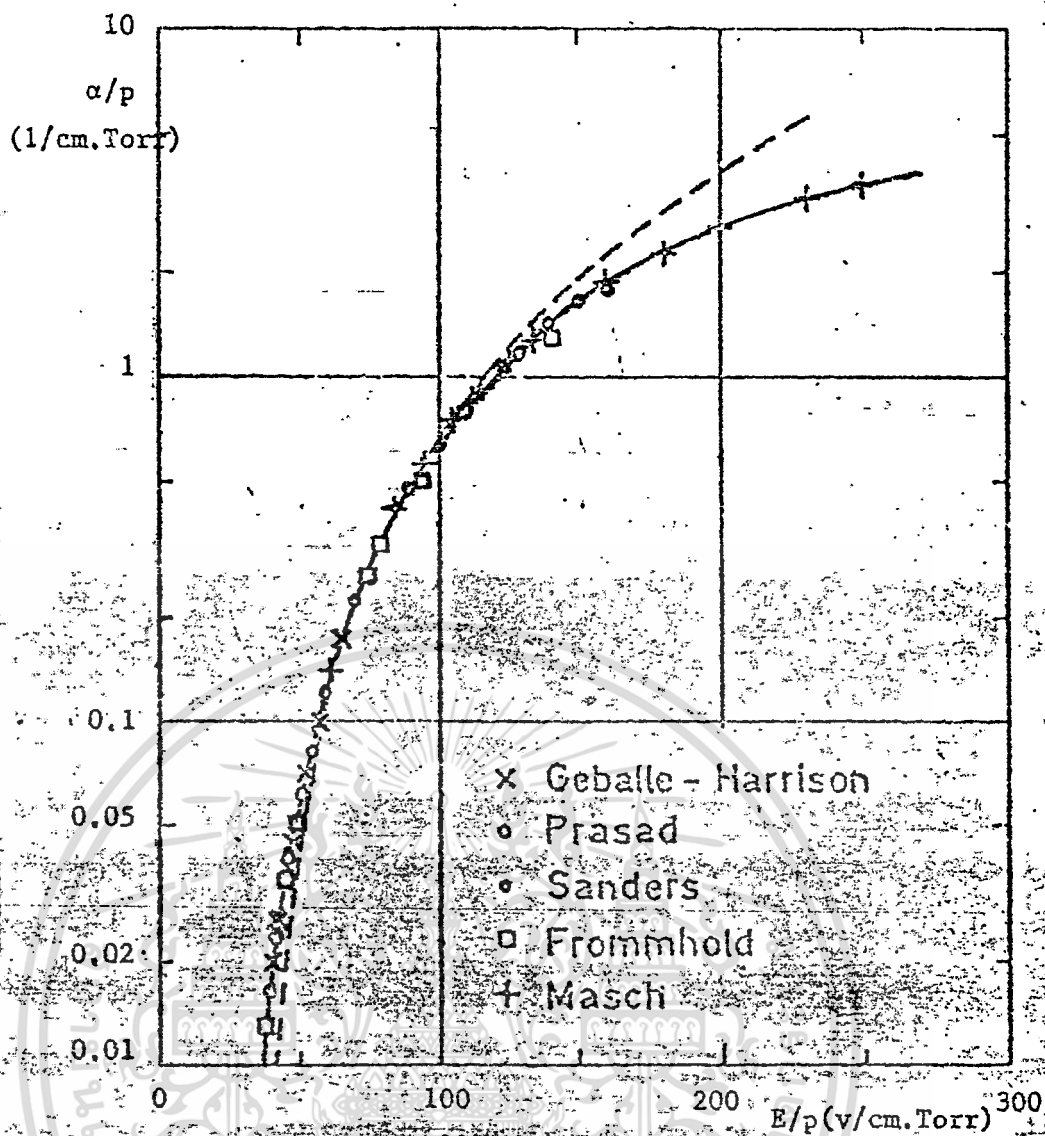
$$\alpha = C(E - E_c)^2 \quad 2.28$$

ซึ่งสอดคล้องกับสมการของชูมันน์ (Schumann's equation) ที่ได้จากเส้นกราฟการวัด

สัมประสิทธิ์ α/p ของอากาศในรูป 2.10 จะได้ค่า $C = 0.191 \text{ kV}^{-2}$ และ E_c เท่ากับ 24.4 kV/cm ฉะนั้นจากสมการทั่วไป 2.24 จึงเขียน α/p ของอากาศได้ว่า

$$\alpha/p = 0.191 \{E/p - 24.4\}^2 \quad 2.29$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$\alpha/p = \exp\{pol(E/p)\}$

สมการของชุมชน $\alpha/p = 1.43 \cdot 10^{-4} (E/p - 32.5)^2$

รูปที่ 2.10 สัมประสิทธิ์ไอออไนเซชันของอากาศ

ที่ความดันอากาศ p และระยะแกป d (สนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ) ค่าแรงดันเบรคดาวน์อาจหาได้โดยใช้เงื่อนไข $\alpha d = K$ แทนในสมการ 2.29 จะได้

$$U_b = 24.4 pd + 2.29 \sqrt{(pd) + K} \tag{2.30}$$

Zaengl ได้วิเคราะห์ค่า K จากเส้นกราฟ α/p ของชุมชน และได้ค่า K ของอากาศเท่ากับ 8.63 ฉะนั้นสมการ 2.30 จึงเป็น

$$U_b = 24.4 pd + 6.72 \sqrt{(pd)} \text{ kV} \tag{2.31}$$

ค่าแรงดันเบรคดาวน์ที่หาจากสมการนี้ถูกต้องใกล้เคียงกันมากกับค่าที่ได้จากการทดลอง ระเบียบขั้นตอนการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บ. ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

$$x_c$$

จากสมการ 2.23 คือ $\int \alpha \{E(x), p\} dx = K$ ถ้าทราบฟังก์ชันของ $E(x)$ ก็จะสามารถหาค่าแรงดันเบรคดาวน์ได้ หรือ หาจากความสัมพันธ์ในสมการ $U_b = E_b \cdot d \cdot n^*$ เมื่อทราบและรูปลักษณะทางเรขาคณิตของอิเล็กโทรดก็จะหาค่า n^* ได้ และอ่านค่า E_b จากกราฟดังเช่นในรูป 2.11 และ 2.12 แสดงค่า E_b แสดงค่า E_b ของอากาศในสนามไฟฟ้าของทรงกระบอกแบบแกนร่วมและแบบขนานกัน

1. หาแรงดันเริ่มต้น U_1 ในสนามไฟฟ้าแบบทรงกระบอกแกนร่วม

ในสนามไฟฟ้าอิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกแกนร่วม ซึ่งมีรัศมีกระบอกนอกเท่ากับ r_2 และตัวนำกระบอกในมีรัศมี r_1 สนามไฟฟ้า ณ. จุดใดๆ ระหว่าง r_1 กับ r_2 ($r_1 < r < r_2$) จะเขียนได้ว่า

$$E_r = E_{\max} \cdot (r_1/r) \quad 2.32$$

จากเงื่อนไขเบรคดาวน์จะเกิดขึ้นเมื่อ $E_{\max} = E_1 = E_b$ และการอินทิเกรตไปตามแนวที่สั้นที่สุดจาก r_1 (ที่มี E_{\max}) ไปหา r_2 เป็นระยะวิกฤตคือ x_c ณ. จุดนั้น α เป็นศูนย์ จึงได้

$$\int_{r_1}^{r_c} \alpha(E) dr = K$$

แทนค่าความสัมพันธ์จากสมการ 2.29 $\alpha/p = C \{E/p - (E/p)_c\}^2$ จะได้

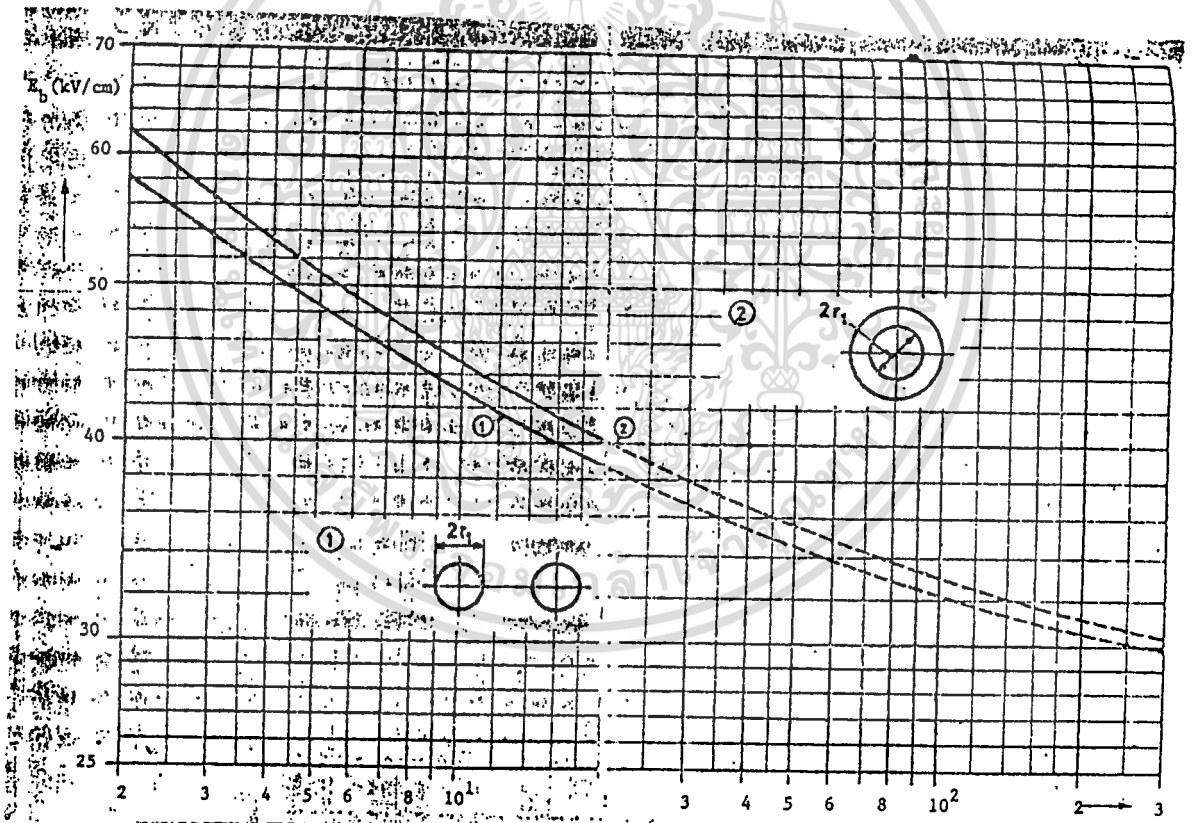
$$pc \int_{r_1}^{r_c} \{E/p - (E/p)_c\}^2 dr = K$$

แทนค่า $E = E_r = E_1 r_1/r$ (จาก $E_r = E_{\max} r_1/r$)

จะได้

$$\int_{r_1}^{r_c} c \{E_1 r_1/pr - (E/p)_c\}^2 dr = K$$

เอกสารนี้การอินทิเกรตสมการนี้จะได้ การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า E_b ของอากาศในสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ทรงแกรงขอก่อนแก่นร่วม
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(E_1/p)^2 (1 - r_1/r_c) - 2E_1/p (E/p) \ln(r_c/r_1) + (E/p)^2_c (r_c/r_1 - 1) = k/pCr_1$$

แต่ตามสมการ 2.32 $E_c \cdot r_c = E_1 \cdot r_1$ ฉะนั้นหาค่า r_1 ได้

$$r_1 = K/(pC) / (E_1/p)^2 - 2E_1/p \cdot (E/p)_c \cdot \ln(E_1/E_c)$$

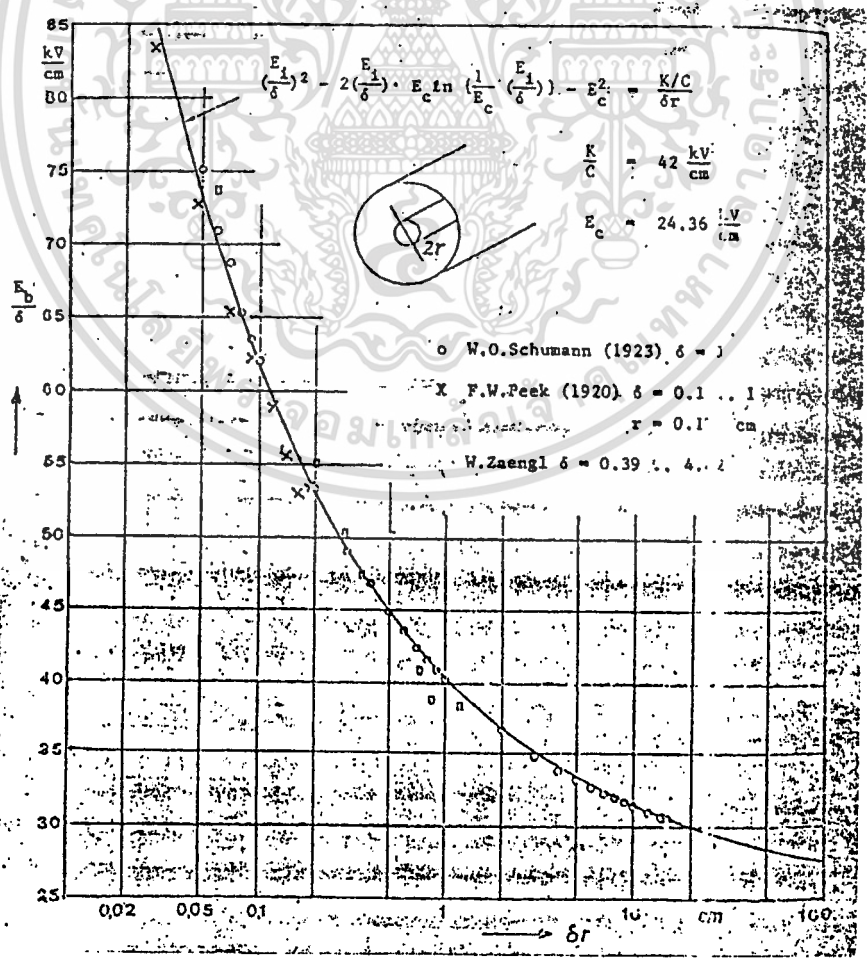
จะเห็นว่าความเครียดสนามไฟฟ้าเบรคดาวน์ E_b หรือโคโรนาเริ่มเกิด E_1 ขึ้นอยู่กับรัศมีตัวนำกระบอกในแต่ไม่ขึ้นอยู่กับ r_2 ในสมการ 2.33 แทนค่า $(E/p)_c$ และ K/pC จะได้ค่า E_1/p ของแต่ละค่า r_1 ดังรูป 2.11 และ 2.12

ในกรณีของทรงกระบอกแกนร่วมนี้ค่า E_1 อาจใช้สูตรสำเร็จของพีก (peek's empirical formula)

$$E_1 = E_b = E_c \{1 + C' / \sqrt{r_1}\}. \text{ kV/cm} \tag{2.34}$$

เมื่อ r_1 เป็น cm

$$\text{และ } E_c = 31 \text{ kV/cm} \quad C' = 0.308 \text{ cm}^{1/2}$$



รูปที่ 2.11 ความเครียดสนามไฟฟ้าเบรคดาวน์ของอากาศในอเล็กโตรดทรงกระบอกแกนร่วม
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.19 แรงดันเริ่มต้นที่วอลต่ำกว่าขั้วบวก

แรงดันเริ่มต้น (threshold voltage, starting voltage) หมายถึงแรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในแก๊ป ถ้าอิลเลคโตรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยแรงดันเริ่มต้นก็คือ แรงดันเบรคดาวน์โดยตรง (direct breakdown) กล่าวคือเมื่อในแก๊ปได้เงื่อนไขเบรคดาวน์ก็จะเกิดเบรคดาวน์ทันที ในกรณีของแก๊ปที่สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงในย่านเบรคดาวน์แบบโคโรนาความดันก๊าซต่ำกว่าความดันวิกฤต $*$ (p_c)

แรงดันเริ่มต้นก็คือแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด (corona inception voltage) ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอและแบบไม่สมมาตร แรงดันเริ่มต้นขั้วลบของอิลเลคโตรดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าต่ำกว่าแบบขั้วบวก ทั้งนี้อาจอธิบายได้ว่าการจะเกิดเบรคดาวน์ได้นั้นจะต้องมีอิลเลคตรอนเริ่มต้นเป็นตัวสร้างอะวาลานซ์ตามกระบวนการต่าง ๆ ที่กล่าวแล้วข้างต้น สมมติว่าเป็นแก๊ปของอิลเลคโตรดรูดกับแผ่นระนาบถ้าที่รูดเป็นขั้วลบ อิลเลคตรอนเริ่มต้นจะเริ่มที่ผิวของปลายรูดซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง รูปที่ 2.9 มีโอกาสเกิดไอออนเซชันจากการชนได้มาก จึงสามารถสร้างอะวาลานซ์วิกฤตของอิลเลคตรอนได้ง่าย ค่าแรงดันเบรคดาวน์จึงต่ำ แต่ถ้ารูดเป็นขั้วบวก อิลเลคตรอนเริ่มต้นจะต้องเริ่มในแก๊ปที่ระยะห่างจากผิวอิลเลคโตรดรูดไปตามแนวที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงอย่างน้อยที่สุดเท่ากับระยะวิกฤต x_c เพื่อให้อิลเลคตรอนมีโอกาสสร้างอิลเลคตรอนอิสระเพิ่มทวีคูณถึงจำนวนวิกฤต ($N_c = 10^{11}$) ได้ซึ่งความยาวของอะวาลานซ์วิกฤตอย่างน้อยจะต้องเท่ากับ x_c จากปลายรูดเป็นบริเวณที่สนามไฟฟ้ามีความเครียดต่ำโอกาสที่จะเกิดไอออนเซชันเพื่อสร้างอะวาลานซ์จึงเป็นไปได้ยากหรือเป็นไปได้ ถ้าจะให้เกิดไอออนเซชันที่ระยะ x_c ได้บริเวณนั้นจะต้องมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงขึ้น นั่นก็คือจะเกิดเบรคดาวน์ได้ต้องป้อนแรงดันสูงขึ้น ด้วยเหตุนี้เองแรงดันเริ่มต้นในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอของขั้วลบจึงต่ำกว่าของขั้วบวกคือ

$$U_c^- < U_c^+$$

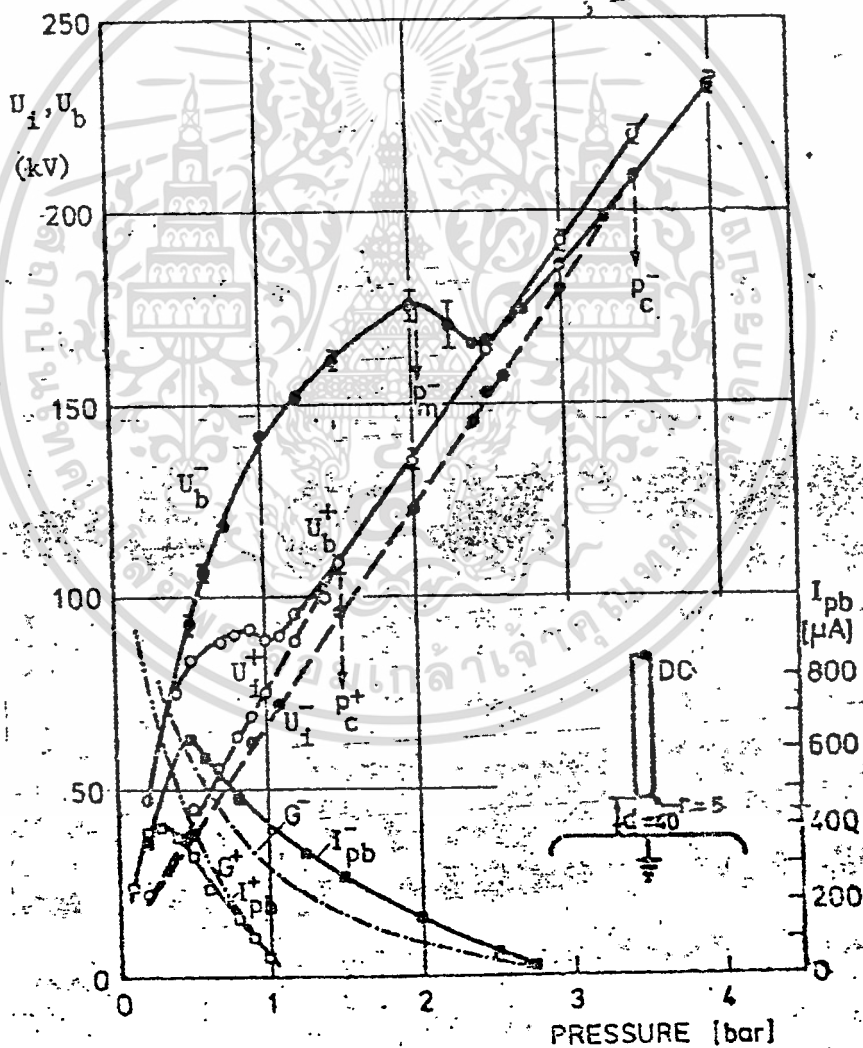
ดังตัวอย่างในรูป 2.13

ถ้าเป็นแบบเบรคดาวน์โดยตรงซึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยหรือไม่สม่ำเสมอสูงที่ก๊าซมีความดัน $P > P_c$ จะได้ $U_c^- = U_c^+$

ฉะนั้น $U_c^- < U_c^+$ (เบรคดาวน์โดยตรง) 2.35

* P_c คือความดันวิกฤต คือ ความดันก๊าซที่แรงดันเบรคดาวน์นั้นน้อยกว่าและแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดมากกว่า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เริ่มเท่ากัน ถ้าความดันอากาศต่ำกว่า P_c ค่า $U_i < U_b$
 แต่ถ้าเบรคดาว์นเกิดขึ้นในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ และ $P < P_c$ จะมีโคโรนาเกิดขึ้นก่อนเกิด
 เบรคดาว์นผลของโคโรนาทำให้เกิดประกายค่าแรงดันเบรคดาว์นขั้วลบจะสูงกว่าขั้วบวก (ดูรูป
 2.13 U_b) รายละเอียดจะได้กล่าวในเรื่อง ผลของประกาย

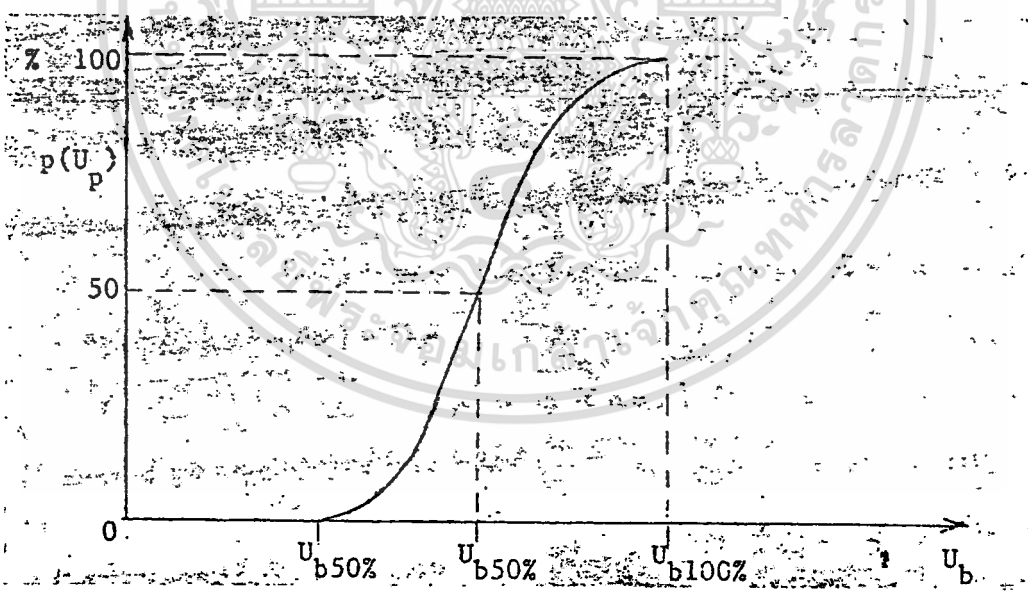


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 2.13 แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดและแรงดันเบรคดาว์น
 ไม่วากรณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันกระแสตรงของ SF_6 ในสนามไฟฟ้ารีดอก-ระนาบ ในเทอมของความดันก๊าซ เพื่อเปรียบเทียบกับแรงดันเริ่มต้น และกระแสโคโรนา I_{cb}

2.20 ความน่าจะเป็นเกิดเบรคดาวน์

แรงดันอิมพัลส์จะเกิดเบรคดาวน์ขึ้นได้เมื่อมีแรงดันเกิน $\Delta U = \{U_p(t) - U_p\}$ มีค่าสูงพอ ที่เวลาลำช้าของการเกิดเบรคดาวน์ t_p ยังอยู่ในช่วงของเวลาแรงดันเกินนี้ นั่นคือ $t_p < (t_2 - t_1)$ เวลา t_p มากน้อยเปลี่ยนไปตามสถิติ แต่ก็อยู่ในช่วงแน่นอน แต่ละค่าของแรงดันอิมพัลส์ U_p เมื่อป้อนซ้ำแล้วซ้ำอีก จะมีการเกิดเบรคดาวน์ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ค่าหนึ่งของจำนวนครั้งที่ป้อนแรงดันเข้าไปทั้งหมด ซึ่งจัดเป็นความน่าจะเป็นเกิดเบรคดาวน์ p (probability of breakdown) ของแรงดันอิมพัลส์ค่านั้น ๆ ความน่าจะเป็นเกิดเบรคดาวน์ $P(U_p)$ อาจหาได้จากการป้อนแรงดันค่าหนึ่งให้กับแกปเป็นจำนวนครั้งมาก ๆ เช่น 20 ครั้ง 100 ครั้งหรืออาจถึง 1000 ครั้ง จำนวนครั้งที่เกิดเบรคดาวน์ในแกปหารด้วยจำนวนครั้งที่ป้อนแรงดันคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ ดังในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ฟังก์ชันกระจายของแรงดันอิมพัลส์เบรคดาวน์

U_p 50% คือ ค่าแรงดันเบรคดาวน์ห้าสิบเปอร์เซ็นต์ ซึ่ง หมายถึงค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ทำให้เกิดเบรคดาวน์ เป็นจำนวนครึ่งหนึ่งของจำนวนครั้งที่ป้อนหรือดีสชาร์จออกไป

U_p 100% คือ ค่าแรงดันพอดีที่ทำให้เกิดเบรคดาวน์ทุกครั้ง ซึ่งมีความหมายที่สำคัญในการกำหนดมิติต่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของอุปกรณ์ป้องกัน เช่น กับดักฟ้าผ่า (lightning arrester) หรือแกปป้องกัน (protective gap)

$U_{50\%}$ เป็นค่ายอดแรงดันอิมพัลส์สูงสุดที่ไม่ทำให้เกิดเบรคดาวนซึ่งเรียกค่าแรงดันนี้ว่า ค่าความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ (impulse withstand voltage) มีความหมายอันสำคัญในการกำหนดมิติการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง และ ใช้เป็นค่ากำหนดการทดสอบการฉนวนที่ต้องทนต่อแรงดันอิมพัลส์ได้ ซึ่งโดยทั่วไปเรียกค่าแรงดันนี้ว่า BIL (Basic Impulse Insulation Level)

โดยทั่วไปฟังก์ชันกระจายของแรงดันอิมพัลส์เบรคดาวน มีลักษณะเป็นฟังก์ชันปกติ (normal distribution) หรือเรียกว่า กระจายแบบเกาส์ฟังก์ชัน (Gaussian distribution function) ทางปฏิบัติเป็นการยากที่จะหาค่า $U_{0\%}$ และ $U_{100\%}$ ได้โดยตรง ดังนั้นจึงอาศัยหาค่า $U_{50\%}$ แล้วใช้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน หาค่า $U_{0\%}$ และ $U_{100\%}$ คือ

$$U_{0\%} = U_{50\%} - 3\sigma$$

$$U_{100\%} = U_{50\%} + 3\sigma$$

ดังนั้นค่าที่ได้ก็คือ ค่าที่มีความน่าจะเป็นเบรคดาวน 1.5 % และ 98.5 % ตามลำดับ

2.21 แฟลคเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อแรงดันเบรคดาวน

แฟลคเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวน เช่น ระยะแกป, รัศมีความโค้ง r , ลักษณะผิว S_r , ช่วงเวลาป้อนแรงดัน, ความถี่ f รูปคลื่นแรงดัน, อุณหภูมิ T , ความดันก๊าซ p , ความชื้น h , ขั้วแรงดันบนอิเล็กโตรดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ในที่นี้จะอธิบายถึงผลของแฟลคเตอร์ต่าง ๆ เหล่านี้ที่มีผลต่อแรงดันเบรคดาวนของกาว โดยกำหนดระยะแกปให้

2.22 รูปลักษณะอิเล็กโตรด (electrode configuration)

รูปลักษณะอิเล็กโตรดจะมีผลต่อแรงดันเบรคดาวนมากขึ้นอยู่กับลักษณะสนามไฟฟ้าว่าเป็นแบบสม่ำเสมอ ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย หรือไม่สม่ำเสมอมาก (ดูข้อ 3.2) ในกรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดกับค่าเฉลี่ยจะแตกต่างกันไม่มาก ค่าแรงดันเริ่มต้น (threshold voltage) หรือกับค่าแรงดันเบรคดาวนเป็นค่าเดียวกันกล่าวคือเมื่ออะวาลานซ์วิกฤตการณ์ไม่อาจเกิดขึ้น ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

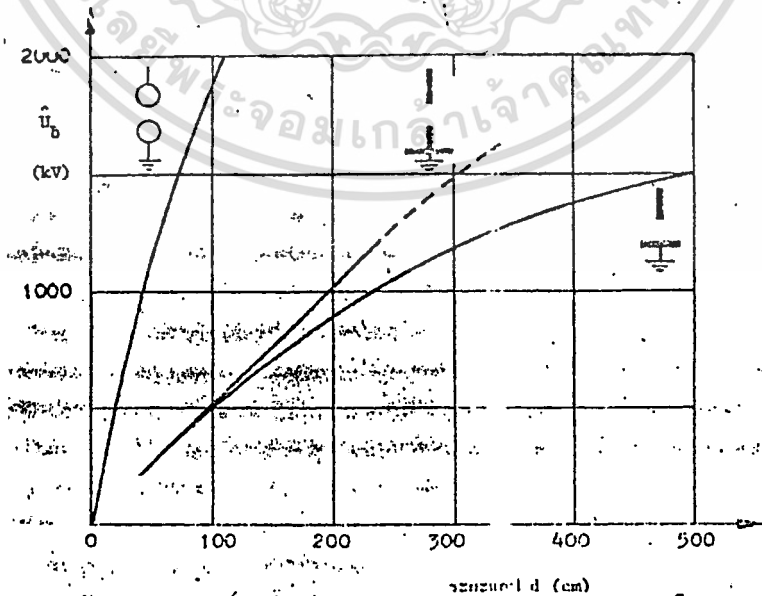
ได้ตามเงื่อนไขก็จะเกิดเบรคดาวทันที จะไม่มีโคโรนาเกิดขึ้นก่อนเบรคดาวนี้ จึงเรียกลักษณะเบรคดาวนี้แบบนี้ว่า เบรคดาวโดยตรง (direct breakdown) เช่น เบรคดาวที่เกิดขึ้นในแถบของทรงกลมที่มีระยะห่างไม่มากนักเมื่อเทียบกับเส้นผ่าศูนย์กลาง ($d < D/2$) ความต่างของขั้วแรงดันมีผลต่อค่าแรงดันเบรคดาวนี้เพียงเล็กน้อย

ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (highly nonuniform field) ระยะห่างเมื่อเทียบกับรัศมีของอิเล็กโทรด ค่าแรงดันเริ่มต้นจะต่ำกว่าแรงดันเบรคดาวอย่างเห็นได้ชัด ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอแบบสมมาตร เช่น แท่งกลม-แท่งกลมมีปลายเหมือนกัน รูปลักษณะอิเล็กโทรดไม่มีผลต่อแรงดันเบรคดาวจะมีผลในกรณีที่อิเล็กโทรดเป็นแบบไม่สมมาตรมาก ๆ เช่น แท่งกลมกับแผ่นระนาบ ดังตัวอย่าง ในรูปที่ 2.15

เบรคดาวจะเกิดขึ้นเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด E_m เท่ากับความเครียดสนามไฟฟ้าเบรคดาว E_b นั่นก็คือแรงดันเบรคดาวคำนวณได้จากสมการ (2.36) คือ

$$\hat{U}_b = E_b \cdot d \cdot n^* \tag{2.36}$$

เมื่อ d คือระยะห่างและ $n^* =$ แฟคเตอร์สนามไฟฟ้า สมการนี้ใช้ได้เฉพาะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ คือ แบบเกิดเบรคดาวโดยตรงเท่านั้น ในกรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง คือเกิดโคโรนาก่อนเบรคดาว สมการ (2.36) นี้ใช้คำนวณแรงดันเบรคดาวไม่ได้ แต่ใช้สำหรับคำนวณหาแรงดันโคโรนาเริ่มต้นเท่านั้น สมการ(2.36)



รูปที่ 2.15 แรงดันเบรคดาวเฉลี่ยค่ายอดกระแสลัมป์ 50/60 Hz ในอากาศที่สภาวะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มาตรฐาน IEC ในเทอมระยะห่าง d ของอิเล็กโทรดรูปแบบต่างๆ ขนด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รีด-รายนาม \hat{U}_m ดูในกราฟ

รีด-รีด $\hat{U}_m \approx 20 + 5.1 d \{kV\}$ d เป็น cm

ทรงกลม-ทรงกลม 200 cm ϕ \hat{U}_m ดูในกราฟ

2.23 ผลของความหนาแน่นของก๊าซ

ระยะอิสระ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ T และเป็นสัดส่วนกลับกับความดัน p ($\propto T/P$) และในสมการ (2.4) ค่าคงตัว A และ B ก็สามารถแทนด้วย P/T ได้ ในทางภาคปฏิบัติความหนาแน่นของอากาศมีบทบาทสำคัญต่อการจนวนกลางแจ้ง (สายส่งไฟฟ้า กำลังสวิตช์ เกียร์ในสถานีจ่ายไฟย่อย การทดสอบในห้องทดลอง) บรรยากาศเปลี่ยนแปลงไม่มากนักจึงคือได้ว่าค่าแรงดันเบรคดาว์น หรือวาวไฟ (flashover) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า P/T ซึ่งแสดงถึงความหนาแน่นของก๊าซ ให้ความหนาแน่นของอากาศ $\delta = 1$ เมื่อความดันบรรยากาศ $P = 760 \text{ Torr}^*$, อุณหภูมิ $t = 20^\circ\text{C}$ (ซึ่งเท่ากับ $T = 273 + 20 = 293^\circ\text{K}$ เป็นสภาวะมาตรฐานของ IEC

$$U_m(\delta) = \delta \cdot U_{m_n}$$

โดยที่ U_m เป็นค่าแรงดันเบรคดาว์นที่ความหนาแน่นอากาศ $= \delta$

U_{m_n} เป็นค่าแรงดันเบรคดาว์นที่สภาวะมาตรฐาน

ค่าความหนาแน่นอากาศคำนวณได้จาก

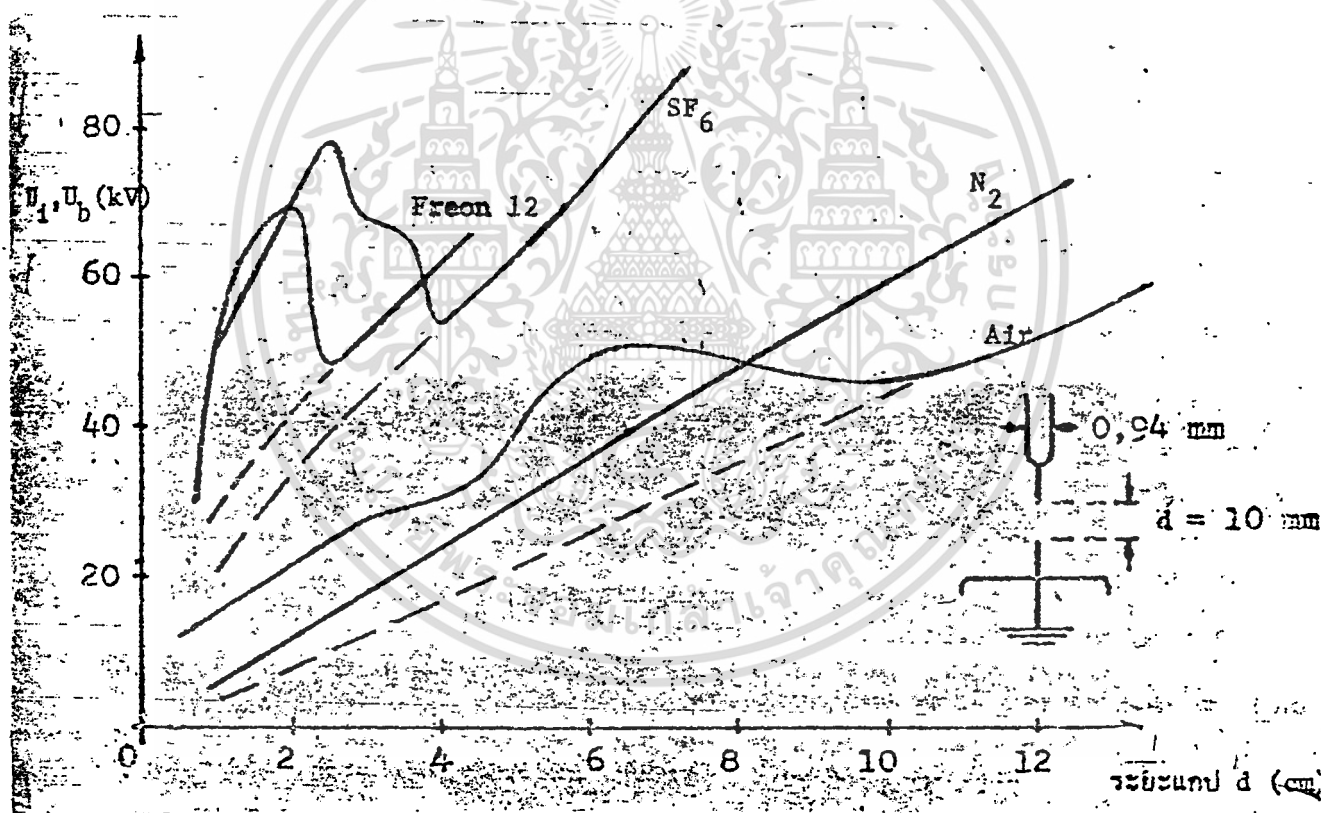
$$= (p/760) \cdot (293/(273+t)) = 0.386p/(273+t)$$

เมื่อ p คือความดันอากาศเป็น Torr

t อุณหภูมิ เป็น $^\circ\text{C}$

ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอแรงดันเบรคดาว์นจะแปรตามความหนาแน่นก๊าซดังในรูป 2.4 แต่ในกรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงคือ ที่แฟคเตอร์สนามไฟฟ้า $n^* < 20 \dots 30 \%$ ลักษณะของแรงดันเบรคดาว์นในเทอมของความดันก๊าซจะมีลักษณะสูงสุดต่ำสุด (Maximum - minimum characteristics) กล่าวคือที่ความดันต่ำ ๆ จะมีโคโรนาเกิดขึ้นก่อนจะเกิดเบรคดาว์น และเรียกว่าเบรคดาว์นตามโคโรนา ถ้าเป็นแบบโคโรนาคงสถานะ (stabilized corona) จะทำให้แรงดันเบรคดาว์นสูงกว่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดมาก แต่เมื่อเพิ่มความดันให้สูงขึ้น โคโรนาคงสถานะจะลดน้อยลงและทำให้ค่าแรงดันเบรคดาว์นลดต่ำลงด้วย จนกระทั่งค่าแรงดันเบรคดาว์นและค่าแรงดันโคโรนาเริ่มค่าไม่ต่างกันใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดมีค่าเท่ากัน และเป็นความดันที่แรงดันมีค่าต่ำ หลังจากจุดนี้หากเพิ่มความดันก๊าซต่อไปอีกค่าแรงดันเบรคดาว์นจะเพิ่มเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความดันก๊าซอีก ในช่วงหลังจุดแรงดันต่ำสุดนี้ ($p > p_c$) เบรคดาว์นจะเป็นแบบเบรคดาว์นโดยตรง ปรากฏการณ์ลักษณะแรงดันเบรคดาว์นในเทอมของความดันก๊าซที่มีลักษณะสูงสุด-ต่ำสุดนี้จะปรากฏให้เห็นเด่นชัดในกรณีของก๊าซประจุไฟฟ้าลบ เช่น SF_6 ดังในรูปที่ 2.13 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ U_b ในเทอมของความดัน p ของ SF_6 ในสนามไฟฟ้าระหว่างแท่งปลายมน (rod) กับระยะห่าง ซึ่งมีแฟคเตอร์สนามไฟฟ้า $n^* = 14\%$ และในรูป 2.15 แสดงให้เห็นลักษณะสูงสุดต่ำสุดของแรงดันเบรคดาว์นกระแสตรงชั่วบวก $U_b = f(p)$ ของก๊าซฟร็อน (CF_2Cl_2) ไนโตรเจน อากาศ เปรียบเทียบกับของก๊าซ SF_6 ซึ่งได้จากสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดปลายเข็มตั้งรูป (n^* ต่ำมาก)



รูปที่ 2.16 ลักษณะแรงดันเบรคดาว์นระหว่างปลายแหลมในอากาศ ไนโตรเจน ฟร็อน และซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6)

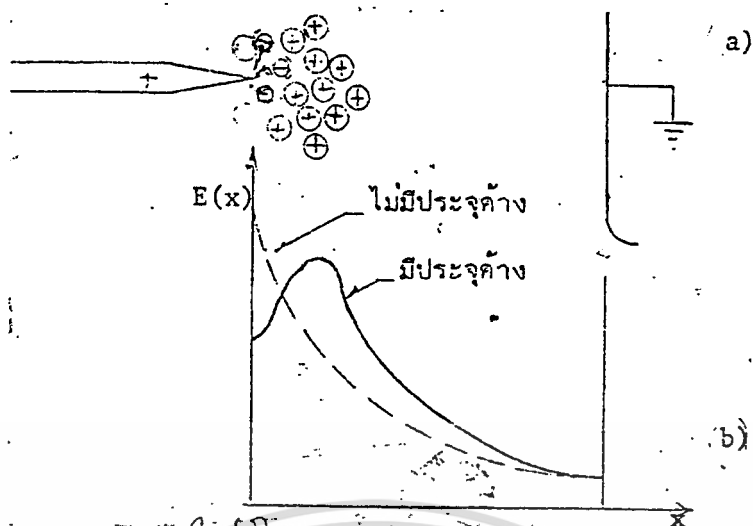
2.24 ผลของประจุค้างมีต่อแรงดันเบรคดาว์นต่างขั้ว

เอกสารนี้ ประจุค้าง (space charge) จะเกิดขึ้นในสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอสูง (จาก 2.17) ได้เป็นผลไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้แรงดันเบรคตาว์น U_b มีค่าสูงกว่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด (U_c) และผลของประจุค้างทำให้แรงดันเบรคตาว์นของขั้วบวกและขั้วลบต่างกัน ในทางตรงข้ามกับแรงดันเบรคตาว์นโดยตรง (direct breakdown) กล่าวคือ แรงดันเบรคตาว์นโดยตรงหรือแรงดันเริ่มต้น (threshold voltage, or starting voltage) ของขั้วลบจะต่ำกว่าของขั้วบวกเสมอ แต่ผลของประจุค้างทำให้แรงดันเบรคตาว์นขั้วลบสูงกว่าขั้วบวกปรากฏการณ์เช่นนี้เกิดขึ้นกับแรงดันทุกรูปแบบ (DC, AC และอิมพัลส์) และในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงของอิเล็กทรอนิกส์แบบไม่สมมาตร ดังตัวอย่างเช่นปลายแหลมกับแผ่นระนาบ การอ้างอิงแรงดันขั้วบวกหรือขั้วลบหมายถึง ขั้วแรงดันบนอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงที่สุด

1. ปลายแหลมขั้วบวก

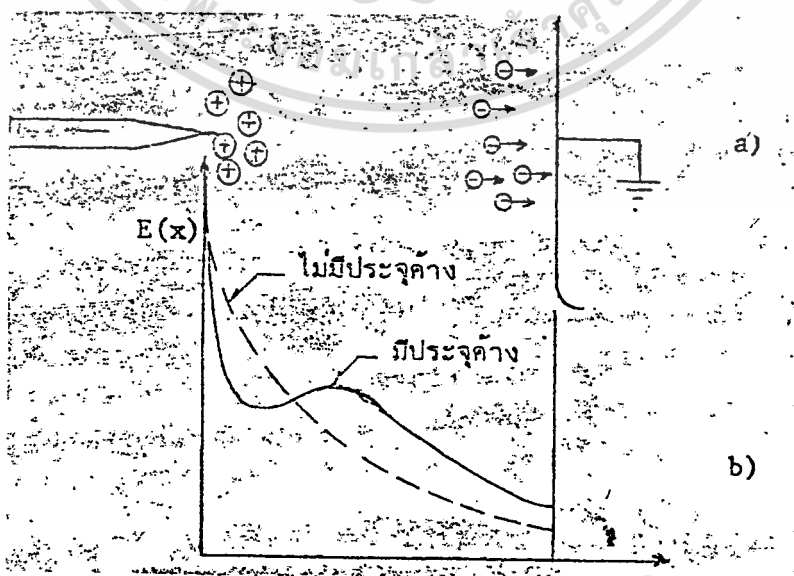
ที่ปลายแหลมเป็นขั้วบวกเทียบกับแผ่นระนาบดังรูปที่ 2.17a เมื่อแรงดันสูงถึงค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด ก๊าซในปริมาตรของแก๊สจะเกิดไอออนในเซชันรอบ ๆ ปลายแหลม อิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่ได้เร็วจะวิ่งเข้าหาอะโนดคือปลายแหลมและรวมตัวเป็นกลาง ปล่อยให้ไอออนบวกซึ่งเคลื่อนที่ได้ช้าค้างออกันอยู่ที่หน้าปลายแหลม ทำให้สนามไฟฟ้าที่ปลายแหลมมีความเครียดน้อยลง แต่ความเครียดสนามไฟฟ้าทิศทางเข้าหาคะโถดคือแผ่นระนาบจะมีค่าสูงขึ้น (ดังรูป 2.17b) ประจุไอออนบวกหน้าปลายแหลมเสมือนหนึ่งว่าทำให้อิเล็กโตรดยาวขึ้น, เมื่อระยะแก๊สสั้นลงและเวลาเดียวกับความเครียดสนามไฟฟ้าแก๊สเพิ่มขึ้นเป็นผลให้เกิดเบรคตาว์นได้ง่ายขึ้น นั่นคือประจุค้างทำให้แรงดันเบรคตาว์นขั้วบวกต่ำลง



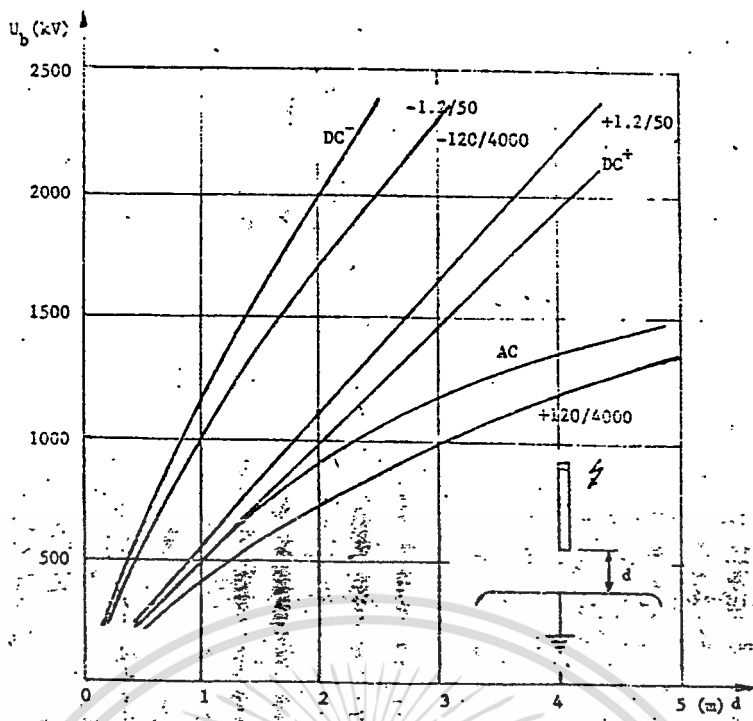
รูปที่ 2.17 ผลประจุค้างของปลายแหลมขั้วบวก

2. ปลายแหลมขั้วลบ

ปลายแหลมขั้วลบตามรูปที่ 2.18 อิเล็กตรอนที่เกิดจากไอออนในเซชันเคลื่อนที่ไปหาระนาบอะโนดซึ่งเป็ขบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำ อิเล็กตรอนอาจเกาะตัวบนโมเลกุลได้และรวมตัวเป็นกลางที่อะโนด ส่วนประจุไอออนบวกเคลื่อนที่ได้เข้าเข้าหาคะโถดปลายแหลมจะค้างอยู่บริเวณหน้าปลายแหลม ทำให้สนามไฟฟ้าที่หน้าปลายแหลมมีความเครียดสูงขึ้น (ดูรูปที่ 2.18 b) แต่สนามไฟฟ้ระหว่างหมอกประจุค้างกับอะโนด (ระนาบ) จะกลับสม่าเสมอดีขึ้นเนื่องจากประจุค้าง จึงทำให้เบรคดาวน์ได้ยากขึ้น ฉะนั้นผลของประจุค้างจะทำให้แรงดันเบรคดาวน์ขั้วลบมีค่าสูงขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนรูปที่ 2.18 ใช้ผลประจุค้างของปลายแหลมขั้วลบให้หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 แรงดันเบรคความ U_b ของอิเล็กโตรดแท่งกับระยะห่างในอากาศ

ในเทอมของระยะห่าง d เมื่อแรงดันป้อนมีรูปแบบต่าง ๆ ที่สภาวะมาตรฐาน IEC (760 Torr 20°C 11 g/m³ H₂O/m³)

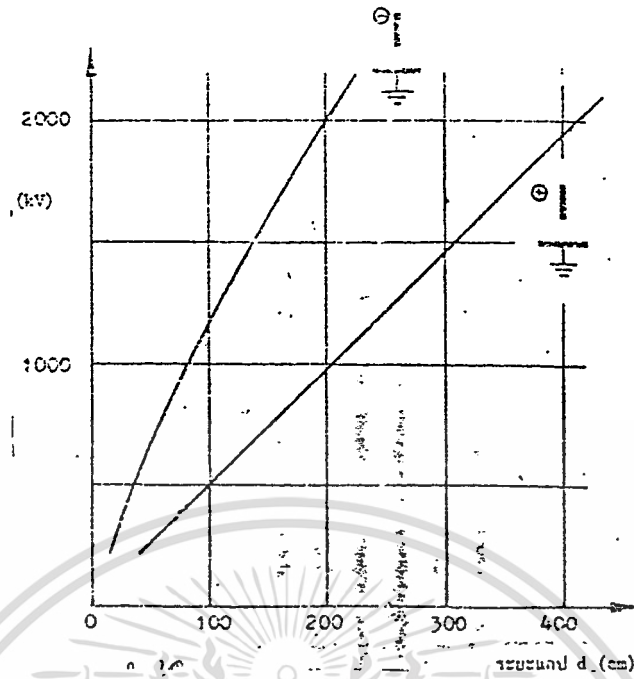
1. DC บวก (+), $U_b = 4.9 d$ [kV] d เป็น cm
DC ลบ (-), U_b อ่านจากกราฟ
2. AC (50Hz) ค่ายอด U_b อ่านจากกราฟ
3. อิมพัลส์ฟ้าผ่าบวก 1.2/50 μ sec $U_{b50\%} = 5.4 d$
อิมพัลส์ฟ้าผ่าลบ 1.250 μ sec ดูกราฟ
4. อิมพัลส์ลัดขิ่ง 120/4000 μ sec ขี้ววกและลบดูจากกราฟ

โดยที่แรงดันที่สร้างสนามไฟฟ้าในแก๊ปจะต้องได้จาก

$$E(x)dx = U$$

ฉะนั้นแรงดันเบรคความแบบปลายแหลมขี้ววกจึงสูงกว่าปลายแหลมขี้ววก ($U_b^- > U_b^+$)

ดังตัวอย่างแรงดันเบรคความในอากาศของอิเล็กโตรดแท่งกับระยะห่างในเทอมของระยะห่าง



รูปที่ 2.20 แรงดันเบรคควาน U_0 กระแสตรงของอากาศในเทอมของระยะแกป

ปรากฏการณ์ผลของประจุค้างนี้ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาที่ย้อนแรงดัน อยู่ในกรณีของแรงดันกระแสตรง DC และแรงดันกระแสสลับ AC (50-60 Hz) ผลของประจุค้างมีต่อขั้วแรงดันเบรคควานเท่า ๆ กับแรงดันอิมพัลส์ก็แสดงให้เห็นผลแตกต่างของขั้วแรงดันเช่นกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งแรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่ง ยกเว้นแรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาสั้นมาก ๆ จะไม่มีผลของประจุค้างดังกล่าว

2.25 ผลของแผ่นฉนวนบางกั้น

แผ่นฉนวนบางกั้นแต่ไม่มีความพรุนกันระหว่างอิเล็กโตรดแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ โดยให้ระยะห่างแผ่นฉนวนบางตั้งฉากกับแนวเส้นสนามไฟฟ้า จะช่วยทำให้แกปนั้นทนต่อแรงดันเบรคควานได้สูงขึ้น แต่ไม่มีผลต่อแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด (corona inception voltage) เนื่องจากแผ่นฉนวนบางไม่ทำให้สนามไฟฟ้าเชิงเรขาคณิตเปลี่ยน ตัวอย่างเช่น ใส่แผ่นฉนวนบางกั้นระหว่างปลายแหลมกับระยะห่างในรูป 2.20 ผลของแผ่นฉนวนบางกั้นทำให้แรงดันเบรคควานของแกปสูงขึ้น เนื่องจากแผ่นฉนวนบางจะกั้นการเคลื่อนที่ของไอออนประจุบวก ที่เกิดจากการไอออไนเซชันที่บริเวณอิเล็กโตรดปลายแหลมมิให้คืบหน้าไป ประจุบวกจะรวมตัวกระจายอยู่บนระยะห่างของแผ่นฉนวนบางทำให้สนามไฟฟ้า

ระหว่างหลังแผ่นฉนวนบางมีความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลง แรงดันเบรคควานจะขึ้นอยู่กับความคงทนไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแกปในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ และขึ้นอยู่กับตำแหน่งการวางกันของแผ่นฉนวนบาง ซึ่งอาจจะทำให้แกปทนแรงดันเบรคดาวน์ได้สูงขึ้นหรือลดลงก็ได้

กรณีของอิเล็กทรอนิกส์คล้ายแหลมกับปลายแหลมควรรีใช้แผ่นฉนวนบางกันทั้งสองด้าน (ทางคยโถดและอะโนด)

ผลของแผ่นฉนวนบางกันทำให้ทนแรงดันเบรคดาวน์สูงในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง แต่มีผลน้อยในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ผลนี้จะเกิดขึ้นในกรณีแรงดันเป็น DC หรือ AC และอิมพัลส์ชั่ววอก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบหม้อแปลง

ในการพิจารณาการออกแบบแม่เหล็กที่เป็นส่วนประกอบนั้นจะมีส่วนที่คล้ายๆกันเช่น "gack art" ซึ่งในการออกแบบแม่เหล็กแน่นอนเป็นค่าทางวิทยาศาสตร์ และตัวแม่เหล็กนั้นจะถูกกำหนดขึ้นมาจากการคำนวณ และมันได้ถูกพัฒนาให้เป็นกฎเกณฑ์ต่างๆ ทางฟิสิกส์เช่น เป็นกฎของ Maxwell, Ampere, Orested และ Gauss

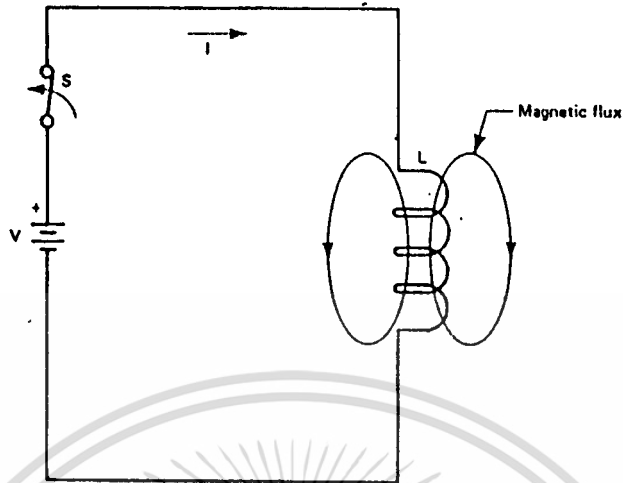
จุดประสงค์ในบทนี้เป็นการคำนวณค่าพื้นฐานของสนามแม่เหล็กกับค่าทางไฟฟ้าซึ่งเป็นสัดส่วนในการออกแบบของสนามแม่เหล็ก เช่นใน คอยล์ และ หม้อแปลง Principle of Electromagnetism (หลักการของสนามแม่เหล็ก)

3.1 หลักการของสนามแม่เหล็ก

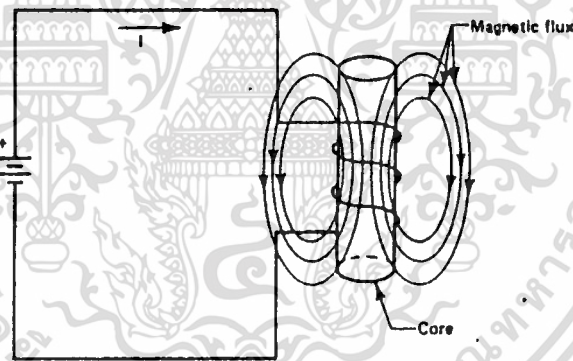
เมื่อพิจารณาวงจรไฟฟ้าจากรูปที่ 3.1 มีค่าแหล่งจ่ายแรงดัน (V), สวิตช์ (S) และ โหลด (L) จากในขดลวดอากาศ ขณะที่ในตัวอย่างนั้นสวิตช์ถูกต้อง ค่ากระแสจะไหลผ่านขดลวดไปที่โหลด ขณะที่กระแสไหลผ่านขดลวดนั้น จะมีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นเช่นที่แสดงดังรูป การที่ทำให้มีกระแสไหลวนในขดลวดเราเรียกว่า ฟลักซ์ (Flux) และเส้นทางของสนามแม่เหล็กเราเรียกว่า (Flux linkages) แต่อย่างไรก็ตามฟลักซ์ในคอยล์จะยังมีค่าที่ไม่คงที่ ถ้าเรามีแท่งแม่เหล็กอยู่ดังรูป 3.2 ผลบวกที่เกิดจากค่าสนามไฟฟ้าในแท่งก่อให้เกิดการผลิตฟลักซ์มากขึ้น ซึ่งจากการที่ Flux linkages จะเดินทางไปที่แท่งตัวนำ และก็จะไหลผ่านอากาศที่ถูสนามแม่เหล็กห้อมล้อมอยู่ ถ้าแท่งโลหะของขดลวดถูกสร้างให้เป็นทางเดินซึ่งก่อให้เกิดฟลักซ์ ดังนั้นที่สนามแม่เหล็กจะถูกห้อมล้อมด้วยในวงของขดลวดเช่นในรูปที่ 3.3 ซึ่งก่อให้เกิดแม่เหล็กที่ถาวรขึ้น

เมื่อฟลักซ์มีค่ารวมที่มากขึ้นเราเรียกว่า "Magnetic flux density or magnetic-induction" คือค่าความนำทางแม่เหล็ก ซึ่งเป็นการแทนค่าที่ตำแหน่งการวัดโดยใช้สัญลักษณ์ B ซึ่งค่า B ที่ได้จะมีหน่วยเป็น เซนติเมตร.วินาที (cgs) ในระบบค่าของ gauss แรงที่สนามแม่เหล็กนั้นจะถูกผลิตออกมาเป็นค่าฟลักซ์ตามที่เรารู้จากค่าของ magnetic field strength มีหน่วยเป็น H ใน Oversteds

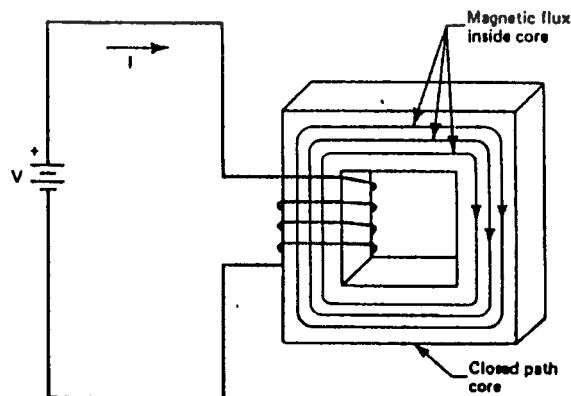
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1 สนามแม่เหล็กถูกกระทำในแกนอากาศเป็นผลมาจากการให้กระแส I



รูปที่ 5.2 แสดงลักษณะที่เพิ่มขึ้นของสนามแม่เหล็กเมื่อขดลวดพันรอบแกนแม่เหล็ก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 5.3 แสดงความต่อเนื่องของแกนแม่เหล็กที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่มากขึ้น
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากค่าความเค้นของสนามแม่เหล็กเราจะเขียนได้ว่า

$$H = 0.4\pi NI / l_i$$

3.1

เมื่อ N = จำนวนขดลวด

l = กระแสที่ไหลใน magnitude

l_i = ความยาวของสนามแม่เหล็กในขดลวด

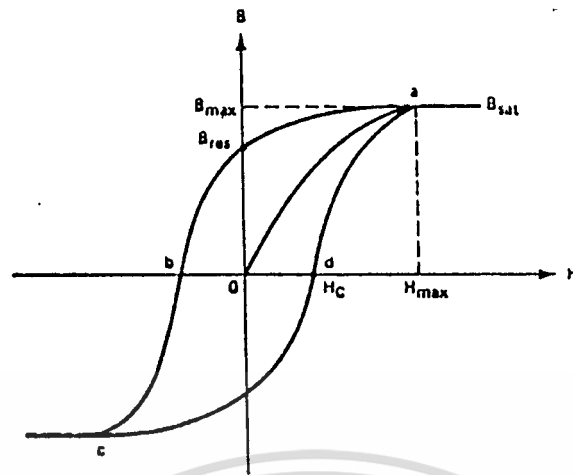
ข้อสำคัญอีกอย่างหนึ่งคือความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์สนามแม่เหล็กและแรงเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กจะเป็นอัตราส่วนซึ่งกัน และกัน เรียกว่า permeability (μ)

$$\text{ให้ } \mu = B/H \quad 3.2$$

การบรรยายอย่างง่าย ๆ ก็คือขดลวดที่ทำให้เกิดค่าทางสนามแม่เหล็กที่ทำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำค่า permeability ของอากาศเป็นค่าคงที่และจะมีค่า $= 1$ ใน cgs ของระบบ

3.2 The Hysteresis Loop

ลักษณะทั่วไปของสนามแม่เหล็กจะเป็นรูป curve S-shaped ใน Hysteresis loop ซึ่งค่าใน Loop สามารถ Plotted บน B-H coordinates โดยได้จากค่าโลหะสนามแม่เหล็กเมื่อค่าที่ได้จากสนามแม่เหล็กเป็นค่าที่สมบูรณ์ซึ่งมันจะเป็นวัฏจักรของสนามแม่เหล็ก รูป 3.4 แสดงให้เห็น curve ของ typical hysteresis ซึ่งค่าของขดลวด ferromagnetic ปราศจาก air gap ในฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่ผ่านมา ดังนั้น ถ้าเราเริ่มขึ้นที่จุดแรกบนเคิร์ฟ ค่าที่ได้เราบันทึกได้จากผลบวกของแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กไปที่จุด b. เมื่อค่าที่เริ่มจุดจากแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กที่ 0 เมื่อไปที่จุด c. เป็นค่าทางลบของสนามแม่เหล็ก และกลับมาผ่านค่าศูนย์ที่จุด c และเป็นค่าสูงสุดทางบวกของสนามแม่เหล็กที่จุด a ทำให้วัฏจักรของสนามแม่เหล็กสมบูรณ์และจะได้เป็น S ตามต้องการ



รูปที่ 3.4 เคริฟแสดง Hysteresis loop ของแกนแม่เหล็ก

รูป 3.4 ทำให้รู้ค่าที่แน่นอนของ Loop hysteresis ซึ่งสำคัญมากและทำให้เราพบค่าที่ต้องการ ดังนี้

B_{max} คือ ค่าความหนาแน่นสูงสุดของฟลักซ์

H_{max} คือ ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กสูงสุด

B_{res} คือ ค่าฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่ตกค้าง เมื่อแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กเป็นศูนย์

H_c คือ แรงเคลื่อนยังคับ หรือแรงเคลื่อนของสนามแม่เหล็กที่วนกลับตกค้างเป็นที่ศูนย์

จากเคริฟ B-H และมีไม่สามารถปลดปล่อยค่าของสนามแม่เหล็กนี้จะเป็นตัวชี้ค่า Saturated และเขียนได้ว่า B_{sat} ถ้าเราได้ค่าความนำของ air gap ที่ขดลวดทำให้ค่า hybrid flux เพิ่มขึ้น ทำให้มีผลด้านความนำของแม่เหล็ก หน่วยของ air gap เป็น permeability ซึ่งเป็นผลทางความยาวของสนามแม่เหล็ก คือ

$$l_e = l_i + \mu_r l_g \quad 3.3$$

เมื่อ l_i = ความยาวของแม่เหล็กผ่านโลหะ

l_g = ความยาวของแม่เหล็กผ่านโลหะ

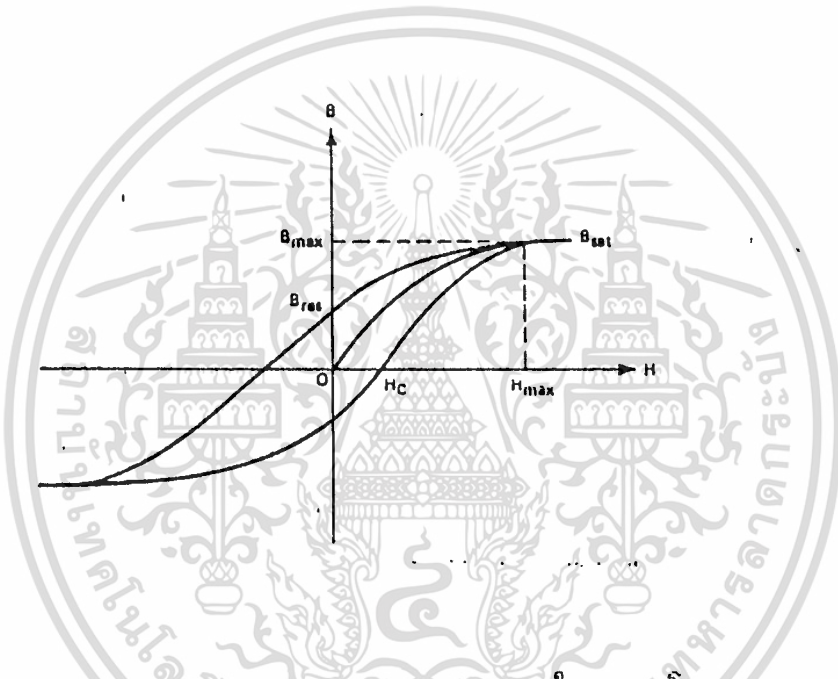
μ_r = permeability ของแม่เหล็กโลหะ

จากกฎของ แอมแปร์ค่า ขดลวดของ grapped สามารถแสดงค่าความหนาแน่น ของ ฟลักซ์

เอเขียนได้ดังนี้เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$B_i = (0.4\pi N I \mu_r) / (l_i + \mu_r l_g) \quad 3.4$$

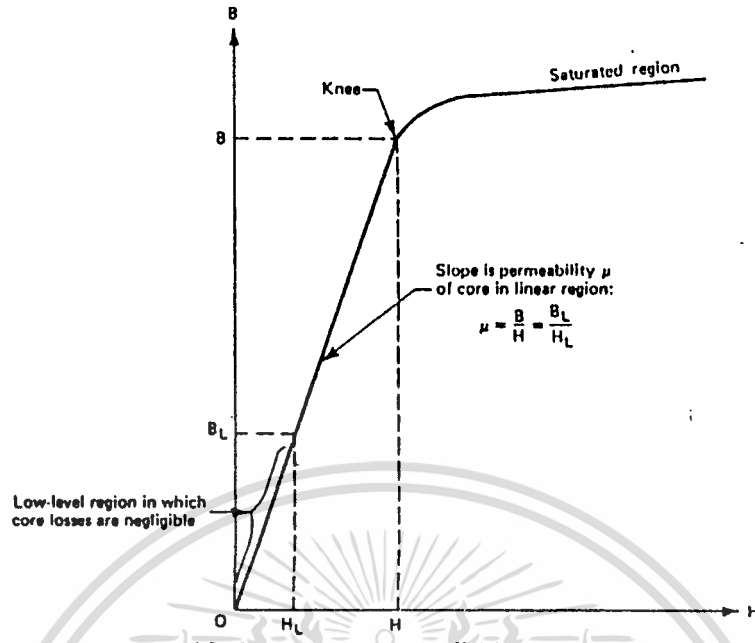
จากสมการที่ 3.4 ค่าความสัมพันธ์จะให้ค่า การหมุนของแอมแปร์ (NI) ความหนาแน่นของฟลักซ์ของ ช่องอากาศ (air gap) จะเล็กกว่าค่า gapless core B_{sat} จะน้อยเมื่อมีค่า ของอากาศ น้อยมากหรือปราศจากช่องอากาศ ดังนั้นค่าความนำของช่องอากาศในวงจรมแม่เหล็กจะให้ "tilt" ที่ hysteresis loop ดังรูปที่ 3.5 ถ้าเป็นไปได้เมื่อลดค่าความอึดตัวของแกนแม่เหล็กมีค่าสูง



รูปที่ 3.5 รูปแสดง Hysteresis loop ของแกนในอากาศโดยแสดงการของ loop โดยตรงในการเพิ่มของช่องอากาศของ B_{sat}

หลักในการประดิษฐ์แม่เหล็กไฟฟ้ารูปคุณสมบัติ B-H โดยปกติกราฟของสนามแม่เหล็กในรูป 3.6 ซึ่งกราฟนั้นจะแสดงสไลปของ B กับ H ในเขตที่ต่ำกว่าพื้นที่ใต้กราฟ "knee" เมื่อพิจารณาแล้วจะมีค่าคงที่ ดังนั้นความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างการกระตุ้นกระแส

ในช่วงที่กราฟต่ำ การสูญเสียแกน (core losses) จะไม่นำมาคิดซึ่งอุณหภูมิที่ต่ำจะคงที่ พื้นที่ใต้กราฟของแกนจะมีค่าอึดตัวและให้ค่าแตกต่างที่ขอบเขตเพื่อหลีกเลี่ยงจากเส้น



รูปที่ 5.6 เกรฟแสดงความต่อเนื่องของการเกิดสนามแม่เหล็กและจุดที่เกิดการอิ่มตัว

3.3 พื้นฐานระบบของหม้อแปลง (basic transformer theory)

เราได้กล่าวถึงการไหลของกระแสโดยที่นำเอาขดลวดพันรอบคอยส์ถึาระยะเวลาของกระแสเทียบกับคาบเวลาผลที่จะได้จะออกมาเป็นตรงกันข้าม ฟลักซ์จะมีค่าเห็นยวนำแรงดันและกระแสไหลในขดทุติยภูมิ ในกรณีนี้ที่รูป 3.7 เป็นตัวอย่างง่ายๆ ของขด 2 ขดในหม้อแปลง

โดยปกติหม้อแปลงมีข้อแตกต่างทางประสิทธิภาพสูงที่เพิ่มมากขึ้นหรือค่าที่ต่ำกว่าทางเอาท์พุทแรงดันในขณะที่คุณสมบัติต่ออัตราวนกลับ โดยที่ให้

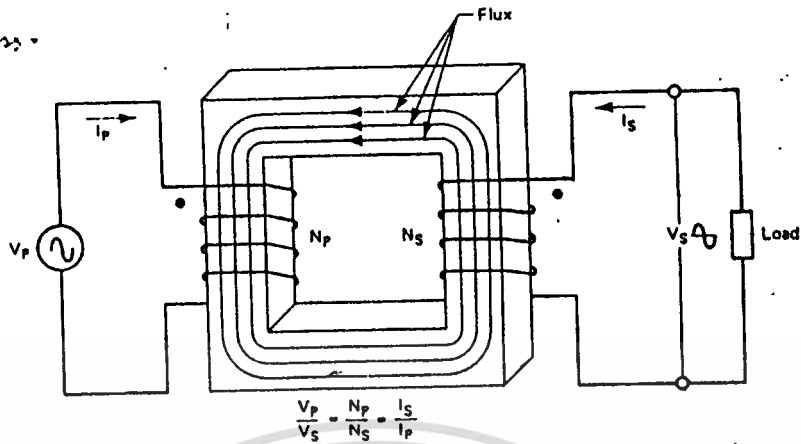
$$N_p / N_s = V_p / V_s \quad 3.5$$

ดังนั้นชนิดหม้อแปลงแบบเพิ่ม (Step-up) หรือ แบบลด (Step-down) จึงเป็นอิสระแก่กัน แรงดันทางทุติยภูมิจะสูงกว่าหรือต่ำกว่าขึ้นอยู่กับแรงดันทางเข้า แน่นนอนเมื่อแรงดันทางทุติยภูมิของขดลวดถูกใส่ไปเพื่อผลิตแรงดันที่สูงกว่าและต่ำกว่า คุณลักษณะที่มีประโยชน์ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแยก (Isolate) อ้างถึงระหว่างปฐมภูมิและทุติยภูมิ

จากพื้นฐานหม้อแปลงมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$e = N A \frac{dB}{dt} 10^{-8} \quad 3.6$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 หม้อแปลงแบบ 2 ขด

เราสามารถหาที่มากการคำนวณของความหนาแน่นฟลักซ์ B และแน่นอนค่าที่แตกต่างกันนี้สามารถแสดงได้โดยเคิร์ฟ โดยให้

$$B_{max} = (V_p) 10^8 / (k f N_p A) \quad 3.7$$

โดยที่

V_p = แรงดันทางขดปฐมภูมิ

f = ความถี่ Hz

N_p = จำนวนขดลวดปฐมภูมิ

A = พื้นที่แกนที่มีประสิทธิภาพ (ต.ร.ช.ม.)

$k = 4.44$ Air wave

จะได้สวิตช์จากแหล่งจ่าย $k = 4$ โดยใช้ปุ่มกดและการแปลงกลับ และ $k = 2$ เมื่อเป็นผลแปรตาม

โดยปกติเราจะออกแบบให้หม้อแปลงมีกำลังโดยเลือก B_{max} ไม่มีกฎเกณฑ์แต่อยู่ที่เคิร์ฟค่าขอบเขตของ B-H โดยจุดที่จุดเริ่มที่จะเลือก $B_{max} = B_{sat}/2$

จากสมการที่ 5.7 เรายอมให้ขดปฐมภูมิดังนี้ (ค่าที่คิดให้จากปฐมภูมิ)

$$N_p = (V_p) 10^8 / (k t \cdot B_{max} \cdot A) \quad 3.8$$

การออกแบบค่าพารามิเตอร์สำคัญมากเพราะจะต้องเลือกใช้กับแกน (ใช้กับขีปนาวุธ) ของพื้นที่

ขดลวดซึ่งจะถูกเลือกใช้ให้เพียงพอกับขนาดของขดลวดที่จะไม่ให้มีการสูญเสียและ ชั้นที่ 2. เพื่อให้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แกนมีกำลังการใช้งาน ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์จะได้สมการดังนี้

$$P_{out} = (1.16 B_{max} \cdot f \cdot d \cdot A_u \cdot A_c) 10^{-9} \quad 3.9$$

โดยที่ P_{out} = กำลังแรงดึงของแกน W

B_{max} = ค่าความแตกต่างของความหนาแน่นฟลักซ์ G

f = ค่าความถี่ Hz

d = ค่าความหนาแน่นของกระแสภายในขดลวด A/m^2

A_u = พื้นที่ๆ มีประสิทธิภาพของแกน cm^2

A_c = พื้นที่ขอบบ้น cm^2

จากโรงงานผู้ผลิตจะให้สัญลักษณ์ W_u ที่พื้นที่ A_c ปกติความหนาแน่นกระแสผ่านเป็นวงกลมเป็น mils ต่อ Ampere ใช้สัญลักษณ์ D เกี่ยวกับ d โดย

$$d = 1.27 * 10^6 / D \quad 3.10$$

จากสมการที่ 3.10 กับ 3.9 เราได้ว่า

$$P_{out} = (1.47 f B_{max} \cdot A_u \cdot A_c) 10^{-9} / D \quad 3.11$$

เราสามารถใส่สมการที่ 3.11 ในการคำนวณค่าที่จะเลือกขนาดของแกนของหม้อแปลง

$$A_u \cdot A_c = (0.68 * P_{out} \cdot D) 10^9 / f B_{max} \quad (cm^4) \quad 3.12$$

ค่าความหนาแน่น D ที่ได้จะแตกต่างจากค่าพื้นฐานของโรงงาน 1000 circular mils ต่อแอมแปร์ ($cm./A$) การออกแบบความหนาแน่นของกระแสจะต่ำกว่าเบอร์ของลวดและจะเป็นอิสระต่อการใช้ซึ่งกระแสที่ได้จากค่าความหนาแน่นจะอยู่ที่ $200 cm./A$ จึงจะปลอดภัย

3.4 แกนเหล็กและวิธีการเลือก (core material and Geometry selection)

แม่เหล็กทั้งหลายที่ถูกเลือกใช้หม้อแปลงที่มีความถี่สูงนั้นเราจะกล่าวคือ ferrite ซึ่งจะถูกใช้งานเป็นอย่างมากในการออกแบบ ferrite ใช้ในหม้อแปลง ซึ่ง ferrite จะไม่ค่อยมีค่าความหนาแน่นของ operating flux ferrite ส่วนมากจะมีค่าอยู่ที่ 300-500 ฐ แต่จะมีความสูญเสียจาก coil ต่ำ โดยให้ความถี่สูงและง่ายต่อการประกอบเข้าด้วยกัน

แกนที่ทำมาจาก ferrite มาในรูปแบบต่างๆ กันกำลังใน ferrite ที่ต้องการใช้ชนิดที่ต่างกันจะถูกพัฒนาขึ้นจากโรงงานที่ใส่แตกต่างกัน ตารางที่ 3.1 คือชื่อของ ferrite ที่ขายอยู่ปัจจุบันและชื่อของผู้ผลิตสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Geometry ของแกนที่ใช้ตามจุดประสงค์จะขึ้นอยู่กับขนาดของกำลังที่ต้องการ เช่น E-E, E-I, E-C และ plot core จะเป็นตัวที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน เนื่องมาจากโครงสร้างของมันจะเหมาะสมกับการใช้งานที่สุด ในการนำไปใช้ในสิ่งที่ต้องการ เช่น กำลัง ขนาดที่ต่ำหรือกลาง หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ ใช้อ้อยู่ในราว 20-200 W มันสามารถที่จะนำไปใช้ได้ดีทีเดียวกับการออกแบบที่ต้องการ การรั่วของฟลักซ์นั้นจะมีค่าต่ำ คุณสมบัติของมันในการออกแบบจะมีตัวป้องกันของมันเองโดยจะให้ค่า EMI ต่ำสุดสำหรับขนาดลำดับกำลังที่สูงกว่าได้แก่ E-I, E-E, E-C กับ plot core จะให้ใช้ตัวนี้ในการที่ใช้พลังงานมากกว่า E-C จะให้กำลังที่อยู่ตรงกันระหว่าง E-E กับ plot core ซึ่งจะเป็นการผสมผลดีของแต่ละแบบ ผู้ผลิตแกนจะแสดงขนาดพารามิเตอร์ที่สำคัญ ที่ต้องการใช้ในการออกแบบหม้อแปลง และถ้าพารามิเตอร์แบบใดแบบหนึ่ง มันก็สามารถที่จะนำมาคิดได้ง่ายๆ โดยใช้สูตรในส่วนที่ 3.3 ตารางที่ 3.2 จะเกี่ยวกับลวดแม่เหล็ก ขนาดของลวดแม่เหล็กกับ AWG ต่อความหนาแน่นของกระแส

3.5 การออกแบบหม้อแปลงแบบ PULSE-WIDTH-MODULATED HALF-BRIDGE CONVERTOR

ลำดับการออกแบบที่จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะของ high frequency power transformer ซึ่งการออกแบบโดยทั่วไปและการแปลงให้เป็นกลางจะใช้กับ การออกแบบขบวนการแปลงแบบกำลัง (full-bridge หรือ push-pull pulse-width-modulated (PWM) โดยโลหะที่ใช้ออกแบบจะถูกเลือกดังตัวอย่างแต่โลหะบางชนิดผู้ผลิตจะใช้ตาม data sheets เพื่อให้เลือกใช้ได้อย่างถูกต้อง

Material	Manufacturer
3c8	Ferroxcube
24B	Stackpole
77	Fair-Rite Products
F, T	Magnetics, Inc
H7C1	TDK
N27	Siemens

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นจากเนื้อหา Ferrite สำหรับหม้อแปลงความถี่สูง ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AWG	Diameter over insulation (inches)		Nominal circular mil area	Resistance per 1000 ft	Current capacity in milliamperes based on 1000 c.m./A	AWG
	Min.	Max.				
8	0.130	0.133	16510	0.6281	16510	8
9	0.116	0.119	13090	0.7925	13090	9
10	0.104	0.106	10380	0.9985	10380	10
11	0.0928	0.0948	8230	1.261	8226	11
12	0.0829	0.0847	6530	1.588	6529	12
13	0.0741	0.0757	5180	2.001	5184	13
14	0.0667	0.0682	4110	2.524	4109	14
15	0.0595	0.0609	3260	3.181	3260	15
16	0.0532	0.0545	2580	4.020	2581	16
17	0.0476	0.0488	2050	5.054	2052	17
18	0.0425	0.0437	1620	6.386	1624	18
19	0.0380	0.0391	1290	8.046	1289	19
20	0.0340	0.0351	1020	10.13	1024	20
21	0.0302	0.0314	812	12.77	812.3	21
22	0.0271	0.0281	640	16.20	640.1	22
23	0.0244	0.0253	511	20.30	510.8	23
24	0.0218	0.0227	404	25.67	404	24
25	0.0195	0.0203	320	32.37	320.4	25
26	0.0174	0.0182	253	41.02	252.8	26
27	0.0157	0.0164	202	51.44	201.6	27
28	0.0141	0.0147	159	65.31	158.8	28
29	0.0127	0.0133	128	81.21	127.7	29
30	0.0113	0.0119	100	103.7	100	30
31	0.0101	0.0108	79.2	130.9	79.21	31
32	0.0091	0.0098	64	162	64	32
33	0.0081	0.0088	50.4	205.7	50.41	33
34	0.0072	0.0078	39.7	261.3	39.69	34
35	0.0064	0.0070	31.4	330.7	31.36	35

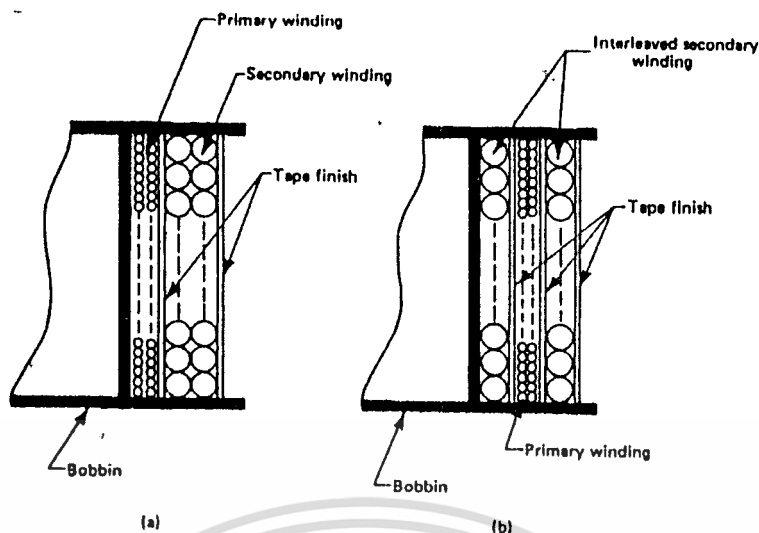
ตารางที่ 3.2 แสดงชนิดของขดลวดที่เคลือบฟิล์มทนแรงดันได้สูง

3.6 ข้อที่ควรคำนึงถึง (PRACTICAL CONSIDERATIONS)

เมื่อทำการตรวจสอบหม้อแปลงที่ถูกใช้งานจริงจะถูกปรับแต่งเพื่อให้ดีขึ้นกว่าเดิมแม้ว่าขดลวดส่วนใหญ่จะเป็นแบบส่วนหนึ่งจะถูกม้วนกองไว้บนขดอื่นๆ ดังแสดงในรูป 3.8 การสอดแทรกของการม้วนจะมีความจำเป็นเพื่อลดผลของการสูญเสียจากการเหนี่ยวนำ การสอดแทรกจะถูกกระทำโดยการพันลวด 1/2 ของขดทุติยภูมิ ตามด้วยการพันของขดปฐมภูมิและต่อด้วยขดของ ทุติยภูมิที่เหลืออีก 1/2

การออกแบบบางครั้งต้องใช้กฎการป้องกันของฟาราเดย์ ระหว่าง ปฐมภูมิกับทุติยภูมิเพื่อลดการสอดแทรกของการแผ่ของความถี่วิทยุ (RFI) แม้ว่า pot core จะมีวิธีการป้องกันที่ดีอยู่แล้วตั้งแต่การพันรอบแกนโลหะทั้งหมดที่ต้องการนั้นก็คือการส่งเสริมการออกแบบหม้อแปลงที่ดีเพื่อแหล่งจ่ายกำลังที่มากกว่าทางเดียวและ จะถูกทำอย่างระมัดระวังระหว่างการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 a. แสดงชั้นของขดลวดพื้นฐานในหม้อแปลง

b. หม้อแปลงที่แยกขดลวดออกมาโดยขดปฐมภูมิ
อยู่ระหว่างขดทุติยภูมิ

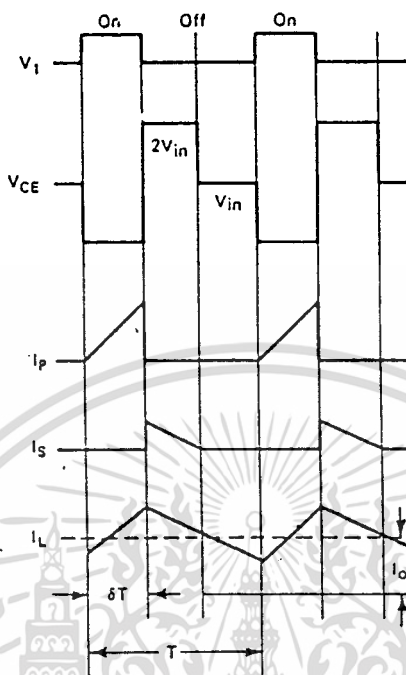
3.7 การออกแบบการแปลงหม้อแปลงแบบใช้ค (TRANSFORMER CHOKE FLYBACK)

จากที่กล่าวมาข้างต้นเป็นการทำงานขั้นพื้นฐานของการแปลงของฟลายแบค ถูกอธิบายและในรูป 3.85 ได้แสดงรูปคลื่นขั้นพื้นฐานบางชนิดซึ่งเกี่ยวข้องกับการแปลงนี้เนื่องมาจากคุณสมบัติการแยกของ topelagy ซึ่งทำหน้าที่ได้ 2 หน้าที่เป็นได้ทั้งหม้อแปลงและใช้ค ในตัวหม้อแปลงและใช้คสำหรับการแสดงถึงลักษณะการใช้งานของมันในการแปลงของฟลายแบค มี 2 หน้าที่ในการทำงานซึ่งเกิดขึ้นได้จากตัวหม้อแปลงใช้คนี้

1. คือการถ่ายเทพลังงานโดยสมบูรณ์วิธีการนี้พลังงานทั้งหมดจะถูกเก็บไว้ใน หม้อแปลงเหนี่ยวนำ (Induction transformer) ซึ่งต่อไปจะถูกถ่ายเทต่อไปยังขดทุติยภูมิก่อนที่ตัวทรานซิสเตอร์สวิทช์ซึ่งจะถูกเปิด

2. การถ่ายเทพลังงานโดยไม่สมบูรณ์เป็นวิธีการที่พลังงานบางส่วนถูกเก็บไว้ในหม้อแปลงเหนี่ยวนำ ก่อนที่จะถูกส่งไปยังขดทุติยภูมิในขณะที่หลังจากการเปิดสวิทช์ รูป3.9 แสดงถึงรูปร่างคลื่นของการทำงานทั้ง 2 แบบ ในกรณีที่มีการถ่ายเทพลังงานโดยสมบูรณ์แสดงให้เห็นกระแสสูงสุดของคอลเลคเตอร์ในขณะที่วงจรเปิดซึ่งหมายถึงค่าของความเหนี่ยวนำขั้นต้นจะค่อนข้างต่ำในความหมายคือทำให้ค่าของขดลวดต่ำโดยการทำให้กระแสสูงขึ้น ซึ่งในขณะเดียวกันทำให้ การสูญเสียในเส้นลวดเพิ่มขึ้นและไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความจุไฟฟ้าทางอินพุต (capacitor input) ไหลเข้าไปในกระแสทั้งนี้ต้องโยงถึงทรานซิสเตอร์ สวิตซ์ซึ่ง ซึ่งจะต้องมีความสามารถในการถ่ายเทกระแสเพื่อที่จะให้กระแสสูงตลอดเวลา



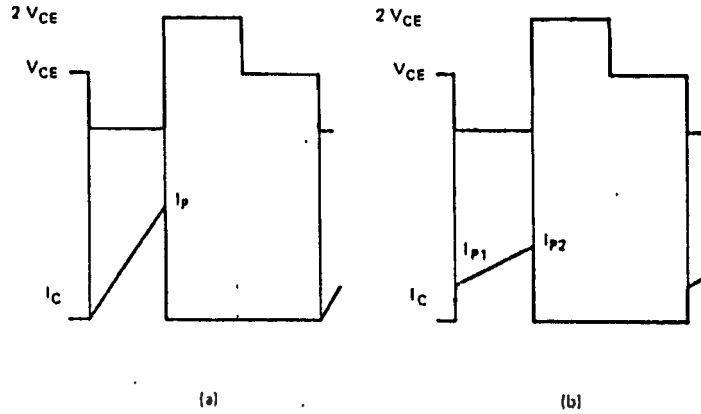
รูปที่ 3.85 การแยกสัญญาณของฟลายแบคกับสัญญาณที่เกี่ยวข้อง

ส่วนการถ่ายพลังงานโดยไม่สมบูรณ์นั้นจะแสดงถึงในทางกลับกันโดยจะแสดงกระแสใน Mode ที่ต่ำกว่าในขณะที่กระแสจากคองเลคเตอร์ที่ไหลผ่านจะสูงกว่าขณะเบิควงจร โดยอีกนัยหนึ่งคือทำให้การแพร่กระจายของทรานซิสเตอร์สูงขึ้น อย่างไรก็ตามเนื่องจากการเห็นยวน่าความนำของทรานฟอร์เมอร์ ไซค์ ที่ค่อนข้างสูงจำเป็นที่จะต้องใช้เพื่อให้การทำงานของ Mode นี้สมบูรณ์ พลังงานที่ถูกเก็บไว้ใน ขดลวดของหม้อแปลง (transformer coil) จะเข้าแทนที่ซึ่งทำให้จำนวนการถ่ายเทพลังงานแบบไม่สมบูรณ์ของ หม้อแปลงไซค์นี้มีจำนวนสูงกว่าการถ่ายเทแบบสมบูรณ์ทั้งนี้ส่วนประกอบอื่นๆ นอกเหนือจากที่กล่าวจะต้องเท่ากันด้วย

3.7.1 จุดมุ่งหมายของการออกแบบ (Design Procedure)

ในลำดับขั้นของสมาการในการออกแบบหม้อแปลงแบบฟลายแบคโดยจากพลังงานที่สมบูรณ์แบบนั้น จะถูกออกแบบให้เป็นลำดับขั้นพื้นฐานที่ต่ำกว่าซึ่งเราพบว่าค่า $1/2$ ของลูกคลื่นกระแส (peak-

collector current) จากรูปที่ 3.9 b จะเขียนโดย $(I_{p1} - I_{p2})$ ไปอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 a. แสดงรูปสัญญาณที่สมมาตรของแรงดันและกระแสใน ฟลายแบคใช้ค
b. แสดงรูปสัญญาณที่ไม่สมมาตรของแรงดันและกระแสใน ฟลายแบคใช้ค

step 1: หม้อแปลงจากกระแสปฐมภูมิจำเป็นที่จะต้องคำนวณค่า peak primary current ลำดับแรกซึ่งทำให้มันเท่ากับ 1/2 ของกระแสที่คอลเลคเตอร์ จากค่าพื้นฐานการคำนวณการเหนี่ยวนำแรงดัน (induce voltage) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าที่เพิ่มมากขึ้นจะกำหนดโดย

$$V = L di/dt \quad 3.13$$

พลังงานที่สมมาตรจากการถ่ายเทนั้นทำให้กระแสเพิ่มจาก 0 ไปยัง peak ของกระแสคอลเลคเตอร์ ระหว่างเวลา t_c เมื่อปิดสวิตซ์ค่าแรงดันทางเข้าจะเขียนได้โดย

$$V_{in} = L_p(I_p/t_c) \quad 3.14$$

โดยที่เอา $1/t_c = f / \max$ ไปแทนที่สมการที่ 3.14 ได้

$$V_{in, \min} = L_p I_{pp} f / \max \quad 3.15$$

เมื่อ	V_{in}	=	แรงดันตรงด้านทางเข้า	V
	L_p	=	Inductance ของขดปฐมภูมิของหม้อแปลง	mH
	I_{pp}	=	กระแสสูงสุดของหม้อแปลง	A
	\max	=	ค่า duty cycle สูงสุด	μs
	f	=	ค่าความถี่ของวงจร	kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังทางออกจะเป็นพลังงานค่ายากที่สมบูรณ์เมื่อค่าเท่ากับพลังงานที่ถูกสะสมได้ต่อ cycle-time ของค่าความถี่ในการทำงาน

$$P_{out} = 1/2 L_p I_{pp}^2 f \quad 3.16$$

แบ่งสมการ 3.16 ไปยัง 3.15 เราจะได้ว่า

$$P_{out}/V_{in,min} = L_p I_{pp}^2 f \max / 2 L_p I_{pp} f$$

ให้ผลลัพธ์การเปลี่ยนแปลงของเทอมในค่าสูงสุดของหม้อแปลงกระแสทางปฐมภูมิ

$$I_{pp} = I_c = 2 P_{out} / V_{in,min} \max \quad 3.17$$

step 2: ค่าเกี่ยวกับค่าสูงสุดและต่ำสุดของ duty cycles ในหลายแบบคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งมีกฎข้อบังคับที่ duty cycle ซึ่งเราจะต้องทราบเสียก่อนเมื่อออกแบบให้ค่า min และค่า max ค่าแรงดันทางเข้าแปรตามจาก $V_{in,min}$ ไป $V_{in,max}$ เมื่อ

$$\min = \max / ((1 - \max)K + \max) \quad 3.18$$

โดยที่ $K = V_{in,max} / V_{in,min} \quad 3.19$

step 3: การคำนวณหม้อแปลงด้านปฐมภูมิ Inductance ตั้งแต่ค่ากระแสของปฐมภูมิสูงสุด ซึ่งในค่าการเหนี่ยวนำของทรานฟอร์เมอร์ใช้คทางปฐมภูมิซึ่งคำนวณได้จาก

$$L_p = V_{in,min} \max / I_{pp} \cdot f \quad 3.20$$

step 4: เลือกขนาดของแกนที่เล็กสุด จากตารางของแกนแม่เหล็ก เพื่อให้เราเลือกใช้ งาน วัสดุที่ใช้ทำแกนและรูปทรงที่ดีที่สุดถ้าเราพันขดลวดปฐมภูมิไปทางเดียวกันแบบ บ็อบบิน บริเวณของขดลวด A_c และบริเวณแกนที่มีผลมาจากขดลวด A_w จะหาได้โดย

$$A_c A_w = (6.33 L_p I_{pp} D^2) 10^6 / B_{max} \quad 3.21$$

เมื่อ D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดป้องกันไปแล้ว (เป็นลวดที่เคลื่อนด้วยในลอนที่ทนแรงดันได้สูง)

และ $B_{max} = B_{sat}/2$

ในขณะที่เดียวกันที่เราทำการออกแบบ ทรานฟอร์เมอร์ใช้การพันขดลวดปฐมภูมิครอบคลุมบนแกน บ็อบบินเป็น 30 เปอร์เซ็นต์ อีก 70 เปอร์เซ็นต์ จะเป็นของขดลวดคหิตยภูมิ อากาศที่อยู่รอบๆ ขดลวด และไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นการป้องกันชนิดหนึ่ง จากกฎมือขวา ตามสมการ 3.21 คูณด้วย 3 แล้วใช้หาขดขั้วขั้วของทราน-
ฟอร์เมอร์ โช๊ค การที่จะป้องกันความเสียหายโดยการเพิ่มตัวประกอบเหล่านี้เข้าไปซึ่งจะให้ติดตั้งคุณ
ด้วย 4 และสมการที่ 3.21 จะได้เป็น

$$A_c A_w = (25.32 L_p I_{pp} D^2) 10^6 / B_{max} \quad 3.22$$

แน่นอนสมการที่ 3.22 การทำ first-order จะทำให้ค่าที่ใกล้เคียงและในที่สุดจะทำให้มีทางเลือกในการใช้แกน และ Bobbin มากขึ้น

step 5: คำนวณความห่าง (gap) ของแกน การทำงานของฟลายแบค คอนเวอร์เตอร์แบบ
single-endedly เป็นการใช้งาน ทรานฟอร์เมอร์ โช๊ค ที่เป็นแบบมีค่าความจุของเส้นแรงเพียงครั้ง
เดียว โดยเหตุที่กระแสและเส้นแรงไม่ได้มีค่าเป็นลบ ตามความเป็นจริงแล้วมีปัญหาก็อาจเกิดขึ้นได้
กับการที่ต้องขั้วลวดที่แกนให้ เข้าสู่สภาวะอิ่มตัว

ปัญหาเหล่านี้สามารถแก้ปัญหาได้ 2 วิธีดังนี้ อย่างแรกใช้แกนที่มีความยาวมากๆ หรืออย่างอื่น 2
แนะนำให้ใช้ air gap ที่มีทางเดินของเส้นแรงเป็นกราฟ hysteresis loop ที่ราบเรียบซึ่งจะ
ต้องใช้ทำงานกับความเข้มของเส้นแรงที่มีค่าต่ำสำหรับการ bias ด้วยไฟ dc ตามปกติผู้ออกแบบจะ
ใช้แบบที่ 2 ในการแก้ปัญหาซึ่งจะทำให้หม้อแปลงที่ผลิตออกมามีความรัดกุมมากขึ้น

ค่าของ air gap จะแสดงให้เห็นถึงความยาวของที่เกิดขึ้นอย่างเสียไม่ได้ในเส้นแรง และการ
สั่งสมพลังงานในทรานฟอร์เมอร์ โช๊คซึ่งเกิดอยู่ในปริมาตรของ air gap V_g ซึ่งความยาวคือ L_g
เมื่อ

$$1/2 L_p I_{pp}^2 = (1/2 B_{max} H_v g) 10^6$$

เมื่อ

$$v_g = A_e l_g$$

และ

$$\mu_0 H = B_{max} / 0.4r$$

$$\mu_0 = \text{ค่า permeability ของอากาศ} = 1$$

ฉะนั้นความยาวของ air gap จะหาได้โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารอ้างอิง (0.4r l_{pp} I_{pp}²) 10⁶ / A_c B_{max}² ที่เขาเท่านั้น (cm) ญาติให้ 3.23 ซึ่งประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าหากแกนเป็นแบบ E-E หรือชนิดที่ใช้กันทั่วๆ ไปมาใช้เป็นโครงสร้างของทรานส์ฟอร์มเมอร์-
ไอส์ค ขากกลางอาจจะเป็น gap ของความยาวของแกนถ้าผู้กำหนดคุณสมบัติให้มันด้วย

step 6: คำนวณจำนวนขดปฐมภูมิของหม้อแปลงเมื่อรู้ค่าความยาว air gap จำนวนขดปฐม-
ภูมิที่จะพันอาจจะคำนวณได้ดังนี้

$$N_p = B_{max} l_g / 0.4 \pi I_{pp} \quad 3.24$$

ผลลัพธ์ที่ได้เราอาจจะวิเคราะห์โดยใช้สมการเสมือนดังนี้

$$N_p = (l_p I_{pp}) 10^8 / A_e B_{ax} \quad 3.25$$

ทั้งนี้สมการที่ 3.24 หรือ 3.25 ก็สามารถนำมาใช้หาผลลัพธ์ได้เช่นเดียวกัน

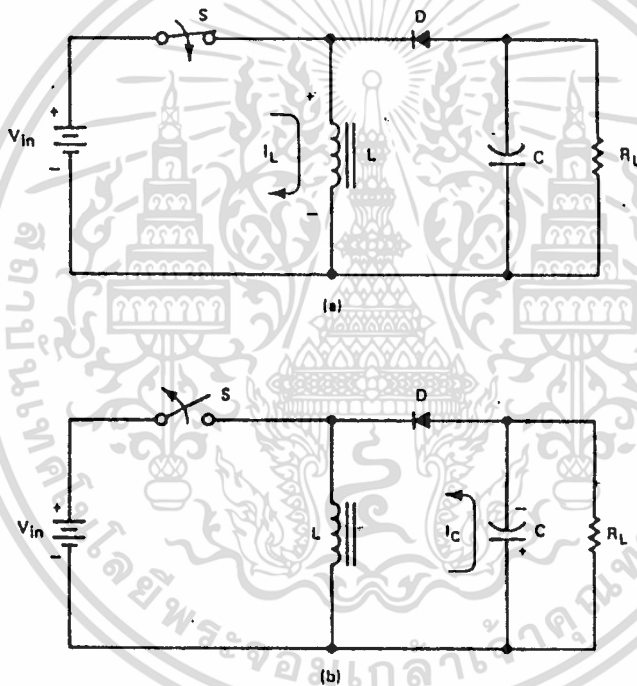
step 7: คำนวณหาจำนวนขดทุติยภูมิ แรงดันทางทุติยภูมิ V_s จะทำการคำนวณได้ต่อเมื่อรู้ค่า
ของแรงดันอินพุตต่ำสุดซึ่งมีค่าตัวประกอบ duty สูงสุด

บทที่ 4

ตัวเปลี่ยนสัญญาณกำลัง (POWER CONVERTOR)

ข้อกำหนดและรูปแบบของวงจร

ถึงแม้ว่าจะมีวงจรเปลี่ยนสัญญาณอยู่มากมายหลายแบบซึ่งขึ้นอยู่กับการวิเคราะห์และการค้นคว้าวิจัย หลักการเบื้องต้นซึ่งมีความสัมพันธ์กันจัดไว้เป็นวงจรที่รู้จักกันเช่น วงจรเปลี่ยนสัญญาณแบบฟลายแบคหรือบูต-บัค, แบบตรงหรือบัค, แบบพุกพลหรือการวิเคราะห์จากแบบบัค สำหรับวงจรเปลี่ยนสัญญาณแบบฟลายแบคนั้นได้แสดงดังในรูปที่ 4.1 ซึ่งจะมีการทำงานของวงจรดังนี้

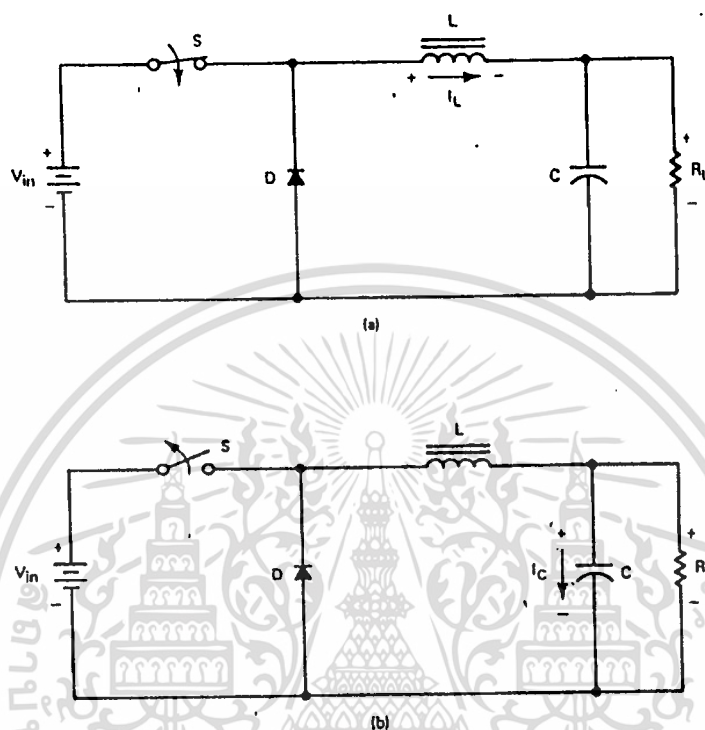


รูปที่ 4.1 วงจรเปลี่ยนสัญญาณแบบฟลายแบค

เมื่อสวิตช์ S ปิดดังแสดงในรูปที่ 4.1a กระแสจะไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ L เกิดการสะสมพลังงาน เพราะว่าผลจากขั้วของแรงดัน ไดโอด D จะได้รับไบอัสกลับจะไม่มีแรงดันปรากฏตกคร่อมโหลด R_L และเมื่อสวิตช์ S เปิดดังแสดงในรูปที่ 4.1b ขดลวดเหนี่ยวนำจะกลับขั้วของแรงดันเนื่องจากผลของเส้นแรงแม่เหล็กทำให้ไดโอด D ได้รับไบอัสตรงและมีกระแสเหนี่ยวนำ I_C ไหลซึ่งมีทิศทางดังที่ได้แสดงไว้ คือขั้วของแรงดันทางด้านเอาต์พุตที่ตกคร่อม R_L จะตรงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภาาใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้วยคร้า ข้ามกับแรงดันทางด้านอินพุต เนื่องจากสวิตช์มีการสับกันอย่างต่อ นี้จะทำให้กระแสเหนี่ยวนำเกิดไม่วกรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

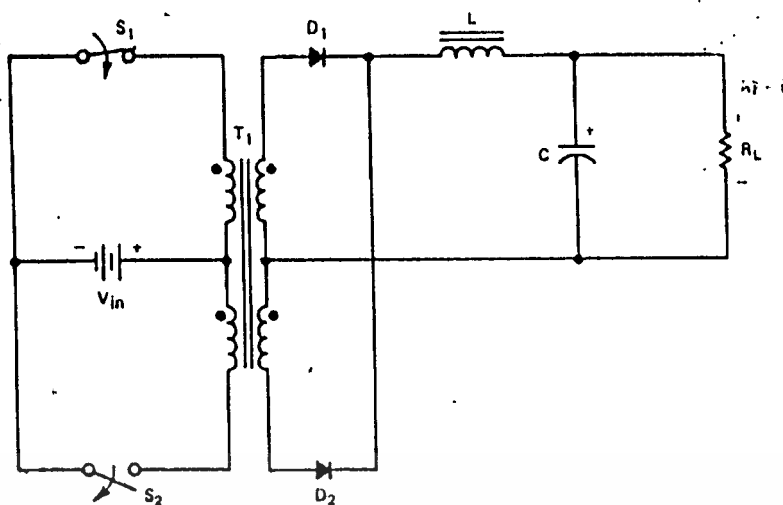
การสลับกันระหว่างอินพุตและเอาต์พุตทำให้กระแสอยู่ในรูปของพัลส์ ในวงจรเปลี่ยนสัญญาณแบบบด-บด พลังงานที่สะสมอยู่ในขดลวดเหนี่ยวนำระหว่างคาบของการสวิตช์ปิด ซึ่งพลังงานนี้จะถูกส่งผ่านไปยัง โหลดในระหว่างที่ฟลายแบคหรือสวิตช์อยู่ในคาบการเปิด



รูปที่ 4.2 วงจรเปลี่ยนสัญญาณแบบโดยตรง

รูปที่ 4.2 จะอธิบายถึงการทำงานของวงจรเปลี่ยนสัญญาณแบบตรง เมื่อสวิตช์ S ปิดกระแส I จะไหลโดยตรงผ่านไปยังขดลวดเหนี่ยวนำ L ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมโวลต์ซึ่งมีขั้วดังแสดงในรูปที่ 4.2a ไดโอด D จะได้รับไบอัสกลับทำให้มีขั้วตรงกับแรงดันอินพุต เมื่อสวิตช์เปิด ดังรูปที่ 4.2b สนามแม่เหล็กในขดลวดเหนี่ยวนำ L จะทำให้เกิดการกลับขั้วไดโอด D จะได้รับไบอัสตรงและมีกระแสไหลผ่านตัวเก็บประจุ C ดังที่แสดงไว้ถึงขั้วของแรงดันทางเอาต์พุตที่ตกคร่อม R_L

เนื่องจากการทำงานแบบสวิตช์ซึ่งกระแสทางด้านเอาต์พุตจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องถึงแม้ว่ากระแสทางด้านอินพุตจะไม่ต่อเนื่องก็ตาม



รูปที่ 4.3 วงจรเปลี่ยนสัญญาณแบบพหุผล

สำหรับรูปที่ 4.3 จะแสดงถึงวงจรเปลี่ยนสัญญาณแบบพหุผลซึ่งเป็นวงจรเปลี่ยนสัญญาณแบบตรง 2 ชุดที่ทำงานสัมพันธ์กันโดยจะสลับกันทำงานของสวิตช์ S_1 และ S_2

4.1 การแยกส่วนของวงจรเปลี่ยนสัญญาณแบบฟลายแบค (Isolate Flyback Transformer)

วงจรเปลี่ยนสัญญาณแบบฟลายแบค (flyback converter) ดังแสดงในรูปที่ 4.1

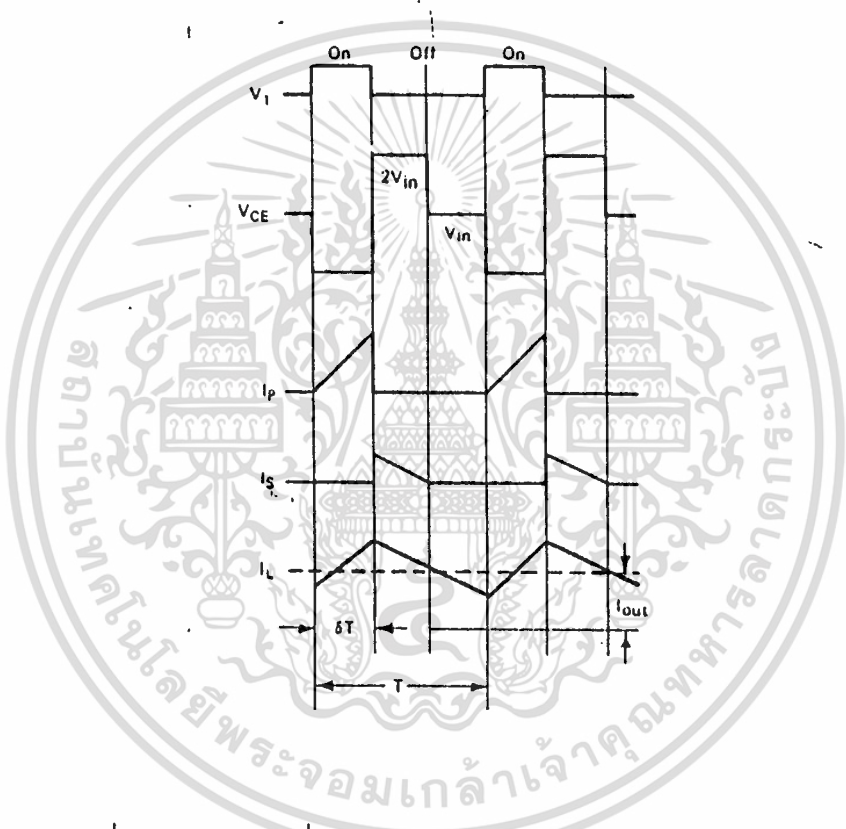
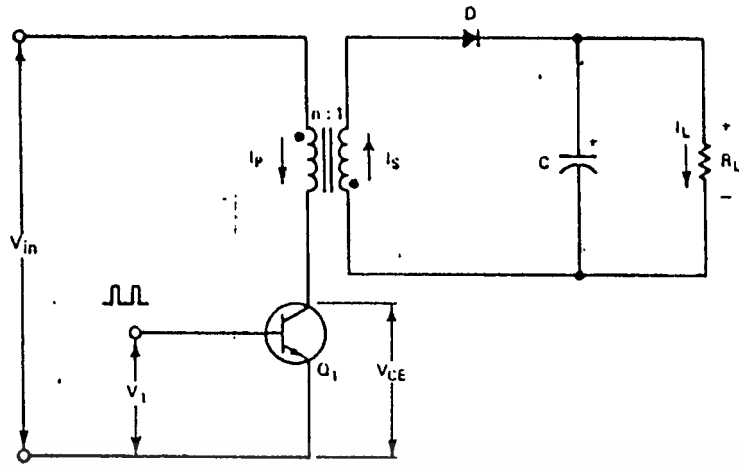
จะไม่มี การป้องกันการเสียหายที่อาจเกิดขึ้นได้ด้วยการ แยกส่วน (isolation) ระหว่าง อินพุท และเอาต์พุท การต่อไฟของแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตซ์ที่ โดยทั่วไปนั้นจำเป็นต้องมีการ แยกส่วน กับสายหลักในรูปของหม้อแปลง แม้ว่าในส่วนหนึ่งของวงจรจะมีอุปกรณ์ที่เป็นหม้อแปลงก็ตาม แต่ขณะที่มันทำงาน มันจะเปรียบได้แค่ขดลวดใช้ค้ เท่านั้นและจะอ้างไปถึง หม้อแปลงแบบใช้ค้

รูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นถึงการแยกส่วนของวงจรเปลี่ยนสัญญาณแบบฟลายแบค ซึ่งมีรูปคลื่นในขณะที่ มันทำงานจนคงสถานะแล้วด้วย การทำงานของวงจรจะเป็นดังนี้ เมื่อทรานซิสเตอร์ Q_1 ทำงาน จะ มีกระแสไหลเข้าไปในขดลวดปฐมภูมิ, เกิดการสะสมพลังงาน ขั้วของไฟระหว่างขดลวดอินพุทกับเอาต์ พุทของหม้อแปลงแบบใช้ค้ จะมีขั้วตรงกันข้ามกัน ขณะนี้จะยังไม่มีการส่งถ่ายพลังงานไปยังโหลดเนื่องจาก ไดโอด D ได้รับไบอัสกลับ

เมื่อทรานซิสเตอร์หยุดการทำงาน ขั้วของไฟจะกลับกันซึ่งเป็นผลมาจากสนามแม่เหล็กที่ตัด กับขดลวด ขณะนี้ไดโอด D จะทำงาน ทำให้เกิดการเก็บประจุที่ตัวเก็บประจุทางด้านเอาต์พุทและมีกระแส

ไหลไปยังโหลด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 วงจรเปลี่ยนสัญญาณแบบฟลายแบคและรูปสัญญาณ

เนื่องจากอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แยกส่วน ซึ่งเป็นส่วนของหม้อแปลงและใช้คไม่มีการเพิ่มขดลวดเหนี่ยวนำซึ่งจำเป็นจะต้องใช้ในส่วนเอาต์พุตของวงจรเปลี่ยนสัญญาณแบบฟลายแบคในการใช้งานก็จำเป็นจะต้องมีขดลวดเล็กๆ ระหว่างภาคเรียงกระแส (rectify) กับ ตัวเก็บประจุทางด้านเอาต์พุต

4.1.1 สวิตชิง ทรานซิสเตอร์ ของวงจรเปลี่ยนสัญญาณแบบฟลายแบค

สวิตชิง ทรานซิสเตอร์ ที่ใช้กับวงจรเปลี่ยนสัญญาณแบบฟลายแบคจะต้องเลือกให้สามารถรับ

แรงดันที่คอลเลกเตอร์สูงสุดขณะที่ทรานซิสเตอร์หยุดทำงาน และไม่ยกขดลวดเหนี่ยวนำไว้ได้โดยมีขดลวดเหนี่ยวนำที่ต่ำกว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรานซิสเตอร์นำกระแส แรงดันที่คอลเลคเตอร์สูงสุดเมื่อทรานซิสเตอร์หยุดทำงานจะหาได้โดย

$$V_{CE, \max} = V_{in} / (1 - \delta_{\max}) \quad (4.1)$$

เมื่อ V_{in} ก็คือแรงดันไฟตรงทางด้านอินพุต และ δ_{\max} คือตัวชี้เซลล์สูงสุด

สมการที่ 4.1 จะบอกโดยการทดสอบถึงอันดับของการจำกัดแรงดันที่คอลเลคเตอร์ที่มีค่าปลอดภัย ค่าตัวชี้เซลล์ซึ่งมีความเกี่ยวข้องจะถูกรักษาให้มีค่าที่ต่ำ ปกติจะให้มิติน้อยกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ในการออกแบบอันดับที่ 2 เมื่อทรานซิสเตอร์ทำงานจะหากระแสที่ไหลผ่านตัวมันได้โดย

$$I_c = I_i / n = I_p \quad (4.2)$$

เมื่อ I_p กระแสสูงสุดของขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงแบบใช้ค, n คืออัตราส่วนของขดลวดระหว่างขดปฐมภูมิตั้งกับขดทุติยภูมิ, และ I_L ก็คือกระแสที่จ่ายให้แก่โหลดทางเอาต์พุต

จะแก้สมการของกระแสคอลเลคเตอร์สูงสุดขณะทำงานในรูปของกำลังงานทางเอาต์พุตและแรงดันทางอินพุตของวงจรเปลี่ยนสัญญาณ และจะเขียนสมการของการส่งถ่ายพลังงานในใช้ค

$$P_{out} = (LI_p / 2T)n \quad (4.3)$$

เมื่อ n (อิต้า) คือค่าแอฟฟิเซียนซี (efficiency) ของตัวเปลี่ยนสัญญาณ แรงดันที่ตกคร่อมบนหม้อแปลงหาได้โดย

$$V_{in} = L di / dt \quad (4.4)$$

ถ้าเราสมมติให้ $di = I_p$ และ $dt = f / \delta_{\max}$ ฉะนั้นสมการที่ 4.4 จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$V_{in} = LI_p f / \delta_{\max} \quad (4.5)$$

หรือ

$$L = V_{in} \delta_{\max} / I_p f \quad (4.6)$$

แทนสมการที่ 4.6 ลงในสมการที่ 4.3 เราจะได้

$$P_{out} = (V_{in} f \delta_{\max} I_p / 2f I_L) n = 1/2 n V_{in} \delta_{\max} I_p$$

แก้สมการของ I_p

$$I_p = 2P_{out} / n V_{in} \delta_{\max} \quad (4.7)$$

นำสมการที่ 4.7 แทนลงในสมการที่ 4.2 เราจะได้สมการใหม่ของกระแสที่ทรานซิสเตอร์ทำงานที่อยู่ ในรูปของกำลังงานทาง output เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ $I_p = 2P_{out} / n V_{in} \delta_{\max}$ ใช้ δ_{\max} เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ (4.8) ขนด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสมการที่ 4.8 ถ้าสมมติให้ค่า $n = 0.8$ (80%) และมี ดิวตี้ไซเคิล $\delta_{max} = 0.4$ (40 เปอร์เซ็นต์) ฉะนั้น

$$I_c = 6.2P_{out}/V_{in} \quad (4.9)$$

4.1.2 วงจรเปลี่ยนสัญญาณแบบฟลายแบคที่ใช้หม้อแปลงแบบใช้ค

เนื่องจากว่าหม้อแปลงแบบใช้คของวงจรเปลี่ยนสัญญาณแบบฟลายแบคจะถูกขับให้ทำงานในทิศทางเดียวซึ่งเป็นคุณสมบัติของ B-H เท่านั้นมันจึงถูกออกแบบมิให้เกิดการทำงานในภาวะอิ่มตัว ค่าแอมเพเดตตีฟ (effective) ของหม้อแปลงแบบใช้คหาได้โดย

$$\text{Volume} = \mu_o \mu_r I_{L, max} L_{out} / B_{max} \quad (4.10)$$

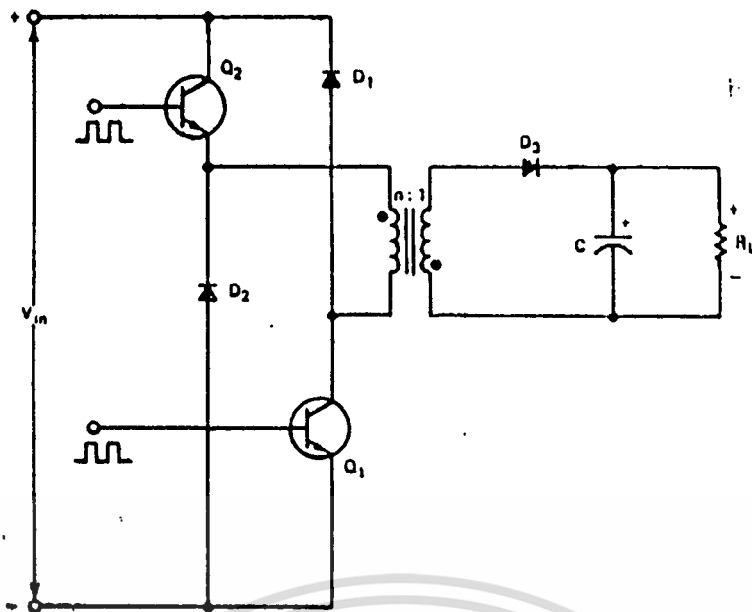
เมื่อ $I_{L, max}$ = ผลของกระแสที่ไหล

μ_r = ค่ารีเลทีฟเปอร์มิอิลิตี้ (relative permeability) ของแกนแบบโลหะ

B_{max} = ความเข้มสูงสุดของเส้นแรงที่แกน

4.1.3 การเปลี่ยนแปลงของวงจรเปลี่ยนสัญญาณแบบฟลายแบคเบื้องต้น

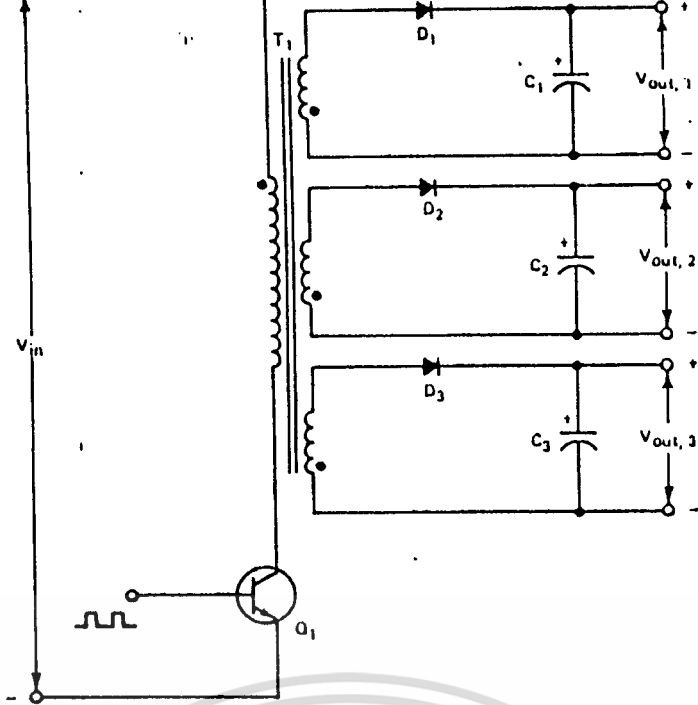
วงจรฟลายแบคเบื้องต้นที่มีการต่อวงจรวงรอบ เมื่อแรงดันที่คอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์ สวิตช์จะมีค่าเป็น 2 เท่าของแรงดันทางอินพุทขณะที่มันหยุดทำงาน ในกรณีเช่นนี้จะต้องใช้ทราน



รูปที่ 4.5 วงจรฟลายแบคที่ใช้ทรานซิสเตอร์ 2 ตัว

ซิสเตอร์ที่มีอัตราการขยายตัวรวมทั้งคลาดที่สามารถทนแรงดันได้สูงๆ เมื่อหันมาใช้ทรานซิสเตอร์ 2 ตัวดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.5 ซึ่งทรานซิสเตอร์จะนำกระแสหรือหยุดนำกระแสพร้อมๆกัน ไดโอด D_1 และ D_2 เป็นแคลมปีงไดโอด (clamping diode) จะเป็นตัวลดแรงดันสูงๆที่คอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์จาก V_m แรงดันน้อยๆของทรานซิสเตอร์ที่ถูกนำมาใช้ในการออกแบบ แต่ก็ต้องคำนึงถึงอุปกรณ์อื่นๆที่อยู่ภายนอก เช่น Q_2 , D_1 และ D_2

การนำวงจรฟลายแบคมาประยุกต์โดยการเพิ่มส่วนของเอาต์พุตของแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิง เนื่องเพราะการแยกส่วนของโวลต์ทางออก แต่ละส่วนจะมีไดโอดและตัวเก็บประจุซึ่งจำเป็นสำหรับแรงดันทางออกภายนอก รูปที่ 4.6 แสดงถึงวงจรแบบที่ใช้งานจริง



รูปที่ 4.6 วงจรเปลี่ยนสัญญาณแบบที่ใช้งานจริง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

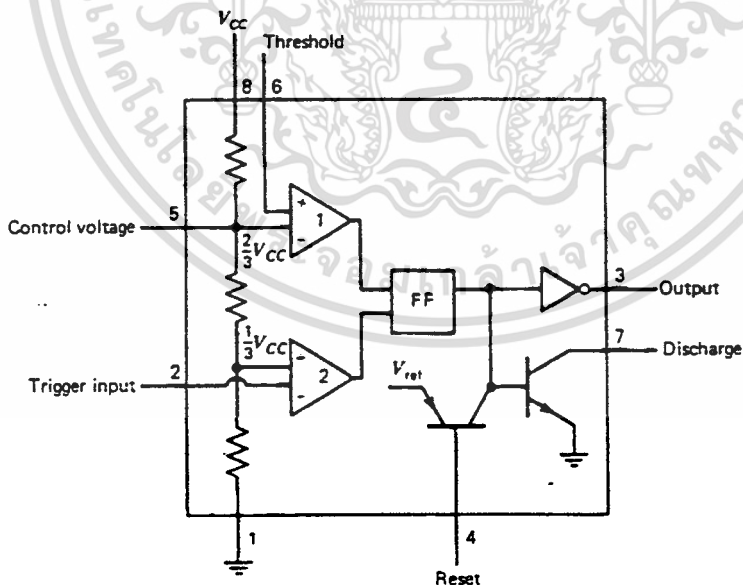
บทที่ 5

วงจรผลิตความถี่ (OSCILLATOR)

หลักการทํางานไอซี 555 ไทม์เมอร์

ตามปกติแล้ว IC เบอร์ 555 นี้จะถูกออกแบบมาให้สามารถใช้งานเป็นวงจรผลิตไวยเบรเตอร์แบบไม่เสถียร (Astable Multivibrator) หรือ วงจรผลิตไวยเบรเตอร์ที่เสถียรสภาวะเดียว (Monostable Multivibrator) ก็ได้ ไอซีเบอร์ 555 นี้ภายในจะประกอบไปด้วยวงจรเปรียบเทียบ (Comparator) 2 ชุด, ฟลิป-ฟลอป และ ส่วนประกอบอื่นดังแสดงในรูปที่ 5.1

ซึ่งถูกบรรจุอยู่ในไอซี 8 ขา ซึ่งได้บอกขาเอาไว้ในรูปที่ 5.1 เช่นเดียวกัน ภายในจะมีตัวต้านทานต่ออนุกรมกันมีประมาณ 5 kOhm เป็นตัวสร้างแรงดันอ้างอิงที่ $(1/3)V_{CC}$ และ $2V_{CC}/3$, เมื่อแรงดัน Threshold ที่ขา 6 เพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึง $2V_{CC}/3$ ฟลิป-ฟลอป จะทำงานทำให้เอาท์พุทที่ขา 3 เป็น โลว์ และในขณะเดียวกัน ทรานซิสเตอร์ จะคายประจุเอาท์พุท ที่ขา 7 จะเป็น โลว์ ด้วยเมื่อ อินพุททริกเกอร์ ที่ขา 2 มีค่าต่ำกว่า $V_{CC}/3$ ฟลิป-ฟลอป จะทำงานขั้บให้ เอาท์พุทที่ขา 3 เป็น ขวกและ ทรานซิสเตอร์คายประจุ จะหยุดทํางาน (turn off)



³ Supply voltage V_{CC} typically ranges between 4.5 V and 18 V.

⁴ Output is capable of sinking 200 mA when low.

รูปที่ 5.1 วงจรภายในของ IC 555 Timer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมจะต้องทำให้แรงดัน input ที่ขา 5 มีค่าเท่ากับ $(2/3)V_{cc}$ ซึ่งเป็นระดับที่ วงจรเปรียบเทียบ 1 ,ขา อินพุทรีเซ็ต (reset input) (ขา 4) จะต้องขับให้ ดิสชาร์จเอาท์พุท (discharge output) (ขา 7) เป็นศูนย์ ไอซี 555 นี้สามารถนำมาต่อให้ ทำงานเป็นวงจรมัลติไวเบรเตอร์ที่ไม่เสถียร หรือวงจรมัลติไวเบรเตอร์ที่เสถียรสถานะเดียว ซึ่งจะต่อ ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุภายนอกเป็นตัวกำหนดความถี่และคาบเวลา

วงจรมัลติไวเบรเตอร์แบบไม่เสถียร (ASTABLE MULTIVIBRATOR)

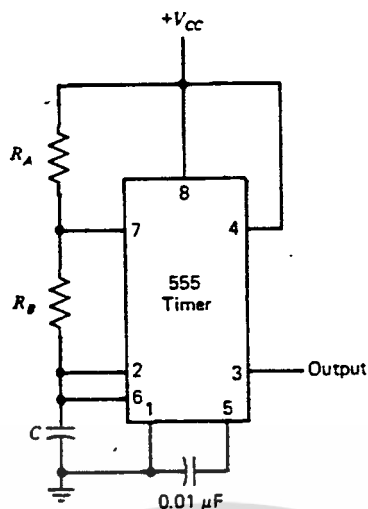
วงจรมัลติไวเบรเตอร์แบบไม่เสถียรสามารถใช้ไอซีเบอร์ 555 ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 5.2 ตัวต้านทาน R_A, R_B และตัวเก็บประจุ C จะกำหนดค่าของเวลา ระหว่างที่ตัวเก็บประจุ C สลับกัน ชาร์จและดิสชาร์จ ทำให้เกิดการกำเนิด สัญญาณทางเอาท์พุทระหว่าง 0 โวลต์และ V_{cc}

จะสามารถอธิบายการทำงานของไอซี 555 ได้จากรูปที่ 5.1 เราจะเห็นว่าการทำงานของวงจรเป็นดังนี้

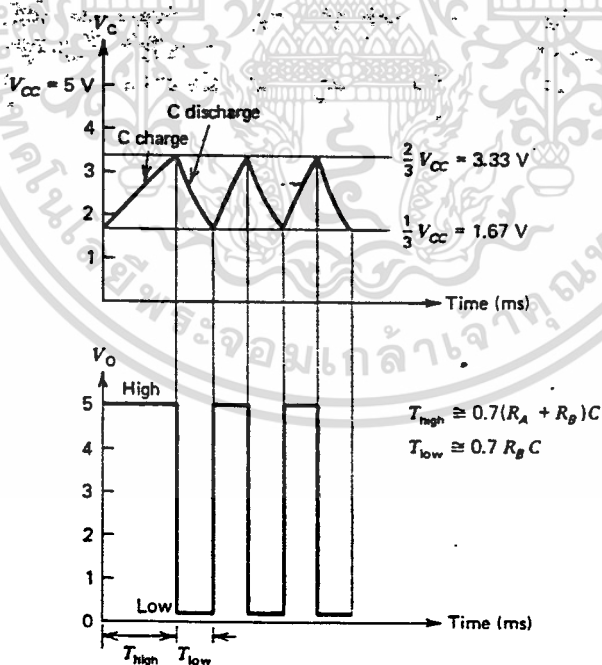
ตัวเก็บประจุ C จะทำการเก็บประจุไปสู่ V_{cc} ด้วยค่าของค่าเวลาคงตัว ซึ่งมีค่าเท่ากับ $(R_A + R_B)C$ เมื่อแรงดันที่ตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับแรงดัน threshold หรือ $2/3V_{cc}$ เอาท์พุทจะกลายเป็นศูนย์และ ทรานซิสเตอร์คายประจุจะทำงานในระหว่างนี้ ขาดิสชาร์จเอาท์พุท จะเป็นศูนย์ ตัวเก็บประจุ C จะคายประจุผ่านตัวต้านทาน R_B ที่ค่าเวลาคงตัว $= R_B C$ จนกว่า ระดับที่อินพุททริกเกอร์ $= 1/3 V_{cc}$ ฟลิก-ฟลอป จะได้รับการทริกทำให้ เอาท์พุทเป็นบวก ทรานซิสเตอร์คายประจุจะหยุดทำงาน ตัวเก็บประจุ C ก็จะเริ่มทำการเก็บประจุใหม่ค่าเวลาคงตัวของรูปคลื่นทางเอาท์พุทหาได้โดย

$$T_{\text{high}} = 0.7(R_A + R_B)C$$

$$T_{\text{low}} = 0.7R_B C$$



รูปที่ 5.2 วงจร astable multivibrator



รูปที่ 5.3 รูปคลื่นของวงจรมัลติไวเบเรเตอร์แบบไม่เสถียรที่ใช้ไอซี 555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.3 เป็นรูปคลื่นที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุและรูปคลื่นทางเอาต์พุต ซึ่งใช้แรงดัน $V_{CC} = 5V$ ค่าคาบเวลาของรูปคลื่นทางเอาต์พุตหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{คาบเวลา} = T &= T_{\text{high}} + T_{\text{low}} = 0.7(R_A + R_B)C + 0.7R_B C \\ &= 0.7(R_A + 2R_B)C \end{aligned}$$

ถ้าจัดให้อยู่ในรูปของ ความถี่จะได้เป็น

$$f = 1/T = 1/(0.7(R_A + 2R_B)C)$$

$$f = 1.43/(R_A + 2R_B)C$$

ค่าดีวีไอเซลสามารถหาได้จาก

$$\text{ดีวีไอเซล} = T_{\text{low}}/T \times 100 \%$$

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเป็น เปอร์เซนต์ของช่วงเวลาที่ output เป็น low duty cycle จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$\text{ดีวีเตอร์ไอเซล} = (R_B / (R_A + 2R_B)) \times 100 \%$$

บทที่ 6

ฟาสต์-รีคัฟเวอรี ไดโอด (Fast Recovery Diode)

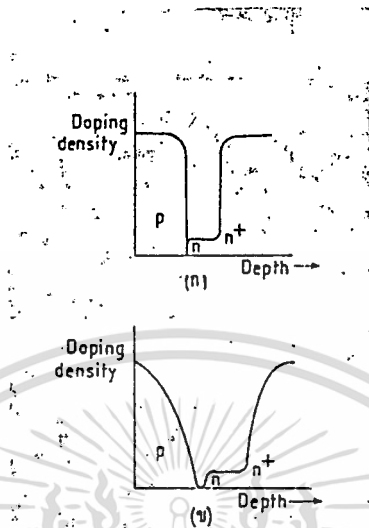
แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงแบบสวิตซ์ (switching power supply) นับวันยิ่งจะมีบทบาทมากขึ้น เพราะถูกออกแบบให้มีน้ำหนักเบา ประสิทธิภาพสูงและราคาถูกลง องค์ประกอบสำคัญสำหรับแหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงแบบสวิตซ์ก็คือ ประสิทธิภาพ ปัจจัยที่จะทำให้มีประสิทธิภาพสูงได้แก่ อุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรจึงมีการพัฒนาอุปกรณ์แบบใหม่ๆ เช่น ทรานซิสเตอร์สวิตซ์แรงดันสูงไอซีควบคุมการทำงาน หม้อแปลงแกนเฟอร์ไรต์ รวมไปถึงตัวเก็บประจุแรงดันสูงแบบอิเล็กโทรไลต์ และสิ่งที่จะขาดไม่ได้ก็คือ ไดโอดเรียงกระแสที่เอาต์พุตจากที่กล่าวมานี้ ไดโอดก็เป็นอุปกรณ์ตัวหนึ่งที่จำกัดประสิทธิภาพของแหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงแบบสวิตซ์ข้อแรกก็คือ ความเร็ว ไดโอดที่จะใช้กับงานประเภทนี้ต้องมีความเร็วสูง เพราะแหล่งจ่ายไฟประเภทนี้ทำงานที่ความถี่ในช่วง 25-50 กิโลเฮิรตซ์ข้อที่สองก็คือ แรงดันตกคร่อมไดโอดขณะนำกระแส หรือแรงดันตกคร่อมขณะไดโอดได้รับไบแอสตรงจะต้องต่ำ เพราะกระแสไฟที่ไหลผ่านไดโอดขณะนำกระแสมีค่าสูงมาก ถ้าแรงดันตกคร่อมไดโอดมีค่าสูงจะทำให้มีการสูญเสียสูงตามไปด้วย ดังนั้นเพื่อประสิทธิภาพที่ดีของแหล่งจ่ายไฟ การศึกษาในเรื่องของไดโอดจึงเป็นสิ่งสำคัญ

ในที่นี้จะแนะนำไดโอดสำหรับใช้ในแหล่งจ่ายไฟแบบนี้โดยเฉพาะ เนื่องจากมีแรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสต่ำกว่า 1 โวลต์ (ที่กระแสสูงสุด) และความเร็วหรือปกติจะระบุเป็นเวลากลับสู่สถานะเดิม (recovery times) ซึ่งมีค่า 30-50 nsec เท่านั้น ไดโอดที่จะพูดถึงมีรหัสเป็น BYW29, BYW30, BYW31 และ BYW92 ไดโอดทั้งหมดนี้เป็นฟาสต์รีคัฟเวอรี ไดโอดแบบเอพิทอกเซียล (fast recovery epitaxial diodes) ใช้ในแหล่งจ่ายไฟที่ให้แรงดันเอาต์พุตสูงไม่เกิน 35 โวลต์

เอพิทอกเซียล เทคโนโลยี่

ไดโอดชนิดนี้ใช้เทคโนโลยีแบบเอพิทอกเซียลในการสร้าง ซึ่งมีข้อดีกว่าวิธีการสร้างไดโอดด้วยกรรมวิธีดับเบิล-ดิฟฟิวส์ (double-diffused) ในรูปที่ 1 เป็นการเปรียบเทียบวิธีการได้ปัสสารกึ่งตัวนำในการสร้างไดโอดทั้งสองแบบซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเทคโนโลยีแบบเอพิทอกเซียลจะควบคุมวัสดุที่ใช้อย่างละเอียด โดยเฉพาะตรงรอยของสาร, ความลึกและความหนาของสาร ชั้นรองจะถูกควบคุมเพื่อให้ได้ไดโอดที่มีประสิทธิภาพ และความเร็วสูงด้วย จากรูปที่ 2 เป็นเอกสารเป็นเอกสารที่อธิบายถึงวิธีการสร้างไดโอดชนิดนี้ เมื่อผู้ดูแลระบบใช้โปรแกรมที่แนะนำไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

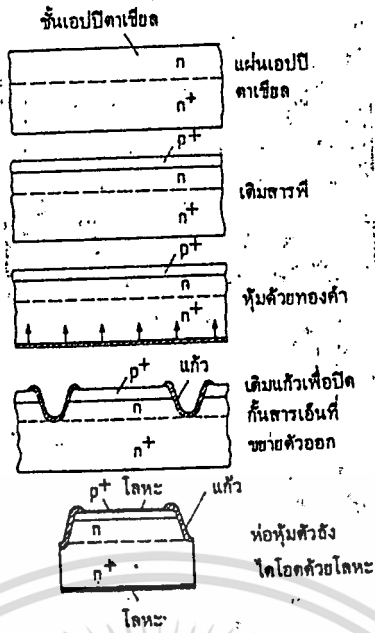
ขั้นตอนการผลิตฟอสต์-รีคัพเวอรีไดโอดชนิดเอปิตาเซียส ที่รอยต่อของไดโอดจะเติมแก้วเพื่อปิดสารเอ็นทียคขยายออก แก้วที่เติมลงไปนี้มีข้อดีคือ ประการแรก ขอบรอยต่อจะถูกป้องกันไม่ให้มีผลกระทบจากรอยต่อที่ติดกัน



รูปที่ 1 แสดงเปรียบเทียบการได้ปสารกึ่งตัวนำระหว่าง
 ก. ฟอสต์-รีคัพเวอรีไดโอดชนิดเอปิตาเซียส
 ข. ไดโอดชนิดดับเบิล-ดีฟฟิวส์

ประการที่สอง สามารถที่จะนำอุปกรณ์นี้ไปทดสอบได้โดยไม่ต้องห่อหุ้มก่อน ประการสุดท้ายก็คือจากการทดสอบเป็นเวลานานพบว่าอุปกรณ์ที่เติมแก้วลงไปให้ผลคงที่มาก สำหรับไดโอดเบอร์ BYW29 ยังมีลักษณะเด่นอีกคือ โลหะที่ห่อหุ้มตัวถังซึ่งต่อกับสายตัวนำภายนอก จะไม่ห่อหุ้มสารซิลิกอนโดยตรง แต่จะมีทองคำห่อหุ้มผสมกับซิลิกอนชั้นหนึ่งก่อน ข้อดีของวิธีนี้คือ ทำให้ความต้านทานระหว่างโลหะตัวนำกับซิลิกอนลดลง ความต้านทานนี้จะเป็นตัวกำเนิดความร้อน (thermal resistance) เนื่องจากทองคำที่หุ้มซิลิกอนมีสภาพการนำความร้อนดีกว่าการใช้ตัวนำดีบุกหลอมที่ใช้อุณหภูมิลดลงจะทำให้การทำงานของอุปกรณ์มีประสิทธิภาพและอายุการใช้งานสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

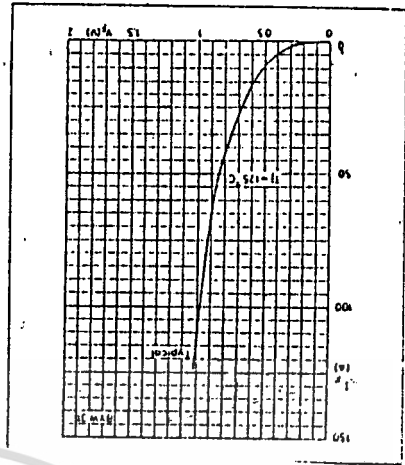


รูปที่ 2 ขั้นตอนการสร้าง ฟอสต์-รีคัพเวอร์ไดโอดชนิดเอปิตาเซียล

	BYW29	BYW30	BYW31	BYW92
I_{FAV} (A)	7.0	12	25	35
$V_{คดม}$ (V)	50, 100, 150	50, 100, 150	50, 100, 150	50, 100, 150
Q_s (nC)	<15	<15	<20	<20
V_F at I_{FAV} ($T_j=125^\circ$) (V)	0.85	0.85	0.85	0.85
I_{rr} (ns)	<35	<35	<50	<50
Encapsulation	Glass-passivated eutectic-bonded DO-220	Glass-passivated DO-4	Glass-passivated 'rock-top' DO-4	Glass-passivated DO-5

ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลทางไฟฟ้าของฟอสต์-รีคัพเวอร์ไดโอดชนิดเอปิตาเซียล

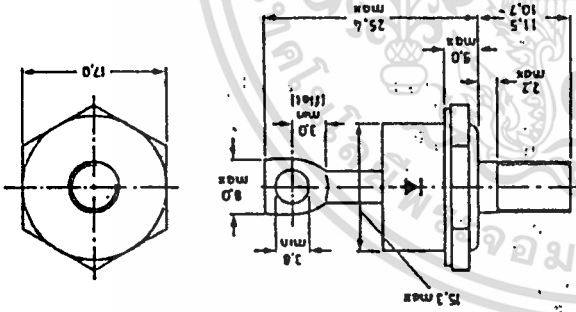
จากตารางที่ 1 เป็นการแสดงข้อมูลโดยย่อของฟอสต์-รีคัพเวอร์ไดโอดชนิดเอปิตาเซียล สำหรับรูปที่ 3 แสดงลักษณะตัวถังของไดโอดแต่ละเบอร์ โดย BYW29 จะเป็นตัวถังชนิด DO-220 ซึ่งปรับปรุงมาจาก TO-220 ส่วน BYW30 และ BYW31 อยู่ในตัวถัง DO-4 และ BYW92 อยู่ในตัวถังชนิด DO-5 สำหรับตัวถัง DO-4 จะมี 2 ขนาดคือ แบบหัวโต และแบบมาตรฐาน ถ้าต้องการแบบหัวโตจะมีอักษร U กำกับไว้ เช่น BYW31-100U (100 แสดงค่าทนแรงดันย้อนกลับ)



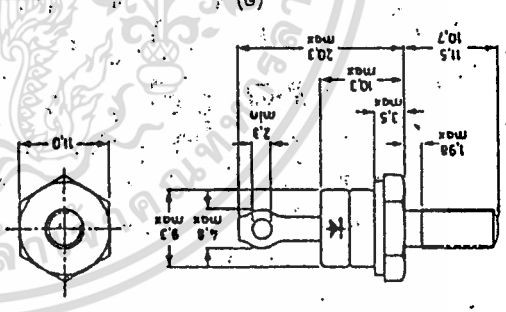
- ก. BYW92
- ข. BYW31
- ค. BYW30
- ง. BYW29

รูปที่ 3 แสดงรูปทรงของไดโอด

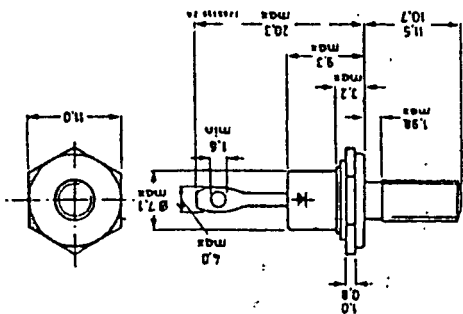
(จ)



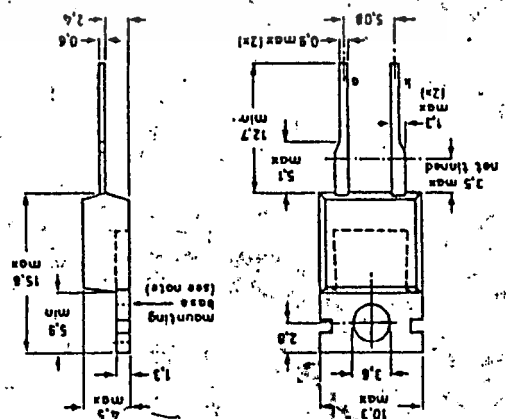
(ข)



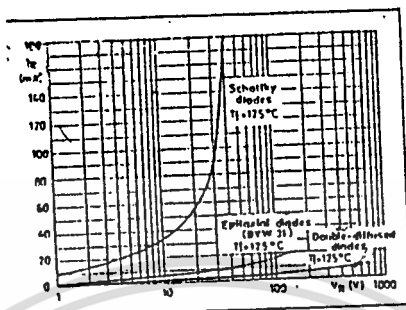
(ค)



(ง)

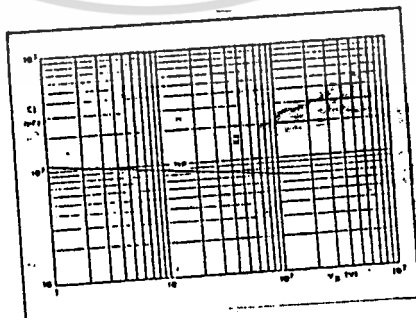


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5 แสดงค่าเก็บประจุแรงดันย้อนกลับของเบอร์ BYW30

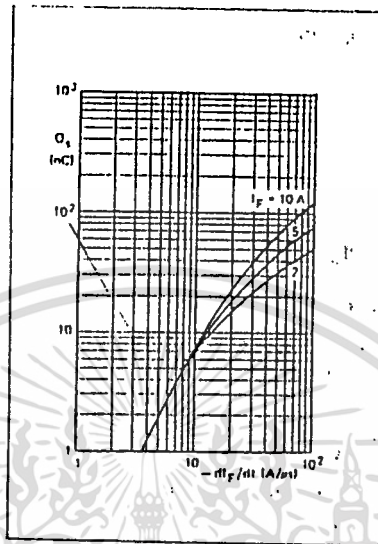
รูปที่ 5 เป็นการแสดงการเปรียบเทียบกระแสรั่วไหลย้อนกลับ (reverse-leakage characteristics) ของฟอสต์-รีคัพเวอรี ไดโอดทั้ง 3 ชนิดคือ ชนิดเอปิตาเซียล, ดับเบิลดิฟฟิวส์ และ ซอตต์ก้าแบเรียร์ จากกราฟจะพบว่าคุณสมบัติของเอปิตาเซียลและ ดับเบิลดิฟฟิวส์ดีกว่าชนิดซอตต์ก้าแบเรียร์ จากกราฟจะพบว่าคุณสมบัติของเอปิตาเซียลและดับเบิลดิฟฟิวส์ดีกว่าชนิดซอตต์ก้าแบเรียร์



รูปที่ 6 แสดงประจุสะสม Q_s ของ BYW30 ที่กระแสตรงต่างกัน

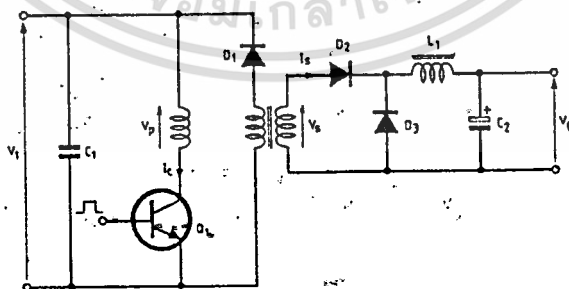
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6 แสดงค่าประจุสะสม (Q_s) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของการเปลี่ยนแปลงกระแสทางตรงต่อเวลา (dI_f/dt) โดยวัดที่ค่ากระแสทางตรงต่างๆ (BYW30)



รูปที่ 7 แสดงค่าเก็บประจุแรงดันย้อนกลับของเบอร์ BYW30

รูปที่ 7 เป็นกราฟแสดงค่าความจุบริเวณรอยต่อ (C_j : BYW30) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของแรงดันย้อนกลับ (V_r : reverse voltage)



รูปที่ 8 แสดงวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบพวงตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้ไดโอดกับแหล่งจ่ายแรงดันแบบสวิตชิ่ง

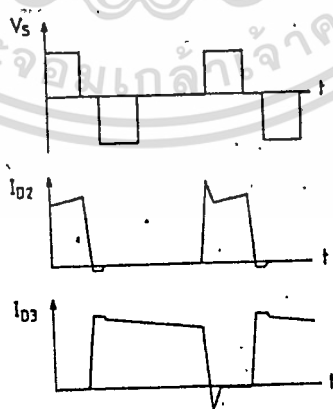
ฟาสต์-รีคัพเวอร์ไดโอดจะถูกใช้ในวงจรคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งวงจรคอนเวอร์เตอร์สามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบคือแบบฟลายแบ็ค (flyback), ทางตรง (forward) และแบบpush-pull สำหรับในที่นี้เราจะแสดงเพียง 2 แบบ คือ ทางตรง และpush-pull พร้อมทั้งพฤติกรรมของไดโอดทั้งทางตรงและทางกลับและยังเปรียบเทียบข้อดี ข้อเสียของไดโอดแต่ละชนิดด้วย

แรงดันทางตรง (Forward Voltage)

รูปที่ 8 เป็นวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบทางตรง หม้อแปลงมีขดลวด 3 ขด คือ ขดปฐมภูมิ ขดทุติยภูมิ และขดเสริม (tertiary) เมื่อทรานซิสเตอร์ Q_1 ทำงานจะมีกระแสไหลผ่านขดปฐมภูมิ เนื่องจากขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิมีขั้ว (dot) เหมือนกัน พลังงานจึงถูกส่งผ่านไปยังขดทุติยภูมิ เกิดกระแสไหลผ่านไดโอด D_2 ผ่านโช้ก L_1 ไปยังเอาต์พุต

พอ Q_1 กลับมาอยู่ในสภาวะที่ไม่ทำงาน จะเกิดแรงดันย้อนกลับที่ขดทุติยภูมิทำให้ไดโอด D_2 ได้รับไบแอสกลับทาง แต่ฟลายวีลไดโอด (flywheel diode) D_3 ได้รับไบแอสตรง เพราะเกิดแรงดันกลับขั้วที่โช้ก L_1 ไดโอด D_3 นำกระแสผ่าน L_1 ไปยังเอาต์พุต

สำหรับขดลวดเสริม และไดโอด D_1 ทำงานในช่วงที่ทรานซิสเตอร์ Q_1 ไม่ทำงาน โดยกระแสที่ผ่านไดโอด D_1 จะทำให้หม้อแปลงหมดสภาพจากการเป็นแม่เหล็ก เพราะทิศทางขดลวดกลับทางกัน



รูปที่ 9 แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 9 แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสในวงจร เนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านไฉก L_1 จะผ่าน ไดโอด D_2 และ D_3 เท่านั้น ถ้าไดโอดทั้ง 2 เหมือนกันจะได้แรงดันที่เอาท์พุท

$$V_o = V_m - V_f \quad (1)$$

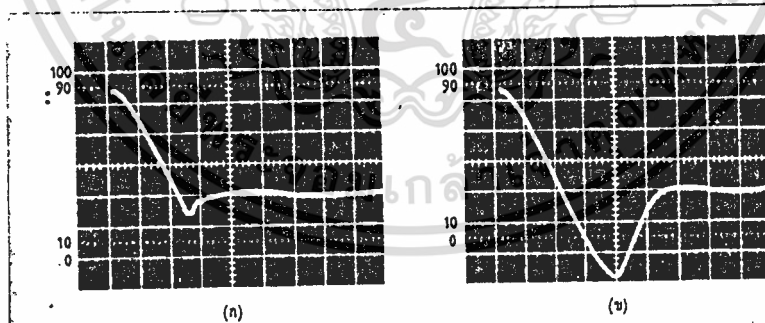
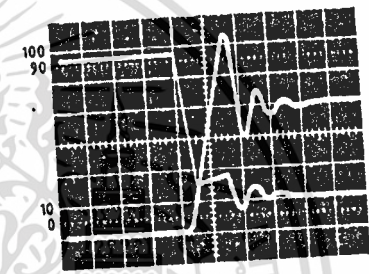
เมื่อ V_f คือแรงดันตกคล่อมไดโอด (D_2 และ D_3) ขณะไบแอสตรง

เดลต้า (ϕ) คือดิวตี้ไซเคิล (duty cycle : เวลาที่ทรานซิสเตอร์นำกระแสต่อคาบเวลา)

กำลังสูญเสียเนื่องจาก V_f คือ

$$P_{loss} = V_f * I_o \quad (2)$$

เมื่อ I_o คือกระแสที่เอาท์พุท



รูปที่ 10 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ V_o และ I_o ขณะทรานซิสเตอร์ Q_1 ทำงาน

รูปที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบเวลารีเวิร์สรีคัฟเวอรีของไดโอด D_2

ก. ไดโอดชนิดเอปิตาเซียลเบอร์ BYW31

ข. ไดโอดชนิดดับเบิล-ดีฟนิวส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การลดการสูญเสียก็คือ การเพิ่มประสิทธิภาพนั่นเอง ดังนั้นแรงดันตกคล่อมทางตรงของไดโอด D_2 และ D_3 จะต้องต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

ฟาสต์-รีคัพเวอรีไดโอดชนิดเอปิตาเซียล ดีกว่าชนิดดับเบิล-ดีฟฟิวส์ เพราะความลาดชันต่ำกว่าทำให้กำลังการสูญเสียน้อยกว่า ซึ่งทำให้ต้องการฮีตซิงค์ หรือแผ่นระบายความร้อนที่เล็กกว่า

ประจุสะสมในไดโอดสามารถหาได้ขณะที่ทรานซิสเตอร์สวิตช์ เพราะจะเกิดการเปลี่ยนแปลงกระแสอย่างรวดเร็ว (q_e ขึ้นอยู่กับ di_e/dt) เมื่อทรานซิสเตอร์ Q_1 ทำงานไดโอด D_2 นำกระแสไดโอด D_3

หยุดนำกระแส D_2 แต่หากทรานซิสเตอร์ไม่ทำงาน กระแสในไดโอด D_2 เริ่มตกและแรงดันตกคล่อมขึ้น

L_1 กลับทางและเพิ่มขึ้นจนกระทั่งไดโอด D_3 ได้รับไบแอสตรง กระแสเริ่มไหลผ่าน D_3 ขณะที่กระแสใน

D_2 ลดลง กระแสที่ไหลผ่านโซลิต L_1 คงที่ กระแสแม่เหล็กเนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กขยับตัวไหลผ่าน D_2

และ D_3 ลดประจุสะสมในไดโอด D_2 จนกระทั่ง D_2 หยุดนำกระแส แรงดันขดลวดทุติยภูมิกลับขึ้น กระแสแม่เหล็กไหลผ่านไดโอด D_1 เข้าไปยังแหล่งจ่ายไฟ

ช่วงที่ไดโอด D_2 กลับสู่สภาวะรีเวิร์ส-รีคัพเวอรี แรงดันขดลวดทุติยภูมิเป็นศูนย์ และเส้นแรงแม่เหล็กในหม้อแปลงยังคงที่ จำเป็นที่จะต้องให้เวลากลับสู่สภาวะรีเวิร์ส-รีคัพเวอรีของไดโอด D_2 เร็ว

เมื่อเปรียบเทียบกับช่วงเวลาที่ทรานซิสเตอร์อยู่ในสภาวะไม่ทำงานเพื่อให้แน่ใจว่าเวลาเพียงพอที่จะทำให้ขดลวดหม้อแปลงกลับเป็นแม่เหล็ก ลดแรงแม่เหล็กให้เป็นศูนย์ก่อนที่ทรานซิสเตอร์ Q_1 จะกลับมาทำงานอีกครั้ง ถ้าเวลากลับสู่สภาวะเดิมช้าจะเป็นการจำกัดความถี่การทำงาน และค่าสูงสุดของคิวตี้-ซเกิล (ลดประสิทธิภาพนั่นเอง)

สำหรับพฤติกรรมรีเวิร์ส-รีคัพเวอรีของไดโอด D_3 จะแตกต่างจาก D_2 เพราะเกิดในช่วงที่ทรานซิสเตอร์ทำงาน

จากรูปที่ 9 เมื่อทรานซิสเตอร์ Q_1 ทำงานกระแสไหลผ่านไดโอด D_2 สูงขึ้น กระแสใน ไดโอด D_2

ลดลง ช่วงที่ไดโอดทั้งสองได้ไบแอสตรงแรงดันขดทุติยภูมิเป็นศูนย์ อัตราการเพิ่มของการกระแสผ่าน การเหนี่ยวนำ

นำรั่วไหลของหม้อแปลงซึ่งอาจจะพิจารณาเป็นค่าเหนี่ยวนำอนุกรมกับขดปฐมภูมิ หาได้โดยแรงดัน ตกคร่อมอิน

พุทของหม้อแปลง เนื่องจากแรงดันคอเล็กเตอร์-อิมิตเตอร์ (V_{CE}) ของทรานซิสเตอร์ กระแสที่ไหลผ่านความเหนี่ยวนำรั่วไหลก็คือกระแสคอเล็กเตอร์ดังนั้น V_{CE} จึงหาได้จากอัตราการ เพิ่มของกระแส

คอเล็กเตอร์ (I_C)

อัตราการเพิ่มของกระแส I_C ขึ้นอยู่กับกระแสเบส โดยปกติกระแสเบสมีค่าประมาณ 0.1- 0.2 เท่า

ของกระแส I_C การเปลี่ยนแปลงกระแส I_C (20 - 50 แอมป์/ไมโครวินาที) ไม่เพียงพอที่ทำให้แรงดันเนื่องจากค่าเหนี่ยวนำรั่วไหลมีค่าเท่าแรงดันอินพุทของหม้อแปลง ดังนั้นทรานซิสเตอร์จะไม่อิ่มตัวในช่วงกลับสู่สภาวะรีเวิร์ส-รีคัพเวอรีของ D_2

การสูญเสียในทรานซิสเตอร์ส่วนมากจะเกิดในช่วงที่ทรานซิสเตอร์ทำงานการสูญเสียนี้ขึ้นอยู่กับ กระแสคอเล็กเตอร์สูงสุด ซึ่งขึ้นอยู่กับกระแสที่เอาท์พุทและค่าสูงสุดกระแสรีเวิร์ส-รีคัพเวอรีและ ช่วงเวลารีเวิร์ส-รีคัพเวอรีของไดโอด D_2 ด้วย การที่จะลดค่าการสูญเสียจำเป็นต้องให้ประจุสะสมไดโอด D_2 น้อยมาก ดังรูปที่ 10 และสำหรับรูปที่ 11 เป็นการเปรียบเทียบสภาวะรีเวิร์ส-รีคัพเวอรีของไดโอด ชนิดเอปิตาเซียสรูป ก. และชนิดดับเบิลดิฟฟิวส์ รูป ข.

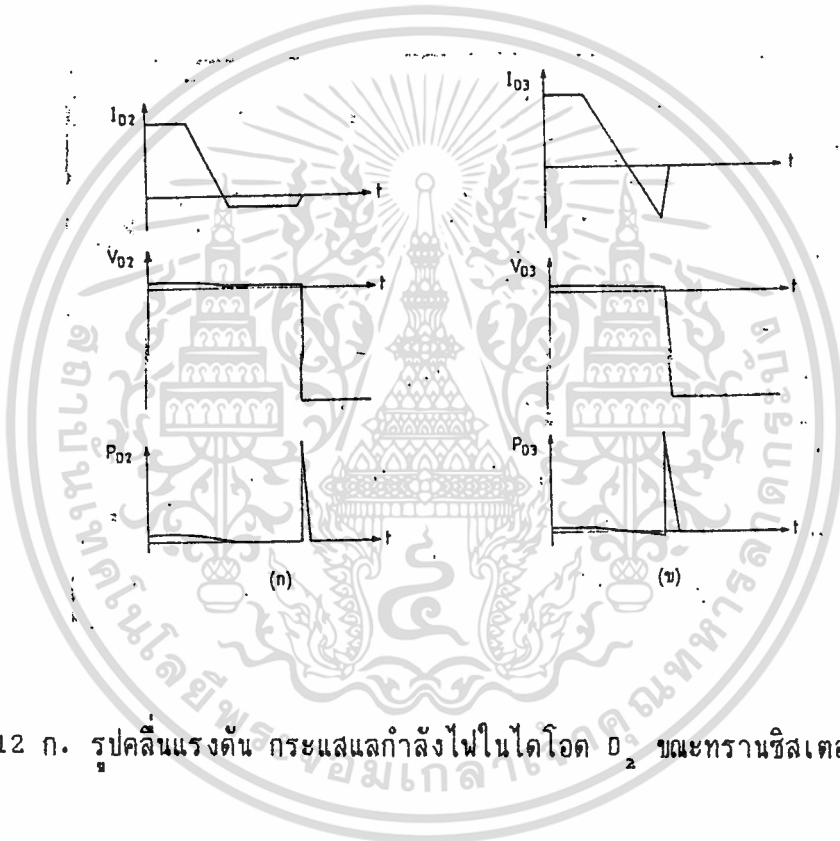
ข้อเสียอีกอย่างของกระแสรีเวิร์ส-รีคัพเวอรีของไดโอด D_2 คือ ถ้ารวมกับกระแสใน D_2 จะทำ

ให้เกิดกระแสกระชาก ช่วงเริ่มต้นของการทำงานจะเกิดกระแสกระชากปรากฏบนกระแสขดปฐม ภูมิ ซึ่งอาจจะสูงกว่ากระแสรวมช่วงตอนปลายของการทำงาน มันอาจมีผลต่อการทำงานของวงจรถ้า กัดกระแสในกระแสคอเล็กเตอร์ ดังนั้นการให้วงจรมีการทำงานได้ดีต้องทำให้กระแสกระชากหมดไป ซึ่ง

จะต้องใช้วงจรชั่งยากซับซ้อนสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสรีเวิร์ส-รีคัพเวอร์ (I_{r}) มีการสูญเสียมนต์วไดโอดน้อยมาก เพราะการสูญเสียเกิดในช่วง

I_{r} ตกเป็นศูนย์เท่านั้น ดังรูปที่ 12 ก. และ 12 ข. ช่วงเวลาตกของกระแส I_{r} สั้นมาก กำลังสูญเสียเฉลี่ยจึงตัดทิ้งได้ วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบพุก-พุลสามารถพิจารณาได้เหมือนกับแบบทางตรง เว้นแต่ว่าแบบไดโอดทั้งคู่หยุดนำกระแสเหมือนกับไดโอด D_2 ในคอนเวอร์เตอร์แบบทางตรง

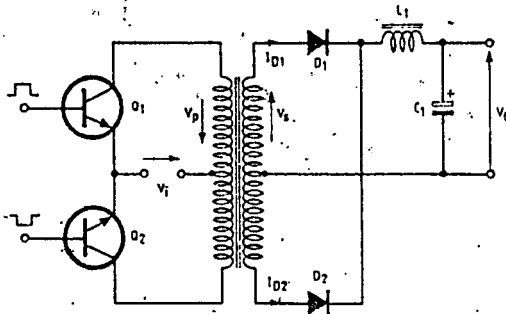


รูปที่ 12 ก. รูปคลื่นแรงดัน กระแสแลกำลังไฟในไดโอด D_2 ขณะทรานซิสเตอร์ไม่ทำงาน

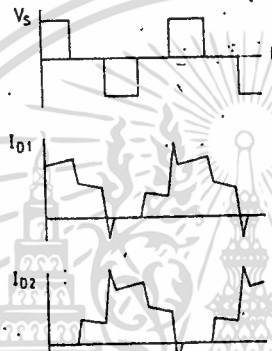
ข. แสดงรูปคลื่นแรงดัน กระแสแลกำลังไฟในไดโอด D_2 ขณะทรานซิสเตอร์ทำงาน

รูปที่ 13 แสดงวงจร พุก-พุล ส่วนความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสแสดงในรูปที่ 14 กระแสขณะที่ไดโอด D_1 และ D_2 หยุดนำกระแสจะมีค่าเพียงครึ่งหนึ่งของกระแสเอาท์พุทเท่านั้น ดังนั้น ประจวบสมจึงน้อยกว่าแบบแรก (ค่าคิวิตีไซเกิลเท่ากัน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 13 แสดงวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบpush-pull



รูปที่ 14 แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ขดทุติยภูมิและกระแสที่ผ่านไดโอด D_1, D_2

การลดกระแสรีเวิร์ส-รีคัพเวอร์

กระแสกระชากในฟลายวีลไดโอดขณะกลับสู่สภาวะรีเวิร์ส-รีคัพเวอร์สามารถลดได้ โดยต่อตัวเหนี่ยวนำอนุกรมกับฟลายวีลไดโอด (คือ L_s) ดังรูปที่ 15 ตัวเหนี่ยวนำจะจำกัดอัตราการตกของกระแส ซึ่งเป็นการลดประจุสะสมในตัวไดโอด ก่อนกระแสจะไหลย้อนกลับ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องจำกัดกระแส I_{su} ให้มีค่าลดลง

ในช่วงเวลาตกของกระแสในขดทุติยภูมิ กระแสในขดปฐมภูมิยังคงไหลอยู่ พลังงานไหลเวียนกลับไปยังอินพุตผ่านขดลวดที่ทำให้หมดสภาพเป็นสนามแม่เหล็ก สิ่งนี้ได้ลดความสามารถของการให้กำลังทางเอาต์พุตของแหล่งจ่าย อย่างไรก็ตามโดยการใส่ตัวเหนี่ยวนำอ้อมตัวไม่เป็นเชิงเส้น L_s จะลดเวลาการตกของกระแสไปได้มากและอัตราการตกจะถูกทำให้เข้าใกล้เป็นศูนย์ ในทางเดียวกันกับกระแส I_{su} ถูกลดลงให้เกิดเป็นศูนย์ และพลังงานที่ไหลเวียนกลับไปยังอินพุตก็ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถูกลดลงกลับไปด้วย

รูปที่ 16 แสดงรูปคลื่นกระแสของไดโอด D_2 ขณะหยุดนำกระแส

แรงดันกลับทาง (Reverse Voltage)

จากรูปที่ 8 แรงดันกลับทางของไดโอด D_2 และ D_3 ขึ้นอยู่กับแรงดันจกขดทุติยภูมิและแรงดันทางตรง ขณะไดโอดนำกระแสได้ว่า

$$V_R = V_m - V_f \quad (3)$$

แรงดันทางทุติยภูมิ V_m หาได้จากแรงดันอินพุตและสวิตช์ (V_i) และอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลง ค่าแรงดันย้อนกลับสูงสุด สามารถหาได้จาก ค่าแรงดันอินพุตสูงสุด แต่ถ้าไม่รู้ค่าอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงค่าแรงดันย้อนกลับสูงสุดก็สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) จากแรงดันทางขดทุติยภูมิต่ำสุด สามารถหาค่าแรงดันเอาท์พุต (V_o) ได้คือ

$$V_{min} = (V_o + V_f) / \Delta_{max} \quad (4)$$

สมมติเลือกอัตราส่วนจำนวนรอบขณะที่ V_{min} ในช่วง V_{min} และ V_{max} ในช่วง V_{max} จะได้ว่า

$$V_{max} = V_{min} * (V_{max} / V_{min}) \quad (5)$$

จาก (4)

$$V_{max} = \frac{V_o + V_f * V_{max}}{\Delta_{max} V_{min}} \quad (6)$$

จาก (3)

$$V_{Rmax} = \frac{V_o + V_f * V_{max}}{\Delta_{max} V_{min}} - V_f \quad (7)$$

เอกสารนี้ ณะที่ทราบขีลเตอร้ดิงกระแสเต็มที ทั่วต้นทงานที่จำกัดกระแสและมีแรงดันตกคร่อมระมม่าานการ่า
ไปว่า ารณใดๆ ทั้งจัน อักทั้งข้มมิใช้ดักแปลงเนื่อห และตั้งข้างอิงติแล้วของเอกสารทอครั้งที่มีการนำไปใช้
โวลต์ และขณะไมทำงานมีแรงดันประมาณ 1 โวลต์ ดังนั้นแรงดันอินพุตสูงสุดจะอยู่ในช่วง 259-372
โวลต์

การคำนวณหาการกระเพื่อมของแรงดัน (Ripple Voltage) จะขึ้นอยู่กับค่าเก็บประจุงานที่ใช้

$$V_2 = \sqrt{(V_1)^2 - (2*P*t/C)} \quad (9)$$

โดย V_1 คือค่าแรงดันสูงสุดของแรงดันที่ผ่านไดโอดเรียงกระแสแล้ว มีหน่วยเป็นโวลต์

V_2 คือค่าแรงดันสูงสุดขณะเกิดการกระเพื่อม มีหน่วยเป็นโวลต์

P คือกำลังงานที่ใช้ มีหน่วยเป็นวัตต์

t คือเวลาของไดโอดขณะไม่นำกระแส มีหน่วยเป็นวินาที

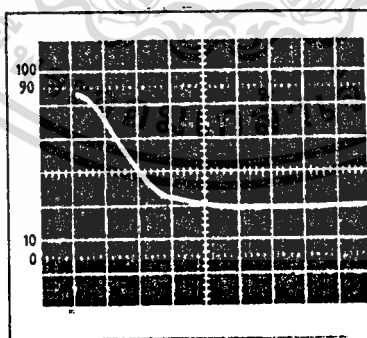
C คือตัวเก็บประจุเพื่อรักษาระดับแรงดัน มีหน่วยเป็นฟารัด

กรณีไฟสลับ 50 เฮิร์ตซ์ ผ่านไดโอดเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น t จะประมาณ 8.5 มิลลิวินาที ถ้าครึ่งคลื่นก็จะหายไป 18 มิลลิวินาที สมมติว่าประสิทธิภาพของแหล่งจ่ายเป็น 80 เปอร์เซ็นต์ ค่าเก็บประจุคือ 2 ไมโครฟารัด ต่อกำลังงาน 1 วัตต์ แรงดันกระเพื่อมจะเป็น

$$V_2 = \sqrt{259^2 - (2*1.25*18*10^{-3})/2*10^{-6}}$$

$$= 211 \text{ โวลต์}$$

ดังนั้นแรงดันอินพุตจะเปลี่ยนอยู่ในช่วง 211-372 โวลต์



รูปที่ 16 แสดงรูปคลื่นกระแสในไดโอด D_u ในช่วงหยุดนำกระแสแสดงให้เห็นการลดการกระชากของกระแส

สำหรับในทางปฏิบัติค่าตัวที่ไซเกิลสูงสุด ขณะแรงดันอินพุตต่ำสุดจะได้ประมาณ 0.45 ค่าแรงดันตกคร่อมไดโอดขณะไบแอสตรงมีค่า 1 โวลต์ จากสมการที่ 7 จะได้ค่าแรงดันย้อนกลับสูงสุดเท่ากับ

$$V_{Rmax} = [(28 * 1) / 0.45 * 372 / 211] - 1$$

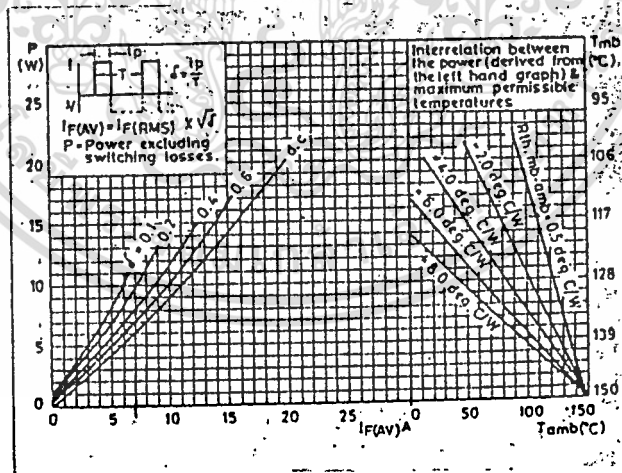
$$= 113 \text{ โวลต์}$$

ค่าตัวที่ไซเกิลต่ำสุดขณะอยู่ในสภาวะปกติ อาจจะคำนวณได้จากค่าตัวที่ไซเกิลสูงสุด และค่าแรงดันอินพุต ดังนี้

$$\Delta_{min} = \Delta_{max} * (V_{fmin} / V_{fmax})$$

$$= 0.45 * (211 / 372)$$

$$= 0.26$$



รูปที่ 17 กราฟแสดงคุณสมบัติด้านกำลังสูญเสียของไดโอดเมื่อทำงานกับคลื่นสี่เหลี่ยม

ค่ากระแสเฉลี่ยสูงสุดของไดโอดเรียงกระแสที่เอาท์พุตแต่ละตัวสามารถคำนวณได้จากไดโอด D_2 ซึ่งมีค่าตัวที่ไซเกิล 0.74 กระแสเอาท์พุตสูงสุด 15 แอมป์ ดังนั้นกระแสเฉลี่ยจะเป็น 11.1 แอมป์
 สำหรับกระแสเฉลี่ยสูงสุดของ D_2 อาจเกิดขึ้นเมื่อแรงดันอินพุตที่ต่ำสุดมีตัวที่ไซเกิล 0.45 กระแสเฉลี่ยจะ
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็น 6.8 แอมป์ จากข้อมูลทั้งสองคือ แรงดันย้อนกลับ V_{r} เป็น 113 โวลต์ กระแสเฉลี่ย 11.1 แอมป์ ไดโอดที่เหมาะสมจะใช้งานคือ BYW30-150

เมื่อเลือกหาไดโอดได้แล้วเราจะพิจารณาถึงแผ่นระบายความร้อนหรือฮีตซิงค์และกำลังสูญเสียทั้งหมดของไดโอดแต่ละตัว รูปที่ 17 เป็นกราฟคุณสมบัติด้านกำลังสูญเสียของไดโอดขณะทำงานกับรูปคลื่นสี่เหลี่ยมถ้าให้ไดโอดแต่ละตัวมีแผ่นระบายความร้อนแยกกันก็สามารถคำนวณหาขนาดของแผ่นระบาย

ความร้อนได้โดยตรงจากกราฟ เช่นไดโอด D_{u} มีกระแสเฉลี่ย 11.1 แอมป์ และค่าดิวตี้ไซเคิล 0.74 จากกราฟจะได้ค่ากำลังสูญเสีย 11 วัตต์ (กราฟด้านซ้าย) และสมมติว่ายอมให้อุณหภูมิทั่วไป (ambient) มีค่า 60 องศาจะต้องการแผ่นระบายความร้อน ที่มีค่าความต้านทานความร้อนเป็น 6 องศาเซลเซียสต่อ 1 วัตต์ (กราฟด้านขวา)

สำหรับไดโอด D_{u} กระแสเฉลี่ยเป็น 6.8 แอมป์ ดิวตี้ไซเคิล 0.45 กำลังสูญเสีย 6 วัตต์ จึงใช้แผ่นระบายความร้อนที่มีค่าความต้านทานความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อหนึ่งวัตต์

ถ้าไดโอดทั้งสองวางอยู่บนแผ่นระบายความร้อนเดียวกัน กำลังสูญเสียทั้งหมด คำนวณจากกราฟที่เป็นกระแสตรงมีกระแสเฉลี่ย 15 แอมป์ จะได้ค่ากำลังสูญเสีย 14.2 วัตต์ ดังนั้นจะต้องใช้แผ่นระบายความร้อนที่มีความต้านทานความร้อนประมาณ 4 องศาเซลเซียสต่อหนึ่งวัตต์ ค่าที่ได้มีค่าสูงกว่าปกติ เนื่องจากเราคิดว่ากำลังสูญเสียเกิดจากไดโอดเพียงตัวเดียว แต่ในทางปฏิบัติค่าประมาณที่ได้ก็เพียงพอ แต่ถ้าต้องการให้แหล่งจ่ายแรงดัน จ่ายกระแสเต็มก็คือ 15 แอมป์แล้ว ค่าดิวตี้ไซเคิลของไดโอด D_{u} จะต้องเป็น 1 ต้องเปลี่ยนไปใช้ไดโอดเบอร์ BYW31-150 เพราะค่ากระแสเฉลี่ยสูงกว่า 15 แอมป์

บทที่ 7

สวิตช์ทรานซิสเตอร์

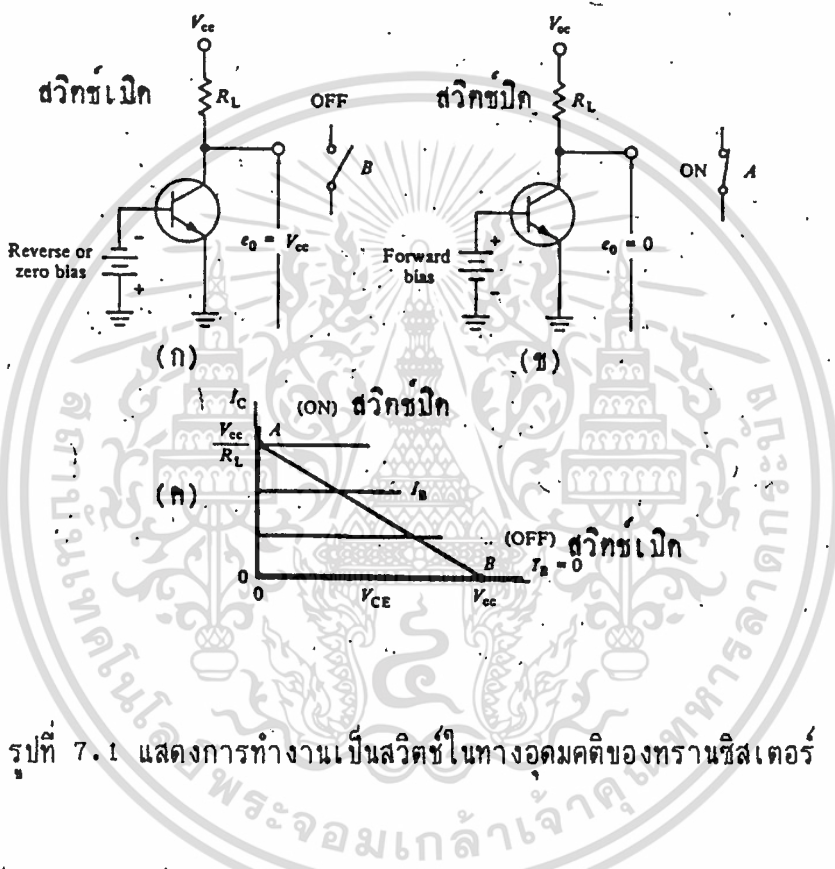
7.1 สวิตช์ทรานซิสเตอร์ในทางอุดมคติ

ทรานซิสเตอร์ที่สามารถนำมาใช้แทนสวิตช์ได้ กล่าวคือ ขณะที่ทรานซิสเตอร์อยู่ในภาวะที่ไม่ทำงาน (ได้รับไบอัสย้อนกลับ) ซึ่งจะไม่ยอมให้กระแสไหลผ่านนั้น ทรานซิสเตอร์ก็คล้ายกับเป็นสวิตช์ที่เปิดออก ดังแสดงในรูปที่ 7.1(ก) ในภาวะนี้จะตรงกับตำแหน่ง B ในกราฟคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของทรานซิสเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 7.1(ค) ภาวะนี้เกิดขึ้นได้เนื่องจากรอยต่อระหว่างอิมิตเตอร์และเบสของทรานซิสเตอร์ ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับจากภายนอก ทำให้กระแสคอลเลคเตอร์มีค่าเป็นศูนย์ (ไม่มีกระแสไหลผ่านทรานซิสเตอร์ แต่เมื่อรอยต่อระหว่างอิมิตเตอร์และเบสของทรานซิสเตอร์ได้รับแรงดันไบอัสตรงแล้ว จะทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานได้ กล่าวคือยอมให้กระแสไหลผ่านได้ และถ้าหากขนาดของแรงดันไบอัสนี้มีค่ามากพอทรานซิสเตอร์ก็จะยอมให้กระแสไหลผ่านได้มากขึ้นกระทั่งอยู่ในภาวะอิ่มตัวดังในรูปที่ 7.1 (ข) นั่นคือกระแสคอลเลคเตอร์จะถูกกำหนดได้ด้วยขนาดค่าความต้านทานภายนอก R_L เนื่องจากในภาวะนี้ค่าความต้านทานของทรานซิสเตอร์ที่มีค่าเป็นศูนย์ (หรือน้อยมากกระทั่งพิจารณาได้ว่าเป็นศูนย์) ดังนั้นแรงดันที่ตกคร่อมทรานซิสเตอร์จากคอลเลคเตอร์ถึงอิมิตเตอร์ก็จะมีค่าเท่ากับศูนย์ด้วย และจะไม่ขึ้นอยู่กับกระแสคอลเลคเตอร์ ดังนั้นทรานซิสเตอร์จึงกระทำตัวคล้ายกับเป็นสวิตช์ที่ปิดเพื่อให้กระแสไหลผ่านได้ดังแสดงในรูปที่ 7.1(ข) และในภาวะนี้จะตรงกับตำแหน่ง A ในกราฟคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ดังในรูปที่ 7.1 (ค)

สำหรับในกรณีที่ทรานซิสเตอร์ (ประเภทรอยต่อ) ถูกต่ออยู่ในลักษณะอิมิตเตอร์ร่วม (common emitter) กระแสเบส I_B จะทำหน้าที่ควบคุมขนาดของกระแสคอลเลคเตอร์ I_C ทั้งนี้โดยที่ $I_C = \beta I_B$ (β : อัตราการขยายของทรานซิสเตอร์นี้) ดังนั้นในทางอุดมคติอาจกล่าวได้ว่ากระแสเบสขนาดเล็กน้อยอาจควบคุมให้ได้กระแสคอลเลคเตอร์จำนวนมากได้ ขนาดของกระแสเบสกำหนดได้โดยแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างอิมิตเตอร์และเบส เมื่อแรงดันอินพุตมีค่าเป็นศูนย์หรือทำให้รอยต่อระหว่างอิมิตเตอร์และเบสอยู่ในลักษณะไบอัสย้อนกลับ (reverse bias) กระแสคอลเลคเตอร์ I_C จะมีค่าเป็นศูนย์ และเมื่อแรงดันอินพุตทำให้รอยต่อระหว่างอิมิตเตอร์และเบสอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในลักษณะไบอัสตรง (forward bias) (จะต้องมีค่าราว 0.7 โวลต์ สำหรับทรานซิสเตอร์ที่ทำจากซิลิกอน) แล้วทรานซิสเตอร์จะทำงานและอยู่ในภาวะอิ่มตัว (saturation) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุตเพียงเล็กน้อย (จาก 0 - 0.7 โวลต์ ในซิลิกอนทรานซิสเตอร์) จะมีผลทำให้กระแสคอลเลคเตอร์ที่เอาท์พุทมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากมาได้



รูปที่ 7.1 แสดงการทำงานเป็นสวิตช์ในทางอุดมคติของทรานซิสเตอร์

จากรูปที่ 7.1 (ค) ที่จุด A บนเส้นโหลด (load line) กระแสคอลเลคเตอร์จะมีค่าสูง โดยที่แรงดันที่ตกคร่อมระหว่างคอลเลคเตอร์และอิมิตเตอร์มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจึงไม่มีการสูญเสียกำลังงานใดๆที่ทรานซิสเตอร์เลย และเมื่อพิจารณาที่จุด B บนเส้นโหลดจะเห็นว่ากระแสคอลเลคเตอร์มีค่าเป็นศูนย์แต่แรงดันระหว่างคอลเลคเตอร์และอิมิตเตอร์มีค่าเท่ากับ V_{cc} ดังนั้นจึงไม่มีการสูญเสียกำลังงานใด ๆ เช่นกัน ซึ่งสำหรับทรานซิสเตอร์ในอุดมคติเมื่อมีกระแสไหลผ่านทรานซิสเตอร์กำลังงานส่วนใหญ่จะปรากฏที่โหลด R_L และทรานซิสเตอร์จะมีการสูญเสียกำลังงานเพียงเล็กน้อย

และกำลังงานที่สูญเสียที่ทรานซิสเตอร์ เฉพาะช่วงของการเปลี่ยนแปลงภาวะการทำงานของทรานซิสเตอร์นี้เป็นผลจากลักษณะของสวิตช์ปิด (OFF) ไปเป็นลักษณะของสวิตช์เปิด (ON) ในทำนองนั้นขบวนการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.2 สวิตช์ทรานซิสเตอร์ที่ใช้งาน

รูปที่ 7.2 เป็นรูปที่แสดงคุณสมบัติลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของทรานซิสเตอร์ที่ใช้งานจริง ๆ ในวงจรแบบอิมิตเตอร์ร่วม ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่าแตกต่างจากคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ในทางอุดมคติ กล่าวคือพื้นที่ส่วนมรา I แสดงย่านที่ทรานซิสเตอร์ทำงานอยู่ในภาวะอิ่มตัว (Saturation region) ซึ่งในย่านนี้ทั้งรอยต่อระหว่างอิมิตเตอร์กับเบส และคอลเลคเตอร์กับเบสจะได้รับแรงดันไบอัสตรง ในขณะที่พื้นที่ II แสดงย่านที่ทรานซิสเตอร์ทำงานอยู่ในภาวะแอกทีฟ (active region) ซึ่งเป็นย่านการทำงานของทรานซิสเตอร์ในวงจรขยายสัญญาณประเภท A โดยทั่วไป ซึ่งรอยต่อระหว่างอิมิตเตอร์กับเบสจะได้รับแรงดันไบอัสตรง แต่รอยต่อระหว่างคอลเลคเตอร์กับเบสจะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ และในส่วนที่ III ของรูปที่ 7.2 แสดงย่านคัทออฟ (cut off region) ของทรานซิสเตอร์ในย่านนี้รอยต่อระหว่างอิมิตเตอร์กับเบส และกระแสคอลเลคเตอร์กับเบสจะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

นอกจากนี้เส้นกราฟ ซึ่งแสดงค่ากำลังงานสูงสุดที่จะสูญเสียในทรานซิสเตอร์ได้ (maximum power dissipation) ดังแสดงในรูปที่ 7.2 และเขียนแทนด้วย P_{max} นั่นก็คือค่าสูงสุดของกำลังงานที่ทรานซิสเตอร์จะทนได้ ซึ่งก็คือผลคูณของแรงดันสูงสุดของคอลเลคเตอร์ $V_{c_{max}}$ ที่สามารถไหลผ่านทรานซิสเตอร์ได้ ทรานซิสเตอร์ซึ่งถูกนำไปใช้งานใดๆก็ตาม เช่น เป็นตัวขยายสัญญาณหรือทำหน้าที่สวิตช์กัตติ ค่าของกระแส หรือแรงดัน หรือกำลังงานที่ทรานซิสเตอร์ได้รับ จะต้องมามีค่าไม่เกินกว่าค่าสูงสุดเหล่านี้

ในรูปที่ 7.2 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของทรานซิสเตอร์ที่ใช้งานจริงและถูกต่ออยู่ในวงจรแบบอิมิตเตอร์ร่วมจะเห็นว่าที่จุด A บนเส้นโหลด (load line)

แรงดันระหว่างคอลเลคเตอร์และอิมิตเตอร์ (V_{ce}) จะไม่เป็นศูนย์เหมือนในรูปที่ 7.1 แต่จะมีค่าราว 0.3 โวลต์ แรงดันนี้เรียกว่า "แรงดันตกคร่อมคอลเลคเตอร์และอิมิตเตอร์ในภาวะอิ่มตัว"

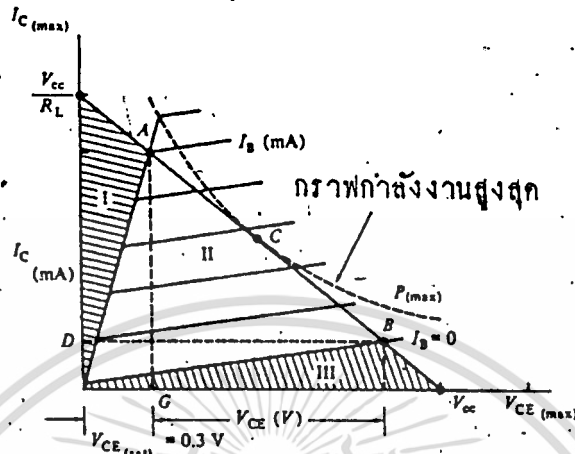
(collector-emitter voltage at saturation) และเขียนแทนได้ด้วย $V_{ce, sat}$

สำหรับซิลิกอนทรานซิสเตอร์ค่า $V_{ce, sat}$ จะค่าราว 0.3 โวลต์ ซึ่งค่าที่แท้จริงของทรานซิสเตอร์แต่ละตัวนั้นจะขึ้นอยู่กับกระแสคอลเลคเตอร์และอาจมีค่าอยู่ในช่วง 0.1 - 0.5 โวลต์ และ

ในเยอรมันเนียมปกติมีค่าราว 0.1 โวลต์ที่จุด B บนเส้นโหลดของรูปที่ 7.2 ก็เช่นเดียวกัน ถึงแม้ว่า

แอมป์กระแสเบสซึ่งเป็นกระแสอินพุทจะมีค่าเป็นศูนย์ก็ตาม แต่กระแสคอลเลคเตอร์ดังกล่าวนี้เกิดขึ้นจากค่าไม่ต่ำกว่าครั้นใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสอิมิตัวย้อนกลับของรอยต่อคอลเลคเตอร์ซึ่งเขียนแทนได้ด้วย I_{c0}



รูปที่ 7.2 แสดงลักษณะคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเบสและแรงดันของทรานซิสเตอร์ที่ใช้งานจริงและถูกต้องอยู่ในวงจรแบบอิมิตเตอร์ร่วม

กระแสคอลเลคเตอร์ซึ่งไหลขณะที่ยิมิตเตอร์ถูกเปิดวงจรออกและรอยต่อระหว่างคอลเลคเตอร์กับเบสได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับนี้เราเรียกว่า "กระแสย้อนกลับของรอยต่อคอลเลคเตอร์" (reverse collector-saturation current) เขียนแทนได้ด้วย I_{c0} หรือ I_{c00} กระแสนี้จะประกอบไปด้วยกระแสย่อยสองส่วนคือ กระแสรั่วที่เกิดขึ้นบริเวณรอบๆ รอยต่อคอลเลคเตอร์ (ไม่ไหลผ่านรอยต่อ) และกระแสอิมิตัว ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากความร้อน สำหรับกระแสรั่วจะขึ้นอยู่กับแรงดันไบอัสส่วนขนาดกระแสอิมิตัวจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเป็นส่วนใหญ่ ในทางปฏิบัติขนาดของกระแส I_{c0} จะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าทุกๆ 10°C ที่เพิ่มขึ้น ในวงจรขณะที่ทรานซิสเตอร์ถูกต่อแบบอิมิตเตอร์ร่วมและกระแสเบสมีค่า I_b กระแสคอลเลคเตอร์ I_c อัตราการขยายกระแสของทรานซิสเตอร์ในภาวะนี้เขียนแทนด้วย h_{fe}

$$\text{โดยที่ } h_{fe} = I_c / I_b \quad (7.1)$$

และในช่วงของการเปลี่ยนแปลงของกระแสเบส ΔI_b ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสคอลเลคเตอร์ ΔI_c อัตราส่วนดังกล่าวนี้จะแสดงอัตราการขยายกระแสกลับของทรานซิสเตอร์ ซึ่งไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

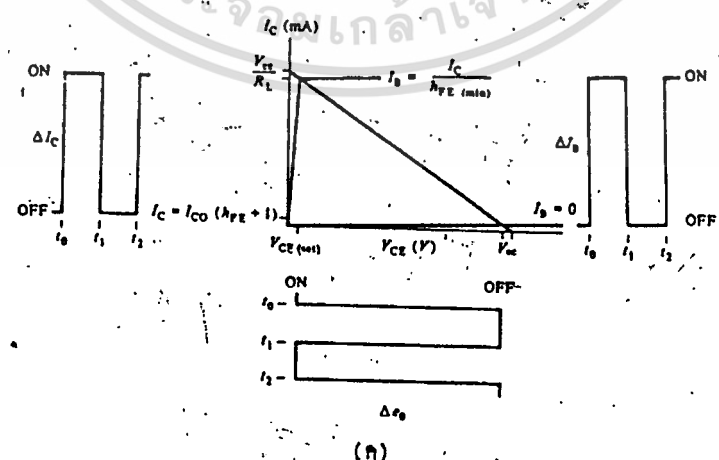
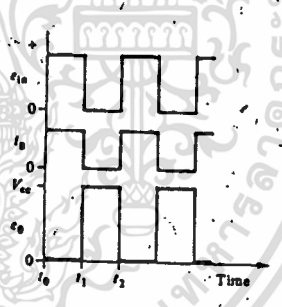
เขียนแทนได้ด้วย h_{fe} โดยที่

$$h_{fe} = \Delta I_c / \Delta I_b \quad (7.2)$$

ดังนั้นจะเห็นว่าค่าของ h_{fe} ที่ตำแหน่งของ I_c ค่าต่างๆ อาจมีค่าแตกต่างกันได้ เหตุนี้ การกำหนดค่า h_{fe} ของแต่ละวงจรจะต้องคำนึงถึงว่าทรานซิสเตอร์ในวงจรมีค่าเท่าใด

7.3 การเปิด-ปิด สวิตช์ของทรานซิสเตอร์ในทางอุดมคติ

จากวงจรของทรานซิสเตอร์ในรูปที่ 7.1 (ก) และ (ข) ซึ่งแสดงการทำงานของทรานซิสเตอร์ คล้ายกับสวิตช์ซึ่งเปิดและปิดตามลำดับ ดังนั้นถ้าหากวงจรทางด้านอินพุต มีแหล่งจ่ายแรงดันสัญญาณพัลส์ รูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก (rectangular voltage pulses) ต่อยู่แทนเบตเตอร์แล้วสัญญาณพัลส์อินพุตดัง แสดงในรูปที่ 7.3(ก) นี้ก็จะสามารถที่จะควบคุมให้ทรานซิสเตอร์ทำงานเป็นสวิตช์ซึ่งเปิดและปิดได้



เอกสารนี้เป็นรูปที่ 7.3 แสดงคุณสมบัติการทำงานของทรานซิสเตอร์ในวงจรสวิตช์ในทางอุดมคติ ด้านการคำนวณค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.4 การวิเคราะห์วงจรสวิตช์ของทรานซิสเตอร์ในทางอุดมคติ

วงจรสวิตช์ของทรานซิสเตอร์อย่างง่าย ๆ แสดงได้ดังในรูปที่ 7.3 (ก) ถ้าหากต้องการให้ขนาดของพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรเป็นดังนี้

$$e_o = 20 \text{ V}_{\text{peak}}$$

$$e_{in} = 5 \text{ V}_{\text{peak}} \quad (0 \sim +5)$$

$$I_c = 20 \text{ mA}$$

และโดยสมมติว่าทรานซิสเตอร์นี้เป็นแบบ ซิลิกอน NPN ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

$$h_{fe} = 40$$

$$V_{BE} = 0 \quad (\text{ในทางอุดมคติ})$$

$$V_{CEsat} = 0 \quad (\text{ในทางอุดมคติ})$$

$$I_{CBO} = 0 \quad (\text{ในทางอุดมคติ})$$

การวิเคราะห์

เนื่องจากทรานซิสเตอร์ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ดังนั้นค่าของ V_{CE} จะเป็นตัวกำหนดขนาดของแรงดันที่เอาท์พุท ดังนั้นค่าของ V_{CE} จะต้องเป็น + 20 โวลต์

ถ้าหากค่าของกระแสคอลเลคเตอร์ $I_c = 20 \text{ mA}$ ในขณะที่ทรานซิสเตอร์ทำงานในภาวะอิ่มตัว ค่าของตัวความต้านทาน R_L จะต้องมีค่าดังนี้

$$R_L = V_{CE} / I_c = 20 / 20 \text{ mA} = 1 \text{ kohm}$$

ในภาวะอิ่มตัวกระแสคอลเลคเตอร์ $I_c = 20 \text{ mA}$ และ $h_{fe} = 40$ ดังนั้นกระแสเบสที่ทำให้ทรานซิสเตอร์อยู่ในภาวะอิ่มตัวก็คือ

$$I_B = I_c / h_{fe} = 20 \text{ ma} / 40 = 0.5 \text{ ma}$$

ดังนั้นที่เวลา t_{ro} แรงดันของสัญญาณอินพุท = + 5 โวลต์ (ไบอัสตรง) จากกฎแรงดันของเคอร์ชอฟเมื่อพิจารณาวงจรทางด้านอินพุทจะได้ว่า

$$e_{in} = E_{R_L} + V_{BE}$$

$$= I_B R_L + V_{BE}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และถ้าหากสมมติว่าเป็นทรานซิสเตอร์ในทางอุดมคติ $V_{BE} = 0$ โวลต์

$$\text{ดังนั้น } e_{in} = I_B R_L$$

$$\text{หรือ } R_L = e_{in} / I_B = 5 / 5.0 \text{ mA} = 10 \text{ kohm}$$

นั่นคือค่า $V_{CC} = +20$ โวลต์, $R_L = 1 \text{ kohm}$, $R_L = 10 \text{ kohm}$

เมื่อสัญญาณอินพุตมีค่า $+5$ โวลต์ ทรานซิสเตอร์จะทำงานในภาวะอิ่มตัวมีกระแสไหลเต็มที่ 20 mA ทรานซิสเตอร์คล้ายกับเป็นสวิตช์ปิด และเมื่อเวลา t_{+} สัญญาณอินพุตจะเป็นศูนย์ทรานซิสเตอร์จะไม่ทำงาน ขณะนี้จะไม่มีการไหลผ่านทรานซิสเตอร์ทำให้แรงดันที่เอาต์พุตมีค่าสูงสุดเป็น $+20$ โวลต์ ทรานซิสเตอร์จึงทำตัวคล้ายกับสวิตช์เปิด

7.5 การเปิด - ปิดสวิตช์ของทรานซิสเตอร์ในทางปฏิบัติ

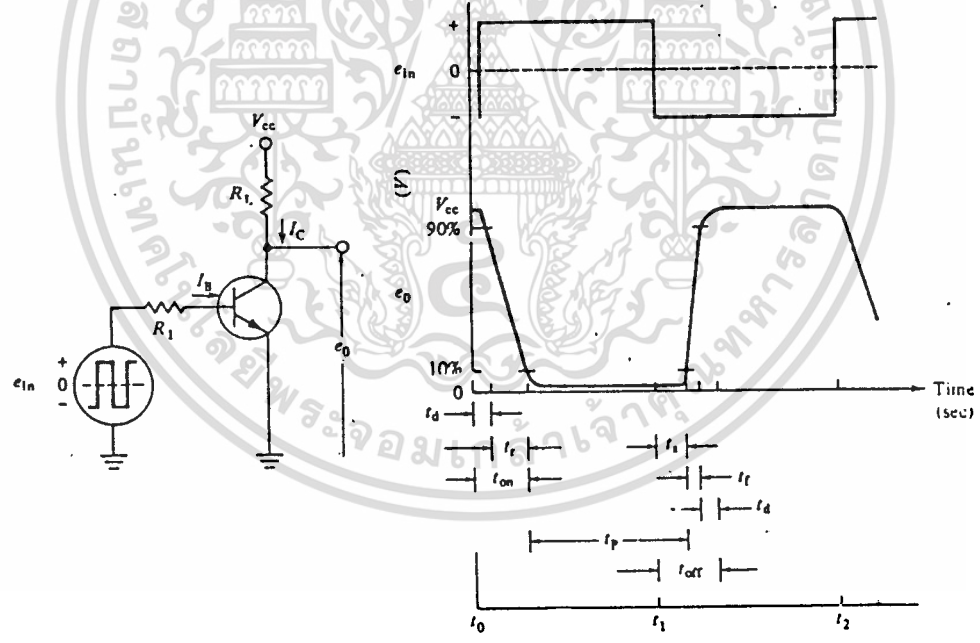
จากการนิยามวงจรสวิตช์ซึ่งค้ ดังแสดงในรูปที่ 7.4 เมื่อพัลส์ทางอินพุตถูกป้อนเข้าไปในวงจร โดยทำให้รอยต่อระหว่างอิมิตเตอร์และเบสได้รับแรงดันไบอัสตรงก็ตาม แต่ทรานซิสเตอร์จะไม่สามารถทำงานได้อย่างทันทีทันใด แต่จะใช้เวลาช่วงหนึ่ง ซึ่งเวลานี้เราเรียกว่า "ออนไทม์" (ON time) เขียนแทนด้วย t_{on} อีกนัยหนึ่งอาจนิยามได้ว่าช่วงเวลาออนไทม์ หมายถึงเวลาที่ใช้เพื่อให้ค่าของแรงดันที่คอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์เปลี่ยนแปลงไป 90 เปอร์เซ็นต์ของแรงดัน V_{CC}

ช่วงเวลา t_{on} นี้พิจารณาได้ว่าประกอบด้วยเวลาย่อยสองส่วนคือ ช่วงเวลาล่าช้า (delay time) ซึ่งเขียนแทนด้วย t_d และช่วงเวลาไต่ขึ้น (rise time) ซึ่งเขียนแทนด้วย t_r และช่วงเวลาล่าช้า t_d ก็คือเวลาที่ใช้สำหรับให้แรงดันที่เอาต์พุตเปลี่ยนแปลงไป 10 เปอร์เซ็นต์ของแรงดัน V_{CC} และช่วงเวลาไต่ขึ้น t_r ในที่นี้ก็คือช่วงเวลาที่เราที่แรงดันอินพุตเปลี่ยนแปลงจาก 10

เปอร์เซ็นต์ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ของแรงดัน V_{CC} และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 7.5 ซึ่งเป็นรูปแสดงวงจรเสมือนของวงจรสวิตช์ในรูปที่ 7.4 จะเห็นว่า ที่เวลา t_{-} แรงดันอินพุตจะมีค่าเป็นลบซึ่งทำให้รอยต่อระหว่างอิมิตเตอร์และเบสได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ ดังนั้นรอยต่อนี้จึงทำตัวคล้ายกับเป็นความต้านทานที่มีค่าสูงต่อขนานอยู่กับตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่รอยต่อ (ดูรูปที่ 7.5 ก) ดังนั้นในขณะที่ตัวเก็บประจุที่รอยต่อจะทำการประจุ (charge) ผ่านตัวต้านทาน R_L

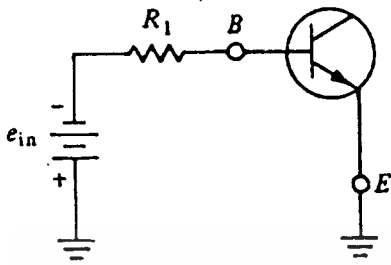
ที่เวลา t_{+} แรงดันอินพุตจะมีค่าเป็นบวกทำให้รอยต่ออิมิตเตอร์และเบสได้รับแรงดันไบอัสตรง ดังแสดงในรูปที่ 7.5 ข) อย่างไรก็ตามก่อนที่จะได้รับแรงดันไบอัสตรงอย่างเต็มที่จะต้องไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กินเวลาช่วงหนึ่งซึ่งเรสเรียกว่าช่วงเวลาล่าช้า t_{+} นั้นเอง ในรูปที่ 7.5 (ค) ซึ่งแสดงวงจรสวิตช์ที่เหมือนกับวงจรในรูปที่ 7.4 และวงจรเสมือนขณะที่เวลา t_{+0} จะเห็นว่าขณะที่ทรอยต่อของอิมิตเตอร์กับเบสและทรอยต่อของคอลเลคเตอร์กับเบสจะทำการประจุ (charge) เพื่อให้แรงดันตกคร่อมเป็น e_{in} โวลท์ และที่ทรอยต่อคอลเลคเตอร์กับเบสก็เช่นเดียวกันจะเกิดตัวเก็บประจุที่ทรอยต่อนี้ขึ้น และทำหน้าที่ประจุเพื่อให้มีแรงดันตกคร่อมเป็นผลรวมระหว่างค่า V_{cc} และ e_{in} เมื่อเวลาผ่านไปเป็น t_{+0} กระแสคอลเลคเตอร์จะยังคงไม่มีจนกว่าที่ทรอยต่ออิมิตเตอร์กับเบสจะได้รับแรงดันไบอัสตรงอย่างเต็มที่ (ต้องใช้เวลา t_{+}) และกระแสคอลเลคเตอร์จะไม่สามารถเพิ่มขึ้นจนถึงภาวะอิ่มตัวได้อย่างทันทีทันใด เนื่องจากตัวเก็บประจุของทรอยต่อคอลเลคเตอร์กับเบสจะทำการคายประจุ โดยการแพร่ของพาหะผ่านส่วนของเบสดังนั้นกระแสคอลเลคเตอร์จึงค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนถึงภาวะอิ่มตัว (ใช้เวลา t_{+})

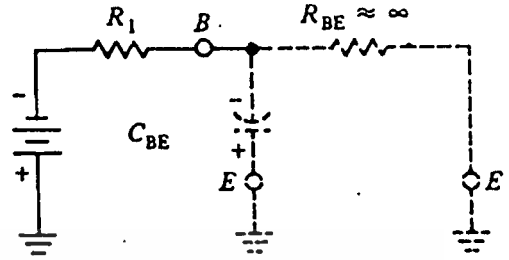


รูปที่ 7.4 แสดงคุณสมบัติของวงจรสวิตช์ซึ่งใช้ทรานซิสเตอร์ในทางปฏิบัติ

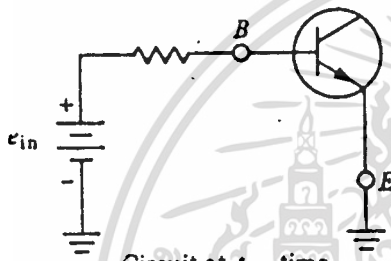
จากรูปที่ 7.4 ขณะที่เวลา t_{+} แรงดันอินพุทจะมีค่าเป็นลบจะทำให้ที่ทรอยต่ออิมิตเตอร์ และเบสได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับอีกครั้งหนึ่ง แต่ค่าแรงดันที่เอาท์พุทจะไม่เปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษานี้เท่านั้น มิใช่ผูกมัดให้มาใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



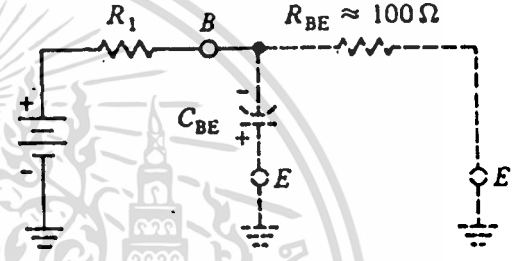
Circuit at t_0 time



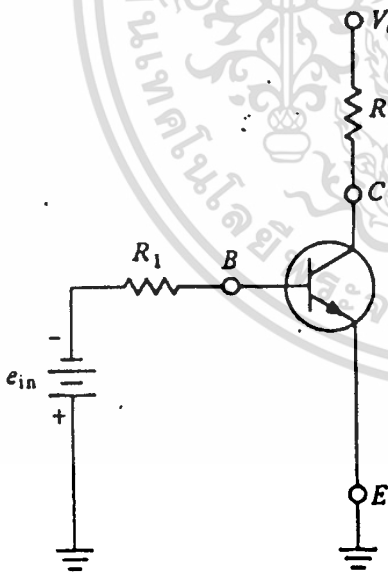
(ก)



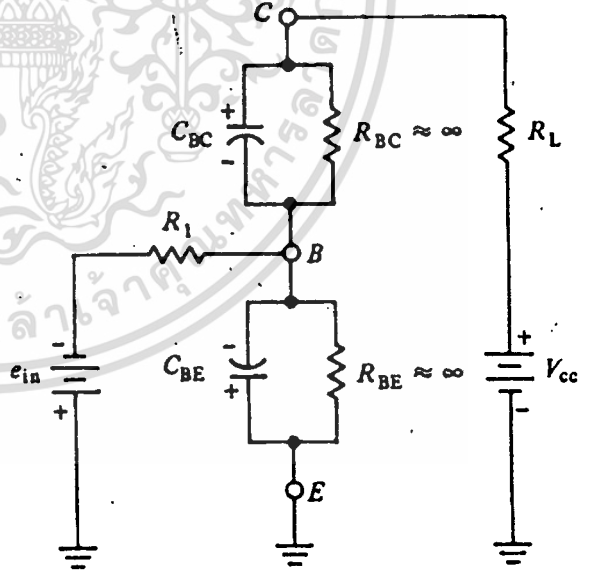
Circuit at t_0 time



(ข)



Circuit at t_0 time



(ค)

รูปที่ 7.5 แสดงวงจรเสมือนของวงจรสวิตช์โดย (ก) ที่เวลา t_0

(ข) ที่เวลา t_0 และ (ค) ที่เวลา t_0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ + การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล่าวคือจะยังคงมีกระแสคอลเลคเตอร์ไหลอยู่ และทำให้แรงดันที่เอาท์พุทยังคงมีค่าเป็นศูนย์หรือใกล้เคียงศูนย์ ที่เป็นเช่นนี้อธิบายได้ว่าขณะที่เวลา t_{on} ทราซิสเตอร์ทำงานอยู่ในภาวะอิ่มตัว กระแสคอลเลคเตอร์ไหลเต็มที่ และกำหนดได้ด้วยความต้านทาน R_L ที่ต่ออยู่ภายนอก และเมื่อแรงดันอินพุทมีค่าลดลงเป็นศูนย์หรือเป็นลบแล้วก็ตาม แต่จะมีประจุพาหะอีเลคตรอนสะสมอยู่บริเวณเบส (กรณี NPN ทราซิสเตอร์) และทราบได้ที่ประจุพาหะเหล่านี้ยังมีอยู่ จะทำให้มีกระแสคอลเลคเตอร์ไหลได้ และเมื่อพาหะนี้หมดไปกระแสคอลเลคเตอร์จึงจะหยุดไหล ช่วงเวลาที่ทำให้ประจุพาหะที่เบสนี้หมดไป ถูกเรียกว่า "ช่วงเวลาสะสม" (storage time) เขียนแทนด้วย t_s ดังแสดงในรูปที่ 7.4

และเนื่องจากการเกิดของ t_s นี้เองทำให้ความกว้างของพัลส์ที่เอาท์พุทมีค่ามากกว่าพัลส์ที่อินพุท ซึ่งแสดงในรูปที่ 7.4 คือช่วง t_s และภายหลังจากที่แรงดันอินพุทเป็นลบแล้ว ช่วงเวลาที่ทำให้แรงดันที่อินพุทมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเป็น $+V_{cc}$ (ในกรณี NPN) ถูกเรียกว่า "เวลาเทินออฟ" (turn off) เขียนแทนด้วย t_{off} นั่นคือเวลา t_{off} ประกอบด้วยเวลาย่อยๆสามส่วนคือ t_s , t_f และ t_d ซึ่งอาจจะกล่าวสรุปได้ว่า

"เวลาสะสม" (storage time) t_s ก็คือเวลาที่ใช้ในการทำให้ประจุพาหะ (carrier recombination process) หลังจากที่มีแรงดันอินพุทลดลงเป็นศูนย์โวลต์ ดังนั้นช่วงเวลา t_s จึงขึ้นอยู่กับ ขบวนการรวมตัวของพาหะและขนาดของแรงดันไบอัสย้อนกลับที่อินพุท

"เวลาดก" (fall time) t_f ก็คือ ช่วงเวลาที่ใช้ในการทำให้แรงดันที่เอาท์พุท (ของทราซิสเตอร์แบบ NPN) มีค่าเพิ่มจาก 10 เปอร์เซ็นต์ของค่าแรงดัน V_{cc} โดยที่เป็นเวลาต่อจากเวลาสะสม

"เวลาล่าช้า" (delay time) t_d ก็คือ ช่วงเวลาต่อจาก "เวลาดก" เพื่อทำให้ทราซิสเตอร์อยู่ในภาวะทำงานอย่างไม่มีสมบรูณ์ กล่าวคือแรงดันที่เอาท์พุทจะมีค่าเท่ากับแรงดัน V_{cc}

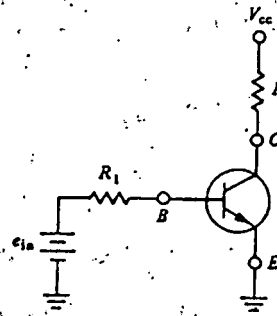
อย่างไรก็ดีในความจริงแล้วช่วงเวลาเหล่านี้มีค่าน้อยมากเช่นราว 10^{-8} วินาที และโดยทั่วไปโรงงานผู้ผลิตทราซิสเตอร์ที่เหมาะสมแก่การนำไปใช้งานในวงจรสวิตช์มักจะบ่งบอกคุณสมบัตินี้ของ t_{on} และ t_{off} ไว้เป็นที่สำคัญโดยที่

$$t_{on} = t_d + t_f \quad (7.3)$$

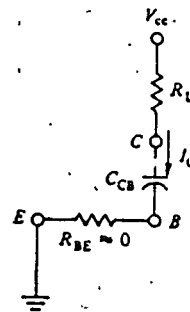
$$\text{และ } t_{off} = t_s + t_f + t_d \quad (7.4)$$

7.6 การลดค่า "เวลาได้ขึ้น" โดยการเพิ่มกระแสเบส

เอกสารนี้แจกในรูปที่ส่ง 7.4 ว่า ช่วงเวลาได้ขึ้นที่ t_{on} การก็คือเวลาที่ใช้ในช่วงที่กระแสคอลเลคเตอร์เพิ่มขึ้น ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



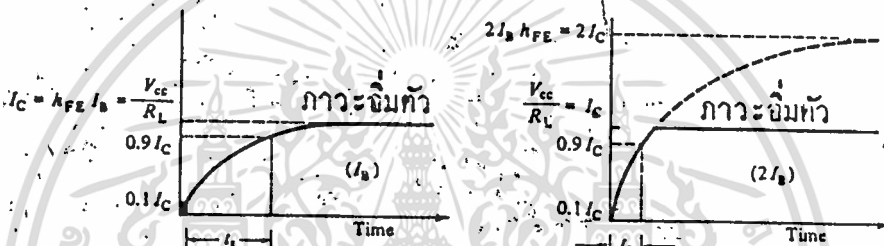
(ก)



$$I_C = I_C (1 - \epsilon) \frac{t_r}{R_L C_{CB}}$$

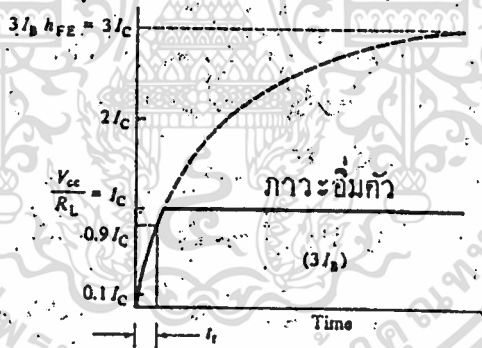
$$0.8 I_C = h_{FE} I_B (1 - \epsilon) \frac{t_r}{R_L C_{CB}}$$

(ข)



(ค)

(ง)



(จ)

รูปที่ 7.6 แสดงวงจรเสมือนและคุณสมบัติของรูปที่ 7.4 ขณะเวลา t_0

จาก 10 เปอร์เซ็นต์ ของกระแสคอลเลคเตอร์ในภาวะอิมิตัว เมื่อทรานซิสเตอร์ OFF รอยต่อระหว่างคอลเลคเตอร์กับเบสจะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับตั้งนั้นจึงกระทำตัวคล้ายกับเป็นตัวเก็บประจุ (capacitor) C_{CB} ดังแสดงในรูปที่ 7.6 (ข) เมื่อพัลส์ทางด้านอินพุตถูกป้อนเข้ามาและทำให้รอยต่อระหว่างอิมิตเตอร์กับเบสได้รับแรงดันไบอัสตรง ดังนั้นความต้านทานของรอยต่อดังกล่าวนี้จึงมีค่าน้อยมาก ($R_{BE} \approx 0$) ดังนั้นในวงจรของรูปที่ 7.6 (ก) ที่เวลา t_0 เราสามารถเขียนวงจรไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสมือนได้ดังแสดงในรูปที่ 7.6 (ข)

ดังนั้นกระแสคอลเลคเตอร์จะไม่เพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดแต่จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นโดยมีช่วงเวลาที่ค่าหนึ่ง $(R_L \cdot C_{cb})$ นั่นคือ

$$i_c = I_c (1 - e^{-t/R_L \cdot C_{cb}}) \quad (7.5)$$

โดยที่กระแส $I_c = h_{fe} I_B$ หรือ $= V_{cc}/R_L$

จากนิยาม $t_r = t_{on} - t_d = 90\% - 10\% = 80\%$

หรือ $t_r = 0.8$

ดังนั้นในช่วงเวลา t_r จะได้ว่า

$$0.8 I_c = h_{fe} I_B (1 - e^{-t_r/R_L \cdot C_{cb}}), \quad = R_L \cdot C_{cb}$$

$$0.8 V_{cc}/R_L = V_{cc}/R_L \cdot (1 - e^{-t_r/R_L \cdot C_{cb}})$$

$$0.8 = 1 - e^{-t_r/R_L \cdot C_{cb}}$$

$$= 5$$

$$t_r = -\log_{10} 5 / \log_{10} e = -0.699 / 0.434$$

$$t_r = 1.61$$

นั่นคือช่วงเวลาไต่ขึ้น t_r จะขึ้นอยู่กับค่า ซึ่งเป็นผลคูณของค่า R_L และ C_{cb} แต่อย่างไรก็ดีในกรณีที่ต้องการให้ค่า R_L , C_{cb} หรือ h_{fe} ไม่สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงได้ อาจกระทำได้โดยการพิจารณาจากรูปที่ 7.5 (ง) และ (จ) ซึ่งค่า I_c มีค่ามากกว่าเดิมจะเห็นว่าในกรณีที่กระแส I_c เพิ่มขึ้นเป็น $2 I_c$ เวลาไต่ขึ้น t_r จะมีค่าน้อยลงกว่าเดิมโดย

$$i_c = I_c \cdot (1 - e^{-t_r/R_L \cdot C_{cb}})$$

$$0.8 V_{cc}/R_L = 2 h_{fe} I_B (1 - e^{-t_r/R_L \cdot C_{cb}})$$

$$0.8 V_{cc}/R_L = 2 (V_{cc}/R_L) \cdot (1 - e^{-t_r/R_L \cdot C_{cb}})$$

$$e^{+t_r/R_L \cdot C_{cb}} = 1.67$$

$$t_r = \log_{10} 1.67 / \log_{10} e = 0.222 / 0.434 = 0.511$$

ดังนั้น $t_r = 0.511$

หรืออาจกล่าวได้ว่าเมื่อกระแสเบสมีค่า I_B ค่าของเวลาไต่ขึ้น $t_r = 1.61$

และเมื่อกระแสเบสมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น $2 I_B$ ค่าของเวลาไต่ขึ้น t_r ที่มี R_L และ C_{cb} คงที่ จะลดลงเหลือ 0.511 ไม่ว่างานนี้ ดังนั้นจะเห็นว่าเมื่อกระแสเบสเพิ่มจากเดิมเป็นสองเท่า, ค่าของเวลาไต่ขึ้น t_r จะลดลงเหลือ

$0.511/1.61 = 1/3$ เท่าของเวลาไต่ขึ้นเดิม

หรือถ้าหากพิจารณาว่ากระแส I_B เพิ่มขึ้นอีกเป็น $3I_B$ จะได้ว่า

$$0.8 V_{cc}/R_L = 3 h_{FE} \cdot I_B (1 - \tau_r')$$

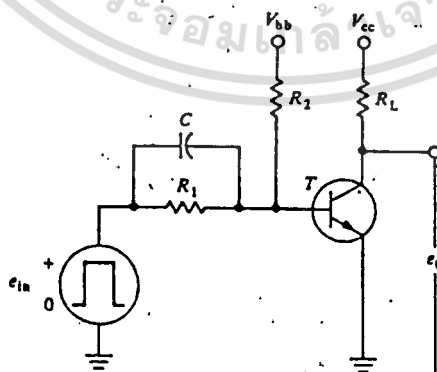
$$0.8 V_{cc}/R_L = 3 V_{cc}/R_L (1 - \tau_r')$$

$$\tau_r = 0.309$$

ซึ่งอาจสรุปได้ว่าเมื่อกระแสเบสเพิ่มขึ้นจากเดิมเป็นสามเท่า ค่าของเวลาไต่ขึ้น τ_r จะลดลงเหลือ $0.309/1.61 = 1/5$ เท่าของเวลาไต่ขึ้นเดิม ในทางปฏิบัติเมื่อการลดค่าของเวลาไต่ขึ้น τ_r ของวงจรวจรสวิตช์ทรานซิสเตอร์ก็กระทำได้โดยการลดค่า R_L ในวงจรรูปที่ 7.6 (ก) เพื่อให้ค่ากระแส I_B เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการลดค่าของ τ_r ด้วยวิธีนี้จะทำให้ "เวลาสะสม" (storage time, t_{st}) เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลเสียอย่างหนึ่ง

7.7 สปีดอัปคาปาซิเตอร์

ในการลดค่าเวลาไต่ขึ้น โดยการเพิ่มกระแสเบส เพื่อให้ทรานซิสเตอร์ทำงาน ON ได้อย่างรวดเร็วดังที่กล่าวมาแล้วนั้น นอกจากนั้นแล้วการลดค่าเวลาไต่ขึ้น ยังสามารถทำได้โดยการเพิ่มตัวเก็บประจุ C เข้าไปในวงจรโดยต่อขนานอยู่กับตัวความต้านทาน R_1 ดังแสดงในรูปที่ 7.7 ตัวเก็บประจุนี้ถูกเรียกว่า "สปีดอัปคาปาซิเตอร์" (Speedup-Capacitor)



เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 7.7 แสดงวงจรวจรสวิตช์ทรานซิสเตอร์ซึ่งมีสปีดอัปคาปาซิเตอร์ ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขณะที่ทางอินพุตมีพัลส์เข้ามา กระแสเบสจะทำการประจุผ่านตัวเก็บประจุนี้ ดังนั้นจะเห็นว่ากระแสเบสจะประกอบด้วยกระแสย่อยสองกระแสคือ ส่วนหนึ่งเป็นกระแสที่ประจุผ่านตัวเก็บประจุ C และอีกส่วนหนึ่งเป็นกระแสปกติซึ่งไหลผ่านตัวความต้านทาน R1 ผลของตัวเก็บประจุ C และ R1 ที่มีต่อกระแสเบส I_B แยกเขียนแสดงได้ดังในรูปที่ 7.5 (ก) และ (ข) ตามลำดับ โดยที่รูปที่ 7.3 (ก) แสดงผลของการประจุของตัวเก็บประจุ C ทำให้เกิดกระแสเบส I_B ส่วนหนึ่ง โดยสมมติว่าค่าความต้านทานของรอยต่อระหว่างอิมิตเตอร์ และ เบสมีค่าคงที่ ดังนั้นเมื่อพัลส์ทางด้านอินพุตถูกป้อนเข้ามาที่เวลา t_{+0} (ดูรูป 7.8 ก) แรงดันจากอินพุตทั้งหมดจะปรากฏตกคร่อมที่รอยต่ออิมิตเตอร์และเบส (V_{BE}) เมื่อเวลาผ่านไปตัวเก็บประจุ C จะทำการประจุทำให้มีแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้น (e_c) ขณะที่มีการประจุกระแสเบส I_B จะมีค่าลดลงในที่สุดจะมีค่าเป็นศูนย์ ที่เวลา t_{+1} พัลส์อินพุตจะมีค่าแรงดันเป็นศูนย์ ดังนั้นตัวเก็บประจุ C จะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดัน และทำให้รอยต่อระหว่างอิมิตเตอร์และเบสได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ แรงดันไบอัสย้อนกลับดังกล่าวนี้จะช่วยทำให้ช่วงเวลาสะสม (storage time) มีค่าน้อยลง ดังนั้นจึงเห็นได้ชัดว่าการประจุของตัวเก็บประจุ "สปีดอัปคาปาซิเตอร์" นี้จะช่วยเพิ่มกระแสเบสซึ่งจะมีผลให้เวลาไต่ขึ้นมีค่าน้อยลง และเมื่อประจุแล้วจะมีผลช่วยทำให้ช่วงเวลาสะสมลดน้อยลง ดังในรูปที่ 7.8 (ก)

ในรูปที่ 7.8 (ข) แสดงวงจรทางอินพุตของวงจรสวิตช์ทรานซิสเตอร์ โดยสมมติว่าค่าความต้านทานของรอยต่ออิมิตเตอร์และเบสมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง T_{BE} ดังนั้นวงจรอินพุตจึงมีลักษณะคล้ายกับวงจรแบ่งแรงดัน (Voltage Divider) และลักษณะของแรงดัน V_{BE} และกระแสเบส I_B แสดงดังในรูป ดังนั้นเมื่อพิจารณาวงจรสวิตช์ทรานซิสเตอร์ซึ่งมีสปีดอัปคาปาซิเตอร์ จะได้ดังแสดงในรูปที่ 7.8 (ค) ซึ่งแสดงลักษณะของกระแสเบสทั้งทางทฤษฎี ซึ่งสมมติว่าค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อระหว่างอิมิตเตอร์ และเบสมีค่าน้อยมากจนไม่นำมาพิจารณา และกระแสเบสในทางปฏิบัติกำหนดค่าของสปีดอัปคาปาซิเตอร์ทำได้โดย

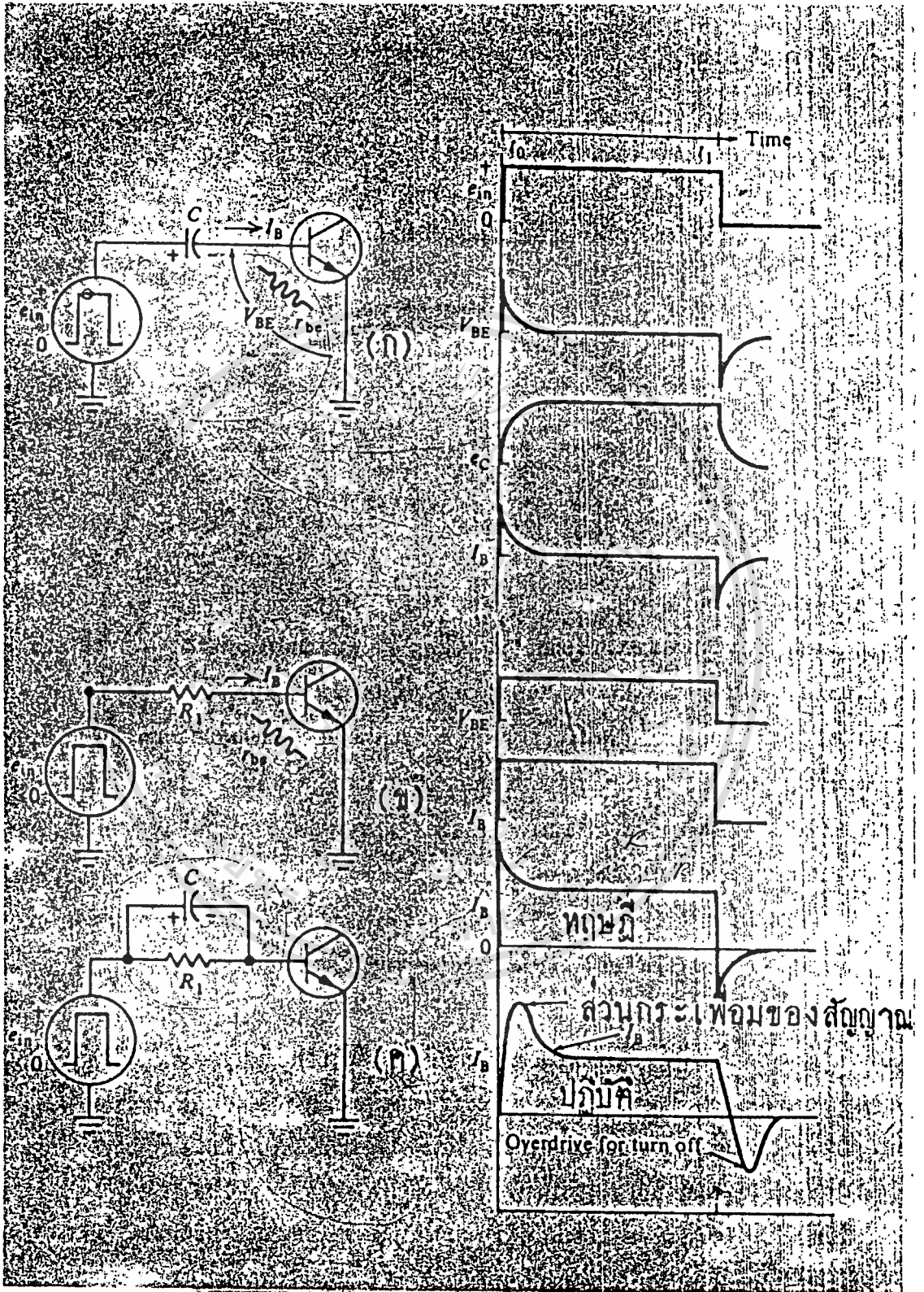
$$I = Q \text{ และ } Q = C \cdot E$$

$$\text{ดังนั้น} \quad I = CE/t$$

$$\text{และ} \quad C = It$$

โดยที่ Q คือ ปริมาณของประจุไฟฟ้า (คูลอมม์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เสแ คือสกรู ซึ่งเป็นกระแสเบสส่วนเกินค่าปกติ (แอมแปร์) ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 7.8 แสดงผลของสปีดอัปคาปาซิเตอร์ในวงจรสวิตช์ทรานซิสเตอร์ โยชนด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

t คือ t_r ซึ่งเป็นเวลาไต่ขึ้น (วินาที)

E คือ ขนาดของแรงดันของพัลส์ที่อินพุต (โวลต์)

C คือ ค่าความจุไฟฟ้าของสปีดอัปคาปาซิเตอร์ (ฟารัด)

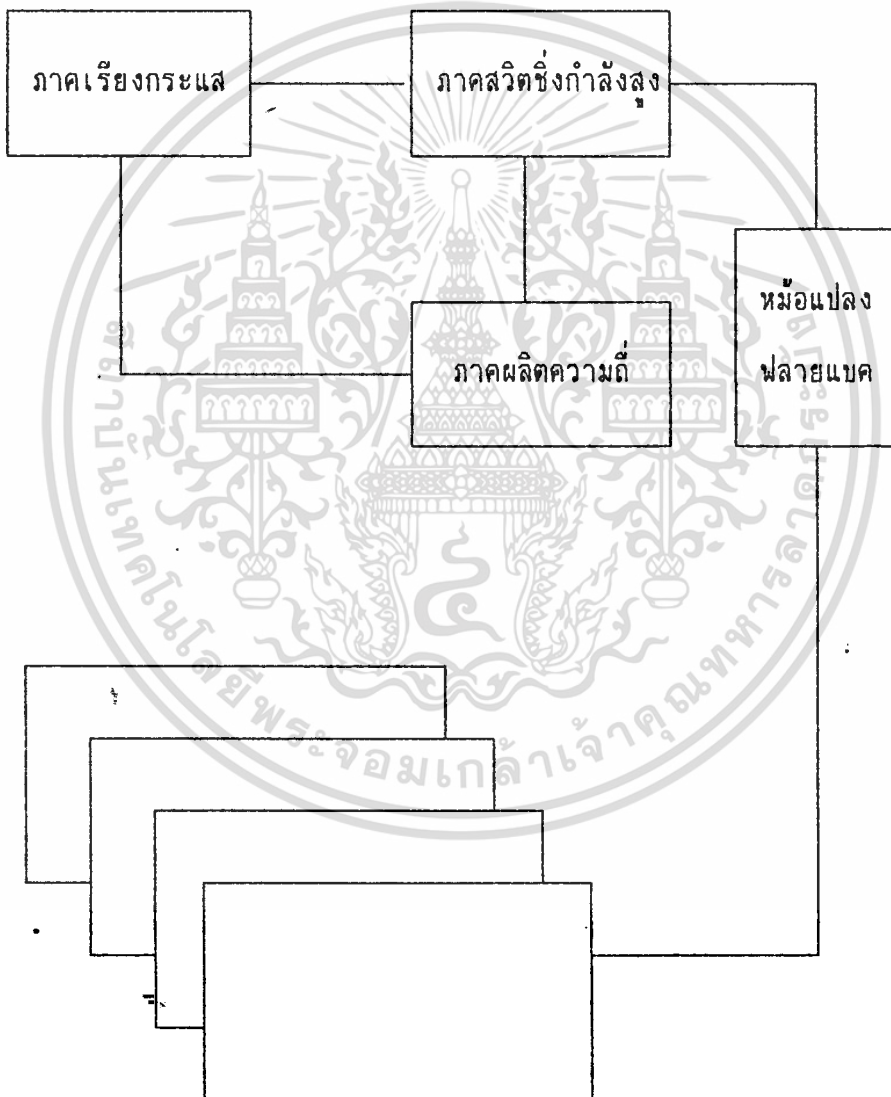


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8

หลักการทํางานของวงจร

การทํางานของวงจรจะมีหลักการเป็นแบบเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (AC TO AC CONVERTOR) แล้วทำการแปลงจากไฟสลับเป็นไฟตรงที่มีแรงดันสูงโดยใช้โคโอดเรียง กระแส ซึ่งสามารถอธิบายดังรูปที่ 8.1 ได้ดังนี้

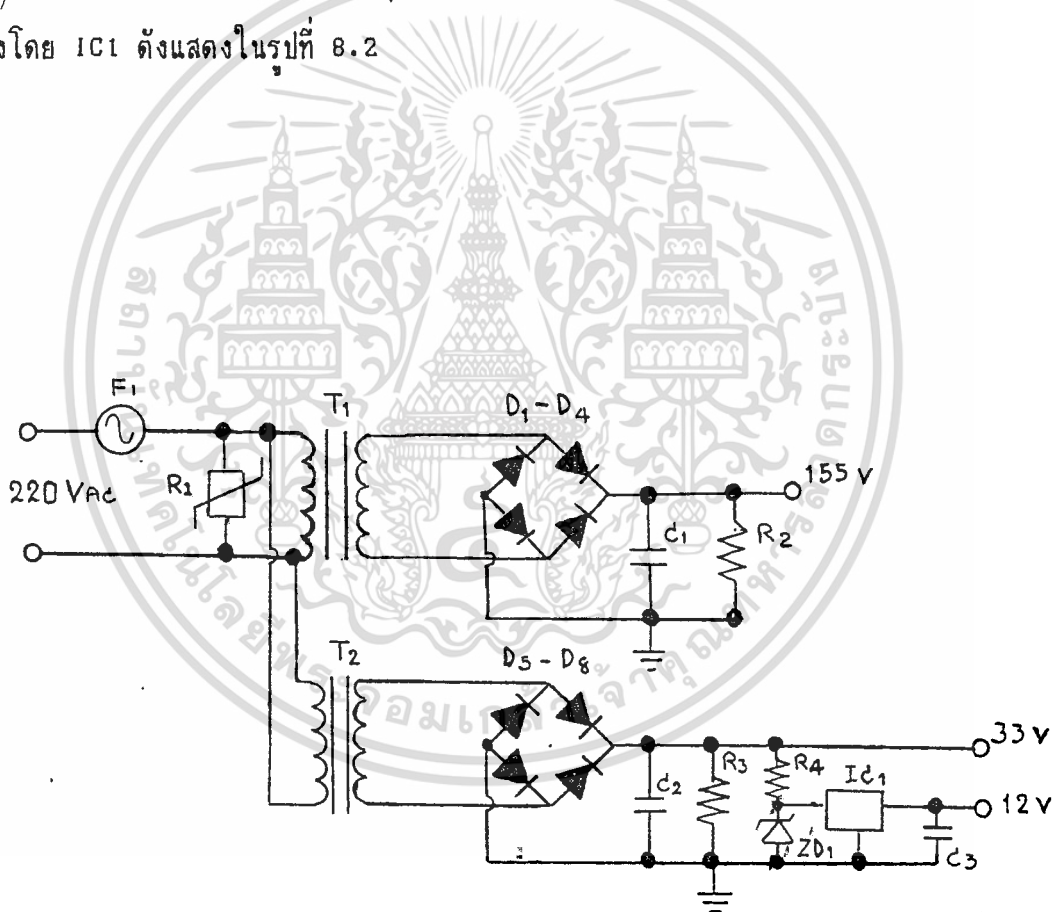


แผ่นโลหะที่ใช้ล่อฝุ่นและลวดสำหรับแตกประจุ

รูปที่ 8.1 บล็อกโคโอดของวงจรเครื่องฟอกอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยูเอตเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคเรียงกระแสจะทำหน้าที่แปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับให้ไฟกระแสตรงเพื่อจ่ายเป็นกำลังงานให้แก่วงจรทั้งหมดรวมถึงใช้ทำการสวิตช์เพื่อจ่ายให้แก่หม้อแปลงฟลายแบคด้วย แรงดันของไฟตรงที่ออกมาจากภาคนี้จะมีอยู่ 3 ชุดด้วยกันคือ 12 โวลต์ 33 โวลต์ และ 155 โวลต์ แรงดัน 12 โวลต์ และ 33 โวลต์จะจ่ายให้แก่ภาคผลิตความถี่และส่วนของการขับกระแส(driver) สำหรับแรงดันไฟ 155 โวลต์ จะจ่ายให้แก่ภาคสวิตช์กำลังสูง สำหรับการแปลงไฟให้ได้แรงดันขนาดตามที่ต้องการนั้นจะใช้หม้อแปลง 2 ตัว ตัวหนึ่งจะแปลงจาก 220 โวลต์เป็น 110 โวลต์ และอีกตัวหนึ่งจะแปลงจาก 220 โวลต์เป็น 24 โวลต์ เมื่อผ่านไดโอดเรียงกระแสแล้วก็จะได้แรงดันไฟตรงค่า 155 โวลต์และ 33 โวลต์ตามลำดับ โดยจะมีตัวเก็บประจุทำการกรองให้ไฟเรียบขึ้น สำหรับไฟแรงดัน 12 โวลต์ จะถูกสร้างโดย IC1 ดังแสดงในรูปที่ 8.2



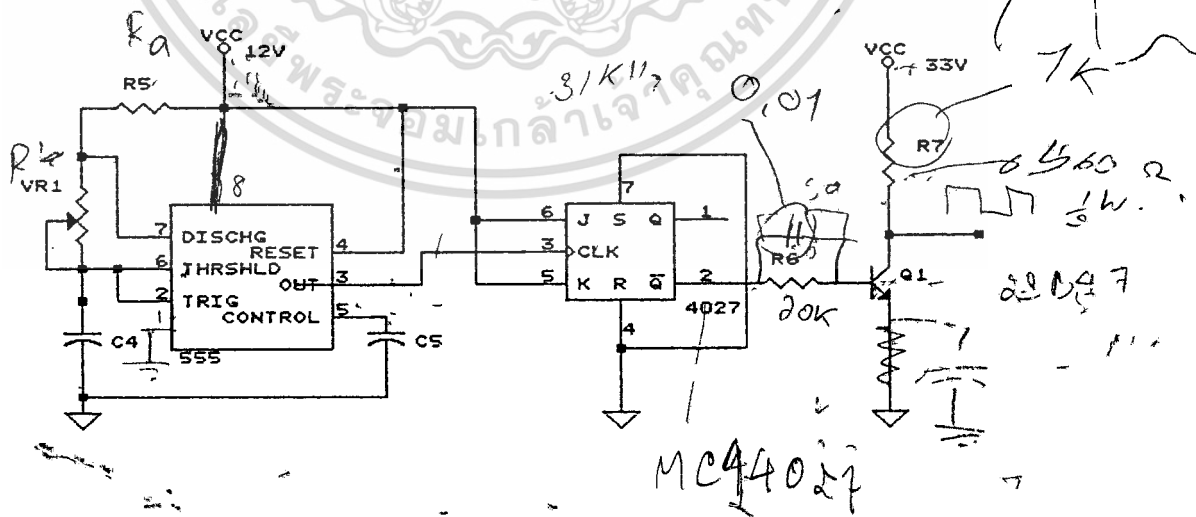
รูปที่ 8.2 แสดงวงจรเรียงกระแส

เอกสารหม้อแปลง T1 จะเป็นหม้อแปลงที่ทำกรแปลงไฟจาก 220 โวลต์ให้เป็นไฟ 110 โวลต์ AC ค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจะถูก rectify ให้เป็นไฟตรงโดยไดโอด D1-D4 ต่อจากนั้นจะถูกกรองให้เป็นไฟกระแสตรงที่ เรียบยิ่งขึ้นโดยตัวเก็บประจุ C1 สำหรับ R2 จะเป็นตัวต้านทานที่ทำหน้าที่คอยคายประจุให้กับ C1 ใน ขณะที่ไม่มีโหลด ส่วนหม้อแปลง T2 ก็จะมีหลักการทำงานเช่นเดียวกันโดยมันจะแปลงไฟจาก 220 โวลต์ เป็น 24 โวลต์ และถูก rectify โดยไดโอด D5-D8 และถูกกรองโดยตัวเก็บประจุ C2 และมีตัวต้านทานที่คอยคายประจุด้วยเช่นเดียวกันคือ R3 สำหรับแรงดันที่ตกคร่อม R2 = 155 Vac และแรงดันที่ตกคร่อม R3 = 33 Vac แรงดันค่า 33 โวลต์นี้จะถูกแบ่งโดย R4 และ ZD1 จากนั้นก็ป้อน ให้แก่ IC1 เพื่อให้ได้แรงดัน 12 โวลต์

ภาคผลิตความถี่จะผลิตความถี่ค่าประมาณ 15.625 kHz ซึ่งเป็นค่าความถี่ใช้งานของฟลายแบค โดยใช้อิซีเบอร์ 555 ซึ่งต่อให้ทำงานเป็นวงจรมัลติไวเบรเตอร์แบบไม่เสถียร ค่าของครวมถี่จะถูกกำหนดโดยตัวต้านทาน R5 VR1 และ C4 ซึ่งค่าความถี่ที่ผลิตออกมาจะมีค่าประมาณ 31.25 kHz แล้ว ป้อนให้แก่อิซีเบอร์ 4027 ซึ่งเป็นฟลิป-ฟลอปแบบซิมอสทำหน้าที่จำกัดค่าดิวิตีไซเคิลให้ได้ 50 เปอร์เซ็นต์จากนั้นก็ป้อนต่อให้กับทรานซิสเตอร์สวิตช์ Q1 ซีเนอร์ไดโอด ZD2 จะเป็นตัวกำหนดแรงดันที่ขา เบสของทรานซิสเตอร์ Q2 ซึ่งภาคขับหม้อแปลงเอาท์พุท หม้อแปลง T3 นี้จะเป็นตัวขับทรานซิสเตอร์ กำลังในภาคสวิตซึ่งกำลังสูง สำหรับวงจรตั้งแสดงไว้ในรูปที่ 8.3

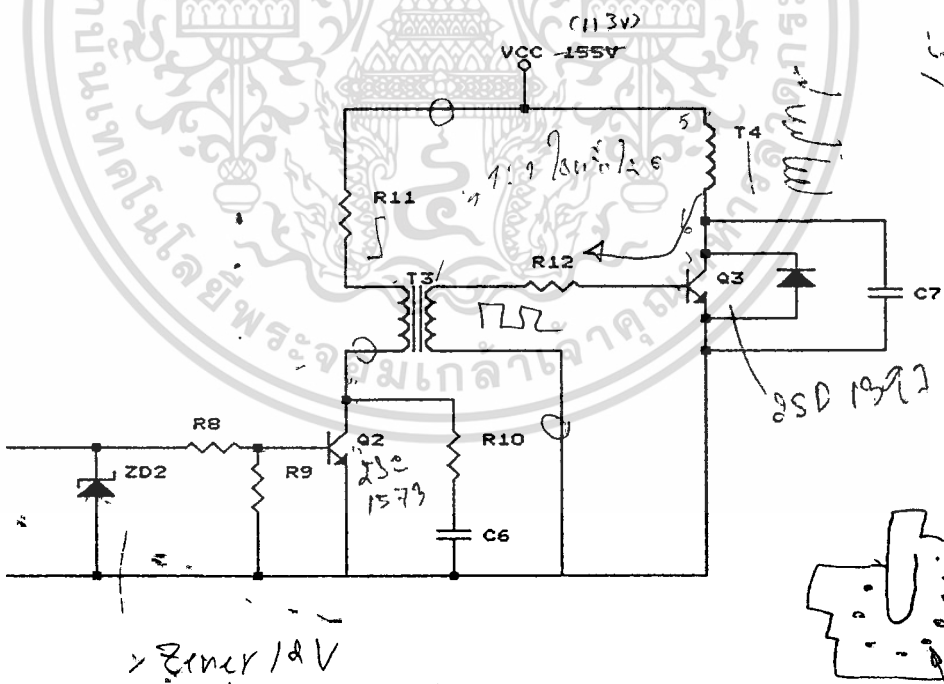
DUTY 50% ที่ 12V



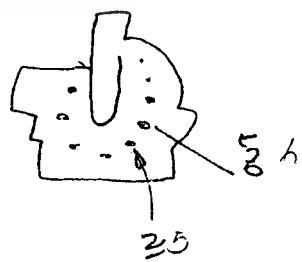
รูปที่ 8.3 วงจรของภาคผลิตความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคสวิตช์กำลังสูง ภาคนี้จะทำการเปลี่ยนไฟกระแสตรงเป็นไฟกระแสสลับตามค่าความถี่ที่ได้รับจากภาคผลิตความถี่ เพื่อป้องกันขดปฐมภูมิของหม้อแปลงฟลายแบค อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ก็คือทรานซิสเตอร์กำลัง Q3 แต่เนื่องจากทรานซิสเตอร์ภาคกำลังที่มีจำหน่ายในท้องตลาดนั้นจะมีค่าอัตราขยายที่ต่ำมาก จำเป็นจะต้องจ่ายกระแสที่เบสสูงจึงต้องมีวงจรขับอันประกอบด้วย Q2 และ T3 ซึ่งจะอธิบายการทำงานของวงจรดังในรูปที่ 8.4 ได้ดังนี้คือ สัญญาณที่ส่งถ่ายมาจากภาคผลิตความถี่ (ขาคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q1) จะถูกป้อนเข้าที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์ Q2 โดยมีซีเนอร์ไดโอด ZD2 เป็นตัวรักษาระดับแรงดันที่อินพุทให้เท่ากับ 12 โวลต์ ซึ่งทรานซิสเตอร์ Q2 นี้จะเป็นตัวขับให้หม้อแปลง T3 ทำงาน ทำให้มีสัญญาณไปป้อนให้แก่ขาเบสของทรานซิสเตอร์ Q3 สำหรับ ตัวต้านทาน R11 ตัวเก็บประจุ C6 , C7 นั้นจะทำให้ทรานซิสเตอร์ทั้งสองทำงานเป็นสวิตช์ได้ดียิ่งขึ้น ส่วนไดโอด D9 จะเป็นตัวป้องกันทรานซิสเตอร์อันเนื่องมาจากกระแสเหนี่ยวนำย้อนกลับที่เกิดขึ้นจากขดลวด ซึ่งจะต้องเป็นไดโอดชนิดที่ใช้กับความถี่สูงๆ หรือ ฟาสท์ รีคัฟเวอรี ไดโอด สำหรับวงจรแสดงไว้ในรูปที่ 8.4



รูปที่ 8.4 วงจรสวิตช์กำลังและฟลายแบค



สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรมีดังนี้

1. 100 800V
2. 0.001 20,000V

R1 = VARISTER เบอร์ S20K250 เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R2, R3 = 100 kohm 10 W 5%

R4 = 3.3 kohm 1/2 W 5%

R5 = 2.2 kohm 1/4 W 5%

R6 = 10 kohm 1/4 W 5%

R7 = 560 ohm 1/4 W 5%

R8 = 470 ohm 1/4 W 5%

R9 = 220 ohm 1/4 W 5%

R10 = 1.2 kohm 10 W 5%

R11 = 3.9 kohm 2 W 5%

R12 = 100 ohm 2 W 5%

VR1 = 5 kohm

C1 = 1200 μ F 200 V อีเลคโตรไลต์

C2 = 2200 μ F 50 V "

C3 = 220 μ F 16 V "

C4 = 0.01 μ F 50 V ไมล่า

C5 = 0.01 μ F 50 V "

C6 = 1.46 nF 2000 V เซรามิค

C7 = 5.5 nF 2000 V "

D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8 = 1N4007

ZD1 = ซีเนอร์ไดโอด 24 โวลท์

ZD2 = " 12 "

Q1 = 2SB547

Q2 = 2SC1573

Q3 = 2SD1397

T1 = หม้อแปลง 110 โวลท์

T2 = หม้อแปลง 24 โวลท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T3 = เอาท์พุทที่ทรานส์ฟอร์มเมอร์ ของเนชั่นแนล เบอร์ TLN F476

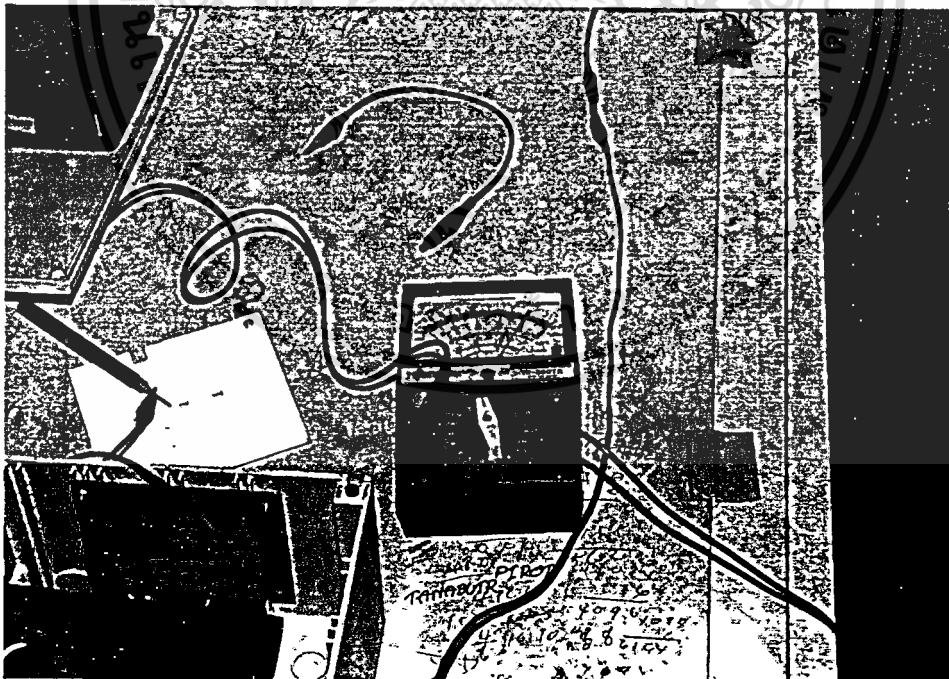
T4 = หม้อแปลงฟลายแบค ของเนชั่นแนล เบอร์ 2137

นิวส์ 500 มิลลิแอมป์

การทดลองและผลการทดลอง

จากการทดลองเมื่อเราเปิดเครื่องฟอกอากาศ จะมีแรงดันสูงไหลมายังแผ่นโลหะ ถ้าเราเอาไขควงตรวจวัดไฟเข้าไปใกล้ๆ หลอดไฟที่ไขควงจะติดสว่าง ซึ่งขณะที่เปิดเครื่องนั้นจะมีเสียงของฟลายแบคทำงานและมีเสียงดังพืดๆ คล้ายกับอากาศถูกดูดผ่านท่อเล็กๆ ทดลองให้มีควันไหลผ่านแผ่นโลหะที่ใช้ล่อ จะเห็นว่าควันจะเข้าไปเกาะกับแผ่นโลหะ ทำให้อากาศมีควันน้อยลง อากาศที่ไหลผ่านออกมาจะสะอาดขึ้นสำหรับการตรวจวัดแรงดันที่ออกจากหม้อแปลงฟลายแบคเราสามารถวัดได้โดยใช้ที่วัดแรงดันสูงที่ใช้กับการตรวจสอบเครื่องมือรับโทรทัศน์ แต่ถ้าหากไม่มีเรายังสามารถใช้อิมัลติมิเตอร์ก็ได้โดยต่อตัวต้านทานอนุกรมก่อนทำการวัด ซึ่งค่าของตัวต้านทานจะหาได้จาก

$$R = V_{\text{max}} / I_{\text{full scale}}$$



รูปที่ 8.5 แสดงการวัดแรงดันด้วยมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปรับแต่งวงจร

โดยความเป็นจริงแล้ววงจรนี้จะมีการปรับแต่งเฉพาะที่ VR1 เท่านั้นเพื่อเป็นการปรับแต่งความถี่ให้ได้ตามกำหนด สำหรับในส่วนอื่นๆไม่จำเป็นที่จะต้องปรับแต่งใดๆอีก เพราะถ้าหากว่าค่าความถี่ไม่ถูกต้องแล้ว แรงดันที่ออกทางเอาต์พุตจะมีค่าลดลง และหม้อแปลง T3 และ T4 จะมีเสียงดังมาก

แนวความคิดในการพัฒนาต่อ

เนื่องจากเครื่องฟอกอากาศชนิดโพลีไดโอดอน นี้เป็นเพียงเครื่องที่ทดลองสร้างขึ้นโดยอาศัยหลักการต่างๆที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้นแต่ยังมีหลายๆส่วนที่ยังไม่สมบูรณ์ เช่นในส่วนของการทำงานควบคุมการทำงานของเครื่องที่ยังสามารถพัฒนาต่อไปได้อีกว่าการเปิด-ปิดเครื่องจะทำให้มีขึ้นเมื่อใด เช่นอาจจะให้มีการเปิดหรือปิดเครื่องโดยการตั้งเวลา การตรวจสอบคว้นและก๊าซในอากาศ โดยการใช้การควบคุมระยะไกล(remote) หรือควบคุมโดยคอมพิวเตอร์หลัก(main computer) และในส่วนของแหล่งจ่ายกำลังงานโดยอาจจะหันไปใช้แหล่งจ่ายกำลังงานแบบสวิตซิ่ง(Switching Power Supply) เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการทำงานมากยิ่งขึ้น มีน้ำหนักเบาและประหยัดค่าใช้จ่ายรวมถึงการป้องกันการเสียหายที่อาจเกิดขึ้นด้วย ซึ่งสิ่งต่างๆเหล่านี้จะทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องฟอกอากาศนี้เพิ่มมากยิ่งขึ้นและมีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานจริงมากยิ่งขึ้นอีก ในส่วนของวงจรที่ควรจะพัฒนาต่อไปก็คือ ส่วนของการป้องกันหม้อแปลงฟลายแบคที่อาจเกิดการเสียหายจากการลัดวงจรที่แผ่นโลหะ หรือการกระโดดของไฟฟ้า การเปลี่ยนขนาดของน้ดลมดุดอากาศให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อที่จะดูดอากาศได้มากยิ่งขึ้น และในส่วนของแผ่นโลหะที่ใช้ล่อฝุ่นให้สามารถทำความสะอาดได้ง่าย และมีภูการป้องกันที่ดีจากอันตรายที่อาจจะเกิดจากไฟแรงสูงด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการใช้งาน

วิธีการใช้งานของเครื่องฟอกอากาศนี้ไม่แตกต่างจากเครื่องใช้ไฟฟ้าทั่วไปโดยเครื่องนี้ใช้ไฟกระแสสลับ 220 โวลต์ 50 เฮิร์ต ป้อนให้ดังนั้นวิธีใช้งานจึงมีเพียงเสียบปลั๊กของเครื่องเข้ากับไฟบ้าน จากนั้นทำการเปิดสวิตช์ซึ่งสวิตช์ที่ใช้นั้นเป็นลักษณะของ Breaker Switch มีไว้เพื่อป้องกันการลัดวงจร และเพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน และภายในวงจรยังประกอบด้วย ฟิวส์ป้องกันการลัดวงจรอยู่อีกที่หนึ่งดังนั้นจึงต้องปัญหาที่ว่าผู้ใช้จะโดนไฟฟ้าดูดเมื่อเปิดเครื่องใช้งานและเครื่องจะพังง่ายออกไปได้

ดังนั้นวิธีการใช้งานจึงมีเพียง เสียบปลั๊ก 220 โวลต์ และทำการเปิด สวิตช์และเป็นอันว่าเครื่องเริ่มทำงานแล้ว

ข้อควรระวังก่อนใช้งาน

เวลาจะทำการเปิดเครื่องนั้นต้องตรวจสอบก่อนว่าฝากล่องทำการปิดเรียบร้อยแล้วหรือยังถ้ายังต้องทำการปิดให้เรียบร้อยเสียก่อนเพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้งานเพราะภายในเครื่องฟอกอากาศนี้มีอนุภาคแรงไฟสูงมาก 30kv โดยประมาณซึ่งมากกว่าไฟ 220 V เป็นร้อยกว่าเท่าด้วยกันซึ่งถ้าไม่ทำการปิดกล่องให้ดีๆ อาจเกิดการรั่ววงจรซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายและเป็นอันตรายต่อผู้ใช้งานได้

วิธีทำความสะอาด

ลักษณะการทำงานของเครื่องฟอกอากาศนั้นใช้หลักการของการผลัดกันอิเล็กตรอนระหว่าง Cathode กับ Anode โดยฝุ่นละอองที่เข้ามาจะถูกทำให้เป็นบวก และ จะใช้ความต่างศักย์ของไฟฟ้าที่มากมายผลัดกันฝุ่นละอองให้ตกไปยังแผ่นที่มีประจุบวกอยู่ดังนั้นฝุ่นละอองจึงเกาะตัวอยู่ที่แผ่น ดังนั้นวิธีทำความสะอาดจะกระทำโดย

1. แผ่นกรองหยาบที่อยู่ทางล่างสุดของกล่อง plate สามารถถอดออกมาล้างฝุ่นออกได้โดยแผ่นกรองนี้จะทำการดักฝุ่นที่มีความหยาบมากให้ติดอยู่ดังนั้นเมื่อใช้งานไปได้พอสมควรจึงต้องทำการถอดออกมาล้างเพื่อให้อากาศที่จะผ่านเข้าไปใน plate ผ่านเข้าไปได้อย่างสะดวก เมื่อล้างเสร็จรอให้แห้งแล้วให้ประกอบเข้ายังที่เดิม และลองตรวจเช็คดูว่าที่แผ่น plate มีฝุ่นเกาะอยู่มากหรือเปล่าถ้ามีอยู่มากให้ทำตามข้อที่ 2.

2. ในกรณีที่ทำความสะอาดแผ่น plate ทำได้ดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสาร 2.1 ถอดขั้วไฟทั้งสองขั้วออก (ต้องปิดเครื่องก่อนที่จะทำการถอด) ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ 2.2 จากนั้นทำการถอดกล่อง plate ออกมาและใช้ไขควงเปิดฝากล่อง (plate) ออกมา

2.3 ถอด slot ที่ต่อกับแผ่น plate ออกแล้วทำการถอด plate ออกมาแล้วล้างทำความสะอาดโดยอาจทำการขัดฝุ่นหรือใช้ผ้าเช็ดฝุ่นที่เกาะตัวอยู่ออก

2.4 รอให้ plateแห้งสนิทแล้วทำการประกอบกลับไปให้เหมือนเดิมจากนั้นลองทำการเปิดเครื่องเพื่อทดสอบการทำงานอีกครั้งหนึ่งเป็นอันเสร็จขั้นตอนการทำความสะอาด

ข้อควรระวังสำหรับวิธีทำความสะอาด

จะต้องดูให้แน่ใจหลังจากทำความสะอาดแล้วว่าอุปกรณ์ทุกชิ้นแห้งสนิทเพราะถ้ามีความชื้นเกิดขึ้นแล้วจะทำให้เกิดการกระโดดข้ามระหว่างประจุทั้งสองได้ซึ่งอาจทำความเสียหายให้กับเครื่องได้



สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองและสร้างโครงงานนี้ขึ้นมา ทำให้ได้รับความรู้และเข้าใจถึงหลักการของ เครื่องรวมถึงได้พบกับปัญหาที่จะต้องแก้ไขให้สำเร็จลุล่วงไป ซึ่งบางปัญหาก็ต้องใช้เวลาในการค้นคว้า และทดลองค่อนข้างมาก ทำให้เสียเวลาในการทำงาน แต่บางปัญหาที่อาจเกิดได้จากการไม่รอบคอบ ของผู้ทดลองเอง เช่นในบางหลักการที่เราคิดว่าน่าจะใช้ได้แต่เมื่อทดลองดู ก็พบว่าทำให้วงจรเสียหาย โดยเฉพาะอุปกรณ์จำพวกกำลัง เช่น POWER TRANSISTOR การทำโครงงานนี้นอกจากจะ ทำให้มีความรู้ในทางวิชาการเกี่ยวกับวงจรทางด้านกำลังแล้ว ยังทำให้เรารู้จักความมั่นใจในการทำงาน กล่าวคือถ้าหากเราได้ทำการตรวจสอบจนแน่ใจแล้วว่าวงจรถูกต้องแล้ว เราก็สามารถทดลองได้ ด้วยความมั่นใจ เพราะถ้าหากเราไม่มั่นใจแล้วทดลองลงไปความเสียหายที่เกิดขึ้นจะมียมาก เนื่องจาก เป็นวงจรที่ใช้แรงดันสูง นอกจากนี้ยังได้เรียนรู้โปรแกรมใช้งานเกี่ยวกับการออกแบบวงจรกับเครื่อง คอมพิวเตอร์อีกด้วย

สำหรับการทดลองและโครงงานนี้สามารถสรุปผลได้ดังนี้ เครื่องฟอกอากาศแบบไอออนบวก เป็น เครื่องใช้ไฟฟ้าที่ใช้หลักการทางฟิสิกส์ กล่าวคือจะใช้หลักการดูดและผลักรันของอนุภาคไฟฟ้า โดยถ้า เป็นขั้วเดียวกันจะผลักรันและขั้วต่างกันจะดูดกันทำให้ประสิทธิภาพในการกรองและฟอกสามารถทำได้ มั่นกับอนุเล็กลง แต่การที่จะทำให้อากาศมีศักย์ทางไฟฟ้าได้นั้น จะต้องทำให้ประจุไฟฟ้าเกิดการแตกตัว ในอากาศโดยการป้อนไฟแรงดันสูงๆ ให้ไหลผ่านลวดเส้นเล็กๆหรือโลหะปลายแหลม ทำให้เกิด การออกันของประจุที่บริเวณลวดหรือปลายของโลหะ และการที่จะทำให้แรงดันจากปกติคือ 220 โวลต์ เอซี เป็นแรงดันประมาณ 25 - 30 กิโลโวลต์นั้นก็ทำได้หลายวิธีแต่การใช้หม้อแปลงหลายแบบเป็นวิธี ที่ประหยัดที่สุดในขณะนี้ เมื่อเราป้อนแรงดันที่ถูกต้องและจะต้องมีค่าความถี่ที่ถูกต้องด้วย ก็จะได้แรงดัน ทางเอาท์พุทที่ถูกต้องแต่ถ้าหากว่าค่าความถี่ไม่ถูกต้อง แรงดันที่ออกทางเอาท์พุทจะลดลง และการวาง แผ่นโลหะนั้นต้องวางในตำแหน่งที่เหมาะสมรวมถึงจะต้องมีการป้องกันที่ดี มิฉะนั้นกระแสไฟฟ้าจะกระ โดดจากโลหะแผ่นหนึ่งไปยังอีกแผ่นหนึ่งได้ ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียและอาจเสียหายเลยก็ได้ เมื่อเรา ทำได้ดังนี้แล้ว อากาศที่ผ่านออกมาจากเครื่องฟอกอากาศก็จะสะอาดดังที่เราต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิติกรรมประกาศ

โครงการนี้สามารถประสบความสำเร็จได้ด้วยความร่วมมือของกลุ่มผู้จัดทำโครงการ ต้องขอขอบพระคุณอาจารย์ ภากร หุตะลังภาค ที่ได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็น และแนวทางในการทำโครงการ รวมทั้ง คุณศศิรินทร์ วัฒนันทุเรย์ และคุณหทัยรัตน์ เสรีกุล ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการพิมพ์ข้อมูลลงเครื่องคอมพิวเตอร์ในการทำ ปรินต์มานิพนธ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

ก. เอกสารอ้างอิงที่เป็นวารสารภาษาไทย

1. ชูเกียรติ วัฒนากุล. "ฟาสต์-รีค้นเวอริไดโอด", วารสารเซมิคอนดักเตอร์อิเล็กทรอนิกส์. ฉบับที่ 102 : หน้า 314-321

ข. เอกสารอ้างอิงที่เป็นหนังสือภาษาไทยและภาษาอังกฤษ

1. ผ.ศ.มนัส สังวรศิลป์. "ทฤษฎีและการออกแบบวงจรพัลส์" กรุงเทพฯ: บริษัทอิเล็กทรอนิกส์ เวิลด์ จำกัด.
2. "คู่มือไอซี CMOS 4000 SERIES". บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด, 2528
3. Louis Nashelky. "Introduction to DIGITAL TECHNOLOGY ", Newyoke: John Wiley & Sons Inc. 1978
4. George Chryssis. "High-Frequency Switching Power Supplies: Theory and design, Newyoke: MCGRAW-HALL PUBLISHING COMPANY. 1989

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SCL4027B



CMOS DUAL J-K FLIP-FLOP

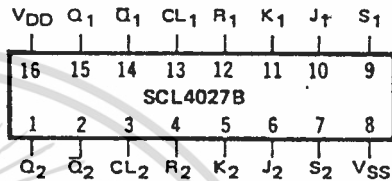
FEATURES

- ◆ Individual Set and Reset Controls
- ◆ Fully Static Operation
- ◆ Logic Edge-Clocked Design
- ◆ 8MHz Toggle Rate @ 10Vdc
- ◆ Balanced Output Drive Current Specifications

DESCRIPTION

The SCL4027B consists of two identical independent CMOS J-K master-slave Flip-Flops. The SCL4027B is useful in performing control, register, and toggle functions. Logic levels present at the J and K inputs along with internal self-steering control the state of each flip-flop; changes in the flip-flop state are synchronous with the positive-going transition of the Clock pulse. Set and Reset functions are independent of the Clock and are initiated when a high level signal is present at either the Set or Reset input.

CONNECTION DIAGRAM (all packages)



Add suffix for package:

- C 16-pin Cerdip F 16-pin Flat
- D 16-pin Ceramic H Chip
- E 16-pin Epoxy

RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

For maximum reliability:

DC Supply Voltage	$V_{DD} - V_{SS}$	3 to 15	Vdc
Operating Temperature	T_A	-55 to +125	°C
C, D, F, H Device		-40 to +85	°C
E Device			

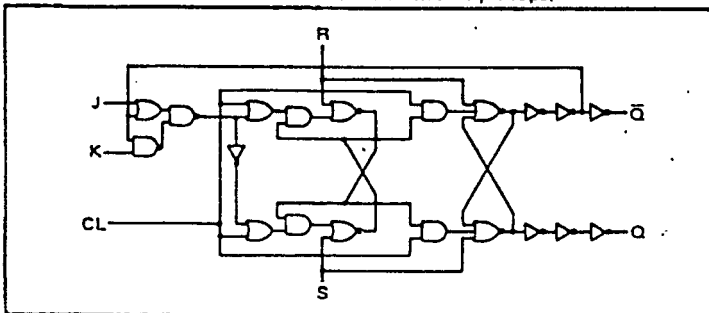
TRUTH TABLE

● t_{n-1} INPUTS					† t_n OUTPUTS		
CL	J	K	S	R	Q	Q $\bar{}$	Q $\bar{}$
1	1	X	0	0	0	1	0
1	X	0	0	0	1	1	0
1	0	X	0	0	0	0	1
1	X	1	0	0	1	0	1
0	X	X	0	0	X		(No Change)
X	X	X	1	0	X	1	0
X	X	X	0	1	X	0	1
X	X	X	1	1	X	1	1

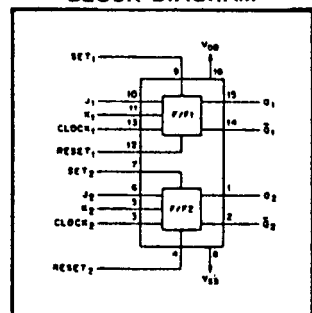
WHERE 1 = HIGH LEVEL
0 = LOW LEVEL
A = LEVEL CHANGE
X = DON'T CARE

● t_{n-1} REFERS TO THE INTERVAL PRIOR TO THE POSITIVE CLOCK PULSE TRANSITION
† t_n REFERS TO THE TIME INTERVAL AFTER THE POSITIVE CLOCK PULSE TRANSITION

LOGIC DIAGRAM (one of two Flip-Flops)



BLOCK DIAGRAM



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

STATIC CHARACTERISTICS 1, 2

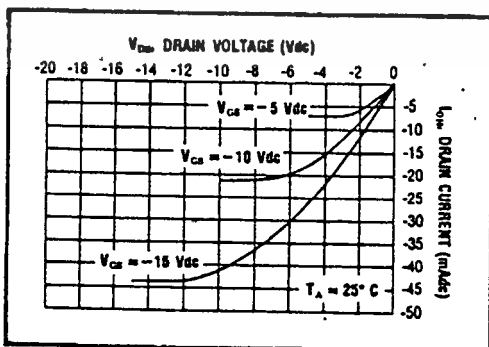
PARAMETER	V _{DD} (Vdc)	CONDITIONS	T _{LOW} ¹		+25°C			T _{HIGH} ²		Units
			Min.	Max.	Min.	Typ.	Max.	Min.	Max.	
QUIESCENT DEVICE CURRENT	I _{DD}	V _{IN} =V _{SS} or V _{DD} All valid input combinations	—	1.0	—	0.005	1.0	—	30	μAdc
			—	2.0	—	0.01	2.0	—	60	
			—	4.0	—	0.02	4.0	—	120	

- NOTES: ¹ Remaining Static Electrical Characteristics are listed under "SCL4000B Series Family Specifications".
² T_{LOW} = -55°C for C, D, F, H device.
 = -40°C for E device.
 T_{HIGH} = +125°C for C, D, F, H device.
 = + 85°C for E device.
³ This device has been designed for balanced output drive current specifications. Consult Family Specifications.

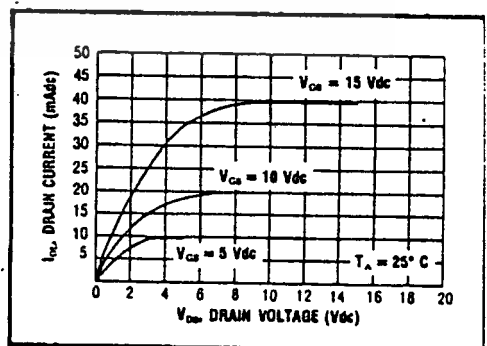
DYNAMIC CHARACTERISTICS (C_L = 50pF, T_A = 25°C)

PARAMETER	V _{DD} (Vdc)	Min.	Typ.	Max.	Units
CLOCKED OPERATION					
PROPAGATION DELAY TIME	t _{PLH, tPHL}	5	—	175	350
		10	—	80	160
		15	—	60	120
OUTPUT TRANSITION TIME	t _{TLH, tTHL}	5	—	100	200
		10	—	50	100
		15	—	40	80
MINIMUM CLOCK PULSE WIDTH	PW _{CL}	5	—	165	330
		10	—	60	120
		15	—	50	100
MAXIMUM CLOCK FREQUENCY	f _{CL}	5	1.5	3.0	—
		10	4.0	8.0	—
		15	5.0	10	—
MAXIMUM CLOCK RISE AND FALL TIME ¹	t _{rCL, t_{fCL}}	5	15	—	—
		10	5	—	—
		15	3	—	—
MINIMUM SETUP TIME	t _{setup}	5	—	100	200
		10	—	50	100
		15	—	40	80
MINIMUM HOLD TIME	t _{hold}	5	—	-25	0
		10	—	-10	0
		15	—	-5	0
SET AND RESET OPERATION					
PROPAGATION DELAY TIME S to Q, R to Q	t _{PLM}	5	—	150	300
		10	—	70	140
		15	—	55	110
MINIMUM SET AND RESET PULSE WIDTH	PW _{S, PW_R}	5	—	100	200
		10	—	50	100
		15	—	40	80
SET AND RESET REMOVAL TIME	t _{rem}	5	—	0	25
		10	—	0	10
		15	—	0	5

¹ When units are cascaded, the maximum rise and fall times of the clock input should be equal to or less than the transition times of the data outputs driving data inputs, plus the propagation delay of the output driving stage for the output capacitive load.



Typical P-Channel
Source Current Characteristics

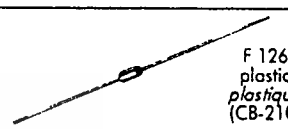

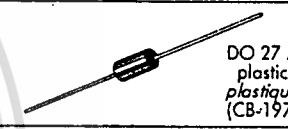
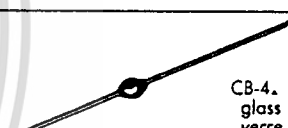
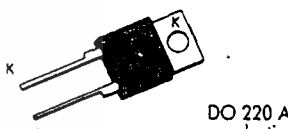
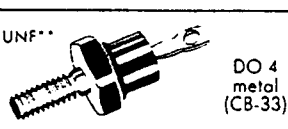
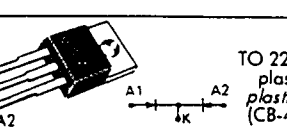


Typical N-Channel
Sink Current Characteristics

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

high efficiency fast recovery rectifier diodes

diodes de redressement rapide à haut rendement

Types	I _O (A)	V _{RRM} (V)	I _{FSM} 10 ms (A)	V _F / I _F T _j 100°C max (V) (A)	I _R /V _{RRM} T _j 100°C max (mA)	t _{rr} max (ns)	Case
1,5 A / T_{amb} = 90°C T_j = 150°C I²t = 12,5 A²s							
BYW 100- 50 BYW 100-100 BYW 100-150 BYW 100-200	1,5	50 100 150 200	50	0,85 1,5	0,5	35 (1)	 F 126 plastic plastique (CB-210)
2,5 A / T_{amb} = 75°C T_j = 175°C I²t = 12,5 A²s							
1N 5802 1N 5803 1N 5804 1N 5805 1N 5806	2,5	50 75 100 125 150	50	0,8 1	0,05	25 (2)	 CB-420 glass verre
3 A / T_{case} = 85°C T_j = 150°C I²t = 25 A²s							
BYW 98- 50 BYW 98-100 BYW 98-150 BYW 98-200	3	50 100 150 200	70	0,85 3	1	35 (1)	 DO 27 A plastic plastique (CB-197)
6 A / T_{amb} = 75°C T_j = 175°C I²t = 78 A²s							
1N 5807 1N 5808 1N 5809 1N 5810 1N 5811	6	50 75 100 125 150	125	0,8 4	0,15	30 (3)	 CB-4. glass verre
7 A / T_{case} = 130°C T_j = 150°C I²t = 50 A²s							
BYW 80- 50 BYW 80-100 BYW 80-150 BYW 80-200	7	50 100 150 200	100	0,85 7	1	35 (1)	 DO 220 AB* plastic plastique (CB-227)
7,6 A / T_{case} = 125°C T_j = 150°C I²t = 32 A²s							
BYW 29- 50 BYW 29-100 BYW 29-150 BYW 29-200	7,6	50 100 150 200	80	0,85 5	0,6	35 (1)	
15 A / T_{case} = 120°C T_j = 150°C I²t = 200 A²s							
BYW 81- 50, (R) BYW 81-100, (R) BYW 81-150, (R) BYW 81-200, (R)	15	50 100 150 200	200	0,85 12	1,5	35 (1)	 10-32 UNF** DO 4 metal (CB-33)
20 A / T_{case} = 125°C T_j = 150°C I²t = 50 A²s							
BYW 51- 50 BYW 51-100 BYW 51-150 BYW 51-200	20 (2 x 10)	50 100 150 200	100	0,89 8	1	35 (1)	 TO 220 A plastic plastique (CB-428)

- (1) : I_F = 1 A V_R = 30 V di/dt = -50 A/μs I_{rr} = 0,2 I_{RM}
 (2) : I_F = 0,5 A I_R = 0,5 A I_{rr} = 0,05 A di/dt = 65 A/μs
 (3) : I_F = 1 A I_R = 1 A I_{rr} = 0,1 A di/dt = 100 A/μs

* Please consult us for other lead configuration.

** M5 thread available on request → Type number + suffix M.

Type number : cathode to case.

Type number + suffix R : anode to case.

N : New product.

o CNES qualified product.

* Nous consulter pour autre configuration des connexions.

** Filetage M5 sur demande → N° de type + suffixe M.

N° de type : cathode au boîtier.

N° de type + suffixe R : anode au boîtier.

N : Nouveau produit.

o Produit qualifié CNES.