ระบบควบคุมรถไฟฟ้ากระแสตรง

DC VEHICLE CONTROL SYSTEM

โดย

นายกฤษฎา สฤษฎ์ศิริ

นายขวัญชัย คงวัฒนานนท์

นายชูเกียรติ สวามิภักดิ์

นายภูวนารถ ชุณหปราณ

วัน เดือน ปี 30 ก.ย. 2541

เลขทะเบียน 038197

เลขเรียกหนังสือ T 59211 ค 279 ร

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2539

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2539

ระบบควบคุมรถไฟฟ้ากระแสตรง

DC VEHICLE CONTROL SYSTEM

โดย

นายกฤษฎา สฤษฎ์ศิริ

นายขวัญชัย คงวัฒนานนท์

นายชูเกียรติ สวามิภักดิ์

นายภูวนารถ ชุณหปราณ

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ. ประภาษ ไพรสุวรรณา

อ. อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2539

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ระบบควบคุมรถไฟฟ้ากระแสตรง

ผู้จัดทำ

1. นายกฤษฎา สฤษฏ์ศิริ
2. นายขวัญชัย คงวัฒนานนท์
3. นายชูเกียรติ สวามิภักดิ์
4. นายภูวนารถ ชุณหปราณ

อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ. ประภาษ ไพรสุวรรณา)

อาจารย์ที่ปรึกษา
(อ. อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบควบคุมรถไฟฟ้ากระแสตรง

นายกฤษฎา สฤษฎ์ศิริ
นายขวัญชัย คงวัฒนานนท์
นายชูเกียรติ สวามิภักดิ์
นายภูวนารถ ชุณหปราณ
ผศ.ประภาษ ไพรสุวรรณา อาจารย์ที่ปรึกษา
อ.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2539

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้แสดงถึงส่วนของระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์ในรถไฟฟ้ากระแสตรง โดยเลือกใช้วงจรควบคุมแรงดันกระแสตรงแบบลดแรงดัน โดยการปรับดิวตี้ไซเกิลจากคันเร่ง และจะได้แสดงรายละเอียดของส่วนต่าง ๆ ที่ใช้ในวงจร ได้แก่ เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ที่ใช้เป็นสวิทช์ในการควบคุมความเร็ว วงจรขับเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ วงจรกรองสัญญาณที่ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ รวมทั้งยังได้กล่าวถึงคุณสมบัติของมอเตอร์กระแสตรงและแบตเตอรี่ที่ใช้ในรถไฟฟ้ากระแสตรงด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DC VEHICLE CONTROL SYSTEM

Kritsada Saritsiri
Khuanchai Khongwattananon
Chukiat Sawamipak
Phuwanart Choonhapran
Asst.Prof.Prapart Prisuwanna Advisor
Arnuwat Janwanitlerd Advisor
1996

ABSTACT

The purpose of this project shows the speed control system which is one of dc vehicle. We have chosen the buck circuit which control output voltage by adjusting duty cycle , which output voltage is lower than input voltage. Furthermore, we explain the details of parts of the circuit eg. power transister , driver circuit and filter design that compose of inductor and capacitor. In addition we explain about how to adjust speed of DC motor and characteristics of battery.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญรูป	III
สารบัญตาราง	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีของวงจรคอนเวอร์เตอร์	2
2.1 บทนำ	2
2.2 ชนิดของวงจรปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	2
2.3 วงจรปรับแรงดันไฟฟ้าแบบลดแรงดัน	3
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันของวงจรลดแรงดัน	3
2.5 วงจรปรับแรงดันแบบเพิ่มแรงดัน	7
2.6 วงจรปรับแรงดันแบบลดและเพิ่มแรงดัน	10
2.7 วงจรปรับแรงดันแบบลดแรงดันเมื่อใช้ทรานซิสเตอร์เป็นสวิทช์	14
บทที่ 3 เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์	16
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสวิชชิ่ง	16
3.2 เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์	20
3.3 การนำทรานซิสเตอร์มาใช้ในงานลักษณะสวิทช์	27
3.4 ทรานซิสเตอร์ดาร์ลิงตัน	34
บทที่ 4 วงจรควบคุม	36
4.1 วงจรควบคุม	36
4.2 วงจรกำเนิดพัลส์สี่เหลี่ยมปรับดิวตี้ไซเคิลได้	36
4.3 วงจรขับเบส	39
บทที่ 5 การคำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ	41
5.1 การคำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำ	41
5.2 การคำนวณค่าตัวเก็บประจุ	41
5.3 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ	42
บทที่ 6 การควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	49
6.1 การควบคุมแรงดันอาเมเจอร์	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 2.1	แสดงรูปวงจรควบคุมแรงดันพื้นฐาน	2
รูปที่ 2.2	วงจรปรับแรงดันพื้นฐานแบบลดแรงดัน	3
รูปที่ 2.3	สวิทช์ขณะปิดวงจรของวงจรลดแรงดัน	4
รูปที่ 2.4	สวิทช์ขณะเปิดวงจรของวงจรลดแรงดัน	4
รูปที่ 2.5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันกับเวลาของวงจรลดแรงดัน	6
รูปที่ 2.6	วงจรปรับแรงดันแบบเพิ่มแรงดัน	7
รูปที่ 2.7	สวิทช์ขณะปิดวงจรของวงจรเพิ่มแรงดัน	8
รูปที่ 2.8	กราฟแสดงลักษณะกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ	9
รูปที่ 2.9	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาของวงจรเพิ่มแรงดัน	10
รูปที่ 2.10	วงจรปรับแรงดันแบบลดและเพิ่มแรงดัน	11
รูปที่ 2.11	เมื่อสวิทช์ปิดวงจร	11
รูปที่ 2.12	เมื่อสวิทช์เปิดวงจร	12
รูปที่ 2.13	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาของวงจรลดและเพิ่มแรงดัน	13
รูปที่ 2.14	วงจรปรับแรงดันแบบลดแรงดันโดยใช้ทรานซิสเตอร์เป็นสวิทช์	15
รูปที่ 3.1	กำลังสูญเสียและความถี่ที่ใช้งานในการสวิชชิ่งของอุปกรณ์ต่าง ๆ	17
รูปที่ 3.2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของกำลังและขนาดของพื้นที่ของชิพของอุปกรณ์ต่างๆ	18
รูปที่ 3.3	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของกำลังและช่วงความถี่ที่ใช้งานของอุปกรณ์ต่างๆ	18
รูปที่ 3.4	แสดงสัญลักษณ์ของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์	20
รูปที่ 3.5	แสดงคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์แบบเอ็นพีเอ็น	21
รูปที่ 3.6	คุณสมบัติในการเปลี่ยนแปลง	22
รูปที่ 3.7	แสดงลักษณะของทรานซิสเตอร์แบบเอ็นพีเอ็น	22
รูปที่ 3.8	พื้นที่ใช้งานปลอดภัยฟอร์เวอร์สไบอัส	26
รูปที่ 3.9	พื้นที่ใช้งานปลอดภัยรีเวอร์สไบอัส	26
รูปที่ 3.10	การทำงานเป็นสวิทช์ของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์	28
รูปที่ 3.11	กราฟลักษณะสมบัติของทรานซิสเตอร์	29
รูปที่ 3.12	แสดงลักษณะของไบโพลาร์จังชันทรานซิสเตอร์ขณะสภาวะทรานเซียนท์	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 8.12	แสดงการทดสอบวงจรกับโหลดน้ำเกลือ	65
รูปที่ 8.13	ลักษณะของสัญญาณคร่อมขาคอลเลกเตอร์-อิมิเตอร์ และเบส-อิมิเตอร์ เมื่อเหยียบคันเร่งน้อย	66
รูปที่ 8.14	ลักษณะของสัญญาณคร่อมขาคอลเลกเตอร์-อิมิเตอร์ และเบส-อิมิเตอร์ เมื่อเหยียบคันเร่งมาก	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

		หน้า
ตาราง 3.1	เปรียบเทียบคุณสมบัติของอุปกรณ์ต่าง ๆ	16
ตาราง 3.2	เปรียบเทียบคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์กับจีทีโอ	19
ตาราง 5.1	ค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กสูงสุดของแกน	42
ตาราง 5.2	แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของแกนแบบต่าง ๆ	44
ตาราง 7.1	เปรียบเทียบขนาดความจุของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ที่อุณหภูมิปกติและต่ำกว่าปกติ	55
ตาราง 8.1	ผลการทดสอบวงจรกับโหลดน้ำเกลือ	64
ตาราง 8.2	ผลการทดสอบวงจรกับรถไฟฟ้า	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและวัตถุประสงค์ของโครงงาน

เนื่องจากปัจจุบันนี้ได้รถยนต์ได้ใช้น้ำมันเป็นแหล่งพลังงานหลัก ซึ่งทำให้เกิดควันพิษจากไอเสียของรถยนต์ซึ่งนับวันจะมีปริมาณของรถยนต์เพิ่มขึ้นมาก ซึ่งเป็นอันตรายต่อสภาพแวดล้อม ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาถึงการทำงานของรถยนต์ที่ใช้ไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงาน โดยได้ศึกษาถึงระบบควบคุมของรถไฟฟ้า ซึ่งในขั้นตอนแรกได้ศึกษาถึงรถไฟฟ้าซึ่งใช้ไฟกระแสตรง เพราะว่าสามารถเก็บพลังงานไฟฟ้าในรูปของแบตเตอรี่ได้ และนอกจากนั้นรถไฟฟ้ายังสามารถควบคุมได้ง่าย มีการบำรุงรักษาน้อย การออกแบบมักจะออกแบบให้รถมีขนาดเล็กกะทัดรัด น้ำหนักเบาซึ่งเหมาะอย่างยิ่งสำหรับการใช้งานในเมือง

ในการทำโครงงานนี้ ได้ศึกษาถึงระบบควบคุมรถไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อนำไปใช้ในรถไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.2 ขอบเขตของโครงงาน

โครงงานนี้ได้ศึกษาถึงระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้า โดยใช้วงจรชอปเปอร์มาควบคุม วงจรชอปเปอร์เป็นวงจรที่ใช้เปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุต จากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ให้ได้ระดับแรงดันทางด้านเอาต์พุทเพราะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์กระแสตรง คือ การควบคุมความเร็วของรถไฟฟ้า สำหรับวงจรชอปเปอร์ที่ใช้ จะใช้วงจรปรับแรงดันแบบลดแรงดัน ซึ่งใช้ทรานซิสเตอร์กำลังเป็นอุปกรณ์ในการสวิทช์ซึ่ง โดยทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมแรงดัน โดยการเปลี่ยนค่าดิวตี้ไซเคิล ซึ่งคือช่วงเวลาที่ทรานซิสเตอร์นำกระแสต่อช่วงเวลาทั้งหมดที่ทรานซิสเตอร์นำและหยุดนำกระแส โดยในการควบคุมให้ทรานซิสเตอร์กำลังนำ และหยุดนำกระแสจะมีวงจรกำเนิดดิวตี้ไซเคิลและวงจรขับเบส เพื่อควบคุมทรานซิสเตอร์ โดยแหล่งพลังงานที่ใช้จะใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง นอกจากนั้นยังได้กล่าวถึงอุปกรณ์ประกอบที่สำคัญอีกคือ ตัวเหนี่ยวนำ และคาปาซิเตอร์ ซึ่งทำให้ระดับแรงดันที่มอเตอร์กระแสตรงที่ได้จากการสวิทช์ซึ่งต่อเนื่องและเรียบยิ่งขึ้น และยังได้มีส่วนที่ใช้ป้องกันคือใช้ฟิวส์ และยังมีวงจรควบคุมป้อนกลับ เพื่อใช้ป้องกันมอเตอร์ในสภาวะที่มีกระแสเกินพิกัด โดยสัญญาณที่ป้อนกลับจะนำมาควบคุมดิวตี้ไซเคิล โดยในขณะที่กระแสเกิน ดิวตี้ไซเคิลจะเป็นศูนย์ซึ่งก็คือการตัดวงจรออกจากแบตเตอรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีของวงจรคอนเวอร์เตอร์
พื้นฐานของวงจรปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

2.1 บทนำ

วงจรปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC-DC CONVERTER หรือ CHOPPERS) คือวงจรไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ป้อนให้กับวงจรทางด้านอินพุต ให้ได้ระดับแรงดันทางด้านเอาท์พุตตามที่ต้องการ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของวงจรชอปเปอร์

E_1 : ระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ป้อนให้วงจร

E_2 : ระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านเอาท์พุต

รูปที่ 2.1 แสดงรูปวงจรควบคุมแรงดันพื้นฐาน

2.2 ชนิดของวงจรปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

วงจรปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสามารถจำแนกได้ตามความสัมพันธ์ของระดับแรงดันทางด้านอินพุตและแรงดันทางด้านเอาท์พุต ซึ่งสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 แบบ ดังนี้

1. วงจรลดแรงดัน (Buck Circuit) คือ วงจรที่ทำหน้าที่ปรับระดับแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุต ให้ได้ระดับแรงดันทางด้านเอาท์พุต ซึ่งมีระดับแรงดันต่ำกว่าระดับแรงดันทางด้านอินพุต

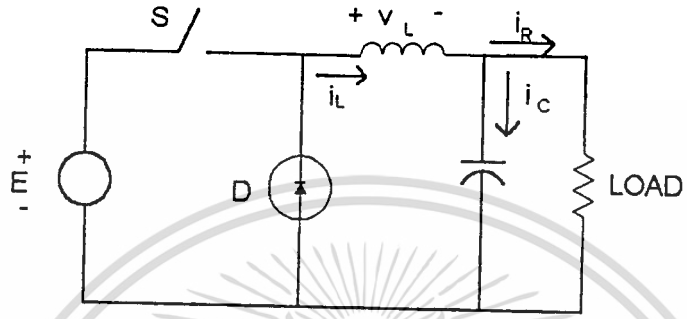
2. วงจรเพิ่มแรงดัน (Boost Circuit) คือ วงจรที่ทำหน้าที่ปรับระดับแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุต ให้ได้ระดับแรงดันทางด้านเอาท์พุต ซึ่งมีระดับแรงดันสูงกว่าระดับแรงดันทางด้านอินพุต

3. วงจรลดและเพิ่มแรงดัน (Buck - Boost Circuit) คือ วงจรที่ทำหน้าที่ปรับระดับแรงดันทางด้านอินพุต ให้ได้ระดับแรงดันทางด้านเอาท์พุต ซึ่งมีระดับแรงดันต่ำหรือสูงกว่าระดับแรงดันทางด้านอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับวงจรที่จะศึกษาเพื่อนำมาควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงคือ วงจรลดแรงดัน ซึ่งมีหลักการพื้นฐานดังต่อไปนี้

2.3 วงจรปรับแรงดันไฟฟ้าแบบลดแรงดัน



รูปที่ 2.2 วงจรปรับแรงดันพื้นฐานแบบลดแรงดัน

E : ระดับแรงดันด้านอินพุต
S : สวิตช์
D : ไดโอด
C : ตัวเก็บประจุ
L : ตัวเหนี่ยวนำ
R : ตัวต้านทาน

i_d : กระแสที่ไหลผ่านไดโอด
i_L : กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ
i_R : กระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทาน
V_L: แรงดันคร่อมตัวเหนี่ยวนำ
V_C: แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ

จากวงจรที่แสดงในรูปที่ 2.2 ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุในวงจรลดแรงดัน จะทำให้กระแสที่ไหลออกทางด้านเอาท์พุตมีความต่อเนื่องและเรียบยิ่งขึ้น และยังทำหน้าที่กำจัดริปเปิ้ลของวงจรอีกด้วย

2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน (Voltage Relation) ของวงจรลดแรงดัน

จากรูปที่ 2.2 ในการปรับระดับแรงดันทางด้านเอาท์พุต V_C นั้นสวิตช์ S จะถูกเปิดและปิดเป็นจังหวะ โดยที่มีคาบเวลาของการเปิด- ปิด เท่ากับ T และกำหนดให้อัตราส่วนของช่วงเวลาที่สวิตช์ S ปิดต่อช่วงเวลาที่สวิตช์เปิดมีค่าเท่ากับ D ซึ่งเรียกว่าดิวตี้ไซเคิล (Duty cycle) ดังนั้นช่วงเวลาที่สวิตช์ปิดวงจรมีค่าเท่ากับ DT ช่วงเวลาที่สวิตช์เปิดมีค่าเท่ากับ (1-D)T สำหรับวงจรในรูปที่ 2.2 จะพิจารณาให้ตัวเก็บประจุมีค่ามากพอดังนั้นเราจะไม่พิจารณาถึงค่าริปเปิ้ลและถือว่าแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าคงที่ (V_C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

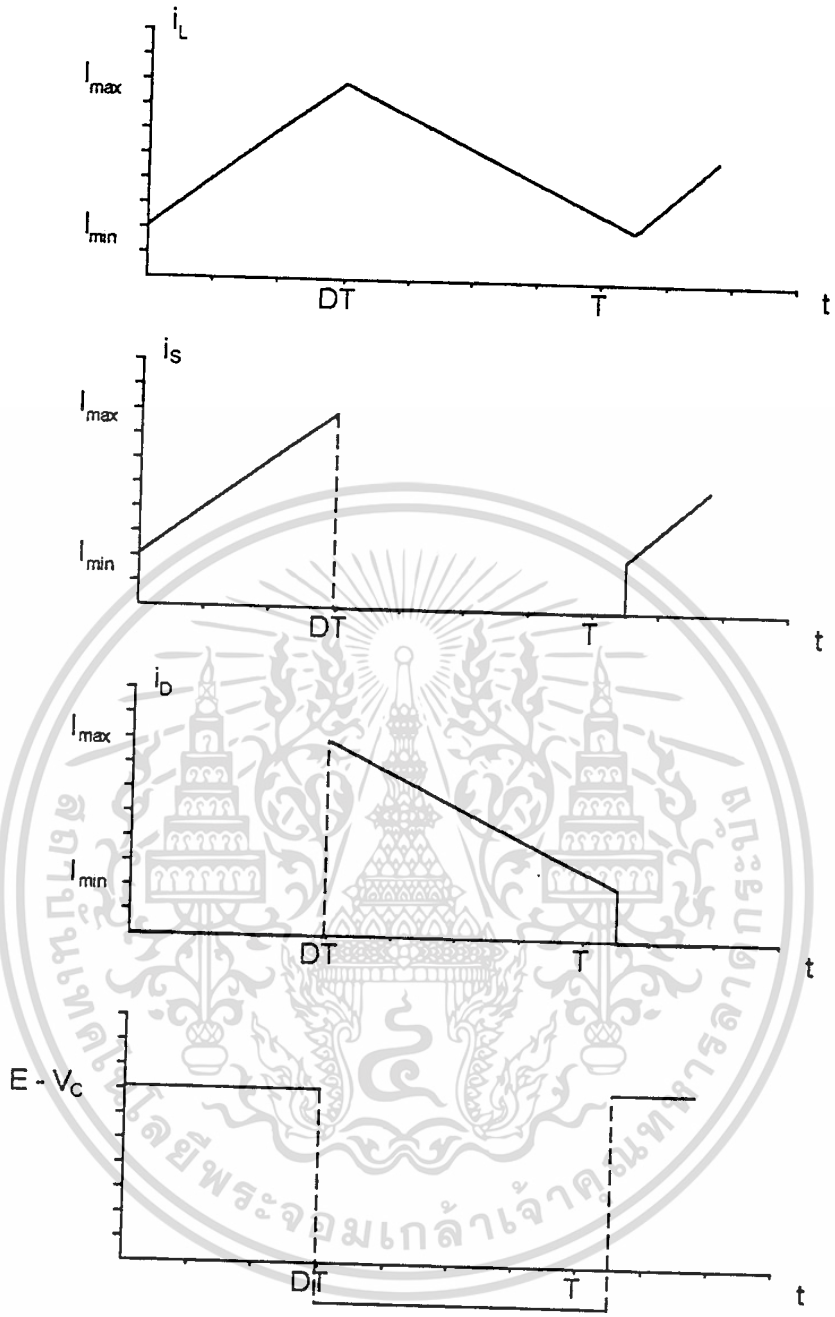
$$0 = L\frac{di_L}{dt} + V_C$$

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{V_C}{L}$$

ทั้งช่วงที่มีการเปิดและปิดวงจร เราจะพิจารณาลักษณะของกระแสเมื่อเทียบกับเวลา ช่วงที่มีการปิดวงจร (DT) กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_L) จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นโดยมีความชันคงที่ โดยเราจะพิจารณาให้ค่ากระแสเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ I_{min} และเพิ่มขึ้นจนถึงค่า I_{max} ซึ่งเป็นจังหวะที่สวิตช์ถูกเปิด

ช่วงที่สวิตช์ถูกเปิด กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำยังคงไหลในทิศทางเดิมแต่มีค่าน้อยลงเรื่อย ๆ จากค่า I_{max} จนถึงค่า I_{min} ซึ่งพิจารณาจากกราฟรูปที่ 2.5 ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันกับเวลาของวงจรลดแรงดัน

ช่วงเวลาที่สวิตช์ถูกปิด กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นจาก I_{min} จนถึง I_{max} และช่วงที่เปิดวงจร กระแสลดลงจาก I_{max} จนถึง I_{min} ทั้งช่วงเปิดและปิดวงจรมีค่าเท่ากันเพราะมีการเปิด-ปิดเป็นจังหวะในแต่ละคาบเวลา ซึ่งอาจมากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ สำหรับวงจรที่พิจารณาเรา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาให้กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเป็นกระแสที่ไหลต่อเนื่อง จากสมการที่พิจารณาจะได้ว่า

$$I_{max} - I_{min} = \frac{(E - V_C)DT}{L}$$

$$I_{max} - I_{min} = \frac{-V_C(1-DT)}{L}$$

$$\frac{(E - V_C)DT}{L} = \frac{V_C(1-DT)}{L}$$

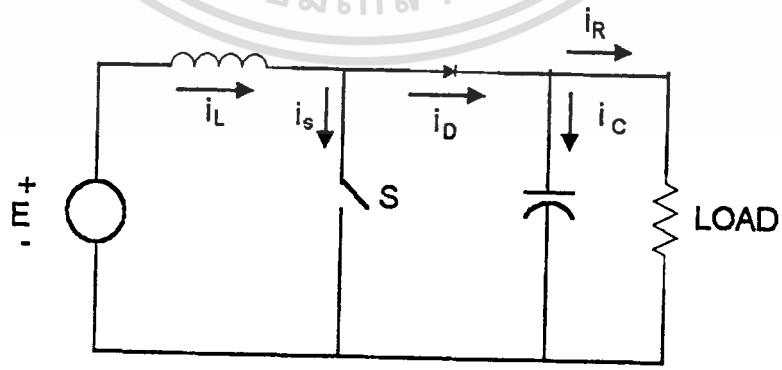
$$(E - V_C)D = V_C(1-D)$$

$$V_C = DE$$

จะเห็นได้ว่าแรงดันที่ตกคร่อมคาปาซิเตอร์(V_C) ซึ่งก็คือแรงดันเอาท์พุตจากวงจรปรับแรงดันกระแสตรงแบบลดแรงดัน ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของคาบเวลาในการเปิด-ปิดสวิตช์ ดังนั้นเราสามารถปรับระดับแรงดันทางด้านเอาท์พุตได้ โดยที่แรงดันเอาท์พุตกระแสตรงของวงจรปรับแรงดันกระแสตรงแบบลดแรงดัน จะมีระดับแรงดันที่ต่ำกว่าระดับแรงดันกระแสตรงทางด้านอินพุต

2.5 วงจรปรับแรงดันแบบเพิ่มแรงดัน

วงจรปรับแรงดันแบบเพิ่มแรงดัน มีวงจรพื้นฐานดังนี้



รูปที่ 2.6 วงจรปรับแรงดันแบบเพิ่มแรงดัน

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันช่วงที่สวิตช์ปิด กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นในอัตราคงที่ดังสมการ

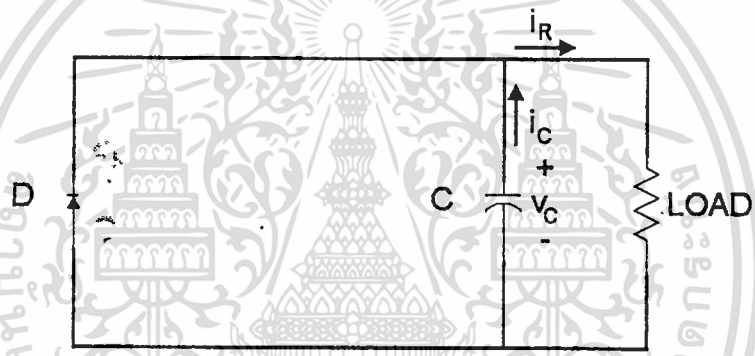
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E = V_L$$

$$E = \frac{Ldi_L}{dt}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{E}{L}$$

ซึ่งช่วงที่สวิตช์ปิด ไดโอดจะถูกรีเวอร์สไบแอสและตัวเก็บประจุ จะจ่ายกระแสไปยังโหลด โดยทิศทางของกระแส i_C จะไหลสู่โหลดความต้านทานช่วงที่สวิตช์ปิด วงจรจะมีลักษณะดังนี้



รูปที่ 2.7 สวิทช์ขณะปิดของวงจรเพิ่มแรงดัน

เมื่อทำการเปิดสวิตช์ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ จะลดลงในอัตราส่วนคงที่จนมาถึงค่า I_{min} ขณะที่สวิตช์ถูกปิดเพราะว่าสวิตช์มีการเปิด-ปิด เป็นจังหวะที่สม่ำเสมอภายในช่วงคาบเวลา เมื่อกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าลดลง แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะมากกว่าแรงดันทางด้านอินพุต ดังนั้นเมื่อเปิดสวิตช์ จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

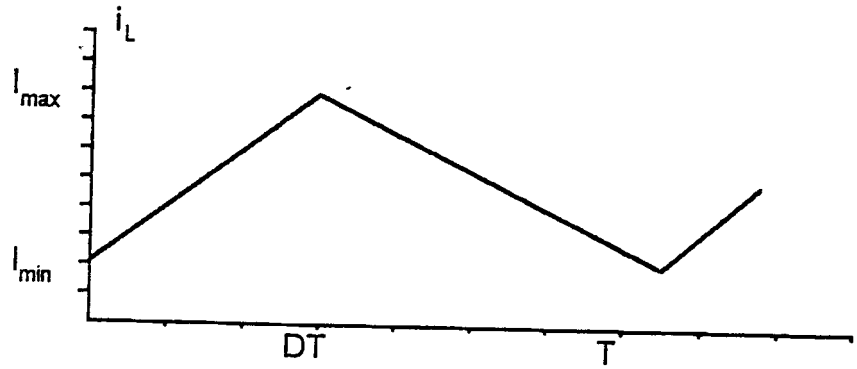
$$E = V_L + V_C$$

$$E = \frac{Ldi_L}{dt} + V_C$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{E - V_C}{L}$$

พิจารณาลักษณะกระแสของตัวเหนี่ยวนำ ดังรูปที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 กราฟแสดงลักษณะของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ

ช่วงระหว่าง I_{max} กับ I_{min} ในขณะที่สวิตช์ปิดกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นจาก I_{min} จนถึง I_{max} ในอัตราคงที่มีค่าเท่ากับช่วงระหว่าง I_{max} จนถึง I_{min} เมื่อสวิตช์เปิดวงจร ซึ่งกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะลดลงจาก I_{max} จนถึง I_{min} จะได้ว่า

$$I_{max} - I_{min} = \frac{(E)}{L}DT$$

$$I_{max} - I_{min} = \frac{(E - V_C)(1-D)T}{L}$$

$$\frac{(E)}{L}DT = \frac{(E - V_C)(1-D)T}{L}$$

$$ED = (V_C - E)(1-D)$$

$$ED = V_C - V_C D - E + ED$$

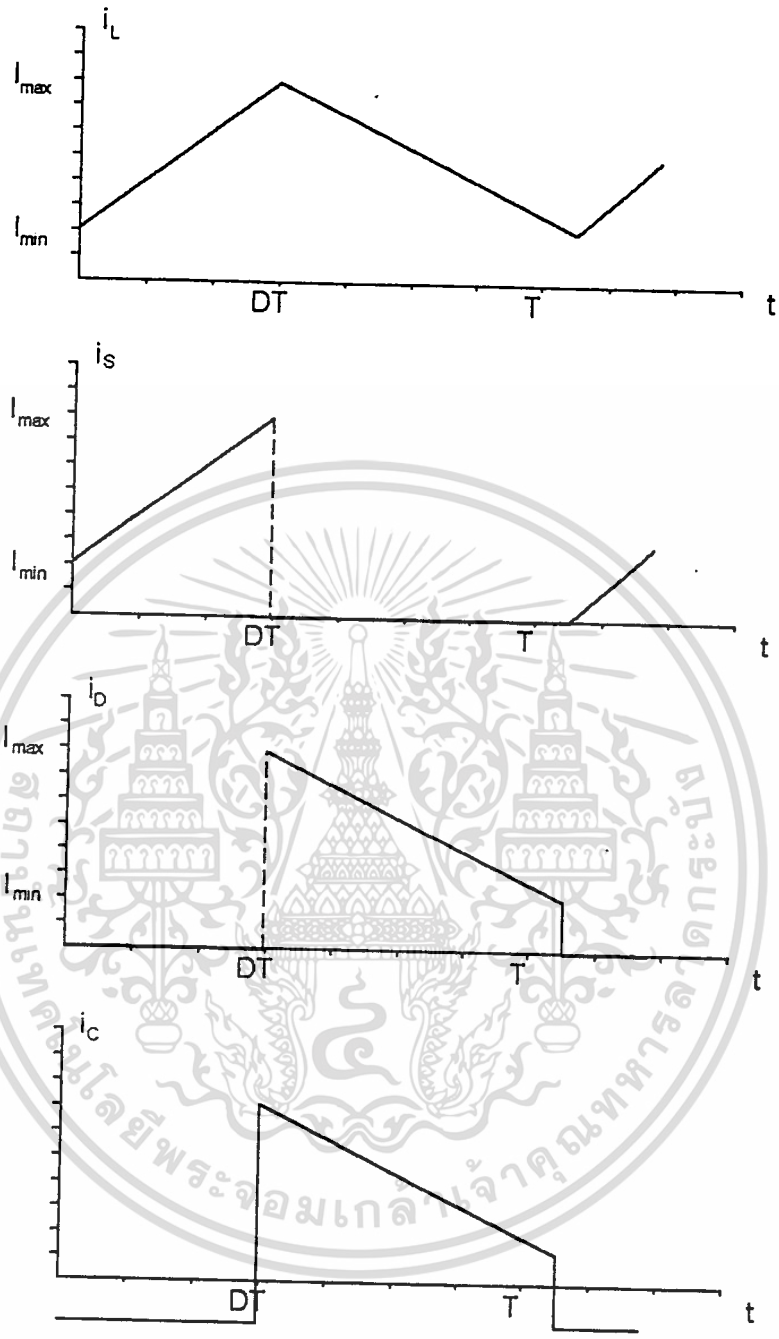
$$E = V_C(1-D)$$

$$V_C = \frac{E}{1-D}$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่าระดับแรงดันทางด้านเอาท์พุต จะมีค่ามากกว่าระดับแรงดันทางด้านอินพุต ซึ่งเป็นลักษณะของวงจรบูทชอปเปอร์และจากสมการจะเห็นว่าระดับแรงดันด้านเอาท์พุตจะขึ้นอยู่กับค่าดิวตี้ไซเคิลซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างช่วงเวลาที่สวิตช์เปิด-ปิด จากสมการยังพบว่าถ้าดิวตี้ไซเคิลมีค่าเท่ากับ 1 จะได้แรงดันทางด้านเอาท์พุตมีค่าเป็นอนันต์ แต่ในความเป็นจริงแล้ว ระดับแรงดันทางด้านเอาท์พุตเป็นค่าที่จำกัดอยู่ที่ระดับแรงดันระดับหนึ่ง

พิจารณาลักษณะของกระแสที่ไหลในอุปกรณ์ต่าง ๆ ในวงจร ดังกราฟรูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



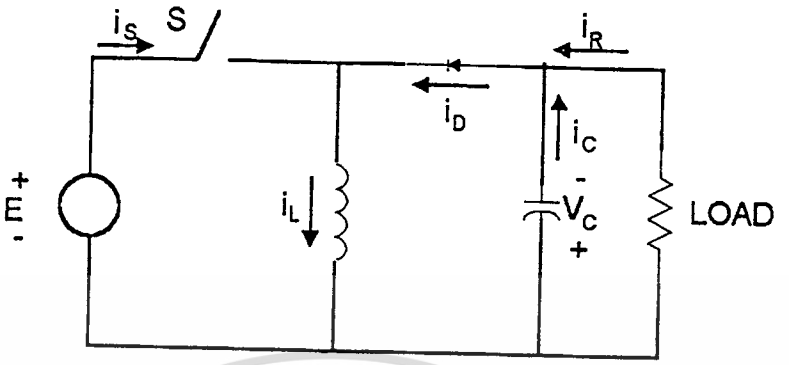
รูปที่ 2.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาของวงจรเพิ่มแรงดัน

2.6 <u>วงจรปรับแรงดันแบบลดและเพิ่มแรงดัน</u>

วงจรปรับแรงดันแบบลดและเพิ่มแรงดัน เป็นวงจรซึ่งทำหน้าที่ปรับระดับแรงดันที่ป้อนให้ทางด้านอินพุต เป็นระดับแรงดันค่าใหม่ ซึ่งสามารถปรับระดับแรงดันทางด้านเอาท์พุต ให้น้อยกว่าหรือมากกว่า แรงดันที่ป้อนให้กับวงจรทางด้านอินพุต และแรงดันที่ได้ทางด้านเอาท์พุต จะมีขั้วตรงข้ามกับแรงดันทางด้านอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรลดและเพิ่มแรงดันมีวงจรพื้นฐานดังนี้

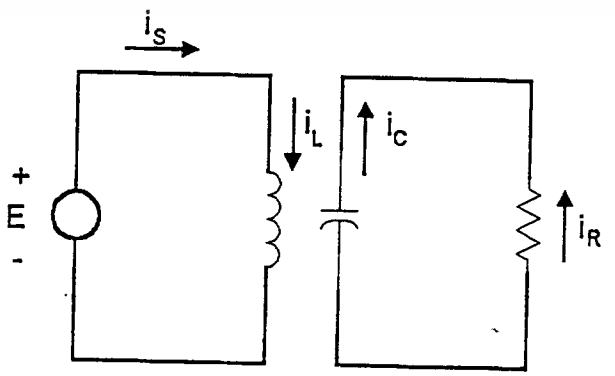


รูปที่ 2.10 วงจรปรับแรงดันแบบลดและเพิ่มแรงดัน

สวิตช์จะถูกปิด - เปิด ในคาบเวลา โดยมีการปิด- เปิด เป็นจังหวะต่อเนื่องกันไปช่วงเวลาที่สวิตช์ปิดเท่ากับ DT ดังนั้นช่วงเวลานี้สวิตช์จะเปิดวงจรเท่ากับ (1- D)T สำหรับวงจรลดและเพิ่มแรงดันนี้ เรากำหนดให้ค่าตัวเก็บประจุมีค่ามากเพียงพอ ดังนั้นเราจะไม่พิจารณาค่าริปเปิ้ล ดังนั้นจึงถือว่าระดับแรงดัน ที่คร่อมตัวเก็บประจุ ซึ่งก็คือ ระดับแรงดันทางด้านเอาท์พุตมีระดับแรงดันคงที่เท่ากับระดับแรงดันที่คร่อมตัวเก็บประจุ

<u>ความสัมพันธ์ของแรงดัน</u> (VOLTAGE REGULATION)

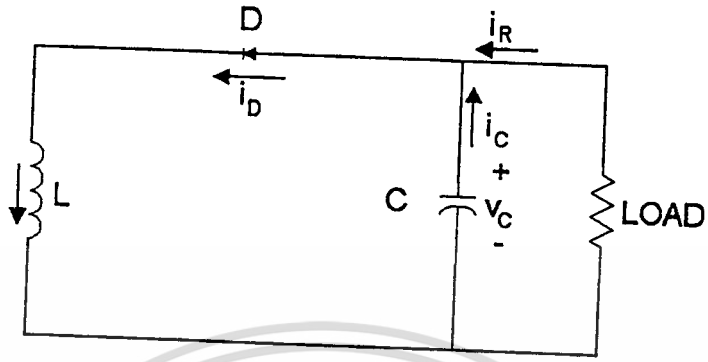
เมื่อสวิตช์ถูกปิด ไดโอดจะถูกรีเวอร์สไบแอส ดังนั้นในขณะที่สวิตช์ปิดลง กระแสที่ไหลผ่านไดโอดมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งในขณะนี้แหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จะจ่ายกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นในอัตราคงที่เมื่อเทียบกับเวลา



รูปที่ 2.11 เมื่อสวิตช์ปิดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อสวิตช์ถูกเปิดแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จะถูกตัดออกจากวงจร และจะมีกระไหลผ่านไดโอด ซึ่งมีค่าเท่ากับกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.12 เมื่อสวิตช์เปิดวงจร

จากที่กล่าวมาแล้วเมื่อสวิตช์ถูกปิด กระแสไหลผ่านตัวแหนี่ยวนำ จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นในอัตราคงที่ดังสมการ

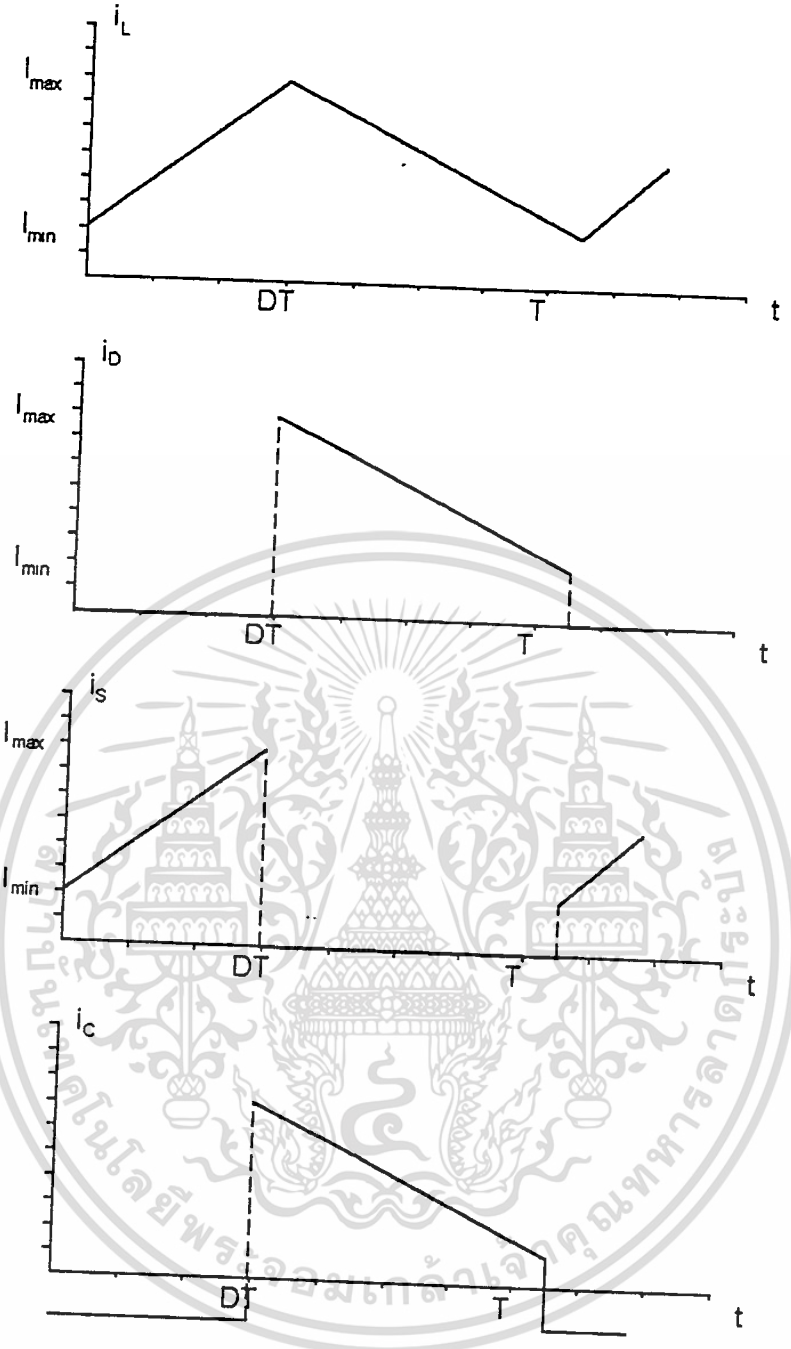
$$E = V_L$$

$$E = L\frac{di_L}{dt}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{E}{L}$$

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของอุปกรณ์ในวงจรดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาของวงจรลดและเพิ่มแรงดัน

ดังนั้นเมื่อสวิตช์ปิดจะได้

$$I_{max} - I_{min} = \left(\frac{E}{L}\right)DT$$

เมื่อสวิตช์ถูกเปิด

$$-V_C = L\frac{di_L}{dt}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์
(POWER TRANSISTER)

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสวิชชิ่ง (switching device)

พิจารณาตาราง 3.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของอุปกรณ์ต่าง ๆ

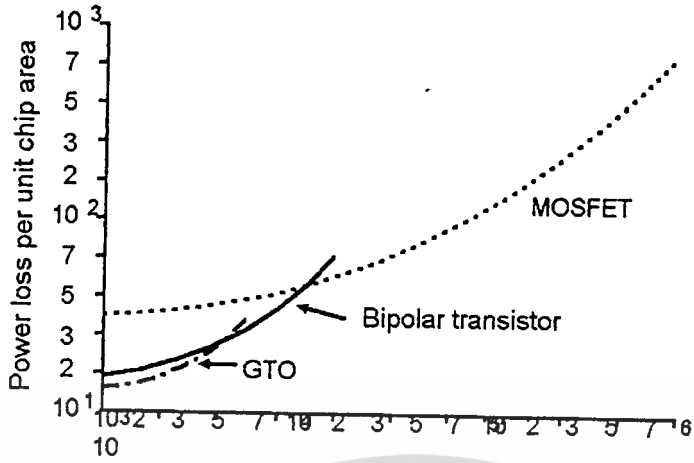
ตาราง 3.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆ ของอุปกรณ์สวิชชิ่ง

Item	Thyristor	GTO	Bipolar transistor	MOSFET	SIT	SIThy
Normally ON/OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON
Breakdown voltage (V)	~4000	~4500	~1000	~1000	~500	~2500
Current density (A cm^{-2})	100	100	40	10	10	100
Surge current capability	Good	Good	Bad	Bad	Bad	Good
Carrier frequency (kHz)	5	3	20	2000	2000	20
Gate drive power	Low	Medium	High	Low	Low	Medium
Self-turn-off ability	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Operation junction temperature limit ($^{\circ}C$)	125	125	150	200	200	200

พิจารณาคุณสมบัติอื่น ๆ อีก ได้แก่

1. กำลังสูญเสียและความถี่ที่ใช้งานในการสวิชชิ่ง (power loss and operating frequency)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Power loss VS switching frequency for power devices

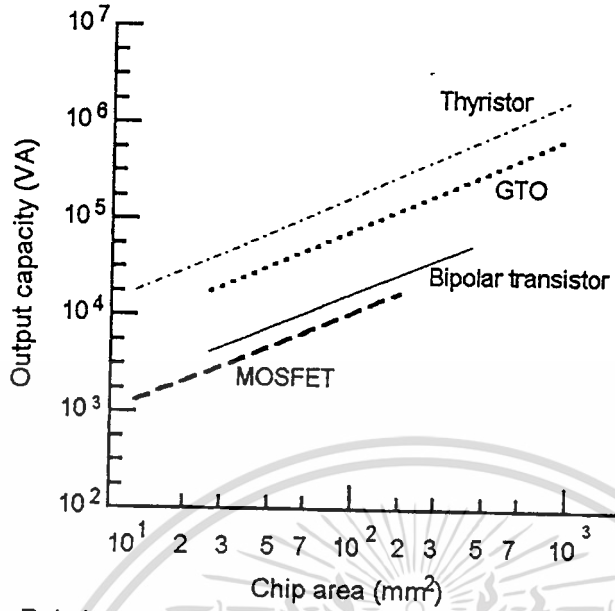
รูปที่ 3.1 กำลังสูญเสียและความถี่ที่ใช้งานในการสวิชชิ่งของอุปกรณ์ต่าง ๆ

จากรูป 3.1 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูญเสียและความถี่ที่ใช้งานในการสวิชชิ่งของจีทีโอ ทรานซิสเตอร์ มอสเฟท จะสังเกตได้ว่าที่ความถี่สูงๆ กำลังสูญเสียของจีทีโอมีมากที่สุด รองลงมาคือทรานซิสเตอร์แล้วตามด้วยมอสเฟท ฉะนั้นในย่านความถี่สูงควรใช้มอสเฟทจะดีที่สุด ในทางตรงกันข้ามถ้าใช้งานที่ความถี่ต่ำเราควรใช้จีทีโอจะมีการสูญเสียน้อยที่สุด

2. ขนาดของกำลังและขนาดของพื้นที่ของชิพ (output capacity and chip area) จากรูป 3.2 จะเห็นได้ว่า ไทริสเตอร์สามารถให้กำลังเอาท์พุทได้ดีที่สุด ตามด้วยจีที่โอ ทรานซิสเตอร์ และมอสเฟท ตามลำดับ

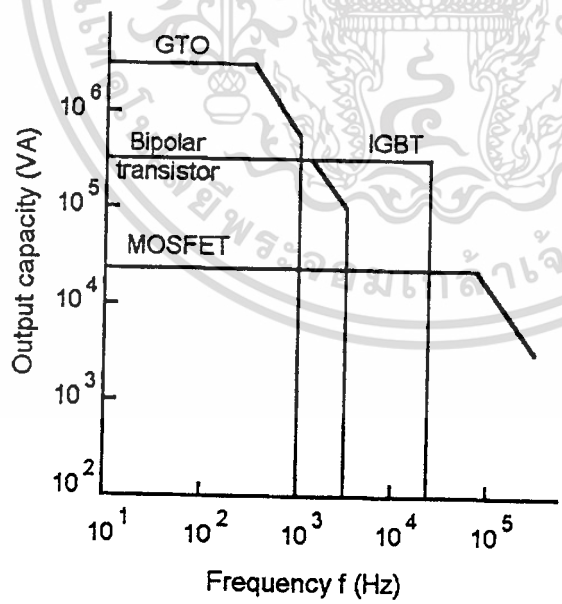
3. ขนาดของกำลังและช่วงความถี่ที่ใช้งาน (output capacity and frequency ranges) จากรูปที่ 3.3 แสดงขอบเขตการใช้งานของอุปกรณ์แต่ละตัวที่ความถี่ต่างๆ กัน จะมีขนาดกำลังเป็นอย่างไร จะเห็นได้ว่าทรานซิสเตอร์สามารถใช้งานได้ที่ความถี่ต่างๆ หลายค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Relationship between chip area and output capacity of each device

รูปที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของกำลังและขนาดของพื้นที่ของชิพ ของอุปกรณ์ต่าง ๆ



Application zones for power devices : output capacity and frequency ranges

รูปที่ 3.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของกำลังและช่วงความถี่ที่ใช้งานของอุปกรณ์ต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เปรียบเทียบทรานซิสเตอร์กับจีทีโอ โดยทั่วไปการเปรียบเทียบการทำงานระหว่างอุปกรณ์สองตัวใดๆ จะต้องกำหนดที่ขนาดของกำลังค่าหนึ่ง เราจะมาพิจารณาตาราง 3.1.2 ที่ขนาดกำลังที่น้อยกว่า 300 กิโลโวลท์แอมแปร์ ซึ่งอุปกรณ์ทั้งสองตัวยังสามารถทำงานได้

ตาราง 3.2 เปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างทรานซิสเตอร์กับจีทีโอ

		Transistor	GTO
Basic characteristic	Voltage rating	△	○
	Current	△	○
	Turn-off time	○	△
	Cut-off characterist	○	△
Application	Protection circuit	Easy	Should be strong
	Snubber circuit	Small	Big
	Over-current protection	Easy	Complicated
	Parallel connection	Easy	Rather Complicated
	Frequency	High	Low
	Assembling precautions	Not to many	Many
	Total evaluation (for 300 kva or less)	♠	○

♠ : excellent ; ○: good ; △ : medium;

จากตาราง3.2 จะเห็นได้ว่าโดยรวมแล้วทรานซิสเตอร์จะดีกว่าจีทีโอ ยกเว้นเรื่องการใช้งานที่แรงดันสูง และที่กำลังมาก ๆ

ในการทำระบบควบคุมรถไฟฟ้ากระแสตรง เราเลือกใช้ทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ในการสวิทชิงดังจะกล่าวรายละเอียดต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
038197

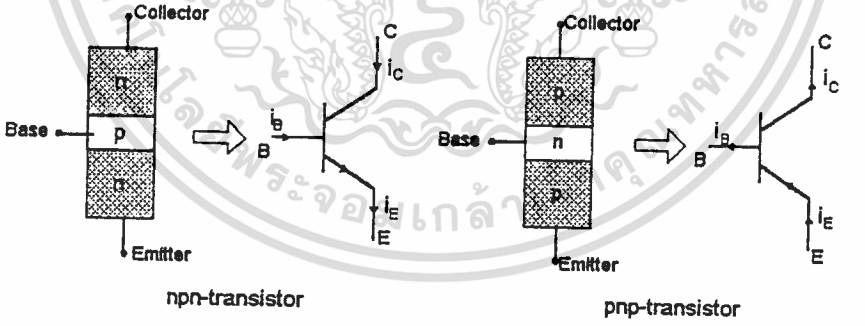
3.2 เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ (POWER TRANSISTOR)

เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์มีหน้าที่ควบคุมคุณสมบัติการเปิดปิดกระแส โดยตัวทรานซิสเตอร์ที่ใช้เป็นสวิทช์จะถูกควบคุมให้ทำงานอยู่ในช่วงอิ่มตัว (saturate) ความเร็วในการสวิทช์ของทรานซิสเตอร์รุ่นใหม่จะสูงกว่าไทริสเตอร์ แต่โวลเตจและกระแสพิกัดของมันจะมีค่าต่ำกว่าไทริสเตอร์

เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์สามารถแบ่งอย่างกว้างๆได้ 3 ชนิดแต่ในที่นี้เราจะพิจารณาเฉพาะไบโพลาร์จังค์ชันทรานซิสเตอร์ (Bipolar junction transistor (BJTs))

3.2.1ไบโพลาร์จังค์ชันทรานซิสเตอร์

ไบโพลาร์จังค์ชันทรานซิสเตอร์ถูกสร้างขึ้นโดยการเติมส่วน เอ็น หรือ พี ลงในไดโอดที่มีรอยต่อเป็นแบบพีเอ็น (pn-junction diode) ถ้ามีส่วนเอ็นสองส่วน ส่วนพีหนึ่งส่วนจะมีรอยต่ออยู่สองรอยต่อ และจะเรียกตัวอุปกรณ์นี้ว่า ทรานซิสเตอร์แบบเอ็นพีเอ็น ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.4(ก) ถ้ามีส่วนพีสองส่วน ส่วนเอ็นหนึ่งส่วน ก็จะเรียกว่าทรานซิสเตอร์แบบพีเอ็นพี ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.4 (ข) บริเวณทั้งสามส่วนมีชื่อเรียกต่างกันว่าคอลเลคเตอร์ (collector) , อีมิตเตอร์ (emitter) , และเบส (base) ซึ่งไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์จะมีส่วนที่เป็นรอยต่ออยู่สองส่วน คือรอยต่อคอลเลคเตอร์-เบส (CBJ) และรอยต่อเบส-อีมิตเตอร์ (BEJ)



(ก) ทรานซิสเตอร์แบบเอ็นพีเอ็น (ข) ทรานซิสเตอร์แบบพีเอ็นพี

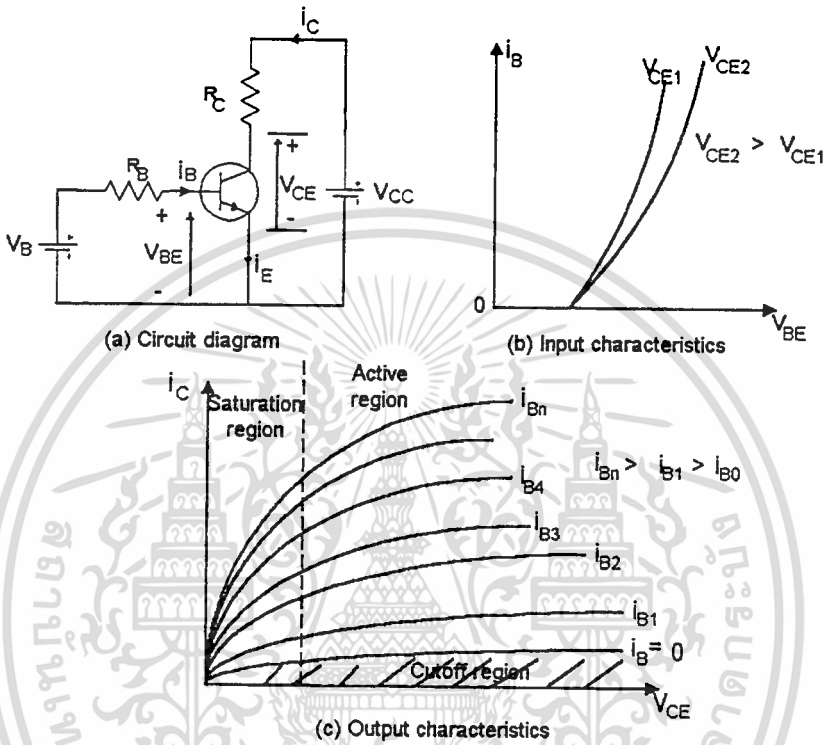
รูปที่ 3.4 แสดงสัญญลักษณ์ของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์

3.2.2คุณสมบัติในสภาวะคงตัว (Steady-state characteristic)

ถึงแม้ว่าจะมีรูปแบบของโครงสร้างที่เป็นไปได้อยู่สามแบบ คือใช้คอลเลคเตอร์ร่วม, ใช้เบสร่วม และใช้อีมิตเตอร์ร่วม แต่แบบใช้อีมิตเตอร์ร่วมได้แสดงในรูปที่ 3.5 (a) (สำหรับทรานซิสเตอร์แบบเอ็นพีเอ็น) จะเป็นแบบที่ใช้งานทั่วไปในการใช้งานเป็นสวิทช์ รูปที่ 3.5 (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

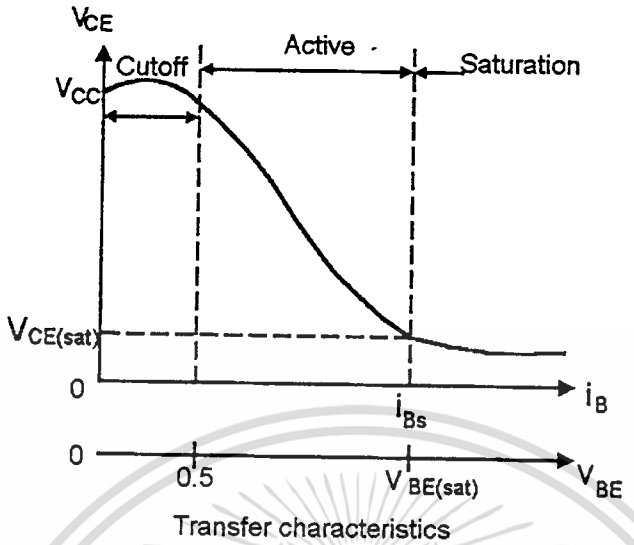
จะแสดงถึงคุณสมบัติทางอินพุทของกระแสเบสต่อโวลเตจตกคร่อมเบส - อีมิตเตอร์ ส่วนรูปที่ 3.5 (c) จะแสดงถึง คุณสมบัติทางเอาท์พุทของกระแสคอลเลคเตอร์ต่อ โวลเตจตกคร่อมคอลเลคเตอร์-อีมิตเตอร์ส่วนสำหรับทรานซิสเตอร์แบบพีเอ็นพีกระแสและโวลท์เตจทั้งหมดจะกลับขั้วกัน



รูปที่ 3.5 แสดงคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์แบบเอ็นพีเอ็น

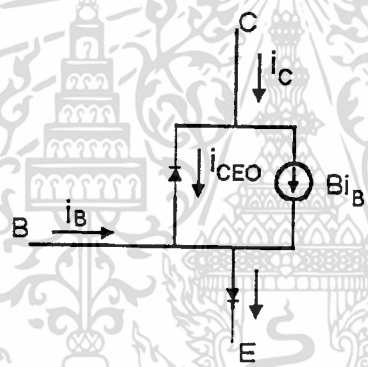
ทรานซิสเตอร์จะมีลักษณะการทำงานอยู่ 3 ช่วง คือ คัทออฟ (cut-off) ,แอคทีฟ (active) และช่วงอิ่มตัว (saturation) ในการคัทออฟทรานซิสเตอร์จะออฟ (off) หรือกระแสเบสไม่มากพอที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์ออน (on) ได้ และบริเวณรอยต่อทั้งสองเป็นรีเวอร์ไบแอส (reverse bias) ในช่วงแอคทีฟทรานซิสเตอร์จะทำหน้าที่เป็นแอมปลิฟลายเออร์ (amplifier) ซึ่งจะขยายกระแสคอลเลคเตอร์ตามอัตราส่วนการขยาย และโวลเตจตกคร่อมคอลเลคเตอร์ - อีมิตเตอร์จะลดลงด้วยกระแสเบส โดยรอยต่อคอลเลคเตอร์ - เบสเป็นรีเวอร์สไบแอสและรอยต่อเบส - อีมิตเตอร์เป็นฟอร์เวิร์ดไบแอส ในช่วงอิ่มตัว กระแสเบสจะมีค่าสูงเนื่องจากโวลเตจตกคร่อมคอลเลคเตอร์ - อีมิตเตอร์มีค่าต่ำ และทรานซิสเตอร์จะทำหน้าที่เป็นสวิทช์ บริเวณรอยต่อทั้งสองเป็นฟอร์เวิร์ดไบแอส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Transfer characteristics

รูปที่ 3.6 คุณสมบัติในการเปลี่ยนแปลง



Model of npn-transistor

รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะของทรานซิสเตอร์แบบเอ็นพีเอ็น

รูปแบบของทรานซิสเตอร์ในรูปที่ 3.7 สมการของกระแส คือ

$$I_E = I_C + I_B \qquad (3.2.1)$$

โดยที่กระแสเบสเป็นกระแสอินพุท และกระแสคอลเลคเตอร์เป็นกระแสเอาท์พุท อัตราส่วนของกระแสคอลเลคเตอร์ ,I_C ต่อกระแสเบส,I_B เรียกว่า อัตราการขยายกระแส (current gain),β

$$\beta = h_{FE} = I_C/I_B \qquad (3.2.2)$$

กระแสคอลเลคเตอร์ประกอบด้วยสองส่วนส่วนหนึ่งเนื่องจากกระแสเบสและอีกส่วนหนึ่งเป็นกระแสรั่วไหลของรอยต่อคอลเลคเตอร์-เบส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_C = \beta I_B + I_{CBO} \qquad (3.2.3)$$

เมื่อ I_{CBO} คือ กระแสรั่วไหลจากคอลเลคเตอร์ไปอีมิตเตอร์เมื่อเปิดวงจรเบสและสามารถพิจารณาตัดทิ้งได้ เมื่อเปรียบเทียบกับ βI_B จากสมการ (3.2.1) และ (3.2.2)

$$I_E = I_B(1+\beta) + I_{CBO} \qquad (3.2.4)$$

$$= I_B(1+\beta) \qquad (3.2.4\ ก)$$

$$I_E = I_C(1+1/\beta) = I_C(\beta+1)/\beta \qquad (3.2.5)$$

กระแสคอลเลคเตอร์สามารถกำหนดเป็น

$$I_C = \alpha I_E \qquad (3.2.6)$$

เมื่อค่าคงที่ α สัมพันธ์กับ β โดย

$$\alpha = \beta/(\beta+1) \qquad (3.2.7)$$

$$\beta = \alpha/(\alpha-1) \qquad (3.2.8)$$

ลองพิจารณาวงจรในรูปที่ 3.2.2.3 เมื่อทรานซิสเตอร์ทำงานเป็นสวิทช์

$$I_B = (V_B - V_{BE})/R_B \qquad (3.2.9)$$

$$V_C = V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$$

$$= V_{CC} - \beta R_C(V_B - V_{BE})/R_B \qquad (3.2.10)$$

$$V_{CE} = V_{CB} + V_{BE}$$

หรือ $$V_{CB} = V_{CE} - V_{BE} \qquad (3.2.11)$$

สมการ (3.2.11) แสดงให้เห็นว่าตราบเท่าที่โวลเตจคร่อมคอลเลคเตอร์-อีมิทเตอร์ ,V_{CE} มากกว่าเท่ากับโวลเตจคร่อมเบส-อีมิทเตอร์ ,V_{BE} รอยต่อคอลเลคเตอร์-เบสจะยังเป็นรีเวอร์สไบแอส และทรานซิสเตอร์จะทำงานอยู่ในช่วงแอคทีฟ กระแสคอลเลคเตอร์ในช่วงแอคทีฟมีค่าสูงสุดหาได้โดยให้โวลเตจคร่อมคอลเลคเตอร์-เบส,V_{CB}=0 และโวลเตจคร่อมเบส-อีมิทเตอร์ ,V_{BE} =โวลเตจคร่อมคอลเลคเตอร์-อีมิทเตอร์ ,V_{CE}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{CM} = (V_{CC}-V_{CE})/R_C$$
$$= (V_{CC}-V_{BE})/R_C \qquad (3.2.12)$$

และกระแสเบสที่สอดคล้องกันคือ

$$I_{BM} = I_{CM}/\beta \qquad (3.2.13)$$

ถ้ากระแสเบสเพิ่มขึ้นจนมากกว่า I_{BM} โวลเตจคร่อมเบส - อีมิทเตอร์จะเพิ่มขึ้นและกระแสคอลเลคเตอร์,I_C จะเพิ่มขึ้น และโวลเตจคร่อมคอลเลคเตอร์ - อีมิทเตอร์,V_{CE}จะมีค่าน้อยกว่าโวลเตจคร่อมเบส - อีมิทเตอร์ ,V_{BE} สภาพนี้จะดำเนินต่อไปจนกระทั่งรอยต่อคอลเลคเตอร์ เบสเป็นฟอร์เวิร์ดไบแอสด้วยโวลเตจคร่อมเบส-คอลเลคเตอร์ ,V_{BE} ประมาณ 0.4-0.5 V ทรานซิสเตอร์จะเข้าสู่ช่วงอิ่มตัว การอิ่มตัวของทรานซิสเตอร์อาจจะกำหนดที่จุดที่ซึ่งเมื่อเพิ่มกระแสเบสขึ้นแล้ว ไม่สามารถทำให้กระแสคอลเลคเตอร์เพิ่มขึ้นได้

ในช่วงอิ่มตัวกระแสคอลเลคเตอร์มีค่าเกือบจะคงที่ ถ้าโวลเตจคร่อมคอลเลคเตอร์-อีมิทเตอร์ขณะอิ่มตัว (collector-emitter saturation voltage) คือ $V_{CE(mat)}$ จะได้กระแสคอลเลคเตอร์เป็น

$$I_{CS} = (V_{CC}-V_{CE(mat)})/R_C \qquad (3.2.14)$$

และค่ากระแสเบสคือ

$$I_{BS} = I_{CS}/\beta \qquad (3.2.15)$$

โดยปกติแล้ววงจรจะถูกออกแบบให้กระแสเบส ,I_B มีค่ามากกว่า I_{BS} อัตราส่วนระหว่าง I_B ต่อ I_{BS} เรียกว่าโอเวอร์ไดรว์แฟกเตอร์ , overdrive factor , ODF

$$ODF = I_B/I_{BS} \qquad (3.2.16)$$

และอัตราส่วนระหว่าง I_{CS}ต่อ I_B คือ ฟอร์ซเบต้า,forced β ,β_f เมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การนำทรานซิสเตอร์มาใช้งานในลักษณะสวิทช์

ในการนำทรานซิสเตอร์ไปใช้งานเป็นวงจรขยาย ทรานซิสเตอร์นั้นจะทำงานอยู่ในบริเวณแอคทีฟ สำหรับการนำทรานซิสเตอร์มาใช้งานในลักษณะของสวิทช์ ทรานซิสเตอร์นั้นจะทำงานอยู่ในบริเวณอิ่มตัวและบริเวณคัทออฟ เราจะศึกษาคุณสมบัติในการทำงานแบบสวิทช์ของทรานซิสเตอร์

3.3.1 การใช้ทรานซิสเตอร์เป็นสวิทช์ในอุดมคติ

รูปที่ 3.10 (ก) เป็นวงจรทรานซิสเตอร์ชนิดอีมิตเตอร์ร่วมที่ทำหน้าที่เป็นสวิทช์ โดยตัวทรานซิสเตอร์เสมือนเป็นสวิทช์ให้กับโหลด R_L ที่ต่อระหว่าง V_{CC} กับขาคอลเลคเตอร์ของตัวทรานซิสเตอร์ส่วนขาอีมิตเตอร์ต่อลงกราวน์ ทรานซิสเตอร์จะกระทำตัวคล้ายกับเป็นสวิทช์ ซึ่งจะปิด-เปิดระหว่างขาคอลเลคเตอร์กับอีมิตเตอร์ ส่วนของแรงดันอินพุทที่ป้อนเข้าที่เบสทำตัวเป็นส่วนควบคุมการทำงานของสวิทช์ ถ้าพิจารณาตามกฎของเคียชโฮฟเราจะพบว่าส่วนของแรงดัน V_{CE} สามารถหาได้จาก

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_L$$

เมื่อแรงดันที่เบส-อิมิ ตเตอร์มีค่าเป็นศูนย์ หรือไบอัสกลับที่ขั้วอิมิตเตอร์ ส่วนของกระแสเบสจะมีค่าเป็นศูนย์ด้วย กระแสคอลเลคเตอร์จะพลอยมีค่าเป็นศูนย์ด้วย ในภาวะเช่นนี้ทรานซิสเตอร์อยู่ในสภาวะคัทออฟ นั่นคือแรงดันที่ตกคร่อมโหลดจะมีค่าเป็นศูนย์ (เพราะกระแสคอลเลคเตอร์ มีค่าเท่ากับศูนย์)

แรงดันตกคร่อม V_{CE} หาได้จาก

$$V_{CE} = V_{CC} - (0 * R_L)$$
$$= V_{CC}$$

นั่นคือเมื่อทรานซิสเตอร์อยู่ในสภาวะคัทออฟ แรงดันที่คอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์จะมีค่าประมาณเท่ากับแรงดัน V_{CC}

ครั้นเมื่อทำให้แรงดันที่เบสมีค่าเป็นบวก หรือป้อนกระแสเบส จนทำให้ทรานซิสเตอร์อิ่มตัว จะทำให้มีกระแสคอลเตอร์ไหลได้เป็นจำนวนมากมาย ดังนั้น แรงดันตกคร่อมโหลดจะมีค่าเป็น $I_C R_L$ ซึ่งมีค่าประมาณได้เท่ากับ V_{CC} และจากสมการเดิมเราสามารถหา V_{CE} ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าทรานซิสเตอร์อิ่มตัวหรือออนเป็นผลทำให้ V_{CE} มีค่าประมาณเท่ากับศูนย์ จากลักษณะสมบัติทางอุดมคตินี้เองทำให้เรามองเห็นว่ากำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นกับทรานซิสเตอร์พลอยมีค่าเป็นศูนย์ด้วย ทั้งนี้เพราะว่า

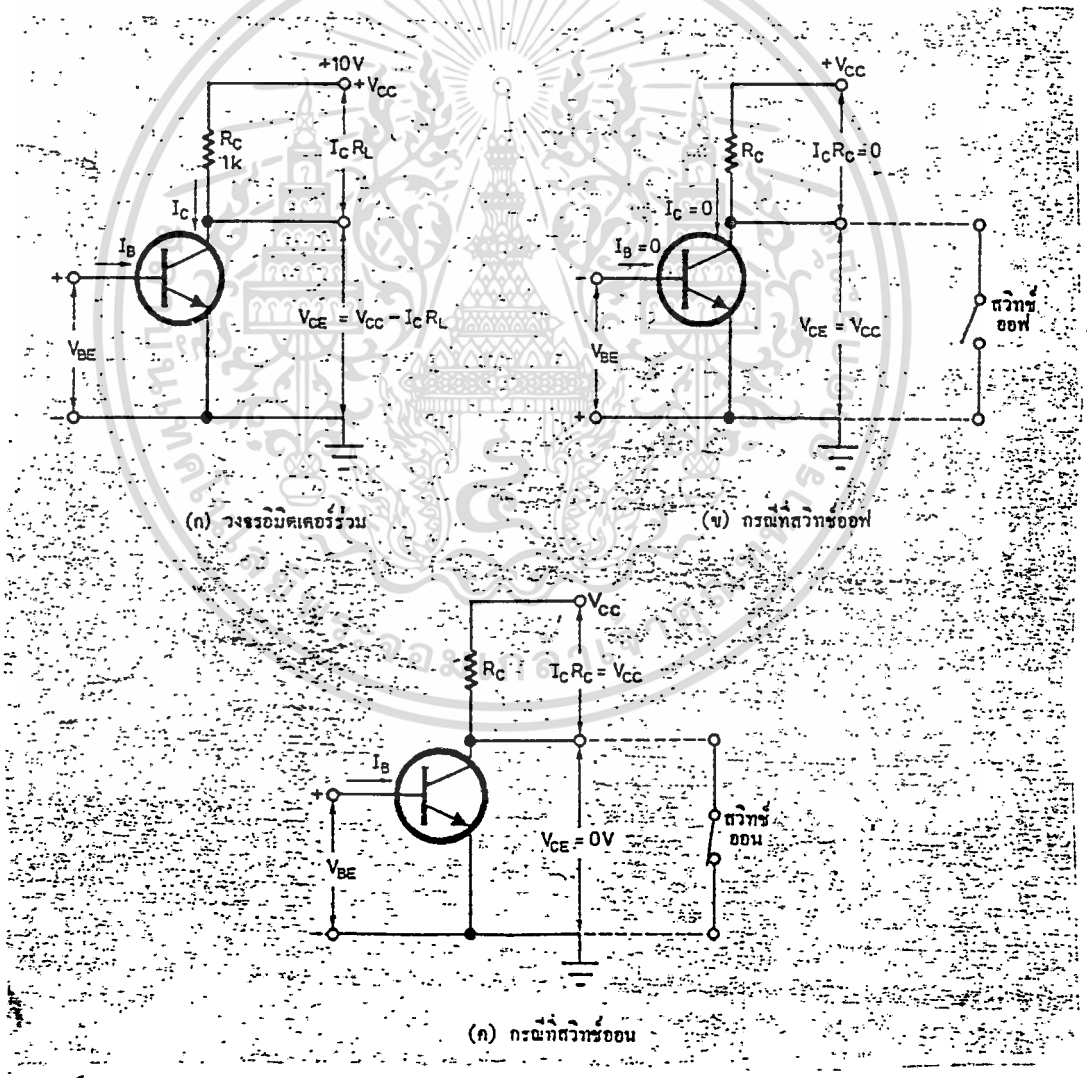
$$P_D = I_C * V_{CE}$$

เมื่อคิดว่าทรานซิสเตอร์อยู่ในสภาวะคัทออฟ $I_C=0$

$$P_D = 0 * V_{CE} = 0$$

เมื่อคิดว่าทรานซิสเตอร์อยู่ในสภาวะอิ่มตัว $V_{CE} = 0$

$$P_D = I_C * 0 = 0$$



รูปที่ 3.10 การทำงานเป็นสวิทช์ของทรานซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การใช้ทรานซิสเตอร์เป็นสวิทช์ตามความเป็นจริง

เพื่อให้เข้าใจลักษณะการใช้งานจริง ๆ ของทรานซิสเตอร์ เราจะต้องมาพิจารณาดูว่าการทำงานของมันแตกต่างจากคุณสมบัติในทางอุดมคติเพียงไร และสิ่งที่จะทำให้เห็นได้ชัด คือ กราฟลักษณะสมบัติของทรานซิสเตอร์ จากสมการเดิม เมื่อ $I_C = 0$,$V_{CE} = V_{CC}$- 0 ซึ่งค่า V_{CE} จะมีค่าเท่ากับ V_{CC} = 10 โวลท์ (ดูรูปที่ 3.10) ร่างจุด A ลงบนกราฟลักษณะสมบัติที่ $I_C = 0$ และ V_{CE} = 10 โวลท์ แต่เมื่อ V_{CE} = 10 โวลท์ เราหาค่าได้ดังนี้

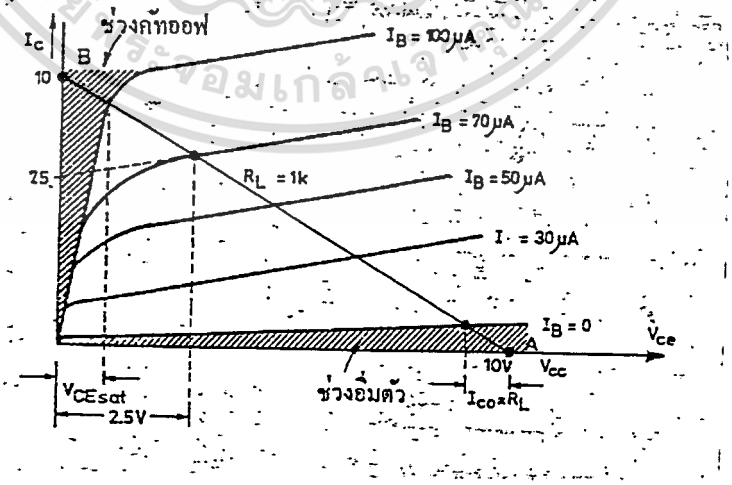
$$0 = V_{CC} - I_C R_L$$

$$I_C = V_{CC} / R_L$$

$$= 10 \text{ V.} / 1\text{k}\Omega = 10 \text{ mA}$$

ร่างจุด B ลงบนกราฟลักษณะสมบัติที่ $V_{CE} = 0$ และ $I_C = 10$ mA ลากเส้นสมการโหลดซึ่งเป็นเส้นเชื่อมต่อ A B (ดูรูปที่ 3.11)

เส้นสมการโหลดนี้จะเป็นตัวบอกความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดัน นั่นคือที่จุดค่ากระแสคอลเลคเตอร์มีค่าต่าง ๆ แรงดัน V_{CE} ก็พลอยมีค่าเปลี่ยนไปด้วย พื้นที่ของกราฟในส่วนบริเวณแสงจะเป็นส่วนที่ เรียกว่าอิ่มตัว และคัทออฟ



รูปที่ 3.11 กราฟลักษณะสมบัติของทรานซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำให้ทรานซิสเตอร์คัทออฟ หรือให้ค่ากระแสเบสเท่ากับศูนย์ ถ้าเราดูจากกราฟเราจะเห็นได้ว่าค่าแรงดัน V_{CE} ที่ได้จะมีค่าน้อยกว่า V_{CC} นั่นคือ จะต้องมีกระแสบางส่วนไหลผ่านทรานซิสเตอร์ได้บ้าง กระแสส่วนนี้ เราเรียกว่ากระแสรั่วไหล (I_{CEO}) ดังนั้นค่าแรงดัน V_{CE} จริง ๆ สามารถคำนวณได้จาก

$$V_{CE} = V_{CC} - I_{CEO}R_L$$

เมื่อ $V_{CC} = 10$ โวลท์ $R_L = 1k\Omega$ และ $I_{CEO} = 1\ \mu A$

$$V_{CE} = 10 - (1\ \mu A * 1k\Omega\ )$$

$$= 9.999 \text{ โวลท์} \approx V_{CC}$$

ครั้นเมื่อพิจารณาทางด้านอิ่มตัวบ้าง เราจะเห็นว่าเมื่อทรานซิสเตอร์เข้าสู่สภาวะอิ่มตัวแรงดัน V_{CE}ที่เกิดขึ้นยังไม่มีค่าเป็นศูนย์จะมีค่าประมาณเท่ากับ $V_{CE(SAT)}$

- เงื่อนไขของการทำให้ทรานซิสเตอร์ออนหรืออิ่มตัว เราอาจจะทำให้ทรานซิสเตอร์อิ่มตัวได้ด้วยเงื่อนไขดังนี้

1. ถ้าเราทำการออกแบบหรือคำนวณค่ากระแสเบส และกระแสคอลเลคเตอร์ ได้จากวงจร ค่าที่ปรากฏเมื่อ $I_B > I_C/h_{FE}$ จะทำให้ทรานซิสเตอร์อิ่มตัว

2. ทรานซิสเตอร์จะอิ่มตัวเมื่อทำการไบแอสแรงดันระหว่างเบสอิมิตเตอร์ชนิดไบอัสตรง

- เงื่อนไขของการทำให้ทรานซิสเตอร์ออฟหรือคัทออฟ ทรานซิสเตอร์ จะคัทออฟก็ต่อเมื่อ

1. รอยต่อระหว่างเบสอิมิตเตอร์จะอยู่ในลักษณะไบอัสกลับหรือแรงดัน $V_{BE} = 0$

2. กระแสเบสมีค่าเท่ากับศูนย์

สิ่งหนึ่งที่ช่วยเราในการออกแบบการใช้ทรานซิสเตอร์เป็นสวิทช์คือการกำหนดค่า $h_{FE\ MIN}$ หรือค่าที่ต่ำที่สุดที่เป็นไปได้ ทรานซิสเตอร์จะอิ่มตัวเมื่อกำหนดอัตราส่วนของกระแส $I_C/I_B = h_{FE\ MIN}$ คังตัวอย่างเช่นเมื่อต้องการออกแบบวงจรทรานซิสเตอร์ที่ใช้เป็นสวิทช์ โดยที่ $I_B = 0.2$ mA เราจะคำนวณหาค่า $h_{FE\ MIN}$ โดยสมมติว่าวงจรที่ใช้เป็นวงจรรูปที่ 3.10 กรณีอิ่มตัวค่า I_C หาได้จาก

$$I_C \approx V_{CC}/R_L$$

$$= 10 \text{ mA}$$

ดังนั้น $h_{FE\ MIN}$ ของทรานซิสเตอร์คือ

$$h_{FE\ MIN} = 10 \text{ mA} / 0.2 \text{ mA} = 50$$

นั่นหมายความว่าเราใช้ทรานซิสเตอร์อะไรก็ได้ที่มีอัตราขยาย $h_{FE} > 50$ จะทำให้ทรานซิสเตอร์อยู่ในสภาวะอิ่มตัวได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเราให้ศักดาไบอัสระหว่างเบสกับคอลเลคเตอร์ (V_{BB}) เพิ่มขึ้นไปเรื่อย ๆ กระแสคอลเลคเตอร์ (I_C) ก็จะเพิ่มขึ้นตามกระแสเบส (I_B) เมื่อค่ากระแสคอลเลคเตอร์ เพิ่มขึ้นจนเกือบถึงหรือถึงค่าของกระแสคอลเลคเตอร์อิ่มตัว ($I_{C(max)}$) กระแสคอลเลคเตอร์จะไหลมากกว่าค่าของกระแสคอลเลคเตอร์อิ่มตัวไม่ได้ แม้ว่าจะเพิ่มกระแสเบสเข้าไปอีกเท่าใดก็ตาม ในขณะนี้ทรานซิสเตอร์จะเข้าสู่สภาวะอิ่มตัว ในขณะที่ทรานซิสเตอร์เข้าสู่สภาวะอิ่มตัว เราจะพบว่า

- การที่จะขับทรานซิสเตอร์ให้เข้าสู่การนำกระแสอย่างเต็มที่ (อิ่มตัว) จะต้องใช้กระแสเบสจะมีค่ามากกว่าค่าใช้งานปกติ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า ค่าอัตราของการขยายกระแส (h_{FB}) ของทรานซิสเตอร์ ในขณะอิ่มตัว ($h_{FB(SAT)}$) จะมีค่าต่ำกว่าค่าของทรานซิสเตอร์นั้นในการใช้งานปกติ ซึ่งค่าของอัตราการขยายกระแสในสภาวะอิ่มตัวนี้ มักจะมีค่าไม่เกิน 20

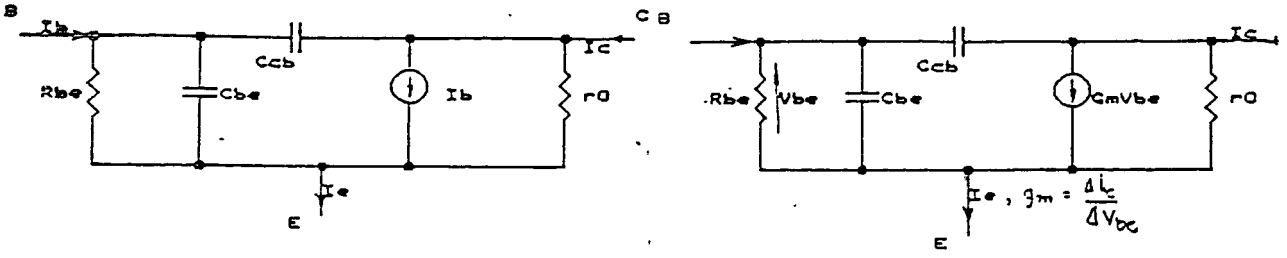
- ในขณะที่ทรานซิสเตอร์อิ่มตัว ค่าของแรงดันระหว่างเบสกับคอลเลคเตอร์ ที่ใช้ขับทรานซิสเตอร์นั้นอิ่มตัวจะมีค่ามากกว่าค่าที่ใช้งานในสภาวะปกติ และจะมีค่ามากกว่าศักดาระหว่างคอลเลคเตอร์กับอีมิตเตอร์ในสภาวะอิ่มตัว ($V_{CE(SAT)}$) ซึ่งจะทำให้รอยต่อระหว่างเบสกับคอลเลคเตอร์ จะกลายเป็นฟอร์เวอร์สไบอัสซึ่งจะทำให้มีประจุสะสมในตัวทรานซิสเตอร์มากกว่าสภาวะปกติ

- จากการที่ต้องขับกระแสเบสให้ทรานซิสเตอร์มากกว่าปกติ จะทำให้มีประจุจำนวนมากสะสมอยู่ในตัวทรานซิสเตอร์ ซึ่งจะทำให้เวลาในการตอบสนองของทรานซิสเตอร์ช้าลงกว่าในขณะที่ทำงานในลักษณะวงจรขยาย

3.3.3 <u>ช่วงเวลาในการสวิทช์</u>

จากรูปที่ 3.12 เราสามารถแสดงถึงทรานซิสเตอร์ที่อยู่ในลักษณะทรานเซียนท์ เมื่อตัวเก็บประจุ C_{ob} และ C_{be} เป็นตัวเก็บประจุของรอยต่อคอลเลคเตอร์-เบส และรอยต่อเบส-อีมิตเตอร์ตามลำดับ อัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลคเตอร์ , Δi_c ต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่ตกคร่อมเบส-อีมิตเตอร์ , ΔV_{BE} ของทรานซิสเตอร์ เราเรียกว่าทรานสคอนดัคแตนซ์ (transconductance) , g_m ตัวเก็บประจุเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับแรงดันตรงรอยต่อ และโครงสร้างทางกายภาพของทรานซิสเตอร์ ความต้านทาน r_{CB} และ r_{BE} เป็นความต้านทานระหว่างคอลเลคเตอร์กับอีมิตเตอร์ และเบสกับอีมิตเตอร์ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



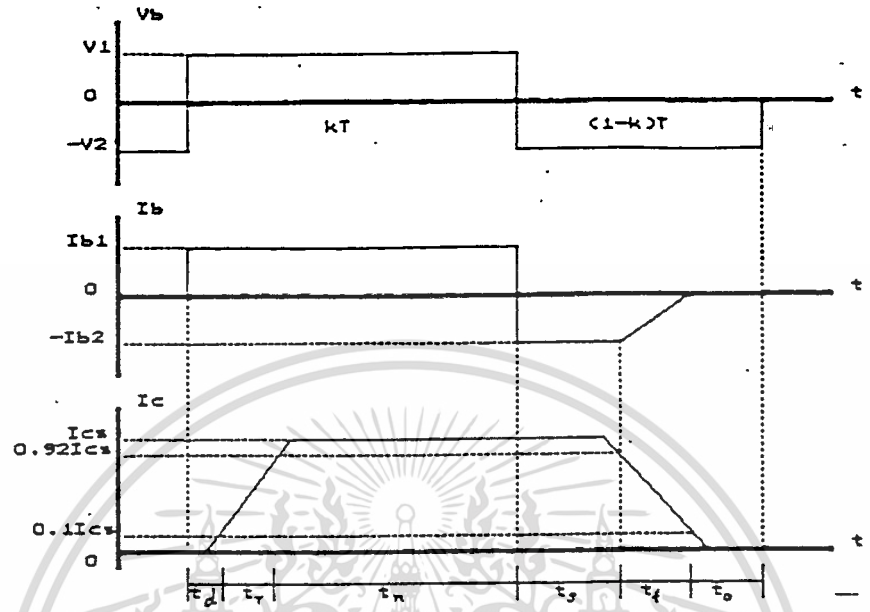
รูปที่ 3.12 แสดงลักษณะของไบโพลาร์จังก์ชันทรานซิสเตอร์ขณะสภาวะทรานเซียนท์

เนื่องจากมีตัวเก็บประจุเสมือนอยู่ภายใน ดังนั้นทรานซิสเตอร์จึงไม่นำกระแสอย่างทันทีทันใด จากรูปที่ 3.13 จะแสดงถึงรูปคลื่นของตัวแปรต่าง ๆ กับเวลาในการสวิทช์ เมื่อแรงดันอินพุท ,V_B เพิ่มจาก 0 ถึง V_1 และกระแสเบสเพิ่มขึ้นจนถึง I_{B1} กระแสคอลเลคเตอร์จะไม่ตอบสนองในทันที จะมีการหน่วงเวลาก่อนที่จะมีกระแสคอลเตอร์ไหล เวลาที่หน่วงไปนี้ เรียกว่า ช่วงเวลาหน่วง (delay time) ซึ่งต้องการเพื่อชาร์จตัวเก็บประจุของรอยต่อเบสกับอีมิตเตอร์ไปจนถึงค่าแรงดันฟอร์เวอร์สไบอัส ,V_{BE} (ประมาณ 0.7 V) หลังจากนั้นกระแสคอลเตอร์ จะเพิ่มขึ้นจนถึงค่าอิ่มตัวที่คงที่ (steady-state) , I_{CS} เวลาในการเพิ่มขึ้นของกระแสที่เรียกว่า ช่วงเวลาขาขึ้น (rise time) ขึ้นอยู่กับค่าคงที่เวลา (time constant) ซึ่งถูกกำหนดโดยตัวเก็บประจุเสมือนภายในนั่นเอง

ในทำนองเดียวกันทรานซิสเตอร์ก็ไม่สามารถที่จะคัทออฟได้ในทันทีทันใด ช่วงเวลาการคัทออฟประกอบด้วย ช่วงเวลาสะสม (storage time) และช่วงเวลาขาลง (fall time) ช่วงเวลาสะสมเป็นผลมาจากการสะสมประจุ เมื่อทรานซิสเตอร์อยู่ในสภาวะอิ่มตัวส่วนของประจุจะสะสมที่บริเวณรอยต่อ ครั้นเมื่อทำให้ทรานซิสเตอร์คัทออฟประจุส่วนนี้ยังหลงเหลืออีกเล็กน้อย

โดยปกติตามคู่มือผู้ผลิตจะบอกมาเป็นช่วงเวลาออนและช่วงเวลาออฟ แต่ทรานซิสเตอร์บางตัวผู้ผลิตจะให้ข้อมูลมาทั้งหมด คือ ช่วงเวลาหน่วง ช่วงเวลาขาขึ้น ช่วงเวลาสะสม ช่วงเวลาขาลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 เวลาในการสวิทชิ่งของไบโพลาร์จังก์ชันทรานซิสเตอร์

นิยามของค่าเวลาต่าง ๆ ที่ใช้ในการทำให้ทรานซิสเตอร์นำกระแส (turn on) และหยุดนำกระแส (turn off) มีดังต่อไปนี้

Rise Time : t_r คือเวลาที่ใช้ในการเพิ่มขึ้นของกระแส หรือแรงดันใด ๆ จาก 10% ของค่าสูงสุด(ไม่รวมโอเวอร์ชูท) ไปยังค่า 90% ของค่าสูงสุด

Delay Time : t_d คือเวลาที่นับจากขณะที่เริ่มต้นขับอินพุท ไปจนถึงเวลาที่เอาท์พุทเริ่มตอบสนองถึง 10% ของค่าสูงสุด

On Time : t_{on} คือเวลาที่นับจาก ขณะเริ่มต้นขับอินพุทไปจนถึงเวลาที่เอาท์พุทตอบสนองจนถึงค่า 90% ของค่าสูงสุด ซึ่ง $t_{on} = t_d + t_r$

Fall Time : t_f คือเวลาที่ใช้ในการลดลงของกระแส หรือศักดา จาก 90% ของค่าสูงสุดลงสู่ค่า 10% ของค่าสูงสุด

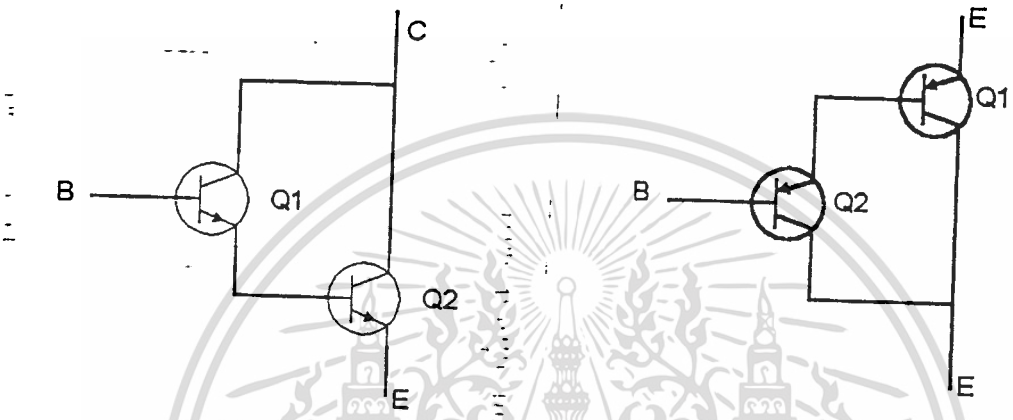
Storage Time : t_s คือเวลาที่นับจากเมื่ออินพุทที่จ่ายเพื่อขับหมดไป จนถึงเวลาที่เอาท์พุทเริ่มตอบสนองลดลงเหลือ 90% ของค่าสูงสุด

Off Time : t_{off} คือเวลาที่นับจากเมื่ออินพุทที่จ่ายเพื่อขับหมดไป ไปจนถึงเวลาที่เอาท์พุทตอบสนองจนลดลงเหลือ 10% ของค่าสูงสุด ซึ่ง $t_{off} = t_s + t_f$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ทรานซิสเตอร์ดาร์ลิงตัน (Darlington Transistor)

ในการใช้ทรานซิสเตอร์ที่ค่ากระแสสูง ๆ มักจะนิยมใช้ทรานซิสเตอร์มาต่อกันแบบดาร์ลิงตัน ลักษณะของวงจร คือ ทรานซิสเตอร์ 2 ตัวต่อกัน ดังรูปที่ 3.14 ซึ่งจะทำให้ค่าอัตราการขยายกระแส (h_{FE}) เพิ่มขึ้น



รูปที่ 3.14 (ก) วงจรคู่ดาร์ลิงตันชนิด NPN (ข) วงจรคู่ดาร์ลิงตันชนิด PNP

พิจารณาชนิด NPN กระแสอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ตัวแรกจะมาขับเบสของทรานซิสเตอร์ตัวที่สอง ดังนั้นกระแสคอลเลคเตอร์ในทรานซิสเตอร์ตัวที่สอง คือ

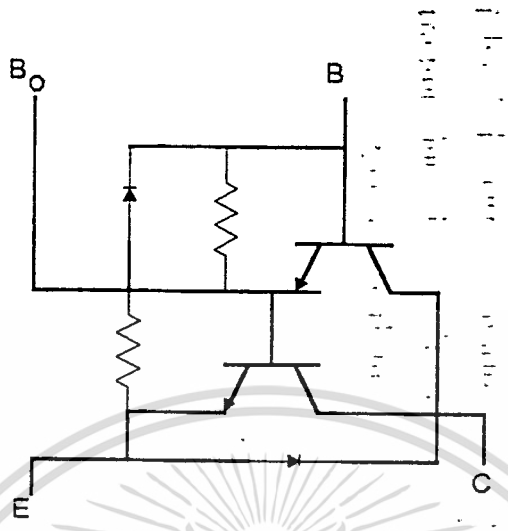
$$I_C = h_{FE1} * h_{FE2} * I_B$$

หรืออีกความหมายหนึ่งคือ วงจรคู่ดาร์ลิงตันจะมีค่า h_{FE} ทั้งหมดเท่ากับผลคูณของค่า h_{FE} แต่ละตัวของทรานซิสเตอร์

การออกแบบเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์

ทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในโครงการนี้ อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นผู้จัดหามาให้ สามารถทนกระแสคอลเลคเตอร์ต่อเนื่องได้ถึง 300 แอมแปร์ และอัตราการทนแรงดันระหว่างคอลเลคเตอร์กับอิมิตเตอร์ 500 โวลท์ ลักษณะของทรานซิสเตอร์จะต่อกันแบบดาร์ลิงตัน ดังรูปที่ 3.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 แสดงทรานซิสเตอร์คาร์ลิงตันที่ใช้ในโครงงานนี้

ส่วนรายละเอียด (specification) ไม่สามารถจัดหาได้ แต่การออกแบบได้คำนวณโดยใช้กระแสเบสโดยประมาณ 1 แอมแปร์ เพื่อทำให้ทรานซิสเตอร์สามารถทำงานได้ ส่วนรายละเอียดของการควบคุมการขับจะอยู่ในบทต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

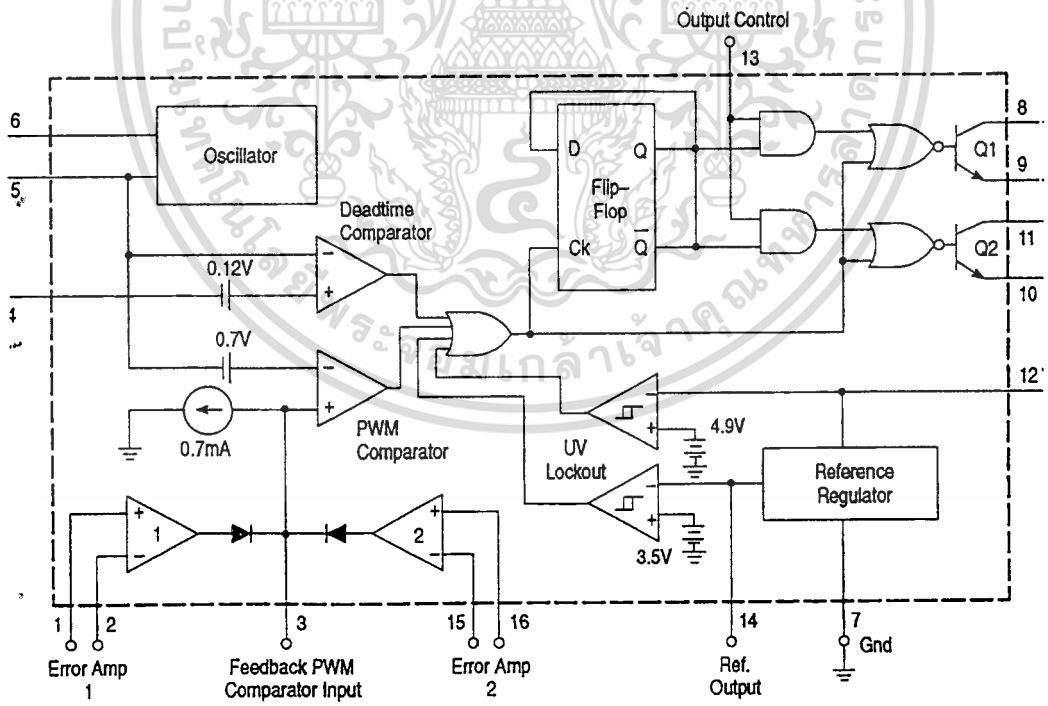
วงจรควบคุม

4.1 วงจรควบคุม

วงจรควบคุมทำหน้าที่สร้างสัญญาณเพื่อไปขับเบสของทรานซิสเตอร์ โดยวงจรสร้างสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมซึ่งปรับดิวตี้ไซเคิลได้เพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุทที่จ่ายให้กับดีซีมอเตอร์ ในส่วนของวงจรควบคุมจะประกอบไปด้วยวงจรกำเนิดพัลส์สี่เหลี่ยมปรับค่าดิวตี้ไซเคิลได้ วงจรชมิตทริกเกอร์ เพื่อทำให้สัญญาณที่ได้จากวงจรกำเนิดพัลส์มีสัญญาณที่ดีขึ้น และวงจรขับเบสของทรานซิสเตอร์

4.2 วงจรกำเนิดพัลส์สี่เหลี่ยมปรับดิวตี้ไซเคิลได้

วงจรในส่วนนี้ทำหน้าที่กำเนิดพัลส์สี่เหลี่ยมซึ่งสามารถปรับความกว้างของพัลส์ได้ ซึ่งทำงานโดยใช้ไอซี TL494 ซึ่งได้แสดงวงจรภายในของไอซีดังรูปที่ 4.1



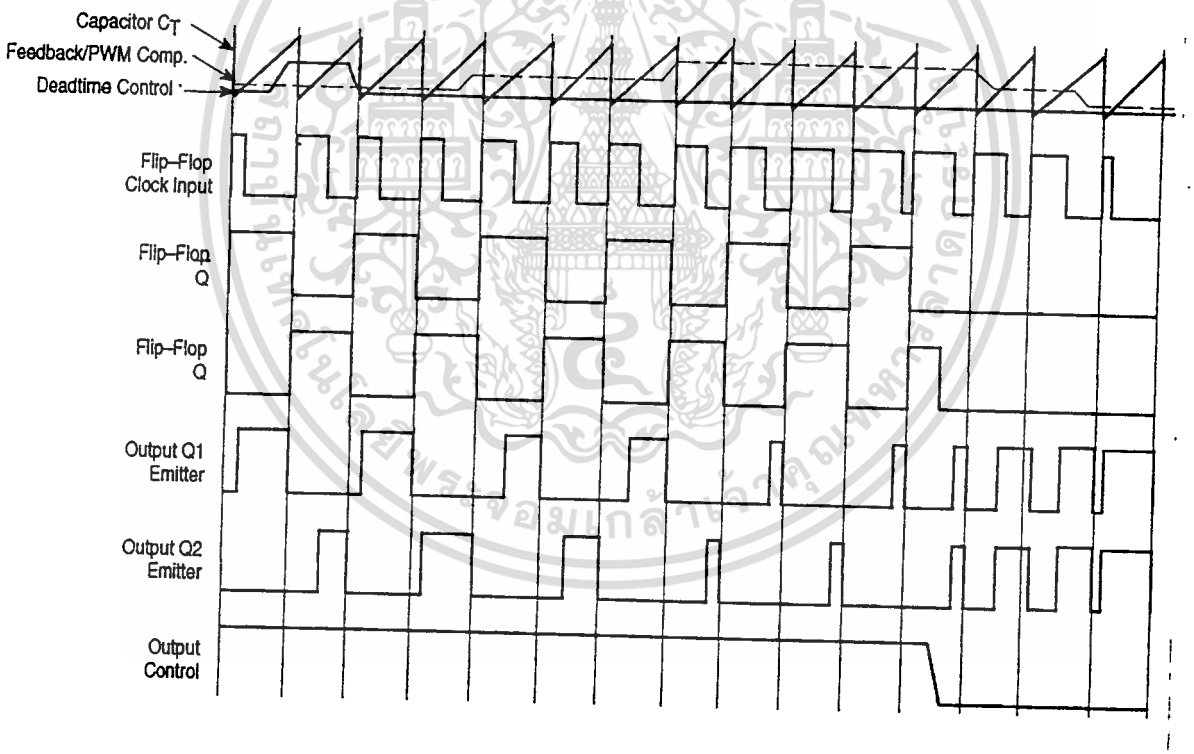
รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมแสดงวงจรภายในไอซี TL494

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอซีเบอร์นี้ถูกออกแบบมาให้สามารถใช้งานได้หลายความถี่ และสามารถปรับดิวตี้ไซเคิลได้ โดยการปรับความถี่และการปรับดิวตี้ไซเคิลไม่ขึ้นแก่กัน สำหรับวงจรนี้จะกำหนดให้ความถี่ของพัลส์สี่เหลี่ยมมีค่าคงที่ซึ่งคำนวณได้จากสูตรดังนี้

$$f_{osc} = \frac{1.1}{R_T * C_T}$$

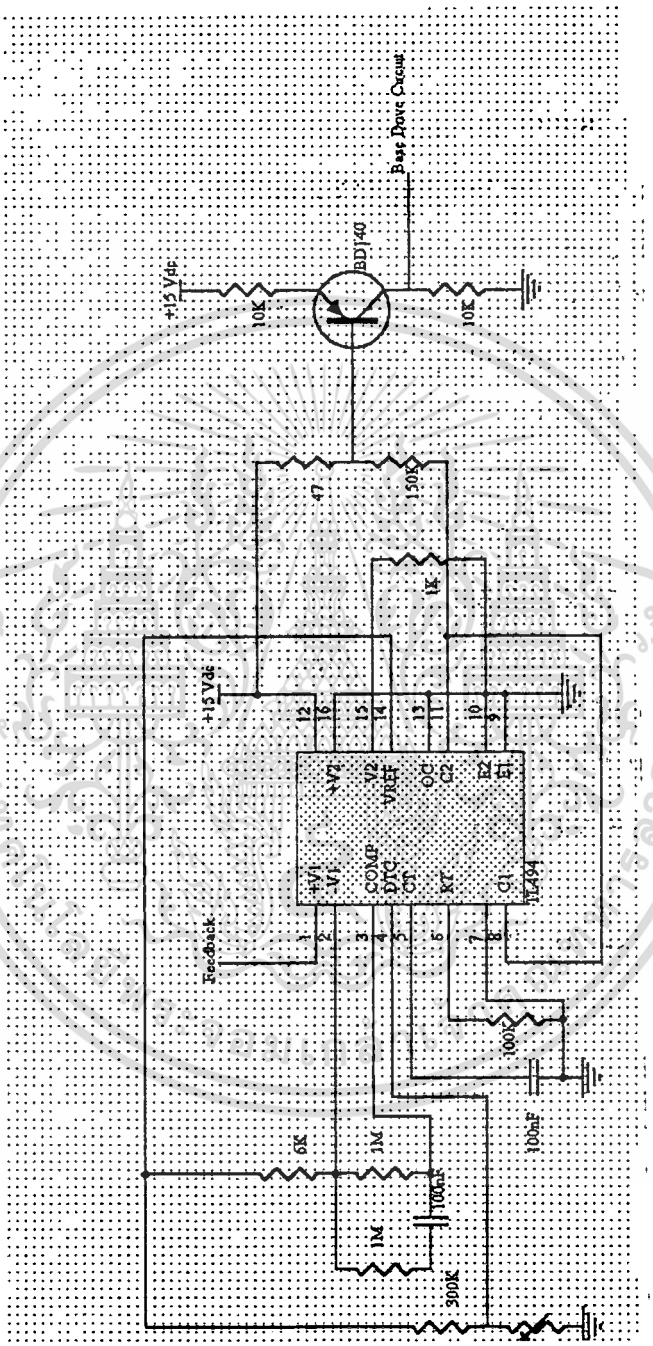
โดยในวงจรนี้เราคำนวณโดยใช้ความถี่ 1250 กิโลเฮิร์ต การปรับค่าความกว้างของพัลส์ทำได้โดยการเปรียบเทียบสัญญาณรูปสามเหลี่ยมกับสัญญาณที่มีค่าคงที่ โดยสัญญาณที่มีค่าคงที่จะถูกป้อนที่ขา 4 ของไอซี(ขา Deadtime Control) ซึ่งแสดงรูปของสัญญาณ (Timing Diagram)ของไอซีดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงสัญญาณของไอซี TL494

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการต่อวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมซึ่งสามารถปรับความกว้างของพัลส์ได้แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 วงจรกำเนิดพัลส์สี่เหลี่ยมปรับดิวตี้ไซเคิลได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

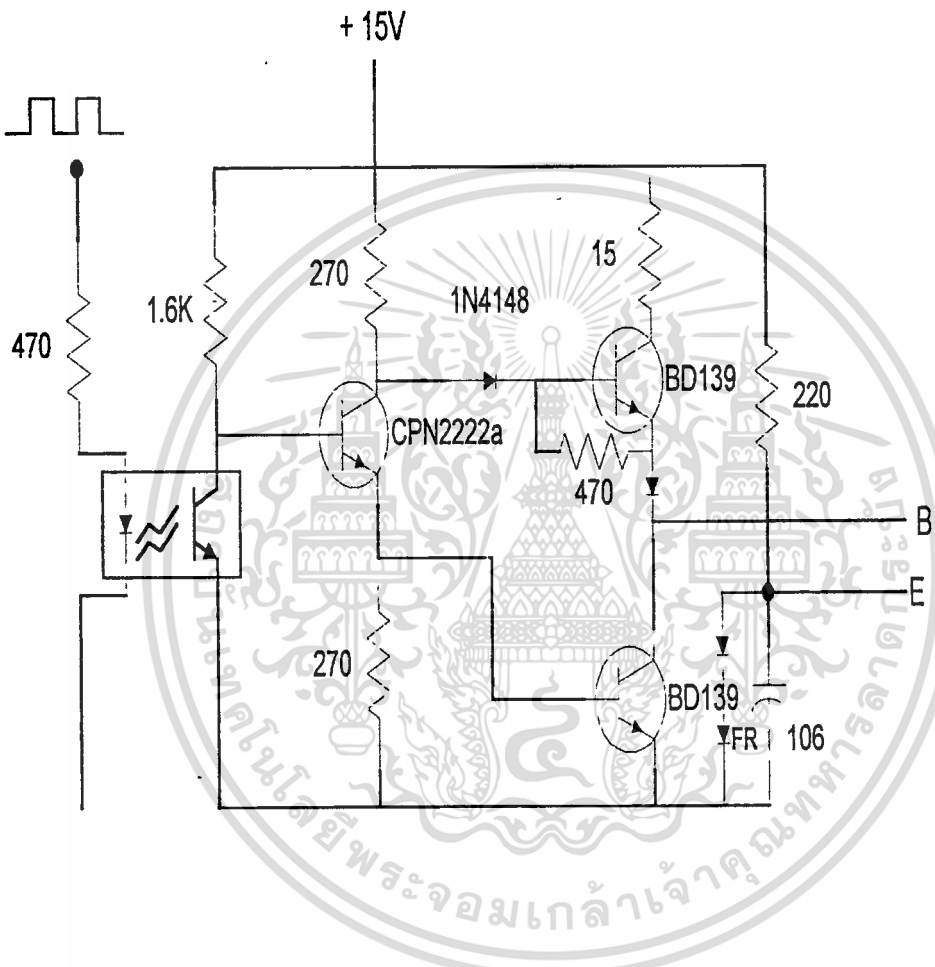
จากวงจรในรูปที่ 4.3 การปรับดิวตี้ไซเคิลสามารถทำได้โดยการปรับสัญญาณแรงดันซึ่งปรับค่าได้ที่ขา 4 ของไอซีสำหรับในวงจรนี้แรงดันสามารถปรับได้ โดยการใช้ความต้านทานปรับค่าได้ซึ่งได้ออกแบบโดยทำเป็นคันเร่ง ซึ่งเมื่อเหยียบคันเร่งจะทำให้ความต้านทานเปลี่ยนแปลงไป ในส่วนของขา 1 เป็นส่วนรับสัญญาณป้อนกลับเพื่อใช้ในส่วนการป้องกันกระแสเกินพิกัดของดีซีมอเตอร์ โดยกระแสจะถูกเปลี่ยนเป็นแรงดันแล้วถูกป้อนเข้ามาที่ขานี้ เมื่อกระแสมีค่ามากเกินไป แรงดันที่ถูกป้อนกลับเข้ามาก็จะมีค่ามาก สัญญาณนี้จะถูกนำไปเปรียบเทียบในวงจรเปรียบเทียบ โดยถ้าสัญญาณแรงดันที่ถูกป้อนกลับเข้ามามีค่ามากกว่า ขนาดของสัญญาณสามเหลี่ยมของไอซีค่าดิวตี้ไซเคิลจะมีค่าเป็นศูนย์

4.3 วงจรขับเบส

วงจรขับเบสแสดงดังรูปที่ 4.4 นี้จะออกแบบสำหรับใช้ขับขาเบสของทรานซิสเตอร์กำลังซึ่งเป็นชนิดโมดูลโดยภายในต่อเป็นวงจรดาร์ลิงตัน ดังนั้นจึงมีกระแสสูง ซึ่งเหมาะในการนำมาใช้ขับมอเตอร์ดีซีเพราะทรานซิสเตอร์ที่ไม่มีการต่อวงจรภายในเป็นแบบดาร์ลิงตัน จะมีอัตราการขยายกระแสต่ำกว่า ในส่วนของวงจรขับเบสจะประกอบไปด้วยส่วนต่าง ๆ คือวงจรชมิตทริกเกอร์ซึ่งใช้ในการทำให้สัญญาณที่ได้จากวงจรกำเนิดพัลส์สี่เหลี่ยมปรับค่าได้มีสัญญาณที่ดีขึ้น ส่วนแยกกราวน์ระหว่างวงจรควบคุมเพื่อป้องกันการรบกวนกัน โดยใช้ไอซีออฟโต้คัปเปิลเบอร์ 4N25 และส่วนของวงขับเบส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BASE DRIVE CIRCUIT



รูปที่ 4.4 วงจรขับเบส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
การคำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ

5.1 การคำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำ

ตัวแปรต่าง ๆ มีค่าดังต่อไปนี้

1. แรงดันขาเข้า (V_s) = 48 V
2. แรงดันขาออกเฉลี่ย (V_a) = 24 V
3. ค่าแรงดันกระเพื่อม (ΔV_C) = 20 mV
4. ค่ากระแสกระเพื่อม (ΔI) = 5 A
5. ความถี่ที่ใช้งาน (f) = 1250 Hz

1. คำนวณค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance Calculation)

จากสมการ $L = \dfrac{V_a(V_s - V_a)}{\Delta I f V_s}$

$$L = \frac{24(48-24)}{5 \times 1250 \times 48}$$

$$L = 1.92 \text{ mH}$$

∴ เราจึงเลือกใช้ตัวเหนี่ยวนำขนาด 2 mH

5.2 การคำนวณค่าตัวเก็บประจุ (Capacitance Calculation)

จากสมการ $C = \dfrac{\Delta I}{8 f \Delta V_c}$

$$C = \frac{5}{8 \times 1250 \times 20 \times 10^{-3}}$$

$$C = 25000 \ \mu F$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

∴ เราจึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุขนาด 25000 μF

5.3 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ(Inductor Design)

ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำมีหลายวิธีในการออกแบบซึ่งในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่อไปนี้

1. ค่าความเหนี่ยวนำ
2. ขนาดของกระแสตรง
3. กระแสสลับ ΔI
4. พลังงานสูญเสียและการเพิ่มของอุณหภูมิ

จากนั้นเราต้องพิจารณาค่าสูงสุดของ B_{dC} และ B_{AC} ที่จะไม่ทำให้เกิดการอิ่มตัว โดยชนิดของแกนจะเป็นตัวกำหนดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด(B_{max}) ดังแสดงในตารางที่ 5.1

Material		Flux density,T
Magnesil	3%Si, 97%Fe	1.6
Orthonol	50%Ni, 50%Fe	1.5
48 Alloy	48%Ni, 50%Fe	1.2
Permalloy	79%Ni, 17%Fe, 4%Mo	0.75

ตารางที่ 5.1 ค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กสูงสุดของแกน

ดังนั้น $B_{max} = B_{dC} + B_{AC}$

ตัวเหนี่ยวนำมีช่องว่างอากาศซึ่งทำให้ทำให้เราไม่พิจารณาความยาวของแกน(l_m)

$$L = \frac{0.4N^2A_C * 10^{-8}}{l_g} \quad [\text{Henry}]$$

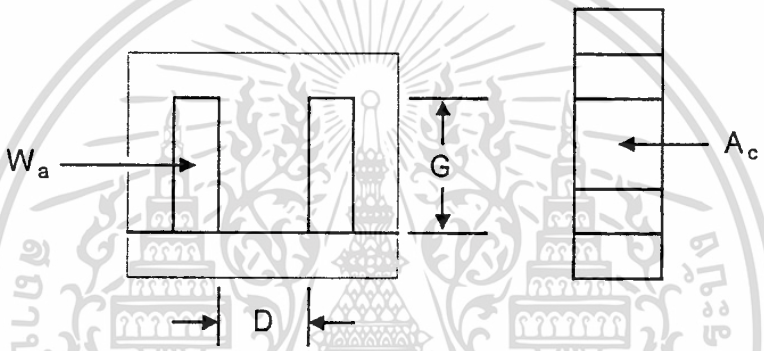
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกำหนดช่องอากาศต้องพิจารณาจากผลของเส้นแรงแม่เหล็กที่เบี่ยงเบนไปจากเดิม (Fringing Flux) เส้นแรงแม่เหล็กเบี่ยงเบนนี้จะไปลดค่าความต้านทานแม่เหล็ก ดังนั้นค่าความเหนี่ยวนำจะเพิ่มขึ้นซึ่งจะได้สมการใหม่เป็น

$$L = \frac{0.4N^2 A_C F * 10^{-8}}{l_g} \quad [\text{Henry}]$$

$$F \text{ (Fringing Flux)} = 1 + \frac{l_g}{\sqrt{A_C}} \ln (2G) \frac{}{l_g}$$

พิจารณาเฉพาะแกน EI



รูปที่ 5.1 ลักษณะของแกน EI

หลังจากที่คำนวณหาขนาดของตัวเหนี่ยวนำที่ต้องการแล้ว เราก็จะมาถึงค่าของพลังงานซึ่งถูกควบคุมโดยพื้นที่ A_P

$$\frac{LI^2}{2} = \text{พลังงาน (วัตต์- วินาที)}$$

และ $$A_P = \frac{[\,2(\text{พลังงงาน}) * 10^4\,]^{1.16}}{B_m K_U K_f} \quad [\text{cm}]^2$$

B_m : ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด $(B_{dC} + B_{AC})$

K_U : window utilization factor หรือ ค่าขีดจำกัดของหน้าต่าง = 0.5

K_f : ค่าสัมประสิทธิความหนาแน่นกระแส ดูตามตารางที่ 5.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Core	Losses	K_j(25 c)	K_j(50 c)	(x)	K_s	K_w	K_u
Pot core	$P_{cu} = P_{fe}$	433	632	-0.17	33.8	48.0	14.5
Powder core	$P_{cu} = P_{fe}$	403	590	-0.12	32.5	58.8	13.1
Lamination	$P_{cu} = P_{fe}$	366	534	-0.12	41.3	68.2	19.7
C core	$P_{cu} = P_{fe}$	323	468	-0.14	39.2	66.6	17.9
Single-coil	$P_{cu} = P_{fe}$	395	569	-0.14	44.5	76.6	25.6
Tape-wound core	$P_{cu} = P_{fe}$	250	365	-0.13	50.9	82.3	25.0

ตารางที่ 5.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของแกนแบบต่าง ๆ

การคำนวณตัวเหนี่ยวนำโดยใช้วิธี Area Product A_P

รายละเอียดของตัวเหนี่ยวนำที่จะใช้ในวงจรบักเรคกิวเลเตอร์

1. ค่าความเหนี่ยวนำ L = 2 mH
2. กระแสตรง I_0 = 90 A
3. กระแสสลับ ΔI = 5 A
4. ความถี่ที่ใช้ f = 1250Hz
5. ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B_m = 1.3 T
6. อุณหภูมิเพิ่ม = 25 °C
7. วัสดุที่ใช้ทำแกนคือเหล็ก
8. แบบของแกนคือแกนEI

ขั้นที่ 1 คำนวณค่าพลังงาน

$$\text{พลังงาน} = \frac{LI^2}{2} \quad \text{W-S}$$

$$I = I_0 + \frac{\Delta I}{2} \quad A$$

$$I = 90 + \frac{5}{2}$$

$$I = 92.5 \ A$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงาน $= \frac{(0.002)(92.5)^2}{2}$

$= 8.556$ W-S

ขั้นที่ 2 คำนวณค่า Area Product A_p

$$A_P = \frac{[\,2(\text{พลังงาน}) * 10^4\,]^{1.16}}{B_m K_U K_f} \quad cm^2$$

$K_W = 0.5$

$$A_P = \frac{[\,2(8.56) * 10^4\,]^{1.16}}{1.3 * 0.5 * 450} \quad cm^2$$

$A_P = 1621.5 \quad cm^2$

ขั้นที่ 3 เลือกแกนที่มีพื้นที่ A_p ใกล้เคียงกับที่คำนวณ (สามารถดูได้จากข้อมูลของแกน)

ใช้แกน 1-20EI

$A_P = 1829.14 \quad cm^2$

MLT (ระยะทางเฉลี่ยของขดลวดต่อหนึ่งรอบ) = 41.6 cm

A_C(พื้นที่ขากลางของแกน) = 4.32 cm^2

W_a(พื้นที่ของหน้าต่าง) = 45.36 cm^2

A_t(พื้นที่ผิวทั้งหมดของแกน) = 1673.4 cm^2

MPL(ระยะทางของเส้นแรงแม่เหล็ก) = 41.3 cm

W_{Tfe}(น้ำหนักของแกน) = 12.699 kg

G = 9.525 cm

ขั้นที่ 4 กำหนดค่าความหนาแน่นของกระแส(J)

กำหนดให้ J = 400 A/cm^2

ขั้นที่ 5 คำนวณขนาดของตัวนำเปลือย

$$A_{W(B)} = \frac{I_0 + \Delta I / 2}{400} \quad cm^2$$

$$A_{W(B)} = \frac{90+2.5}{400}$$

$A_{W(B)} = 0.23125 \quad cm^2$

ขั้นที่ 6 เลือกขนาดของตัวนำ

SWG.NO.10 3 เส้น

ขนาดตัวนำเปลือ ย = 0.25194 cm^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดตัวนำพร้อมฉนวน = 0.28 cm^2

ขั้นที่ 7 คำนวณพื้นที่หน้าต่างประสิทธิผล (Effective window area ,$W_a(eff)$

$$W_a(eff) = W_a S_3 \quad cm^2$$

$$S_3 : \frac{\text{พื้นที่หน้าต่างที่สามารถใช้งานได้}}{\text{พื้นที่หน้าต่าง}} = 0.75$$

$$W_a(eff) = (45.36)(0.75)$$

$$= 34.02 \quad cm^2$$

ขั้นที่ 8 คำนวณจำนวนรอบ โดยใช้พื้นที่ตัวนำ A_W

$$N = \frac{W_a(eff)\, S_2}{A_W}$$

$$S_2 : \frac{\text{พื้นที่พันขดลวด}}{\text{พื้นที่หน้าต่างที่สามารถใช้ได้}}$$

$$N = \frac{(34.02)(0.6)}{0.56}$$

$$= 37 \quad \text{รอบ}$$

ขั้นที่ 9 คำนวณหาความกว้างของช่อง

$$l_g = \frac{0.4N^2 A_C * 10^{-8}}{L} \quad [Henry]$$

$$l_g = \frac{0.4(37)^2 40.32 * 10^{-8}}{.002} \quad [Henry]$$

$$= 0.347 \quad cm$$

เรานำแผ่นแบคคาไลท์มาใช้เพื่อทำให้มีช่องห่าง

ขั้นที่ 10 คำนวณค่าเส้นแรงแม่เหล็กเบี่ยงเบน

$$F \text{ (Fringing Flux)} = 1 + \frac{l_g}{\sqrt{A_C}} \ln \frac{(2G)}{l_g}$$

$$F \text{ (Fringing Flux)} = 1 + \frac{0.347}{\sqrt{40.32}} \ln \frac{[2(9.525)}{0.347}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$= 1.218$

ขั้นที่ 11 คำนวณจำนวนรอบใหม่โดยการพิจารณาเส้นแรงแม่เหล็กเบี่ยงเบน

$$N^2 = \frac{l_g L}{0.4\prod A_C F * 10^{-8}}$$

$$N^2 = \frac{(0.347)(0.002)}{(1.26)(40.32)(1.218)10^{-8}}$$

$N = 34$ รอบ

ขั้นที่ 12 คำนวณค่าความต้านทานของขดลวด (ทองแดง)

$$R = \frac{1.2\rho MLT * N}{A}$$

$$= \frac{1.2 * 1.724 * 10^{-6} * 41.6 * 34}{0.25194}$$

$= 0.0116 \ \Omega$

ขั้นที่ 13 คำนวณความสูญเสียในขดลวด (Copper Loss ,P_{CU})

$P_{CU} = I^2 R$ W

$= 92.5^2 * 0.0116$

$= 92.25$ W

ขั้นที่ 14 คำนวณค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก

$$B_m = \frac{0.4\prod N[I_{dC} + \frac{\Delta I}{2}] * 10^{-4}}{l_g} \ T$$

$$= \frac{1.26 * 34 (90 + \frac{5}{2}) * 10^{-4}}{0.347}$$

$= 1.14$ T

ขั้นที่ 15 คำนวณหาค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ac

$$B_m = \frac{0.4\prod N[\Delta I] * 10^{-4}}{l_g \quad 2} \ T$$

$$= \frac{1.26 * 34 * 2.5 * 10^{-4}}{0.347}$$

$= 0.03$ T

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจากการคำนวณ

จะใช้แกนขนาด 2 นิ้ว

ขดลวดใช้เบอร์ SWG10 ตีเกลี่ยว 3 เส้น

จำนวนรอบ 34 รอบ

ช่องว่างอากาศ 3.47 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
การควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เราสามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงได้ 3 วิธี คือ

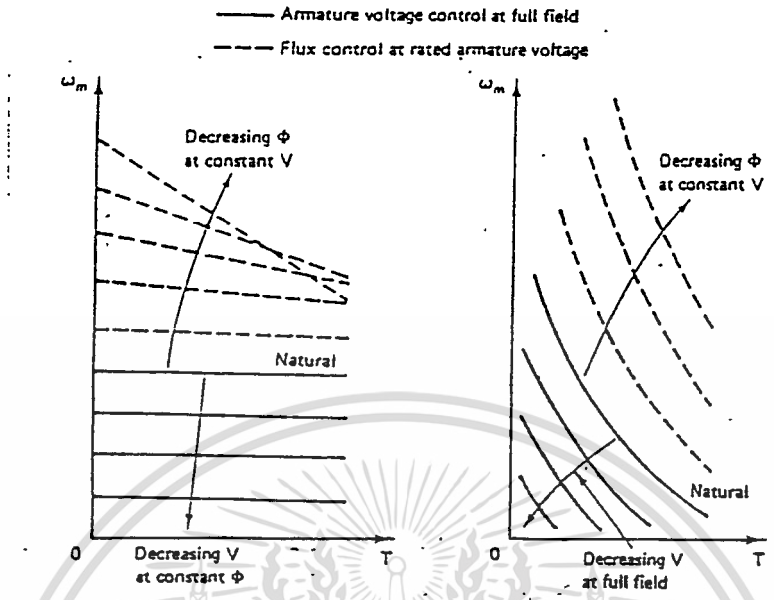
6.1 <u>การควบคุมแรงดันอาเมเจอร์</u> (Armature Voltage Control)

ถ้าแรงดันของอาเมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ที่เป็นแบบขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กอนุกรม ที่กำลังหมุนอยู่มีค่าน้อยลง กระแสอาร์เมเจอร์จะลดลงส่งผลให้แรงบิดของมอเตอร์ลดลงไปด้วย ในขณะที่แรงบิดของมอเตอร์น้อยกว่าแรงบิดที่โหลดต้องการมอเตอร์จะเกิดความหน่วง เป็นผลทำให้ความเร็วและแรงดันต้านกลับ (Back Emf) ลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งแรงบิดของมอเตอร์เท่ากับแรงบิดที่โหลดต้องการ ถ้าแรงดันอาเมเจอร์ของมอเตอร์กระแสตรงลดลงมาก ๆ ซึ่งอาจน้อยกว่าแรงดันต้านกลับ ณ จุดนี้เองทำให้กระแสอาเมเจอร์จะไหลกลับทางในขณะนี้มอเตอร์ก็จะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สร้างแรงบิดที่ตรงข้ามกับ ตอนที่เป็นมอเตอร์จนกระทั่งความเร็วของมอเตอร์ตกลงถึงค่าที่ทำให้แรงดันต้านกลับ มีค่าเท่ากับแรงดันอาเมเจอร์ ส่วนในกรณีของมอเตอร์ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กอนุกรมเมื่อแรงดันอาเมเจอร์มีค่าลดลงมาก ๆ มันจะไม่ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่ที่เกิดความหน่วงขึ้นเพราะว่าแรงบิดของมอเตอร์ต่ำกว่าแรงบิดของโหลดที่ต้องการ

ถ้าแรงดันอาเมเจอร์ของมอเตอร์กระแสตรงที่หมุนอยู่ ณ สภาวะคงที่เพิ่มขึ้น ก็จะทำให้กระแสอาเมเจอร์เพิ่มขึ้น ทำให้แรงบิดของมอเตอร์กระแสตรงเพิ่มขึ้น มอเตอร์จะเกิดอัตราเร่งทำให้ความเร็วของมอเตอร์และแรงดันต้านกลับเพิ่มขึ้น จนกระทั่งเข้าสู่จุดสมดุลใหม่คือ แรงบิดของมอเตอร์เท่ากับแรงบิดที่โหลดต้องการ ที่ความเร็วสูงขึ้นกว่าเดิม

ขณะเพิ่มหรือลดความเร็ว แรงดันอาร์เมเจอร์ควรจะเปลี่ยนทีละน้อย ๆ เพราะการเปลี่ยนแรงดันอาเมเจอร์ทีละมก ๆ นั้น เป็นสาเหตุให้กระแสไหลผ่านอาเมเจอร์มาก ซึ่งจุดนี้อาจจะทำความเสียหายให้กับคอมมิวเตเตอร์ หรือลดอายุการใช้งานของมอเตอร์ลงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) Separately excited (ข) Series

รูปที่ 6.1 แสดงกราฟ speed-torque ของมอเตอร์แบบแยกขดลวดกระตุ้นและมอเตอร์ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กอนุกรม

วิธีการลดแรงดันอาร์เมเจอร์ มอเตอร์สามารถทำงานที่ความเร็ว-แรงบิด ใดๆ ก็ได้ คุณสมบัติ ที่สำคัญของการควบคุมความเร็วแบบนี้คือ ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและแรงบิด และความชันของกราฟความเร็วและแรงบิด จะไม่เปลี่ยนแปลงตลอดความเร็ว อีกทั้งยังเหมาะสมกับการควบคุมแบบควบคุมแรงบิดให้คงที่ เพราะกระแสอาเมเจอร์สามารถปรับถึงจุดสูงได้ตลอดการปรับความเร็วเช่นเดียวกัน นั่นแสดงว่ามอเตอร์จะให้แรงบิดได้เท่ากับขนาดของโหลด ไม่ว่าจะมีความเร็วเท่าใดก็ตาม

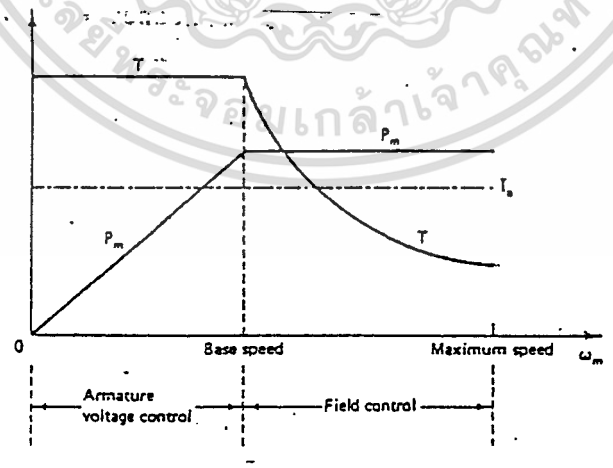
6.2 <u>การควบคุมสนามแม่เหล็ก</u> (Field Flux Control)

ถ้าสนามแม่เหล็กของมอเตอร์กระแสตรงแบบแยกขดลวดกระตุ้นหรือแบบซีรีย์ที่กำลังหมุนอยู่ ณ ความเร็วหนึ่งช้าลง จะทำให้แรงดันเหนี่ยวนำน้อยลง และเนื่องจากความต้านทานอาร์เมเจอร์มีค่าต่ำจึงทำให้กระแสเพิ่มขึ้นมากกว่าการลดลงของสนามแม่เหล็ก เป็นผลให้แรงบิดของมอเตอร์เพิ่มขึ้นมากด้วย ซึ่งจะมากกว่าแรงบิดที่โหลดต้องการทำให้มอเตอร์มีความเร่งเพิ่มขึ้นและแรงดันต้านกลับเพิ่มขึ้น จนกระทั่งมอเตอร์เข้าสู่จุดสมดุลใหม่ที่ความเร็วสูงกว่าเดิม ที่ซึ่งแรงบิดของมอเตอร์เท่ากับแรงบิด ที่โหลดต้องการอีกครั้ง การที่สนามแม่เหล็กลดลงมากทำให้กระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไหลสูงขึ้นมาก อาจทำให้เกิดความเสียหาย ดังนั้นเราควรปรับสนามแม่เหล็กให้ลดลงทีละน้อย อย่างช้า ๆ สำหรับมอเตอร์แบบขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กอนุกรม การเพิ่มสนามแม่เหล็กจะทำให้กระแสกระแสอาร์เมเจอร์ลดลงมากเพราะแรงบิดของมอเตอร์ต่ำกว่าแรงบิด ที่โหลดต้องการ มอเตอร์จึงเกิดความหน่วงความเร็วลดลง จนกระทั่งแรงบิดของมอเตอร์ เท่ากับแรงบิดที่โหลดต้องการ สำหรับมอเตอร์แบบแยกขดลวดกระตุ้น เราสามารถควบคุมสนามแม่เหล็ก โดยการปรับแรงดันตกคร่อม ชุดขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก สำหรับมอเตอร์แบบชันก์ขนาดเล็กเราสามารถควบคุมสนามแม่เหล็ก โดยการต่อตัวต้านทานปรับค่าได้ในขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก สำหรับมอเตอร์แบบขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กอนุกรม เราควบคุมสนามแม่เหล็กได้โดยการต่อความต้านทาน คร่อมขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก ซึ่งในมอเตอร์แบบขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กอนุกรมบางตัวจะมีการแทปบนขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก ซึ่งเราสามารถควบคุมความเร็วได้โดยการเปลี่ยนจำนวนรอบของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กได้

ในระบบขับเคลื่อนที่ต้องการควบคุมความเร็วในช่วงกว้างมาก ๆ เราอาจใช้การควบคุมแรงดันอาร์เมเจอร์ร่วมกับการควบคุมสนามแม่เหล็ก การควบคุมแรงดันอาร์เมเจอร์ จะมีข้อดีในการรักษาแรงบิดสูงสุดที่มอเตอร์สามารถทำได้ที่ทุก ๆ ความเร็ว และการควบคุมแบบการควบคุมสนามแม่เหล็ก จะใช้ควบคุมความเร็วที่สูงกว่า ซึ่งไม่สามารถใช้การควบคุมแรงดันอาร์เมเจอร์ได้ เพราะว่าเราไม่สามารถเพิ่มแรงดันอาร์เมเจอร์ให้สูงกว่าพิกัดได้ ดังนั้นจึงใช้การควบคุมสนามแม่เหล็ก ซึ่งในช่วงนี้มอเตอร์จะมีแรงบิดที่ลดลงเมื่อความเร็วเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 6.2 แสดงพิกัดของแรงบิดและกำลังในการควบคุมแรงดันอาร์เมเจอร์ร่วมกับการปรับสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3 <u>การควบคุมความต้านที่ขดลวดอาร์เมเจอร์</u>

ความสัมพันธ์ของความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์แบบแยกขดลวดกระตุ้นและแบบซีรีย์เมื่อปรับความต้านทานภายนอกซึ่งต่ออนุกรมกับขดลวดอาร์เมเจอร์แสดงดังรูปที่ 6.3

รูปที่ 6.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว-แรงบิด ของมอเตอร์กระแสตรงที่ควบคุมโดยวิธีการปรับความต้านทานที่อนุกรมกับขดลวดอาร์เมเจอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7
แบตเตอรี่

7.1 บทนำ

แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันอย่างกว้างขวางแต่เรามักมองไม่เห็นความสำคัญ ในรถยนต์แบตเตอรี่ถือว่าเป็นหัวใจของระบบไฟฟ้า เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานในการหมุนให้เครื่องยนต์ติดได้ หลักการทำงานของแบตเตอรี่กล่าวโดยง่าย ๆคือ การเปลี่ยนพลังงานเคมีให้เป็นพลังงานไฟฟ้าเมื่อเครื่องยนต์ทำงานแล้ว เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเปลี่ยนพลังงานกลที่เหลือเป็นพลังงานไฟฟ้าแล้วมาเก็บไว้ในแบตเตอรี่ในรูปของพลังงานเคมีไว้ใช้ต่อไป

7.2 ปฏิกิริยาเคมี

ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในแบตเตอรี่กล่าวพอสังเขปซึ่งสรุปได้ดังนี้

ในแบตเตอรี่จะมีแผ่นบวกทำด้วยตะกั่วเปอร์ออกไซด์(PbO_2) มีสีน้ำตาลแผ่นลบทำด้วยตะกั่วพรุน(Pb) มีสีเทา น้ำยาเคมีที่ใช้เป็นกรดกำมะถัน (H_2SO_4)

ขณะที่จ่ายไฟจะมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นดังนี้

- ออกซิเจนจากตะกั่วเปอร์ออกไซด์ จะรวมตัวกับไฮโดรเจน จากกรดกำมะถันกลายเป็นน้ำ
- ตะกั่วจากตะกั่วเปอร์ออกไซด์จะรวมตัวกับอนุมูลซัลเฟต(SO_4) กลายเป็นตะกั่วซัลเฟต($PbSO_4$)

ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นทั้งที่แผ่นบวกและลบ เมื่อเกิดปฏิกิริยาแล้วจะทำให้เกิดตะกั่วซัลเฟต ทั้งสองแผ่นและน้ำ ที่เกิดขึ้นนี้จะเจือจางกรดกำมะถัน ฉะนั้นเมื่อเกิดปฏิกิริยาไปนาน ๆ กระแสไฟฟ้าที่ได้จะลดลงเรื่อย ๆ

ขณะที่อัดไฟจะเกิดปฏิกิริยาตรงกันข้ามกับตอนจ่ายไฟคือตะกั่วซัลเฟต จะแตกตัวออกเป็นตะกั่วและอนุมูลซัลเฟต ที่แผ่นทั้งสอง น้ำจะแตกตัวเป็นไฮโดรเจนกับออกซิเจน โดยที่ไฮโดรเจนจะจับตัวกับอนุมูลซัลเฟตเป็นกรดกำมะถัน และออกซิเจนจะจับตัวกับตะกั่วเป็นตะกั่วเปอร์ออกไซด์

7.3 ขนาดความจุของแบตเตอรี่ (Capacity)

ขนาดความจุของแบตเตอรี่ แสดงเป็นแอมแปร์-ชั่วโมง(Ampere-hour) หรือ Ah ซึ่งหมายถึงปริมาณไฟฟ้าที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายออกมาได้ ภายใต้อุณหภูมิ กระแส และแรงดันที่กำหนด

ขนาดของแรงดันของแต่ละเซลในแบตเตอรี่เมื่อวงจรเปิดและอัตราไฟเต็มที่จะมีค่าเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1 โวลต์ ทั้งนี้ไม่ขึ้นอยู่กับจำนวนแผ่นบวกและลบที่มีอยู่ในเซลนั้น ส่วนขนาดของกระแสไฟฟ้าที่จะได้ขึ้นอยู่กับจำนวนและแผ่นบวกและลบ รวมทั้งปริมาณของกรดกำมะถันด้วย โดยประมาณแล้วขนาดความจุของแบตเตอรี่จะแปรตามพื้นที่ของแผ่นบวกและลบ ถ้าพื้นที่มากก็จะมีความจุมาก ดังนั้นแบตเตอรี่ที่ผลิตขึ้นจึงพยายามทำแผ่นเหล่านี้ให้บาง ๆเพื่อ จะได้มีพื้นที่มาก ๆ

วิธีวัดขนาดความจุของแบตเตอรี่ได้มีการตั้งมาตราฐานโดยวัดอัตราการจ่ายไฟต่อ 20 ชั่วโมง ซึ่งวัดกระแสไฟฟ้าที่จ่ายออกมาจากแบตเตอรี่ที่อัดไฟเต็มที่แล้วเป็นเวลา 20 ชั่วโมง จุดสิ้นสุดในการใช้งานของแบตเตอรี่ จะถูกกำหนดกำหนดด้วยระดับแรงดันสุดท้าย สำหรับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด แรงดัน 12 V ระดับแรงดันสุดท้ายจะเท่ากับ 1.75 V/Cell

7.4 แรงดันแบตเตอรี่(Battery Voltage)

แรงดันแบตเตอรี่เป็นค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วของแบตเตอรี่ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วที่สภาพไร้โหลด (แบตเตอรี่เปิดวงจร) จะเป็นฟังก์ชั่นของการเกิดประจุของแบตเตอรี่แต่ขณะที่มีโหลด แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วจะเป็นฟังก์ชั่นของกระแสโหลด การเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันของแบตเตอรี่ จะมีผลต่อการควบคุมความเร็วของรถไฟฟ้ามาก

7.5 ความต้านทานภายในของแบตเตอรี่(Battery Internal Impedance)

ค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่ ขณะที่มีโหลด ค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ เกิดจากปรากฏการณ์ทางเคมีที่เกิดขึ้นภายในแบตเตอรี่ ในขณะที่เกิดการถ่ายเทประจุไฟฟ้าเช่นปรากฏการณ์โพลาไรเซชั่นซึ่งจะทำให้เกิดประจุไฟฟ้าใกล้ ๆผิว ของแผ่นขั้วอิเลคโตรด ซึ่งจะทำให้กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการไหลของอิออนระหว่างแผ่นขั้วอิเล็คโตรดมีค่าลดลง ดังนั้นปรากฏการณ์นี้จึงเสมือนว่าค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่นั่นเอง

7.6 คุณสมบัติของอุณหภูมิ(Temperature Characteristics)

อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในตัวแบตเตอรี่จะมีผลต่อการทำงาน และขนาดความจุของแบตเตอรี่มาก เนื่องจากอุณหภูมิมีผลต่อความต้านทานของน้ำยาอิเลคโตรไลท์

ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเช่นกันกล่าวคือเมื่ออุณหภูมิต่ำจะทำให้ปฏิกิริยาทางเคมีเกิดขึ้นได้ช้าทำให้พลังงานที่ได้นั้นลดลง เราจะพิจารณาตารางที่ 7.1 ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพเมื่อคิดเป็น %ของขนาดของความจุของแบตเตอรี่เมื่อเปรียบเทียบกันที่อุณหภูมิต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.1 เปรียบเทียบขนาดความจุของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ที่อุณหภูมิปกติและที่ต่ำกว่าปกติ

Relative Capacity of Lead - Acid Storage Batteries at Normal and Low Temperatures

Temperatures		Percentage of Capacity at 80° F 20 Hr Rate	
°C	°F	20 Hr Rate	20 Min Rate
27	80	100	46
15	60	90	39
4	40	77	31
-7	20	68	24
-18	0	49	19
-29	-20	35	9
-40	-40	21	1
-51	-60	9	....

จากการศึกษาพบว่าขนาดความจุของแบตเตอรี่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง(Linear function) กับอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศาขนาดความจุเพิ่มเป็น 1% ของความจุที่ 15°C

จากตารางทำให้ทราบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด คือประมาณ 26.7 °C หรือ 80 °F

7.7 คุณสมบัติของการอัดไฟ (Charge Characteristics)

ในการอัดไฟเข้าแบตเตอรี่นั้น สิ่งที่ต้องคำนึงถึงมากที่สุดคือปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น เนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นเป็นก๊าซไวไฟดังนั้นจึงต้องมีระบบระบายก๊าซที่เกิดขึ้นให้ดี ในการอัดไฟที่กระแสยิ่งสูง ก็ยิ่งทำให้เกิดความร้อนสูงเป็นผลทำให้เกิดก๊าซมากขึ้นด้วยความร้อนที่เกิดขึ้น ในช่วงระหว่างการอัดไฟไม่ควรเกิน 55 °C

วิธีการอัดไฟมี 4 วิธีคือ

1. การอัดไฟด้วยกระแสคงที่ (Charging With Constant Current)

2. การอัดไฟด้วยกระแสเป็นช่วง ๆ (Charging With intermittent Constant Current)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การอัดไฟด้วยแรงดันคงที่และจำกัดกระแส (Charging With Constant Voltage and Current Limitation)

4. การอัดไฟด้วยกระแสไม่คงที่ (Charging With Tapered Current)

7.8 <u>คุณสมบัติในการจ่ายไฟ</u> (Discharge Characteristic)

ขณะที่การใช้กำลังเพิ่มมากขึ้นพลังงานที่เก็บสะสมไว้ในแบตเตอรี่ก็จะค่อย ๆลดลงตามไปด้วย การที่พลังงานเหล่านี้ลดลงเนื่องจากการลดลงของระดับแรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่ ซึ่งเกิดจากการเพิ่มของกระแสโหลด ประจุในตัวของแบตเตอรี่ก็จะค่อย ๆลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้