



SWITCHED-MODE POWER SUPPLIES
SNUBBER CIRCUIT
ADJUST SPEED MOTOR BY OSCILLATOR
AND ENERGY CONVERSION

นาย ชำนาญ สันหนองเมือง 34161204

นาย ผดุงศักดิ์ อภิรัตน์มนตรี 34161219

อาจารย์ที่ปรึกษา

อ. สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์

ปริญญาานิพนธ์สำหรับปริญญาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม

ภาควิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2535

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

032648

ภาควิชา เทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม

สาขา เทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง SWITCHER-MODE POWER SUPPLIES

SNUBBER CIRCUIT

ADJUST SPEED MOTOR BY OSCILLATOR THEORY

AND ENERGY CONVERSION

ผู้จัดทำ

1. นาย ชำนาญ สันหนองเมือง 34161204
2. นาย ผดุงศักดิ์ อภิรัตน์มนตรี 34161219

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(อ. สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์)

35th Nov 2015

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ

Abstract

บทนำ	1
ความรู้เกี่ยวกับ switching power supply	1
- Switching power supply	1
- ข้อดีของ Switching power supply	3
- ข้อเสียของ Switching power supply	4
วงจรพื้นฐานของวงจร Switching regulator	5
- step - down regulator	5
- step - up regulator	6
- Inverting or Flyback regulator	7
การวิเคราะห์วงจร out put filter	8
Snubber circuit	13
- The turn-off snubber	15
- The turn-on snubber	19
- The unified snubber	22
ความรู้เกี่ยวกับการปรับความเร็วมอเตอร์โดยใช้หลักการออสซิลเลเตอร์ ..	25
ความรู้เกี่ยวกับวงจรแม่เหล็ก	38
กิตติกรรมประกาศ	48
เอกสารอ้างอิง	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทคัดย่อ

โครงงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาการทำงานของวงจรแหล่งจ่ายไฟกำลังแบบสวิตชิง , วงจรสับเบอ์ , การปรับความเร็วมอเตอร์โดยใช้หลักการออสซิลเลเตอร์ , การศึกษาการเปลี่ยนรูปพลังงาน

วงจรแหล่งจ่ายไฟกำลังแบบสวิตชิงแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ แบบแรงดันทางออกน้อยกว่าแรงดันทางเข้า และแบบแรงดันออกมากกว่าแรงดันทางเข้า

วงจรสับเบอ์ เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการป้องกันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ทรานซิสเตอร์ ไคริสเตอร์ เป็นต้น

การปรับความเร็วมอเตอร์โดยใช้หลักการออสซิลเลเตอร์ เป็นการศึกษาเกี่ยวกับวงจรออสซิลเลเตอร์ เพื่อมาประยุกต์ใช้กับมอเตอร์เฟสเดียวแบบอินดักชัน

การศึกษาการเปลี่ยนรูปพลังงาน เป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากพลังงานไฟฟ้า ไปเป็น พลังงานกล โดยใช้หลักการของหม้อแปลง

ABSTRACT

THIS PROJECT IS STUDIED ABOUT SWITCHING MODE POWER SUPPLY , SNUBBER CIRCUIT , ADJUST SPEED MOTOR BY OSCILLATOR THEORY AND ENERGY CONVERSION

SWITCHING POWER SUPPLY HAVE 2 TYPE 1. STEP DOWN CONVERTER (BUCK) DC. INPUT VOLTAGE HAVE MAGNITUDE LESS THAN DC. OUT PUT VOLTAGE AND 2. STEP UP CONVERTOR (BOOST) TRANSFORMS A DC.VOLTAGE INPUT TO A VOLTAGE OUT PUT THAT IS GREATER IN MAGNITUDE.

SNUBBER CIRCUIT USED FOR FIX LOSS. IT CAN BE EMPLOYED ON A POWER SWITCHING TRANSISTOR.

ADJUST SPEED MOTOR BY TRANSFORMMER THEORY STUDY ABOUT OSCILLATOR CIRCUIT FOR APPLIED USE WITH SINGLE-PHASE INDUCTION MOTOR

ENERGY CONVERSION STUDY ABOUT TRANSFER ENERGY FROM ELECTRIC ENERGY TO MECHANICAL ENERGY BY USE TRANSFORMMER THEORY

SWITCHING POWER SUPPLY

บทสรุป

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

เป็นเวลานานหลายปีมาแล้วที่รู้กันมาว่ามีการแบ่งแยกออกเป็น 2 ภาค ในขบวนการสัญญาตทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ นั่นคือ สำหรับแต่ละปัญหา ดูเหมือนว่าเราจะมองกันให้อยู่ในแง่ของดิจิตอล (DIGITAL) และอนาล็อก (ANALOG) สำหรับนักประดิษฐ์เมื่อเผชิญกับปัญหาทางด้านออกแบบวงจรแหล่งจ่ายไฟ การแก้ไขแบบง่ายที่สุดคือ การใช้ ไอ.ซี. รักษาไฟตรงแบบต่อเนื่องชนิด 3 ขา เป็นตัวอย่างที่มองเห็นได้ วงจร ไอ.ซี. ซึ่งอยู่บน chip เดียวกันนี้ทำให้การออกแบบแหล่งจ่ายไฟเป็นไปได้ง่ายขึ้น แหล่งจ่ายไฟชนิดอนุกรม (series - pass) หรือขนาน (shunt) หรือ ลิเนียร์ (linear) ง่ายต่อการใช้และยังมีสัญญาณรบกวน (noise) กับริพเพิล (ripple) ที่ด้าน เอาท์พุท (out put) น้อยมาก ด้วยเหตุผลเหล่านี้เองทำให้สามารถครอบครองอยู่ในท้องตลาดได้เป็นเวลานาน

ใน ไอ.ซี. รักษาศักดาไฟตรงแบบต่อเนื่อง เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ (power transistor) จะต้องทำงานโดยตลอดไม่มีการหยุดพัก ดังนั้น จะสิ้นเปลืองพลังงานสูงมาก ถ้าต้องการกระแสไฟสูง ประสิทธิภาพของเครื่องจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ V_{out}/V_{in} สำหรับกรณี V_{out} คงที่ ประสิทธิภาพจะลดลงในขณะที่แรงเคลื่อน อินพุท (input) เพิ่มขึ้น และเมื่อเกิดความแตกต่างระหว่าง V_{out} กับ V_{in} จะมีความจำเป็นที่จะต้องใช้ ทรานซิสเตอร์และแผ่นระบายความร้อน (heat sink) ที่มีขนาดใหญ่ นอกจากนี้ใน ไอ.ซี. รักษาศักดาไฟตรงแบบต่อเนื่องยังมีความจำเป็นที่ว่า แรงเคลื่อนขาออกจะต้องอยู่ระหว่างศักดากราวด์ (ground potential) และระดับไฟขาเข้า (input level) ทำให้ ซีรีส์พาส ทรานซิสเตอร์ (series - pass transistor) ต้องการหม้อแปลงไฟและคาปาซิเตอร์ สำหรับกรองกระแสที่มีขนาดใหญ่

1.2 Switching Power Supply

ปัจจุบันนี้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ส่วนมากมักจะต้องการ DC power source มากกว่าหนึ่งระดับ ซึ่งวิธีที่จะได้ DC supply นั้นจะได้มาจากการเปลี่ยน AC supply เป็น DC supply ซึ่งการรักษาระดับ DC ที่ได้นั้นจะต้องมีการ regulate ซึ่งมีอยู่ 2 แบบ คือ linear regulator และ switching regulator

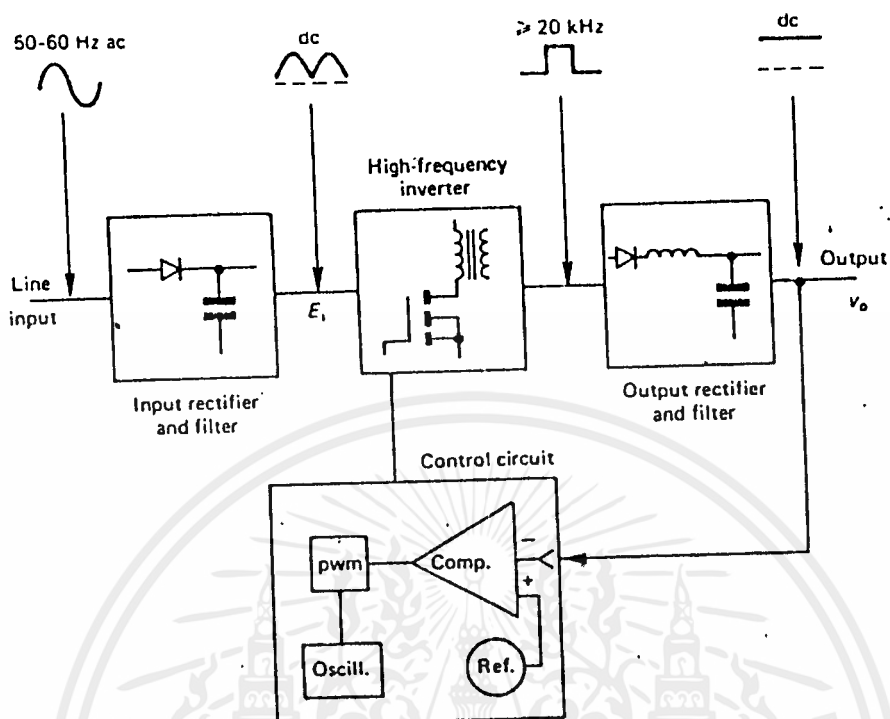
Linear regulator power supply จะประกอบด้วย power transformer, rectifier และ filter สำหรับ switching power supply ไม่ต้องมี line transformer, AC input จะถูก rectifier และ filter เมื่อได้ DC มาแล้ว ก็จะถึง chopprd โดย transisor switch หรือใช้ SCR ก็ได้ และจะส่งกำลังผ่าน high frequency transformer และถูกนำมาผ่าน rectifier แล้วนำมาทำการ filter อีกครั้ง

Switching power supply ส่วนมากจะใช้ใน งานอุตสาหกรรมคอมพิวเตอร์ทหาร และอวกาศ เพราะมีขนาดเล็กและประสิทธิภาพสูง

1.3 Basic Operation of Switching Regulator

ตามรูปที่ 1.1 เป็น block diagram ของ switching power supply ชนิดหนึ่ง ซึ่งประกอบด้วย 4 ภาคหลัก คือ

1. Input rectifier and filter
2. High frequency Inverter
3. Out put rectifier and filter
4. Control Circuit



รูปที่ 1.1 แสดง Block diagram basic Switching Power Supply

1.3.1 ลักษณะของการทำงานตาม Block diagram

AC line voltage จะเข้ามาทาง input rectifier และ filter circuit จะทำให้เกิด DC Voltage ขึ้นและจะถูก chopped โดย transistor ด้วยความถี่สูง ($10K - 100KH_z$), ในส่วนของวงจร high frequency inverter และพลังงานจะถูกส่งผ่านโดย high frequency transformer ซึ่งจะได้ Out put voltage ตามต้องการ

Out put จากวงจร high frequency จะส่งผ่านเข้าไปในส่วนของ out put rectifier และ filter ซึ่งในส่วนนี้จะมีการตรวจสอบแรงดันเพื่อส่งไปยัง วงจรควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับวงจรควบคุม จะประกอบด้วยวงจร oscillator วงจร pulse width modulator (PWH) วงจร error amplifier วงจร precision voltage referemco out put จาก error amplifier จะถูกเปรียบเทียบกับ input reference voltage ซึ่งได้มาจากส่วนของ out put rectifier และ filter เมื่อ load มีค่ามากขึ้น voltage จะลดลง error amplifier senser จะ มีค่าลดลง ซึ่งจะทำให้วงจร PWN นานขึ้นส่งผลให้สามารถยกกระดัด DC Out put ขึ้นมา ได้ ดังนั้น out put ของวงจรจะมีค่าคงเดิม

1.3.2 ข้อดีของ Switching Regulator

ข้อดีขั้นแรกของ Switching regulator คือ ประสิทธิภาพสูงและมีขนาดเล็ก ซึ่ง regulator แบบ linear (ทั้งแบบ shunt และ Serries) การทำงานของ transistor จะอยู่ใน mode ของ active คือมีกระแสไหลต่อเนื่องตลอดเวลา ทำให้เกิดการสูญเสียมาก ทำให้มีประสิทธิภาพประมาณ 40 % ถึง 50 % และหาก Volt ระหว่าง input และ out ต่างกันมากประสิทธิภาพอาจต่ำกว่า 40 %

แต่ switching regulator จะมีประสิทธิภาพอยู่ในช่วง 60 % ถึง 90 % ซึ่งสูงกว่า liner regularor ซึ่ง switching regulator มีประสิทธิภาพสูงเกิดจาก factor 3 อย่าง คือ

1. Power transistor จะทำงานเป็น switch คือ ON และ OFF ตลอดเวลา ซึ่งทั้งสองสภาวะนี้ คือ ช่วง ON จะมี Voltage ตกคร่อมต่ำมาก (เท่ากับ V_{sat}) และ off จะมีกระแสไหลผ่านตัวมันต่ำ ทำให้ power ที่สูญเสียในตัว transistor ต่ำ
2. มีค่า rogulation ตีและสามารถใช้กับ input ที่มีช่วงกว้าง
3. ประสิทธิภาพสูงจากการที่มันสามารถรักษาแรงดันคงที่ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของกระแส load

Switching regulator ใช้การ ON - OFF duty cycle ของ teansistor switching ทำการ regulate out put voltage และ current โดยใช้ความถี่ของการ switch สูงกว่า line frequency (ประมาณ 10^4 - 10^5 KH)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

transformer closer, capacitor และ อุปกรณ์ filter อื่น ๆ จะมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และราคาถูก การที่มีอุปกรณ์ขนาดเล็ก จะทำให้ power ที่สูญเสียในแต่ละตัวจะน้อยกว่าอุปกรณ์ ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าใน linear regulator

อุปกรณ์ที่มีราคาสูงสุดใน switching power คือ transistor และอุปกรณ์ที่มีราคารองลงมาได้แก่ switching transformer, chokes, filter capacitor, diode rectifier ตามลำดับ

1.3.3 ข้อเสียของ Switching Regulator

Switching regulator จะก่อให้เกิด Electromagnetic Interference (EMI) และ Radio frequency Interference (RFI) Noise ระหว่างที่ช่วง switch ความเร็วสูง และช่วงขาขึ้นและขาลงของ pulse ใช้เวลาน้อย ทำให้เกิดความถี่ที่สูงขึ้นกว่าความถี่สูงขึ้นมาเดิม (100 NH_z ถึง 500 NH_z) แต่ที่ filter ได้ง่าย

แต่ในการใช้งานจริง ๆ จะมีค่า impedance สูงระหว่าง supply และตัว regulator เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสอย่างรวดเร็ว ย่อมจะเกิด noise ขึ้นแน่นอน

ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นนี้ เราสามารถแก้ไข หรือลด noise ลงได้ตามลำดับดังนี้

1. ลดค่าของ series impedance
2. เพิ่มเวลาของการ switching
3. ทำการ filter ที่ input และ output ของตัว regulator

Switching Regulator ซึ่งมีความถี่คงที่ ง่ายต่อการ filter กว่าวงจรซึ่งสามารถปรับความถี่ได้ เพราะว่า noise ที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นแน่นอนที่ความถี่ใดความถี่หนึ่ง วงจร regulator ซึ่งปรับความถี่ได้ แต่คงที่ช่วงเวลา ON การเพิ่มหรือลดความถี่ให้เหมาะสมกับ load ซึ่งเปลี่ยนแปลง สำหรับวิธีนี้ จะเป็นการยากในการ filter noise

1.4 Basic Switching Regulator Architecture

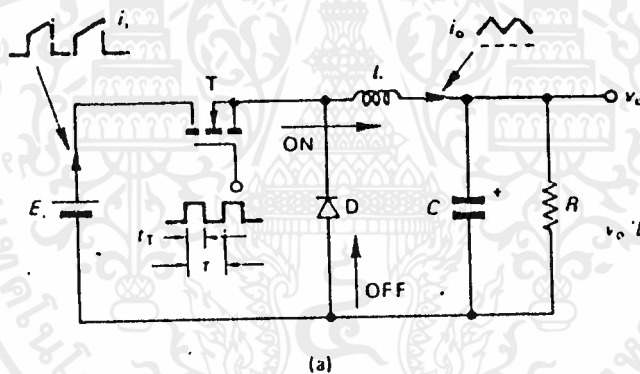
วงจร switching regulator มีวงจรพื้นฐานและใช้กันจนถึงทุกวันนี้มีอยู่ 3 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิด

1. Step - down or "buck" regulator
2. step - up or "boost" regulator
3. Inverting or "Dlyback" regulator (ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็น "boost regulator")

1.4.1 The Step - Down Regulator Buck

ตามรูปที่ 1.2 จะแสดงถึง วงจรพื้นฐานของ step - down regulator
 out put voltage ที่ได้ จะมีค่าน้อยกว่า input voltage



รูปที่ 1.2 แสดง Step - Down or "Buck" Switching Regulator

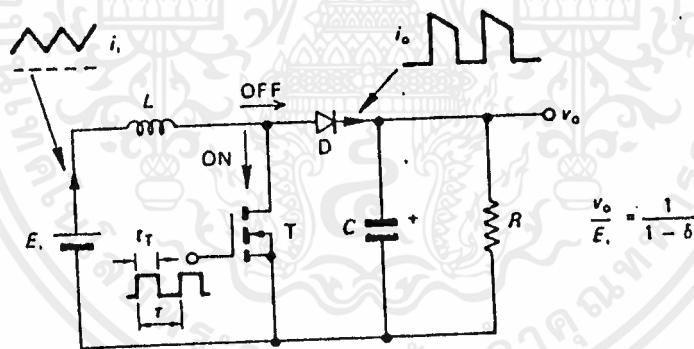
ในวงจรแบบ buck นั้น switching transistor จะถูกต่อ series กับ DC input ซึ่ง switching transistor จะเป็นตัวกำหนดให้ DC ที่ไปปรากฏทางด้าน O/P โดยจะขึ้นอยู่กับความกว้างของ pulse ที่ควบคุม transistor อีกทอดหนึ่ง เมื่อ switch "closed" dc ทาง input ก็จะไปปรากฏที่วงจร filter และมีกระแสไหล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ่าน Inductor ไปยัง load เมื่อ switch "open" พลังงานที่ถูกเก็บไว้ในสนามแม่เหล็กของ inductor จะถูกปล่อยผ่าน load และ diode
 ในวงจรชนิด buck นี้กระแสสูงสุด (leak current) จะเป็นค่าที่พอดีกับ load current และ out put voltage สามารถหาได้จาก

$$V_o = V_i \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} \quad (\text{or}) = V_i \cdot \text{Duty Cycle}$$

1.4.2 The Step - Up Regulator

วงจรพื้นฐานของ regulator ชนิด Boost นี้แสดงรูปที่ 1.3 ซึ่งเป็นชนิดหนึ่งของวงจรประเภทนี้ voltage out put ที่ได้จะสูงกว่า input voltage



รูปที่ 1.3 แสดงวงจรพื้นฐานของ Switching Regulator

44 ชนิด Step - up หรือ Boost 6.5

การทำงานของวงจร boost นี้ เมื่อก่อนเริ่ม inductor ก็จะเก็บพลังงานไว้ เมื่อมีกระแสไหลไปยัง load เมื่อ switch (ซึ่งใช้ transistor) "close" กระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แก็ก็จะไหลออกจาก inductor ผ่าน switch แต่ในช่วงนี้จะไม่มีกระแสไหลไปยัง load เมื่อ switch "open" voltage ที่ตกคร่อม load จะเท่ากับ DC input voltage ที่เกิดขึ้นใน inductor และจะทำให้มีกระแสผ่านไปยัง load อีกครั้ง

สำหรับ peak switching current จะไม่มีผลต่อ load current และ power out ของวงจร boost regulator จะหาได้จาก

$$P_{out} = \frac{LI^2F}{2} \quad P_{out} : \text{Power Out } P_{ut}$$

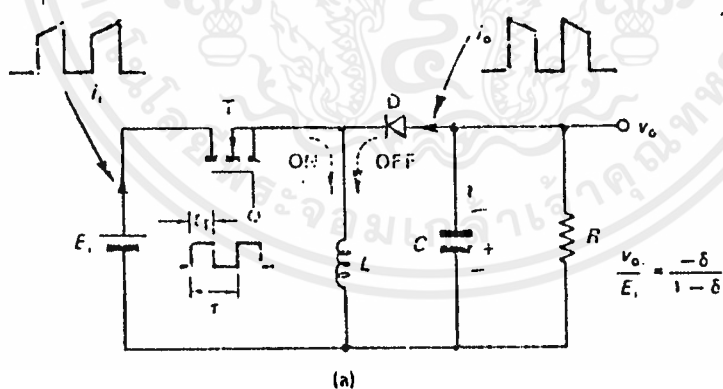
L : Inductance

I : Peak Current

F : Operating Frequency

1.4.3 The Inverting Regulator

วงจร switching regulator ชนิดที่สามนี้ จะเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Flyback regulator ซึ่งวงจรชนิดนี้ จะมีลักษณะการทำงานคล้าย boost regulator ดังแสดงในรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 แสดงวงจรพื้นฐานของ Inverting

หรือ Flyback Switching Regulator

Flyback Regulator นี้เป็นการดัดแปลงมาจาก วงจรชนิด boost

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



regulator ซึ่งจะใช้วิธีเก็บพลังงานไว้ใน inductor เมื่อ switch "closed" จะมีกระแสไหลผ่าน inductor แต่จะไหลไปทาง diode ต่อแบบ reverse bias เมื่อ switch "open" blocking diode จะได้รับ Forward bias จากพลังงานที่เก็บไว้ใน inductor และจะถูกส่งไปยัง load

วงจร Flyback regulator นี้ จะให้กำลังคงที่ และไม่สนใจ Impedance ของ load ซึ่งใช้งานในพวก Photo Flash, CDI, battery chargers

ในการหา output voltage ของวงจรนี้ ถ้า V_o เป็น output voltage P_o เป็น output power R_L เป็น load resistance I เป็น current L เป็น inductance f เป็น operating frequency

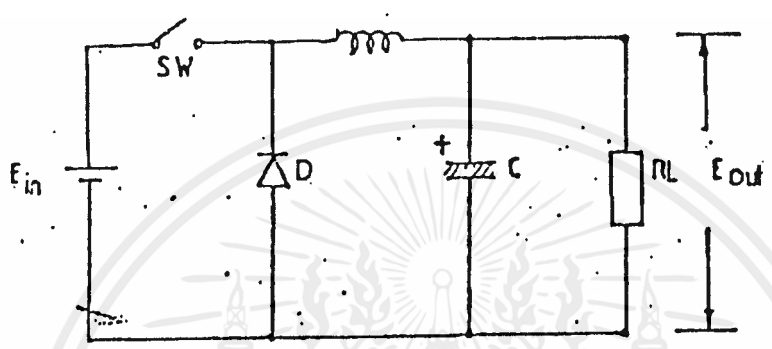
$$V_o = \frac{P_o}{R_L} = I \cdot L \cdot \frac{f}{2}$$

- V_o : Voltage Out Put
- P_o : Power Out
- R_L : Load Resistance
- I : Inductance Current
- f : Operating frequency

กระแส Inductance ที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับ duty cycle ของ switch สำหรับค่า regulator จะดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับ duty cycle สำหรับ transient response ในช่วงที่มีการ charge พลังงานให้แก่ load นั้นเป็นการยากที่จะทำการวิเคราะห์ เพราะผลที่ได้จะถูกกำหนดโดยค่า load ต่ำสุด และการใช้ filter capacitor ที่จะสนองต่อเวลา วงจร flyback ทั่ว ๆ ไป สามารถจะจ่ายกำลังได้ถึง 100 W.

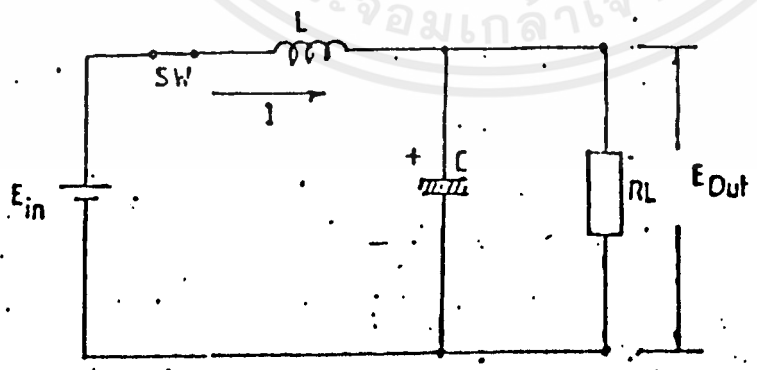
การวิเคราะห์วงจร Out put filter

การทำงานของ switching power supply ซึ่งอาศัยการ ON - OFF ของ transistor switching ปล่อยสัญญาณให้กับ transformer switching ทางด้าน primary และ Induce ไปยังขด secondary ดังนั้นสัญญาณ Out put ที่ขด secondary จึงมีลักษณะเป็น Pulse ตามจังหวะการ ON - OFF ของ switch



รูปที่ 1.3 แสดงการทำงานของวงจร filter

พิจารณาช่วงที่ SW. ON



รูปที่ 1.4 ช่วงที่ SW. ON

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นช่วงที่มี Pulse เข้ามา diode ทำตัวเหมือนเปิดวงจร

$$E_{in} = L \cdot di/dt + E_{out}$$

- เมื่อ E_{in} : input voltage (v)
 L : inductance filter (h)
 i : current in circuit at sw.on (a)
 E_{out} : DC out put voltage (v)

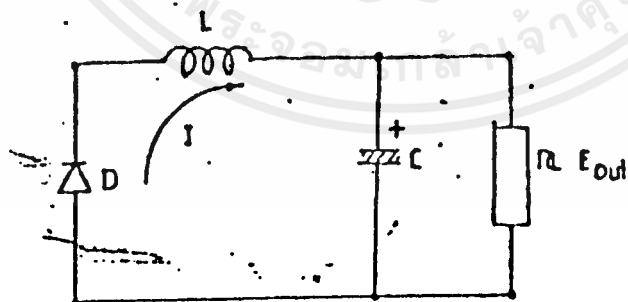
จากสมการที่ (1)

$$di/dt : (E_{in} - E_{out}) / L \tag{5.2}$$

จากสมการที่ (2)

$$i : (E_{in} - E_{out}) t_{on} / L \tag{5.3}$$

พิจารณาช่วงที่ sw.-off



รูปที่ 1.5 ช่วงที่ sw.-off

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

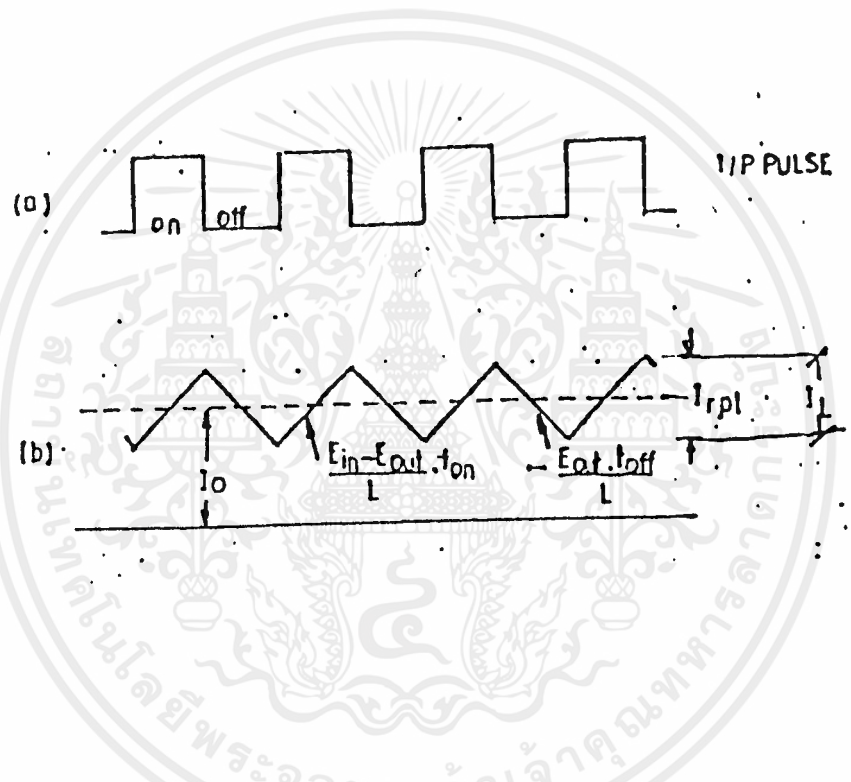
คือช่วงที่ไม่มี pulse เข้ามา diode ซึ่งทำตัวเสมือนต่อวงจร

$$L \frac{di}{dt} + E_{out} = 0 \tag{5.4}$$

$$\frac{di}{dt} = -E_{out} / L \tag{5.5}$$

เพราะฉะนั้น $i = -E_{out} / L \cdot t_{off}$ (5.6)

การหาค่า L



รูปที่ 1.6 แสดง wave form ของสัญญาณ out put

จากรูป 1.6 (b) และสมการที่ (5.3)

$$I_{pk} = (E_{in} - E_{out}) t_{on} / L \tag{5.7}$$

เมื่อ I_{pk} : peak current ที่ผ่าน L_1

t_{on} : ช่วงเวลาที่ sw.on

$$I_{u1} = I_{ru1/2} (= I_o) \tag{5.8}$$

เมื่อ I_{rpl} : peak ripple current

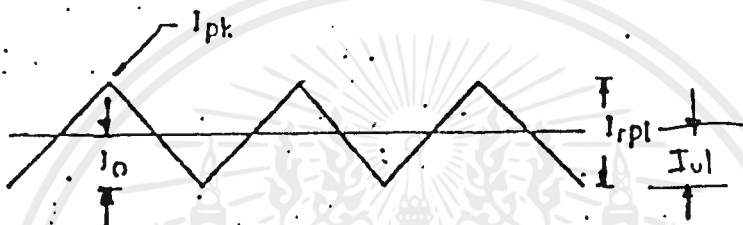
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I_{u1} : average peak ripple current

I_o : out put current

จากรูป 1.7

$$I_o = I_{rpl/2} (=I_{u1}), I_{pk} = I_{rpl} \quad (5.9)$$



ผลของกระแสเนื่องจาก L

รูป 1.7 แสดง wave form ของ riple fiple

จากสมการ (5.8) และ (5.9)

$$\text{เพราะฉะนั้น } I_{pk} = I_{rpl} = 2 I_{u1} \quad (5.10)$$

จากสมการ (5.7) และ (5.10)

$$2I_{u1} = (E_{in} - E_{out})t_{on} / L \quad (5.11)$$

จะได้ว่า $I_{u1} = (E_{in} - E_{out})t_{on} / 2L$

$$\text{หรือ } I_{ut} = 1/5 I_{o(max)} \text{ ถึง } 1/20 I_{o(max)} \quad (5.12)$$

จากสมการ (5.11) และ (5.12)

$$L > (2.5-10) (E_{in} - E_{out})t_{on} / I_{o(max)} \quad (5.13)$$

$$\text{เมื่อ } E_{out} = t_{on} \cdot E_{in} \quad (5.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T = 1/f$$

(5.15)

จากสมการ (5.13) และ (5.14)

$$L = (2.5-10) (E_{in} - E_{out}) (E_{out}/E_{in}) \cdot T / I_{o(max)} \quad (5.16)$$

การหาค่า C

การหาค่า C ได้เราจะต้อง ripple voltage peak to peak ก่อน

$$\text{จากสูตร } E_{out} = 1/c \int i dt \quad (5.17)$$

$$E_{out} = I_{rp1} / c \cdot t_{off} \quad (5.18)$$

$$\text{เมื่อ } I_{rp1} = I_{pk}$$

$$\text{ดังนั้น } E_{out} = I_{pk} / c \cdot t_{off} \quad (5.19)$$

$$\text{เพราะฉะนั้น } c = I_{pk} / \Delta E_{out} \cdot t_{off} \quad (5.20)$$

จากสมการ (5.10) และ (5.14)

$$c = (E_{in} - E_{out}) \cdot t_{on} \cdot t_{off} \quad (5.21)$$

จากสมการ (5.9) และ (5.14)

$$I = t_{on} / T \cdot E_{in} \cdot t_{off} \quad (5.22)$$

การคำนวณหาจำนวนรอบของ inductor filter

$$\text{จากสูตร } L = AL * N^2 * 10^{-9} \quad (5.23)$$

$$\text{เพราะฉะนั้น } N = \sqrt{[L * 10^{-9} / AL]} \quad \text{turn} \quad (5.24)$$

เมื่อ N : จำนวนรอบ (T)

AL : ปริมาตรของลวด (nh/t²)

L : inductance (h)

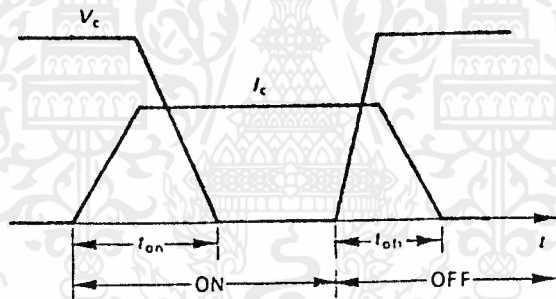
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SNUBBER

SWITCHING-AID CIRCUITS

ในการที่จะให้ power switching transistor เป็นสวิตช์ที่ใหญ่ขึ้น มีความทนทานและมีอายุการยาวนานจะต้องใช้วงจรช่วยเหลือสวิตช์ (switching-aid circuit) โดยปกติเราจะเรียกว่า วงจร snubber (snubber circuits) ซึ่งวงจรนี้สามารถลด Loss ที่สูญเสียใน Transistor switching ทั้งช่วงเวลาสวิตช์เปิดและสวิตช์ปิด

สำหรับโหลดเหนี่ยวนำ (Inductance load) ที่เวลาชั่วขณะหนึ่ง ทรานซิสเตอร์จะได้รับแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไหลเต็มๆ ในเวลาที่พร้อมกันดังรูปที่ 7.11



รูปที่ 7.11 collector switching waveforms for an inductive load

จากรูป 7.11 ในสภาวะนี้ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงกำลังสูญเสียสูงสุดได้แต่สามารถเปลี่ยนคาบเวลาของสวิตช์ได้ กำลังการสูญเสียที่สวิตช์ (switching loss) จะกระจายอยู่ในรูปของความร้อนในทรานซิสเตอร์ ให้โดย

สำหรับ สวิตช์เปิด

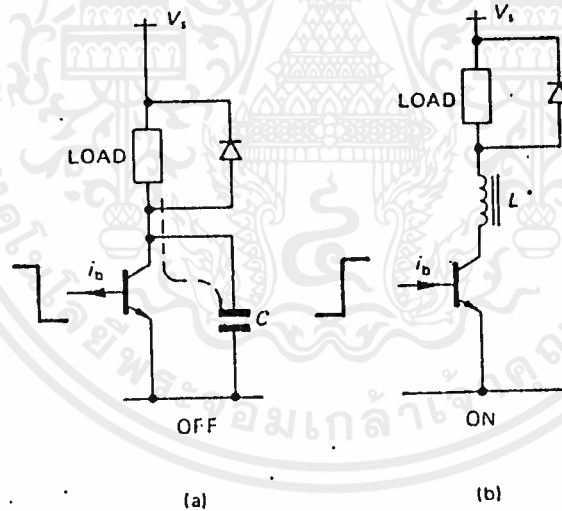
$$W_{on} = V_m I_m t_{on} \quad (j) \quad (7.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับ สวิตช์ปิด

$$W_{off} = V_m I_m t_{off} / 2 \quad (j) \quad (7.16)$$

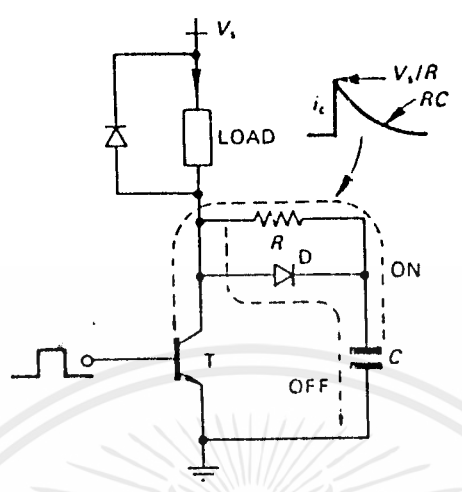
วงจรสับเบอ์ทั้งสองวงจร สามารถนำไปใช้งานกับเพาเวอร์สวิตซ์ทรานซิสเตอร์ วงจรแรกนั้นระยะเวลาการทำงานของทรานซิสเตอร์จะอยู่ในสภาวะเปิด (turn on) และวงจรสองระยะเวลาการทำงานสภาวะปิด (turn off) กรณีของ turn off snubber นี้จะวางตัวขนานมาจากทรานซิสเตอร์ เข้าไปที่คาปาซเตอร์ที่ขนานอยู่แสดงดังรูป 7.12 a ส่วนกรณี turn on snubber จะต่อตัวเหนี่ยวนำอนุกรมเข้าไปที่ขาคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์ แสดงดังรูป 7.12 b ซึ่งจะควบคุมระยะเวลาขึ้น (rise time) ของกระแสคอลเลคเตอร์ ระยะเวลาลง (fall time) ของแรงดันคอลเลคเตอร์



รูปที่ 7.12 Basic switching-aid circuit comprising (a) a

capacitor for current shunting at transistor turn off (b) an inductor for limiting the rate of rise of collector current at turn on

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.13 practical turn off snubber showing cap

The turn-off snubber circuit

รูป 7.13 แสดงวงจร turn-off snubber ที่สมบูรณ์ซึ่งประกอบด้วย คาปาซิเตอร์ไดโอด ตัวต้านทาน ประกอบเข้ากันกับขาคอลเลคเตอร์ขาอิมิตเตอร์ ของทรานซิสเตอร์สวิทช์ ซึ่ง สภาวะที่ทรานซิสเตอร์ turn-off กระแสคอลเลคเตอร์จะ ลดลงแรงดันที่คอลเลคเตอร์จะเหมือนกับ แรงดันที่คาปาซิเตอร์ (capacitor voltage) ซึ่งแรงดันเริ่มต้นเป็นศูนย์ (initially zero) ที่คาปาซิเตอร์มีขนาดใหญ่ ช่วงเวลาขึ้น ของแรงดันคอลเลคเตอร์จะช้า สำหรับกระแสไหลจะเหมือนเดิม ที่สภาวะ turn off นี้ แรงดันที่แหล่งจ่ายและกระแสไหลและกระแสไหลเกิดขึ้นพร้อมกัน รูป 7.14 แสดงสัญญาณรูปคลื่นของคอลเลคเตอร์ ขณะ turn off ที่ค่าขนาดของคาปาซิเตอร์มีขนาดต่างๆกัน รูป 7.14 a สัญญาณรูปคลื่นของทรานซิสเตอร์ขณะไม่มีสแน็บเบอร์ ที่แรงดันคอลเลคเตอร์นั้น สมมติให้ช่วงเวลาขึ้น (rise time) มีค่าสั้นมากเมื่อเทียบหับเวลาดตก (fall time)

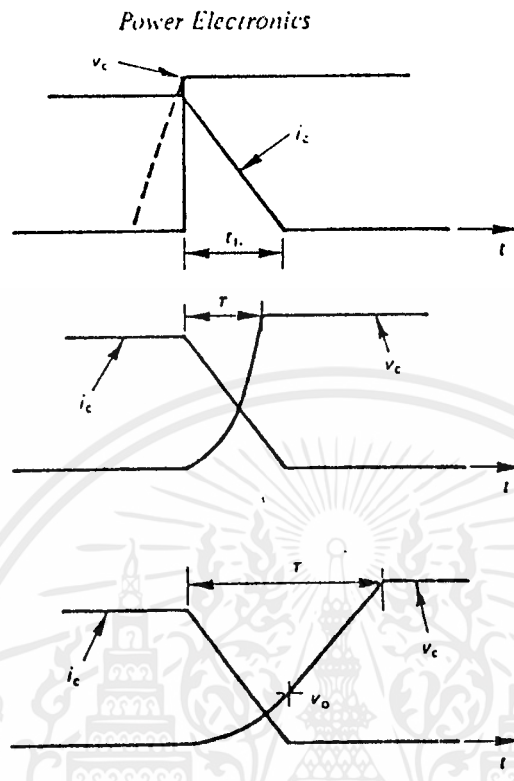
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของกระแสคอลเลคเตอร์ สำหรับขนาดคาปาซิเตอร์ต่ำ คาปาซิเตอร์จะเก็บประจุให้มีแรงดันเต็มก่อนที่กระแสคอลเลคเตอร์จะตกลงมาที่ศูนย์ แสดงในรูป 7.14 b สำหรับคาปาซิเตอร์ที่มีขนาดใหญ่ กระแสคอลเลคเตอร์จะตกมาถึงศูนย์ ก่อนที่คาปาซิเตอร์จะเก็บประจุให้มีแรงดันเต็มดังแสดงในรูป 7.14 c

สำหรับการวิเคราะห์ ช่วงเวลาขึ้น (rise time) ของแรงดันคอลเลคเตอร์สำหรับไม่มี snubber สมมติให้เป็น ศูนย์ ดังนั้น พลังงานที่สูญเสียที่ทรานซิสเตอร์ขณะ turn off ที่แสดงในรูป 7.14 a ให้โดย

$$W = V_m I_m t_{f1} / 2 \quad (j) \quad (7.17)$$

เมื่อมีวงจรถนั้บเบอร์ พลังงานที่สูญเสียที่ทรานซิสเตอร์ มีค่าลดลงแต่จะเพิ่มขึ้นที่สนับเบอร์แทน หลังจาก turn off คาปาซิเตอร์จะเก็บประจุแรงดัน พลังงานส่วนนี้ก็คือ $1/2 C_m V_m$ ต่อมาเมื่อทรานซิสเตอร์ turn on พลังงานส่วนนี้จะกระจายในรูปงานที่สูญเสียของทรานซิสเตอร์ที่มีวงจรถนั้บเบอร์ จะมีค่าน้อยกว่าที่ไม่มีวงจรถนั้บเบอร์ ซึ่งกำลังงานที่สูญเสียให้โดยสมการ 7.17 การออกแบบสนับเบอร์ทั้งสองกรณี แสดงให้เห็นในรูป 7.14 b และ 7.14 c



รูปที่ 7.14 transistor turn-off waveforms : (a) unaided turn-off ; (b) turn-off with small snubber capacitance ; (c) turn-off with large snubber capacitance

ถ้าคาปาซิเตอร์สแน็บเบอร์ ถูกเก็บประจุให้เต็มก่อนที่กระแสคอลเลคเตอร์ I_c จะลงมาถึงศูนย์ ดังนั้น กำลังงานที่สูญเสียของวงจร (loss snubber and transistor) ให้โดย

$$W = V_{ce} I_m t_{f1} [1 - 4k + k^2] / 6 \tag{7.18}$$

สำหรับ $k < 1$ ที่ $k = \tau / t_{f1}$ ให้นิยามตามรูป 7.14

ในทางกลับกันถ้าคาปาซิเตอร์สแน็บเบอร์ไม่สามารถเก็บประจุถึง V_{ce} จนกระทั่งหลังจากกระแสคอลเลคเตอร์ I_c มาถึงศูนย์ นั่นคือ $k > 1$ ดังนั้นกำลังที่สูญเสียทั้งหมดให้โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$W_L = V_m I_m t_{F1} (K^2 - K + 1/3) / 2 (k - 1/2) \quad (j) \quad (7.19)$$

สำหรับ $K > 1$

Loss นี้จะพาดพิงขณะที่ไม่มีวงจรถ่ายเหลือ (unaided) กำลังงานที่สูญเสียให้โดยสมการ 7.17 และนำไป plot กราฟดังแสดงในรูป 7.15 เมื่อทรานซิสเตอร์และคาปาซิเตอร์ประกอบเข้าไปช่วยเหลือ loss ทั้งหมดก็แสดงดังรูป 7.15. เหมือนกัน จุดสำคัญที่เกิดขึ้นเกี่ยวกับสับเบอร์ turn off และ snubber loss คือ

1) เพราะ current tailing , voltage overshoot และที่สมมุติเวลาขึ้น (rise time) ของแรงดันใช้เวลาสั้นมากถือว่าไม่สำคัญ กำลังงานสูญเสียที่ทรานซิสเตอร์เมื่อไม่มีวงจรถ่าย แสดงค่าโดยประมาณด้วยสมการ 7.17

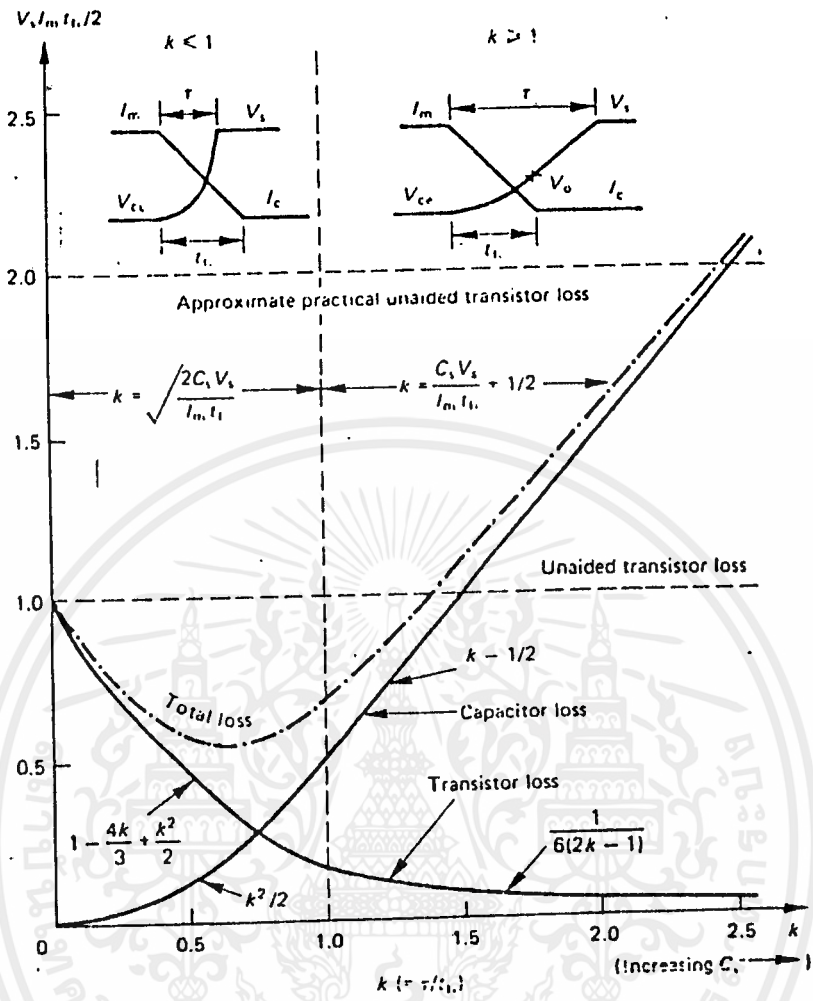
2) เพิ่มคาปาซิเตอร์สับเบอร์ (snubber capacitance) ขึ้นนั่นคือ k ก็เพิ่มขึ้นด้วย power ที่สูญเสียที่ทรานซิสเตอร์ก็จะลดลงไปเรื่อยๆ แต่ power สูญเสียที่สับเบอร์จะเพิ่มขึ้น

3) ถ้า $K < 1.4$ loss ทั้งหมดจะมีค่าน้อยกว่า เมื่อไม่มีวงจรถ่ายทรานซิสเตอร์ (unaided transistor)

4) สภาวะที่ Loss ทั้งหมดมีค่าน้อยที่สุด เมื่อ $k = 2/3$ ในสภาวะนี้คาปาซิเตอร์สับเบอร์ให้โดย

$$C_n = I_m t_{F1} \cdot 2 / V_m \quad (ก) \quad (7.20)$$

สับเบอร์ไม่ได้ช่วยลด loss ทั้งหมด แต่เพราะว่า loss จะกระจายอยู่ในรูปอยู่ระหว่างทรานซิสเตอร์และตัวต้านทาน



รูปที่ 7.15 loss components for a transistor at switch off when employing a capacitance-type snubber

พลังงานที่เก็บในคาปาซิเตอร์ $1/2 C_s V_s^2$ จะถูกเคลื่อน

ย้ายขณะ turn-on และกระจายในวงจรสับเบอร์ที่ความต้านทาน R power ของความต้านทาน
 นี้ขึ้นอยู่กับความถี่ของการเป็นสวิตช์ และให้โดย

$$P_{r_{sn}} = 1/2 C_s V_s^2 f_m \quad (w)$$

ขนาดของความต้านทานวงจรสับเบอร์ แสดงรายละเอียดได้ 2 ข้อ

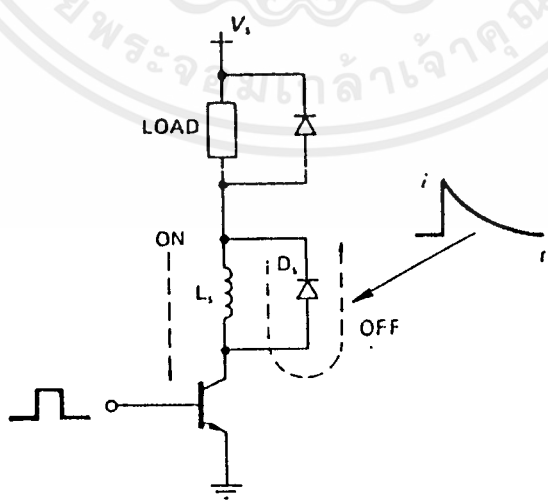
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) วงจรสับเบอ์ R-C time constant มักจะเกิดขึ้นหลังจาก turn-on คาปาซิเตอร์จะคายประจุ (discharges) ก่อนที่ถึง turn off ถัดไป ถ้า $t_{on(min)}$ ของทรานซิสเตอร์มีค่าต่ำ ดังนั้น $t_{on(min)} = 5R_C$ จึงจะเพียงพอให้เกิดการแก้ไขวงจรสับเบอ์ที่สภาวะเริ่มแรก

2) กระแสเริ่มต้นที่ความต้านทานได้รับจากการคายประจุของคาปาซิเตอร์ให้โดย V_C/R_C นั่นคือส่วนประกอบของกระแสขณะ turn on จะต้องรวมค่าของกระแสที่คาปาซิเตอร์จ่ายออกมาด้วย ฉะนั้นกระแสคอลเลคเตอร์สูงสุดจะไม่เกินค่ากระแสนี้ ในระดับนี้จะลดกระแส discharge เริ่มแรก โดยการต่อตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าน้อยอนุกรมกับตัวต้านทาน ผลอันนี้จะทำให้เกิด over damped L-R-C oscillation ของกระแสที่ turn on

The turn-on snubber circuit

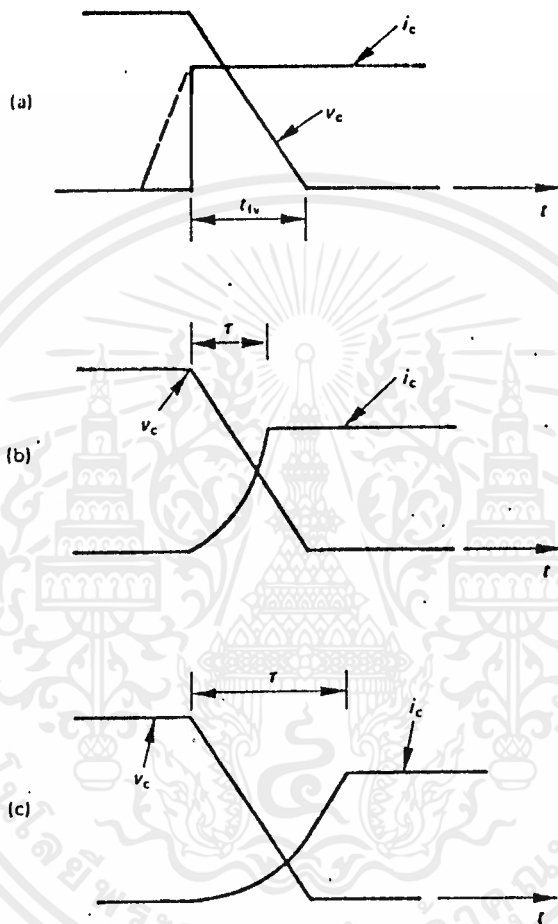
วงจรสับเบอ์ที่สภาวะ turn on ประกอบด้วย ตัวเหนี่ยวนำ ไดโอด เข้าในวงจรคอลเลคเตอร์ ดังแสดงในรูป 7.17 ที่สภาวะ turn on ตัวเหนี่ยวนำจะควบคุมอัตราการขึ้นของกระแสคอลเลคเตอร์ระหว่างแรงดันคอลเลคเตอร์ตก (fall) ที่สภาวะทรานซิสเตอร์ turn off พลังงานจะเก็บไว้ในตัวเหนี่ยวนำ $L_C I_m^2 / 2$ ซึ่งจะถ่ายเทด้วยกระแสที่ไหลผ่านไดโอดตลอด และกระแสในไดโอดและความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำ



รูปที่ 7.17 turn-on switching-aid circuit incorporating series induct

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 7.18 แสดงรูปคลื่นของคอลเลคเตอร์ turn on ซึ่งไม่ใส่วงจรสับเบอร์และใส่วงจรสับเบอร์



รูปที่ 7.18 Transistor voltage and current collector waveforms at turn-on (a) without a snubber ;(b) and (c) with an inductive snubber

ที่สภาวะ turn on loss ที่ทรานซิสเตอร์ซึ่งไม่มีวงจรช่วย โดย

$$W = v_m I_m t_{fv} / 2 \tag{7.22}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติให้ช่วงเวลายาวขึ้น (rise time) ของกระแสคอลเลคเตอร์เป็น 0 และ ช่วงตกของแรงดันคอลเลคเตอร์เป็นเส้นตรง (linearly)

การนำวงจรสับเบอร์ turn on ไปใช้งานรายละเอียดรูปคลื่นคอลเลคเตอร์ แสดงในรูป 7.18 b หรือ 7.18 c สำหรับค่าความเหนี่ยวนำที่นั่นกระแสคอลเลคเตอร์จะ ถึงค่ากระแสสูงสุดก่อนที่แรงดันคอลเลคเตอร์จะมาถึงศูนย์ แสดงในรูปที่ 7.18 b กระแส คอลเลคเตอร์จะเพิ่มขึ้นในลักษณะสมการกำลังสอง และ loss ทั้งหมดที่สภาวะ turn on ให้โดย

$$W_c = (V_{cc} I_m t_{fv}) (1+k^2-4/3k)/2 \tag{j} \tag{7.23}$$

สำหรับ $k < 1$ ที่ $k = \omega/t_{fv}$ เหมือนนิยามในรูป 7.18 loss นี้จะประกอบด้วย loss ที่ทรานซิสเตอร์ และพลังงานที่เก็บในตัวเหนี่ยวนำ สำหรับวงจรสับเบอร์ที่ค่าความ เหนี่ยวนำสูงนั้น แรงเคลื่อนคอลเลคเตอร์จะตกมาถึงศูนย์ก่อนที่ กระแสคอลเลคเตอร์จะมา ถึงศูนย์แล้ว กระแสจะเพิ่มขึ้นในลักษณะเส้นตรง (linearly) loss ทั้งหมดใส่โดย

$$W_c = (V_{cc} I_m t_{fv}) (k^2-k+1/3)/2(k-1/2) \tag{j} \tag{7.24}$$

loss ทั้งหมดมีค่าต่ำสุดที่สภาวะ turn on เกิดขึ้นที่ $K = 2/3$ เมื่อ

$$I_m = (2/3)(I_{cc} I_m^2 f_m) \tag{h} \tag{7.25}$$

ที่สภาวะ turn on ตัวเหนี่ยวนำสับเบอร์จะเก็บพลังงานและกระจายในรูปความร้อนผ่าน ไดโอดสับเบอร์ ขนาดของ loss สูงสุดขึ้นอยู่กับความถี่และให้โดย

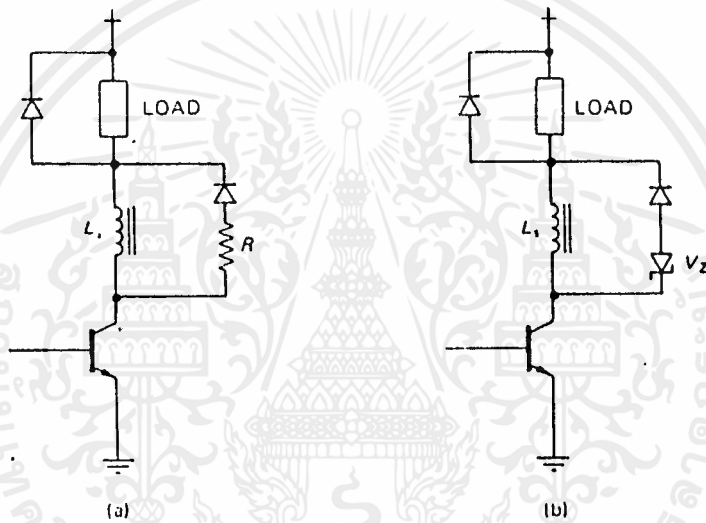
$$P_{cm} = (1/2)(I_m^2 f_m) \tag{w} \tag{7.26}$$

power นี้กระจายอยู่ทั้งความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำและไดโอด d_c ความต้านทานใน รูปนี้มักจะมีค่าต่ำเนื่องจาก time constance L/R มีค่ายาวในการละลาย ค่าเวลาถูกนำ ไปออกแบบ คือ $t_{off (min)} = 5L/R$ ที่ $t_{off (min)}$ เป็นเวลาที่ทรานซิสเตอร์ ใช้เวลาต่ำสุด off time time constant สามารถลดลงได้ โดยต่อความต้าน ทานอนุกรม หรือ ซีเนอร์ไดโอดดังแสดงในรูป 7.19

ข้อเสียของการเพิ่มความต้านทานอนุกรมเข้าไปคือ แรงดันคอลเลคเตอร์ที่ทรานซิสเตอร์ ขณะ turn off จะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก v_{ce} ไปเป็น $v_{ce} + i_{cm} R$ ข้อดีของการใช้ซีเนอร์ไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือ แรงดันเกิน (over voltage) จะถูก fixed ซึ่งไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสไหลลัดถ้าให้แรงดันเกินซีเนอร์ไดโอดจะดูดกลืนพลังงานได้เร็วกว่าการใช้ความต้านทาน ส่วนข้อดีของการใช้ความต้านทานในการกระจาย คือ ง่ายและสะดวกในการกระจายความร้อนได้ดีกว่า



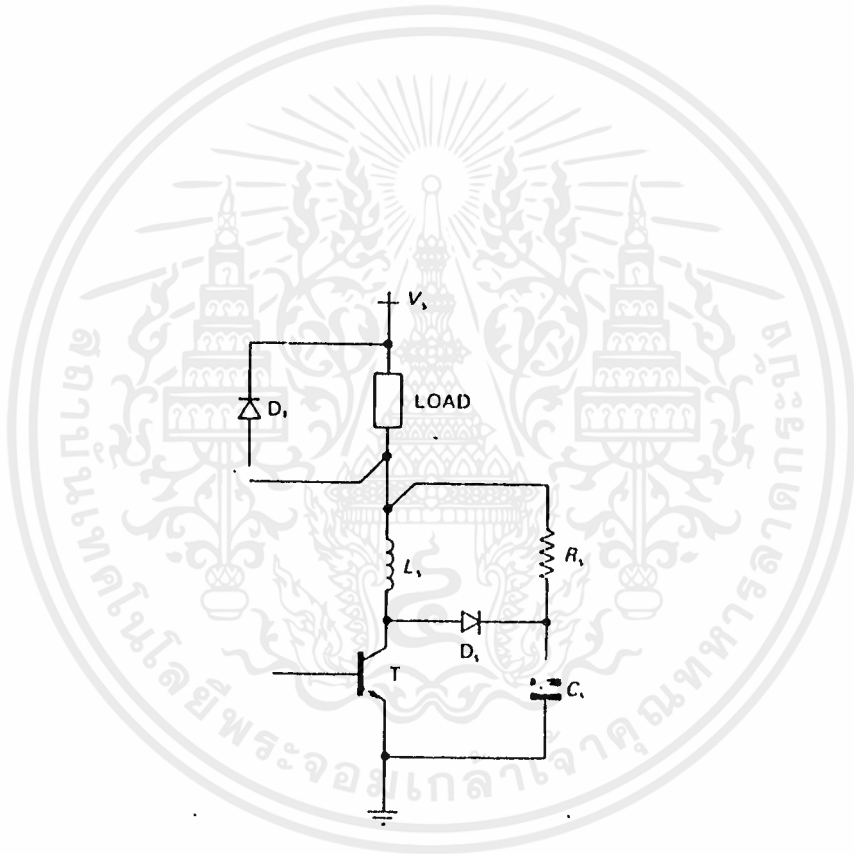
รูปที่ 7.19 two turn on snubber modifications for increasing the rate of release of inductor L_1 stored energy: (a) using a power resistor; (b) using a power Zener diode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The unified snubber circuit

รูป 7.22 แสดง ทราานซิสเตอร์เป็นสวิทช์ซึ่งเป็นการรวมวงจรสับเบอร์ทั้ง turn on และ turn off ทั้ง L_m หาได้โดยการวิเคราะห์ที่ผ่านมาแล้วกำลังที่กระจายที่ตัวต้านทาน R เป็นการรวมทั้ง turn on inductor และ turn off capacitor C_m ที่เกิดขึ้น

$$P_{r_m} = (1/2) (L_m i_m^2 + C_m v_m^2) f_m \quad (w). \quad (7.29)$$



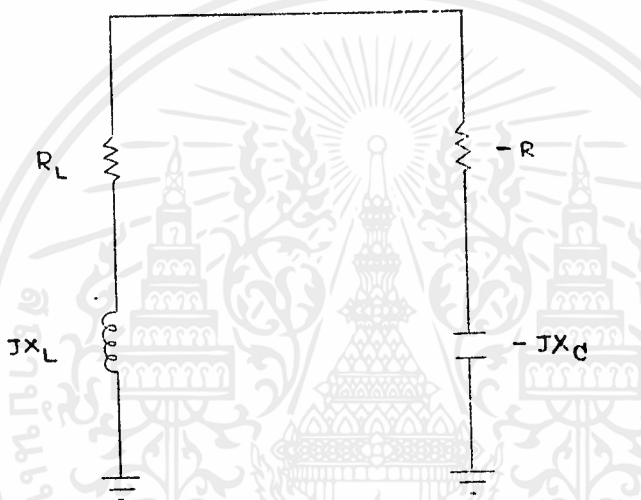
รูปที่ 7.22 unified snubber incorporating both a turn-on and a turn-off circuit which share the one dissipation resistor.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปรับความเร็วมอเตอร์โดยใช้หลักออสซิลเลเตอร์

จุดประสงค์ของโครงการนี้ เป็นการเสนอแนวทางการปรับความเร็วมอเตอร์ single-phase Induction moter แบบใหม่ซึ่งจะใช้หลักการออสซิลเลท

การวิเคราะห์วงจรออสซิลเลเตอร์โดยการพิจารณาวงจรอนลิเนียร์ เพื่อหาค่าความต้านทานลบที่ขึ้นอยู่กับความถี่ ซึ่งต่ออนุกรมกับค่าเหนี่ยวนำ และค่าเก็บประจุ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 1 นั้นเป็นการวิเคราะห์วงจรออสซิลเลเตอร์อีกวิธีหนึ่ง



รูปที่ 1 วงจรที่ตัดเทียบวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ประกอบด้วยความต้านทานลบ

จากรูปที่ 1 R_L เป็นความต้านทานจริง ที่มีค่าเป็นบวก ซึ่งเป็นค่าความต้านทานภายในของค่าเหนี่ยวนำ และค่าเก็บประจุ ส่วน $-R$ เป็นค่าความต้านทานจริงที่มีค่าเป็นลบที่เกิดจากวงจรถอนลิเนียร์

การออสซิลเลทของวงจรจะเกิดขึ้นเมื่อขนาดของความต้านทานบวกมีค่าเท่ากับค่าความต้านทานลบ ๓. ความถี่วิกฤตนี้เสมือนกับเริ่มมีการกระตุ้นให้เกิดการออสซิลเลท เมื่อพิจารณาพลังงานรวมที่สะสมอยู่ในค่าเก็บประจุ และค่าเหนี่ยวนำ เหมือนถูกกระตุ้น ดังนั้นจึงเกิดการออสซิลเลท การถ่ายเทพลังงานของค่าเก็บประจุและค่าเหนี่ยวนำนี้จะมีค่าเป็นศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

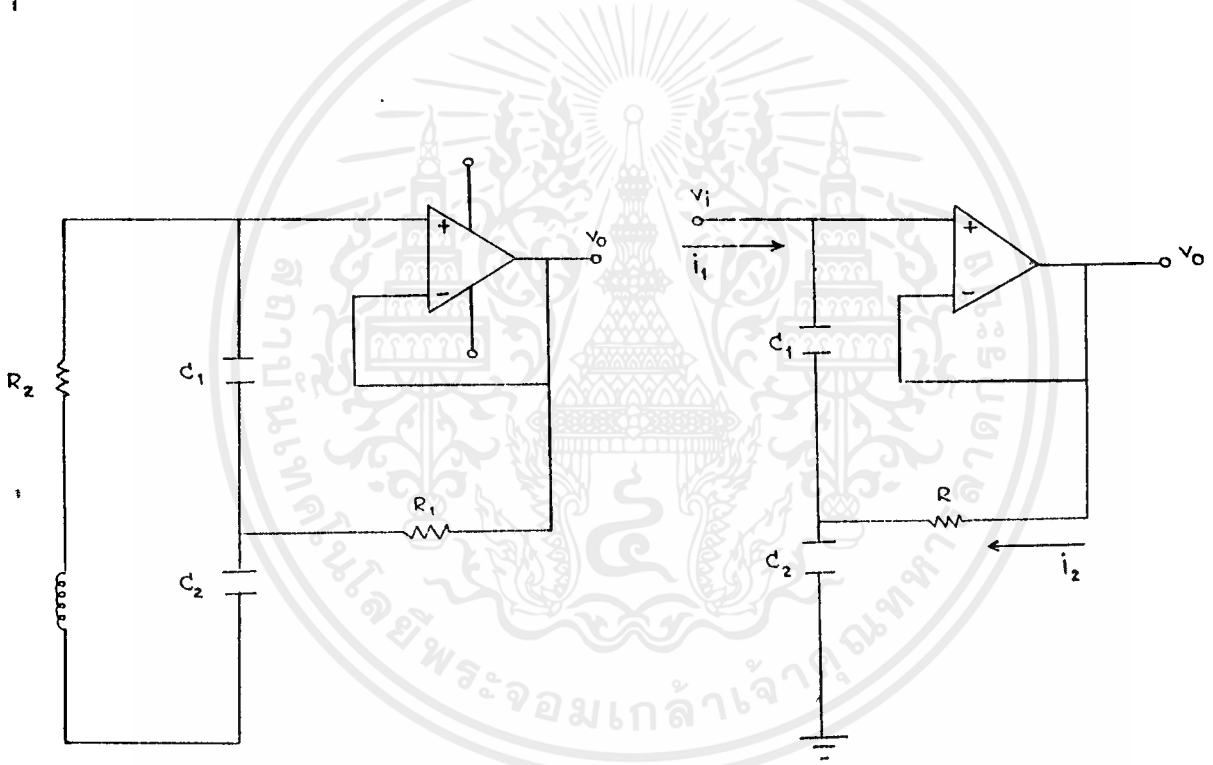
เมื่อเวลามีค่านันต์ ข้อกำหนด การออสซิลเลทของวงจรที่ความถี่วิกฤต คือ

$$R_L + (-R) = 0 \dots\dots\dots (1)$$

และ $jX_L + (-jX_C) = 0 \dots\dots\dots (2)$

สมการที่ 1 ใช้หาข้อกำหนดความถี่และสมการที่ 2 ให้หาข้อกำหนดเงื่อนไขของการออสซิลเลท

การวิเคราะห์วงจรออสซิลเลทที่เสนอตามรูปที่ 2 นั้น เมื่อพิจารณาหาค่าความต้านทานลบที่ขึ้นอยู่กับความถี่ได้โดยแยกวงจรดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 วงจรออสซิลเลเตอร์

รูปที่ 3 แสดงการแยกจากวงจรที่ 2

การพิจารณาอินพุตแดนซ์ทางเข้าในรูปที่ 3

$$Z_i = \frac{V_1}{I_1}$$

$$\underline{V}_1 = x_{c1} \cdot i_1 + (i_1 + i_2) \cdot x_{c2} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ค่าอิมพีแดนซ์ที่ทางเข้าของส่วนที่ 1 คือ V_1 และ ให้ $s = j\omega$ จะได้

$$i_1$$

$$Z_1 = [i_1 / (sc_1) + (i_1 + i_2) / sc_2]$$

$$i_1$$

แต่ $V_{c1} = V_R$

$$i_1 / (sc_1) = i_2 \cdot R$$

$$i_2 = i_1 / (sc_1 R) \quad \dots\dots\dots(4)$$

แทนค่า (4) ใน (3) จะได้

$$V_1 = i_1 / (sc_1) + [i_1 + i_1 / (sc_1 R) \cdot 1 / (sc_2)]$$

$$V_1 = i_1 \cdot [1 / (sc_1) + \{ 1 + 1 / (sc_1 R) \} \cdot 1 / (sc_2)] \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$Z = V_1 / i_1 = 1 / (sc_1) + (1 + 1 / (sc_1 R)) \cdot 1 / (sc_2)$$

$$Z = 1 / (sc_1) + 1 / (sc_2) + 1 / (s^2 c_1 c_2 R)$$

แทนค่า $s = j\omega$

$$Z = 1 / (j\omega c_1) + 1 / (j\omega c_2) + 1 / (j^2 \omega^2 c_1 c_2 R)$$

$$Z = - 1 / (\omega^2 c_1 c_2 R) - j(1/c_1 + 1/c_2) / \omega \quad \dots\dots\dots(6)$$

จะเห็นว่าสมการที่ (8) มีค่าความต้านทานจริงมีค่าเป็นลบ และขึ้นอยู่กับความถี่

แนวความคิดมาใช้กับมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก่อนอื่นจะต้องทำความเข้าใจหลักการทำงานของมอเตอร์ single-phase มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว (single-phase induction motors) เป็นมอเตอร์ที่มีโครงสร้างและหลักการทำงานในการที่ทำให้มันหมุนได้คล้ายกับมอเตอร์เหนี่ยวนำหลายเฟส จะแตกต่างกันก็ตรงที่ตัวอยู่กับที่มีการพันขดลวดเป็นแบบเฟสเดียวและได้รับไฟจากไฟเฟสเดียวด้วย ดังนั้นจึงทำให้เกิดสนามแม่เหล็กสลับกันไปมาขึ้นที่ตัวอยู่กับที่ซึ่งไม่ใช่สนามแม่เหล็กหมุนที่ความเร็ว synchronous เหมือนอย่างกับพวกที่มีการพันแบบสองเฟสหรือสามเฟส จากเหตุผลนี้จึงทำให้เส้นแรงที่สลับไปมานี้ไม่สามารถที่จะทำให้เกิดแรงบิดหมุนขึ้นได้ในขณะที่ตัวหมุนยังหยุดอยู่ นี่ก็คือสาเหตุว่าทำไมมอเตอร์เฟสเดียวจึงไม่มีแรงบิดเริ่มแรกในตัวของมันเอง

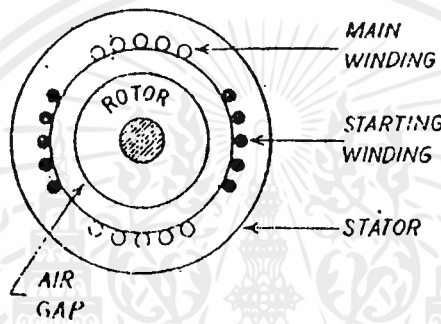
อย่างไรก็ดีถ้าหากว่าตัวหมุนถูกทำให้หมุนไปด้วยมือหรือวิธีใดวิธีหนึ่งในทิศทางใดทิศทางหนึ่งแล้ว ย่อมทำให้เกิดแรงบิดและอัตราเร่งเกิดขึ้นกับมอเตอร์นั้นจนกระทั่งมีความเร็วเต็มที่

ตัวหมุน (rotor) ของมอเตอร์แบบนี้ส่วนใหญ่เป็นแบบกรงกระรอก (Squirrel cage) ส่วนทางตัวอยู่กับที่นั้นก็มีการพันขดลวดตัวนำผิดแผกแตกต่างกันไปบ้างแล้วแต่ชนิดของมอเตอร์ การที่กล่าววามอเตอร์เฟสเดียวมีโครงสร้าง และหลักการทำงานในการที่ทำให้มันหมุนได้คล้ายกับมอเตอร์เหนี่ยวนำหลายเฟสนั้นหมายความว่ามอเตอร์แบบนี้มีทั้งตัวอยู่กับที่และตัวหมุน โดยที่ตัวอยู่กับที่นั้นจะมีการพันขดลวดเพื่อทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนในช่วงเวลาเริ่มแรกหรือในช่วงเวลา $\frac{1}{2}$ ของคาบของกระแสเพียงอย่างเดียว เช่น ขดเริ่มทำให้หมุน (starting winding) หรือตัวประจุ (capacitor) ต่อร่วมกับขดทำให้หมุน หรืออาจทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเลื่อนหรือเคลื่อนที่ไปรอบหรือเกิดสนามแม่เหล็กโดยอาศัยคุณสมบัติของตัวหมุนและตัวอยู่กับที่ร่วมกันก็ได้ ส่วนตัวหมุนนั้นก็อาจเป็นแบบโครงกรงกระรอกหรืออาจไม่เป็นก็ได้แต่ก็ต้องเป็นตัวที่จะทำให้เกิดมีการเหนี่ยวนำขึ้นในตัวมันเพื่อทำให้เกิดแรงบิดขึ้นได้เมื่อมีสนามแม่เหล็กหมุนหรือเลื่อนได้หมุนผ่านตัวมัน ซึ่งจะกล่าวแยกเป็นเรื่อง ๆ ไปตามชนิดของมอเตอร์แบบต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ที่แยกเฟสออกจากกัน (Split-Phase Motor) โครงสร้างของมอเตอร์

ประกอบด้วย



รูปที่ 4

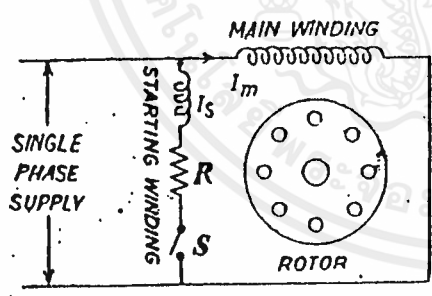
1. ตัวอยู่กับที่ (stator) มีขดลวดอยู่ 2 ชุดหนึ่งมีไว้สำหรับใช้งานตามปกติเรียกว่า ขดสำหรับวิ่ง (running winding หรือ main winding) ขดขดลวดชุดนี้มีความต้านทานต่ำแต่ reactance สูงกว่าชุดสำหรับทำให้มอเตอร์หมุน โดยที่มีขนาดเส้นลวดใหญ่กว่าชุดหมุน ชุดสำหรับวิ่งหรือใช้งานนี้เป็นชุดหลักที่มีไฟผ่านอยู่ตลอดเวลา ไม่ว่าจะเป็นขณะเริ่มหมุนที่แรกหรือว่าขณะที่ทำงานปกติ ชุดที่สองเป็นชุดสำหรับเริ่มทำให้หมุน (starting winding) ขดลวดชุดนี้พันไว้ที่ตัวอยู่กับที่เช่นกัน แต่ว่าให้ลงในช่อง (slot) เป็นมุมห่างไปจากชุดหลัก 90 องศาไฟฟ้า ทั้งนี้เพื่อทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นในขณะเริ่มแรก ชุดนี้มีความต้านทานของขดลวดตัวนำสูงแต่ reactance ต่ำและเส้นลวดมีขนาดเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาตจากศูนย์ฯ (centrifugal switch) แล้วจึงนำไปต่อไม่วารณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

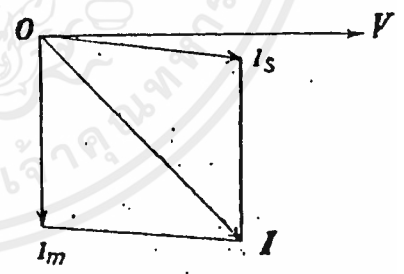
ขนานกับชุดสำหรับวิ่ง ถ้าไม่ใช้สวิตช์หนีศูนย์กลางก็อาจใช้ relay เป็นตัวตัดขาดเริ่มทำให้ หมุนหรือหรือขาดช่วยทำให้หมุน (starting winding or auxilliary winding) ก็ได้ โดยปกติแล้วมอเตอร์ที่ใช้ฉนวนน้ำยาของตู้เย็นหรือเครื่องปรับอากาศที่ใช้กับไฟเฟสเดียวนั้นจะ ใช้ตัวประจุต่ออยู่ด้วยซึ่งจะได้กล่าวถึงอีกทีหนึ่ง

2. ตัวหมุน (rotor) เป็นแบบกรงกระรอกธรรมดาซึ่งอาจจะมี 2กรงซ้อนกันหรือ กรงเดียวก็ได้แล้วแต่จุดประสงค์ของการใช้งาน ตัวนำที่ฝังอยู่ในตัวหมุนเป็นรูปกรงกระ รอกนี้อาจจะฝังเฉียง ๆ (skew) ก็ได้ ที่แกนของตัวหมุนสวิตช์หนีศูนย์กลางติดอยู่ด้วย ทั้งนี้ เพื่อตัดขาดเริ่มทำให้หมุนออกไปหลังจากที่มอเตอร์มีความเร็วประมาณ 75% ของ synchronous

วงจรของมอเตอร์ชนิดนี้ได้จากรูป 4 และรูปที่ 5 จากรูปที่ 5 พบว่ามีความต้านทาน ที่มีค่าสูงอีก 1 ตัวต่ออนุกรมเข้ากับขดทำให้หมุน (starting winding) ความต้านทานนี้อาจไม่ต้องใช้ก็ได้ ถ้าหากว่าความต้านทานของขดเริ่มทำให้หมุนมีค่าสูงพอ



รูปที่ 5



รูปที่ 6

จากคุณสมบัติของขดลวดทั้งสองที่กล่าวมาแล้ว จึงทำให้กระแส I_1 และ I_2 มีมุมแตกต่างกันเกือบ 90 องศา ดังรูปที่ 6 กระแส I_1 มาที่หลัง (lag) แรงเคลื่อนไฟ V ไปเห็นมุมเล็กน้อยทั้งนี้เพราะค่าความต้านทานสูงกว่าค่า reactance มาก ฉะนั้นจึงทำให้กระแส I_1 เกือบทับกับ (inphase) V แต่ว่ากระแส I_2 อันเนื่องมาจากขดหลัก (Main winding) นั้นมีความต้านทานต่ำแต่ reactance สูง ดังนั้นจึงทำให้ I_2 มาที่หลัง V เกือบ 90 องศา เมื่อเป็นเช่นนั้นจึงทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้น เพื่อใช้ในการเริ่มหมุนของมอเตอร์ ส่วนสวิตช์หนีศูนย์กลาง s นี้ จะทำหน้าที่ตัดไฟของขดเริ่มหมุน (starting winding) ออกไป หลังจากที่ยังมอเตอร์วิ่งได้เกือบใกล้ความเร็วปกติหรือประมาณที่ 75% ของความเร็วที่ synchronous

มอเตอร์แบบนี้มีแรงบิดเริ่มแรกประมาณ 1 ถึง 2 เท่าของแรงบิดที่ปกติ โดยใช้กระแสเริ่มแรกตั้งแต่ 5 ถึง 7 เท่าของกระแสที่ปกติจึงทำให้เหมาะสมในการใช้งานกับเครื่องกลึงชนิดเล็ก ตัวแยกโยกโดยอาศัยแรงหนีศูนย์กลาง (centrifugal separators) และตัวเป่า (blowers) เหล่านี้เป็นต้น

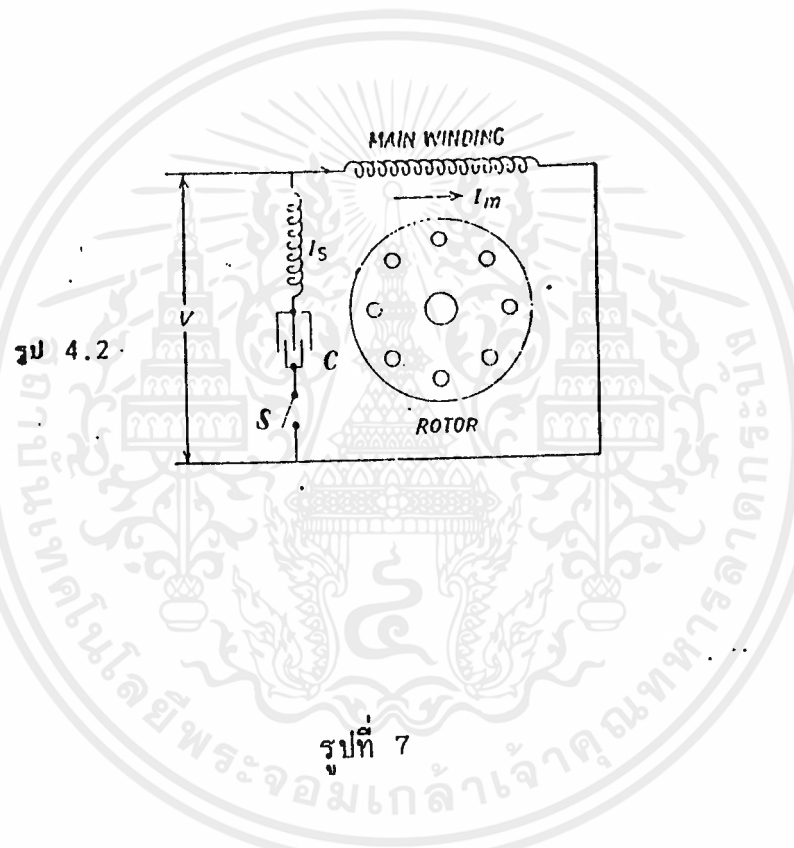
ทิศทางการหมุนของมอเตอร์เหล่านี้กลับทิศได้โดยการสลับขั้วต่อไฟของขดใดหนึ่งจาก 2 ขดนั้น (แต่ไม่ใช่สลับทั้ง 2 ขด) หลังจากนั้นจึงจ่ายไฟให้กับขดทั้งสอง ก็จะทำให้มอเตอร์หมุนกลับทิศ มอเตอร์แบบนี้บางทีก็เรียกว่า "มอเตอร์ที่เริ่มหมุนโดยใช้ความต้านทาน" นอกจากมอเตอร์แบบที่กล่าวข้างบนแล้ว ยังมีมอเตอร์แบบอื่น ๆ อีก เช่น motor เป็นตัวแยกโยก มี 2 แบบคือ แบบ capacitor-start induction run และ capacitor-start capacitor run ดังนั้นเพื่อแยกให้เห็นถึงความแตกต่างของมอเตอร์ทั้ง 2 ชนิดนี้จึงแยกได้ดังต่อไปนี้

มอเตอร์ชนิดเริ่มหมุนด้วยตัวประจุและวิ่งด้วยการเหนี่ยวนำ (Capacitor

Start Induction-Run Motor) มอเตอร์แบบนี้ก็มีโครงสร้างคล้ายกับแบบ split-phase motor ต่างกันที่ว่ามีมอเตอร์แบบนี้ทำให้กระแส I_1 และ I_2 มีเฟสแยกกัน โดยใช้ตัวประจุหรือตัวควบแน่น (capacitor or condenser) ต่ออนุกรมเข้ากับขดเริ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้หมุน (starting winding) ดังรูปที่ 7 ตัวประจุไฟฟ้าที่ใช้เป็นชนิดสารละลาย (electrolytic) ดังนั้นจึงต้องต่อขั้วขากและลบให้ถูกต้องด้วย ตัวประจุนี้จะโดนตัดออกไปโดยสวิตช์หนึ่ศูนย์กลางหลังจากที่มันมีความเร็วประมาณ 75% ของความเร็วที่ synchronous ตัวประจุนี้ติดอยู่ที่เปลือกหรือแยกออกต่างหากจากตัวมอเตอร์ก็ได้

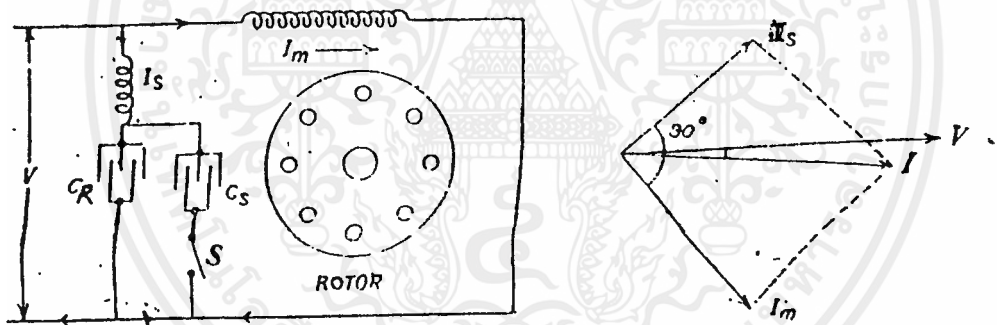


กระแส I_m นี้มาที่หลัง V เป็นมุมใหญ่มุมหนึ่ง ในขณะที่เดียวกัน I_s มาก่อน V เป็นมุมหนึ่งเช่นกัน ดังนั้นจึงทำให้ได้กระแสลัพท์ I ซึ่งเกือบจะทับกับ V ดังนั้นจึงทำให้แรงบิดเริ่มแรกสูง ซึ่งทำให้เหมาะสมที่จะนำไปขับตัวอัด (compressor) ปั้นเครื่องผสมเหนียว (doughmixers) และ อื่น ๆ

มอเตอร์ชนิดที่ใช้ตัวประจุทั้งในขณะที่หมุนเริ่มแรกและในขณะที่วิ่งหรือทำงานตามปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Capacitor-Start Capacitor-Run Motor) มอเตอร์แบบนี้มีตัวประจุไฟ 2 ตัวคือ C_s และ C_r รูปที่ 8 ตัว C_s ซึ่งใช้เป็นตัวทำให้มอเตอร์เริ่มหมุนนี้ มีความจุเกือบ 3 เท่าของ C_r ซึ่งใช้สำหรับวิ่งและเป็นตัวประจุแบบชนิด paper ตัว C_s นี้จะโดนตัดออกไปโดยอัตโนมัติ หลังจากที่มอเตอร์หมุนได้ใกล้เคียงความเร็วที่นิกัด ในการตัด C_s นั้นนอกจากใช้สวิตช์หนีศูนย์กลางเป็นตัวตัดแล้วก็อาจใช้ current coil relay เป็นตัวตัดก็ได้ ส่วนใหญ่ในปัจจุบันนี้นิยมใช้ current coil relay เป็นตัวตัด โดยการใช้ C_r ที่เหมาะสมจึงทำให้กระแส I_s และ I_m แตกต่างกันเกือบ 90 องศา (ดูรูปที่ 9) ซึ่งทำให้เหมือนกับว่ามอเตอร์นั้นได้รับไฟจากไฟ 2 เฟส



รูปที่ 8

รูปที่ 9

ข้อดีของการต่อตัวประจุขนาดเล็กไว้ในวงจรของมอเตอร์ก็คือ

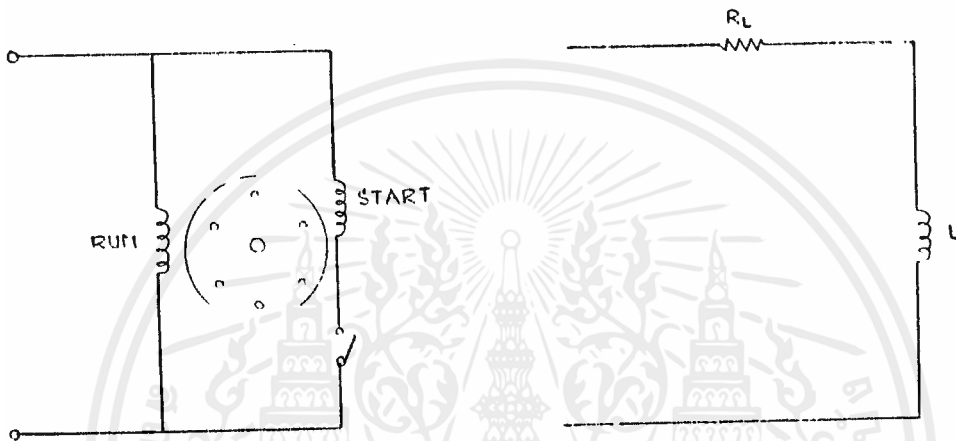
- 1) ทำให้สามารถทน over-load ได้ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) มีตัวประกอบกำลัง (p.f) สูงขึ้นกว่าเดิม

3) ทำให้วิ่งได้เร็วกว่าซึ่งเป็นสิ่งที่ปรารถนามากในการใช้ในห้องทดลองหรือสำนักงาน

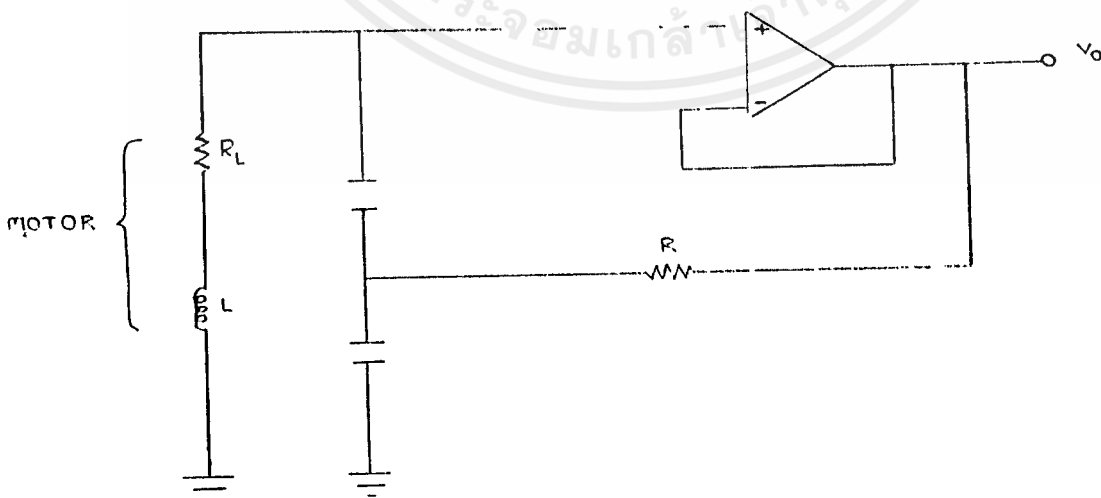
จากที่กล่าวมาเป็นการทำงานของมอเตอร์ single-phase สามารถเทียบเคียงวงจรสมมูลของมอเตอร์ได้ว่าจะประกอบด้วย ความต้านทานของขดลวด และค่าอินดักแตนท์ดังรูปที่ 10 และรูปที่ 11



รูปที่ 10

รูปที่ 11

จากวงจรเทียบเคียง เมื่อนำมาต่อร่วมกับวงจรดังรูปที่ 12



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 12

จากสมการที่ (1) และ (2) เป็นเงื่อนไขในการออสซิลเลท คือ $R_L = -R$ และ

$$jX_L = -jX_C$$

$$\therefore \text{ความถี่ที่เกิดการออสซิลเลท } f_o = 1/(2\pi\sqrt{LC}) \dots\dots\dots(7)$$

ซึ่งจากสมการที่ 7 นั้นถ้าเราสามารถปรับค่า c ในวงจรดังรูปที่ 12 แล้วจะเป็นผลทำให้ความถี่ที่เกิดการออสซิลเลท มีการเปลี่ยนแปลง ไปตามสมการที่ (7) ซึ่งผลของการเปลี่ยนแปลงความถี่นี้เองจะเป็นผลทำให้ความเร็วของมอเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยตามสมการที่ (8)

$$N = \frac{120 f}{P} \dots\dots\dots(8)$$

เมื่อ f คือ ความถี่ที่เกิดการออสซิลเลท Hz

P คือ จำนวนขั้วแม่เหล็กทั้งหมดที่มีอยู่ pole

N คือ ความเร็วที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุน rpm

การหาค่าความต้านทานของมอเตอร์

จะใช้กฎของโอห์มในการหาโดยการป้อนไฟกระแสตรงเข้าไปที่มอเตอร์ บันทึกกระแส บันทึกแรงดัน แล้วคำนวณหาค่า R_L ตามสมการข้างล่างนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_L = V_1 / I_1 \dots\dots\dots (9)$$

การหาค่า L ของมอเตอร์

การหาค่า L ของมอเตอร์นั้นมีหลายวิธี อาจใช้มิเตอร์วัด L ทำการวัดก็ได้ แต่ในที่นี้จะแสดงการวัดโดยการป้อน สัญญาณแรงดันรูปคลื่นไซน์ให้กับมอเตอร์แล้วบันทึก waveform ของกระแส แรงดัน และความถี่ที่ป้อนนั้น ซึ่งขณะที่ป้อนนั้นให้ทำการจับ rotor ไม่ให้หมุน จากนั้นนำค่าที่มามีค่าแอมพลิจูดของมอเตอร์ คือ

$$Z = V_1 / I_1 \dots\dots\dots (10)$$

$$Z = \sqrt{(R_L^2 + X_L^2)} \dots\dots\dots (11)$$

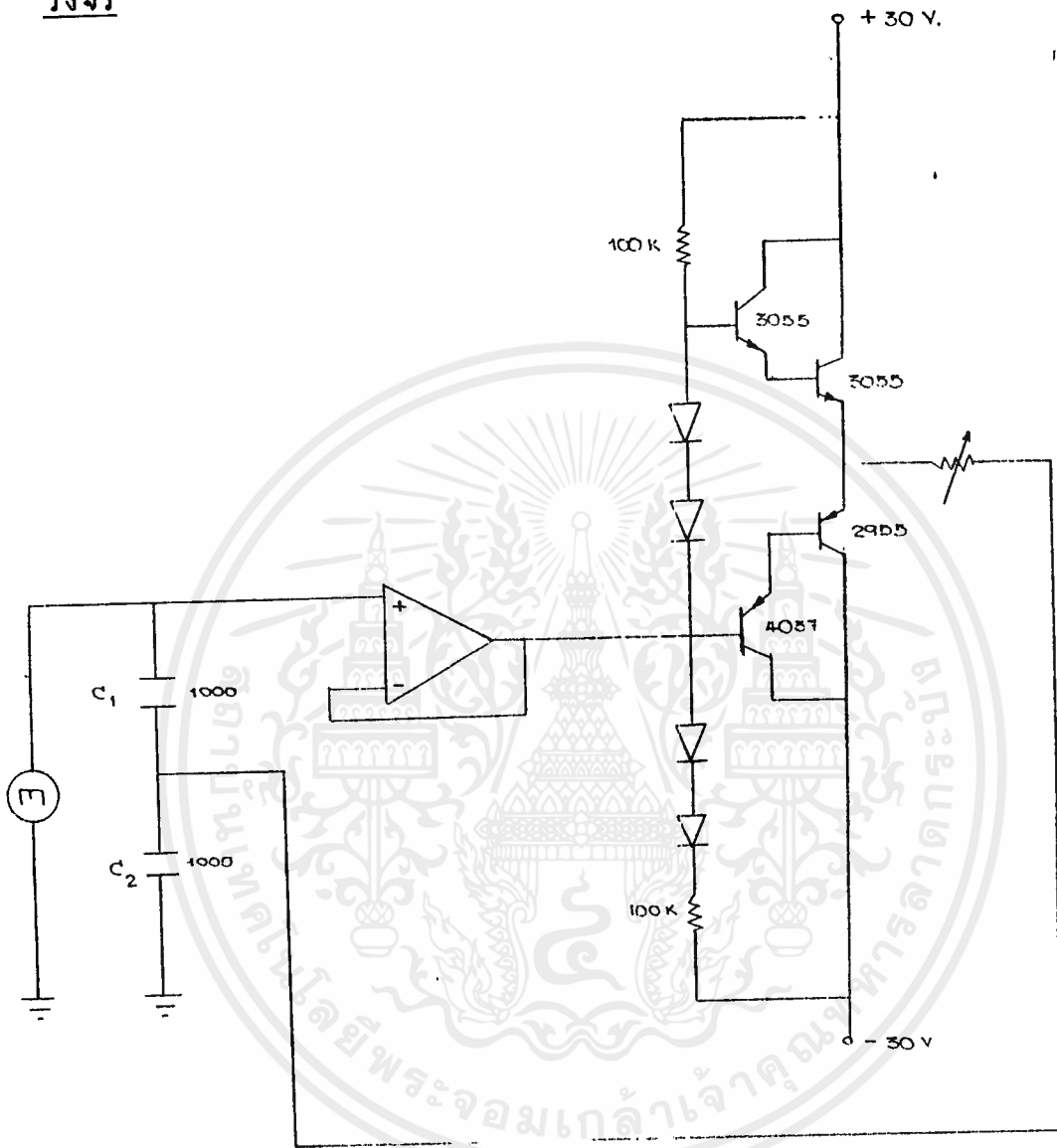
$$X_L = \sqrt{(Z^2 - R_L^2)} \dots\dots\dots (12)$$

จาก (12) เราสามารถหาค่า L ของมอเตอร์ได้

$$L = X_L / (2\pi f_o) \dots\dots\dots (13)$$

วงจรและผลการทดลอง

วงจร



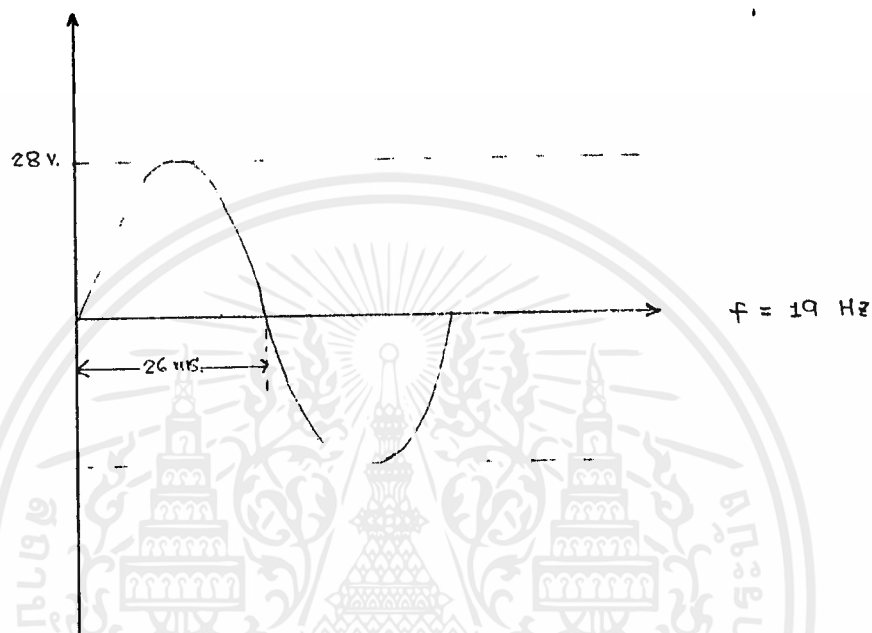
จากแนวความคิดนั้น เราสามารถปรับความเร็วของมอเตอร์ได้ โดยการเปลี่ยนแปลงค่า C_1 และ C_2 ของวงจร ซึ่งผลที่ได้จะทำให้ความถี่ที่ออสซิลเลทมีค่าเปลี่ยนแปลง เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์ก็จะเปลี่ยนไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

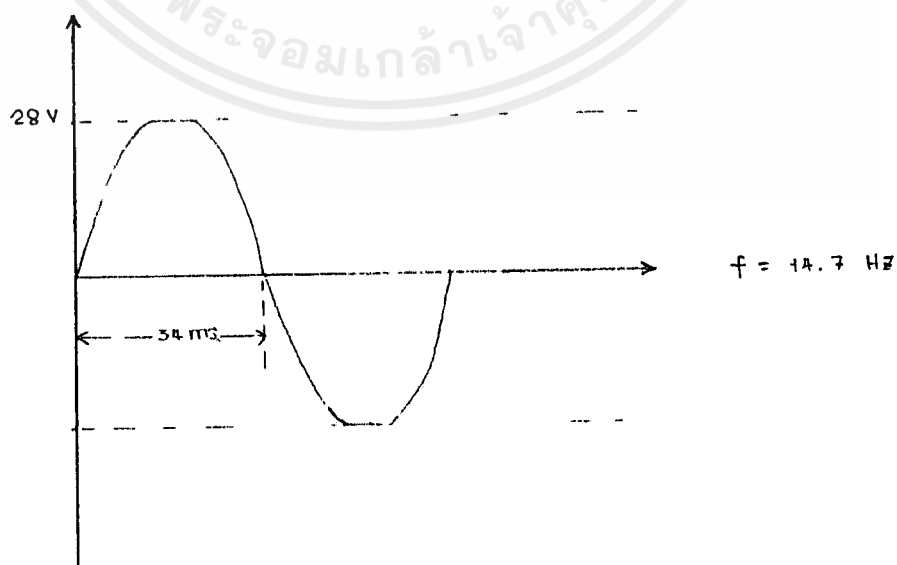
ผลการทดลอง

รูปคลื่นที่ได้ออกมา ที่มอเตอร์เมื่อเปลี่ยนค่า C ต่าง ๆ กัน

$$\text{ให้ } C_1 = 470 \mu\text{F} \quad C_2 = 470 \mu\text{F}$$



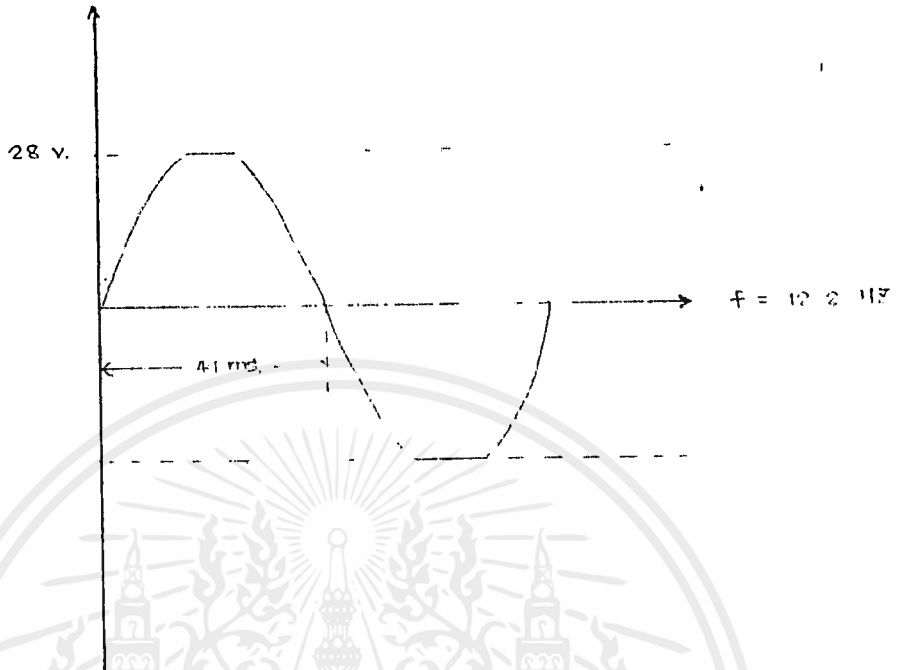
$$\text{ให้ } C_1 = 470 \mu\text{F} \quad C_2 = 1000 \mu\text{F}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ $C_1 = 470 \mu F$

$C_2 = 2200 \mu F$



เมื่อเราปรับค่า R เราก็สามารถปรับความเร็วของมอเตอร์ได้นั้นคือความถี่ของมอเตอร์ก็เปลี่ยนตามด้วย

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงพลังงาน

การเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า Faraday ได้ทำการทดลอง และค้นพบความจริงเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขดลวดอันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงผ่านขดลวดนั้นไปมา และเขาได้ทำการศึกษาต่อไปโดยรู้ได้จากการทดลองว่าการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้านั้น เกิดขึ้นได้จากวิธีการดังต่อไปนี้

1) โดยการให้ตัวนำเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กที่หยุดนิ่งอยู่กับที่

2) โดยการให้สนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ตัดผ่านตัวนำที่หยุดอยู่กับที่

3) โดยการเปลี่ยนจำนวนของเส้นแรงแม่เหล็กที่ตัดผ่านขดลวดนั้น

วิธีการหนึ่งนั้นนำไปใช้ในการทำเครื่องกำเนิดกระแสไฟตรง วิธีการที่ 2 ใช้กับเครื่องกำเนิดกระแสไฟสลับ และวิธีการที่สาม ใช้กับการเหนี่ยวนำขดลวด และหม้อแปลงไฟฟ้า ถึงแม้กระนั้นก็ตาม วิธีการสามนี้อาจพิจารณานำไปใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วย ถ้าหากพิจารณาว่าขดลวดนั้น เป็นหน่วยที่ให้กำเนิดกำลังไฟฟ้า แทนที่จะคิดว่าเป็นตัวนำตัวนำตัวเดียว หรือด้านหนึ่งของขดลวดเท่านั้น วิธีการทั้ง 3 ข้างบนนี้เป็นกฎของการตัดผ่านเส้นแรงแม่เหล็ก

กฎของการเหนี่ยวนำ ในปี 1831 Faraday ได้ค้นพบกฎเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้า ต่อมาภายหลัง Lenz ได้ทำการศึกษา และสรุปกฎเหล่านี้คือ กฎข้อที่หนึ่ง เรียกว่ากฎของ Lenz ส่วนกฎข้อที่สอง เป็นกฎของ Faraday ดังต่อไปนี้

กฎข้อที่ 1 กล่าวว่า ในวงจรปิดใดที่มีการเปลี่ยนแปลงการไหลของกระแสในวงจรย่อมทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นในวงจรมานั้น โดยแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวงจร มีทิศทางตรงกันข้ามกับการเปลี่ยนแปลงการไหลของกระแสในวงจรมานั้น

กฎข้อที่ 2 กล่าวว่า การเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างปลายของขดลวด หรือ loop อันหนึ่งนั้น เป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กที่ล้อมรอบขดลวดนั้นๆ หรือการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างปลายของแท่งตัวนำอันหนึ่งนั้น เป็นสัดส่วนโดยตรงกับการที่ตัวนำตัดผ่านเส้นแรงแม่เหล็กนั้นๆ ต่อหนึ่งหน่วยเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรแม่เหล็ก (Maganetic circuit)

เราทราบแล้วว่าเมื่อมีกระแสไหลผ่านเส้นลวดตัวนำ จะทำให้เกิดสนามขึ้นรอบๆ ตัวนำนั้น ในที่นี้จะกล่าวถึงวงจรแม่เหล็กโดยสังเขป เพื่อเป็นพื้นฐานเท่านั้น

ในวงจรไฟฟ้า เรามีกฎของ ohm ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส แรงเคลื่อนไฟฟ้า และความต้านทาน ส่วนในวงจรแม่เหล็กก็มีความสัมพันธ์ที่คล้ายคลึงกันอันหนึ่ง คือ

$$\text{เส้นแรงแม่เหล็ก} = \text{แรงเคลื่อนแม่เหล็ก} / \text{ความต้านทานเส้นแรงแม่เหล็ก}$$

สำหรับวงจรแม่เหล็กนี้สามารถนำกฎของ Kirchoff มาใช้ได้เช่นเดียวกับวงจรไฟฟ้า

โดยไม่คำนึงถึงว่าวงจรแม่เหล็กจะเป็นแบบอนุกรมหรือขนาน ต่างก็มีหลักเกณฑ์อันเดียวกัน

ข้อสำคัญก็คือ ต้องรู้จักทำการเปรียบเทียบว่าตัวแทนของสัญลักษณ์ในวงจรแม่เหล็กนั้น

เปรียบเทียบได้กับสัญลักษณ์ตัวไหนในวงจรไฟฟ้า ดังเช่น m.m.f. เปรียบเทียบได้กับ e.m.f.

เปรียบเทียบได้กับกระแส I และ reluctance เปรียบเทียบได้กับความต้านทาน R เป็นต้น

โดยที่ในวงจรแม่เหล็กที่เป็นแบบอนุกรมนั้น applied m.m.f. มีค่าเท่ากับผลบวกของ

reluctance drop ในวงจรนั้น ในขณะเดียวกัน สำหรับวงจรขนานของวงจรแม่เหล็ก

m.m.f. ที่ใส่เข้าไปในแต่ละ path มีค่าเท่ากัน แต่ flux ทั้งหมดที่เกิดขึ้นนั้น จะแบ่ง

แยกไปตาม path ต่างๆที่ต่อขนานกัน โดยที่ flux (เส้นแรงแม่เหล็ก) นั้นเป็นส่วนผกผัน

กับ reluctance ซึ่งสอดคล้องกับวงจรไฟฟ้าเช่นกัน

แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetomotive force) m.m.f.

m.m.f. คือ พลังงานรูปหนึ่งที่ใช้ในการเคลื่อนที่หนึ่งหน่วยขั้วแม่เหล็กให้วิ่งรอบ

วงจรแม่เหล็กหนึ่งรอบ หรืออาจพิจารณาว่าเป็นความสามารถในการทำให้เกิดเส้นแรง

แม่เหล็กของขดลวดใดขดลวดหนึ่ง

m.m.f. ในวงจรแม่เหล็กนั้นเป็นส่วนโดยตรงกับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดกับจำนวน

รอบ (turn) ของขดนั้น และมีหน่วยเป็น แอมป์-รอบ (Amp-turn)

$$F = m.m.f. = NI$$

เมื่อ N = จำนวนรอบของขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I = กระแสเป็น ampere

ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Intensity of magnetic field = H)

ก็คือความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ออกแรงกระทำกับหนึ่งขั้วแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น

Amp-turn/metre หรือ Amp/metre ในหน่วย NKS ส่วนในระบบ CGS มีหน่วยเป็น (oersted) หรือ gilbert ต่อ ซม. สำหรับในตัวกลางที่เป็นอากาศหรืออื่นๆนั้น ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (field intensity) มีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก B (flux density = B) นั่นคือ $B = \mu H$ เมื่อ B มีหน่วยเป็น Weber/m²

ในระบบ MKS แต่ในระบบ CGS มีหน่วยเป็น maxwell/cm² (gauss) หรือ 10,000 gauss = 1 Wb/m² เมื่อ μ คือ สภาพการซึมซาบของแม่เหล็ก (permeability) ไม่มีหน่วย

H คือ field intensity หรือ magnetic potential gradient หรือเรียกว่า m.m.f. gradient ก็ได้

สภาพการซึมซาบและความต้านทานทางแม่เหล็ก สภาพการซึมซาบของแม่เหล็ก ก็

คือ ตัวกลางตัวหนึ่งที่สามารถทำให้เกิดสนาม หรือเส้นแรงแม่เหล็กได้มากน้อยแตกต่างกันไป เช่น ถ้ามีขดลวดขดหนึ่งพันอยู่รอบแกนไม้ โดยที่มีกระแสจำนวนหนึ่งไหลผ่านขดลวดนี้ ก็ทำ

ให้เกิดสนาม หรือเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นจำนวนหนึ่ง ในทำนองเดียวกัน ถ้าเราใช้แกนเหล็ก ขนาดเท่ากับแกนไม้ใส่เข้าไปแทนในขดลวดนั้น แล้วให้กระแสไฟจำนวนเดียวกันไหลผ่านขดลวดนั้น จะทำให้ได้สนาม หรือเส้นแรงแม่เหล็กมากกว่า เมื่อมีแกนเป็นไม้ นี่ก็แสดงว่า

แกนเหล็กมีสภาพการซึมซาบทางแม่เหล็กสูงกว่าไม้ ค่า เมื่อเป็นอากาศนั้นเท่ากับ 1 ในระบบ CGS ค่า นี้ยังแสดงไว้ในรูปอัตราส่วนของ B/H ด้วย โดยที่ B เป็น flux density และ H เป็น field intensity

$$B = \mu H$$

ความต้านทานทางแม่เหล็ก (Reluctance =) ก็คือ ความต้านทานที่เกิดขึ้นใน

วงจรมแม่เหล็ก ซึ่งอาจจะเป็นอากาศ หรือวัสดุอะไรก็ได้ที่อยู่ในบริเวณที่เส้นแรงแม่เหล็กส่งอำนาจไปถึง จะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับชนิดของสิ่งนั้นๆ ความต้านทานนี้จะต้านทานการส่งเส้นแรงแม่เหล็กที่ออกจากแหล่งกำเนิดเส้นแรงให้ลดลงไป นี่เป็นส่วนโดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับความยาว l ที่เส้นแรงผ่านไปเพื่อให้ครบวงจรของตัวมันเอง และเป็นสัดส่วนผกผันกับ
พ.ท. A ที่เส้นแรงผ่าน รวมทั้งเป็นสัดส่วนผกผันกับ μ_r ฉะนั้นในอากาศจึงได้ว่า

$$R = \frac{l}{\mu_0 A} \quad (\because \mu_r = 1)$$

วงจรมแม่เหล็กประกอบขึ้นด้วยวัสดุแม่เหล็กที่มีความซึมซาบสูง (μ) มากมาย
ส่วนประกอบที่มีความซึมซาบสูง (μ) นี้ จะเป็นผลให้เกิดสนามแม่เหล็กที่มีขนาดและทิศ
ทางตามลักษณะโครงสร้าง โดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็น 3 มิติ แต่อย่างไรก็ตาม ปัญหาใน
การหาคำตอบของสนามไฟฟ้า 3 มิติที่ยู่ยากสามารถใช้หลักการของวงจรมแม่เหล็ก 1 มิติ ในการ
แก้ปัญหามีผลลัพธ์เป็นที่ยอมรับกัน

ตัวอย่างเช่น วงจรมแม่เหล็กที่แสดงในรูป 1.1 สมมติให้แกนประกอบจากวัสดุที่มีค่า
ความซึมซาบ (μ) ของอากาศรอบๆแกน และถูกพันด้วยขดลวดเหนี่ยวนำ N รอบ ซึ่งขึ้นอยู่
กับแหล่งจ่ายกระแส I ขดลวดเหนี่ยวนำจะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นในแกน ความสัมพันธ์
ระหว่างกระแส I และ ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก H หาได้จากการอินทิเกรตเชิงเส้นรอบ
ผิวปิดของความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ซึ่งเท่ากับ กระแสทั้งหมดที่ผ่านเข้าไปในผิวปิด
แสดงดังสมการ

$$\oint H \cdot dl = \int J \cdot da$$

โดย H = magnetic field intensity

J = current density

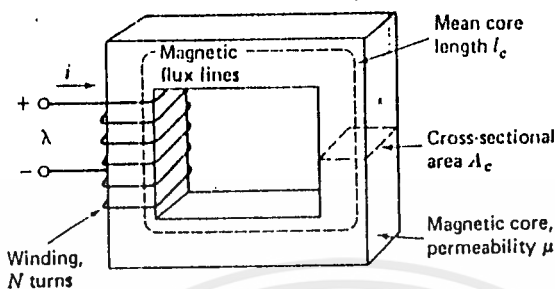


Fig. 1-1. Simple magnetic circuit.

จากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่า แหล่งจ่ายพลังงานที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในแกนคือ NI (ampere-turn product) เรียกอีกอย่างว่า แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (magnetomotive force: m.m.f) รูปที่ 1.1 แสดงเพียงขดลวด 1 ขด แต่ในลักษณะของหม้อแปลงจะมีขดลวดอย่างน้อย 2 ขด ซึ่งผลลัพธ์คือ ผลรวมของ NI ทั้งหมด

ในการนิยามหาความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำในแกน จะใช้การอินทิกรัลเชิงเส้น H ซึ่งจะได้ผลทางสเกลาร์ คือ $H \cdot l_c$ อัตราส่วนของ m.m.f. กับ ความเข้มสนามแม่เหล็ก หาได้จากสมการ

$$\mathcal{F} = NI = H \cdot l_c \quad \text{----- 1.1}$$

ทิศทางของ H หาได้จากกฎมือขวา (right hand rule) ซึ่งมี 2 สภาวะ

1. กระแสสมมติไหลในทิศทางตามกฎมือขวา คือ หัวแม่มือชี้ทิศทางของกระแส และนิ้วที่เหลือแสดงทิศทางของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเกิดจากค่ากระแสนั้น
2. กรณีขดลวดพันรอบแกนในทิศทางวนขวา หัวแม่มือจะแสดงทิศทางของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และนิ้วที่เหลือแสดงทิศทางไหลของกระแส

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า H และ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก B คือ $B = \mu H$ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าแม่เหล็ก B คือ อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$B = \mu H$$

-----1.2

โดย คือ สภาพการซึมซาบ (permeability) และ B มีหน่วยเป็น webers per square meter หรือ tesla (T) และ มีหน่วยเป็น webers per ampere turn meter หรือ henrys per meter และค่าของความซึมซาบ () ในอวกาศ (free space) $= 4\pi \times 10^{-7}$ และค่าของ μ ของวัสดุแม่เหล็กคือ μ_r โดย μ_r จะเป็นค่าคงที่ ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของสารวัสดุแม่เหล็กแต่ละชนิด และมีผลในการสร้างความเข้มสนามแม่เหล็กแต่ละชนิด และมีผลในการสร้างความเข้มสนามแม่เหล็กที่แตกต่างกัน

ฟลักซ์แม่เหล็ก (ϕ) ที่พบในพื้นที่ใดๆหาได้จาก การอินทิเกรตพื้นผิวของส่วนประกอบธรรมดาๆ ของ B แสดงดังสมการ

$$\phi = \int_{\text{surface}} B \cdot da \quad \text{-----1.3}$$

เมื่อกำหนดให้ ϕ มีหน่วยเป็น webers และจากทฤษฎีสถิตที่มีค่าความต่อเนื่องของฟลักซ์ แสดงดังสมการ

$$\int_{\text{closed surface}} B \cdot da = 0 \quad \text{-----1.4}$$

จากสมการ 1.4 จะเห็นได้ว่า ปริมาณฟลักซ์แม่เหล็กทั้งหมดที่พบในพื้นที่ผิวปิด 3 มิติ มีผลลัพธ์เป็น 0 ค่าฟลักซ์ที่อยู่ภายในผิวปิดซึ่งมีค่าหนึ่งจะมากกว่าฟลักซ์ของพื้นที่ผิวที่ล้อมรอบ และจะไม่คิดถึงฟลักซ์ที่อยู่ภายนอกผิวปิดจะได้ว่า

$$\phi_c = B_c A_c \quad \text{-----1.5}$$

ในกรณีของหม้อแปลงจะคิดเช่นเดียวกับ กรณีของผิวปิดในรูป 1.1

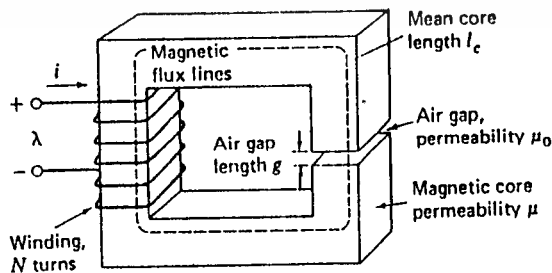


Fig. 1-2. Magnetic circuit with air gap.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 1.2 จะแสดงวงจรมแม่เหล็กที่ประกอบด้วย ช่องอากาศ โดยมีช่องว่างระยะทาง g ในการพิจารณาวจรมแม่เหล็กจะพิจารณาเป็นวงจรมแม่เหล็ก 2 วงจรมต่ออนุกรมกัน และค่าความหนาแน่นสนามในพื้นที่ A_c และ A_g ดังนี้

$$B_c = \phi / A_c \quad \text{-----1.6}$$

$$B_g = \phi / A_g \quad \text{-----1.7}$$

ค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไปออกมาภายนอกเนื่องจากการเหนี่ยวนำใน ช่องว่างอากาศ แสดงดังรูป 1.3 จะมีผลให้สนามแม่เหล็กในพื้นที่ A_g มีค่าลดลง แต่ในที่นี้จะคิดว่าค่าสนามไฟฟ้าที่ไปออกมามีค่าน้อยมากจนแทบไม่มีผล

การประยุกต์สมการ 1.1 และ 1.2 ในวงจรมแม่เหล็ก

$$= NI = H_c l_c + H_g g \quad \text{-----1.9}$$

และ
$$= B_c l_c / \mu_0 + B_g g / \mu_0 \quad \text{-----1.10}$$

NI ในที่นี้ คือผลรวมของ แอมแปร์ - รอบ ประยุกต์ใช้ในวงจรมแม่เหล็ก แรงเคลื่อนแม่เหล็ก แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (NI) จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กในแกน และอีกส่วนหนึ่งจะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นในช่องว่างอากาศ (air gap)

จากสมการ 1.8 และ 1.10 สามารถเขียนในรูปของฟลักซ์รวม (ϕ) ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mathcal{F} = \phi l_c / A_c + \phi G / A_c \text{ -----1.11}$$

ถ้าไม่คิดสนามแม่เหล็กส่วนเกินรอบนอกที่เกิดจากช่องว่างอากาศ (air gap) โดยคิดเฉพาะสนามแม่เหล็กตลอดแนวเส้นตรงในช่องว่างอากาศ จะได้สมการของ reluctance ของแกน และช่องว่างอากาศ

$$R_c = l_c / \mu A_c \text{ -----1.12}$$

$$R_g = G / \mu_0 A_c \text{ -----1.13}$$

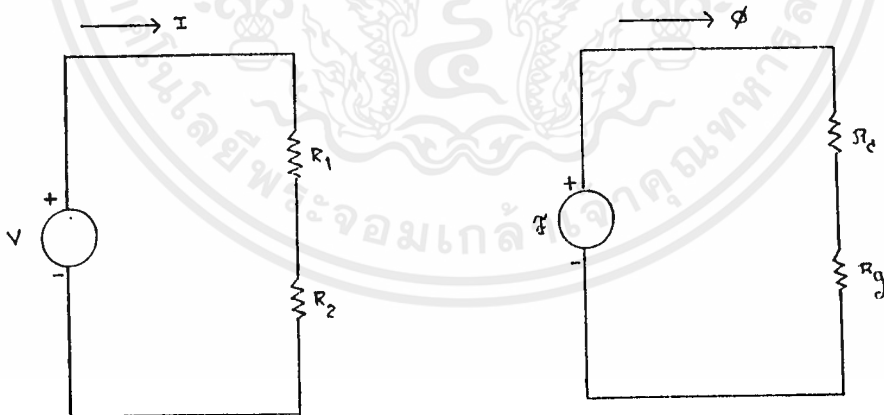
จะได้ว่า

$$\mathcal{F} = \phi (R_c + R_g) \text{ -----1.14}$$

เมื่อพิจารณาหาฟลักซ์ จะได้ว่า

$$\phi = \mathcal{F} / (R_c + R_g) \text{ -----1.15}$$

จากสมการ 1.14 และ 1.15 จะสามารถเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง กระแส และแรงเคลื่อนในวงจรไฟฟ้าแสดงดังรูป 1.4 a ซึ่งภายในวงจรไฟฟ้ามีแรงเคลื่อน V ขั้ว กระแส I ไปผ่าน R_1 และ R_2 ดังรูป ส่วนรูป 1.4 b จะแสดงคุณลักษณะการตอบสนอง ของวงจรแม่เหล็ก



Flux Linkage, Inductance and Energy

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กตามเวลา ย่อมมีการเหนี่ยวนำทำให้เกิด กระแสไฟฟ้าขึ้น จากกฎของฟาราเดย์ แสดงดังสมการ

$$\int_c \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = -d/dt \int B \cdot d\mathbf{a} \text{ -----1.16}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ 1.16 นั้นจะแสดงการอินทิกรัลเชิงเส้นของความเข้มสนามไฟฟ้า E รอบๆผิวปิด c จะเท่ากับ อัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กในผิวปิดนั้น โครงสร้างของแม่เหล็กที่เกิดจากการพันขดลวดแสดงดังรูป 1.2 ทางด้านซ้ายของสมการ 1.20 สนามไฟฟ้า E ในขดลวด มีค่าน้อยมาก ดังนั้นสมการทางด้านซ้ายสามารถที่จะลดมาเป็น แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ e (induced voltage) ที่ขดลวด ส่วนทางด้านขวาของสมการ 1.16 จุดสำคัญอยู่ที่แกนของฟลักซ์ และขดลวดที่ล้อมรอบฟลักซ์ มีจำนวน N รอบ ได้สมการใหม่ ดังนี้

$$e = N \frac{d\phi}{dt} = \frac{d\lambda}{dt} \quad \text{-----1.17}$$

เมื่อ $\lambda = N\phi$ ถูกเรียกว่าเป็น Flux Linkage ที่ผ่านขดลวด

ϕ = ค่า instantaneous ของฟลักซ์ที่แปรตามเวลา อยู่ในแกน

ทิศทางของ e (induced voltage) แสดงดังสมการ 1.17 ถ้าเป็นเครื่องหมายลบ(-) จะแสดงให้เห็นว่า ถ้าขดลวดถูก short circuit จะทำให้กระแสไหลโดยมีทิศทางตรงข้ามกับการเปลี่ยนแปลงของ flux linkage

สำหรับ วงจรแม่เหล็ก มีความสัมพันธ์ระหว่าง ϕ กับ I ในรูปของตัวเหนี่ยวนำ ดังนี้

$$L = \lambda / I \quad (\text{หน่วย henry}) \quad \text{-----1.18}$$

$$\text{และ} \quad L = N^2 \frac{B_c A_c}{l_c} = N^2 \frac{\mu_0 \mu_r}{G} \quad \text{-----1.19}$$

จากรูป 1.5 จะแสดงวงจรแม่เหล็ก ซึ่งประกอบด้วยช่องว่างของอากาศ (air gap) และขดลวด 2 ชุดซึ่งจะทำให้ได้แรงเคลื่อนแม่เหล็กรวม (total m.m.f.) ดังนี้

$$\mathcal{F} = NI = N_1 I_1 + N_2 I_2 \quad \text{-----1.20}$$

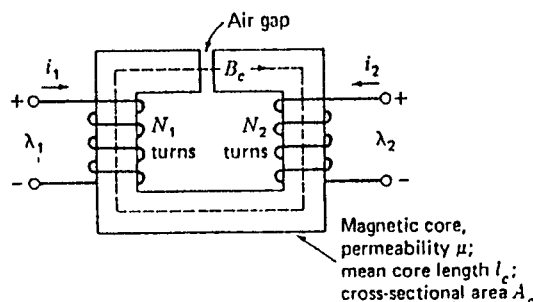


Fig. 1-5. Magnetic circuit with two windings.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากสมการ 1.15 สามารถจะหาฟังก์ชันที่เกิดขึ้นในแกน (core flux) ดังนี้

$$\phi = (N_1 I_1 + N_2 I_2) \mu_0 A_c / G \quad \text{-----1.21}$$

ในสมการ 1.21 ϕ คือ ผลรวมของ core flux ซึ่งเกิดจากการกระทำของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (m.m.f.) ทั้งสองในเวลาเดียวกัน

ถ้าสมการ 1.21 ถูกกระจายออกไปให้อยู่ในรูปของกระแสทางด้านใดด้านหนึ่ง

สามารถแสดงผลของ flux linkage ในขดลวด 1 ขด ได้ดังนี้

$$\lambda_1 = N_1 \phi = N_1^2 A_c I_1 \mu_0 / G + N_1 N_2 A_c I_2 \mu_0 / G \quad \text{-----1.22}$$

ซึ่งสามารถเขียนได้ ดังนี้

$$\lambda_1 = L_{11} I_1 + L_{12} I_2 \quad \text{-----1.23}$$

$$\text{เมื่อ } L_{11} = N_1^2 A_c \mu_0 / G \quad \text{-----1.24}$$

คือ ตัวเหนี่ยวนำของขดลวด 1 และ $L_{11} I_1$ ก็คือ flux linkage ในขดลวด 1

เพราะเกิดจากกระแส I_1 และค่าความเหนี่ยวนำรวมกันระหว่าง ขดลวด 1 และขดลวด 2

$$\text{คือ } L_{12} = N_1 N_2 A_c \mu_0 / G \quad \text{-----1.25}$$

และ $L_{12} I_2$ คือ flux linkage ขดลวด 1 ที่เกิดจากกระแส I_2 ของขดลวดที่ 2

ในทำนองเดียวกัน flux linkage ที่เกิดในขดลวดที่ 2 คือ

$$\lambda_2 = N_2 \phi = N_1 N_2 A_c I_1 \mu_0 / G + N_2^2 A_c I_2 \mu_0 / G \quad \text{-----1.26}$$

$$\text{หรือ } \lambda_2 = L_{21} I_1 + L_{22} I_2 \quad \text{-----1.27}$$

เมื่อ $L_{21} = L_{12}$ คือ ค่าความเหนี่ยวนำรวม และ

$$L_{22} = N_2^2 A_c \mu_0 / G \quad \text{-----1.28}$$

คือ ตัวเหนี่ยวนำของ coil 2

แทนค่าสมการ 1.18 ใน 1.17 จะได้

$$e = d(LI)/dt \quad \text{-----1.29}$$

สำหรับวงจรแม่เหล็กที่มีขดลวดขดเดียว และเป็นวงจรแม่เหล็กสถิต ซึ่งมีตัวเหนี่ยวนำคงที่ จากวงจรดังกล่าว จะได้สมการ ดังนี้

$$e = L di/dt$$

-----1.30

อย่างไรก็ตาม เครื่องมือทางเครื่องกลไฟฟ้าจะเปลี่ยนไปเป็นพลังงาน ดังเช่น
ตัวเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา จากสมการ 1.29 จะได้ดังนี้

$$e = L di/dt + idl/dt$$

-----1.31

กำลังไฟฟ้า (p) ของขดลวดในวงจรแม่เหล็ก ได้จากการวัดอัตราการเปลี่ยนแปลง
ของพลังงานในวงจร และได้หา แรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

$$p = IE = Id\lambda /dt$$

-----1.32

จะมีหน่วยเป็น watt หรือ จูล/วินาที การเปลี่ยนแปลงของพลังงานแม่เหล็กสะสม Δw ใน
วงจรแม่เหล็ก จากเวลา t_1 ถึง t_2 คือ

$$\Delta w = \int_{t_1}^{t_2} P dt = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Id$$

-----1.33

ในระบบ SI พลังงานสะสม w จะวัดในหน่วย จูล

สำหรับระบบขดลวดเดี่ยวของตัวเหนี่ยวนำคงที่ การเปลี่ยนแปลงของพลังงาน

แม่เหล็กสะสมเขียนได้ ดังนี้

$$\Delta w = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Id = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda d\lambda / L = (\lambda_2^2 - \lambda_1^2) / 2L$$

-----1.34

พลังแม่เหล็กสะสมรวม จะให้ค่าของ จะหาได้จาก = 0

$$w = \lambda^2 / 2L = L I^2 / 2$$

-----1.35

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ อาจารย์ สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์ เป็นอย่างสูง
ที่ได้ให้ข้อมูล ความรู้ และคำแนะนำปรึกษาในเรื่องต่างๆ แก่ผู้จัดทำ และ
ขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่ได้ช่วยเหลือ ในการทำปริญาณิพนธ์นี้จนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. B.W. WILLIAMS, " POWER ELECTRONICS DRIVERS AND APPLICATIONS "
2. ROBERT BOYLESSTAD , LOUIS NASHESKY " ELECTRONIC DEVICES AND CIRCUIT THEORY "



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้