



เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ
Static frequency converter (Induction heating)

โดย

นายชนันกร	กรวาทิน	39012085
นายเมธาวิ	ศรีเจริญ	39012100
นายสมศักดิ์	โกวิทศรีสุวัฒน์	39012109
นายอมร	อาทิตย์รุ่งอรุณ	39012118

เลขเรียกหนังสือ.....*ขพ นทศ ๙๖๓*
เลขทะเบียน.....
วัน เดือน ปี.....*19 ตค ๖๖*

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุมทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2541

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

๒๕๔๑

STATIC FREQUENCY CONVERTER
(Induction heating)

Mr.	CHONKON	KONVATHIN	39012085
Mr.	METAWEЕ	SRICHAREON	39012100
Mr.	SOMSAK	KOWITSRISUWAT	39012109
Mr.	AMORN	ARTIDRUNGARUN	39012118

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENT FOR THE DEGREE
BACHELOR OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

1998

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2541

สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม

ภาควิชา เทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

STATIC FREQUENCY CONVERTER (Induction heating)

คณะผู้จัดทำ

นายชนันกร	กรวาทิน	39012085
นายเมธาวิ	ศรีเจริญ	39012100
นายสมศักดิ์	โกวิทศรีสุวรรณ	39012109
นายอมร	อาทิตย์รุ่งอรุณ	39012118

อาจารย์ที่ปรึกษา.....

(อาจารย์สักริยา ชิตวงศ์)

อาจารย์ที่ปรึกษา.....

(อาจารย์ไสว พงศ์สวัสดิ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทคัดย่อ

พลังงานนั้นเป็นสิ่งที่ไม่สามารถสร้างขึ้นหรือทำลายได้ แต่สามารถที่จะเปลี่ยนรูปของพลังงานได้ ซึ่งในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อน จะต้องอาศัยสื่อสิ่งหนึ่ง

เครื่องให้ความร้อนแบบขดลวดเหนี่ยวนำ จะเป็นการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้อยู่ในรูปของพลังงานความร้อน โดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า , ปรากฏการณ์ผิว และการถ่ายเทความร้อน

ปริญญานิพนธ์ ฉบับนี้จะกล่าวถึง การศึกษาและการออกแบบเครื่องให้ความร้อนแบบขดลวดเหนี่ยวนำ โดยมีจุดประสงค์เพื่อการศึกษาหลักการทำงานและการออกแบบของวงจรซึ่งระบบอินเวอร์เตอร์ที่ออกแบบใช้ในโครงการนี้เป็นแบบฟูลบริดจ์เรโซแนนซ์ โดยอุปกรณ์สวิทช์ซึ่งที่ใช้จะเป็นจัมพอก เอส ซี อาร์ ความถี่ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้นั้นจะขึ้นอยู่กับค่าของโหลดคือ ค่าความเหนี่ยวนำ (L) และค่าคาปาซิเตอร์ (C)

Abstract

The Energy is not build or losses. But can be convert is energy other, By Electric Energy can convert to heat energy its want to something.

Induction heat can able to convert Electric Energy by Electromagnetic Theory, Skin effect and Heat transfer.

The Thesis is Education and designs of Induction heat by it have concept for Analysis and design of circuits.

The inverter system in project will be full bridge resonant and uested SCR for Switching. The frequency of voltage can abled load (inductive and capacitive)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ในการศึกษาและการปฏิบัติงานต่างๆทั้งหมดที่ผ่านมา ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา ที่ให้การสนับสนุนทุนทรัพย์ และคอยให้กำลังใจแก่ผู้จัดทำอีกทั้งยังได้รับความอนุเคราะห์จาก อาจารย์ สักกรียา ชิตวงษ์ และอาจารย์ ไสว พงศ์สวัสดิ์ เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

ขอกราบขอบพระคุณสำหรับ ผศ.ประภาส อุคคกิมพันธ์ และอาจารย์ทุก ๆ ท่านที่ให้ความช่วยเหลือ และให้คำปรึกษาต่างๆ ตลอดมา ข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อการทำงานทาง คณะผู้จัดทำ

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่สโตร์ ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองทำให้สามารถปฏิบัติงานได้เสร็จสมบูรณ์ รวมถึงเพื่อนๆที่ให้ความช่วยเหลือในการปฏิบัติงาน และคอยให้กำลังใจ

สุดท้ายนี้ คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณทุกท่านที่ได้ให้การสนับสนุน และคอยให้กำลังใจ แก่คณะผู้จัดทำเสมอมา

ชนันกร	กรวาทิน
เมธาวิ	ศรีเจริญ
สมศักดิ์	โกวิทศรีสุวรรณ
อมร	อาทิตย์รุ่งอรุณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่ 1	
เอส ซี อาร์	
1.1	บทนำ 1
1.2	หลักการทํางานของ เอส ซี อาร์ 2
1.3	ลักษณะสมบัติของ เอส ซีอาร์ 4
1.4	คุณลักษณะของ เอส ซี อาร์ ขณะนำกระแส 5
1.5	คุณลักษณะของ เอส ซี อาร์ ขณะหยุดนำกระแส 5
1.6	วิธีการทำให้ เอส ซี อาร์ หยุดนำกระแส 11
1.6.1	การหยุดนำกระแสของ เอส ซี อาร์ ในวงจรไฟกระแสตรง 11
1.6.2	วิธีการหยุดนำกระแสโดยการบีบบังคับ 13
1.	แบบ เอ (Class: A Self Commutated By Resonating The Load) 14
2.	แบบ บี (Class: B Self Commutated By An LC Circuit) 14
3.	แบบ ซี คือ ซี หรือ แอล ซี (Class: C C OR LC Switched by Another Load Carrying SCR) 15
4.	แบบ ดี คือ ซี หรือ แอล ซี (Class: D C OR LC Switch By Auxiliary SCR) 16
5.	แบบ อี (Class: E An External Pulse Source For Commutation) 17
6.	แบบ เอฟ (Class: F AC Line Commutation) 17
1.7	ระยะเวลาของสัญญาณทริกเกอร์ 18
1.8	ผลที่ทำให้ เอส ซี อาร์ นำกระแสโดยไม่มีกระแสชนวน 19
1.9	ข้อควรระวัง และการป้องกัน 20
1.10	การต่อเอส ซี อาร์ แบบอันดับ และแบบขนาน
1.10.1	การต่อเอส ซี อาร์ แบบอันดับ 21
1.10.2	การต่อเอส ซี อาร์ แบบขนาน 23
1.11	การพิจารณาขีดจำกัดของอุปกรณ์ไทรสเตอร์ 24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.11.1	พิกัดของแรงดัน ไทริสเตอร์	25
1.11.2	พิกัดของกระแส ไทริสเตอร์	25
1.11.3	พิกัดของอุณหภูมิ	26
1.11.4	พิกัดของเกต	27
1.12	ชนิดของไทริสเตอร์	
1.	PHASE – CONTROL THYRISTOR	28
2.	FAST – SWITCHING THYRISTOR	28
บทที่ 2		
ทฤษฎีการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ		
2.1	หลักการเบื้องต้น	29
2.2	ทฤษฎีการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ	33
2.2.1	การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำกับชิ้นงานอุดมคติ	33
2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับคุณสมบัติของชิ้นงาน	43
2.3.1	สภาพความต้านทานของโลหะกับอุณหภูมิ	43
2.3.2	ความซึมซาบของโลหะ กับอุณหภูมิ และความเข้มของสนามแม่เหล็ก	46
2.3.2	โครงสร้างทางโลหะของเหล็กผสมคาร์บอนกับอุณหภูมิ	46
2.4	สารที่ใช้ในการทำให้ชิ้นงานเย็นตัวลง และขบวนการที่มีชิ้นงานเย็นตัวลง	47
2.5	ทฤษฎี และวงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำ	52
2.5.1	การคำนวณวงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำ	52
บทที่ 3		
การแปลงผันแบบเต็มคลื่น 3 เฟส		
3.1	ทฤษฎี และหลักการทำงาน	60
บทที่ 4		
ระบบอินเวอร์เตอร์		
4.1	ทฤษฎี และหลักการทำงาน	65
บทที่ 5		
การวิเคราะห์ และออกแบบการทำงาน		
5.1	โครงสร้างของระบบ INDUCTION HEATING	71
5.2	ระบบคอนเวอร์เตอร์	71
5.3	ระบบอินเวอร์เตอร์	72

5.3.1 การคำนวณ และการออกแบบระบบอินเวอร์เตอร์	73
5.4 วงจรสับเบอร์	74
5.4.1 รูปแบบของวงจรสับเบอร์	75
5.4.2 การออกแบบวงจรสับเบอร์	77
5.4.3 การทำงานของวงจรสับเบอร์	80
5.4.4 การคำนวณ และออกแบบวงจรสับเบอร์	81
5.5 วงจรควบคุมการทริกเกตของคอนเวอร์เตอร์	82
5.6 วงจร ไอโซเลตส์ัญญาณของคอนเวอร์เตอร์	84
5.7 วงจร FULL BRIDGE INVERTER	85
5.8 วงจร PULSE TRIGGER GATE OF INVERTER	85
5.9 วงจร ไอโซเลตส์ัญญาณทริกเกต ซี อาร์ ของชุดอินเวอร์เตอร์	86
5.10 วงจรตัดต่อสัญญาณ	87
5.11 ZERO CROSSING	88
บทที่ 6	
ผลการทดลอง	
ผลการทดลองของคอนเวอร์เตอร์	90
ผลการทดลองของอินเวอร์เตอร์	92
บทที่ 7	
สรุปการทดลองและข้อเสนอแนะ	95
บรรณานุกรม	
ภาคผนวก	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

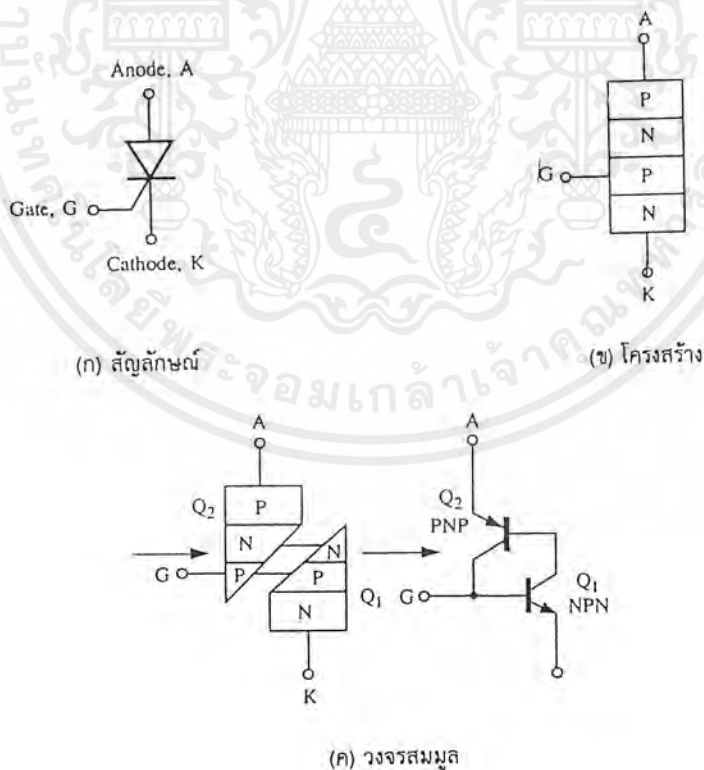
บทที่ 1

เอส ซี อาร์ (SCR)

1.1 บทนำ

เอส ซี อาร์ มีชื่อเต็มว่า “ซิลิคอน คอนโทรล เร็คติไฟเยอร์” (Silicon Controlled Rectifier) มันมีการใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมเพราะว่า เอส ซี อาร์ สามารถใช้กับค่ากระแสและแรงดันที่สูงกว่าไทรสเตอร์ชนิดอื่น ๆ ในปัจจุบัน เอส ซี อาร์ สามารถควบคุมกระแสได้มากกว่า 1,500 แอมแปร์

เมื่อพิจารณาสัญลักษณ์ของ เอส ซี อาร์ ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ซึ่งมีลักษณะที่คล้ายกับไดโอด และในทางไฟฟ้า เอส ซี อาร์ จะสามารถนำกระแสได้ทิศทางเดียวเช่นเดียวกับไดโอด แต่ เอส ซี อาร์ นี้จะมีส่วนที่ไม่เหมือนไดโอด คือ เอส ซี อาร์ มีขาเกตที่ใช้ในการจุดชนวนให้ตัวมันทำงาน

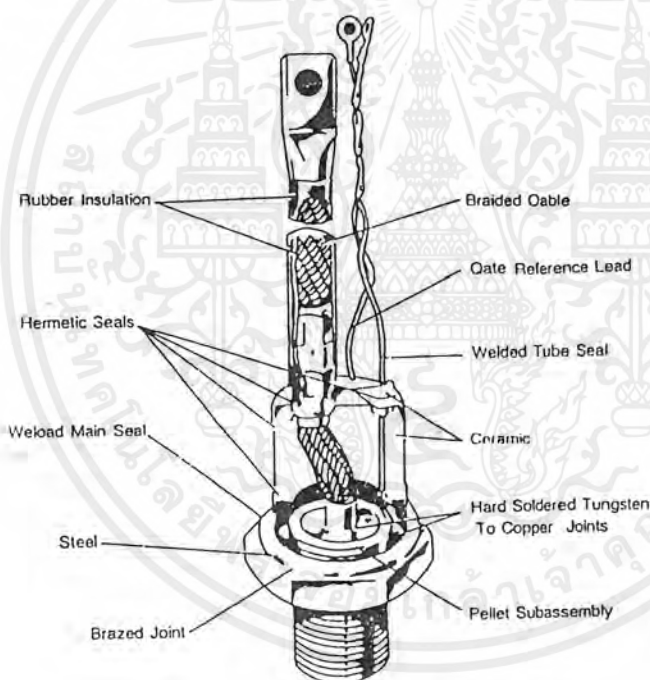


รูปที่ 1.1 เอส ซี อาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 1.1 แสดงโครงสร้างของ เอส ซี อาร์ ที่เป็นสารกึ่งตัวนำ 4 ชั้น คือ รอยต่อ พี-เอ็น-พี-เอ็น และมีขาต่อออกมาใช้งาน 3 ขา คือ แอนโนด (Anode), แคโทด (Cathode) และเกต (Gate) เมื่อพิจารณาจากโครงสร้างของ เอส ซี อาร์ สามารถแสดงแทนด้วยวงจรมูลของทรานซิสเตอร์ 2 ตัว คือชนิด พี-เอ็น-พี และชนิดเอ็น-พี-เอ็น ที่ต่อกัน ดังแสดงในรูปที่ 2(ค)

โดยขามิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ชนิด พี-เอ็น-พี (Q_2) จะเป็นขานอนโนด ขามิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ชนิด เอ็น-พี-เอ็น(Q_1) จะเป็นขาคะโทด และขาคอลเลกเตอร์ของทรานซิสเตอร์(Q_2) ที่ต่อร่วมกับขานอนโนดของทรานซิสเตอร์ (Q_1) จะเป็นขาเกต

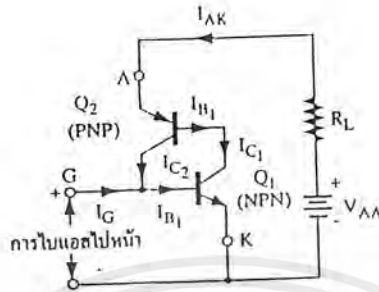


รูปที่ 1.2 แสดงโครงสร้างส่วนประกอบของ เอสซีอาร์

1.2 หลักการทำงานของ เอส ซี อาร์

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่า เอส ซี อาร์ เป็นอุปกรณ์ที่คล้ายกับไดโอดที่มีการทำงานอยู่ 2 สถานะ คือ สถานะนำกระแส (Conducting State) และสถานะไม่นำกระแส (Non Conducting State) แต่การนำกระแสของ เอส ซี อาร์ นั้นจะถูกควบคุมที่ขาเกต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.3 แสดงวงจรสมมูลย์การทำงานของ เอส ซี อาร์

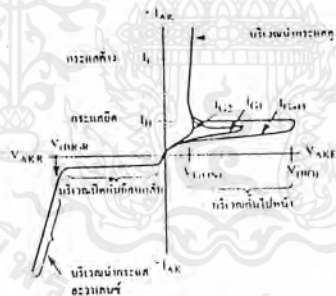
เมื่อพิจารณาการทำงานของ เอส ซี อาร์ จากวงจรที่แสดงในรูปที่ 1.3 โดยการต่อแหล่งจ่าย (V_{AA}) ขั้วบวกเข้ากับขั้วแอนโอด (A) และขั้วลบที่ขั้วแคโทด (K) ถ้าเราจ่ายแรงดันไบแอสไปหน้า (Forward Bias Voltage) ให้ระหว่างขั้วเกต (G) กับแคโทด (K) ของทรานซิสเตอร์ (Q_1) คือที่ขั้วเกตจะมีศักย์เป็นบวกเมื่อเทียบกับแคโทด ซึ่งจะมีกระแสเกต (I_G) ไหลเข้าขาเบสของทรานซิสเตอร์ของทรานซิสเตอร์ (Q_1) ทำให้ทรานซิสเตอร์ (Q_1) นำกระแส และเป็นเหตุให้มีกระแสคอลเลกเตอร์ (I_C) ไหลจากขาคอลเลกเตอร์ มาสู่ขั้วอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ (Q_1) ได้ แต่เนื่องจากกระแสคอลเลกเตอร์ (I_{C1}) ก็คือกระแสเบส (I_{B2}) ของทรานซิสเตอร์ (Q_2) จึงเท่ากับว่าเป็นการให้ไบแอสไปหน้าแก่ทรานซิสเตอร์ (Q_2) ด้วย และมีผลทำให้ทรานซิสเตอร์ (Q_2) นำกระแส ซึ่งในขณะนี้จะมีการไหลของกระแส (I_{AK}) ไหลจากขั้วบวกของแหล่งจ่าย (V_{AA}) ผ่านตัวต้านทาน (R_L) เข้าขั้วอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ (Q_2) และกระแสจะไหลต่อเนื่องเข้าขาคอลเลกเตอร์มาสู่ขั้วอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ (Q_1) จนกระทั่งมาครบวงจรที่ขั้วลบของแหล่งจ่าย (V_{AA}) และขณะที่ทรานซิสเตอร์ (Q_2) ได้รับการไบแอสไปหน้าด้วยกระแสเบส (I_{B2}) อันจะมีผลทำให้กระแสคอลเลกเตอร์ (I_{C2}) ไหลมาที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์ (Q_1) ได้โดยค่ากระแสคอลเลกเตอร์ (I_{C2}) จะเท่ากับกระแสเบสของทรานซิสเตอร์ (Q_1) ซึ่งวงจรการทำงานของเอส ซี อาร์ นี้จะมียุทธศาสตร์ใหม่เหมือนตอนเริ่มต้นอีกครั้งในลักษณะ การกระทำวกกลับ (Regenerative Action) หรือที่เรียกว่า "การค้าง" (Latching) อันเป็นคุณสมบัติของ เอส ซี อาร์ ในขณะที่เอส ซี อาร์ นำกระแสคือ ความต้านทานระหว่างขั้วแอนโอด และแคโทดของ เอส ซี อาร์ จะมีค่าต่ำมาก และเมื่อ เอส ซี อาร์ นำกระแสหลังการจุดชนวนด้วยกระแสเกตแล้ว ก็ไม่จำเป็นต้องคงการจุดชนวนนั้นไว้จนกว่าเมื่อเอส ซี อาร์ หยุดนำกระแสถึงจะต้องมีการจุดชนวนด้วยกระแสเกตอีกครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครั้งในลักษณะ การกระทำวกกลับ (Regenerative Action) หรือที่เรียกว่า “การค้าง” (Latching) อันเป็นคุณสมบัติของ เอส ซี อาร์ ในขณะที่เอส ซี อาร์ นำกระแสคือ ความต้านทานระหว่างขา แอนโอด และแคโทดของ เอส ซี อาร์ จะมีค่าต่ำมาก และเมื่อ เอส ซี อาร์ นำกระแสหลังการจุดชนวน ด้วยกระแสเกตแล้ว ก็ไม่จำเป็นต้องคงการจุดชนวนนั้นไว้จนกว่าเมื่อเอส ซี อาร์ หยุดนำกระแสถึง จะต้องมีการจุดชนวนด้วยกระแสเกตอีกครั้ง

1.3 ลักษณะสมบัติของเอส ซี อาร์

พิจารณาจากรูปที่ 1.4 ซึ่งแสดงคุณลักษณะทางกระแส และแรงดันของ เอส ซี อาร์ ขณะที่ ไม่มีการไหลของกระแสเกต (I_G) เมื่อ เอส ซี อาร์ ได้รับการไบแอสไปหน้า (Forward Bias) ที่ขา แอนโอด กับแคโทด เอส ซี อาร์ จะยังไม่นำกระแสขณะที่แรงดันต่ำ แต่จะมีเพียงกระแสรั่ว (Leakage Current) ไหลได้เล็กน้อยในบริเวณกั้นไปหน้า (Forward Blocking Region) และถ้าเพิ่มแรงดันไป หน้า (Forward Voltage) หรือ (V_{AKF}) ให้สูงขึ้นเพียงพอ ซึ่งมีผลทำให้พาหะส่วนน้อยภายในโครงสร้าง เอส ซี อาร์ จะเร่งความเร็วและสร้างพาหะในรอยต่อเกต กับแคโทด มีจำนวนมากพอจนทำให้ เอส ซี อาร์ นำกระแสได้ ณ. แรงดันจุดเริ่มทลาย (Break Over Voltage) หรือ (V_{BO})



รูปที่ 1.4 ลักษณะสมบัติของเอส ซีอาร์

ขณะที่ เอส ซี อาร์ นำกระแสอยู่ได้ กระแส (I_{AK}) ที่ไหลผ่าน เอส ซี อาร์ จะต้องมากกว่า กระแสค้ำ (Latching Current) และแรงดันตกคร่อม เอส ซี อาร์ (V_F) โดยทั่วไปมีค่าประมาณ 0.7 ถึง 4 โวลต์ แต่ถ้าต้องการให้ เอส ซี อาร์ กลับคืนสู่สภาวะหยุดนำกระแสคือจะต้องทำให้กระแสที่ไหลผ่าน เอส ซี อาร์ ลดลงต่ำกว่า กระแสถือ (Holding Current)

การใช้งานของ เอส ซี อาร์ โดยทั่วไปการจ่ายแรงดันไบแอสไปหน้าให้แก่ขาแอนโอดและแคโทดจะต้องต่ำกว่าแรงดันจุดเริ่มทลาย หรือ V_{BO} และทำการจุดชนวนที่ขาเกต เอส ซี อาร์ จะนำกระแสได้อย่างรวดเร็วซึ่งแรงดันจุดชนวนเกต (V_{GT}) มีค่าประมาณ 1 ถึง 3 โวลต์ และกระแสจุด

$V_{(BR)R}$ ซึ่งจะมีกระแสไหลผ่าน เอส ซี อาร์ ได้สูงเพราะรอยต่อภายในโครงสร้างของเอส ซี อาร์ ทะลุเสียหาย

1.4 คุณลักษณะของเอสซีอาร์ขณะนำกระแส (THYRISTOR TURN-ON)

กรณีที่ 1

ขณะเอส ซี อาร์ ได้รับไบอัสตรงและได้รับแรงดันเกต (V_G) ที่เหมาะสม ซึ่งจะสร้างกระแสเกต (I_G) สำหรับจุดชนวนหรือทริกเกอร์เอส ซี อาร์ ก็จะนำกระแส เช่นเดียวกับการป้อน V_{AK} เพียงอย่างเดียวโดยไม่มี V_G นั่นคือ เมื่อ $V_{AK} < V_{BO}$ เอส ซี อาร์ก็จะนำกระแส

กรณีที่ 2

เมื่อป้อน V_{AK} โดยปราศจาก V_G ($I_G = 0$) โดยเมื่อป้อน $V_{AK} > V_{BO}$ จะทำให้เอส ซี อาร์ นำกระแสหรือป้อน V_G (I_G คงที่ที่ค่าต่าง ๆ) ร่วมกับ V_{AK} ก็จะทำให้ค่าระดับแรงดันที่ใช้เปิด SCR ต่ำลง

จากรูปที่ 1.5 แสดงรูปคลื่นของกระแสแอนโอด (I_T) หรือกระแสที่ไหลผ่านเอส ซี อาร์ ซึ่งมีการป้อนแรงดันที่ขาเกต (V_G) และทำให้เกิด I สังเกตว่าเวลาในการเปิด (t_{on}) จะเท่ากับช่วงเวลาระหว่างค่ากระแส 10% ของกระแสเกต ($0.1 I_G$) จนถึง 90% ของกระแสสภาวะเปิด ($0.9 I_T$) นอกจากนี้ t_{on} ยังประกอบด้วย ช่วงเวลาดีเลย์ (t_d) รวมกับช่วงเวลารอขึ้น (t_r) เมื่อ t_d เป็นช่วงเวลาระหว่างค่ากระแส $0.1 I_G$ จนถึง $0.1 I_T$ และ t_r เป็นช่วงเวลาระหว่างค่ากระแส $0.1 I_T$ ถึง $0.9 I_T$ รูปที่ 1.5 แสดงคุณลักษณะของเอส ซี อาร์ที่เกิดจากการพิจารณา 2 กรณีด้วยกัน

1.5 คุณลักษณะของเอสซีอาร์หยุดนำกระแส

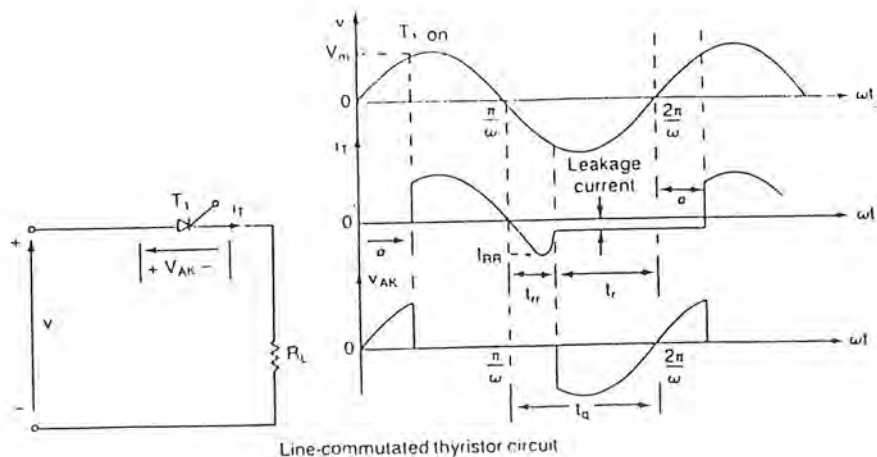
(THYRISTOR TURN-OFF)

เมื่อไทรสเตอร์อยู่ในสภาวะนำกระแสสามารถหยุดนำกระแสได้โดยการลดกระแสที่ไหลผ่านให้ต่ำกว่ากระแสยึดโดยวิธีการหยุดนำกระแสของไทรสเตอร์นั้นจะไม่ขอกกล่าวในที่นี้

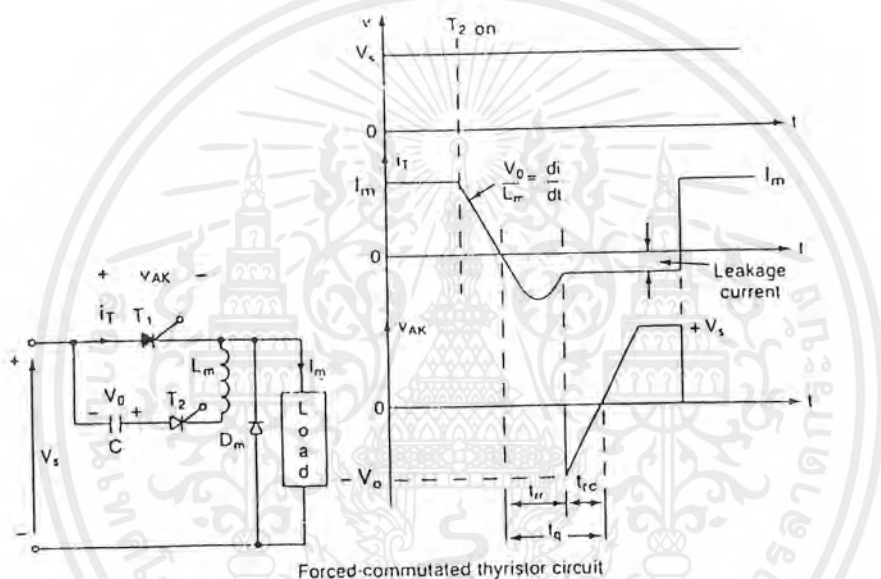
Turn-Off-Time (t_q) เอส ซี อาร์ เป็นระยะเวลาตั้งแต่การทำให้กระแสที่ไหลผ่านเอส ซี อาร์ ไหลย้อนกลับลดลงจากศูนย์ และขณะที่ไทรสเตอร์ต้านแรงดันฟอร์เวิร์ดโดยไม่เกิดการนำกระแส t_q ยังขึ้นอยู่กับค่าสูงสุดของสถานะนำกระแส และแรงดันอย่างรวดเร็ว

Turn-Off-Time (t_q) จะประกอบด้วย Reverse Recovery Time (t_{rr}) และ Recombination Time (t_{rc})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Line-commutated thyristor circuit



Forced-commutated thyristor circuit

รูปที่ 1.6 แสดงคุณลักษณะของช่วงการหยุดนำกระแส

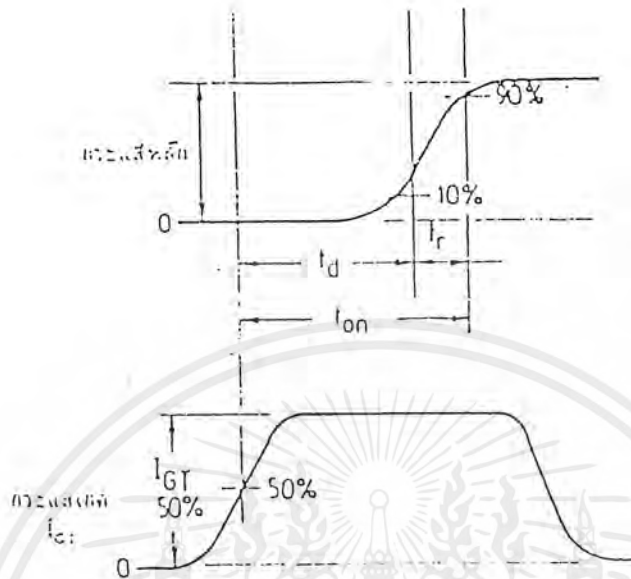
ช่วงเวลานัดคืนตัว

ช่วงเวลารีเซ็ตเฟวรี่ (Recovery time) หรือช่วงเวลานัดคืนตัวเป็นช่วงเวลาในการเริ่มต้นหยุดนำกระแส เป็นคุณสมบัติโดยเฉพาะของเอสซีอาร์ และ อุปกรณ์กระแสผ่านทางเดียวอื่น ๆ ช่วงเวลารีเซ็ตเฟวรี่ของเอสซีอาร์ แบ่งเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงรีเซ็ตเฟวรี่ในขณะที่ป้อนกลับ (t_{rr} : reverse recovery time) และช่วงเวลารีเซ็ตเฟวรี่ (t_{gr} : gate recovery time) ดังรูปที่ 1.7

เมื่อกระแสไบแอสตรงในเอส ซี อาร์ตกเป็นศูนย์แรงดัน ไบแอสกลับระหว่างแอนโอดและคาโทดของเอส ซี อาร์ จะทำให้เกิดกระแสไบแอสกลับไหลผ่าน และกระแสนั้นจะค่อย ๆ ลดจนกลายเป็นกระแสรั่วไหลปกติ

ช่วงเวลารีเซ็ตเฟวรี่ ในขณะที่ป้อนไบแอสกลับนั้น จะเริ่มวัดจากจุดที่กระแสกลับเฟสไปจนถึงจุดปกติในกระแสไบแอสกลับดังรูปที่ 1.7 และในระหว่างช่วงเวลานี้แอนโอดและคาโทดจะค่อย ๆ เพิ่มประจุแต่แรงดันไบแอสกลับจะยังคงอยู่ต่อไปอีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.7 แสดง Turn on time ในการนำกระแสของ เอส ซี อาร์

การนำกระแสของ SCR (turn-on time) มี 2 ระยะคือ ช่วงหน่วง (t_d) และช่วงเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการนำกระแสเมื่อควบคุมที่ เกต (t_{GT}) วัตที่จุด 50% ของกระแสเกตไปยังจุด 90 เปอร์เซ็นต์ของกระแสหลัก หรือก็คือผลรวมของเวลาช่วงหน่วงกับเวลาช่วงได้ขึ้น

ช่วงเวลารีเซ็ตเฟวอร์ช่วงที่ 2 หรือช่วงเวลากेटรีเซ็ตเฟวอร์ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เอส ซี อาร์ค้อย เก็บประจุอย่างช้า ๆ ถึงช่วงที่กระแสเปลี่ยนเป็นการไบแอสตรงช่วงเวลากेटรีเซ็ตเฟวอร์ มักจะมีเวลามากกว่าช่วงรีเซ็ตเฟวอร์ในขณะที่ป้อนกลับเสมอ

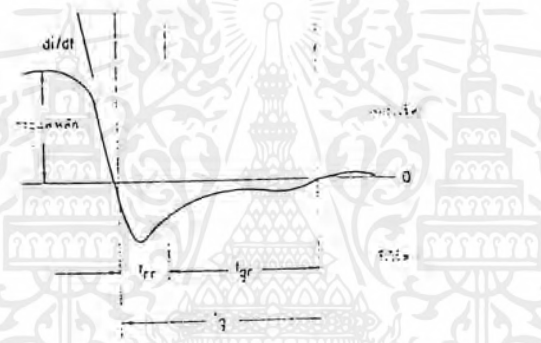
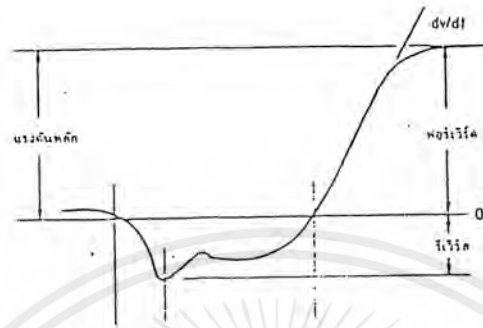
ในช่วงเวลารีเซ็ตเฟวอร์ทั้งหมดตั้งแต่เริ่มมีกระแสไบแอสกลับไหลจนกระทั่งเกิดไบแอสตรง คือช่วงเวลาที่วงจรเริ่มหยุดนำกระแส หรือเรียกว่า T_E

ส่วนช่วงเวลาในการหยุดนำกระแสทั้งหมดจะขึ้นกับ สภาพของวงจรรวมทั้งกระแสในขณะนำกระแส อัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสระหว่างช่วงไบแอสตรง และไบแอสกลับ ช่วงเวลาไบแอสกลับ อัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่จะกลับมาสู่การไบแอสตรง การไบแอสเกต และอุณหภูมิบริเวณรอยต่อ

การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิบริเวณรอยต่อ และการเพิ่มของกระแสขณะนำกระแสทำให้ช่วงเวลาในการเริ่มต้นหยุดนำกระแสเพิ่มขึ้นซึ่งผลกระทบเหล่านี้มีความสำคัญมาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนึงถึงค่าเหล่านี้ ในการออกแบบใช้งานด้วย ส่วนการไบแอสเกตด้วยไฟลอปจะช่วยลดช่วงเวลาในการเริ่มต้นหยุดนำกระแส



รูปที่ 1.8 แสดง Turn off time ในการหยุดนำกระแสของเอส ซี อาร์

ช่วงเวลาหยุดนำกระแส (turn-off time) เป็นคุณสมบัติเฉพาะของอุปกรณ์ไทรสเตอร์ชนิดมีทิศทางเดียวเท่านั้น เวลาคืนตัว (recovery time) ของ SCR มี 2 ระยะ เช่นกันคือช่วงคืนตัวด้านรีเวิร์ค และช่วงคืนตัวที่เกิด หรือ ฟอว์เวิร์คบล็อกกิ้ง

สำหรับการประยุกต์ใช้งานเอสซีอาร์ ในการใช้ควบคุมกำลังงานไฟฟ้ากระแสสลับช่วงตบของรูปคลื่นจะเป็นช่วงแรงดันไบแอสกลับ จะทำให้เกิดการหยุดนำกระแสไปอย่างอัตโนมัติ ในช่วงความถี่ที่ใช้งานต่ำ ๆ

ช่วงหยุดนำกระแสของเอสซีอาร์

การประยุกต์ใช้งานเอส ซี อาร์ในการควบคุมกำลังงานมักจะใช้กันในช่วงที่มีคุณสมบัติหยุดนำกระแส มักจะไม่มีปัญหาในการออกแบบให้ เอส ซี อาร์นำกระแสได้แน่นอน และแม่นยำ นอกนั้นหลังจากที่เรานำสัญญาณจุดชนวนออก ช่วงเวลาในการนำกระแสจะขึ้นกับเกณฑ์ที่กำหนด ซึ่งอาจนานเท่าผลรวมของ อัตราขยายเบสรวม ของ โครงสร้างทรานซิสเตอร์ NPN และ PNP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนในการทำให้เอส ซี อาร์หยุดนำกระแสในนั้น อัตราขยายควรทำให้ต่ำกว่าปกติในสภานำกระแส กระแสอาโนดควรต่ำกว่ากระแสแคโทด สำหรับการใช้ในสายไฟฟ้าสลับ การหยุดนำกระแสจะเป็นไปโดยอัตโนมัติในช่วงลบของรูปคลื่น

อย่างไรก็ตามในการใช้งานกับไฟฟ้ากระแสตรง กระแสอาโนดจะถูกทำให้หยุดลง หรือเมื่อยังเบนไป และในการจะเกิดกระแสอาโนดขึ้นอีกครั้งหนึ่ง ช่วงเวลาจะขึ้นกับอุณหภูมิ, กระแสไบแอสตรงและอุปกรณ์ประกอบอื่นๆและช่วงเวลารีเซ็ตเฟวรี่จะต้องผ่านไปก่อนที่เอส ซี อาร์จะกลับมามีแรงดันไบแอสตรงเพื่อที่จะนำกระแสอีกครั้ง

เราสามารถทำความเข้าใจกับ ช่วงเวลารีเซ็ตเฟวรี่ของเอส ซี อาร์ ได้ง่ายขึ้นโดยพิจารณาที่รอยต่อทั้ง 3 ที่เกิดขึ้น เมื่อเอสซีอาร์นำกระแสในแต่ละรอยต่อจะได้รับการไบแอสตรงซึ่งทำให้บริเวณสาร P และสาร N ในแต่ละข้างมีโฮล และอิเล็กตรอนอยู่มาก

ถ้าต้องการให้เกิดการหยุดนำกระแสในช่วงเวลาสั้น ๆ เราจำเป็นต้องป้อนแรงดันไฟลบให้กับอาโนด เพื่อจะทำให้โฮล และอิเล็กตรอนใกล้ๆกับปลายของรอยต่อทั้ง 2 ด้านเกิดการแพร่กระจาย และเกิดกระแสไบแอสกลับไหลผ่านเอส ซี อาร์

เมื่อโฮล และอิเล็กตรอนบริเวณใกล้ ๆ กับรอยต่อเกิดการแพร่กระจายออกไปจนหมด กระแสไบแอสกลับจะหยุดไหล หมายถึงว่า เอส ซี อาร์อยู่ในสภาวะปกติพร้อมที่จะนำกระแสอีกครั้ง

อย่างไรก็ตามปัญหาที่เกิดขึ้นอย่างหนึ่ง คือ ในช่วงเวลานั้นจะเกิดการรวมกันของโฮลและอิเล็กตรอนขึ้นตรงบริเวณกลางรอยต่อ ซึ่งในการรวมตัวกันของโฮล และอิเล็กตรอนบริเวณกลางรอยต่อนี้เอง ทำให้การแพร่กระจายเกิดขึ้นค่อนข้างช้า และช้าซึ่งหมายถึง ช่วงเวลารีเซ็ตเฟวรี่ที่นาน

การวัดช่วงเวลารีเซ็ตเฟวรี่ของเอส ซี อาร์ ควรจะป้อนกระแสไบแอสตรงเป็นเวลานานเพียงพอจนแน่ใจว่าวงจรทำงานในสภาวะคงที่แล้ว

เพื่อที่จะดูว่าการเปลี่ยนแปลงของส่วนประกอบในวงจรคือขนาดกระแสไบแอสตรง, ช่วงเวลาของกระแสไบแอสตรง, อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแส ต่อเวลา, ขนาดกระแสไบแอสกลับ, ขนาดแรงดันไบแอสกลับ, อัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันต่อเวลา, ขนาดของแรงดันที่ใช้, ค่าความต้านทานระหว่างเกต และ คาโทด ขนาดสัญญาณจุดชนวนเกต ว่าจะมีผลต่อช่วงเวลารีเซ็ตเฟวรี่อย่างไร ให้ทำการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบนั้น ๆ โดยให้ส่วนอื่น ๆ คงที่

1.6 วิธีการทำให้เอสซีอาร์หยุดนำกระแส

สำหรับเอส ซี อาร์จะไม่หยุดนำกระแสโดยหยุดจ่ายกระแสเข้าขา เกตของเอส ซี อาร์ โดยเอส ซี อาร์จะหยุดนำกระแสเมื่อลดกระแสที่ไหลผ่านเอส ซี อาร์ลงต่ำกว่ากระแสยึด (Holding Current) เป็นเวลานานกว่า turn-off-time (t_q) ซึ่งเป็นคุณสมบัติของเอส ซี อาร์

วิธีการทำให้กระแสไหลผ่านเอส ซี อาร์ลงต่ำกว่ากระแสยึด สามารถทำได้โดยการลดแรงดันตกคร่อมเอส ซี อาร์ลงสู่ศูนย์ หรือจ่ายแรงดันรีเวิร์คไบอัสให้แก่เอส ซี อาร์ วิธีการพื้นฐานของการทำให้เอส ซี อาร์หยุดนำกระแสสามารถจัดแบ่งได้ 3 วิธีการ คือ

1. การทำให้เอส ซี อาร์หยุดนำกระแสโดยแหล่งจ่ายไฟเป็นไฟกระแสสลับ ซึ่งเรียกกันว่า Line Commutation หรือ Natural Commutation คือ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับนั้นแรงดันไฟฟ้าจะตกลงสู่ศูนย์ และมีแรงดันกลับทิศทาง ซึ่งจะเป็นการจ่ายรีเวิร์คไบอัสให้แก่เอส ซี อาร์ในทุกๆ ไชเคิล และกระแสที่ไหลผ่านเอส ซี อาร์จะตกสู่ศูนย์ ซึ่งถ้าเป็นเวลานานกว่า turn-off-time (t_q หรือ t_{off}) ก่อนที่จะจ่ายแรงดันไฟฟ้า ฟอว์เวิร์คอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งเป็นวิธีการทำให้เอสซีอาร์หยุดนำกระแสในการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับโดยการควบคุมเฟส

2. การทำให้เอส ซี อาร์หยุดนำกระแสโดยการจัดโหลดให้เหมาะสม (Load Commutation) ใช้ในวงจรเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยวิธีการชอปเปอร์ (Choppers) และวงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับ (Inverter) คือ เมื่อเอส ซี อาร์นำกระแสจะเป็นการสวิตซ์ไฟเข้าโหลด ซึ่งประกอบด้วยตัวต้านทาน, อินดักเตอร์, คาปาซิเตอร์ ที่มีค่าเหมาะสม โดยอยู่สถานะ Underdamped กระแสที่ไหลผ่านโหลดจะตกลงสู่ศูนย์โดยธรรมชาติ เมื่อกระแสที่ไหลผ่านเอส ซี อาร์ต่ำกว่ากระแสยึด เป็นเวลานานกว่า time-off-time จะทำให้เอส ซี อาร์หยุดนำกระแสได้

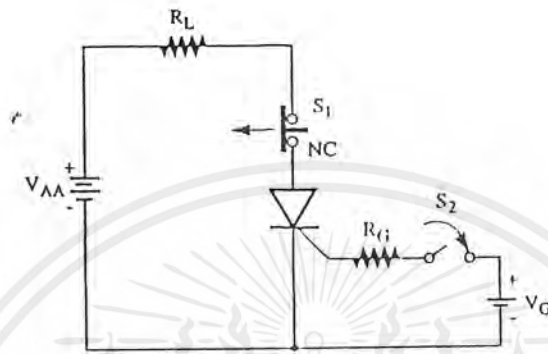
3. การทำให้เอส ซี อาร์หยุดนำกระแสโดยวิธีการบังคับ (Forced Commutation) เป็นการทำให้กระแสไหลลดลงสู่ศูนย์ ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้กระแสเนื่องจากการคายประจุของคาปาซิเตอร์ หรือจ่ายรีเวิร์คไบอัสซึ่งประจุในคาปาซิเตอร์ให้แก่เอส ซี อาร์

1.6.1 การหยุดนำกระแสของเอสซีอาร์ในวงจรไฟกระแสตรง

การทำให้เอส ซี อาร์หยุดนำกระแส โดยมากในวงจรไฟกระแสตรงจะไม่มีปัญหาในการจุดชนวนที่ทำให้เอสซีอาร์นำกระแส แต่จะพบปัญหาในการที่ทำให้เอส ซี อาร์ หยุดนำกระแสแอนโอด แม้ว่าไม่มีการจุดชนวนด้วยกระแสเกตก็ตาม หลักการที่ทำให้เอส ซี อาร์ หยุดนำกระแสมีอยู่วิธีการเดียว คือ การทำให้กระแสแอนโอด มีค่าลดต่ำกว่าค่ากระแสยึด (Holding Current) ซึ่งสามารถกระทำได้ 2 วิธี คือ

1. วิธีการตัดกระแส (Current Interruption) สำหรับในวงจรไฟกระแสตรง การทำให้

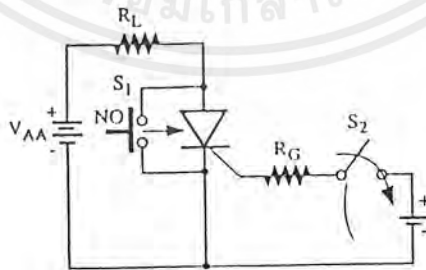
กระแสแอมป์ลดลงสามารถทำได้โดยการปิดวงจร หรือ ถัดวงจรไม่ให้กระแสไหลผ่านเอส ซีอาร์ ซึ่งเป็นวิธีพื้นฐานที่นิยมใช้กันในห้องปฏิบัติการ



(ก) การต่อสวิตช์อินคับกับเอส ซี อาร์

รูปที่ 1.9 แสดงวิธีการตัดกระแสเอส ซี อาร์

จากรูปที่ 1.9 ใช้สวิตช์ (S_1) แบบกดชนิดปกติปิด (N_C) ต่ออินคับกับเอส ซี อาร์ เมื่อทำสวิตช์ (S_1) สวิตช์จะเปิดวงจรกระแสแอมป์ มีค่าลดลงเป็นศูนย์ เอส ซี อาร์จะหยุดนำกระแส เมื่อปล่อยสวิตช์ (S_1) กลับสู่สภาวะปกติเอส ซี อาร์ก็ยังไม่นำกระแสจนกว่าจะมีการจุดชนวนเกดที่สวิตช์ (S_2)



(ข) การต่อสวิตช์ขนามกับเอสซีอาร์

รูปที่ 1.9 แสดงวิธีการตัดกระแสให้ เอส ซี อาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 1.9 ใช้สวิตช์ (S_1) แบบกดชนิดปกติเปิด (N_O) ต่อขนานกับเอส ซี อาร์ เมื่อทำการกดสวิตช์ (S_1) สวิตช์จะลัดวงจรที่ขาแอนโอด กับแคโทดของเอส ซี อาร์ ซึ่งมีผลทำให้แรงดันคร่อมเอส ซี อาร์มีค่าลดลงเป็น 0 โวลต์ แต่ในขณะนี้ยังมีกระแสไหลผ่านโหลดได้ แต่เมื่อปล่อยสวิตช์ (S_1) กลับสู่สภาวะปกติ กระแสในวงจรทางโหลดจะหยุดไหล เพราะว่า เอส ซี อาร์อยู่ในสภาวะไม่นำกระแสและยังคงสภาวะเช่นนี้ จนกว่าจะมีการจุดชนวนเกตที่สวิตช์ (S_2) อีกครั้ง

ส่วนในวงจรไฟกระแสตรง การที่จะทำให้เกิดแรงดันไบอัสย้อนกลับจะใช้ตัวเก็บประจุ (C) ต่อขนานกับเอสซีอาร์ และอาศัยการคายประจุทำให้เอสซีอาร์ หยุดนำกระแส เรียกวิธีนี้ว่า “การสับเปลี่ยนแบบบังคับ” (Forced Commutation) เป็นวิธีการที่นิยมใช้กันมาก เพราะ สามารถทำให้ เอสซีอาร์ หยุดทำงานได้อย่างรวดเร็วมากวิธีการสับเปลี่ยนแบบบังคับ

1.6.2 วิธีการหยุดนำกระแสโดยบีบบังคับ

(Forced Commutation Method)

เป็นวิธีการที่นิยมใช้กันมาก เพราะสามารถทำให้ เอส ซี อาร์ หยุดทำงานได้อย่างรวดเร็วมาก วิธีการทำให้เอส ซี อาร์ หยุดนำกระแสด้วยวิธีการนี้มีด้วยกันหลายแบบ พอจำแนกเป็นจำพวกใหญ่ ๆ ได้ดังนี้

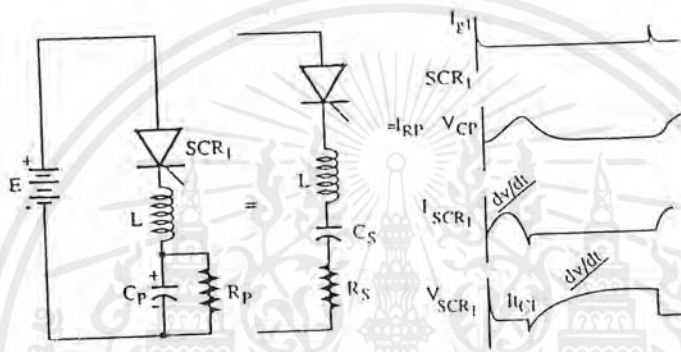
1. แบบ เอ คือการทำให้หยุดนำกระแสด้วยตัวเองโดยใช้ภาวะเรโซแนนซ์ของโหลด (Class: A Self Commutated By Resonating The Load)
2. แบบ บี คือ การทำให้หยุดนำกระแสด้วยตัวเอง โดยอาศัยวงจร แอล ซี (Class: B Self Commutated By An LC Circuit)
3. แบบ ซี คือ ซี หรือ แอล ซี ถูกต่อเข้ากับ เอส ซี อาร์ ด้วย เอส ซี อาร์ อีกตัวหนึ่ง ที่ทำหน้าที่รับภาวะโหลดเหมือนกัน (Class: C C OR LC Switched by Another Load Carrying SCR)
4. แบบ ดี คือ ซี หรือ แอล ซี ถูกต่อกับเอส ซี อาร์ ด้วย เอส ซี อาร์ ช่วย (Class: D C OR LC Switch By Auxiliary SCR)
5. แบบ อี คือ การใช้สัญญาณพัลส์ภายนอกมาบังคับให้กระแสหยุดไหล (Class: E An External Pulse Source For Commutation)
6. แบบ เอฟ คือ การทำให้กระแสหยุดไหลด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (Class: F AC Line Commutation)

จากการทำให้ เอส ซี อาร์ หยุดนำกระแสด้วยวิธีการสับเปลี่ยนแบบบังคับ มีวงจรแบบต่าง ๆ

หลายแบบ ดังตัวอย่างต่อไปนี้

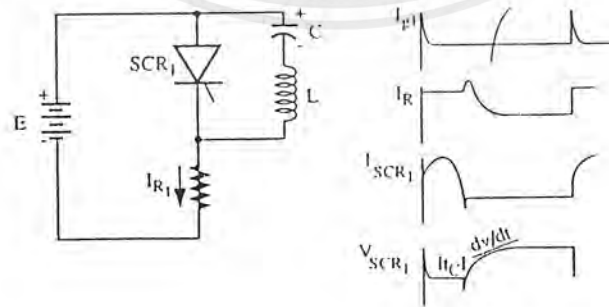
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. แบบเอ คือ การทำให้หยุดนำกระแสด้วยตัวเอง โดยใช้ภาวะเรโซแนนซ์ของโหลด (Class: A Self Commutated By Resonating The Load) ดังตัวอย่างวงจรในรูป เมื่อขณะ เอส ซี อาร์ นำกระแส กระแสแอมโวนจะไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (L) และเก็บประจุลงในตัวเก็บประจุ (C) ซึ่งผลของ แอด ซี เรโซแนนซ์ จะทำให้แรงดันที่ตัวเก็บประจุ (C) มีค่าสูงกว่าแหล่งจ่าย (E) เอส ซี อาร์ จะถูกไบอัสย้อนกลับและหยุดนำกระแส



รูปที่ 1.10 แบบ เอ (Class: A)

2. แบบบี คือ การทำให้หยุดนำกระแสด้วยตัวเองโดยอาศัยวงจร แอด ซี (Class:B Self Commutated By An LC Circuit) ดังตัวอย่างวงจรรูปที่ 1.11

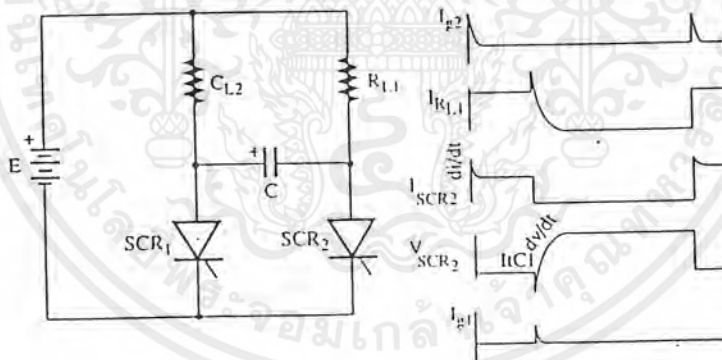


รูปที่ 1.11 แบบบี (Class:B)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก่อนที่มีสัญญาณจุกชนวน ตัวเก็บประจุ (C) จะเก็บประจุมีแรงดันคร่อม ตามที่แสดงในรูป เมื่อมีสัญญาณจุกชนวนให้ เอส ซี อาร์ นำกระแสชุดหนึ่ง กระแสจากแหล่งจ่าย (E) จะไหลผ่าน เอส ซี อาร์ ผ่านโหลด(R) และมีกระแสอีกชุดหนึ่งที่ไหลจากขั้วบวกตัวเก็บประจุ (C) ผ่านเอส ซี อาร์ ผ่านตัวเหนี่ยวนำ (L) มาที่ขั้วลบของตัวเก็บประจุ (C) กระแสชุดนี้จะเป็นกระแสของ แอล ซี เรโซแนนซ์ ซึ่งผลของแอล ซี ทำให้เกิดกระแสไหลกลับเมื่อกระแสไหลกลับมีค่ามากกว่ากระแสโหลดที่ไหลผ่านเอส ซี อาร์ จะทำให้เอส ซี อาร์ หยุดนำกระแสได้ เพราะเมื่อตัวเก็บประจุ (C) คายประจุจนหมด ที่ขั้วบวกของตัวเก็บประจุ (C) จะมีศักย์เป็นลบเสมือนว่าที่ขั้วแอโนดและขั้วแคโทดจะได้แรงดันย้อนกลับ

3.แบบ ซี คือ ซี หรือ แอล ซี ถูกต่อเข้ากับ เอส ซี อาร์ ด้วย เอส ซี อาร์ อีกตัวหนึ่งที่ทำหน้าที่รับภาวะโหลดเหมือนกัน (Class : C C OR LC Switched By Another Load Carrying SCR) ดังตัวอย่างในวงจรรูปที่ 1.12



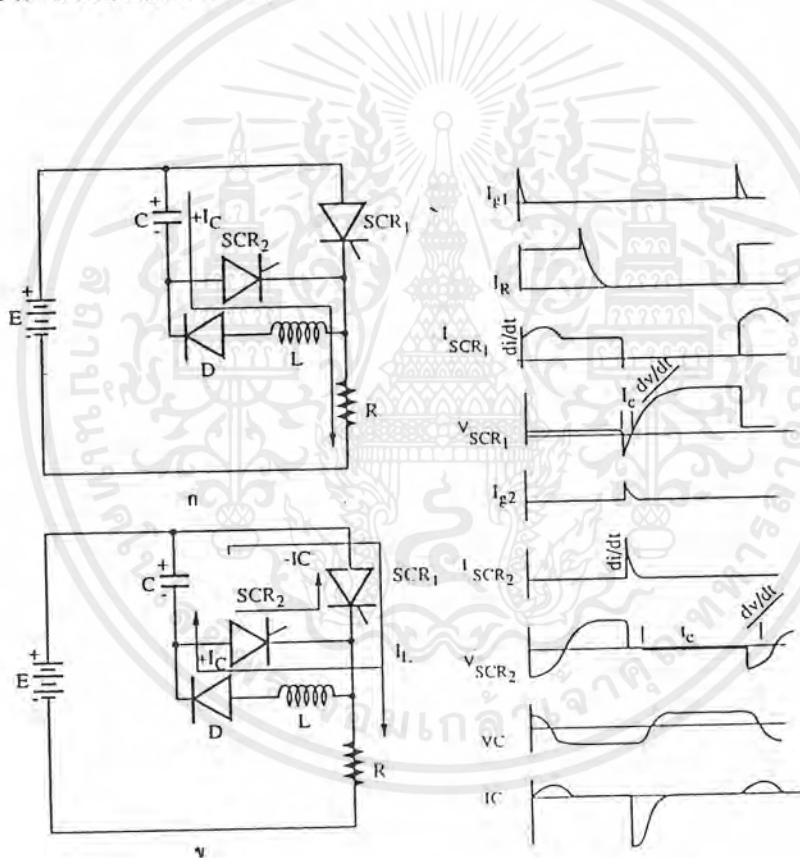
รูปที่ 1.12 แบบ ซี (Class: C)

จากรูปที่ 1.12 สมมติให้ เอส ซี อาร์ ตัวที่สอง (SCR_2) นำกระแสตัวเก็บประจุ (C) จะเก็บประจุมีแรงดันคร่อมตามรูป เมื่อจุกชนวนให้ เอส ซี อาร์ ตัวที่หนึ่ง (SCR_1) ทำงาน เอส ซี อาร์ ตัวที่หนึ่งจะเหมือนเป็นสวิตช์ต่อ ตัวเก็บประจุ (C) คร่อม เอส ซี อาร์ ตัวที่สอง และตัวเก็บประจุ (C) ก็ จะคายประจุทำให้มีกระแสไหลผ่าน เอส ซี อาร์ ตัวที่สองในทิศทางที่สวนทางกับกระแสที่ไหล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ่าน เอส ซี อาร์ ตัวที่สองเดิม และถ้ากระแสจากการคายประจุมีค่ามากกว่ากระแสที่ไหลผ่าน เอส ซี อาร์ ตัวที่สองเดิม เอส ซี อาร์ ตัวที่สองก็จะหยุดนำกระแสได้

4. แบบ ดี คือ ซี หรือแอลซี ถูกต่อกับ เอส ซี อาร์ ด้วยเอส ซี อาร์ ช่วย (Class: D C OR LC Switch By An Auxiliary SCR) ดังตัวอย่างในรูปที่ 1.13

จากรูปตัวอย่างที่ 1.12 วงจรแบบ ซี จัดเป็นแบบดี ได้ถ้าเราถือว่าตัวต้านทาน (R_{L2}) ไม่ใช่เป็นโหลดที่เราต้องการ ในรูปตัวอย่างที่ 1.13 แบบ ดี จะเห็นว่า เอส ซี อาร์ ตัวที่สอง (SCR_2) จะทำหน้าที่สำหรับหยุด เอส ซี อาร์ ตัวที่หนึ่ง (SCR_1) ขณะนำกระแส หรือกล่าวได้ว่า เอส ซี อาร์ ตัวที่สองเป็น เอส ซี อาร์ ทำหน้าที่ช่วยนั่นเอง



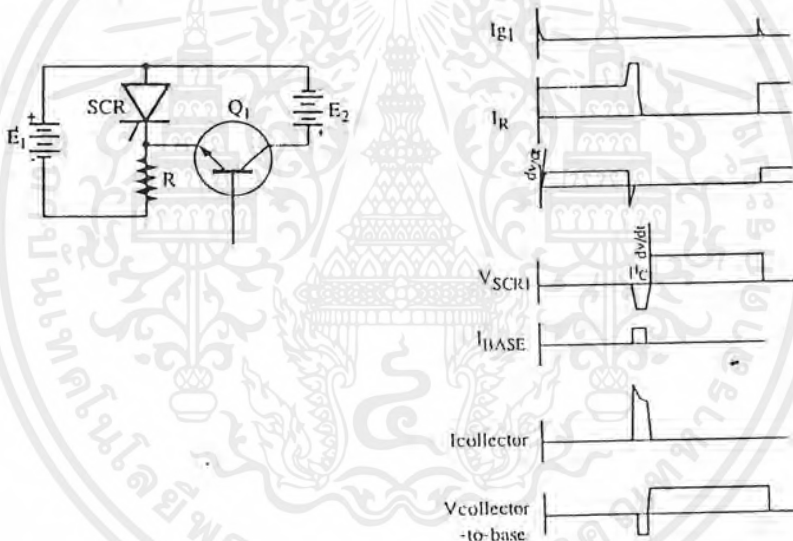
รูปที่ 1.13 แบบ ดี (Class: D)

การเริ่มต้นทำงานของวงจรต้องให้ เอส ซี อาร์ ตัวที่สองทำงานก่อน เพื่อให้ตัวเก็บประจุ (C) ทำการเก็บประจุมีแรงดันคร่อม ตามรูปที่ 1.13 แบบ ดี (ก) เมื่อเก็บประจุ เต็มแล้ว เอส ซี อาร์ ตัวที่สอง จะหยุดทำงานเองเพราะกระแสหยุดไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ เอส ซี อาร์ ตัวที่หนึ่งถูกจุดชนวนให้นำกระแส ซึ่งจะมีความถี่ไหลอยู่ 2 ส่วน คือ กระแสที่ไหลผ่านโหลด และกระแสที่ไหลจากขั้วบวกของตัวเก็บประจุ (C) ผ่าน เอส ซี อาร์ ตัวที่หนึ่งผ่านตัวเหนี่ยวนำ (L) และไดโอด (D) โดยผลของ แอส ซี และไดโอด ทำให้ตัวเก็บประจุ (C) เก็บประจุใหม่ในทิศทางตรงข้าม ดังรูปที่ 1.12 แบบคี่ (ข) เมื่อเอส ซี อาร์ ตัวที่สองถูกจุดชนวนอีกครั้งตัวเก็บประจุ (C) จะคายประจุให้กระแสไหลสวนทางกลับกระแสที่ไหลผ่านเอส ซี อาร์ ตัวที่หนึ่งซึ่งทำให้เอส ซี อาร์ ตัวที่หนึ่งหยุดทำกระแสได้

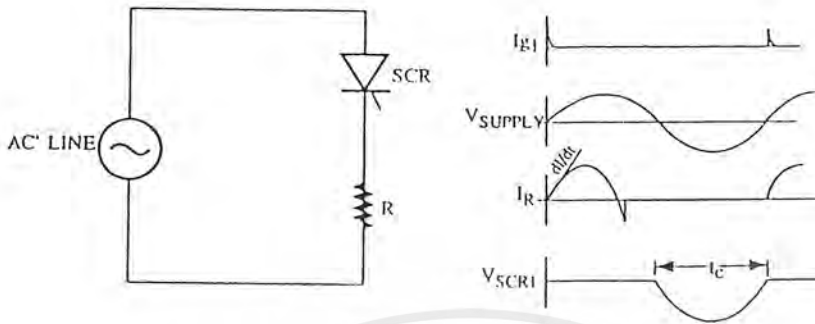
5. แบบ อี คือ การใช้สัญญาณพัลส์ ภายนอกมาบังคับให้กระแสหยุดไหล (Class: E An External Pulse Source For Commutation) ดังตัวอย่างวงจรในรูปที่ 1.14



รูปที่ 1.14 แบบอี (Class: E)

ขณะเมื่อ เอส ซี อาร์ นำกระแสอยู่ถ้าทำให้ทรานซิสเตอร์ (Q_1) นำกระแส กระแสจากแหล่งจ่ายแรงดัน (E_2) จะทำให้ เอส ซี อาร์ หยุดทำงานทันที

6. แบบ เอฟ คือ การทำให้กระแสหยุดไหลด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (Class:F AC-Line Commutation) ดังตัวอย่างในรูปที่ 1.15



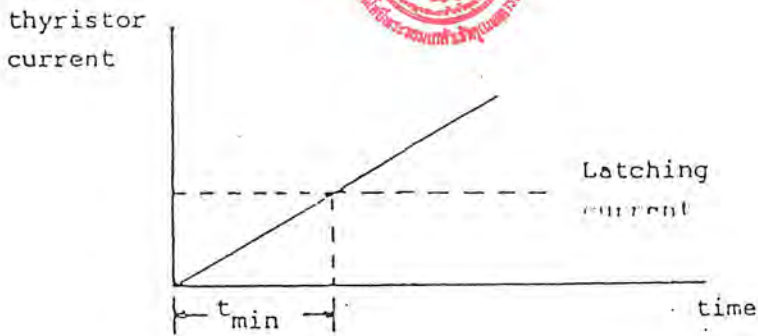
รูปที่ 1.15 แบบ เอฟ (Class: F)

การทำงานของ เอส ซี อาร์ ในวงจรไฟกระแสสลับจะไม่เกิดปัญหาในการที่จะทำให้ เอส ซี อาร์ หยุดนำกระแส เพราะ เอส ซี อาร์ สามารถนำกระแสในช่วงวัฏจักรบวก และหยุดนำกระแสในช่วงวัฏจักรลบ อันเป็นผลมาจากแหล่งจ่ายแรงดันกลับทิศทาง

1.7 ระยะเวลาของสัญญาณทริกเกอร์

ในการทำให้เอส ซี อาร์นำกระแสโดยสัญญาณทริกเกอร์นั้น สัญญาณทริกเกอร์จะต้องมีระยะเวลานานจนกระทั่งกระแสผ่านเอส ซี อาร์มากกว่ากระแสค้าง (Latching Current) ดังรูปที่ 1.16 ถ้าสัญญาณทริกเกอร์สิ้นสุดก่อนที่กระแสผ่านเอส ซี อาร์มากกว่ากระแสค้าง จะทำให้เอส ซี อาร์หยุดนำกระแสเมื่อสัญญาณทริกเกอร์สิ้นสุด ฉะนั้น สัญญาณทริกเกอร์จะต้องมีระยะเวลานานจนกระทั่งกระแสผ่านเอส ซี อาร์มากกว่ากระแสค้าง จึงจะทำให้เอส ซี อาร์นำกระแสต่อไป โดยสามารถนำสัญญาณทริกเกอร์ออก เอส ซี อาร์ก็จะยังคงนำกระแสต่อไป ในรูปที่ 1.16 แสดงเวลาน้อยที่สุด (Time) ที่จะต้องรักษาสัญญาณทริกเกอร์ไว้

ในกรณีที่โหลดเป็นอินดักทีฟ กระแสที่ไหลผ่านเอส ซี อาร์สู่อินดักทีฟโหลดจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น ฉะนั้น ระยะเวลาของสัญญาณทริกเกอร์จะต้องนานจนกระทั่งกระแสไหลมากกว่ากระแสค้างเอสซีอาร์จะนำกระแสต่อไปได้



Trigger pulse width must exceed t_{min}

รูปที่ 1.16 แสดงเวลาน้อยที่สุด ที่จะต้องรักษาสัญญาณทริกเกอร์

1.8 ผลที่ทำให้เอสซีอาร์นำกระแสโดยไม่มีการจุดชนวน

ในบางครั้งเอส ซี อาร์จะเกิดการนำกระแสเอง โดยปราศจากสัญญาณจุดชนวนเกิด สาเหตุเกิดจากการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของแรงดันที่เอาโนดหรือเรียกว่า dv/dt ซึ่งหมายถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันต่อการเปลี่ยนแปลงของเวลาทรานเซียนต์ที่เกิดบริเวณแอ โนดสูงเกินกว่าที่กำหนด หรืออาจเกิดจากทรานเซียนต์ที่ขากเกต

เมื่อเราทำให้เอสซีอาร์หยุดนำกระแสการนำกระแสครั้งต่อไปควรเริ่มต้นจากการป้อนสัญญาณจุดชนวนเกิด

แต่ถ้าเอส ซี อาร์ถูกใช้ในการควบคุมไฟฟ้ากระแสสลับ สาเหตุของการจุดชนวนผิดพลาดอาจเนื่องมาจาก แรงดันทรานเซียนต์รบกวน ซึ่งถูกจำกัดไว้ให้มีค่าแรงดันไม่เกินครึ่งคลื่นของแรงดันที่ใช้ ส่วนการหยุดนำกระแสจะเกิดที่บริเวณแรงดันเป็นศูนย์ของรูปคลื่น

ถ้าใช้ไฟฟ้ากระแสตรง ทรานเซียนต์มักจะมีเกิดจากการเปิด-ปิดอุปกรณ์ต่าง ๆ การนำกระแสเอง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของแรงดันที่เอาโนดอย่างรวดเร็ว สาเหตุจากตัวเก็บประจุภายในเอส ซี อาร์ ส่วนการหยุดนำกระแส จะต้องใช้วงจรที่ออกแบบมาโดยเฉพาะ

แรงดันที่ป้อนให้กับขั้วเอาโนดและคาโทดของเอสซีอาร์ทำให้เกิดการเก็บประจุและเกิดมีกระแสไหลผ่าน ($I = C dv/dt$)

ถ้าอัตราการเพิ่มขึ้นของ แรงดัน เกินค่าที่กำหนดไว้ ค่ากระแสที่เกิดจากการเก็บประจุมากกว่า กระแสจุดชนวนเกิดอีก ซึ่งเป็นเหตุให้ เอส ซี อาร์เกิดการนำกระแสเองได้

1.9 ข้อควรระวังและการป้องกัน

ในอุปกรณ์ที่มีความไวแก่มาก ๆ อัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันต่อเวลาจะสามารถกำหนดโดยการต่อตัวต้านทานจาก ขาคาโทมายังขาเกต แต่ส่วนมากมักจะใช้โครงข่าย RC ในการรักษาค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันต่อเวลาให้อยู่ในระดับที่กำหนดเมื่อเปิดเกตไว้

แรงดันทรานเซียนต์ที่เกิดขึ้นจากผลของการรบกวนในสายไฟฟ้ากระแสสลับที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของแหล่งจ่าย เช่นการกระตุ่นหม้อแปลง, การเปิด-ปิดอุปกรณ์ต่าง ๆ อาจเป็นสาเหตุให้แรงดันของเอส ซี อาร์เพิ่มขึ้นเกินอัตราที่กำหนดไว้

ซึ่งพูดโดยทั่ว ๆ ไป ก็คือ การนำกระแสของเอส ซี อาร์เมื่อเกิดแรงดันพั้ง นั้นเอง ดังนั้นควรระวังการที่จะทำให้เกิดแรงดันพั้งนั้นจริง ๆ แต่ว่าการใช้แรงดันที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้คุณสมบัติในการใช้งานแย่ลงได้

ฉะนั้นจะเป็นผลดีมาก ถ้าหากว่าสามารถกำจัดทรานเซียนต์บางส่วนออก โดยอาจใช้ซีเนอริไดโอดหรือโครงข่าย RC (จะมีผลดีในช่วงความถี่สูง) โครงข่าย RC นี้มักใช้ป้องกัน อัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันต่อเวลาไม่ให้เพิ่มขึ้น และมักจะมีผลในการจำกัดแอมพลิจูดของทรานเซียนต์ได้ดี

สัญญาณรบกวนไฟฟ้ารอบข้าง อาจมีพลังงานสูงเพียงพอที่จะทำให้เกิดกระแสจุกชนวนและเหนี่ยวนำไปยังสายเกต โดยผ่านค่าประจุภายในหรือเหนี่ยวนำโดยสนามแม่เหล็กดังนั้นจึงควรที่จะทำให้สายไฟที่ขาเกตสั้นที่สุด และต่อโดยตรงร่วมกับขาคาโท และที่สำคัญควรใช้สายชนิดดีในการต่อด้วย อีกวิธีหนึ่งให้ตัวต่อเก็บประจุค่าประมาณ 0.01 ถึง 0.1 ไมโครฟารัด ระหว่างขาเกตและขาคาโท

เพื่อเพิ่มความสามารถของเอสซีอาร์ให้ทนต่อแรงดันสูงให้ต่อตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน ตัวเก็บประจุที่ขาเกต และขาคาโท ตัวเก็บประจุที่ขาเกตควรมีอัตราของกระแสจุกชนวนที่ไม่มีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสต่อเวลาถ้ามีกระแสไหลสูง ๆ

การที่จะให้เอส ซี อาร์ใช้งานได้นาน สิ่งสำคัญคือ ส่วนประกอบและขีดจำกัดในการทำงาน ควรให้อยู่ในอัตราที่กำหนด และข้อสำคัญที่สุดคือ อุณหภูมิและแรงดันที่ใช้งาน

อัตราของแรงดันมีผลที่จะทำให้อุณหภูมิของส่วนประกอบต่างๆ เพิ่มขึ้น ดังนั้นการกำหนดอุณหภูมิในการออกแบบ จะกำหนดได้จากอัตราของแรงดัน ความเร็วในการสวิตช์ และอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันต่อเวลา ส่วนอัตราทางกระแสควรเลือกตามอุณหภูมิที่ใช้งาน

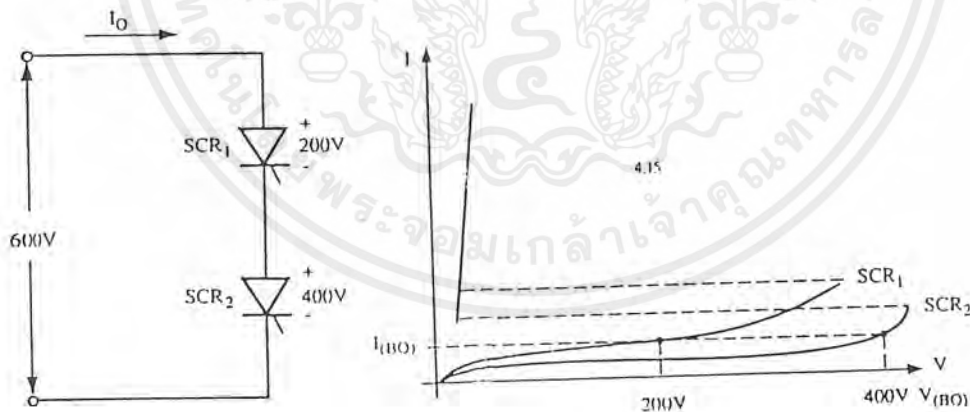
1.10 การต่อ เอสซี อาร์ แบบอันดับและแบบขนาน

การเพิ่มขีดความสามารถของเอส ซี อาร์ กระทำได้โดยการใช้อีส ซี อาร์หลาย ๆ ตัวต่อแบบอันดับ และขนานกัน แต่การต่อจะต้องมีความเข้าใจและความระมัดระวังเป็นพิเศษ เพราะมีฉะนั้นเอส ซี อาร์อาจเกิดการเสียหายได้

1.10.1 การต่อ เอส ซี อาร์แบบอันดับ

แม้ว่าในปัจจุบัน เอส ซี อาร์ จะมีค่าแรงดันปิดกั้น (Blocking Voltage) มากกว่า 1,000 โวลต์ แต่ในการใช้งานบางอย่าง เอส ซี อาร์ก็ไม่สามารถทำงานได้ อย่างเช่นวงจรถอนอินเวอร์เตอร์ ที่ใช้เวลาในการเปิด-ปิดความเร็วสูงซึ่ง เอส ซี อาร์ที่มีความเร็วสูง มักจะมีแรงดันปิดกั้นต่ำ จึงจำเป็นต้องใช้อีส ซี อาร์หลาย ๆ ตัวมาต่ออันดับกันแต่จะต้องมีการทำให้แรงดันคร่อม เอส ซี อาร์ แต่ละตัวขณะนำกระแส และหยุดนำกระแสมีค่าเท่า ๆ กันเพื่อป้องกันไม่ให้ เอส ซี อาร์ แต่ละตัวได้รับความเสียหาย

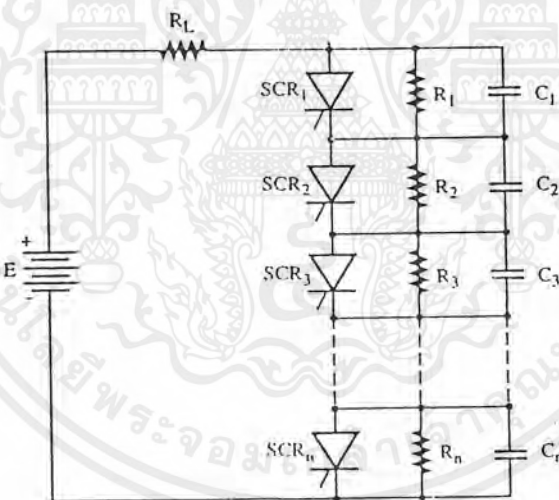
จากรูปที่ 1.17 แสดงตัวอย่างลักษณะสมบัติของ เอส ซี อาร์ 2 ตัว เบอร์เดียวกันแต่มีคุณสมบัติแตกต่างกันเล็กน้อย เมื่อนำเอส ซี อาร์ มาต่ออันดับกัน จะมีผลทำให้แรงดันคร่อมเอส ซี อาร์ แต่ละตัวไม่เท่ากัน



รูปที่ 1.17 แสดงการต่อใช้งาน เอสซีอาร์ แบบอันดับ

เมื่อต่อเอส ซี อาร์ แบบอันดับดังแสดงในรูปที่ 17 กระแสรั่วไหลในวงจรจะมีค่าเท่ากันแต่แรงดันคร่อม เอส ซี อาร์ ทั้งสองตัวมีค่าต่างกัน คือ เอส ซี อาร์ ตัวที่หนึ่งมีค่า 200 โวลต์ และเอส ซี เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาร์ คิวที่สองมีค่า 400 โวลต์ เมื่อเอส ซี อาร์คิวที่ 2 นำกระแสได้เองโดยไม่มีการจุดชนวนเพราะมีแรงดันคร่อมตัวมันใกล้จุดแรงดันจุดเริ่มทลาย (Break Over Voltage) และ ขณะที่เอส ซี อาร์ คิวที่สองนำกระแสได้แล้วแรงดันทั้งหมดก็จะมาคร่อมที่เอส ซี อาร์ คิวที่ 1 ตัวเดียว ซึ่งทำให้เกินขีดความสามารถที่ เอส ซี อาร์ คิวที่ 1 ทนได้ เอส ซี อาร์ คิวที่ 1 ก็จะนำกระแสตามไปด้วย ดังนั้นเพื่อป้องกันการเกิดปัญหา เอส ซี อาร์ นำกระแสได้เอง ก็จะต้องทำให้ เอส ซี อาร์ ทั้งหมดเฉลี่ยแรงดันตกคร่อมตัวมันเท่า ๆ กัน ทั้งสถานะแรงดันคงที่ และขณะแรงดันเปลี่ยนแปลงด้วยวิธีการคือ การปรับเท่าแรงดัน (Voltage Equalization) โดยใช้ตัวต้านทานและ ตัวเก็บประจุมาต่อขนานเข้ากับตัวเอส ซี อาร์ทุกตัว ซึ่งทำให้ค่าของแรงดันจะขึ้นอยู่กับค่าของความต้านทานขณะแรงดันคงที่ และขณะแรงดันเปลี่ยนแปลงจะขึ้นอยู่กับแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ ดังแสดงในรูปที่ 1.18

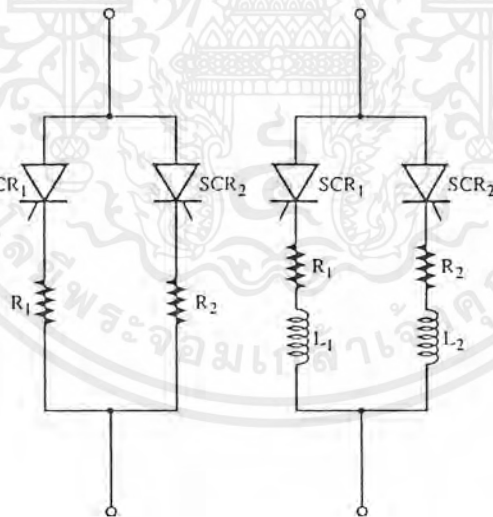


รูปที่ 1. 18 แสดงลักษณะสมบัติเปรียบเทียบของ
เอส ซี อาร์ สองตัวเบอร์เดียวกันและต่ออันดับกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.10.2 การต่อ เอส ซี อาร์ แบบขนาน

เป็นวิธีการเพิ่มขีดความสามารถของ เอส ซี อาร์ ให้ทนกระแสได้สูงขึ้นการต่อเอส ซี อาร์ แบบนี้ไม่ค่อยได้รับความนิยม แต่ถ้ามีความจำเป็นก็สามารถทำได้ หลักสำคัญในการพิจารณาเมื่อต้องใช้ เอส ซี อาร์ มาต่อขนานกันคือการแบ่งกระแสที่ไหลผ่านเอส ซี อาร์ แต่ละตัวให้ใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นสาเหตุอันเนื่องมาจาก เอส ซี อาร์ แต่ละตัวมีคุณสมบัติแตกต่างกัน เราสามารถที่จะทำการแบ่งกระแสได้โดยวิธีการปรับเท่ากระแส (Current Equalization) โดยการใช้ตัวต้านทาน (R) หรือ ตัวต้านทาน (R) และ ตัวเหนี่ยวนำ (L) ต่ออันดับกับเอส ซี อาร์ ก่อนแล้วจึงนำมาต่อขนานกัน ดังแสดงในรูปที่ 1.19



รูปที่ 1.19 แสดงการต่อใช้งาน เอส ซี อาร์ แบบขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.11 การพิจารณาขีดจำกัดของอุปกรณ์ไทรสเตอร์

โดยในการเลือกใช้ต้องพิจารณาจากพิกัดของแรงดัน, กระแส, กำลัง, อุณหภูมิ, dv/dt , di/dt และเวลาในการให้เอส ซี อาร์ นำกระแสและหยุดนำกระแส ซึ่งจะถูกกำหนดไว้ในหนังสือคู่มือ ซึ่งจะมีรหัสสัญลักษณ์ และความหมายของตัวอักษรที่ระบุไว้ข้างท้ายอันแสดงถึงสภาวะการทำงาน ดังแสดงในตารางที่ 1.1 ต่อไปนี้

Symbol Letter Designation Code

Quantity Symbol	1st subscript	2nd subscript	3rd subscript
I = current	(BO) = breakover value	(AV) = average value	M = peak value
$I_{2t} = I \text{ squared} / t$	D = off-state (forward blocking)	D = value not Triggering	(RMS) = root-mean square value
P = power	F = forward-biased State (only for gate)	Any device	
T = temperature	G = gate	M = peak value	
V = voltage	H = holding value	MAX = permissible maximum value	
	j = junction	R = repetitive value	
	L = latching value	(RMS) = root-mean- square value	
	R = reverse-biased state	S = surge (non- Repetitive) value	
	Stg = storage condition (non-operational)	T = value triggering	
	T = on-state	All devices	
		W = working value (excluding repetitive cluding repetitive and non-repetitive transients)	

ตารางที่ 1.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.11.1 พิกัดของแรงดันไทรสเตอร์ (Thyristor Voltage Ratings)

V_{DWM} และ V_{RWM} (Crest Working Off-State Voltage And Crest Working Reverse Voltage)

หมายถึง แรงดันทางด้านฟอร์เวิร์ด และรีเวิร์ดสูงสุดของแหล่งจ่ายไปกระแสสลับ ($\sqrt{2} V_{RMS}$) ที่จ่ายให้เอสซีอาร์ และ เอสซีอาร์จะไม่นำกระแส โดยไม่สัญญาณทรigger ซึ่งไม่คิดแรงดันชั่วครู่ (Transient Voltage) ที่เกิดขึ้นซ้ำ ๆ และไม่ซ้ำ ๆ (Repetitive And Non-Repetitive)

Peak V_{DRM} และ V_{RRM} (Repetitive Off-State Voltage And Crest Working Reverse Voltage)

หมายถึง แรงดันในสถานะชั่วครู่ถ้าไม่เกินกำหนดทางด้านแรงดันฟอร์เวิร์ด และ รีเวิร์ดที่เกิดขึ้นซ้ำ ๆ ในทุก ๆ ไซเคิลของแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ ซึ่งไม่รวมถึงแรงดันในสถานะชั่วครู่ที่เกิดขึ้นไม่ซ้ำ ๆ และจะไม่ทำให้เอสซีอาร์ทำกระแสขณะที่ไม่มีการจุดชนวน

V_{DSM} และ V_{RSM} (Non-Repetitive Off-State Voltage And Non Repetitive Peak Reverse Voltage)

หมายถึง แรงดันในสถานะชั่วครู่ทางฟอร์เวิร์ดและรีเวิร์ดที่เกิดขึ้นไม่ซ้ำ ๆ ในทุก ๆ ไซเคิลของแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับและ ไม่ทำให้เอสซีอาร์นำกระแสขณะที่ไม่มีการจุดชนวน

V_{TM} (Maximun On-State Voltage)

หมายถึง ค่าแรงดันสูงสุดชั่วครู่คร่อมไทรสเตอร์ขณะนำกระแสที่ค่ากระแสสูง ๆ ตามที่กำหนด ณ อุณหภูมิ 25 °C ค่านี้จะบอกถึงประสิทธิภาพของไทรสเตอร์

dv/dt (Critical Rate Of Rise Of On-State Voltage)

หมายถึง เป็นค่าต่ำสุดของอัตราการเพิ่มแรงดันไปอัสฟอร์เวิร์ดคร่อมไทรสเตอร์ที่ทำให้มันเปลี่ยน สถานะเข้าสู่การนำกระแส คือ ทำแรงดันที่แอนโอด ของไทรสเตอร์เพิ่มขึ้นเร็วกว่า dv/dt ผลของตัวเก็บประจุที่เกิดขึ้นภายในไทรสเตอร์ จะทำให้เกิดกระแสจำนวนมากพอไหลเข้าเกต และไทรสเตอร์จะนำกระแสเองได้โดยไม่ต้องมีการจุดชนวนจากภายนอก โดยปกติ dv/dt จะมีค่าอยู่ระหว่าง 8 v/ μ s ถึง 125 v/ μ s

1.11.2 พิกัดของกระแสไทรสเตอร์ (Thyristor Current Ratings)

$I_{T(RMS)}$ (RMS On-State Current)

หมายถึง ค่ากระแสสูงสุดในหน่วย อาร์ เอ็ม เอส ที่ไหลผ่านไทรสเตอร์ ขณะนำกระแสได้อย่างต่อเนื่อง โดยที่ไทรสเตอร์ยังไม่เสียหายเมื่ออุณหภูมิไม่สูงกว่าที่กำหนด และค่านี้จะไม่ขึ้นอยู่กับรูปคลื่นของกระแส

$I_{T(AV)}$ (Average On-State Current)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายถึง ค่ากระแสเฉลี่ยสูงสุดที่ไหลผ่าน เอส ซี อาร์ ขณะนำกระแสได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่ทำให้ เอส ซี อาร์ เสียหายในอุณหภูมิที่ไม่สูงกว่าที่กำหนด

I_{TSM} (Non-Repetitive Surge On-State Current)

หมายถึง ค่ากระแสกระชากสูงสุดที่เกิดขึ้นไม่ซ้ำในช่วงเวลาสั้น ๆ ที่ยอมให้ไหลผ่านไทรสเตอร์ขณะนำกระแส

I_{DRM} และ I_{RRM} (Peak Forward And Reverse Leakage Current)

หมายถึง ค่ากระแสรั่วที่ไหลผ่าน เอส ซี อาร์ เมื่อได้รับแรงดันฟอร์เวิร์ดและแรงดันรีเวิร์ดสูงสุด

I^2t (Surge Current Capability For Fusing)

หมายถึง ค่ากระแสกำลังสองคูณกับเวลา ซึ่งต้องไม่เกินกว่ากำหนดและค่านี้จะเป็นค่าบอกคุณสมบัติของฟิวส์ที่ใช้ป้องกันพวก เอส ซี อาร์ พลังงานที่ทำให้ฟิวส์ขาด $= I^2 RT \propto I^2 t$

I_H (Holding Current)

หมายถึง กระแสยึดเป็นค่ากระแสแอนโหนดต่ำสุดที่ไทรสเตอร์ต้องการ เพื่อให้คงอยู่ในสถานะนำกระแสได้ ถ้ากระแสแอนโหนดต่ำกว่าค่ากระแสยึด ไทรสเตอร์จะหยุดนำกระแสโดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ระหว่าง 5 ถึง 70 มิลลิแอมป์

I_L (Latching Current)

หมายถึง กระแสค้างเป็นค่ากระแสแอนโหนดต่ำสุดที่ไทรสเตอร์ต้องการ เพื่อให้คงอยู่ในสถานะนำกระแสได้ขณะเมื่อเอาฟิวส์ที่จะชนวนเกดออกไปแล้ว ตามปกติกระแสค้างจะมีค่าสูงกว่ากระแสยึดอยู่ประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์

di/dt (Rate-Of-Change Of On-State Current)

หมายถึง อัตราการเพิ่มขึ้นสูงสุดของกระแสที่ไหลผ่านไทรสเตอร์ หลังจากถูกนำกระแส โดยไม่ทำให้ไทรสเตอร์เสียหาย หรือทำงานผิดพลาด โดยทั่วไปค่า di/dt จะมีค่าอยู่ระหว่าง $100A/\mu s$ ถึง $400A/\mu s$ แต่ทว่า เมื่อเอส ซี อาร์ ถูกทริกให้เริ่มนำกระแสสารกึ่งตัวนำที่อยู่ใกล้ ๆ เกดของเอส ซี อาร์ จะนำกระแส ซึ่งมีพื้นที่เล็ก ๆ ก่อนแล้วค่อย ๆ กระจายไปพื้นที่ทั้งหมดของสารกึ่งตัวนำ เพราะฉะนั้น ถ้าอัตราการเพิ่มขึ้นของกระแสต่อเวลา (di/dt) สูงกว่าที่กำหนดเป็นสาเหตุทำให้เกิดความร้อนเฉพาะจุด (Hot Spots) ที่ Junction และทำให้เอส ซี อาร์ เสียหายไป ในการลดอัตราการเพิ่มขึ้นของกระแสต่อเวลา จะทำโดยการต่อ Inductance อนุกรมกับเอส ซี อาร์

1.11.3 พิกัดของอุณหภูมิ (Temperature Ratings)

T_{STg} (Storage Temperature)

หมายถึง ค่าอุณหภูมิสะสม (หน่วย $^{\circ}C$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T_j (Junction Temperature)

หมายถึง ค่าอุณหภูมิตรงรอยต่อของสารกึ่งตัวนำ PNP

$R_{\theta_{jc}}$ (Resistance Temperature between Junction and Case)

หมายถึง ความต้านทานอุณหภูมิ ระหว่าง Junction กับ Case มีหน่วยเป็น $^{\circ}\text{C}/\text{watt}$

$R_{\theta_{cs}}$ (Resistance Temperature between Case And Heat Sink)

หมายถึง ความต้านทานอุณหภูมิ ระหว่าง Case กับ Heat sink มีหน่วยเป็น $^{\circ}\text{C}/\text{watt}$

t_{off} (Turn-Off Time)

หมายถึง ช่วงเวลาที่ไทรสเตอร์เริ่มหยุดนำกระแส เพราะ เป็นช่วงเวลาระหว่างที่กระแส แอนโวลตลงเป็นศูนย์และแรงดันคร่อม ไทรสเตอร์มีค่าเป็นศูนย์ด้วย

1.11.4 พิกัดของเกต (Gate Ratings)

V_{GT} (DC Gate-Trigger Voltage)

หมายถึง แรงดันจุดชนวนเกตที่ทำให้ระหว่างขาเกต และขาคาโทดของเอส ซี อาร์ อันที่จะ ทำให้เกิดกระแสจุดชนวนเกตและ ไทรสเตอร์สามารถนำกระแสได้ V_{GT} จะเป็นค่าที่กำหนดมา สำหรับโหนดค่าหนึ่ง ณ อุณหภูมิ 25°C ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น ไทรสเตอร์จะต้องการ V_{GT} น้อยลง

I_{GT} (DC Gate-Trigger Current)

หมายถึง กระแสจุดชนวนเกตที่ทำให้ไทรสเตอร์นำกระแสได้ I_{GT} จะถูกกำหนดสำหรับ โหนด ค่าหนึ่ง ณ อุณหภูมิ 25°C ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นค่า I_{GT} จะลดลง

I_{GTM} (Peak Gate-Trigger Current)

หมายถึง กระแสจุดชนวนเกตสูงสุดในการทำให้ไทรสเตอร์เข้าสู่สถานะนำกระแสได้โดย ที่ไม่เสียหาย I_{GTM} จะต้องกำหนดด้วยว่าเป็นค่ากระแสที่จ่ายให้เกตนานเท่าใด

I_{GRM} (Peak Reverse Gate Current)

หมายถึง กระแสจุดชนวนเกตสูงสุดทางด้านรีเวิร์ด

V_{GRM} (Peak Reverse Gate Current)

หมายถึง แรงดันจุดชนวนเกตย้อนกลับสูงสุดที่จ่ายให้แก่ขาเกตของ ไทรสเตอร์ได้โดยที่ เกตไม่เสียหาย โดยปกติ V_{GRM} จะมีค่าอยู่ระหว่าง 5 ถึง 10 โวลต์

P_{GM} (Peak Gate Power Dissipation)

หมายถึง ค่ากำลังงานสูงสุดที่เกิดจะทนได้ในเวลาที่กำหนดค่า P_{GM} จะมีค่าอยู่ระหว่าง 10 ถึง 40 วัตต์ ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของ ไทรสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P_{GM} (Peak Gate Power Dissipation)

หมายถึง ค่ากำลังงานสูงสุดที่เกิดจะทนได้ในเวลาที่กำหนดค่า P_{GM} จะมีค่าอยู่ระหว่าง 10 ถึง 40 วัตต์ ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของไทรสเตอร์

$P_{G(AV)}$ (Average Gate Power Dissipation)

หมายถึง ค่ากำลังงานเฉลี่ยสูงสุดที่เกิดจะทนได้ที่อุณหภูมิ และเวลาที่กำหนดค่า $P_{G(AV)}$ จะอยู่ระหว่าง 150 มิลลิวัตต์ ถึง 1 วัตต์

1.12 ชนิดของไทรสเตอร์

(THYRISTOR TYPES)

ชนิดอุปกรณ์ไทรสเตอร์สามารถแบ่งได้หลายชนิด แต่ในที่นี้จะขอกกล่าวถึงชนิดของเอส ซี อาร์ เท่านั้น โดยเอส ซี อาร์ แบ่งออกได้ 2 ชนิด คือ

1. Phase-Control Thyristor (SCR_S)
2. Fast-Switching Thyristor (SCR_S)

1. PHASE-CONTROL THYRISTOR

เป็นอุปกรณ์ที่มี Turn-Off เหมาะสำหรับการหยุดนำกระแสโดยธรรมชาติ ซึ่งจะมี Turn-Off-Time (t_q) ระหว่าง 50 – 100 uses ใช้ในวงจรเปลี่ยนไฟกระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง และวงจรเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับโดยการควบคุมเฟส โดยมีความเร็วในการสวิตซ์ซึ่งต่ำ

2. FAST-SWITCHING THYRISTOR

Fast-Switching SCR'S มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Inverter SCR'S ซึ่งมีช่วงเวลาในการ Turn-Off (t_q) ระหว่าง 5 – 50 us โดยมีความเร็วในการสวิตซ์ซึ่งสูง ซึ่งจะใช้ในการหยุดนำกระแสแบบบีบบังคับ (Forced Commutation) ส่วนมากจะใช้ในวงจรเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยวิธีการชอปเปอร์ (Chopper) และวงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (Invertors)

บทที่ 2

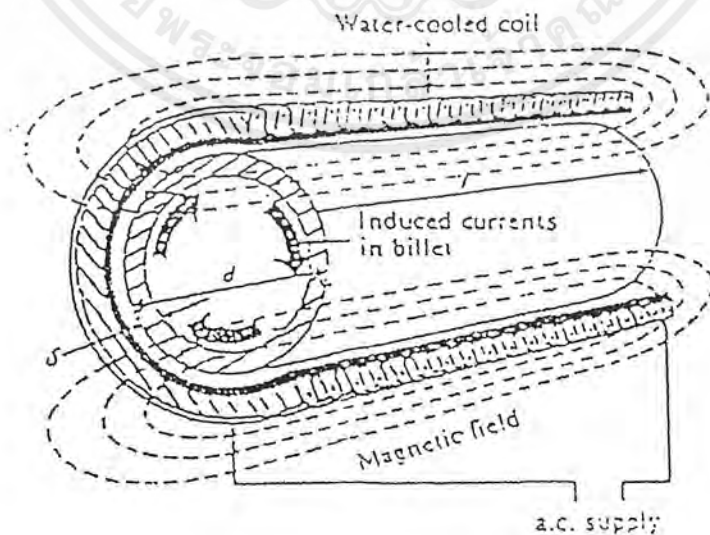
ทฤษฎีการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

2.1 หลักการเบื้องต้น

การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ (Induction Heating) โดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Induction) ปรากฏการณ์ผิว (Skin effect) และการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) [Davies et al., 1979] จากสาเหตุมูลฐานทั้งสามสามารถอธิบายการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำได้โดยย่อดังนี้

เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเข้าสู่ขดลวดเหนี่ยวนำที่มีชิ้นงานอยู่ภายใน ไฟฟ้ากระแสสลับจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นในขดลวดคล่องผ่านชิ้นงาน เนื่องจากชิ้นงานเป็นโลหะ สนามแม่เหล็กคล่องผ่านชิ้นงานจะเหนี่ยวนำให้มีกระแสไฟฟ้าไหล โดยกระแสส่วนมากจะไหลผ่านชิ้นงานในระดับความลึกผิว (Skin depth) กระแสที่ไหลวนรอบชิ้นงานทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่บริเวณผิวของชิ้นงาน ความร้อนนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสที่เหนี่ยวนำและความต้านทานสมมูลของเส้นทางที่กระแสไหลผ่าน ความร้อนที่เกิดขึ้นจะถ่ายเทไปยังบริเวณอื่น โดยอาศัยหลักการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีที่บริเวณผิว

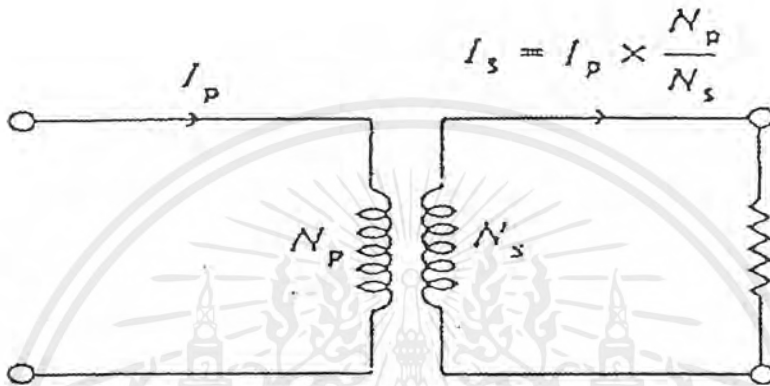
จากรูปที่ 2.1 แสดงการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำอย่างง่าย กล่าวคือ ถ้าวางชิ้นงานไว้ในขดลวด หรือใกล้กับขดลวดเหนี่ยวนำ ชิ้นงานนั้นจะถูกเหนี่ยวนำทำให้เกิดความร้อนขึ้น ถ้าพิจารณาทั้งระบบว่าเป็นระบบของหม้อแปลง ก็เสมือนว่าขดลวดเหนี่ยวนำคือขดลวดปฐมภูมิและชิ้นงานเป็นขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง



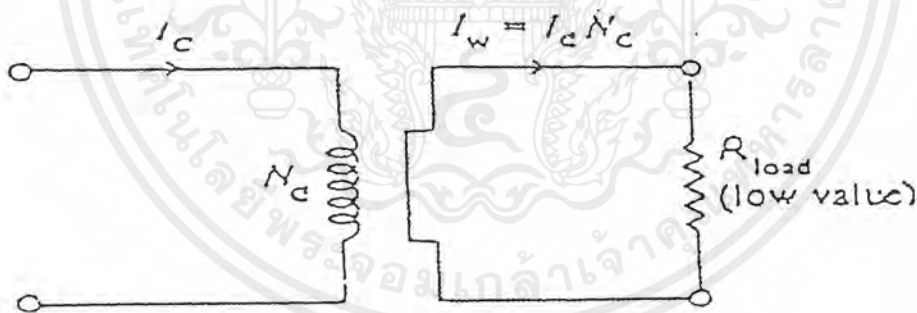
ที่ 2.1 การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำอย่างง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.2 แสดงวงจรสมมูลของวงจรทั่ว ๆ ไป ส่วนรูปที่ 2.3 แสดงวงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงาน จะเห็นว่าถ้า I_c เป็นกระแสที่ไหลในขดลวดเหนี่ยวนำและ I_w เป็นกระแสที่ไหลในชิ้นงาน โดยอาศัยความสัมพันธ์ของหม้อแปลง จะทำให้กระแสทั้งสองมีความสัมพันธ์กันดังนี้



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของหม้อแปลงทั่ว ๆ ไป



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงาน

$$I_w = N_c I_c \quad \text{แอมแปร์} \quad (2.1)$$

โดย N_c คือ จำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ และกำลังสูญเสียในรูปของความร้อนของชิ้นงานเท่ากับ

$$P_w = N_c^2 I_c^2 R_w \quad \text{วัตต์} \quad (2.2)$$

โดย R_w คือ ความต้านทานสมมูลของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.4 แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ขึ้นงานจากปรากฏการณ์ผิวถ้าพิจารณาว่ากระแสโดยส่วนมากจะอยู่ในระดับความลึกผิว จะสามารถหาความต้านของขึ้นงานได้ดังรูปที่ 2.5 โดยทำการคลี่ขึ้นงานออกและประมาณว่ากระแสไหลเป็นแผ่นบาง ที่มีความหนาเท่ากับความลึกผิว ซึ่งระยะทางการไหลมีค่าเท่ากับขนาดเส้นรอบวงของขึ้นงานทรงกระบอกทำให้ได้ค่าความต้านทานของขึ้นงานดังนี้

$$R_w = \frac{2\pi R_p}{\delta l_w} \quad \text{โอห์ม} \quad (2.3)$$

โดย ρ คือ สภาพความต้านทานเฉพาะของขึ้นงาน

$$\delta \text{ คือ ความลึกผิว} = \sqrt{\frac{\rho}{\mu f \pi}} = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu \omega}}$$

μ คือ ค่าความซึมซาบได้ของขึ้นงาน

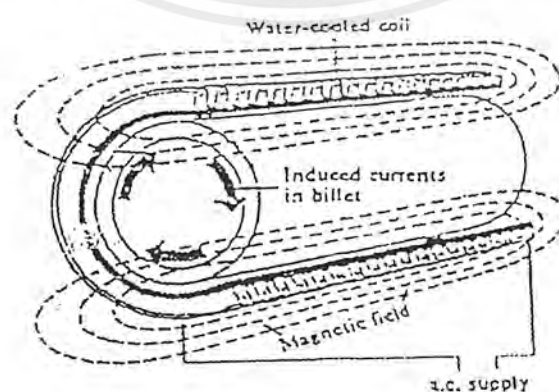
R_p คือ รัศมีของขึ้นงาน

f คือ ความถี่

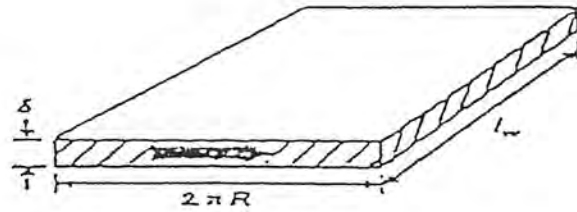
ω คือ ความถี่เชิงมุม

l_w คือ ความยาวของขึ้นงาน ซึ่งมีค่าเท่ากับความสูงของลวดเหนี่ยวนำ

จากสมการที่ (2.3) จะเห็นได้ว่าความต้านทานสมมูลจะมีความสัมพันธ์กับสภาพความต้านทานของความลึกผิวและลักษณะทางเรขาคณิตของขึ้นงานด้วย

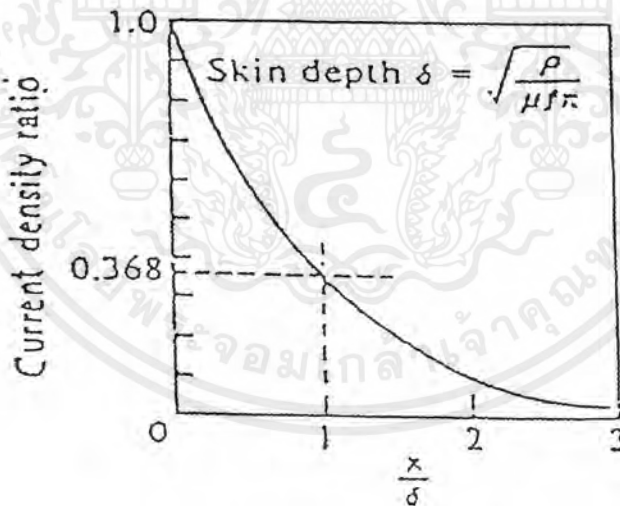


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แผ่นคัลล์ของชิ้นงาน

จากรูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับระยะทางจากผิวของชิ้นงานเนื่องจากปรากฏการณ์ผิว จึงทำให้ความหนาแน่นกระแสจะมีค่าเพียง 0.368 เท่าของความหนาแน่นกระแสที่ผิวชิ้นงานจึงประมาณว่ากระแสส่วนมากจะไหลอยู่ในระดับความลึกผิวนี้



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับความลึกผิว

การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำนี้ไม่ได้ใช้แหล่งความร้อนจากภายนอก แต่ใช้ชิ้นงานเป็นแหล่งความร้อนของตัวเอง อีกทั้งชิ้นงานก็ไม่จำเป็นต้องสัมผัสกับแหล่งจ่ายพลังงาน ซึ่งได้แก่ขดลวดเหนี่ยวนำ การให้ความร้อนจึงทำได้โดยสะดวก การให้ความร้อนแบบนี้ทำให้เกิดความร้อนสูงเฉพาะตำแหน่งที่ต้องการ เราสามารถควบคุมเวลาที่จะให้ความร้อน ตลอดจนพื้นที่ของชิ้นงานที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

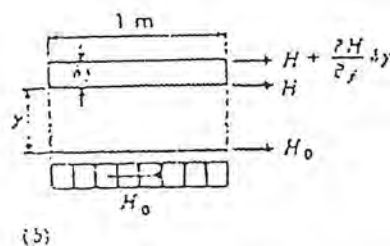
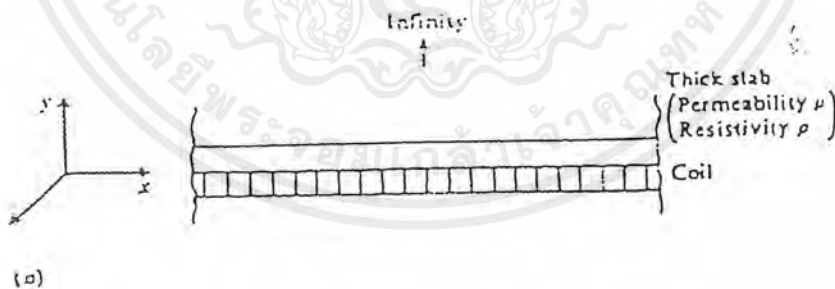
ได้รับความร้อนและสามารถควบคุมความลึกของชั้นงานได้ โดยการเลือกความถี่ของแรงดันไฟฟ้า กระแสสลับให้เหมาะสม

2.2 ทฤษฎีการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

ทฤษฎีการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสามารถอธิบายให้เข้าใจได้โดยอาศัยทฤษฎีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในการศึกษาบททฤษฎีเหล่านี้ต้องใช้สมการคณิตศาสตร์ที่ยุ่งยากจึงได้พยายามศึกษาทฤษฎีการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ กับชั้นงานในลักษณะอุดมคติที่เรียกว่า Semi-infinite Slab เป็นการเบื้องต้นก่อน ซึ่งเป็นสมการในรูปของฟังก์ชันซายน์และเอกซ์โปเนนเชียล แต่อย่างก็ตามการพิจารณาชั้นงานในลักษณะที่เป็นอุดมคติก่อน จะช่วยทำให้เกิดความเข้าใจกลไกในการเหนี่ยวนำความร้อนสำหรับชั้นงานอื่น ๆ ได้ดียิ่งขึ้น

2.2.1 การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำกับชั้นงานอุดมคติ

ชั้นงานอุดมคติที่กล่าวถึงคือ ชั้นงานที่เรียกว่า Semi-infinite Slab ซึ่งถือว่าชั้นงานนี้ยาวและหนามาก ซึ่งการสมมุติแบบนี้จะช่วยให้ผลเฉลยของการวิเคราะห์อยู่ในรูปฟังก์ชันง่าย ๆ ดังที่กล่าวไปแล้ว จากรูปที่ 2.7 แสดงการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำกับชั้นงานลักษณะอุดมคติซึ่งวางขดลวดขดลวด ทำให้สมมุติได้ว่าที่ผิวของชั้นงานมีค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก H_0 เท่ากับความเข้มสนามแม่เหล็กที่ขดลวดสร้างขึ้น ซึ่งความเข้มสนามแม่เหล็กนี้จะมีค่าเปลี่ยนแปลงกับเวลาในทิศทางตามแกน X และเป็นปริมาณเวกเตอร์โดยจะเหนี่ยวนำทำให้เกิดกระแสไหลที่ผิวของชั้นงานในทิศทางแกน Z ส่วนทิศทางตามแกน Y จะชี้ไปตามความหนาของชั้นงาน



รูปที่ 2.7 การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำกับชั้นงานลักษณะอุดมคติ

ในที่นี้จะสมมุติเงื่อนไขขอบเขตของสนามแม่เหล็กที่ผิวชั้นงานดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 H_{x(y=0)} &= H_{om} \cos \omega t \\
 H_y &= 0 \\
 H_x &= 0
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

โดยที่ H_{om} คือค่ายอดของ H_x ที่ผิวชั้นงาน ($y = 0$)

การกระจายของสนามแม่เหล็ก (H) สนามไฟฟ้า (E) และความหนาแน่นกระแส (J) ในชั้นงานโลหะที่มีความถี่ค่อนข้างต่ำ (ไม่เกิน 10_{10} Hz) อธิบายโดยใช้สมการพื้นฐานทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \nabla^2 \bar{H} &= \frac{\mu \partial \bar{H}}{\rho \partial t} \\
 \nabla^2 \bar{E} &= \frac{\mu \partial \bar{E}}{\rho \partial t} \\
 \nabla^2 \bar{J} &= \frac{\mu \partial \bar{J}}{\rho \partial t}
 \end{aligned}
 \tag{2.5}$$

พิจารณาที่สนามแม่เหล็ก H จาก

$$\begin{aligned}
 \nabla^2 H &= \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} \\
 &= \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial}{\partial t} (H_x + H_y + H_z)
 \end{aligned}$$

เนื่องจาก $H_y = H_z = 0$ เท่านั้น แต่จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสนามแม่เหล็กที่เวลาใดเวลาหนึ่งต่อระยะทางตามแนวแกน X และแกน Z ดังนั้น

$$\nabla^2 H = \frac{\partial^2 H_x}{\partial x^2} = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial H_x}{\partial t}
 \tag{2.6}$$

คำตอบของสมการอนุพันธ์ย่อยจะมีผลเฉลยในรูป $H_x = H_{x(y)} \cos \omega t$ ซึ่ง $H_{x(y)}$ คือการเปลี่ยนแปลงของ H_x กับระยะทางในแนวแกน Y (ความลึกจากผิวของชั้นงาน) แต่ในการวิเคราะห์ที่ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถแทน H_x ให้อยู่ในรูปของปริมาณเชิงซ้อน $H_{x(y)}e^{(j\omega t)}$ ก่อน แล้วหลังจากที่ได้ผลเฉลยจึง ค่อยนำเฉพาะค่าส่วนจริง (Real Point) ไปใช้ จากการแทนค่าปริมาณเชิงซ้อนในสมการที่ (2.6) ได้ ผลดังนี้

$$\frac{d^2H}{dy^2} - j\frac{\mu}{\rho}\omega H_x = 0$$

$$\text{ให้ } \alpha^2 = \frac{\mu\omega}{2\rho} = \frac{1}{\delta^2}$$

$$\frac{d^2H}{dy^2} - 2j\alpha^2 H_x = 0$$

เขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$\frac{d^2H}{dy^2} - k^2 H_x = 0$$

โดย $k^2 = 2j\alpha^2$ สมการข้างบนจึงมีผลเฉลยดังนี้

$$H_{x(y)} = A_1 e^{(ky)} + A_2 e^{(-ky)} \quad (2.7)$$

จากเงื่อนไขขอบเขตเมื่อ $y = \alpha$ และ H_x จะต้องมีค่าจำกัดค่าใดค่าหนึ่งดังนั้นจะได้ $A_1 = 0$ และที่ขอบเขต $y = 0$; $H_{x(y)} = H_{om} e^{(j\omega x)}$ ดังนั้นจะได้ $A_2 = H_{om} e^{(j\omega t)}$ แทนค่าในสมการ (2.7) จะได้

$$H_{x(y)} = H_{om} e^{(-ky)} e^{(j\omega t)}$$

$$H_{x(y)} = H_{om} e^{(-\alpha y \sqrt{2j})} e^{(j\omega t)}$$

$$\text{แต่ } \sqrt{2j} = 1 + j \text{ ดังนั้น}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 H_{x(y)} &= H_{om} e^{[-(1+j)\alpha y]} e^{j\omega t} \\
 &= H_{om} e^{[-(1+j)\alpha y + j\omega t]} \\
 &= H_{om} e^{(\alpha y)} e^{j(\omega t - \alpha y)}
 \end{aligned}$$

ใช้ค่าตอบเฉพาะส่วนจริง คือ

$$H_{x(y)} = H_{om} e^{(-\alpha y)} \cos(\omega t - \alpha y) \quad (2.8)$$

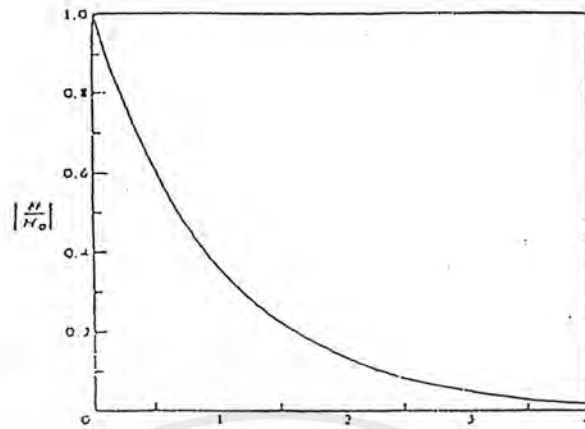
จากสมการที่ (2.8) พบว่าที่บริเวณผิวของชิ้นงาน $y=0$ จะได้ค่าตาม $H_x = H_{om} \cos \omega t$ เส้นใจขอบเขตที่สมมุติไว้และที่ระยะใด ๆ จากผิวของงานในทิศทางแกน Y ขนาดของความเข้มสนามแม่เหล็กจะมีค่าลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล และการเปลี่ยนแปลงของมุมเฟสที่ระยะใด ๆ จากผิวของชิ้นงานจะเป็นแบบล่าช้าเมื่อเทียบกับมุมเฟสที่ผิวซึ่งล่าช้าเป็นปริมาณ $\alpha y = y/\delta$ จากสมการที่ (2.8) เมื่อ $y = 1/\alpha$ ปริมาณ H ลดลงเป็น e^{-1} เท่าของค่า H ที่ผิวและเฟสจะเปลี่ยนไปเป็น 1 เรเดียน (57.3 องศา) ที่ความลึกซึ่งขนาดของ H เป็น $e^{-1} = 0.368$ เท่ากับค่าที่ผิว ค่า y ที่จุดนี้เป็นปริมาณสำคัญซึ่งนิยมให้เรียกว่า ความลึกผิว (Skin Depth), δ

$$\text{จากตัวแปรที่นิยามไว้แล้ว } \alpha^2 = \frac{\mu\omega}{2\rho}$$

$$\text{ดังนั้นความลึกผิว } \delta = \frac{1}{\alpha} = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}} = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_r \mu_0}}$$

จากรูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสนามแม่เหล็กกับระยะจากผิวชิ้นงาน ซึ่งบอกเป็นอัตราส่วน y/δ หรือจำนวนเท่าของความลึกผิว ซึ่งเป็นระยะทางจากผิวของชิ้นงาน ที่นิยมใช้ในงานของการเหนี่ยวนำความร้อนมาก จากค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (\bar{H}) ในสมการที่ (2.8) จะสามารถหาค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก (\bar{B}) ความหนาแน่นกระแส (\bar{J}) และค่าความเข้มสนามไฟฟ้า (\bar{E}) ได้โดยใช้ความสัมพันธ์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสนามแม่เหล็กกับระยะทางจากผิวขั้วงาน

จาก $\vec{B} = \mu\vec{H}$

$$\text{ดังนั้น } B_{x(y)} = B_{om} e^{(-\alpha y)} \cos(\omega t - \alpha y) \quad (2.10)$$

และสมการของแมกซ์เวลล์ $\vec{J} = \text{curl}(\vec{H})$

$$\text{curl}\vec{H} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial Y} & 0 \\ H_x & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

เนื่องจาก $H_x = H_y = 0$ และไม่มีการเปลี่ยนแปลงของ H ในทิศทางแกน X และตามแกน Z ดังนั้น

$$\text{curl}\vec{H} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial X} & \frac{\partial}{\partial Y} & \frac{\partial}{\partial Z} \\ H_x & H_y & H_z \end{vmatrix}$$

จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{J} = \bar{k} \frac{\partial H_x}{\partial y} = \bar{k} \left\{ -e^{(j\omega t)} \left[\frac{\partial}{\partial y} e^{(-\alpha y)} \sqrt{2j} \right] \right\} H_{om}$$

$$\bar{J} = \bar{k} [\alpha \sqrt{2j} e^{(-\alpha y \sqrt{2j} + j\omega t)}] H_{om}$$

แต่ $\sqrt{2j} = 1 + j = \sqrt{2} e^{(j\frac{\pi}{4})}$

$$\bar{J}_z = \bar{k} \left[\alpha \sqrt{2} e^{(-\alpha y(1+j) + j\omega t + j\frac{\pi}{4})} \right] H_{om} \quad (2.11)$$

$$\bar{J}_z = \bar{k} \alpha \sqrt{2} H_{om} \left[e^{(-\alpha y)} \cos \left(\omega t - \alpha y + \frac{\pi}{4} \right) \right] \quad (2.12)$$

จากสมการ (2.11) แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นกระแสที่เหนี่ยวนำ มีทิศทางตั้งฉากกับความเข้มนามแม่เหล็กเสมอ กล่าวคือมีทิศทางตามแกน Z และมีมุมเฟสหน้าหน้าความเข้มนามแม่เหล็กอยู่ 45 องศา $\left(\frac{\pi}{4} \right)$

เมื่อ $y = 0$

$$J_{z0} = \sqrt{2} H_{om} \alpha e^{(j\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right))} \quad (2.13)$$

จาก $H_{ax} = H_{om} e^{(j\omega t)}$

$$J_{z0} = \sqrt{2} H_{x0} \alpha e^{(j\frac{\pi}{4})}$$

ดังนั้น $\bar{J}_z = J_{om} e^{(j\omega t - \alpha y \sqrt{2j})}$

ใช้เฉพาะส่วนจริง $J_{x(y)} = J_{om} e^{(-\alpha t)} \cos(\omega t - \alpha t)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลของความหนาแน่นของกระแส สามารถหาค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าได้ จากความสัมพันธ์ทางคลื่น ไฟฟ้าดังนี้

$$\text{จาก } \vec{E} = \rho \vec{J}$$

$$\text{ดังนั้น } E_z = \rho J$$

$$E_z(y) = \rho J_{om} e^{-\alpha y} \cos(\omega t - \alpha y) \quad (2.14)$$

จากผล $\vec{B}, \vec{E}, \vec{J}$ ตามสมการข้างต้นจะพบว่าปริมาณเหล่านี้จะมีลักษณะเหมือนกันกับ \vec{H} คือเป็นไปตามปรากฏการณ์ผิว นั่นคือที่ระยะความลึกจากผิวเข้ามา ปริมาณเหล่านี้จะลดลงแบบเอกซ์โปเนนเชียล

ความร้อนที่เกิดความเหนี่ยวนำ เป็นผลมาจากกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน เนื่องจากมีกระแสไหล จากค่าความหนาแน่นของกระแสในชิ้นงานสามารถหาค่ากำลังสูญเสียต่อพื้นที่ผิว ได้ โดยการอินทิเกรต ρJ^2 ตลอดปริมาณต่อ 1 คาบเวลา ดังนี้

$$P_s = \int_0^\infty \rho J^2 dy(x1)(x1)$$

$$P_s = \rho J_{om}^2 \int_0^\infty \int_0^T e^{-2\alpha y} \cos^2(\omega t - \alpha y) dy dt$$

$$P_s = \frac{\rho}{2} J_{om}^2 \int e^{-2\alpha y} dy \quad (2.15)$$

$$P_s = \frac{\rho J_{om}^2}{4\alpha} = \frac{\rho J_{om}^2 \delta}{4} \quad (2.16)$$

$$\text{แต่จาก } |J_{om}| = \sqrt{2} |H_{om}| \quad \alpha = \frac{\sqrt{2} |H_{om}|}{\delta}$$

$$P_s = \frac{\rho H_{om}^2}{2\delta} \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_s = \frac{\rho H_0^2}{\delta} \quad (2.18)$$

โดยที่ H_0 คือ ค่าอาร์เอ็มเอสของ H ที่ผิว

จากสมการที่ (2.15) สามารถหาค่ากำลังสูญเสียต่อหนึ่งหน่วยได้อย่างง่ายโดย เป็นสัดส่วนของกำลังสูญเสียจากผิวถึงระดับความลึก $y(P_{sy})$ ต่อกำลังสูญเสียของชิ้นงาน (P_s) ด้วยวิธีการอินทิเกรตตามสมการที่ (2.15) แบบเปลี่ยนขีดจำกัดบนของการอินทิเกรตดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{P_{sy}}{P_s} &= \frac{[e^{(-2\alpha y)}]_0^y}{[e^{(-2\alpha y)}]_0^\infty} = \frac{e^{(-2\alpha y)} - 1}{0 - 1} \\ &= 1 - e^{(-2\alpha y)} \end{aligned} \quad (2.19)$$

จากรูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของ P_{sy} และ P_s กับสัดส่วนของระยะทางจากผิวและความลึกผิวโดยจะเห็นได้ว่ากำลังสูญเสียเกือบ 90% จะเกิดขึ้นในช่วงความลึกผิว ทำให้สามารถใช้ผลประโยชน์ด้านนี้สำหรับการชุบแข็งที่ผิว และด้วยวิธีการปรับความถี่ให้สูงขึ้น ก็จะทำให้ความลึกผิวแคบลงตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.19)

$$\begin{aligned} \phi &= \text{Re} \left[\mu H_{om} \int_0^\infty e^{(j\omega t - (1+j)\alpha y)} (dyx1) \right] \\ \phi &= \frac{\mu H_{om}}{\sqrt{2\mu}} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{4}\right) \end{aligned} \quad (2.20)$$

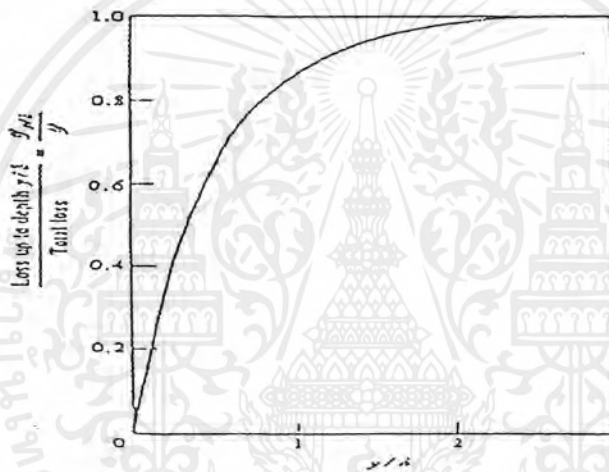
ส่วนแรงเคลื่อนสนามไฟฟ้าในชิ้นงาน ที่เกิดจากการการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์สนามแม่เหล็กกับเวลามีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} E &= N \frac{d\phi}{dt} \\ E &= \frac{-\mu N}{\sqrt{2\alpha}} H_{om} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{4}\right) \end{aligned}$$

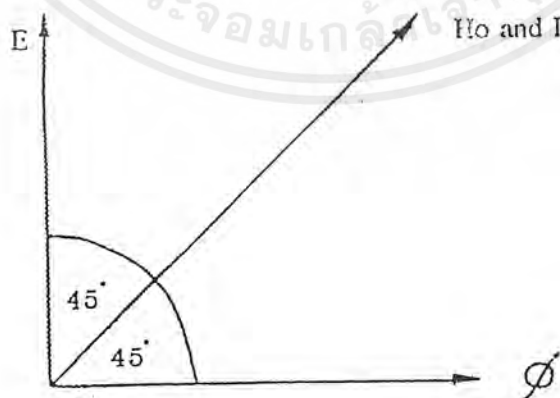
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E = \frac{\mu N}{\sqrt{2\alpha}} N \omega \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right) \quad (2.21)$$

จากสมการ (2.20) และ (2.21) จะเห็นว่าฟลักซ์สนามแม่เหล็ก ผลรวมจะเป็นสัดส่วนกับค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก H_{om} และมุมเฟสจะล่าหลังมุมเฟสของความเข้มสนามแม่เหล็กอยู่ $\frac{\pi}{4}$ ส่วนแรงดันที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำจะนำหน้าความเข้มสนามแม่เหล็กอยู่ $\frac{\pi}{4}$ โดยขณะที่กระแสสนามที่ไหลในชิ้นงานมีมุมเฟสเดียวกันกับความเข้มสนามแม่เหล็ก



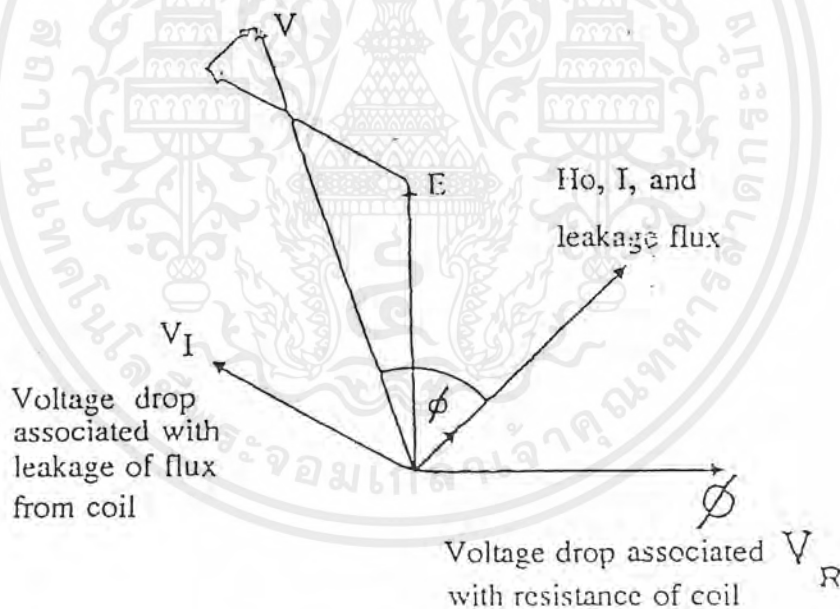
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียต่อพื้นที่ กับระยะจากผิวชิ้นงาน



รูปที่ 2.10 เฟสเซอร์ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสนามแม่เหล็กกับ

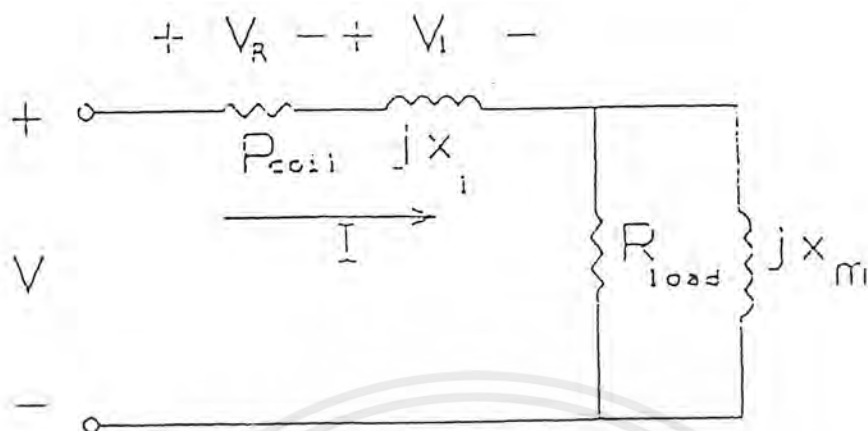
แรงดันในกรณีที่ขดลวดเหนี่ยวนำเป็นแบบอุดมคติ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยทางโรงเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นตัวประกอบกำลัง (Power Factor) ของชิ้นงานซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง E และ I โดยดูจากเฟสเซอร์ไดอะแกรมดังรูปที่ 2.10 ซึ่งจากไดอะแกรมตัวประกอบกำลังจะเป็นแบบ ถ้าหลังมีค่า 0.707 แสดงว่าตัวประกอบในส่วนจริงและจินตภาพของอิมพีแดนซ์ในวงจรสมมูลมีค่า เท่ากันแต่ความเป็นจริงแล้ว ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กจะมีความเหนี่ยวนำรั่วไหล ทำให้ตัว ประกอบกำลังของระบบลดลงและตัวขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กก็มีความต้านทานของตัวเองอยู่จึง ทำให้เฟสเซอร์ไดอะแกรมของระบบเปลี่ยนแปลงไปดังรูปที่ 2.11 และสามารถเขียนแบบจำลองของ วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของระบบนี้ได้ ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งจากแบบจำลองของระบบที่มีชิ้นงานที่เรียก ว่า Slab นี้ อาจมองว่าเป็นรีแอกเตอร์ (Reactor) แกนหลักที่มีโพลดเป็นลักษณะพิเศษ กล่าวคือ มีค่า ความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ (Reactance) เท่ากันซึ่งฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านรีแอกแตนซ์นี้ก็คือ Magnetizing Flux นั่นเอง



รูปที่ 2.11 เฟสเซอร์ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กในกรณีที่ตัวขดลวดไม่เป็นอุดมคติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 แบบจำลองวงจรสมมูลของขดลวดให้ความร้อนและชิ้นงาน

2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับคุณสมบัติของชิ้นงาน

2.3.1 สภาพความต้านทานของโลหะกับอุณหภูมิ

ค่าสภาพความต้านทานโดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่เป็นชิ้นงานโดยปกติ สารที่เป็นโลหะเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าสภาพความต้านทานจะเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้น ความสัมพันธ์ในลักษณะทั่วไปจะเป็นดังสมการข้างล่าง

$$\rho_\theta = \rho_1 [1 + \alpha(\theta - \theta_1)] \quad (2.22)$$

โดย ρ_θ คือค่าสภาพความต้านทานที่อุณหภูมิ θ ใด ๆ และ ρ_1 คือค่าสภาพความต้านทานที่อุณหภูมิ θ_1 ส่วนคือ α ค่าสัมประสิทธิ์ของสารชนิดต่าง ๆ ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 ในความเป็นจริงแล้วค่าสภาพความต้านทานของชิ้นงาน จะเปลี่ยนแปลงไปกับอุณหภูมิ แต่สำหรับการคำนวณเราต้องใช้ค่าสภาพความต้านทานที่เป็นค่าสมมูลซึ่งใช้แทนได้ตลอดช่วงอุณหภูมิจากสมการที่ (2.18) กำลังสูญเสียที่ชิ้นงานจะแปรผันตรงกับ $\frac{P}{\delta}$ และในขณะที่ δ แปรผันกับ $\rho^{1/2}$ นั้นหมายความว่ากำลังสูญเสียที่ชิ้นงานเป็นสัดส่วนกับ $\rho^{1/2}$ ถ้าปริมาณอื่น ๆ มีค่าคงที่และเนื่องจากค่าสภาพความต้านทานโดยทั่วไปแล้วจะแปรกับอุณหภูมิอย่างเป็นเชิงเส้นในช่วงกว้างของอุณหภูมิ ทำให้เขียนสมการที่ (2.22) ใหม่ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\rho_\theta = \rho_1 + \frac{\theta - \theta_1}{\theta_2 - \theta_1} (\rho_2 - \rho_1) \quad (2.23)$$

และเนื่องจากอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเป็นสัดส่วนกับกำลังสูญเสีย ดังนั้นจึงเป็นสัดส่วนกับ $\rho^{1/2}$ ด้วย นั่นคือ

$$\frac{d\theta}{dt} = \text{Constant} \times \sqrt{\rho} \quad (2.24)$$

แทนสมการที่ (2.23) ลงในสมการที่ (2.24) แล้วจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{d\theta}{\left[\rho_1 + \frac{(\theta - \theta_1)}{(\theta_2 - \theta_1)} (\rho_2 - \rho_1) \right]} = \int_0^t \text{Constant} \, dt$$

ตารางที่ 2.1 ค่าสภาพความต้านทาน ρ และค่าสัมประสิทธิ์ α ของโลหะชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

	α	$\rho_{20^\circ\text{C}} (\Omega\text{m})$	Melting Point ($^\circ\text{C}$)
Aluminium	4.29×10^{-3}	2.65×10^{-8}	660
Brass (65% Cu, 35% Zn)	1.6×10^{-3}	6.4×10^{-8}	931
Brass (90% Cu, 11% Zn)	1.86×10^{-3}	3.9×10^{-8}	1046
Copper	3.93×10^{-3}	1.72×10^{-8}	1084
Pure iron	6.5×10^{-3}	9.71×10^{-8}	1538
Lead	3.36×10^{-3}	20.65×10^{-8}	327
Silver	4.1×10^{-3}	1.5×10^{-8}	962

ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนจนอุณหภูมิ θ_1 เปลี่ยนเป็น θ_2 เท่ากับ

$$t = 2 \frac{(\theta_2 - \theta_1)}{(\rho_2 - \rho_1)} \times \left[\frac{(\sqrt{\rho_2} - \sqrt{\rho_1})}{\text{Constant}} \right] \quad (2.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

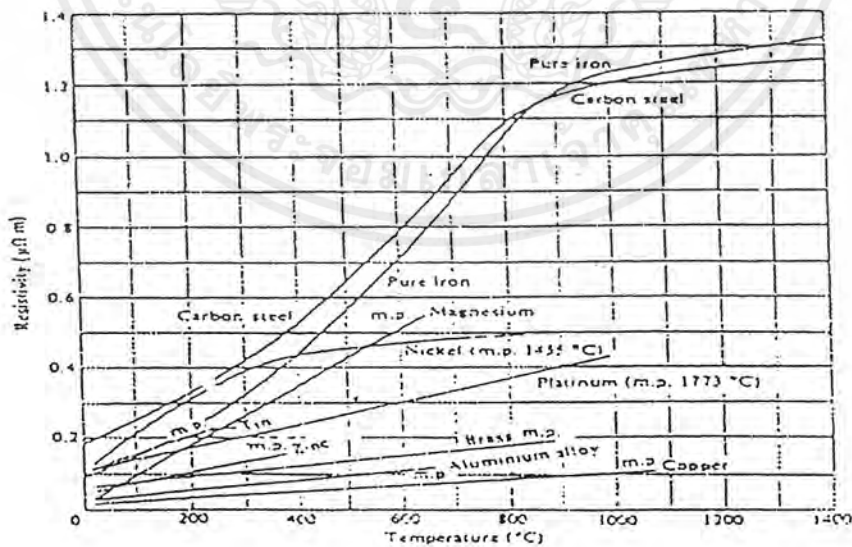
ถ้าสมมุติให้ค่าสภาพความต้านทานมีค่าคงที่และมีค่าเท่ากับ ρ_m ตลอดช่วงอุณหภูมิการใช้งาน (θ_1 ถึง θ_2) เมื่อแทนในสมการที่ (2.24) จะได้

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} d\theta = \int_0^t \sqrt{\rho_m} \text{Constant } dt$$

$$t = [(\theta_2 - \theta_1) / (\sqrt{\rho_m} \text{Constant})] \quad (2.26)$$

$$\rho_m = \frac{(\sqrt{\rho_2} + \sqrt{\rho_1})^2}{4} \quad (2.27)$$

รูปที่ 2.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพความต้านทานกับอุณหภูมิของโลหะชนิดต่าง ๆ สำหรับเหล็กผสมคาร์บอน ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพความต้านทานกับอุณหภูมิจะไม่เปลี่ยนแปลงกับปริมาณของส่วนผสมคาร์บอนและจากกราฟจะเห็นว่าโลหะที่เป็นสารเฟอร์โรแมกเนติก การเปลี่ยนแปลงของ ρ กับอุณหภูมิจะไม่เป็นเชิงเส้นตลอดช่วงอุณหภูมิ ดังนั้นการคำนวณโดยใช้ค่า ρ_m จึงต้องแยกพิจารณาในช่วงที่เป็นเชิงเส้นทีละช่วงไป



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพของค่าความต้านทานกับอุณหภูมิของโลหะชนิดต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 ความซึมซาบของโลหะกับอุณหภูมิและความเข้มสนามแม่เหล็ก

ความซึมซาบของโลหะนั้นจะมีค่าค่อนข้างคงที่ แต่สำหรับ โลหะที่เป็นสารประเภทเฟอร์โรแมกเนติก ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสนามแม่เหล็กกับความเข้มสนามแม่เหล็กจะไม่เป็นเชิงเส้น แต่จะเป็นไปตามกราฟกระแสทำแม่เหล็ก [Davies et al., 1979] จะพบว่าความซึมซาบของสารเฟอร์โรแมกเนติกจะขึ้นกับ ความเข้มสนามแม่เหล็กและระดับความอิ่มตัวของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กด้วย ได้มีการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความซึมซาบของสารกับความเข้มสนามแม่เหล็ก ได้ผลเป็นที่ยอมรับตามสมการที่ (2.28) ดังนี้

$$\mu = \left(143 \times 10^{-6} \times \frac{B_s}{H_{om}} + 1 \right) \mu_0 \quad (2.28)$$

โดย B_s คือ ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กอิ่มตัว
 H_{om} คือ ค่าขอดความเข้มสนามแม่เหล็ก
 μ_0 คือ ค่าความซึมซาบได้ของอากาศ

นอกจากนี้ค่าความซึมซาบของสารเฟอร์โรแมกเนติกยังมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิด้วย โดยปกติแล้วค่าความซึมซาบของสารประเภทนี้จะมีค่าค่อนข้างคงที่ กับอุณหภูมิแต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงจุดคูรี (Curie point) แล้วค่าความซึมซาบของสารนั้นจะลดลงเป็นค่าความซึมซาบของอากาศทันที ($\mu_r = 1$) มีผลให้สารนั้นหมดสภาพความเป็นสารแม่เหล็กและจากข้อมูลของเหล็กผสมคาร์บอน 0.5% จะมีอุณหภูมิคูรีอยู่ที่ประมาณ 760 องศาเซลเซียส

2.3.3 โครงสร้างทางโลหะของเหล็กผสมคาร์บอนกับอุณหภูมิ

ในการชุบแข็งโลหะเหล็กที่ใช้ต้องเป็นเหล็กผสมคาร์บอน ซึ่งเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอน ในเนื้อเหล็กจะทำให้องค์ประกอบของเหล็กแตกต่างกันไป อีกทั้งโครงสร้างทางโลหะที่อุณหภูมิต่าง ๆ ก็จะไม่แตกต่างกันไปด้วย ดังนั้นเราจึงต้องศึกษาโครงสร้าง และคุณสมบัติของโลหะโดยใช้แผนภาพสมดุลเหล็กผสมคาร์บอนซึ่งแสดงในรูปที่ 2.14

จากแผนภาพในรูปที่ 2.14 จะมีเส้น PSO ที่อุณหภูมิ 768 องศาเซลเซียส ส่วนโครงสร้างพื้นฐานของเหล็กโดยใช้เส้น PSO โครงสร้างพื้นฐานของเหล็กเป็นแบบ Body Center Cubic Lattice (BCC) ที่มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กในขณะที่เนื้อเส้น GSE โครงสร้างพื้นฐานของเหล็กจะเป็นแบบ Face Center Cubic Lattice (FCC) ซึ่งมีคุณสมบัติไม่เป็นแม่เหล็ก โดยองค์ประกอบของเหล็กในเฟสนี้มีชื่อเรียกว่า Austenite สำหรับองค์ประกอบของเหล็กในเฟสที่อยู่ใต้เส้น PS หรือ AC₁ เหล็กจะมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สององค์ประกอบ คือ Ferrite กับ Pearlite โดยที่ Pearlite ก็คือ Ferrite และ Cementite ผสมกัน สำหรับ Cementite ก็คือ Ferrite ที่มีคาร์บอนเรียงอยู่เป็นชั้น ๆ ทั้งนี้เพราะถ้าส่วนผสมของคาร์บอนมากกว่า 0.008% และที่อุณหภูมิต่ำกว่า 724 องศาเซลเซียส คาร์บอนจะไม่สามารถผสมกลมกลืนเข้ากับเหล็กได้หมดแต่ถ้าส่วนผสมของคาร์บอนน้อยกว่า 0.008% คาร์บอนจะผสมกลมกลืนกลายเป็นสารละลายอยู่ใน Ferrite ดังแผนภาพเฟสนี้จะอยู่ได้เส้น GP

ระหว่างเส้น AC₁ กับเส้น AC₃ เช่นที่เส้น AC₂ Ferrite และ Pearlite จะเริ่มเปลี่ยนแปลงเป็น Austenite และเมื่ออุณหภูมิของเหล็กสูงขึ้นเหนือเส้น AC₃ การเปลี่ยนแปลงจะสมบูรณ์เหล็กที่ได้จะมีคุณสมบัติไม่เป็นแม่เหล็ก และจากแผนภาพอุณหภูมิที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงเป็นสาร Austenite จะขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์ของสารคาร์บอนที่มีอยู่ถ้าสัดส่วนนี้มีค่าเท่ากับ 0.83% การเปลี่ยนแปลงจาก Pearlite เป็น Austenite จะเกิดขึ้นทันที เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงจุด S โดยไม่มีสถานะระหว่างกลาง (เช่นกรณีที่เกิดแบบเส้น AC₂) และถ้าเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนมากกว่า 0.83% คาร์บอนที่มีการขึ้นนี้จะทำให้ Ferrite กลายเป็น Cementite หมด กล่าวคือ ไม่มี Ferrite ล้วน ๆ อยู่เลย ดังแผนภาพเฟสนี้จะอยู่ได้เส้น SO ในกรณีที่เหล็กมีส่วนผสมคาร์บอนมากกว่า 0.83% เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเหนือเส้น SO สาร Pearlite กับ Cementite จะกลายเป็นสารผสมระหว่าง Austenite กับ Cementite แทนและถ้าเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นจนกระทั่งถึงเส้น Ac_m โครงสร้างของเหล็กจะกลายเป็น Austenite หมด ซึ่งอุณหภูมิที่จะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงนี้ จะขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์ของสารผสม

2.4 สารที่ใช้ในการทำให้ชิ้นงานเย็นตัวลงและขบวนการที่ชิ้นงานเย็นตัวลง

ในการทำให้เหล็กที่ร้อนแดงเย็นลงอย่างรวดเร็วหรือการชุบ (Quench) ถือว่าเป็นส่วนสำคัญในขบวนการชุบแข็งการปล่อยชิ้นงานตัวลงอย่างธรรมชาติจะช้าไป โดยปกติจะใช้วิธีการทำให้เย็นตัวลงโดยใช้ น้ำ น้ำมัน น้ำเกลือ หรือโซลิม แต่จะนิยมใช้น้ำเป็นส่วนใหญ่ เพราะหาง่าย ราคาถูก และมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้ดี

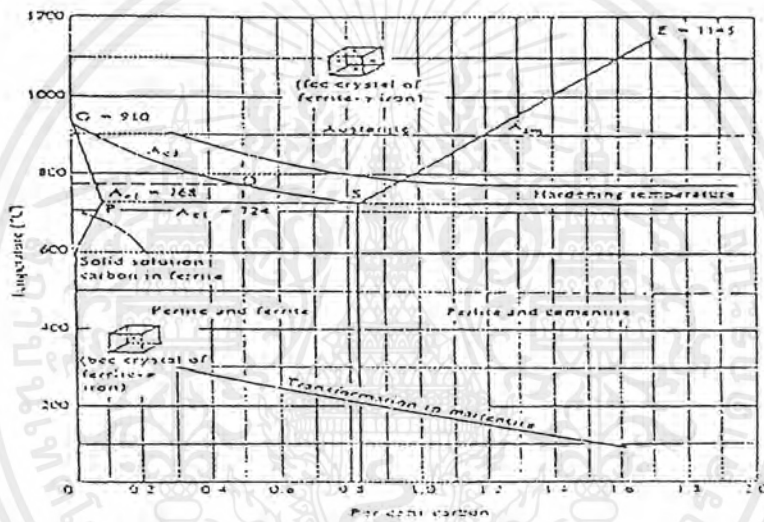
การทำให้ชิ้นงานที่ร้อนเย็นลงอย่างรวดเร็ว ขบวนการที่พบบ่อยมักเป็นแบบ Single Shot Hardening คือจะให้ชิ้นงานได้รับความสะท้อนทั้งชิ้นงาน ในเวลาเดียวกันแล้วทำให้ชิ้นงานเย็นลงพร้อมกัน โดยอาจใช้วิธีจุ่มชิ้นงานลงในสารระบายความร้อน หรือใช้วิธีพ่นสารระบายความร้อนไปที่ชิ้นงานทั้งชิ้นในเวลาเดียวกัน ชิ้นงานที่ใช้วิธีนี้ค่อนข้างเล็ก

โดยอีกวิธีที่มักพบเห็นในขบวนการทำให้ชิ้นงานเย็นตัวลงคือ แบบ Scanning วิธีนี้ขจัดคลวให้ความร้อนจะมีขนาดค่อนข้างเล็ก มักจะพบเป็นการให้ความร้อนเฉพาะบริเวณ โดยตัวขจัดคลวให้ความร้อนจะมีการเคลื่อนที่สัมผัสกับบริเวณที่ต้องการให้ความร้อน และชิ้นงานจะถูกทำให้เย็นตัวลงโดยทันที โดยสารที่เป็นตัวระบายความร้อน การให้ความร้อนลักษณะนี้ตัวขจัดคลวให้ความร้อน

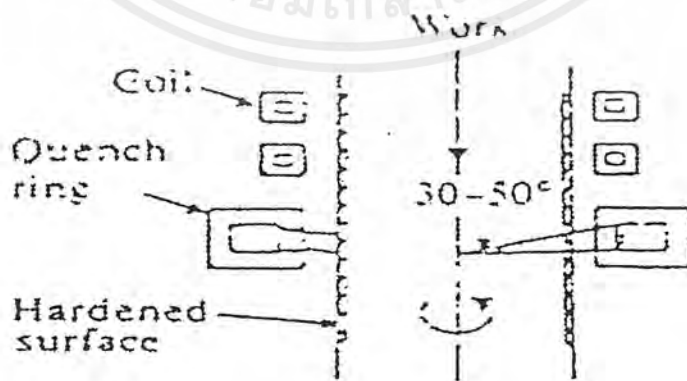
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะมีกำลัง ไม่สูงมากนัก แต่จะสามารถชุบแข็งชิ้นงานที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ได้โดยจะใช้วิธีเลื่อน บริเวณต้องการให้ความร้อนเข้าสู่คลวดให้ความร้อน ซึ่งทำให้เวลาที่ใช้ชุบแข็งชิ้นงานทั้งชิ้นมากขึ้น

โดยทั้งสองวิธีนี้ชิ้นงานจะมีการเคลื่อนที่สัมพันธ์กับคลวดให้ความร้อน และถูกทำให้เย็นตัวลงโดยฉับพลันโดยการฉีดสารระบายความร้อนหลังจากที่ได้รับความร้อน การให้ความร้อนลักษณะนี้ชิ้นงานจะมีความแข็งค่อนข้างสม่ำเสมอ เพราะชิ้นงานจะมีอัตราการเคลื่อนที่ที่คงที่ เมื่อเทียบกับคลวดให้ความร้อนนอกจากนี้ในรูปที่ 2.16 ชิ้นงานจะมีการเคลื่อนที่ในแนวตั้งเพื่อเลื่อน บริเวณที่ต้องการชุบแข็งเข้าสู่คลวดให้ความร้อนด้วย

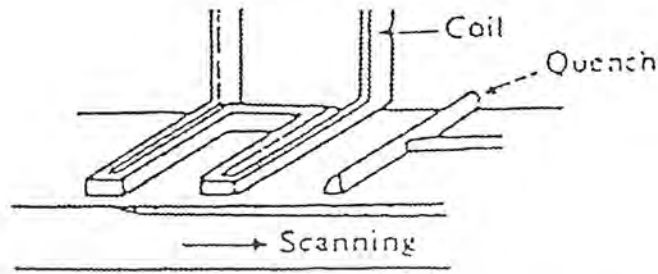


รูปที่ 2.14 แผนภาพสมดุลเหล็กผสมคาร์บอน

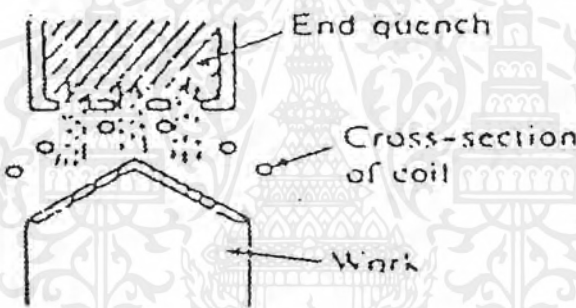


รูปที่ 2.15 วิธีการทำให้ชิ้นงานเย็นตัวลงแบบ Scanning โดยที่ชิ้นงานเป็นลักษณะแผ่นเรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

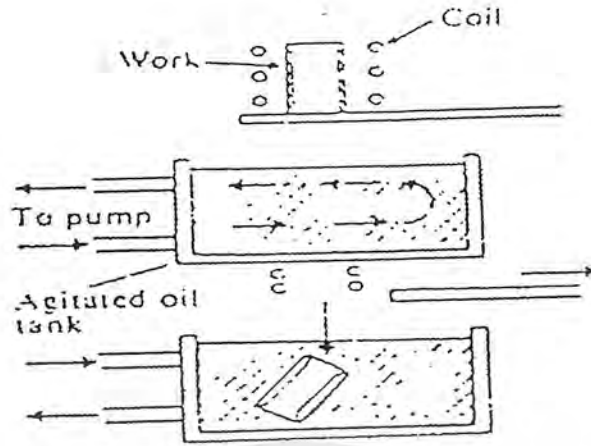


รูปที่ 2.16 วิธีการทำให้ชิ้นงานเย็นตัวลงแบบ Scanning โดยชิ้นงานเป็นลักษณะทรงกระบอก

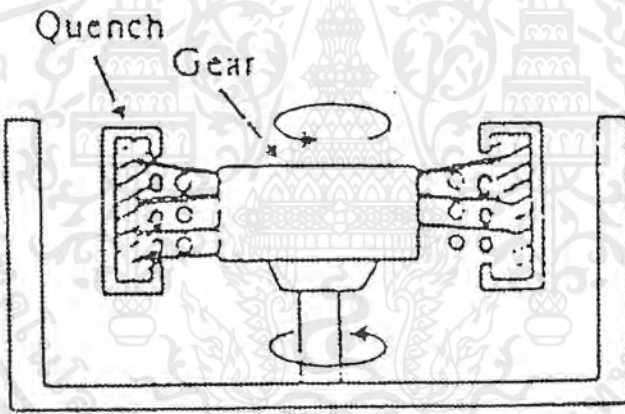


รูปที่ 2.17 วิธีการให้ความร้อนที่บริเวณชิ้นงานที่ต้องการชุบผิวแข็ง

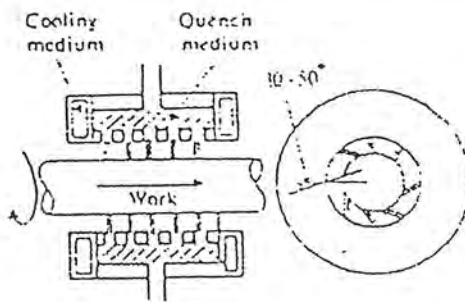
รูปที่ 2.17 แสดงวิธีการให้ความร้อนที่บริเวณชิ้นงาน โดยทำให้ขดลวดมีลักษณะที่เหมาะสมกับบริเวณที่ต้องการชุบผิว และจะทำให้ชิ้นงานเย็นตัวลงโดยการฉีดสารระบายความร้อนจากด้านบน ผ่านขดลวดให้ความร้อนสู่บริเวณผิวของชิ้นงานวิธีนี้จะเป็นแบบ Single Shot



รูปที่ 2.18 วิธีการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานลักษณะทรงกระบอกแล้วจะปล่อยให้ตกลงในถังใส่สารระบายความร้อน



รูปที่ 2.19 วิธีการทำให้ชิ้นงานเย็นตัวลงหลังจากชิ้นงานได้รับความร้อน



รูปที่ 2.20 วิธีการทำให้ชิ้นงานเย็นตัวลงโดยจับปล้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.19 และรูปที่ 2.20 เป็นการทำให้ชิ้นงานเย็นตัวลงค่อนข้างจะซับซ้อน รูปที่ 2.19 หลังจากชิ้นงานได้รับความร้อนแล้วจะยังคงอยู่ในขดลวดให้ความร้อน และจะเย็นตัวลงโดยได้รับสารระบายความร้อนจากหัวฉีดด้านข้างวิธีนี้จะใช้กับชิ้นงานประเภทเกียร์ ส่วนรูปที่ 2.20 ชิ้นงานจะถูกทำให้เย็นตัวลงโดยฉับพลัน หลังจากที่ถูกขดลวดให้ความร้อนหยุดให้ความร้อนหยุดให้พลังงานแล้ว

สารที่ใช้ระบายความร้อนโดยทั่วไป จะใช้น้ำกับโลหะที่มีส่วนผสมต่ำ เช่น เหล็กที่มีส่วนผสมคาร์บอนต่ำ และเหล็กหล่อที่มีรูปทรงอย่างง่าย จะใช้น้ำมันเมื่อชิ้นงานเป็นเหล็กที่มีคาร์บอนสูง และกับชิ้นงานที่มีบริเวณที่ได้รับความร้อนไม่สม่ำเสมอ ส่วนน้ำเกลือจะใช้กับเหล็กที่มีความแข็งค่อนข้างต่ำและถ้าเป็นพวกสแตนเลสจะปล่อยให้เย็นเอง

การใช้น้ำมันในการชุบผิวแข็งจะมีปัญหาเรื่องกลิ่นและควัน ในกรณีที่ชิ้นงานไม่สามารถใช้น้ำแทนได้เพราะอาจจะทำให้ชิ้นงานแตกหรือร้าวได้ ก็อาจใช้สารประเภทโพลีเมอร์แทนได้สารประเภทนี้จะเป็นสารอินทรีย์ทางเคมีที่มีโมเลกุลมาก สามารถละลายได้ดีในน้ำที่อุณหภูมิห้องและเมื่อใช้แล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้เช่น

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบสารที่ใช้ในการ Quenching และเวลาที่ใช้

<u>Aquaquench 251</u> Concentration	Time (s)	<u>Quench</u>	Time (s)
<u>2</u>	11.5	<u>Water</u>	12
<u>5</u>	12.5	<u>10% Soluble Oil</u>	13
<u>10</u>	14	<u>An Additive-Treated</u> Fast Quenching	20.5
<u>20</u>	24.5	<u>An High-Grade</u> <u>Minerel</u> Quenching Oil	26

อัตราในการที่ทำให้ชิ้นงานเย็นตัวลงสามารถเปลี่ยนแปลงได้ โดยขึ้นอยู่กับความเข้มของสารโพลีเมอร์ที่ใช้ ปัจจุบันมีสารที่ชื่อเป็นการค้าว่า Aquaquench 251 ซึ่งสามารถทำให้ชิ้นงานเป็ยกมากกว่า นอกจากนี้สามารถใช้ได้กับชิ้นงานที่ต้องการแข็งไม่มากนักซึ่งน้ำไม่สามารถใช้ได้ ในการชุบผิวแข็งชิ้นงานอาจจะเกิดรอยร้าวได้ โดยส่วนมากมักมาจากการทำให้ชิ้นงานเย็นตัวลงไม่เหมาะสม หรือการใช้สารระบายความร้อนที่ไม่เหมาะสมกับความร้อน เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวในกระบวนการระบายความร้อนควรทำดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

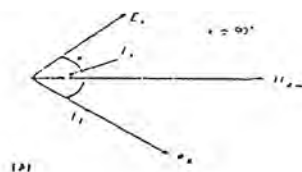
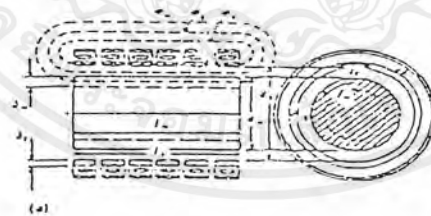
1. ควรเลือกใช้สารในการในการทำให้ชิ้นงานเย็นลงให้เหมาะสมและเลือกระยะเวลากับระดับความแข็งที่ต้องการให้สัมพันธ์กัน
2. ขณะทำให้ชิ้นงานเย็นตัวลงควรทำให้เย็นตัวลงด้วยความสม่ำเสมอ
3. ควรหลีกเลี่ยงที่จะชุบผิวชิ้นงานในบริเวณที่มีความแตกต่างของพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานมาก ๆ

ได้ทราบถึงทฤษฎีและหลักการในการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำแล้วว่า เมื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านเข้าสู่ขดลวดเหนี่ยวนำที่มีชิ้นงานอยู่ใน ไฟฟ้ากระแสสลับจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นในขดลวดเหนี่ยวนำเคลื่อนผ่านชิ้นงาน และจะเหนี่ยวนำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านชิ้นงาน ซึ่งต่อไปจะกล่าวถึงทฤษฎีและวงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำ

2.5 ทฤษฎีและวงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำ

เนื่องจากขดลวดเหนี่ยวนำที่ใช้งานไม่ใช่ทรงกระบอกที่มีความยาวเป็นอนันต์ดังนั้นไม่สามารถใช้ทฤษฎีทรงกระบอกที่มีความยาวเป็นอนันต์ มาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของขดลวดเหนี่ยวนำได้จึงได้มีการศึกษาทฤษฎีในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่เป็นทรงกระบอกที่มีความยาวจำกัด เพื่อที่จะใช้ในการออกแบบและคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของขดลวดเหนี่ยวนำที่จะใช้งาน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.5.1 การคำนวณวงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.21 (a) ฟลักสนามแม่เหล็กที่เคลื่อนผ่านชิ้นงานกับขดลวด
(b) เฟสเซอร์ไดอะแกรมของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.21 แสดงถึงฟลักซ์ของแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากความเข้มสนามแม่เหล็ก H_{Rm} ที่ได้จากกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ โดยฟลักซ์ที่คล่องผ่านระบบจะประกอบด้วยฟลักซ์ 3 ส่วนด้วยกัน คือ

1. ϕ_w คือ ฟลักซ์แม่เหล็กที่คล่องผ่านชิ้นงาน
2. ϕ_w คือ ฟลักซ์แม่เหล็กที่คล่องผ่านช่องอากาศ
3. ϕ_c คือ ฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านผิวของขดลวดเหนี่ยวนำ

จากสมการ

$$P_w = \mu\pi H_{Rm}^2 (l_w A_w) p \quad (2.29)$$

$$\text{และ } \phi_{wm} = \mu H_{Rm} A_w (q - ip) \quad (2.30)$$

โดยที่ P_w คือ กำลังสูญเสียในชิ้นงาน (วัตต์)

H_{Rm} คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กค่ายอดที่ผิวของชิ้นงาน (แอมแปร์/เมตร)

ϕ_{wm} คือ ฟลักซ์สนามแม่เหล็กค่ายอดที่คล่องผ่านชิ้นงาน (เวเบอร์)

l_w คือ ความยาวของชิ้นงานที่ถูกเหนี่ยวนำ (เมตร)

A_w คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน (ตารางเมตร)

จากหัวข้อการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำกับชิ้นงานทรงกระบอกคั่นนั้น ถ้า $\frac{d}{\delta} > 8$

แล้ว

$$\rho = \frac{2}{(1.23 + d/\delta)} \quad (2.31)$$

$$q = \frac{2}{(d/\delta)} \quad (2.32)$$

ϕ_g คือ ฟลักซ์สนามแม่เหล็กในช่องอากาศ (Air gap flux) โดยปกติแล้วจะมีค่าค่อนข้างใหญ่ในขณะที่ไม่มีชิ้นงานในขดลวดเหนี่ยวนำ แต่จะมีขนาดเล็กลงเมื่อมีชิ้นงานในขดลวดเหนี่ยวนำ เพราะพื้นที่หน้าตัดที่ฟลักซ์คล่องผ่านจะมีค่าลดลง ช่องอากาศนี้มีให้เพื่อเป็นระยะห่างทางกลเพื่อให้ชิ้นงานป้อนเข้าสู่ขดลวดเหนี่ยวนำได้สะดวก และยังช่วยเป็นฉนวนความร้อนระหว่างชิ้นงานกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวขดลวดเหนี่ยวนำเองด้วย ฟลักซ์สนามแม่เหล็กส่วนนี้จะมีผลให้ตัวประกอบกำลังของขดลวดเหนี่ยวนำต่ำลง

$$\phi_{fm} = \mu_0 H_{Rm} A_g \quad \text{เวเบอร์} \quad (2.33)$$

โดย A_g คือ พื้นที่ฟลักซ์สนามแม่เหล็กเคลื่อนผ่านอากาศ (ตารางเมตร)

ϕ_c คือ ฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่เคลื่อนผ่านตัวขดลวดเองตัวขดลวดเหนี่ยวนำก็มีปรากฏการณ์ผิวเช่นเดียวกับชิ้นงาน ตามปรกติขดลวดเหนี่ยวนำจะใช้ทองแดงที่มีคุณสมบัติไม่เป็นแม่เหล็ก จากหัวข้อการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำกับชิ้นงานในอุดมคติ เนื่องจาก ฟลักซ์สนามแม่เหล็ก จะล้าหลังความเข้มสนามแม่เหล็กอยู่ 45 องศา ดังนั้น ϕ_{cm} คำนวณได้จากสมการ

$$\phi_{cm} = \frac{k_r \mu_0 \delta_c \pi d_c H_{cm} (1-j)}{2} \quad \text{เวเบอร์} \quad (2.34)$$

โดย δ_c คือ ความลึกผิวที่เกิดในขดลวด

k_r คือ Correction Factor มีค่าระหว่าง 1-1.5

d_c คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของขดลวดเหนี่ยวนำฟลักซ์สนามแม่เหล็กทั้งหมดคือผลรวมของฟลักซ์ทั้งสาม

$$\phi_{om} = \phi_{wm} + \phi_{gm} + \phi_{cm}$$

ถ้าคิดเป็นอาร์เอ็มเอสจะได้

$$\phi_0 = \phi_w + \phi_g + \phi_c$$

$$\phi_{om} = \mu_0 H_{om} \left(A_g + \mu_r q A_w + \frac{k_r \pi d_c \delta_c}{2} \right) - j \left(\mu_r p A_w + \frac{k_r \pi d_c \delta_c}{2} \right) \quad (2.35)$$

ถ้าละเลขค่า Reluctance ของวงจรแม่เหล็กภายนอกสามารถคำนวณหา H_{om} ในรูปของ $N_c I_c$ และ I_c ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_{om} = \frac{\sqrt{2}I_c N_c}{I_c} \quad (2.36)$$

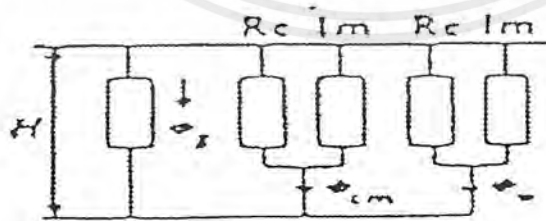
ค่าอาร์เอ็มของแรงดันคร่อมขดลวด

$$E_c = j \frac{2\pi N_c \phi_{om}}{\sqrt{2}} \quad (2.37)$$

แทนค่าสมการ (2.35) และสมการ (2.36) ลงในสมการ (2.37) จะได้ว่า

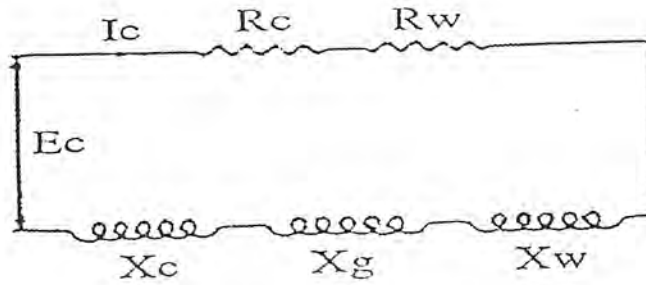
$$E_c = \frac{2\pi\mu_0 N_c^2 I_c}{I_c} \left[\left(\mu_r p A_w + \frac{k_r \pi d_c \delta_c}{2} \right) - j \left(A_g + \mu_r q A_w + \frac{k_r \pi d_c \delta_c}{2} \right) \right] \quad (2.38)$$

จากสมมติฐานที่ว่าฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่ค้ำองผ่าน มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ และเป็นผลที่มาจากความเข้มสนามแม่เหล็กเดียวกันทำให้สามารถแทนสมการ (2.38) ได้ด้วยวงจรสมมูลทางแม่เหล็ก ซึ่งเป็นแบบขนานค้ำรูปที่ 2.22 (ก) และถ้าพิจารณาวงจรสมมูลทางไฟฟ้าจะอยู่ในรูปความต้านทานกับความเหนี่ยวนำ ต่อแบบอนุกรมค้ำรูปที่ 2.22 (ข) โดยส่วนที่เป็นความต้านทานจะแทนด้วยกำลังสูญเสียในชิ้นงานและตัวขดลวดเหนี่ยวนำ ส่วนที่เป็นความเหนี่ยวนำจะเป็นส่วนของสนามแม่เหล็กที่ค้ำองผ่านชิ้นงานตัวขดลวดเหนี่ยวนำ และช่องอากาศซึ่งจะมีเฟสเดียวกับความเข้มสนามแม่เหล็กและสามารถเขียนในรูปของอิมพีแดนซ์รวมได้ค้ำนี้



(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 (ก) วงจรสมมูลทางแม่เหล็ก
(ข) วงจรสมมูลทางไฟฟ้า

$$Z = (R_w + R_c) + j(X_g + X_w + X_c) \quad (2.39)$$

$$R_w \text{ คือ ค่าความต้านทานของขั้วงาน } R_w = K(\mu_r \rho A_w) \text{ โอห์ม} \quad (2.40)$$

$$R_c \text{ คือ ค่าความต้านทานของขดลวด } R_c = K \frac{k_r \pi d_c \delta_c}{2} \text{ โอห์ม} \quad (2.41)$$

$$X_g \text{ คือ ค่ารีแอกแตนซ์จากช่องอากาศ } X_g = K(A_g) \text{ โอห์ม} \quad (2.42)$$

$$X_w \text{ คือ ค่ารีแอกแตนซ์จากขั้วงาน } X_w = K(\mu_r \rho A_w) \text{ โอห์ม} \quad (2.43)$$

$$X_c \text{ คือ ค่ารีแอกแตนซ์จากขดลวด } X_c = K \frac{k_r \pi d_c \delta_c}{2} \text{ โอห์ม} \quad (2.44)$$

โดยที่

$$K = \frac{2\pi\mu_0 N_c^2}{I_c} \quad \text{โอห์ม/เมตร}^2 \quad (2.45)$$

จากสมการเหล่านี้สามารถที่จะนำมาคำนวณคุณสมบัติของขดลวดเหนี่ยวนำที่สำคัญได้ดัง

นี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

η คือ ประสิทธิภาพของขดลวดเหนี่ยวนำ

$$\eta = \frac{R_c}{(R_c + R_w)} \quad (2.46)$$

PF คือ ตัวประกอบกำลังของขดลวดเหนี่ยวนำ

$$PF = \cos \phi = \frac{(R_w + R_c)}{Z} \quad (2.47)$$

โดยที่

$$Z^2 = (R_c + R_w)^2 + (X_g + X_w + X_c)^2 \quad (2.48)$$

P_c คือ กำลังที่ขดลวดเหนี่ยวนำ

$$P_c = \frac{P_w}{\eta} \quad \text{วัตต์} \quad (2.49)$$

กำลังปรากฏที่ขดลวดเหนี่ยวนำ coil VA, $(VA)_c$

$$(VA)_c = \frac{P}{\cos \phi} = I_c^2 Z \quad (2.50)$$

$$\text{แรงดันต่อรอบที่ขดลวดเหนี่ยวนำ} \frac{E_c}{N_c} = \frac{E_c}{(\text{coil VA})} = \frac{(VA)_c}{H_c I_c} \quad (2.51)$$

(Total ampere - turns)

$$\text{Coil amper - turns} = I_c N_c = I_c H_c \quad (2.52)$$

โดย I_c และ E_c เป็นค่าอาร์เอ็มเอส จากที่กล่าวมาข้างต้น ถ้าพิจารณาโดยละเอียดจะพบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_c = \frac{\pi\sqrt{\pi}k_r d_r N_c^2 \sqrt{(\rho_c \mu_0 f)}}{I_c} \quad (2.53)$$

$$R_w = \frac{4\sqrt{\pi}A_w N_c^2 \sqrt{(\rho_c \mu_0 \mu_r f)}}{I_c} \quad (2.54)$$

$$L_c = \frac{\sqrt{\pi}k_r d_r N_c^2 \sqrt{(\rho_c \mu_0 / \mu_0 f)}}{2I_c} \quad (2.55)$$

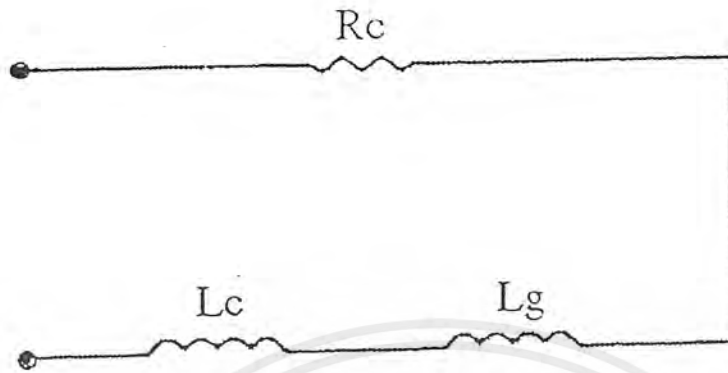
$$L_w = \frac{2A_w N_c^2 \sqrt{(\rho_w \mu_0 \mu_r f)}}{I_c \sqrt{\pi d_w}} \quad (2.56)$$

$$L_g = \frac{\mu_0 N_c^2 A_w}{I_c} \quad (2.57)$$

จากสมการของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงาน จะเห็นได้ว่าวงจรสมมูลจะขึ้นอยู่กับลักษณะขนาดของทั้งชิ้นงานและขดลวด รวมทั้งจำนวนรอบของขดลวดด้วย และถ้าพิจารณาให้ชิ้นงานและขดลวดเหนี่ยวนำคงที่ ค่าความต้านทานของชิ้นงานและขดลวดจะแปรตามรากที่สองของความถี่ รากที่สองของความต้านทานจำเพาะ และรากที่สองของความซึมซาบแม่เหล็ก สำหรับกรณีความเหนี่ยวนำของชิ้นงานและขดลวดจะแปรตามรากที่สองของความต้านทานจำเพาะ รากที่สองของความซึมซาบแม่เหล็ก แต่จะแปรผกผันกับรากที่สองของความถี่ ส่วนกรณีความเหนี่ยวนำเนื่องจากช่องอากาศ พบว่าจะขึ้นอยู่กับลักษณะของขดลวดเหนี่ยวนำและพื้นที่หน้าตัดของช่องอากาศแต่ว่าจะไม่ขึ้นกับค่าความถี่จากสมการดังกล่าวข้างต้น เป็นการพิจารณาสมการขดลวดเหนี่ยวนำไปพร้อมกับชิ้นงาน แต่สำหรับกรณีที่ไม่มีชิ้นงานในขดลวด วงจรสมมูลทางไฟฟ้าก็ยังเป็นลักษณะอนุกรมเหมือนเดิม แต่ความต้านทานจะมี เฉพาะความต้านทานของขดลวด (R_c) และความเหนี่ยวนำจะมีเฉพาะความเหนี่ยวนำเนื่องจากขดลวด (L_c) และช่องว่างอากาศ (L_g) ดังรูปที่ 2.23 โดยค่า R_c และ L_c จะมีค่าเท่าเดิม แต่ L_g จะมีค่าเปลี่ยนไปในทางที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะพื้นที่หน้าตัดของส่วนที่เป็นช่องว่างอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับพื้นที่หน้าตัดภายในของขดลวด ดังแสดงในสมการ (2.58)

$$L_{gm} = \frac{N_c^2 \mu_0 \pi d_c^2}{4I_c} \quad (2.58)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำ

จากที่ผ่านมาเราได้ทราบถึงทฤษฎีการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำและวงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำอย่างละเอียดแล้ว ต่อไปจะกล่าวถึงทฤษฎีของวงจรและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานในวงจรส่วนต่างๆ ของเครื่องชุบผิวแข็ง โดยการเหนี่ยวนำ

บทที่ 3

การแปลงผันแบบเต็มคลื่น 3 เฟส

3.1 ทฤษฎี และ หลักการทำงาน

วงจรแปลงผันแบบเต็มคลื่น 3 เฟสใช้มากในอุตสาหกรรมที่มีระดับกำลังไฟฟ้าสูงถึง 120 kW และทำงานได้ 2 ควอดแรนต์

รูปที่ 3.1 (ก) แสดงวงจรแปลงผันแบบเต็มคลื่นต่อกับโหลดอินดักทีฟค่าสูงจนทำให้กระแสที่โหลดมีความต่อเนื่อง เอสซีอาร์เหล่านี้นำกระแสในช่วง $\pi/3$ และทำงานเป็นคู่ คือ 12, 23, 34, 45, 56 และ 61 ส่วนรูปที่ 3.1(ข) แสดงรูปคลื่นของแรงดันอินพุต, แรงดันเอาต์พุต, กระแสอินพุต และกระแสที่เอสซีอาร์ อธิบายการทำงานได้ดังนี้คือ

ที่ $\omega t = \pi/6 + \alpha$ เอสซีอาร์ T_6 นำกระแส และ เอสซีอาร์ T_1 นำกระแส ระหว่างช่วง $(\pi/6 + \alpha) \leq \omega t \leq (\pi/2 + \alpha)$ ขณะที่ T_1 และ T_6 นำกระแส แรงดันที่สาย $V_{ab} = (V_{an} - V_{bn})$ ตกรวมโหลด และที่ $\omega t = \pi/2 + \alpha$ เอสซีอาร์ T_2 นำกระแส แต่ T_6 ได้รับไบอัสกลับจึงปิด

ระหว่างช่วง $(\pi/2 + \alpha) \leq \omega t \leq (5\pi/6 + \alpha)$ เอสซีอาร์ T_1 และ T_2 นำกระแส และ V_{ac} ตกรวมโหลด (การนำกระแสของเอสซีอาร์คู่อื่น มีหลักการคล้ายกัน)

ถ้ากำหนดแรงดันที่เฟส มีค่าเป็น

$$V_{an} = V_m \sin \omega t \quad (3.1)$$

$$V_{bn} = V_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (3.2)$$

$$V_{cn} = V_m \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \quad (3.3)$$

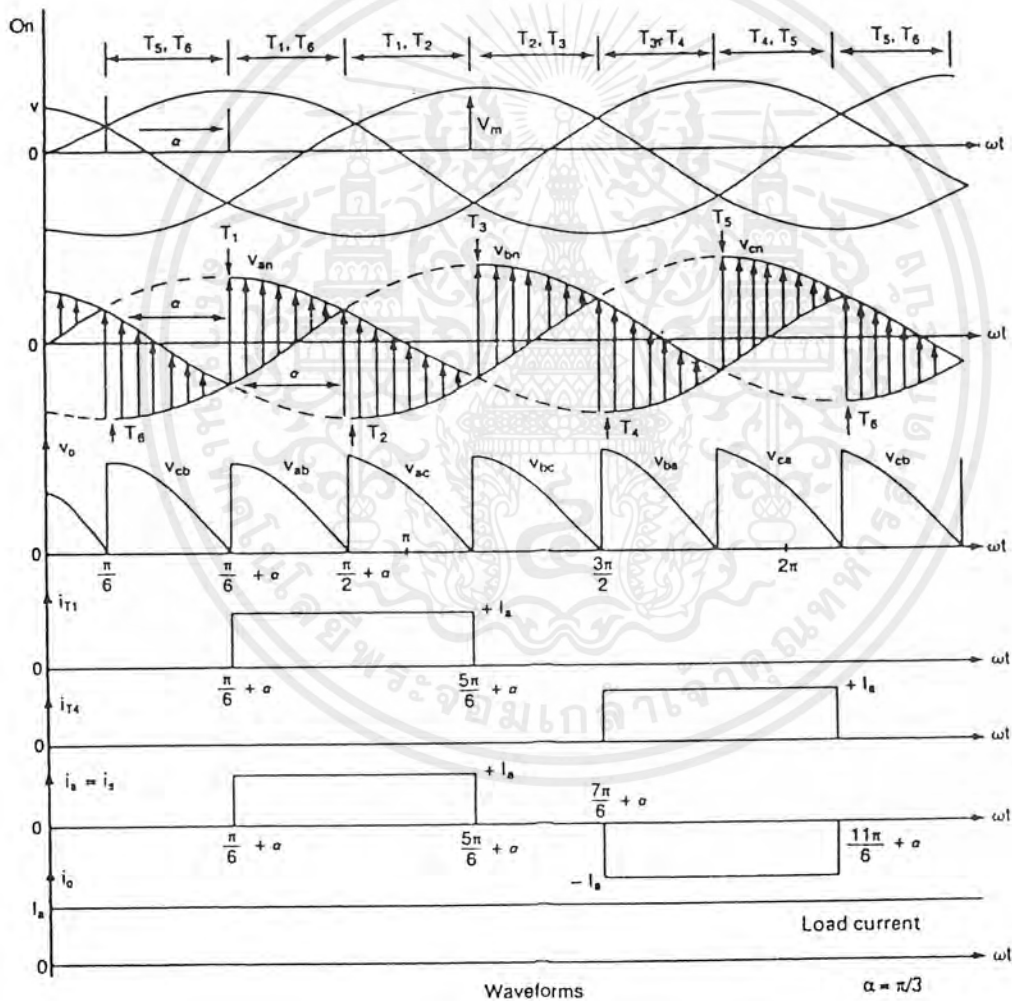
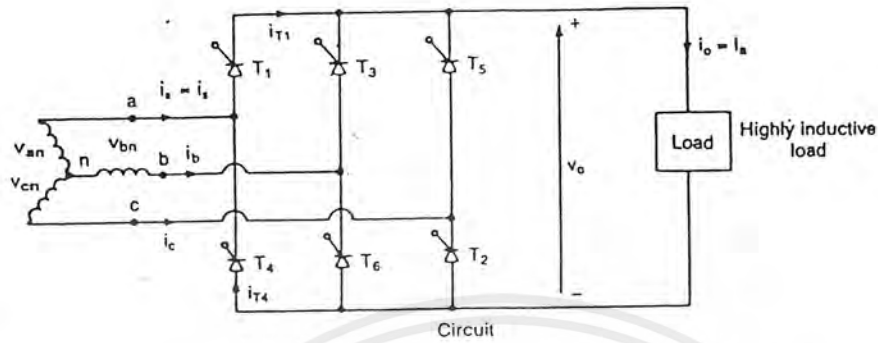
แรงดันที่สายที่สอดคล้องกัน จะมีค่าเป็น

$$V_{ab} = V_{an} - V_{bn} = \sqrt{3} V_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{6} \right) \quad (3.4)$$

$$V_{bc} = V_{bn} - V_{cn} = \sqrt{3} V_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \quad (3.5)$$

$$V_{CA} = V_{cn} - V_{an} = \sqrt{3} V_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 (ก) แสดงวงจร และ(ข) รูปคลื่นของวงจรแปลงผันแบบเต็มคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาค่าเฉลี่ยของแรงดันเอาต์พุต ได้จาก

$$\begin{aligned}
 V_{dc} &= \frac{3}{\pi} \int_{\pi/6+\alpha}^{\pi/2+\alpha} V_{ab} d(\omega t) \\
 &= \frac{3}{\pi} \int_{\pi/6+\alpha}^{\pi/2+\alpha} \sqrt{3} V_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{6} \right) d(\omega t) \\
 &= \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m \int_{\pi/6+\alpha}^{\pi/2+\alpha} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \sin \omega t + \frac{1}{2} \cos \omega t \right) d(\omega t) \\
 &= \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m \left[\left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \cos \omega t \right) \Big|_{\pi/2+\alpha}^{\pi/2+\alpha} + \left(\frac{1}{2} \sin \omega t \right) \Big|_{\pi/6+\alpha}^{\pi/2+\alpha} \right] \\
 &= \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \left[\sin \alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \alpha - \frac{1}{2} \sin \alpha \right] + \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} \cos \alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \alpha \right] \right] \\
 V_{dc} &= \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m \cos \alpha \tag{3.7}
 \end{aligned}$$

หาค่า rms ของแรงดันเอาต์พุตได้จาก

$$V_{rms} = \left[\frac{1}{T} \int_0^T V_L(t) dt \right]^{1/2}$$

กำหนดให้ $V_L = V_{ab} = V_{an} - V_{bn} = \sqrt{3} V_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{6} \right)$

แทนค่า $V_{rms} = \left[\frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}+\alpha} 3V_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{6} \right) d(\omega t) \right]^{1/2}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
&= \left[\frac{9Vm}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+2}^{\frac{\pi}{6}+2} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{6} \right) d(\omega t) \right]^{1/2} \\
&= \sin A = \frac{1}{2}(1 - \cos 2A) \\
&= \left[\frac{9Vm}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+2}^{\frac{\pi}{6}+2} \frac{1}{2} \left[1 - \cos 2 \left(\omega t + \frac{\pi}{6} \right) \right] d(\omega t) \right]^{1/2} \\
&= \cos(A+B) = \cos A \cos B - \sin A \sin B \\
&= \left[\frac{9Vm}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+2}^{\frac{\pi}{6}+2} \left[1 - \frac{1}{2} \cos 2\omega t + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin 2\omega t \right] d(\omega t) \right]^{1/2} \\
&= \left[\frac{9Vm}{2\pi} \left[\omega t - \frac{1}{4} \sin 2\omega t - \frac{\sqrt{3}}{4} \cos 2\omega t \right]_{\frac{\pi}{6}+2}^{\frac{\pi}{6}+2} \right]^{1/2} \\
&= \left[\frac{9Vm}{2\pi} \left[\frac{\pi}{3} + \frac{3}{8} \sin 2\alpha + \frac{\sqrt{3}}{8} \cos 2\alpha + \frac{3\sqrt{3}}{8} \cos 2\alpha - \frac{3}{8} \sin 2\alpha \right] \right]^{1/2} \\
&= \left[\frac{9Vm}{2\pi} \left[\frac{\pi}{3} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos 2\alpha \right] \right]^{1/2} \\
V_{rms} &= \sqrt{3} V_m \left[\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{4\pi} \cos 2\alpha \right]^{1/2} \tag{3.8}
\end{aligned}$$

ค่า rms ของกระแสองค์ประกอบพื้นฐาน มีค่าเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_1 = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_a = 0.7797 I_a \quad (3.9)$$

ค่า rms ของกระแสอินพุต

$$I_s = \left[\frac{2}{2\pi} \int_{\pi/6+\alpha}^{5\pi/6+\alpha} I_a^2 d(\omega t) \right]^{1/2}$$

$$= I_a \sqrt{\frac{2}{3}} = 0.8165 I_a \quad (3.10)$$

$$\text{HF} = \left[\left(\frac{I_s}{I_1} \right)^2 - 1 \right]^{1/2}$$

$$= \left[\left(\frac{\pi}{3} \right)^2 - 1 \right]^{1/2}$$

$$= 0.3108 \text{ หรือ } 31.08 \% \quad (3.11)$$

$$\text{DF} = \cos \phi_1 = \cos(-\alpha) \quad (3.12)$$

$$\text{PF} = \frac{I_1}{I_s} \cos(-\alpha) = \frac{3}{\pi} \cos(\alpha)$$

$$= 0.9549 \text{ DF} \quad (3.13)$$

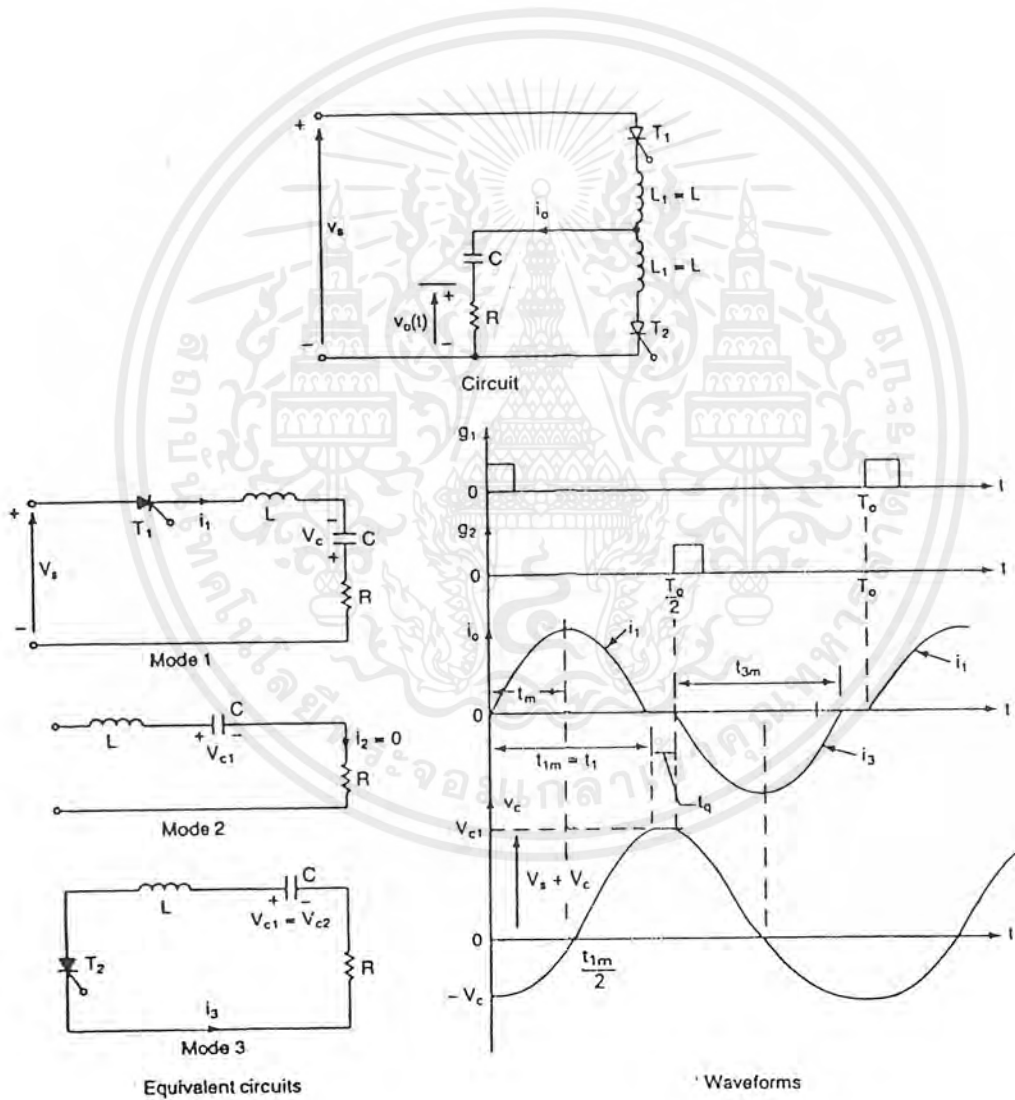
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 อินเวอร์เตอร์

4.1 ทฤษฎี และ การทำงาน

วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์

Series Resonant Inverter with Unidirectional Switches



รูปที่ 4.1 วงจรพื้นฐานอินเวอร์เตอร์อนุกรมเรโซแนนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปวงจร series inverter เป็นการใช้อุปกรณ์ไทริสเตอร์ ในการสวิตช์ ในการสวิตช์ เมื่อไทริสเตอร์ T_1 นำกระแส จะเกิดการไหลของกระแสพัลส์เรโซแนนซ์ที่โหลดและกระแสนั้นจะตกลงสู่ศูนย์ที่เวลา $t = t_m$ และ T_1 นั้นจะหยุดนำกระแสด้วยตัวมันเอง(Self commutated)

เมื่อไทริสเตอร์ T_2 นำกระแสจะเกิดกระแสเรโซแนนซ์ ที่โหลดในช่วงลบ และ T_2 นั้นจะหยุดนำกระแสด้วยตัวมันเอง การทำงานของวงจรสามารถแบ่งออกเป็นโหมดต่างๆ ได้ดังรูป วงจรอนุกรมเรโซแนนซ์นั้นขึ้นอยู่กับค่า L, C, R เพื่อให้ให้อยู่ในสถานะ Underdamped

$$R^2 < \frac{4L}{C} \quad (4.1)$$

โหมด 1 ในการเริ่มต้นตอนแรกเมื่อ T_1 นำกระแส และเกิดการไหลของกระแสพัลส์เรโซแนนซ์ที่โหลด

สมการของกระแสโหลด ในโหมดนี้มีลักษณะดังนี้

$$L \frac{di_1}{dt} + Ri_1 + \frac{1}{C} \int i_1 dt + v_{c1}(t=0) = V_s \quad (4.2)$$

ในสถานะเริ่มต้นนำกระแส จะกำหนดให้ $i_1(t=0) = 0$ และ $v_{c1}(t=0) = -V_c$ ดังนั้นวงจรนี้มีค่าอยู่ในช่วง Underdamped จากสมการ (4.2) จะได้ค่า $i_1(t)$ ดังนี้

$$i_1(t) = A_1 e^{-R/2L t} \sin \omega_r t \quad (4.3)$$

จากสมการที่ 4.3 สามารถหาค่า A_1 ได้ดังนี้

$$\left. \frac{di_1}{dt} \right|_{t=0} = \frac{V_s + V_c}{\omega_r L} = A_1$$

โดยที่ ω_r คือ ความถี่เรโซแนนซ์

$$\omega_r = \left(\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2} \right)^{1/2} \quad (4.4)$$

$$i_1(t) = \frac{V_s + V_c}{\omega_r L} e^{-\alpha t} \sin \omega_r t \quad (4.5)$$

$$\alpha = \frac{R}{2L} \quad (4.6)$$

กระแส $i_1(t)$ ในสมการ (4.5) จะมีสูงสุดในช่วงนำกระแสที่เวลา t_m

$$\left. \frac{di_1}{dt} \right|_{t=t_m} = 0 \quad \text{หรือ}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\omega_r l^{-\alpha t_m} \cos \omega_r t_m - \alpha l^{-\alpha t_m} \sin \omega_r t_m = 0$$

สามารถหาค่าเวลา t_m ได้จากสมการ

$$t_m = \frac{1}{\omega_r} \tan^{-1} \frac{\omega r}{\alpha} \quad (4.7)$$

แรงดันตกคร่อมคาปาซิเตอร์สามารถหาได้จาก

$$\begin{aligned} V_{c1}(t) &= \frac{1}{c} \int_0^t i_1(t) dt - V_c \\ &= -(V_s + V_c) l^{-\alpha t} (\alpha \sin \omega_r t + \omega_r \cos \omega_r t) / \omega_r + V_s \end{aligned} \quad (4.8)$$

ช่วงเวลาทำงานของโหมคนี้อยู่ในช่วง $0 \leq t \leq t_{1m}$ หรือ π / ω_r และ $i_1(t)$ จะมีค่าลดลงสู่ศูนย์โดยสิ้นสุดที่เวลา t_{1m} ดังนั้นที่โหมคนี

$$i_1(t = t_{1m}) = 0$$

และ

$$V_{c1}(t = t_{1m}) = V_{c1} = (V_s + V_c) l^{-\epsilon \pi / \omega_r} + V_s$$

โหมคที่ 2 การทำงานของโหมคนี คือ ไทริสเตอร์ T_1 และ T_2 เปิด (หยุดนำกระแส) เป็นการกลับสู่ที่เวลาเริ่มต้น ($t=0$) โดยในโหมคนีจะเริ่มต้นการทำงานที่ช่วงเวลา $0 \leq t \leq t_{2m}$

ดังนั้น

$$i_2(t) = 0, \quad V_{c2}(t) = V_{c1}$$

$$V_{c2}(t = t_{2m}) = V_{c2} = V_{c1} \quad (4.9)$$

โหมคที่ 3 การเริ่มต้นการทำงานของโหมคนี คือ เมื่อ ไทริสเตอร์ T_2 ปิด (นำกระแส) จะทำให้กระแสไหลผ่านโหลดโดยลักษณะของกระแสจะเกิดขึ้นในช่วงลบ การเริ่มต้นในโหมคนีจะเริ่มที่เวลา $t=0$ โดยเราสามารถหากระแสโหลดได้จาก

$$L \frac{di_3}{dt} + Ri_3 + \frac{1}{c} \int i_3 dt + v_{c3}(t=0) = 0 \quad (4.10)$$

เมื่อเริ่มต้นนำกระแส $i_3(t=0) = 0$ และ $V_{c3}(t=0) = -V_{c2} = -V_{c1}$ จากสมการที่ 4.10 สามารถหาได้

$$i_3(t) = \frac{V_{c1}}{\omega_r L} l^{-\alpha t} \sin \omega_r t \quad (4.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันตกคร่อมคาปาซิเตอร์นั้น สามารถหาได้จาก

$$\begin{aligned} V_{c3}(t) &= \frac{1}{C} \int_0^t i_3(t) dt - V_{c1} \\ &= V_{c1} e^{-\alpha t} (\alpha \sin \omega_r t + \omega_r \cos \omega_r t) / \omega_r \end{aligned} \quad (4.12)$$

ช่วงเวลาทำงานของโหมคนี้อยู่ในช่วง $0 \leq t \leq t_{3m}$ หรือ π / ω_r และ $i_3(t)$ จะมีค่าตกลงสู่ศูนย์ โดยการจะสิ้นสุดของการทำงาน

$$i_3(t = t_{3m}) = 0$$

ในช่วงสภาวะคงที่

$$\begin{aligned} V_{c3}(t = t_{3m}) &= V_{c3} = V_c = V_{c1} \\ V_{c3}(t = t_{3m}) &= V_{c3} = V_c = V_{c1} e^{-\epsilon \pi / \omega_r} \end{aligned} \quad (4.13)$$

นำสมการที่ (4.9) และ (4.13) มารวมกัน จะได้สมการที่ (4.14), (4.15)

$$V_c = V_s \frac{1 + e^{-Z}}{e^Z - e^{-Z}} = V_s \frac{e^Z + 1}{e^{2Z} - 1} = \frac{V_s}{e^Z - 1} \quad (4.14)$$

$$V_{c1} = V_s \frac{1 + e^{-Z}}{e^Z - e^{-Z}} = V_s \frac{e^Z (1 + e^{-Z})}{e^{2Z} - 1} = \frac{V_s e^Z}{e^Z - 1} \quad (4.15)$$

โดยกำหนดให้

$$\begin{aligned} Z &= \alpha \pi / \omega_r \\ V_s + V_c &= V_{c1} \end{aligned} \quad (4.16)$$

จากสมการที่ 4.16 เป็นช่วงนำกระแสที่อยู่ภายใต้สภาวะคงที่ โดยที่กระแสสูงสุดในซีกบวกจะมีค่าดังในสมการที่ 4.5 และ กระแสสูงสุดในซีกลบจะมีค่าเหมือนกัน

ดังนั้นกระแสที่ไหลด $i_1(t)$ มีค่ากลายเป็นศูนย์ และเป็นช่วงเวลาที่ไทรสเตอร์ T_1 จะหยุดนำกระแสก่อนที่ไทรสเตอร์ T_2 นำกระแส

การปรับเปลี่ยนเวลาในการเปิด โดย $t_{zm} (=t_{off})$ นั้นเรียกว่า Dead Zone โดยจะต้องมีค่าเวลามากกว่า turn-off ของไทรสเตอร์ (t_q) ดังนั้น

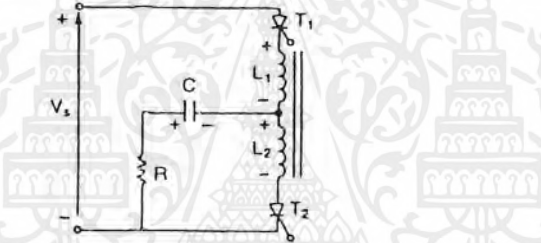
$$\frac{\pi}{\omega_0} - \frac{\pi}{\omega_r} = t_{off} > t_q \quad (4.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

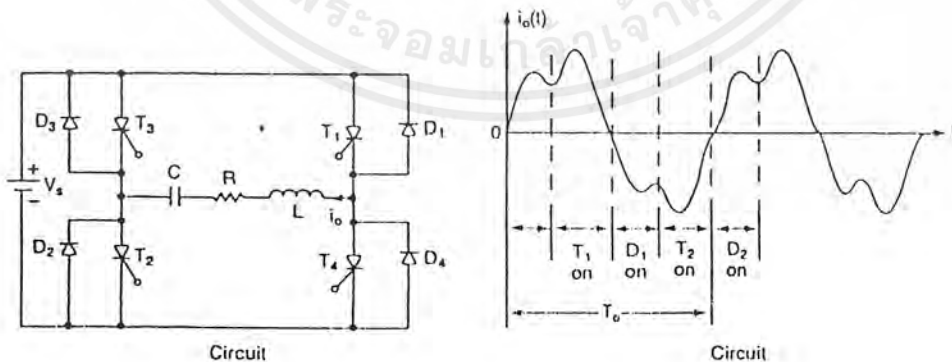
กำหนดให้ ω_0 = ความถี่ของแรงดันเอาต์พุต (rad/s)
ความถี่ของเอาต์พุตที่สามารถเป็นไปได้สูงสุด จะถูกจำกัดด้วยสมการนี้

$$f_0 \leq f_{\max} = \frac{1}{2(t_q + \pi/\omega_r)} \quad (4.18)$$

ในรูปที่ 4.1 เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ เรโซแนนซ์อย่างง่าย ๆ และกำลังทางไฟฟ้าจ่ายจากแหล่งจ่ายไฟตรงนั้นยังไม่ต่อเนื่อง แหล่งจ่ายไฟตรงนี้จะมีกระแสสูงสุดและจะประกอบฮาร์โมนิกส์ เราสามารถปรับปรุงวงจรพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์ ในรูปที่ 4.1 ได้ดังรูปที่ 4.2, 4.3 และ 4.4

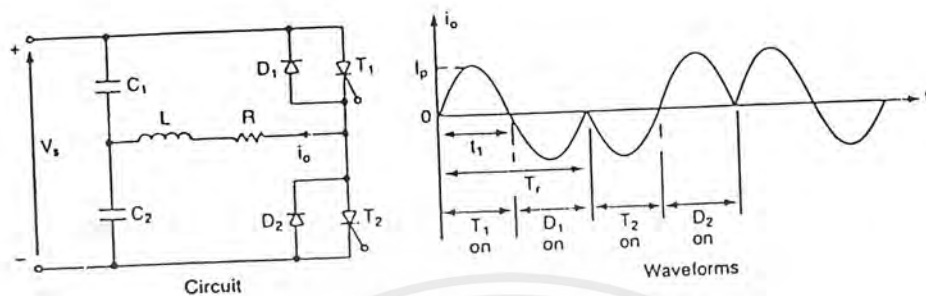


รูปที่ 4.2 วงจรอินเวอร์เตอร์อนุกรมเรโซแนนซ์แบบมีตัวเหนี่ยวนำคัปปลิง



รูปที่ 4.3 วงจรอินเวอร์เตอร์อนุกรมเรโซแนนซ์แบบฮาล์ฟบริดจ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



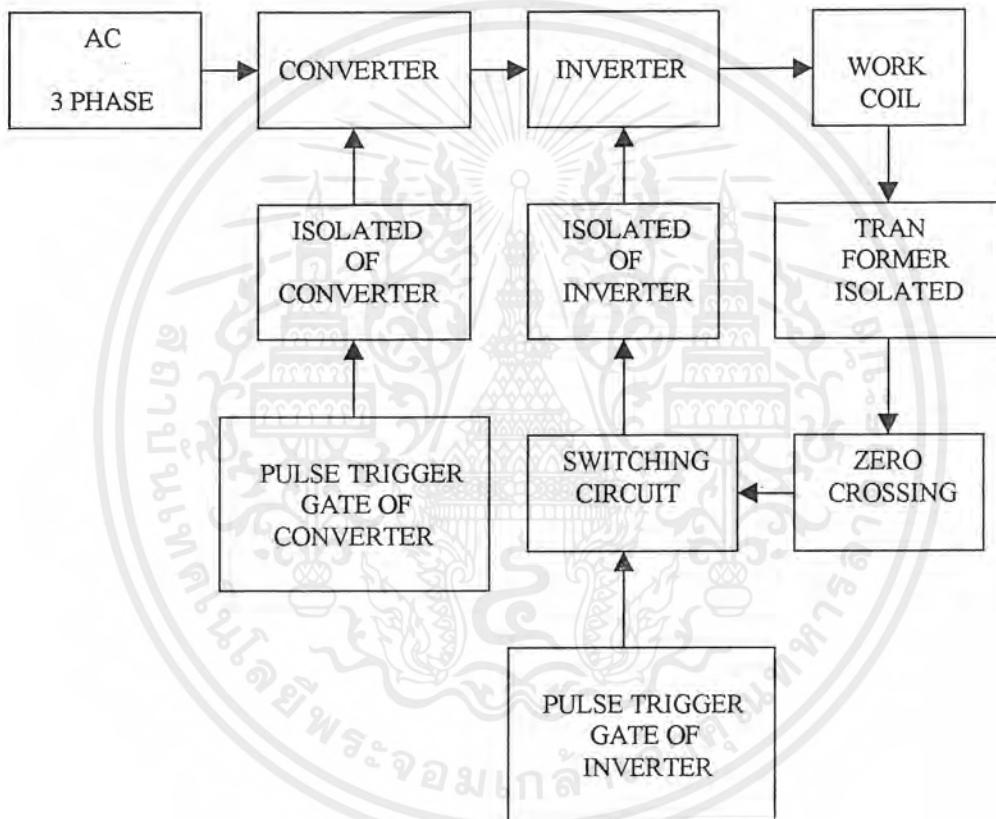
รูปที่ 4.4 วงจรอินเวอร์เตอร์อนุกรมเรโซแนนซ์แบบ ฮาล์ฟบริดจ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การวิเคราะห์และออกแบบการทำงาน

5.1 โครงสร้างของระบบ



รูปที่ 5.1 แสดงโครงสร้างของ ระบบ INDUCTION HEATING

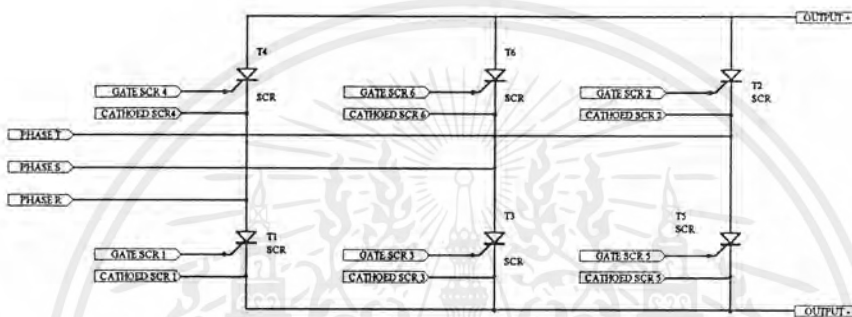
5.2 ระบบคอนเวอร์เตอร์

คอนเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้อุปกรณ์สวิตซิ่งซึ่งจำพวกเอสซีอาร์ในโครงการนี้ได้ใช้คอนเวอร์เตอร์แบบเต็มถูกคลื่น 3 เฟส คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอนเวอร์เตอร์แบบเต็มคลื่น 3 เฟส

คอนเวอร์เตอร์แบบนี้เป็นการใช้อุปกรณ์สวิทช์ซึ่งจำพวก เอส ซี อาร์ ในการทำงานข้อดี สามารถ regeneration และ ไม่ต้องมี fly wheel Diode ในขณะที่เป็นโหลดเป็นอินดักทีฟโหลด มี ripple น้อย ลักษณะของคอนเวอร์เตอร์แบบนี้แสดงไว้ในรูปข้างล่าง



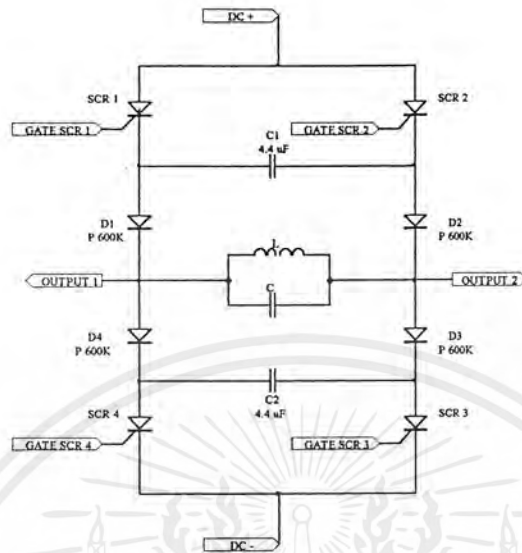
รูปที่ 5.2 แสดงวงจร full bridge converter

5.3 ระบบอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ โดยอาศัยอุปกรณ์สวิทช์ซึ่งจำพวก เอส ซี อาร์ โดยในโครงการนี้ได้ใช้อินเวอร์เตอร์แบบเฟสเดียว

อินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์

อินเวอร์เตอร์แบบนี้ใช้อุปกรณ์สวิทช์ซึ่ง 4 ตัว สำหรับอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวมีข้อดีคือสามารถให้กำลังงานที่สูงจึงเหมาะสำหรับงานที่ต้องการกำลังงานสูงๆลักษณะของอินเวอร์เตอร์แบบนี้แสดงไว้ดังรูปข้างล่าง



รูปที่ 5.3 แสดงวงจร full Bridge Inverter

5.3.1 การคำนวณ และการออกแบบระบบอินเวอร์เตอร์

กำหนดให้

1. $L=10\mu\text{H}$
2. $C=4.4\ \mu\text{F}$
3. ความถี่ของแรงดันเอาต์พุต (f_o) = 700 Hz
4. ค่าช่วงเวลา turn - off ของไทรสเตอร์(t_q) = 50 us

หาค่า ω_r

$$\omega_r = \left(\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2} \right)^{1/2}; R=0$$

$$\omega_r = \left(\frac{1}{10 \cdot 10^{-3} \cdot 4.4 \cdot 10^{-6}} \right)^{1/2}$$

$$=4767.3\ \text{rad/s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาค่า ω_o

$$\omega_o = 2\pi f_o$$

$$= 2 * \pi * 700 = 4398.2 \text{ rad/s}$$

หาค่าช่วงเวลาที่เอสซีอาร์ จะหยุดนำกระแส

$$t_{off} = \frac{\pi}{\omega_o} - \frac{\pi}{\omega_r}$$

$$= \frac{\pi}{4398.2} - \frac{\pi}{4767.3} = 55.30 \text{ us}$$

หาค่าความถี่สูงสุดที่เป็นไปได้

$$f_{max} = \frac{1}{2 \left(t_q + \pi / \omega_r \right)}$$

$$= \frac{1}{2 \left(50 * 10^{-6} + \pi / 4767.3 \right)} = 705.2 \text{ Hz}$$

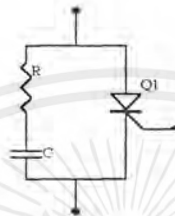
5.4 วงจรสับเบอร์ (Sunbber Circuit)

เอสซีอาร์สามารถนำกระแสได้เมื่อได้รับสัญญาณทรigger แต่ถ้าเกิด dv/dt ที่มีค่าสูงมากพอสมควรก็จะทำให้เกิดกระแสทรigger ขึ้นเองภายในตัวเอสซีอาร์ได้ (เนื่องจากภายในตัวมันมีคาปาซิเตอร์อยู่ค่าหนึ่ง) เป็นเหตุทำให้เอสซีอาร์เกิดนำกระแสได้ ในขณะที่ไม่มีสัญญาณทรigger ดังนั้นจึงต้องมีวงจรป้องกันโดยต่อคร่อมระหว่างขั้วเอาโนดกับคาโทดของเอสซีอาร์เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดค่า dv/dt ที่สูงเกินไป

การต่อวงจร RC คร่อมกับการจ่ายแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสดังรูปที่ 5.4 นั้นก็เพื่อป้องกันสัญญาณรูปเคียวแหลมไปทำอันตรายแก่อุปกรณ์หรือชิ้นส่วนวงจรในภาควงจรควบคุมนั่นเอง โดยทำหน้าที่เสมือนเป็นทางคว้นให้กับสัญญาณที่มีความถี่สูงได้ไหลลัดวงจรลงสายนิวตรอนไปเพราะค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุจะมีค่าน้อยลงแบบไฮเปอร์โบลา (Hyperbola)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อความถี่ของสัญญาณไฟฟ้ามากขึ้น ดังนั้นจึงเกิดแนวคิดขึ้นว่าวิธีสร้างทางด่วนให้สไปต์ไหลลงสายนิวตรอนด้วยวงจร RC ที่ทำหน้าที่เป็นวงจรสับเบอร์นี้ อาจทำได้โดยเลือกใช้ตัวต้านทานค่าน้อย ๆ ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุที่ทานแรงดันได้สูง ๆ



รูปที่ 5.4 แสดงการต่อใช้งานของวงจรสับเบอร์

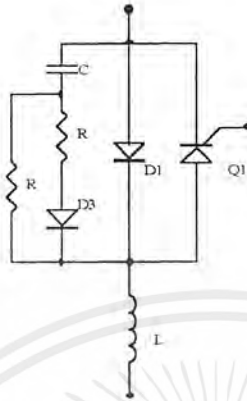
5.4.1 รูปแบบของวงจรสับเบอร์

มีอยู่ด้วยกัน 3 แบบวงจรสับเบอร์แบบ RC ยังมีการนำมาใช้งานเป็นวงจรสับเบอร์ได้ในอีกลักษณะหนึ่ง โดยนำมาใช้ต่อขนานกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังโดยตรงเลยโดยใช้ป้องกันตัวอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังอันเนื่องมาจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน เมื่อเทียบกับเวลา (dv/dt) ที่มากเกินไปซึ่งอาจจะมากจนเกินไปจากพิกัดที่อุปกรณ์สามารถจะทนได้ วงจรสับเบอร์ตามวัตถุประสงค์นี้จึงมีความสำคัญมาก เพราะโดยปกติแล้ว อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังมักจะมีราคาสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบใหญ่ ๆ ที่มีพิกัดกำลังสูง ๆ ด้วยแล้ว ตัวอุปกรณ์จะมีราคาแพงมากและ ยังหาซื้อได้ยากอีกด้วย นอกจากนี้ ในทางปฏิบัติแล้ววงจรหนึ่ง ๆ ยังต้องใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังมากกว่า 1 ตัว เพื่อทำการควบคุมการจ่ายกำลังงานอีกด้วย การป้องกันด้วยวงจรสับเบอร์จึงได้กลายเป็นมาตรการป้องกันขั้นพื้นฐานที่จำเป็น เพราะฟิวส์และเซอร์กิตเบรกเกอร์ไม่สามารถป้องกันความเสียหายจากเหตุการณ์นี้ได้

1. วงจรสับเบอร์มีขั้วทิศทางเดียวแบบถูกขั้ว (Forward-Polarized)

เหมาะสำหรับวงจรที่ใช้ใน ไทริสเตอร์ (Thyristor) หรือทรานซิสเตอร์ค่อขนานแบบกลับขั้วกับ ไดโอด (Antiparallel Diode) ดังรูปที่ 3.8.1 ตัวต้านทาน R ทำหน้าที่จำกัดผลของ dv/dt ในทิศทางฟอร์เวิร์ด และตัวต้านทาน R_1 ทำหน้าที่จำกัดกระแสคายประจุของ C ในขณะที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังนำกระแส

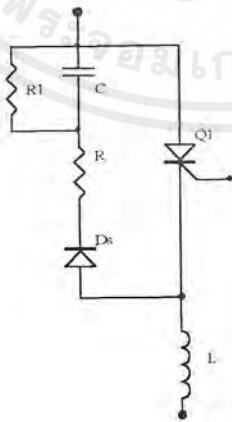
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 แบบมีขั้วทิศทางเดียวแบบถูกขั้ว

2. วงจรสับเบอร์มีขั้วทิศทางเดียวแบบกลับขั้ว (Reversed-Polarized)

ใช้จำกัด dv/dt ในทิศทางรีเวิร์ดดังรูปที่ 5.6 โดยตัวต้านทาน R_1 ทำหน้าที่จำกัดกระแสคายประจุของ C ในกรณีนี้กระแสคายประจุจะไม่ไหลผ่านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เป็นผลให้กำลังงานสูญเสียในอุปกรณ์มีค่าลดลง

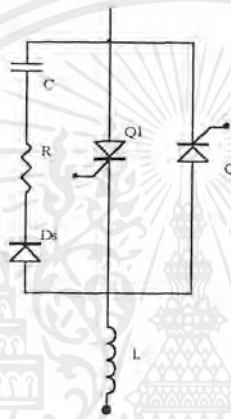


รูปที่ 5.6 แบบมีขั้วทิศทางเดียวแบบกลับขั้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. วงจรสับเบอ์แบบไม่มีขั้ว

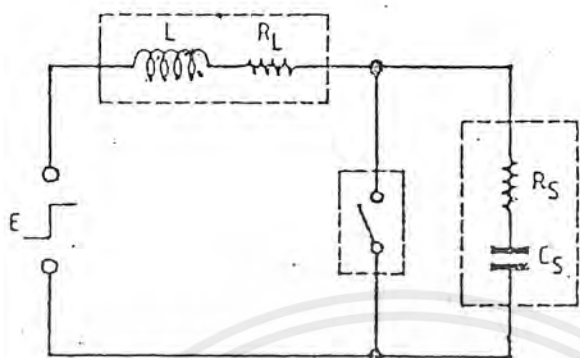
เป็นวงจรสับเบอ์สำหรับใช้กับกรณีที่มีการนำเอาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังมาต่อขนานกันในลักษณะที่ควบคุมกระแสได้ทั้ง 2 ทิศทาง ดังรูปที่ 5.7 ในกรณีนี้วงจรสับเบอ์จะต้องสามารถรับกับการทำงานได้ทั้ง 2 ทิศทาง



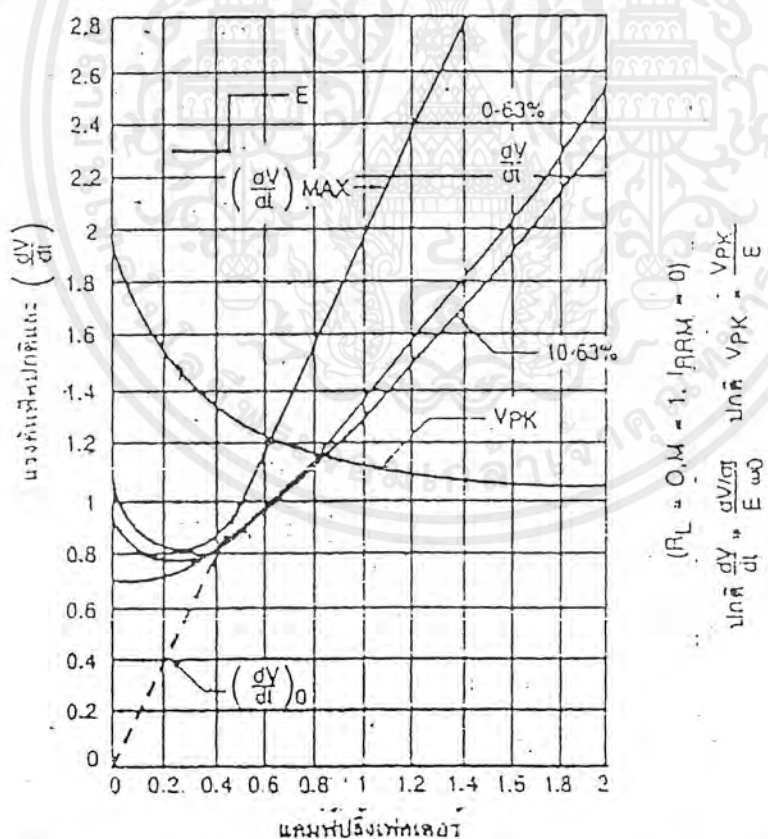
รูปที่ 5.7 แบบ ไม่มีขั้ว

5.4.2 การออกแบบวงจรสับเบอ์

นอกจากการปรับปรุงค่า dv/dt ของเอส ซี อาร์ให้สูงขึ้นแล้ว เพื่อลดปัญหาการนำกระแสผิดจังหวะแล้ว การใช้วงจรสับเบอ์เพื่อลดค่า dv/dt ที่เกิดขึ้นกับเอส ซี อาร์ก็เป็นอีกวิธีหนึ่ง การหาค่า R_3 และ C_3 สามารถทำได้โดยการแก้สมการดิฟเฟอเรนเชียล ซึ่งทำได้ยากมาก ดังนั้นจึงขอแนะนำวิธีการหาโดยใช้กราฟ วงจรสมมูลที่ใช้สำหรับวิเคราะห์จะเป็นดังในรูปที่ 5.8 สำหรับเอส ซี อาร์ จะถูกแทนด้วยสวิตช์ที่เปิดอยู่ทั้งนี้ เพราะเอส ซี อาร์อยู่ในสภาวะหยุดนำกระแสและค่าเริ่มต้น (initial value) ของกระแสและแรงดันตกคร่อม C_3 จะให้เป็นศูนย์ทั้งคู่ กราฟที่ใช้สำหรับการออกแบบจะแสดงในรูปที่ 5.9



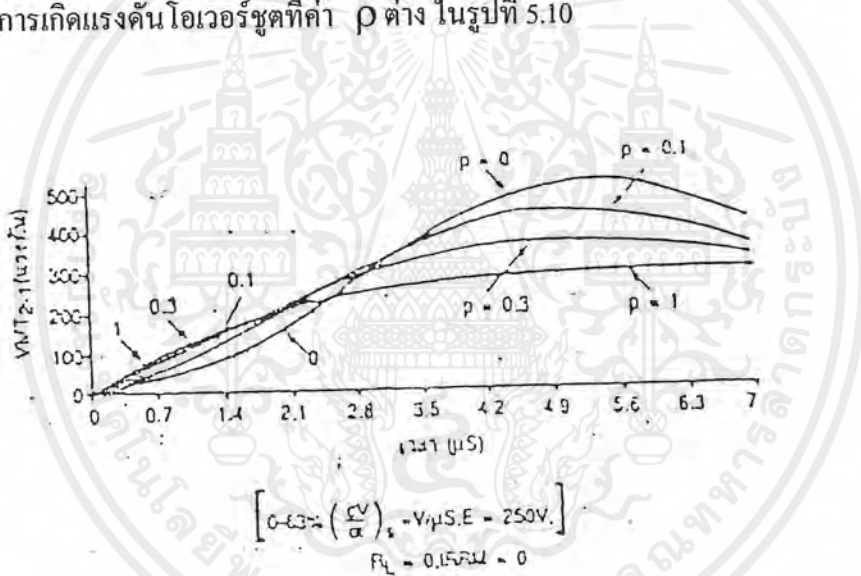
รูปที่ 5.8 วงจรสมมูลที่ใช้วิเคราะห์หาค่า R_L และ C_S ของวงจรสับเบอร์



รูปที่ 5.9 กราฟที่ใช้ในการวิเคราะห์หาค่า R_L และ C_S ของวงจรสับเบอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะเป็นกราฟที่ใช้ในการออกแบบเพื่อป้องกันผลของสแตติกและคอมมิวเตตติ้ง dv/dt ของวงจรรวม
ในกราฟจะเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ 0-63 % และ 10-63 % dv/dt ตามลำดับ แต่ใช้ได้กับโหลดที่เป็น
เป็น L อย่างเดียวเท่านั้น ($R_L = 0$) โดยค่า ρ (damping factor) ที่ใช้จะอยู่ระหว่าง 0-2 ขึ้นตอน
แรกสำหรับการออกแบบจะต้องเลือกค่า ρ ให้เหมาะสมกับเอสซีอาร์ที่ใช้งาน เพราะทั้งนี้การ
เลือกค่า ρ จะมีผลต่อการเกิดแรงดันโอเวอร์ชูต V_{pk} (overshoot) และค่า dv/dt ของวงจรรวม ถ้า
 ρ ค่ามีค่าน้อยๆ (0-0.5) ค่า dv/dt ที่เกิดขึ้นจะมีค่าต่ำ แต่แรงดันโอเวอร์ชูตที่คร่อมเอสซี
อาร์จะมีค่าสูง รวมทั้งจะเกิดเวลาประวิง (time delay) จะหน่วงแรงดันไม่ให้ขึ้นไปเร็วนัก ทำให้
(dv/dt)_{max} ไม่ได้เกิดขึ้นที่เวลา $t = 0$ และถ้ามีค่ามากกว่า 0.5 ค่า dv/dt จะมีค่าสูง แต่แรงดัน
โอเวอร์ชูต กับ มีค่าต่ำลงและ (dv/dt)_{max} จะเกิดขึ้นที่เวลา $t = 0$ รายละเอียดดูได้จากกราฟ รวม
ทั้งรูปร่างของการเกิดแรงดันโอเวอร์ชูตที่ค่า ρ ต่าง ในรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 ลักษณะการเกิดแรงดันโอเวอร์ชูตที่ค่าต่าง ๆ

แรงดันโอเวอร์ชูตนี้มีผลโดยตรงกับ V_{DRM} (Peak Repetitive Forward Blocking Voltage) ของ เอส ซี อาร์ ซึ่งถ้ามันมีค่ามากกว่าแล้วจะทำให้เอส ซี อาร์เสียหายได้ ขั้นตอนต่อไปให้อ่านค่าปกติของ dv/dt และ V_{pk} จากตำแหน่งค่าที่เลือกเสร็จแล้วให้ตรวจสอบดูว่า V_{pk} ที่เกิดขึ้นจริงมีค่าเกิน V_{DRM} ของเอสซีอาร์หรือไม่โดยใช้สมการ $V_{pk} =$ ค่าปกติของ $V_{pk} \times E$ เมื่อ E คือค่าแรงดันสูงสุดของแหล่งจ่ายไฟมีค่าเท่ากับผลคูณของ 2 กับค่าแรงดันอาร์ เอ็ม เอสของแหล่งจ่ายไฟ (V_{RMS}) ซึ่งถ้ามีค่าเกินก็จะต้องเลือกค่าใหม่ หรือเปลี่ยนขนาดของ เอส ซี อาร์ ที่มี V_{DRM} ให้สูงขึ้นหลังจากนั้นก็หาค่า W_0 (Undamped Natural Frequency) จากสูตรที่ว่า $W_0 = (dv/dt) / (\text{ค่าปกติของ } dv/dt \times E)$ เมื่อ dv/dt เป็นค่าที่เกิดขึ้นจริงกับเอส ซี อาร์ ดังนั้นการแทนค่านี้ในสมการจะต้องให้มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ dv/dt ของเอส ซี อาร์ ซึ่งก็คือ ค่า (dv/dt)_o หรือ (dv/dt)_c นั้นเอง โดยจะใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าไบนนั้นขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของผู้ออกแบบ ถ้าดับต่อไปก็หาค่า C_3 จากสมการ $C_3 = 1 / (\omega_0^2 L)$ และ หาค่า R_3 จากสมการ $R_3 = 2 / L / C_3$ เมื่อ L คือ ค่าอินดักแตนซ์ของโหลด ซึ่งในบางครั้งอาจจะต้องคำนวณหาเอง เมื่อ โหลดบอกแต่เพียงกระแสอาร์เอ็มเอสที่ใช้งาน (I_{rms}) ค่า L ที่คำนวณจะ เป็นไปตามสมการ

$$L = V_{rms} / (2 f I_{rms}) \text{ โดยที่ } f \text{ คือความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ}$$

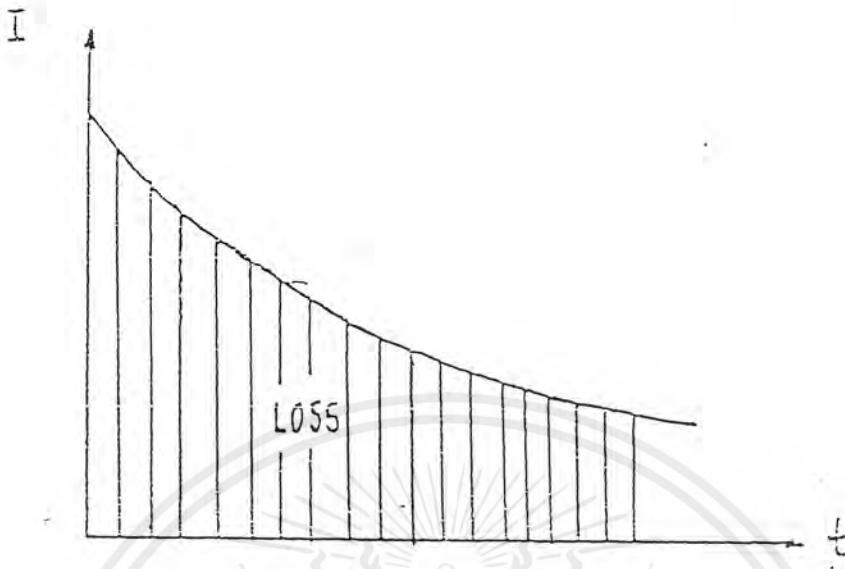
5.4.3 การทำงานของวงจรถับเบอร์

หลักการการทำงานของวงจรถับเบอร์ คือเมื่อเอส ซี อาร์หยุดนำกระแส กระแสอาโนดก็จะเปลี่ยนทิศทางเข้าซาร์จตัวเก็บประจุ โดยผ่านทางไดโอด ตัวเก็บประจุที่สูงจะสร้าง Forward Blocking Voltage ครอบมอส ซี อาร์

ในช่วงเวลาของการหยุดนำกระแส ค่าของประจุที่เข้าซาร์จอยู่ในตัวเก็บประจุนั้นอยู่กับ ค่าของกระแสที่ไหลเข้าและขนาดของตัวเก็บประจุเอง และเมื่อนำกระแส ตัวเก็บประจุก็จะดีสชาร์จ (discharge) ผ่านทางตัวต้านทานสิ่งสำคัญอย่างยิ่งคือ ประจุที่ดีสชาร์จออกจากตัวเก็บประจุจะต้องหมดก่อนช่วงที่เอสซีอาร์จะถูกทำให้หยุดนำกระแสอีกครั้งหนึ่ง เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาที่จะเกิดขึ้นในช่วงการหยุดนำกระแสครั้งต่อไป ตัวต้านทานที่อยู่ในวงจรถับเบอร์จะเป็นตัวจำกัดค่า (Di / Dt) ของวงจรถับเบอร์นี้ ตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจร จะต้องมามีค่าของความต้านทาน (Resistance) และค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance) ต่ำเพื่อให้กระแสเปลี่ยนทิศเข้าซาร์จตัวเก็บประจุได้อย่างรวดเร็ว ค่าของตัวเก็บประจุถูกกำหนดโดยค่า (Dv / Dt) ในช่วงหยุดนำกระแส สำหรับไดโอดที่ใช้จะต้องเป็นพวก Fast recovery diode ค่าของตัวความต้านทานจะถูกจำกัดโดยค่าของตัวเก็บประจุ และระยะเวลาที่นำกระแส

วงจรถับเบอร์จะเป็นตัวที่ช่วยลด (Dv / Dt) และความสูญเสียในขณะหยุดนำกระแสของเอส ซี อาร์ (turn off loss) แต่จะเกิดความสูญเสีย (loss) ขึ้นเองในตัววงจรถับเบอร์ในขณะช่วงเวลาของการนำกระแส โดยค่าความสูญเสียของสับเบอร์นี้ขึ้นกับค่า (Di / Dt) ของกระแสดีสชาร์จของตัวเก็บประจุ

คุณสมบัติที่สำคัญที่วงจรถับเบอร์ควรมีก็คือ จะต้องมามีค่าของ Leakage inductance ต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้



รูปกราฟแสดงการสูญเสีย

5.4.4 การคำนวณ และการออกแบบวงจร snubber

กำหนด

1. Peak Voltage ; $E_s = 220\sqrt{2} = 311 \text{ v}$
2. Max- operate frequency ; $f_o = 50 \text{ Hz}$
3. dv/dt สูงสุดของ เอส ซี อาร์ = 100 v/ us
4. เลือกค่า overshoot Voltage = 22 %
5. เลือกค่า Stray Circuit จาก $e_o / e_s = 1.22$ จะได้ $\zeta = 0.65$

$$\text{damping factor } (\zeta) = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}$$

โดยที่

$$\text{damping factor } (\zeta) > 0.5$$

$$\text{Snubber resistance } R = \frac{LS}{e_s}$$

$$\text{Snubber capacitance } C = \frac{4\zeta^2 e_s}{RS}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Peak Snubber current } I_{\max} = \frac{e_s}{R} \frac{2\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}$$

การคำนวณ

$$R = \frac{10 * 10^{-6} * 100 * 10^6}{312} = 3.2 \text{ ohm (เลือกค่า 10 ohm)}$$

$$C = \frac{4 * (0.65)^2 * 311}{10 * 100 * 10^6} = 525.59 \text{ nF (เลือก rated ที่ 244 V)}$$

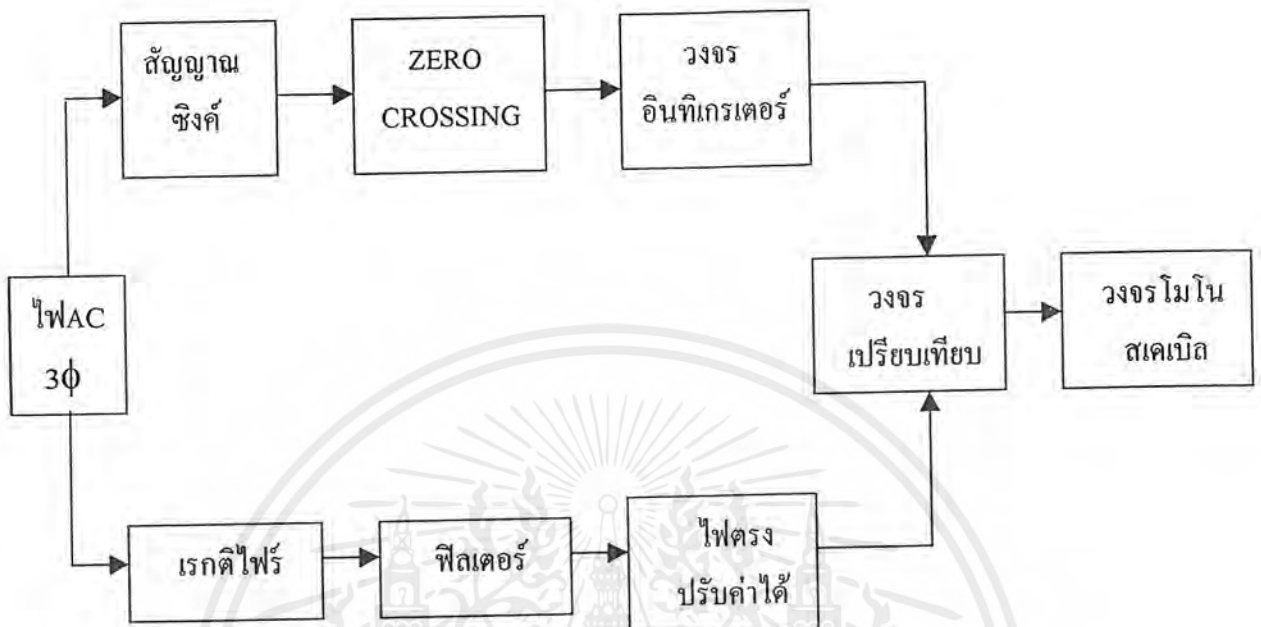
$$I_{\max} = \frac{311}{10} \frac{2 * 0.65}{\sqrt{1 - (0.65)^2}} = 53 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} \text{Snubber resistor losses } P(10 \text{ ohm}) &= C e_o^2 f_o \\ &= 525.5 * 10^{-9} * (380)^2 * 50 \\ &= 3.79 \text{ W (เลือกค่าที่ 10 W)} \end{aligned}$$

5.5 วงจรควบคุมการ-trigger ของ Converter

(PLUSE TRIGGER GATE OF CONVERTER)

วงจรควบคุมการ-trigger หรือวงจรสร้างสัญญาณกระตุ้น จะเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ให้ตัวเอส ซี อาร์ เริ่ม และหยุดการทำงาน และยังสามารถควบคุมมุม-trigger ได้ เพื่อใช้ในการควบคุมศักดาไฟฟ้า กระแสสลับทางด้านเอาต์พุทของวงจรกำลัง เพื่อจ่ายให้แก่โหลด ซึ่งมีบล็อกการทำงานดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 บล็อกไดอะแกรมแสดงขั้นตอนการทำงานของ
วงจรสร้างสัญญาณกระตุ้นทริกเกด

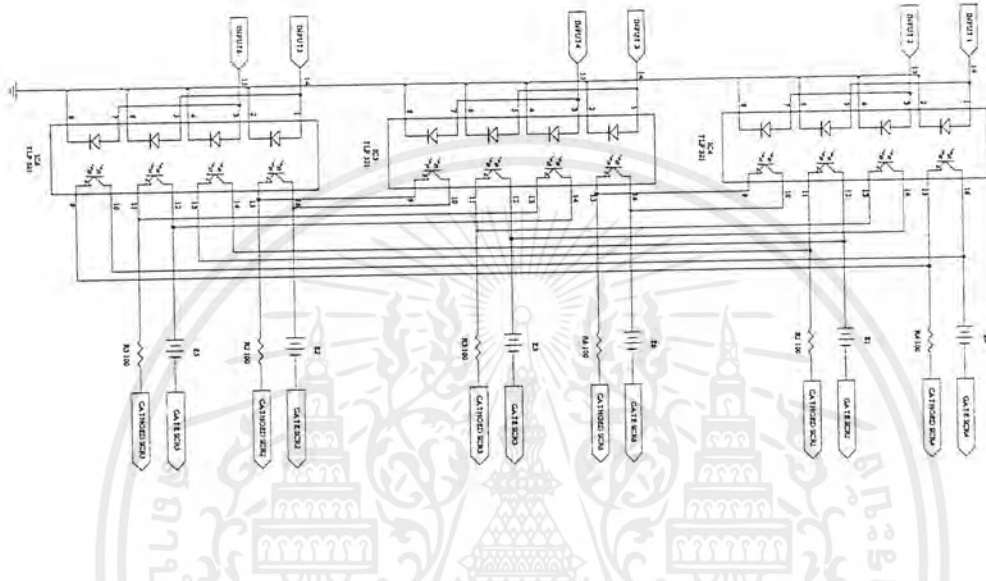
จากบล็อกไดอะแกรมของวงจรควบคุมจะประกอบด้วย ส่วนต่าง ๆ ดังนี้ คือ วงจร zero crossing , วงจรอินทิเกรเตอร์, วงจรเปรียบเทียบ, วงจรเรกติไฟร์, ฟิลเตอร์, ชุดปรับค่าแรงดันไฟตรง

วงจรสร้างสัญญาณกระตุ้นทริกเกด มีลำดับขั้นตอนการทำงานดังนี้ คือ เมื่อป้อนสัญญาณไฟกระแสสลับ 20 โวลท์ เข้าไปยังขา 5 ของ TCA 785 จากนั้นส่วน zero crossing จะทำการเปลี่ยนสัญญาณรูปซายน์ไปเป็นรูปสัญญาณสี่เหลี่ยม ส่วนวงจรอินทิเกรเตอร์นั้นจะเปลี่ยนสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมไปเป็นสัญญาณแรมป์

สัญญาณแรมป์ที่ได้มานี้ จะนำมาเข้าวงจรเปรียบเทียบเพื่อทำการเปรียบเทียบกับ ระดับแรงดันไฟตรงที่ปรับค่าได้ โดยจุดตัดกันของระดับแรงดันไฟตรง กับสัญญาณแรมป์นั้นจะทำให้เกิดสัญญาณพัลส์ขึ้นมา สัญญาณที่ได้มานี้ จะนำไปผ่านส่วนของวงจรโมโนสเตเบิล เพื่อทำการสร้างสัญญาณ ลอจิกที่เป็นสัญญาณพัลส์เล็ก ๆ ที่สามารถเปลี่ยนแปลงคาบเวลาได้ตามการควบคุมของวงจรเปรียบเทียบ ซึ่งสัญญาณที่ได้นี้จะเป็นสัญญาณเอาท์พุทที่จะนำไปใช้งาน ดังนั้นถ้าระดับแรงดันไฟตรงเกิดการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น มุมที่กระตุ้นจะเพิ่มขึ้นตามด้วยโดยมุมที่กระตุ้นสามารถปรับได้ตั้งแต่ 0-180 องศา ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6 วงจรไอโซเลตสัญญาณของ CONVERTER (ISOLATED OF CONVERTER CIRCUIT)



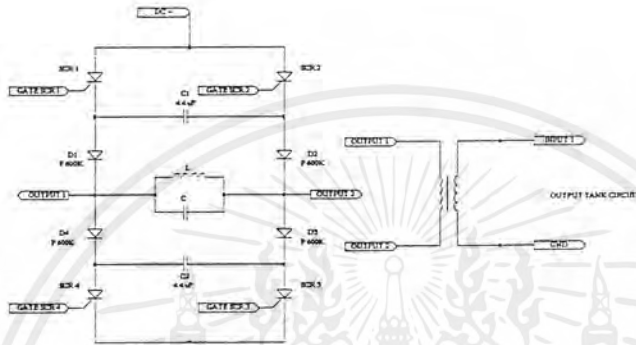
รูปที่ 5.12 แสดงวงจรแยกกราวด์ระหว่างชุดควบคุมกับชุดกำลัง

การนำสัญญาณทริกเกอร์ ได้จากชุดควบคุมนั้น ไปทริกที่ขาเกตของ เอส ซี อาร์ โดยตรงเลย นั้น อาจจะทำให้เกิดอันตรายได้ต่อวงจรควบคุมทริกเกต เพราะในกรณีที่โหลดมีการดึงโวลทเดจ และกระแส อาจจะทำให้เกิดการโอเวอร์โวลคได้ และยังป้องกันในส่วนของชุดส่งกำลังทำงานผิดพลาด ดังนั้นวิธีการแก้ปัญหาจึงใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จำพวก optoisolation ซึ่งเป็นการทำงานโดยใช้แสงในการรับ-ส่ง เข้ามาช่วยแทน เพื่อใช้ในการส่งสัญญาณพัลส์ทริกเกตจากชุดควบคุมไฟ ทริกที่ขาเกตของเอสซีอาร์ในชุดส่งกำลัง โดยลักษณะและรูปของสัญญาณที่ออกจากเอาต์พุทของ optoisolation จะเหมือนกันทุกประการและยังสามารถทำการแยก GROUND ออกจากกัน ระหว่างชุดควบคุมและชุดส่งกำลัง

หลักการทำงานพื้นฐานของอุปกรณ์ optoisolation คือ เมื่อสัญญาณลอจิกป้อนเข้ามาทางอินพุต จะทำให้เกิดกระแสไหลผ่านไดโอด เปล่งแสงอินฟราเรด ก็จะเกิดการส่งแสงไปกระตุ้นในการตรวจจับ คือ โฟโต้ทรานซิสเตอร์ทำงาน ซึ่งทำงานเปรียบเสมือนเป็นสวิตช์ปิดเปิดตัวหนึ่ง เมื่อป้อนสัญญาณเข้ามาทางอินพุตมีระดับลอจิก “0” จะมีผลทำให้โฟโต้ทรานซิสเตอร์ไม่ทำงานจึงเปรียบ

เสมือนเป็นสวิตช์เปิด ส่วนในกรณีที่มีระดับลอจิก “1” จะมีผลทำให้ โฟโตรีเลย์ทำงานจึงเปรียบเสมือนสวิตช์ปิด ทำให้เกิดสัญญาณพัลส์ส่งไปทรานซิสเตอร์ของเอส ซี อาร์

5.7 วงจร FULL BRIDGE INVERTER CIRCUIT



รูปที่ 5.13 FULL BRIDGE INVERTER

เมื่อ T1 และ T3 เกิดการนำกระแส จะทำให้เกิดกระแสไหลผ่าน จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม C1 และ C2 และจะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่โหลด

เมื่อ T2 และ T4 เกิดการนำกระแส C1และ C2จะป้อนแรงดันไปอัดกลับให้แก่ T1 และ T3 ให้หยุดนำกระแส โดยกระแสจะไหลผ่าน T2,C1,D1,LOAD,D3,C3,และT4 จากนั้น C1,C2 จะได้รับการอัดประจุใหม่ โดยมีขั้วของแรงดันตรงข้ามกับขั้วเดิม

เมื่อเกิดการกลับขั้วแรงดันที่ C1 และC2 ไคโอด D2,D4 จะนำกระแสแทน D1,D3 แสดงว่าแรงดันที่C1และ C2 พร้อมทั้งจะเปิด T2 และT4 ถ้า T1และT3 นำกระแสอีกครั้ง

5.8 PULSE TRIGGER GATE OF INVERTER

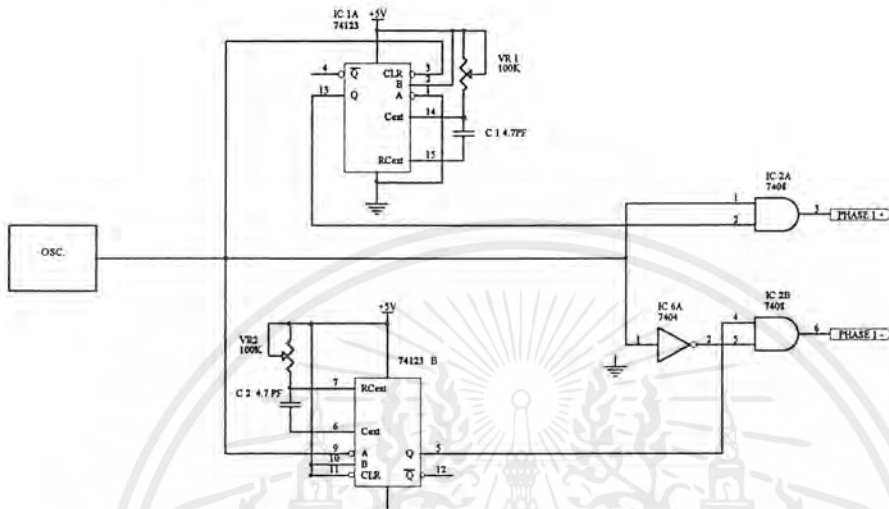
การทำงานเริ่มจาก oscillator กำเนิดสัญญาณ Pulse ออกมาที่ความถี่ 800 HZ เพื่อเป็นClock ให้กับวงจร Monostable ทั้ง 2 ตัว โดย

Monostable ตัวที่ 1 กำหนดเงื่อนไขให้ทำงานที่ขอบขาขึ้นของ pulse (risetime)

Monostable ตัวที่ 2 กำหนดเงื่อนไขให้ทำงานที่ขอบขาลงของ pulse (fall time)

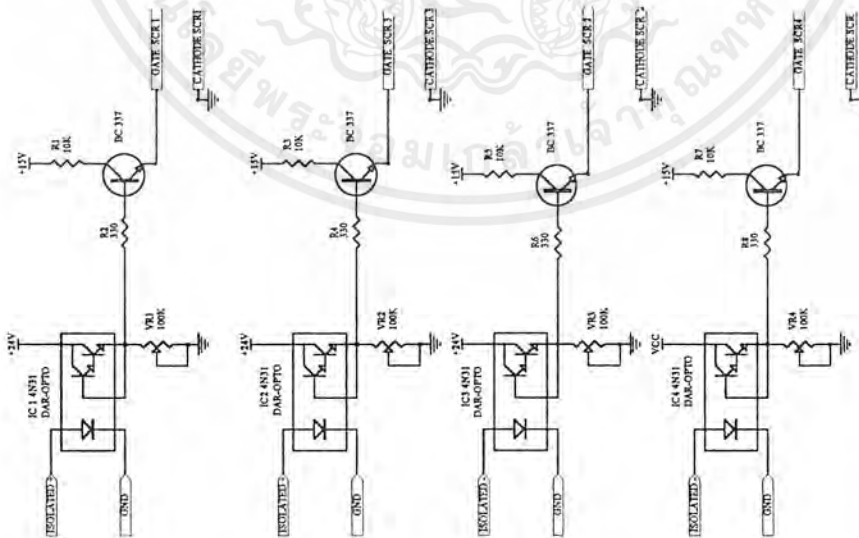
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจึงสามารถกำเนิดสัญญาณออกมา 2 สัญญาณที่มีช่วง turn on ต่างกัน 50% เมื่อ Duty Cycle ของ pulse จาก oscillator เป็น 50% ดังนั้นจะได้สัญญาณออกมามีดังนี้



รูปที่ 5.14 PULSE TRIGGER GATE OF INVERTER

5.9 วงจรไอโซเลตสัญญาณทริกเอสซีอาร์ของชุดอินเวอร์เตอร์ (ISOLATED OF INVERTER CIRCUIT)



รูปที่ 5.15 วงจร ไอโซเลตสัญญาณทริกเอสซีอาร์ของชุดอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรานซิสเตอร์ BC237 จะรับสัญญาณจาก PHASE 2+ เมื่อเกิดสัญญาณ ขึ้นมาเมื่อใด จะทำให้ทรานซิสเตอร์นำกระแส

เมื่อ เอส ซี อาร์ เบอร์ TVN 058 ได้รับสัญญาณทริกที่ขาเกต เมื่อใดจะทำให้ เอส ซีอาร์ นำกระแสตลอด จะผลทำให้รีเลย์ RY1 นำกระแส และ SW RY1 จะเปลี่ยนจาก “LOW” ไปเป็น “HIGH”

7404 ทำหน้าที่ กลับสภาวะของสัญญาณจาก “LOW” ไปเป็น “HIGH” และจาก “HIGH” ไปเป็น “LOW”

คั่นนั้นเมื่อที่ขา 1 ของ IC 6A มีสภาวะ “LOW” และที่ขา 2 ของ IC 6A มีสภาวะ “HIGH”

ที่ขา 1 ของ IC 7A จะรับสัญญาณจาก (PHASE 1+) และที่ขา 2 ของ IC 7B จะมีสภาวะ “LOW” เอาท์พุทที่ขา 3 ของ IC 7A จะมีรูปสัญญาณเหมือนกับที่ได้รับจากสัญญาณ (PHASE 1+)

ที่ขา 4 ของ IC 7B จะรับสัญญาณจาก (PHASE 2+) และที่ขา 5 ของ IC 7B จะมีสภาวะ “LOW” เอาท์พุทที่ขา 6 ของ IC 7B จะมีสภาวะเป็น “LOW” ตลอด

เมื่ออินพุทที่ขาใดขาหนึ่งของ IC 8A มีสภาวะ “HIGH” จะทำให้เอาท์พุทของ IC 8A มีสภาวะเป็น “HIGH”

ที่ขา 9 ของ IC 7C จะรับสัญญาณจาก (PHASE 1-) โดยมีสภาวะการทำงานเหมือนกับ IC 7A ส่วนขาที่ 12 ของ IC 7D จะรับสัญญาณจาก (PHASE 2-) โดยจะมีการทำงานเหมือนกับ IC 7B และเมื่ออินพุทที่ขาใดขาหนึ่งของ IC 8B มีสภาวะ “HIGH” จะทำให้เอาท์พุทของ IC 8A มีสภาวะเป็น “HIGH”

5.11 ZERO CROSSING

สัญญาณ Input ที่เข้ามาจะเป็น Sine wave เมื่อผ่าน opAmp เบอร์ LF351 จะได้สัญญาณออกมาเป็น Square Wave ที่มีจุดเริ่มต้น และจุดสิ้นสุดรูปลิ้นตรงกับสัญญาณ sine wave ที่ Input 1

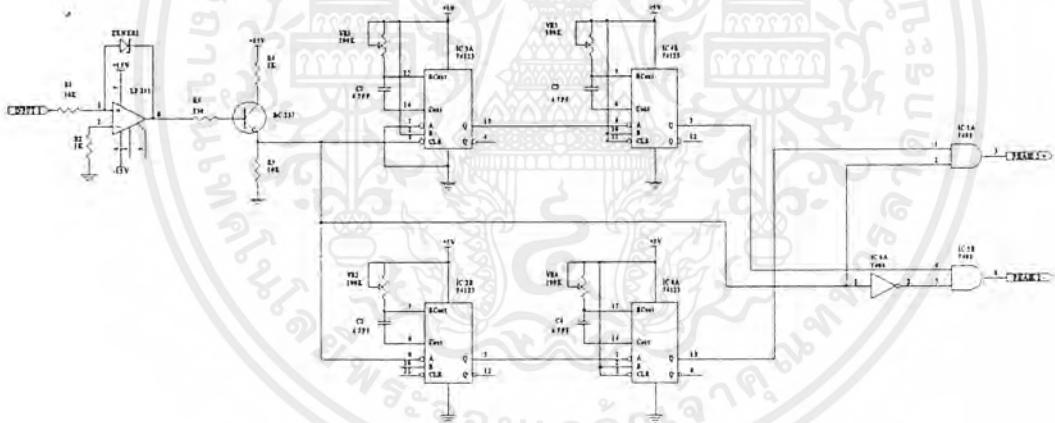
เมื่อนำเอาสัญญาณ Squarewave ที่ได้มาเป็นสัญญาณ Clock ป้อนให้กับ IC 3A เพื่อสร้างสัญญาณ Monostable ในช่วง PHASE 2+ และ IC 3B ในช่วง PHASE 2-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณ Monostable ที่ได้จากขา 13 ของ IC 3A จะมีตำแหน่งของช่วงขอบขาขึ้น ตรงกับช่วงขอบขาขึ้นของสัญญาณ Clock ส่วนสัญญาณ Monostable ที่ได้จากขา 5 ของ IC 3B นั้นจะมีตำแหน่งของช่วงขอบขาขึ้น ตรงกับช่วงขอบขาลงของสัญญาณ Clock

IC4B และ IC4A จะกำหนดให้มีการทำงานในช่วงขอบขาลงของสัญญาณ Monostable ที่ได้จากขา 13 ของ IC 3A และสัญญาณ Monostable ที่ได้จากขา 5 ของ IC 3B โดยที่ขา 5 เป็นขาเอาต์พุตของ IC 4B และ ที่ขา 13 เป็นขาเอาต์พุตของ IC 4A ความกว้างของพัลส์ของเอาต์พุตจะขึ้นอยู่กับค่า RC

IC 5A และ IC5B จะทำหน้าที่ควบคุมสัญญาณ Monostable ที่ได้จากการปรับค่า RC ไม่ให้เกินในช่วงเวลาของไซเคิลบวกและไซเคิลลบ



รูปที่ 5.17 วงจร ZERO CROSSING

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

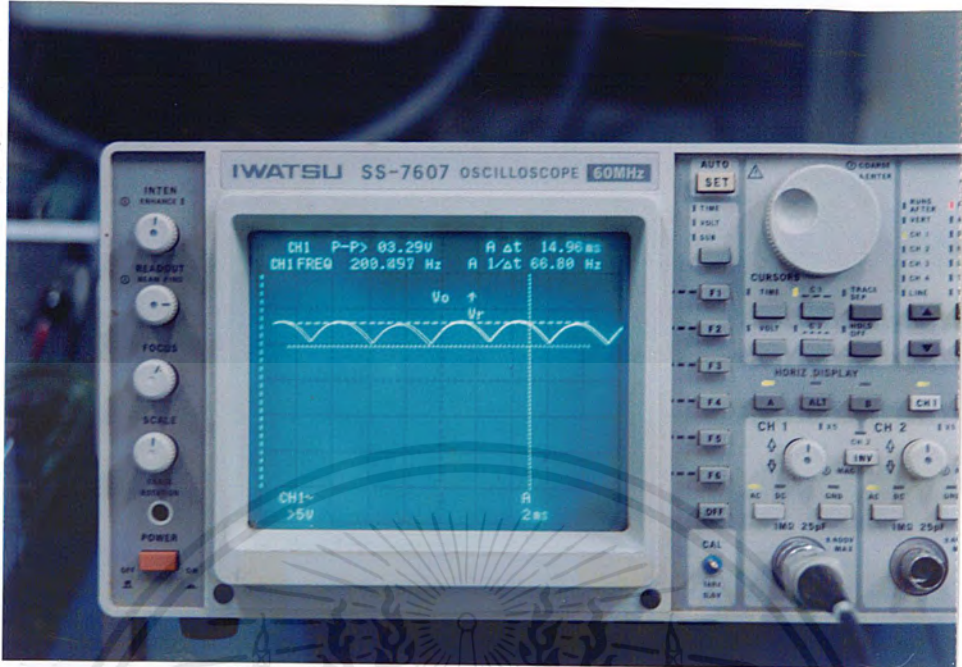
ผลการทดลอง

ผลการทดลองของคอนเวอร์เตอร์

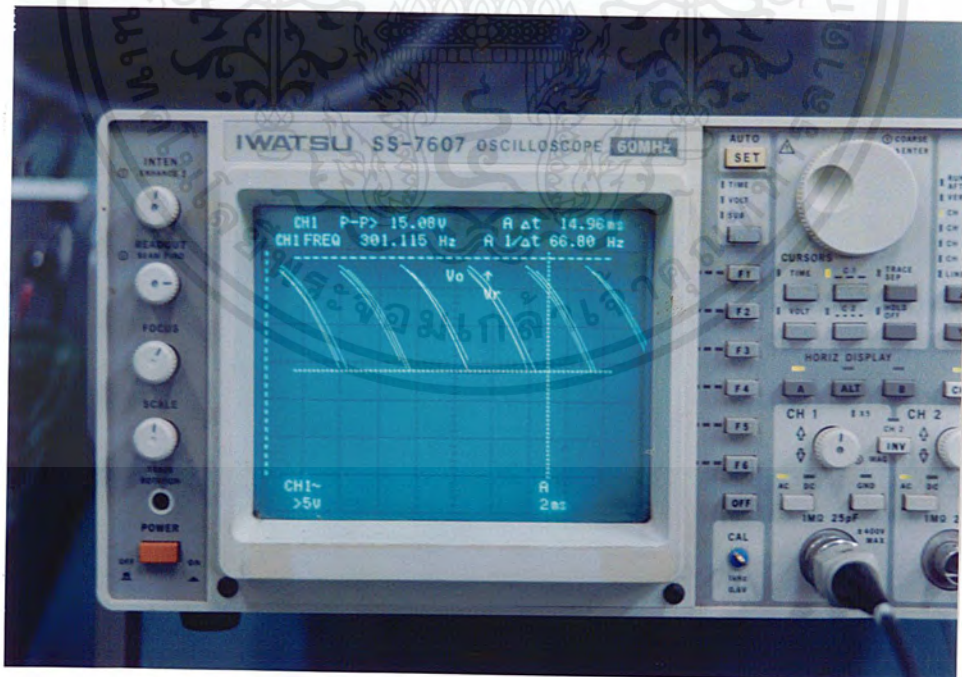


รูปแสดงตัวเครื่องของชุดคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



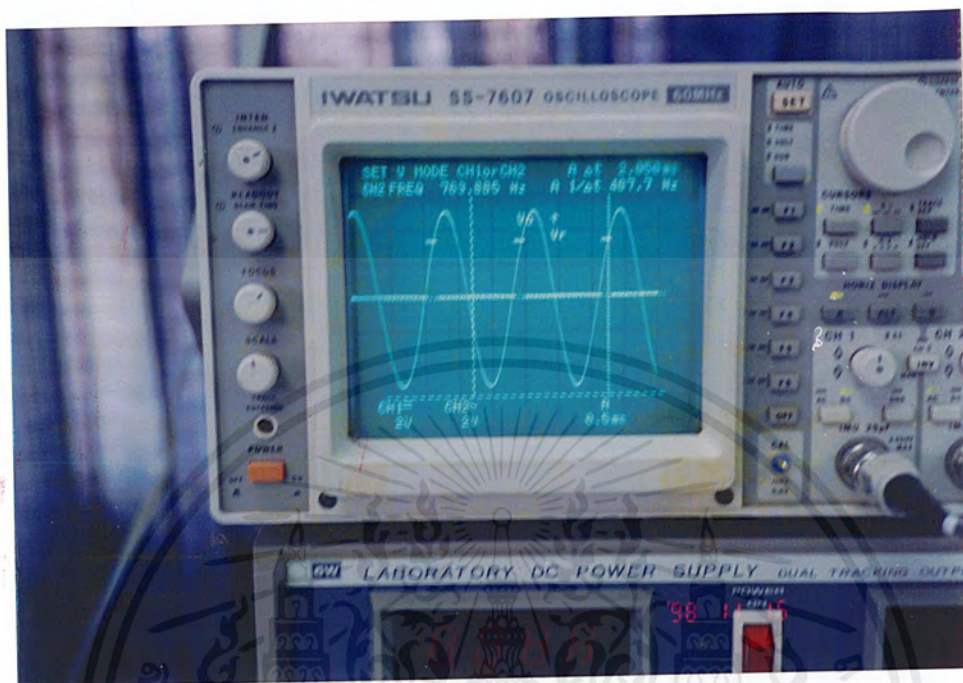
รูปคลื่นเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์



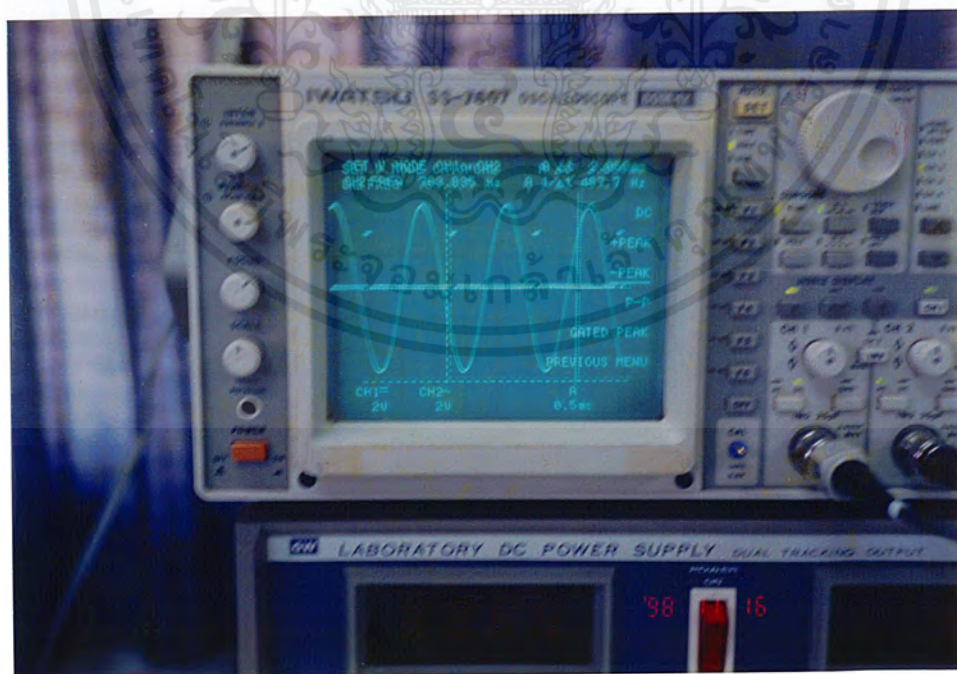
รูปคลื่นเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองของชุดอินเวอร์เตอร์

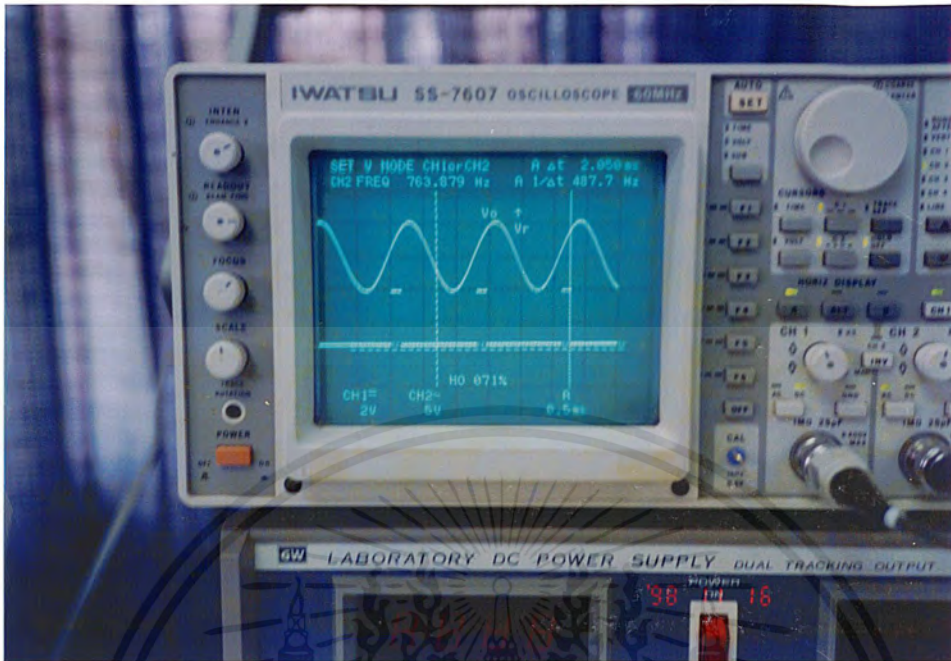


รูปคลื่นแสดงการเปรียบเทียบระหว่าง สัญญาณ SINE กับ สัญญาณทริกที่ขาเกฟสววก

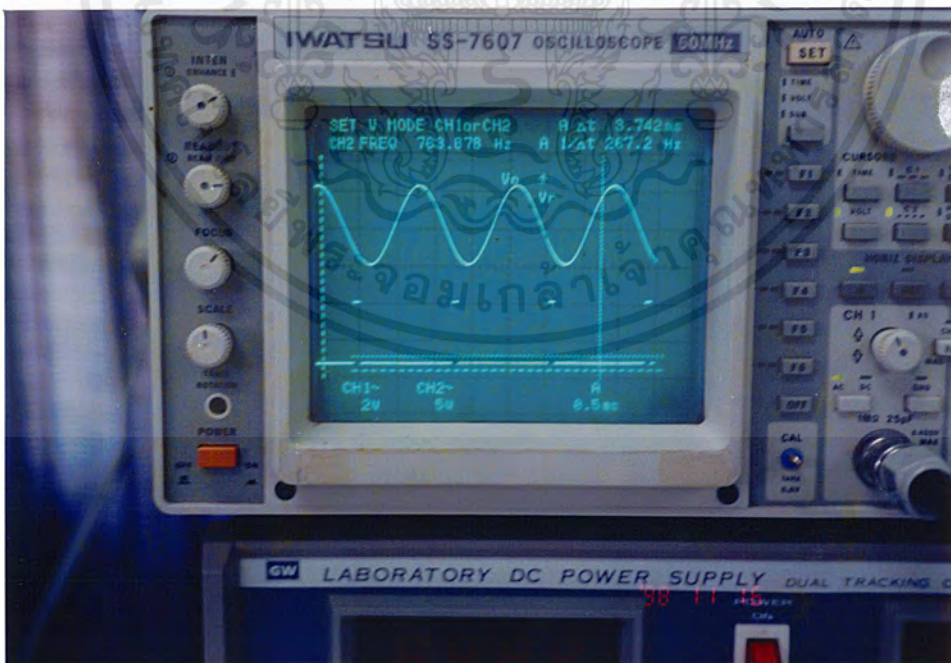


รูปคลื่นแสดงการเปรียบเทียบระหว่าง สัญญาณ SINE กับ สัญญาณทริกที่ขาเกฟสววก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

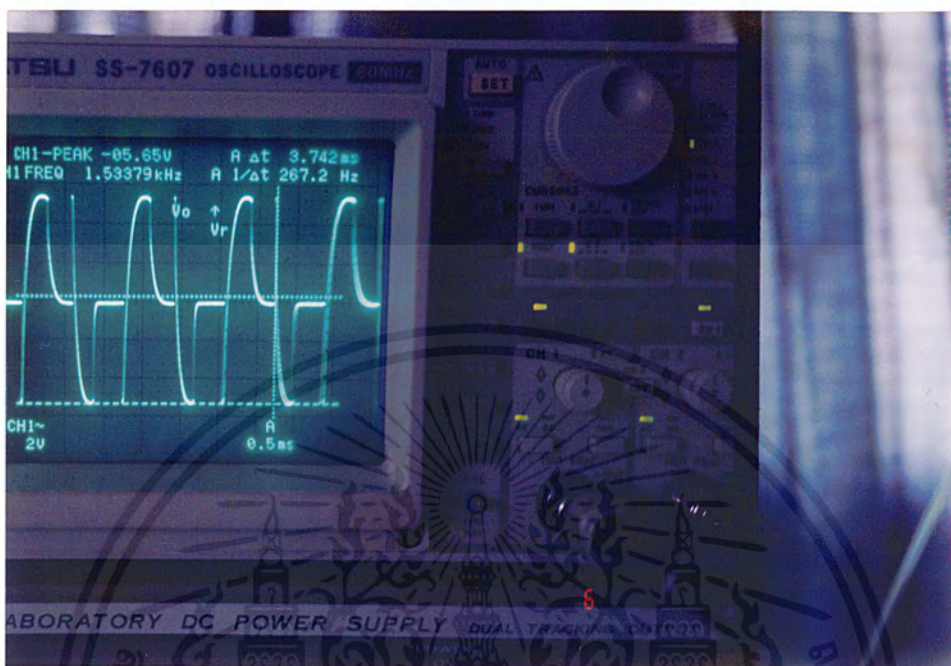


รูปคลื่นแสดงการเปรียบเทียบระหว่าง สัญญาณ SINE กับ สัญญาณทริกที่ขาเกทเฟสวค
(สามารถปรับมุมทริกได้)



รูปคลื่นแสดงการเปรียบเทียบระหว่าง สัญญาณ SINE กับ สัญญาณทริกที่ขาเกทเฟสค
(สามารถปรับมุมทริกได้)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปคลื่นแสดงลักษณะของแรงดันเอาต์พุตที่โหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองชุดคอนเวอร์เตอร์เมื่อทำการปรับVR1จะทำให้ได้แรงดันเอาต์พุตที่เกิดจากการทรานส์ฟอร์มเมอร์ต่างๆและแปลงออกมาแรงดันไฟตรงโดยการต่อคาปาซิเตอร์ที่โหลดได้

จากการออกแบบและได้ทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ระบบอินเวอร์เตอร์ที่ทำการออกแบบและใช้งานอยู่ในโครงการนี้ยังคงมีปัญหาอยู่บางประการเช่นความถี่ของแรงดันเอาต์พุตไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้นั้นยังคงมีความถี่ต่ำอยู่ดังนั้นความถี่ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับนั้น ก็คือความถี่เรโซแนนซ์ของเอาต์พุต

ในการหาความถี่เรโซแนนซ์นั้น จะต้องคำนึงถึงค่า R,LและCที่ต่ออยู่ที่โหลดในระบบด้วย โดยถ้าความถี่เรโซแนนซ์ยิ่งมีความถี่สูงจะมีผลต่อช่วงเวลาที่ใช้ในการหยุดนำกระแสเอส ซี อาร์

ดังนั้นในการออกแบบหาความถี่เรโซแนนซ์จะต้องทราบค่าช่วงความถี่เอสซีอาร์จะหยุดนำกระแส(tg) ซึ่งเอสซีอาร์แต่ละเบอร์จะมีค่าเวลาดังกล่าวเท่ากันจะต้องเลือกให้เหมาะสมโดยจะต้องออกแบบให้ช่วงเวลาในการหยุดนำกระแสของเอส ซี อาร์ จะต้องมีความมากกว่า tg ของเอส ซี อาร์ เพราะถ้าออกแบบช่วงเวลาในการหยุดนำกระแสของเอส ซี อาร์น้อยกว่าค่า tg ของเอส ซี อาร์จะมีผลทำให้เกิดการลัดวงจรได้

ในการทดลองสามารถทำให้เกิดความถี่ของแรงดันเอาต์พุตที่ความถี่หนึ่งเท่านั้นโดยเป็นความถี่ที่เหมาะสมกับอุปกรณ์ค่า L และค่า C ที่ใช้ในการทดลอง เมื่อมีการเพิ่มแรงดันไฟตรงจะมีผลทำให้ กระแสที่ไหลผ่านเอส ซี อาร์ มีเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้เป็นอันตรายตัวอุปกรณ์ เอส ซี อาร์ เนื่องจากเอส ซี อาร์ นำกระแสตลอด

ข้อเสนอแนะ

- อุปกรณ์สวิทช์ซึ่งที่ใช้ในระบบอินเวอร์เตอร์ควรจะมีค่าช่วงเวลาในการหยุดนำกระแสดีกว่านี้
- ความถี่เรโซแนนซ์ที่ได้ควรมีความถี่สูงขึ้น
- ระบบ ISOLATED ควรจะใช้ PULSE TRANSFORMER แทน OPTO- ISOLATED ที่ใช้อยู่
- ระบบ PROTECT ระบบอินเวอร์เตอร์ และ การออกแบบอินเวอร์เตอร์แบบป้องกันกระแส

(CSI)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

1. M.Rashid, “ Power Electronics Circuit Device and Application ” Second edition
Prentice – Hall International ,INC.
2. อุดมศักดิ์ ชัยยืน , POWER ELECTRONICS, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
3. อนันท์ คัมภีรานนท์, Industrial Electronics,
สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตนนทบุรี
4. มงคล ทองสงคราม , “ อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ”, พิมพ์ครั้งที่ 1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6-Pin DIP Optoisolators Darlington Output

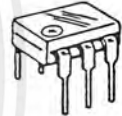
Each device consists of a gallium arsenide infrared emitting diode optically coupled to a monolithic silicon photodarlington detector.

It is designed for use in applications requiring high sensitivity at low input currents.

- Convenient Plastic Dual-In-Line Package
- High Sensitivity to Low Input Drive Current
- High Input-Output Isolation Guaranteed — 7500 Volts Peak
- UL Recognized. File Number E54915 
- VDE approved per standard 0883/6.80 (Certificate number 41853), with additional approval to IEC380/VDE0806, IEC435/VDE0805, IEC65/VDE0860, VDE0110b, covering all other standards with equal or less stringent requirements, including  IEC204/VDE0113, VDE0160, VDE0832, VDE0833, etc.
- Special lead form available (add suffix "T" to part number) which satisfies VDE0883/6.80 requirement for 8 mm minimum creepage distance between input and output solder pads.
- Various lead form options available. Consult "Optoisolator Lead Form Options" data sheet for details.

4N29
4N29A
4N30
4N31
4N32
4N32A
4N33

6-PIN DIP
OPTOISOLATORS
DARLINGTON
OUTPUT



CASE 730A-02
PLASTIC

MAXIMUM RATINGS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Rating	Symbol	Value	Unit
--------	--------	-------	------

INPUT LED

Reverse Voltage	V_R	3	Volts
Forward Current — Continuous	I_F	60	mA
LED Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	120 1.41	mW mW/°C

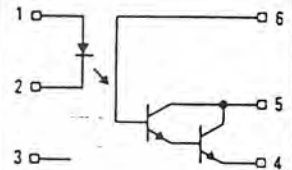
OUTPUT DETECTOR

Collector-Emitter Voltage	V_{CEO}	30	Volts
Emitter-Collector Voltage	V_{ECO}	5	Volts
Collector-Base Voltage	V_{CBO}	30	Volts
Collector Current — Continuous	I_C	150	mA
Detector Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	150 1.76	mW mW/°C

TOTAL DEVICE

Isolation Surge Voltage (1) (Peak ac Voltage, 60 Hz, 1 sec Duration)	V_{ISO}	7500	Vac
Total Device Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	250 2.94	mW mW/°C
Ambient Operating Temperature Range	T_A	-55 to +100	°C
Storage Temperature Range	T_{stg}	-55 to +150	°C
Soldering Temperature (10 seconds, 1/16" from case)	—	260	°C

SCHEMATIC



1. LED ANODE
2. LED CATHODE
3. N.C.
4. EMITTER
5. COLLECTOR
6. BASE

(1) Isolation surge voltage is an internal device dielectric breakdown rating. For this test, Pins 1 and 2 are common, and Pins 4, 5 and 6 are common.

4N29, 4N29A, 4N30, 4N31, 4N32, 4N32A, 4N33

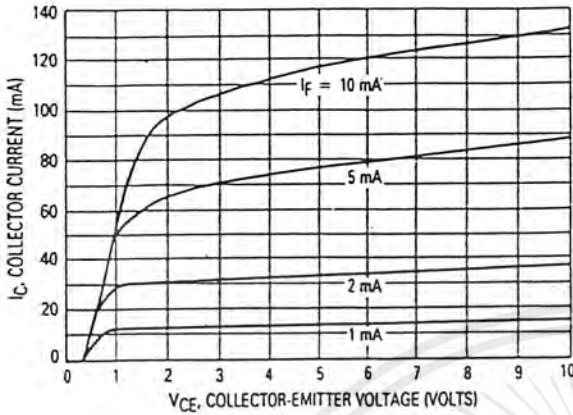


Figure 3. Collector Current versus Collector-Emitter Voltage

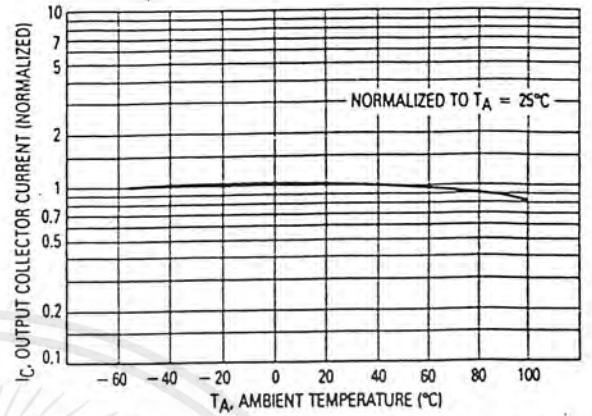


Figure 4. Output Current versus Ambient Temperature

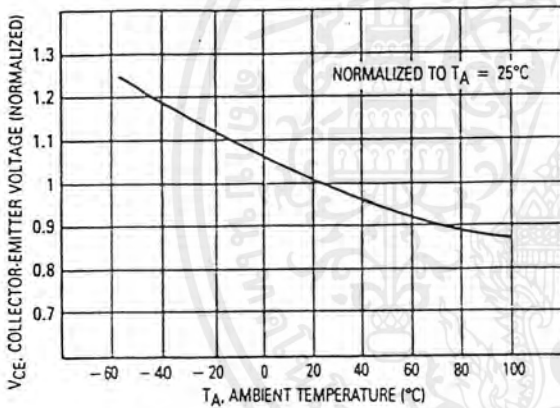


Figure 5. Collector-Emitter Voltage versus Ambient Temperature

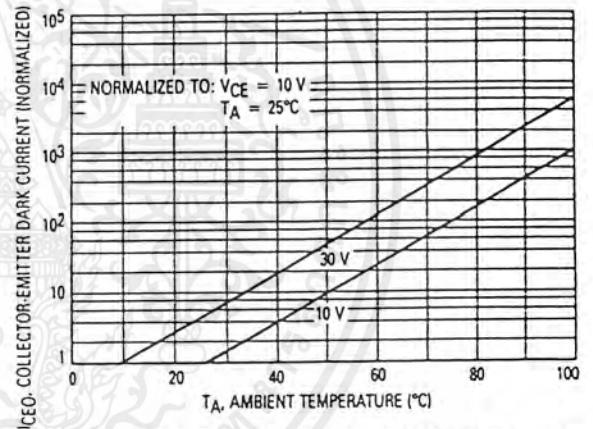


Figure 6. Collector-Emitter Dark Current versus Ambient Temperature

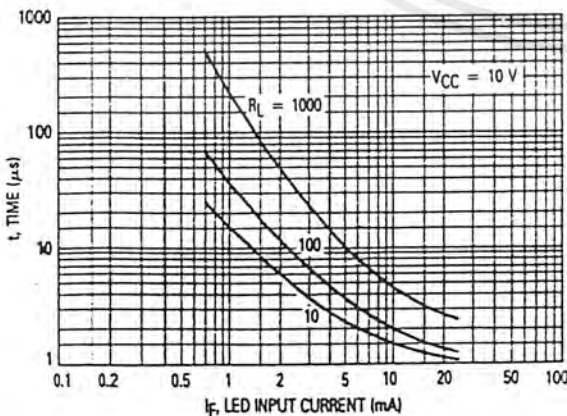


Figure 7. Turn-On Switching Times

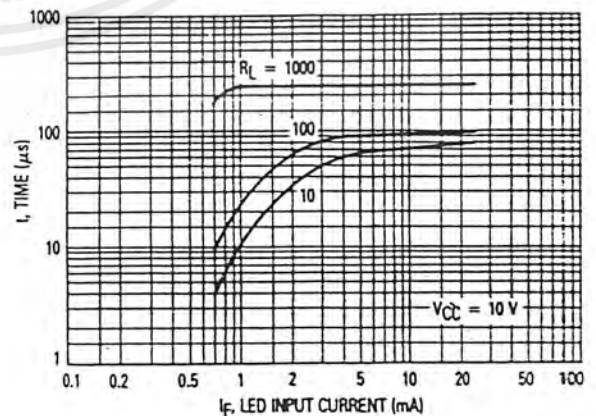


Figure 8. Turn-Off Switching Times

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4N29, 4N29A, 4N30, 4N31, 4N32, 4N32A, 4N33

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
INPUT LED					
*Reverse Leakage Current ($V_R = 3\text{ V}, R_L = 1\text{ M ohms}$)	I_R	—	0.05	100	μA
*Forward Voltage ($I_F = 50\text{ mA}$)	V_F	—	1.34	1.5	Volts
Capacitance ($V_R = 0\text{ V}, f = 1\text{ MHz}$)	C	—	18	—	pF

OUTPUT DETECTOR ($T_A = 25^\circ\text{C}$ and $I_F = 0$, unless otherwise noted)

*Collector-Emitter Dark Current ($V_{CE} = 10\text{ V}, \text{Base Open}$)	I_{CEO}	—	—	100	nA
*Collector-Base Breakdown Voltage ($I_C = 100\ \mu\text{A}, I_E = 0$)	$V_{(BR)CBO}$	30	—	—	Volts
*Collector-Emitter Breakdown Voltage ($I_C = 100\ \mu\text{A}, I_B = 0$)	$V_{(BR)CEO}$	30	—	—	Volts
*Emitter-Collector Breakdown Voltage ($I_E = 100\ \mu\text{A}, I_B = 0$)	$V_{(BR)ECO}$	5	—	—	Volts
DC Current Gain ($V_{CE} = 5\text{ V}, I_C = 500\ \mu\text{A}$)	h_{FE}	—	16K	—	—

COUPLED ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

*Collector Output Current (1) ($V_{CE} = 10\text{ V}, I_F = 10\text{ mA}, I_B = 0$)	4N32, 4N33 4N29, 4N30 4N31	I_C	50 10 5	— — —	— — —	mA
Isolation Surge Voltage (2, 3) (60 Hz ac Peak, 1 Second)	*4N29, 4N32 *4N30, 4N31, 4N33	V_{ISO}	7500 2500 1500	— — —	— — —	Volts
Isolation Resistance (2) ($V = 500\text{ V}$)		R_{ISO}	—	10^{11}	—	Ohms
*Collector-Emitter Saturation Voltage (1) ($I_C = 2\text{ mA}, I_F = 8\text{ mA}$)	4N31 4N29, 4N30, 4N32, 4N33	$V_{CE(sat)}$	— —	— —	1.2 1	Volts
Isolation Capacitance (2) ($V = 0\text{ V}, f = 1\text{ MHz}$)		C_{ISO}	—	0.2	—	pF
Turn-On Time ($I_C = 50\text{ mA}, I_F = 200\text{ mA}, V_{CC} = 10\text{ V}$)		t_{on}	—	0.6	5	μs
Turn-Off Time ($I_C = 50\text{ mA}, I_F = 200\text{ mA}, V_{CC} = 10\text{ V}$)	4N29, 30, 31 4N32, 33	t_{off}	— —	17 45	40 100	μs

*Indicates JEDEC Registered Data.

(1) Pulse Test: Pulse Width = 300 μs , Duty Cycle $\leq 2\%$.

(2) For this test, Pins 1 and 2 are common and Pins 4, 5 and 6 are common.

(3) Isolation Surge Voltage, V_{ISO} , is an internal device dielectric breakdown rating.

TYPICAL CHARACTERISTICS

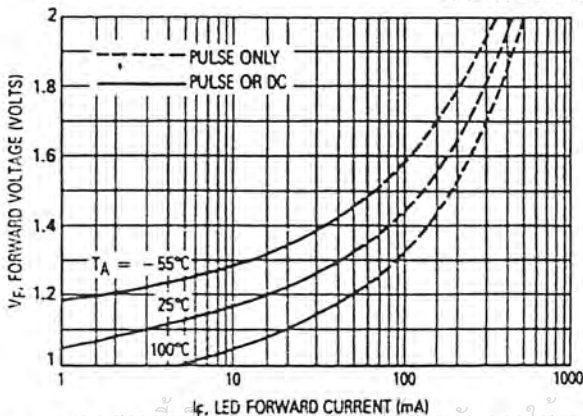


Figure 1. LED Forward Voltage versus Forward Current

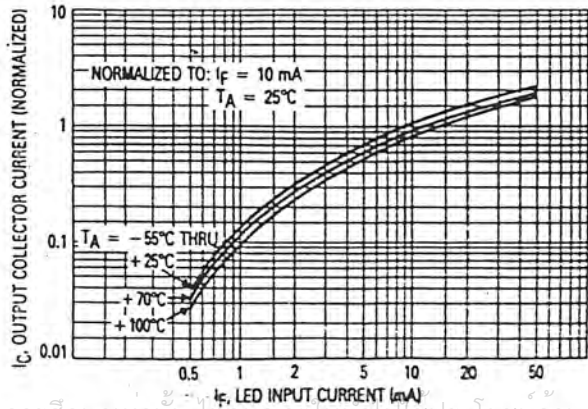


Figure 2. Output Current versus Input Current

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4N29, 4N29A, 4N30, 4N31, 4N32, 4N32A, 4N33

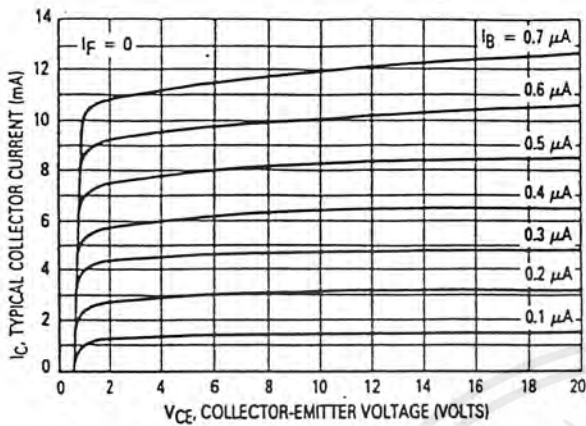


Figure 9. DC Current Gain (Detector Only)

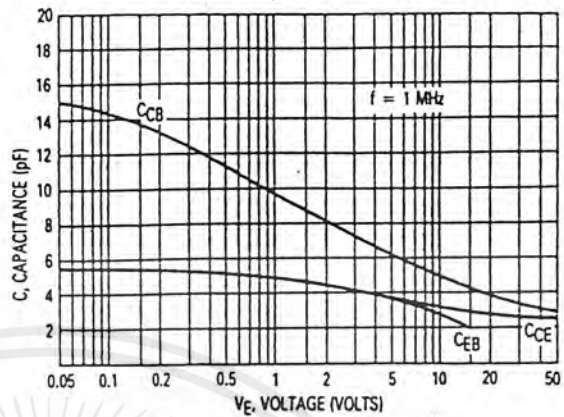


Figure 10. Detector Capacitances versus Voltage

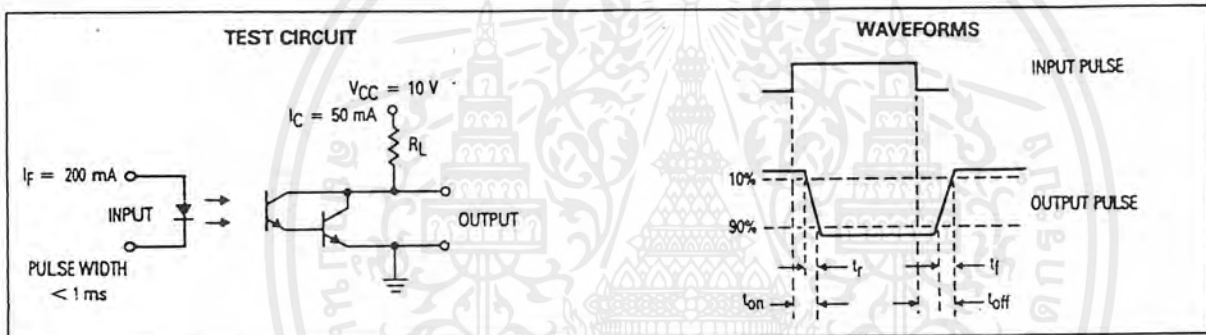
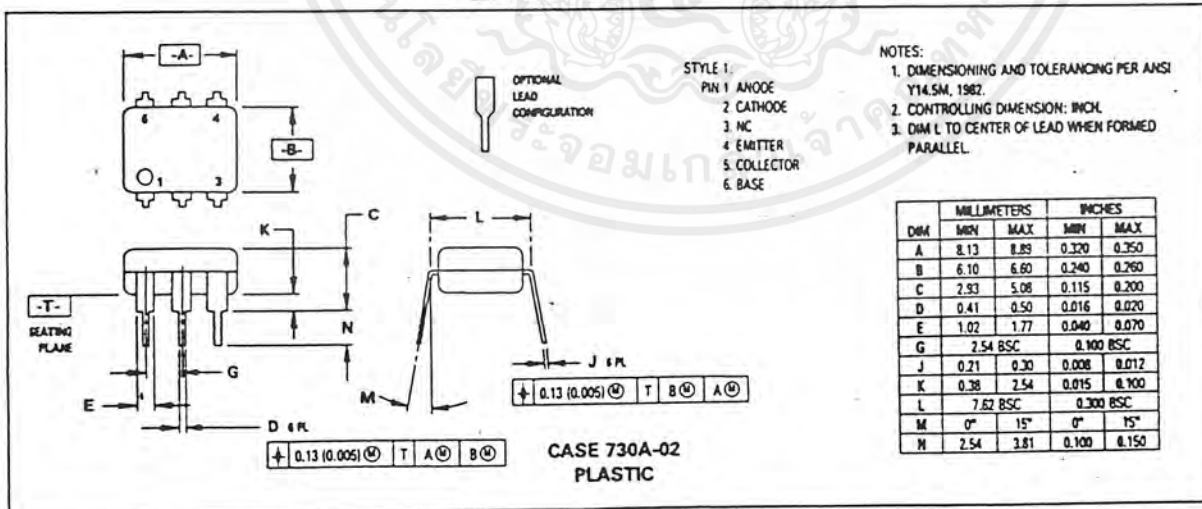
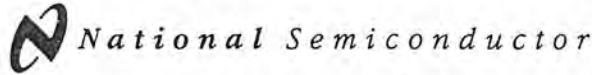


Figure 11. Switching Times

OUTLINE DIMENSIONS



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



LF351 Wide Bandwidth JFET Input Operational Amplifier

General Description

The LF351 is a low cost high speed JFET input operational amplifier with an internally trimmed input offset voltage (BI-FET IITM technology). The device requires a low supply current and yet maintains a large gain bandwidth product and a fast slew rate. In addition, well matched high voltage JFET input devices provide very low input bias and offset currents. The LF351 is pin compatible with the standard LM741 and uses the same offset voltage adjustment circuitry. This feature allows designers to immediately upgrade the overall performance of existing LM741 designs.

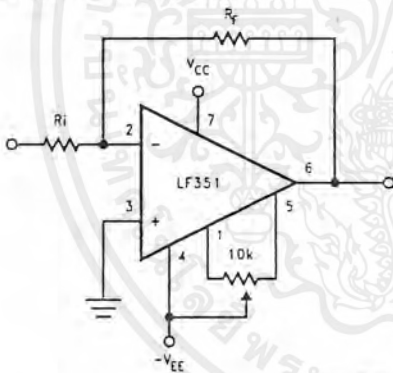
The LF351 may be used in applications such as high speed integrators, fast D/A converters, sample-and-hold circuits and many other circuits requiring low input offset voltage, low input bias current, high input impedance, high slew rate and wide bandwidth. The device has low noise and offset voltage drift, but for applications where these requirements are critical, the LF356 is recommended. If maximum supply

current is important, however, the LF351 is the better choice.

Features

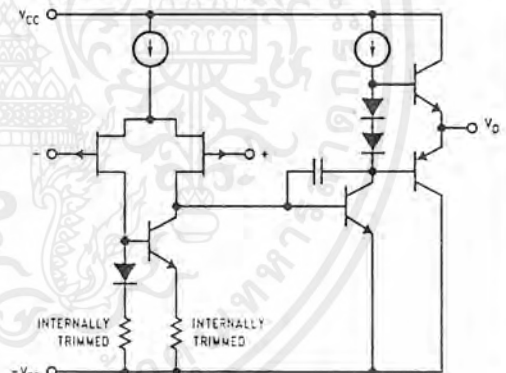
- Internally trimmed offset voltage 10 mV
- Low input bias current 50 pA
- Low input noise voltage 25 nV/√Hz
- Low input noise current 0.01 pA/√Hz
- Wide gain bandwidth 4 MHz
- High slew rate 13 V/μs
- Low supply current 1.8 mA
- High input impedance 10¹²Ω
- Low total harmonic distortion A_V = 10, R_L = 10k, V_O = 20 V_{p-p}, BW = 20 Hz–20 kHz < 0.02%
- Low 1/f noise corner 50 Hz
- Fast settling time to 0.01% 2 μs

Typical Connection



TL/H/5648-11

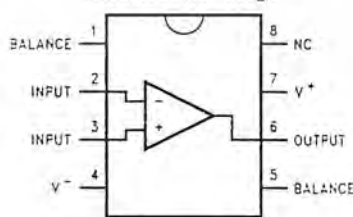
Simplified Schematic



TL/H/5648-12

Connection Diagrams

Dual-In-Line Package



TL/H/5648-13

Order Number LF351M or LF351N
See NS Package Number M08A or N08E

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Absolute Maximum Ratings

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

Supply Voltage	± 18V
Power Dissipation (Notes 1 and 6)	670 mW
Operating Temperature Range	0°C to + 70°C
T _j (MAX)	115°C
Differential Input Voltage	± 30V
Input Voltage Range (Note 2)	± 15V
Output Short Circuit Duration	Continuous
Storage Temperature Range	- 65°C to + 150°C
Lead Temp. (Soldering, 10 sec.)	
Metal Can	300°C
DIP	260°C

θ_{jA}		
N Package		120°C/W
M Package		TBD

Soldering Information		
Dual-In-Line Package		
Soldering (10 sec.)		260°C
Small Outline Package		
Vapor Phase (60 sec.)		215°C
Infrared (15 sec.)		220°C

See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" for other methods of soldering surface mount devices.

ESD rating to be determined.

DC Electrical Characteristics (Note 3)

Symbol	Parameter	Conditions	LF351			Units
			Min	Typ	Max	
V _{OS}	Input Offset Voltage	R _S = 10 k Ω , T _A = 25°C Over Temperature		5	10 13	mV mV
$\Delta V_{OS}/\Delta T$	Average TC of Input Offset Voltage	R _S = 10 k Ω		10		$\mu V/^{\circ}C$
I _{OS}	Input Offset Current	T _j = 25°C, (Notes 3, 4) T _j \leq 70°C		25	100 4	pA nA
I _B	Input Bias Current	T _j = 25°C, (Notes 3, 4) T _j \leq \pm 70°C		50	200 8	pA nA
R _{IN}	Input Resistance	T _j = 25°C		10 ¹²		Ω
A _{VOL}	Large Signal Voltage Gain	V _S = \pm 15V, T _A = 25°C V _O = \pm 10V, R _L = 2 k Ω Over Temperature	25	100		V/mV V/mV
V _O	Output Voltage Swing	V _S = \pm 15V, R _L = 10 k Ω	\pm 12	\pm 13.5		V
V _{CM}	Input Common-Mode Voltage Range	V _S = \pm 15V	\pm 11	+ 15 - 12		V V
CMRR	Common-Mode Rejection Ratio	R _S \leq 10 k Ω	70	100		dB
PSRR	Supply Voltage Rejection Ratio	(Note 5)	70	100		dB
I _S	Supply Current			1.8	3.4	mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AC Electrical Characteristics (Note 3)

Symbol	Parameter	Conditions	LF351			Units
			Min	Typ	Max	
SR	Slew Rate	$V_S = \pm 15V, T_A = 25^\circ C$		13		$V/\mu s$
GBW	Gain Bandwidth Product	$V_S = \pm 15V, T_A = 25^\circ C$		4		MHz
e_n	Equivalent Input Noise Voltage	$T_A = 25^\circ C, R_S = 100\Omega, f = 1000\text{ Hz}$		25		nV/\sqrt{Hz}
i_n	Equivalent Input Noise Current	$T_j = 25^\circ C, f = 1000\text{ Hz}$		0.01		pA/\sqrt{Hz}

Note 1: For operating at elevated temperature, the device must be derated based on the thermal resistance, θ_{JA} .

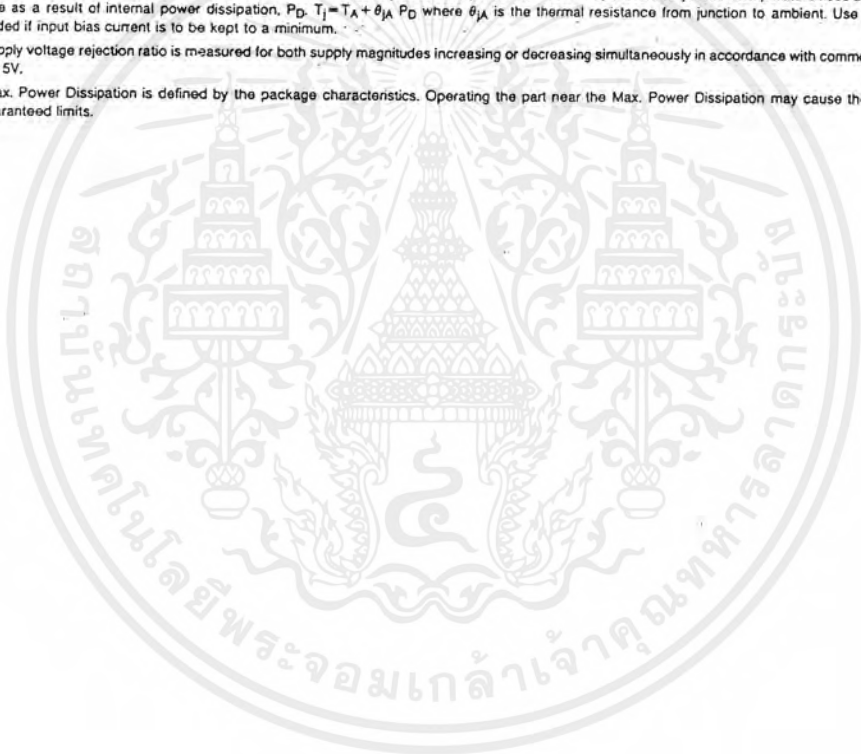
Note 2: Unless otherwise specified the absolute maximum negative input voltage is equal to the negative power supply voltage.

Note 3: These specifications apply for $V_S = \pm 15V$ and $0^\circ C \leq T_A \leq +70^\circ C$. V_{OS} , I_B and I_{OS} are measured at $V_{CM} = 0$.

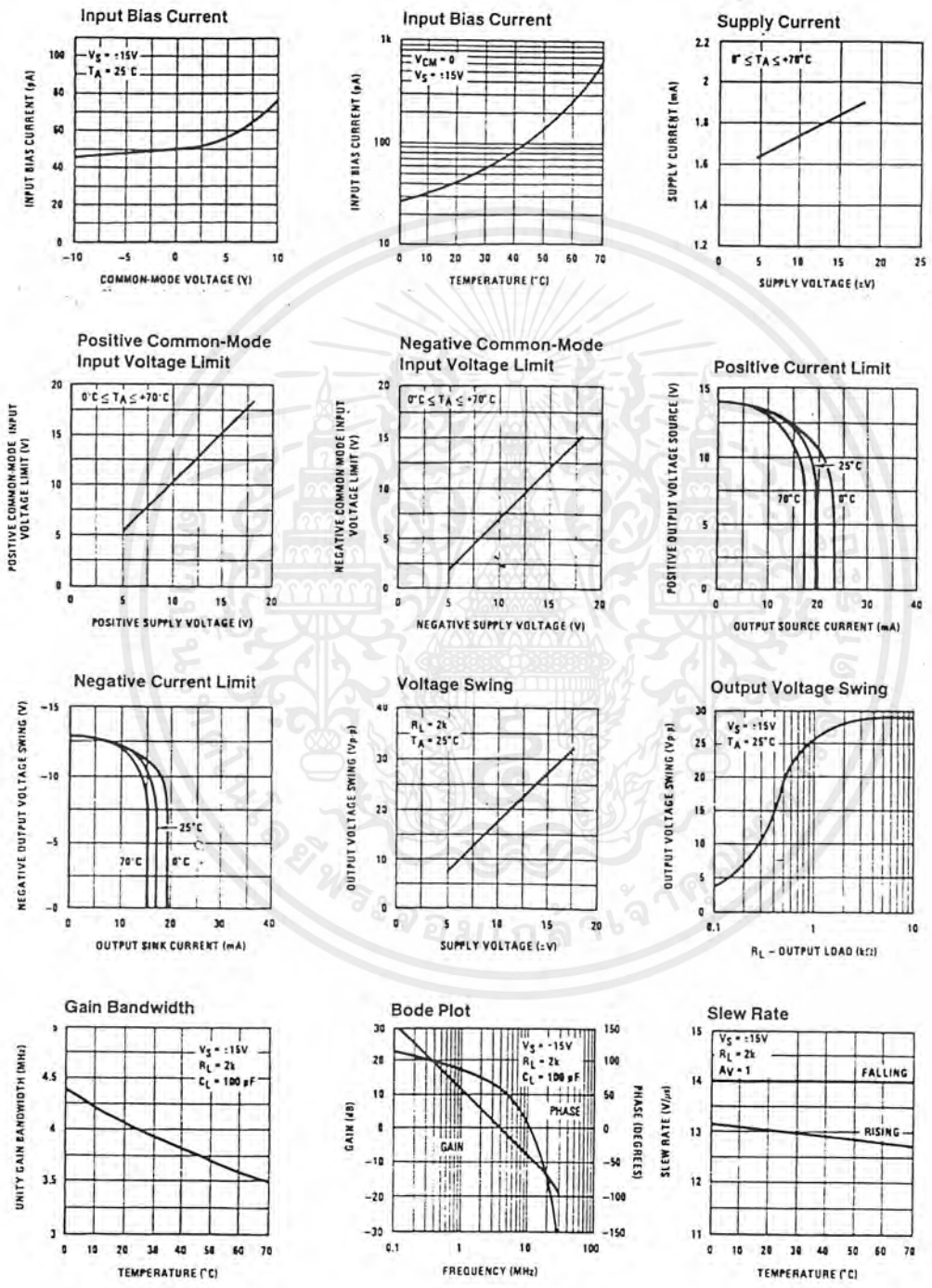
Note 4: The input bias currents are junction leakage currents which approximately double for every $10^\circ C$ increase in the junction temperature, T_j . Due to the limited production test time, the input bias currents measured are correlated to junction temperature. In normal operation the junction temperature rises above the ambient temperature as a result of internal power dissipation, P_D . $T_j = T_A + \theta_{JA} P_D$ where θ_{JA} is the thermal resistance from junction to ambient. Use of a heat sink is recommended if input bias current is to be kept to a minimum.

Note 5: Supply voltage rejection ratio is measured for both supply magnitudes increasing or decreasing simultaneously in accordance with common practice. From $\pm 15V$ to $\pm 5V$.

Note 6: Max. Power Dissipation is defined by the package characteristics. Operating the part near the Max. Power Dissipation may cause the part to operate outside guaranteed limits.

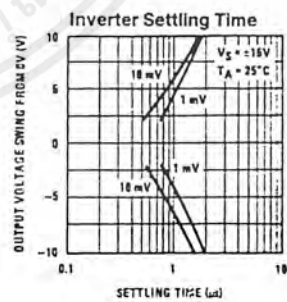
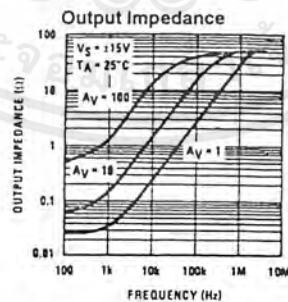
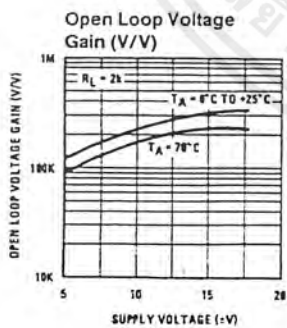
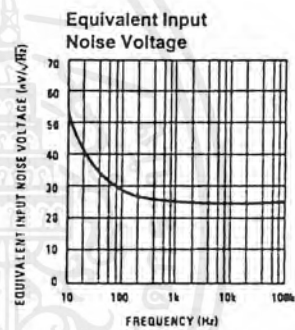
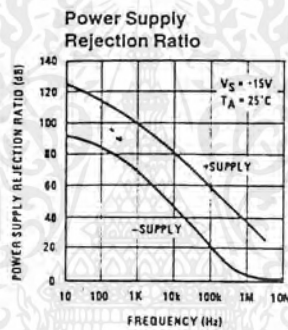
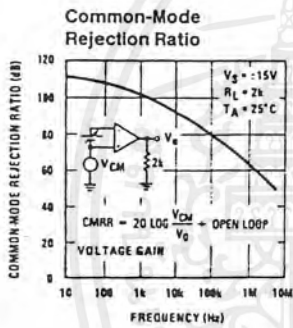
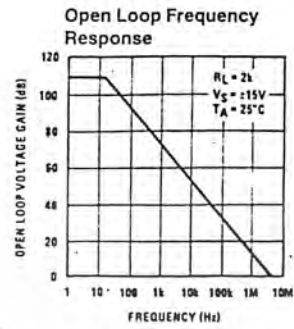
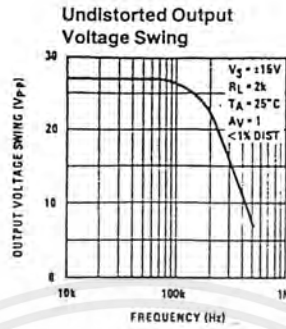
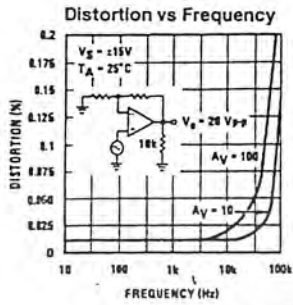


Typical Performance Characteristics



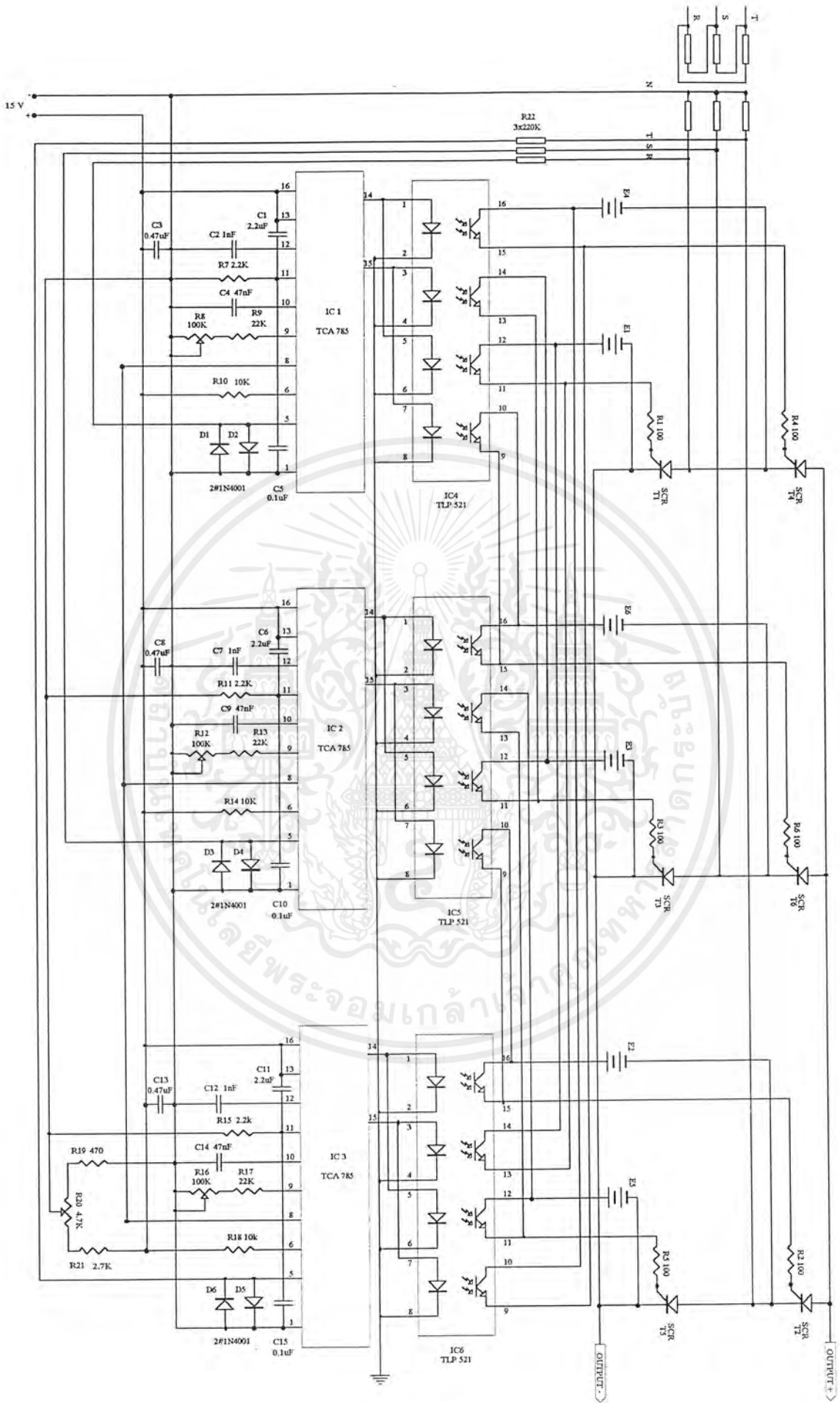
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Performance Characteristics (Continued)



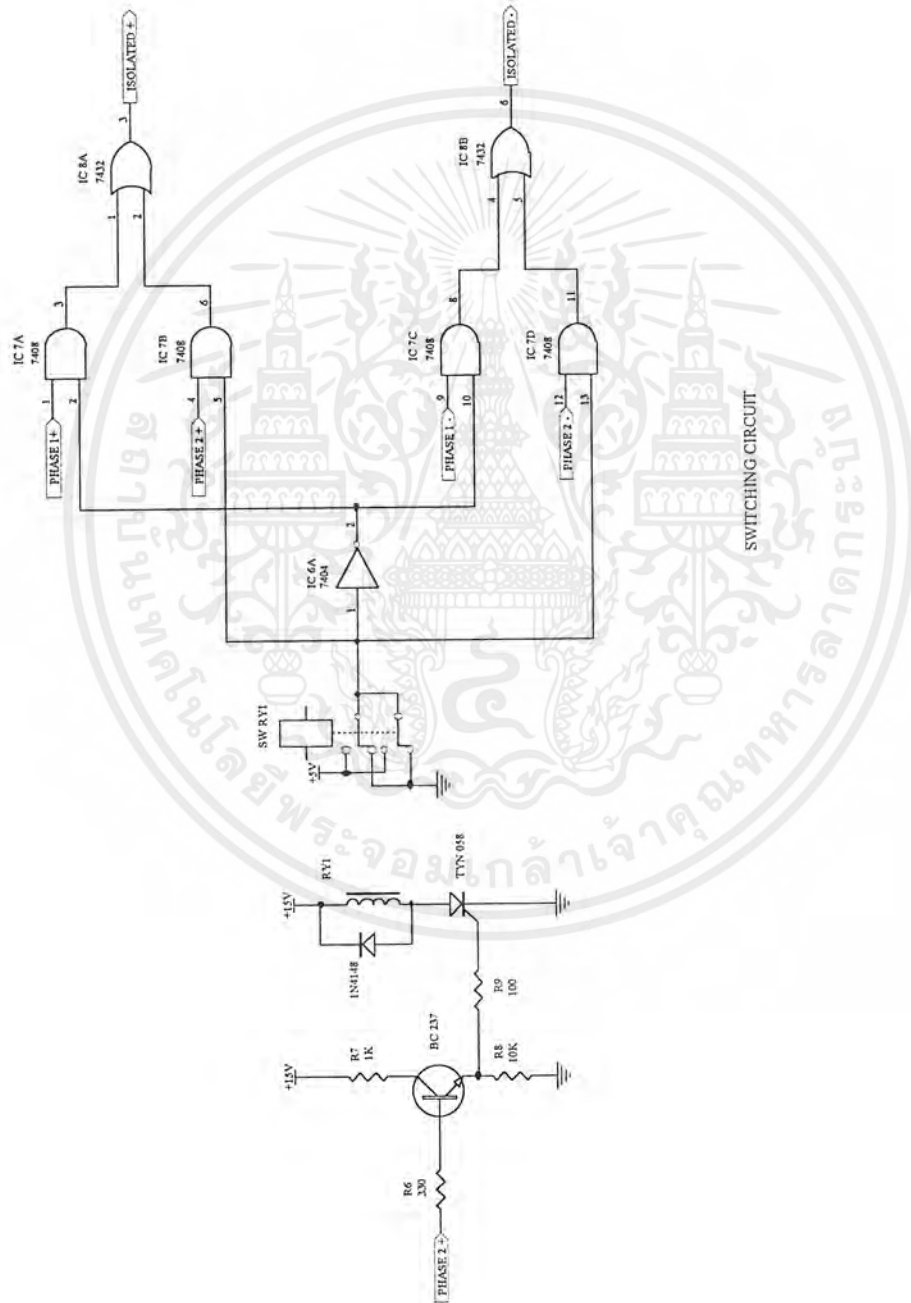
TL/H: 5648-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

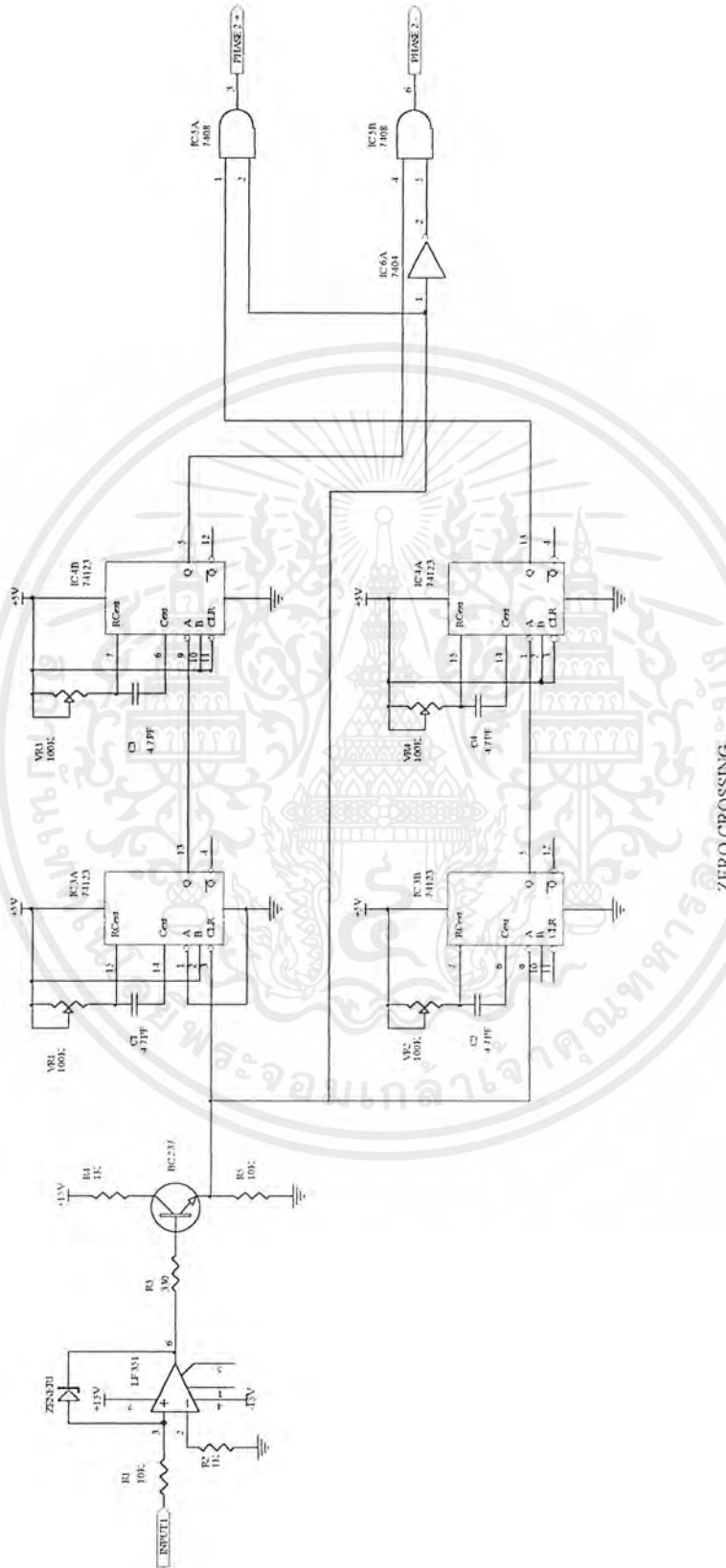


SYSTEM OF CONVERTER

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



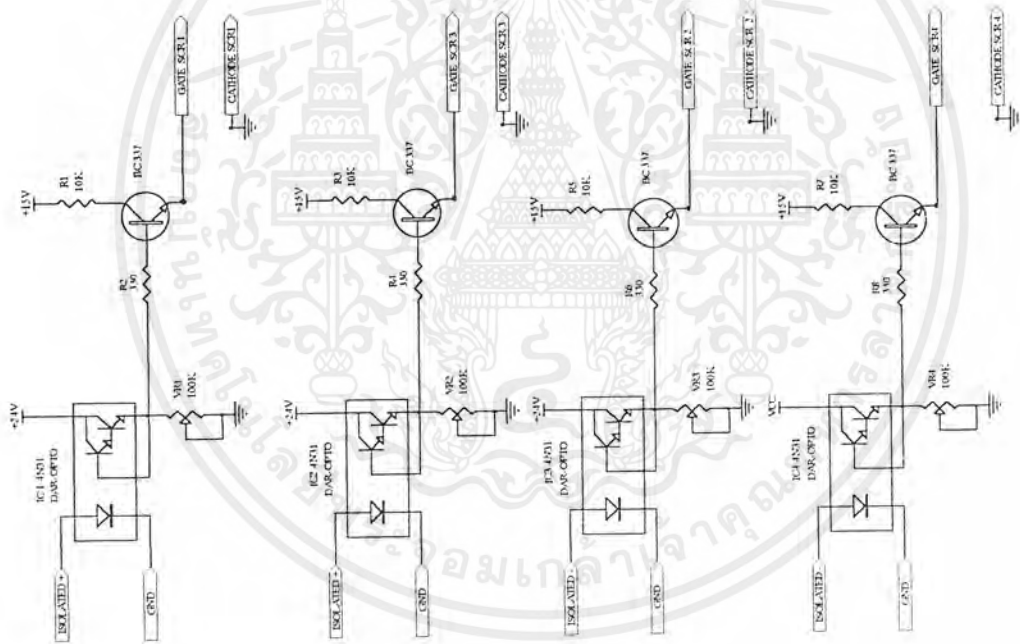
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ZERO CROSSING

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ISOLATED AND AMPLIFIER OF INVERTER



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้