หัวข้อโครงงาน	ชุดสาธิตการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง
โดย	นายพิทยา จินา
	นายชิษณุกฤต ปานเนือง
	นายกิตติศักดิ์ ดำชุม
	นายอัครเดช สวัสดิกาญจน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ปรากฤต เหลี่ยงประดิษฐ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม อนุมัติให้นับโครงงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

.....หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พศวีร์ ศรีโหมด)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ปรากฤต เหลี่ยงประดิษฐ์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. 2556

รหัสโครงงาน 55EE117

ชุดสาธิตการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

High Voltage Direct Current Transmission Demonstration Model

บทคัดย่อ (Abstract)

โครงงานเรื่องชุดสาธิตการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานของระบบการส่งกำลังไฟฟ้าด้วยแรงดันกระแสตรงชนิดโมโนโพลาร์แบบ 12 พัลส์ การแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงโดยวงจรเร็กติไฟเออร์ การแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับโดยวงจรอินเวอเตอร์ ทำการจัดสร้างชุดจุดชนวนไทริสเตอร์ด้วยระบบดิจิตอล เป็นการลดความยุ่งยากของการจุดชนวนแบบเดิมที่ใช้ระบบอนาล็อก ซึ่งมีขีดจำกัดในการสร้างการจุดชนวนหลายพัลส์ ผลการทดลองการจุดชนวนของไทริสเตอร์โดยต่อโหลดความต้านทาน 100 วัตต์ สัญญาณที่ได้ตรงตามจุดประสงค์ทุกประการ

กิตติกรรมประกาศ

รายงานโครงงานนี้ได้จัดทำขึ้นตามเงื่อนไขของระเบียบการศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ ชั้นปีที่ 3 โดยได้รับคำแนะนำเป็นอย่างดีจากอาจารย์ปรากฤต เหลี่ยงประดิษฐ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการผู้ซึ่งให้แนวคิด คำปรึกษา ข้อแนะนำต่างๆในการทำโครงงาน ตลอดจนการตรวจทานรายงานโครงการนี้และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ควบคุมห้องปฏิบัติการ และเจ้าหน้าที่สารบัญสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ช่วยอำนวยความสะดวกต่างๆให้โครงงานเรื่องชุดสาธิตการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ความดีและคุณประโยชน์อันใดที่ได้รับจากโครงงานนี้ ผู้จัดทำขออุทิศให้ บิดา มารดา และบูรพคณาจารย์ต่อไป

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ ก
กิตติกรรมประกาศ ข
สารบัญ ค
สารบัญภาพ จ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ 1
1.3 ขอบเขตของโครงงาน 2
1.4 โครงสร้างของโครงงาน 2
1.4 ประโยชน์ของโครงงาน 3

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง 4
2.2 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบสามเฟส 11
2.3 ไทริสเตอร์ 14
2.4 ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 30

บทที่ 3 การออกแบบโครงงาน

3.1 วงจรภาคกำลัง 35
3.2 วงจรภาคควบคุม 36

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง

4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 39

4.2 การทดลองการทำงานของวงจรตรวจสอบเฟส 39

4.3 การทดลองการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์เทียบกับสัญญาณไฟเข้า 40

4.4 สัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์ 42

4.5 ทดลองการทำงานของวงจรเร็กติไฟเออร์โดยใช้โหลดความต้านทาน 44

บทที่ 5 สรุปและเสนอแนะ

เอกสารอ้างอิง

ภาคผนวก

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1.1 โมโนโพลาร์แบบ 12 พัลส์ 2
ภาพที่ 2.1 อัตราส่วนการลงทุนโดยประมาณสำหรับระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง 5
ภาพที่ 2.2 การเปรียบเทียบต้นทุนของระบบไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูง
และไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงเทียบกับระยะทาง 6
ภาพที่ 2.3 ตัวอย่างของเสาไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูง (ซ้าย)
และระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (ขวา) ที่ขนาดประมาณ 1,000 MW 7
ภาพที่ 2.4 วงจรไฟฟ้ากระแสตรงพื้นฐาน 8
ภาพที่ 2.5 สายส่งชนิดโมโนโพลาร์ 9
ภาพที่ 2.6 สายส่งชนิดไบโพลาร์ 9
ภาพที่ 2.7 สายส่งชนิดโฮโมโพลาร์ 10
ภาพที่ 2.8 การต่อขดลวดแบบ Y-Y 11
ภาพที่ 2.9 การต่อขดลวดแบบ Δ-Δ 12
ภาพที่ 2.10 การต่อขดลวดแบบ Y-Δ 13
ภาพที่ 2.11 การต่อขดลวดแบบ Δ-Y 14
ภาพที่ 2.12 โครงสร้างของไทริสเตอร์ 14
ภาพที่ 2.13 คุณสมบัติของกระแสและแรงดันของไทริสเตอร์ 15
ภาพที่ 2.14 การทำงานของไทริสเตอร์ 16
ภาพที่ 2.15 เวลาการหยุดทำงานของไทริสเตอร์ 17
ภาพที่ 2.16 การจุดชนวนของไทริสเตอร์ 18
ภาพที่ 2.17 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเต็มคลื่น 19
ภาพที่ 2.18 วงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบเต็มคลื่น 19
ภาพที่ 2.19 วงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบเต็มคลื่นกระแสเอาท์พุทคงที่ 20
ภาพที่ 2.20 รูปคลื่นแรงดันเอาท์พุทและกระแสของอินพุทวงจรตัวแปลงผัน
แบบควบคุมเฟส 3 เฟสแบบเต็มคลื่น 21
ภาพที่ 2.21 การจ่ายโหลดเหนี่ยวนำขนาดใหญ่ของตัวแปลงผันแบบควบคุมเฟส 3 เฟส 22

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 2.22 แรงดันเอาท์พุทแบบสองทิศทางของตัวแปลงผัน 3 เฟส ที่แปรค่าตามมุมจุดชนวนจาก 0 องศา ถึง 180 องศา 22
ภาพที่ 2.23 มุมจุดชนวนจาก 0 องศา ถึง 180 องศา 23
ภาพที่ 2.24 ความสัมพันธ์ของมุมระหว่างแรงดันและกระแส (Displacement angle) 23
ภาพที่ 2.25 แปลงผันแบบคู่เมื่อส่งผ่านกำลัง 2 ทาง 24
ภาพที่ 2.26 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่ใช้ SCR 25
ภาพที่ 2.27 ตัวอย่างรูปคลื่นกระแสด้านเข้าและแรงดันด้านออก ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ 6 พัลส์ 27
ภาพที่ 2.28 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ 12 พัลส์ 28
ภาพที่ 2.29 รูปคลื่นกระแสด้านเข้าและแรงดันด้านออกของวงจรเรียงกระแสสามเฟส 12 พัลส์ 29
ภาพที่ 2.30 รายละเอียดการจัดขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ตระกูล 8051 31
ภาพที่ 3.1 ระบบการส่งไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์ 34
ภาพที่ 3.2 วงจรเรียงกระแส 3 เฟสที่ควบคุมเต็มบริดจ์ 35
ภาพที่ 3.3 วงจรตรวจสอบเฟส 36
ภาพที่ 3.4 วงจรประมวลผลและ Volume A/D 37
ภาพที่ 3.5 วงจรขับกระแสเกต 38
ภาพที่ 4.1 วงจรตรวจสอบเฟส 39
ภาพที่ 4.2 การตรวจสอบสัญญาณเอาท์พุทที่ออกจากวงจรตรวจสอบเฟส 40
ภาพที่ 4.3 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงานประมวลผล 41
ภาพที่ 4.4 การตรวจสอบสัญญาณเอาท์พุทที่ออกจากวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่จุด B 41
ภาพที่ 4.5 สัญญาณพัลส์ที่จุด B ของขา P2.0 และ ขา P2.1 42
ภาพที่ 4.6 สัญญาณพัลส์ที่จุด B ของขา P2.2, P2.3,P2.4และที่ขา P2.5 43
ภาพที่ 4.7 วงจรที่ใช้ทดลองโหลดความต้านทาน 44
ภาพที่ 4.8 ภาพคลื่นสัญญาณในการจุดชนวนที่มุม 30 องศา 45
ภาพที่ 4.9 ภาพคลื่นสัญญาณในการจุดชนวนที่มุม 60 องศา 45
ภาพที่ 4.10 ภาพคลื่นสัญญาณในการจุดชนวนที่มุม 90 องศา 46

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ในการศึกษาการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง จะเป็นการศึกษาทางทฤษฎีเป็นส่วนใหญ่ดังนั้นโครงงานนี้จึงจัดทำชุดสาธิตการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงเพื่อแสดงสัญญาณที่จุดต่างๆทำให้เข้าใจระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงได้ง่ายขึ้น โดยจะทำการศึกษาตั้งแต่การแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรงและทำการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสและการควบคุมกำลังของระบบการส่ง ดังนั้นจึงได้สร้างชุดสาธิตการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงขึ้นมา

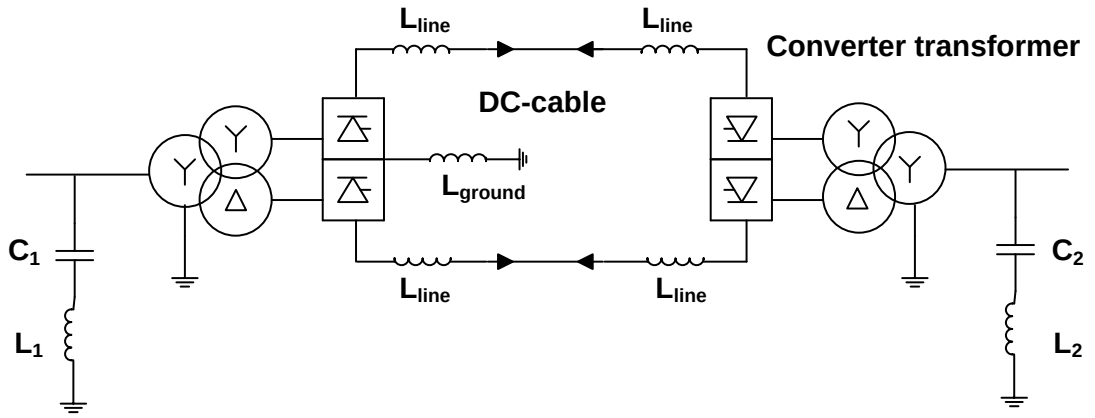
1.2 วัตถุประสงค์

1. สร้างชุดสาธิตการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง
2. สามารถนำเสนอสัญญาณต่างๆที่เกิดจากระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง
3. สามารถแสดงค่าการส่งถ่ายพลังงานในชุดสาธิตการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

1.3 ขอบเขตของโครงงาน

1. สร้างชุดสาธิตการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง โดยมีแรงดันเข้าทางด้านเร็กติไฟล์ 380 V 3 เฟส และแรงดันออกทางด้านอินเวอร์เตอร์ 380 V 3 เฟส
2. สร้างชุดสาธิตการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง โดยใช้หม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์
3. สร้างวงจรคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์
4. จัดสร้างชุดสาธิตการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงชนิดโมโนโพลาร์แบบ 12 พัลส์ ใช้ไทริสเตอร์ในการจุดชนวน 24 ตัว
5. สร้างชุดสาธิตการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง 250 V, 2 A , 500 W
6. สร้างระบบควบคุมกระแสที่สามารถส่งพลังงานไฟฟ้ากลับไปกลับมาได้โดยใช้ MCS 51
7. มีจุดวัดสัญญาณที่แสดงถึงการทำงานของชุดสาธิตการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

1.4 โครงสร้างของโครงงาน



ภาพที่ 1.1 โมโนโพลาร์แบบ 12 พัลส์

1.4 ประโยชน์ของโครงงาน

1. ได้ชุดสาธิตเพื่อศึกษาสัญญาณที่จุดต่างๆของระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง
2. ทราบถึงหลักการทำงานและออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์
3. ทราบถึงหลักการทำงานและออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในโครงงานนี้เป็นการจัดสร้างชุดสาธิตการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงจะมีวงจรหลักคือ วงจรเร็กติไฟเออร์ซึ่งทำการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสเป็นไฟฟ้ากระแสตรง และทำงานแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส โดยวงจรอินเวอร์เตอร์ ในวงจรเร็กติไฟเออร์และอินเวอร์เตอร์ จะประกอบไปด้วยส่วนกำลังและส่วนควบคุมเฟส จะมีหม้อแปลง 3 เฟส 380 V เป็นแบบ Y-Y , Y-Δ การต่อวงจรหม้อแปลงในลักษณะเช่นนี้ทำให้แรงดันด้านเข้ามีมุมต่างกัน 30 องศา ซึ่งชุด Y-Y จะต่อเข้ากับวงจร SCR จำนวน 6 ตัว และชุด Y-Δจะต่อเข้ากับไทริสเตอร์ 6 ตัวของอีกชุดหนึ่ง ซึ่งทั้ง 2 ชุดนี้จะต่ออนุกรมกัน ส่วนทางด้านควบคุมจะควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งจะรับแรงดันอ้างอิงจากวงจรตรวจสอบเฟส

2.1 การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง [1]

โดยปกติแล้วในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าไปยังสายส่งไฟฟ้า เพื่อการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปให้ผู้ใช้ต่อไป จะทำการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูง เพราะการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นเรื่องง่ายโดยการใช้หม้อแปลง ดังนั้นระบบจะไม่ซับซ้อนไม่ต้องการการดูแลรักษามากมายนอกจากนี้ถ้าพูดถึงในเรื่องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับก็มีข้อดีเหนือเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงมากมาย ดังนั้นระบบการส่งจ่ายกำลังด้วยไฟฟ้ากระแสสลับจึงเป็นสิ่งที่นิยมมาก แต่อย่างไรก็ตามการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าผ่านไฟฟ้ากระแสสลับก็มีข้อด้อยหลายประการดังนี้

- เกิดค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุของสายโอเวอร์เฮดและสายเคเบิลที่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อสายมีความยาวมากขึ้น ทำให้เกิดข้อจำกัดในเรื่องของระยะการส่งกำลังไฟฟ้า
- ไม่สามารถต่อระบบไฟฟ้ากระแสสลับสองระบบที่มีความถี่ต่างกันเข้าด้วยกันได้ และถึงแม้ว่าระบบไฟฟ้ากระแสสลับสองระบบจะมีความถี่เท่ากัน ก็อาจจะไม่สามารถเชื่อมต่อระบบเข้าด้วยกันโดยตรงได้ เพราะระบบอาจจะขาดเสถียรภาพ หรือเกิดกระแสลัดวงจรค่าสูง ดังนั้นวิศวกรจึงได้มีความพยายามที่จะส่งจ่ายกำลังโดยการใช้ไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงเพื่อแก้ไขปัญหาข้างต้นดังกล่าว

2.1.1 การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงแรงดันสูง

การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าผ่านแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่นำมาแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในกรณีที่ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ

2.1.2 ข้อดีของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงแรงดันสูง

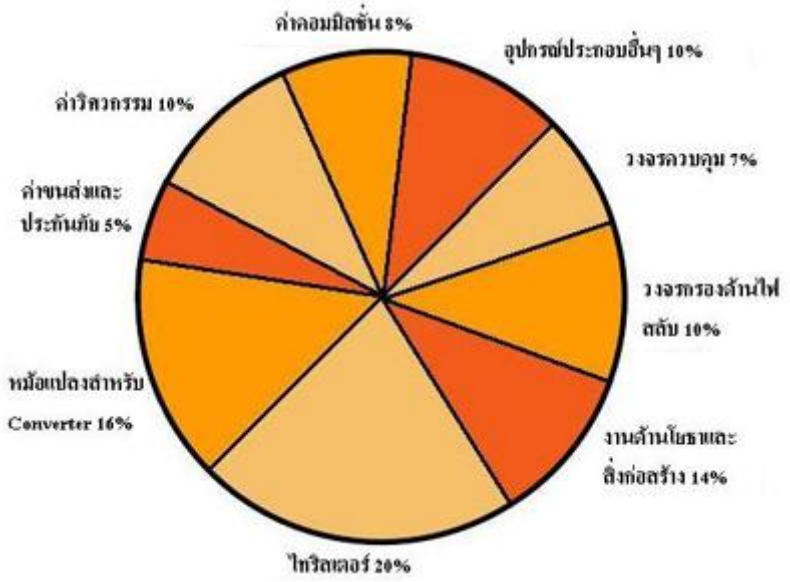
- การส่งกำลังไฟฟ้าด้วยไฟฟ้ากระแสตรงทำให้สามารถเชื่อมระบบไฟฟ้ากระแสสลับต่างระบบที่มีความถี่ต่างกันได้อย่างสะดวก โดยไม่ต้องทำการซิงโครไนซ์

- ไม่เกิดปัญหาค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุของสายโอเวอร์เฮดและสายเคเบิล ทำให้ไม่มีข้อจำกัดเรื่องกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ส่งจ่ายได้หรือความยาวของสายเคเบิล และนอกจากนั้นยังได้ใช้ประโยชน์จากขนาดพื้นที่หน้าตัดของสายเคเบิลอย่างเต็มที่เนื่องจากไม่เกิดปรากฏการบนผิวของตัวนำ ดังเช่นที่ระบบไฟฟ้ากระแสสลับมี

- สามารถควบคุมการไหลของพลังงานไฟฟ้าได้อย่างสะดวก และสามารถออกแบบให้ควบคุมด้วยระบบดิจิตอลได้ ทำให้สามารถควบคุมได้อย่างรวดเร็วแม่นยำ

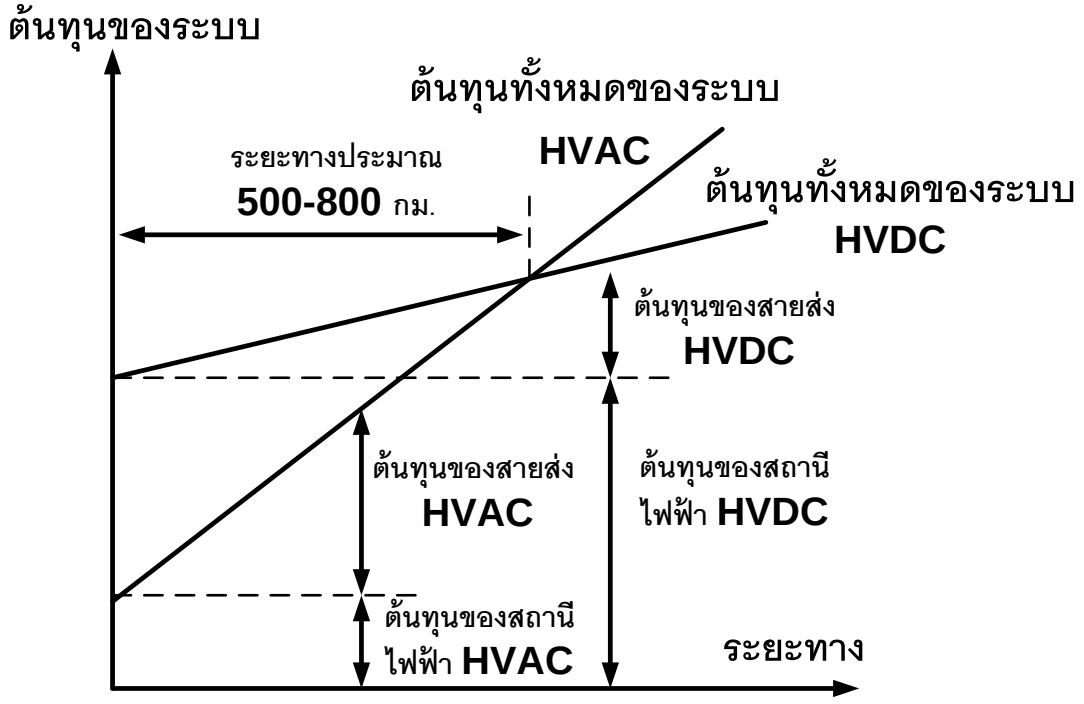
- เนื่องจากการควบคุมของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่สามารถทำได้อย่างรวดเร็ว จึงสามารถนำข้อดีนี้มาใช้เพื่อลดหรือหน่วงการแกว่ง ของกำลังไฟฟ้าในกริดไฟฟ้ากระแสสลับได้ เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของระบบ

*ต้นทุนของระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง อัตราส่วนการลงทุนเกี่ยวกับระบบโดยประมาณสำหรับระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงจะเป็นดังนี้



ภาพที่ 2.1 อัตราส่วนการลงทุนโดยประมาณสำหรับระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

จะเห็นว่าต้นทุนของระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงนั้นขึ้นอยู่กับหลาย ๆ องค์ประกอบ ซึ่งถ้าหากเรานำเอาการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงไปเปรียบเทียบกับการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงข้อมูลที่ได้จากการเปรียบเทียบจะเป็นประโยชน์เพื่อช่วยในการตัดสินใจเลือกระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้มีการศึกษาในเรื่องต้นทุนของระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง เมื่อเทียบกับระบบไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงซึ่งก็ได้ผลสรุปว่าในการส่งกำลังระยะใกล้ ๆ ระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงจะมีต้นทุนที่สูงกว่าอันเนื่องมาจากสถานีกำลังของระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงมีราคาที่สูงกว่าระบบไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงเพราะระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงต้องมีการแปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรง และ จากไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งก็หมายความว่าต้องมีการลงทุนไปกับระบบแปลงผันกำลังไฟฟ้าในส่วนนี้ด้วยนั่นเอง จึงทำให้ต้นทุนในส่วนของสถานีกำลังระบบไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูง จะมีราคาที่ต่ำกว่าระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง แต่อย่างไรก็ตามจากผลของการศึกษากลับพบว่าเมื่อระยะทางที่ต้องส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ต้นทุนของระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงกลับมีค่าน้อยกว่าการส่งจ่ายกำลังในระบบไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูง ดังภาพที่ 2.1

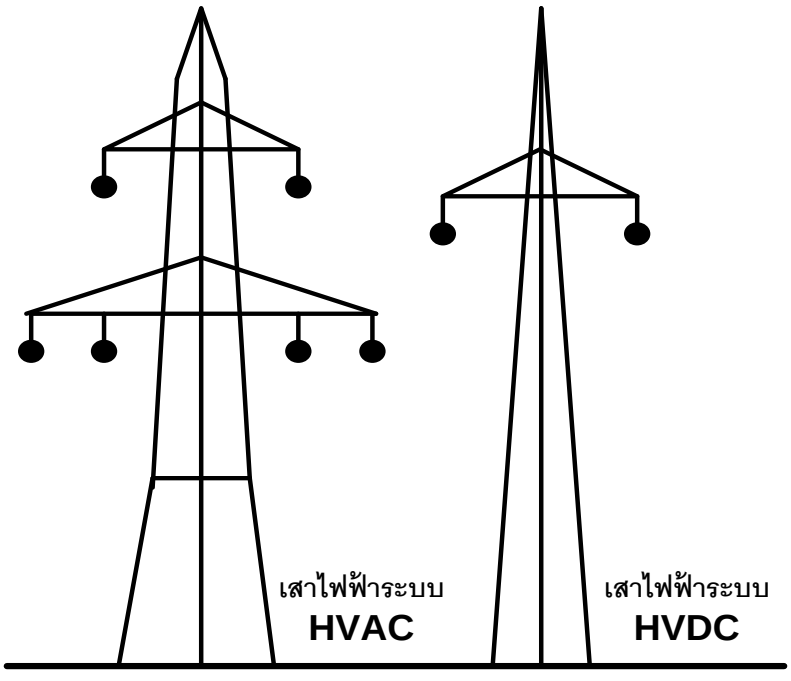


ภาพที่ 2.2 การเปรียบเทียบต้นทุนของระบบไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงและไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงเทียบกับระยะทาง

จากภาพจะเห็นว่าระยะทางในการส่งจ่ายที่ระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงเริ่มที่จะถูกกว่าระบบไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูง จะอยู่ที่ระยะประมาณ 500–800 กม. ที่เป็นเช่นนี้เพราะต้นทุนของสายเคเบิลของระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงนั้นมีค่าต่ำกว่าระบบไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงและรวมไปถึงการสูญเสียในระบบไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงที่มีค่าสูงกว่าระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงนั่นเอง

2.1.3 การพิจารณาในด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงถือได้ว่าเป็นระบบที่มีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมในแง่ของการประหยัดพลังงาน เนื่องจากมันมีประสิทธิภาพของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามากกว่าระบบไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงนั่นเองและถ้าหากพูดถึงในเรื่องของพื้นที่ที่ต้องใช้ในการติดตั้งระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (เสาไฟฟ้า) ก็ยังเป็นข้อได้เปรียบระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงอีกด้วย เรื่องจากมันต้องการพื้นที่ที่น้อยกว่าดังภาพที่ 2.3 แสดงตัวอย่างโครงสร้างของเสาไฟฟ้าสำหรับระบบไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูง (ซ้าย) และระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (ขวา) ที่ขนาดกำลังประมาณ 1,000 MW



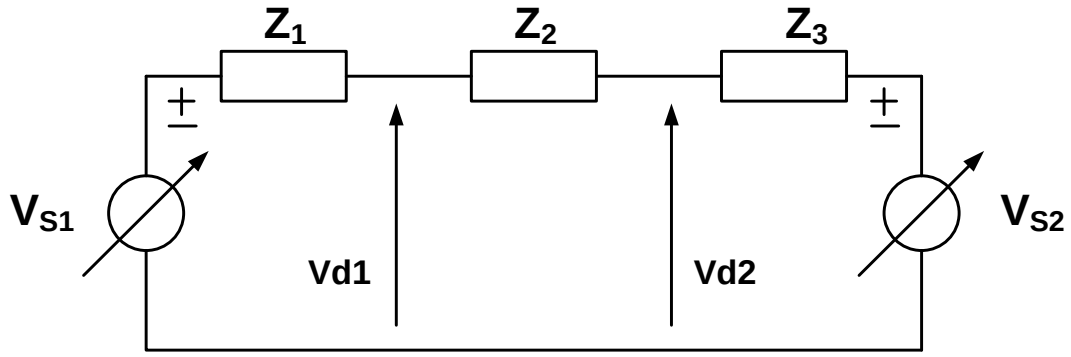
ภาพที่ 2.3 ตัวอย่างของเสาไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูง (ซ้าย) และระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (ขวา) ที่ขนาดประมาณ 1,000 MW

นอกจากนี้หากพิจารณาในแง่ของประเด็นสิ่งแวดล้อมอื่นๆ ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงก็ยังมีข้อดีเหนือระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงดังนี้

- เสียงรบกวน
- ความเข้ากันได้ด้านแม่เหล็กไฟฟ้า
- สามารถใช้พื้นดินหรือทะเลเป็นส่วนส่งกำลังกลับในระบบโมโนโพลาร์ได้

2.1.4 หลักการทำงานของไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

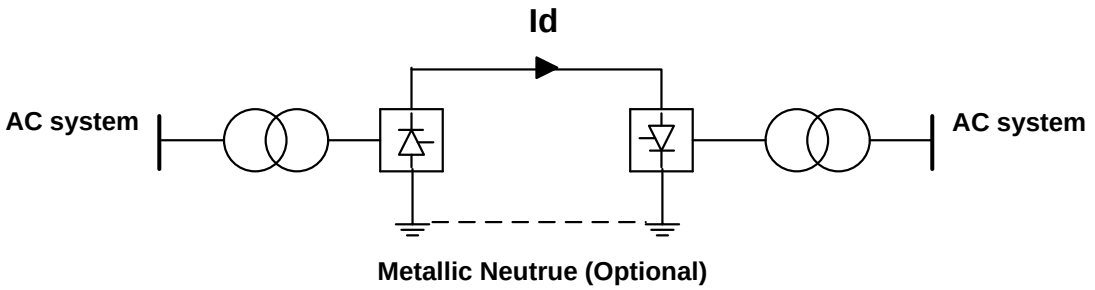
วงจรไฟฟ้ากระแสตรงพื้นฐาน การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงสามารถอธิบายหลักการเบื้องต้นได้ด้วยวงจรไฟฟ้ากระแสตรงพื้นฐานดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 วงจรไฟฟ้ากระแสตรงพื้นฐาน

จากรูปเราสามารถควบคุมการไหลของกระแส และการไหลของพลังงานไฟฟ้าโดยการควบคุมขนาดความแตกต่างของแรงดัน Vd1 กับ Vd2 และถ้าหากเราควบคุมทิศทางของกระแสให้คงที่ ดังนั้นการไหลของพลังงานจะขึ้นอยู่กับขั้วของแรงดัน Vd1 และ Vd2 นั่นเอง ประเภทของการส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

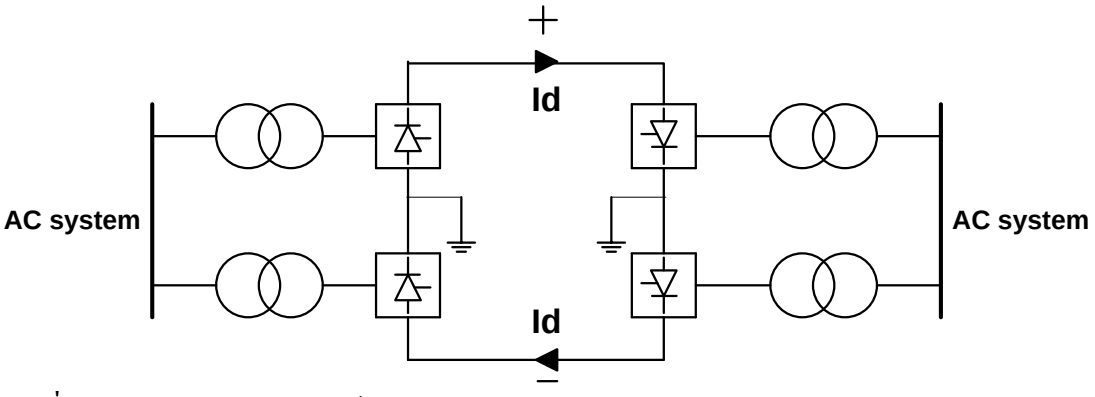
1. สายส่งชนิดโมโนโพลาร์



ภาพที่ 2.5 สายส่งชนิดโมโนโพลาร์

จากภาพข้างบนนี้เป็นภาพโครงสร้างพื้นฐานของสายส่งชนิดโมโนโพลาร์โดยสายส่งประเภทนี้ใช้ขดลวด 1 ชุดโดยปกติมีเฉพาะขั้วลบใช้พื้นดินหรือพื้นนำเป็นชุดส่งกำลังกลับซึ่ง โมโนโพลาร์นี้เป็นพื้นฐานในการพัฒนาเป็นระบบไบโพลาร์ต่อไป แทนที่จะใช้ดินเป็นชุดส่งกำลังกลับแบบโลหะ จะถูกนำมาใช้เป็นชุกส่งกลับแทนในกรณีที่ค่าความต้านทานดินมีค่าสูงเกินไปหรือกรณีที่ต่อใต้ดินหรือใต้น้ำแล้วมีสิ่งรบกวนที่อาจจะเกิดขึ้นได้

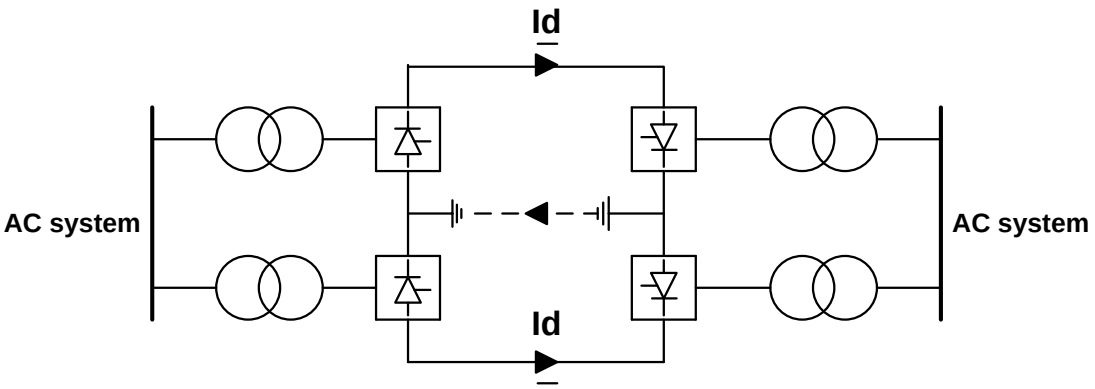
2. สายส่งชนิดไบโพลาร์



ภาพที่ 2.6 สายส่งชนิดไบโพลาร์

จากรูปเป็นโครงสร้างของไบโพลาร์โดยระบบนี้มีขดลวด 2 ชุด ชุดหนึ่งเป็นบวกอีกชุดหนึ่งเป็นลบ แต่ละขั้วมีคอนเวอร์เตอร์ซึ่งมีอัตราแรงดันที่เท่ากันเชื่อมต่อแบบอนุกรมบนฝั่งของด้านกระแสตรงจุดต่อระหว่างคอนเวอร์เตอร์ทั้งสองเป็นกราวด์โดยปกติแล้วกระแสบน 2 ขั้วนี้จะเท่ากันและไม่มีกระแสกราวด์โดยที่ทั้ง 2 ขั้วนั้นสามารถทำงานได้อิสระต่อกัน ถ้าขั้วใดขั้วหนึ่งเกิดการแยกกัน อันเนื่องมาจากความผิดปกติบนสายส่งขึ้น ในสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงชนิดไบโพลาร์ เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบหรือผลข้างเคียงเหมือนกับสายส่งระบบไฟฟ้ากระแสสลับแบบวงจรคู่ ในสภาวะการทำงานปกติมันอาจจะเกิดฮาร์โมนิกส์ น้อยกว่าระบบโมโนโพลาร์การควบคุมเพื่อเปลี่ยนทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าทำได้โดยการเปลี่ยนขั้วของทั้ง 2ขั้ว ในกรณีกระแสที่กราวด์ไม่ดีเท่าที่ควรหรือกราวด์อิเล็คโตรดไม่ทำงานอันเนื่องมาจากความต้านทานดินสูงๆ ขดลวดที่ 3 จะถูกใช้เสมือนโลหะทั่วไปมีเพื่อเป็นชุดส่งกำลังกลับเมื่อขั้วใดขั้วหนึ่งเกิดความต้านทานขึ้นระหว่างการทำงานของสายส่งไบโพลาร์

3. สายส่งชนิดโฮโมโพลาร์



ภาพที่ 2.7 สายส่งชนิดโฮโมโพลาร์

สายส่งชนิดโฮโมโพลาร์มีชุดของตัวเหนี่ยวนำตั้งแต่ 2 ชุดขึ้นไป ซึ่งทุกชุดมีขั้วเดียวกันโดยปกติจะเป็นขั้วลบเพราะมันเกิดอัตราส่วนอินเตอร์เฟอเรนซ์ ซึ่งขึ้นอยู่กับโคโรนาร์ด้วยชุดส่งกำลังกลับของระบบจะต่อลงพื้นดินเพราะเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นที่ขดลวดเหนี่ยวนำใดแล้วคอนเวอร์เตอร์ทั้งหมดจะสามารถจ่ายเข้าขดลวดเหนี่ยวนำที่เหลืออยู่ ซึ่งสามารถทำให้รับกำลังไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นมากกว่าปกติ ในทางตรงกันข้ามการต่อแบบไบโพลาร์ ซึ่งต่อคอนเวอร์เตอร์เข้ากับ 1 ขั้วของสายส่งนั้นโดยมากมักไม่เหมาะสม โครงสร้างแบบโฮโมโพลาร์จะมีข้อดีมากกว่าซึ่งค่ากระแสที่กราวด์ยังพอรับได้ กระแสที่กราวด์จะมีผลข้างเคียงกับสายที่อยู่ในท่อที่บรรจุแก๊สหรือน้ำมัน

2.2 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบสามเฟส [3]

- การส่งกำลังไฟฟ้าแบบสามเฟส ทำได้โดยนำหม้อแปลงแบบเฟสเดียวจำนวน 3 เครื่อง มาต่อกันเป็นแบบใดแบบหนึ่ง คือ Y-Y , Δ-Δ , Y-Δ , Δ-Y

- การต่อขดลวดลักษณะนี้สามารถสร้างขึ้นมาในหม้อแปลงเครื่องเดียวกันก็ได้ นั่นคือเป็นหม้อแปลงแบบสามเฟสเครื่องเดียวเลย

- ทำให้ราคาถูกกว่า

- ใช้เนื้อที่ติดตั้งน้อยลง

- น้ำหนักไม่มาก

- หม้อแปลงสามเฟส หากมีความเสียหายเกิดขึ้นจะต้องเปลี่ยนหม้อแปลงใหม่ทั้งเครื่อง แต่ถ้าเป็นการนำแบบเฟสเดียวมาต่อกันถ้าเครื่องใดเสียก็จะเปลี่ยนเพียงเครื่องเดียวเท่านั้น

2.2.1 การต่อขดลวดแบบ Y-Y

- ทำให้การแปลงแรงดันสมนัยกันเฟสต่อเฟส นั่นคือแรงดันและกระแสด้านทุติยภูมิจะมีเฟสตรงกันกับแรงดันและกระแสด้านปฐมภูมิ

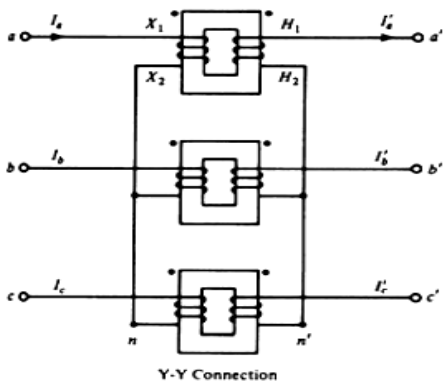
- ข้อดีของการต่อขดลวดหม้อแปลงแบบนี้คือ

- มีจุดนิวทรัลไว้สำหรับการต่อลงดินทั้งด้านแรงสูงและด้านแรงต่ำ

- ฉนวนของขดลวดทนต่อแรงดันระหว่างสายกับนิวทรัลเท่านั้น

- กระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็กมีฮาร์โมนิกส์ที่ 3 ปนอยู่

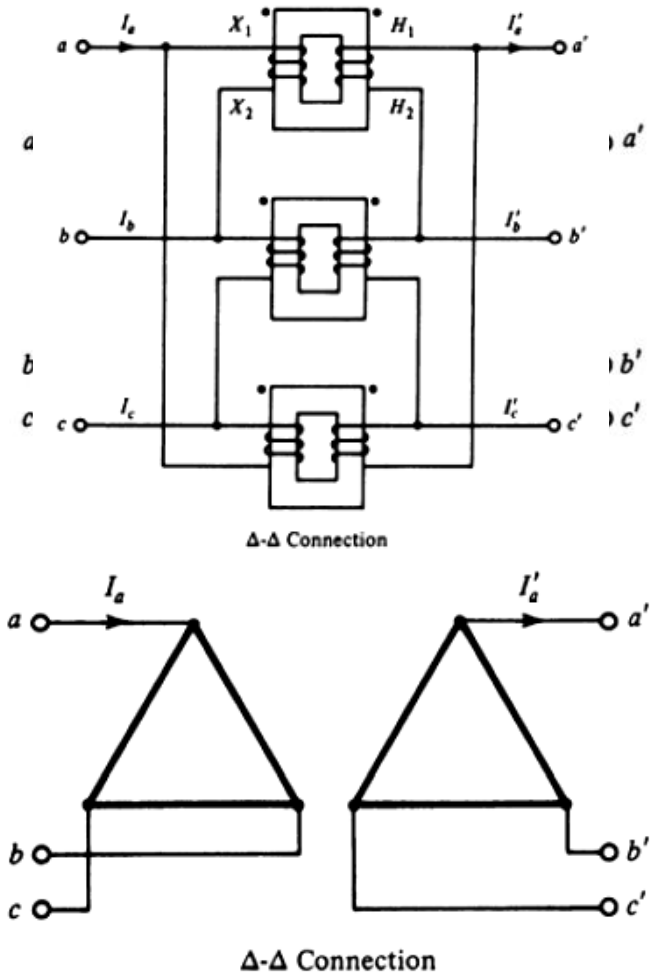
- กระแสฮาร์โมนิกส์แต่ละเฟสจะตรงกัน ทำให้รวมกันไม่เป็นศูนย์มีกระแสฮาร์โมนิกส์ไหลในนิวทรัล การต่อขดลวดหม้อแปลงเป็นแบบ Y – Y นี้ทำให้เกิดฮาร์โมนิกส์ขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังได้



ภาพที่ 2.8 การต่อขดลวดแบบ Y-Y

2.2.2 การต่อขดลวดแบบ Δ-Δ

- การต่อขดลวดของหม้อแปลงแบบนี้ จะทำให้ไม่มีนิวทรัล
- แต่ละขดลวดต้องสามารถทนต่อแรงดันระหว่างสายกับสาย
- มีกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ 3 เกิดขึ้น ซึ่งมีเฟส ตรงกัน และไหลวนอยู่ภายใน Δ ไม่ได้ไหลเข้าไปในระบบไฟฟ้ากำลัง



ภาพที่ 2.9 การต่อขดลวดแบบ Δ-Δ

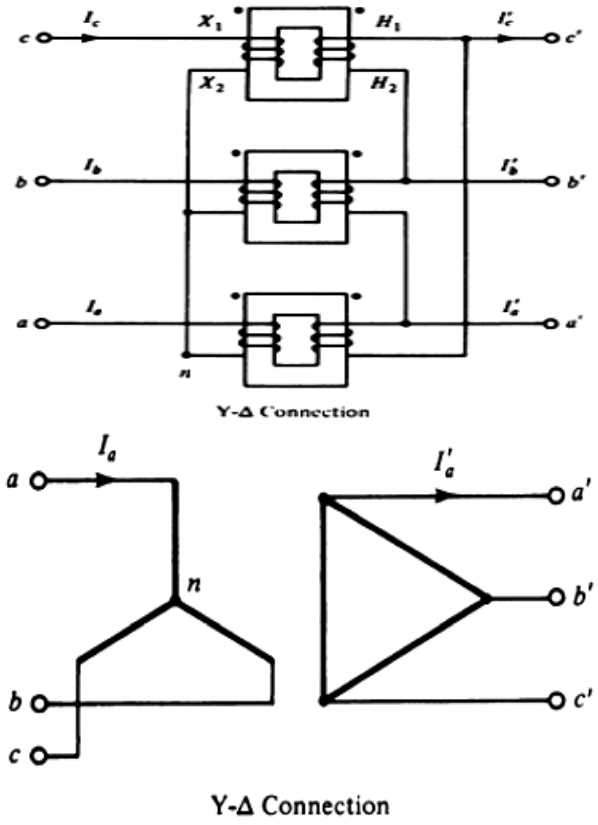
2.2.3 การต่อขดลวดแบบ Y-Δและ Δ-Y

- การแปลงแรงดันจากด้านปฐมภูมิไปยังทุติยภูมิจะควบคู่กันระหว่างขดลวดที่มีทิศทางขนานกัน

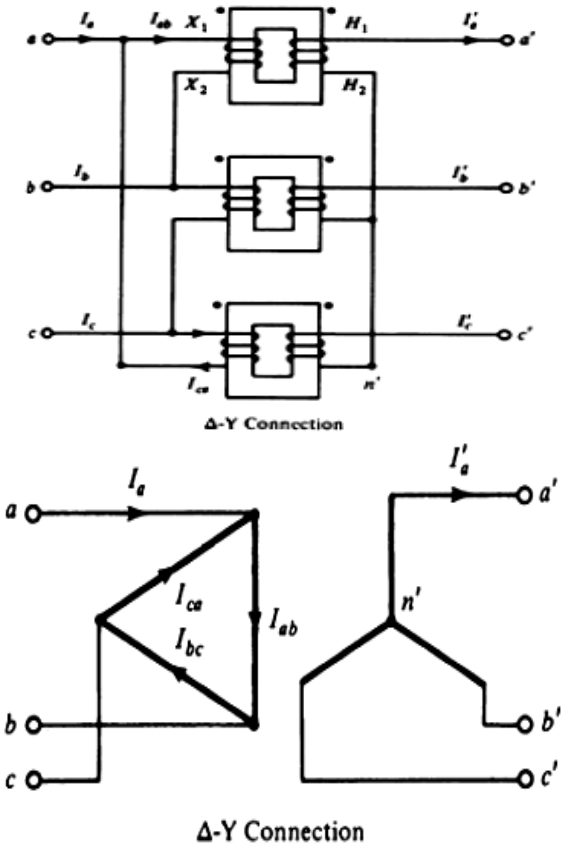
- การต่อขดลวดแบบนี้ทำให้กระแสและแรงดันแต่ละด้านของหม้อแปลงมีเฟสไม่ตรงกัน

- ถ้าด้านปฐมภูมิเป็น Δ และด้านทุติยภูมิเป็น Y แรงดัน VAB จะถูกแปลงไปเป็น Van นั่นคือ VAB จะมีเฟสตรงกันกับ Van

- ในสภาวะสมดุลจะทำให้ VAB มีเฟสต่างจาก Van เท่ากับ 30 องศานั้น VAB จะมีเฟสต่างกันกับ VAB เป็น 30 องศาด้วย



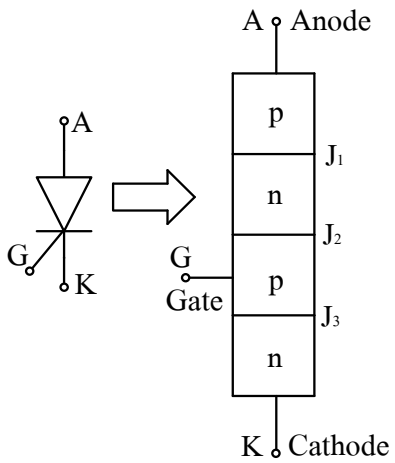
ภาพที่ 2.10 การต่อขดลวดแบบ Y-Δ



ภาพที่ 2.11 การต่อขดลวดแบบ Δ-Y

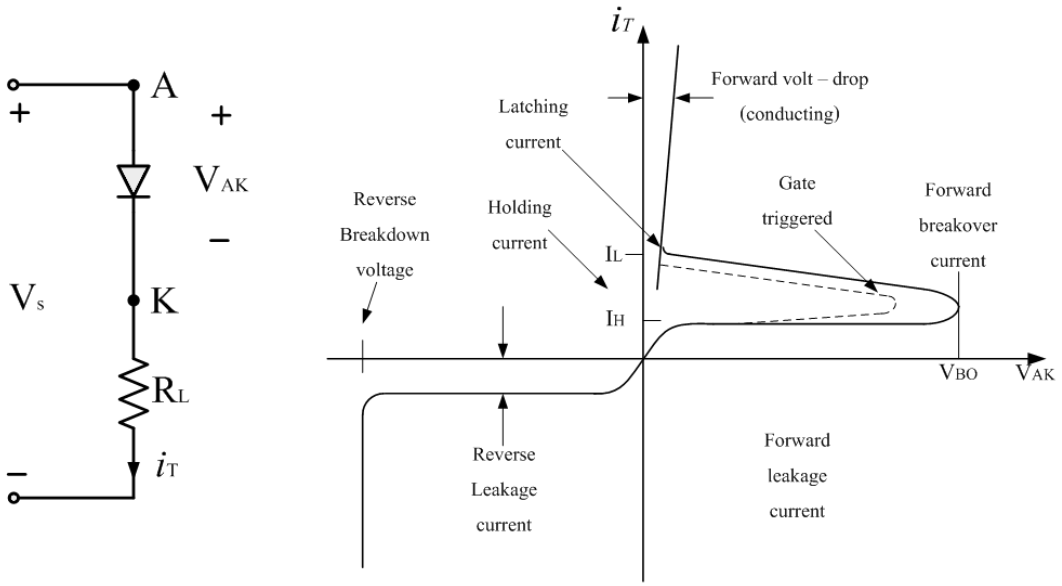
2.3 ไทริสเตอร์ [2]

2.3.1 โครงสร้างของไทริสเตอร์



ภาพที่ 2.12 โครงสร้างของไทริสเตอร์

ไทริสเตอร์เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำ 4 ชั้นคือ P-N-P-N ซึ่งมีรอยต่อพี เอ็นอยู่ 3 รอยต่อไทริสเตอร์มีขาใช้งาน 3 ขา คือแอโนด,แคโทดและเกทเมื่อแรงดันที่แอโนดเป็นบวกเมื่อเทียบกับแคโทด รอยต่อ J1 และรอยต่อ J3 จะถูกไบแอสตรงระหว่าง P-N และรอยต่อ J1 จะไบแอสกลับระหว่าง N-P สภาวะนี้เราจะเรียกว่าการจำกัดตรง การหยุดนี้จะมีกระแสรั่วไหลที่รอยต่อ ถ้าแรงดันอาโนดในขณะนี้สูงขึ้นเรื่อยถึงจุดหนึ่งจะเกิดการได้ คือมีกระแสไหลผ่านได้เรียกว่าแรงดันพัง เห็นได้ว่าขณะนี้ J1 จะไบแอสตรงอยู่ ดังนั้นจะมีพาหะจำนวนมากเกาะอยู่ที่รอยต่อถ้ากระแสมากกว่ากระแสที่ถูกกั้น ไดโอดจะนำกระแสได้ เพื่อรักษาประจุที่รอยต่อให้เพียงพอ ในทางกลับกันถ้าลดแรงดันจนกระแสต่ำกว่าค่ากระแสที่ถูกยึดไว้ ไทริสเตอร์จะหยุดทำงานการที่เราเพิ่มแรงดันให้อาโนด ที่สามารถจะทำให้ไทริสเตอร์ทำงานได้ต้องเพิ่มแรงดันจนถึงค่าแรงดันพัง แต่ถ้าเราใช้วิธีเพิ่มแรงดันที่ขาเกท จะเกิดกระแสเกตไปเพิ่มค่าประจุให้รอยต่อ P-N ไทริสเตอร์จะนำกระแสได้เช่นเดียวกัน และกระแสอาโนดต้องสูงกว่ากระแสที่ถูกกั้น



ภาพที่ 2.13 คุณสมบัติของกระแสและแรงดันของไทริสเตอร์

2.3.2 การจำลองไทริสเตอร์ด้วยทรานซิสเตอร์

การอธิบายการทำงานของไทริสเตอร์ อาจจะอธิบายได้จากการทำงานของทรานซิสเตอร์สองตัว ดังภาพ 2.13 ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์แบบ P-N-P และ N-P-N ความสัมพันธ์ของกระแสคอลเลคเตอร์กับกระแสอิมิตเตอร์

$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO} \quad (2.1)$$

โดยที่

I_C = กระแสคอลเลคเตอร์

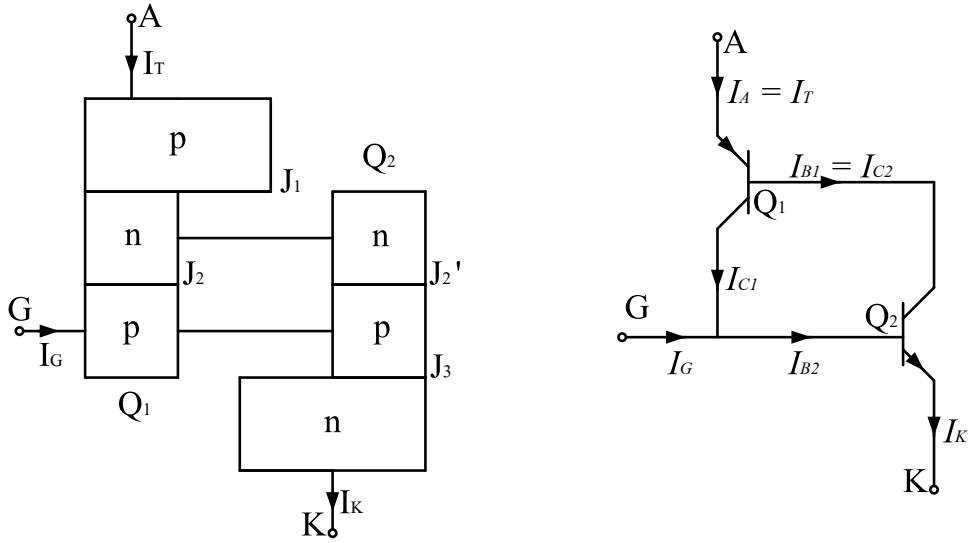
I_E = กระแสอิมิตเตอร์

I_{CBO} = กระแสรั่วระหว่างขาคอลเลคเตอร์และขาเบส

I_A = กระแสอาโนด

I_G = กระแสเกต

I_K = กระแสคาโทด



ก. โครงสร้างของไทริสเตอร์ ข. วงจรสมมูลของไทริสเตอร์

ภาพที่ 2.14 การทำงานของไทริสเตอร์

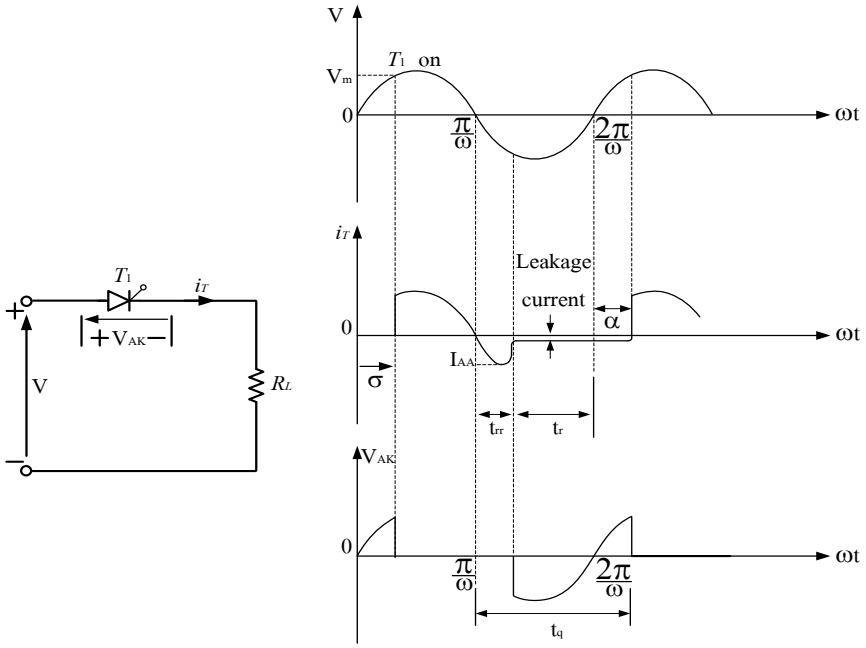
2.3.4 การทำให้ไทริสเตอร์หยุดนำกระแส

การหยุดนำกระแสของไทริสเตอร์ถือว่าเป็นปัญหาหนึ่งที่ไม่เหมาะกับการนำไทริสเตอร์ไปประยุกต์ใช้ในวงจรสวิตชิ่งเพราะว่าไทริสเตอร์จะหยุดทำงานก็ต่อเมื่อกระแสอาโนดต่ำว่ากระแสที่ถูกยึดไว้ ดังนั้นค่อนข้างจะเป็นปัญหามากในการใช้ไทริสเตอร์กับวงจรช็อปเปอร์

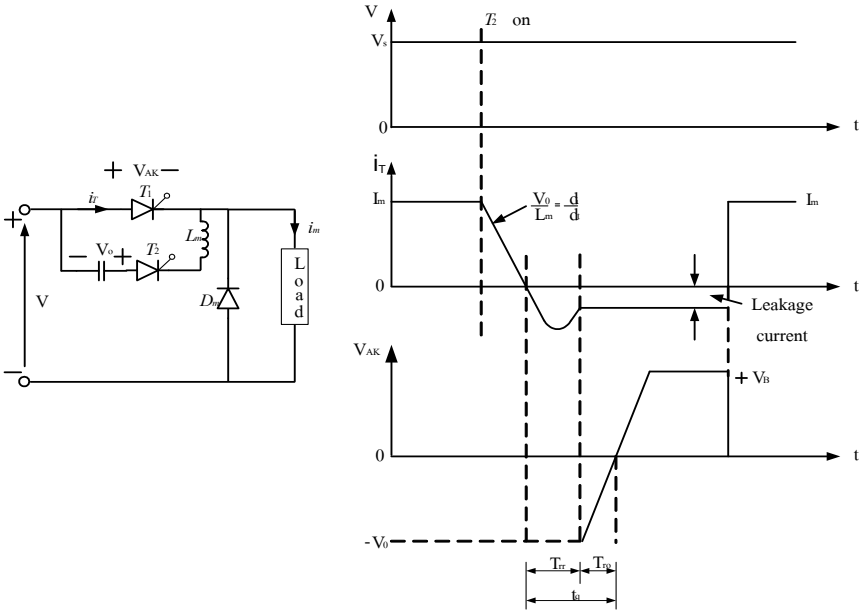
2.3.5 หลักการทำให้ไทริสเตอร์หยุดสามารถสามารถทำได้ ดังนี้

1. การหยุดแบบธรรมชาติเป็นการให้ไทริสเตอร์กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ เมื่อแรงดันของแหล่งจ่ายตกลงถึงศูนย์ ไทริสเตอร์ก็จะหยุดทำงาน บางทีเราเรียกว่า การหยุดแบบธรรมชาติ

2. การหยุดแบบวิธีบังคับเป็นการหยุดโดยวิธีบังคับหรือควบคุมให้หยุด โดยการสร้างวงจร เพื่อทำให้กระแสอาโนดต่ำกว่ากระแสที่ถูกยึดไว้เป็นเวลานานพอที่จะทำให้หยุด ซึ่งจะเรียกเวลานี้ว่า Reverse Recovery Time $\left(t_{rr}\right)$



ก. การหยุดด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

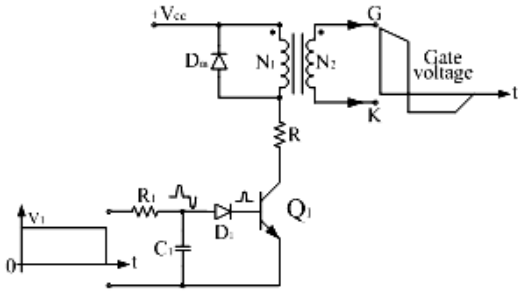


ข. การหยุดแบบวิธีบังคับ

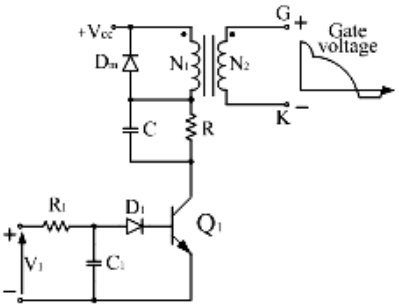
ภาพที่ 2.15 เวลาการหยุดทำงานของไทริสเตอร์

2.3.6 การสร้างสัญญาณ จุดชนวนให้ไทริสเตอร์

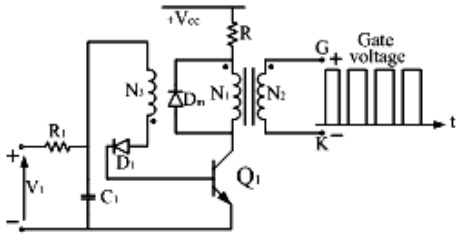
วงจรพื้นฐานแบบต่างๆของการสร้างสัญญาณจุดชนวนเพื่อให้ไทริสเตอร์ทำงาน



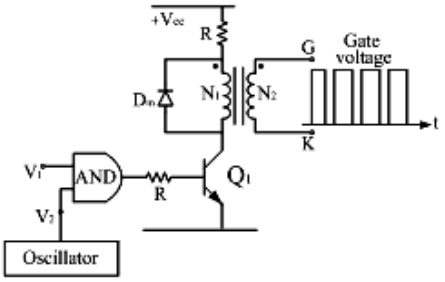
ก. การหยุดระยะสั้น (Short pulse)



ข. การหยุดระยะยาว (Long pulse)



ค. Pulse – train generato

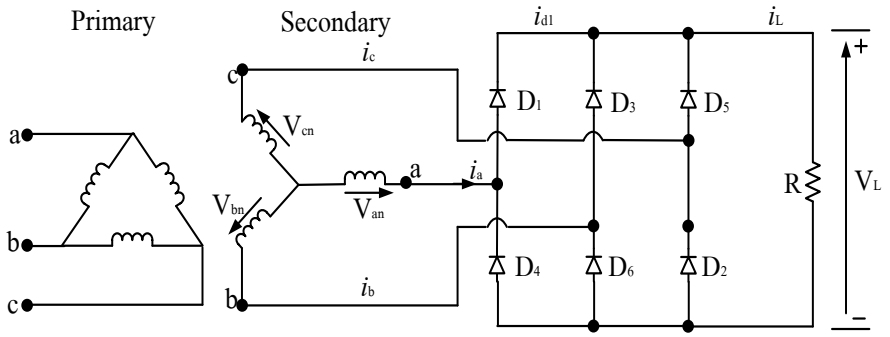


ง. Pulse train with timer and AND logic

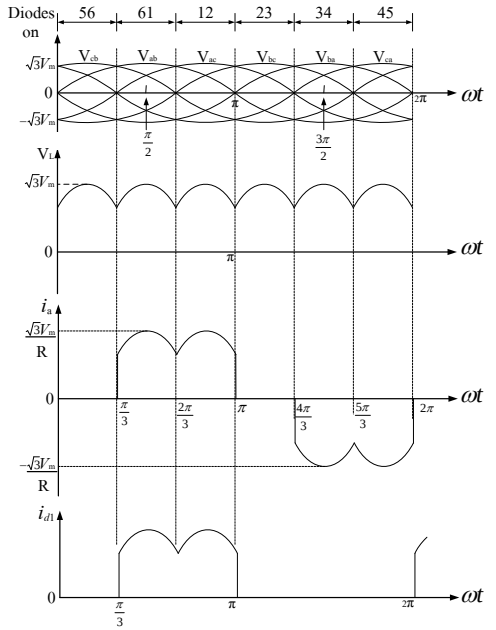
ภาพที่ 2.16 การจุดชนวนของไทริสเตอร์

2.3.7 วงจรเรียงกระแส 3 เฟส แบบบริดจ์

วงจรเรียงกระแส 3 เฟสนับว่าเป็นวงจรเรียงกระแสที่เป็นที่นิยมมากในอุตสาหกรรม เพราะมีแรงดันค่อนข้างเรียบ เมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยไม่ต้องมีการกรอง รับแรงดันอินพุทจากสายของระบบไฟฟ้า 3 เฟส ใช้ขนาดของไดโอดเพียง 1/3 ของขนาดกระแสโหลดเท่านั้น จากภาพที่ 2.18 แสดงให้เห็นโครงสร้างของวงจรเรียงกระแสชนิดนี้ ประกอบด้วยไดโอดกำลัง 6 ตัวโดยทั่วไปของวงจรเรียงกระแสจะกำหนดลำดับของกระแสไหลออกเป็นลำดับคี่ เช่น D1, D3, D5 เป็นต้น รูปคลื่นของการเรียงกระแสจะแสดงดังภาพที่ 2.17



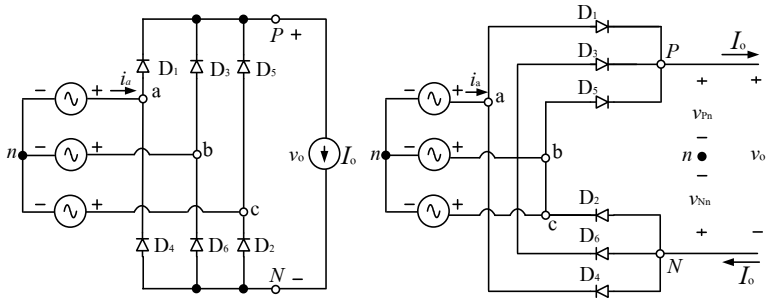
ภาพที่ 2.17 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเต็มคลื่น



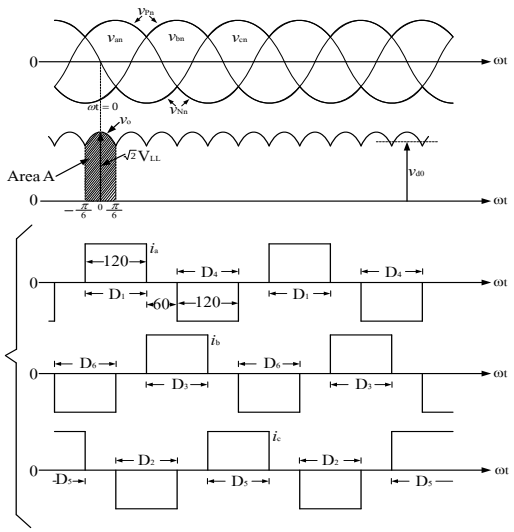
ภาพที่ 2.18 วงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบเต็มคลื่น

2.3.8 วงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบโหลดเหนี่ยวนำขนาดใหญ่

วงจรเรียงกระแส 3 เฟสที่ใช้โหลดเหนี่ยวนำขนาดใหญ่มากจะพบมากในการใช้วงจรเรียงกระแส 3 เฟสในการขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งมักจะเป็นโหลดประเภทตัวเหนี่ยวนำเช่นการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง หรือหม้อแปลงไฟฟ้า เป็นต้น โหลดเหนี่ยวนำขนาดใหญ่จะมีผลทำให้กระแสเอาท์พุทเรียบ จากผลของค่าความเหนี่ยวนำซึ่งทำหน้าที่กรองระดับระลอกคลื่นของกระแสให้เรียบ ซึ่งเราสามารถแทนได้ด้วยแหล่งกระแสคงที่ ดังแสดงให้เห็นในภาพที่ 2.19 ก.และภาพที่ 2.19 ข. แสดงถึงทิศทางของกระแสโหลดและกลุ่มการทำงานของไดโอดในทิศทางกระแสไหลออกและกระแสไหลเข้า



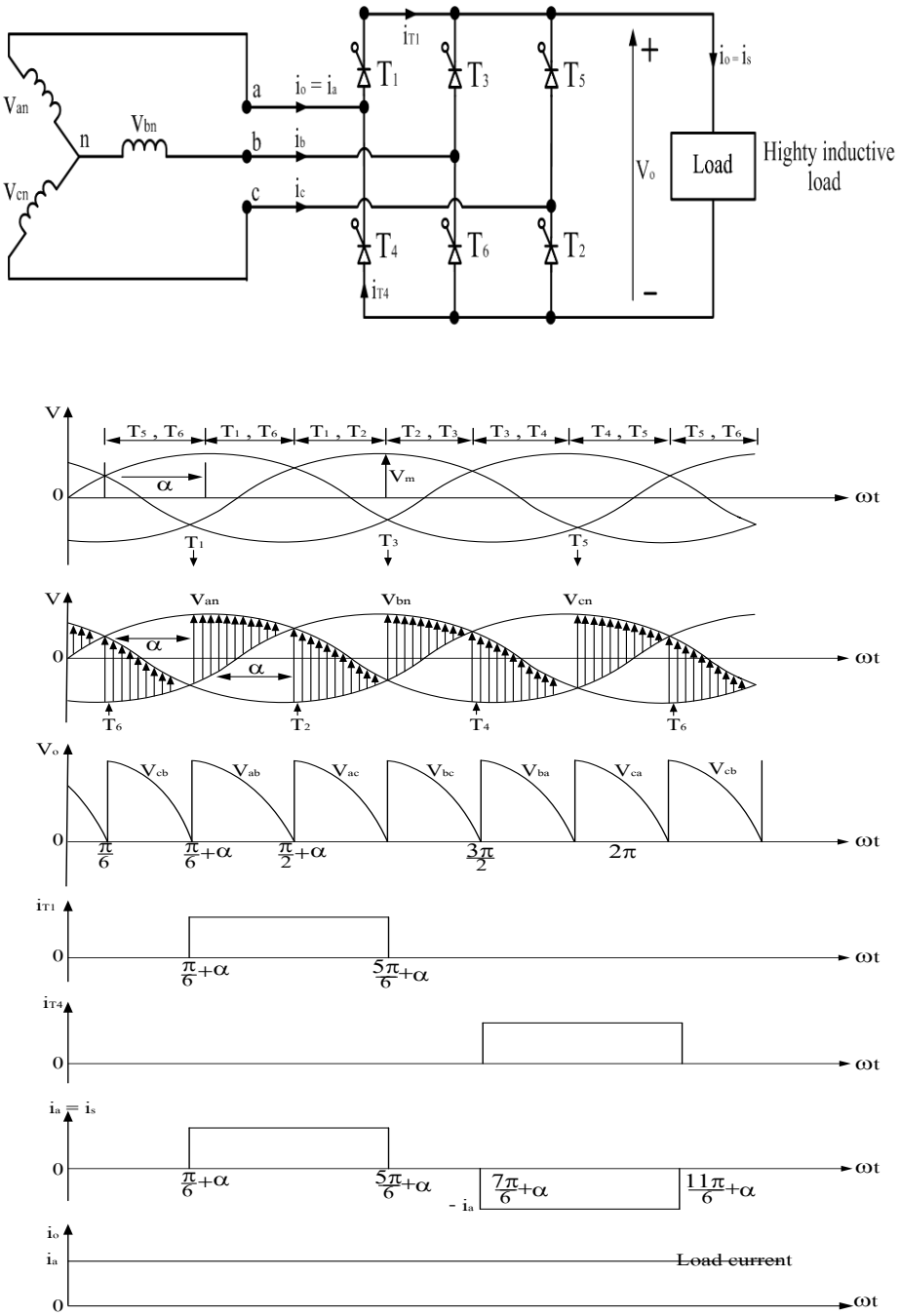
ก. วงจรเรียงกระแส



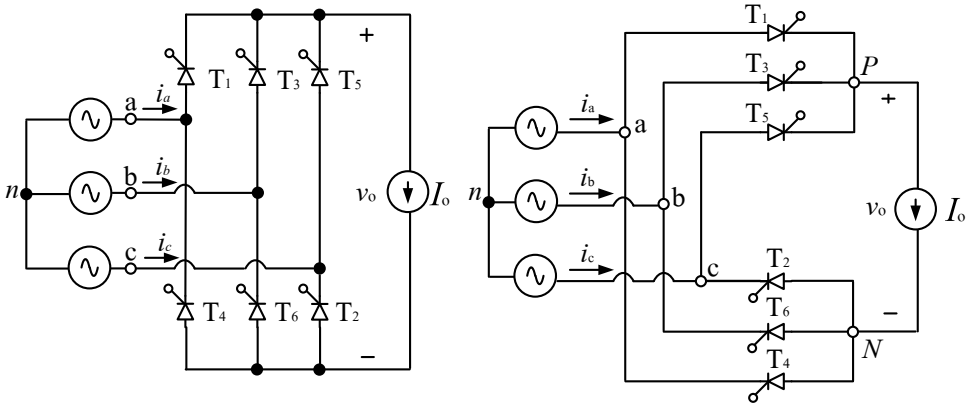
ข. รูปคลื่นแรงดันในส่วนต่างๆ

ภาพที่ 2.19 วงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบเต็มคลื่นกระแสเอาท์พุทคงที่

2.3.9 ตัวแปลงผันแบบควบคุมเฟส 3 เฟสแบบเต็มคลื่น



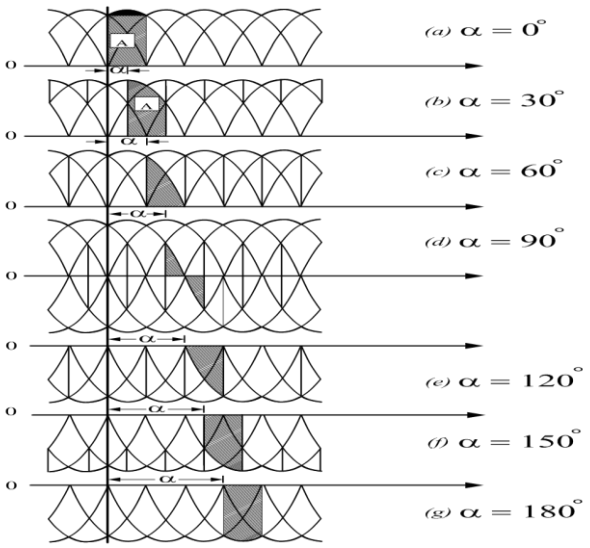
ภาพที่ 2.20 รูปคลื่นแรงดันเอาท์พุทและกระแสของอินพุทวงจรตัวแปลงผันแบบควบคุมเฟส 3 เฟสแบบเต็มคลื่น



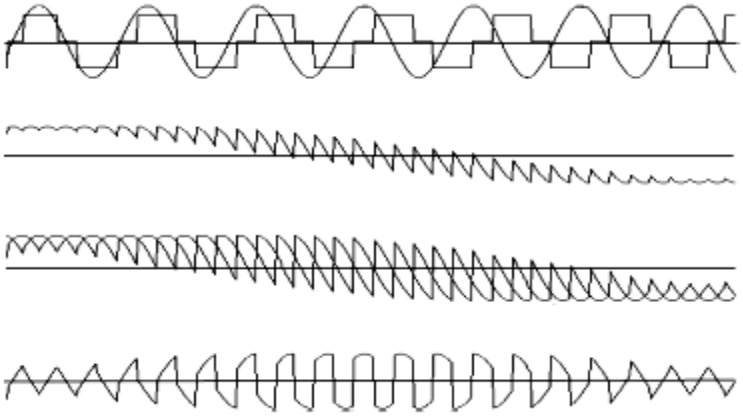
ก. แสดงรูปวงจรเรียงกระแส

ภาพที่ 2.21 การจ่ายโหลดเหนี่ยวนำขนาดใหญ่ของตัวแปลงผันแบบควบคุมเฟส 3 เฟส

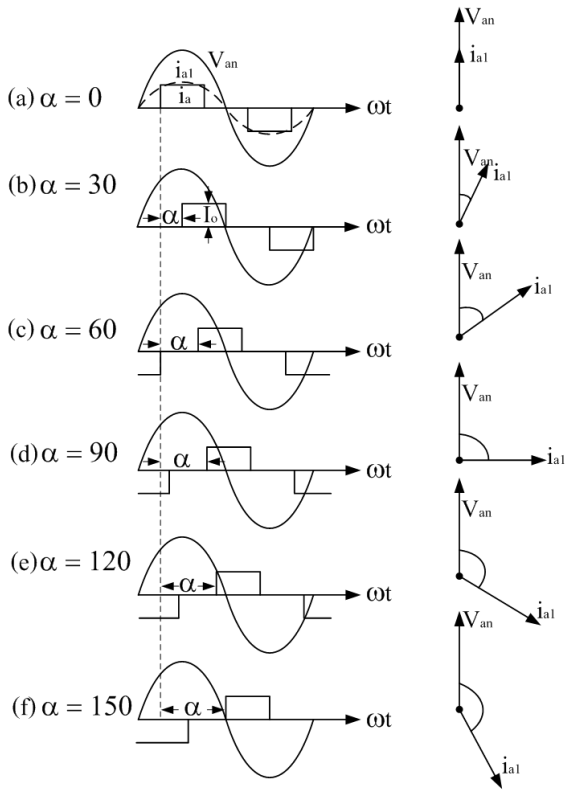
การทำงานของไทริสเตอร์จะทำงานทีละคู่ โดยหมายเลข 1,3,5 จะเป็นการทิศทางของกระแสไหลออกไปสู่โหลด และหมายเลข 4,6,2 เป็นทางที่กระแสไหลกลับไปสู่แหล่งจ่าย จากภาพที่ 2.21 ได้แสดงถึงทิศทางการไหลของกระแสและขั้วบวก ลบของแรงดึงเอาท์พุทที่ขั้ว P-N การปรับมุมจุดชนวนจะมีผลให้ทิศทางของแรงดันเอาท์พุทเปลี่ยนแปลงไปจากขั้วบวกและลบ จากภาพที่ 2.22 จะเห็นว่าแรงดันเอาท์พุทจะเป็นศูนย์เมื่อมุมจุดชนวนเท่ากับ 90 องศา จากนั้นแรงดันจะไปปรากฏที่ด้านลบ ตำแหน่งของขั้วของเอาท์พุทจะเปลี่ยนแปลงไป



ภาพที่ 2.22 แรงดันเอาท์พุทแบบสองทิศทางของตัวแปลงผัน 3 เฟสที่แปรค่าตามมุมจุดชนวนจาก 0 องศา ถึง 180 องศา



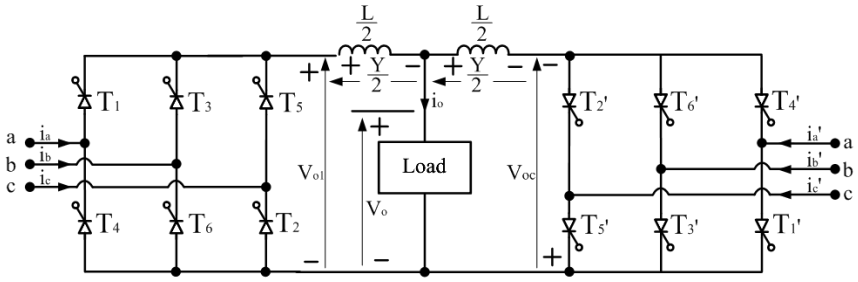
ภาพที่ 2.23 มุมจุดชนวนจาก 0 องศา ถึง 180 องศา



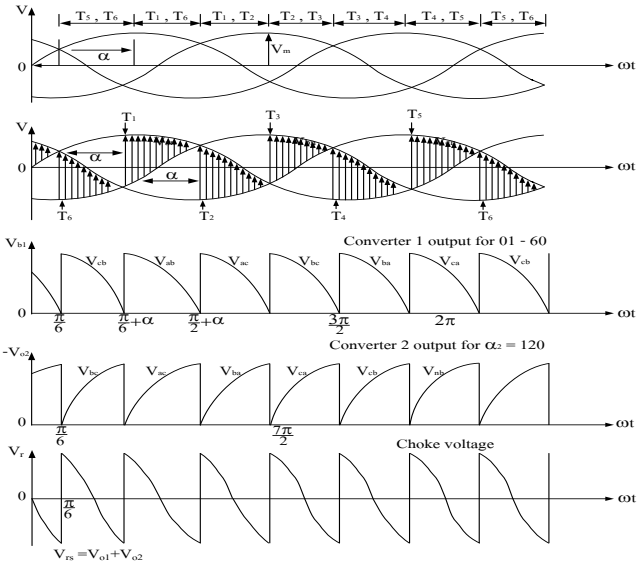
ภาพที่ 2.24 ความสัมพันธ์ของมุมระหว่างแรงดันและกระแส (Displacement angle) เมื่อปรับมุมจุดชนวนของไทริสเตอร์ในระดับต่างๆ

2.3.10 ตัวแปลงผันแบบควบคุมเฟส 3 เฟส แบบคู่

เป็นการนำตัวแปลงผันแบบควบคุมเฟส 3 เฟสมาต่อร่วมกัน 2 ทิศทางดังแสดงในภาพที่ 2.25 เพื่อมีวัตถุประสงค์ที่จะส่งกำลังไฟฟ้าได้ 2 ทางและสามารถปรับมุมจุดชนวนเพื่อให้กำลังไฟฟ้าถ่ายโอนกันได้ ในวงจรนี้จะมีบทบาทสำคัญในการประยุกต์ใช้ในการส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรง ที่สามารถส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าได้ในขณะที่แรงดันอินพุททั้ง 2 ด้านมีความถี่ที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังถูกประยุกต์ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าขนาดใหญ่ได้ 2 ทิศทางได้เช่นกัน



ก. รูปวงจรตัวแปลงผันแบบควบคุมเฟส 3 เฟส แบบคู่



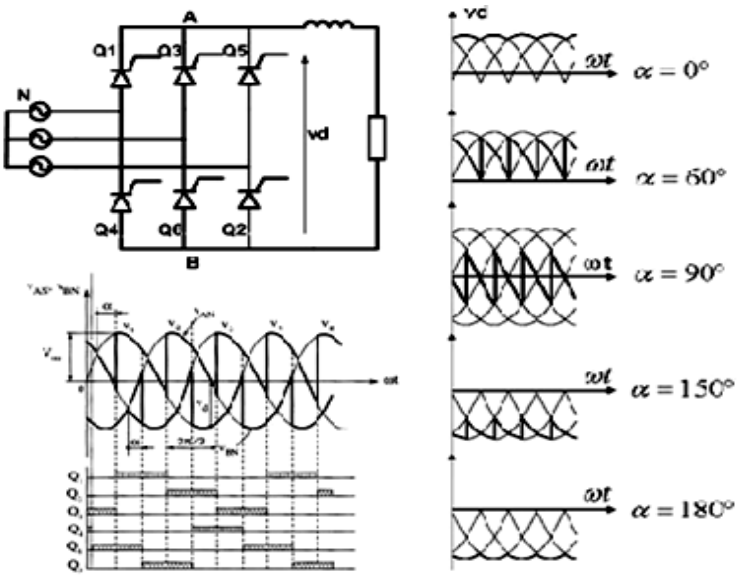
ข. รูปคลื่นสัญญาณเมื่อส่งผ่านกำลัง 2 ทาง

ภาพที่ 2.25 แปลงผันแบบคู่เมื่อส่งผ่านกำลัง 2 ทาง

2.3.11 การทำงานของวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ 6 พัลส์

หัวใจสำคัญของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบการส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงนี้ก็คือวงจรเรียงกระแสสองวงจร โดยวงจรแรกจะทำงานโหมดการส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ทำหน้าแปลงไฟฟ้ากระแสสลับไปเป็นไฟฟ้ากระตรงและส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงนี้ไปตามสายเคเบิล เมื่อถึงปลายทางก็แปลงกลับไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับโดยการใช้วงจรเรียงกระแสที่สองที่ทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์ ในสมัยเริ่มแรกนั้นจะใช้หลอดสุญญากาศทำหน้าที่เป็นสวิตช์กำลังในวงจรเรียงกระแส แต่อย่างไรก็ตามการปรากฏตัวและการพัฒนาของสวิตช์กำลังสารกึ่งตัวนำที่เหนือกว่าหลอดสุญญากาศทุกอย่างทำให้ไม่มีการใช้หลอดสุญญากาศในวงจรเรียงกระแสที่ใช้ในระบบการส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงอีกต่อไป โดยสวิตช์กำลังที่ใช้ในวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ในระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงในปัจจุบันก็คือไทริสเตอร์

SCR เป็นสวิตช์กำลังสารกึ่งตัวนำที่มีสามขา คือ Anode (A), Cathode (K), และ Gate (G) โดยถ้าเราให้แรงดันที่ขา A มีศักดิ์ไฟฟ้าเป็นบวกเมื่อเทียบกับขา K และให้สัญญาณจุดชนวน ที่ขา G ที่มีศักดิ์ไฟฟ้าเป็นบวกเมื่อเทียบกับขา K ก็จะทำให้ SCR นั้นนำกระแสได้ ส่วน GTO นั้นจะทำงานคล้ายๆ กับ SCR ต่างตรงที่สามารถใช้สัญญาณที่ G เพื่อสั่งให้หยุดนำกระแสได้ด้วย



ก. แสดงมุมจุดชนวน SCR ข. รูปสัญญาณที่มุมจุดชนวน 0-180 องศา

ภาพที่ 2.26 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่ใช้ SCR

การที่เราจะสั่งให้ SCR ตัวใดนำกระแสนั้นก็ขึ้นอยู่กับแรงดันของแหล่งจ่ายที่ SCR ตัวนั้นต่ออยู่ต้องมีค่าสูงสุด โดย SCR หมายเลข 1,3,5 จะเป็น SCR ที่ควบคุมแรงดันด้านบวก (จุด A) และ SCR หมายเลข 4,6,2 จะเป็น SCR ที่ควบคุมแรงดันด้านลบ (จุด B) ตัวอย่างเช่นในกรณีแรงดัน V12 (V1-V2) มีค่าสูงสุด ซึ่งแสดงว่าแหล่งจ่ายแรงดัน V1 มีค่าสูงสุดทางด้านบวกจึงต้องจุดชนวน Q1 ให้นำกระแสทางบวก และแหล่งจ่ายแรงดัน V2 จะมีค่าสูงสุดทางด้านลบจึงต้องจุดชนวน Q6 ให้นำกระแสทางลบ และแรงดันโหลดในขณะนั้นจะมีขนาดเท่ากับแรงดัน V12 นั่นเอง ตัวอย่างอีกกรณีหนึ่งคือ สมมุติว่าแรงดัน V31 (V3-V1) มีค่าสูงสุด ซึ่งแสดงว่าแหล่งจ่ายแรงดัน V3 มีค่าสูงสุดทางด้านบวกจึงต้องจุดชนวน Q5 ให้นำกระแสทางบวก และแหล่งจ่ายแรงดัน V1 จะมีค่าสูงสุดทางด้านลบจึงต้องจุดชนวน Q4 ให้นำกระแสทางลบ และแรงดันโหลดในขณะนั้นจะมีขนาดเท่ากับแรงดัน V31นั่นเอง ดังนั้นการนำกระแสของ SCR จะเรียงลำดับตามนี้คือ Q1+Q2, Q2+Q3, Q3+Q4, Q4+Q5, Q5+Q6, Q6+Q1 และวนกลับไปขึ้นรอบใหม่

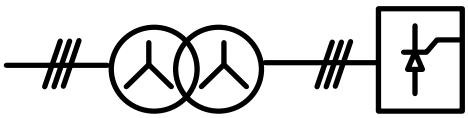
การควบคุมแรงดันด้านออกสามารถควบคุมได้โดยการควบคุมมุมจุดชนวน (α) หรือมุมที่สั่งให้ SCR นำกระแสโดยมุมที่เป็นจุดตัดกันของ V1 กับ V3 จะนับเป็นมุม 0 องศา (ซึ่งจะต่างจากวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟส ที่จะเริ่มนับมุม 0 องศาเมื่อแรงดันด้านเข้ามีค่า 0) ในกรณีที่มุมจุดชนวนเป็น 0 องศา ลักษณะแรงดันด้านออกจะเหมือนกันกรณีที่เราแทน SCR ด้วยไดโอด (ที่ไม่สามารถควบคุมมุมจุดชนวนได้) และแรงดันด้านออกจะมีค่าเฉลี่ยสูงสุด เมื่อมุมจุดชนวนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แรงดันด้านออกก็จะมีค่าเฉลี่ยลดลง ในกรณีนี้พลังงานที่ส่งจ่ายจะไหลจากด้านไฟสลับ (ด้านซ้ายมือ) ไปยังด้านไฟตรง (ด้านขวามือ) เพราะกระแสด้านออกมีค่าเฉลี่ยเป็นบวกและแรงด้านออกก็มีค่าเฉลี่ยเป็นบวกด้วยเช่นเดียวกัน ซึ่งในกรณีนี้จะเรียกว่าเป็นการทำงานในโหมดคอนเวอร์เตอร์ เมื่อเราจุดชนวนที่มุม 90 องศา แรงดันด้านออกจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 จึงทำให้กรณีนี้จะไม่มีกระแสไหล และพลังงานที่ส่งจ่ายก็จะเท่ากับ 0 ด้วยเช่นเดียวกัน แต่เมื่อเราเพิ่มมุมจุดชนวนให้มากกว่า 90 องศา จะทำให้แรงดันด้านออกมีค่าเฉลี่ยเป็นลบ ในขณะที่กระแสยังคงมีค่าเฉลี่ยเป็นบวกเช่นเดิม ในกรณีนี้จะทำให้พลังงานที่ส่งจ่ายจะไหลกลับทางได้ทาง โดยจะไหลจากด้านไฟตรง (ด้านขวามือ) ไปยังด้านไฟสลับ (ด้านซ้ายมือ) ซึ่งในกรณีนี้จะเรียกว่าเป็นการทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์แรงดันด้านออกเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ

$$(\mathrm{vd}) \;=\; \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_S \cos\alpha \;=\; 1.35 V_S \cos\alpha$$

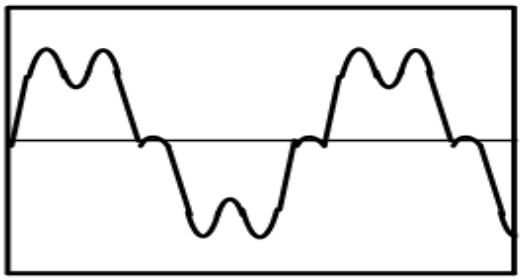
โดย

V_S คือ ค่าแรงดันไลน์ RMS ของแหล่งจ่าย และ α คือมุมจุดชนวนของ SCR

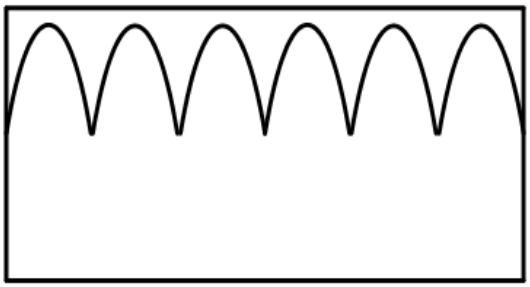
กรณีของการส่งจ่ายกำลังด้วยการส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่ต้องทำงานทั้งในโหมดคอนเวอร์เตอร์และโหมดอินเวอร์เตอร์วงจรด้านออกหรือด้านไฟตรงของวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์จะต้องมีตัวเหนี่ยวนำอยู่เพื่อทำให้กระแสมีค่าต่อเนื่องด้วย



ก. รูปวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ 6 พัลส์



ข. รูปคลื่นกระแสด้านเข้า

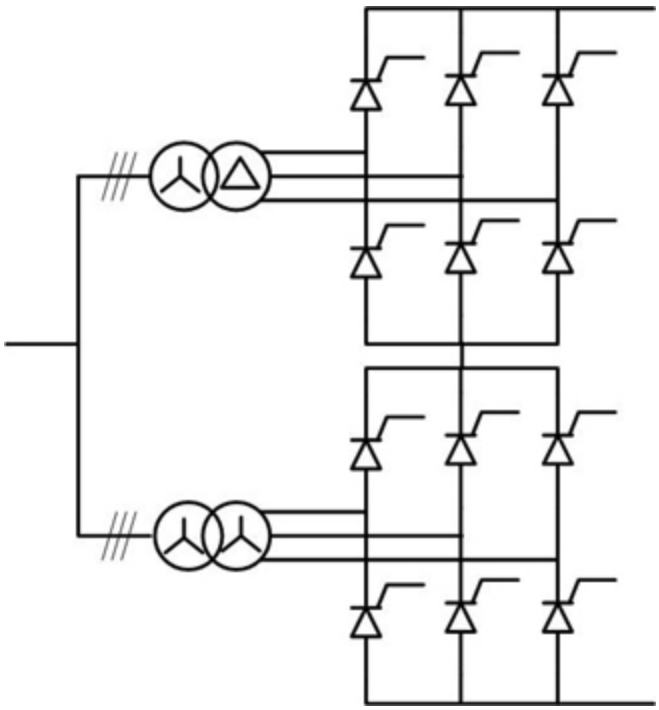


ค. รูปคลื่นแรงดันด้านออก

ภาพที่ 2.27 ตัวอย่างรูปคลื่นกระแสด้านเข้าและแรงดันด้านออกของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ 6 พัลส์

2.3.11 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ 12 พัลส์

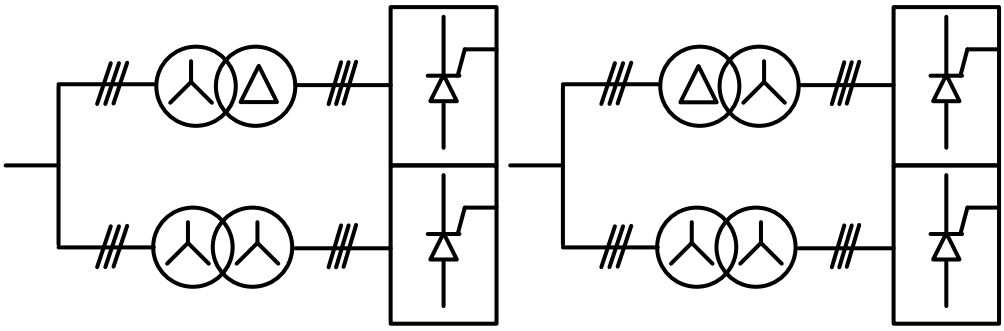
แม้ว่าค่าระลอกคลื่นของแรงดันด้านออกและกระแสด้านออกของวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ 6 พัลส์จะมีค่าความถี่สูงถึง 6 เท่าของความถี่แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้า(6x50 = 300Hz ในกรณีของประเทศไทย) แต่อย่างไรก็ตามค่าระลอกก็ยังคงมีค่าที่ยังไม่ต่ำมากนัก ทำให้ต้องใช้ตัวเหนี่ยวนำที่ค่าค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงได้มีการนำเอาวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ 12 พัลส์เข้ามาใช้ เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ 12 พัลส์ โดยแท้จริงแล้วก็คือวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ 6 พัลส์สองวงจรต่ออนุกรมกัน โดยวงจรเรียงกระแสแต่ละวงจรจะมีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้จากหม้อแปลงที่มีขดลวดทุติยภูมิต่อแบบเดลต้าและแบบสตาร์ตามลำดับ



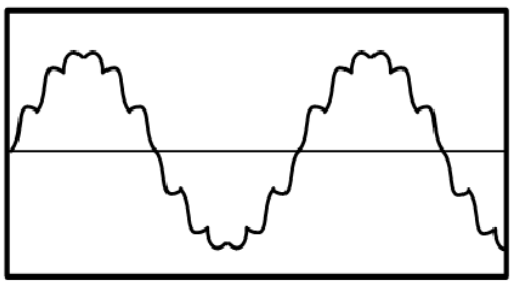
ภาพที่ 2.28 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ 12 พัลส์

จากวงจรจะเห็นว่าแรงดันไฟสลับด้านเข้าของวงจรด้านบนบนจะได้มาจากหม้อแปลงลูกที่อยู่ด้านบน ซึ่งมีขดทุติยภูมิที่ต่อแบบเดลต้า ในขณะที่แรงดันไฟสลับด้านเข้าของวงจรด้านล่างจะได้มาจากหม้อแปลงลูกที่อยู่ด้านล่าง ซึ่งมีขดทุติยภูมิที่ต่อแบบสตาร์ การต่อวงจรหม้อแปลงในลักษณะเช่นนี้ทำให้แรงดันด้านเข้ามีมุมต่างกัน 30 องศา (ในขณะที่การต่อแบบ 6 พัลส์ จะมีมุมต่างกัน 60 องศา)

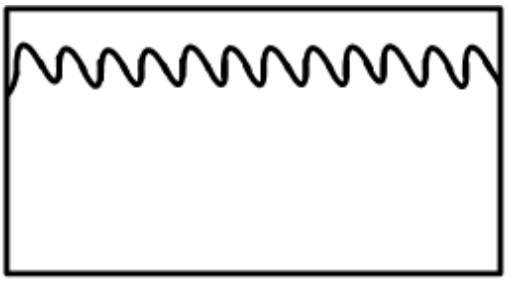
ดังนั้นแรงดันด้านออกจะมีค่าระลอกของแรงดันและกระแสที่ลดลงและความถี่ค่าระลอกจะสูงขึ้น กลายเป็น 12 เท่าของความถี่แรงดันด้านเข้า (12x50 = 600 Hz กรณีประเทศไทย) ดังนั้นความถี่ฮาร์มอนิกส์ของแรงดันไฟตรงด้านออกก็จะประกอบไปด้วยฮาร์มอนิกส์คู่ โดยมีฮาร์มอนิกส์ความถี่ต่ำสุดอยู่ที่ 600 Hz ในขณะที่ฮาร์มอนิกส์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ 6 พัลส์จะอยู่ที่ 300 Hz เป็นต้นไป



ก. รูปวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ 12 พัลส์



ข. รูปคลื่นกระแสด้านเข้า



ค. รูปคลื่นแรงดันด้านออก

ภาพที่ 2.29 รูปคลื่นกระแสด้านเข้าและแรงดันด้านออกของวงจรเรียงกระแสสามเฟส 12 พัลส์

แสดงถึงตัวอย่างผลการวัดของกระแสด้านเข้าของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ 12 พัลส์ ซึ่งเมื่อนำไปเทียบกับวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ 6 พัลส์ ในภาพที่ 2.27 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่ากระแสด้านเข้าของวงจรวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ 12 พัลส์มีลักษณะที่มีความเพี้ยนน้อยกว่ากระแสด้านเข้าของวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ 6 พัลส์อย่างชัดเจนหรือมีลักษณะที่ใกล้เคียงรูปไซน์มากกว่า ในขณะแรงดันด้านออกจะมีแอมพลิจูดของค่าระลอกคลื่นที่ต่ำกว่าและความถี่ของค่าระลอกก็ยังมีค่าสูงกว่าวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ 6 พัลส์ ดังนั้นจึงจะใช้รีแอ็กเตอร์กระแสตรงที่มีค่าเล็กกว่าอย่างมีนัยสำคัญ

นอกจากนี้ถ้าต้องการให้กระแสด้านเข้ามีฮาร์มอนิกส์ที่ต่ำกว่านี้ก็ยังสามารถใช้วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์สามเฟส 18 พัลส์ หรือ 24 พัลส์ ได้อีกด้วย แต่ก็เพิ่มความยุ่งยากเนื่องจากต้องใช้หม้อแปลงเพื่อสร้างแรงดันไฟสลับด้านเข้าวงจรเรียงกระแสให้มีมุมต่างกัน 20 องศา และ 15 องศา ตามลำดับ

2.4 ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 [4]

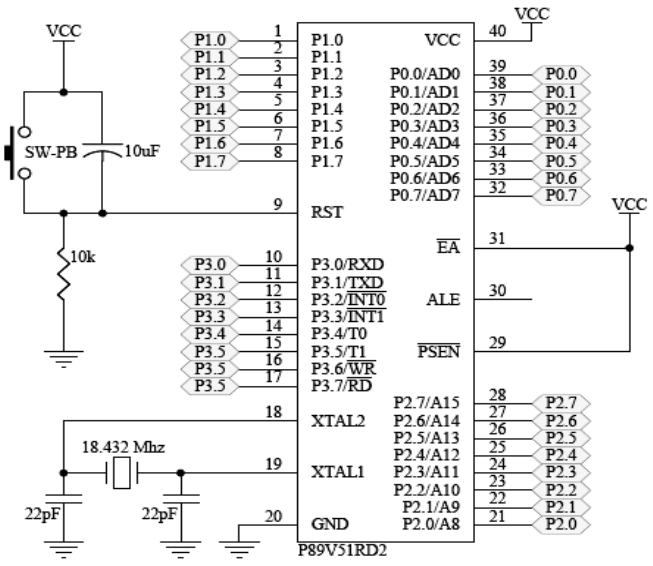
ไมโครคอนโทรลเลอร์ถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางซึ่งเรารู้จักกันในนามของ MCS-51 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่บริษัท Intel ผลิตขึ้นมาเพื่อใช้กับงานควบคุมขนาดกลางเนื่องจากมีความเร็วและประสิทธิภาพเหมาะสมกับงานควบคุมโดยทั่วไปมีคำสั่งในการเขียนที่สะดวกและคล่องตัวมากจึงได้รับความนิยมสูงในปัจจุบันความแตกต่างของไมโครคอนโทรลเลอร์กับไมโครโปรเซสเซอร์ในปัจจุบันหลายคนกำลังสับสนว่าไมโครคอนโทรลเลอร์กับไมโปรเซสเซอร์นั้นคืออุปกรณ์เดียวกันโดยลักษณะโครงสร้างของไมโครโปรเซสเซอร์จะประกอบไปด้วยหน่วยประมวลผลกลางหน่วยคำนวณทางคณิตศาสตร์และลอจิกบัสข้อมูลและบัสแอดเดรสสำหรับติดต่อกับหน่วยความจำภายนอกและวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาในการใช้งานไมโครโปรเซสเซอร์จะต้องเชื่อมต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมจากภายนอกหากต้องการติดต่อกับอุปกรณ์อินพุตและเอาต์พุตต้องอาศัยอุปกรณ์ที่เรียกว่าไอซีขยายพอร์ตทำให้การสร้างระบบควบคุมต้องการอุปกรณ์จำนวนมากจึงส่งผลให้ระบบมีขนาดใหญ่พอสมควรเปรียบเทียบโครงสร้างของไมโครคอนโทรลเลอร์จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าภายในไมโครคอนโทรลเลอร์มีอุปกรณ์พื้นฐานเหมือนกับไมโครโปรเซสเซอร์หากแต่จะบรรจุหน่วยความจำโปรแกรมหน่วยความจำข้อมูลและพอร์ตอินพุตเอาต์พุตไว้ภายในผู้ใช้งานจึงเพียงแต่เขียนโปรแกรมควบคุมลงบนตัวไมโครคอนโทรลเลอร์เท่านั้นก็พอ เนื่องจากว่าไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ได้มีการผลิตออกมาหลายรุ่นและมาจากหลายบริษัทในที่นี้จะกล่าวถึงไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ในอนุกรมของ 8051 ซึ่งผลิตโดยบริษัท Philips เท่านั้นโดยมีชุดคำสั่งและสถาปัตยกรรมพื้นฐานเหมือนกับไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS–51 ของผู้ผลิตอื่นไม่ว่าจะเป็น Intel , Dallas คุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ในอนุกรมของ 8051 มีดังนี้

1. เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีหน่วยประมวลผลกลางแบบ 8 บิต
2. มีคำสั่งคำนวณทางคณิตศาสตร์ และตรรกศาสตร์
3. มีแอดเดรสบัสขนาด 16 บิตทำให้สามารถอ้างตำแหน่งหน่วยความจำโปรแกรมและหน่วยความจำข้อมูลได้ 64 กิโลไบต์
4. มีหน่วยความจำภายในขนาด 128 ไบต์ หรือ 256 ไบต์
5. มีพอร์ตอนุกรมทำงานแบบดูเพล็กซ์เต็ม 1 พอร์ต
6. มีพอร์ตอินพุตเอาต์พุตแบบขนานจำนวน 32 บิต

7. มีไทเมอร์2 ตัว (8051/8031) หรือ 3 ตัว (8052/8032)

8. มีวงจรควบคุมการเกิดอินเตอร์รับ 5 ประเภท (8051/8031) หรือ 6 ประเภท (8052/8032)

9. มีวงจรออสซิลเลเตอร์ภายในตัว ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ของบริษัท Philips เป็นที่นิยมใช้งานกันในปัจจุบันจะมีโครงสร้างเหมือนกันไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูล MCS-51 กลุ่ม AT89Cxx ในกลุ่มนี้สามารถที่จะทำการเขียนโปรแกรมลงไปในชิพได้เลยโดยไม่ต้องถอดชิพออกไปจากระบบเรียกว่าการโปรแกรมในวงจรและอื่นๆอีก สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ที่เราจะใช้เป็นรุ่น P89V51RD2 ของบริษัท Philips ที่เลือกรุ่นนี้เนื่องจากเป็นรุ่นที่สามารถรองรับการดาวน์โหลดโปรแกรมแบบ ISP (In System Programming) ผ่านพอร์ตอนุกรมได้โดยตรง ไม่ต้องอาศัยอุปกรณ์หรือวงจรเพิ่มเติมในการดาวน์โหลดโปรแกรม จึงทำให้สามารถใช้งานได้อย่างสะดวกรวมถึงราคาของ P89V51RD2 ที่ไม่แพง เมื่อเทียบกับความสามารถ และประสิทธิภาพของมัน P89V51RD2 สามารถทำงานในโหมด X2 ซึ่ง จะทำให้สามารถทำงานได้เร็วกว่า MCS-51 พื้นฐาน 2 เท่า (1 แมชชีนไซเคิล ใช้สัญญาณนาฬิกา 6 ลูก) เมื่อใช้คริสตอลความถี่ที่เท่ากันในการทำงานในโหมด X2 นี้ P89V51RD2 สามารถใช้คริสตอลความถี่สูงสุด 20MHz ส่วนในการทำงานในโหมด X1 สามารถใช้คริสตอลความถี่สูงสุด 40 MHz ภายใน P89V51RD2 มีหน่วยความจำโปรแกรมแบบแฟลชขนาด 64 กิโลไบต์ นอกจากนั้นยังมีหน่วยความจำข้อมูลภายนอกเพิ่มเติมขนาด 1 กิโลไบต์ อยู่ภายในตัวชิพด้วย



ภาพที่ 2.30 รายละเอียดการจัดขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ตระกูล 8051

2.4.1 หน้าที่การใช้งานของแต่ละขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ในตระกูลของ 8051 มีดังนี้

- ขา +VCC (ขา 40) ใช้สำหรับต่อไฟเลี้ยง
- ขา GND (ขา 20) สำหรับต่อกราวด์ของระบบ
- ขาพอร์ต 0 (ขา 32 ถึง 39) จะมี 8 ขาคือ P0.0-P0.7 โดยสามารถกำหนดให้เป็นได้ทั้งอินพุตและเอาต์พุตโดยหากต้องการให้ขาพอร์ต 0 ขาใดเป็นอินพุตก็สามารถทำได้โดยการเขียนข้อมูล‘1’ไปยังขาที่ต้องการติดต่อด้วยแต่ถ้าต้องการเป็นเอาต์พุตก็สามารถทำได้โดยการเขียนข้อมูลส่งไปยังขาที่ต้องการติดต่อและยังใช้ในการติดต่อกับขาแอดเดรสไบต์ต่ำของหน่วยความจำภายนอก(A0-A7) และขาข้อมูล (D0-D7) โดยใช้กระบวนการมัลติเพล็กซ์เข้าช่วยในการทำงาน
- ขาพอร์ต 1 (ขา 1-8) จะมี 8 ขาคือ P1.0-P1.7 โดยสามารถกำหนดให้เป็นได้ทั้งอินพุตและเอาต์พุตโดยหากต้องการให้ขาพอร์ต 1 ขาใดเป็นอินพุตก็สามารถทำได้โดยการเขียนข้อมูล ‘1’ไปยังขาที่ต้องการติดต่อด้วยและนอกจากนี้ในกลุ่มของ 8051 จะใช้ขา P1.0 เป็นขาอินพุตสำหรับค่าของไทเมอร์1 และ P1.1 เป็นขาอินพุตสำหรับค่าของไทเมอร์2 ในขณะที่ P1.4-P1.7 ใช้เป็นขาเชื่อมต่อแบบ SPI เพื่อทำการโปรแกรมข้อมูลในระบบ
- ขาพอร์ต 2 (ขา 21-28) จะมี 8 ขาคือ P2.0-P2.7 ใช้เป็นอินพุตและเอาท์พุตพอร์ตและใช้งานในการติดต่อกับขาแอดเดรสไบต์สูงของหน่วยความจำภายนอก A8-A15
- ขาพอร์ต 3 (ขา 10-17) จะมี 8 ขาคือ P3.0-P3.7 ใช้เป็นอินพุตและเอาท์พุตพอร์ตและถูกใช้งานในหน้าที่พิเศษอื่นๆอีกหลายอย่างดังนี้

P3.0 ใช้เป็นขาอินพุตสำหรับรับข้อมูลจากการสื่อสารแบบอนุกรมหรือขา RXD

P3.1 ใช้เป็นขาอินพุตสำหรับส่งข้อมูลจากการสื่อสารแบบอนุกรมหรือขา TXD

P3.2 ใช้เป็นขาอินพุตรับสัญญาณอินเตอร์รับจากภายนอกช่อง 0 หรือขา INT0

P3.3 ใช้เป็นขาอินพุตรับสัญญาณอินเตอร์รับจากภายนอกช่อง 1 หรือขา INT1

P3.4 ใช้เป็นขาอินพุตสำหรับรับสัญญาณไทเมอร์จากช่อง 0 หรือขา T0

P3.5 ใช้เป็นขาอินพุตสำหรับรับสัญญาณไทเมอร์จากช่อง 1 หรือขา T1

P3.6 ใช้เป็นขาอินพุตหรือเป็นขา WR ในกรณีที่ใช้เชื่อมต่อกับหน่วยความจำภายนอก

P3.7 ใช้เป็นขาอินพุตหรือเป็นขา RD ในกรณีที่ใช้เชื่อมต่อกับหน่วยความจำภายนอก

- ขา RESET (ขา9) ใช้ในการรีเซ็ตการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อเริ่มต้นการทำงานใหม่

- ขา ALE/PROG (ขา30) เป็นขาควบคุมการเลตซ์ของขาพอร์ต 0 เมื่อมีการใช้งานหน่วยความจำภายนอกหากขานี้มีสถานะเป็นลอจิก‘0’และใช้เป็นขาสำหรับใช้รับพัลส์ของการโปรแกรมข้อมูลลงในไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ถ้ามีสถานะเป็นลอจิก‘1’ในรุ่นที่มีหน่วยความจำเป็นแบบอีพรอม

- ขา PSEN (ขา9) ใช้ส่งสัญญาณร้องขอติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมภายนอกในช่วงของการอ่านเขียนข้อมูลกับหน่วยความจำภายนอกเมื่อใช้โปรแกรมจากหน่วยความจำโปรแกรมภายในชิพจะไม่ส่งสัญญาณออกมาที่ขานี้

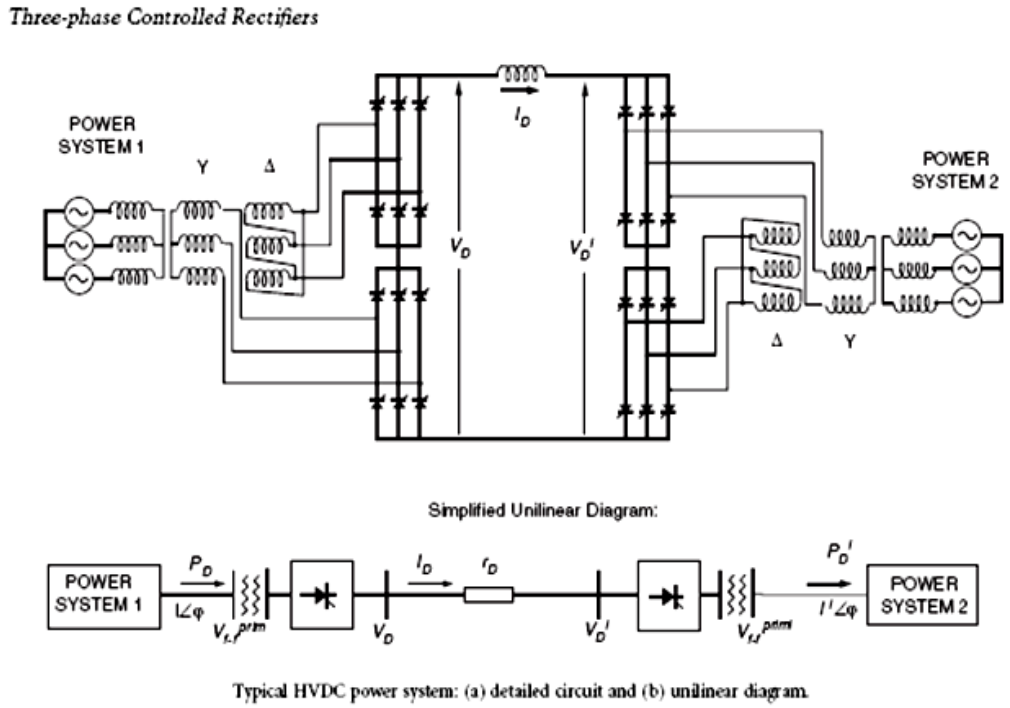
- ขา EA/VPP (ขา31) ใช้สำหรับเลือกให้ MCS-51 ติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมภายนอกหรือจากหน่วยความจำภายใน MCS-51 เองโดยหากมีสถานะเป็น‘0’จะเลือกใช้โปรแกรมภายนอกหากมีสถานะเป็น‘1’จะเลือกใช้หน่วยความจำภายใน MCS-51 และใช้เป็นขาอินพุตสำหรับรับแรงดันไฟสูงสำหรับการโปรแกรมหน่วยความจำภายในสำหรับ MCS-51 แบบแฟลชต้องการแรงดันในการโปรแกรม +5VDC

- ขา XTAL1 และ XTAL2 (ขา 19 และขา 18) เป็นขาต่อคริสตอลเพื่อสร้างสัญญาณนาฬิกาในการกำหนดจังหวะในการทำงานของ MCS-51

บทที่ 3

การออกแบบโครงงาน

การออกแบบและส่วนประกอบของโครงงานและส่วนประกอบต่างๆซึ่งในโครงงานนี้เป็นการออกแบบการส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงชนิดโมโนโพลาร์แบบบริดจ์ 12 พัลส์ ประกอบไปด้วยวงจรกำลัง วงจรตรวจสอบเฟส และไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยวงจรตรวจสอบเฟสและวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์จะเรียกส่วนนี้ว่าอุปกรณ์ด้านควบคุม ด้านกำลังใช้แรงดันและกระแสที่สูง ดังนั้นโครงงานนี้จึงจำเป็นต้องแยกอุปกรณ์ด้านควบคุมออกจากอุปกรณ์ด้านกำลังเพื่อป้องกันอุปกรณ์ด้านควบคุมไม่ให้เกิดความเสียหายเนื่องจากแรงดันและกระแสที่สูงทางด้านวงจรกำลัง



Typical HVDC power system: (a) detailed circuit and (b) unilinear diagram.

ภาพที่ 3.1 ระบบการส่งไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์

ภาพที่ 3.1 แสดงการส่งไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์ ซึ่งประกอบไปด้วยวงจรเร็กติไฟร์เออร์ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงและมีวงจรอินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับอีกที

3.1 วงจรภาคกำลัง

3.1.1 หม้อแปลง

การออกแบบหม้อแปลงจะเลือกการออกแบบเป็นแบบแปลงแรงดันลง โดยมีอัตราส่วนเป็น 10 : 1 เพื่อให้มีกระแสมากพอที่จะสั่งให้ SCR ทำงานได้ โดยหม้อแปลงที่ออกแบบนั้นด้านปฐมภูมิเป็นแบบ Y และด้านทุติยภูมิจะเป็นแบบ Y และ Δ ตามหัวข้อ 2.2.3 จากการออกแบบหม้อแปลงจะมีขนาด 500 VA แรงดันด้านปฐมภูมิจะมีแรงดัน 380 V ด้านทุติยภูมิจะมีแรงดัน 38 V สามารถคำนวณกระแสได้จากสมการ

$$S = \sqrt{3}VA$$

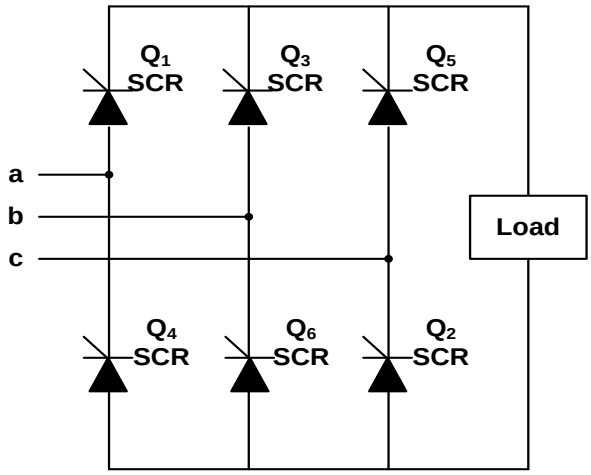
ดังนั้นกระแสมีค่า

$$I_{rms} = \frac{S}{\sqrt{3}V}$$

$$I_{rms} = \frac{500VA}{38\sqrt{3}V} = 7.6A$$

$$I_{peak} = 7.6\sqrt{2}A = 10.74A$$

3.1.2 วงจรเรียงกระแส 3 เฟส

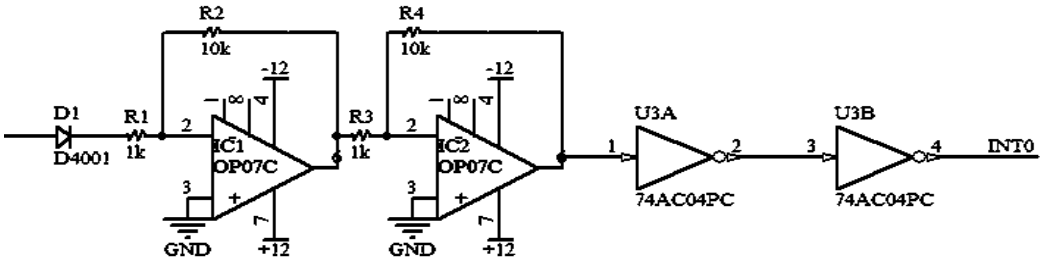


ภาพที่ 3.2 วงจรเรียงกระแส 3 เฟสที่ควบคุมเต็มบริดจ์

จากภาพที่ 3.2 การทำงานของวงจรนี้หม้อแปลงจะรับกระแสมาจากวงจรขับกระแสเกต และทำการถ่ายสัญญาณมาสู่วงจรด้านกำลังซึ่งหม้อแปลงทั้ง 6 ตัวจะต่ออยู่กับไทริสเตอร์แต่ละตัว ตามภาพที่ 3.1 ซึ่งไทริสเตอร์แต่ละตัว จะมีไฟมารอไว้แต่ละเฟสโดยที่ไทริสเตอร์ตัวที่ 1 และ 4 จะได้ไฟจากเฟส a ไทริสเตอร์ตัวที่ 3 และ 6 จะได้ไฟจากเฟส b และไทริสเตอร์ตัวที่ 5 และ 2 จะได้ไฟจากเฟส c เมื่อหม้อแปลงได้รับสัญญาณจากวงจรขับกระแสเกตก็จะถ่ายทอดสัญญาณมาที่ขาเกตของไทริสเตอร์ และนำกระแสทำให้เกตไทริสเตอร์ทำงานเมื่อไทริสเตอร์ทำงานตามรูปแบบของโปรแกรมที่ตั้งไว้ ก็จะทำให้โหลดที่ต่ออยู่ทำงานตามที่เราต้องการ รวมทั้งหม้อแปลงยังเป็นตัวแยกกราวด์ให้ทางด้านวงจรกำลังอีกด้วยเพราะถ้ามีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นด้านวงจรกำลังจะทำให้เกิดอันตรายต่อวงจรทางด้านภาคควบคุม

3.2 วงจรภาคควบคุม

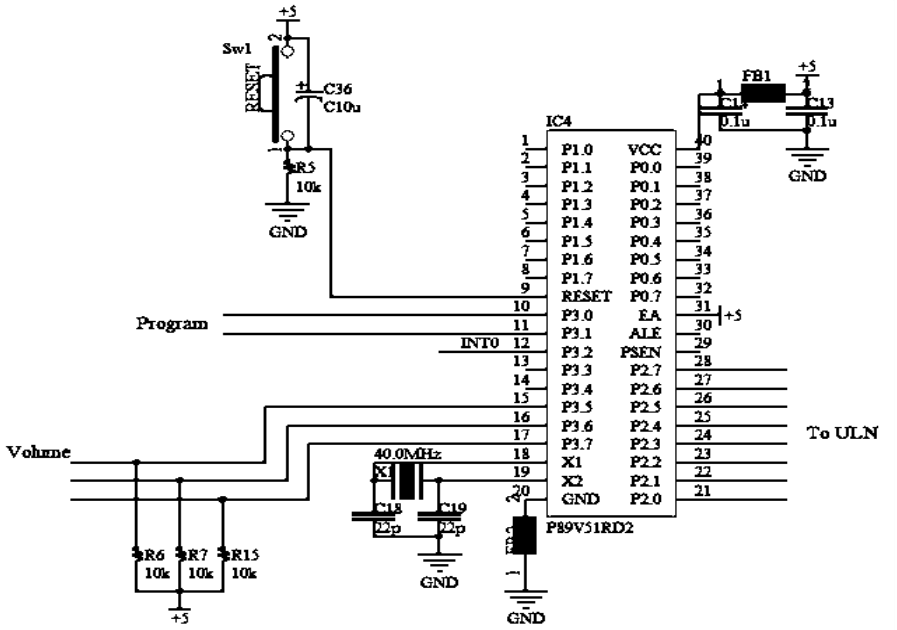
3.2.1 วงจรตรวจสอบเฟส



ภาพที่ 3.3 วงจรตรวจสอบเฟส

จากภาพที่ 3.3 วงจรตรวจสอบเฟสจะประกอบไปด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าจาก 220V เป็น 12V เพื่อทำให้ไดโอดที่ต่อกับวงจรออปแอมป์ทำงานและแปลงสัญญาณไซน์เต็มคลื่นเป็นสัญญาณไซน์ครึ่งคลื่นและส่งต่อไปยังวงจรออปแอมป์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ขยายขนาดหรือลดขนาดของสัญญาณทางด้านขาเข้าของตัวออปแอมป์และใช้ในการหาจุดเริ่มต้นของรูปคลื่นสัญญาณไซน์ที่จุดศูนย์เพื่อที่จะสร้างสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมให้อยู่ในรูปคลื่นสัญญาณไซน์และเปลี่ยนรูปคลื่นสัญญาณไซน์ให้อยู่ในรูปคลื่นสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมเพื่อง่ายต่อการประมวลผลของไมโครคอนโทรลเลอร์

3.2.2 วงจรประมวลผล

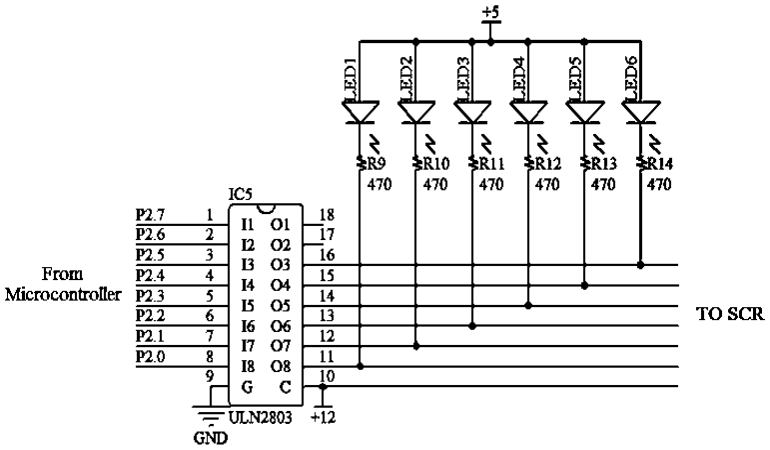


ภาพที่ 3.4 วงจรประมวลผลและ Volume A/D

จากภาพที่ 3.4 ในวงจรนี้จะประกอบไปด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51และ Volume A/D จะทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิตอล ซึ่งจะมีค่าเท่ากับสัญญาณอนาล็อกนั้นๆ โดยใช้หลักการสุ่มสัญญาณอนาล็อกทางอินพุต แล้วนำขนาดของสัญญาณอนาล็อกนั้น มาเปรียบเทียบกับค่าแรงดันอ้างอิง ของวงจรแล้วจึงเปลี่ยนเป็นค่าข้อมูลแบบดิจิตอลเพื่อจะนำสัญญาณดิจิตอลไปประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อใช้ในการตั้งค่ามุมจุดชนวนของไทริสเตอร์ที่ต้องการทั้ง 6 ตัว ส่วนขาที่ 18,19 ของตัวไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นจะมีออสซิลเรเตอร์ที่ใช้ผลิตสัญญาณ Clock จ่ายให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ ส่วนขาที่40 และขาที่20 จะมีเฟอร์ไรท์บีทซึ่งทำหน้าที่กันสัญญาณรบกวนที่มากับกระแสและ GND

ในส่วน IC Max-232 จะทำหน้าที่แปลงสัญญาณ TTL เป็น RS-232 เพื่อเชื่อมต่อระหว่างส่วน Device กับ Host เนื่องจากสัญญาณ TTL เชื่อมต่อในระยะไกลๆไม่ได้จึงต้องแปลงเป็นพอร์ต RS-232 เพื่อส่งในระยะทางไกลๆมีประสิทธิภาพ

3.2.3 วงจรขับกระแสเกต



ภาพที่ 3.5 วงจรขับกระแสเกต

จากภาพที่ 3.5 เนื่องจาก CPU ไมโครคอนโทรลเลอร์ต่างๆ นั้นจะส่งสัญญาณออกมาได้เพียงระดับของลอจิกซึ่งไม่สามารถนำสัญญาณที่ได้นี้ไปขับกระแสให้กับไทริสเตอร์โดยตรงได้ ดังนั้นในการที่จะควบคุมการทำงานของไทริสเตอร์ด้วย CPU นั้นจำเป็นต้องสร้างวงจรขับกระแสเกตเพื่อทำหน้าที่ขับกระแสควบคุมตัวไทริสเตอร์อีกทีหนึ่ง โดยใช้สัญญาณลอจิกที่ได้จาก CPU ไปกระตุ้นไทริสเตอร์ ของวงจรขับกระแสเกตเพื่อให้ทำงานตามต้องการอีกทีหนึ่งวงจรขับกระแสและป้องกันกระแสเกินมีหลักการทำงานง่ายๆคือ จะทำงานเมื่อได้รับสัญญาณอินพุทเป็นลอจิก 1 และให้เอาท์พุทมีค่าแรงดันเป็น 0 V ในขณะที่ทำงาน แต่ถ้าได้รับสัญญาณอินพุทเป็นลอจิก 0 จะให้เอาท์พุทเป็นแรงดันเท่ากับแรงดันที่ต่อเข้าที่ขา Common-Output (ขา-10) นั่นก็คือถ้าต้องการให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดของหม้อแปลงก็ป้อนสัญญาณลอจิกให้กับเอาท์พุทบิตนั้นด้วยลอจิก 1 ส่วน LED 1-6นั้นเอาไว้แสดงว่าสัญญาณที่ออกมาจาก IC-ULN2803 นั้นเป็นลอจิก 0 หรือ ลอจิก 1

ส่วนสำคัญในชุดของวงจรควบคุมนั้นเป็นในส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ด้านอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กระแสน้อยแต่เราจะนำไปควบคุมอุปกรณ์ด้านกำลังซึ่งใช้กระแสที่สูงดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องแยกอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ออกจากอุปกรณ์ด้านกำลังเพื่อป้องกันอุปกรณ์ด้านอิเล็กทรอนิกส์ไม่ให้เกิดความเสียหายเนื่องจากกระแสที่สูงจากด้านกำลัง สำหรับอุปกรณ์ที่จะใช้แยกอุปกรณ์ด้านอิเล็กทรอนิกส์ออกจากอุปกรณ์ด้านกำลังโดยใช้ไอซีเบอร์ ULN2803 และหม้อแปลงพัลส์เป็นตัวเชื่อมการทำงานของวงจรทั้งสองเมื่อเกิดการลัดวงจรหรือกระแสเกินด้านกำลังด้านอิเล็กทรอนิกส์จะไม่ได้รับผลกระทบจนถึงกับเสียหายได้

บทที่ 4

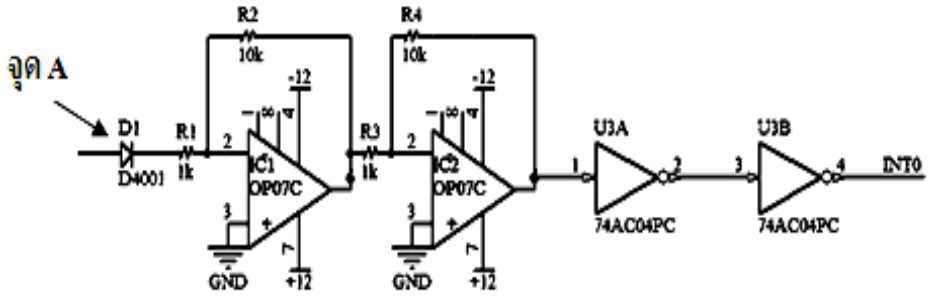
การทดลองและผลการทดลอง

ในโครงงานนี้จะกล่าวถึงการวัดค่าทางด้านเอาท์พุทที่เกิดจากการใช้เทคนิคการจุดชนวนไทริสเตอร์โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งแตกต่างจากการจุดชนวนโดยใช้ TCA785 ในการทดลองการจุดชนวนไทริสเตอร์สามารถปรับมุมการชุดชนวนที่มุมต่างๆได้ ตามหัวข้อ 2.3.9

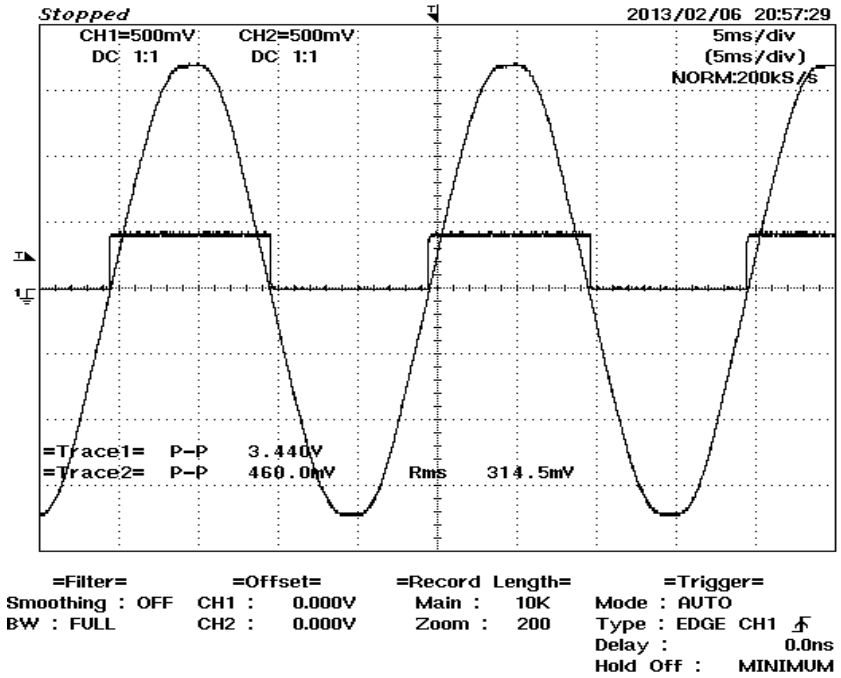
4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. แหล่งจ่ายไฟ 3 เฟส AC380V	1	เครื่อง
2. ชุดไมโครคอนโทรลเลอร์	1	ชุด
3. ชุดเร็กติไฟเออร์ 3 เฟส	1	ชุด
4. ออสซิลโลสโคป	1	เครื่อง
5. สายโพรบแบบDifferential probe	2	เส้น
6. มัลติมิเตอร์	1	เครื่อง
7. โหลดความต้านทาน	1	ชุด

4.2 การทดลองการทำงานของวงจรตรวจสอบเฟส



ภาพที่ 4.1 วงจรตรวจสอบเฟส

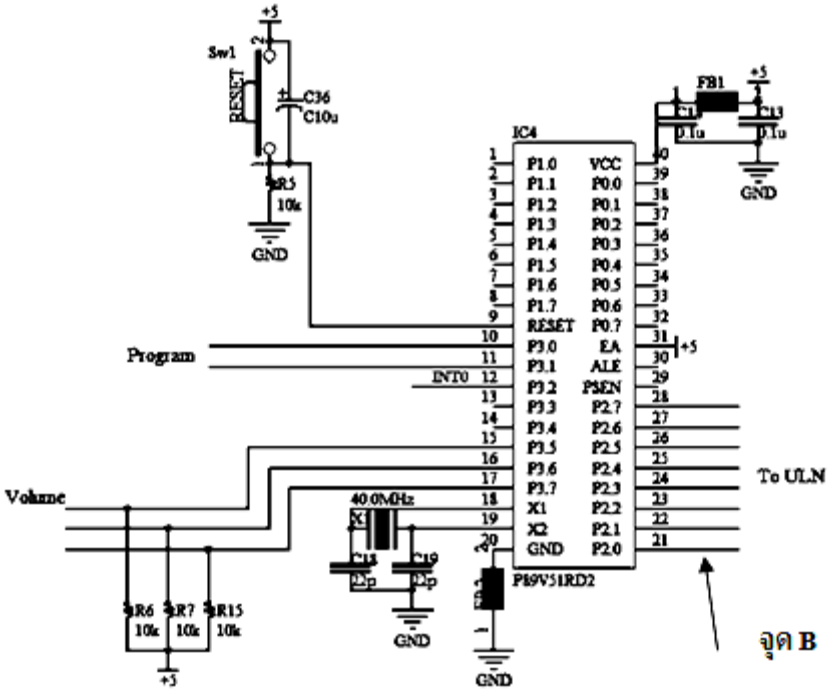


ภาพที่ 4.2 การตรวจสอบสัญญาณเอาท์พุทที่ออกจากวงจรตรวจสอบเฟส

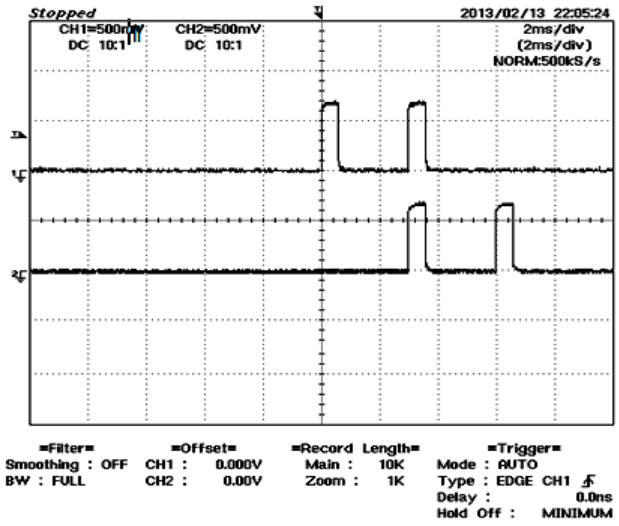
จากภาพที่ 4.2 ใช้ออสซิลโลสโคปในการวัดสัญญาณเอาท์พุทที่ออกจากวงจรตรวจสอบเฟสที่ขา INT0 จากภาพที่ 4.2 และวัดสัญญาณไฟอินพุท AC 50 HZ เพื่อแสดงให้เห็นว่ารูปคลื่นสัญญาณเอาท์พุทที่ออกมานั้นจะทำงานที่มุม 0 องศาของรูปคลื่นไซน์

4.3 การทดลองการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์เทียบกับสัญญาณไฟเข้า

เมื่อได้สัญญาณจากวงจรตรวจสอบเฟสของไมโครคอนโทรลเลอร์จึงได้ทำการประมวลผลเพื่อให้ได้สัญญาณขับเกตจำนวน 6 สัญญาณ สำหรับวงจรเร็กติไฟเออร์ 6 พัลส์และจะพัฒนาไปเป็น 12 สัญญาณสำหรับเร็กติไฟเออร์ 12 พัลส์ โดยผลของสัญญาณจะออกมาที่ขา P 2.0-P 2.5 สำหรับ 6 พัลส์และอีก 6 สัญญาณจะออกมาที่ขา P 1.0-P 1.5 ดังแสดงในภาพที่ 4.3 และแสดงตัวอย่างสัญญาณพัลส์ ดังภาพที่ 4.4



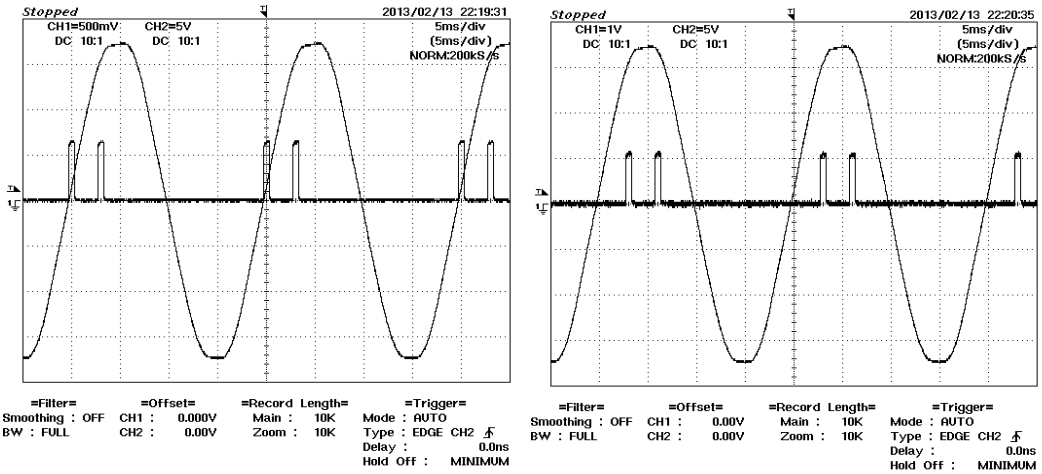
ภาพที่ 4.3 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงานประมวลผล



ภาพที่ 4.4 การตรวจสอบสัญญาณเอาท์พุทที่ออกจากวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่จุด B

จากภาพที่ 4.4 แสดงสัญญาณจุดชนวนที่ได้จากวงจรที่ขา P2.0 และ P2.1 ที่ต่างกัน 30 องศา โดยเป็นไปตามทฤษฎีหัวข้อ 3.3.9

4.4 สัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์

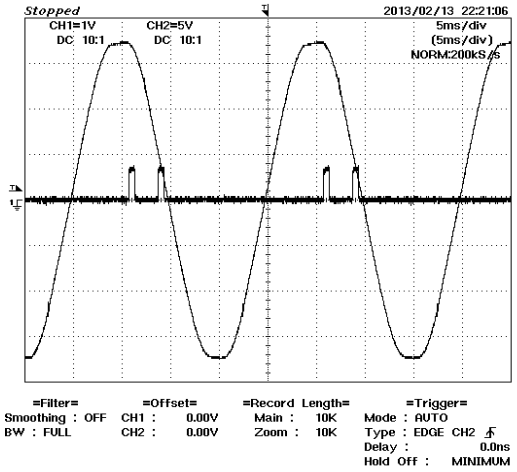


ก. สัญญาณที่ขา P2.0 ข. สัญญาณที่ขา P2.1

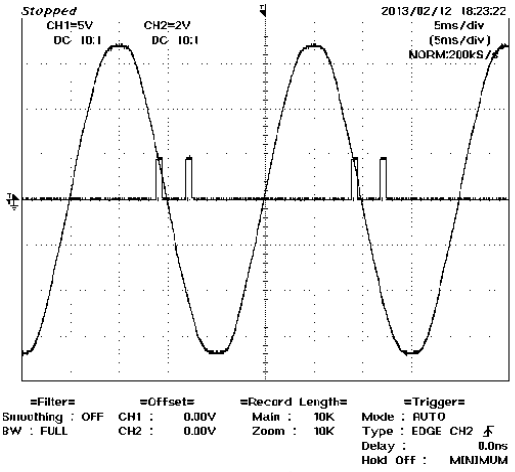
ภาพที่ 4.5 สัญญาณพัลส์ที่จุด B ของขา P2.0 และ ขา P2.1

จากภาพที่ 4.5 เป็นสัญญาณจุดชนวนที่ออกจากขา P2.0 ของไมโครคอนโทรลเลอร์รูปซึ่งจะเกิดขึ้น ที่มุม 0 องศาเมื่อเทียบกับสัญญาณไซน์ที่แรงดันเฟส แต่ถ้าเทียบกับสัญญาณไซน์ที่ไลน์จะเกิดขึ้นที่มุม 30 องศา ของสัญญาณแรงดันไลน์ และในภาพจะเกิดสัญญาณพัลส์ 2 ลูกในหนึ่งรูปคลื่นไซน์ เนื่องจากการทำงานของไทริสเตอร์จะทำงานพร้อมกันเป็นคู่ เมื่อนำภาพ 4.5ก. เปรียบเทียบกับภาพ 4.5ข. จะเห็นได้ว่าคลื่นลูกที่สองของภาพ 4.5ก. จะตรงกันพอดีกับคลื่นลูกแรกของภาพที่ 4.5ข.ระยะห่างของลูกคลื่นระหว่างลูกแรกกับลูกที่สองจะห่างกันเป็นเวลา 3.33 ms

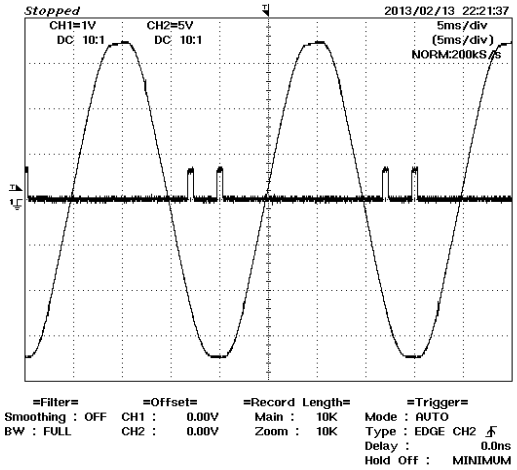
จากข้อความด้านบนสัญญาณจุดชนวนอีก 4 สัญญาณจะใกล้เคียงกันซึ่งปรากฏตามภาพที่ 4.6 ต่อไป



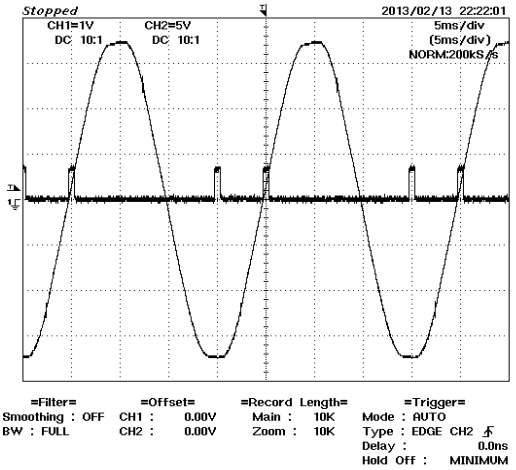
ก. สัญญาณที่ขา P2.2



ข. สัญญาณที่ขา P2.3



ค. สัญญาณที่ขา P2.4



ง. สัญญาณที่ขา P2.5

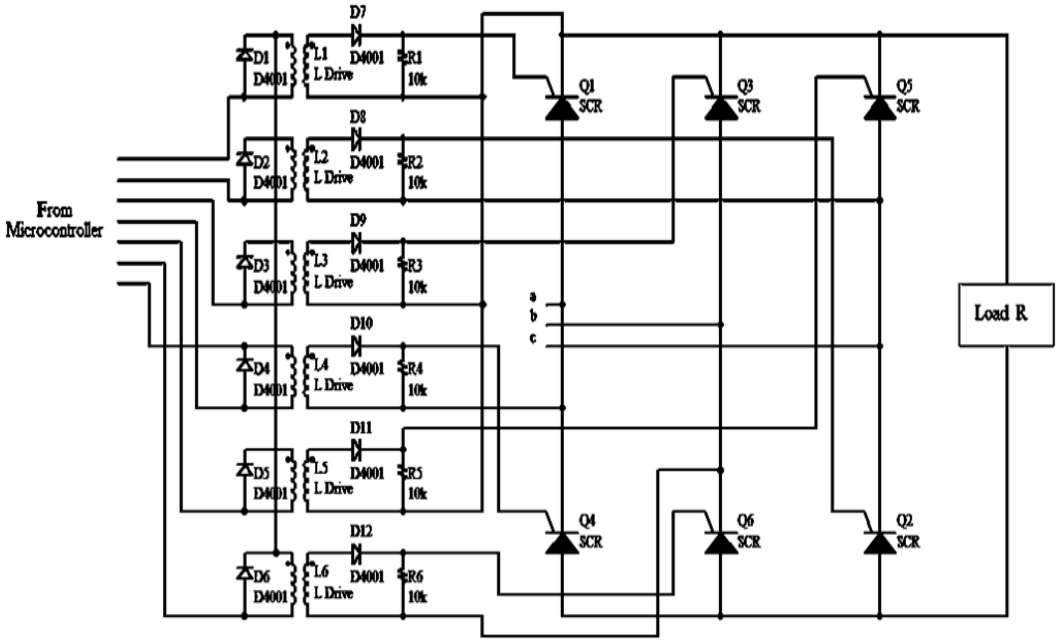
ภาพที่ 4.6 สัญญาณพัลส์ที่จุด B ของขา P2.2, P2.3,P2.4และที่ขา P2.5

จากการทดลองในส่วนนี้จะเห็นได้ว่าภาพสัญญาณลำดับขั้นการจุดชนวนเกตของ

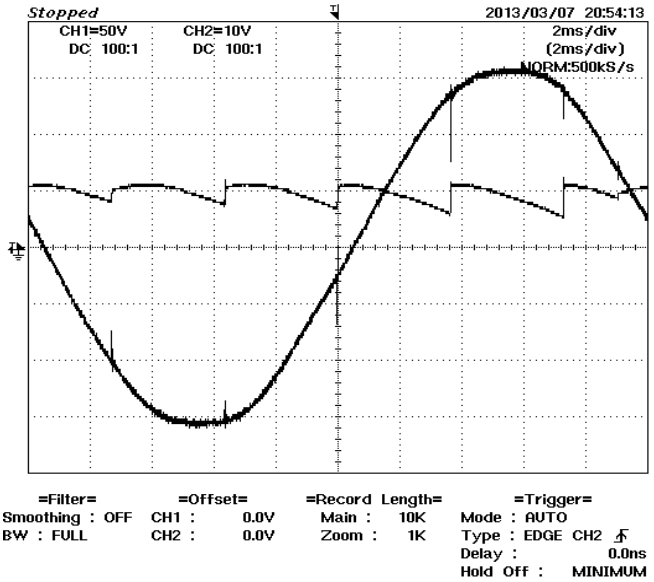
- ไทริสเตอร์ทั้ง 6 ตัวจะเป็นไปตามลำดับดังนี้คือ
  - ไทริสเตอร์ 6 และ 1 ทำงานพร้อมกันที่เวลา 0 ms
  - ไทริสเตอร์ 1 และ 2 ทำงานพร้อมกันที่เวลา 3.33 ms
  - ไทริสเตอร์ 2 และ 3 ทำงานพร้อมกันที่เวลา 6.66 ms
  - ไทริสเตอร์ 3 และ 4 ทำงานพร้อมกันที่เวลา 9.99 ms
  - ไทริสเตอร์ 4 และ 5 ทำงานพร้อมกันที่เวลา 13.32 ms
  - ไทริสเตอร์ 5 และ 6 ทำงานพร้อมกันที่เวลา 16.65 ms

4.5 ทดลองการทำงานของวงจรเร็กติไฟเออร์โดยใช้โหลดความต้านทาน

ในส่วนนี้จะใช้ออสซิลโลสโคปและใช้สายโพรบแบบ Differential probe เพื่อลดทอนสัญญาณไม่ให้รูปคลื่นสัญญาณที่ออกมาเกินจอของสโคปทำให้อ่านค่าได้ง่ายขึ้น โดยใช้สายโพรบเส้นแรกจับสัญญาณไฟอินพุท AC 50Hz และใช้สายโพรบเส้นที่สองจับสัญญาณเอาท์พุทของโหลดความต้านทาน ซึ่งใช้โหลดเป็นหลอดไฟ 100 วัตต์ และทำการเปลี่ยนค่ามุมในการจุดชนวน SCR ด้วย Volume จะได้สัญญาณรูปคลื่นสามเฟสตามที่ต้องการ

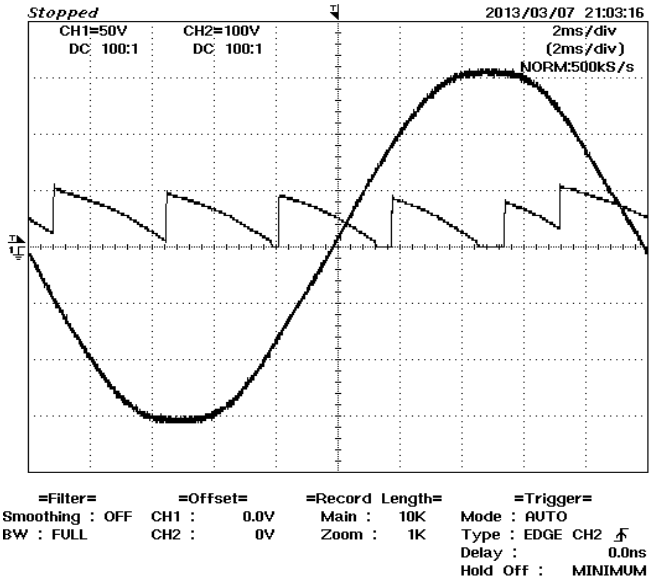


ภาพที่ 4.7 วงจรที่ใช้ทดลองโหลดความต้านทาน



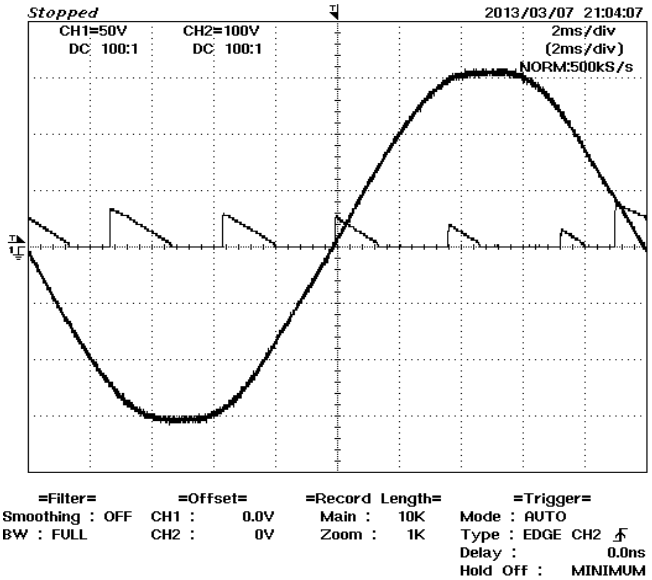
ภาพที่ 4.8 ภาพคลื่นสัญญาณในการจุดชนวนที่มุม 30 องศา

สัญญาณเอาท์พุทดังแสดงในภาพที่ 4.8 เป็นการจุดชนวนที่มุม 30 องศา จะเห็นได้ว่าภาพคลื่นสัญญาณจะเกิดขึ้นทั้งหมด 6 ลูกคลื่นในหนึ่งรูปคลื่นไซน์ และจะลอยอยู่บนเส้นแกน X เนื่องจากเป็นโหลดความต้านทานแต่ในการจุดชนวนที่มุม 30 องศานั้นจะเห็นได้ว่าลูกคลื่นมีการแหว่งไม่เหมือนกับการจุดชนวนที่มุม 0 องศา เนื่องจากลูกคลื่นโดนตัดที่ตำแหน่ง 30 องศา เนื่องมาจากการจุดชนวนที่ 30 องศาของทั้งสามเฟส



ภาพที่ 4.9 ภาพคลื่นสัญญาณในการจุดชนวนที่มุม 60 องศา

สัญญาณเอาท์พุทดังแสดงในภาพที่ 4.9 เป็นการจุดชนวนที่มุม 60 องศา จะเห็นได้ว่าภาพคลื่นสัญญาณจะเกิดขึ้นจะเหมือนกับรูปที่ 4.8 แต่จะมีการแหว่งของลูกคลื่นอย่างเห็นได้ชัดเจนและลูกคลื่นนั้นจะตกเข้าใกล้เส้นแกน X เนื่องจากมีการตัดของรูปคลื่นในมุมการจุดชนวนที่มากขึ้นที่มุมจุดชนวนนี้หลอดไฟจะสว่างปานกลางเนื่องจากมุมจุดชนวนคือ 60 องศา



ภาพที่ 4.10 ภาพคลื่นสัญญาณในการจุดชนวนที่มุม 90 องศา

สัญญาณเอาท์พุทดังแสดงในภาพที่ 4.10 เป็นการจุดชนวนที่มุม 90 องศา จะเห็นได้ว่าภาพคลื่นสัญญาณจะเกิดขึ้นจะเหมือนกับรูปที่ 4.8 และ 4.9 แต่ลูกคลื่นนั้นจะอยู่คาบเส้นแกน X และจะเห็นได้ชัดเจนว่ามีช่องว่างระหว่างลูกคลื่นเนื่องจากมีการตัดของรูปคลื่นในมุมจุดชนวนที่มากขึ้นและเนื่องจากเป็นโหลดความต้านทานจึงทำให้ไม่เห็นลูกคลื่นในส่วนที่อยู่ใต้เส้นแกน X ที่มุมจุดชนวนนี้หลอดไฟจะสว่างน้อยเนื่องจากมุมจุดชนวนเข้าใกล้ 180 องศาโหลดจะทำงานได้ไม่เต็มที่สังเกตจากภาพที่ลูกคลื่นโดนตัดไปมาก

บทที่ 5

สรุปและเสนอแนะ

โครงงานฉบับนี้ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ที่มีการควบคุมมุมจุดชนวนของไทริสเตอร์โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการจุดชนวนไทริสเตอร์และกำหนดมุมจุดชนวน ณ มุมที่เหมาะสมของการนำกระแสของไทริสเตอร์ เพื่อทำให้วงจรสามารถนำไปใช้ควบคุมการถ่ายเทพลังงานของระบบการส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงได้ จากผลการทดลองการกำหนดมุมจุดชนวนมีผลต่อแรงดันที่เอาท์พุท มุมจุดชนวนยิ่งเข้าใกล้ 0 องศาจะทำให้มีพลังงานไฟฟ้าสูงสุด กลับกันถ้ามุมทริกเข้าใกล้ 180 องศาแรงดันจะลดลงจนเป็น 0 ปัญหาที่เกิดขึ้นในการทำโครงการนี้ คือ การต่อระบบกราวด์ของวงจร ซึ่งต้องแยกกันโดยเด็ดขาดระหว่างกราวด์ของวงจรควบคุม และกราวด์ของวงจรไฟฟ้ากำลัง ในการแก้ปัญหานี้ แก้โดยการแยกการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าออกจากกันโดยใช้การหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นตัวแยกการเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้า การแยกการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าโดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้านั้นสามารถนำหม้อแปลงไฟฟ้ามาใช้งานได้เลย โดยเลือกแรงดันที่เหมาะสมกับวงจรที่จะแยกนั้นและเนื่องจาก MCS-51 เป็นตัวควบคุมที่ค่อนข้างจะเก่าไปแล้วสำหรับปัจจุบันนี้จึงทำให้เขียนโปรแกรมออกจะยุ่งยาก การทำงานของตัวชิพประมวลผลได้ช้าทำให้การปรับมุมจุดชนวนเกิดความผิดพลาด ต้องเช็คเฟสที่จะจ่ายให้บอร์ดทดลองก่อนทุกครั้ง ถ้าสลับเฟสรูปคลื่นสัญญาณเอาท์พุทจะออกมาไม่ครบตามที่ต้องการ เนื่องจากไทริสเตอร์บางตัวจะไม่ทำงาน สิ่งที่ต้องระวังเป็นพิเศษคือในงานอิเล็คทรอนิคส์กำลังกับระบบไฟฟ้า 3 เฟสเป็นงานที่มีอันตรายค่อนข้างสูงจึงต้องมีความระมัดระวังมากในทุกขั้นตอน

เอกสารอ้างอิง

[1] ยุทธชัย ศิลปวิจารณ์ “การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบไฟฟ้ากระแสตรง” สาขาวิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี,2554.

[2] นิมิต บุญภิรมย์, “วิชาอิเล็กทรอนิกส์กำลัง” เอกสารประกอบการสอน สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม,2556.

[3] วันชัย จันไกรผล, “วิชาระบบไฟฟ้ากำลัง” เอกสารประกอบการสอน สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม,2556.

[4] ขจร อนุดิตย์ การเขียนโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ด้วยภาษา C

[5] Editor-in-Chief Muhummad H.Rashid “Power electronic handbook” 2007.

ภาคผนวก