บทที่ 1
บทนำ

ปัจจุบันเรานิยมเอาสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ไดโอด (diode) ทรานซิสเตอร์ (transistor) ไทริสเตอร์ (thyristor) ไอซี (ic = integratedcircuits) ต่างๆแม้กระทั่งไมโครโปรเซสเซอร์ (microprocessor) เข้ามาควบคุมกำลังงานขนาดใหญ่ เช่น การควบคุมแรง ดันและกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ควบคุมกระแสและความเร็วของมอเตอร์ขนาดใหญ่ เป็นต้น ในการควบคุมกำลังขนาดใหญ่ที่สำคัญอย่างหนึ่ง คือ การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ซึ่งเป็นที่รู้กันดีว่าวิธีที่ง่ายที่สุด ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรง คือ การใช้การเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้มอเตอร์ ถ้าแรงดันไฟฟ้ามีค่าสูง มอเตอร์จะหมุนเร็ว ถ้าแรงดันไฟฟ้าต่ำ มอเตอร์จะหมุนช้า ซึ่งเราจะทำได้ง่ายๆ ด้วยการเอาตัวความต้านทานที่เปลี่ยนค่าได้แลทนกระแสได้สูง ต่ออนุกรมระหว่างสายจ่ายไฟฟ้ากับมอเตอร์ ตัวความต้านทานนี้นอกจากจะใช้ปรับคว ามเร็วของมอเตอร์แล้ว ยังใช้จำกัดค่ากระแสไฟฟ้า ให้อยู่ในค่าที่ปลอดภัยในตอนมอเตอร์เริ่มหมุนหรือสตาร์ท (start) วิธีการที่ยากกว่าแต่ดีกว่าวิธีที่กล่าวข้างบนนี้ยังมีอีกหลายวิธี ดังเช่น ถ้าเป็นมอเตอร์กระแสตรง จะปรับความเร็วได้ด้วยการเปลี่ยนค่าความต้านทาน ในวงจรฟิลด์ (field) ของมอเตอร์ ถ้าเป็นมอเตอร์เอซีเราจะใช้ปรับค่าความต้านทานของ rotor เข้ามาควบคุมการเปลี่ยนความเร็ว

ดังนั้นเราจะสามารถนำเอา วงจรทางด้านเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ มาทำหน้าที่ ควบคุมความเร็วของมอเตอร์ ควบคุมแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ควบคุมการไหลของ กระแสไฟฟ้า เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นกระแสสลับหรือเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียวให้เป็นกระแสสลับสามเฟส เป็นต้น วิธีเหล่านี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมเครื่องกลไฟฟ้า

ชิ้นส่วนสำคัญในการควบคุมเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้ าขนาดใหญ่ที่เหมาะสมที่สุดในปัจจุบัน คือ ไทริสเตอร์ ซึ่งเป็นสิ่งประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำและทำหน้าที่ปิดวงจรไฟฟ้าเอซีและดีซีได้ด้วยความเหมาะสมและดีกว่าการใช้สวิตซ์ธรรมดาโดยไทริสเตอร์นี้ มีข้อดีที่มีน้ำหนักเบาทำงานไว้ใจได้ดี มีการบำรุงรักษาน้อย อายุการงานยืนย าว มีขนาดเล็ก ทำงานโดยไม่มี เสียงดังรบกวนทนทานต่ออุณหภูมิทำงานได้ที่ระดับความสูงใดๆ สามารถเริ่มเดินเครื่องทันทีทัน ใดได้ประสิทธิภาพสูงและมีราคาต่ำ สามารถใช้ไฟฟ้ากำ ลังน้อยเข้าควบคุมให้ไทริสเตอร์ นำกระแสไฟฟ้าขนาดใหญ่ได้ และไม่มีส่วนใดเคลื่อนไหว จึงไม่พบความยุ่ง ยาก เหมือนสวิตซ์ธรรมดาหรือรีเลย์ (relays) แต่ไทริสเตอร์ก็มีข้อเสียหลายประการคือเมื่อไทริสเตอร์นำกระแสจะมี

แรงดันตกคร่อมในทิศฟอร์เวิร์ด (forward) ประมาณ 1.5 โวลต์ มีขนาดอัตรากำลังจำกัดด้วยความร้อน เนื่องจากในระหว่างที่ ไทริสเตอร์ นำกระแสนั้นจะเกิดความร้อนขึ้นในไทริสเตอร์ ซึ่งต้องการวิธีการระบายความร้อนที่มีประสิทธิภาพ และจะต้องออกแบบวงจรป้องกันไว้ กับการที่อาจมีแรงดันเปลี่ยนแปลงชั่วครู่ นอกจากนี้ไทริสเตอร์สามารถเปิดให้นำกระแสได้ง่าย แต่การทำให้ไทริสเตอร์หยุดนำกระแสเป็นสิ่งที่ยุ่งยาก

หน้าที่โดยตรงของไทริสเตอร์ คือทำหน้าที่เป็นสวิตซ์ปิดเปิดให้กระแสไหลผ่านพร้อมกับเรียงกระแส ให้กระแสไฟฟ้าไหลได้ในทางเดียว แต่เราอาจจัดวงจรให้ทรานซิสเตอร์ทำหน้าที่ได้คล้ายกับไทริสเตอร์ โดยที่ไทริสเตอร์และทรานซิสเตอร์เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางสารกึ่งตัวนำทั้งคู่ ไม่มีส่วนใดเคลื่อนไหวเลย มีน้ำหนักน้อย มีปริมาตรเล็กมากสะดวกในการติดตั้ง และมีเวลาในการปิดให้กระแสหยุดไหลเร็วกว่าสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้ทำสวิตซ์หลายแบบ ซึ่งทำให้เรานิยมใช้ไทริสเตอร์ทำหน้าที่สวิตซ์ แต่ถึงกระนั้น ไทริสเตอร์มีข้อเสียสองประการเมื่อเทียบกับทรานซิสเตอร์ คือมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมไทริสเตอร์ประมาณ 1.5 โวลต์ ซึ่งสูงกว่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมทรานซิสเตอร์ (ซึ่งมีค่าประมาณ 25 มิลลิโวลต์) และต้องการวงจรในการปิดให้กระแสหยุดไหลแต่ทรานซิสเตอร์ไม่ต้องการวงจรนี้ แต่ขณะเปิดให้กระแสไหล ไทริสเตอร์ต้องการกระแสพัลส์ (pulse) ป้อนเข้าเกท (gate) ขณะที่ทรานซิสเตอร์ต้องการกระแสเบส (base) ที่ไหลต่อเนื่อง ไทริสเตอร์จะยังมีข้อดีที่สำคัญมากคือ มีอัตราแรงดันสูงและมีอัตรากระแสสูงมากทำให้สามารถใช้ควบคุมกำลังฟ้าสูงๆ มากได้ ซึ่งเราอาจนำไทริสเตอร์ไปใช้ควบคุมกำลังไฟฟ้าจากขนาดมิลลิวัตต์ถึงเมกะวัตต์ ทำให้เรานิยมใช้ไทริสเตอร์กันมากในการควบคุมกำลังไฟฟ้าขนาดใหญ่ ในกรณีเช่นนี้ทรานซิสเตอร์ไม่มีทางที่จะแข่งขันได้

รีเลย์ก็เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่ทำหน้าที่ปิดเปิดกระแสไฟฟ้าแต่ไม่ทำหน้าที่เรียงกระแส แต่ก็สามารถจัดวงจรให้ทำหน้าที่ควบคุมมอเตอร์หรือควบคุมแรงดัน แต่รีเลย์มีข้อเสีย คือ มีชิ้ นส่วนเคลื่อนไหวอยู่เสมอ ตรงปุ่มที่แตะกันจะเด้งได้ ทำให้มีการสึกหรอมีความสามารถให้กระแสไหลผ่านได้ไม่สูงและมีกำลังไฟฟ้าต่ำเนื่องจากค่าเหนี่ยวนำของขดลวดของรีเลย์ทำให้ปิดเปิดไม่เร็วพอ และทำให้มีเวลาแตกต่างระหว่างอินพุต (input) กับเอาต์พุต (output) เพราะฉะนั้นเว ลาของการสวิตชิ่ง (switching) จึงช้าอยู่ในพิสัยของมิลลิวินาที ดังนั้นทำให้รีเลย์มีความสำคัญน้อยลงและเรานิยมใช้ไทริสเตอร์เข้าทำหน้าที่แทน

โดยเหตุผลต่างๆ ที่กล่าวข้างบนนี้ ทำให้ไทริสเตอร์มีบทบาทสำคัญและเป็นที่นิยมมากกว่าสิ่งประดิษฐ์อื่นๆ ในการใช้เป็นสวิตซ์สถ านะของแข็ง (solid state switch) ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญในการควบคุมมอเตอร์และกำลังไฟฟ้าขนาดใหญ่

1.1 ความสำคัญของปัญหา

1.1.1 ทำให้มีแหล่งจ่ายกระแสตรงแรงสูงแบบปรับค่าแรงดันได้ถึง 0-540 V ไว้ใช้งาน

1.1.2 กระแสจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลง หรือกระแสจะลดลงเมื่อโหลดเพิ่มขึ้น

1.1.3 พัฒนาการใช้อุปกรณ์ SCR (Solid state , Thyristor) กับงาน Converter

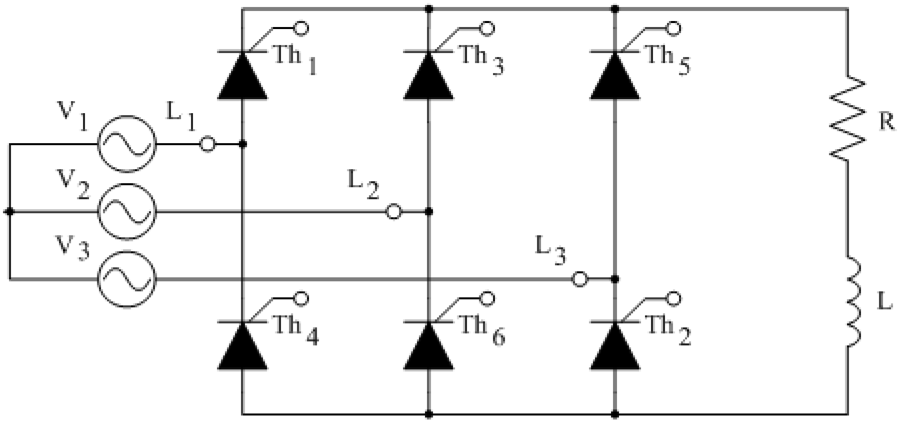
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1.3.1 สร้างวงจร AC-DC Converter โดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส

1.3.2 สร้างอุปกรณ์ที่ได้นำไปประยุกต์กับภาระ (Load) ที่แรงดันสูงกว่า 310 Vdc

1.3.3 สามารถออกแบบแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงที่มีแรงดันสูงโดยใช้แหล่งจ่าย 3 เฟส

1.3 โครงสร้างของโครงงาน



ภาพที่ 1.1 วงจรการทำงานของโครงงาน

1.4 ขอบเขตของโครงงาน

1.4.1 สร้าง Converter AC-DC 3 เฟส ขนาดไม่เกิน 2KW 0-540 V

1.4.2 สร้างวงจรจุดชนวนควบคุม Thyrister 6 ชุด

1.4.3 ภาระ (Load) ทดสอบขนาด 1.5 KW ที่ประกอบด้วยหลอดไฟ

1.5ประโยชน์ของโครงงาน

1.5.1 จ่ายแรงดันไฟฟ้า DC ได้จาก 0-540 V

1.5.2 อำนวยความสะดวก ในการใช้งานของผู้ที่ต้องการใช้ไฟฟ้ากระแสตรงตามสถาน ที่ต่างๆ

1.5.3 สามารถนำไปใช้เกี่ยวกับการควบคุมอุปกรณ์ที่ใช้แรงดันไฟฟ้า DC ได้

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไทริสเตอร์ [1]

ไทริสเตอร์ (หรือ SCR ซึ่งย่อมาจาก Semiconductor Controlled Rectifiers) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ได้ผลิตและใช้งานมาตั้งแต่ปี ค.ศ 1957 ดังนั้น จึงนับได้ว่า เก่าแก่มากตัวหนึ่ง และนอกจากนี้ ยังเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ชนิดโซลิดสเตต ที่สามารถใช้งานกับกำลังสูงๆ และมีโครงสร้างเป็นแบบ 4 ชั้น สำหรับการนำกระแส สามารถกระทำได้ ด้วยการควบคุมที่ขั้วเกต และเมื่อกระแสที่ไหลมีค่าสูงพอ ก็จะทำให้ไทริสเตอร์สามารถแลตซ์ได้ แต่เมื่อกระแสแอโนดไหลถึงค่าแลตซ์แล้ว ไทริสเตอร์จะไม่สามารถหยุดนำได้ด้วยเกต ดังนั้นการนำไปใช้งานกับกำลังสูงๆ ของอุปกรณ์นี้ วิศวกร หรือนักออกแบบ จะต้องมีพื้นความรู้ และความชำนาญที่ดีพอ จึงจะสามารถขับอุปกรณ์ดังกล่าว ให้นำและหยุดนำได้ดี และควรมีวงจรสนับเบอร์ป้องกันด้วย ดังจะได้อธิบายต่อไป

2.2 โครงสร้างเบื้องต้นของไทริสเตอร์

ไทริสเตอร์ ได้แสดงถึงโครงสร้างการโดป โดยได้โดปสลับชนิดกันระหว่าง p กับ n รวมเป็น 4 ชั้น รวมทั้งขนาดของความกว้าง โดยประมาณด้วย ถ้าเป็นไทริสเตอร์กำลัง สูงๆ อาจต้องใช้แผ่นซิลิกอนที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางถึง 10 เซนติเมตร สำหรับโครงสร้างเกต- แคโทด มี 2 รูปแบบ คือ โครงสร้างแบบแจกแจง (Distribute Gate) นิยมผลิตเป็นไทริสเตอร์ขนาดใหญ่ (เส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ 10 เซนติเมตร) อีกรูปแบบได้แก่ โครงสร้างเกตแบบอิเล็กโ ทรด นิยมผลิตเป็นไทริสเตอร์ขนาดเล็กสำหรับการขึ้นรูปเกตและแคโทดโดยทั่วๆ ไป สามารุกระทำได้หลากหลาย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของไทริสเตอร์ ความสามารถในการเพิ่มอัตรา di/ dt ตลอดจนความเร็วในการสวิตช์ ซึ่งได้จาการนำสัญลักษณ์ ของไดโอด มาเพิ่มขั้วที่ 3 ซึ่งเป็นเกต เพื่ อทำหน้าที่ควบคุมแรงดันและกระแส

โครงสร้างที่แสดงด้วยภาพตัดขวางแนวตั้งของไทริสเตอร์ นั้น จะได้คล้ายกับทรานซิสเตอร์กำลังมาก (การแสดงทั้งความหนาแน่นของพาหนะที่โดปและความกว้างของแต่ละ

ชั้น) คือ แคโทดและเกตของไทริสเตอร์จะคล้ายกับอีมิตเตอร์และเบสของทรานซิสเตอร์ต ามลำดับ สำหรับการหยุดนำของไทริสเตอร์กำลัง บริเวณ n นี้ ได้แก่บริเวณ n ในคอลเล็กเตอร์ นั้นเอง

2.3 การทำงานของไทริสเตอร์

2.3.1 การนำกระแส

กระแสแอโนด I_A จะมีค่าสูงขึ้น และเมื่อผลนั้นเกิดขึ้น ไทริสเตอร์จะถึงจุดเริ่มทลาย (Breakover) สุดท้าย เป็นผลทำให้การทำงา นของไทริสเตอร์ เข้าสู่สถานะความต้านทานเป็นลบ พร้อมกับได้อัตราขยายกระแส β ของทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัว มีค่ามากกว่า 1 และในขณะที่กำลังทำงานในบริเวณการเป็นลบ สถานะนี้คงจะไม่คงที่ เนื่องจาก ทรานซิสเตอร์ทั้งสอง ได้มีการต่อแบบวกกลับ (ป้อนแบบวกกลับ) การทำงานในช่วงนี้ จึงเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เพื่อทำให้ไทริสเตอร์ทำงานเข้าสู่การนำอย่างถาวร จากการสัมประสิทธิ์การถ่ายโอน α ตามข้างบน จะเห็นได้ว่า ถ้าหากค่านี้มีค่ามากขึ้น เป็นผลทำให้สถานะกั้นแรงดันไบแอสไปหน้า หรือ VBO ลดลง

กลไกสำคัญที่ทำให้ α เพิ่มขึ้นได้ คือ การเพิ่มค่าแรงดันแอโนด- แคโทด เพราะ เมื่อแรงดันดังกล่าวนี้เพิ่มขึ้น จะทำให้บริเวณปลอดประจุของรอยต่อ J_2 เคลื่อนที่มุ่งไปยังชั้น n_1 พร้อมกับเป็นผลทำให้ความกว้างเบสของทรานซิสเตอร์ $p_1n_1p_2$ มีค่าน้อยลง ดังนั้น ค่า α pnp จึงเพิ่มขึ้นในทำนองเดียวกัน ชั้นปลอดประจุรอยต่อ J_2 ได้มุ่งขยายไปชั้น p_2 (บริเวณเบสของทรานซิสเตอร์ npn) ด้วย จึงทำให้ α npn เพิ่มขึ้นได้เช่นกัน

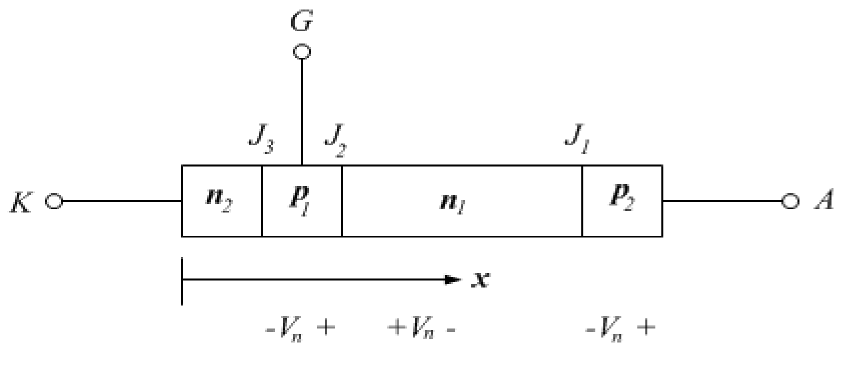
จากการป้อนกระแสเบสให้กับทรานซิสเตอร์กำลังชนิด npn และ pnp ที่ได้มีการป้อนกลับแบบบวกจะเห็นว่า กระแสเบสดังกล่าว ก็คือกระแสเกตของไทริสเตอร์นั่นเอง ซึ่งถ้าหากกระแสเกตค่าบวกมีค่าเพียงพอดังนั้น จำนวนอิเล็กตรอนในไทริสเตอร์ ก็สามารถฉีดข้ามรอยต่อ J_3 (ซึ่งถูกไบแอสไปหน้า) ไปยังชั้นเบส p_2 ของทรานซิสเตอร์ npn ได้ และอิเล็กตรอนดังกล่าว ยังสามารถแพร่กระจายข้ามเบส p_2 และรอยต่อ J_2 ไปยังชั้นเบส n_1 ของทรานซิสเตอร์ pnp ได้อีกด้วยอิเล็กตร อนในชั้น n_1 เหล่านี้ ได้ทำให้เกิดผล 2 อย่าง ในเวลาเดียวกัน คือ

1. ความกว้างของชั้นปลอดประจุของรอยต่อ J_2 มีค่ามากขึ้น เพราะประจุอวกาศค่าบวกที่เกิดจากการไอออนของตัวให้ ได้ไปทดแทนประจุอวกาศค่าลบของอิเล็กตรอนให้มีค่าเท่ากัน และความกว้างของชั้นปลอดประจุดังกล่าวนั้น ยังขยายต่อไปยังชั้น n_1 จึงเป็นผลทำให้ความกว้างของเบสทรานซิสเตอร์ pnp ลดลง ดังนั้น α pnp มีค่าสูงขึ้น

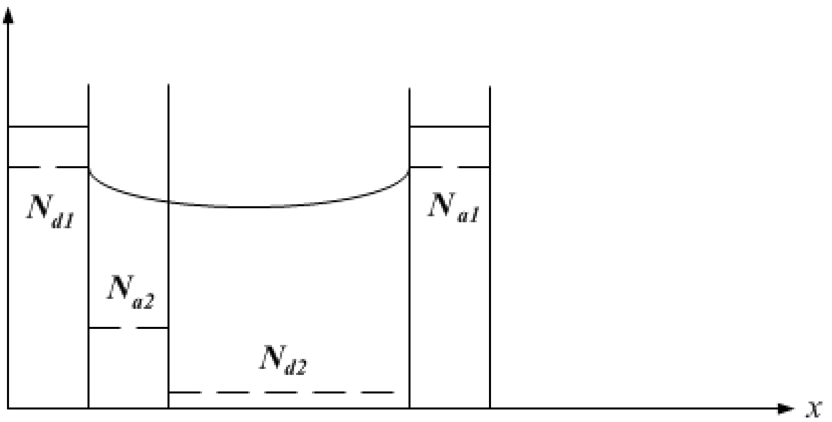
2. พาหะข้างมาก (อิเล็กตรอน) ที่ได้ฉีดเข้าไปยังเบสของทรานซิสเตอร์ pnp นี้ ได้เป็นสาเหตุทำให้โฮลถูกฉีดไปยังชั้นเบสด้วย (เพื่อรักษาประจุอวกาศ มีสภาพเป็นกลาง) โดยผ่านรอยต่อเบสอีมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ pnp (รอยต่อ p_1n_1) และโฮลที่ฉีดนั้นยังแพร่กระจายข้ามเบส และบริเวณปลอดประจุรอยต่อ J_2 ของทรานซิสเตอร์กำลัง npn มากขึ้น (เพราะประจุอวกาศบวกของโฮลได้ไปกระแทกกับอิเล็กตรอนในชั้น n_2) พร้อมกับเกิดปฏิกิริยาการวกกลับ และได้ทำให้ไทริสเตอร์เข้าสู่สถานะนำ โดยกระแสจะไหลระหว่างแอโนดและแคโทดเป็นจำนวนมาก พร้อมกับฉีดเข้าในเบสด้วยจำนวนที่ทำให้ทรานซิสเตอร์กำลังอิ่มตัวได้ โดยปราศจากกระแสเกตป้อน และนี้คือปฏิกิริยาการเริ่มต้นของการแลตซ์ของไทริสเตอร์นั่นเอง

2.3.2 การทำงานของสถานการณ์นำ

ในขณะนำกระแส การฉีดพาหะข้างน้อย ได้เกิดขึ้นในทรานซิสเตอร์ทั้ง 4 ชั้น อย่างรุนแรง ดังแสดงในภาพการกระจายของประจุสะสมใน 4 ชั้น ตามภาพที่ 2.1 โดยรอยต่อ J_2 ถูกไบแอสย้อนกลับและในขณะเดียวกัน



ความหนาแน่นนองพาหะรวม



ภาพที่ 2.1 การแพร่กระจายของพาหะขณะนำกระแสในไทริสเตอร์

ทรานซิสเตอร์ในวงจรสมมูลเกิดการอิ่มตัว ในสภาพเช่นนี้กระแสไบแอสไปหน้า จะไหลเป็นจำนวนมาก พร้อมการทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมไบแอสไปหน้า จำนวนเล็กน้อย เนื่องจากการมอดุเลตความนำจำเพาะ เกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ดังรูปการกระจายของประจุสะสมใน ภาพ ที่ 2.1 สำหรับแรงดันขณะนำกระแสโดยประมาณ สามารถคำนวณได้จากสมการข้างล่างนี้

$$V_{AK(on)} = V_{J1} - V_{J2} + V_{J3} + V_n \quad (2.1)$$

ซึ่ง V_{J3} แทน แรงดันไบแอสไปหน้าของรอยต่อ (ประมาณ 0.7 – 0.9 โวลต์) V_{n-} แทนแรงดันดันตกคร่อมบริเวณ n มีค่า 10-40 โวลต์และจะไม่ขึ้ นกับกระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์นี้ สามารถคำนวณได้โดยประมาณ สำหรับแรงดัน $V_{AK(on)}$ ในสมการที่ (2.1) จะได้คล้ายกับแรงดันขณะนำของไดโอดและขณะที่ความหนาแน่นของแระแสมีค่ามาก แรงดันขณะนำนี้จะเพิ่มขึ้นตาม ทั้งนี้เนื่องจากการรวมตัวใหม่และการเคลื่อนง่ายมีค่าลดลง ดังได้อธิบายมาแล้วรวมทั้งผลที่เกิดขึ้นจากค่าความต้านทานโอห์มมิกประสิตด้วย และผลดังกล่าวทั้งหมดนี้ คือ ความต้านทานขณะนำ

2.3.3 ขบวนการหยุดนำ

การจะหยุดนำกระแสของไทริสเตอร์ ด้วยการตัดแหล่งจ่ายป้อนเกต ในขณะที่ไทริสเตอร์นั้นกำลังนำกระแสในช่วงแลตซ์ (Latch) ไม่สามารถทำได้ นอกจากจะต้องใช้วงจรภายนอกมาช่วยลดกระแสแอโนดให้ต่ำกว่ากระแสคงไว้ ภายในระยะเวลาที่ได้กำหนดไว้ในเอกสารคู่มือ เท่านั้น เพราะในระหว่างเวลาดังกล่าวนี้ การทำงานของทรานซิสเตอร์ในวงจรสมมูลได้ถูกดึงดูดให้ออก

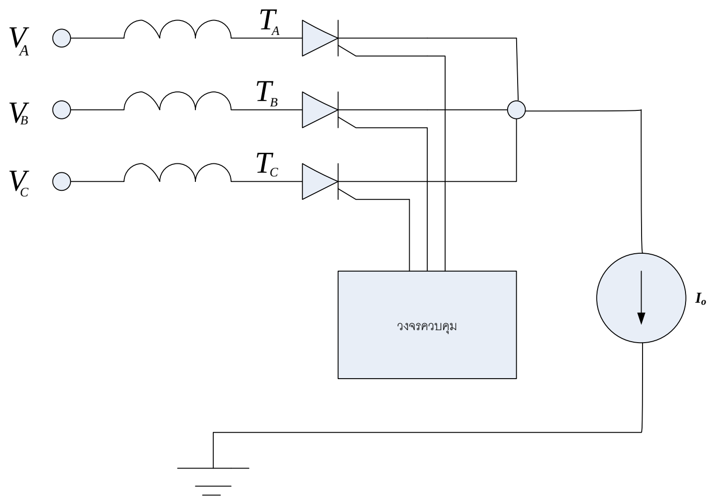
จากจุดอิ่มตัว มายังบริเวณไวงาน สุดท้ายจะตัดการไหลของกร ะแสป้อนกลับของทรานซิสเตอร์ใน วงจรสมมูลไทริสเตอร์ให้หยุดนำได้

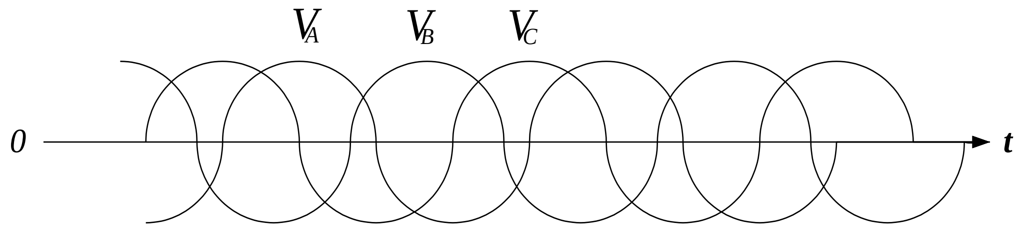
ปกติ กระแสเกตค่าลบไม่สามารถทำให้ไทริสเตอร์หยุดนำกระแสได้ เพราะว่า พื้นที่ บริเวณ แคโทดโตกว่าพื้นที่เกต และการเกิดไบแอสย้อนกลับของรอยต่อเกตแคโทด (เบส -อีมีตเตอร์ของ ทรานซิสเตอร์ npn) ที่มีสาเหตุมาจากกระแสเกตค่าลบ สามารถเกิดขึ้นได้เพียงบางส่วนเท่านั้น ดัง แสดงในภาพที่ 2.5 หลังจากนั้นแรงดันตกคร่อมด้านข้างของบริเวณ p_2 ได้ผลักดันให้กระแสคราว ลิงค์ไหลไปยังจุดศูนย์กลางของแคโทดเป็นจำนวนมาก เหมือนกับกระแสอีมิเตอร์คราวดิงส์ที่ เกิดขึ้นในทรานซิสเตอร์กำลังขณะหยุดนำกระแส จึงทำให้กระแสแอโนดไหลผ่านจุดศูนย์กลาง แคโทดมากขึ้น พร้อมกับยังรักษาให้รอยต่อ เกต-แคโทด ถูกไบแอสไปหน้าต่อไป พร้อมกับทำลาย กระแสเกตค่าลบที่ป้อนเข้ามาให้หมดไปด้วย

2.4 คุณลักษณะการสวิตซ์

2.4.1 ทรานเซียนต์ขณะนำกระแสและการควบคุม di/dt ให้มีค่าภายในกำหนด

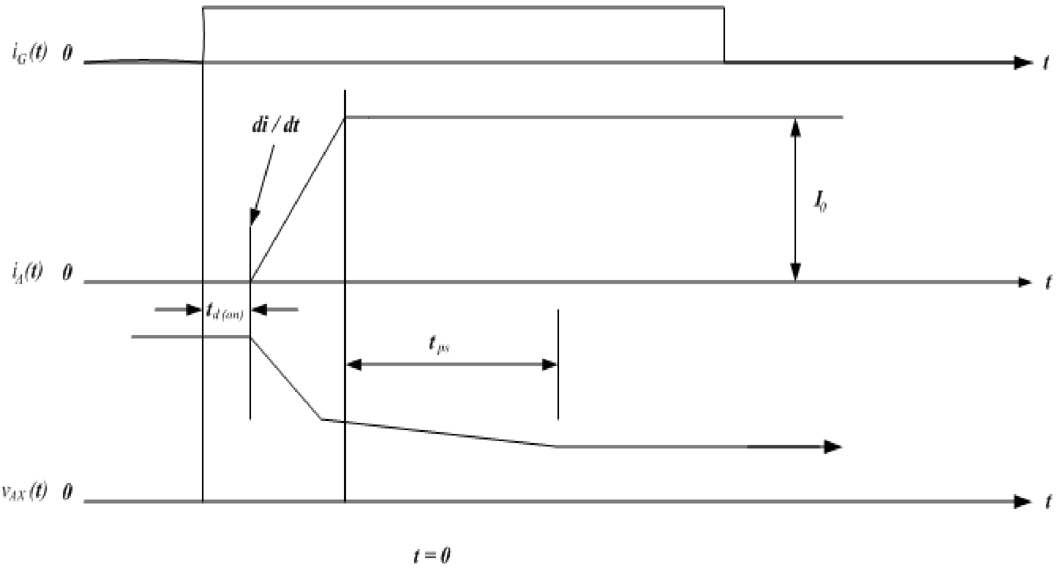
ทรานเซียนต์การสวิตซ์ของไทริสเตอร์ สามารถเข้าใจง่าย ถ้าหากนำวงจรตาม ภาพ ที่ 2.2 มา พิจารณา ซึ่งเป็นวงจรควบคุมการเรียงกระแสแบบหลายเฟสอย่างง่าย นั่นเอง และการนำกระแสของ ไทริสเตอร์แต่ละตัว จะสำเร็จได้ต้องป้อนกระแสเกตเป็นรูปคลื่นพัลส์ด้วยขนาด ตามที่ได้กำหนดไว้ กับเกตดังภาพที่ 2.3 และถ้ากระแสเกตได้เริ่มต้นป้อนให้กับไทริสเตอร์ T_A ในภาพที่ 2.2 ที่เวลา t_0 ดังนั้น แรงดันเฟส A ที่เวลา t_0 นี้จะต้องมีค่ามากกว่า 2 เฟส ที่เหลือ สำหรับผลลัพธ์ของรูปคลื่น กระแสแอโนด และแรงดันแอโนด-แคโทด จะได้ตามภาพที่ 2.3 โดยกระแสแอโนด จะเพิ่มขึ้นด้ วย อัตราพิกัด di_F / dt อย่างคงที่ได้ ถ้าหากวงจรนี้ถูกกระทำจากวงจร





ภาพที่ 2.2 วงจรควบคุมการเรียงกระแส แบบหลายเฟส

โดยใช้ไทริสเตอร์ภายนอก เช่น ค่าการเหนี่ยวนำประปรายของวงจร หรือ เนื่องจาก เวลาการสวิตซ์ของอุปกรณ์กำลังตัวอื่นๆ สำหรับช่วงเวลาการสวิตซ์ ใดๆ สามารถกำหนดรวมกันได้ 3 ช่วง คือ เวลาหน่วงการนำกระแส หรือ $t_{d\,(on)}$ เวลาช่วงขึ้น หรือ t_1 และเวลาการแพร่ของพลาสมา หรือ t_{ps}



ภาพที่ 2.3 ภาพคลื่นแรงดันและกระแสระหว่างการนำกระแส

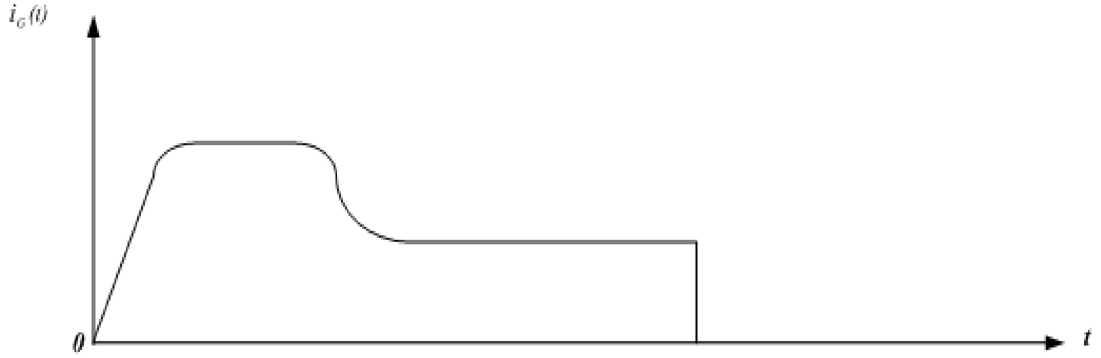
2.4.2 ทรานเซียนต์ขณะหยุดนำกระแส

การหยุดนำของไทริสเตอร์ จำเป็นต้องทำให้ไทริสเตอร์ตัวนั้น ถูกไบแอสย้อนกลับจากวงจร ภายนอกในเวลาที่สิ้นก่อน เช่น การหยุดนำกระแสของไทริสเตอร์ T_A ในภาพที่ 2.2 ซึ่งเกิดขึ้นได้เมื่อไทริสเตอร์ T_B ต้องนำกระแสก่อน โดย T_B จะนำกระแสได้เมื่อแรงดันในเฟส B มีค่ามากกว่าเฟส A พร้อมกับ ทำให้ไทริสเตอร์ T_A ถูกไบแอสย้อนกลับและหยุดนำกระแสได้และในไม่ช้าไทริสเตอร์ T_B ก็จะนำกระแสได้เต็มรูปแบบการนำข้อสังเกต จะเห็นได้ว่า ช่วงเวลาการนำกระแสของไทริสเตอร์ จะสั้นกว่าช่วงเวลาหยุดนำกระแส

อย่างไรก็ตาม กระแสจะไม่สลับการไหลจากไทริสเตอร์ T_A เป็น T_B ทันทีทันใด แต่จะสลับหลังจากเวลาการนำกระแสได้ถูกยืดออกไป ดังแสดงใน ภาพ ที่ 2.5 ซึ่งเป็นรูปคลื่นของไทริสเตอร์ T_A ที่เกิดจากผลของวงจรภายนอก แล้วทำให้กระแสไทริสเตอร์ T_A นี้ เริ่มลดค่าลงที่เวล า $t = 0$ ด้วยอัตราพิกัด di_R / dt ที่คงที่ และวิธีการหยุดนำ จะได้คล้ายกับการหยุดนำกระแสของไดโอดขณะที่กระแสลดลง พาหะในส่วนที่เพิ่มขึ้นในบริเวณทั้ง 4 ชั้นของไทริสเตอร์ก็ได้ลดลงจากค่านี้ด้วย ดังการแพร่กระจายพาหะในภาพที่ 2.1

ในขณะที่เวลายังคงดำเนินต่อไป การไหลข องกระแส ก็ได้ลดลงอย่างต่อเนื่อง และผ่านจุดตัดศูนย์ที่เวลาที่ t_1 แล้วมุ่งสู่ค่าลบ ดังแสดงใน ภาพ ที่ 2.4 ในขณะนี้ แรงดันคร่อมไทริสเตอร์ได้ลดลงเหลือเพียงเล็กน้อยจนกระทั่งรอยต่อ J_1 หรือ J_3 ได้ถูกไบแอสย้อนกลับ (การไบแอสย้อนกลับ

จะยังไม่เกิดขึ้นทันใด จนกว่าค่าความหนาแน่นของพาหะในส่วนที่เพิ่มตรงรอยต่อ ลดลงเป็นศูนย์) โดยปกติรอยต่อ J_3 จะถูกไบแอสย้อนกลับก่อนเวลา t_2 ดังแสดงใน ภาพ ที่ 2.5 หลังจากนั้น อาจเข้าสู่สถานการณ์เบรกดาวน์อะวาลานซ์ได้ เมื่อแรงดันแอโนด-แคโทดมีค่าเป็นลบมากขึ้น เพราะในชั้น n_2 และ p_2 ได้มีการโดปอย่างมาก จึงทำให้ความสามารถในการปิดกั้นแรงดันย้อนกลับของรอยต่อนี้มีค่าไม่มากพอ (เฉลี่ยประมาณ 20-30 โวลต์)



ภาพที่ 2.4 การป้อนกระแสเกตด้วยค่าเริ่มต้นมากๆ เพื่อเพิ่มพื้นที่เริ่มต้นการนำ ของไทริสเตอร์ให้มีค่ามากตามสุดท้าย ลดเวลาในการนำกระแสได้

เนื่องจากการกระจายของพาหะในส่วนที่เพิ่มในไทริสเตอร์ ได้สิ้นสุดลงที่เวลา t_2 จึงทำให้กระแสค่าลบนี้ไม่มีพาหะในส่วนที่เพิ่มคอยสนับสนุน ดังนั้น กระแสค่าลบที่เวลา t_2 จึงเกิดเป็นค่ายอดสูงสุด หรือกระแส Irr หลังจากนั้น (หลัง t_2)กระแสค่าลบนี้ก็จะถดถอยไปสู่ศูนย์ในขณะเดียวกัน (ที่เวลา t_2) เมื่อพาหะในส่วนที่เพิ่มในรอยต่อ J_3 มีค่าลดลงเป็นศูนย์รอยต่อนี้ ก็จะกลับสู่สภาพย้อนกลับ พร้อมกับทำให้แรงดันแอโนด (–) แคโทดเริ่มต้นเกิดค่าลบขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งค่าพุ่งสูงด้วนค่าเท่ากับ $V_{REV} = V_B - V_A$

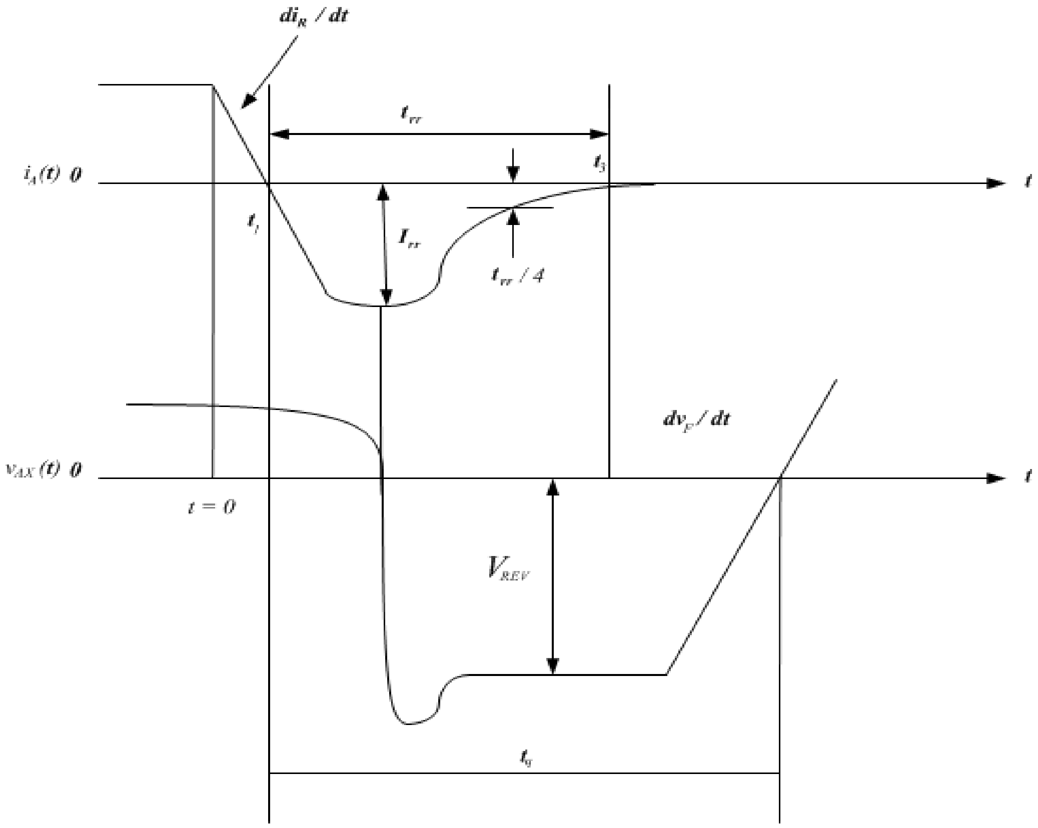
พร้อมกับเป็นผลไปกระทำกับไทริสเตอร์ T_A ละสำหรับแรงดันที่พุ่งสูงเกิดขึ้นเนื่องจากการเหนี่ยวนำของกระแสแอโนดที่ได้ถดถอยจาก Irr ไปสู่ศูนย์อย่างรวดเร็ว เหมือนกับที่ได้อธิบายมาแล้ว ในไดโอดกำลัง

2.4.3 เวลาหยุดนำกระแสและการควบคุมอัตรา dV_F / dt ให้มีค่าภายในกำหนด

ในกรณีที่เป็นไดโอดกำลัง คาบทรานเซียนต์ของการฟื้นตัวย้อนกลับ ได้ถูกกำหนดให้มีค่าตั้งแต่เริ่มต้นย้อนกลับ ไปจนกระทั่งถึงค่าที่ได้ลดลงเหลือ เท่ากับ Irr/4 หรือ Irr/10 หรือช่วงเวลา t_3

ยังคงมีค่าหลงเหลืออยู่ภายในบริเวณ n_1 และ p_2 ของไทริสเตอร์ ซึ่งถ้าหากแรงดันไบแอสไปหน้าถูกป้อนเข้ามาให้กับไทริสเตอร์ด้วยพิกัด dV_F/dt ที่ได้กำหนดไว้ในเอกสารคู่มือ อีกครั้ง ดังแสดงในภาพที่ 2.6 ดังนั้น พัลส์การถดถอยของกระแสไปหน้าที่เกิดการกระแสฟื้นตัวไปหน้าจะไหลได้ ถ้าหากพาหะในส่วนที่เพิ่มยังคงมีค่าดังได้กล่าวมาแล้ว และทันใดนั้น ก็จะเกิดการรวมตัวกันใหม่ภายในอีกครั้ง พร้อมกับถูกกวาดออกไปด้วยแรงดันไบแอสไปหน้าที่ได้เพิ่มขึ้นนี้

พัลส์กระแสฟื้นตัวไปหน้า อาจมีผลคล้ายกับการนเกตด้วยรูปคลื่นพัลส์ คือ ถ้ากระแสฟื้นตัวไปหน้ามีค่ามากพอ อาจทำให้ไทริสเตอร์ สามารถนำกระแสโดยไม่ได้ตั้งใจได้ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อกระแสฟื้นตัวไปหน้ามีค่ามากขึ้น จะเป็นผลทำให้กระแสค่ายอดฟื้นตัวไปหน้า มีค่ามากขึ้นตาม สำหรับการป้องกันไม่ให้เกิดการนำกระแสโดยไม่ตั้งใจนี้ สามารถทำได้ 2 ประการ คือ

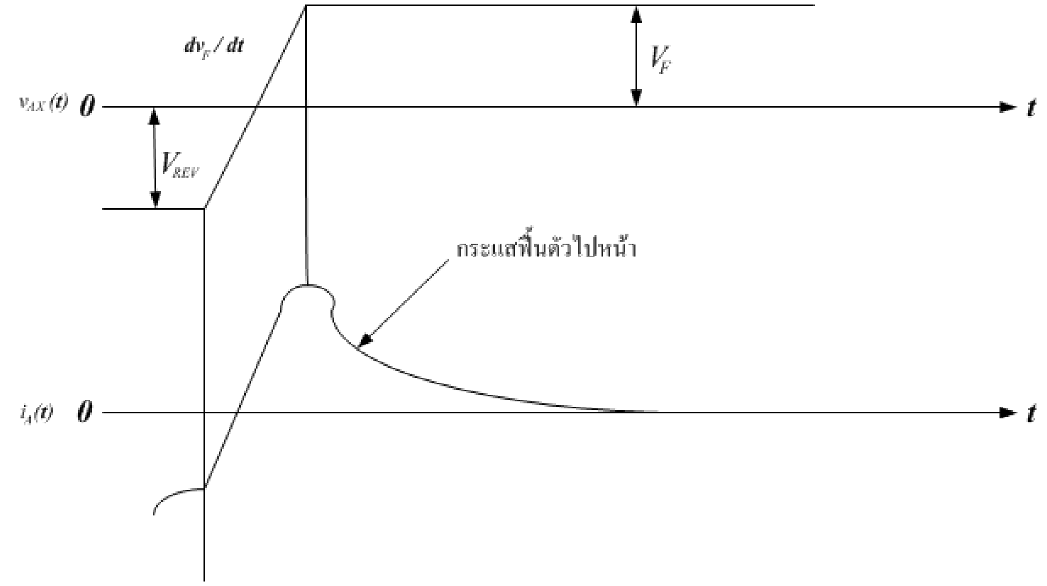


ภาพที่ 2.5 ภาพคลื่นแรงดันและกระแสไทริสเตอร์ ระหว่างการหยุดนำกระแส

โดยแรงดันกั้นไปหน้าต้องไม่ตกคร่อมไทริสเตอร์ก่อน จนกว่าจะถึ งเวลาการฟื้นตัว หรือ t_q ที่ได้กำหนด และอัตราพิกัดของการเพิ่มขึ้นของแรงดันไปหน้า หรือ dV_F / dt ต้องตั้งค่าไว้ให้ต่ำกว่าค่าที่ได้กำหนดไว้ในเอกสารคู่มือ

1. เวลาที่ไทริสเตอร์กำลังปิดกั้น แรงดันย้อยกลับต้องมีค่ามากกว่าเวลาที่ t_3 ด้วยเหตุนี้เอง บริษัทผู้ผลิต จึงต้องมีการกำหนดเวลาดังกล่าวนี้ ด้วยค่า t_q ใดๆ และเป็นเวลาต่ำสุดที่ไทริสเตอร์นั้นควรอยู่ในสถานะปิดกั้นก่อน ที่แรงดันไปหน้าจะถูกป้อนอีกครั้ง

2. อัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดันไปหน้าในครั้งต่อไป ควรมี ค่าต่ำกว่าบริษัทผู้ผลิตระบุไว้ ปกติอัตรา dV_F/dt นี้ จะเป็นข้อมู ลสำคัญที่ทำให้เกิดกระแสไหลทะลุบริเวณปลอดประจุ (ซึ่งเปรียบเสมือนเป็นตัวเก็บประจุ) ในบริเวณรอยต่อ J_2 ถ้ากระแสนี้ [ความจริง ก็คือกระแสที่เกิดจาก C_{J2} (dV_F / dt) มีค่ามากกว่ากระแสจุดเริ่มทลาย I_{BO} ไทริสเตอร์อาจนำกระแสได้ ดังนั้น อัตรา dV_F/dt จึงต้องกำหนดให้น้อยกว่าค่าตามสมการข้างล่าง]



ภาพที่ 2.6 ผลของกระแสฟื้นตัวไปหน้า ที่เกิดจากการป้อนแรงดันไปหน้า จะไปตกคร่อมไทริสเตอร์อีกครั้ง ก่อนเวลาฟื้นตัวที่ได้กำหนดไว้ ดังนั้น ถ้าหากกระแสฟื้นตัวไปหน้ามีค่ามากเกินไป อาจเป็นผลทำให้ไทริสเตอร์นำกระแสได้

$$\left[\frac{dV_F}{dt}\right]_{\max} < \frac{I_{BO}}{C_{J2}} \qquad (2.2)$$

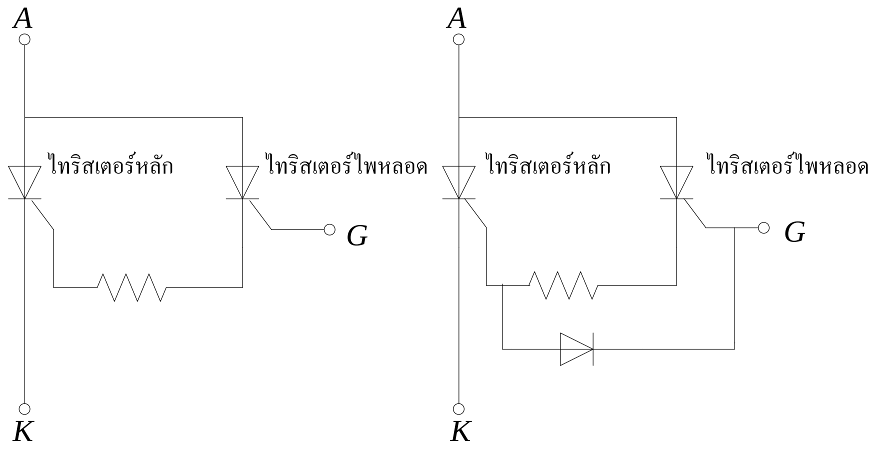
เมื่อ dV_F / dt มีค่าสูงสุด อาจมีค่าตั้งแต่ 100 โวลต์ต่อไมโครวินาที ซึ่งจะเหมาะสมกับการนำไปใช้งานในความถี่ต่ำ ได้แก่ การควบคุมเฟส ไปจนเป็น 1,000 โวลต์ / ไมโครวินาที หรือถ้ามีค่ามากกว่านี้ ก็จะเหมาะสมกับวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง

2.5 การควบคุมอัตรา di / dt และ dV_F / dt

2.5.1 การควบคุมอัตรา di / dt

การทำให้อัตรา di/dt มีค่าภายใต้ข้อกำหนด สามารถทำได้ด้วยการเพิ่มพื้นที่การนำแคโทดขณะเริ่มต้นนำกระแสให้มีค่ามากขึ้น และการเพิ่มพื้นที่การนำแคโทดให้มากขึ้น สามารถทำ ได้ด้วยการเพิ่มกระแสเกตให้กับไทริสเตอร์ และเคยกล่าวมาแล้ว สำหรับวงจรเกตที่ป้อนด้วยกระแสสูงๆ จะไม่เป็นที่นิยม แต่จะมีวิธีหนึ่ง ซึ่งเป็นที่นิยมและดีมาก คือการใช้ไทริสเตอร์ไพลอตเป็นตัวป้อนกระแสสูงๆ ดังแสดงในภาพที่ 2.7 โดยโครงสร้างของไทริสเตอร์ไพลอตนั้นยังเป็นซิ ลิกอนแบบแผ่นบาง เช่นเดียวกับไทริสเตอร์หลัก

การพัฒนารูปแบบไทริสเตอร์ให้ทำงานได้เร็วขึ้น สามารถทำได้ ด้วยการแก้ไข ที่โครงสร้างเกต – แคโท ด ให้แคโทดมีขนาดเล็กลง พร้อมกับ มีพื้นที่บางส่วนผสมเข้ากับเกต เหมือนกับโครงสร้างของเบส–อีมิตเตอร์ ในทรานซิสเตอร์กำลังมาก กา รวางเกต – แคโทด ร่วมกัน ได้ใช้รูปทรงแบบเรขาที่ซับซ้อนหลากหลาย ดังนั้นทำให้พื้นที่ในบริเวณรอบๆ เกต –แคโทด มีค่า ที่มากขึ้น จึงเป็นสาเหตุทำให้มีพื้นที่เริ่มต้นของการนำกระแสมากขึ้นตาม สุดท้าย ทำให้ค่าความสามารถของอุปกรณ์ที่กระทำต่ออัตรา di/dt ดีขึ้น



(a) (b)

ภาพที่ 2.7 การแก้ไขวงจรให้ไทริสเตอร์นำและหยุดนำ ได้เร็วขึ้น

a. การใช้ไทริสเตอร์ไพลอตป้อนเกต ให้กับไทริสเตอร์หลัก

b. การทำให้ไทริสเตอร์หยุดนำกระแสได้เร็วขึ้นด้วยวิธี Gate Assisted Turn-off Thyristors หรือ Gatts

การนำมาใช้งานของไทริสเตอร์ที่มีโครงสร้างแบบเกต -แคโทดร่วมกัน (Interdigitated Gate-Cathode Structure) สามารถทำให้เวลาในการหยุดนำกระแสสั้นลง เพราะถ้าเป็นไทริสเตอร์ที่มีพื้นที่แคโทดมาก จะเป็นผลทำให้บริเวณรอบๆ เกต -แคโทดมีค่าน้อยลง จึงทำให้การทำงานด้วยการควบคุมเฟสยังคงดำเนินต่อไป ดังนั้นกระแสค่าลบ จึงไม่สามารถทำให้อุปกรณ์หยุดนำกระแสได้ดังอธิบายมาแล้วในตอนต้นๆ อย่างไรก็ตาม ถ้าเกต -แคโทดของไทริสเตอร์ มีโครงสร้างแบบร่วมกัน จะได้บริเวณกึ่งกลางของแคโทด อยู่ไม่ห่างไกลจากขอบของเกต -แคโทด จึงเป็นผลให้ปริมาณการไหลของกระแสในบริเวณกึ่งกลางแคโทด ลดค่าความหนาแน่นลง ได้มาก ดังนั้น กระแสค่าลบสามารถไหลผ่านได้ และมีค่ามาก ขึ้น พร้อมกับทำให้ค่าประจุที่เก็บไว้ในบริเวณ n_2 และ p_2 ถูกกวาดออกไป สุดท้ายได้เวลาในการหยุดกระแสสั้นลง

ปกติไทริสเตอร์ที่มีโครงสร้างแบบเกต -แค โทดร่วมกันมากๆ (Highly Interdigitated Gate-Cathode Stucture) มักนิยมขับด้วยวงจรไทริสเตอร์ไพลอต แต่ต่อมาวงจรนี้ ได้ถู กดัดแปลง โดยการนำไดโอดต่อร่วมอีก 1 ตัว ดังแสดงในภาพที่ 2.7 b เพื่อช่วยการหยุดนำ เพราะ ขณะที่ยังไม่ต่อไดโอดเข้าไป ไทริสเตอร์ไพลอตจะกั้นกระแสค่าลบไว้ ทำให้กระแสเกตค่าลบนี้ ไม่สามารถดึงมาจากไทริสเตอร์หลักได้ สุดท้าย ได้เวลาการหยุดนำยาว ดังนั้น วงจรที่ได้แสดง ดังภาพที่ 2.12b ซึ่งประกอบด้วยไทริสเตอร์ไพลอต , ไดโอด และไทริสเตอร์ที่มีโครงสร้างเกต -แคโทดแบบร่วมกันมากๆ จึงมีชื่อเรียกว่า ไทริสเตอร์ช่วยหยุดนำ (A Gate-Assisted Turn-Off Thyristors, GATTs) และถึงแม้ว่าขั้วแอโนด-แคโทดของอุปกรณ์นี้ ได้ถูกไบแอสย้อนกลับเพื่อทำใ ห้หยุดนำก็ตาม แต่วงจรตามภาพที่ 2.12b ก็สามารถนำใช้งานได้ สำหรับการหยุดนำด้วยเวลา 10 ไมโครวินาที หรือน้อยกว่า วงจรดังกล่าว ก็สามารถใช้งานได้กับอุปกรณ์ที่มีแรงดันกั้นไบแอสไปหน้าเท่ากับ 2,000 โวลต์และกระแสการนำ เท่ากับ 1,000 แอมป์ ถึง 2,000 แอมป์ ได้ รวมถึงควา มถี่การสวิตซ์ด้วยซึ่ง เท่ากับ 10 กิโลเฮิร์ตซ์

บทที่ 3
การออกแบบโครงงาน

จากทฤษฎีที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้วนั้น สามารถนำมาออกแบบในการทำโครงงาน คือ นำคอนเวอร์เตอร์ (Converter) มาเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส เป็นไฟฟ้ากระแสตรง

3.1 ประเภทของคอนเวอร์เตอร์และการนำไปใช้งาน [1]

การนำคอนเวอร์เตอร์ไปใช้งาน สามารถจัดแบ่ง ตามประเภทการใช้งาน ได้ 5 ประเภทด้วยกันซึ่งได้กล่าวดังต่อไปนี้

3.1.1 การเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง

ในการใช้ เอส ซี อาร์ ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงจะสามารถเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลดได้ การนำไปใช้งาน เช่น

- เป็นแหล่งไฟฟ้ากระแสตรง ที่สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสให้คงที่
- ใช้เป็นเครื่องช่วยเดินเครื่องและควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
- ควบคุมแรงดันไฟฟ้าแก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

3.1.2 การเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับโดยการควบคุมเฟส

ในการนี้จะควบคุมเอส ซี อาร์ให้นำกระแสไม่ครบลูกคลื่นของแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ การนำไปใช้งาน เช่น

- ควบคุมความร้อนที่จ่ายออกจากฮีทเตอร์ (Heater)
- ใช้เป็นเครื่องช่วยเดินและควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

3.1.3 การเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยวิธีการชอปเปอร์ [2]

เป็นการจ่ายไฟโดยการเปิดปิดไฟจากแหล่งจ่ายไฟที่จ่ายให้กับโหลด ซึ่งแรงดันที่โหลดจะเป็นลักษณะของพัลส์ การควบคุมแรงดันที่จ่ายให้กับโหลดสามา รถควบคุมโดยการเปลี่ยนแปลงความถี่ หรือเปลี่ยนความกว้างของพัลส์ การนำไปใช้งาน เช่น

- แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

- ขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรง โดยจะเป็นเครื่องช่วยเดินเครื่องแทนการใช้ตัวความต้านทานและควบคุมความเร็วได้อย่างต่อเนื่อง

3.1.4 การเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ [3]

การเปลี่ยนแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับโดยวิธีการอินเวอร์เตอร์ (Inverters) การนำไปใช้งาน เช่น

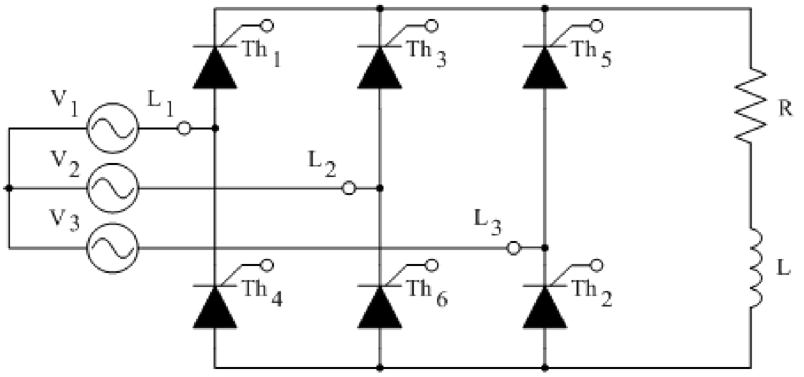
- แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่มีแรงดันและความถี่คงที่ เช่น ใช้เป็นระบบจ่ายแรงดันไฟฟ้าสำรอง ในกรณีที่ไม่ต้องการให้มีการหยุดชะงักของแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ
- ขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสสลับ โดยสามารถควบคุมความเร็วจากการเปลี่ยนแปลงความถี่ และแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้ามอเตอร์
- ระบบส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง
- เตาถลุงเหล็กชนิดเหนี่ยวนำโดยความถี่สูง

3.1.5 การเปลี่ยนแปลงความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับ

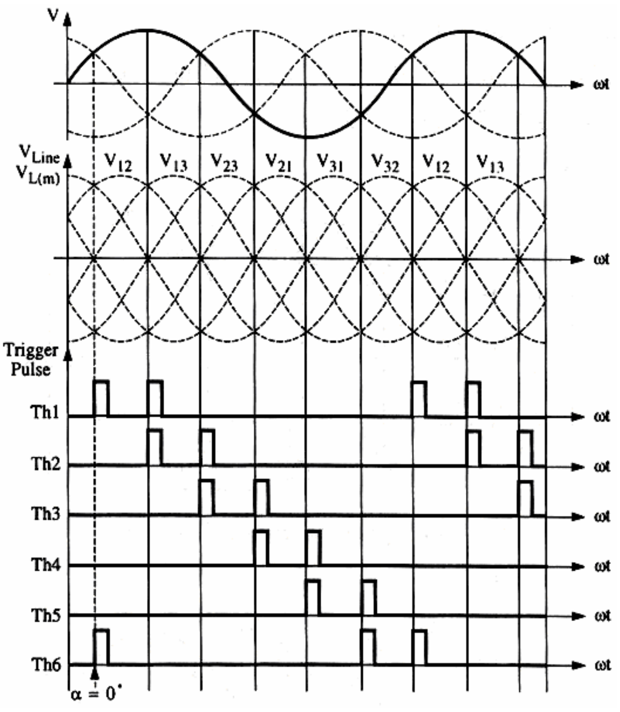
การเปลี่ยนแปลงความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับโดยทางอ้อม ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อจ่ายให้วงจรอินเวอร์เตอร์ เพื่อเปลี่ยนความถี่ตามต้องการ

3.2 วงจรเรียงกระแส 3 เฟสที่ควบคุมเต็มบริดจ์

วงจรเรียงกระแส 3 เฟส เป็นคลื่นที่ควบคุมเต็มบริดจ์นี้ ประกอบไปด้วยไทริสเตอร์ทั้งหมดจำนวน 6 ตัว ดังแสดงในภาพที่ 3.1 โดยที่ไทริสเตอร์แต่ละคู่จะทำงานพร้อมกันตามลำดับการป้อนสัญญาณจุดชนวนเกท ดังแสดงในภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.1 วงจรเรียงกระแส 3 เฟส ที่ควบคุมเต็มบริดจ์



ภาพที่ 3.2 แสดงภาพคลื่นแรงดันระหว่างสายและลำดับของสัญญาณจุดชนวนเกทของไทริสเตอร์

จากภาพที่ 3.2 จะพบว่าลำดั บขั้นการจุดชนวนเกทของไทริสเตอร์ทั้ง 6 ตัวจะ เป็นไปตามลำดับนี้คือ (พิจารณาที่มุม $\alpha = 0^0$)

ไทริสเตอร์ 6 และ 1 ทำงานที่มุม $\alpha = 0^0$

ไทริสเตอร์ 1 และ 2 ทำงานที่มุม $\alpha = 60^0$

ไทริสเตอร์ 2 และ 3 ทำงานที่มุม $\alpha = 120^0$

ไทริสเตอร์ 3 และ 4 ทำงานที่มุม $\alpha = 180^0$

ไทริสเตอร์ 4 และ 5 ทำงานที่มุม $\alpha = 240^0$

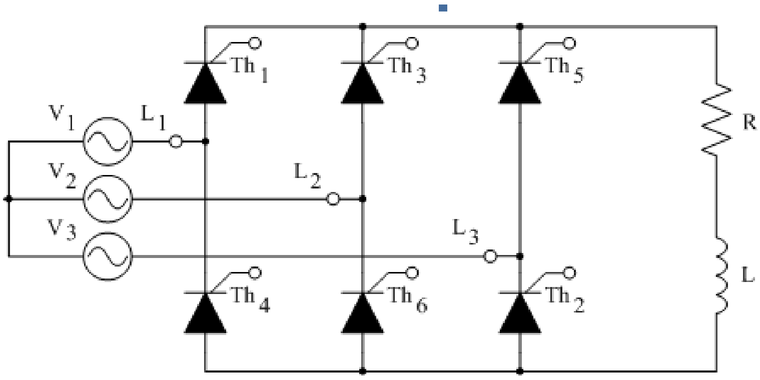
ไทริสเตอร์ 5 และ 6 ทำงานที่มุม $\alpha = 300^0$

ไทริสเตอร์ 6 และ 1 ทำงานที่มุม $\alpha = 360^0$

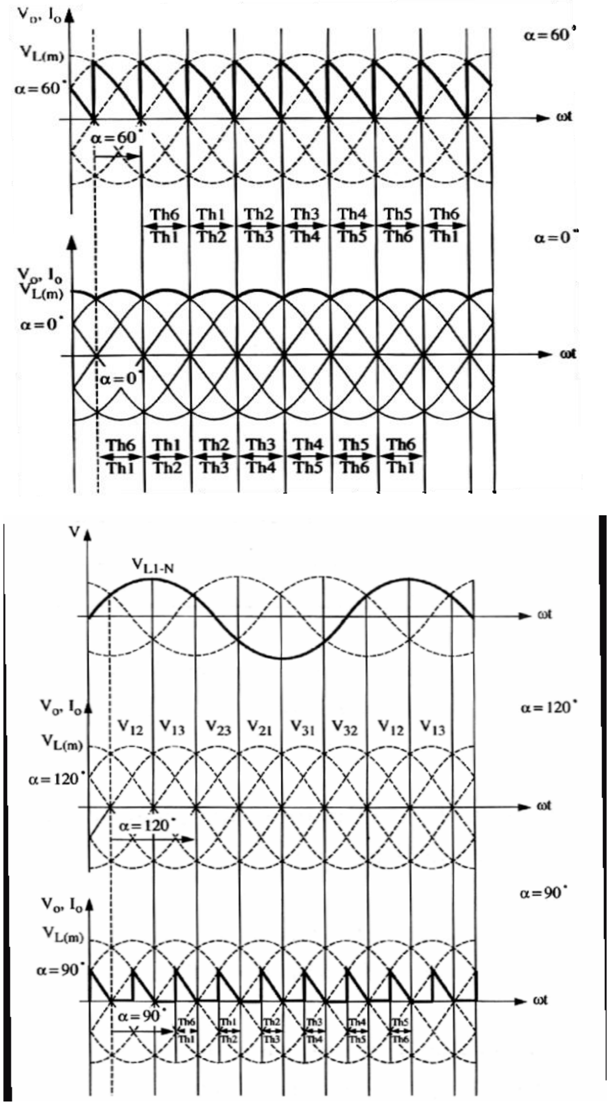
จะเห็นว่าที่มุมจุดชนวน $\alpha = 0^0$ ไทริสเตอร์แต่ละตัวจะนำกระแสเป็นมุมเท่ากับ 60^0 และที่มุม α โตขึ้น จะทำให้มุมในการนำกระแสลดลง

3.2.1 เมื่อโหลดเป็นตัวต้านทาน

การทำงานของวงจรเมื่อโหลดเป็นตัวต้านทานเพีย งอย่างเดียว ให้พิจารณาในภาพที่ 3.3 และรูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลด (V_0) และกระแสไหลผ่านโหลด (I_0)



ภาพที่ 3.3 วงจรควบคุมเต็มบริดจ์เมื่อโหลดเป็นตัวต้านทานต้านทาน



ภาพที่ 3.4 ภาพคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลดและกระแสที่ไหลผ่านโหลด

จะเห็นว่ารูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลด (V_0) จะปรากฏเมื่อมุม α มีค่าระหว่าง 0^0 ถึง 120^0 เท่านั้น และที่มุมจุดชนวนเกทที่มุม α มีค่าระหว่าง 0^0 ถึง 60^0 ($0^0 < \alpha < 60^0$) กระแสโหลดจะไหลต่อเนื่อง แต่ถ้าจุดเกทที่มุม α มากกว่า 60^0 แต่ไม่เกิน 120^0 ($60^0 < \alpha < 120^0$) กระแสโหลดจะไหลไม่ต่อเนื่อง ทำให้การพิจารณาหาสมการแรงดันตกคร่อมโหลดเกิดขึ้น 2 กรณี

ก. เมื่อจุดขนวนเกทที่มุม($0^0 < \alpha < 60^0$)

สมการคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่โหลด คือ

$$V_{o(avg)} = \frac{6}{2\pi}\int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}+\alpha} V_{L1-L2}\, d\,\omega t$$

$$= \frac{3}{\pi}\int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}+\alpha} \sqrt{3}V_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{6})\, d\,\omega t$$

$$= \frac{3V_{L(M)}}{\pi}\left[\cos\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)\right]_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}+\alpha}$$

$$\therefore\ V_{o(avg)} = \frac{3\sqrt{3}\ V_m}{\pi}[\cos\alpha] \qquad (3.1)$$

สมการคำนวณ หาค่าแรงดันไฟฟ้า อาร์.เอ็ม.เอส ที่โหลด คือ

$$V_{o(rms)} = \sqrt{\frac{6}{2\pi}\int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}} 3\ V_m^2 \sin^2\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) d\,\omega t}$$

$$\therefore\ V_{o(rms)} = \sqrt{3}V_m\sqrt{\left[\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{4\pi}\ \cos 2\alpha\right]} \qquad (3.2)$$

ข. เมื่อจุดชนวนเกทที่มุม ($60^0 < \alpha < 120^0$)

สมการคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่โหลด คือ

$$V_{o(avg)} = \frac{6}{2\pi}\int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{5\pi}{6}} \sqrt{3}\ V_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{6})\, d\,\omega t$$

$$= \frac{3\sqrt{3}\ \ V_{(m)}}{\pi}\left[-\cos\left(\omega t+\frac{\pi}{6}\right)\right]_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{5\pi}{6}+\alpha}$$

$$\therefore\ V_{o(avg)} = \frac{3\sqrt{3}\ \ V_{m}}{\pi}\left[1+\cos\left(\frac{\pi}{3}+\alpha\right)\right] \tag{3.3}$$

สมการคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้า อาร์ .เอ็ม.เอส. ที่โหลด คือ

$$V_{o(rms)} = \sqrt{\frac{6}{2\pi}\int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{5\pi}{6}}3\ \ V_m^2\sin^2\left(\omega t+\frac{\pi}{6}\right)d\,\omega t}$$

$$V_{o(rms)}^2 = \frac{6}{2\pi}\int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{5\pi}{6}}3V_m^2\sin^2\left(\omega t+\frac{\pi}{6}\right)d\,\omega t$$

$$= \frac{18V_m^2}{2\pi}\int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{5\pi}{6}}\sin^2\left(\omega t+\frac{\pi}{6}\right)d\,\omega t$$

$$= \frac{18V_m^2}{4\pi}\int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{5\pi}{6}}1-\cos 2\ \omega t+\frac{\pi}{6}\ d\omega t$$

$$= \frac{9V_m^2}{2\pi}\int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{5\pi}{6}}d\,\omega t-\int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{5\pi}{6}}\cos 2\left(\omega t+\frac{\pi}{6}\right)d\,\omega t$$

$$= \frac{9V_m^2}{2\pi}\left(\frac{5\pi}{6}-\frac{\pi}{6}-\alpha\right)-\frac{1}{2}\left[\sin\ 2\left(\omega t+\frac{\pi}{6}\right)\right]_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{5\pi}{6}+\alpha}$$

$$= \frac{9V_m^2}{2\pi}\left(\frac{2\pi}{3}-\alpha\right)-\frac{1}{2}\left[\sin\ 2[\frac{5\pi}{6}+\frac{\pi}{6}]-\sin\ 2\ \ [\left(\frac{\pi}{6}+\alpha\right)+\frac{\pi}{6}\ ]\right]$$

$$= \frac{9V_m^2}{2\pi}\left(\frac{2\pi}{3}-\alpha\right)-\frac{1}{2}\left[\sin\ 2\pi-\sin\ 2\,[\frac{\pi}{3}+\alpha]\right]$$

$$= \frac{9V_m^2}{2\pi}\left(\frac{2\pi}{3}-\alpha\right)-\frac{1}{2}\left[-[\sin\frac{2\pi}{3}\cos 2\alpha+\sin 2\,\alpha\frac{2\pi}{3}]\right]$$

$$= \frac{9V_m^2}{2\pi}\left(\frac{2\pi}{3}-\alpha\right)+\frac{1}{2}\left[\frac{\sqrt{3}}{2}\cos 2\alpha+\frac{1}{2}\sin 2\ \alpha\right]$$

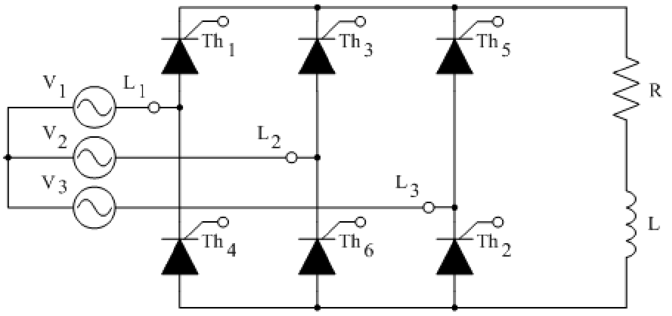
$$\therefore \quad V_{o(rms)} = \frac{3V_m}{\sqrt{2\pi}}\sqrt{\frac{2\pi}{3} - \alpha + \frac{1}{4}\left[\sqrt{3}\cos 2\alpha + \sin 2\alpha\right]} \qquad (3.4)$$

หมายเหตุ V_{L1-L2} คือ แรงดันระหว่างสาย (Line-To-Line)

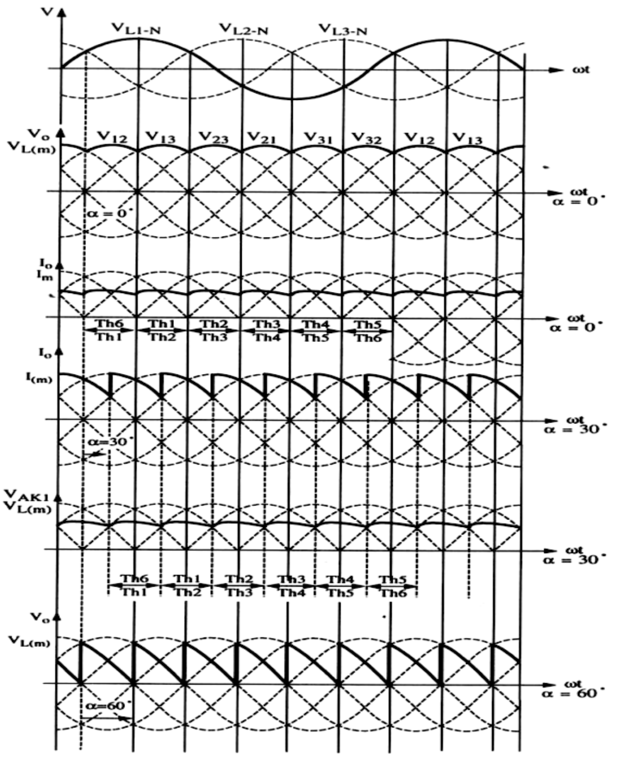
V_m คือ แรงดันสูงสุดระหว่างเฟส (Line-To-Nutral)

3.2.2 เมื่อโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำ

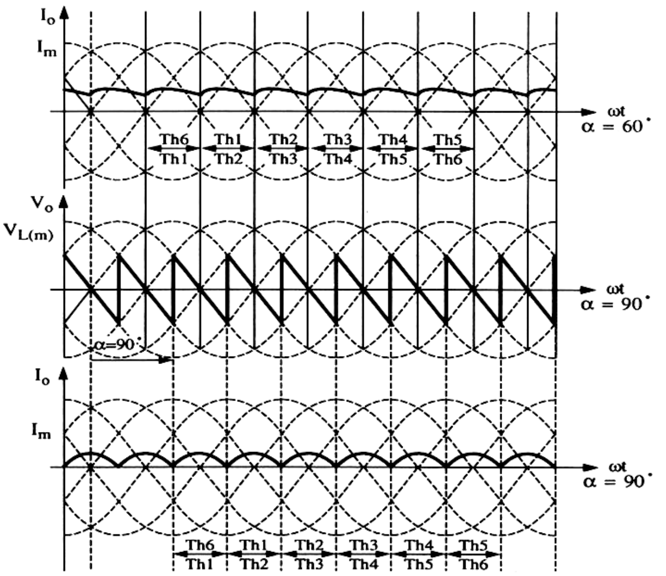
กรณีโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำนี้ รวมถึงเมื่อโหลดเป็นตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่มีค่า α_L สูงมากๆ (α_L >> R) อีกด้วย ซึ่งลักษณะการควบคุมวงจรดังกล่าวจะแตกต่างจากกรณีโหลดเป็นตัวต้านทาน กล่าวคือ เมื่อจุดชนวนเกทที่มุม α มากกว่า 60^0 จะเกิดรูปคลื่นด้านลบตกคร่อมโหลดและเมื่อมุม α มีค่ามากกว่า 90^0 จะทำให้แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่โหลดมีค่าเป็นศูนย์ ลักษณะของวงจรเมื่อโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำ หรือตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ แสดงในภาพที่ 3.5 และรูป คลื่นกระแสและแรงดันขาออกของวงจร แสดงในภาพที่ 3.6 และ 3.7



ภาพที่ 3.5 วงจรเรียงกระแส 3 เฟส ที่ควบคุมเต็มบริดจ์เมื่อโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำหรือตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ



ภาพที่ 3.6 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลดและกระแสโหลดเมื่อโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำและมุมจุดชนวนเกทที่ $\alpha = 0^0, 30^0, 60^0$ และ 90^0



ภาพที่ 3.7 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลดและกระแสโหลดเมื่อโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำและจุดชนวนเกทที่มุม $\alpha = 0^0, 30^0, 60^0$ และ 90^0

จะเห็นว่ารูปคลื่นกระแสโหลดจะไหลอย่างต่อเนื่อง เมื่อมุมจุดชนวนมีค่าระหว่าง 0^0 ถึง 90^0 เท่านั้น ($0^0 < \alpha < 90^o$) และถ้าจุดชนวนเกทเกินกว่ามุม 90^0 จะทำให้แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่โหลดมีค่าเป็นศูนย์ และลักษณะการไหลของกระแสเมื่อมุม α โตกว่า 90^0 จะไหลอย่างไม่ ต่อเนื่อง สมการการคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลดเกิดขึ้น 2 กรณี คือ

ก. เมื่อจุดชนวนเกทที่มุม ($0^0 < \alpha < 90^o$) กระแสโหลดไหลอย่างต่อเนื่องสมการแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย คือ

$$V_{o(avg)} = \frac{6}{2\pi}\int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}+\alpha}\sqrt{3}\;V_m \sin\left(\omega t+\frac{\pi}{6}\right)d\,\omega t$$

$$= \frac{3\sqrt{3}\;V_m}{\pi}\left[-\cos\left(\omega t+\frac{\pi}{6}\right)\right]_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}+\alpha}$$

$$\therefore V_{o(avg)} = \frac{3\sqrt{3}\;V_m}{\pi}[\cos\alpha] \tag{3.5}$$

สมการแรงดันไฟฟ้า อาร์.เอ็ม.เอส คือ

$$V_{o(rms)} = \sqrt{\frac{6}{2\pi}\int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}+\alpha}\sqrt{3}\;V_m^2\;\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{6}\right)d\,\omega t}$$

$$\therefore V_{o(rms)} = \sqrt{3}\;V_m\sqrt{\left[\frac{1}{2}+\frac{3\sqrt{3}}{4\pi}\;\cos 2\,\alpha\right]} \tag{3.6}$$

ข. เมื่อจุดชนวนเกทที่มุม ($90^0 < \alpha < 120^o$) กระแสโหลดไหลไม่ต่อเนื่องสมการแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย คือ

$$V_{o(avg)} = \frac{6}{2\pi}\int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{5\pi}{6}}\sqrt{3}\;V_m \sin\left(\omega t+\frac{\pi}{6}\right)d\,\omega t$$

$$\therefore V_{o(avg)} = 0 \tag{3.7}$$

3.3 วงจรสร้างสัญญาณขับเกท

ในปัจจุบันจะนิยมใช้ chip หรือ IC สร้างวงจรจุดฉนวน IC ที่นิยมใช้มากที่สุดคือ TCA 785 ดังจะอธิบายต่อไปนี้

3.3.1 คุณสมบัติของ TCA 785

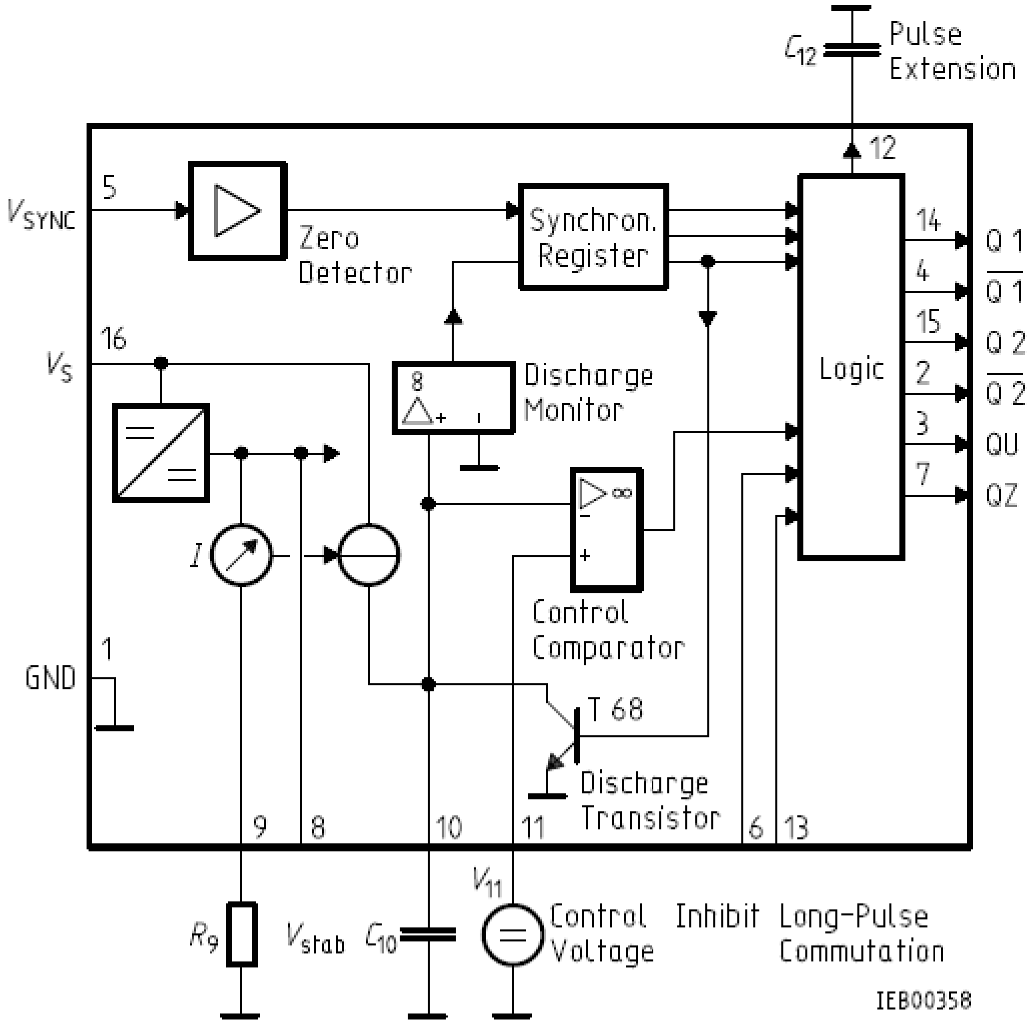
คุณสมบัติของ TCA 785 เป็นวงจรรวมเบอร์ TCA 785 ผลิตโดยบริษัท Siemens ประเทศสหพันธ์รัฐเยอรมัน ใช้ในงานควบคุมเฟสโดยเฉพาะ หรือใช้ได้กับวงจร Line Commutated Converter ใช้ได้กับระบบไฟฟ้า 1 เฟส และ 3 เฟส สามารุปรับปรุงมุม จุดชนวนเกทได้ตั้งแต่ 0 องศา ถึง 180 องศา และสามารถสร้างลักษณะของพัลส์ได้หลายรูปแบบ ตามลักษณะของโหลด เช่น Single shot pulse เป็นต้น ใช้งานได้ดีในย่านความถี่ระหว่าง 10 Hz ถึง 500 Hz ต้องการไฟเลี้ยงกระแสตรงขนาด 8 Vdc ถึง 18 Vdc ใช้งานได้ดีในย่านอุณหภูมิ 25 องศา C ถึง +85 องศา C กินกระแสไฟฟ้าประมาณ 4.5 mA 10 mA อินเตอร์เฟสไ ด้โดยตรงกับออจิกเกทที่ใช้แรงดัน +15 Vdc (เช่น CMOS) สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าด้า นออกของวงจรที่ขา 14 และ 15 ได้ประมาณ 250 mA สัญญาณด้านออก มีทั้งแบบปกติและแบบกลับสัญญาณมี Inhibit Function ควบคุมการกำเนิดสัญญาณ และสามารถใช้งานในลักษณะ Zero crossing ได้ด้วย

3.3.2 คุณลักษณะการทำงานของ TCA 785

การทำงานของวงจรรวม TCA 785 พิจารณาแผนภาพกรอบแสดงโครงสร้างภายในของ TCA 785 ซึ่งเป็นวงจรรวมแบบ LSI มี 16 ขา บรรจุแบบตัวถังพลาสติกดังรูป 3.8 จะเห็นว่าขา 16 คือ +Vs รับแรงดันไบแอสในย่าน +8 Vdc ถึง +18 Vdc โดยขา 1 เป็นจุดดิน (Ground) แรง ดันควบคุมภายในเป็นแรงดันอ้างอิงคือ V_{ref} = 3.1 โวลท์ วัดได้ที่ขา 8 โดยตัว C_8 ทำหน้าที่ป้องกันสัญญาณรบกวน ขา 5 คือ ขาที่รับแรงดันซิงโครไนซ์ (V_{syn}) ซึ่งเป็นแรงดันไฟสลับจากแปล่งจ่ายไฟสลับที่ต่อกับวงจรภาคกำลัง โดยต่อนิวตรอนกับขา 1, R_9 คือตัวต้านทานสร้างสัญญาณลาดเอียงและ C_{10} คือ ตัวเก็บประจุสัญญาณลาดเอียงต่อกับขา 9 และขา 10 ตามลำดับ ค่าของ C_{10} มีค่าในย่าน 500 pF ถึง 1 μF และ R_9 มีค่าเหมาะสมในย่าน 3 ถึง 300 กิโลโอห์ม

จากภาพที่ 3.8 แสดงให้เห็นการทำงานของ TCA 785 โดยการควบคุมแรงดัน ภายใน V_{ref} = 3.1 โวลท์ ดังนั้นตัวพารามิเตอร์ ส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับแรงดัน DC. Supply และความกว้างขวางของแรงดันช่วงยินยอมเป็น U_s = 8 ถึง 18 โวลท์ ขั้วของไฟฟ้าบวกจะต่ออยู่กับขา 16 และขั้วลบจะต่อกับขา 1 (Ground) กระแสที่ใช้งาน (No Load) จะมีค่าถึง 10 mA เอาท์พุทของการควบคุมแรงดัน V_{ref}=3.1 โวลท์ และให้รายละเอียดที่ขา 8 โดยต่อความต้านทาน DC.Coupling ที่ภายในป้องกัน Noise ทำให้ดีขึ้นโดยใช้ Holding คาปาซิเตอร์ C_8 สามารถต่อเข้ากับกราวด์ที่นี่ (ระดับแรงดันอ้างอิง)

ในวงจรการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแ สตรงตามต้องการทั่วไปแล้วชนิดของอุปกรณ์ TCA 785 ชนิดของจุดที่มีการขนานในรูปแบบของการควบคุมตามเงื่อนไขในทุกๆ เฟส และการควบคุมแต่ละขาให้ดี สัญญาณของ Syncronizin Usyn เป็นการแสดงให้เห็นจากแรงดันของการใช้ เอ ซี โดยผ่านความต้านทานค่ามาก Usyn จะมีการต่ออยู่กับขา 5 และกราวด์ต่ออยู่กับขา 1



ภาพที่ 3.8 Block Diagram TCA 785

การ Synchronizing เป็นการป้องกันการตอบสนองสูงสุดของ Zero crossing การป้องกันโดยใช้หน่วยความจำ ซึ่งใช้ในการควบคุมการกำเนิดของคลื่นฟันเลื่อยโดยที่ผ่านมาส่วนใหญ่จะประกอบด้วยกระแสคงที่จากแหล่งกำเนิด I_{const} โดยประจุภายนอกคาปาซิเตอร์ C_{10} จะมีค่าอยู่ระหว่าง 500 pF ถึง 1 µF ซึ่งเราทราบอยู่แล้วว่าสัญญาณฟันเลื่อนมีค่ามากขึ้นหลายเท่าขึ้นอยู่กับ

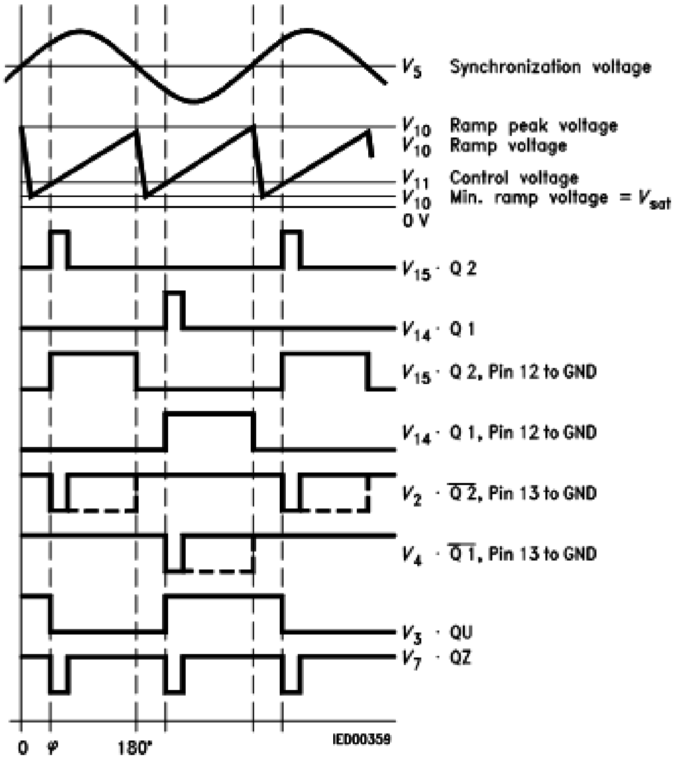
และค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของ I_0 ยังคงไม่เปลี่ยนแปลงกระแส I_{const} จะถูกปรับโดยความต้านทานภายนอก R_9 และ R_R เท่ากับ 3 ถึง 300 กิโลโอห์ม โดยผ่านขา 9

วงจร RC R9,C10 จะทำให้ความหมายของสภาวะของแรงดันฟันเลื่อย U1 สัญญาณ Ramp จะเริ่มโดยที่ศูนย์ ตัดกับแรงดัน Sync และบางสิ่งที่ได้กล่าวมา โดยการคายประจุ Ramp คาปาซิเตอร์ C10 โดยผ่านทรานซิสเตอร์ให้คายประจุภายในวงจรลอจิกของหน่วยความ จำ Sync จะทำหน้าที่เป็นการป้องกันเอาท์พุทมีค่าเป็น โดยเฉพาะการคายประจุที่ตัวนี้อย่างสมบูรณ์ของ C10

นี่เป็นความสำคัญเมื่อเราใช้ไอซี TCA785 อ้าง Zero crossing switch และการเปลี่ยนความกว้างของพัลส์ แรงดันซึ่งไหลที่ C10 จะไม่มีผลต่อการควบคุมของไอซี TCA 785 และในทางเดียวกัน นี้จะเป็นการควบคุมแรงดันที่แหล่งจ่าย (Supply)

ในกรณีของการมีคลื่นรบกวนจะต้องเพิ่ม Op-amp ให้กับตัวไอซี และในขณะเดียวกันนั้นเมื่อทำการควบคุมแรงดันไม่ให้เกิดการรั่วไหล จะได้รับการควบคุมเฟส หรือ 180 องศาและจะประกอบด้วย (เต็มคลื่น) ทุกๆ การควบคุมแรงดัน ซึ่งแรงดันรั่วไหลมีค่าต่ำและมีค่าเข้าใกล้ 0 โวลท์

การควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง U12 ที่ทำการต่ออยู่กับขา 11 (ด้วยกราวด์ขา 1) ซึ่งการควบคุมโดยการเปรียบเทียบของ Comparator จะทำการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและแรงดันฟันเลื่อย U10 จะทำการควบคุมแรงดัน U11 ให้ Output pulse (บวกหรือกราวด์) โดยวิธีการเชื่อมโยง (ภาพที่ 3.9)



ภาพที่ 3.9 แสดงภาพคลื่นสัญญาณที่ขาต่างๆ ของ TCA

เอาท์พุทส่วนใหญ่ Q_1 (ขาที่ 14) และ Q_2 (ขาที่ 15) จะได้รับโดยวิธีการของ Emitter follower จะมีค่าสูงสุด 250 mA มันจะเป็นการจ่ายให้กับ Half-wave ที่มีขั้วเหมือนกับ Q_2 ในขั้วบวกของแรงดัน Sync Q_2 จะทำการปล่อยพัลส์ เฉพาะครึ่งลบเท่านั้น Pulse Diration จะมีค่าประมาณ 30 S (Pulse ซึ่งปราศจากการต่อกับขา 12) มันจะเป็นอิสระ โดยคาปาซิเตอร์นี้จะต่อภายนอก C_{12}

ถ้าอินพุทของทริกเกอร์ เข้าที่ขา 12 ถูกลัดวงจรกับกราวด์ ความกว้างของพัลส์ = 180 องศา (Long Pulse) เอาท์พุท ของ Q_1 (ที่ขา 4) และ Q_2 (ขา 2) Open collector จะทำให้เหมือนกับข้อมูลคือ สูงสุด 10 mA

สัญญาณสามารถได้ทั้งคู่ของเอาท์พุท เมื่อความต้านทานของ collector R_4 และ R_2 (ประมาณ 15 กิโลโอห์ม) จะต้องถูกกระทำระหว่างเอาท์พุท และขั้วบวกสัญญาณที่ออกมาพิจารณา ได้จากสัญญาณที่มีลักษณะกลับกันของ Q_1 และ Q_2 การลดทอนของพัลส์ (เอาท์พุทที่ออกไปยังขั้วบวก) มีค่าประมาณ 30 S

ถ้าจุดทริกเกอร์ ถูกต่อเข้ากับกราวด์ ตามความกว้างของ Pulse Output ไปยังขั้วบวกของ 180 องศา (Long Pulse switching) จะเกิดความถี่มากแต่ละเอาท์พุท ของ Q_u (ขา 3) Q_z (ขา 7) เป็นตัวทำให้กำเนิด Open collector

การได้รับสัญญาณ Collector จาก R_3 และ R_7 เป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งระหว่างเอาท์พุทและขั้วบวก สัญญาณเอาท์พุท Q_u จะเหมือนกับของ Q_1 จะมีความกว้าง = 180 องศา เท่ากับค่าคงที่สัญญาณที่ออกจาก Q_2 การทำให้ปราศจาก Noise ที่ดีนั้น จะมีการต่อเอาท์พุท Q_z (ขา 7) กับกราวด์

การยับยั้งพัลส์ (ขา 6) สามารถระงับพร้อมกันหมดทุกเอาท์พุท (Q_1,Q_2,Q_u) จุดที่ทำการทริกที่ขา 6 มีการต่อกราวด์โดยสวิตช์หน้าสัมผัสรีเลย์ หรือ เอ็น -พี-เอ็น ทรานซิสเตอร์ ดังภาพที่ 3.10 แสดงให้เห็นวงจรภายในของ TCA 785 แสดงสถานะของเอาท์พุท

การควบคุมไทริสเตอร์ใน Line-commutuler or Non-commutating กระแสคอนเวอร์เตอร์ จะเป็นที่ต้องการทั้งคู่ของแบบจำลองทริกเกอร์ ไทริสเตอร์จะถูกทริกเกอร์ โดยกระแสพัลส์ที่เป็นบวกระหว่าง เกท และคาโทด การควบคุมพัลส์ โดยส่วนใหญ่แล้วจะทำอยู่ระหว่างการค้างของกระแส

การทำ switch off ของไทริสเตอร์จะทำโดยการลดกระแสที่ไหลผ่านระหว่างอาโนดและคาโทด ให้ต่ำกว่ากระแสโฮลดิ้ง ความแตกต่างของการลดทอน ซึ่งจะจ่ายไปยังการทริกของไทริสเตอร์ขึ้นอยู่กับการออกแบบวงจรการเปลี่ยนแปลงพัลส์ และขึ้นอยู่กับการ On load

ภาพที่ 3.9 แสดงการควบคุมโดยตรง การควบคุมไอซี TCA 785 โดยตรง การควบคุมไทริสเตอร์กำลังไฟฟ้าต่ำ มุมเฟสจะถูกปรับอยู่ระหว่าง 0-180 องศา และกำลังไฟฟ้าของโหลดอยู่ระหว่าง 0 และ 400 วัตต์ แหล่งจ่ายแรงดัน (ขา 16) มาจากความต้านทานที่ต่ออนุกรมกับ R_1 ถูกแปลงกระแสไฟฟ้าโดยไดโอด D_1 และถูกรักษาระดับของแรงดันโดย ซีเนอร์ไดโอด D_4C_1 จะเป็นตัวทำให้แรงดันจากการ Rectifier เรียบยิ่งขึ้น

การยับยั้งอินพุท (ขา 6) ซึ่งอยู่เหนือ + 14 โวลท์ ดังนั้นความต้านทาน 10 กิโลโอห์มถูกต่อเข้ากับแรงดันการทำงาน (ขา 6) ถ้าแรงดันที่ Output Pulse ถูกยับยั้งมีค่าลดลงถึง 2.5 โวลท์ Output Pulse จะถูกต้านไว้

วงจรที่ถูก Open ที่ขา 6 ไปยังกราวด์ หรือ mp ได้ ทำได้โดยการใช้สวิตช์ หรือวงจรลอจิก การปิดสวิตช์ขณะโหลด จะไม่ขึ้นอยู่กับสถานะของสัญญาณของ TCA 785 ทั้งห มดนี้ระดับของการยับยั้ง ทำให้เกิดการเสียหายหรือเอาท์พุทที่เป็นไปได้ ความจำเป็นที่ตามมาเมื่อพัลส์ ที่เกิดขึ้นตรงไทริสเตอร์มันจะเป็นความต้องการของกำลังไฟฟ้าเกิดขึ้นมาก เพราะว่าการสูญเสียในความต้านทาน

R_1 มากกว่า Power supplies และไม่พอเพียงเมื่อสวิตช์ off ของ ไอซี และนี่เป็นสาเหตุของการรบกวนที่เกิดขึ้นในวงจร

ค่า R_9 และ R_{10} จะเป็นตัวกำหนดขนาดของสัญญาณลาดเอียง (V_{10}) ถ้า R_9 และ C_{10} มีค่ามากความลาดเอียงของ C_{10} จะมีค่ามากตามไปด้วย ขา 11 ของ TCA 785 คือ ขาที่ต่อแรงดันควบคุมเป็นแรงดันไปตรง ปรับค่าได้แรงดันควบคุม (V_{11}) นี้จะป้อนเข้าขาบวก ของออปแอมป์เปรียบเทียบสัญญาณควบคุมในภาพที่ 3.9 โดยเทียบกับแรงดัน V_{10} เพื่อกำหนดขนาดของมุมจุดชนวนที่ด้านออกของวงจร ดังแสดงในภาพที่ 2.11 จะเห็นว่า สัญญาณด้านออกของวงจรอยู่ที่ขา 14 และขา 15 โดยพัลส์ที่ที่ขา15จะทำงานในช่วงเวลา wt=0องศาถึง180องศาและพัลส์ที่ขา 14 จะทำงานที่ wt =180 องศา ถึง 360 องศา ขนาดความกว้างของพัลส์ด้านออกคือ β ปกติถ้าไม่ต่อ C_{12} จะมีค่า β = 30 µS แต่สามารถเปลี่ยนค่า β ได้โดยใช้ค่า C_{12} ต่อเข้าที่ขา 12 ดังแสดงความสัมพันธ์ของค่า C_{12} กับค่า β ในตารางที่ 2.1

สำหรับขา 2 และขา 4 คือสัญญาณกลับของ V_{15} และ V_{14} สัญญาณลักษณะพัลส์เดี่ยวที่มี β=30 µS นั้น จะเกิดขึ้นเมื่อไม่มีการต่อ C_{12} เข้าที่ขา 12 แต่ถ้าต้องการให้พัลส์ด้านออกเป็นพัลส์ยาวทำได้โดยการต่อขา 12 กับจุกกราวด์ และถ้าต้องการให้สัญญาณด้านออกที่ขา 2 และ ขา 4 เป็นพัลส์ยาวด้วย จะต้องต่อขา 13 เข้ากับจุดกราวด์ด้วย ดังรูปคลื่นในภาพที่ 2.11

ตารางที่ 3.1 แสดงความสัมพันธ์ของความกว้างของพัลส์ด้านออกกับค่า C_{12}

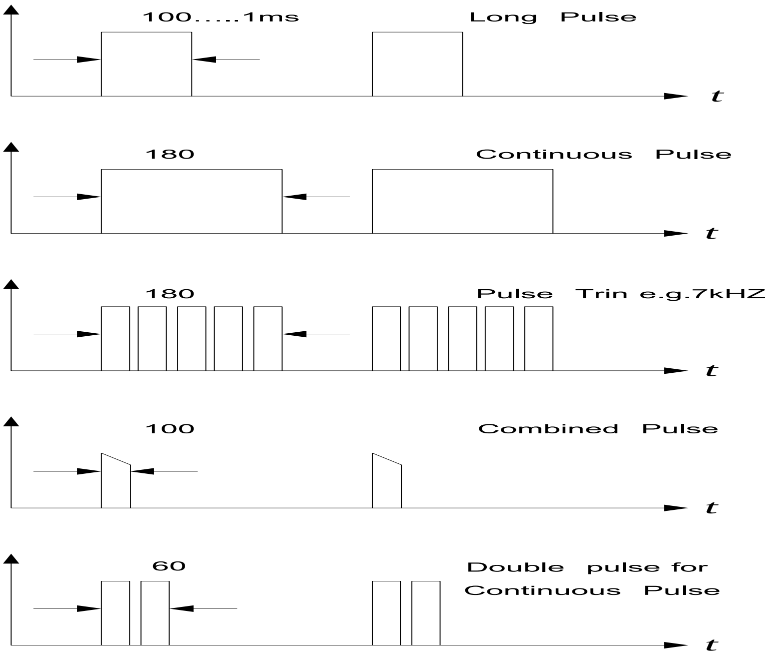
C_{12}(pF)	0	150	220	330	680	1000
Pulse width (µS)	30	93	137	205	422	620

3.3.3 ลักษณะของพัลส์ด้านออกของ TCA 785

ลักษณะของพัลส์ด้านออกชนิดต่างๆ การสร้างพัลส์ด้านออกให้มีรูปร่าง แตกต่างกันนั้น อยู่กับชนิดของโหลดในวงจรกำลังที่ไทริสเตอร์นั้นต่อควบคุมโหลดอยู่กับลักษณะของพัลส์ มีหลายแบบดังภาพที่ 3.10 มีรายละเอียดดังนี้

- Short Pulse (β = 30 – 100 µS) สำหรับโหลดตัวต้านทาง
- Long Pulse (β = 100 1µS – lmS) สำหรับโหลดตัวต้านทานที่กินกระแสสูงๆ หรือโหลดตัวเหนี่ยวนำ
- Continuous Pulse (β = 180 องศา – α) สำหรับโหลดตัวเหนี่ยวนำที่มีค่า สูงมากๆ

- Combined pulse สำหรับวงจรที่มีการเปลี่ยนแปลงของกร ะแสเกท (di / dt = 1 ถึง 3 A/μS) หรือสำหรับจุดชนวนเกทไทริสเตอร์ที่ต่ออนุกรมกัน
- Double Pulse ใช้สำหรับวงจรจุดชนวนเกทไทริสเตอร์ในวงจร 3 เฟส บริดจ์



ภาพที่ 3.10 ลักษณะของพัลส์จุดชนวนเกทของไทริสเตอร์แบบต่างๆ

3.3.4 การควบคุมเฟส (Phase Control)

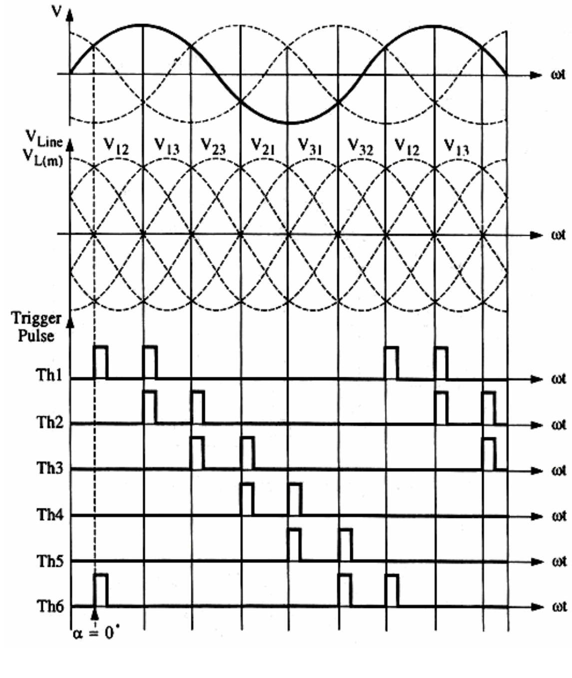
การควบคุมไทริสเตอร์ในทางปฏิบัติทั่วๆ ไปแล้ว เมื่อ ทำการเ ปลี่ยนกระแสสลับไปเป็นไฟกระแสตรงและใช้กำลังไฟฟ้าที่ถูกควบคุม ณ เวลาเดียวกันถ้าเป็นการควบคุมกำลังไฟฟ้าสูงของไทริสเตอร์ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นการต้องการ โดยอุปกรณ์พิเศษ คือ ไอซี TCA 785 การควบคุมเฟสที่มีการพัฒนาสำหรับแต่ละจุดประสงค์ โดยการเลือกและจุดภายนอกของสวิตช์ซึ่ง โดยสามารถเชื่อมโยงกับภายนอกมันจะถูกจ่ายให้โดย การเปลี่ยนแปลงอย่างมากของหน้าที่ ที่ต้องปฏิบัติ ซึ่งจะดูอุปกรณ์อื่น ๆ ที่เกี่ยวพันธ์ทำให้การใช้อุปกรณ์ที่มีราคาสูงในวงจรที่มีการไหลทางเดียวหรือใช้ไฟดีซี

ในการแยกแยะไอซี TCA 785 และการควบคุมไทริสเตอร์ที่ใช้ในการแปลงกระแสไฟฟ้าในวงจรคอนเวอร์เตอร์ และกระแสไฟฟ้ากระแสสลับในการควบคุมจะใช้ไอซี TCA 785 ในการควบคุมเฟสจะใช้ได้อย่างดีมาก ในวงจรกระแสไฟฟ้าสำหรับ วงจรการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟกระแสตรง

หัวข้อพิเศษของไอซี TCA 785 เต็มไปด้วยเรื่องประยุก ต์การใช้งานในช่วงกว้างเพราะว่าเป็นไปได้ของแหล่งจ่ายภายนอก 8 ถึง 18 โวลท์ อุณหภูมิการใช้งานอยู่ในช่วง 25 ถึง 85 องศาเซลเซียส กระแสการใช้งานเฉพาะ 45 to LSL ตรงกัน ยกตัวอย่าง การควบคุมโดยความเร็วต่ำปราศจากการรบกวนลอจิกด้วยระบบสัญญาณเอาท์พุทจำนวนทั้งสอง สำหรับ การกระตุ้นแต่ละตัวเท่ากับ 250 mA เอาท์พุททั้งสองจะตรงกันข้าม หน้าที่ของการยับยั้งการกระตุ้นสัญญาณพัลส์การยับยั้งการเกิดการดับอาร์คพัลส์ของการกระตุ้นจะขยายโดยคาปาซิเตอร์ที่อยู่ภายนอก

3.3.5 วงจรควบคุมแบบ 3 เฟส

วงจรควบคุมแบบ 3 เฟส โดย TCA 785 วงจรเรียงกระแส 3 เฟสที่ควบคุมด้วย TCA 785 เช่น วงจรเรียงกระแส 3 เฟสเต็มคลื่นควบคุมครึ่งบริดจ์ วงจรเรียงกระแส 3 เฟสเต็มคลื่นที่ควบคุมเต็มบริดจ์ ซึ่งในโครงงานนี้จัดทำวงจรเรียงกระแส 3 เฟสเต็มคลื่นที่ควบคุมเต็มบริดจ์ โดยใช้วงจรจุดชนวนเกทไทริสเตอร์ 6 ตัว ในวงจรเรียงกระแส 3 เฟ สดังแสดงในภาพที่ 3.12 เทคนิคที่สำคัญมากสำหรับวงจร 3 เฟสเต็มบริดจ์นี้ คือพัลส์จุดชนวนเกทต้องใช้พัลส์คู่ ในทางปฏิบัติแล้วสามารถต่อสัญญาณพัลส์คู่ได้โดยการต่อด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงพัลส์จุดชนวนให้ถูกต้อง ดังภาพที่ 3.1 และ เมื่อวัดสัญญาณจุดชนวนเกทของไทริสเตอร์ทั้ง 6 ตัว จะแสดงให้เห็นในลักษณะของพัลส์คู่ดังภาพที่ 3.11



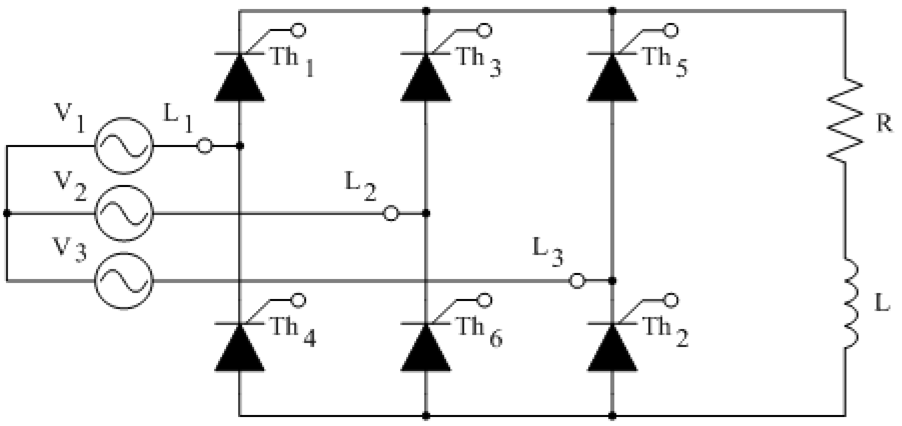
ภาพที่ 3.11 ภาพคลื่นของสัญญาณจุดชนวนพัลส์คู่ สำหรับวงจรเรียงกระแส 3 เฟสที่ควบคุมเฟสเต็มบริดจ์

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 การทดลองวงจรคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส ตามวงจรที่ 4.1 ได้แบ่งการวัดสัญญาณตามจุดต่างๆ ดังนี้

- ภาควงจรทริกเกจของไอซี TCA 785
- ภาควงจรหม้อแปลงพัลส์
- ภาคสัญญาณเอาท์พุทจากไทริสเตอร์

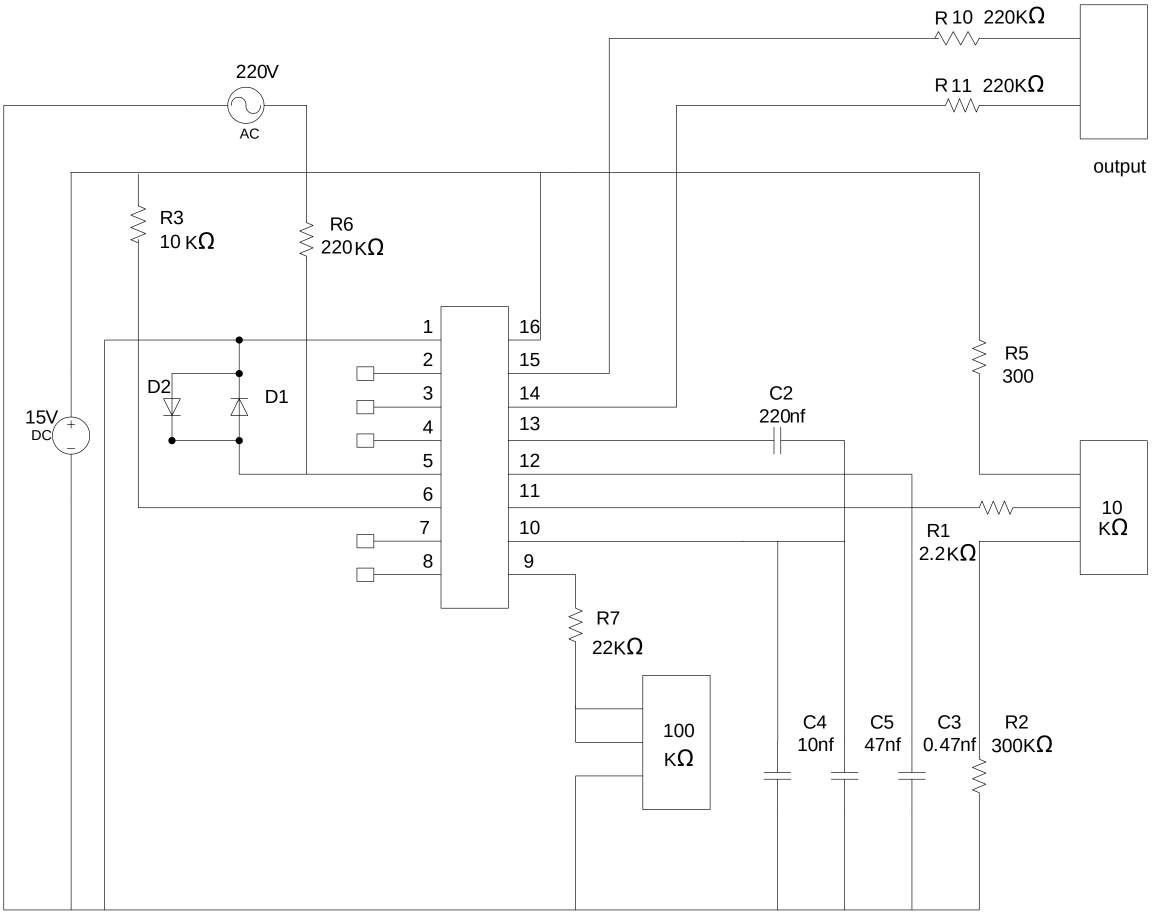


ภาพที่ 4.1 วงจรการทำงานของโครงงาน คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส

4.2 การทดลองทริกเกทของไอที TCA 785

ในการทดลองโดยใช้ Ic TCA 785 ที่สามารถปรับมุ มทริกเกทได้ตั้งแต่ 0 ถึง 180 องศา และสร้างพัลส์แบบ Single shut pulse ซึ่งใช้ได้ดีในย่านความถี่ 10 Hz ถึง 500 Hz ต้องการแรงดันไฟฟ้า 8 Vdc ถึง 18 Vdc และอุณหภูมิการใช้งานอยู่ระหว่าง -25 องศาเซียลเซส ถึง +85 องศาเซียลเซส กันกระแสไฟฟ้าประมาณ 4.5 mA – 10 mA อิน เตอร์เฟสได้โดยตรงกับลอจิกเกทที่ใช้แรงดัน +15 Vdx (เช่น CMOS) สามารถจ่ายกระแสได้ประมาณ 250 mA ซึ่งเป็นแบบปกติและแบบกลับสัญญาณที่ขา 14 และขา 15 ดังแสดงวงจรการทดลองในภาพที่ 4.2

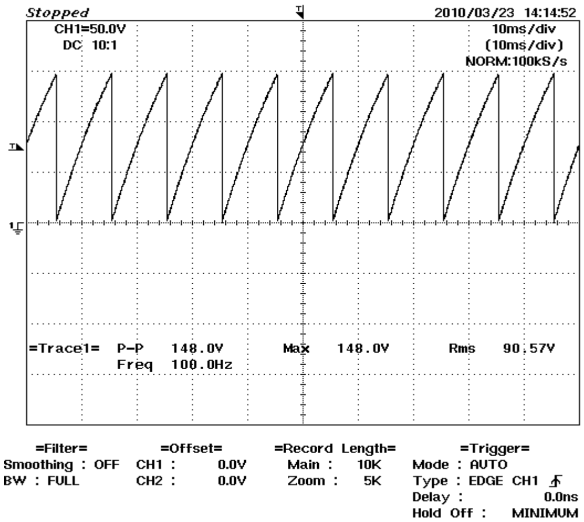
ภาพวงจรทริกเกจของไอซี TCA 785



ภาพที่ 4.2 วงจรของ TCA 785

ผลการทดลอง

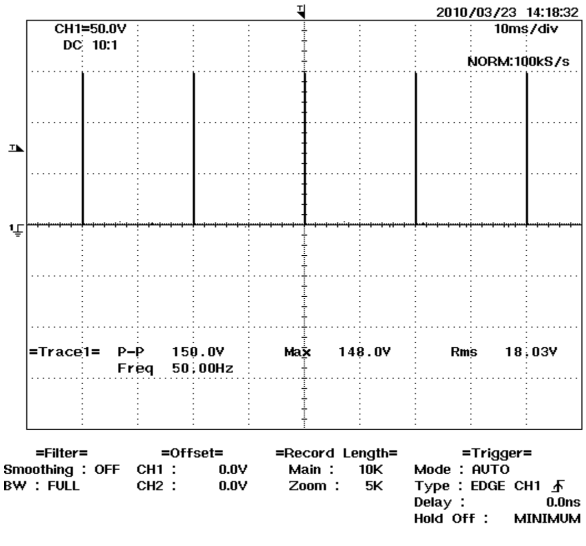
4.2.1 การวัดสัญญาณ Ramp Capacitor



ภาพที่ 4.3 แสดงสัญญาณ Ramp ที่ขา 10

จากภาพที่ 4.3 เป็นสัญญาณที่วัดได้ขา 10 ของ TCA 785 โดยมีคาปาซิเตอร์ต่ออยู่หน้าขา 10 เรียกคาปาซิเตอร์นี้ว่า Ramp Capaciter เป็นตัวเก็บประจุที่เป็นเชิงเส้นเส รี ต่อเวลาที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งทำให้เกิดสัญญาณแรมพ์ หรือเรียกคาปาซิเตอร์นี้ว่าเป็นตัวเก็บประจุสัญญาณลาดเอียง โดยมีค่าอยู่ในช่วง 500 pF ถึง 1 μF ทำการวัดสัญญาณแรมพ์ได้ที่ขา 10 ของ TAC 785

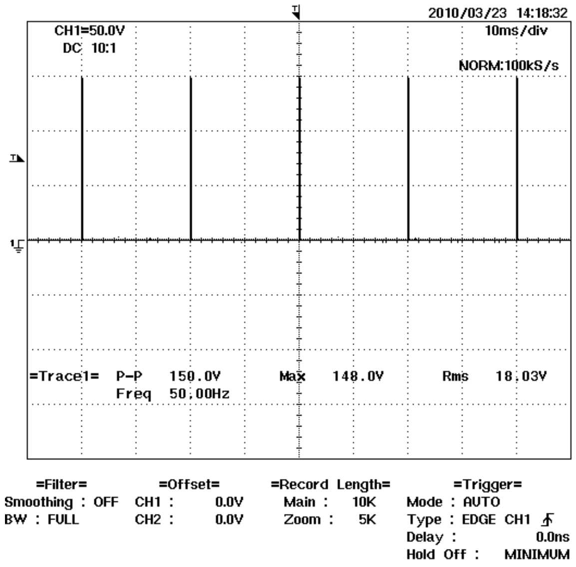
4.2.2 การวัดสัญญาณเอาท์พุทที่ขา 14



ภาพที่ 4.4 แสดงสัญญาณที่ขา 14

จากภาพที่ 4.4 เป็นการแสดงเอาท์พุทที่ขา 14 แบบ Single Shot Pulse ของ TCA 785 ในช่วงสัญญาณลบก่อนที่จะนำไปผ่านหม้อแปลงพัลส์ ซึ่งแรงดันเอาท์พุทประมาณ 15 Vp-p ความถี่ 50 Hz

4.2.3 การวัดสัญญาณเอาท์พุทที่ขา

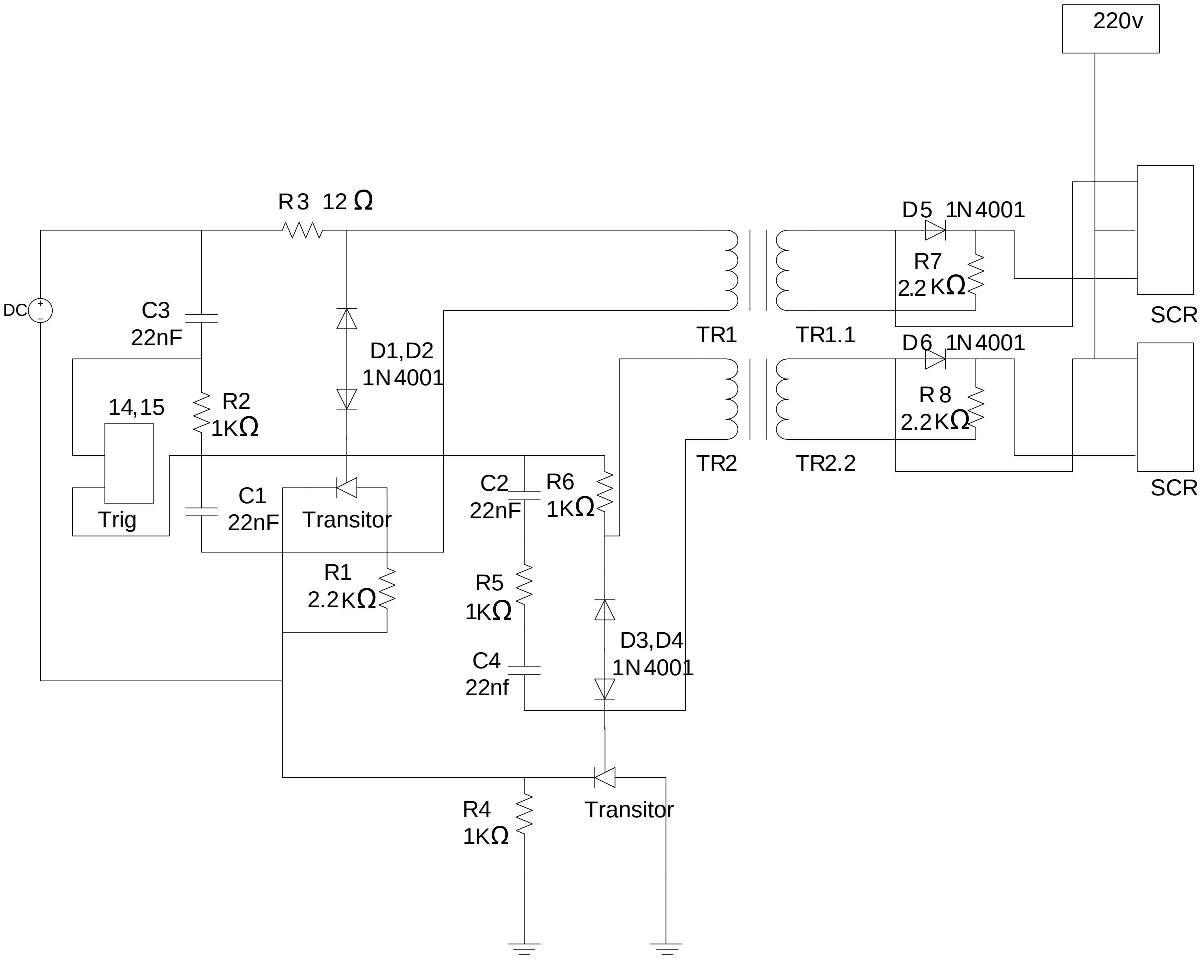


ภาพที่ 4.5 แสดงสัญญาณที่ขา 15

จากภาพที่ 4.5 เป็นการ แสดงเอาท์พุทที่ขา 15 แบบ Single Shot Pulse ของ TCA 785 ในช่วงสัญญาณบวกก่อนที่จะนำไปผ่านหม้อแปลงพัลส์ ซึ่งแรงดันเอาท์พุทประมาณ 15 Vp-p ความถี่ 50 Hz

4.3 การทดลองสัญญาณผ่านวงจรหม้อแปลงพัลส์

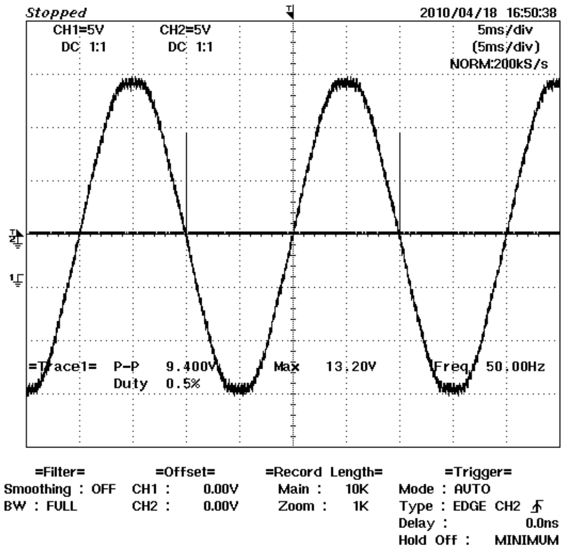
จากภาพที่ 4.6 วงจรการทดลองของหม้อแปลงพัลส์ หม้อแปลงพัลส์ชนิดไอโซเ ลต ซึ่งจะมีอัตราส่วน 1:1 ซึ่งจะทำหน้าที่แยกส่วนของวงจรกำลังออกจากวงจรควบคุม ดังแสดงในภาพที่ 4.6



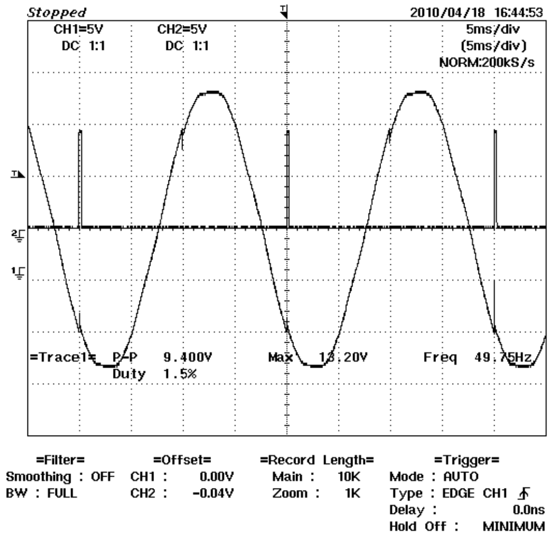
ภาพที่ 4.6 วงจรหม้อแปลงพัลส์และไทริสเตอร์ต่อเฟส

ผลการทดลอง

4.3.1 แสดงเอาท์พุทของหม้อแปลงพัลส์เทียบกับสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V



(ก)



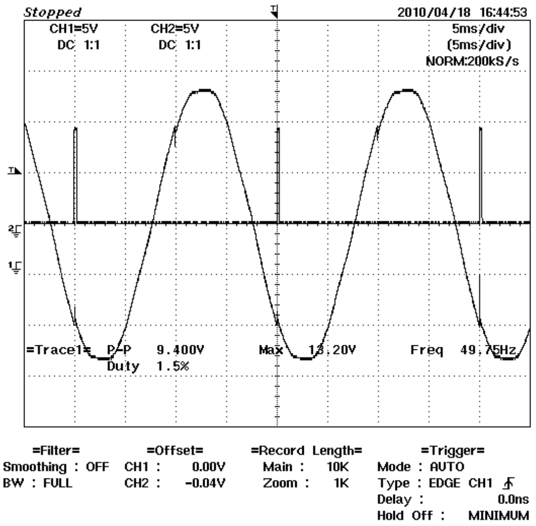
(ข)

ภาพที่ 4.7 แสดงเอาท์พุทของหม้อแปลงพัลส์ขา 14 เทียบกับสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V

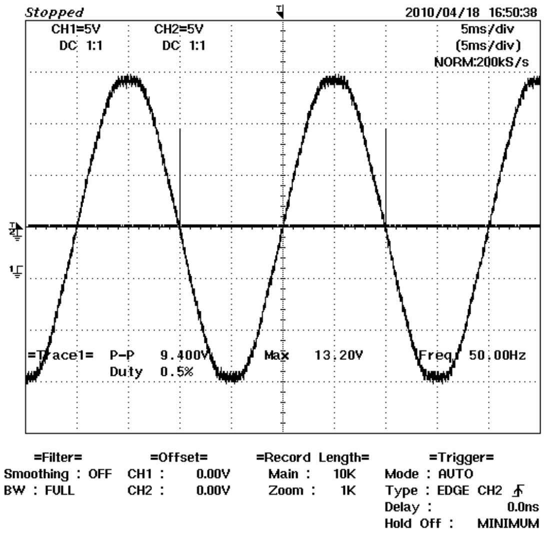
(ก) แสดงอินพุทของหม้อแปลงพัลส์ขา 14

(ข) แสดงเอาท์พุทของหม้อแปลงพัลส์ขา 14

จากภาพที่ 4.7 จะเห็นว่าสัญญาณไซน์ 1 คาบเวลา มีมุม 180 องศา และเรา นำมาเทียบกั บสัญญาณเอาท์พุทของหม้อแปลงพัลส์ เราสามารถปรับ R10kΩ ในวงจรทริกของ TCA 785 ซึ่งเป็นอินพุทของหม้อแปลงพัลส์ จะทำเอาท์พุทของหม้อแปลงพัลส์สามารถเลื่อนมุมเฟสได้ตั้งแต่ 0 องศา ถึง 180 องศา เพื่อนำไปตัดกับสัญญาณไซน์ เพื่อนำไปขับไทริสเตอร์ต่อไป



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.8 แสดงเอาท์พุทของหม้อแปลงพัลส์ขา 15 เทียบกับสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V

(ก)แสดงอินพุทของหม้อแปลงพัลส์ขา 15

(ข)แสดงเอาท์พุทของหม้อแปลงพัลส์ขา 15

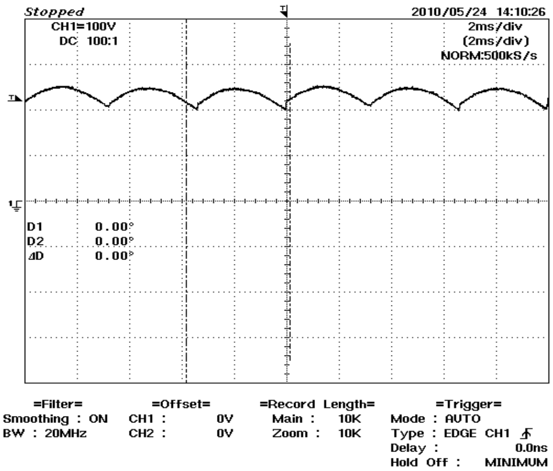
จากภาพที่ 4.8 จะเห็นว่าสัญญาณไซน์ 1 คาบเวลา มีมุม 180 องศา และเรานำมาเทียบกับสัญญาณเอาท์พุทของหม้อแปลงพัลส์ เราสามารถปรับ R10kΩ ในวงจรทริกของ TCA 785 ซึ่งเป็นอินพุทของหม้อแปลงพัลส์ จะทำเอาท์พุทของหม้อแปลงพัลส์สามารถเลื่อนมุมเฟสได้ตั้งแต่ 180 องศา ถึง 360 องศา เพื่อนำไปตัดกับสัญญาณไซน์ เพื่อนำไปขับไทริสเตอร์ต่อไป

4.4 การทดลองวัดสัญญาณทางด้านเอาท์พุท

อุปกรณ์การทดลอง

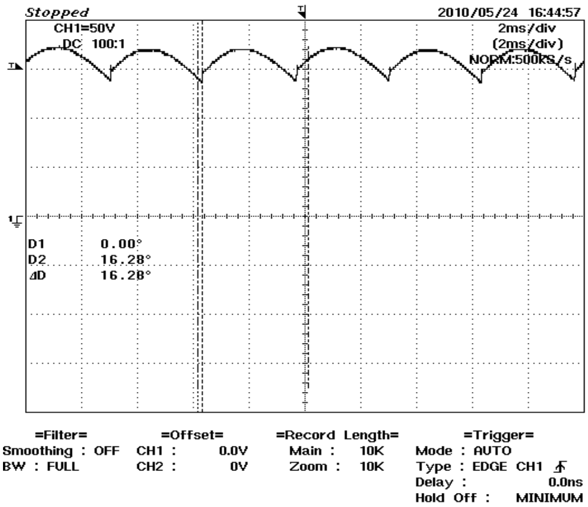
- แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 380 โวลท์
- เพาเวอร์ซัพพลาย 15 โวลท์ดีซี
- มัลติมิเตอร์
- ออสซิลโลสโคป
- ดิ๊ฟโพรป
- สายไฟพร้อมแจ๊คเสียบ

การทดลองชุดคอนเวอร์เตอร์โดยผลการทดลองของโหลดที่เป็นตัวต้านทานและโหลดเก็บประจุที่มุมจุดชนวน $\alpha = 0^{\circ}, 15^{\circ}, 30^{\circ}, 45^{\circ}, 60^{\circ}$, และ 90°



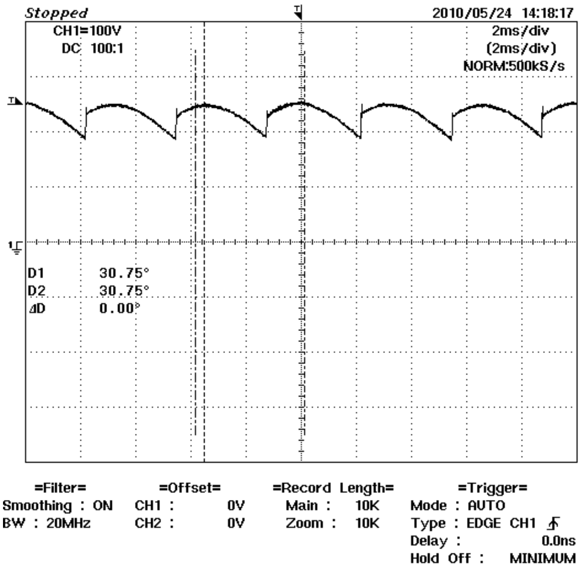
ภาพที่ 4.9 แสดงภาพแรงดันตกคร่อมที่โหลดความต้านทานแรงดันตกคร่อมความต้านทานแรงดันที มุมจุดชนวน 0 องศา

จากภาพแสดงให้เห็นภาพคลื่นแรงดันเอาท์พุทของคอนเวอร์เตอร์ที่มุมจุดชนวน 0 องศา โดยมีแรงดันสูงสุด 540 โวลท์ แรงดันเฉลี่ย 514.6 โวลท์



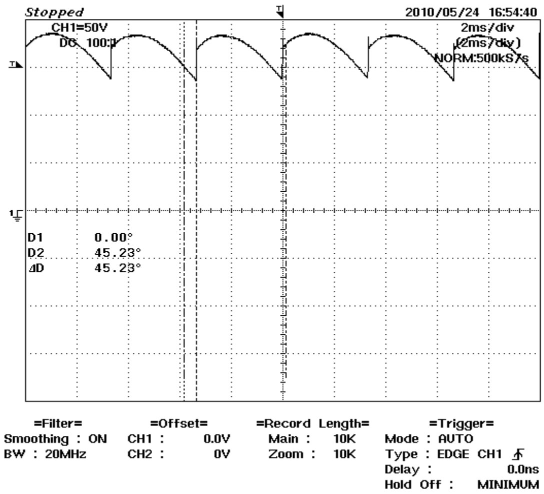
ภาพที่ 4.10 แสดงภาพแรงดันตกคร่อมที่โหลดความต้านทานแรงดันตกคร่อมความต้านทานที่มุม จุดชนวน 15 องศา

จากภาพแสดงให้เห็นภาพคลื่นแรงดันเอาท์พุทของคอนเวอร์เตอร์ที่มุมจุดชนวน 15 องศา โดยมีแรงดันสูงสุด 540 โวลท์ แรงดันเฉลี่ย 494.25 โวลท์



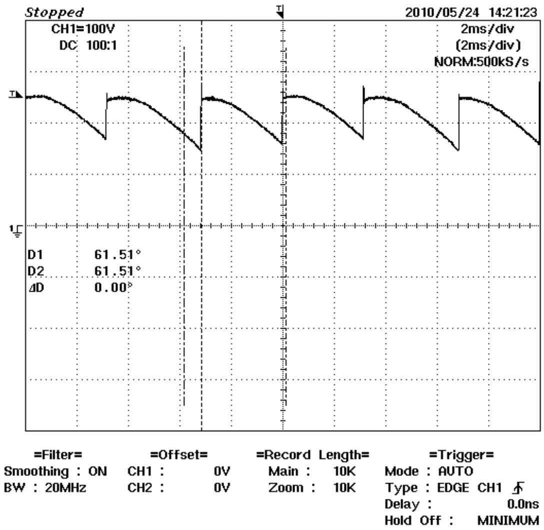
ภาพที่ 4.11 แสดงภาพแรงดันตกคร่อมที่โหลดความต้านทานแรงดันตกคร่อมความต้านทานที่มุม จุดชนวน 30 องศา

จากภาพแสดงให้เห็นภาพคลื่นแรงดันเอาท์พุทของคอนเวอร์เตอร์ที่มุมจุดชนวน 30 องศา โดยมีแรงดันสูงสุด 540 โวลท์ แรงดันเฉลี่ย 446 โวลท์



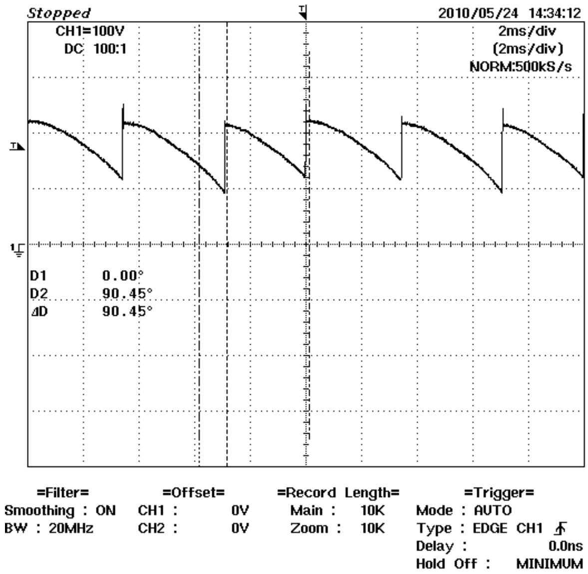
ภาพที่ 4.12 แสดงภาพแรงดันตกคร่อมที่โหลดความต้านทานแรงดันตกคร่อมความต้านทานที่มุมจุดชนวน 45 องศา

จากภาพแสดงให้เห็นภาพ คลื่นแรงดันเอาท์พุ ทของคอนเวอร์เตอร์ที่มุมจุดชนวน 45 องศา โดยมีแรงดันสูงสุด 540 โวลท์ แรงดันเฉลี่ย 365.5 โวลท์



ภาพที่ 4.13 แสดงภาพแรงดันตกคร่อมที่โหลดความต้านทานแรงดันตกคร่อมความต้านทานที่มุมจุดชนวน 60 องศา

จากภาพแสดงให้เห็นภาพคลื่นแรงดันเอาท์พุทของคอนเวอร์เตอร์ที่มุมจุดชนวน 60 องศา โดยมีแรงดันสูงสุด 540 โวลท์ แรงดันเฉลี่ย 257.42 โวลท์



ภาพที่ 4.14 แสดงภาพแรงดันตกคร่อมที่โหลดความต้านทาน แรงดันตกคร่อมความต้านทานที่มุมที่จุดชนวน 90 องศา

จากภาพแสดงให้เห็นภาพคลื่นแรงดันเอาท์พุทของคอนเวอร์เตอร์ที่มุมจุดชนวน 90 องศา โดยมีแรงดันสูงสุด 540 โวลท์ แรงดันเฉลี่ย 0 โวลท์

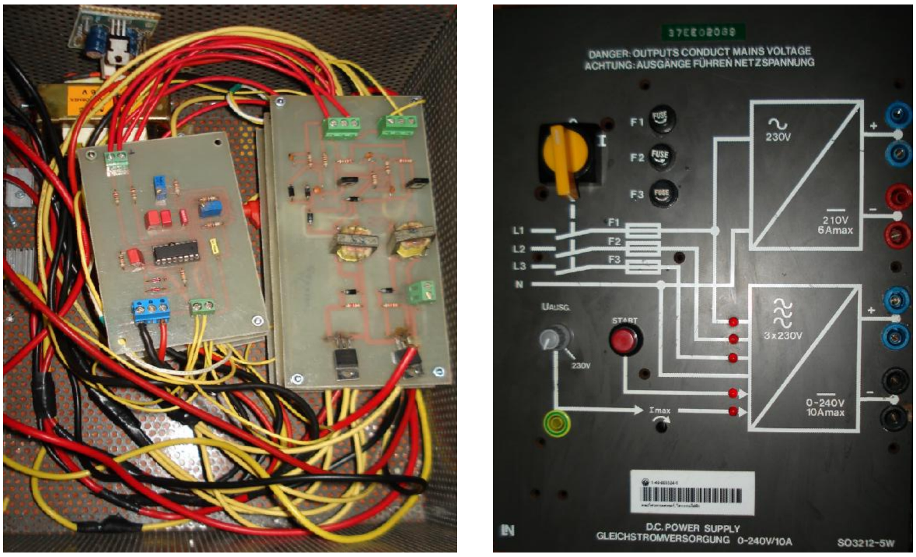
ตารางที่ 4.1 แสดงการทดลองของโหลดที่เป็นตัวต้านทานและโหลดเก็บประจุที่มุมจุดชนวน $\alpha = 0^{\circ}, 30^{\circ}, 60^{\circ}$, และ 90°

α	0	30	60	90
ค่าจากการทดลอง	514.6	446	257.42	0
ค่าจากการคำนวณ	515.97	446.57	257.98	0

4.5 โครงสร้างของคอนเวอร์เตอร์สามเฟส

ภาพที่ 4.15 ก. แสดงอุปกรณ์ภายในของคอนเวอร์เตอร์สามเฟส

ข. คอนเวอร์เตอร์สามเฟสที่ประกอบสมบูรณ์และพร้อมใช้งาน



บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

จากการทดลองการควบคุมมุมทริกของ SCR ที่โหลดตัวเก็บประจุให้มีค่ามากขึ้นตามลำดับ เอาท์พุทจะค่อยๆ เรียบขึ้นจนเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในที่สุด ส่วนในโหลดตัวต้านทานจะได้แรงดันเอาท์พุทเป็นภาพเคลื่อนเพียงซักเดียวติดกัน ซึ่งเป็นแรงดันกระแสตรง ไม่เรียบเหมือนโหลดตัวเก็บประจุ การเริ่มทำงานของโหลดตัวเก็บประจุจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามแรงดันที่จ่ายและการปรับมุมทริกเมื่อปิดวงจรแล้ว แรงดันจะยังคงมีอยู่ และจะค่อยๆ ลดลงในเวลาอันสมควร

ในการทำโครงงานครั้งนี้ ปัญหาแรกที่พบเจอเริ่มต้นจากชุดทริกสัญญาณที่ต้องการให้ค่าเอาท์พุทออกมาให้ตรงกับ Data Sheet ตามคุณสมบัติของ TCA 785 ต้องทำการปรับเปลี่ยนค่าอุปกรณ์บางอย่างในวงจร เพื่อให้สามารถได้ภาพสัญญาณตามคุณสมบัติ ปัญหาต่อมาที่พบเจออยู่ในด้านชุดกำลัง เมื่อทำการต่อวงจร ปรากฏว่ารูปสัญญาณที่ได้ไม่กลับเฟส ทำให้ต้องหาจุดผิดพลาดในวงจร และทำการแก้ไข ทำให้ได้รู้สาเหตุว่าต่อทรานซิสเตอร์ผิด และเมื่อได้แก้ไขภาพ สัญญาณที่ได้จึงออกมาถูกต้อง ต่อมาเมื่อได้ทดสอบกับไทริสเตอร์เพียงเฟสเดียวทำให้ทราบว่าวงจรสามารถใช้งานได้จริง จากนั้นก็ทำการต่อไทริสเตอร์ทั้ง 6 ชุด ทำให้ได้เอาท์พุทตามที่ปรากฏในผลการทดลอง

จากขั้นตอนการทดลองโครงงานเพื่อควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ข้อผิดพลาดที่มักเกิดขึ้นในการทดลอง มีดังนี้

1. ความผิดพลาดของอุปกรณ์ในวงจรเมื่อเกิดความเสียหายเมื่อลงอุปกรณ์ครบแล้ว จะทำการตรงเช็คได้ลำบาก

2. ความผิดพลาดของเครื่องมือวัดในระบบเครื่องมือวัด อาจมีปัญหาทำให้เอาท์พุทที่ออกมาคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริงอาจเนื่องมาจาก เครื่องมือวัดอาจใช้งานมานานสายวัดชำรุด

3. ในการต่อวงจรนั้น ควรตรวจเช็คขาของอุปกรณ์ต่างๆ ให้ตรงกับวงจร หากไม่ตรง อาจทำให้เกิดความเสียหายกับวงจร ควรป้องกัน โดยการติดตั้งอุปกรณ์ตัดตอนด้วย และการจ่ายแรงดันควรตรวจดูอย่างถี่ถ้วน เพราะวงจรนี้เป็นการทำงานร่วมกันระหว่างไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ ถ้าตรวจเช็คไม่ดีอาจเกิดความเสียหายแก่วงจรได้