หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ไทรีสเตอร์
(Thyristor)

2.1 คำนำ

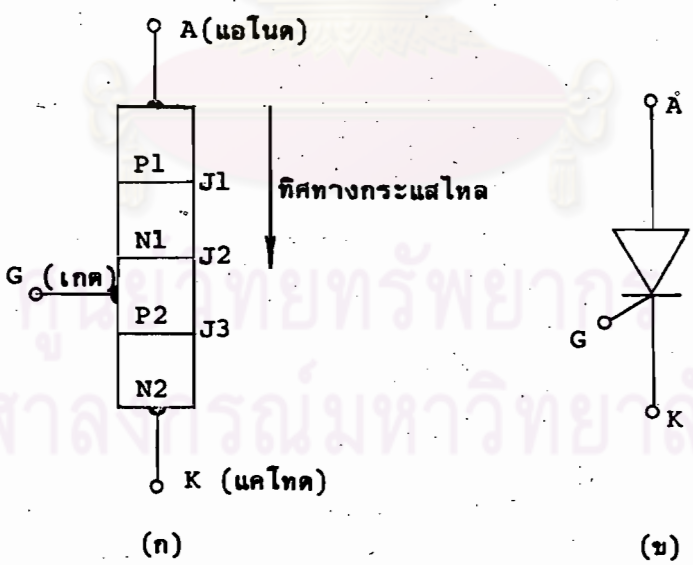
ไทรีสเตอร์เป็นอุปกรณ์เซมิคอนดัคเตอร์ ทำหน้าที่เป็นสวิทช์อิเล็กทรอนิกส์สามารถปิดวงจรให้กระแสไหลได้ทิศทางเดียว และทำให้หยุดนำกระแสได้ด้วยวงจรภายนอก ในช่วงการทำงานของไทรีสเตอร์ จะไม่มีส่วนหนึ่งส่วนใดเคลื่อนไหวทำให้อายุการใช้งานของไทรีสเตอร์ยาวนาน ไทรีสเตอร์มีข้อดีที่มีน้ำหนักเบา ทำงานโดยไม่มีเสียงรบกวน ทนทานต่ออุณหภูมิหนาวเย็น ทำงานได้ทุกระดับความสูง สามารถเริ่มทำงานได้ทันทีทันใด จากการที่ได้มีการพัฒนาไทรีสเตอร์ให้มีขนาดต่าง ๆ ทำให้อุตสาหกรรมทุกประเภทนำเอาไทรีสเตอร์ไปใช้ควบคุมกำลังไฟฟ้าและการเปลี่ยนรูปพลังงานไฟฟ้า ไทรีสเตอร์ได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์ในด้านควบคุมความเร็ว ดีซี.และ เอซี. มอเตอร์ การควบคุมความสว่าง การควบคุมอุณหภูมิ แหล่งจ่ายไฟฉุกเฉิน และในวงจรอินเวอร์เตอร์จะใช้ไทรีสเตอร์เป็นอุปกรณ์หลักในการสวิชชิ่ง เพื่อให้ได้แรงดันกระแสไฟออกเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมเพื่อนำไปใช้งาน ไทรีสเตอร์มีข้อเสียที่มีแรงดันตกคร่อมตัวมันเอง ทำให้เกิดกำลังสูญเสียและการทำให้ไทรีสเตอร์หยุดนำกระแสเป็นสิ่งที่ยุ่งยาก

ในบทนี้จะขอกล่าวถึง หลักการทำงาน และคุณสมบัติของไทรีสเตอร์เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้ไทรีสเตอร์และการควบคุมให้ไทรีสเตอร์ทำงานตามที่ต้องการ

2.2 ไทรีสเตอร์[1]

ไทรีสเตอร์หรือเอส.ซี.อาร์(Thyristor or Silicon control Rectrifier) เป็นอุปกรณ์เซมิคอนดัคเตอร์ที่ผลิตขึ้นจากสารกึ่งตัวนำแบบพีและ

แบบเอ็นเรียงสลับกันเป็นชั้น ๆ สี่ชั้นทำให้เกิดรอยต่อพีเอ็นสามรอยต่อและมีสามขั้วคือ แอโนด(Anode) แคโทด(Cathode)และเกต(Gate) ดังรูปที่ 2.1 ไทรีสเตอร์ ทำหน้าที่เป็นสวิชท์อิเล็กทรอนิกส์สามารถนำกระแสได้ทิศทางเดียวโดยกระแสไฟฟ้าจะไหลจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด[1] เมื่อได้รับสัญญานจุดฉนวนที่ขาเกต ในช่วงการทำงานของไทรีสเตอร์จะไม่มีส่วนหนึ่งส่วนใดเคลื่อนไหวทำให้อายุการใช้งานของไทรีสเตอร์ยาวนาน ไทรีสเตอร์มีข้อดีที่มีน้ำหนักเบา ทำงานไว้ใจได้การบำรุงรักษาน้อย สามารถเริ่มทำงานได้ทันทีทันใดอย่างไรก็ตามไทรีสเตอร์ก็มีข้อเสียหลายประการคือเมื่อไทรีสเตอร์นำกระแสจะมีแรงดันตกคร่อมไทรีสเตอร์ในทิศฟอร์เวิร์ด ประมาณ 1.5 โวลท์ ทำให้เกิดกำลังสูญเสียภายในตัวไทรีสเตอร์ก่อให้เกิดความร้อนจึงจำเป็นต้องมีการระบายความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพ และต้องออกแบบวงจรป้องกันแรงดันเปลี่ยนแปลงชั่วครู่ด้วย นอกจากนี้เมื่อไทรีสเตอร์นำกระแสแล้ว การที่จะทำให้ไทรีสเตอร์ หยุดนำกระแสเป็นสิ่งยุ่งยาก



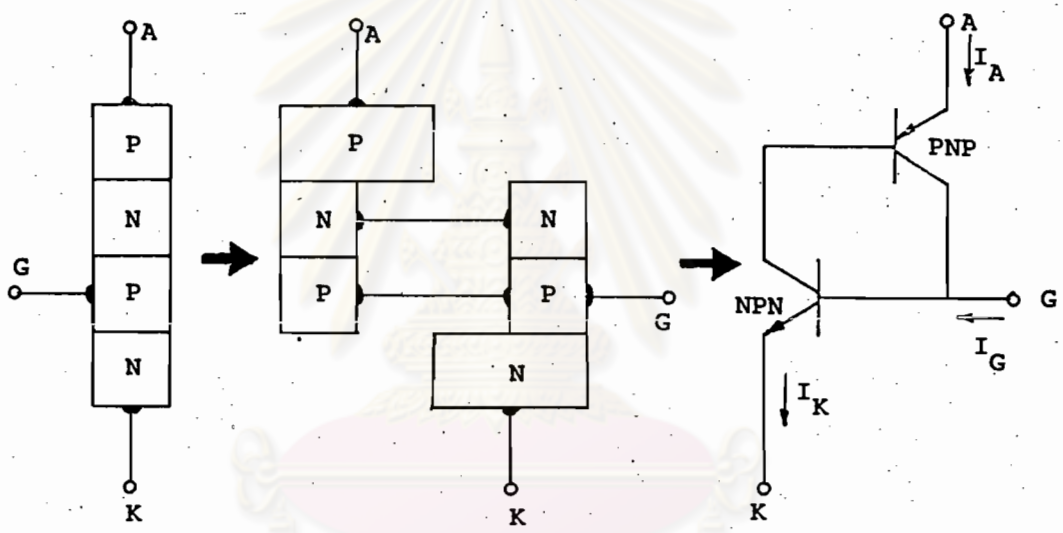
รูปที่ 2.1 ก) โครงสร้างของไทรีสเตอร์

ข) สัญญลักษณ์ของไทรีสเตอร์

2.3 หลักการทำงานและลักษณะสมบัติของไทรีสเตอร์

2.3.1 หลักการทำงาน

การทำงานของไทรีสเตอร์สามารถอธิบายได้โดยอาศัยทฤษฎีของรอยต่อพีเอ็นหรือโดยอาศัยวงจรสมมูลย์ทรานซีสเตอร์[1] ในที่นี้จะขอกล่าวเฉพาะวิธีหลังวิธีเดียวคือ ให้ไทรีสเตอร์มีโมเดลเป็นทราสซีสเตอร์ โดยให้ชั้นพีเอ็นพีเอ็นของไทรีสเตอร์ถูกแบ่งออกเป็นทรานซีสเตอร์เอ็นพีเอ็น และ พีเอ็นพีสองตัวต่อกันด้วยวิธีการป้อนกลับค่าบวก ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โมเดลไทรีสเตอร์แบบวงจรทรานซีสเตอร์ต่อกันแบบป้อนกลับค่าบวก

เมื่อป้อนแรงดันให้กับไทรีสเตอร์ในทิศทางฟอร์เวิร์ดโดยขั้วแอโนดต่อกับขั้วบวกและขั้วแคโทดต่อกับขั้วลบของแหล่งจ่ายกระแสไฟตรง ทรานซีสเตอร์ทั้งสองจะมีแรงดัน เข้าไปเลี้ยงอีมิตเตอร์(Emitter) และคอลเล็คเตอร์(Collector) ในทิศทาง ฟอร์เวิร์ดแต่ทรานซีสเตอร์ทั้งสองยังอยู่ในสภาวะไม่นำกระแส ต่อมาเมื่อเพิ่มแรงดันแอโนดถึงค่าแรงดันพังข้าม V_{BO} (Breakover Voltage)คอลเล็คเตอร์ ของทรานซิสเตอร์เอ็นทีเอ็นตัวล่างซึ่งมีศักย์ลบปรากฏอยู่จะเข้าไปกระตุ้นเบส(Base) ของทรานซิสเตอร์พีเอ็นพีตัวบน ทำให้เกิดการ

นำกระแสดังนั้นคอลเล็คเตอร์ของทรานซิสเตอร์ตัวบน จะมีศักย์บวกปรากฏสูงขึ้น และส่งเข้ากระตุ้นเบสของทรานซิสเตอร์ตัวล่าง ให้นำกระแสมากขึ้นคอลเล็คเตอร์ของทรานซิสเตอร์ตัวล่างก็จะมีศักย์ลบปรากฏมากขึ้น และเข้ากระตุ้นเบสของทรานซิสเตอร์ตัวบนให้นำกระแสมากขึ้น ซึ่งผลอันนี้จะวนมากระตุ้นทรานซิสเตอร์ตัวล่างอีก กระบวนการนี้เป็นการป้อนกลับค่าบวก ซึ่งผลสุดท้ายจะทำให้ทรานซิสเตอร์ทั้งสองนำกระแสอยู่ในสภาวะอิ่มตัว และมีกระแสแอโนดของไทรีสเตอร์ไหลได้สูงมาก ทำให้ไทรีสเตอร์จะอยู่ในสภาวะนำกระแส ถ้าต้องการให้ไทรีสเตอร์เปลี่ยนสภาวะนำกระแสกลับเข้าสู่สภาวะหยุดนำกระแส ก็โดยการลดขนาดกระแสแอโนด I_A ลงให้ต่ำกว่ากระแสโฮลดิ่ง I_H (Holding Current) ในขณะที่กระแสเกต I_G มีค่าเท่ากับศูนย์ กระแสคอลเล็คเตอร์ของทรานซิสเตอร์ตัวบนจะลดต่ำลงมากไม่พอที่จะไปกระตุ้น ให้เบสของทรานซิสเตอร์ตัวล่างให้นำกระแสต่อไปได้ ศักย์ที่คอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์ตัวล่างก็จะลดน้อยลงมากไม่พอที่จะไปกระตุ้นเบสของทรานซิสเตอร์ตัวบนให้นำกระแสต่อไปอีกได้ ทรานซิสเตอร์ทั้งสองก็จะหยุดกระแส ดังนั้นไทรีสเตอร์จึงเปลี่ยนสถานะกลับเข้าสู่สภาวะหยุดนำกระแส

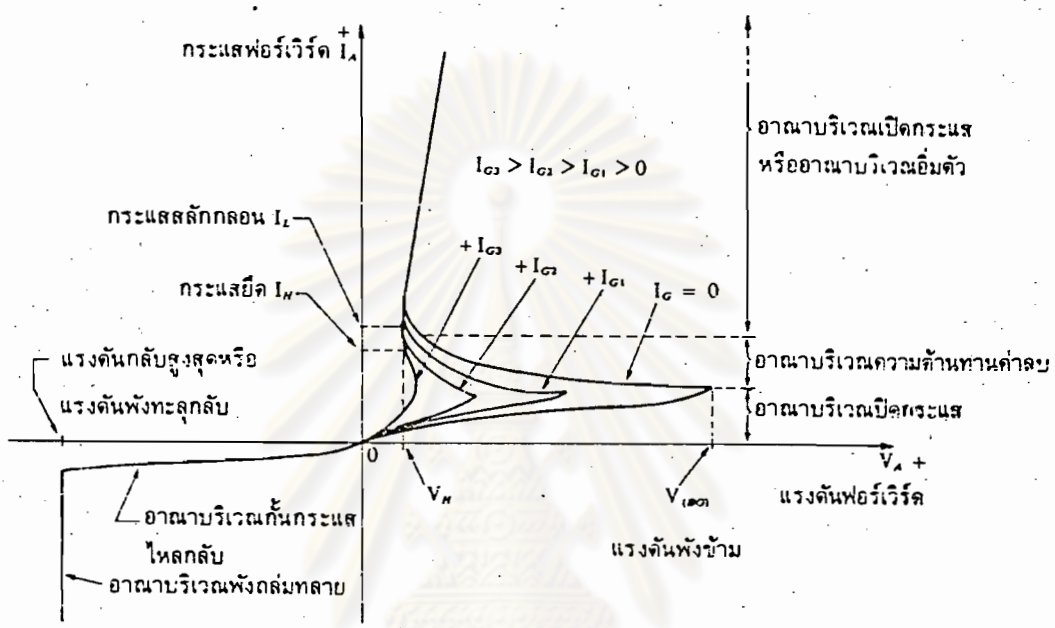
ถ้าป้อนแรงดันแอโนดเป็นลบเทียบกับแคโทดของไทรีสเตอร์ จะทำให้ไทรีสเตอร์ทั้งสองต่ออยู่ในสภาวะไบแอสกลับ (Reverse Bias)จึงมีกระแสแอโนดไหลได้น้อยมาก เมื่อเพิ่มแรงดันแอโนดค่าลบให้สูงมาก ๆ จะทำให้ทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัวพังทะลุได้ ก่อให้เกิดกระแสแอโนดไหลได้สูงมากและทำให้ไทรีสเตอร์พังเสียหาย

2.3.2 ลักษณะคุณสมบัติของไทรีสเตอร์

ไทรีสเตอร์สามารถทำงานได้สองสภาวะ คือสภาวะนำกระแสและสภาวะไม่นำกระแส ดังแสดงในรูปที่ 2.3

เมื่อป้อนแรงดันกลับทาง (Reverse Voltage) ให้กับไทรีสเตอร์ จะได้เส้นโค้ง คุณสมบัติของไทรีสเตอร์เหมือนกับของไดโอด ซึ่งจะมีกระแสรั่วไหลกลับ

ทาง (Reverse Leakage Current) เล็กน้อยอยู่ค่าหนึ่ง จะมีค่ามากขึ้นเมื่อแรงดันกลับทางมีค่าเพิ่มขึ้น และมีค่าอย่างมากเมื่อแรงดันกลับทางมีค่ามากกว่าค่าแรงดันพังทะลุกลับ (Reverse Breakdown Voltage) เมื่อป้อนแรงดันฟอร์เวิร์ด ให้



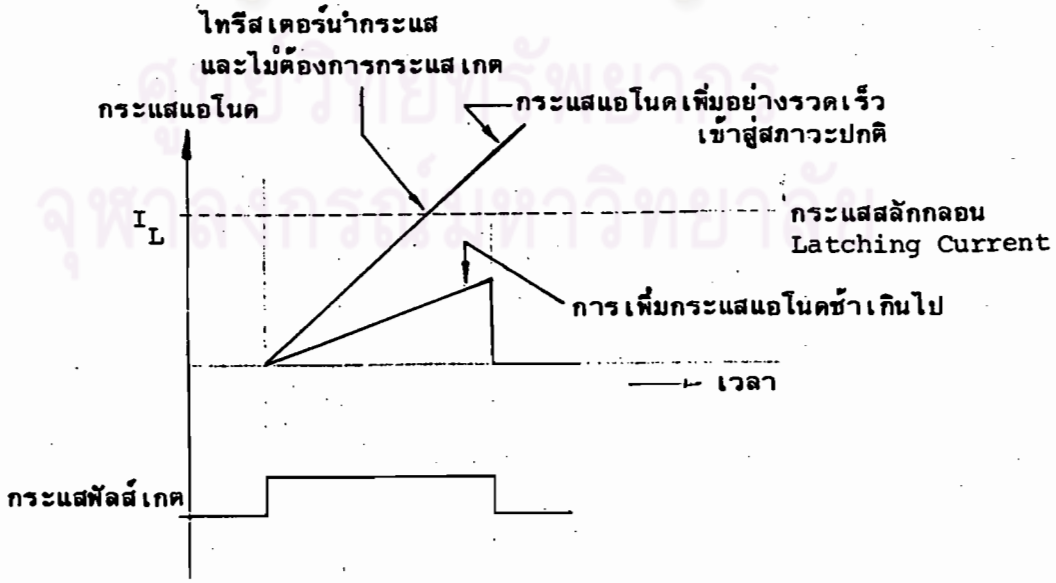
รูปที่2.3 ลักษณะคุณสมบัติของแรงดันและกระแสของไทรีสเตอร์

แก่ไทรีสเตอร์ ขณะที่กระแสเกตมีค่าเป็นศูนย์ จะมีกระแสรั่วในทิศทางฟอร์เวิร์ด (Forward Leakage Current)เล็กน้อย แต่เมื่อเพิ่มแรงดันฟอร์เวิร์ดมากขึ้นถึงค่าแรงดันพังข้าม V_{BO} (Breakover Voltage)จะทำให้ไทรีสเตอร์เปลี่ยนสถานะเข้าสู่สภาวะนำกระแสได้เอง โดยต้องการเวลาชั่วครู่หนึ่ง ซึ่งเรียกว่า "เวลาเปิดกระแส" (Turn-on Time) และเมื่อลดแรงดันที่ป้อนให้แก่ไทรีสเตอร์ลงจนทำให้กระแสแอโนดมีค่าเท่ากับกระแสยึด I_H (Holding Current) ซึ่งเป็นกระแสที่น้อยที่สุดที่ไทรีสเตอร์จะอยู่ในสภาวะนำกระแสได้ ช่วงนี้เป็นช่วงที่ไทรีสเตอร์กำลังจะเปลี่ยนสถานะจากสภาวะนำกระแสไปสู่สภาวะหยุดนำกระแส ในขณะที่กระแสเกต $I_G = 0$ เมื่อลดกระแสแอโนด I_A ให้ต่ำกว่ากระแสยึด I_H ไทรีสเตอร์จะหยุดนำกระแสการเปลี่ยนสภาวะนี้ต้องการเวลาชั่วครู่หนึ่ง เรียกว่า "เวลาปิดกระแส" (Turn-off Time ; tg) กระแสเกด I_G มีอิทธิพลมากในการทำให้ไทรีสเตอร์

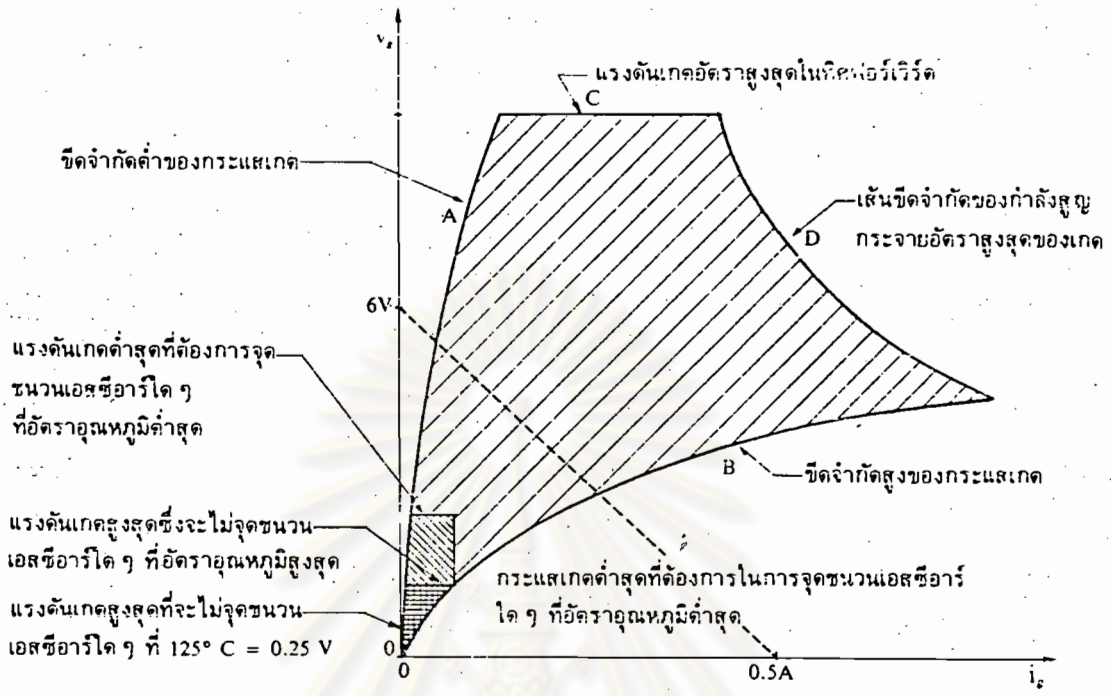
เปลี่ยนสภาวะจากสภาวะไม่นำกระแสเข้าสู่สภาวะนำกระแสได้ง่ายขึ้น โดยไม่ต้องให้แรงดันแอโนด V_A สูงมาก

2.4 การจุดชนวนไทรีสเตอร์

ไทรีสเตอร์สามารถเปลี่ยนสภาวะไม่นำกระแสเข้าสู่สภาวะนำกระแสได้ โดยอาศัยกระบวนการป้อนกลับค่าบวกที่เกิดขึ้นในตัวไทรีสเตอร์ สามารถควบคุมกระบวนการนี้ให้เกิดขึ้น โดยการป้อนแรงดันค่าบวกเข้าที่ขั้วเกตเทียบกับขั้วแคโทดของไทรีสเตอร์ จะทำให้มีกระแสเกตหุ่งเข้าเบสของทรานซิสเตอร์เอ็นพีเอ็น ดังรูป 2.2 เป็นผลให้เกิดกระบวนการป้อนกลับค่าบวก ไทรีสเตอร์ก็จะนำกระแสได้ วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการจุดชนวนให้ไทรีสเตอร์นำกระแสทั่ว ๆ ไป การจุดชนวนโดยการป้อนกระแสเกตต้องให้เป็นพัลส์ที่มีสันหน้าสูงชันและพัลส์ต้องกว้างพอ เพื่อให้กระแสแอโนดมีค่ามากว่ากระแสสลักกลอน I_l (Latching Current) ดังรูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสของเกตแสดงได้ดังรูปที่ 2.5 บริเวณที่แสดงด้วยเส้นแลเงาห่าง ๆ เป็นบริเวณตำแหน่งของการจุดชนวนที่ใช้ได้ดีและทำงานเชื่อถือได้และถ้าตำแหน่งจุดชนวนอยู่ในส่วนล่างซ้ายมือจะเป็นจุดที่เหมาะสมในการใช้งานมากที่สุด



รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแอโนดกับกระแสสลักกลอน



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะคุณสมบัติของแรงดันและกระแสของเกต

2.5 การนำกระแสและการหยุดนำกระแสของไทรีสเตอร์

เมื่อป้อนแรงดันค่าบวกเข้าที่เกตเทียบกับขั้วแคโทดของไทรีสเตอร์ ขณะที่มีแรงดันฟอร์เวิร์ดป้อนให้แก่ไทรีสเตอร์ ไทรีสเตอร์จะไม่นำกระแสทันที แต่จะใช้เวลาชั่วครู่หนึ่งจึงจะนำกระแสตามปกติ ช่วงเวลานี้เรียกว่า"เวลานำกระแส"(Turn-on Time ; t_{on}) โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1-3 us การที่ต้องใช้เวลาช่วงนำกระแสเนื่องจากการนำกระแสจะเริ่มต้นจากบริเวณเล็ก ๆ ของชั้นที่เกตเชื่อมติดอยู่แล้วแพร่ขยายออกไปทั่วทั้งบริเวณ ดังนั้นช่วงเริ่มนำกระแส กระแสจะมีความหนาแน่นสูงมากและถ้าอัตราการเพิ่มของกระแส di/dt มีค่าสูงมากจะก่อให้เกิดความร้อนที่บริเวณเล็ก ๆ ที่นำกระแสนั้น ทำให้ไทรีสเตอร์เสียหายได้เมื่อไทรีสเตอร์นำกระแสแล้วจะมีแรงดันคร่อมไทรีสเตอร์อยู่ประมาณ 1-1.5 โวลท์ กระแสที่ไหลผ่านไทรีสเตอร์จะถูกจำกัดด้วยความต้านทานภายนอกการที่จะให้ไทรีสเตอร์หยุดนำกระแสทำได้ 3 วิธี[9] คือ.-

ก. ลดกระแสแอโนดลงให้ต่ำกว่ากระแสยึด I_H (Holding Current) โดยการเปิดสวิทช์วงจรของไทรีสเตอร์ทำในกระแสแอโนดหยุดไหล

ข. ป้อนแรงดันกลับข้ัวให้แก่ไทรีสเตอร์ (Reverse Bias) โดยแคโทดมีแรงดันเป็นบวกเมื่อเทียบกับข้ัวแอโนด จะกระตุ้นให้กระแสแอโนดลดลงต่ำกว่ากระแสยึด เช่น การต่อไทรีสเตอร์ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับทุก ๆ ครึ่งไซเคิลไทรีสเตอร์จะถูกป้อนแรงดันกลับข้ัว ทำให้กระแสแอโนดต่ำลงกว่ากระแสยึด

ค. เพิ่มกระแสยึด I_H (Holding Current) ให้สูงกว่ากระแสแอโนด โดยการป้อนแรงดันลบที่ข้ัวเกตเมื่อเทียบกับข้ัวแคโทด Gate Turn-off Thyrister จะทำให้ไทรีสเตอร์หยุดนำกระแสได้

การหยุดนำกระแสของไทรีสเตอร์จะใช้เวลาชั่วครู่หนึ่ง เพื่อให้ประจุในช่วงรอยต่อของไทรีสเตอร์คืนตัวสู่สภาพปกติ เรียกช่วงเวลานี้ว่า "เวลาหยุดนำกระแส" เนื่องจากมีผลต่อวงจรคอมมิวเตต เวลาหยุดนำกระแสของไทรีสเตอร์มีค่าตั้งแต่ 10 us - 200 us

การนำไทรีสเตอร์มาใช้ควบคุมกำลังไฟฟ้า จะต้องเลือกขนาดให้เหมาะสมสามารถทนทานต่อแรงดันฟอร์เวิร์ด แรงดันรีเวิร์ดแบบชั่วขณะและไม่ชั่วขณะได้และทนทานต่อกระแสโหลดได้

2.6 การคอมมิวเตตไทรีสเตอร์ด้วยวิธีปิบบังคับ[1]

โดยอาศัยประจุจำนวนมากที่เก็บไว้บนตัวเก็บประจุ เมื่อถึงเวลาที่ต้องการให้ไทรีสเตอร์หยุดนำกระแส ก็ใช้วิธีการของอิเล็กทรอนิกส์เข้าบังคับให้ตัวเก็บประจุถ่ายประจุผ่านไทรีสเตอร์ในทิศใบแอสกลับทางอย่างรวดเร็วเป็นกระแสอิมพัลส์(Impulse) เมื่อกระแสอิมพัลสนี้มีค่าใหญ่กว่ากระแสแอโนดในทิศฟอร์เวิร์ดแล้ว ไทรีสเตอร์ก็จะหยุดนำกระแสลง วิธีนี้ให้เวลาหยุดนำกระแสสั้นมาก เป็นวิธีที่นิยมใช้กับกรณีที่แหล่งจ่ายไฟเสี้ยงวงจรเป็นไฟฟ้ากระแสตรง วิธีการคอมมิวเตตไทรีสเตอร์ด้วยวิธีบังคับแบ่งออกได้ 6 คลาส ดังนี้.

ก. คลาส A การคอมมิวเตตตัวเองโดยการเรโซแนนซ์ของโหลด

ข. คลาส B การคอมมิวเตตตัวเองโดยใช้วงจร LC

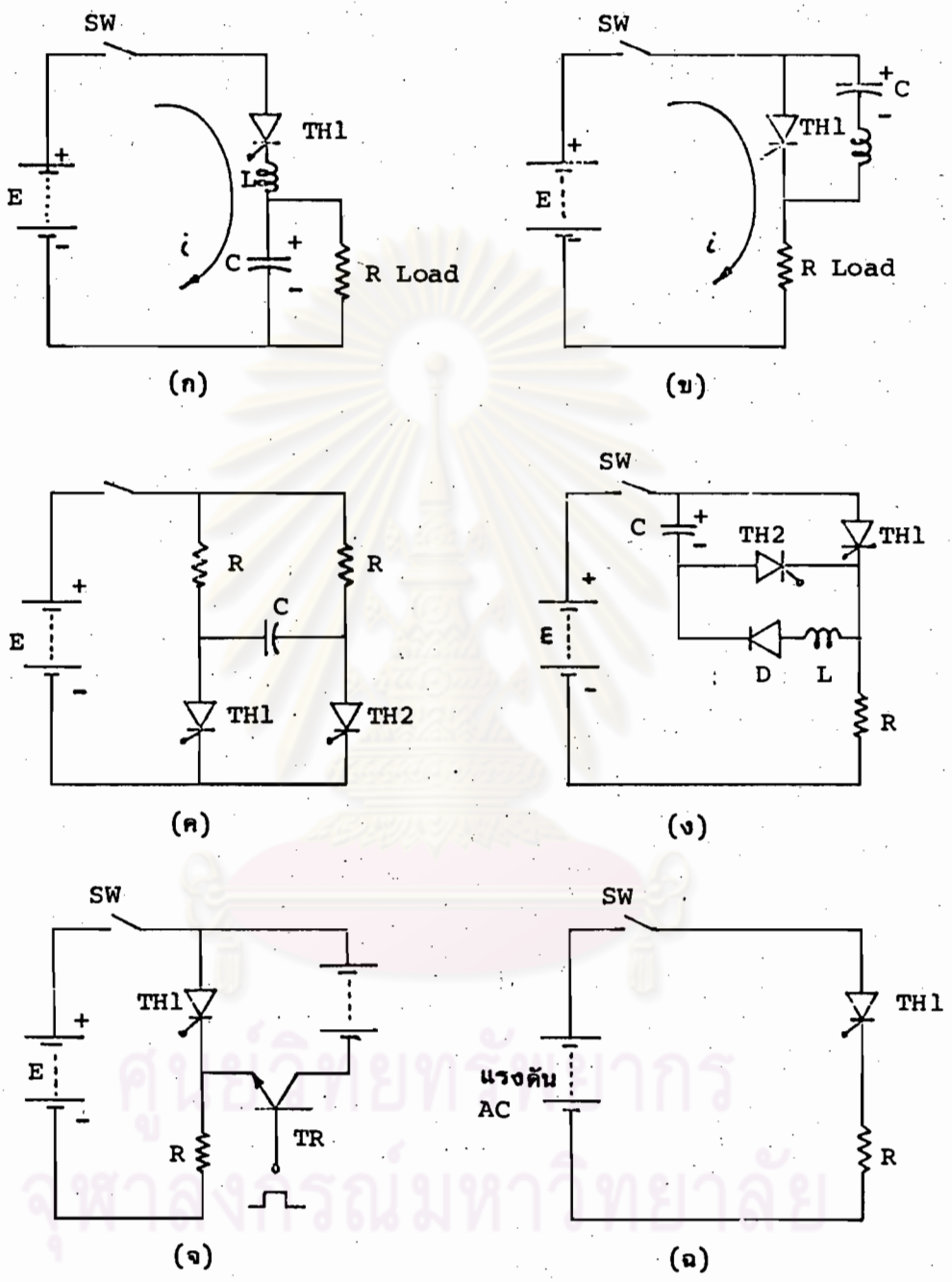
ค. คลาส C C หรือ LC ถูกสวิทช์เข้าต่อกับไทรีสเตอร์ด้วยไทรีสเตอร์อีกตัวหนึ่งซึ่งต่างผลัดกันรับโหลด

ง. คลาส D C หรือ LC ถูกสวิทช์เข้าต่อกับไทรีสเตอร์โดยอาศัยไทรีสเตอร์ช่วย

จ. คลาส E การคอมมิวเตตโดยใช้แหล่งจ่ายพัลส์จากภายนอก

ฉ. คลาส F การคอมมิวเตตด้วยแรงดันของไฟฟ้ากระแสสลับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.1 วงจรการคอมมิวเตตไทรีสเตอร์ด้วยวิธีการบังคับของวงจรชอปเปอร์แบบต่าง ๆ

ก. วงจร คลาส A ข. วงจร คลาส B

ค. วงจร คลาส C ง. วงจร คลาส D

จ. วงจร คลาส E ฉ. วงจร คลาส F

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย