บทที่ 2

หลักการของมอเตอร์กระแสตรงแบบไม่มีคอมมิวเตเตอร์

2.1 บทนำ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการวิจัย และทดลองเกี่ยวกับลักษณะสมบัติของมอเตอร์กระแสตรงแบบไม่มีคอมมิวเตเตอร์ โดยใช้ thyristor ควบคุมทิศทางของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์

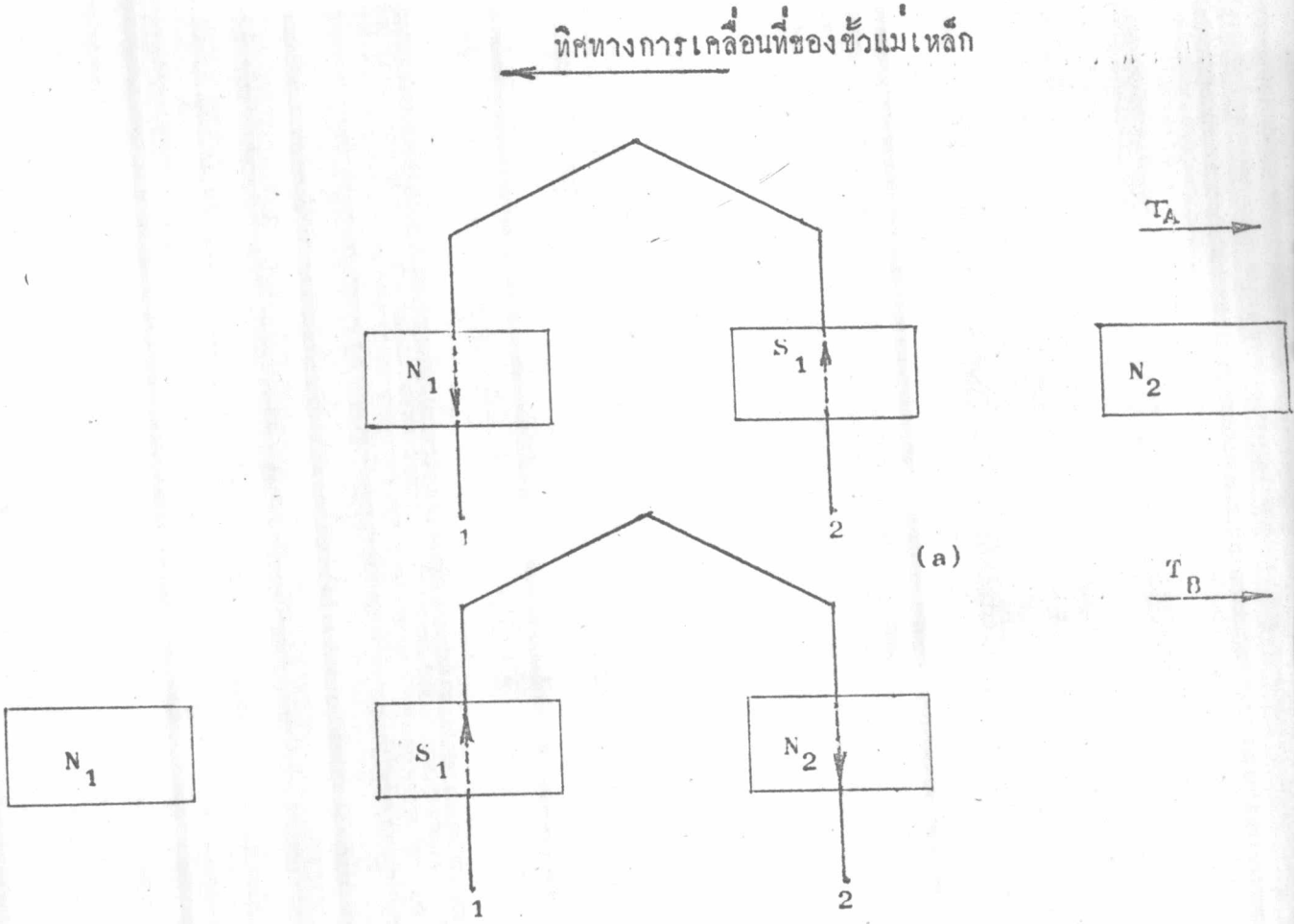
เพื่อที่จะทำให้สามารถเข้าใจถึงหลักการทำงานของมอเตอร์แบบไม่มีคอมมิวเตเตอร์ จึงจะกล่าวถึงหลักของมอเตอร์กระแสตรง ลักษณะสมบัติของ thyristor และหลักในการใช้ thyristor ทำหน้าที่ควบคุมการกลับทิศทางของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์ให้สัมพันธ์กับชนิดของขั้วแม่เหล็ก เพื่อทำให้เกิดแรงบิดในทิศทางเสริมกันให้หราบเสียก่อนในบทนี้

2.2 หลักของมอเตอร์กระแสตรง

ในมอเตอร์กระแสตรงจะมีขดลวดสนามแม่เหล็กเป็นส่วนที่สร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมา เมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวดอาร์เมเจอร์ก็จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กของอาร์เมเจอร์ โดยที่แกนของสนามแม่เหล็กที่เกิดเนื่องจากขดลวดอาร์เมเจอร์ไม่อยู่ในทิศทางเดียวกันกับแกนของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นโดยขดลวดสนามแม่เหล็ก จะทำให้เกิดแรงบิดขึ้นเป็นผลให้ตัวโรเตอร์ที่มีขดลวดอาร์เมเจอร์พันอยู่หมุนได้ และถ้าจะทำให้ตัวโรเตอร์สามารถหมุนต่อไปได้ ก็จะต้องทำให้กระแสที่ไหลผ่านขดลวดอาร์เมเจอร์สร้างสนามแม่เหล็กที่ทำให้เกิดแรงบิดไปในทิศทางเดียวกันเสมอ

รูป 2.1 แสดงถึงการกลับทิศทางของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์ เพื่อทำให้เกิดแรงบิดในทิศทางเดียวกันเสมอ จากรูป 2.1 ปลาย 1 และ 2 เป็นปลายของขดลวดอาร์เมเจอร์ที่เป็นแบบ full-pitched ของมอเตอร์กระแสตรงชนิด 2 ขั้ว

ตามรูป 2.1 (a) coil side 1 อยู่ตรงกับขั้วเหนือ N_1 และ coilside 2 อยู่ตรงกับขั้วใต้ S_1 เมื่อมีกระแสไหลในขดลวดตามทิศทางลูกศรที่กำหนดในรูป 2.1 (a) แรงบิดที่เกิดขึ้นบนขดลวดอาร์เมเจอร์ซึ่งเกิดเนื่องจากผลของกระแสที่ไหลผ่าน coil side 1 และ 2 กระทำกับสนามแม่เหล็กของขั้วแม่เหล็ก N_1, S_1 มีทิศทางตาม T_A เมื่อมีแรงบิดเกิดขึ้นก็จะทำให้โรเตอร์หมุนไป จึงทำให้ในเวลาต่อมา coil side 1 ก็จะต้องมาอยู่ตรงกับขั้วใต้ S_1 และ coil side 2 อยู่ตรงกับขั้วเหนือ N_2 ตามรูป 2.1 (b) ถ้ากระแสในขดลวด 1 และ 2 ยังไหลในทิศทางเดิมก็จะทำให้เกิดแรงบิดในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของแรงบิด T_A เนื่องจาก coil side ของขดลวดได้มาอยู่ในสนามแม่เหล็กของขั้วแม่เหล็กชนิดตรงข้ามกับขั้วแม่เหล็กเดิม



รูป 2.1 แสดงถึงผลของการกลับทิศทางของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์เพื่อทำให้เกิดแรงบิดที่มีทิศทางไปในทางเดียวกัน

T_A คือทิศทางของแรงบิดที่เกิดขึ้นตามรูป (a)

T_B คือทิศทางของแรงบิดที่เกิดขึ้นตามรูป (b)

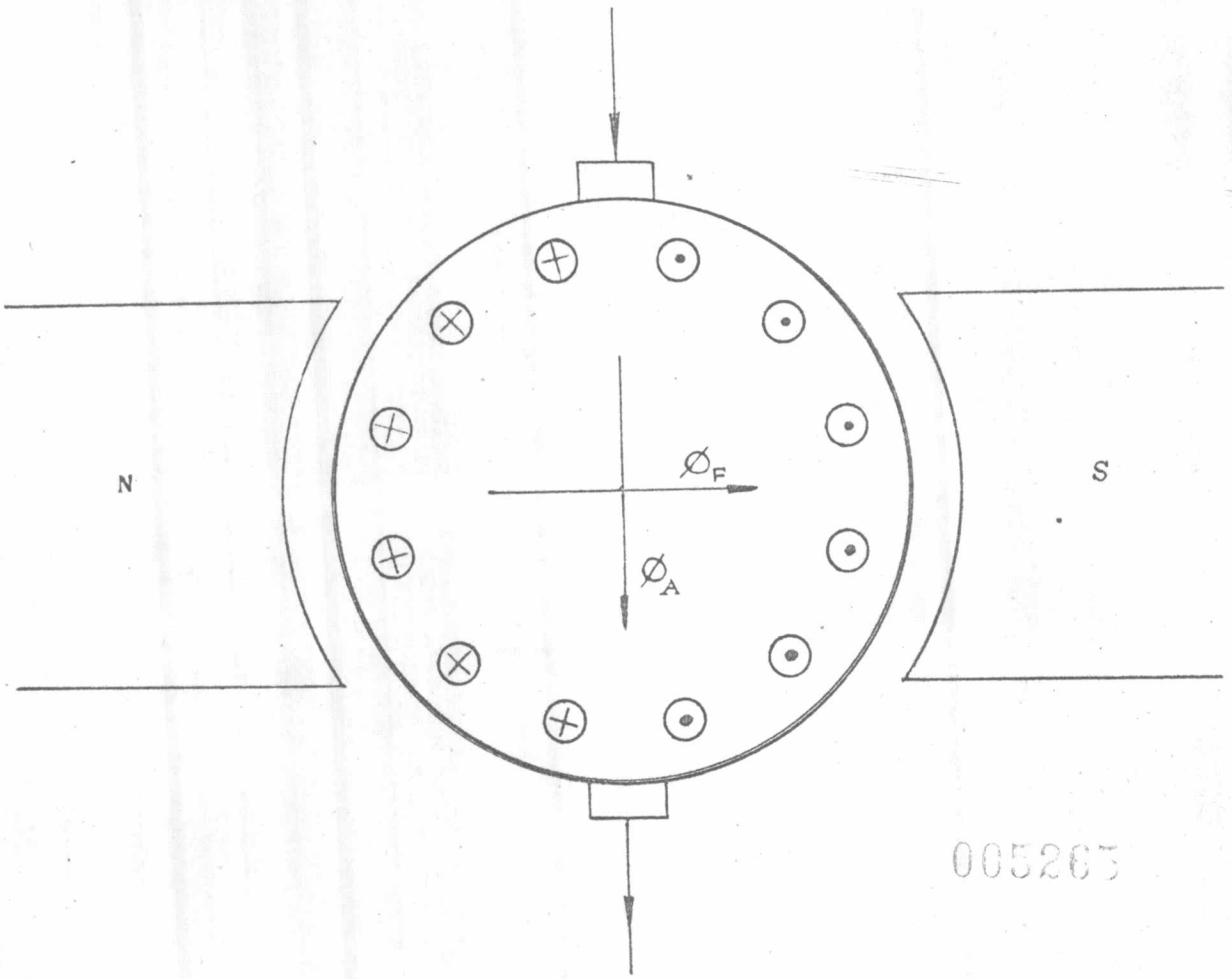
ดังนั้นเพื่อที่จะให้เกิดแรงบิดในทิศทางเดียวกันกับแรงบิด T_A เพื่อเสริมกำลังให้โรเตอร์สามารถหมุนต่อไปได้ จึงจำเป็นต้องกลับทิศทางของกระแสที่ไหลในขดลวด 1 และ 2 เมื่อเทียบกับทิศทางของกระแสในรูป 2.1(a) ซึ่งเมื่อกลับทิศทางของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์ 1 และ 2 แล้วก็จะทำให้เกิดแรงบิด T_B ซึ่งมีทิศทางไปในทางเดียวกับ T_A ตามรูป 2.1(b)

ในมอเตอร์กระแสตรงทั่ว ๆ ไป ใช้คอมมิวเตเตอร์ควบคุมการกลับทิศทางของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์ให้สัมพันธ์กับขนิดของขั้วแม่เหล็ก

รูปที่ 2.2 เป็นไดอะแกรมของมอเตอร์กระแสตรงขนิด 2 ขั้ว $\varnothing_F$ เป็นสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์ กระแสอาร์เมเจอร์ไหลเข้าสู่ขดลวดอาร์เมเจอร์โดยผ่านทางแปรงถ่านและคอมมิวเตเตอร์ ซึ่งกระแสอาร์เมเจอร์จะสร้างสนามแม่เหล็ก $\varnothing_A$ มีทิศทางตั้งฉากกับ $\varnothing_F$ เนื่องจากผลของการกระทำระหว่างสนามแม่เหล็ก $\varnothing_F$ และ $\varnothing_A$ จึงทำให้เกิดแรงบิด และแรงบิดนี้จะทำให้อาร์เมเจอร์หมุน กระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์จะต้องกลับทิศทางเมื่อเคลื่อนที่ไปอยู่ในสนามแม่เหล็กของขั้วแม่เหล็กขนิดตรงข้าม จึงจะทำให้เกิดแรงบิดในทิศทางเสริมกัน เป็นผลให้มอเตอร์สามารถหมุนต่อไปได้

การกลับทิศทางของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์ให้สัมพันธ์กับขั้วแม่เหล็กนี้เรียกว่า "การคอมมิวเตชั่น" ซึ่งในมอเตอร์กระแสตรงทั่ว ๆ ไปใช้คอมมิวเตเตอร์เป็นตัวควบคุม เนื่องจากการคอมมิวเตชั่นของคอมมิวเตเตอร์นี้เอง จึงทำให้สนามแม่เหล็ก $\varnothing_A$ มีทิศทางตั้งฉากกับ $\varnothing_F$ ในทิศทางเดียวกันทำให้เกิดแรงบิดในทิศทางเดียวกันเสมอ

มอเตอร์กระแสตรงที่ใช้คอมมิวเตเตอร์มีข้อเสีย คือ การคอมมิวเตชั่นไม่สมบูรณ์เนื่องจากเกิด armature reaction ในขณะที่มอเตอร์ทำงาน ทำให้เกิดการ spark ที่คอมมิวเตเตอร์และแปรงถ่าน จึงต้องแก้ไขโดยใช้ interpole หรือ compensating winding หรือใช้วิธีเลื่อนแปรงถ่าน ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษามาก เนื่องจากต้องคอยรักษาไม่ให้คอมมิวเตเตอร์สกปรกหรือชื้น ส่วนแปรงถ่านนั้นก็สึกกร่อนเร็วจึงต้องคอยเปลี่ยนอยู่เสมอ นอกจากนี้เมื่อเกิด transient overload และ over voltage ทำให้เกิด commutation flash-over ซึ่งทำความเสียหายให้แก่คอมมิวเตเตอร์และแปรงถ่าน จึงทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาสูงมาก



005263

รูป 2.2 ไดอะแกรมของมอเตอร์กระแสตรงชนิด 2 ขั้ว

⊕ แสดงทิศทางของกระแสไหลเข้า

⊙ แสดงทิศทางของกระแสไหลออก

เนื่องจากข้อเสียต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์กระแสตรงแบบมีคอมมิวเตเตอร์ จึงได้ทดลองสร้างมอเตอร์แบบไม่มีคอมมิวเตเตอร์ขึ้นเพื่อวิจัย และศึกษา

2.3 Thyristor

thyristor ที่นำมาใช้เป็นอุปกรณ์ที่สามารถนำกระแสได้เพียงทางเดียวเหมือนกับไดโอด (กระแสสามารถไหลได้ในทิศทางตามหัวลูกศรกล่าวคือจากแอโนดไปยังแคโธดเท่านั้น) thyristor เป็นสารกึ่งตัวนำซิลิกอนมีลักษณะเป็น 4 แถบ คือP-N-P-N มีขา 3 ขา ดังรูป2.3 ขาหนึ่งต่อออกมาจากส่วนที่เป็น P ที่อยู่แถบนอกสุดเรียกว่า แอโนด และอีกขาหนึ่งต่อออกมาจากส่วนที่เป็น N ที่อยู่แถบนอกสุดเรียกว่า แคโธด ส่วนขาที่สามต่อออกมาจากส่วนที่เป็น P ที่อยู่แถบในเรียกว่า เกท ค่าของกระแสที่ไหลผ่านแอโนด-แคโธดนั้นขึ้นอยู่กับความต้านทานของโหลดภายนอก และการทำงานของ thyristor จะถูกควบคุมด้วยเกท

thyristor จะสามารถนำกระแสได้ก็ต่อเมื่อ แอโนดมีศักย์เป็นบวกเมื่อเทียบกับแคโธดประการหนึ่ง และมีกระแสไปจุดชนวนที่เกทอีกประการหนึ่ง หลังจากที่อยู่ในสภาวะนำกระแสแล้ว กระแสที่เกทก็จะหมดความหมายในการควบคุมการทำงานของ thyristor

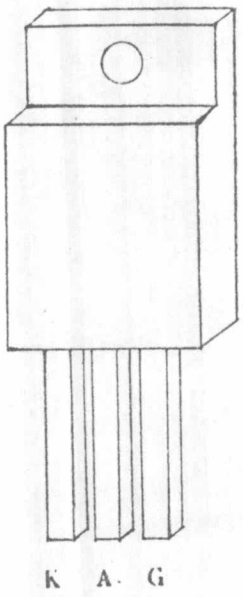
thyristor จะเปลี่ยนจากสภาวะนำกระแส เป็นไม่นำกระแสก็ต่อเมื่อกระแสในวงจรแอโนด-แคโธด มีค่าต่ำกว่าค่าโฮลดิ้งเคอร์เรนท์ (holding current) หรือ แอโนดมีศักย์เป็นลบเมื่อเทียบกับแคโธด

การเปลี่ยนสภาวะจากนำกระแสเป็นไม่นำกระแสของ thyristor โดยวิธีที่ไม่มีวงจรหรือแรงดันภายนอกมาช่วยในการหยุดนำกระแส เรียกว่า"natural commutation" ส่วนอีกวิธีหนึ่งโดยมีวงจรหรือแรงดันภายนอกมาช่วยในการหยุดนำกระแสเรียกว่า "forced commutation"

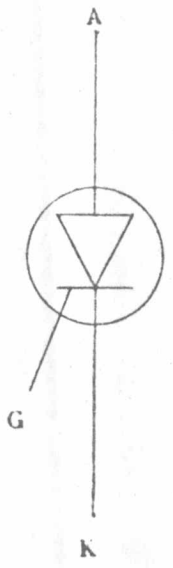
2.4 การใช้ thyristor ทำหน้าที่แทนคอมมิวเตเตอร์

ในการใช้thyristor ควบคุมการกลับทิศทางของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์ให้สัมพันธ์กับชนิดของขั้วแม่เหล็กแทนคอมมิวเตเตอร์นั้น เพื่อความสะดวกในการสร้างมอเตอร์ตัวต้นแบบจึงสร้างกลับกันกับมอเตอร์กระแสตรงทั่ว ๆ ไป โดยให้อาร์เมเจอร์เป็นส่วนที่อยู่กับที่และขดลวดสนามแม่เหล็กเป็นส่วนที่หมุนกระแสในขดลวดสนามแม่เหล็กได้มาจากแหล่งจ่ายไฟตรงภายนอกที่จ่ายผ่านทางวงแหวนเลื่อน

ในการอธิบายเกี่ยวกับการทำงานของ thyristor ในมอเตอร์กระแสตรงแบบไม่มีคอมมิวเตเตอร์ จะขออธิบายตามรูป2.4



K = แคโธด
A = แอโนด
G = เกท

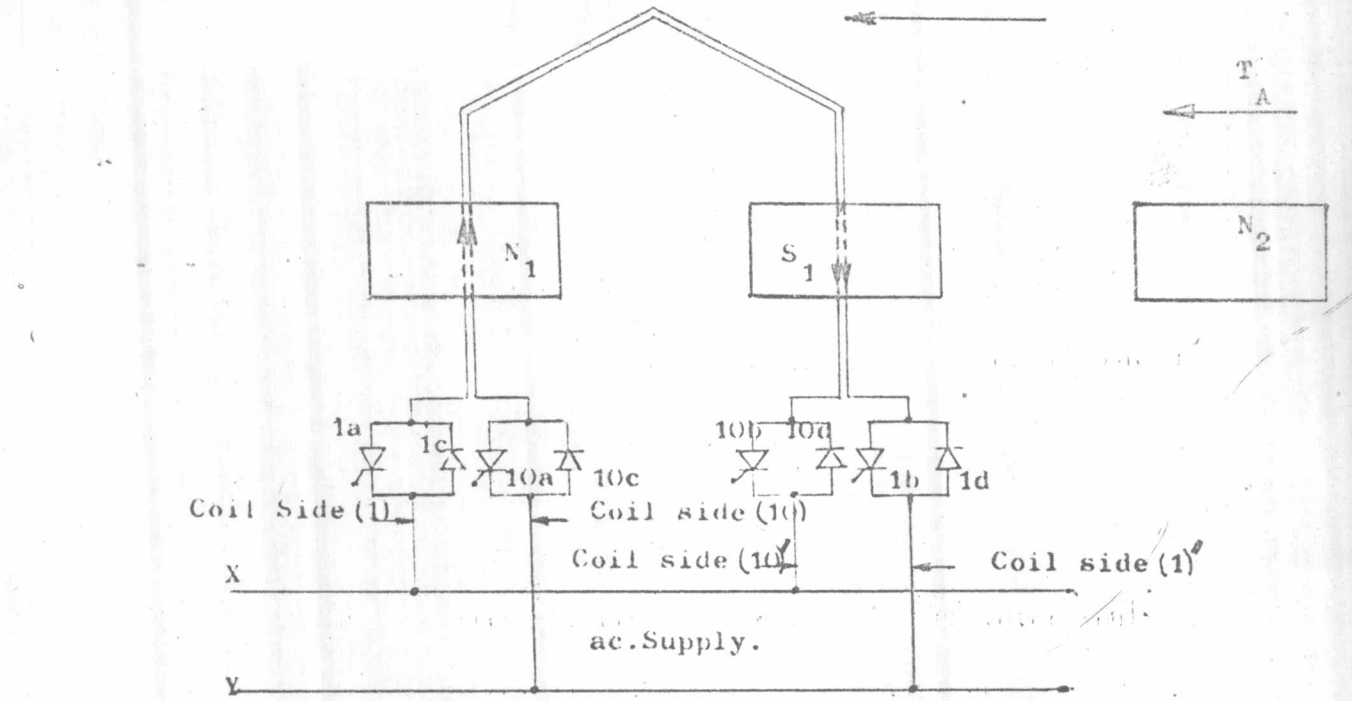


สัญญลักษณ์ทางไฟฟ้า

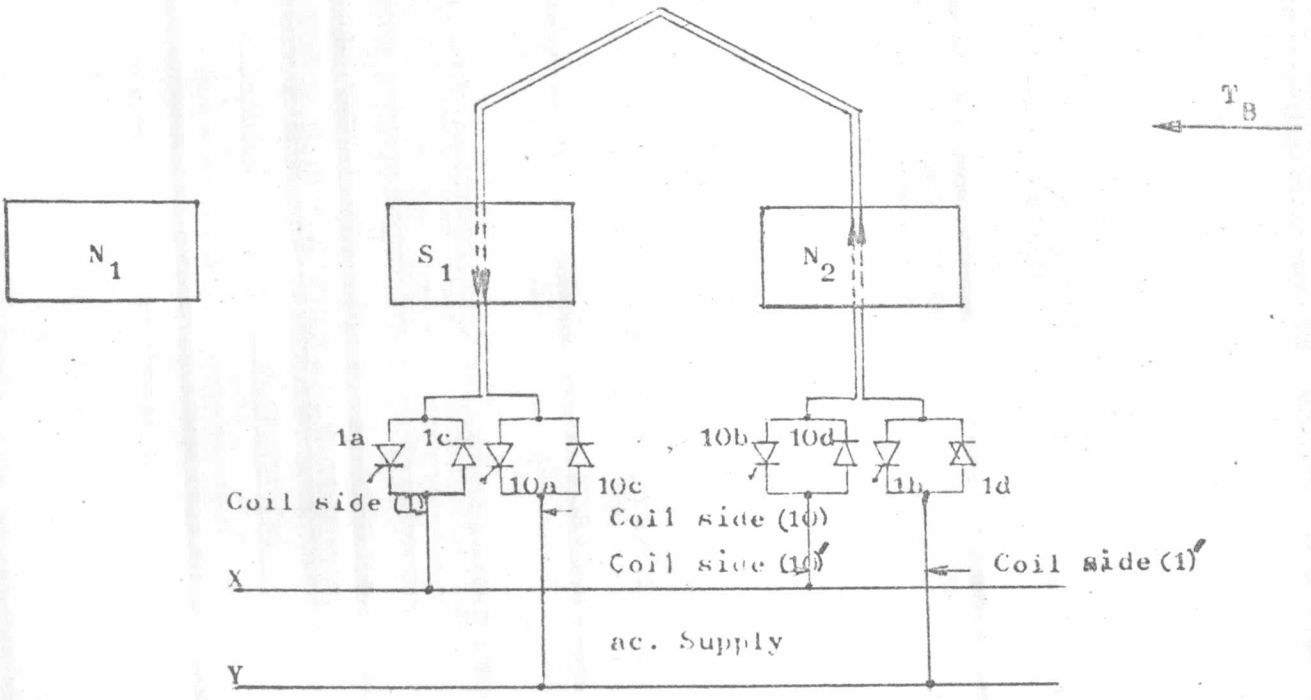
รูป 2.3 แสดงถึงลักษณะของ thyristor และสัญญลักษณ์ทางไฟฟ้า

ลักษณะสมบัติของ thyristor ที่ใช้ในการวิจัย

max. on-state current (rms)	10	A.
repetitive peak off-state forward+reverse voltage	400	V.
dc. gate-trigger voltage min.	0.3	V.
dc. holding current gate open max.	6	mA.
turn-on time gate pulse = 50 mA, min. width = 5μs.		
with rise time = 0.1 μs (t_{gt})max.	2	μs.
turn-off time T_c = 80 °C I_T = 2A. (t_q)max.	45	μs.
thermal resistance from junction to case (θ_{j-c})max.	2	°C/W



(a)



(b)

รูป 2.4 วงจรอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์แบบไม่มีคอมมิวเตเตอร์โดยใช้ thyristor ควบคุมกระแสในอาร์เมเจอร์แทน

รูป 2.4 เป็นไดอะแกรมของมอเตอร์ชนิด 2 ขั้ว ขดลวดอาร์เมเจอร์แต่ละชุดที่พันอยู่ใน slot ของสเตเตอร์ประกอบด้วยขดลวด 2 ชุดย่อย ซ้อนกันเป็น 2 แถบ ในหนึ่ง slot (มี 2 coil side ในหนึ่ง slot) เพื่อให้สามารถ rectify ได้ full-wave ขดลวดพันเป็นแบบ full-pitched ที่ปลายทั้งสองของขดลวดแต่ละชุดย่อยจะมี thyristor และไดโอดต่อตามรูป 2.4 ในที่นี้จะขออธิบายถึงการทำงานของ thyristor ในการควบคุมทิศทางของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์เพียงชุดเดียวเท่านั้นโดยที่การทำงานของชุดอื่น ๆ ก็จะเป็นไปในทำนองเดียวกัน

รูป 2.4(a) และ (b) เป็นการเปรียบเทียบทิศทางของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์ในสองช่วงเวลาถัดกัน ในตอนเริ่มต้น ตามรูป 2.4(a) coil side(1) และ coil side(10) ซึ่งอยู่ใน slot เดียวกัน อยู่ใต้ขั้วเหนือ N_1 ส่วน coil side(1)' และ coil side (10)' อยู่ใต้ขั้วใต้ S_1 เมื่อมีกระแสไปจุดชนวนที่เกทของ TH.1b และ TH.10b ซึ่งเป็น thyristor ที่ต่ออยู่ทางด้านปลายของ coil side(1)' และ coil side(10)' ตามลำดับก็จะทำให้ TH.1b หรือ TH.10b ตัวใดตัวหนึ่งนำกระแสแล้วแต่สภาพของขั้วของแรงดันไฟสลับในขณะนั้น กล่าวคือ TH.1b จะเป็นตัวนำกระแสถ้าในขณะนั้น X มีศักย์เป็นบวกเมื่อเทียบกับ Y หรือ TH.10b จะนำกระแสถ้าในขณะนั้น X มีศักย์เป็นลบเมื่อเทียบกับ Y ดังนั้นไม่ว่าขั้วของแรงดันไฟสลับจะเป็นอย่างไรก็ตามกระแสที่ไหลในขดลวด coil side(1) และ coil side(10) ก็จะมีทิศทางเดียวกันตามรูป 2.4(a) เมื่อมีกระแสไหลในขดลวดอาร์เมเจอร์จึงทำให้เกิดแรงบิด T_A ขึ้น และแรงบิดนี้จะทำให้ขั้วแม่เหล็กหมุนไป จนกระทั่งเมื่อขั้วแม่เหล็กหมุนไป 180 electrical degree ก็จะทำให้ coil side(1) และ coil side(10) มาอยู่ใต้ขั้วใต้ S_1 และ coil side(1)' และ coil side(10)' อยู่ใต้ขั้วเหนือ N_2 ตามรูป 2.4(b) ซึ่งถ้ากระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์ยังไหลในทิศทางเดิมก็จะทำให้เกิดแรงบิดทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางของแรงบิด T_A เนื่องจาก coil side ไปอยู่ในสนามแม่เหล็กของขั้วแม่เหล็กชนิดตรงข้ามกับของเดิม จึงจำเป็นต้องกลับทิศทางของกระแสโดยการย้ายกระแสที่ไปจุดชนวนที่เกทของ TH.1b และ TH.10b ออกแล้วให้ไปจุดชนวนที่เกทของ TH.1a และ TH.10a ทำให้ทิศทางของกระแสไหลกลับกันกับทิศทางเดิมตามรูป 2.4(b) จึงทำให้เกิดแรงบิด T_B ในทิศทางเดียวกับแรงบิด T_A

ในการที่จะจุดชนวน thyristor ให้นำกระแสเพื่อทำให้กระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์สัมพันธ์กับชนิดขั้วแม่เหล็ก จำเป็นจะต้องมี transducer ซึ่งจะให้สัญญาณไปจุดชนวน thyristor ให้นำกระแส

สัมพันธ์กับขนิดของขั้วแม่เหล็ก ในการวิจัยนี้ใช้ photo-transistor เป็น transducer การทำงานของ photo-transistor จะถูกควบคุมด้วยแสงที่ส่องผ่านรูที่วิ่งตัดแสง ซึ่งรูนี้จะหมุนตามโรเตอร์ของมอเตอร์ เนื่องจากแผ่นรูนี้ติดควบคู่เข้ากับแกนของโรเตอร์จึงทำให้การจุดชนวน thyristor ให้นำกระแสได้สัมพันธ์กับขนิดของขั้วแม่เหล็กตามต้องการ

เนื่องจากมอเตอร์แบบนี้ป้อนด้วยไฟสลับ ๑ เฟส เข้าที่วงจรอาร์เมเจอร์ จึงทำให้การคอมมิวเตชั่นที่ความเร็วต่ำ ๆ นั้นเป็นแบบ natural commutation กล่าวคือ กระแสในวงจรอาร์เมเจอร์ลดลงเป็นศูนย์ในทุก ๆ ครึ่งคาบเวลาของแรงดันไฟสลับ ทำให้ thyristor สามารถเปลี่ยนจากสภาวะนำกระแสเป็นไม่นำกระแสได้ เพราะกระแสที่ไหลผ่าน thyristor มีค่าต่ำกว่าค่าโฮลดิ้งเคอร์เรนท์ ส่วนการคอมมิวเตชั่นที่ความเร็วสูง ๆ นั้นจะเป็นแบบ forced commutation กล่าวคือ แรงดันย้อนกลับ(back emf) ของมอเตอร์ซึ่งแรงดันย้อนกลับนี้เป็นแรงดันที่ถูกสร้างขึ้นโดยมอเตอร์มีทิศทางย้อนกลับทิศทางของแรงดันไฟสลับที่ป้อนเข้าไปทางวงจรอาร์เมเจอร์ ถ้าแรงดันย้อนกลับมีขนาดมากกว่าขนาดของแรงดันไฟสลับในวงจรอาร์เมเจอร์ก็จะทำให้thyristor เปลี่ยนจากสภาวะนำกระแสเป็นไม่นำกระแสได้