บทที่ 3
มอเตอร์ตัวต้นแบบที่สร้างขึ้นเพื่อการวิจัย

3.1 บทนำ

ในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงหลักของมอเตอร์กระแสตรง และหลักในการใช้ thyristor ทำหน้าที่ควบคุมการกลับทิศทางของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์แทนคอมมิวเตเตอร์แล้ว ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของมอเตอร์กระแสตรงแบบไม่มีคอมมิวเตเตอร์ตัวต้นแบบ ที่ได้สร้างขึ้นเพื่อการวิจัยและทดลองเพื่อศึกษาถึงลักษณะสมบัติของมอเตอร์แบบนี้

มอเตอร์ตัวต้นแบบประกอบด้วยส่วนใหญ่ ๆ 2 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนที่เป็นมอเตอร์กระแสตรง และ ส่วนที่เป็น transducer เพื่อที่จะทำให้สามารถจุดชนวน thyristor ให้นำกระแสได้สัมพันธ์กับชนิดของขั้วแม่เหล็ก ซึ่งในการวิจัยนี้ใช้ photo-transistor เป็นตัว transducer เรียกส่วนที่เป็น transducer ในการจุดชนวน thyristor นี้ว่าเครื่องจุดชนวน รายละเอียดเกี่ยวกับวงจรและหลักการทำงานของส่วนที่เป็นมอเตอร์กระแสตรง และส่วนที่เป็นเครื่องจุดชนวนนี้จะอธิบายในหัวข้อต่อไป

รูปที่ 3.1 เป็น block diagram แสดงถึงการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงแบบไม่มีคอมมิวเตเตอร์ตัวต้นแบบที่สร้างขึ้นมาเพื่อการวิจัย

3.1.1 มอเตอร์ที่ใช้ในการวิจัย

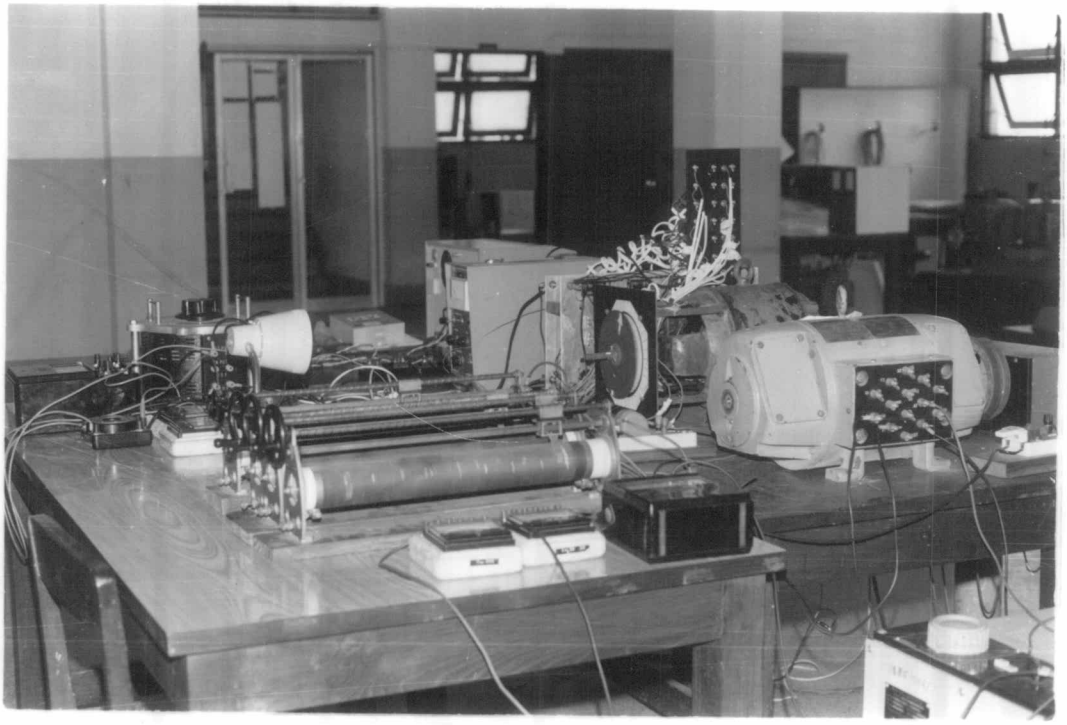
ในการสร้างมอเตอร์ตัวต้นแบบนั้น เพื่อความสะดวกจึงทำกลับกันกับมอเตอร์กระแสตรงทั่ว ๆ ไป กล่าวคือมอเตอร์ตัวต้นแบบนี้จะมีขดลวดสนามแม่เหล็กเป็นส่วนที่เคลื่อนที่และขดลวดอาร์เมเจอร์เป็นส่วนที่อยู่กับที่ กระแสในขดลวดสนามแม่เหล็กได้มาจากแหล่งจ่ายไฟตรงภายนอกซึ่งจ่ายผ่านทางวงแหวนเลื่อน

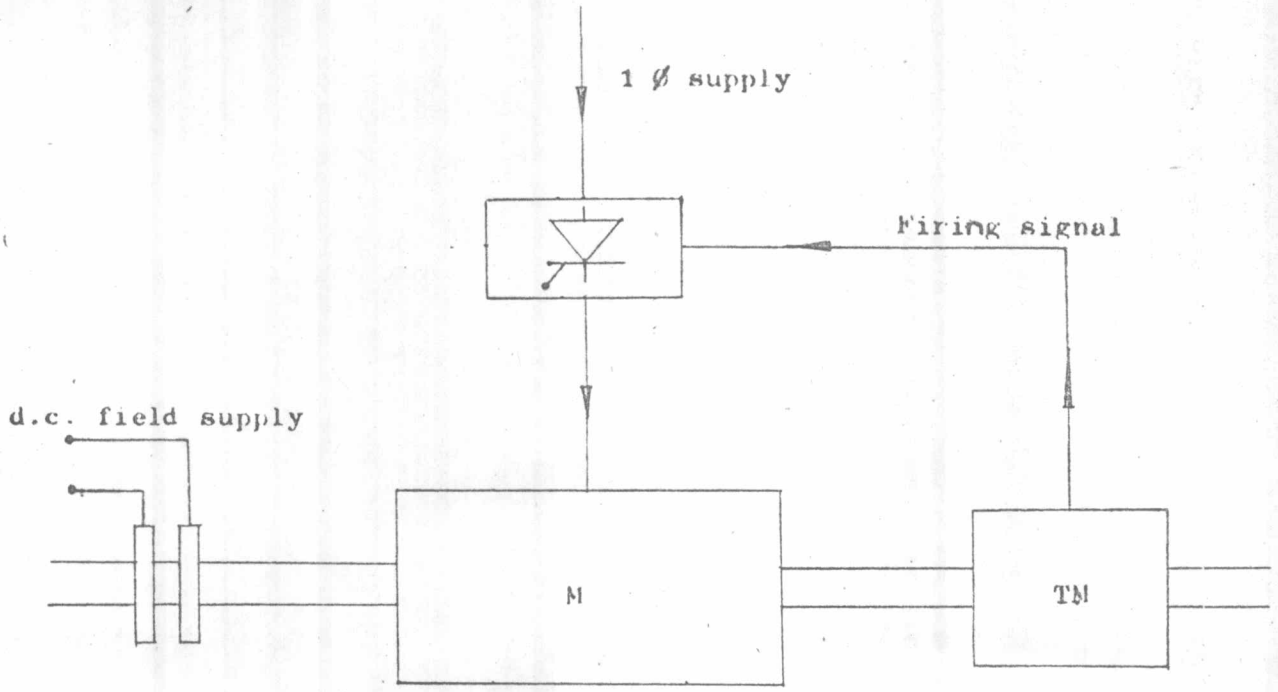
มอเตอร์ตัวที่นำมาสร้างเป็นต้นแบบนี้มีจำนวน slot ที่สเตเตอร์ 36 slot และที่โรเตอร์ 24slot ในการวิจัยนี้สร้างมอเตอร์แบบ 4 ขั้ว พันขดลวดอาร์เมเจอร์ที่ slot ของสเตเตอร์แบบ full-pitched โดยพันเป็น 2 coil side ในหนึ่ง slot และปลายของขดลวดอาร์เมเจอร์นำมาต่อกับ thyristor และไดโอดภายนอก เนื่องจากมอเตอร์มีจำนวน slot 9 slot ต่อขั้ว ดังนั้นขดลวดอาร์เมเจอร์ก็จะมีทั้งหมด 9 ชุด แยกจากกัน โดยที่แต่ละชุดจะพัน displace กันไปคนละ 20 electrical degree ตามรูป 3.2 (a) ส่วนรูป 3.2 (b) เป็นไดอะแกรมแสดงการพันขดลวดสนามแม่เหล็ก

Picture 1

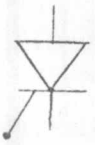
มอเตอร์กระแสตรงแบบไม่มีคอมมิวเตเตอร์
ตัวต้นแบบที่สร้างเพื่อการวิจัย.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูป 3.1 block diagram ของมอเตอร์กระแสตรงแบบไม่มีคอมมิวเตเตอร์



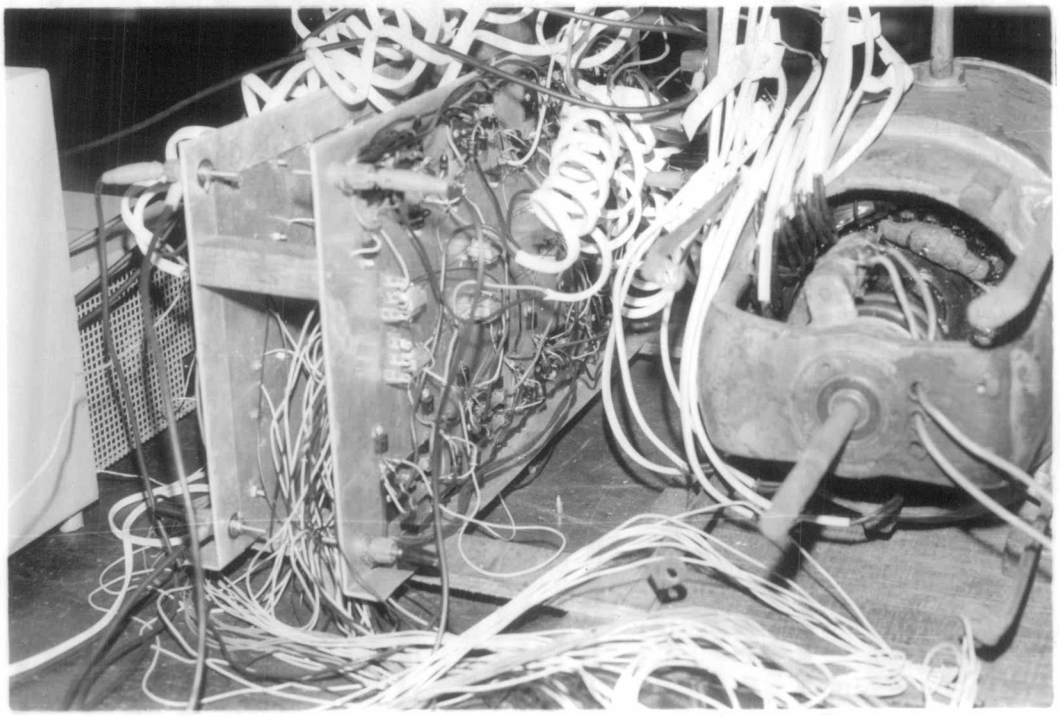
คือ thyristor

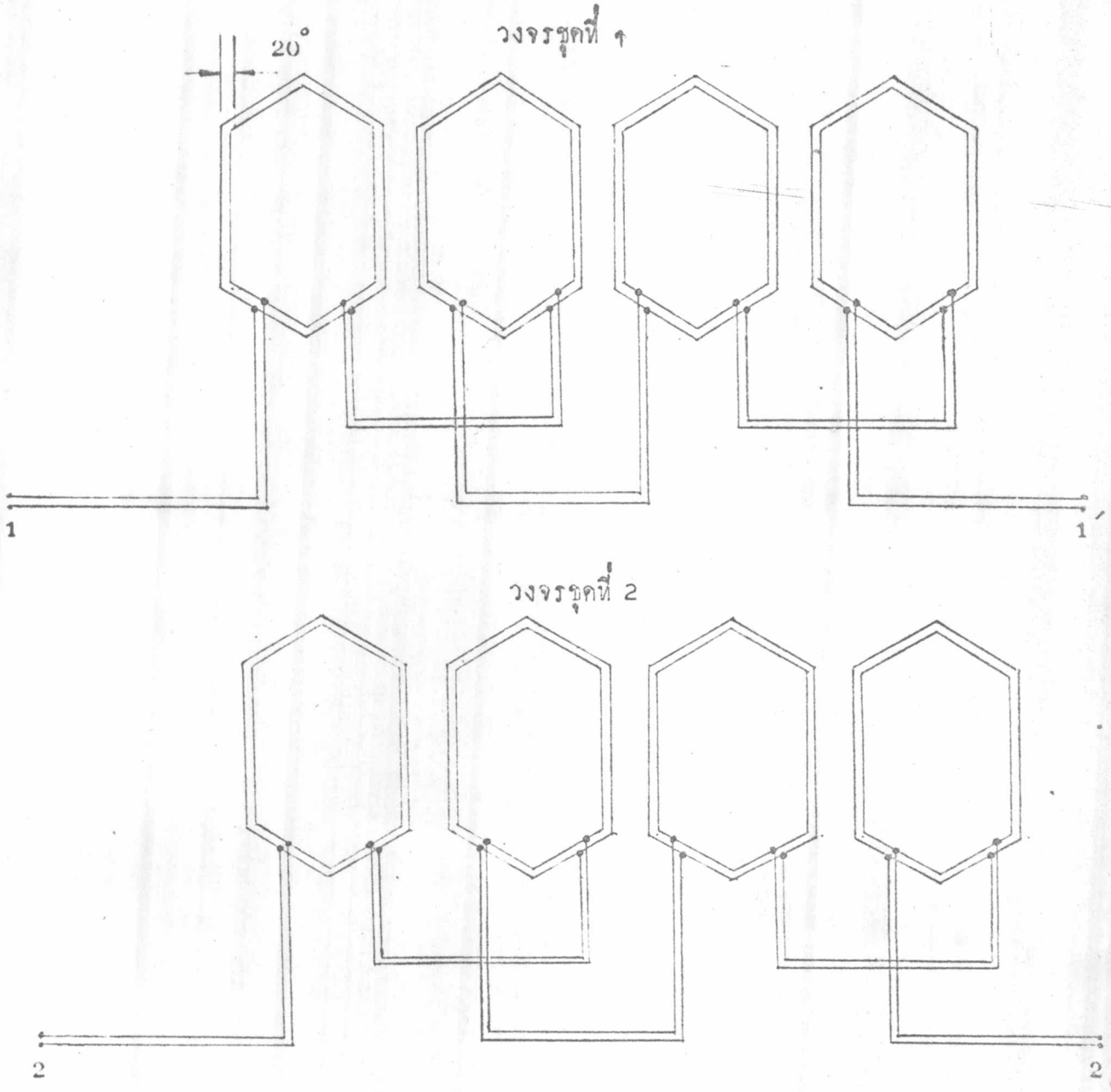
M " มอเตอร์กระแสตรง

TM " เครื่องจุดควน

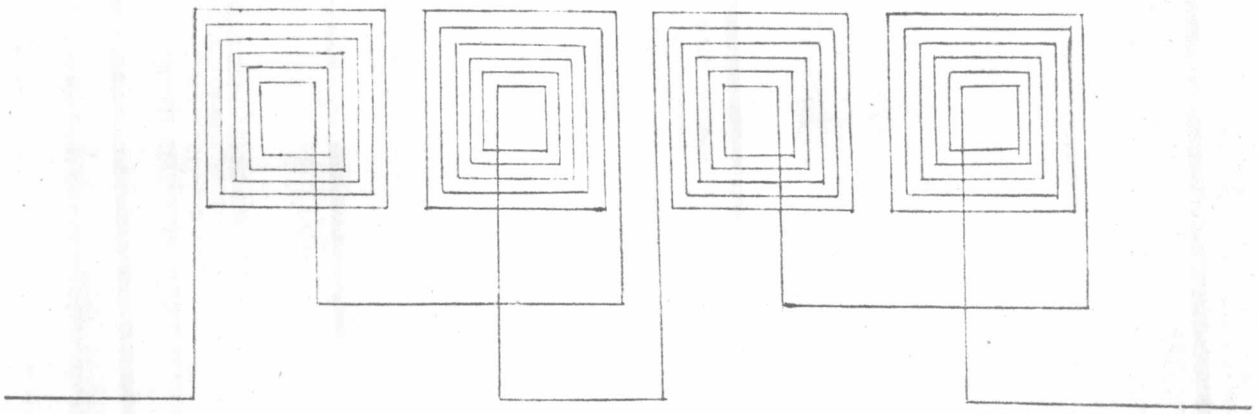
Picture 2

มอเตอร์กระแสตรงแบบไม่มีคอมมิวเตเตอร์ และ Thyristor unit





รูป 3.2(a) วงจงอาร์เมเจอร์



รูป 3.2(ข) ไดอะแกรมของขดลวดสนามแม่เหล็ก

รูป 3.3(a) และ(b) เป็นไดอะแกรมแสดงวงจรของขดลวดอาร์เมเจอร์ รูป 3.3(a) เป็นรูปของขดลวดอาร์เมเจอร์เพียงชุดเดียว โดยที่ AB และCD เป็น coil side 2 coil side ที่พันอยู่ใน slot เดียวกัน และปลายของขดลวดอาร์เมเจอร์จะต่อกับ thyristor และไดโอดดังรูป ส่วนรูป3.3(b) เป็นรูปแสดงวงจรของขดลวดอาร์เมเจอร์ทั้งหมด 9 ชุด

ตามรูป 3.3(b) นั้น thyristor ตัวที่กำกับด้วยอักษร P จะเป็นตัวที่เมื่อนำกระแสจะทำให้กระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์ไหลจากข้างล่างขึ้นไปข้างบน ส่วน thyristor ที่กำกับด้วยอักษร N จะเป็นตัวที่เมื่อนำกระแสจะทำให้กระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์ไหลจากข้างบนมาสู่ข้างล่าง และ subscript ตัวเลขนั้นหมายถึงเลขหมายของวงจรอาร์เมเจอร์ชุดที่thyristor ตัวนั้นต่ออยู่ที่ปลายของขดลวด

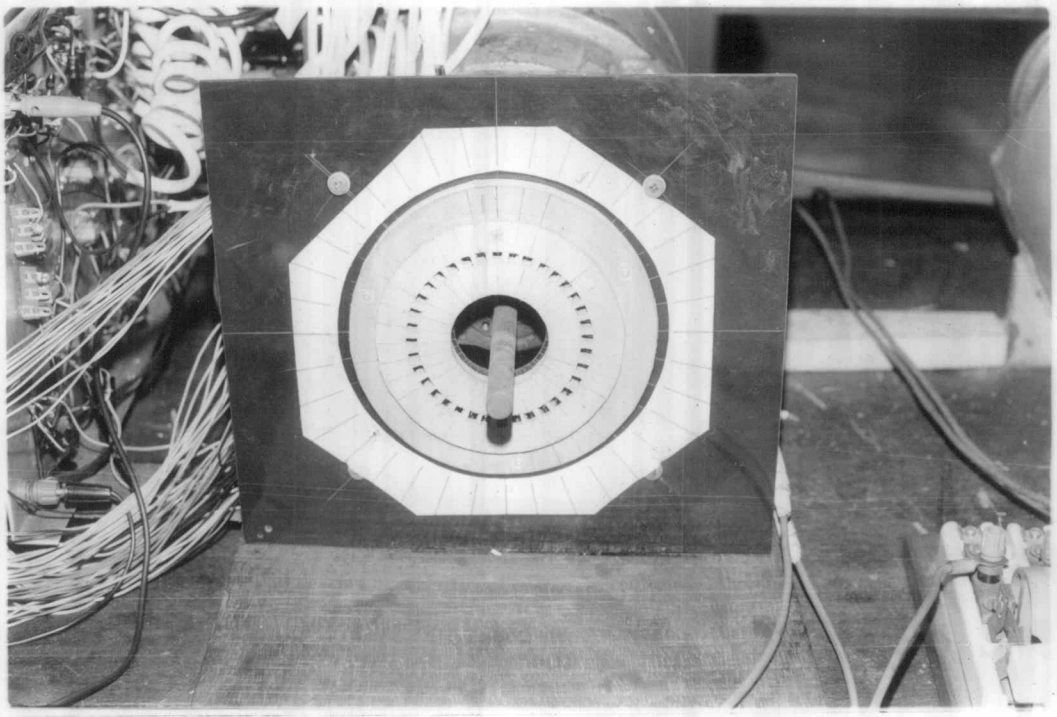
3.1.2 <u>เครื่องจุดชนวน</u>

เครื่องจุดชนวนเป็นตัวtransducer ที่จะให้สัญญาณไปจุดชนวน thyristorให้นำกระแส เพื่อทำให้กระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์มีทิศทางสัมพันธ์กับขั้วแม่เหล็ก เครื่องนี้ประกอบด้วยส่วนใหญ่ ๆ 2 ส่วน คือ ส่วนที่อยู่กับที่เรียกว่า สเตเตอร์ และส่วนที่หมุนเรียกว่าโรเตอร์ โรเตอร์ของเครื่องจุดชนวนติดควบคู่อยู่กับแกนของโรเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงตัวที่กล่าวถึงใน 3.1.1 ส่วนที่เป็นสเตเตอร์นั้นจะประกอบด้วยphoto-transistor จำนวน36 ตัวเรียงกันเป็นระยะห่างเท่า ๆ กันเป็นเส้นรอบวงของวงกลมบนแผ่น bakerlite ส่วนโรเตอร์นั้นจะเป็นแผ่นไม้ที่มีรูเจาะไว้ 2 รูบนเส้นรอบวงของวงกลมที่มีรัศมีเท่ากับรัศมีของวงกลมที่ photo-transistor เรียงกันอยู่บนแผ่น bakerlite โดยที่รูสองรูนี้จะอยู่ตรงข้ามกัน(180°)

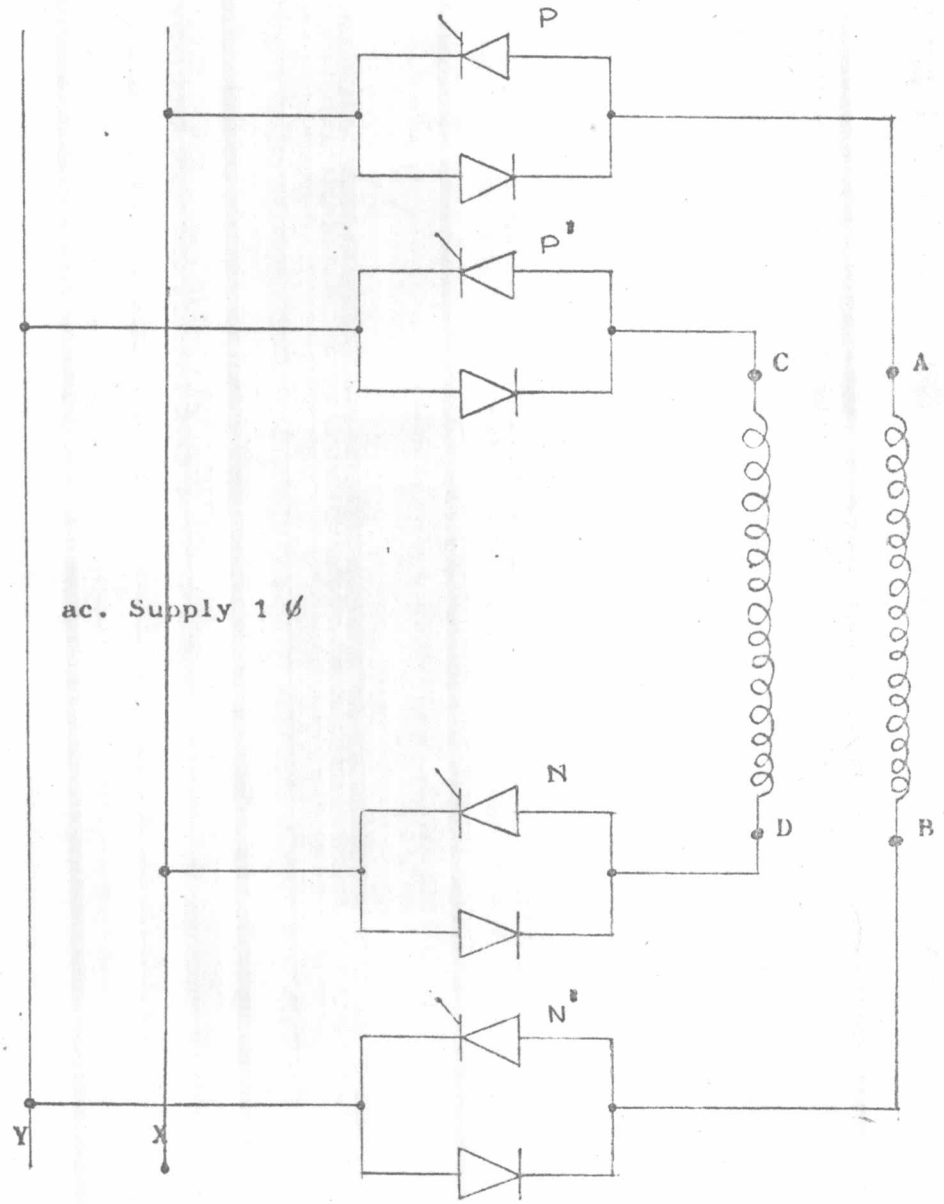
thyristor จะถูกจุดชนวนก็ต่อเมื่อ photo-transistor ถูกแสงที่ส่องผ่านรูที่อยู่บนโรเตอร์ของเครื่องจุดชนวน และ photo-transistor ตัวหนึ่ง ๆ ก็จะให้สัญญาณไปจุดชนวน thyristor ตัวที่วงจรของ photo-transistor ตัวนั้นต่อไว้เท่านั้น โดยphoto-transistor หนึ่งตัวจะมีหน้าที่ให้สัญญาณไปจุดชนวน thyristor ตัวที่กำหนดไว้เพียงตัวเดียวเท่านั้น วงจรจุดชนวนจะเป็นตามรูป 3.4 เมื่อphoto-transistor ถูกแสงก็จะมีความต้านทานต่ำมากเป็นเสมือนสวิชปิดวงจรให้มีกระแสไหลระหว่างเกท-แคโธดของ thyristor ทำให้ thyristor นำกระแสได้

Picture 3

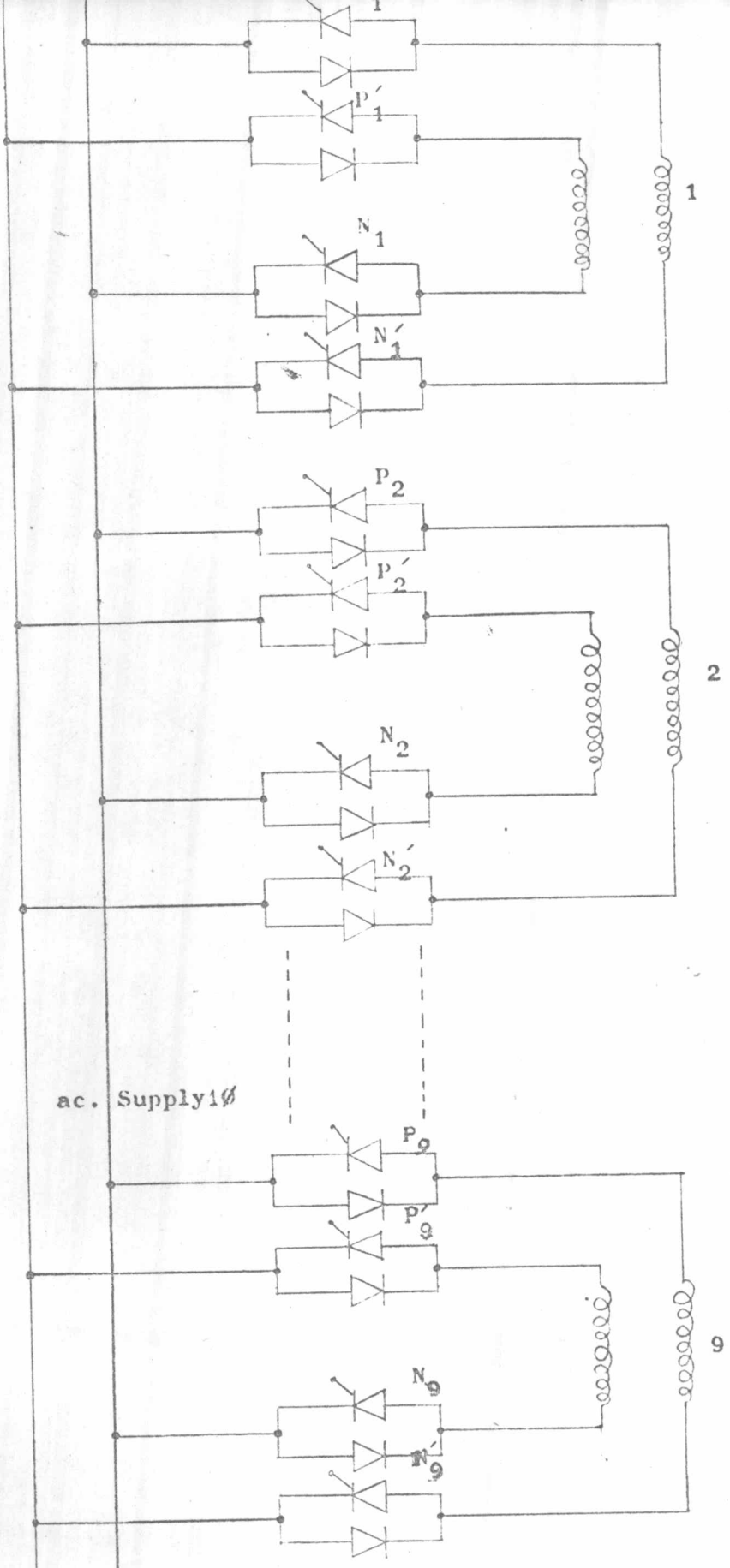
เครื่องจุดชนวน



หอสมุดกลาง
จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

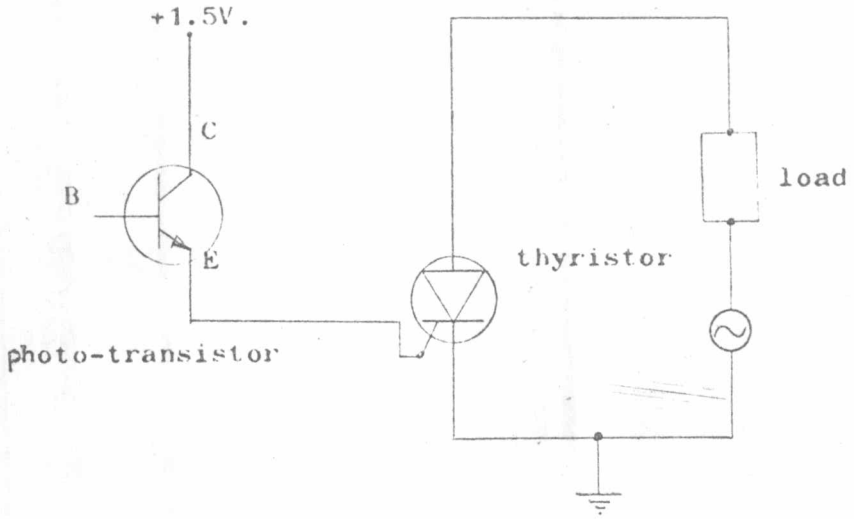


รูป 3.3(a) วงจรอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์แบบไม่มีคอมมิวเตเตอร์



รูป 3.3 (b)

ไดอะแกรมสมบูรณ์ของวงจรคาร์เมจคูร์ตของมอเตอร์แบบไม่มีคอมมิวเตเตอร์



รูป 3.4 วงจรจุดชนวน thyristor โดยใช้ photo-transistor เป็นอีเลคโทรนิคสวิช

รูป 3.5 เป็นรูปแสดงถึงลักษณะของเครื่องจุดชนวนโดยมี photo-transistor 36 ตัวเรียงกันอยู่บนสเตเตอร์มีระยะห่างเท่า ๆ กัน photo-transistor 36ตัวนี้จะเป็นตัวควบคุมการจุดชนวนของ thyristor 36 ตัว โดย photo-transistor ที่กำกับด้วยอักษร P ก็จะเป็นตัวควบคุมการจุดชนวนของ thyristorที่กำกับด้วยอักษร P และมีตัวเลข subscribt เหมือนกัน ส่วน photo-transistor ที่กำกับด้วยอักษร N ก็จะเป็นตัวที่ควบคุมการจุดชนวนของ thyristor ตัวที่กำกับด้วยอักษร N ความกว้างของรูบนโรเตอร์ที่จะเป็นตัวปล่อยให้แสงไปส่องลงบน photo-transist เพื่อทำให้ photo-transistor ทำงานนั้นเรียกว่า trigger arc ซึ่งถ้า trigger arc มีขนาดโตก็จะทำให้ photo-transistor ทำงานมากตัวขึ้น

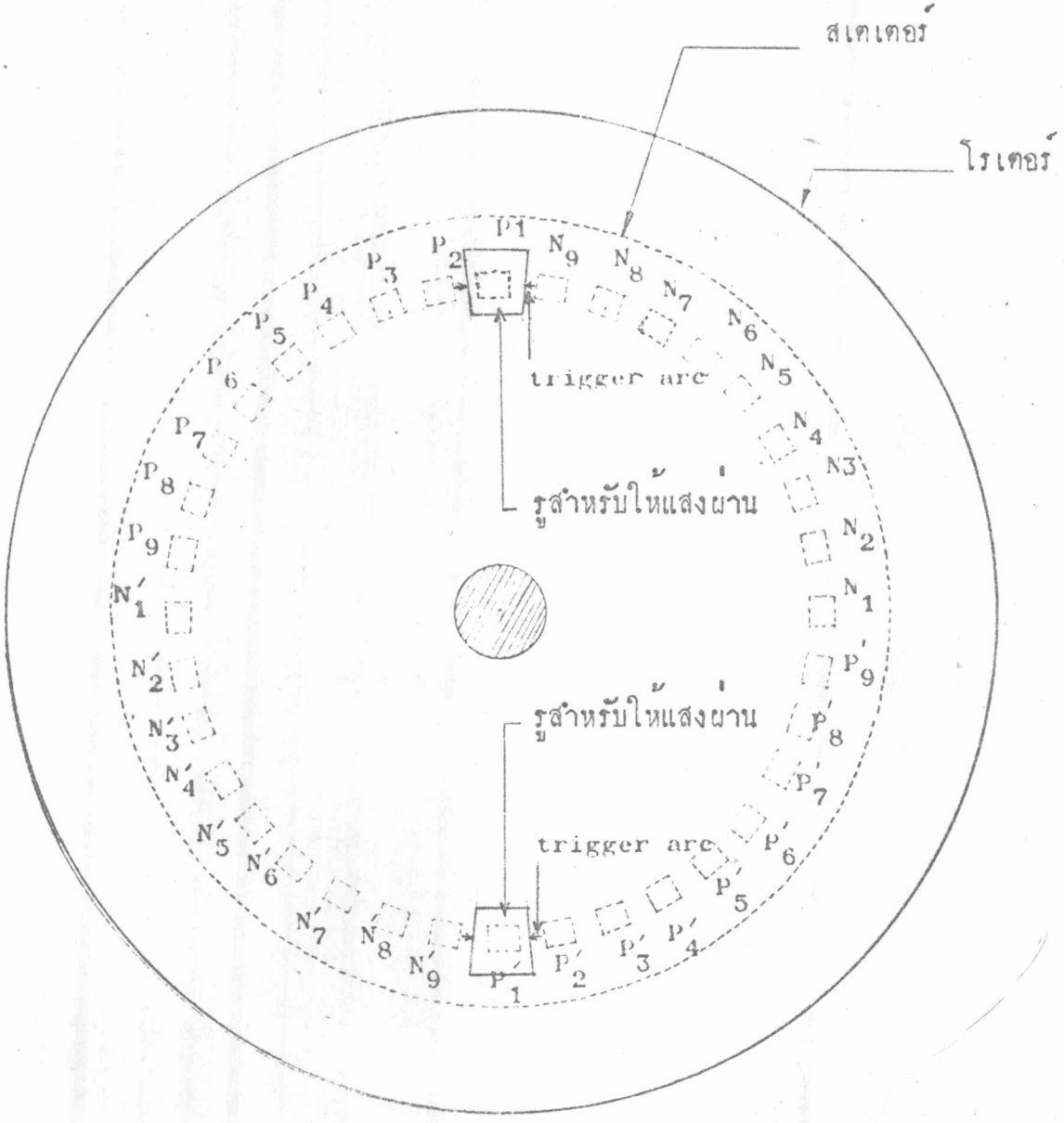
เมื่อ trigger arc มาอยู่ตรงกับ photo-transistor ตัวใดก็จะทำให้ photo-transistor ตัวนั้นปิดวงจรให้สัญญาณไปจุดชนวน thyristor ตัวที่มีอักษรกำกับตรงกัน เช่น ตามรูป 3.5photo-transistor P_1 และ P_1' จะเป็นตัวที่ถูกแสงกระตุ้นให้ทำงาน จึงทำให้มีสัญญาณไปจุดชนวน thyristorP_1 และ P_1' ในรูป 3.3(b) ให้นำกระแส ซึ่งจะทำให้มีกระแสไหลในขดลวดอาร์เมเจอร์ชุดที่ 1 โดยไหลจากข้างล่างขึ้นไปข้างบน

โรเตอร์ของเครื่องจุดชนวนที่ติดควบคู่กับแกนของโรเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงสามารถเลื่อนได้ จึงทำให้สามารถเปลี่ยนมุมในการจุดชนวน thyristor ได้ซึ่งเรียกมุมนี้ว่า "trigger angle"

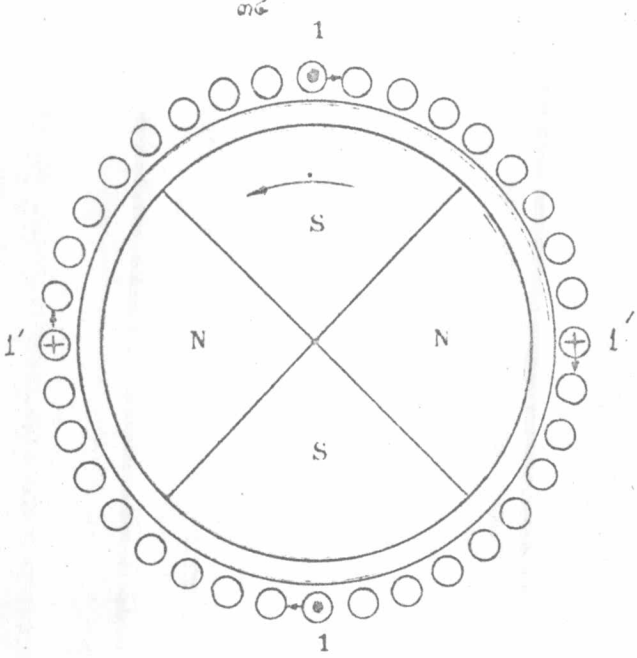
3.2 <u>คำนิยามของ trigger angle</u>

มุม trigger angleที่มีค่า 0° หมายถึงมุมที่ทำให้ขดลวดอาร์เมเจอร์ใน slot ที่ตรงกับเส้นศูนย์กลางขั้วของขั้วแม่เหล็กมีกระแสไหล ซึ่งที่มุมนี้จะทำให้ได้แรงบิดสูงที่สุด ตามรูป 3.6 เป็นรูปที่แสดงถึงสภาพของวงจรขดลวดอาร์เมเจอร์ที่ถูกทำให้มีกระแสไหล และสภาพของเครื่องจุดชนวนในขณะที่มีมุม trigger angle=0° จากรูป 3.6 (c) จะเห็นว่า photo-transistor P_1และ P_1' จะเป็นตัวที่ถูกแสงซึ่งจะทำให้มีสัญญาณไปจุดชนวน thyristor P_1และ P_1' ให้นำกระแส เป็นผลให้มีกระแสไหลในขดลวดอาร์เมเจอร์ชุดที่ 1 ซึ่งอยู่ใน slot ที่ตรงกับเส้นศูนย์กลางขั้วของขั้วแม่เหล็ก

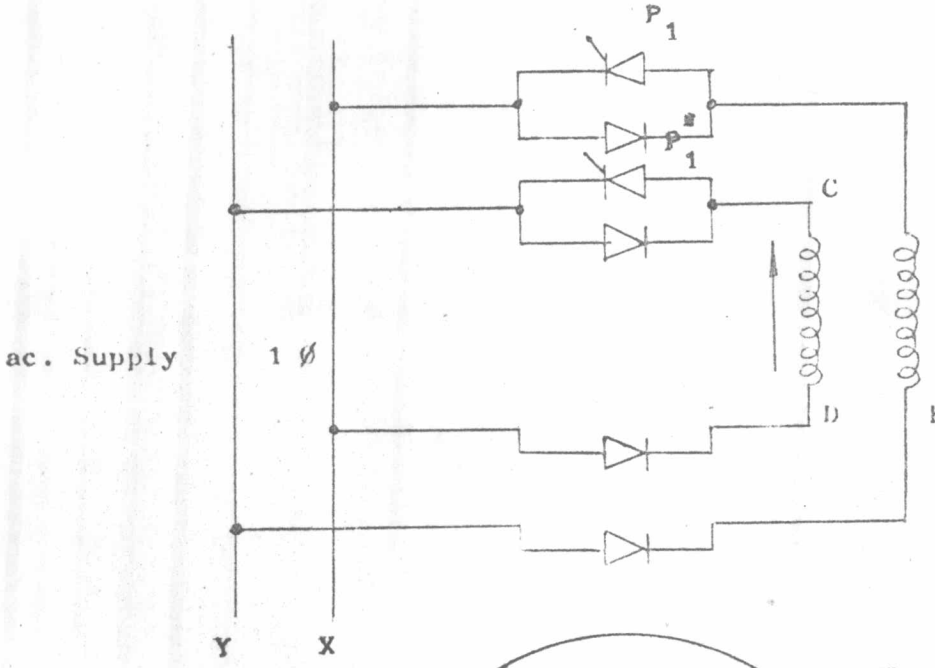
ส่วนมุม trigger angle ที่เป็นบวกหมายถึงมุมที่เลื่อนโรเตอร์ของเครื่องจุดชนวนไปจาก



รูป 3.5 end view ของเครื่องจุดชนวน

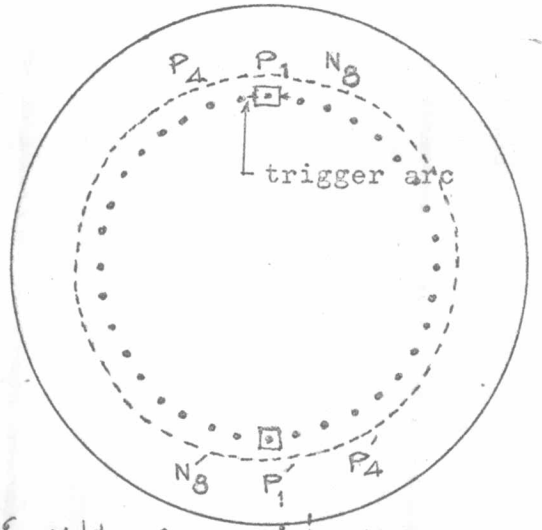


(a) มอเตอร์กระแสตรง



วงจรชุดที่ 1

(b) ลักษณะของวงจรอาร์-เมเจอร์ที่มุม trigger angle = 0°



(c) เครื่องจุดชนวน

รูป 3.6 มอเตอร์แบบไม่มีคอมมิวเตเตอร์ ที่มุม trigger angle = 0°

ตำแหน่งที่เป็น trigger angle=0° โดยที่จะต้องเลื่อนไปในทางนำหน้าทิศทางการหมุนของมอเตอร์ ตัวอย่างเช่น เมื่อต้องการมุม trigger angle= +30° โรเตอร์ของเครื่องจุดชนวนจะต้องเลื่อนไป 30 mechanical degree ซึ่งในสภาพนี้ trigger arc จะไปตรงกับ photo-transistor P_4 และ P_4' ซึ่งจะทำให้มีสัญญาณไปจุดชนวน thyristor P_4 และ P_4' ให้นำกระแส เป็นผลทำให้กระแสไหลในขดลวดอาร์เมเจอร์ ชุดที่ 4 ตามรูป 3.3 (b)

มุม trigger angle ที่เป็นลบหมายถึงมุมที่เลื่อนโรเตอร์ของเครื่องจุดชนวนไปจากตำแหน่งที่เป็น trigger angle=0° โดยที่จะต้องเลื่อนไปในทางตามหลังทิศทางการหมุนของมอเตอร์ ตัวอย่างเช่น เมื่อต้องการมุม trigger angle= -20° โรเตอร์ของเครื่องจุดชนวนจะต้องเลื่อนไป 20 mechanical degree ซึ่งในสภาพนี้ trigger arc จะอยู่ตรงกับ photo-transistor N_8 และ N'_8 เป็นผลทำให้มีสัญญาณไปจุดชนวน thyristor N_8 และ N_8' ให้นำกระแส ทำให้มีกระแสไหลในขดลวดอาร์เมเจอร์ชุดที่ 8 ตามรูป 3.3 (b)

ค่าของมุม trigger angle นี้มีผลต่อแรงบิดตอนเริ่มต้นและความเร็วของมอเตอร์ ซึ่งจะได้อธิบายในหัวข้อต่อไป

3.3 การทำงานของมอเตอร์กระแสตรงแบบไม่มีคอมมิวเตเตอร์

3.3.1 ตอนเริ่มเดินเครื่อง

ในการอธิบายการทำงานของมอเตอร์ตอนเริ่มเดินเครื่อง จะขออธิบายโดยสมมุติว่าเริ่มเดินเครื่องที่มุม trigger angle=0° ซึ่งในสภาพที่มุม trigger angle=0° นี้ photo-transistor P_1 และ P_1' จะถูกแสงกระตุ้นให้ทำงาน จึงทำให้มีสัญญาณไปจุดชนวน thyristor P_1 และ P_1' ให้นำกระแส เป็นผลให้มีกระแสไหลในขดลวดอาร์เมเจอร์ชุดที่ 1

รูป 3.6 (b) เป็นไดอะแกรม แสดงถึงทิศทางของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์ กระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์จะไหลในทิศทางจาก B ไป A ในขณะที่ Y มีศักย์เป็นบวกเมื่อเทียบกับ X และจะมีกระแสไหลจาก D ไป C เมื่อขณะที่ Y มีศักย์เป็นลบเมื่อเทียบกับ X ดังนั้นกระแสที่ไหลในขดลวดใน slot ที่ 1 จะไหลจากข้างล่างขึ้นไปข้างบนเสมอไม่ว่าในขณะนั้นขั้วของแหล่งจ่ายไฟจะเป็นอย่างไรก็ตาม กระแสที่ไหลในขดลวดอาร์เมเจอร์แสดงโดยสัญญลักษณ์จุด และกากบาท ตามรูป 3.6(a) ซึ่งจากทิศทางของกระแสที่ไหลแรงบิดที่เกิดขึ้นจะทำให้โรเตอร์หมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

i 17745998

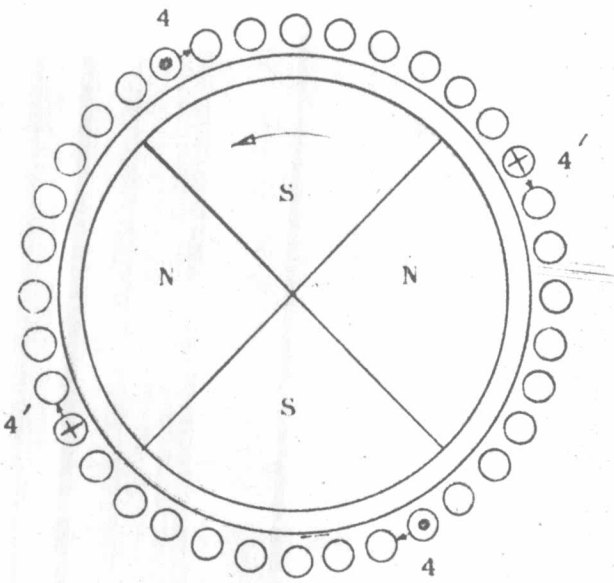
เมื่อปรับมุม trigger angle เป็น $+30^{\circ}$ trigger arc จะตรงกับ photo-transistor P_4 และ P_4' ซึ่งจะทำให้มีสัญญาณไปจุดชนวน thyristor P_4 และ P_4' ให้นำกระแสเป็นผลให้กระแสไหลในขดลวดอาร์เมเจอร์ชุดที่ 4 ซึ่งแสดงด้วยสัญญลักษณ์จุดและกากบาด ดังรูป 3.7(a) และแรงบิดที่เกิดขึ้นจะทำให้โรเตอร์หมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา เนื่องจากยังอยู่ในสนามแม่เหล็กของขั้วแม่เหล็กชนิดเดียวกันกับมุม trigger angle=0°

เมื่อปรับมุม trigger angle เป็น -30° มอเตอร์ก็ยังคงหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาแต่เมื่อปรับมุม trigger angle เป็น $+50^{\circ}$ จะทำให้มอเตอร์หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

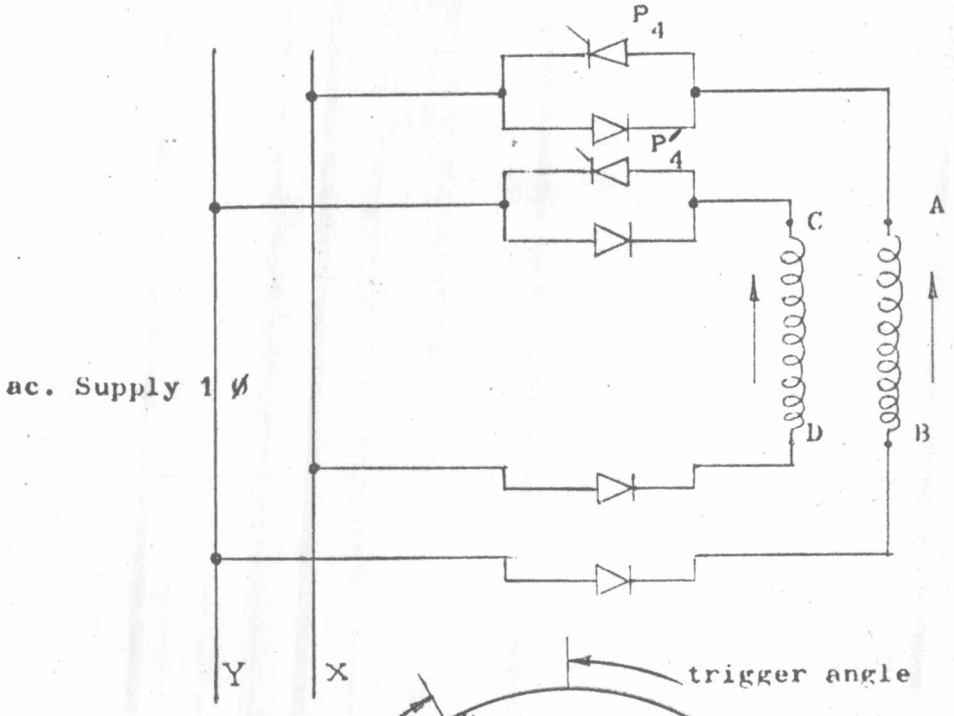
สรุปแล้วการปรับค่ามุม trigger angle นั้นมีผลต่อขนาดของแรงบิดตอนเริ่มเดินเครื่องและยังมีผลต่อทิศทางของการหมุนของมอเตอร์อีกด้วย รูปที่ 3.8 เป็นไดอะแกรมที่แสดงถึง quadrant ต่าง ๆ ของมุม trigger angle ซึ่งจะทำให้ทิศทางการหมุนของมอเตอร์เป็นทิศทางตามเข็มนาฬิกาหรือทวนเข็มนาฬิกา

3.3.2 <u>ตอนเดินเครื่องที่ความเร็วต่ำ</u>

ในหัวข้อที่แล้วได้กล่าวถึงแรงบิดตอนเริ่มต้น ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงขณะที่มอเตอร์กำลังหมุนที่ความเร็วต่ำ ในตอนเริ่มต้นเดินเครื่องสมมุติว่าเริ่มเดินเครื่องที่มุม trigger angle=0° ตามรูป 3.9(b) trigger arc จะตรงกับ photo-transistor P_1 และ P_1' ซึ่งจะทำให้มีสัญญาณไปจุดชนวนที่เกทของ thyristor P_1 และ P_1' ในวงจรขดลวดอาร์เมเจอร์ชุดที่ 1 สมมุติว่าในขณะนั้น x มีศักย์เป็นบวกเมื่อเทียบกับ y จึงทำให้ thyristor P_1' ตามรูป 3.9(c) นำกระแส ส่วน thyristor P_1 ไม่สามารถนำกระแสได้เนื่องจากแอโนด-แคโธดถูกไบแอสกลับ เมื่อ thyristor P_1' นำกระแสเป็นผลทำให้มีกระแสไหลในขดลวดอาร์เมเจอร์ CD ซึ่งพันอยู่ใน slot ที่ตรงกับเส้นศูนย์กลางขั้วของแม่เหล็ก ทิศทางของกระแสที่ไหลในขดลวดอาร์เมเจอร์เป็นดังรูป 3.9(a) แรงบิดที่เกิดขึ้นทำให้มอเตอร์หมุนทวนเข็มนาฬิกา ซึ่งโรเตอร์ของเครื่องจุดชนวนจะหมุนตามด้วยทำให้ trigger arc มาตรงกับ photo-transistor P_2 และ P_2' จะทำให้มีสัญญาณไปจุดชนวน thyristor P_2 และ P_2' เป็นผลทำให้มีกระแสไหลในขดลวดอาร์เมเจอร์ชุดที่ 2 และแรงบิดที่เกิดขึ้นก็จะมีทิศทางเสริมกับแรงบิดที่เกิดเนื่องจากกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์ชุดที่ 1 จึงทำให้มอเตอร์หมุนต่อไปได้ ส่วน thyristor P_1 และ P_1' ในวงจร

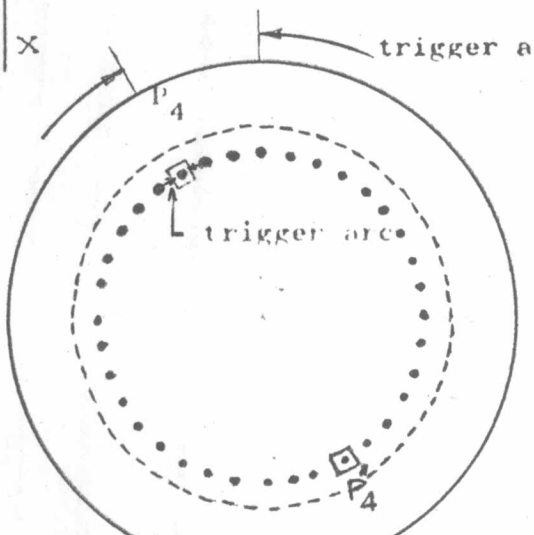


(a) มอเตอร์กระแสตรง



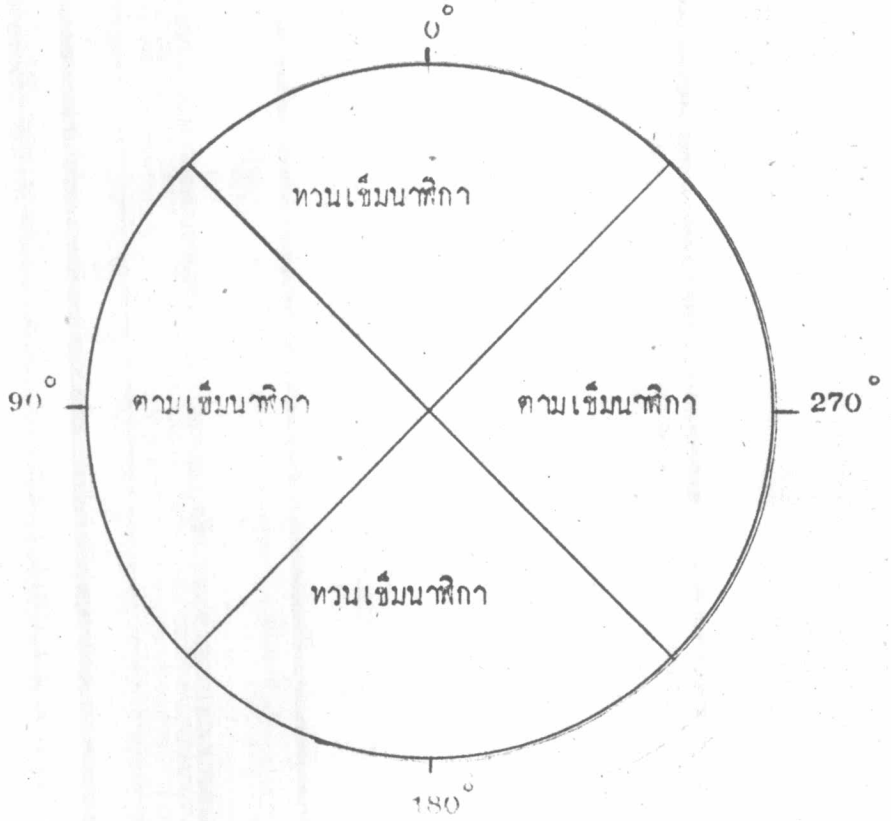
วงจรชุดที่ 4

(b) ลักษณะของวงจรอาร์-
เมเจอร์ที่มุม trigger angl
= + 30°

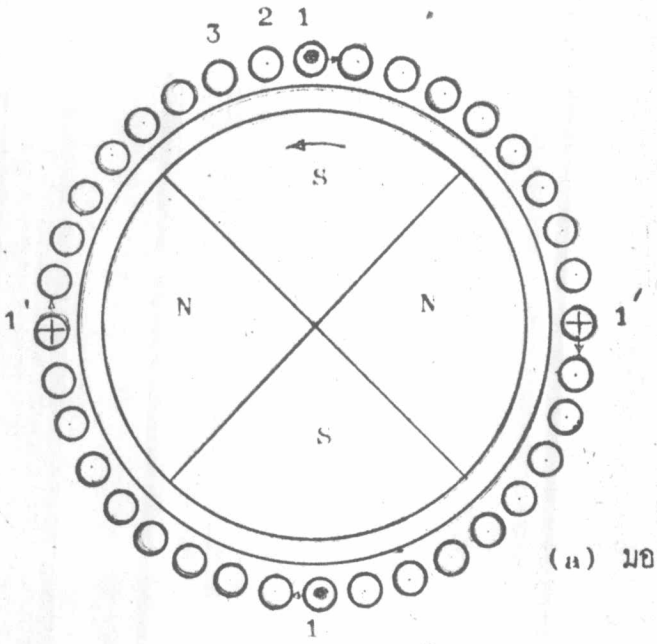


(c) เครื่องจุดชนวน

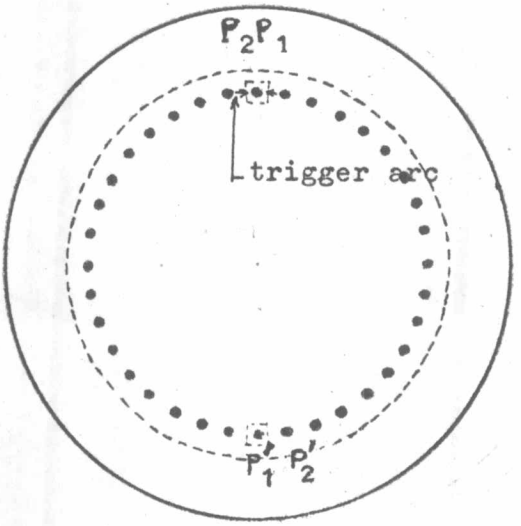
รูป 3.7 มอเตอร์แบบไม่มีคอมมิวเตเตอร์ที่มุม trigger angle = +30°



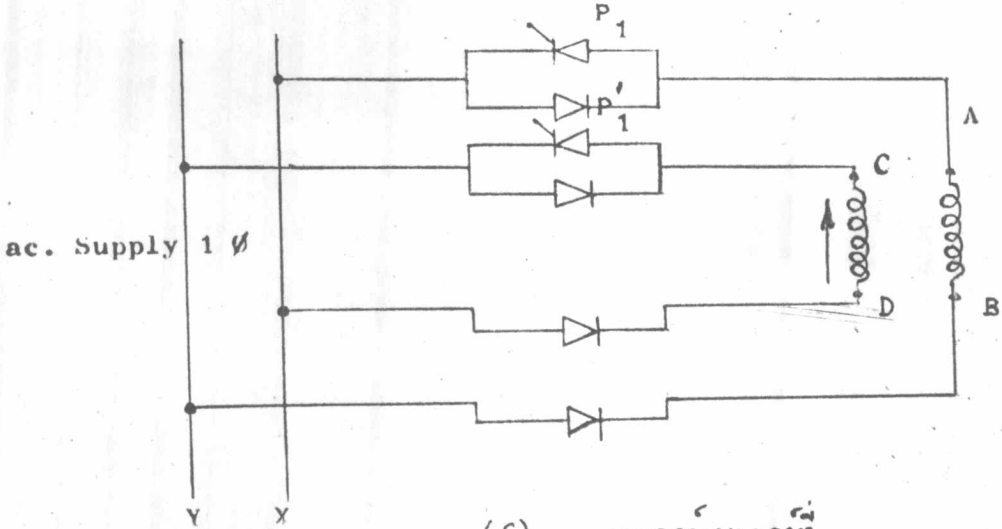
รูป 3.8 quadrant แสดงทิศทางของแรงบิดตอนเริ่มต้นของมอเตอร์แบบไม่มีคอมมิวเตเตอร์



(a) มอเตอร์กระแสตรง



(b) เครื่องจุดชนวน



วงจรชุดที่ 1

(C) วงจรอาร์เมเจอร์ที่ trigger angle = 0°

รูป 3.9 มอเตอร์แบบไม่มีคอมมิวเตเตอร์

ชุดที่ 1 เมื่อ trigger arc จาก photo-transistor P_1 และ P_1' ไปแล้ว สัญญาณที่ไป จุดชนวนที่เกทของ thyristor P_1 และ P_1' ก็จะหมดไปด้วย และเนื่องจากแหล่งจ่ายไฟเป็นกระแสสลับ ขั้ว X และ Y จะกลับขั้วทุก ๆ ครึ่งคาบเวลา จึงทำให้ thyristor P_1 และ P_1' หยุดนำกระแส เนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านแอโนด-แคโธดลดลงมีค่าต่ำกว่าค่าโฮลดิ้งเคอร์เรนท์ และการทำงานของมอเตอร์ในช่วงเวลาต่อไปก็จะเป็นในทำนองเดียวกันกับที่ได้กล่าวมาแล้ว การคอมมิวเตชั่นที่ความเร็วต่ำ ๆ เป็นแบบ natural commutation

3.3.3 <u>การคอมมิวเตชั่นที่ความเร็วสูง</u>

การคอมมิวเตชั่นในขณะที่มอเตอร์มีความเร็วสูงนั้นเป็นแบบ forced commutation กล่าวคือ อาศัยแรงดันย้อนกลับ (back emf) ซึ่งเกิดขึ้นในขดลวดอาร์เมเจอร์และมีทิศทางย้อนกลับกับทิศทางของแรงดันไฟสลับที่ป้อนเข้าไป ถ้าขนาดของแรงดันย้อนกลับมากกว่าขนาดของแรงดันไฟสลับ ก็จะทำให้แอโนดของ thyristor มีศักย์เป็นลบเมื่อเทียบกับแคโธดทำให้ thyristor หยุดนำกระแส