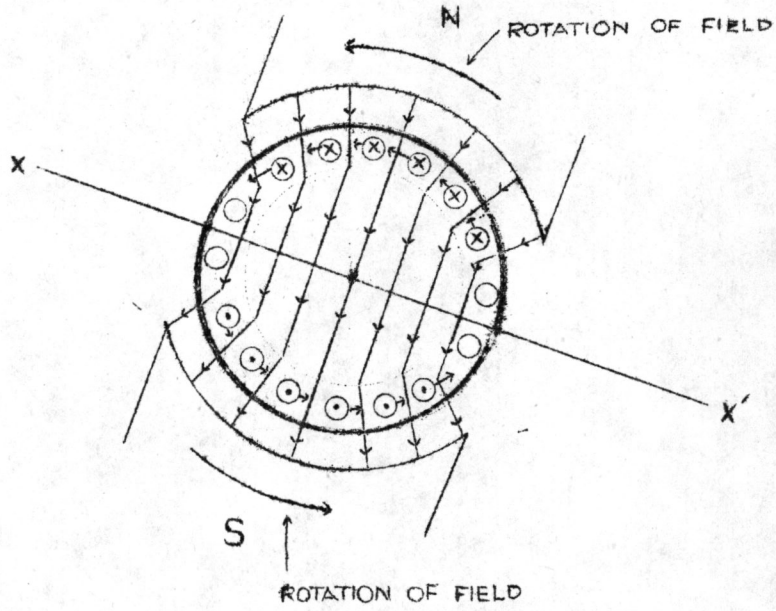
บทที่ ๒

มอเตอร์ตัวต้นแบบที่ใช้ในการวิจัย

๒.๑ หลักการทำงานของมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำแบบ ๓ เฟส

ขณะที่ขดลวด ๓ เฟสของสเตเตอร์ต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟ ๓ เฟส จะเกิดสนามแม่เหล็กขนาดคงที่และจะเคลื่อนที่ไปรอบ ๆ ด้วยความเร็วซิงโครนัส สนามแม่เหล็กจะผ่านช่องอากาศ (air gap) ผ่านผิวของโรเตอร์และไปตัดตัวนำไฟฟ้าในโรเตอร์ซึ่งยังหยุดนิ่ง จากกฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law of electro magnetic induction)จะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าในโรเตอร์ เนื่องจากความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่เคลื่อนที่กับตัวนำไฟฟ้าที่หยุดนิ่ง ชั่วขณะนี้ ความถี่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าในโรเตอร์จะเท่ากับความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ โดยขนาดจะเป็นอัตราส่วนกับความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กที่เคลื่อนที่กับตัวนำไฟฟ้าในโรเตอร์ ทิศทางจะเป็นไปตามกฎมือขวาของเฟลมมิ่ง เนื่องจากแท่งโลหะหรือตัวนำไฟฟ้าในโรเตอร์เป็นชนิดวงจรปิด จึงเกิดกระแสไหลในตัวนำเหล่านั้น กระแสที่ไหลนี้จะไหลตั้งฉากกับทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก จึงทำให้เกิดแรงบิดขึ้นที่ตัวนำ มีทิศทางตามกฎมือซ้าย ดังแสดงในรูปที่ ๒.๑

ขณะที่โรเตอร์หมุนแล้ว ความเร็วของโรเตอร์จะไม่เท่ากับความเร็วของสนามแม่เหล็กในสเตเตอร์ เพราะว่าถ้าทั้ง ๒ มีความเร็วเท่ากันก็จะไม่มีความเร็วสัมพัทธ์ และจะไม่เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าในโรเตอร์ เมื่อไม่เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าในโรเตอร์ ก็จะไม่มีกระแสไหล ทำให้ไม่เกิดแรงบิด ดังนั้นโรเตอร์จะหมุนที่ความเร็วต่ำกว่าความเร็วของสนามแม่เหล็กในสเตเตอร์เสมอ ความแตกต่างในความเร็วทั้ง ๒ จะขึ้นอยู่กับโหลด(load) ของมอเตอร์



รูปที่ ๒.๑

ความเร็วสลิป (slip speed) คือความแตกต่างระหว่างความเร็วของสนามแม่เหล็กหรือความเร็วซิงโครนัสกับความเร็วของโรเตอร์

สลิป (slip) คืออัตราส่วนของความเร็วสลิปกับความเร็วซิงโครนัส

เมื่อสนามแม่เหล็กหมุน (revolving magnetic field) มีความเร็วซิงโครนัส

$$\text{เท่ากับ} \quad \frac{120\,f}{p} \quad \text{รอบ/นาที}$$

โดยที่ f = ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่เข้าสเตเตอร์ (รอบ/ วินาที)

p = จำนวนโพลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จะทำให้โรเตอร์หมุนได้ด้วยความเร็วต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสเล็กน้อย โดยขึ้นกับค่าของสลิป (S)

นั่นคือโรเตอร์จะหมุนด้วยความเร็ว $\text{rpm.(rotor)} = \frac{120\,f}{p}(1-S)$ (๒.๑)

เมื่อโรเตอร์หมุนแล้ว ความถี่ และขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำขึ้นในโรเตอร์ ตลอดจนแรงบิด (torque) และค่ารีแอคแทนซ์ ของโรเตอร์จะขึ้นอยู่กับค่าสลิปด้วย (๔)

จากสมการที่ ๒.๑ พอจะเห็นแล้วว่า เราสามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำแบบ ๓ เฟส ได้ ๓ วิธีคือ

๑. โดยการเปลี่ยนค่าความถี่ของแรงดันไฟฟ้าเข้าสเตเตอร์
๒. โดยการเปลี่ยนค่าสลิป (S) ซึ่งสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนค่าความต้านทานในวงจรของโรเตอร์ หรือเปลี่ยนค่าแรงดันในวงจรของโรเตอร์
๓. โดยวิธีการเปลี่ยนจำนวนโพล(P) ของมอเตอร์

วิธีการเปลี่ยนความเร็วเหล่านี้ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ ๑ และในการวิจัยนี้เป็นการหาวิธีการเปลี่ยนความเร็วของมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำแบบ ๓ เฟสขึ้นใหม่ โดยใช้หลักการเปลี่ยนจำนวนโพลของสนามแม่เหล็กภายในมอเตอร์ ดังนั้นจึงสามารถใช้ได้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ ๓ เฟสชนิด squirrel cage motor เท่านั้น

๒.๒ มอเตอร์ตัวต้นแบบที่ใช้ในการวิจัย

มอเตอร์ที่นำมาดัดแปลงให้หมุนได้ ๒ ความเร็วในครั้งนี้ แต่เดิมหมุนได้ที่ความเร็วซิงโครนัสค่าเดียวคือ ๑๕๐๐ รอบต่อนาที ในการวิจัยครั้งนี้ได้พยายามดัดแปลงขดลวดสเตเตอร์เพื่อให้มอเตอร์ตัวนี้สามารถเปลี่ยนความเร็วซิงโครนัสได้เป็น ๑๐๐๐ และ ๑๕๐๐ รอบต่อนาที

มอเตอร์ตัวต้นแบบนี้ เป็นมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำแบบ ๓ เฟส มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายในสเตเตอร์เท่ากับ ๓ ๗/๘ นิ้ว สเตเตอร์มี ๓๖ ร่อง (slots) ความยาวของ slot เท่ากับ ๓ นิ้ว โรเตอร์เป็นแบบ squirrel cage ซึ่งมี aluminium bars อยู่ภายใน ปลายทั้ง ๒ ข้างของตัวโรเตอร์มีใบพัดเป่าลม (ventilating fan) เพื่อช่วยระบายความร้อนลักษณะ frame ของมอเตอร์เป็นแบบ totally enclosed มอเตอร์ตัวนี้มีขนาด ๒ แรงม้า สามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่อง (continuous) ใช้กับแรงดันชนิด ๓ เฟสขนาด-

๒๒๐/๓๘๐ โวลท์ ขดลวดสเตเตอร์พันไว้เพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๔ โพล เมื่อใช้กับแรงดันไฟฟ้าที่มีความถี่ ๕๐ รอบต่อวินาที จะเกิดความเร็วซิงโครนัส ๑๕๐๐ รอบต่อนาที ลวดทองแดงที่พันบนสเตเตอร์ใช้ลวดทองแดงเบอร์ ๒๐ SWG. จำนวน ๓๒ รอบต่อหนึ่งคอล์ย (coil) การพันขดลวดสเตเตอร์เป็นแบบ double layer lap winding มีจำนวน group ทั้งหมดเท่ากับ ๑๒ groups แต่ละ group มี ๓ คอล์ย โดยมีช่วงคอล์ย (pitch) เท่ากับ ๗ ร่อง

ดังนั้นจะได้ว่า

Pitch Factor = ๐.๙๓๙๗

Distribution Factor = ๐.๙๕๙๕

Winding Factor = ๐.๙๐๑๙

รูปที่ ๒.๒ แสดงลักษณะและส่วนประกอบต่าง ๆ ของมอเตอร์ต้นแบบที่ใช้ในการวิจัย

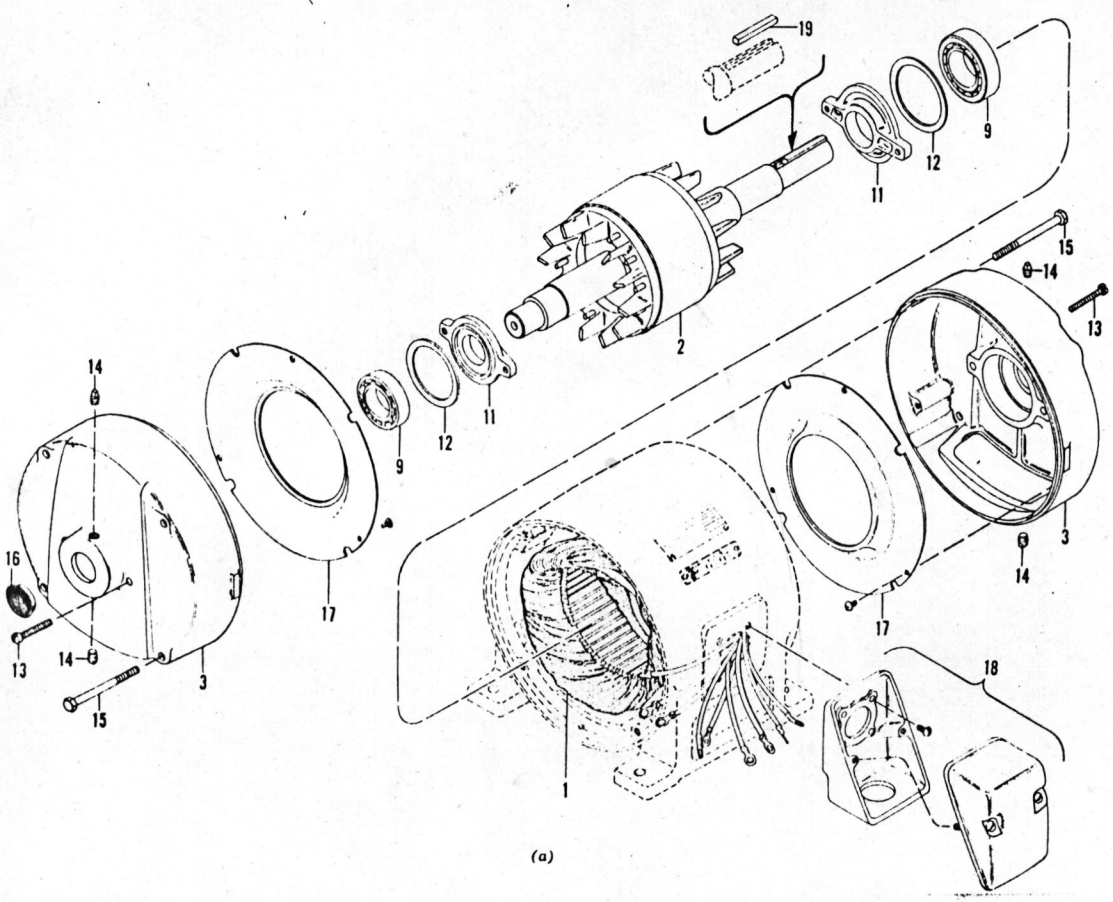
รูปที่ ๒.๓ แสดง phase belt ของขดลวดสเตเตอร์ภายในมอเตอร์เพื่อทำให้เกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๔ โพล ตลอดจน diagram การต่อวงจรของขดลวดสเตเตอร์เพื่อใช้กับแรงดันไฟฟ้า ๒๒๐ โวลท์ และ ๓๘๐ โวลท์

รูปที่ ๒.๔ แสดงรายละเอียดในการพันขดลวดสเตเตอร์ของเฟส A ส่วนการพันขดลวดสเตเตอร์ของเฟส B และ C ไม่ได้แสดงให้ดู เพราะลักษณะการพันก็เหมือนกับของเฟส A เพียงแต่จุดเริ่มต้นจะห่างออกไปเท่ากับ ๑๒๐ องศาทางไฟฟ้า (๖ slots) เท่านั้น ซึ่งในรูปก็ได้แสดงทิศทางการไหลของกระแสทั้ง ๓ เฟสไว้อย่างละเอียดแล้ว (ถ้าแสดงการพันขดลวดสเตเตอร์ของเฟส B และ C เข้าไปด้วย จะทำให้รูปยุ่งยากและลำบากแก่การพิจารณาทำความเข้าใจของผู้อ่าน)

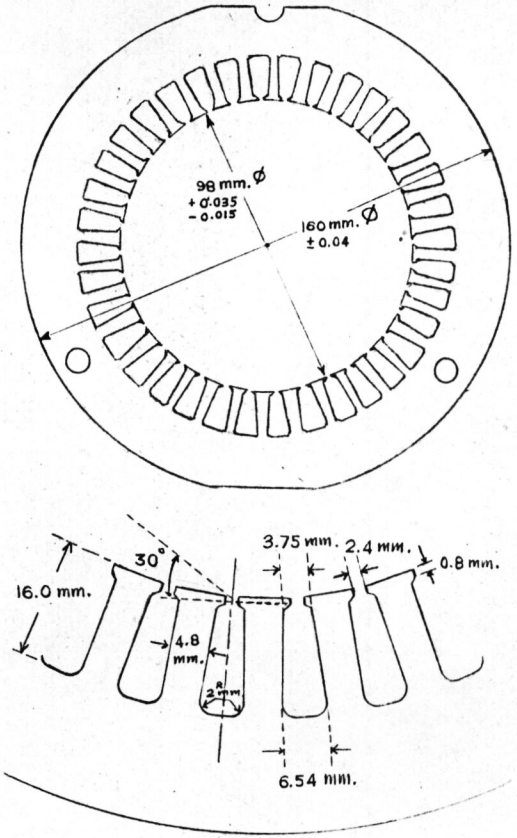
๒.๓ แนวความคิดในการเปลี่ยนแปลงจำนวนโพลของสนามแม่เหล็ก

เนื่องจากความเร็วซิงโครนัส $N_s = \frac{๑๒๐\ f}{p}$

ดังนั้นวิธีการทำให้มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำแบบ ๓ เฟส สามารถเปลี่ยนความเร็ว



(a)

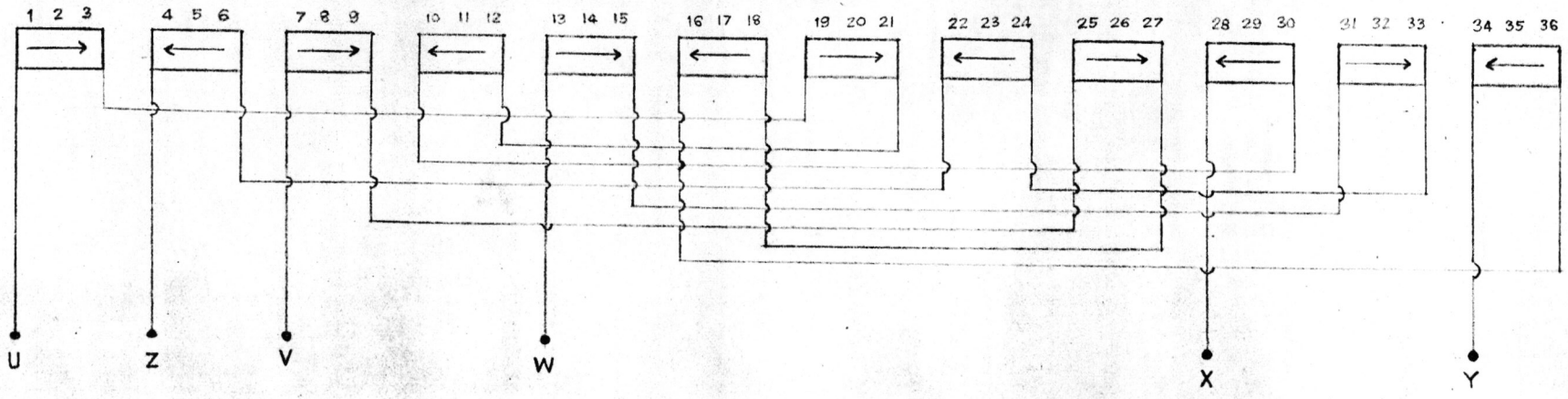


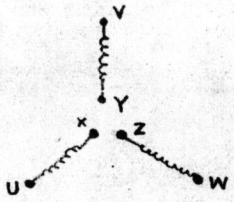
(b)

DIMENSION OF STATOR CORE

รูปที่ ๒.๒ แสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ของมอเตอร์ต้นแบบที่ใช้ในการวิจัย

รูปที่ ๒.๓ แสดง PHASE BELT ของขดลวดสเตเตอร์ เพื่อทำให้เกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๔ โพล ตลอดจน DIAGRAM การต่อวงจรของขดลวดสเตเตอร์เพื่อใช้กับแรงดันไฟฟ้า ๒๒๐ โวลท์ และ ๓๘๐ โวลท์

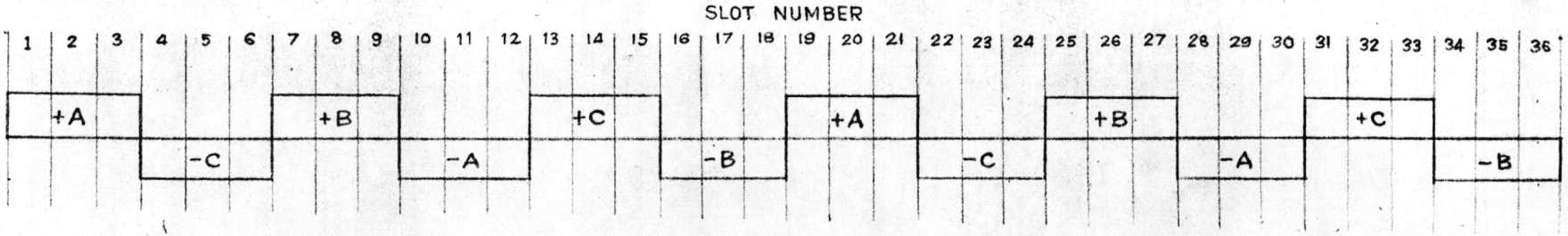




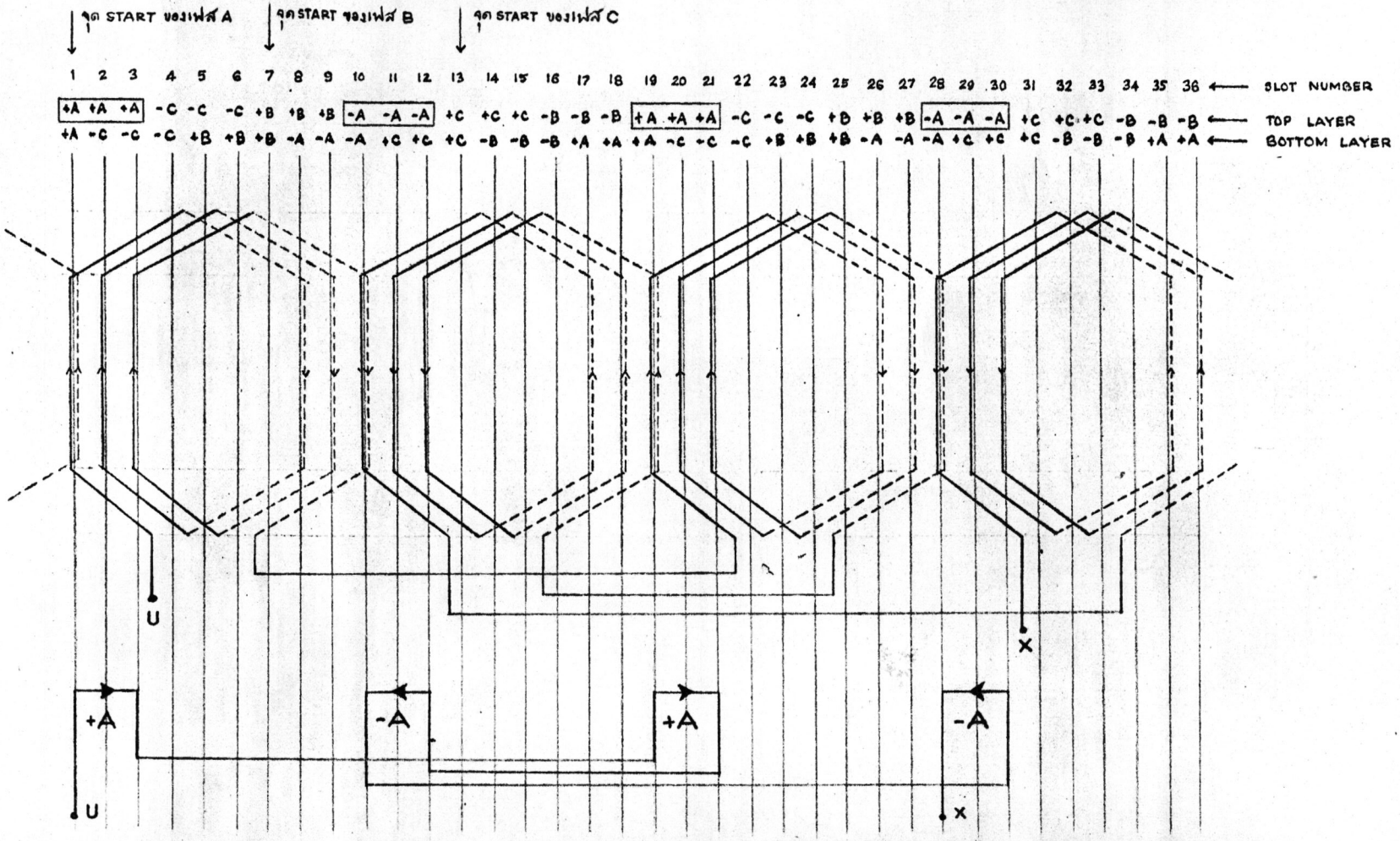
Δ/Y
220/380 VOLT

Δ : U-Z , V-X , W-Y ⟶ LINE

Y : X-Y-Z ⟶ JOIN TOGETHER
U , V , W ⟶ LINE



หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



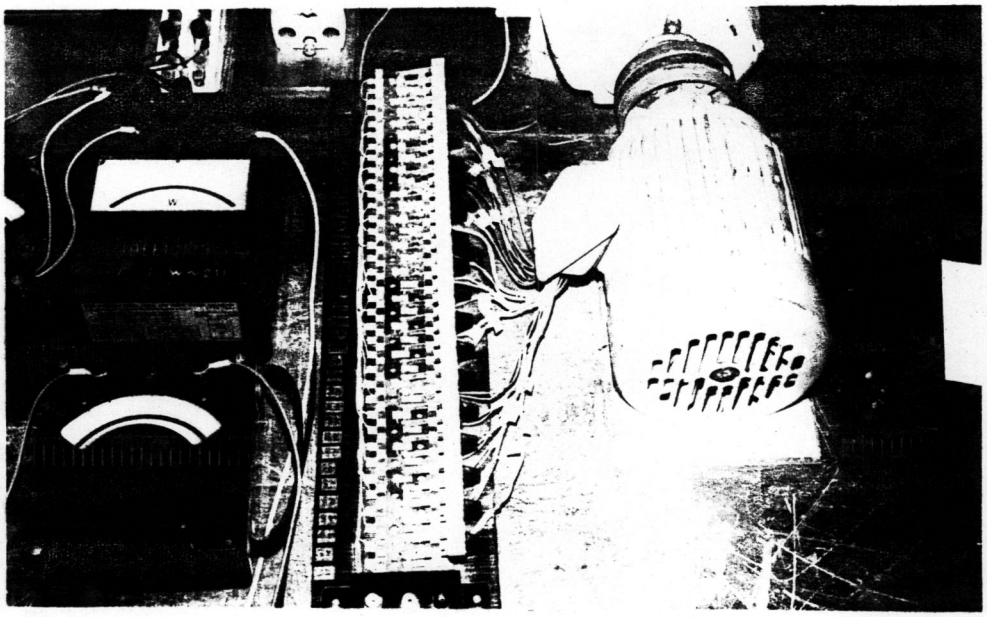
แสดง PHASE BELT ของขดลวดสเตเตอร์ในเฟส "A"

รูปที่ ๒.๔ ลักษณะการพันลวด การต่อวงจร และ PHASE BELT ของขดลวดสเตเตอร์ในเฟส "A" พร้อมทั้งทิศทางการไหลของกระแสทั้ง ๓ เฟส

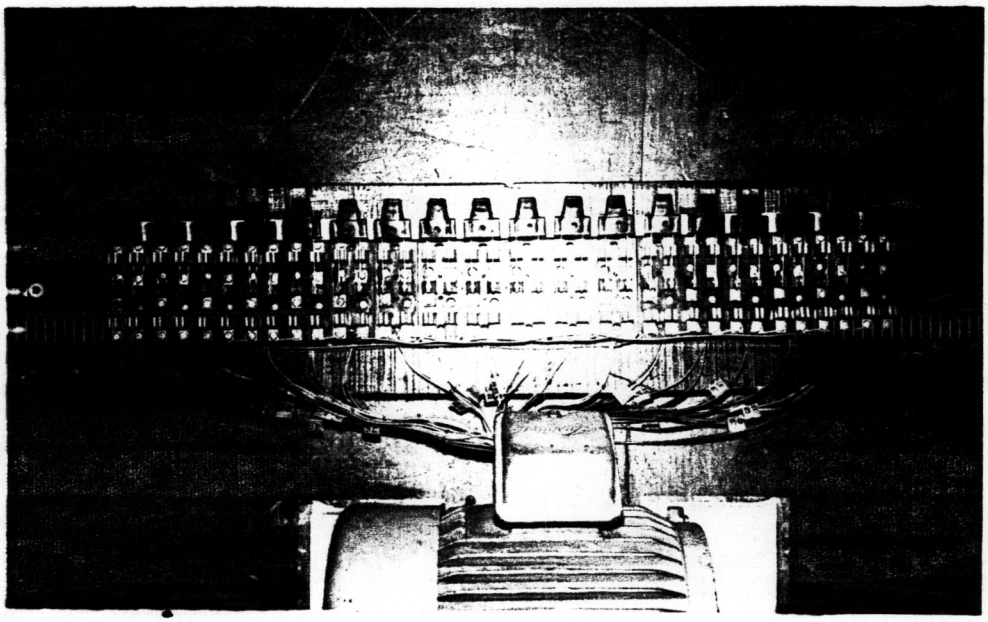
ซิงโครนัสได้เป็น ๑๕๐๐ และ ๑๐๐๐ รอบต่อนาที ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าจากสายส่งมีความถี่ ๕๐ รอบต่อวินาที ก็คือต้องทำให้มอเตอร์ตัวนี้สามารถเปลี่ยนจำนวนโพลของสนามแม่เหล็กได้เป็น ๔ โพลและ ๖ โพล

การเปลี่ยนจำนวนโพลของสนามแม่เหล็กโดยใช้สวิทช์และขดลวดสเตเตอร์เพียงชุดเดียวนั้น เท่าที่ทำอยู่ในปัจจุบันสามารถทำได้โดยอาศัยวิธี Consequent Pole และวิธี Pole Amplitude Modulation แต่วิธีทั้ง ๒ นี้ยังมีข้อเสียกล่าวคือ วิธี Consequent Pole สามารถใช้ได้เมื่อต้องการเปลี่ยนจำนวนโพลในอัตราส่วน ๑: ๒ หรือ ๒: ๑ เท่านั้น ในกรณีนี้เราต้องการเปลี่ยนจำนวนโพลเป็น ๔:๖ จึงไม่สามารถใช้วิธีนี้ได้ และถ้าจะใช้วิธี Pole Amplitude Modulation ก็มีข้อเสียที่ว่าจะเกิด harmonic ขึ้นมาก และเกิด unbalance ระหว่าง phases ด้วย ทำให้คุณสมบัติในการทำงานของมอเตอร์ที่ความเร็วทั้ง ๒ แตกต่างกัน ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้จึงไม่ได้นำหลักการของวิธีการทั้ง ๒ มาใช้โดยตรง แต่จากการที่ได้ศึกษาวิธีทั้ง ๒ มานั้น ทำให้เกิดความคิดที่จะจัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์อีกแบบหนึ่ง ซึ่งใช้ขดลวดสเตเตอร์เพียงชุดเดียวเช่นกัน และในการเปลี่ยนวงจรการต่อของขดลวดสเตเตอร์นั้นก็ได้อาศัยสวิทช์ภายนอกช่วยเช่นเดียวกับวิธีทั้ง ๒ แต่วิธีที่ใช้นี้ต้องอาศัยสวิทช์แบบ double throw ซึ่งมีจำนวนขามากกว่า กล่าวคือ ในวิธีทั้ง ๒ แบบข้างต้นนั้นเราต้องการสวิทช์แบบ double throw ที่มีขาเพียง ๓-๔ ขาเท่านั้น แต่วิธีที่ใช้นี้ต้องการสวิทช์แบบ double throw ที่มีจำนวนขาถึง ๓๖ ขา ดังแสดงในรูปที่ ๒.๕ ถึงแม้ว่าวิธีที่ใช้นี้จะมีสวิทช์ที่ยุ่งยากกว่าใน ๒ วิธีแรก แต่ก็สามารถทำให้เปลี่ยนจำนวนโพลของสนามแม่เหล็กได้เป็น ๔:๖ ซึ่งในวิธี Consequent Pole ทำไม่ได้ และยังให้คุณสมบัติในการทำงานของมอเตอร์ได้ดีใกล้เคียงกันทั้ง ๒ ความเร็ว ซึ่งวิธี P.A.M. ทำไม่ได้

วิธีที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้มีแนวความคิดที่ว่า จะแบ่งขดลวดสเตเตอร์ออกเป็น ๓ ชั้น แต่ละชั้นใช้การพันขดลวดแบบ double layer lap winding (จำนวน รอบ ของแต่ละ coil ในแต่ละชั้น จะกล่าวถึงในบทที่ ๓)



(A)



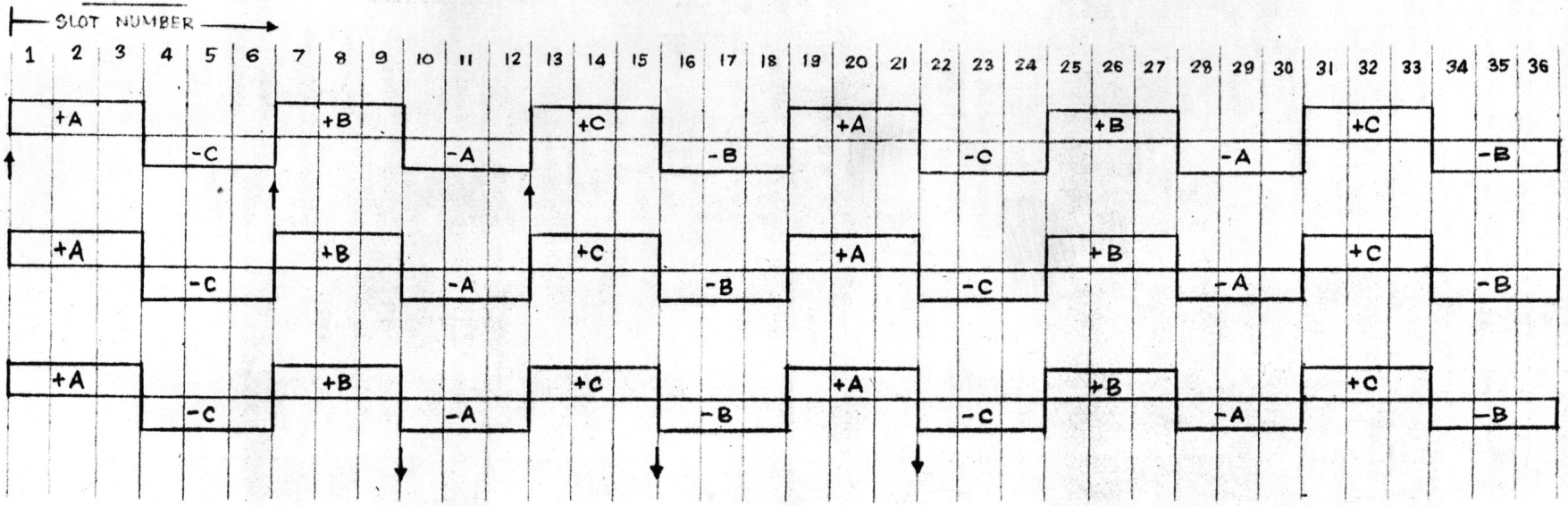
(B)

รูปที่ ๒.๕ (A,B) สวิทช์ควบคุมความเร็วที่สร้างขึ้นในการวิจัย

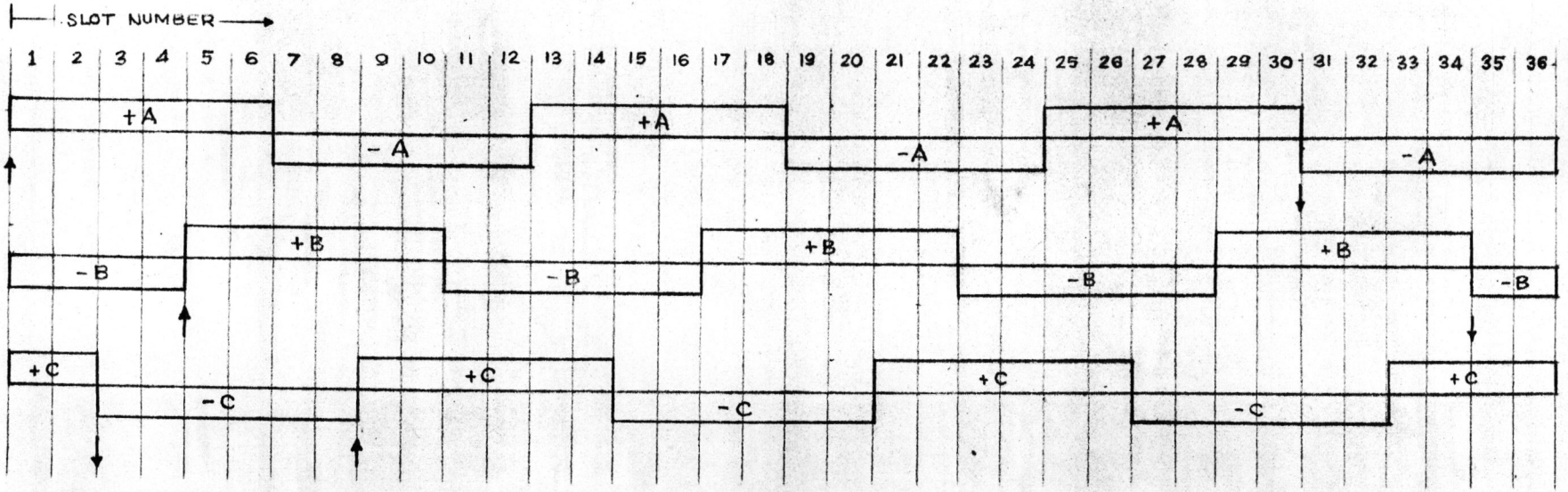
ในการต่อวงจรให้เกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๔ โพล หรือเกิดความเร็วซิงโครนัสเท่ากับ ๑๕๐๐ รอบต่อนาทีนั้น ทำได้โดยการต่อวงจรของขดลวดทั้ง ๓ ชั้นให้เหมือนกับ conventional motor (ดังกล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ ๒.๒) ทุกประการ ดังแสดงในรูปที่ ๒.๖ ดังนั้นคุณสมบัติในการทำงานของมอเตอร์ เมื่อเกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๔ โพล จึงเหมือนกับ conventional motor ที่ออกแบบมาโดยเฉพาะเพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๔ โพลทุกประการ เมื่อต้องการทำให้เกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๖ โพลหรือเกิดความเร็วซิงโครนัสเท่ากับ ๑๐๐๐ รอบต่อนาที เราก็สามารถทำได้โดยสับสวิทช์เปลี่ยนวงจรการต่อของขดลวดทั้ง ๓ ชั้น ซึ่งสวิทช์นี้จะจัดการต่อให้แต่ละชั้นเกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๖ โพล โดยให้ขดลวดชั้นที่ ๑ เป็นของเฟส A ขดลวดชั้นที่ ๒ เป็นของเฟส B และขดลวดชั้นที่ ๓ เป็นของเฟส C จุดที่กระแสเริ่มเข้าในแต่ละเฟสจะห่างกัน ๑๒๐ องศาทางไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ ๒.๗

สมมุติขดลวดทั้ง ๓ ชั้นนี้แต่ละชั้นมีจำนวนรอบของขดลวด (turn) ทั้งหมด = N เพราะฉะนั้นทั้ง ๓ ชั้นรวมกันจะมีจำนวนรอบของขดลวดทั้งหมดเท่ากับ ๓ N เมื่อจัดการต่อวงจรของขดลวดสเตเตอร์เพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๔ โพล ขดลวดในชั้นที่ ๑ จะเป็นของเฟส A เท่ากับ $\frac{N}{3}$ รอบ เป็นของเฟส B เท่ากับ $\frac{N}{3}$ รอบ และของเฟส C เท่ากับ $\frac{N}{3}$ รอบ ส่วนขดลวดในชั้นที่ ๒ และ ๓ ก็เช่นเดียวกัน คือแต่ละชั้นจะมีขดลวดของเฟส A, B และ C เท่ากับ $\frac{N}{3}$ รอบ เท่ากันทั้งหมด ดังนั้นเมื่อรวมทั้ง ๓ ชั้นแล้วจะมีจำนวนรอบของขดลวดในเฟส A เท่ากับ N รอบ จำนวนรอบของขดลวดในเฟส B เท่ากับ N รอบ และของเฟส C เท่ากับ N รอบเช่นกัน เมื่อจัดการต่อวงจรของขดลวดสเตเตอร์ เพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๖ โพล ขดลวดในชั้นที่ ๑, ๒ และ ๓ จะเป็นของเฟส A, B และ C ตามลำดับ เพราะฉะนั้นในแต่ละเฟสจะมีจำนวนรอบของขดลวดเท่ากับ N รอบเท่ากัน ซึ่งเท่ากับจำนวนรอบของขดลวดในแต่ละเฟสเมื่อต่อวงจรให้เกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๔ โพลด้วย

รูปที่ ๒.๖ แสดง PHASE BELT ของขดลวดชั้นต่าง ๆ เมื่อต่อขดลวดให้เกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๔ โพล

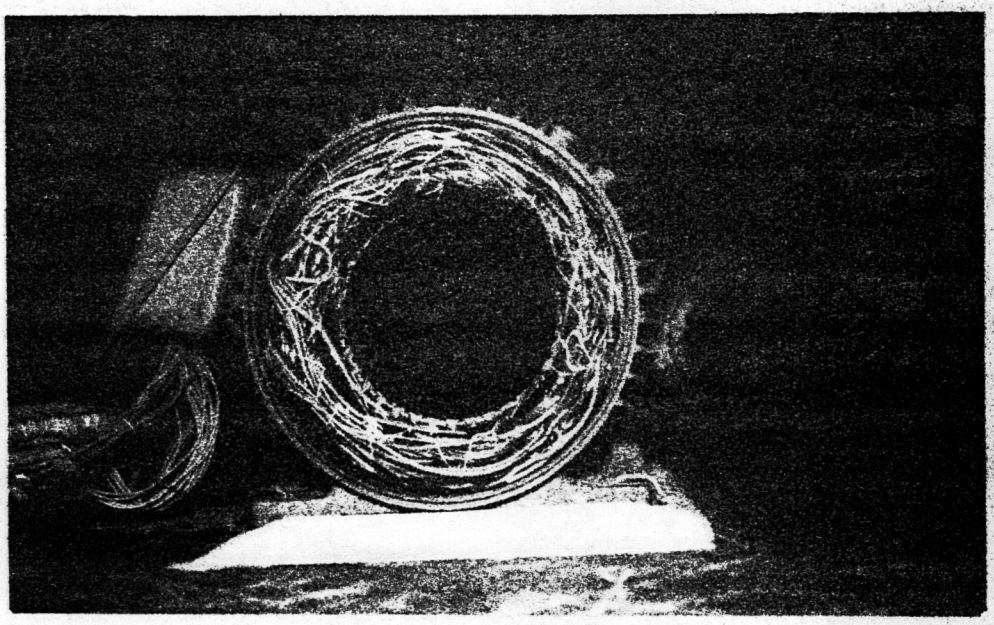


รูปที่ ๒.๗ แสดง PHASE BELT ของขดลวดชั้นต่าง ๆ เมื่อต่อขดลวดให้เกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๖ โพล

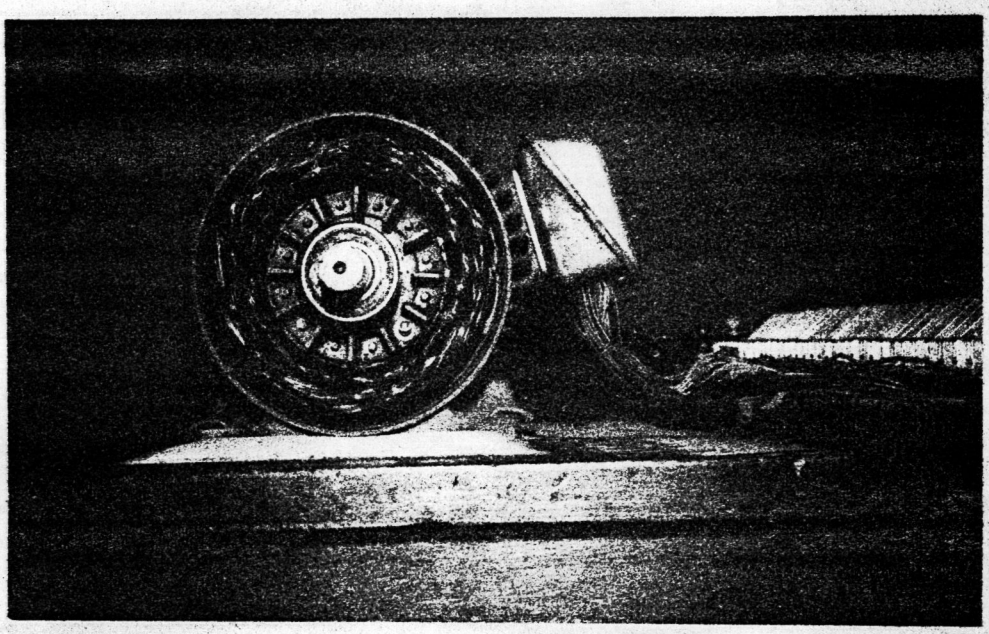


↑ จุดที่กระแสจากสายส่งเริ่มไหลเข้าสู่เฟส

↓ จุดที่กระแสไหลออกจากเฟส



(A)



(B)

รูปที่ ๒.๘ (A,B) แสดงการพันขดลวดสเตเตอร์ในมอเตอร์ที่ดัดแปลงขึ้นมาเพื่อให้สามารถเปลี่ยนความเร็วซิงโครนัสได้เป็น ๑๐๐๐/๑๕๐๐ รอบ-ต่อนาที

ดังนั้นในการต่อวงจรของขดลวดสเตเตอร์เพื่อให้เกิดจำนวนโพลของสนามแม่เหล็กต่างกันจะไม่มีผลให้ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ต่อเฟสเปลี่ยนไป และยังสามารถทนแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าได้เท่ากันทุกประการ ส่วนรายละเอียดในการพันขดลวด ขนาด และ จำนวนรอบของขดลวด การต่อวงจรและการออกแบบสวิทช์เพื่อช่วยในการเปลี่ยนความเร็ว จะได้กล่าวโดยละเอียดต่อไปในบทที่ ๓