บทที่ ๓

การออกแบบขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์

จากบทที่ ๒ พอจะทราบแนวความคิดและหลักการที่ใช้ในการเปลี่ยนจำนวนโพลของสนามแม่เหล็กมาแล้ว ในบทนี้จะได้กล่าวถึงรายละเอียดในการออกแบบการพันขดลวด การคำนวนขนาดและจำนวนรอบของขดลวด ตลอดจนการต่อวงจร และสวิทช์ที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงการต่อวงจรของขดลวดสเตเตอร์ เพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๔ โพล และ ๖ โพล ตามต้องการ

๓.๑ การออกแบบการพันขดลวดสเตเตอร์

ดังกล่าวแล้วว่าเมื่อต้องการให้เกิดขั้วแม่เหล็กแบบ ๔ โพล หรือทำให้เกิดความเร็วซิงโครนัสเท่ากับ ๑๕๐๐ รอบต่อนาที เราจะจัดทิศทางการไหลของกระแสในแต่ละเฟสให้เหมือนกับ conventional motor แบบ ๔ โพล ที่เรานำมาดัดแปลงทุกประการ ขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์หลังการดัดแปลงแล้วจะแบ่งเป็น ๓ ชั้น แต่ละชั้นจะมีทิศทางการไหลของกระแสทั้ง ๓ เฟส เหมือนกันหมด โดยที่ขดลวดสเตเตอร์ของแต่ละเฟสในแต่ละชั้นจะต่ออย่างอนุกรมกัน ดังนั้นจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๔ โพลขึ้นพร้อม ๆ กันทั้งสามชั้น ที่ตำแหน่งและเวลาเดียวกันทั้งหมด ขดลวดทั้งสามเฟสนี้จะต่อรวมกันเป็นแบบ wye-connection

การออกแบบขดลวดสเตเตอร์เพื่อทำให้เกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๔ โพล ทำได้ดังนี้

สเตเตอร์มี ๓๖ ร่อง
ต้องการให้เกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๔ โพล

มอเตอร์เป็นชนิด ๓ เฟส
เพราะฉนั้นจำนวน slot/pole/phase จะเท่ากับ ๓
นั่นคือจะมี ๓ coils/group
และมีจำนวนกรุ๊ฟทั้งหมดเท่ากับ ๑๒ กรุ๊ฟ
ช่วงคอล์ย (pitch) **เท่ากับ ๗ ร่อง**
ดังนั้นจะได้ว่า

Pitch Factor = ๐.๙๓๙๗
Distribution Factor = ๐.๙๕๙๘
Winding Factor = ๐.๙๐๑๙
ระยะห่างระหว่างร่อง (slot) = ๒๐ องศาทางไฟฟ้า

จุดเริ่มของเฟส A, B และ C อยู่ในชั้นที่ ๑ ซึ่งห่างกัน ๑๒๐ องศาทางไฟฟ้า หรือเท่ากับ ๖ ร่อง (slot) เนื่องจากขดลวดสเตเตอร์ทั้ง ๓ ชั้น ต่ออนุกรมกัน ดังนั้นจุดที่กระแสไหลออกจากแต่ละเฟสจะอยู่ในชั้นที่ ๓ ซึ่งไหลออกจากแต่ละเฟสที่จุดห่างกัน ๑๒๐ องศาทางไฟฟ้าเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ ๒.๖ และ ๓.๑

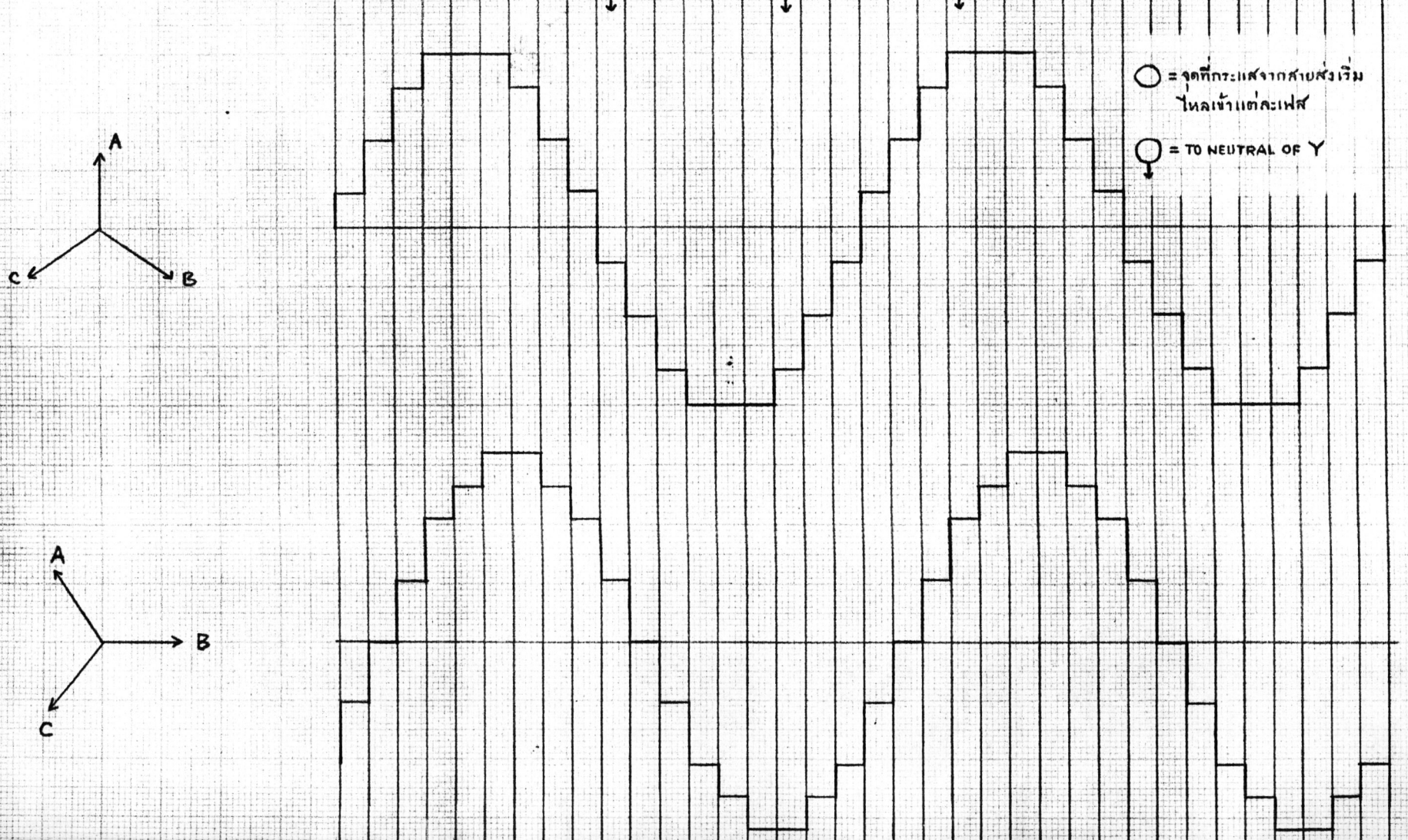
เมื่อต้องการให้เกิดความเร็วซิงโครนัสเท่ากับ ๑๐๐๐ รอบต่อนาที ขดลวดสเตเตอร์ในแต่ละชั้นจะถูกจัดเพื่อทำให้เกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๖ โพล โดยให้ขดลวดในชั้นที่ ๑ เป็นของเฟส A ขดลวดชั้นที่ ๒ เป็นของเฟส B และขดลวดในชั้นที่ ๓ เป็นของเฟส C

การออกแบบขดลวดสเตเตอร์เพื่อทำให้เกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๖ โพลทำได้ดังนี้

สเตเตอร์มี ๓๖ ร่อง
ต้องการให้เกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๖ โพล
ขดลวดในแต่ละชั้นใช้สำหรับ ๑ เฟส
เพราะฉนั้น slot/pole ในแต่ละชั้น (เฟส) เท่ากับ ๖
นั่นคือในแต่ละเฟส (ชั้น) จะมี ๖ coils/group

รูปที่ ๓.๑ แสดงทิศทางของการไหลของกระแสทั้ง ๓ เฟส ในขดลวดแต่ละชั้น และลักษณะการเกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๔ โพล

SLOT NUMBER	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
FIRST LAYER	(+A)	+A	+A	-C	-C	-C	(+B)	+B	+B	-A	-A	-A	(+C)	+C	+C	-B	-B	-B	+A	+A	+A	-C	-C	-C	+B	+B	+B	-A	-A	-A	+C	+C	+C	-B	-B	-B
	+A	-C	-C	-C	+B	+B	+B	-A	-A	-A	+C	+C	+C	-B	-B	-B	+A	+A	+A	-C	-C	-C	+B	+B	+B	-A	-A	-A	+C	+C	+C	-B	-B	-B	+A	+A
SECOND LAYER	+A	+A	+A	-C	-C	-C	+B	+B	+B	-A	-A	-A	+C	+C	+C	-B	-B	-B	+A	+A	+A	-C	-C	-C	+B	+B	+B	-A	-A	-A	+C	+C	+C	-B	-B	-B
	+A	-C	-C	-C	+B	+B	+B	-A	-A	-A	+C	+C	+C	-B	-B	-B	+A	+A	+A	-C	-C	-C	+B	+B	+B	-A	-A	-A	+C	+C	+C	-B	-B	-B	+A	+A
THIRD LAYER	+A	+A	+A	-C	-C	-C	+B	+B	+B	-A	-A	-A	+C	+C	+C	-B	-B	-B	+A	+A	+A	-C	-C	-C	+B	+B	+B	-A	-A	-A	+C	+C	+C	-B	-B	-B
	+A	-C	-C	-C	+B	+B	+B	-A	-A	(-A)	+C	+C	+C	-B	-B	(-B)	+A	+A	+A	-C	-C	(-C)	+B	+B	+B	-A	-A	-A	+C	+C	+C	-B	-B	-B	+A	+A



และในแต่ละชั้นจะมีจำนวนกรุ๊ฟทั้งหมดเท่ากับ ๖ กรุ๊ฟ
ช่วงคอล์ย (pitch) เท่ากับ ๗ ร่อง
ดังนั้นจะได้ว่า

Pitch Factor = ๐.๙๖๕๙

Distribution Factor = ๐.๖๔๔

Winding Factor = ๐.๖๒๒

ระยะระหว่างร่อง (slot) = ๓๐ องศาทางไฟฟ้า

เนื่องจากจุดที่กระแสเริ่มเข้าในแต่ละเฟสต้องห่างกัน ๑๒๐ องศาทางไฟฟ้า ดังนั้น จุดเริ่มต้นในแต่ละเฟสจะห่างกันเท่ากับ ๔ ร่อง (slot) ดังแสดงในรูปที่ ๒.๗ และ ๓.๒ ส่วนจุดที่กระแสไหลออกจากแต่ละเฟส ในที่นี้ก็ให้ห่างกันเท่ากับ ๑๒๐ องศาทางไฟฟ้า (๖ slots) เช่นกัน

กรณีที่มีขดลวดสเตเตอร์เพียงชุดเดียว แต่ต้องการให้เปลี่ยนแปลงการต่อวงจรของขดลวดสเตเตอร์ได้เป็น ๒ แบบ (๔ โพล และ ๖ โพล) ดังกล่าวมานั้น สามารถทำได้โดยแบ่งขดลวดสเตเตอร์ในแต่ละชั้นออกเป็น ๖ ชุด ดังแสดงในรูปที่ ๓.๓ ในรูปนี้ (S) หมายถึงจุดเริ่มต้น (start) ของขดลวดแต่ละชุด ส่วน (F) หมายถึงจุดปลาย (finish) ของขดลวดแต่ละชุด A1, B2 หรือ $\bar{C}2$ ไม่มีความหมายอะไร เป็นชื่อที่ตั้งขึ้นมาแทนขดลวดชุดต่าง ๆ เท่านั้น

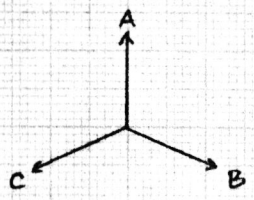
เมื่อต้องการให้เกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๔ โพล กระแสจะไหลเข้าขดลวดชุดต่าง ๆ ที่จุด (S) ทั้งหมด และไหลออกที่จุด (F) แต่เมื่อต้องการให้เกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๖ โพล กระแสจะไหลเข้าที่จุด (S) สำหรับขดลวดที่ไม่มีเครื่องหมาย " − " (bar)อยู่ข้างบน ส่วนขดลวดชุดที่มีเครื่องหมาย " − " (bar)อยู่ข้างบนนั้น กระแสจะไหลเข้าที่จุด (F) และไหลออกที่จุด (S) ของขดลวดชุดนั้น ๆ ดังจะเห็นได้ชัดจากรูปที่ ๓.๓ ซึ่งแสดงทิศทางการไหลของกระแสในขดลวดแต่ละชุดไว้ด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

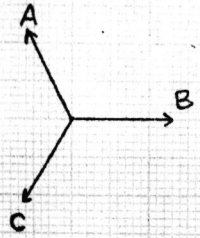
รูปที่ ๓.๒ แสดงทิศทางการไหลของกระแสทั้ง ๓ เฟส และลักษณะการเกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๖ โพล

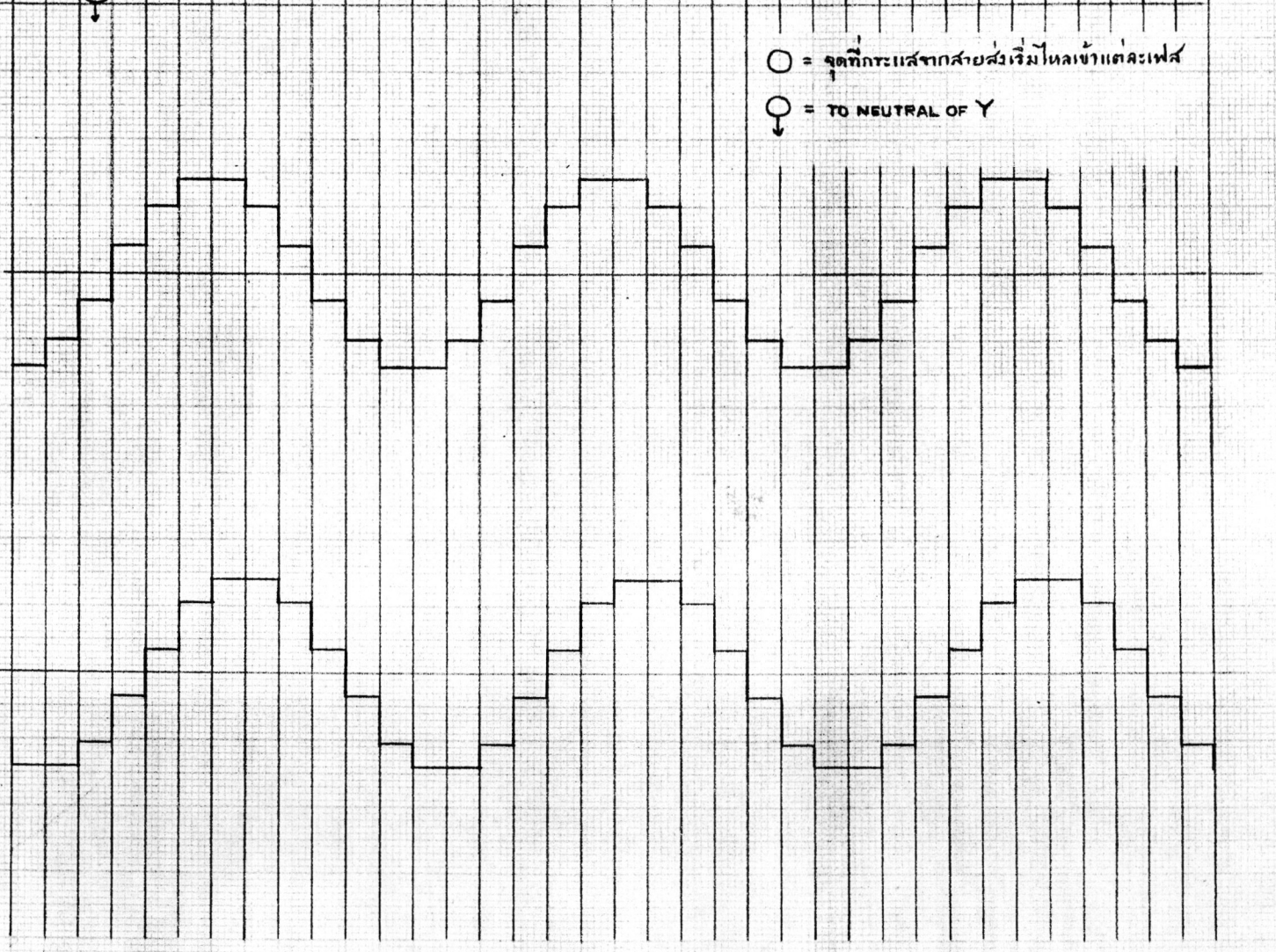
SLOT NUMBER	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
FIRST LAYER	(+A)	+A	+A	+A	+A	+A	-A	-A	-A	-A	-A	-A	+A	+A	+A	+A	+A	+A	-A	-A	-A	-A	-A	-A	+A	+A	+A	+A	+A	+A	-A	-A	-A	-A	-A	-A
	-A	+A	+A	+A	+A	+A	+A	-A	-A	-A	-A	-A	-A	+A	+A	+A	+A	+A	+A	-A	-A	-A	-A	-A	-A	+A	+A	+A	+A	+A	(+A)	-A	-A	-A	-A	-A
SECOND LAYER	-B	-B	-B	-B	(+B)	+B	+B	+B	+B	+B	-B	-B	-B	-B	-B	-B	+B	+B	+B	+B	+B	+B	-B	-B	-B	-B	-B	-B	+B	+B	+B	+B	+B	+B	-B	-B
	-B	-B	-B	-B	-B	+B	+B	+B	+B	+B	+B	-B	-B	-B	-B	-B	-B	+B	+B	+B	+B	+B	+B	-B	-B	-B	-B	-B	-B	+B	+B	+B	+B	+B	(+B)	-B
THIRD LAYER	+C	+C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	(+C)	+C	+C	+C	+C	+C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	+C	+C	+C	+C	+C	+C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	+C	+C	+C	+C
	+C	+C	(+C)	-C	-C	-C	-C	-C	-C	+C	+C	+C	+C	+C	+C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	+C	+C	+C	+C	+C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	+C	+C	+C	+C

○ = จุดที่กระแสจากสายส่งเริ่มไหลเข้าแต่ละเฟส

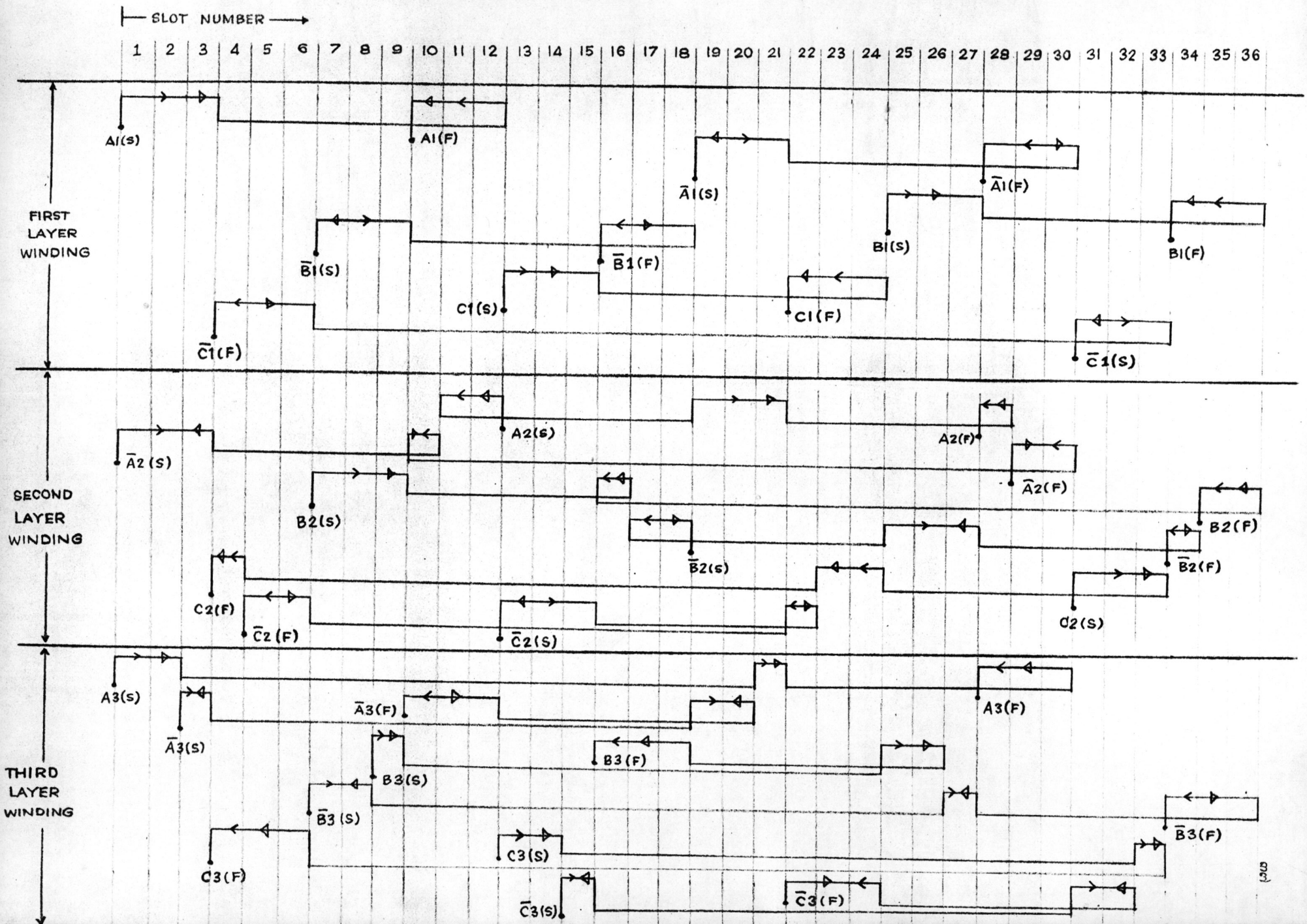
= TO NEUTRAL OF Y



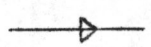




รูปที่ 3.3 WINDING DIAGRAM FOR 4/6 POLES 3 ϕ INDUCTION MACHINE



หมายถึงทิศทางการไหลของกระแสในขดลวดแต่ละชุดเมื่อจัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์เพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๔ โพล


หมายถึงทิศทางการไหลของกระแสในขดลวดแต่ละชุดเมื่อจัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์เพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๖ โพล

ดังนั้นการเปลี่ยนจำนวนโพลของสนามแม่เหล็กจาก ๔ โพล เป็น ๖ โพล ก็สามารถทำได้โดยการกลับทิศทางการไหลของกระแสในขดลวดชุดที่มีเครื่องหมาย " — " (bar) อยู่ข้างบน และเปลี่ยนให้ขดลวดชั้นที่ ๑ เป็นของเฟส A ทั้งหมด ขดลวดชั้นที่ ๒ และ ๓ เป็นของเฟส B และ C ทั้งหมดเท่านั้น การเปลี่ยนแปลงเช่นนี้จะทำให้ phase belt แบบ ๔ โพล ที่แสดงในรูป ๒.๖ กลายเป็น phase belt แบบ ๖ โพล ดังแสดงในรูป ๒.๗ ขณะเดียวกันก็ต้องเปลี่ยนจุดที่กระแสเริ่มเข้าและออกในแต่ละเฟส ให้สอดคล้องกันด้วย ดังจะกล่าวในหัวข้อที่ ๓.๓

จากรูปที่ ๓.๓ จะเห็นว่า ในชั้นที่ ๑ จะมีขดลวดอยู่ทั้งหมด ๖ ชุด คือ

$A1(S) - A1(F)$, $\bar{A}1(S) - \bar{A}1(F)$

$B1(S) - B1(F)$, $\bar{B}1(S) - \bar{B}1(F)$

$C1(S) - C1(F)$, $\bar{C}1(S) - \bar{C}1(F)$

โดยมีปลาย $A1(S)$, $A1(F)$, $\bar{A}1(S)$, $\bar{A}1(F)$, $B1(S)$, $B1(F)$, $\bar{B}1(S)$, $\bar{B}1(F)$, $C1(S)$, $C1(F)$, $\bar{C}1(S)$, $\bar{C}1(F)$ รวมทั้งสิ้น ๑๒ ปลาย ออกมายังสวิทช์ภายนอก

ในชั้นที่ ๒ ก็มีขดลวด ๖ ชุด คือ

$A2(S) - A2(F)$, $\bar{A}2(S) - \bar{A}2(F)$

$B2(S) - B2(F)$, $\bar{B}2(S) - \bar{B}2(F)$

$C2(S) - C2(F)$, $\bar{C}2(S) - \bar{C}2(F)$

โดยมีปลาย A2(S), A2(F), $\bar{A}$2(S), $\bar{A}$2(F), B2(S), B2(F), $\bar{B}$2(S), $\bar{B}$3(F), C2(S), C2(F), $\bar{C}$2(S), $\bar{C}$2(F) รวมทั้งสิ้น ๑๒ ปลายออกมายังสวิทซ์ภายนอก

ในขั้นที่ ๓ ก็มีขดลวด ๖ ชุด คือ

A3(S) - A3(F) , $\bar{A}$3(S) - $\bar{A}$3(F)

B3(S) - B3(F) , $\bar{B}$3(S) - $\bar{B}$3(F)

C3(S) - C3(F) , $\bar{C}$3(S) - $\bar{C}$3(F)

โดยมีปลาย A3(S), A3(F), $\bar{A}$3(S), $\bar{A}$3(F), B3(S), B3(F), $\bar{B}$3(S), $\bar{B}$3(F), C3(S), C3(F), $\bar{C}$3(S), $\bar{C}$3(F) รวมทั้งสิ้น ๑๒ ปลายออกมายังสวิทซ์ภายนอก

เพราะฉะนั้นจะมีปลายของขดลวดทั้ง ๑๘ ชุด ออกมายังสวิทซ์ภายนอก (control switch) รวมทั้งสิ้น ๓๖ ปลาย

๓.๒ การออกแบบขนาด และจำนวนรอบของขดลวดสเตเตอร์

มอเตอร์ต้นแบบที่นำมาดัดแปลงครั้งนี้ เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด ๓ เฟส ๒๒๐/๓๘๐ โวลท์ ขนาด ๒ แรงม้า ๔ โพล มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของสเตเตอร์และขนาดของ laminated sheet ที่ใช้ทำ stator core ดังแสดงไว้ในรูปที่ ๒.๒ สเตเตอร์มี ๓๖ ร่อง (slot) ความยาวของแต่ละร่อง (slot) เท่ากับ ๓ นิ้ว ต้องการดัดแปลงให้เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ ๓ เฟส ๒๒๐/๓๘๐ โวลท์ ขนาด ๐.๕ แรงม้า ที่สามารถเปลี่ยนจำนวนโพลของสนามแม่เหล็กได้เป็น ๔ โพลและ ๖ โพล จากหัวข้อที่ ๓.๑ ได้แสดงให้เห็นแล้วว่า

เมื่อเกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๔ โพล จะมี winding factor = ๐.๙๐๑๙

เมื่อเกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๖ โพล จะมี winding factor = ๐.๖๒๒๐

ดังนั้นถ้าต้องการทำให้คุณสมบัติในการทำงานของมอเตอร์เมื่อเกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๔ โพล และ ๖ โพล ใกล้เคียงกัน ขณะเกิด ๖ โพลจะต้องใช้จำนวนรอบของขดลวดสเตเตอร์มากกว่าขณะที่เกิด ๔ โพล เท่ากับ $\frac{๐.๙๐๑๙}{๐.๖๒๒๐}$ เท่า (๑.๔๕ เท่า) หรือต้องการจำนวนรอบเพิ่มขึ้นอีก ๔๕ % จากกรณีของ ๔ โพล ในการวิจัยครั้งนี้จึง

จำเป็นต้องนำมอเตอร์ขนาดใหญ่กว่า ๐.๕ แรงม้าซึ่งมีร่อง (slot) กว้างขึ้นอีก ๔๕ % มาทำการดัดแปลง เพราะว่ามอเตอร์ขนาด ๒ แรงม้ามีร่อง (slot) กว้างกว่ามอเตอร์ขนาด ๐.๕ แรงม้าประมาณ ๔๕ % ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้จึงได้นำมอเตอร์ขนาด ๒ แรงม้ามาทำเป็นมอเตอร์ต้นแบบในการทดลอง

เนื่องจากไม่ทราบชนิดของเหล็กที่ใช้ทำ stator core ของมอเตอร์ต้นแบบ ในการออกแบบขนาดและจำนวนรอบของขดลวดสเตเตอร์เพื่อให้ได้กำลังงานออกที่เพลา ๐.๕ แรงม้าเท่ากันทั้ง ๒ ความเร็ว จึงใช้วิธีทดลองพันขดลวดสเตเตอร์ด้วยลวดทองแดงที่มีขนาดและจำนวนรอบต่าง ๆ กัน จากภาคผนวก ข. ซึ่งเป็นข้อมูลแสดงขนาดและจำนวนรอบของขดลวดที่ใช้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ ชนิด ๓ เฟส ๒๒๐/๓๘๐ โวลท์ ขนาด ๐.๕ แรงม้าของยี่ห้อต่าง ๆ กัน จะเห็นว่าขนาดของลวดทองแดงที่ใช้กับมอเตอร์ขนาด ๐.๕ แรงม้าส่วนใหญ่จะอยู่ระหว่างเบอร์ ๒๑–๒๕ SWG. เมื่อได้ทดลองพันมอเตอร์ต้นแบบโดยใช้ลวดทองแดงขนาดต่าง ๆ กันดังกล่าว และมีจำนวนรอบต่าง ๆ กันด้วย พบว่าขนาดและจำนวนรอบที่เหมาะสมที่สุดก็คือ ใช้ลวดทองแดงเบอร์ ๒๓ SWG. โดยมีจำนวนรอบ/ร่อง เท่ากับ ๑๔๔ รอบ ถ้าใช้ลวดทองแดงที่มีพื้นที่หน้าตัดใหญ่กว่านี้ก็จะต้องลดจำนวนรอบของขดลวดลง เพราะมีข้อจำกัดเกี่ยวกับพื้นที่หน้าตัดของร่อง (slot) ดังนั้นถ้าใช้ลวดที่ใหญ่ขึ้นถึงจะให้กำลังงานออกที่เพลาได้มากกว่า ๐.๕ แรงม้า แต่ขณะที่เกิด ๖ โพลก็จะทำให้มอเตอร์มีอุณหภูมิสูงมาก เพราะจำนวนรอบน้อยเกินไป และถ้าใช้ลวดทองแดงที่มีพื้นที่หน้าตัดเล็กกว่านี้ ก็จะทำให้มอเตอร์ตัวนี้มีกำลังงานออกที่เพลาน้อยกว่า ๐.๕ แรงม้า และคุณสมบัติในการทำงานที่ ๔ โพลจะเลวลงด้วยเนื่องจากใช้จำนวนรอบมากเกินไป ส่วนในกรณีที่ใช้ลวดทองแดงเบอร์ ๒๓ SWG. จำนวน ๑๔๔ รอบ/ร่อง นี้ จากตารางที่ ๕.๑ จะเห็นว่าขณะเกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๔ โพลนั้นมีค่ากำลังงานออกที่เพลาสูงสุดน้อยกว่าขณะที่เกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๖ โพล แต่อย่างไรก็ตามการใช้ขนาดและจำนวนรอบของขดลวดเช่นนี้ก็จะให้คุณสมบัติในการทำงานที่น่าพอใจ เพราะการที่ใช้จำนวนรอบของขดลวดจำนวน ๑๔๔ รอบ/ร่อง เป็นการเพิ่มจำนวนรอบให้มากกว่าที่ ๔ โพลต้องการถึง ๔๕ % ภายในตัวแล้ว จึงให้คุณสมบัติในการทำงานเมื่อเกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๖ โพลที่ดีมาก ซึ่งอาจถือได้ว่าเป็นจำนวนรอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกรณีของ ๖ โพล แต่สำหรับกรณีของ ๔ โพลแล้วการที่ใช้จำนวนรอบถึง ๑๔๔ รอบ/ร่อง เป็นการใช้จำนวนรอบที่มากไป

จากปกติ ซึ่งจะทำให้ค่ากำลังงานสูงสุดน้อยลงไปกว่าที่ควรจะเป็น แต่อย่างไรก็ตาม ค่าของ current density ที่เกิดขึ้นทั้งในกรณีของ ๔ โพล และ ๖ โพล ก็ยังอยู่ในช่วงมาตรฐานที่นิยมใช้กัน ดังจะกล่าวอีกครั้งในบทที่ ๕

ส่วนเหตุผลที่ว่าทำไมจึงพยายามใช้จำนวนรอบของขดลวดให้เหมาะสมกับกรณีของ ๖ โพล มากกว่า ๔ โพล ก็เพราะว่าปกติเมื่อเกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๖ โพล มอเตอร์จะมีความเร็วลดลงประมาณ ๕๐๐ รอบ/นาที ดังนั้นระบบความร้อนจึงทำงานได้ไม่เต็มที่เหมือนในกรณีที่มีความเร็วสูงกว่า ซึ่งแน่นอนว่าอุณหภูมิขณะทำงานย่อมสูงกว่ากรณีของ ๔ โพล ดังนั้นถ้าใช้จำนวนรอบของขดลวดน้อยกว่าที่กรณีของ ๖ โพลต้องการ ก็จะทำให้เกิดความร้อนสูงขึ้นอีกในขณะเกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๖ โพล

เนื่องจากการพันขดลวดสเตเตอร์ได้แบ่งขดลวดออกเป็น ๓ ชั้น แต่ละชั้นเป็น double layer lap winding เมื่อใช้จำนวนรอบต่อร่องเท่ากับ ๑๔๔ รอบจะทำให้จำนวนรอบในแต่ละคอยล์ (coil) ของแต่ละชั้น (layer) มีค่าเท่ากับ ๑๔๔/๖=๒๔รอบ

๓.๓ การออกแบบสวิทช์ควบคุมความเร็วของมอเตอร์

ดังกล่าวแล้วว่าขดลวดสเตเตอร์ในแต่ละชั้นจะถูกแบ่งออกเป็นชุดต่างๆ ๖ ชุด เมื่อรวมทั้ง ๓ ชั้น จะมีขดลวดชุดต่างๆรวมทั้งหมด ๑๘ ชุด ปลายทั้ง ๒ ด้านของขดลวดทั้ง ๑๘ ชุด (๓๖ ปลาย) ได้ถูกนำมาต่อเข้ากับสวิทช์ภายนอก (control switch) โดยมี diagram การต่อวงจรดังแสดงในรูปที่ ๓.๔ และใช้สัญญลักษณ์ต่างๆดังนี้

|| หมายถึง contact ด้านที่ ๑ ของ double throw switch

⫲ หมายถึง contact ด้านที่ ๒ ของ double throw switch

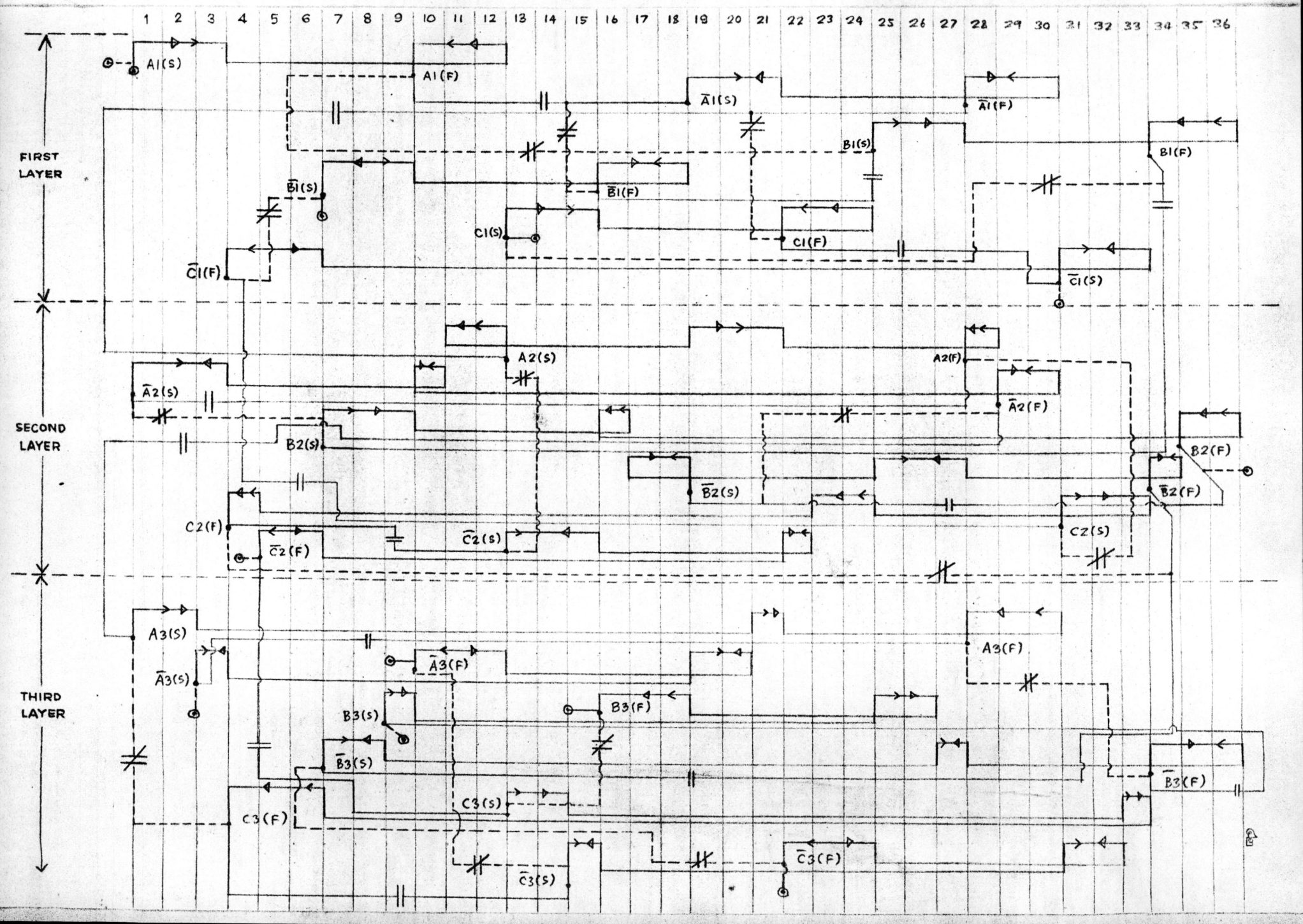
เมื่อ contact ด้านที่ ๑ ทำงาน (close) contact ด้านที่ ๒ จะไม่ทำงาน (open) และเมื่อ contact ด้านที่ ๒ ทำงาน (close) contact ด้านที่ ๑ จะไม่ทำงาน (open)

——— หมายถึง ทิศทางการไหลของกระแสเพื่อทำให้เกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๔ โพล

- - - - → หมายถึง ทิศทางการไหลของกระแสเพื่อทำให้เกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๖ โพล

—⊙ หมายถึง terminal ของแต่ละเฟส เมื่อต้องการให้เกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๔ โพล

รูปที่ ๓.๔ DIAGRAM การต่อวงจรของขดลวดสเตเตอร์ชุดต่าง ๆ เข้ากับสวิทช์ภายนอกเพื่อให้สามารถเปลี่ยนจำนวนโพลได้เป็น ๔ โพลและ ๖ โพล



-----⊙ หมายถึง terminal ของแต่ละเฟสเมื่อต้องการให้เกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๖ โพล

๓.๓.๑ การต่อวงจรเพื่อทำให้เกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๔ โพล (๑๕๐๐ รอบ/นาที)

สนามแม่เหล็กแบบ ๔ โพลจะเกิดขึ้นได้เมื่อต่อปลายของขดลวดชุดต่าง ๆ ทั้ง ๓๖ ปลาย ดังแสดงในรูปที่ ๓.๔ โดยที่ชุดของเฟส A มีการต่อวงจรดังนี้ A1(F) - $\bar{A}$1(S) , $\bar{A}$1(F) - A2(S) , A2(F) - $\bar{A}$2(S) , $\bar{A}$2(F) - A3(S) , A3(F) - $\bar{A}$3(S)

ชุดนี้เป็นของเฟส A ซึ่งจะทำให้เกิด phase belt ของ A ขึ้นมาพร้อม ๆ กัน และมีลักษณะเดียวกันในขดลวดทั้ง ๓ ชั้น ดังแสดงในรูปที่ ๒.๖

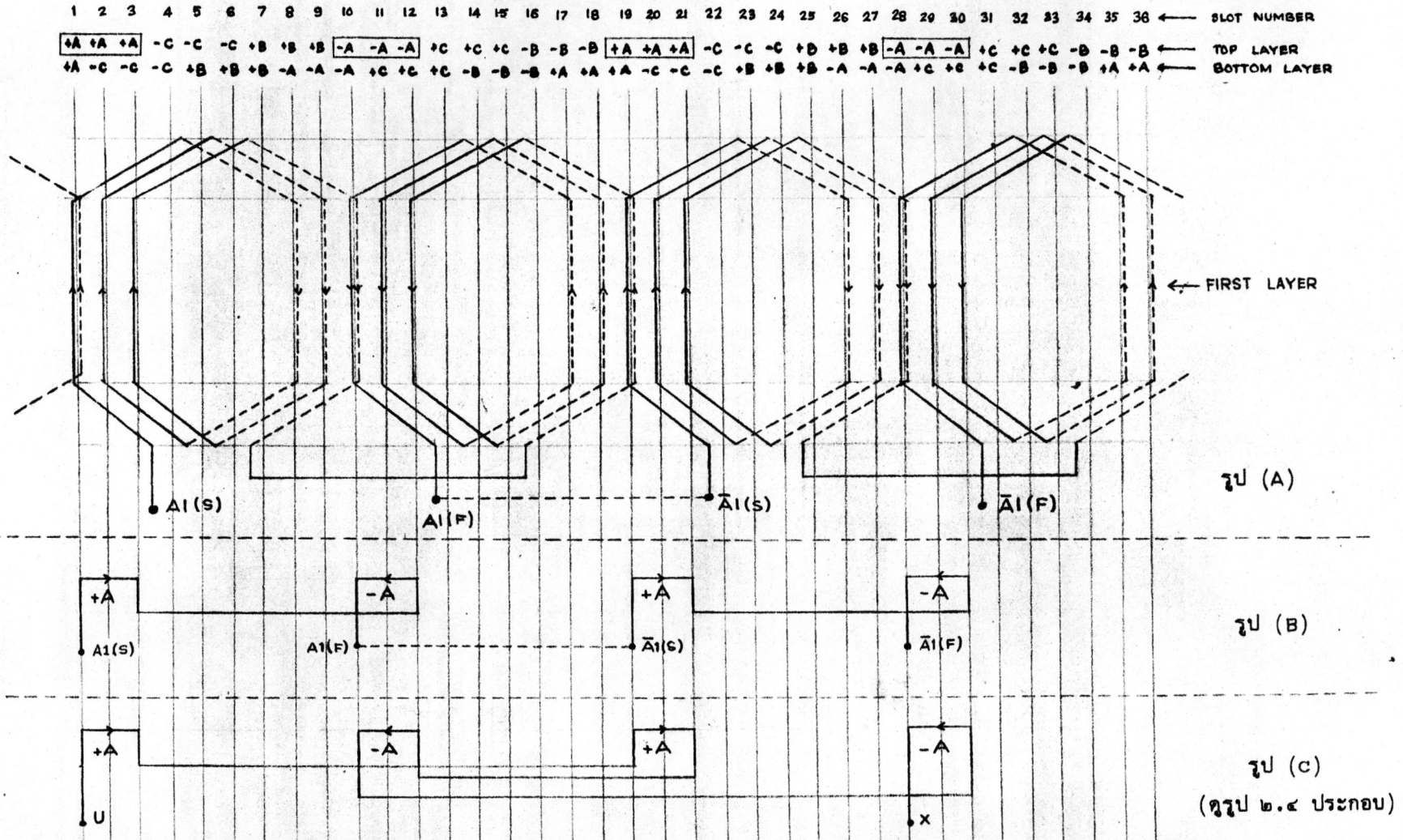
ชุดของเฟส B เกิดจากการต่อปลายของขดลวดชุดต่าง ๆ ดังนี้ $\bar{B}$1(F) - B1(S) B1(F) - B2(S) , B2(F) - $\bar{B}$2(S) , $\bar{B}$2(F) - $\bar{B}$3(S) , $\bar{B}$3(F) - B3(S)

ซึ่งจะทำให้เกิด phase belt ของ B ขึ้นมาพร้อม ๆ กันและมีลักษณะเดียวกันในขดลวดทั้ง ๓ ชั้น ดังแสดงในรูปที่ ๒.๖

ชุดของเฟส C เกิดจากการต่อปลายของขดลวดชุดต่าง ๆ ดังนี้ C1(F) - $\bar{C}$1(S) , $\bar{C}$1(F) - C2(S) , C2(F) - $\bar{C}$2(S) , $\bar{C}$2(F) - C3(S), C3(F) - $\bar{C}$3(S)

ซึ่งจะทำให้ phase belt ของ C เกิดขึ้นมาพร้อม ๆ กันและมีลักษณะเดียวกันในขดลวดทั้ง ๓ ชั้น ดังแสดงในรูปที่ ๒.๖

ปลายที่เหลือคือ $\bar{A}$3(F), B3(F), $\bar{C}$3(F) จะต่อรวมกันเป็นจุด neutral ของการต่อแบบ wye (Y) ส่วนปลาย A1(S), $\bar{B}$1(S), C1(S) จะต่อเข้ากับสายสู่ ๓ เฟส แบบ ๓ สาย เหตุที่ต้องนำปลาย A1(S), $\bar{B}$1(S) และ C1(S) ต่อเข้ากับสายส่ง ๓ เฟสนั้น ดังเหตุผลที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ ๓.๑



รูปที่ ๓.๕ (A) ลักษณะการพันและการต่อวงจรของขดลวดสเตเตอร์ในเฟส A ของชั้นที่ ๑ เพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๔ โพล (สำหรับเฟส A ของชั้น ๒ และชั้นที่ ๓ ก็มีลักษณะเดียวกันกับชั้นที่ ๑)

(B) PHASE BELT และ ONE LINE DIAGRAM ของการต่อวงจรในรูป (A)

(C) PHASE BELT และ ONE LINE DIAGRAM ของเฟส A ใน CONVENTIONAL MOTOR ที่ออกแบบเฉพาะเพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๔ โพล เพียงอย่างเดียว

รูปที่ ๓.๕ (a, b) แสดงลักษณะการต่อวงจรของขดลวดสเตเตอร์ในเฟส A ของชั้นที่ ๑ เพื่อทำให้เกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๔ โพล สำหรับเฟส A ของชั้นที่ ๒ และ ๓ ก็เกิดขึ้นในลักษณะเดียวกัน ณ ตำแหน่งและเวลาเดียวกัน โดยที่เฟส A ของทั้ง ๓ ชั้นได้ต่ออนุกรมกันไว้ทั้งหมด

รูปที่ ๓.๕ (b, c) จะเห็นว่า phase belt ในมอเตอร์ที่ดัดแปลงขึ้นมานี้ จะเหมือนกับ phase belt ซึ่งมี ๔ โพลของ conventional motor ก่อนดัดแปลงทุกประการ ถึงแม้ว่าการต่อวงจรจะต่างกันไปเล็กน้อยก็ตาม

รูปที่ ๓.๑ จะเห็นว่าการจัดทิศทางการไหลของกระแสทั้งสามเฟสในลักษณะเช่นนี้ ไม่ว่าเวคเตอร์ของไฟ ๓ เฟสซึ่งหมุนด้วยความเร็ว ๕๐ รอบ/วินาที จะเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งใดก็ตาม ก็ยังคงทำให้เกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๔ โพลอยู่ตลอดเวลา และจะหมุนไปด้วยความเร็วซิงโครนัสเท่ากับ ๑๕๐๐ รอบ/นาที

๓.๓.๒ การต่อวงจรเพื่อทำให้เกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๖ โพล (๑๐๐๐ รอบ/นาที)

สนามแม่เหล็กแบบ ๖ โพลจะเกิดขึ้นได้เมื่อต่อปลายของขดลวดชุดต่าง ๆ ทั้ง ๓๖ ปลาย ดังแสดงในรูปที่ ๓.๔

เฟส A : กรณี ๖ โพล ขดลวดสเตเตอร์ในชั้นที่ ๑ ทั้งหมดจะถูกใช้เป็นขดลวดของเฟส A โดยมีลักษณะการต่อขดลวดทั้ง ๖ ชุดที่อยู่ในชั้นที่ ๑ เข้าด้วยกันดังนี้

$A1(F) - B1(S)$, $B1(F) - C1(S)$, $C1(F) - \bar{A}1(F)$,

$\bar{A}1(S) - \bar{B}1(F)$, $\bar{B}1(S) - \bar{C}1(F)$

ซึ่งจะทำให้เกิด phase belt ของ A ดังแสดงในรูปที่ ๒.๗ และ ๓.๖

เฟส B : กรณี ๖ โพล ขดลวดสเตเตอร์ในชั้นที่ ๒ ทั้งหมดจะถูกใช้เป็นขดลวดของเฟส B โดยมีลักษณะการต่อขดลวดทั้ง ๖ ชุดที่อยู่ในชั้นที่ ๒ เข้าด้วยกันดังนี้

$\bar{C}2(S) - A2(S)$, $A2(F) - C2(S)$, $C2(F) - \bar{B}2(F)$,

$\bar{B}2(S) - \bar{A}2(F)$, $\bar{A}2(S) - B2(S)$

ซึ่งจะทำให้เกิด phase belt ของ B ดังแสดงในรูปที่ ๒.๗

เฟส C : กรณี ๖ โพล ขดลวดสเตเตอร์ในชั้นที่ ๓ ทั้งหมดจะถูกใช้เป็นขดลวดของเฟส C โดยมีลักษณะการต่อขดลวดทั้ง ๖ ชุดที่อยู่ในชั้นที่ ๓ เข้าด้วยกันดังนี้

$B3(F) - C3(S)$, $C3(F) - A3(S)$, $A3(F) - \bar{B}3(F)$,

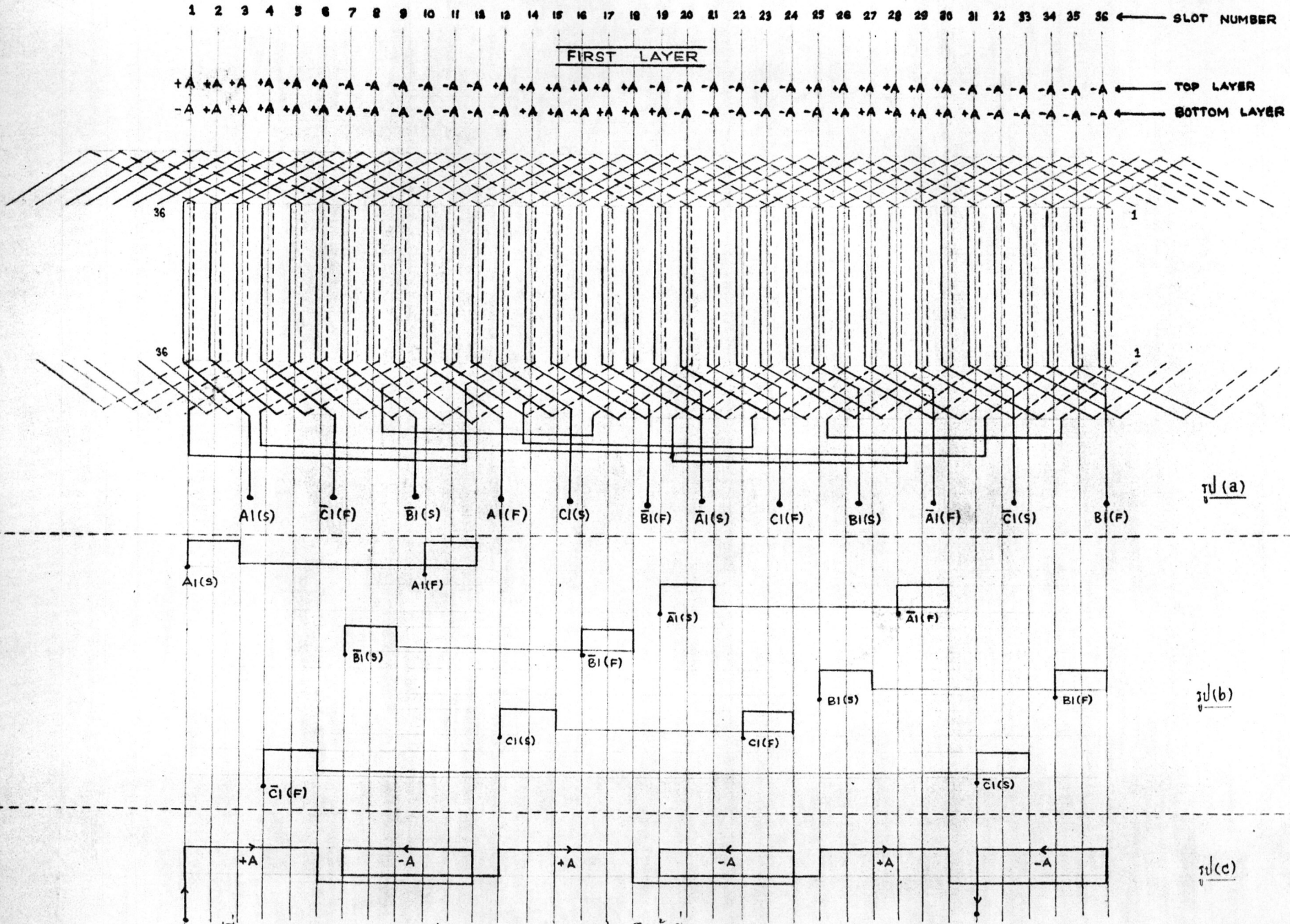
$\bar{B}3(S) - \bar{C}3(F)$, $\bar{C}3(S) - \bar{A}3(F)$

ซึ่งจะทำให้เกิด phase belt ของ C ดังแสดงในรูปที่ ๒.๗

ปลายที่เหลือคือ $\bar{C}1(S)$, $B2(F)$, $\bar{A}3(S)$ จะต่อรวมกันเป็นจุด neutral ของการต่อแบบ wye (Y) ส่วนปลาย $A1(S)$, $\bar{C}2(F)$, $B3(S)$ จะต่อเข้ากับสายส่ง ๓ เฟส แบบ ๓ สาย เหตุที่ต้องให้กระแสจากเฟสต่าง ๆ ทั้ง ๓ เฟสเริ่มเข้าที่จุดเหล่านี้ ก็ด้วยเหตุผลเดียวกับกรณีที่ต้องการให้เกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๔ โพล นั่นคือต้องจัดให้จุดเริ่มต้นของแต่ละเฟสห่างกันเท่ากับ ๑๒๐ องศาทางไฟฟ้า แต่ในกรณี ๖ โพล แต่ละร่อง (slot) จะห่างกันเท่ากับ ๓๐ องศาทางไฟฟ้า ดังนั้นจึงต้องทำให้กระแสที่เริ่มเข้าแต่ละเฟสเข้าที่จุดห่างกัน ๔ ร่อง ซึ่งในกรณีนี้ เฟส A ก็จะเริ่มเข้าที่ $A1(S)$ เฟส B และเฟส C ก็จะเริ่มเข้าที่ $\bar{C}2(F)$ และ $B3(S)$ ตามลำดับ ส่วนปลายที่ออกจากแต่ละเฟสคือ $\bar{C}1(S)$, $B2(F)$ และ $\bar{A}3(S)$ ก็ห่างกัน ๑๒๐ องศาทางไฟฟ้าด้วย

รูปที่ ๓.๖ (a) แสดงขดลวดชุดต่าง ๆ ๖ ชุด ที่มีอยู่ในชั้นที่ ๑

รูปที่ ๓.๖ (b) แสดงลักษณะการต่อวงจรของขดลวดสเตเตอร์ทั้ง ๖ ชุดในชั้นที่ ๑ เพื่อจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๖ โพล



รูปที่ ๓.๖ (a) ลักษณะการพันและการต่อวงจรของขดลวดสเตเตอร์ชุดต่างๆ ในชั้นที่ ๑
(b) one line diagram ในการต่อขดลวดสเตเตอร์ชุดต่างๆ ในชั้นที่ ๑ เข้าด้วยกัน สำหรับเฟส A เพื่อทำให้เกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๖ โพล
(c) phase belt ที่เกิดจากการต่อวงจรในรูป (b)

รูปที่ ๓.๖ (c) แสดง phase belt ของ A ซึ่งเกิดจากการจัดทิศทางการไหลของกระแสในเฟส A โดยการต่อวงจรตามรูป ๓.๖ (b)

รูปที่ ๓.๒ จะเห็นว่าการจัดทิศทางการไหลของกระแสทั้ง ๓ เฟส ในลักษณะเช่นนี้ ไม่ว่าเวคเตอร์ของไฟ ๓ เฟส ซึ่งหมุนด้วยความเร็ว ๕๐ รอบ/วินาที จะเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งใดก็ตาม ก็ยังคงทำให้เกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๖ โพลอยู่ตลอดเวลา และจะหมุนไปด้วยความเร็วซิงโครนัสเท่ากับ ๑๐๐๐ รอบ/นาที

สรุปแล้วจะเห็นได้ว่า เราสามารถเปลี่ยนความเร็วซิงโครนัสของมอเตอร์ได้ โดยการเปลี่ยนจำนวนโพลของสนามแม่เหล็ก การเปลี่ยนจำนวนโพลของสนามแม่เหล็กสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงการต่อวงจรของขดลวดทั้ง ๑๘ ชุด โดยอาศัยสวิทช์โยก ๒ ทางซึ่งมี ๓๖ ขา เมื่อต้องการเปลี่ยนความเร็วของมอเตอร์ก็สามารถทำได้โดยเพียงแต่โยกสวิทช์ไปทางใดทางหนึ่งเท่านั้น