

บทที่ 3

วิธีการที่นำเสนอ

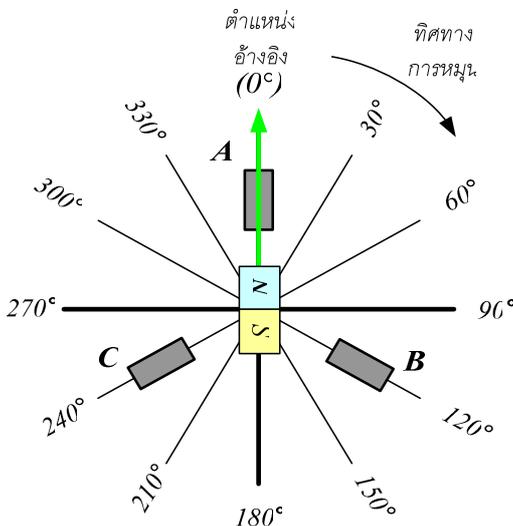
ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการประมาณตำแหน่งของโรเตอร์ การกำหนดรูปแบบการสวิตช์ในการเริ่มต้นทำงาน และวิธีการบังคับเริ่มหมุนมอเตอร์ วิธีการประมาณตำแหน่งของโรเตอร์ที่นำเสนอจะอาศัยผลจากการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์ที่ได้รับอิทธิพลมาจากแม่เหล็กถาวรที่โรเตอร์ ในทางอุดมคติการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำของมอเตอร์ชนิดที่มีผลต่างของค่าฟลักซ์ (flux linkage) ที่เกิดจากผลต่างระหว่างขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ (salient pole) จะมีระดับค่าความเหนี่ยวนำในแต่ละเฟสที่แตกต่างกันตามตำแหน่งของโรเตอร์ ดังนั้นจึงสามารถใช้ระดับค่าความเหนี่ยวนำดังกล่าวในการระบุตำแหน่งของโรเตอร์ได้ แต่เนื่องจากระดับค่าความเหนี่ยวนำระหว่างช่วง 1 ถึง 180 องศา และช่วง 181 ถึง 360 องศา มีระดับที่เหมือนกันจึงไม่สามารถแยกแยะขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ระหว่างสองช่วงนี้ได้ ดังนั้นจึงต้องมีวิธีการที่จะกำหนดขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ วิธีการที่นำเสนอจะอาศัยผลจากการอิมิตัวในแกนเหล็กสเตเตอร์ที่ได้รับอิทธิพลมาจากแม่เหล็กถาวรที่โรเตอร์และผลจากการจ่ายแรงดันพัลส์เข้าที่ขดลวดสเตเตอร์ เมื่อขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์อยู่ในตำแหน่งใดๆ การอิมิตัวในแกนเหล็กสเตเตอร์จะมากน้อยต่างกันตามตำแหน่งของโรเตอร์ จากความแตกต่างกันนี้สามารถนำไปใช้ในการกำหนดขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ได้ เมื่อรู้ตำแหน่งของโรเตอร์ได้แล้ว จากนั้นจะทำการกำหนดรูปแบบการสวิตช์เพื่อเริ่มต้นทำงาน โดยรูปแบบการสวิตช์จะพิจารณาจากตำแหน่งของโรเตอร์ที่ประมาณได้เป็นจุดอ้างอิง หลังจากนั้นจะทำการบังคับให้มอเตอร์เริ่มหมุนจากจุดอ้างอิงจนกระทั่งมีความเร็วรอบที่สามารถตรวจจับจุดตัดศูนย์ของแรงดัน BEMF ได้ และจะใช้จุดตัดศูนย์นี้เป็นจุดอ้างอิงในการทำงานตามวิธีการแบบไร้ตัวตรวจจับตำแหน่ง

3.1 วิธีการประมาณค่าตำแหน่งของโรเตอร์

3.1.1 หลักการพื้นฐานของการประมาณตำแหน่งของโรเตอร์

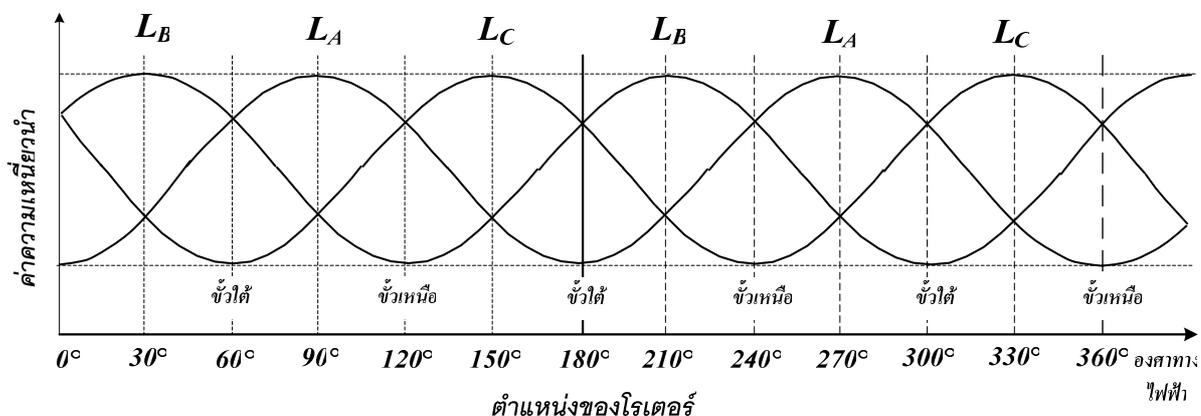
ในการประมาณตำแหน่งขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์นี้ จำเป็นต้องกำหนดตำแหน่งเพื่อใช้เป็นจุดอ้างอิงในการเริ่มต้นนับองศาทางไฟฟ้าตั้งแต่ 1 ไปจนถึง 360 องศา โดยกำหนดให้ขั้วเหนือ

ของโรเตอร์อยู่ตรงกับตำแหน่งของเฟส A เป็นตำแหน่ง 0 องศาทางไฟฟ้า และมีทิศทางการหมุนตามเข็มนาฬิกา ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ตำแหน่งอ้างอิงในการประมาณค่าตำแหน่งของโรเตอร์

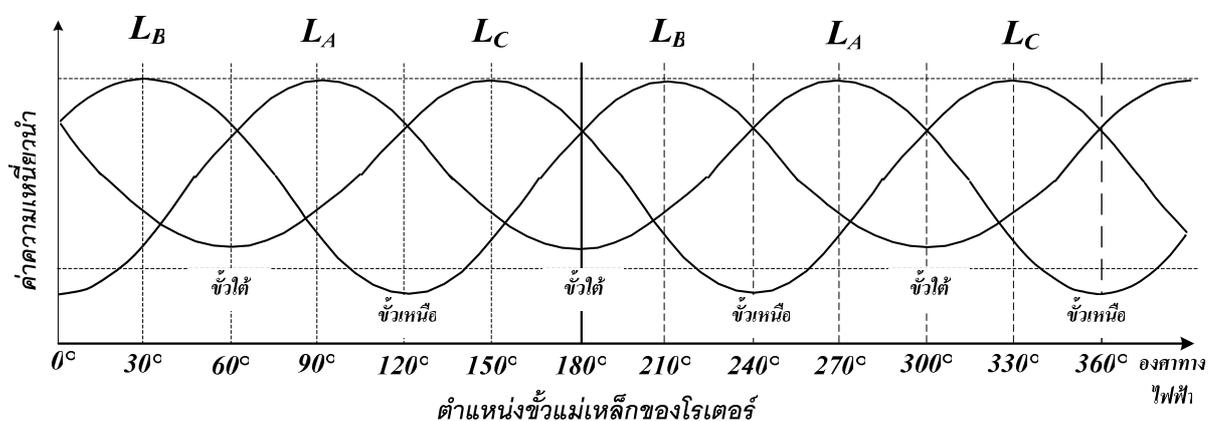
ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของโรเตอร์และค่าความเหนี่ยวนำในแต่ละเฟสของขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ BLDC ในทางอุดมคติดังใน [3] และเมื่อทำการแสดงค่าความเหนี่ยวนำทั้งสามเฟสจะได้ดังในรูปที่ 3.2 จากรูปจะเห็นว่าค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์ทั้งสามเฟสมีการเปลี่ยนแปลงระดับตามตำแหน่งของโรเตอร์ จากความสัมพันธ์ดังกล่าวเมื่อทำการเปรียบเทียบระดับค่าความเหนี่ยวนำในแต่ละเฟสแล้วสามารถแบ่งแยกช่วงมุมได้ช่วงละ 30 องศาทางไฟฟ้า ดังนั้นใน 360 องศาทางไฟฟ้าจะสามารถแบ่งช่วงมุมได้ทั้งหมด 12 ช่วง โดยที่ความละเอียดสูงสุดของการประมาณตำแหน่งของโรเตอร์จะได้เท่ากับ 30 องศา



รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนี่ยวนำกับตำแหน่งของโรเตอร์ในทางอุดมคติ

ในสภาวะการใช้งานปกติของมอเตอร์ขณะหยุดนิ่งเมื่อไม่มีการจ่ายสัญญาณใดๆจากภายนอกเข้าสู่มอเตอร์ก็จะไม่สามารถตรวจวัดค่าความเหนี่ยวนำดังกล่าวได้ เมื่อต้องการรู้ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดในแต่ละเฟสของมอเตอร์จึงต้องทำการกระตุ้นด้วยการจ่ายสัญญาณแรงดันพัลส์เข้าสู่ขดลวดของมอเตอร์เพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่จะออกมาในรูปกระแสและแรงดันที่เฟสของมอเตอร์ซึ่งจะง่ายแก่การตรวจวัด เมื่อค่าความเหนี่ยวนำสัมพันธ์กับค่ากระแสและแรงดันเฟสของมอเตอร์ ดังนั้นจึงสามารถใช้ค่ากระแสและแรงดันที่ได้มาทำการวิเคราะห์ในรูปของค่าความเหนี่ยวนำเพื่อการประมาณตำแหน่งของโรเตอร์

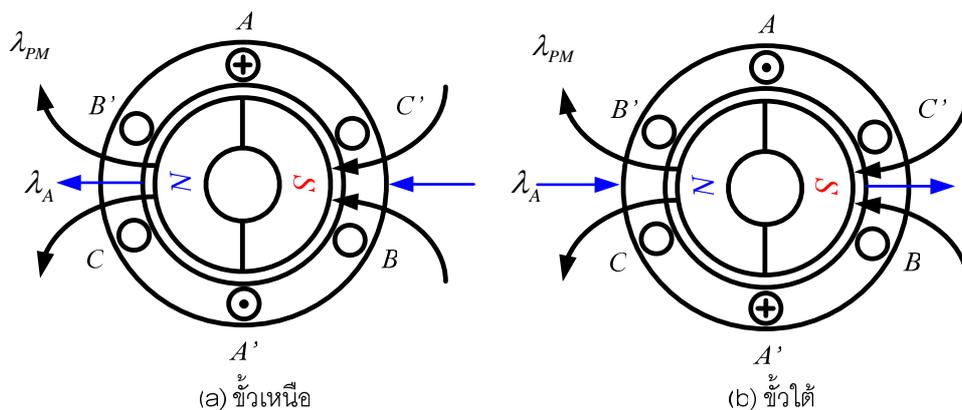
การเปรียบเทียบความแตกต่างของระดับค่าความเหนี่ยวนำทั้งสามเฟสสามารถใช้การเปรียบเทียบระดับแรงดันเฟสของมอเตอร์ในการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ได้ แต่ไม่สามารถใช้ค่าระดับแรงดันในการแยกแยะขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ระหว่างช่วงมุมจาก 1 ถึง 180 องศา และ 181 ถึง 360 องศาได้ เช่น ช่วงมุม 1 ถึง 30 องศา ระดับแรงดันจะเหมือนกันกับช่วงมุม 181 ถึง 210 องศา เป็นต้น วิธีการกำหนดขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ที่นำเสนอนี้จะอาศัยผลจากการอิมิตัวในแกนเหล็กสเตเตอร์ที่ได้รับอิทธิพลมาจากแม่เหล็กถาวรที่โรเตอร์และผลจากการจ่ายแรงดันพัลส์เข้าสู่ขดลวดของมอเตอร์ ผลจากการอิมิตัวดังกล่าวสามารถแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนี่ยวนำกับตำแหน่งของโรเตอร์เมื่อมีการกระตุ้นด้วยแรงดันพัลส์เข้าสู่มอเตอร์

ในรูปที่ 3.3 แสดงให้เห็นผลการเปลี่ยนแปลงระดับค่าความเหนี่ยวนำเมื่อทำการจ่ายแรงดันพัลส์เข้าสู่ขดลวดสเตเตอร์เหมือนดังใน [3] แต่แสดงให้เห็นผลของค่าความเหนี่ยวนำที่เปลี่ยนแปลงทั้งสามเฟส จากรูปจะเห็นว่าค่าความเหนี่ยวนำจะลดลงเมื่อเกิดจากการอิมิตัวที่มากขึ้น ซึ่งการอิมิตัว

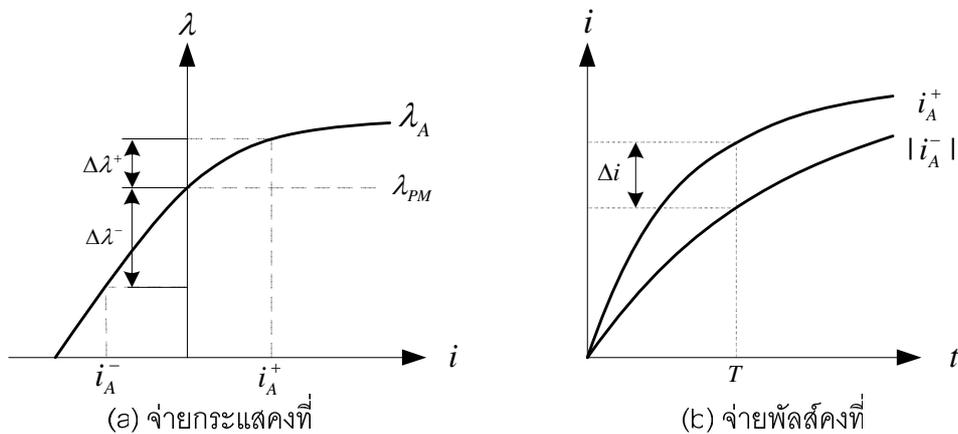
จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับตำแหน่งขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ เมื่อการอิ่มตัวมากขึ้นจะทำให้ระดับค่าความเหนี่ยวนำและระดับค่ากระแสมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าระดับแรงดัน ดังนั้นจึงสามารถใช้ในการเปรียบเทียบระดับค่ากระแสในการกำหนดตำแหน่งขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ได้ [3-5] ทฤษฎีพื้นฐานของวิธีการเปรียบเทียบค่ากระแสนี้จะอาศัยผลการอิ่มตัวที่ในแกนเหล็กสเตเตอร์ที่ได้รับอิทธิพลมาจากแม่เหล็กถาวรที่โรเตอร์และผลจากการจ่ายแรงดันพัลส์เข้าสู่ขดลวดสเตเตอร์ โดยจะพิจารณาในรูปผลรวมของฟลักซ์ที่เกิดขึ้นจากขั้วแม่เหล็กที่โรเตอร์และฟลักซ์ที่ถูกสร้างขึ้นจากขดลวดสเตเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 จากรูปจะเป็นไดอะแกรมของมอเตอร์ BLDC แบบ 2 ขั้วแม่เหล็กที่สร้างขึ้นเพื่อจำลองพฤติกรรมของฟลักซ์ที่เกิดขึ้นจากขดลวดสเตเตอร์และขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์หลังจากทำการจ่ายสัญญาณแรงดันพัลส์เข้าที่ขดลวดเฟส A โดยกำหนดการจ่ายแรงดันพัลส์ให้กระแสมีทิศทางเดียวกันและทิศทางตรงข้ามกับทิศทางฟลักซ์ที่เกิดจากขั้วแม่เหล็กที่โรเตอร์ ลูกศรใหญ่แสดงถึงทิศทางของฟลักซ์ที่เกิดจากขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ (λ_{PM}) ลูกศรเล็กแสดงทิศทางของฟลักซ์ที่เกิดจากขดลวดสเตเตอร์เฟส A ของมอเตอร์ (λ_A)



รูปที่ 3.4 ทิศทางฟลักซ์ที่เกิดจากขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ขณะอยู่ในตำแหน่งปรับแนวกับขดลวดสเตเตอร์เฟส A

จากรูปที่ 3.4 (a) จะเห็นได้ว่าทิศทางของฟลักซ์ที่เกิดจากขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์มีทิศทางเดียวกันกับฟลักซ์ที่เกิดขึ้นจากขดลวดสเตเตอร์เฟส A ดังนั้นฟลักซ์ทั้งสองจึงเสริมกัน เมื่อฟลักซ์เสริมกันเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้เกิดการอิ่มตัวในแกนเหล็กสเตเตอร์มากขึ้น เมื่อเกิดการอิ่มตัวมากขึ้นจึงทำให้ค่าความเหนี่ยวนำในขดลวดสเตเตอร์ลดน้อยลงแต่กระแสจะไหลได้มากขึ้น รูปที่ 3.4 (b) แสดงให้เห็นทิศทางของฟลักซ์ที่มีทิศทางตรงกันข้ามกับฟลักซ์ที่เกิดขึ้นจากขดลวดเฟส A ซึ่งฟลักซ์เกิดการหักล้างกันลดน้อยลง เมื่อฟลักซ์ลดน้อยลงจึงทำให้เกิดการอิ่มตัวในแกนเหล็กสเตเตอร์ลดน้อยลง เมื่อการอิ่มตัวลดน้อยลงค่าความเหนี่ยวนำในขดลวดสเตเตอร์ก็จะเพิ่มมากขึ้นแต่กระแสจะไหลได้

น้อยลง จากการเสริมกันหักล้างกันของฟลักซ์ที่เกิดจากขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์และฟลักซ์ที่เกิดจากขดลวดสเตเตอร์ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำและกระแสเปลี่ยนแปลง [4] เมื่อแสดงในรูปของกราฟได้ดังรูปที่ 3.5



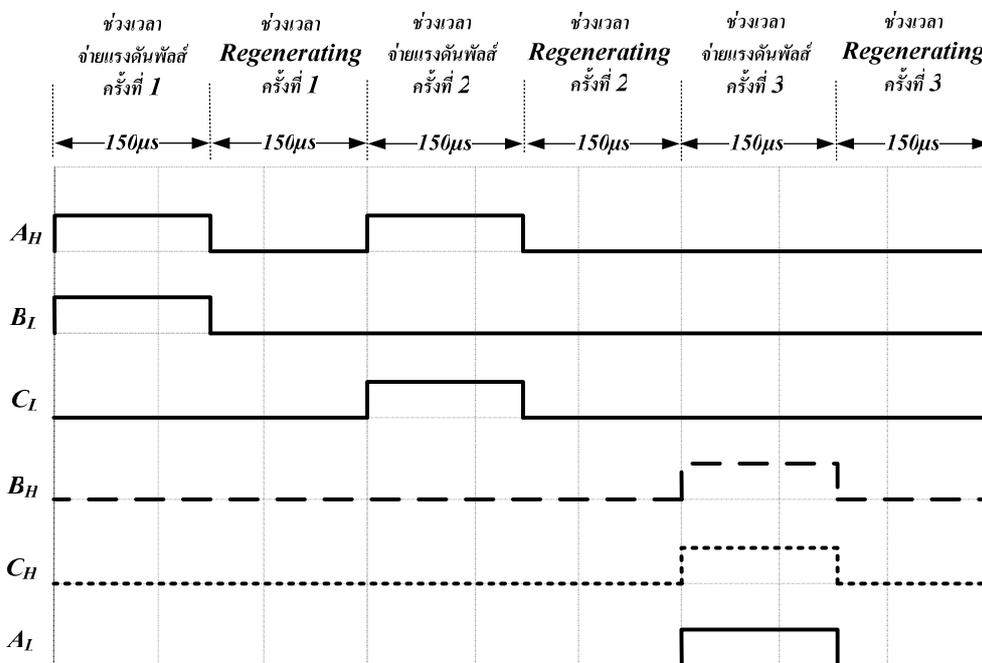
รูปที่ 3.5 ผลของกระแสและฟลักซ์ในขณะที่เกิดการอิมตัวขึ้นในแกนเหล็กสเตเตอร์

จากรูปที่ 3.5 i_A^+ และ i_A^- คือกระแสจากการจ่ายแรงดันพัลส์ที่ทำให้เกิดฟลักซ์ในทิศทางเดียวกันและตรงกันข้ามกันกับทิศทางฟลักซ์ของโรเตอร์ซึ่งกำหนดให้กระแสทั้งสองมีขนาดคงที่ค่าหนึ่ง λ_{PM} คือฟลักซ์ของโรเตอร์ $\Delta\lambda^+$ คือผลต่างระหว่างฟลักซ์ของโรเตอร์กับฟลักซ์ของเฟส A ที่เกิดจากกระแส i_A^+ $\Delta\lambda^-$ คือผลต่างระหว่างฟลักซ์ของโรเตอร์กับฟลักซ์ของเฟส A ที่เกิดจากกระแส i_A^- จากรูปที่ 3.5 (a) เมื่อกำหนดให้กระแส i_A^+ และ i_A^- มีขนาดเท่ากัน ค่าฟลักซ์ที่เกิดจากกระแส i_A^+ จะทำให้ค่าฟลักซ์รวมเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้แกนเหล็กสเตเตอร์เกิดการอิมตัวมากขึ้น ในขณะที่เกิดการอิมตัวมากขึ้นนั้นแกนเหล็กสเตเตอร์จะไม่สามารถซึมซับค่าฟลักซ์เพิ่มขึ้นได้อีก เมื่อพิจารณาจากค่าฟลักซ์ที่เกิดจากกระแส i_A^- จะทำให้ฟลักซ์รวมลดน้อยลงจึงทำให้แกนเหล็กสเตเตอร์เกิดการอิมตัวน้อยลง และถ้าพิจารณาในรูปของค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดจากกระแส i_A^+ จะมีค่าน้อยกว่าค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดจากกระแส i_A^- จากรูปที่ 3.5 (b) เมื่อกำหนดให้ T คือช่วงเวลาการจ่ายแรงดันพัลส์ที่มีความกว้างพัลส์คงที่ค่าหนึ่ง จะเห็นได้ว่าช่วงที่เกิดการอิมตัวระดับกระแส i_A^+ มีค่ามากกว่าระดับกระแส i_A^- ดังนั้นจึงสามารถใช้ค่าระดับกระแสในการกำหนดขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ได้ ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับว่าขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์อยู่ในตำแหน่งใดซึ่งระดับกระแสจะแตกต่างกันตามตำแหน่งขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ และต้องกำหนดความกว้างพัลส์ให้เหมาะสมเพื่อให้ได้ความแตกต่างของระดับกระแสชัดเจนมากที่สุดในขณะที่ขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์อยู่ที่จุดวิกฤตที่สุด

3.1.2 ขั้นตอนการเปรียบเทียบค่าความเหนียวนำ

ในขั้นตอนการเปรียบเทียบค่าความเหนียวนำนี้จะทำการจ่ายแรงดันพัลส์เข้าสู่มอเตอร์จำนวนสามครั้งด้วยกัน การจ่ายแรงดันพัลส์ในสองครั้งแรกเพื่อเปรียบเทียบค่าความเหนียวนำในแต่ละเฟส ในขณะเดียวกันก็ได้บันทึกค่ากระแสยอดของการจ่ายแรงดันพัลส์ไว้ด้วยซึ่งค่ากระแสยอดเหล่านี้จะนำไปใช้ในการหาตำแหน่งขั้วเหนือขั้วใต้ของสนามแม่เหล็กจากโรเตอร์โดยใช้วิธีการเปรียบเทียบกับกระแสยอดที่ได้จากการจ่ายแรงดันพัลส์ครั้งที่สาม

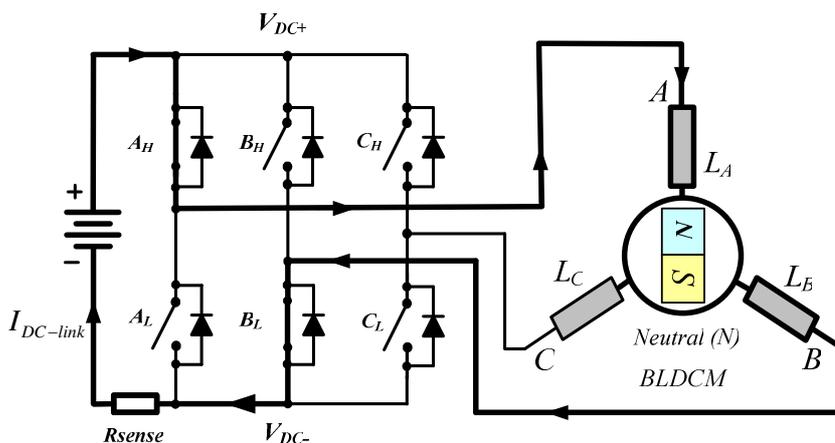
ลำดับขั้นของแรงดันพัลส์ที่จ่ายให้แก่ขดลวดโดยกำหนดให้มีทั้งช่วงเวลาที่พัลส์ “ON” และ “OFF” ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ครั้งแรกจะทำการจ่ายแรงดันพัลส์ให้กับขดลวดเฟส A และเฟส B ครั้งที่สองจะจ่ายให้กับขดลวดเฟส A และเฟส C ครั้งที่สามจะจ่ายให้กับขดลวดเฟส A และเฟส B หรือ A และเฟส C จะขึ้นอยู่กับระดับกระแสยอดที่ได้จากสองครั้งแรกเป็นตัวกำหนด ลักษณะของแรงดันพัลส์ เหตุผลในการเลือกตำแหน่งสวิตช์ดังกล่าวเนื่องจากต้องการใช้ข้อมูลที่ได้จากเฟส A เป็นข้อมูลอ้างอิงในการเปรียบเทียบซึ่งกันและกันกับอีกสองเฟสที่เหลือ โดยที่ตำแหน่งสวิตช์ทั้งสามครั้งจะเป็นไปตามรูปแบบการสวิตช์ 6 ขึ้น 120 องศา



รูปที่ 3.6 ลักษณะของแรงดันพัลส์

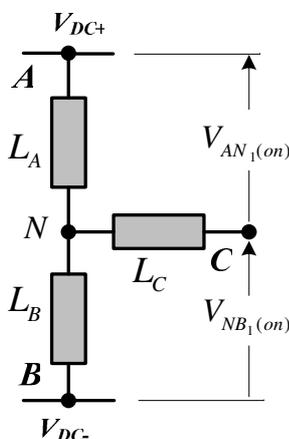
การจ่ายแรงดันพัลส์ครั้งที่หนึ่ง

ครั้งแรกจะทำการจ่ายสัญญาณพัลส์เข้าไปที่ขด A บน และขด B ล่าง (สวิตช์ A_H และ B_L “ON”) โดยการเชื่อมต่อเฟส A เข้าที่แรงดันบัสไฟตรงบวก V_{DC+} และเฟส B เข้าที่แรงดันบัสไฟตรงลบ V_{DC-} ในขณะที่เฟส C ถูกปล่อยลอย โดยไม่มีกระแสไหลผ่าน ดังแสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ทิศทางการไหลของกระแสในช้่วงเวลาจ่ายแรงดันพัลส์ครั้งที่หนึ่ง

ซึ่งเมื่อทำการเขียนออกมาในรูปของวงจรมุมูล จะได้ดังรูปที่ 3.8 จากรูปจะเห็นได้ว่า สามารถตรวจวัดแรงดันที่จุดนิวทรัล (neutral point) หรือเรียกโดยย่อว่า จุด N หรือแรงดันที่ตกคร่อมที่เฟส B ผ่านขั้วของเฟส C ได้ เมื่อไม่มีกระแสไหลผ่านที่ขดลวดของเฟส C แรงดันที่จุด N ย่อมเท่ากับแรงดันที่ขั้วของเฟส C ซึ่งก็คือแรงดันตกคร่อมที่เฟส B หรือ $V_{NB_1(on)}$ เมื่อเทียบกับแรงดันบัสไฟตรงลบ V_{DC-} ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 วงจรมุมูลของช้่วงเวลาจ่ายแรงดันพัลส์ครั้งที่หนึ่ง

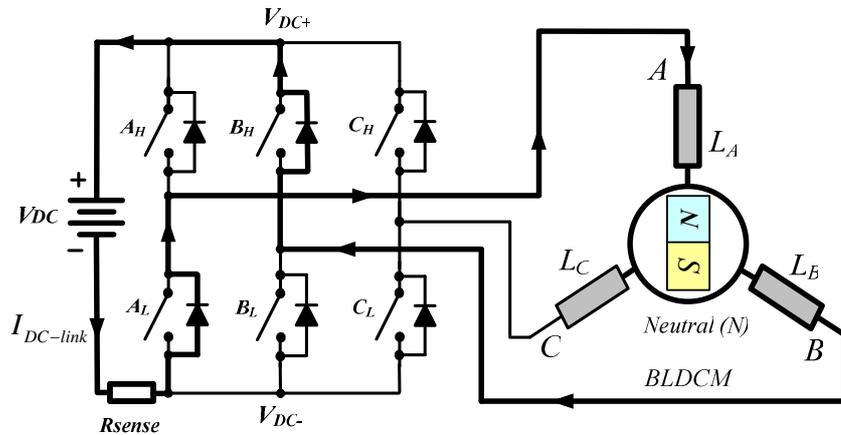
จากวงจรสมมูลดังกล่าว สามารถแสดงให้เห็นค่าแรงดันที่ได้จากการจ่ายแรงดันพัลส์ ออกมาในรูปแบบของสมการได้ ดังสมการที่ (3.1)

$$\begin{aligned} V_{DC} &\approx [L_A(\theta_0) + L_B(\theta_0)] \frac{di_{1(on)}}{dt} \\ &\approx L_A(\theta_0) \frac{\Delta i_{1(on)}}{T_{s_1(on)}} + L_B(\theta_0) \frac{\Delta i_{1(on)}}{T_{s_1(on)}} = V_{AN_1(on)} + V_{NB_1(on)} \end{aligned} \quad (3.1)$$

เมื่อค่าแรงดัน V_{DC} คือแรงดันบัสไฟตรงบวก $\Delta i_{1(on)}$ คือค่ากระแสที่เปลี่ยนแปลงในช่วงที่จ่ายแรงดันพัลส์ $T_{s_1(on)}$ คือช่วงเวลาของการจ่ายแรงดันพัลส์ θ_0 คือมุมของตำแหน่งเริ่มต้น L_A และ L_B คือค่าความเหนี่ยวนำที่ขดลวดที่สเตเตอร์ของเฟส A และเฟส B $V_{AN_1(on)}$ คือแรงดันตกคร่อมขดลวดสเตเตอร์ของเฟส A เทียบกับ แรงดันที่จุด N และ $V_{NB_1(on)}$ คือแรงดันตกคร่อมขดลวดสเตเตอร์ของเฟส B เทียบกับ V_{DC-} ตามลำดับ จากสมการที่ (3.1) แรงดันที่ตกคร่อมที่เฟส $V_{AN_1(on)}$ และ $V_{NB_1(on)}$ สามารถที่จะเขียนใหม่ได้ในรูปของ V_{DC} ได้ดังนี้

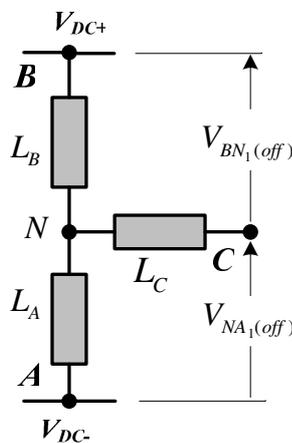
$$\left. \begin{aligned} V_{AN_1(on)} &= \frac{L_A}{L_A + L_B} V_{DC} \\ V_{NB_1(on)} &= \frac{L_B}{L_A + L_B} V_{DC} \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

หลังจากหยุดจ่ายสัญญาณแรงดันพัลส์ (สวิตช์ A_H และ B_L "OFF") ก็จะเป็นช่วงเวลาการคลายสภาพความเป็นแม่เหล็กในขดลวดสเตเตอร์ หรือเรียกว่าช่วงเวลา regenerating ดังแสดงดังรูปที่ 3.9 จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อสวิตช์หยุดการทำงาน กระแสยังคงไหลอย่างต่อเนื่องผ่านไดโอด regenerating กลับไปที่แรงดันบัสไฟตรงบวก แรงดันบัสไฟลบ เข้าสู่ขดลวดเดิม



รูปที่ 3.9 ทิศทางการไหลของกระแสในช่วงเวลา regenerating ครั้งที่หนึ่ง

และสามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 3.10 จากรูปจะเห็นได้ว่า ในช่วงเวลาหยุดการจ่ายพัลส์ สามารถวัดแรงดันที่จุดนิวตรอน หรือแรงดันที่ตกคร่อมที่เฟส A ผ่านขั้วของเฟส C ได้ ซึ่งเมื่อไม่มีกระแสไหลผ่านที่ขดลวดของเฟส C แรงดันที่จุด N ย่อมเท่ากับแรงดันที่ขั้วของเฟส C เมื่อเทียบกับแรงดันบัสไฟตรงลบ V_{DC-} ซึ่งก็คือแรงดันตกคร่อมที่เฟส A หรือ $V_{NA_1(off)}$ ดังรูป



รูปที่ 3.10 วงจรสมมูลของช่วงเวลา regenerating ครั้งที่หนึ่ง

จากวงจรสมมูลดังกล่าว สามารถแสดงให้เห็นค่าแรงดันที่ได้จากช่วงเวลาหยุดการจ่ายแรงดันพัลส์ ออกมาในรูปแบบของสมการได้ ดังสมการที่ (3.3)

$$V_{DC} \approx -L_A(\theta_0) \frac{\Delta i_{1(off)}}{T_{S_1(off)}} - L_B(\theta_0) \frac{\Delta i_{1(off)}}{T_{S_1(off)}} = V_{NA_1(off)} + V_{BN_1(off)} \quad (3.3)$$

เมื่อ $\Delta i_{1(off)}$ คือค่ากระแสที่เปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาหยุดการจ่ายแรงดันพัลส์ $T_{S_1(off)}$ คือเวลาในช่วงเวลาหยุดการจ่ายแรงดันพัลส์ $V_{AN_1(off)}$ และ $V_{BN_1(off)}$ คือแรงดันตกคร่อมขดลวดสเตเตอร์ของเฟส A เทียบกับแรงดันที่จุด N และ แรงดันที่จุด N เทียบกับแรงดันเฟส B ตามลำดับ

จากการที่แรงดันทั้งหมดที่ตกคร่อมทั้งขดลวดเฟส A และเฟส B ในช่วงเวลาการจ่ายแรงดันพัลส์จะมีค่าตรงข้ามกันกับช่วงเวลาหยุดการจ่ายแรงดันพัลส์นั้นเนื่องจากคาบเวลาในการจ่ายแรงดันพัลส์มีค่าน้อยมากจึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะทันทีทันใดซึ่งจะไม่ส่งผลให้แรงดันที่ตกคร่อมเปลี่ยนแปลง และนั่นก็หมายความว่าแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดของทั้งเฟส A และเฟส B ทั้งช่วงเวลาการจ่ายแรงดันพัลส์และหยุดจ่ายแรงดันพัลส์มีค่าเท่ากันแต่มีศักย์ทางไฟฟ้าตรงข้ามกัน ดังนั้นเมื่อนำสมการที่ (3.1) และ (3.3) มาเปรียบเทียบกัน จะได้ว่า

$$\left. \begin{aligned} &L_A(\theta_0) \frac{\Delta i_{1(on)}}{T_{S_1(on)}} = -L_A(\theta_0) \frac{\Delta i_{1(off)}}{T_{S_1(off)}}, \text{ or, } V_{AN_1(on)} = V_{NA_1(off)} \\ \text{และ} &L_B(\theta_0) \frac{\Delta i_{1(on)}}{T_{S_1(on)}} = -L_B(\theta_0) \frac{\Delta i_{1(off)}}{T_{S_1(off)}}, \text{ or, } V_{BN_1(on)} = V_{BN_1(off)} \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

แรงดันที่ตกคร่อมทั้งขดลวดเฟส A และเฟส B ในช่วงเวลาหยุดการจ่ายแรงดันพัลส์ ก็คือ $V_{NA_1(off)}$ และ $V_{BN_1(off)}$ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ซึ่งสามารถเขียนใหม่ในรูปของ V_{DC} ได้ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} V_{BN_1(off)} &= \frac{L_B}{L_A + L_B} V_{DC} \\ V_{NA_1(off)} &= \frac{L_A}{L_A + L_B} V_{DC} \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

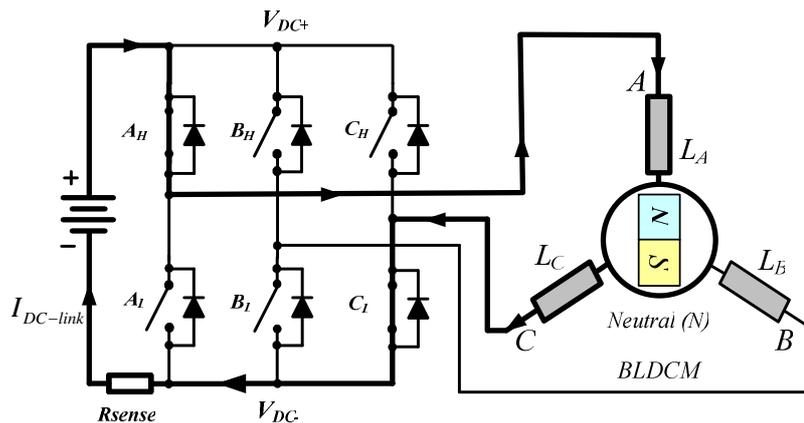
เมื่อทำการเปรียบเทียบแรงดัน $V_{NB_1(on)}$ จากสมการที่ (3.2) และแรงดัน $V_{NA_1(off)}$ จากสมการที่ (3.5) จะได้ว่า

$$V_{NA_1(off)} - V_{NB_1(on)} = (L_A - L_B) \frac{V_{DC}}{(L_A + L_B)} \quad (3.6)$$

จากสมการที่ (3.6) จะเห็นได้ว่าค่าความเหนี่ยวนำ L_A และ L_B สามารถเปรียบเทียบระหว่างกันได้โดยการเปรียบเทียบค่าแรงดัน $V_{NA_1(off)}$ และ $V_{NB_1(on)}$ เมื่อค่าระดับแรงดันระหว่างเฟส A และเฟส B มีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าก็จะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำของทั้งสองเฟสมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าตามกัน ซึ่งก็คือการเปรียบเทียบค่าระดับความเหนี่ยวนำในรูปของระดับแรงดันระหว่างเฟส A และเฟส B

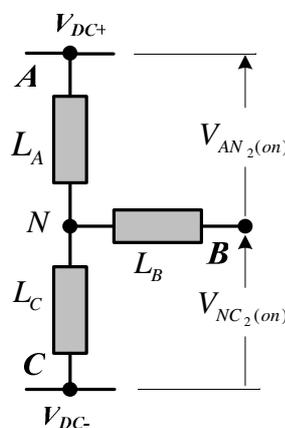
การจ่ายแรงดันพัลส์ครั้งที่สอง

ด้วยหลักการเดียวกัน การจ่ายแรงดันพัลส์ครั้งที่สองด้วยช่วงเวลาเท่ากัน ถูกจ่ายให้กับเฟส A และเฟส C โดยเฟส A จะเชื่อมต่อกับแรงดันบัสไฟตรงบวก V_{DC+} และเฟส C จะเชื่อมต่อกับแรงดันบัสไฟตรงลบ V_{DC-} (สวิตช์ A_H และ C_L "ON") ในขณะที่เฟส B จะถูกปล่อยลอยโดยไม่มีกระแสไหลผ่าน ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ทิศทางการไหลของกระแสในช่วงเวลาจ่ายแรงดันพัลส์ครั้งที่สอง

ซึ่งเมื่อทำการเขียนออกมาในรูปของวงจรมุมูล และสมการ จะได้ดังรูปที่ 3.12 และสมการที่ (3.7)



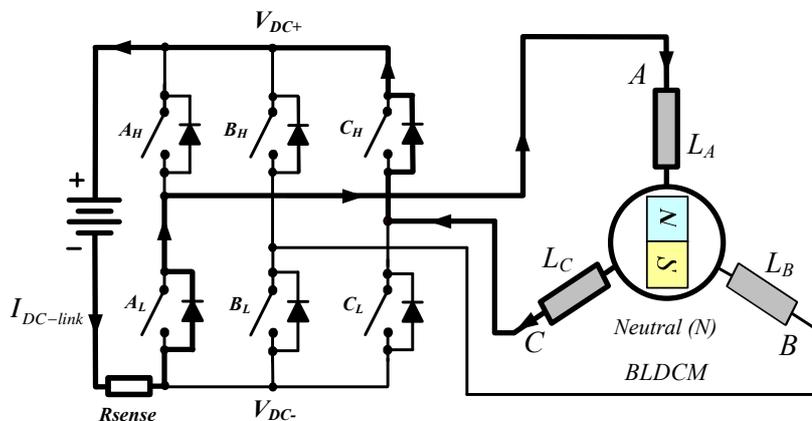
รูปที่ 3.12 วงจรมุมูลของช่วงเวลาการจ่ายแรงดันพัลส์ครั้งที่สอง

$$\begin{aligned}
 V_{DC} &\approx [L_A(\theta_0) + L_C(\theta_0)] \frac{di_{2(on)}}{dt} \\
 &\approx L_A(\theta_0) \frac{\Delta i_{2(on)}}{T_{S_2(on)}} + L_C(\theta_0) \frac{\Delta i_{2(on)}}{T_{S_2(on)}} = V_{AN_2(on)} + V_{NC_2(on)}
 \end{aligned}
 \tag{3.7}$$

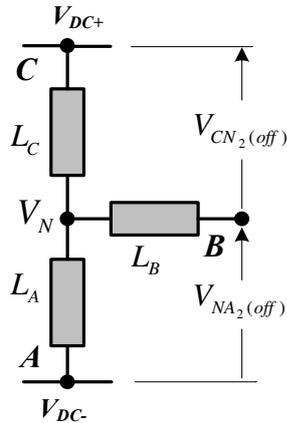
เมื่อ $\Delta i_{2(on)}$ คือค่ากระแสที่เปลี่ยนแปลงในช่วงที่จ่ายแรงดันพัลส์ $T_{S_2(on)}$ คือช่วงเวลาของการจ่ายแรงดันพัลส์ L_C คือค่าความเหนี่ยวนำที่ขดลวดที่สเตเตอร์ของเฟส C $V_{AN_2(on)}$ คือแรงดันตกคร่อมขดลวดสเตเตอร์ของเฟส A เทียบกับจุด N และ $V_{NC_2(on)}$ คือแรงดันตกคร่อมขดลวดสเตเตอร์ของเฟส C เทียบกับ V_{DC-} ตามลำดับ จากสมการที่ (3.7) แรงดันที่ตกคร่อมที่เฟส $V_{AN_2(on)}$ และ $V_{NC_2(on)}$ สามารถที่จะเขียนใหม่ได้ในรูปของ V_{DC} ได้ดังนี้

$$\left. \begin{aligned}
 V_{AN_2(on)} &= \frac{L_A}{L_A + L_C} V_{DC} \\
 V_{NC_2(on)} &= \frac{L_C}{L_A + L_C} V_{DC}
 \end{aligned} \right\}
 \tag{3.8}$$

หลังจากนั้น สวิตช์ A_H และ C_L จะหยุดทำงาน และจะเกิดการ regenerating ขึ้นอีกครั้ง คล้ายกับที่กล่าวไปแล้วในช่วงการจ่ายพัลส์ครั้งที่หนึ่ง วงจรแสดงทิศทางการไหลของกระแสและวงจรสมมูลในช่วงเวลาการจ่ายแรงดันพัลส์ ในครั้งที่สองนี้ แสดงดังรูปที่ 3.13 และ รูปที่ 3.14



รูปที่ 3.13 ทิศทางการไหลของกระแสในช่วงเวลา regenerating ครั้งที่สอง



รูปที่ 3.14 วงจรสมมูลของช่วงเวลา regenerating ครั้งที่สอง

จากวงจรสมมูลดังกล่าว สามารถแสดงให้เห็นค่าแรงดันที่ได้จากช่วงเวลาหยุดการจ่ายแรงดันพัลส์ออกมาในรูปของสมการได้ ดังสมการที่ (3.9)

$$V_{DC} \approx -L_A(\theta_0) \frac{\Delta i_{2(off)}}{T_{S_2(off)}} - L_C(\theta_0) \frac{\Delta i_{2(off)}}{T_{S_2(off)}} = V_{NA_2(off)} + V_{CN_2(off)} \quad (3.9)$$

เมื่อ $\Delta i_{2(off)}$ คือค่ากระแสที่เปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาหยุดการจ่ายแรงดันพัลส์ $T_{S_2(off)}$ คือเวลาในช่วงหยุดการจ่ายแรงดันพัลส์ $V_{NA_2(off)}$ และ $V_{CN_2(off)}$ คือแรงดันตกคร่อมขดลวดสเตเตอร์ของเฟส A เทียบกับ V_{DC-} และแรงดันตกคร่อมขดลวดสเตเตอร์ของเฟส C เทียบกับจุด N ตามลำดับ

การจ่ายพัลส์ในครั้งที่สองนี้ จะสังเกตได้ว่า แรงดันทั้งหมดที่ตกคร่อมทั้งขดลวดเฟส A และเฟส C ในช่วงเวลาหยุดการจ่ายพัลส์ จะมีลักษณะคล้ายกับการจ่ายพัลส์ครั้งแรก ดังนั้นสามารถที่จะเขียนใหม่ได้ด้วยการนำสมการที่ (3.7) และ (3.9) มาเปรียบเทียบกันได้นี้

$$\left. \begin{aligned} L_A(\theta_0) \frac{\Delta i_{2(on)}}{T_{S_2(on)}} &= -L_A(\theta_0) \frac{\Delta i_{2(off)}}{T_{S_2(off)}}, \text{ or, } V_{AN_2(on)} = V_{NA_2(off)} \\ \text{และ} \quad L_C(\theta_0) \frac{\Delta i_{2(on)}}{T_{S_2(on)}} &= -L_C(\theta_0) \frac{\Delta i_{2(off)}}{T_{S_2(off)}}, \text{ or, } V_{NC_2(on)} = V_{CN_2(off)} \end{aligned} \right\} \quad (3.10)$$

$V_{CN_2(off)}$ และ $V_{NA_2(off)}$ แรงดันที่ตกคร่อมทั้ง ขดลวด A และ C ในช่วงเวลาหยุดการจ่ายพัลส์ ซึ่งสามารถเขียนใหม่ได้ในรูปของ V_{DC} ได้ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} V_{CN_2(off)} &= \frac{L_C}{L_A + L_C} V_{DC} \\ V_{NA_2(off)} &= \frac{L_A}{L_A + L_C} V_{DC} \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

ดังนั้น เมื่อต้องการเปรียบเทียบแรงดันตกคร่อมขดลวดเฟส A และเฟส C ที่เกิดขึ้นทั้งสองช่วงเวลา ในรูปของค่าความเหนี่ยวนำ L_A และ L_C จะได้ดังสมการข้างล่างนี้

$$V_{NA_2(off)} - V_{NC_2(on)} = (L_A - L_C) \frac{V_{DC}}{(L_A + L_C)} \quad (3.12)$$

จากสมการที่ (3.12) ค่า $V_{NA_2(off)}$ และ L_A คือค่าแรงดันกับค่าความเหนี่ยวนำของเฟส A และ ส่วนค่า $V_{NC_2(on)}$ และ L_C คือค่าแรงดันกับค่าความเหนี่ยวนำของเฟส C จะเห็นได้ว่าค่าความเหนี่ยวนำ L_A และ L_C สามารถเปรียบเทียบระหว่างกันได้โดยการเปรียบเทียบค่าแรงดัน $V_{NA_2(off)}$ และ $V_{NC_2(on)}$ เมื่อค่าระดับแรงดันระหว่างเฟส A และเฟส C มีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าก็จะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำของทั้งสองเฟสมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าตามกัน ซึ่งก็คือการเปรียบเทียบค่าระดับความเหนี่ยวนำในรูปของระดับแรงดันระหว่างเฟส A และเฟส C

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความเหนี่ยวนำระหว่างเฟส A กับเฟส B และ เฟส A กับเฟส C ได้แล้ว จากนั้นจะทำการเปรียบเทียบค่าความเหนี่ยวนำระหว่างเฟส B กับเฟส C โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนี่ยวนำ L_B และ L_C สามารถกำหนดได้จาก $V_{NB_1(on)}$ และ $V_{NC_2(on)}$ ซึ่งได้จากการเปรียบเทียบกันระหว่างสมการที่ (3.5) สมการที่ (3.4) และ สมการที่ (3.9) จะได้ดังสมการที่ (3.13)

$$\left. \begin{aligned} V_{NB_1(on)} = V_{BN_1(off)} &= \frac{L_B}{L_A + L_B} V_{DC} \\ V_{NC_2(on)} &= \frac{L_C}{L_A + L_C} V_{DC} \end{aligned} \right\} \quad (3.13)$$

เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่าง $V_{NB_1(on)}$ จากสมการที่ (3.2) และ $V_{NC_2(on)}$ จากสมการที่ (3.13) จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
V_{NB_1(on)} - V_{NC_2(on)} &= \left[\frac{L_B}{L_A + L_B} V_{DC} \right] - \left[\frac{L_C}{L_A + L_C} V_{DC} \right] \\
&= \left[\frac{L_B(L_A + L_C) - L_C(L_A + L_B)}{(L_A + L_B)(L_A + L_C)} \right] V_{DC} \\
&= \left[\frac{L_A L_B + L_B L_C - L_A L_C - L_B L_C}{(L_A + L_B)(L_A + L_C)} \right] V_{DC}
\end{aligned}$$

เมื่อจัดรูปใหม่จะได้ดังนี้

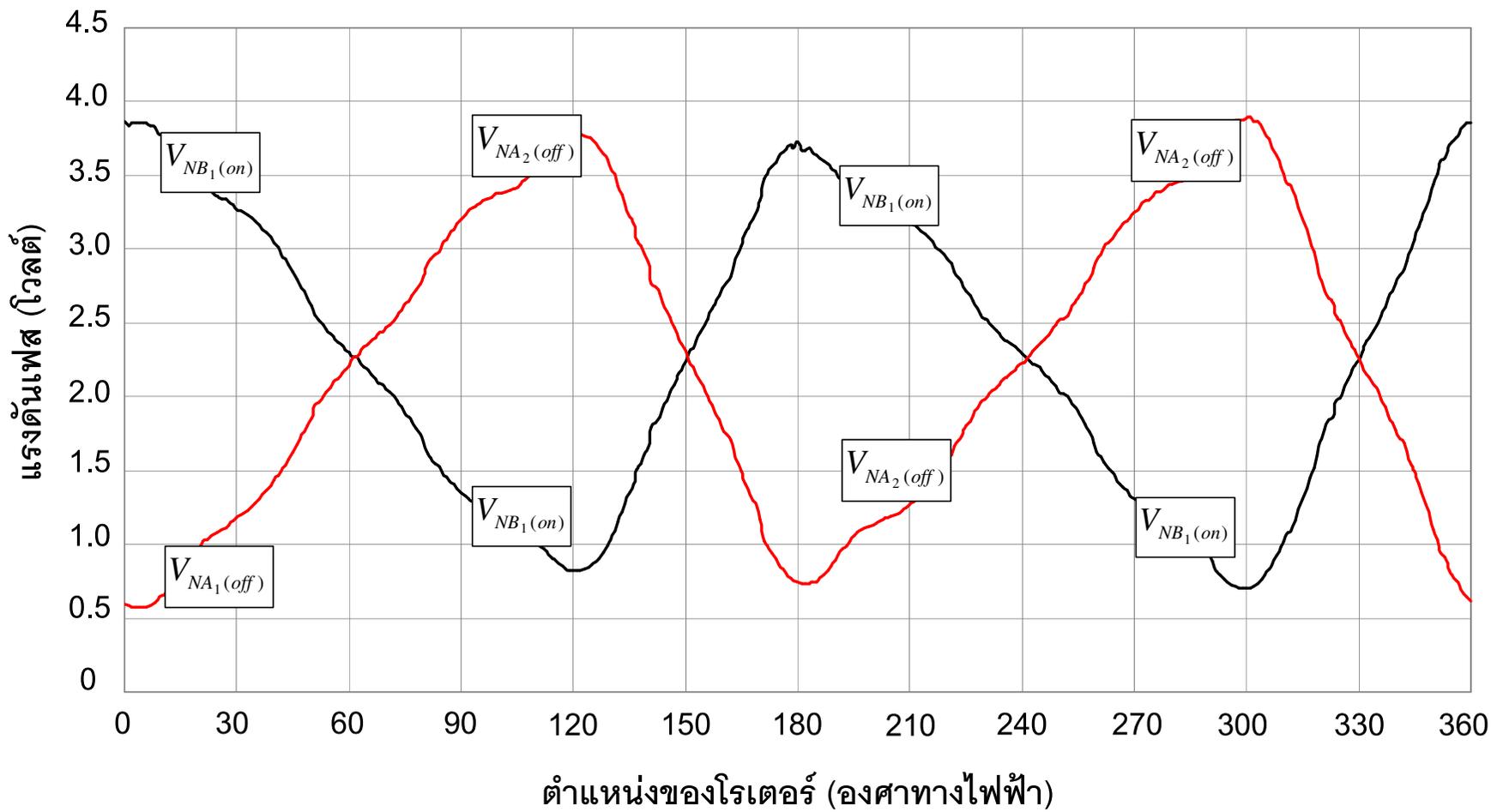
$$V_{NB_1(on)} - V_{NC_2(on)} = [L_B - L_C] \frac{L_A}{(L_A + L_B)(L_A + L_C)} V_{DC} \quad (3.14)$$

จะเห็นได้ว่าค่าความเหนี่ยวนำ L_B และ L_C สามารถเปรียบเทียบระหว่างกันได้โดยการเปรียบเทียบค่าแรงดัน $V_{NB_1(on)}$ และ $V_{NC_2(on)}$ เมื่อค่าระดับแรงดันระหว่างเฟส B และเฟส C มีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าก็จะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำของทั้งสองเฟสมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าตามกันไป ซึ่งก็คือการเปรียบเทียบค่าระดับความเหนี่ยวนำในรูปของระดับแรงดันระหว่างเฟส B และเฟส C นั้นเอง

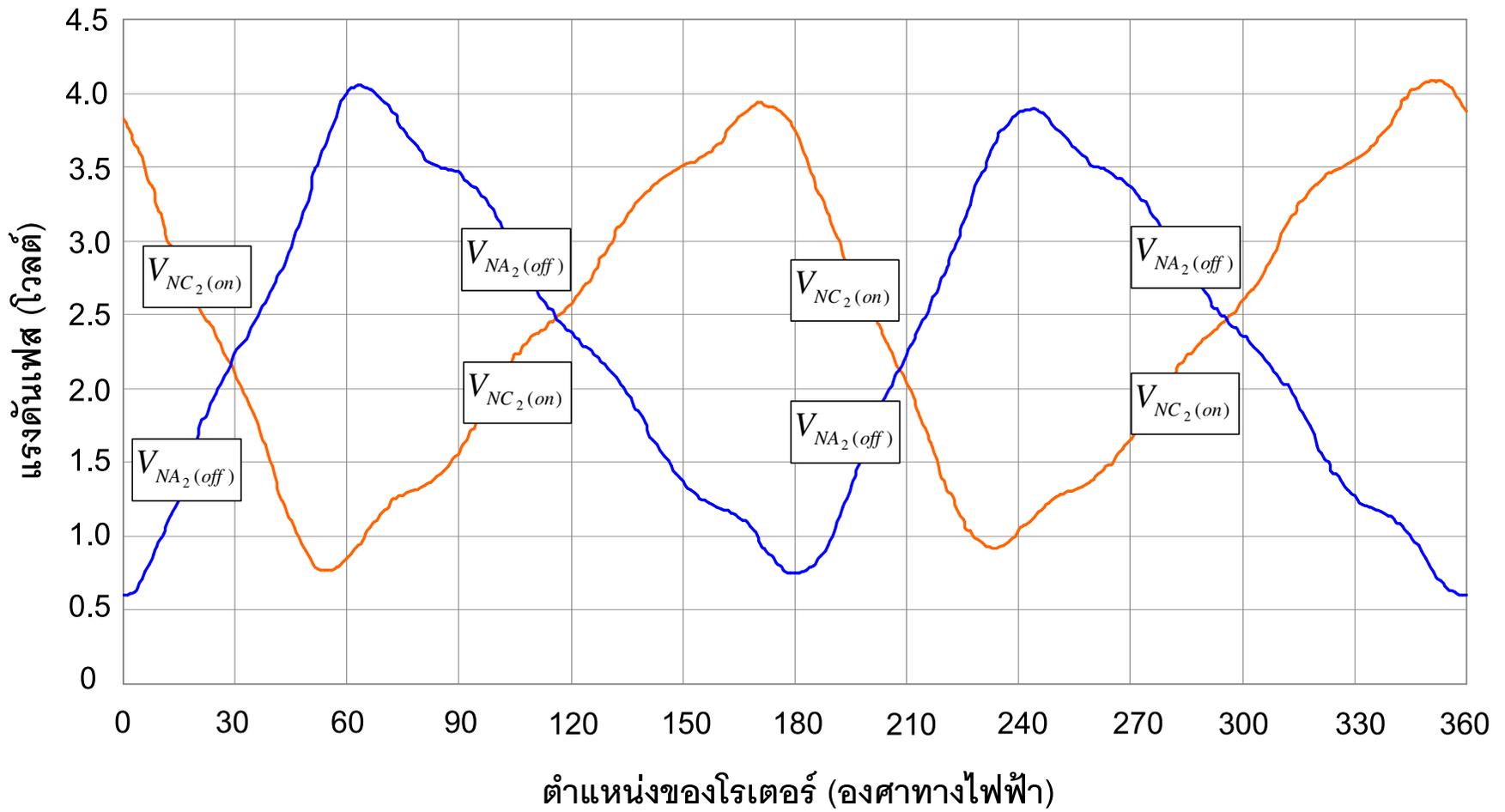
จากสมการที่ (3.6) จะเป็นการเปรียบเทียบกันระหว่างค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดที่เฟส A กับเฟส B สมการที่ (3.12) จะเป็นการเปรียบเทียบกันระหว่างค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดที่เฟส A กับเฟส C และ สมการที่ (3.14) จะเป็นการเปรียบเทียบกันระหว่างค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดที่เฟส B กับเฟส C จากทั้งสามสมการแสดงให้เห็นว่าเราสามารถเปรียบเทียบค่าความเหนี่ยวนำซึ่งกันและกันได้โดยเทียบกับแรงดันทั้งสามเฟส ซึ่งผลต่างของค่าความเหนี่ยวนำก็คือผลต่างของแรงดันเฟสที่เปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ เมื่อนำตัวแปรต่างๆจากทั้งสามสมการมาใส่ลงในตารางโดยเปรียบเทียบกับช่วงมุมที่ได้จากรูปที่ 3.2 จะได้ดังตารางที่ 3.1 จากตารางจะมีทั้งการเปรียบเทียบค่าระดับแรงดัน การเปรียบเทียบความเหนี่ยวนำช่วงมุมที่ประมาณตำแหน่งของโรเตอร์ ในส่วนระบุช่วงมุมได้มีการกำหนดขอบเขตให้ครอบคลุมถึงรอยต่อระหว่างช่วงมุมด้วยเพื่อไม่ให้เกิดการสับสนในขณะค่าที่ประมาณได้อยู่ตรงกลางระหว่างสองช่วงมุมโดยที่มุมที่ประมาณได้จะอยู่ในช่วงน้อยกว่าและ มากกว่าหรือเท่ากับ เช่น $0^\circ > \theta_0 \geq 30^\circ$ กับ $30^\circ > \theta_0 \geq 60^\circ$ จะบอกได้ว่า ถ้าประมาณได้น้อยกว่าหรือเท่ากับ 30 องศา จะอยู่ในช่วงแรก และถ้ามากกว่า 30 องศา ก็อยู่ในช่วงที่สอง เป็นต้น

ตารางที่ 3.1 การเปรียบเทียบระดับค่าความเหนี่ยวนำในรูประดับค่าแรงดัน

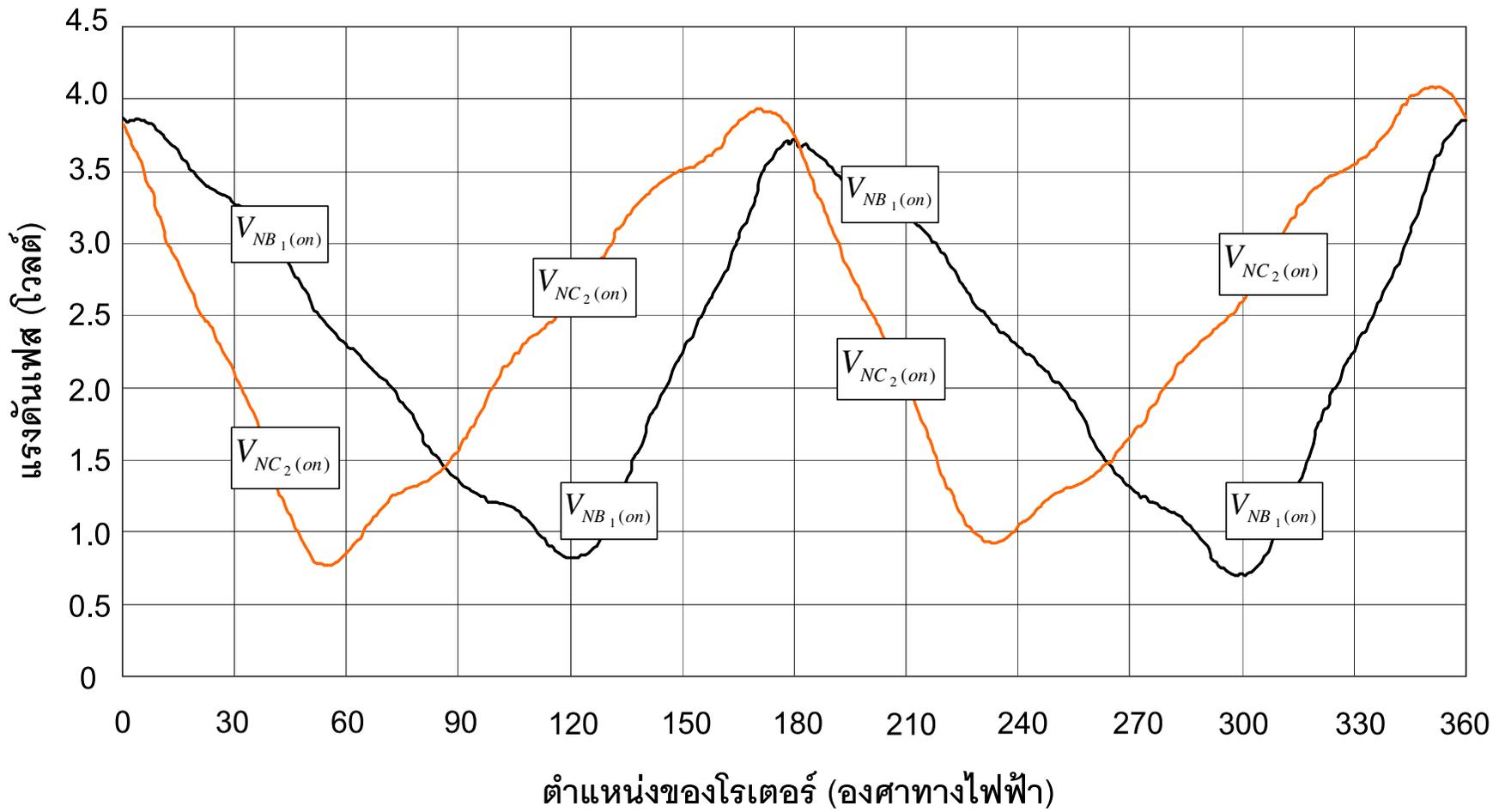
การเปรียบเทียบค่าระดับแรงดัน	การเปรียบเทียบค่าระดับความเหนี่ยวนำ	ตำแหน่งเริ่มต้นของโรเตอร์ที่ประมาณได้
$V_{NB_1(on)} > V_{NA_1(off)}$ $V_{NC_2(on)} \geq V_{NA_2(off)}$ $V_{NB_1(on)} > V_{NC_2(on)}$	$L_B > L_C \geq L_A$	$0^\circ < \theta_0 \leq 30^\circ$ หรือ $180^\circ < \theta_0 \leq 210^\circ$
$V_{NB_1(on)} \geq V_{NA_1(off)}$ $V_{NC_2(on)} < V_{NA_2(off)}$ $V_{NB_1(on)} > V_{NC_2(on)}$	$L_B \geq L_A > L_C$	$30^\circ < \theta_0 \leq 60^\circ$ หรือ $210^\circ < \theta_0 \leq 240^\circ$
$V_{NB_1(on)} < V_{NA_1(off)}$ $V_{NC_2(on)} < V_{NA_2(off)}$ $V_{NB_1(on)} \geq V_{NC_2(on)}$	$L_A > L_B \geq L_C$	$60^\circ < \theta_0 \leq 90^\circ$ หรือ $240^\circ < \theta_0 \leq 270^\circ$
$V_{NB_1(on)} < V_{NA_1(off)}$ $V_{NC_2(on)} \leq V_{NA_2(off)}$ $V_{NB_1(on)} < V_{NC_2(on)}$	$L_A \geq L_C > L_B$	$90^\circ < \theta_0 \leq 120^\circ$ หรือ $270^\circ < \theta_0 \leq 300^\circ$
$V_{NB_1(on)} \leq V_{NA_1(off)}$ $V_{NC_2(on)} > V_{NA_2(off)}$ $V_{NB_1(on)} < V_{NC_2(on)}$	$V_C > V_A \geq V_B$	$120^\circ < \theta_0 \leq 150^\circ$ หรือ $300^\circ < \theta_0 \leq 330^\circ$
$V_{NB_1(on)} > V_{NA_1(off)}$ $V_{NC_2(on)} > V_{NA_2(off)}$ $V_{NB_1(on)} \leq V_{NC_2(on)}$	$L_C \geq L_B > L_A$	$150^\circ < \theta_0 \leq 180^\circ$ หรือ $330^\circ < \theta_0 \leq 360^\circ$



รูปที่ 3.15 ค่าระดับแรงดันของเฟส A กับเฟส B ที่เปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งของโรเตอร์



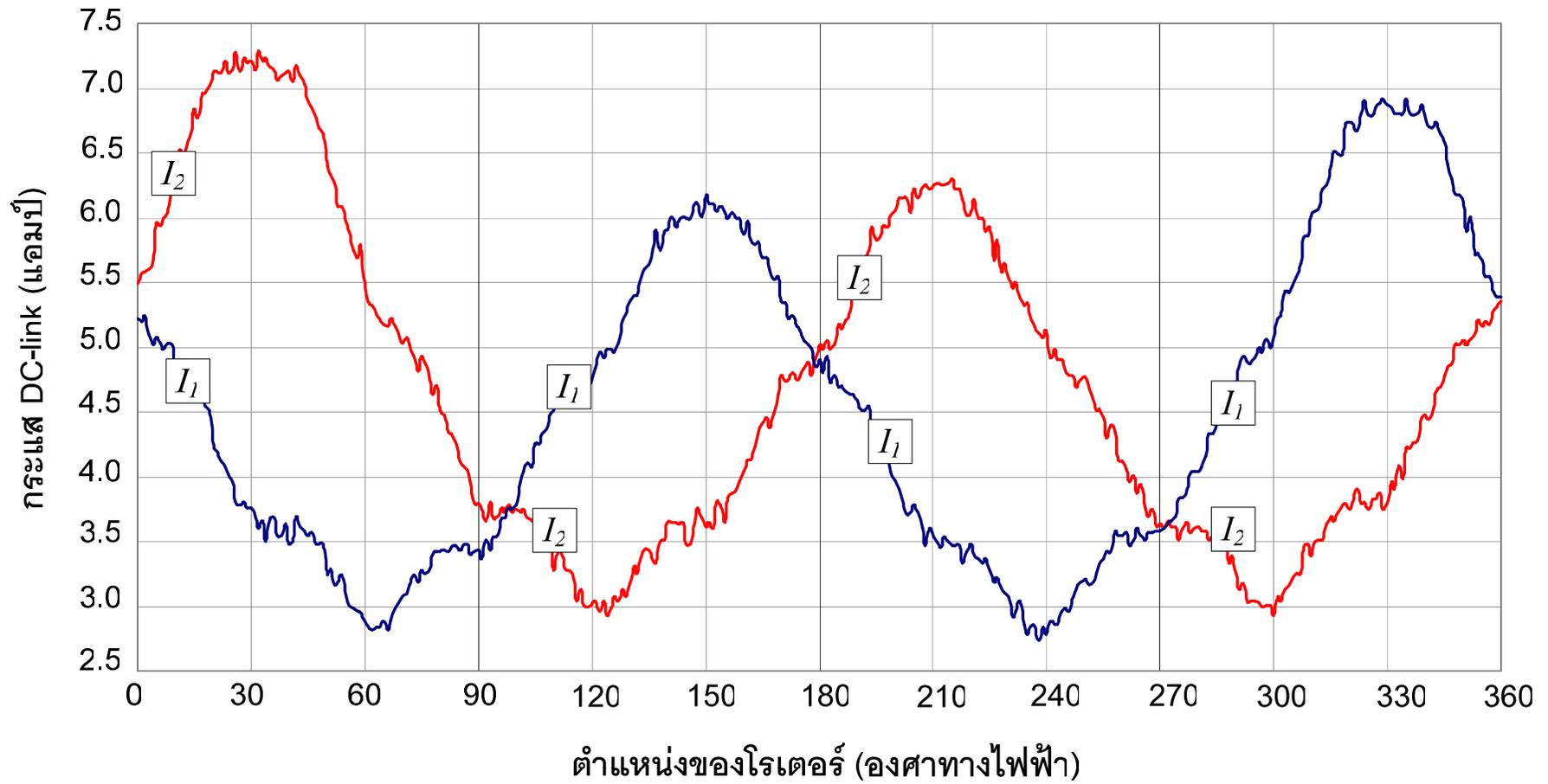
รูปที่ 3.16 ค่าระดับแรงดันของเฟส A กับเฟส C ที่เปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งของโรเตอร์



รูปที่ 3.17 ค่าระดับแรงดันของเฟส B กับเฟส C ที่เปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งของโรเตอร์

รูปที่ 3.15 รูปที่ 3.16 และ รูปที่ 3.17 เป็นผลการทดสอบการจ่ายพัลส์จากทั้งสองครั้งในทุกๆ 1 องศา ตลอด 360 องศาทางไฟฟ้า ด้วยการจ่ายแรงดันพัลส์ขนาดความกว้างพัลส์เท่ากับ 150 μs แรงดันบัลไฟตรงที่ 310 VDC จากรูปจะเห็นได้ว่าค่าระดับแรงดันของแต่ละเฟสมีการเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ เมื่อเปรียบเทียบระดับแรงดันดังกล่าวตามการเปรียบเทียบดังในตารางที่ 3.1 ซึ่งรูปที่ 3.15 จะเป็นการเปรียบเทียบแรงดันเฟส A กับเฟส B รูปที่ 3.16 จะเป็นการเปรียบเทียบแรงดันเฟส A กับเฟส C และรูปที่ 3.17 จะเป็นการเปรียบเทียบแรงดันเฟส B กับเฟส C เมื่อรวมผลการเปรียบเทียบทั้งหมดก็จะสามารถแบ่งมุมออกเป็นช่วงๆ ได้ 12 ช่วง ช่วงละ 30 องศาทางไฟฟ้า เมื่อพิจารณาค่าระดับแรงดันจากมุม 0 ถึง 180 องศา จะมีความแตกต่างในแต่ละช่วงที่แทบจะเหมือนกันกับค่าระหว่างมุม 180 องศา ถึง 360 องศา

เมื่อพิจารณาจากค่าระดับกระแส DC-link จากการทดสอบเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 3.15 ซึ่งเป็นระดับกระแสจากการทดสอบการจ่ายพัลส์ทั้งสองครั้ง เมื่อ I_1 คือค่ากระแสที่ได้จากการจ่ายพัลส์ครั้งที่หนึ่ง I_2 คือค่ากระแสที่ได้จากการจ่ายพัลส์ครั้งที่สอง จะเห็นได้ว่าค่าระดับกระแสทั้งสองค่ามีความแตกต่างกันในแต่ละช่วงอย่างชัดเจน แต่เนื่องจากค่ากระแสยอดจากทั้งสองค่านี้อาจจะไม่ใช่ค่ากระแสที่สูงที่สุดที่จะใช้เป็นตัวกำหนดตำแหน่งขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ได้ ดังนั้นจึงต้องทำการจ่ายสัญญาณแรงดันพัลส์อีกหนึ่งครั้งเพื่อให้ได้ข้อมูลกระแสเพิ่มเติม การจ่ายพัลส์ครั้งที่สามและวิธีการเลือกตำแหน่งสวิตช์จะกล่าวในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 3.18 ค่าระดับกระแสที่เปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งของโรเตอร์

การจ่ายแรงดันพัลส์ครั้งที่สาม

การจ่ายแรงดันพัลส์ครั้งที่สามนี้จะพิจารณาจากค่าของระดับกระแสที่มากที่สุดจากทั้งสองครั้งแรกมาเป็นตัวเลือกที่จะกำหนดตำแหน่งในการสวิตช์ โดยตำแหน่งสวิตช์จะเป็นตำแหน่งที่กระแสมีทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสจากครั้งที่หนึ่งหรือสอง ตัวอย่างเช่น ถ้าครั้งที่หนึ่งมีระดับกระแสสูงที่สุด เมื่อตำแหน่งสวิตช์ของครั้งที่หนึ่ง คือ A_H และ B_L ดังนั้นตำแหน่งสวิตช์ในครั้งที่สามจะเป็น สวิตช์ A_L และ B_H เมื่อนำผลจากรูปที่ 3.15 มาทำการกำหนดตำแหน่งในการสวิตช์จะได้ดังตารางที่ 3.2 ในตารางจะแสดงทั้งการเปรียบเทียบค่าความเหนี่ยวนำในรูปของแรงดันเฟส ช่วงมุมที่ประมาณตำแหน่งขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ การเปรียบเทียบค่าระดับกระแสที่ได้จากการจ่ายแรงดันพัลส์จากทั้งสองครั้ง และตำแหน่งสวิตช์ที่ถูกกำหนดสำหรับการจ่ายแรงดันพัลส์ครั้งที่สาม

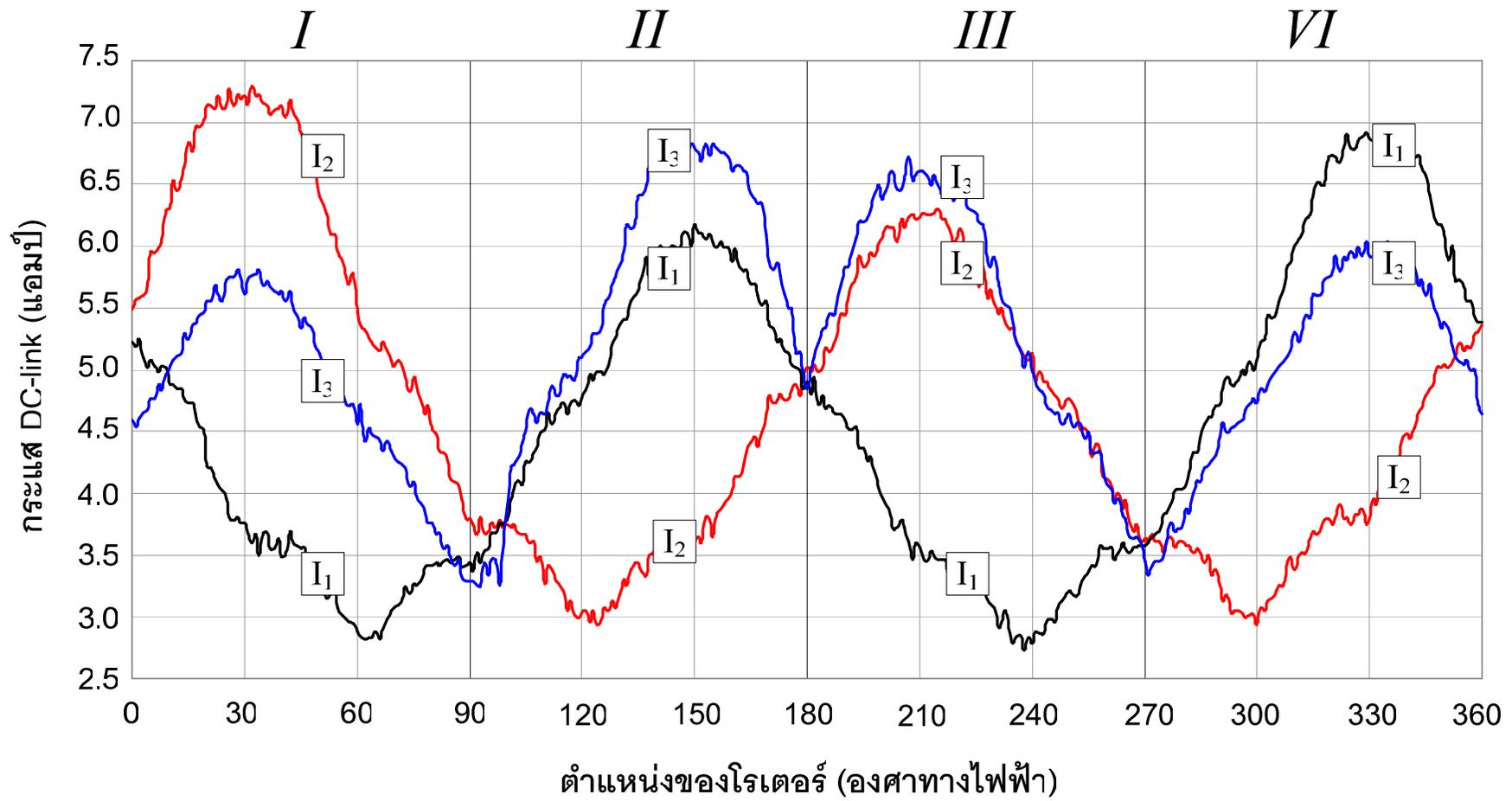
เมื่อทำการจ่ายแรงดันพัลส์ในครั้งที่สามแล้วจะได้ผลของระดับกระแสดังรูปที่ 3.16 จากรูปจะเป็นผลการทดสอบการจ่ายแรงดันพัลส์จากทั้งสามครั้ง ด้วยเงื่อนไขเดียวกันคือจะทำการทดสอบทุกๆ 1 องศา จนครบรอบ 360 องศาทางไฟฟ้า ด้วยการจ่ายแรงดันพัลส์ขนาดความกว้างพัลส์เท่ากับ 150 μ s และแรงดันบัลไฟตรงที่ 310 VDC จากรูป I_1 คือค่าสัญญาณกระแสที่ได้จากการจ่ายแรงดันพัลส์ครั้งที่หนึ่ง I_2 คือค่าสัญญาณกระแสที่ได้จากการจ่ายแรงดันพัลส์ครั้งที่สอง และ I_3 คือค่าสัญญาณกระแสที่ได้จากการจ่ายแรงดันพัลส์ครั้งที่สาม เมื่อพิจารณาจากค่าระดับกระแสที่ได้จากการจ่ายแรงดันพัลส์ครั้งที่สามจะเห็นได้ว่าระดับกระแสจะมีทั้งสูงกว่าและต่ำกว่าระดับกระแสที่ได้จากครั้งที่หนึ่ง หรือครั้งที่สอง ซึ่งในบางช่วงจะเห็นว่าระดับความคลาดเคลื่อนจากความ เป็นจริงที่เกิดจากทดสอบที่ยากลำบาก เนื่องจากไม่สามารถล็อกโรเตอร์ให้นิ่งพอในขณะตรวจวัด จึงทำให้ผลที่ได้ผิดรูปแบบและไม่ตรงตำแหน่ง แต่เมื่อทดลองใช้งานจริงก็สามารถประมาณค่าได้อย่างแม่นยำ

จากความแตกต่างกันดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าระดับกระแสที่สูงกว่าจะหมายถึงตำแหน่งขั้วเหนือของโรเตอร์จะอยู่ใกล้กับเฟสใดเฟสหนึ่งในสองเฟสของตำแหน่งสวิตช์นั้น เช่น I_2 มีค่าสูงที่สุด เมื่อตำแหน่งสวิตช์ของ I_2 คือ สวิตช์ A_H และ C_L ก็จะหมายความว่าขั้วเหนือของโรเตอร์อยู่ใกล้กับเฟส A หรือ เฟส C เป็นต้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าระดับกระแสจะสามารถกำหนดช่วงมุมออกได้เป็นสี่ช่วงด้วยกัน โดยช่วงที่ I คือมุมระหว่าง 1 ถึง 90 จะพิจารณาจากค่าระดับกระแส $I_2 \geq I_1$ และ $I_2 > I_3$ ช่วงที่ II คือมุมระหว่าง 91 ถึง 180 องศา จะพิจารณาจากค่าระดับกระแส $I_1 \geq I_2$ และ $I_3 > I_1$ ช่วงที่ III คือ มุมระหว่าง 181 ถึง 270 องศา จะพิจารณาจากค่า

ระดับกระแส $I_2 \geq I_1$ และ $I_3 > I_2$ และช่วงที่ VI คือ มุมระหว่าง 271 ถึง 360 องศา จะพิจารณาจากค่าระดับกระแส $I_1 \geq I_2$ และ $I_1 > I_3$

ตารางที่ 3.2 การกำหนดตำแหน่งสวิตช์ในการจ่ายแรงดันพัลส์ครั้งที่สาม

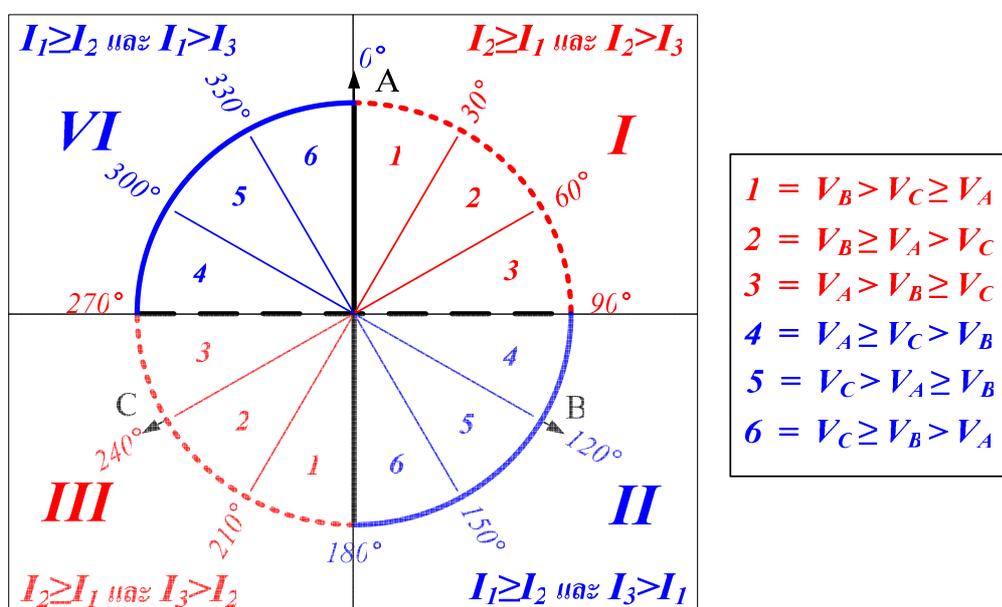
การเปรียบเทียบระดับค่าแรงดัน	ตำแหน่งเริ่มต้นของโรเตอร์ที่ประมาณได้	การเปรียบเทียบค่าระดับกระแส	ตำแหน่งสวิตช์ครั้งที่สาม
$V_{NB_1(on)} > V_{NA_1(off)}$ $V_{NC_2(on)} \geq V_{NA_2(off)}$ $V_{NB_1(on)} > V_{NC_2(on)}$	$0^\circ < \theta_0 \leq 30^\circ$ หรือ $180^\circ < \theta_0 \leq 210^\circ$	$I_2 \geq I_1$	C_H, A_L
$V_{NB_1(on)} \geq V_{NA_1(off)}$ $V_{NC_2(on)} < V_{NA_2(off)}$ $V_{NB_1(on)} > V_{NC_2(on)}$	$30^\circ < \theta_0 \leq 60^\circ$ หรือ $210^\circ < \theta_0 \leq 240^\circ$	$I_2 \geq I_1$	C_H, A_L
$V_{NB_1(on)} < V_{NA_1(off)}$ $V_{NC_2(on)} < V_{NA_2(off)}$ $V_{NB_1(on)} \geq V_{NC_2(on)}$	$60^\circ < \theta_0 \leq 90^\circ$ หรือ $240^\circ < \theta_0 \leq 270^\circ$	$I_2 \geq I_1$	C_H, A_L
$V_{NB_1(on)} < V_{NA_1(off)}$ $V_{NC_2(on)} \leq V_{NA_2(off)}$ $V_{NB_1(on)} < V_{NC_2(on)}$	$90^\circ < \theta_0 \leq 120^\circ$ หรือ $270^\circ < \theta_0 \leq 300^\circ$	$I_1 \geq I_2$	B_H, A_L
$V_{NB_1(on)} \leq V_{NA_1(off)}$ $V_{NC_2(on)} > V_{NA_2(off)}$ $V_{NB_1(on)} < V_{NC_2(on)}$	$120^\circ < \theta_0 \leq 150^\circ$ หรือ $300^\circ < \theta_0 \leq 330^\circ$	$I_1 \geq I_2$	B_H, A_L
$V_{NB_1(on)} > V_{NA_1(off)}$ $V_{NC_2(on)} > V_{NA_2(off)}$ $V_{NB_1(on)} \leq V_{NC_2(on)}$	$150^\circ < \theta_0 \leq 180^\circ$ หรือ $330^\circ < \theta_0 \leq 360^\circ$	$I_1 \geq I_2$	B_H, A_L



รูปที่ 3.19 สัญญาณกระแส DC-link จากการทดสอบการจ่ายแรงดันพัลส์ทั้งสามครั้ง

3.1.3 ขั้นตอนการกำหนดขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์

การประมาณตำแหน่งขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ด้วยวิธีการที่น่าเสนอนี้จำเป็นต้องใช้ข้อมูลทั้งกระแสและแรงดันมาวิเคราะห์เพื่อประมาณค่าตำแหน่งขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ ดังนั้นในขั้นตอนนี้จะเป็นการนำเอาผลจากการเปรียบเทียบค่าความเหนี่ยวนำในรูปของค่าระดับแรงดันเฟส และการเปรียบเทียบค่าสูงสุดของกระแส DC-link มาทำการเรียบเรียงให้ดูง่ายขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.20 จากรูปจะเป็นการแบ่งแยกช่วงมุมตามตำแหน่งขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ด้วยการเปรียบเทียบค่าระดับแรงดันโดยอ้างอิงจากผลการทดสอบในรูปที่ 3.14 รูปที่ 3.15 และรูปที่ 3.16 ส่วนการเปรียบเทียบค่าระดับกระแสจะได้จากผลการทดสอบในรูปที่ 3.19 ซึ่งแบ่งความแตกต่างของระดับกระแสออกเป็นช่วงได้ 4 ช่วง ช่วงละ 90 องศา เมื่อพิจารณาในช่วงที่ I และช่วงที่ III จะเห็นว่าเมื่อค่าระดับแรงดันในช่วงมุมที่ตรงข้ามกันมีค่าเหมือนกัน และจะใช้การเปรียบเทียบระดับค่ากระแสเป็นตัวกำหนดตำแหน่งขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ โดยใช้การเปรียบเทียบระดับค่ากระแส I_2 กับ I_3 หรือ ในช่วงที่ II และช่วงที่ VI ก็เช่นเดียวกัน ซึ่งจะใช้การเปรียบเทียบระดับค่ากระแส I_1 กับ I_3 เป็นตัวกำหนดตำแหน่งขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์



รูปที่ 3.20 ตำแหน่งขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ในช่วงมุมต่างๆ

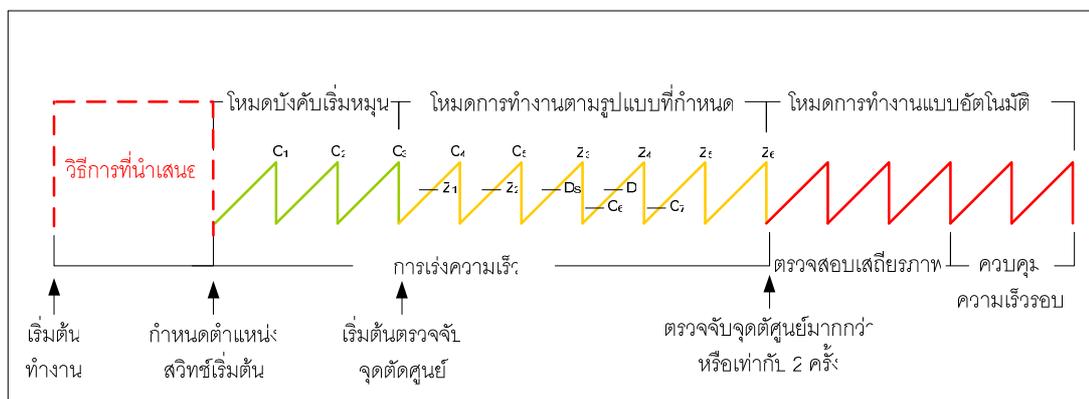
เมื่อนำผลที่ได้จากรูปที่ 3.17 ที่ได้แสดงการประมาณตำแหน่งของโรเตอร์ด้วยการเปรียบเทียบระดับแรงดัน และการกำหนดตำแหน่งขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ด้วยการเปรียบเทียบค่าระดับกระแส ร่วมกับตารางที่ 3.2 ก็จะสามารถสรุปออกมาเป็นตารางได้ดังในตารางที่ 3.3 จากตารางจะเห็นได้ว่ามีทั้งการเปรียบเทียบค่าระดับค่าความเหนี่ยวนำในรูปของแรงดันเฟส การเปรียบเทียบค่าระดับกระแสเพื่อกำหนดตำแหน่งสวิตช์ในครั้งที่สาม การเปรียบเทียบค่าระดับกระแสเพื่อกำหนดตำแหน่งขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ และตำแหน่งเริ่มต้นของโรเตอร์ที่ประมาณได้

ตารางที่ 3.3 ช่วงมุมตำแหน่งขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ที่ประมาณได้

การเปรียบเทียบ ระดับค่าแรงดัน	ตำแหน่งเริ่มต้นของ โรเตอร์ที่ประมาณได้	การเปรียบเทียบ ระดับค่ากระแส	ตำแหน่งเริ่มต้นของ โรเตอร์ที่ประมาณได้
$V_{NB_1(on)} > V_{NA_1(off)}$ $V_{NC_2(on)} \geq V_{NA_2(off)}$ $V_{NB_1(on)} > V_{NC_2(on)}$	$0^\circ < \theta_0 \leq 30^\circ$ หรือ $180^\circ < \theta_0 \leq 210^\circ$	$I_2 \geq I_1$	$I_2 > I_3$ $0^\circ < \theta_0 \leq 30^\circ$
			$I_3 > I_2$ $180^\circ < \theta_0 \leq 210^\circ$
$V_{NB_1(on)} \geq V_{NA_1(off)}$ $V_{NC_2(on)} < V_{NA_2(off)}$ $V_{NB_1(on)} > V_{NC_2(on)}$	$30^\circ < \theta_0 \leq 60^\circ$ หรือ $210^\circ < \theta_0 \leq 240^\circ$	$I_2 \geq I_1$	$I_2 > I_3$ $30^\circ < \theta_0 \leq 60^\circ$
			$I_3 > I_2$ $210^\circ < \theta_0 \leq 240^\circ$
$V_{NB_1(on)} < V_{NA_1(off)}$ $V_{NC_2(on)} < V_{NA_2(off)}$ $V_{NB_1(on)} \geq V_{NC_2(on)}$	$60^\circ < \theta_0 \leq 90^\circ$ หรือ $240^\circ < \theta_0 \leq 270^\circ$	$I_2 \geq I_1$	$I_2 > I_3$ $60^\circ < \theta_0 \leq 90^\circ$
			$I_3 > I_2$ $240^\circ < \theta_0 \leq 270^\circ$
$V_{NB_1(on)} < V_{NA_1(off)}$ $V_{NC_2(on)} \leq V_{NA_2(off)}$ $V_{NB_1(on)} < V_{NC_2(on)}$	$90^\circ < \theta_0 \leq 120^\circ$ หรือ $270^\circ < \theta_0 \leq 300^\circ$	$I_1 \geq I_2$	$I_3 > I_1$ $90^\circ < \theta_0 \leq 120^\circ$
			$I_1 > I_3$ $270^\circ < \theta_0 \leq 300^\circ$
$V_{NB_1(on)} \leq V_{NA_1(off)}$ $V_{NC_2(on)} > V_{NA_2(off)}$ $V_{NB_1(on)} < V_{NC_2(on)}$	$120^\circ < \theta_0 \leq 150^\circ$ หรือ $300^\circ < \theta_0 \leq 330^\circ$	$I_1 \geq I_2$	$I_3 > I_1$ $120^\circ < \theta_0 \leq 150^\circ$
			$I_1 > I_3$ $300^\circ < \theta_0 \leq 330^\circ$
$V_{NB_1(on)} > V_{NA_1(off)}$ $V_{NC_2(on)} > V_{NA_2(off)}$ $V_{NB_1(on)} \leq V_{NC_2(on)}$	$150^\circ < \theta_0 \leq 180^\circ$ หรือ $330^\circ < \theta_0 \leq 360^\circ$	$I_1 \geq I_2$	$I_3 > I_1$ $150^\circ < \theta_0 \leq 180^\circ$
			$I_1 > I_3$ $330^\circ < \theta_0 \leq 360^\circ$

3.2 วิธีการเริ่มต้นการทำงานของมอเตอร์

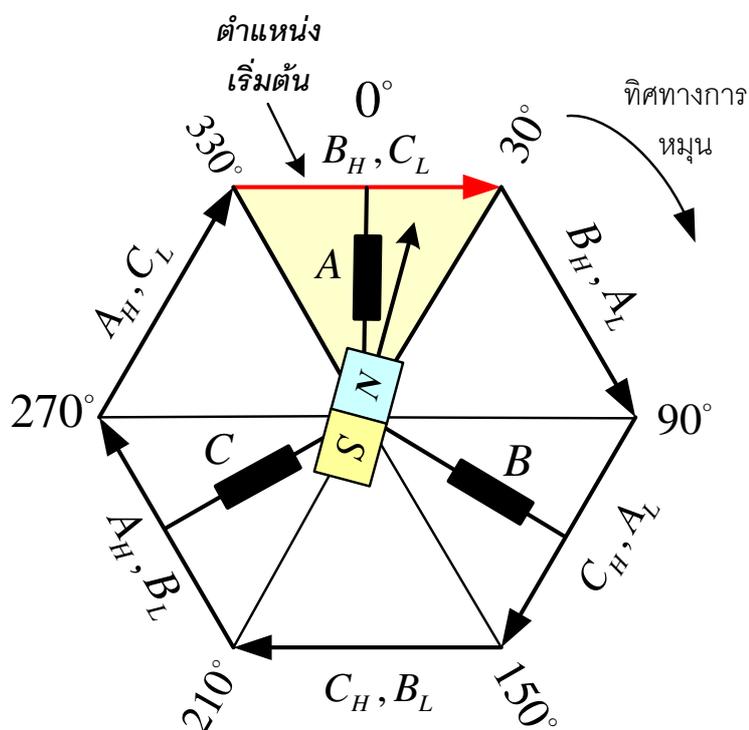
วิธีการเริ่มต้นทำงานด้วยวิธีการที่นำเสนอจะใช้วิธีการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ที่กล่าวมาข้างต้นเข้ามาแทนที่ในส่วนการกำหนดตำแหน่งขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ของวิธีการเดิม และใช้การเริ่มต้นการทำงานด้วยวิธีการบังคับเริ่มหมุนไปจนถึงการขับเคลื่อนแบบสวิตช์อัตโนมัติแบบไร้ตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ตามวิธีการเดิม จากแผนผังขั้นตอนการเริ่มต้นทำงานทั้งหมดของวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบเดิมจากบทที่ 2 สามารถเขียนใหม่ได้ ดังรูปที่ 3.21 จากรูปจะแทนส่วนการกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นด้วยวิธีการประมาณตำแหน่งของโรเตอร์ และส่วนที่จะกำหนดเลือกลำดับขั้นของการสวิตช์ของการเริ่มต้นทำงาน ในส่วนกำหนดลำดับขั้นการเริ่มต้นทำงานจะทำการเลือกจากขั้นที่เหมาะสมที่สุดที่จะได้แรงบิดเริ่มต้นสูงสุดในการเริ่มต้นทำงาน โดยวิธีการเลือกจะพิจารณาจากทิศทางเวกเตอร์ลัพธ์ของฟลักซ์ของในการสวิตช์ขั้นนั้นๆ ที่ตั้งฉากกันกับทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กของขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ที่ประมาณได้ วิธีการเดิมจะไม่มีส่วนที่จะเลือกลำดับขั้นนี้ เพราะถูกกำหนดไว้ตายตัวตั้งแต่ครั้งแรก แต่วิธีการที่นำเสนอสามารถปรับเปลี่ยนลำดับขั้นได้ไม่ว่าตำแหน่งขั้วแม่เหล็กที่ประมาณได้จะอยู่ในช่วงมุมใดก็จะสามารถปรับเปลี่ยนขั้นการสวิตช์ในการเริ่มต้นทำงานให้ตรงกับความต้องการได้ หลังจากนั้นจะเข้าสู่โหมดการบังคับเริ่มหมุน โหมดการสวิตช์ตามรูปแบบที่กำหนด และโหมดการทำงานแบบอัตโนมัติตามวิธีการเดิม ตามลำดับ



รูปที่ 3.21 แผนผังขั้นตอนการเริ่มต้นทำงานด้วยวิธีการที่นำเสนอ

3.2.1 การกำหนดลำดับชั้นเริ่มต้นการสวิตช์

การกำหนดลำดับชั้นในช่วงเริ่มต้นทำงานด้วยวิธีการที่นำเสนอนี้ จะเป็นไปตามลำดับชั้นตามวิธีการขับเคลื่อนแบบการสวิตช์ 6 ชั้น 120 องศา ซึ่งจะเลือกจากชั้นในการสวิตช์ที่จะสร้างแรงบิดสูงสุดในช่วงเริ่มต้นการทำงาน ซึ่งก็คือตำแหน่งสวิตช์ที่จะสร้างฟลักซ์ในทิศทางที่ตั้งฉากกับฟลักซ์ของโรเตอร์ โดยจะได้แรงบิดเริ่มต้นมากที่สุดที่จะทำให้มอเตอร์เริ่มทำงานได้อย่างนุ่มนวล ส่วนการกำหนดทิศทางการหมุนนั้นจะเป็นไปตามลำดับชั้นของวิธีการขับเคลื่อนแบบสวิตช์ 6 ชั้น 120 องศา ดังรูป



รูปที่ 3.22 ทิศทางของฟลักซ์ลัพธ์ของวิธีการขับเคลื่อนแบบสวิตช์ 6 ชั้น 120 องศา

จากรูปที่ 3.22 จะแสดงทิศทางของฟลักซ์ลัพธ์ตามวิธีการขับเคลื่อนแบบสวิตช์ 6 ชั้น 120 องศา ลูกศรใหญ่แสดงทิศทางของฟลักซ์ลัพธ์ที่ได้จากการสวิตช์ในแต่ละชั้น ลูกศรเล็กแสดงทิศทางของฟลักซ์ที่ขั้วเหนือของโรเตอร์ จากรูปแสดงตัวอย่างให้เห็นว่าถ้าตำแหน่งขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ที่ประมาณได้อยู่ในช่วง 1 ถึง 30 องศา ดังนั้นตำแหน่งสวิตช์เริ่มต้นควรจะเป็น B_H และ C_L และเมื่อนำตำแหน่งขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ที่ประมาณได้ทุกตำแหน่งใน 360 องศา จากตารางที่ 3.3 มาทำการกำหนดร่วมกับตำแหน่งสวิตช์เริ่มต้น จะได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3.4 การกำหนดลำดับชั้นเริ่มต้นการสวิตช์

ตำแหน่งเริ่มต้น ของโรเตอร์	ตำแหน่ง เริ่มต้น ชั้นที่หนึ่ง	ชั้นที่สอง	ชั้นที่สาม	ชั้นที่สี่	ชั้นที่ห้า	ชั้นที่หก
$330^\circ < \theta_0 \leq 360^\circ$	B_H, C_L	B_H, A_L	C_H, A_L	C_H, B_L	A_H, B_L	A_H, C_L
$0^\circ < \theta_0 \leq 30^\circ$						
$30^\circ < \theta_0 \leq 60^\circ$	B_H, A_L	C_H, A_L	C_H, B_L	A_H, B_L	A_H, C_L	B_H, C_L
$60^\circ < \theta_0 \leq 90^\circ$						
$90^\circ < \theta_0 \leq 120^\circ$	C_H, A_L	C_H, B_L	A_H, B_L	A_H, C_L	B_H, C_L	B_H, A_L
$120^\circ < \theta_0 \leq 150^\circ$						
$150^\circ < \theta_0 \leq 180^\circ$	C_H, B_L	A_H, B_L	A_H, C_L	B_H, C_L	B_H, A_L	C_H, A_L
$180^\circ < \theta_0 \leq 210^\circ$						
$210^\circ < \theta_0 \leq 240^\circ$	A_H, B_L	A_H, C_L	B_H, C_L	B_H, A_L	C_H, A_L	C_H, B_L
$240^\circ < \theta_0 \leq 270^\circ$						
$270^\circ < \theta_0 \leq 300^\circ$	A_H, C_L	B_H, C_L	B_H, A_L	C_H, A_L	C_H, B_L	A_H, B_L
$300^\circ < \theta_0 \leq 330^\circ$						

3.2.2 การเริ่มต้นทำงานด้วยวิธีการบังคับเริ่มหมุน

การเริ่มต้นทำงานด้วยวิธีการบังคับเริ่มหมุนนี้ จะมีการกำหนดขนาดของความกว้างพัลส์ และจำนวนพัลส์ที่แน่นอนให้กับตัวสวิตช์ชุดบน ในหนึ่งคาบของการสวิตช์ ของการขับเคลื่อนแบบสวิตช์ 6 ชั้น 120 องศา โดยมีขนาดความกว้างพัลส์ที่มากในช่วงแรกๆ และค่อยๆ ลดขนาดลงตามสัดส่วน ด้วยเหตุผลที่ว่า กระแสที่ได้จากการสวิตช์จะต้องมีขนาดมากพอที่จะสร้างแรงบิดชนะภาระในช่วงเริ่มต้นจนกระทั่งสามารถทำให้มอเตอร์เริ่มหมุนได้ ทั้งนี้ขนาดของกระแสจะขึ้นอยู่กับ การกำหนดค่าแรงดันอ้างอิงเพื่อการจำกัดค่ายอดของกระแสด้วย เพื่อให้การเริ่มต้นการทำงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพจึงต้องมีการปรับจูนให้เหมาะสมกับขนาดค่าพิกัดของกระแสของมอเตอร์แต่ละชนิดด้วย ในขั้นตอนจากนี้ไปก็จะเป็นขั้นตอนที่เป็นไปตามวิธีการเดิมที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2