

การหาพารามิเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรภายในที่ใช้ใน เครื่องปรับอากาศที่เน้นผลกระทบของการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็ก และฮาร์มอนิกของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เจษฎากร จิตติภูมิเดชา^{1*} สุรพงศ์ สุวรรณกวิน²

^{1,2}ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

*อีเมลผู้ประพันธ์บรรณกิจ: 6770023821@student.chula.ac.th

รับต้นฉบับ: 15 ธันวาคม 2568; รับบทความฉบับแก้ไข: 13 มิถุนายน 2569; ตอบรับบทความ: 15 มิถุนายน 2569

เผยแพร่ออนไลน์: 27 สิงหาคม 2569

บทคัดย่อ

มอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรภายในมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในเครื่องปรับอากาศ การปรับความเร็วรอบของคอมเพรสเซอร์จะอาศัยอินเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมแบบไรเซนเซอร์วัดตำแหน่ง โดยสมรรถนะของการควบคุมดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ อย่างไรก็ตามข้อมูลพารามิเตอร์ที่ได้จากผู้ผลิตมอเตอร์เป็นเพียงข้อมูลเบื้องต้นซึ่งยังขาดความแม่นยำเพียงพอ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่มีการปรับปรุงการออกแบบโครงสร้างของมอเตอร์ใหม่เพื่อลดต้นทุน สถานการณ์ดังกล่าวทำให้เกิดการอิมิตของแกนเหล็กได้ง่ายขึ้น จึงมีความต้องการค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่แม่นยำที่พิจารณาถึงผลกระทบของการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็กและฮาร์มอนิกของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วย บทความนี้นำเสนอวิธีการหาพารามิเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรภายในที่เน้นผลกระทบของการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็กและฮาร์มอนิกของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยจะนำเสนอกระบวนการหาพารามิเตอร์อย่างเป็นระบบ ที่ช่วยลดระยะเวลาของขั้นตอนการปรับละเอียดค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการทดสอบ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการพัฒนาผลิตภัณฑ์ได้จริงในภาคปฏิบัติ ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์มีความแม่นยำมากกว่าข้อมูลพารามิเตอร์ที่ได้จากผู้ผลิตมอเตอร์ และทำให้ระบบขับเคลื่อนเครื่องปรับอากาศมีประสิทธิภาพในการควบคุมที่ดีครอบคลุมตลอดช่วงการทำงานของคอมเพรสเซอร์ อีกทั้งยังสามารถลดค่าความผิดพลาดจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ลงได้สูงสุดถึงร้อยละ 52

คำสำคัญ: ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ในเครื่องปรับอากาศ ฮาร์มอนิกของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ มอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรภายใน ผลกระทบของการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็ก การหาพารามิเตอร์

Parameter Identification for Interior Permanent Magnet Synchronous Motors in Air Conditioners Emphasis on the Effects of Magnetic Cross-Coupling and Induced Electromotive Force Harmonics

Jadsadakorn Thitipumdacha^{1*} Surapong Suwankawin²

^{1,2}*Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand*

*Corresponding author e-mail: 6770023821@student.chula.ac.th

Received: 15 December 2025; Revised: 13 June 2026; Accepted: 15 June 2026

Published online: 27 August 2026

Abstract

Interior permanent magnet synchronous motors (IPMSMs) are widely used in air conditioners. The compressor speed is controlled by inverter using sensorless control in which the performance depends mainly on motor parameters. However, the parameters provided by motor manufacturers are preliminary and often insufficiently accurate, especially when the motor structures are redesigned to reduce cost. Such circumstances can easily cause the saturation of iron core and lead to the necessity for accurate identification of motor parameters that should take the effects of magnetic cross-coupling and induced electromotive force harmonics into consideration. This article proposes a systematic procedure for parameter identification for IPMSMs that emphasizes the effects of magnetic cross-coupling and induced electromotive force harmonics. The proposed scheme can optimize the duration of parameters' fine tuning in the testing process and can be practically applied in product development. Experimental results show that the parameters obtained by the proposed method are more accurate than those provided by motor manufacturers. Consequently, the control performance of the drive system of air conditioners can be improved across the entire operating range of compressors, while the rotor position estimation error can be reduced by up to 52 percent.

Keywords: Air-conditioning motor drives, Induced electromotive force harmonics, Interior Permanent Magnet Synchronous Motors (IPMSMs), Magnetic cross coupling effect, Parameter identification

บทนำ

มอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรภายใน (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor: IPMSMs) นิยมใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมที่ต้องการประสิทธิภาพสูง เนื่องจากลักษณะของมอเตอร์ชนิดนี้มีความหนาแน่นกำลังสูง (high power density) เมื่อเทียบกับขนาดของมอเตอร์ [1] อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพสูง ซึ่งการควบคุมมอเตอร์นั้น จำเป็นที่จะต้องมีความรู้ตำแหน่งของโรเตอร์ โดยปกติแล้วจะมีการติดตั้งเซนเซอร์เพื่อที่จะตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ อย่างไรก็ตาม การติดตั้งเซนเซอร์ในมอเตอร์นั้น ทำให้ต้นทุนสูงขึ้น อีกทั้งในการใช้งานมอเตอร์ชนิดนี้ในบางผลิตภัณฑ์ เช่น มอเตอร์ที่ติดตั้งในคอมเพรสเซอร์ที่ใช้ในระบบเครื่องปรับอากาศ ไม่สามารถติดตั้งเซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ได้ เนื่องจากการใช้งานมีสภาวะแวดล้อมอุณหภูมิที่สูง ทำให้มีความจำเป็นที่จะต้องควบคุมมอเตอร์โดยเทคนิคการควบคุมแบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่จำเป็นจะต้องมีการใช้พารามิเตอร์ที่ถูกต้องในการคำนวณ เพื่อให้การควบคุมมอเตอร์มีความแม่นยำ สามารถทำงานในจุดโหลดการทำงานที่ต้องการและมีประสิทธิภาพที่สูง

เนื่องจากแนวโน้มของการออกแบบผลิตภัณฑ์ของอุตสาหกรรมมีการแข่งขันในด้านราคาเพิ่มมากขึ้น ทำให้มอเตอร์ที่ใช้งานมีการลดต้นทุนในด้านวัสดุ ไม่ว่าจะเป็นการลดปริมาณการใช้งานของแม่เหล็กถาวรโดยการลดความหนาของการซ้อนกันของแม่เหล็กถาวร (stack length) การลดปริมาณของขดลวดที่ใช้พันมอเตอร์โดยการลดจำนวนรอบในการพันขดลวด การออกแบบคอมเพรสเซอร์ให้มีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนสูงขึ้น อีกทั้งเพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีประสิทธิภาพที่สูงยิ่งขึ้น จึงมีการออกแบบขอบเขตงานการทำงานของมอเตอร์ให้ขยายเพิ่มมากขึ้น จากสาเหตุเหล่านี้ทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ตามมาดังต่อไปนี้

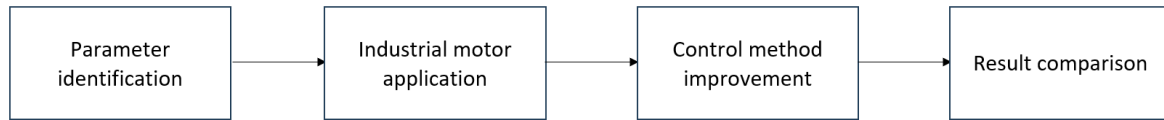
- 1) ค่าความเหนี่ยวนำของมอเตอร์ ณ ที่จุดโหลดทำงานสูงสุดเกิดการอิ่มตัวมาก
- 2) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีฮาร์มอนิกเป็นส่วนประกอบร่วม

จากสาเหตุข้างต้น จะสามารถพิจารณาได้ว่าค่าความเหนี่ยวนำของมอเตอร์ ณ ที่จุดโหลดทำงานเกิดการอิ่มตัวมากทำให้ค่าความเหนี่ยวนำได้รับผลกระทบจากการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็กระหว่างแกน d และแกน q ที่มากยิ่งขึ้น [2] ทำให้ค่าความผิดพลาดระหว่างค่าความเหนี่ยวนำที่ได้รับจากผู้ผลิต กับค่าความเหนี่ยวนำของมอเตอร์ที่เกิดขึ้นจริงมีค่ามากยิ่งขึ้น ส่งผลให้การคำนวณการควบคุมมอเตอร์เกิดความผิดพลาดที่สูงขึ้น อีกทั้งจากการที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีฮาร์มอนิกเป็นส่วนประกอบร่วมด้วย ทำให้เกิดระลอกแรงบิดที่สูง ส่งผลต่อการสั่นสะเทือนทางกลของมอเตอร์ในผลิตภัณฑ์ ซึ่งทำให้การออกแบบการควบคุมมอเตอร์โดยใช้พารามิเตอร์พื้นฐานของมอเตอร์ที่ได้รับจากผู้ผลิตมีสมรรถนะในการควบคุมไม่เพียงพอ และทำให้เกิดปัญหาที่ไม่สามารถควบคุมมอเตอร์ ณ จุดโหลดทำงานที่ต้องการได้

งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง จะนำเสนอการตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ที่ได้รับผลกระทบจากการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็ก โดยจะทำการตรวจสอบค่าพารามิเตอร์จากการจำลองมอเตอร์ด้วยวิธี Finite Element Analysis (FEA) [3], [4], [5] ซึ่งต้องพึ่งพาข้อมูลเชิงลึกจากผู้ผลิตมอเตอร์ ทำให้ต้องใช้ระยะเวลาในการขอข้อมูลและทำการจำลอง อีกทั้งบางข้อมูลยังเป็นความลับของผู้ผลิต ทำให้การปฏิบัติจริงในอุตสาหกรรมทำได้ยาก นอกจากนี้ถึงแม้ว่าวิธีการและขั้นตอนในการหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหล่านี้จะมีการเผยแพร่ทางวิชาการอย่างแพร่หลาย [2], [6] แต่ในบริบทของการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมจริง จะต้องมีการพัฒนาระบบการทดสอบหรือขั้นตอนการทดลองจริงในทางปฏิบัติที่ชัดเจน เพื่อให้วิศวกรผู้ออกแบบสามารถนำขั้นตอนไปประยุกต์ใช้ได้จริงอย่างเป็นระบบ ถึงแม้จะมีงานวิจัยที่มีการประยุกต์ใช้กับมอเตอร์ในอุตสาหกรรม [7], [8] แต่ว่าในงานวิจัย Yin et al. [7] ไม่ได้กล่าวถึงขั้นตอนการทดลองอย่างเป็นระบบและแสดงรายละเอียดขั้นตอนการทดลอง รวมทั้งไม่ได้กล่าวถึงการนำผลลัพธ์การทดลองไปประยุกต์การใช้งาน นอกจากนี้ในงานวิจัย [8] ถึงแม้จะมีการกล่าวถึงการตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ในอุตสาหกรรม แต่ว่าในงานวิจัยไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบจากการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็ก อีกทั้งงานวิจัยในอดีต [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8] ไม่ได้กล่าวถึงเกณฑ์ (criteria) ที่ใช้ในการตัดสินใจอย่างเป็นขั้นตอนและเป็นรูปธรรม เพื่อกำหนดว่าคุณลักษณะใดของมอเตอร์ที่ควรจะมีการพิจารณาถึงผลกระทบของการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็กและฮาร์มอนิกของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงจะเสนอกระบวนการตรวจสอบหาพารามิเตอร์เพื่อใช้กับมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรภายในโดยพิจารณาผลกระทบของการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็กและฮาร์มอนิกของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยจะนำเสนอกระบวนการหาพารามิเตอร์อย่างเป็นระบบ ที่ช่วยลดระยะเวลาของขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการทดสอบ และเพื่อเป็นส่วนช่วยสำคัญในการนำไป

ประยุกต์ใช้ในกระบวนการพัฒนาผลิตภัณฑ์ได้จริงในภาคปฏิบัติ โดยจะตรวจสอบผลลัพธ์จากการนำพารามิเตอร์ที่ได้จากกระบวนการตรวจสอบไปปรับปรุงสมรรถนะของระบบขับเคลื่อนแบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งของมอเตอร์ซึ่งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรภายในสำหรับระบบเครื่องปรับอากาศ และเปรียบเทียบผลลัพธ์กับระบบที่ใช้พารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยตรงจากผู้ผลิต โดยสามารถเขียนเป็นแผนภาพแนวคิดการวิจัยได้ดังรูปที่ 1 และตารางการเปรียบเทียบระหว่างวิธีเดิมในอดีตกับวิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ดังตารางที่ 1



รูปที่ 1: แผนภาพแนวคิดการวิจัย

ตารางที่ 1: การเปรียบเทียบระหว่างวิธีเดิมในอดีตกับวิธีที่นำเสนอในงานวิจัย

วิธีการ	ค่าพารามิเตอร์	ค่าความเหนี่ยวนำพิจารณาผลกระทบจากการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็ก		แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำพิจารณาส่วนประกอบฮาร์มอนิก	
		หาค่าพารามิเตอร์	ประยุกต์ใช้ในสมการควบคุม	หาค่าพารามิเตอร์	ประยุกต์ใช้ในสมการควบคุม
วิธีเดิมในอุตสาหกรรม	ได้รับจากผู้ผลิตมอเตอร์	ไม่ได้พิจารณา	ไม่ได้พิจารณา	ไม่ได้พิจารณา	ไม่ได้พิจารณา
วิธีเดิมในงานวิจัยอดีต [2], [6], [7]	ตรวจสอบค่าพารามิเตอร์	พิจารณา	ไม่ได้พิจารณา	ไม่ได้พิจารณา	ไม่ได้พิจารณา
วิธีเดิมในงานวิจัยอดีต [3], [4]	จำลอง (simulation)	พิจารณา	ไม่ได้พิจารณา	ไม่ได้พิจารณา	ไม่ได้พิจารณา
วิธีเดิมในงานวิจัยอดีต [5]	จำลอง (simulation)	พิจารณา	พิจารณา	ไม่ได้พิจารณา	ไม่ได้พิจารณา
วิธีเดิมในงานวิจัยอดีต [9], [10]	ตรวจสอบค่าพารามิเตอร์	ไม่ได้พิจารณา	ไม่ได้พิจารณา	พิจารณา	พิจารณา
วิธีที่นำเสนอ	ตรวจสอบค่าพารามิเตอร์	พิจารณา	พิจารณา	พิจารณา	พิจารณา

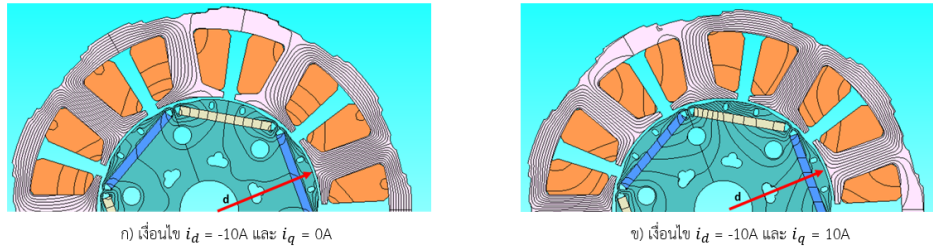
ระเบียบวิธีวิจัย

1. กระบวนการสำหรับการตรวจสอบหาพารามิเตอร์

1.1 การตรวจสอบหาค่าความเหนี่ยวนำที่คำนึงถึงผลกระทบจากการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็ก

โดยปกติแล้วการคำนวณพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในกรอบอ้างอิงหมุนแบบ 2 มิติ (แกน d, q) จะสามารถพิจารณาได้ว่าค่าความเหนี่ยวนำของแกน d และแกน q นั้นเป็นอิสระต่อกันเพื่อความสะดวกในการคำนวณ แต่ในความเป็นจริงแล้วค่าความเหนี่ยวนำของแกน d และแกน q นั้นมีผลกระทบจากการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็กซึ่งกันและกันอยู่ จากรูปที่ 2 จะแสดงได้ว่าเมื่อพิจารณาฟลักซ์แม่เหล็กบนแกน d ที่กระแส i_d มีค่าคงที่ (i_d มีค่า -10A) เส้นแรงฟลักซ์แม่เหล็กจะมีค่าเปลี่ยนไป เมื่อกระแส i_q มีค่าเพิ่มมากขึ้น (i_q เพิ่มขึ้นจาก 0A เป็น 10A)

โดยผลกระทบจากการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็กจะมีค่ามากขึ้นเมื่อมอเตอร์ทำงาน ณ ที่จุดโหลดทำงานที่ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำเกิดการอิ่มตัวของแกนเหล็กอย่างมาก [2] ซึ่งมอเตอร์ที่มีค่า L_d, L_q ที่ใกล้เคียงกัน หรือข้อมูลค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จากผู้ผลิต มีจุดทำงานที่ L_q มีค่าน้อยกว่า L_d จะได้รับผลกระทบสูง เนื่องจากการคำนวณแรงบิดที่เกิดจากความต้านทานแม่เหล็ก (reluctance torque) ในมอเตอร์ซึ่งโครนัสแม่เหล็กถาวรภายใน จะพิจารณาถึงค่าความเป็นขั้วขึ้น ($L_q - L_d$) ดังนั้นถ้าจุดทำงานที่ L_q มีค่าน้อยกว่า L_d และไม่ได้พิจารณาผลกระทบจากการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็ก จะทำให้ค่าผิดพลาดของการควบคุมมอเตอร์มีค่ามาก



รูปที่ 2: ฟลักซ์แม่เหล็กบนแกน d พิจารณาผลกระทบจากการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็ก

ค่าความเหนี่ยวนำแกน d และแกน q (L_d , L_q) ที่คำนึงถึงผลกระทบจากการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็กสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (1) และ (2)

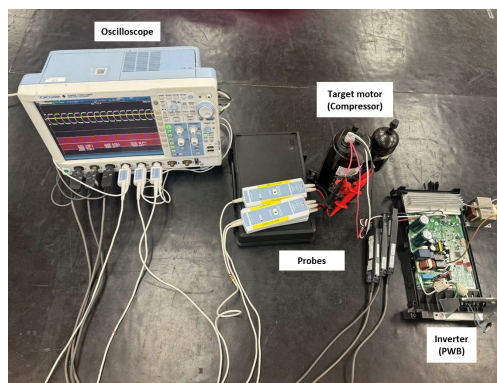
$$L_q(i_d, i_q)i_q = L_{qq}(0, i_q)i_q + L_{qd}(i_d, i_q)i_d \quad (1)$$

$$L_d(i_d, i_q)i_d = L_{dd}(i_d, 0)i_d + L_{dq}(i_d, i_q)i_q \quad (2)$$

งานวิจัยในอดีตส่วนใหญ่จะนิยามผลกระทบจากการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็กที่มีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำแกน d และแกน q (L_d , L_q) โดยวิธีการจำลองมอเตอร์และสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในมอเตอร์ด้วยวิธี Finite Element Analysis (FEA) [3], [4], [5] แล้วจึงนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้มาใช้งานต่อ อย่างไรก็ตามวิธีการจำลองมอเตอร์นั้นทำได้ยากในอุตสาหกรรมซึ่งต้องพึ่งพาข้อมูลเชิงลึกจากผู้ผลิตมอเตอร์ อีกทั้งบางข้อมูลยังเป็นความลับของผู้ผลิต งานวิจัยนี้จึงนำวิธีการทดสอบหาค่าผลกระทบจากการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็กที่มีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำแกน d และแกน q จาก [2], [6] มาประยุกต์ใช้

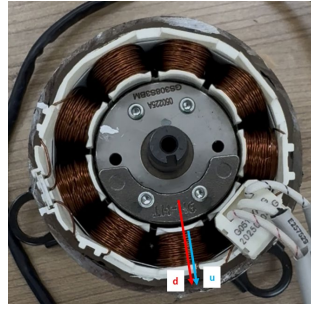
ในการทดสอบหาค่าความเหนี่ยวนำแกน d และแกน q (L_d , L_q) ที่มีผลกระทบจากการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็กนั้น จะทำได้โดยใช้อุปกรณ์และการติดตั้งการทดสอบดังรูปที่ 3 โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังต่อไปนี้

กรณีหาค่าผลกระทบจากการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็กจากแกน d ที่มีต่อความเหนี่ยวนำแกน q (L_{dq})



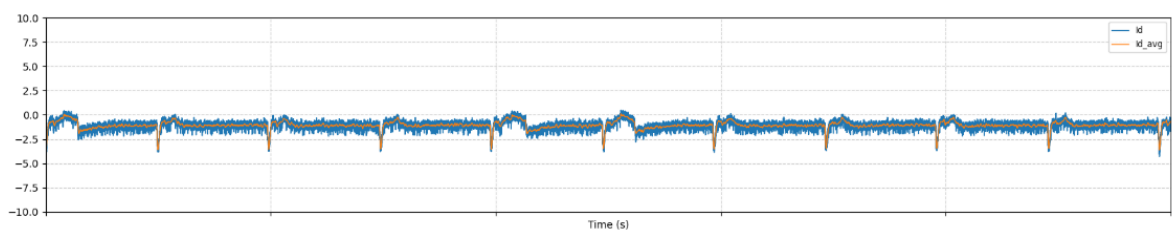
รูปที่ 3: อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาค่าความเหนี่ยวนำของมอเตอร์

1) ทำการล่อกรอเตอร์เข้าที่มุมใด ๆ และเลือกค่ามุมในขั้นตอนแปลงแกนระหว่าง 2 มติ d, q และแกน 3 มติ u, v, w ให้ตรงกับมุมที่ทำการล่อกรอเตอร์ (เช่น มุม 0 องศา เทียบกับขดลวดแกน u) ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4: ตัวอย่างการล่อกรอเตอร์ที่มม 0 องศา (ทำการเชื่อมยึดติดแกนโรเตอร์เข้ากับฐาน)

2) เลือกจ่ายกระแสคำสั่งแกน d (i_d^*) -1A ผ่านการควบคุมแบบย้อนกลับเฉพาะแกน d ดังรูปที่ 5

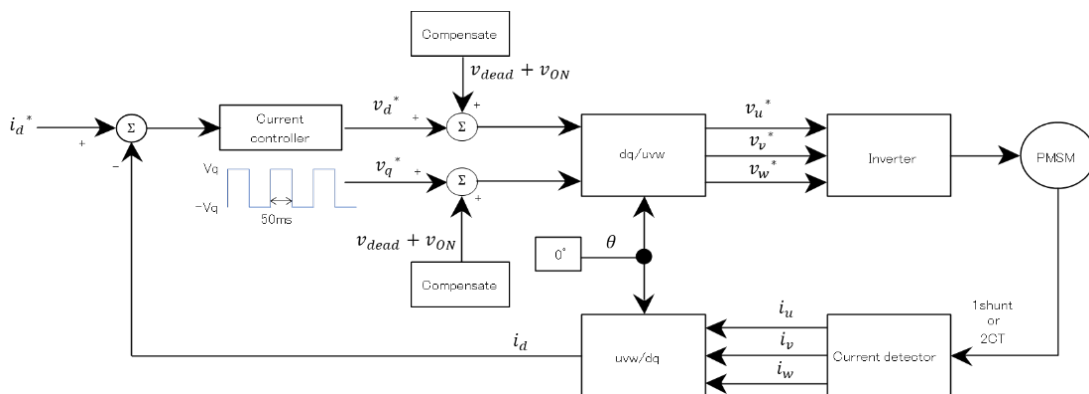


รูปที่ 5: กราฟแสดงผลพัลส์จ่ายกระแสคำสั่งแกน d (i_d^*) -1A

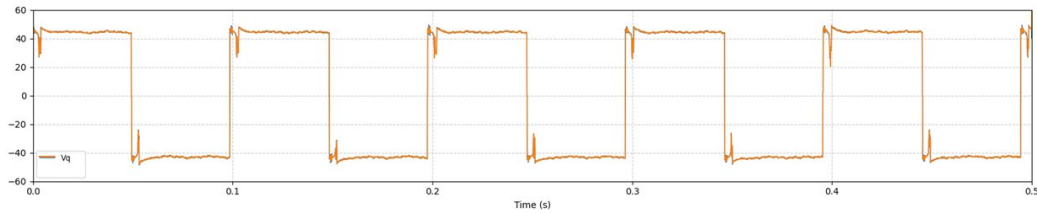
3) เลือกจ่ายแรงดันคำสั่งแกน q (v_q^*) ที่มีสัญญาณเป็นพัลส์ฝั่งบวกและฝั่งลบ โดยเลือกขนาดแรงดันให้ครอบคลุมกระแสแกน q สูงสุดที่มีการใช้งาน สามารถคำนวณ v_q^* คร่าว ๆ ได้จากสมการที่ (3)

$$v_q^* = i_{q,max} \times R_s \quad (3)$$

โดยในขั้นตอนการคำนวณหา v_d^*, v_q^* สำหรับจ่ายให้อินเวอร์เตอร์ (inverter) ในระบบควบคุม จำเป็นที่จะต้องทำการชดเชยแรงดันที่ได้รับผลกระทบจากเวลาเว้นว่าง (dead time) ของอินเวอร์เตอร์ และผลกระทบจากแรงดันตกคร่อมที่สูญเสียที่อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ในวงจรอินเวอร์เตอร์ด้วย เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ v_d, v_q ที่เกิดขึ้นบนขดลวดมอเตอร์ มีค่าตรงกับแรงดันคำสั่ง v_d^*, v_q^* ที่ต้องการ จะได้ระบบควบคุมสำหรับทดสอบดังรูปที่ 6 และได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 7



รูปที่ 6: ระบบควบคุมที่ใช้สำหรับทดสอบหาค่า L_{qd}

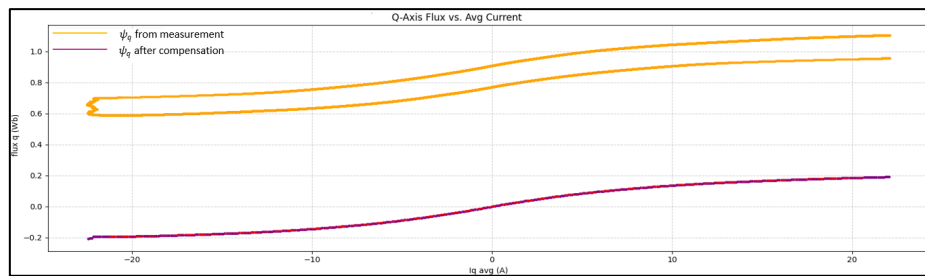


รูปที่ 7: กราฟแสดงผลพัลส์จ่ายแรงดันค่าสั่งแกน q (v_q^*) 45V

4) ขณะที่จ่ายแรงดันไปยังมอเตอร์ เนื่องจากโรเตอร์ไม่สามารถหมุนได้ ($\omega = 0$) ทำให้เราสามารถหาค่าฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนแกน q (ψ_q) ได้ดังสมการที่ (4)

$$\psi_q(\tau) = \int_0^t (v_q(\tau) - Ri_q(\tau)) d\tau \quad (4)$$

5) นำค่าที่ได้จากขั้นตอนที่ 4 มาพล็อตกราฟระหว่าง ψ_q และ i_q โดยเลือกข้อมูลมา 1 รอบวัฏจักรแม่เหล็ก โดยที่นำข้อมูล ψ_q ที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยที่กระแส i_q เดียวกัน และเนื่องจากกระแหว่างการทดสอบอาจจะมีฟลักซ์ตกค้างอยู่ด้วย จึงทำการชดเชยกราฟ ψ_q ให้จุดที่ $i_q = 0$ มีค่าเฉลี่ยของ $\psi_q = 0$ ตัวอย่างของผลลัพธ์ที่ได้ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8: ตัวอย่างกราฟระหว่าง ψ_q และ i_q

6) คำนวณหาค่า L_q ที่สัมพันธ์กับค่า i_q ในรูปของ $L_q(i_d, i_q)$ ดังสมการที่ (5)

$$L_q(-1, i_q) = \frac{\psi_q}{i_q} \quad (5)$$

7) ทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2 จนถึงขั้นตอนที่ 6 โดยที่เปลี่ยนค่า i_d^* ที่ละค่าให้ครอบคลุมตั้งแต่กระแสน้อยที่สุด ไปจนถึงกระแสสูงสุดที่มีการใช้งาน (อาทิเช่น $i_d^* = -14A, \dots, -1A, 0A, 1A, \dots, 5A$ สำหรับมอเตอร์ที่มีการใช้งานกระแสแกน d ตั้งแต่ -14A ไปจนถึง 5A)

8) สามารถหาค่า L_{qd} ได้ดังสมการที่ (6) โดยใช้ค่า L_q จากสมการที่ (5) และค่า L_{qq} คำนวณจากกรณี $i_d = 0$

$$L_{qd}(i_d, i_q) = \frac{L_q(i_d, i_q)i_q - L_{qq}(0, i_q)i_q}{i_d} \quad (6)$$

โดยขั้นตอนการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2: สรุปรขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอน	วิธีการ	ผลลัพธ์
1	ทำการลือคตำแหน่งของโรเตอร์	โรเตอร์ไม่สามารถขยับได้ (ไม่เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ)
2	จ่ายกระแสคำสั่งแกน d (i_d^*)	ได้กระแสแกน d ที่เป็นค่าคงที่
3	จ่ายแรงดันคำสั่งแกน q (v_q^*) เป็นพัลส์ฝั่งบวก และฝั่งลบ	ได้กระแสแกน q สลับฝั่งบวกและลบซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลา ณ กระแสแกน d ค่าคงที่
4	คำนวณหาค่าฟลักซ์แม่เหล็กแกน q	ได้ค่าฟลักซ์แม่เหล็กแกน q ที่ขึ้นอยู่กับ i_d และ i_q
5	พล็อตกราฟระหว่าง ψ_q และ i_q	ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ψ_q และ i_q ณ กระแสแกน d ค่าคงที่
6	คำนวณหา L_q	ได้ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง L_q และ i_q ณ กระแสแกน d ค่าคงที่
7	ซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2-6 โดยเปลี่ยน ค่ากระแสคำสั่งแกน d (i_d^*)	ได้ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง L_q และ i_q ณ กระแสแกน d ของแต่ละ ค่าคงที่
8	คำนวณหา L_{dq}	ได้ค่า L_{dq} ของแต่ละกระแส i_d และ i_q

กรณีหาค่าผลกระทบจากการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็กจากแกน q ที่มีต่อความเหนี่ยวนำแกน d (L_{dq})

ขั้นตอนในการหา L_{dq} นั้นให้ทำเหมือนกรณีหาค่า L_{qd} แต่เปลี่ยนจากจ่ายกระแสคำสั่งแกน d (i_d^*) และแรงดันคำสั่งแกน q (v_q^*) ไปเป็นจ่ายกระแสคำสั่งแกน q (i_q^*) และแรงดันคำสั่งแกน d (v_d^*) แทน จะสามารถหาค่า L_{dq} ได้ ดังสมการที่ (7)

$$L_{dq}(i_d, i_q) = \frac{L_d(i_d, i_q)i_d - L_{dd}(i_d, 0)i_d}{i_q} \quad (7)$$

อย่างไรก็ตาม ค่าพารามิเตอร์ $L_q, L_d, L_{qq}, L_{dd}, L_{qd}, L_{dq}$ ได้จากกระบวนการสำหรับการตรวจสอบหาพารามิเตอร์ที่ได้เสนอไปนั้นมีข้อจำกัดในการนำไปใช้ เนื่องจากพารามิเตอร์มีจำนวนมาก และการทำข้อมูลแบบตารางค้นหา (lookup table) ไม่สามารถใช้งานได้กับผลิตภัณฑ์ที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุม ซึ่งมีข้อจำกัดด้านหน่วยความจำ จึงจำเป็นต้องทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ L_q, L_d, L_{qq}, L_{dd} ด้วยการประมาณพหุนามแบบสโปลน์ 3 มิติ และจะทำการลดความละเอียดของการประมาณพหุนามแบบสโปลน์ 3 มิติลง โดยที่ค่าประมาณที่คำนวณได้ ยังมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และจำนวนเซตของค่าสัมประสิทธิ์มีจำนวนไม่มากเกินไป งานวิจัยนี้จึงเลือกค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นให้ผ่านเงื่อนไขทางสถิติของค่าความผันแปรของตัวแปร (R-squared) > 0.95 ค่าความแปรปรวน (variance) < 1×10^{-6} และมีค่าความผิดพลาดจากการประมาณค่าไม่เกิน 1mH โดยทุกค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากพหุนามแบบสโปลน์ 3 มิติแบบลดความละเอียดจะต้องผ่านเงื่อนไขทั้งสามข้อข้างต้น แล้วจึงนำค่า สัมประสิทธิ์ไปใช้ในการคำนวณความผิดพลาดของค่าจริงกับค่าประมาณของตำแหน่งของโรเตอร์ในการควบคุม ดังสมการที่ (8) และ (9) แล้วจึงไปหาค่า L_{qd}, L_{dq} ด้วยสมการที่ (6) และ (7) ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์

$$L_q(i_d, i_q) = A_{00} + A_{10}i_d + A_{01}i_q + A_{20}i_d^2 + A_{11}i_di_q + A_{02}i_q^2 \quad (8)$$

$$L_d(i_d, i_q) = B_{00} + B_{10}i_d + B_{01}i_q + B_{20}i_d^2 + B_{11}i_di_q + B_{02}i_q^2 \quad (9)$$

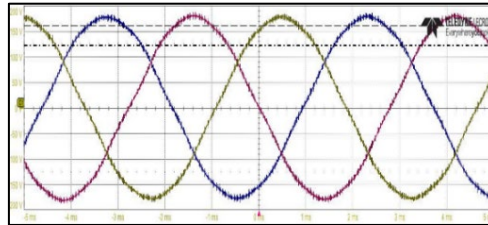
เมื่อ $A_{00}, A_{10}, A_{01}, A_{20}, A_{11}, A_{02}$ คือค่าสัมประสิทธิ์ของ L_q ในแต่ละเงื่อนไข i_d, i_q

และ $B_{00}, B_{10}, B_{01}, B_{20}, B_{11}, B_{02}$ คือค่าสัมประสิทธิ์ของ L_d ในแต่ละเงื่อนไข i_d, i_q

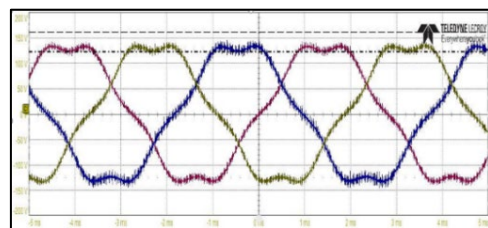
1.2 การตรวจสอบหาฟลักซ์แม่เหล็กที่คำนึงถึงผลกระทบจากการที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีฮาร์มอนิกเป็นส่วนประกอบ

โดยปกติแล้วมอเตอร์เชิงโรตารีแม่เหล็กถาวรภายในจะมีลักษณะของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีรูปร่างเป็นไซน์ หรือมีส่วนประกอบของฮาร์มอนิกให้น้อยที่สุด ดังรูปที่ 9 เพื่อทำให้แรงบิดที่เกิดจากกระแสของสเตเตอร์ที่มีรูปร่างเป็นไซน์ กับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่าหนึ่ง อย่างไรก็ตามแนวโน้มในปัจจุบัน ผู้ผลิตมอเตอร์ได้มีการเสนอมอเตอร์ที่มีลักษณะของ

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีรูปร่างไม่เป็นไซน์ ดังรูปที่ 10 เพื่อให้ได้ราคาคำนวณที่ถูกต้อง และได้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่สูงขึ้น ซึ่งการควบคุมมอเตอร์แบบนี้ด้วยระบบการควบคุมแบบเดิมที่มีการป้อนแค่กระแสสเตเตอร์รูปร่างเป็นไซน์ จะทำให้เกิดระลอกแรงบิดขึ้นได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำสัญญาณของมอเตอร์ที่มีลักษณะดังรูปที่ 10 มาหาค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง เพื่อจะขจัดเซาะระลอกแรงบิดที่เกิดขึ้นในขั้นตอนต่อไปได้

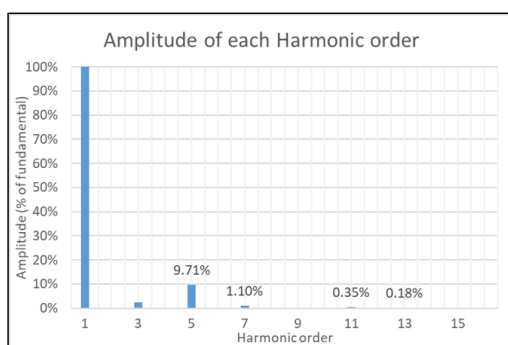


รูปที่ 9: มอเตอร์ที่มีลักษณะของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีรูปร่างเป็นไซน์

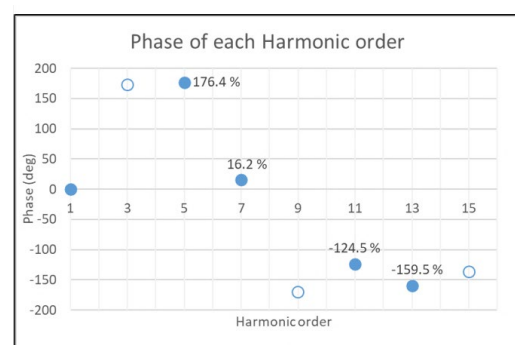


รูปที่ 10: มอเตอร์ที่มีลักษณะของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีรูปร่างไม่เป็นไซน์ และมีฮาร์มอนิกเป็นส่วนประกอบ

จากข้อมูลแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีรูปร่างไม่เป็นไซน์ที่ได้มาจากผู้ผลิตดังรูปที่ 10 สามารถนำไปหาส่วนประกอบของฮาร์มอนิกได้โดยการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform: FFT) ซึ่งผลลัพธ์จะได้เป็นค่าแอมพลิจูดและมุมเลื่อนเฟสของฮาร์มอนิกแต่ละฮาร์มอนิกดังรูปที่ 11 เนื่องจากฮาร์มอนิกอันดับ 3, 9, 15, ... ในระบบมอเตอร์ 3 เฟส 3 สายของแต่ละเฟส มีค่ารวมกันแล้วจะหักล้างกันเป็นศูนย์จึงไม่พิจารณา จากนั้นจะสามารถหาค่าพลักซ์แม่เหล็กที่มีส่วนประกอบของฮาร์มอนิกได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้



ก) แอมพลิจูด



ข) มุมเลื่อนเฟส

รูปที่ 11: ผลลัพธ์การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว

จากรูปที่ 11 เนื่องจากแอมพลิจูดของฮาร์มอนิกมีค่าที่เป็นนัยสำคัญคือฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 และมุมเลื่อนเฟสของฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 มีค่าประมาณ 180 องศา ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการนำไปใช้งาน จึงนิยามพลักซ์แม่เหล็กเฟส u ดังสมการที่ (10)

$$\psi_u = \psi_1 \cos \theta + \psi_5 \cos 5\theta \quad (10)$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์แม่เหล็กและแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำดังสมการที่ (11) และสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีส่วนประกอบของฮาร์มอนิกดังสมการที่ (12)

$$E_u = \frac{d}{dt} \psi_u \quad (11)$$

$$E_u = -\omega_e(\psi_1 \sin\theta + 5\psi_5 \sin 5\theta) \quad (12)$$

ดังนั้นจากค่า ω_e ที่ได้มาจากข้อมูลแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้มาจากผู้ผลิต และ ψ_1 กับ ψ_5 จากผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว จึงสามารถนำไปคำนวณย้อนกลับในสมการที่ (10) เพื่อหาฟลักซ์แม่เหล็กเฟส u ที่มีส่วนประกอบฮาร์มอนิกได้

2. การปรับปรุงประสิทธิภาพการควบคุมมอเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง

2.1 สมการการประมาณตำแหน่งของโรเตอร์จากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

แบบจำลองของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรภายในเมื่อพิจารณาบนแกนหมุน แสดงได้ดังสมการ (13)

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_d & -\omega_e L_q \\ \omega_e L_d & R_s + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \psi_a \end{bmatrix} \quad (13)$$

เนื่องจากแบบจำลองจากสมการ (13) มีความไม่สมมาตรกันของค่าเหนี่ยวนำบนแกน d และ q จึงจำเป็นต้องเขียนแบบจำลองของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรภายในเมื่อพิจารณาบนแกนหมุนใหม่ โดยใช้วิธี Extended back EMF [11] แสดงได้ดังสมการ (14)

$$\begin{bmatrix} \hat{v}_d \\ \hat{v}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_d & -\omega_e L_q \\ \omega_e L_d & R_s + pL_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{E}_{ex,d} \\ \hat{E}_{ex,q} \end{bmatrix} \quad (14)$$

นิยาม

$$\begin{bmatrix} \hat{E}_{ex,d} \\ \hat{E}_{ex,q} \end{bmatrix} \triangleq E_{ex} \begin{bmatrix} \sin\Delta\theta \\ \cos\Delta\theta \end{bmatrix} + \Delta\omega L_d \begin{bmatrix} \hat{i}_q \\ -\hat{i}_d \end{bmatrix}$$

โดยที่ $\Delta\omega$ คือค่าความผิดพลาดของค่าจริงกับค่าประมาณของความเร็วของโรเตอร์ และปกติแล้วจะประมาณได้ว่ามีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อนำความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนเหนี่ยวนำมาพิจารณา จะสามารถหาความผิดพลาดของค่าจริงกับค่าประมาณของตำแหน่งของโรเตอร์ได้ แสดงได้ดังสมการที่ (15)

$$\Delta\hat{\theta} = \tan^{-1} \left(\frac{\hat{E}_{ex,d}}{\hat{E}_{ex,q}} \right) \approx \frac{\hat{E}_{ex,d}}{\hat{E}_{ex,q}} \quad (15)$$

โดยปกติแล้วความผิดพลาดของค่าจริงกับค่าประมาณของตำแหน่งของโรเตอร์จะมีการควบคุมแบบย้อนกลับให้ได้ค่าใกล้เคียงศูนย์ ทำให้สมการที่ (15) สามารถเขียนในรูปของพารามิเตอร์ที่อยู่ในแกน d, q ได้ดังสมการที่ (16)

$$\Delta\theta = \frac{v_d - R_s i_d + pL_d i_d + \omega_e L_q i_q}{v_q - R_s i_q + pL_d i_q - \omega_e L_q i_d} \quad (16)$$

อย่างไรก็ตามการประมาณตำแหน่งของโรเตอร์จากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยใช้วิธี Extended back-EMF [11] ไม่ได้พิจารณาถึงผลกระทบจากการที่แกนเหล็กอิ่มตัว และผลกระทบจากการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็กระหว่างแกน d และแกน q

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนี่ยวนำที่คิดถึงผลกระทบจากการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็กและฟลักซ์แม่เหล็ก จะเขียนได้ดังสมการที่ (17) และ (18)

$$\psi_d(i_d, i_q) = L_{dd}i_d + L_{dq}i_q + \psi_a \quad (17)$$

$$\psi_q(i_d, i_q) = L_{qq}i_q + L_{qd}i_d \quad (18)$$

ดังนั้นเพื่อที่จะเพิ่มความแม่นยำของการประมาณตำแหน่งของโรเตอร์ จึงจำเป็นที่จะต้องคิดถึงผลกระทบจากการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็กในการคำนวณแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้วิธี Extended back EMF [5] ดังแสดงในสมการที่ (19)

$$\Delta\theta = \frac{v_d - R_s i_d + pL_{dd}i_d + \omega_e L_{qq}i_q + \omega_e L_{qd}i_d}{v_q - R_s i_q + pL_{dd}i_q - \omega_e L_{qq}i_d + \omega_e L_{qd}i_q} \quad (19)$$

2.2 สมการการคำนวณแรงบิดของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรภายใน

จากสมการแรงบิดของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรภายในทั่วไป (20)

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{P}{2}(\psi_d i_q - \psi_q i_d) \\ &= \frac{P}{2}(\psi_a i_q) + \frac{P}{2}(L_d - L_q)i_d i_q \triangleq T_{avg} \end{aligned} \quad (20)$$

การปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่มีส่วนประกอบของฮาร์มอนิกกับกระแสสเตเตอร์ที่เป็นสัญญาณไซน์ ทำให้เกิดระลอกของแรงบิดที่ไม่ต้องการขึ้นมา ทำให้มอเตอร์มีประสิทธิภาพลดลง เกิดการสั่น และมีผลกระทบต่อการควบคุมมอเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง [9] นิยามฟลักซ์แม่เหล็กที่คำนึงถึงผลกระทบจากการที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีส่วนผสมของฮาร์มอนิก จะเขียนได้ดังสมการที่ (21) และ (22)

$$\psi_d = L_d i_d + \psi_a + \psi_{d,har} \quad (21)$$

$$\psi_q = L_q i_q + \psi_{q,har} \quad (22)$$

จากสมการข้างต้นจะสามารถหาสมการแรงบิดของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรภายใน กรณีที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีส่วนประกอบของฮาร์มอนิกได้ดังสมการที่ (23)

$$T_e = \frac{P}{2}((\psi_a + \psi_{d,har})i_q - \psi_{q,har}i_d) + \frac{P}{2}(L_d - L_q)i_d i_q \triangleq T_{avg} + \Delta T \quad (23)$$

เมื่อ ΔT คือระลอกของแรงบิด

งานวิจัยในอดีตพิจารณาการลดระลอกของแรงบิดโดยการป้อนกระแสฮาร์มอนิกเข้าไปยังกระแสคำสั่งโดยอาศัยการพิจารณาจากค่าฟลักซ์เชื่อมโยงที่มีส่วนผสมของฮาร์มอนิก [10] แต่ว่าสมการที่ใช้ในงานวิจัย มีการชดเชยทั้งกระแสคำสั่งแกน d (i_{dh}^*) และกระแสคำสั่งแกน q (i_{qh}^*) งานวิจัยนี้จะเสนอแนวคิดที่จะทำการชดเชยเฉพาะกระแสคำสั่งแกน q (i_{qh}^*) เพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานจริงกับการควบคุมแบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งของมอเตอร์ในอุตสาหกรรม

นิยามกระแสคำสั่งแกน q (i_q^*) รวมทั้งพิจารณากระแสคำสั่งชดเชย i_{qh}^* ได้ดังสมการที่ (24)

$$i_q^* = i_{q0}^* + i_{qh}^* \quad (24)$$

และจากสมการที่ (10) เมื่อทำการแปลงแกนฟลักซ์แม่เหล็กเฟส u, v, w ไปบนแกน d, q จะสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (25) และ (26)

$$\psi_{d,har} = \psi_5 \cos 6\theta \quad (25)$$

$$\psi_{q,har} = -\psi_5 \sin 6\theta \quad (26)$$

สามารถทำการหาค่ากระแสคำสั่งชดเชย i_{qh}^* ที่ทำให้ระลอกของแรงบิด ΔT มีค่าเท่ากับศูนย์ ได้ดังสมการที่ (27)

$$i_{qh}^* = \frac{(-\psi_5 \cos 6\theta \times i_{q0}^* - \psi_5 \sin 6\theta \times i_{d0}^*)}{(L_d - L_q)i_{d0}^* + \psi_a} \quad (27)$$

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

1. ผลลัพธ์ของกระบวนการสำหรับการตรวจสอบหาพารามิเตอร์

ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกระบวนการสำหรับการตรวจสอบหาพารามิเตอร์ และผลลัพธ์จากการประยุกต์ใช้พารามิเตอร์ที่ได้มาเพื่อทดสอบการปรับปรุงประสิทธิภาพการควบคุมมอเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง จะถูกตรวจสอบผลลัพธ์โดยการทดลองการทำงานของระบบที่ต่อเข้ากับมอเตอร์ตัวอย่างในคอมพิวเตอร์ของผลิตภัณฑ์เครื่องปรับอากาศ ซึ่งใช้ระบบควบคุมแบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง และมีพารามิเตอร์ที่ได้รับจากผู้ผลิตตามตารางที่ 3 และ 4

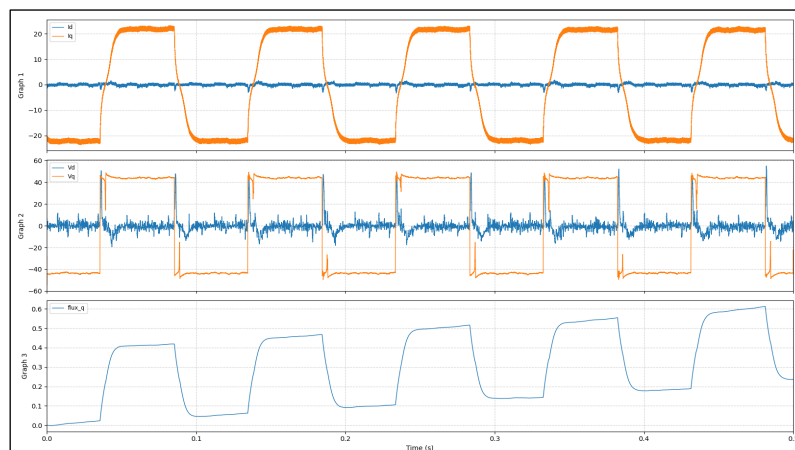
ตารางที่ 3: พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของมอเตอร์ที่ได้จากผู้ผลิต

จำนวนขั้ว	วิธีการพันขดลวด	จำนวน slot	J
6	Concentrated winding	9	$1.63[10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^2]$
ψ_a	R	$N_{m, rated}$	V_{rated}
0.1496[Wb]	3.55[Ω]	10-120[rps]	380[V]

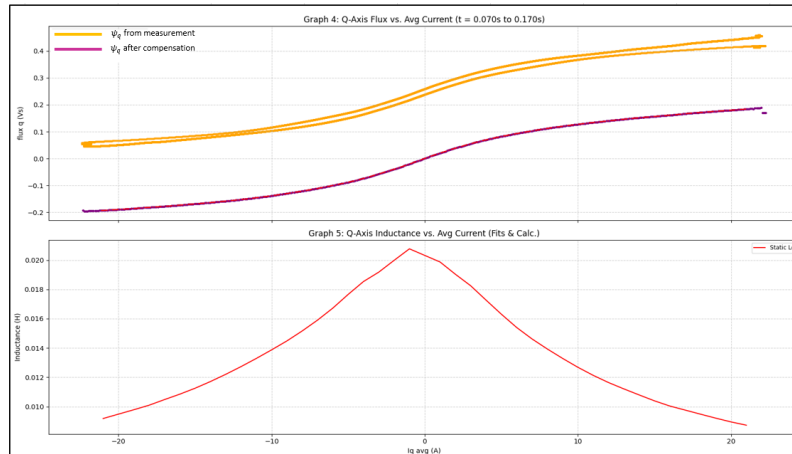
ตารางที่ 4: ค่าความเหนี่ยวนำของมอเตอร์ที่ได้จากผู้ผลิต

พารามิเตอร์	ข้อมูลพารามิเตอร์จากผู้ผลิต									
I_d [A]	1.73	3.46	5.20	6.93	8.66	10.39	12.12	13.86	15.59	17.32
L_d [mH]	10.52	10.58	10.25	9.98	9.76	9.57	9.40	9.26	9.11	8.98
I_q [A]	1.73	3.46	5.20	6.93	8.66	10.39	12.12	13.86	15.59	17.32
L_q [mH]	17.88	17.10	16.32	15.46	14.59	13.77	12.98	12.14	11.38	10.71

ผลการทดสอบการหาพารามิเตอร์ค่าความเหนี่ยวนำตามขั้นตอนที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ โดยจะได้ผลลัพธ์สำหรับ $V_d, V_q, i_d, i_q, \psi_q, L_q$ เทียบกับเวลา และ ψ_d, L_d เทียบกับ i_q ของเงื่อนไขที่ครอบคลุมการใช้งานกระแสแกน d (i_d) ตั้งแต่ -14A ไปจนถึง 5A และได้ผลลัพธ์สำหรับ $V_d, V_q, i_d, i_q, \psi_d, L_d$ เทียบกับเวลา และ ψ_d, L_d เทียบกับ i_d ของเงื่อนไขที่ครอบคลุมการใช้งานกระแสแกน q (i_q) ตั้งแต่ -5A ไปจนถึง 20A โดยจะแสดงตัวอย่างของผลลัพธ์ในรูปที่ 12 และ 13

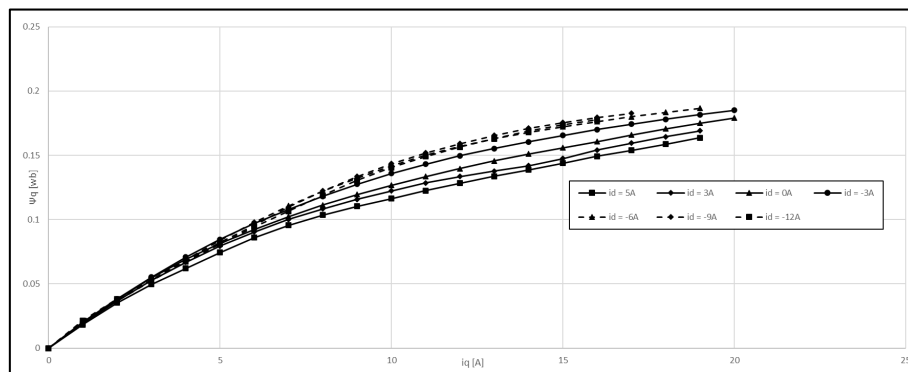


รูปที่ 12: ตัวอย่างผลการทดสอบของ $V_d, V_q, i_d, i_q, \psi_q, L_q$ เทียบกับเวลา สำหรับเงื่อนไข $i_d = 0A$

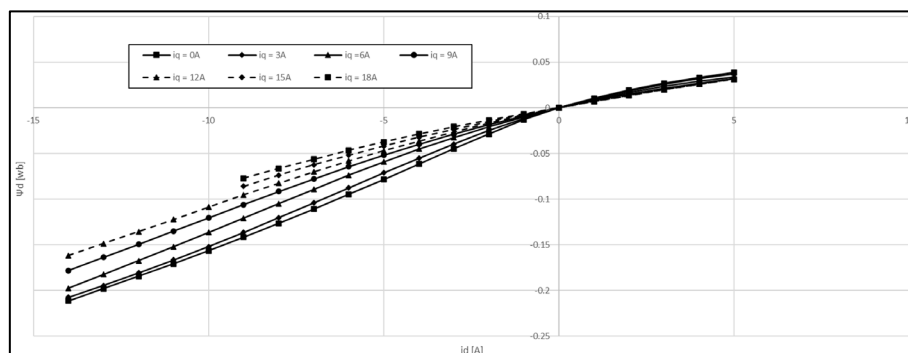


รูปที่ 13: ตัวอย่างผลการทดสอบของ ψ_q, L_q เทียบกับ i_q สำหรับเงื่อนไข $i_d = 0A$

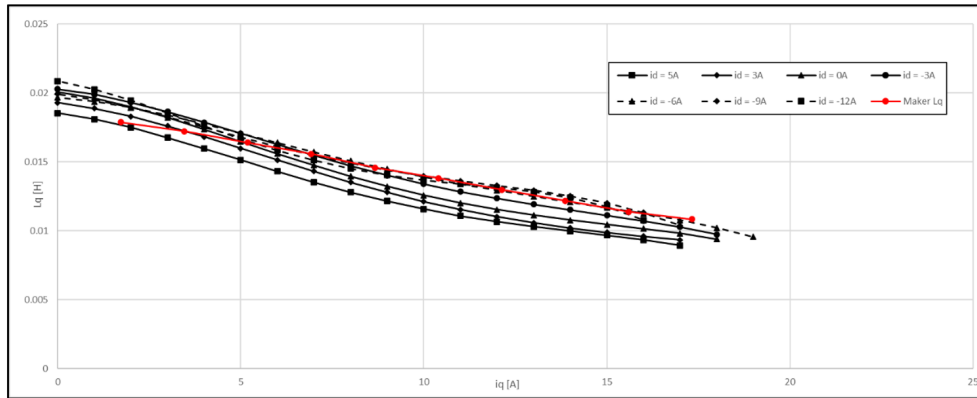
สรุปรวบรวมผลของฟลักซ์แม่เหล็กที่ได้จากการทดสอบเพื่อหาผลกระทบจากการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็ก ได้ผลดังรูปที่ 14 และรูปที่ 15 และผลของค่าความเหนี่ยวนำที่คำนวณหาจากฟลักซ์แม่เหล็กที่ได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับค่าความเหนี่ยวนำของมอเตอร์ที่ได้จากผู้ผลิต ดังรูปที่ 16 และ 17 จะเห็นได้ว่าค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จากการทดสอบ ที่พิจารณาถึงผลกระทบจากการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็ก มีค่าแตกต่างจากค่าที่ได้จากผู้ผลิตอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่ามอเตอร์รุ่นนี้ที่ใช้ในเครื่องปรับอากาศได้รับผลกระทบของการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็ก



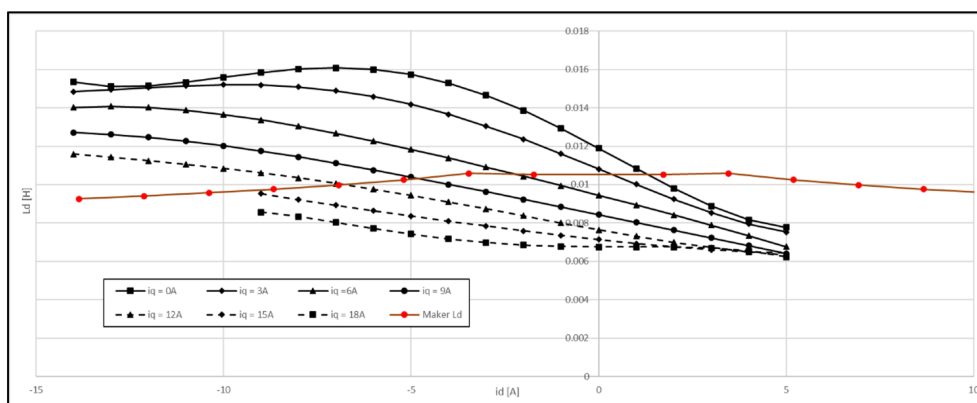
รูปที่ 14: สรุปผลการทดสอบของ ψ_q สำหรับเงื่อนไขแต่ละ i_d



รูปที่ 15: สรุปผลการทดสอบของ ψ_d สำหรับเงื่อนไขแต่ละ i_q

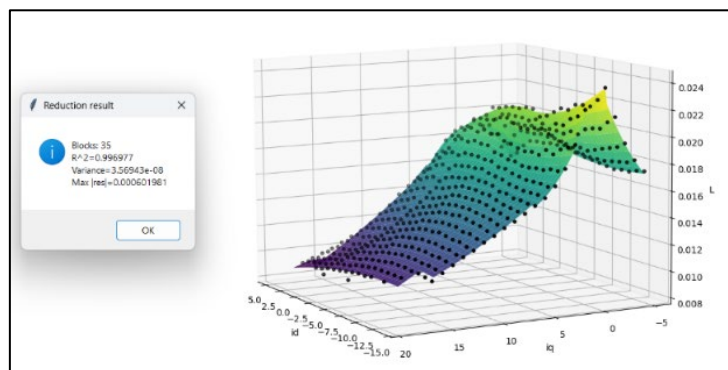


รูปที่ 16: ผลของ L_q ที่ได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากผู้ผลิต

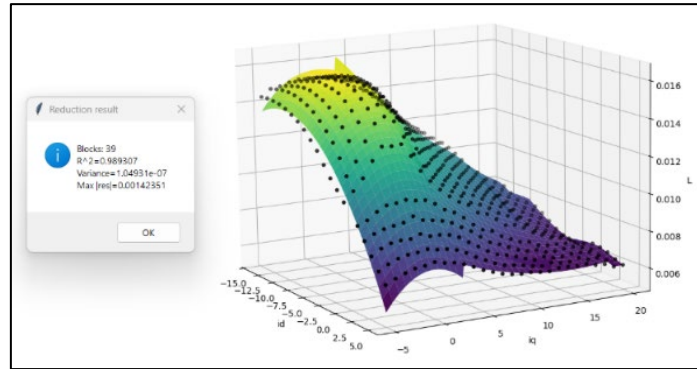


รูปที่ 17: ผลของ L_d ที่ได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากผู้ผลิต

ผลลัพธ์จากการทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ L_q และ L_d ด้วยวิธีการประมาณพหุนามแบบสโปลน์ 3 มิติ (แบบลดความละเอียด) เพื่อจะนำพารามิเตอร์ L_q และ L_d ที่ได้จากการทดสอบให้สามารถไปประยุกต์ใช้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ต่อเข้ากับมอเตอร์ตัวอย่างในคอมพิวเตอร์ของผลิตภัณฑ์เครื่องปรับอากาศดังรูปที่ 18 และ 19



รูปที่ 18: ผลของ L_q ที่ได้จากการประมาณพหุนามแบบสโปลน์ 3 มิติ (แบบลดความละเอียด)



รูปที่ 19: ผลของ L_d ที่ได้จากการประมาณพหุนามแบบสโปลน์ 3 มิติ (แบบลดความละเอียด)

2. ผลลัพธ์ของการปรับปรุงประสิทธิภาพการควบคุมมอเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง

2.1 ผลลัพธ์จากการประยุกต์ใช้ค่าความเหนี่ยวนำในสมการการประมาณตำแหน่งของโรเตอร์จากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ผลการทดลองการปรับปรุงประสิทธิภาพการควบคุมมอเตอร์ โดยเปรียบเทียบระหว่างระบบที่ใช้ค่าความเหนี่ยวนำจากผู้ผลิต กับระบบที่ใช้ค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จากการทดลอง มาประยุกต์ใช้กับสมการการหาตำแหน่งความผิดพลาดของค่าจริงกับค่าประมาณของตำแหน่งของโรเตอร์ ($\Delta\theta$) สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังตารางที่ 5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหลังจากมีการตรวจสอบหาพารามิเตอร์ด้วยกระบวนการที่ได้ทำการเสนอในงานวิจัยนี้ และทำการพิจารณาถึงผลกระทบจากการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็ก จะทำให้การควบคุมมอเตอร์มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น ขอบเขตการทำงานของมอเตอร์กว้างมากขึ้น และสามารถทำงานที่จุดโหลดที่ต้องการทางด้านอุตสาหกรรมได้

ตารางที่ 5: ผลการทดลองการปรับปรุงประสิทธิภาพการควบคุมแบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง

ความเร็วรอบของมอเตอร์	โหลดการทำงานสูงสุดที่ต้องการ (แรงดันสูง/แรงดันต่ำ*)	โหลดการทำงานสูงสุดที่ได้ (แรงดันสูง/แรงดันต่ำ*) เมื่อใช้ค่า L จากการทดลอง	โหลดการทำงานสูงสุดที่ได้ (แรงดันสูง/แรงดันต่ำ*) เมื่อใช้ค่า L จากผู้ผลิต
36rps	4.5MPa/1.8MPa	4.5MPa/1.8MPa	3.8MPa/1.4MPa
40rps	4.5MPa/1.8MPa	4.5MPa/1.8MPa	3.8MPa/1.4MPa
45rps	4.5MPa/1.8MPa	4.5MPa/1.8MPa	3.9MPa/1.4MPa

หมายเหตุ: โหลดการทำงานอ้างอิงแรงดันสูงของท่อ Discharge และแรงดันต่ำของท่อ Suction ของคอมเพรสเซอร์

2.2 ผลลัพธ์จากการประยุกต์ใช้ฟลักซ์แม่เหล็กในสมการการคำนวณแรงบิด

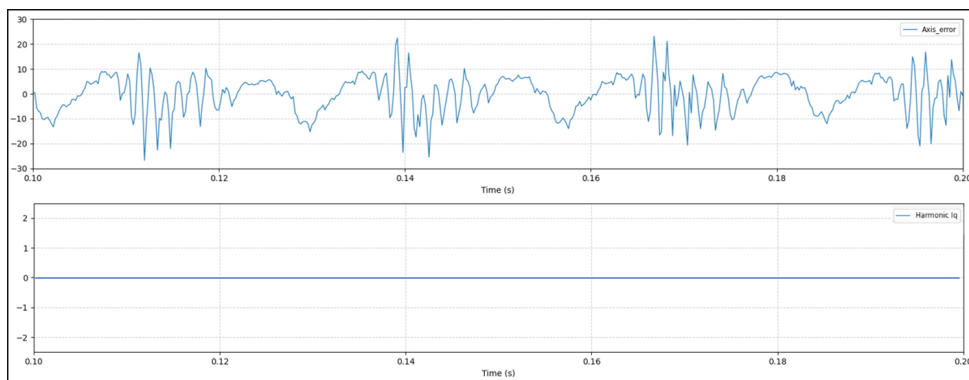
ผลลัพธ์จากการคำนวณหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีส่วนประกอบของฮาร์มอนิกโดยการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว โดยใช้ข้อมูลจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากผู้ผลิต จะได้ผลลัพธ์ของแอมพลิจูดและมุมเลื่อนเฟส ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6: สรุปค่าแอมพลิจูดและมุมเลื่อนเฟสของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำแยกแต่ละฮาร์มอนิก

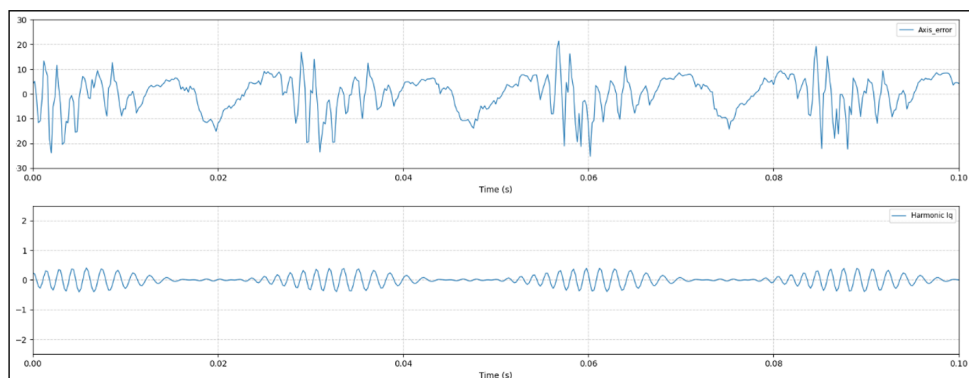
ลำดับของฮาร์มอนิก	แอมพลิจูด	มุมเลื่อนเฟส
ลำดับที่ 1 (1 st)	135	0°
ลำดับที่ 3 (3 rd)	3.164	172.9°
ลำดับที่ 5 (5 th)	13.108	176.4°
ลำดับที่ 7 (7 th)	1.476	16.2°

โดยจากผลลัพธ์ในตารางที่ 6 สามารถพิจารณาได้ว่าแอมพลิจูดของฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับผลของฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 และเนื่องจากฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ไม่มีผลกระทบต่อแรงบิด ดังนั้นสามารถคำนวณหาฟลักซ์แม่เหล็กเฟส u ได้จากสมการที่ (10)–(12) ผลลัพธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในตารางที่ 6 และข้อมูล ψ_a ที่ได้จากผู้ผลิต (องค์ประกอบความถี่หลักมูลของฟลักซ์แม่เหล็ก) โดย $\psi_u = 0.1496\cos\theta - 0.002905\cos5\theta$ และสามารถคำนวณหาฟลักซ์แม่เหล็กที่พิจารณาเฉพาะผลของฮาร์มอนิกบนแกน d และ q ได้เท่ากับ $\psi_{d,har} = -0.002905(\cos6\theta)$ และ $\psi_{q,har} = -0.002905(\sin6\theta)$

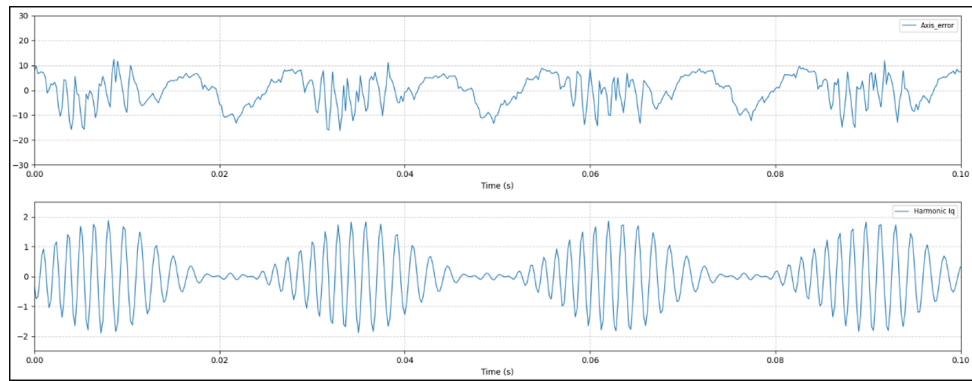
จากการนำค่า $\psi_{d,har}, \psi_{q,har}$ มาคำนวณกระแสชดเชยฮาร์มอนิกเพื่อทำการลดแรงบิด ได้ผลลัพธ์ของการทดลองได้เป็นดังรูปที่ 20 และรูปที่ 21 โดยจะพิจารณาจากระลอกของค่าความผิดพลาดของค่าจริงกับค่าประมาณของตำแหน่งของโรเตอร์ ($\Delta\theta$) ที่สะท้อนมาจากระลอกแรงบิดของมอเตอร์ จะเห็นได้ว่าผลลัพธ์ระลอกของ $\Delta\theta$ นั้นมีค่าไม่ต่างกันมาก เนื่องจากการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกอาจจะยังไม่เพียงพอ จึงทำการเพิ่มอัตราส่วนของ $\psi_{d,har}, \psi_{q,har}$ ขึ้นไปเป็น 5 เท่า และทำการปรับมุมเฟสของกระแสฮาร์มอนิก จากมุมของตำแหน่งโรเตอร์ที่คำนวณได้เพื่อให้การชดเชยได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด โดยผลลัพธ์ของการทดลองได้เป็นดังรูปที่ 22 จะเห็นได้ว่ามุมเฟสของกระแสฮาร์มอนิกที่ให้ผลลัพธ์การชดเชยที่ดีที่สุดอยู่ที่มุม 90 องศา และระลอกของ $\Delta\theta$ มีค่าน้อยลง โดยจากเดิมที่มีค่าอยู่ที่ประมาณ +25 องศา ถึง -30 องศา ลดลงมาเหลือประมาณ +12 องศา ถึง -18 องศา หลังจากทำการชดเชยกระแสฮาร์มอนิก โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังรูปที่ 23 สะท้อนได้ว่าการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกที่ถูกต้อง สามารถทำให้แรงบิดของมอเตอร์มีค่าลดลง



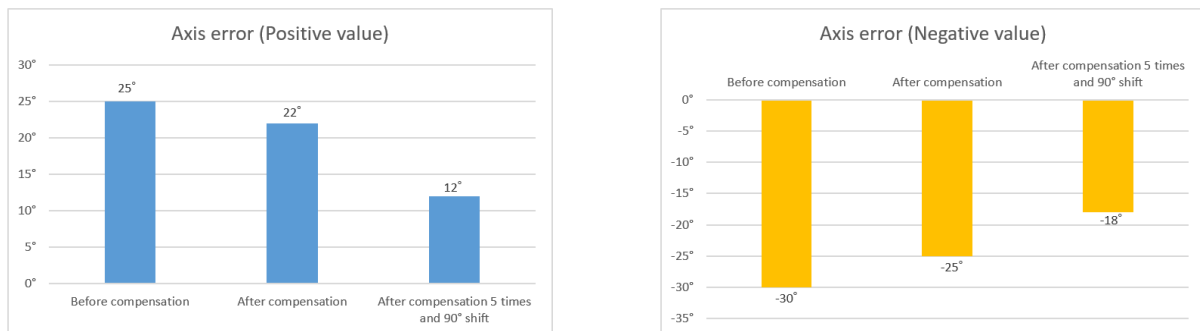
รูปที่ 20: ผลการทดลองกรณีไม่ชดเชยกระแสฮาร์มอนิก



รูปที่ 21: ผลการทดลองกรณีชดเชยกระแสฮาร์มอนิกด้วยค่า $\psi_{d,har}, \psi_{q,har}$



รูปที่ 22: ผลการทดลองกรณีชดเชยกระแสฮาร์มอนิกด้วยอัตราส่วน 5 เท่าของ $\psi_{d,har}$, $\psi_{q,har}$ และปรับมุมเฟส 90 องศา



รูปที่ 23: กราฟเปรียบเทียบผลลัพธ์ของค่าความผิดพลาดของการประมาณตำแหน่งโรเตอร์

สรุปผล

กระบวนการตรวจสอบหาพารามิเตอร์ของมอเตอร์ซึ่งโครนิสชนิดแม่เหล็กถาวรภายในที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ สามารถหาค่าความเหนี่ยวนำแกน d และ แกน q ที่พิจารณาถึงผลกระทบของการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็ก และสามารถหาค่าฟลักซ์แม่เหล็กที่พิจารณาถึงผลกระทบของฮาร์มอนิกจากข้อมูลแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้รับจากผู้ผลิต

ผลลัพธ์จากการประยุกต์ใช้ค่าความเหนี่ยวนำแกน d และแกน q ที่ได้จากกระบวนการตรวจสอบหาพารามิเตอร์ เข้ากับสมการประมาณตำแหน่งของโรเตอร์ สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการควบคุมมอเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งได้เป็นอย่างดี และทำให้ขอบเขตการใช้งานมอเตอร์ครอบคลุมโหลดการทำงานสูงสุดที่ต้องการของผลิตภัณฑ์เครื่องปรับอากาศ เนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จากกระบวนการตรวจสอบหาพารามิเตอร์ที่พิจารณาถึงผลกระทบของการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็ก ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำที่ได้ใกล้เคียงกับค่าจริงของมอเตอร์ มากกว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากผู้ผลิตอย่างมีนัยสำคัญ และจากการพิจารณาถึงผลกระทบจากการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็กในการคำนวณแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้วิธี Extended back EMF ด้วย

ผลลัพธ์จากการประยุกต์ใช้ค่าฟลักซ์แม่เหล็กที่ได้จากกระบวนการตรวจสอบหาพารามิเตอร์ เข้ากับสมการระลอกแรงบิด โดยการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกที่ได้นำเสนอในงานวิจัย สามารถปรับปรุงระลอกแรงบิดที่สะท้อนไปยังค่าความผิดพลาดของค่าจริงกับค่าประมาณของตำแหน่งของโรเตอร์ ($\Delta\theta$) จากการที่สามารถลดค่าความผิดพลาดจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ลงได้สูงสุดถึงร้อยละ 52 แต่ยังจำเป็นต้องมีการปรับจูนค่าอัตราส่วนและมุมเฟสของกระแสฮาร์มอนิกที่ทำการชดเชยเข้าไปในระบบ เพื่อให้ได้มีประสิทธิภาพที่สูงที่สุด

งานวิจัยนี้เป็นผลงานสำคัญที่มีส่วนช่วยในการปรับปรุงขั้นตอนการทำงานในระบบอุตสาหกรรมให้มีประสิทธิภาพในการทำงานที่ดียิ่งขึ้น โดยกระบวนการที่นำเสนอเป็นระบบ ขั้นตอน สามารถลดระยะเวลาของกระบวนการหาพารามิเตอร์ และนำไปใช้ได้จริงกับ

ระบบอุตสาหกรรม อีกทั้งยังสามารถมีส่วนช่วยในการปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ในระบบอุตสาหกรรมให้ดียิ่งขึ้น
ครอบคลุมตลอดช่วงการใช้งานที่ต้องการ

อย่างไรก็ตาม สำหรับงานวิจัยในอนาคตควรจะพิจารณาการหาค่าพารามิเตอร์แบบ Online identification เพิ่มเติมด้วย เพื่อให้สามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่สะท้อนผลจากการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากปัจจัยสภาพแวดล้อม เช่น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของมอเตอร์ได้แม่นยำมากยิ่งขึ้น

ถึงแม้งานวิจัยนี้จะสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการควบคุมมอเตอร์แบบไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่งได้ และสามารถประยุกต์ใช้กับมอเตอร์ในอุตสาหกรรมได้จริงเมื่อเทียบกับงานวิจัยในอดีต แต่ควรจะมีการประยุกต์ใช้ค่าความเหนี่ยวนำแกน d และแกน q ที่พิจารณาถึงผลกระทบของการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็กที่ได้มาจากระบบการหาพารามิเตอร์ เข้ากับสมการอื่นที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมมอเตอร์ เช่น สมการการหากระแสคำสั่ง i_d^* และ i_q^* จากค่าแรงบิดที่ได้จากวงรอบป้อนกลับของความเร็วรอบ เพื่อจะได้ปรับปรุงจุดการทำงานของมอเตอร์ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

วิศวกรผู้ทำงานเกี่ยวกับการออกแบบการควบคุมมอเตอร์ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ สามารถอ้างอิงขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์และการประยุกต์ใช้พารามิเตอร์สำหรับการควบคุมจากงานวิจัยนี้ เพื่อที่จะสามารถลดระยะเวลาในการทำงาน และเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมมอเตอร์ให้ดียิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท เจเนอรัล แอร์คอนดิชันนิ่ง อาร์แอนด์ดี (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้เงินทุนในการศึกษา และให้ความช่วยเหลือทางด้านอุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัย

REFERENCES

- [1] Z. Q. Zhu and X. M. Wu, *Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Machine Drives*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2023.
- [2] B. Stumberger, G. Stumberger, D. Dolinar, A. Hamler, and M. Trlep, "Evaluation of saturation and cross-magnetization effects in interior permanent-magnet synchronous motor," *IEEE Trans. Industry Appl.*, vol. 39, no. 5, pp. 1264–1271, 2003.
- [3] Z. Q. Zhu, Y. Li, D. Howe, C. M. Bingham, and D. Stone, "Influence of machine topology and cross-coupling magnetic saturation on rotor position estimation accuracy in extended back-EMF based sensorless PM brushless AC drives," in *Proc. IEEE Industry Appl. Annu. Meeting*, New Orleans, LA, USA, Sep. 2007, pp. 2378–2385.
- [4] K. Yamazaki and M. Kumagai, "Torque analysis of interior permanent-magnet synchronous motors by considering cross-magnetization: variation in torque components with permanent-magnet configurations," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 7, pp. 3192–3201, 2014.
- [5] Y. Li, Z. Q. Zhu, D. Howe, and C. M. Bingham, "Improved rotor position estimation in extended back-EMF based sensorless PM brushless AC drives with magnetic saliency," in *Proc. IEEE Int. Elect. Mach. Drives Conf. (IEMDC)*, Antalya, Turkey, May 2007, pp. 214–219.
- [6] Z. Q. Zhu, K. Liu, and D. Liang, *Parameter Estimation of Permanent Magnet Synchronous Machines*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2025.
- [7] C. Yin, Y. Liu, and F. Chen, "Motor parameter identification for compressors based on the improved DC transient method," in *Proc. IEEE 3rd Int. Conf. Image Process. Comput. Appl. (ICIPCA)*, Shenyang, China, Jun. 2025, pp. 92–97.
- [8] T. Duraisingam, B. Li, and A. Sayed-Ahmed, "Offline self-commissioning method to estimate direct & quadrature axes inductance for IPM/SPM in industrial motor drive applications," in *Proc. IEEE Int. Elect. Mach. Drives Conf. (IEMDC)*, Houston, TX, USA, May 2025, pp. 329–335.
- [9] H. Kim and S. Bhattacharya, "Improved rotor position estimation in extended back-EMF based position sensorless control for IPMSMs with non-sinusoidal back-EMF," in *Proc. IEEE Industry Appl. Soc. Annu. Meeting*, Detroit, MI, USA, Oct. 2020, pp. 1–7.



- [10] M. J. Nam, J. H. Kim, K.-Y. Cho, H.-W. Kim, and Y. Cho, "Torque ripple reduction of an interior PM synchronous motor by compensating harmonic currents based on flux linkage harmonics," *J. Power Electron.*, vol. 17, no. 5, pp. 1223–1230, 2017.
- [11] Z. Chen, M. Tomita, S. Doki, and S. Okuma, "An extended electromotive force model for sensorless control of interior permanent-magnet synchronous motors," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 50, no. 2, pp. 288–295, 2003.