

1. บทนำ

ในทศวรรษที่ผ่านมามอเตอร์ไฟฟ้ามีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรมต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Synchronous Motor ; PMSM) เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง มีเสียงรบกวนและการสูญเสียความร้อนต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องกลไฟฟ้าชนิดอื่นๆ เช่นเครื่องยนต์สันดาปภายใน ฯลฯ ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นจึงได้มีการวิจัยและพัฒนามอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรกันอย่างต่อเนื่อง อาทิ ความรู้ในด้านการออกแบบ การสร้างและการทดสอบเครื่องกลไฟฟ้าเพื่อการประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ นอกจากนี้ยังเป็นการช่วยเหลือระดับประเทศบริษัทผู้ผลิตเครื่องจักรกลไฟฟ้าสำหรับการแข่งขันของตลาดที่สูง อีกทั้งเป็นการลดการนำเข้าเครื่องกลไฟฟ้าจากต่างประเทศ

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านชนิดแม่เหล็กถาวร (Brushless DC PM motor ;BLDC) ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในส่วนของคอมเพลกซ์เซอร์และมอเตอร์พัดลมของเครื่องปรับอากาศ ซึ่งมอเตอร์แบบ BLDC นี้จะช่วยประหยัดพลังงานเนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงกว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำกระแสสลับชนิดเฟสเดียว (single-phase AC induction motor) นอกจากนี้มอเตอร์แบบ BLDC ยังมีข้อได้เปรียบอื่นๆอีกหลายประการ เช่น อายุการใช้งานที่ยาวนาน มีความน่าเชื่อถือสูงและการดูแลบำรุงรักษาน้อย

มอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรแบบ surface-mounted จะมีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูง เนื่องจากแม่เหล็กถาวรถูกยึดอยู่บนโรเตอร์ ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองทางคณิตศาสตร์ทำให้เห็นว่าโครงสร้างของมอเตอร์ชนิดนี้มีประสิทธิภาพสูง แต่ค่าของ cogging torque ที่เกิดขึ้นนั้นก็มีความสูงตามมาด้วย ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดการกระเพื่อมขึ้นที่แรงบิด (torque ripple) รวมทั้งมีเสียงรบกวนและการสั่นสะเทือน

มอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรแบบฝัง (IPM motor) ได้รับความสนใจสูงจากนักวิจัยและโดยเฉพาะการนำไปใช้งานด้านอุตสาหกรรม เนื่องจากมีข้อดีมากมายที่สูงกว่ามอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรแบบ surface-mounted เช่น

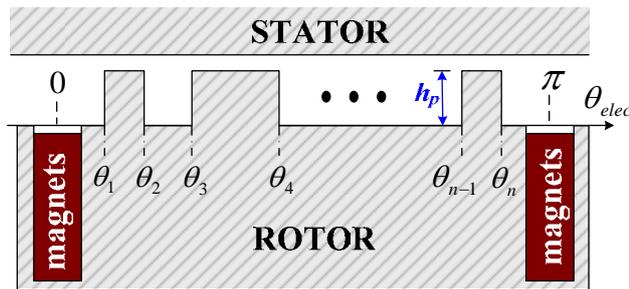
- ค่า cogging torque และ ripple torque ต่ำ
- อัตราส่วนของ L_d/L_q สูง ทำให้ค่า flux weakening สูง ดังนั้นจึงสามารถนำมาใช้งานในย่านความเร็วสูงที่ค่ากำลังคงที่ได้
- มีราคาถูกและการสร้างแม่เหล็กนั้นทำได้ง่าย

สำหรับในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรแบบฝัง โดยลักษณะโทโพโลยีของมอเตอร์ IPM ชนิดนี้จะเป็นแบบความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงร่วมกับการใช้เทคนิคของการมอดูเลชันตามความกว้างของพัลส์ (pulse width

modulation ; PWM) เพื่อทำการลดค่าฮาร์มอนิกส์ในช่องว่างอากาศ ซึ่งจะเป็นการลดค่าของ cogging torque ที่เกิดขึ้นได้

โทโพโลยีของมอเตอร์ซิงโครนัสแบบ IPM เป็นหนึ่งในโครงสร้างที่นิยมใช้งานกันอย่างมาก สำหรับการประยุกต์ใช้งานในระบบขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า เช่น รถยนต์ไฟฟ้าและการใช้งานด้านต่างๆในประเทศ เนื่องจากสามารถปรับความเร็วรอบในการใช้งานได้กว้าง อันเป็นผลมาจากอัตราส่วนระหว่าง L_d และ L_q ที่มีค่าสูง ซึ่งสามารถทำได้โดยอาศัยการออกแบบที่ดีและเลือกการวิเคราะห์โดยวิธีของ flux weakening อย่างไรก็ตามสิ่งที่สำคัญก็คือ การลดค่าฮาร์มอนิกส์ของแรงดัน back-EMF ซึ่งฮาร์มอนิกส์นั้นเป็นสาเหตุหนึ่งในการทำให้เกิด torque ripple ขึ้น ดังนั้นการลดค่าฮาร์มอนิกส์ของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในช่องว่างอากาศจะทำให้ torque ripple ลดลงได้

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษา วิเคราะห์ ออกแบบและทำการสร้างมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรแบบฝัง โดยอาศัยหลักการควบคุมที่สเปคตรัมของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งมีผลทำให้ torque ripple และกระแสไหลวนในโรเตอร์ลดลง โครงสร้างของมอเตอร์ที่นำเสนอแสดงดังรูปที่ 1



การประยุกต์ใช้หลักการ PWM ในโรเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรแบบฝัง โดยมีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูง

รูปที่ 1. โครงสร้างของมอเตอร์ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้

2. วัตถุประสงค์

เพื่อวิเคราะห์ ออกแบบ และสร้างมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรแบบฝังซึ่งมีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูง

3. วิธีการทดลอง

3.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.2 วิเคราะห์และออกแบบเพื่อลดค่าฮาร์มอนิกส์ของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในช่องว่างอากาศโดยใช้หลักการของ PWM

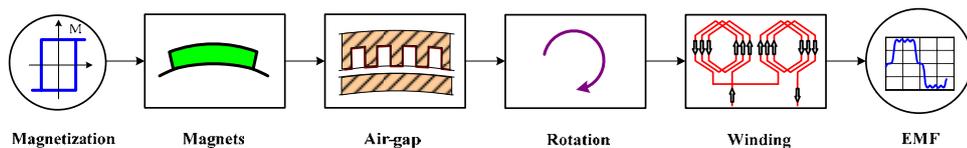
- 3.3 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรแบบฝั้ซึ่งมีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูง
- 3.4 จำลองการทำงานบนโปรแกรม FEMM และ MATLAB/Simulink
- 3.5 สร้างต้นแบบมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรแบบฝั้ซึ่งมีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงและจัดเตรียมแท่นทดสอบซึ่งประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์และอุปกรณ์ควบคุมต่างๆ (power electronics)
- 3.6 ทดสอบการทำงานของต้นแบบ
- 3.7 สรุปผลการวิจัยและส่งรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

4. ผลการทดลอง

สำหรับการทดสอบต้นแบบของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรแบบฝั้ซึ่งมีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงนี้ จะสามารถพิสูจน์ให้เป็นจริงได้โดยการจำลองการทำงานบนโปรแกรม FEMM และ MATLAB/Simulink และทดสอบจากระบบต้นแบบในห้องปฏิบัติการประกอบด้วยรายละเอียดในการดำเนินงานดังนี้

4.1 วิเคราะห์และออกแบบเพื่อลดค่าฮาร์มอนิกส์ของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในช่องว่างอากาศโดยใช้หลักการของ PWM

การเกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ (EMF) ของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรสามารถแสดงดังแผนภาพบล็อกในรูปที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยอำนาจของเส้นแรงแม่เหล็กที่พุ่งผ่านช่องว่างอากาศไปยังขดลวดสเตเตอร์ โดยอาศัยการหมุนของโรเตอร์และทำให้มีแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ (EMF) เกิดขึ้น ซึ่งแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ได้นั้นเป็นผลมาจากสเปคตรัมฮาร์มอนิกส์ของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในช่องว่างอากาศ



รูปที่ 2. แผนภาพบล็อกการเกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ (EMF) ของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

งานวิจัยนี้จำเป็นต้องทำการศึกษาและวิเคราะห์เพื่อออกแบบให้สเปคตรัมฮาร์มอนิกส์ของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในช่องว่างอากาศมีรูปร่างใกล้เคียงสัญญาณไซน์มากที่สุด ดังนั้นหลักการของ PWM ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการลดค่าฮาร์มอนิกส์ของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในช่องว่างอากาศ โดยการวิเคราะห์จะอาศัยการคำนวณทางคณิตศาสตร์เพื่อให้ได้ค่าสเปคตรัมที่เหมาะสม

การแก้ไขปัญหาคือเป็นแบบ constrained optimization ซึ่งถูกกำหนดให้อยู่ในรูปของเวกเตอร์ x แสดงดังสมการที่ (1)

$$x = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_n]^T \quad (1)$$

ในขณะที่สมการของปัญหาสามารถแสดงดังสมการที่ (2)

$$F(x_\infty) = [f_1, f_2, f_3, \dots, f_n]^T(x_\infty) = 0 \quad (2)$$

และ

$$f_1(x) = \int_0^\pi M(\theta) \sin(\theta) d\theta - \frac{\pi}{2} M_1 \quad (3)$$

$$f_i(x) = \int_0^\pi M(\theta) \sin(h_i \theta) d\theta \quad h_i = 3, 5, 7, \dots \quad (4)$$

โดยที่

$M(\theta)$ คือ ฟังก์ชันขนาดของเส้นแรงแม่เหล็กที่ได้จากแม่เหล็กถาวร

M_1 คือ เส้นแรงแม่เหล็ก fundamental ที่ต้องการ

$h_i = 3, 5, 7, \dots$ คือ กลุ่มลำดับต่างๆของฮาร์โมนิกส์ที่ต้องการกำจัด

การพิจารณาค่ามุม θ_i จะอยู่ระหว่างช่วง 0 ถึง π โดยจำเป็นต้องกำหนด constrained เข้าไปในปัญหาของสมการ ดังสมการที่ (5) ตามลำดับ

$$0 < \theta_1 < \theta_2 < \theta_3 < \dots < \theta_{n-1} < \theta_n < \pi \quad (5)$$

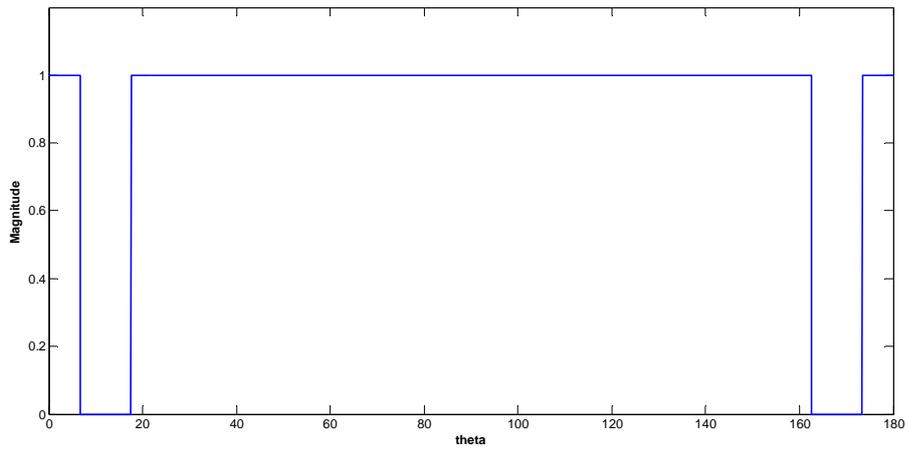
เพื่อให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ ดังนั้นฟังก์ชันค่าของมุมจึงควรมีลักษณะของ radial flux density ดังสมการที่ (6)

$$B_g(\theta) \approx B_m \sin(p\theta) \quad (6)$$

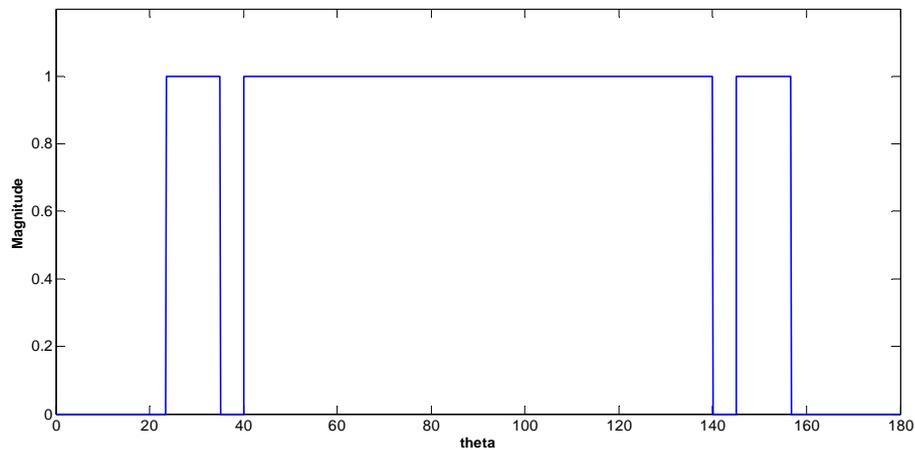
โดยที่ p คือจำนวนขั้วแม่เหล็ก และ B_m คือขนาดของเส้นแรงแม่เหล็กที่ต้องการ

ดังนั้นการกำหนดจำนวนพัลส์สามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ แบบคู่และแบบคี่ ซึ่งลักษณะความกว้างของพัลส์ที่ได้จึงมีความแตกต่างกันไปตามลำดับของฮาร์โมนิกส์ที่ต้องการจะลดค่า ดังแสดงได้ในรูปที่ 3-6 โดยประกอบด้วยจำนวนพัลส์ขนาด 3, 5, 6 และ 9 ตามลำดับ

ในรูปที่ 3 เป็นการวิเคราะห์ด้วยหลักการ PWM ซึ่งมีจำนวนพัลส์เท่ากับ 3 โดยเลือกทำการลดค่าฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 1, 5, 7, 11, 13 และ 1, 3, 5, 7, 11, 13 ดังรูปที่ 3-ก และ 3-ข ตามลำดับ



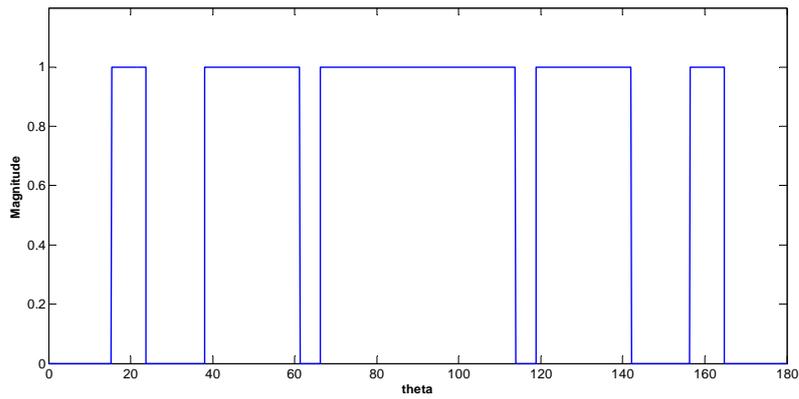
(ก) ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 1,5,7,11,13



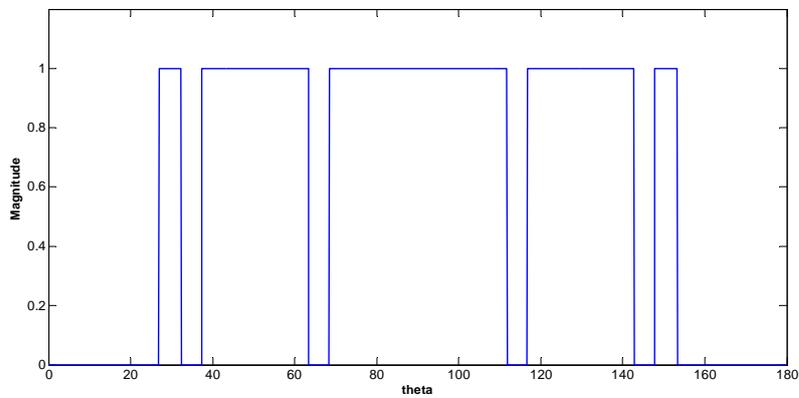
(ข) ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 1,3,5,7,11,13

รูปที่ 3. จำนวนพัลส์มีค่าเท่ากับ 3

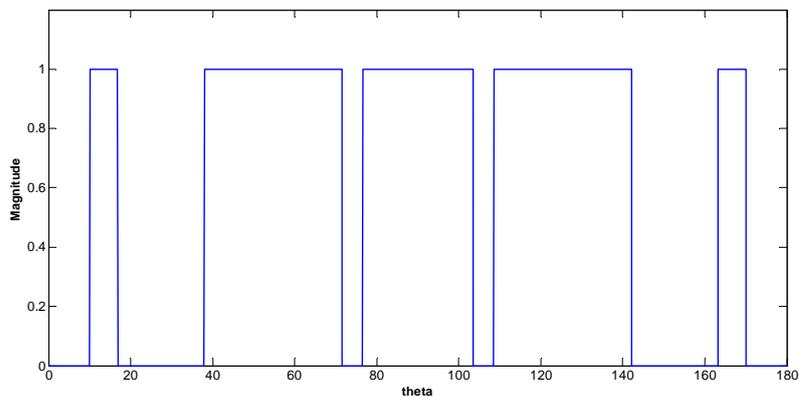
ในรูปที่ 4 เป็นการวิเคราะห์จำนวนพัลส์ขนาด 5 พัลส์ โดยที่ขนาดความกว้างของพัลส์นั้นจะแตกต่างกันไปตามฮาร์โมนิกส์ที่ต้องการลดค่า เช่น ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3,5,7,11,17 หรือ 19 ดังนั้นค่ามุมที่ได้จึงมีขนาดที่แตกต่างกันออกไป แต่จะกำหนดให้ระดับแอมพลิจูดหรือความสูงนั้นมีขนาดที่เท่ากัน



(ก) ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 1,3,5,7,11



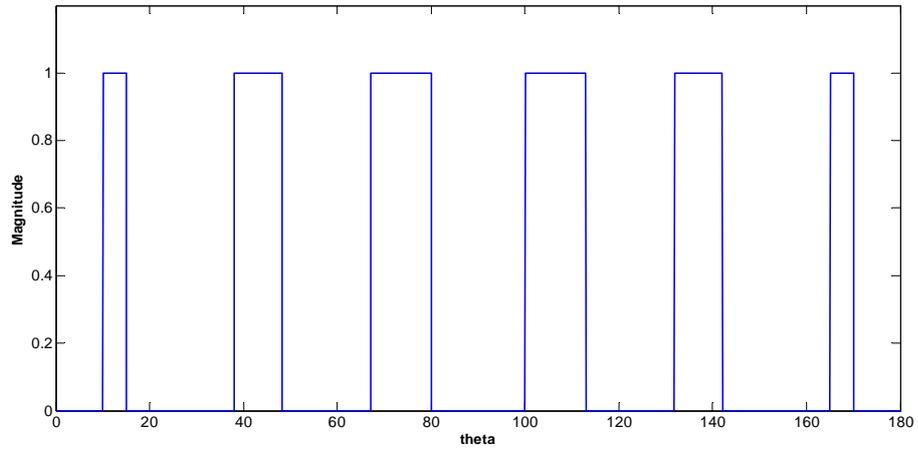
(ข) ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 1,3,11,17,19



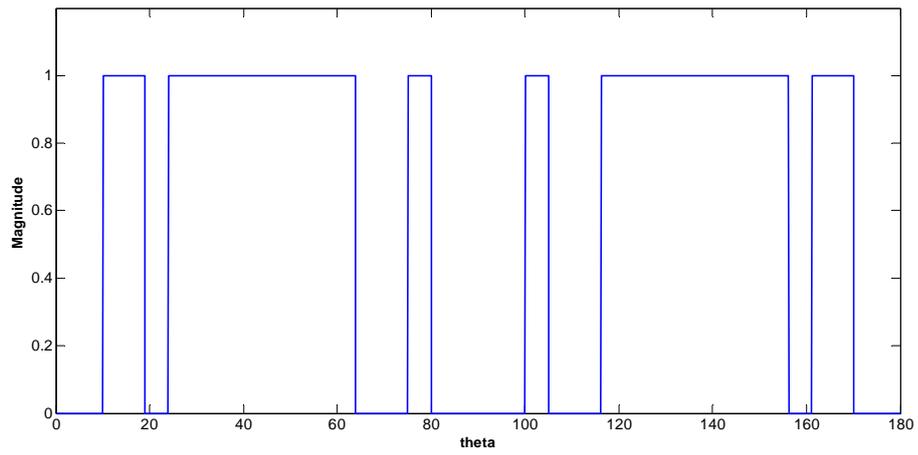
(ค) ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 1,3,5,7,11,17,19

รูปที่ 4. จำนวนพัลส์มีค่าเท่ากับ 5

จำนวนพัลส์ขนาดเท่ากับ 6 พัลส์ แสดงดังรูปที่ 5 โดยในรูปที่ 5-ก เป็นการเลือกลดฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3, 5 และ 7 สังเกตเห็นได้ว่าขนาดความกว้างของพัลส์นั้นมีความแตกต่างกันไม่มาก ในขณะที่ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 5, 7, 11 และ 13 (รูปที่ 5-ข) ความกว้างของพัลส์มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งไม่สอดคล้องกับหลักวิธีการของ PWM



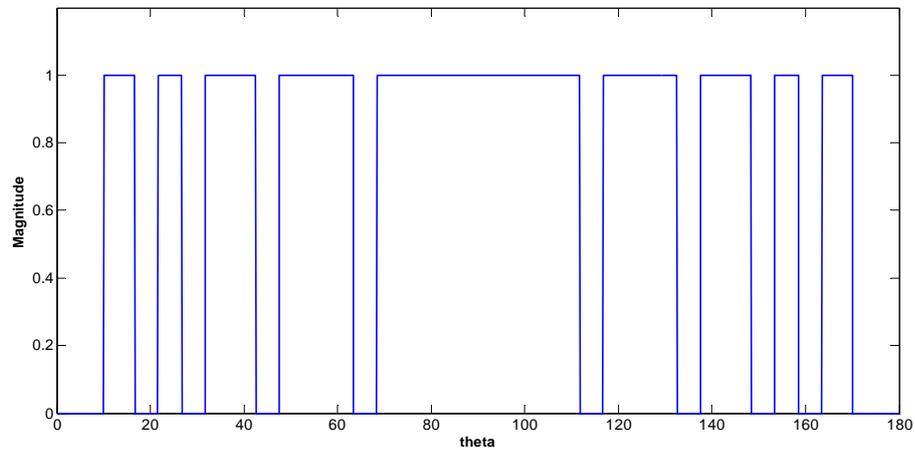
(ก) ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 1,3,5,7



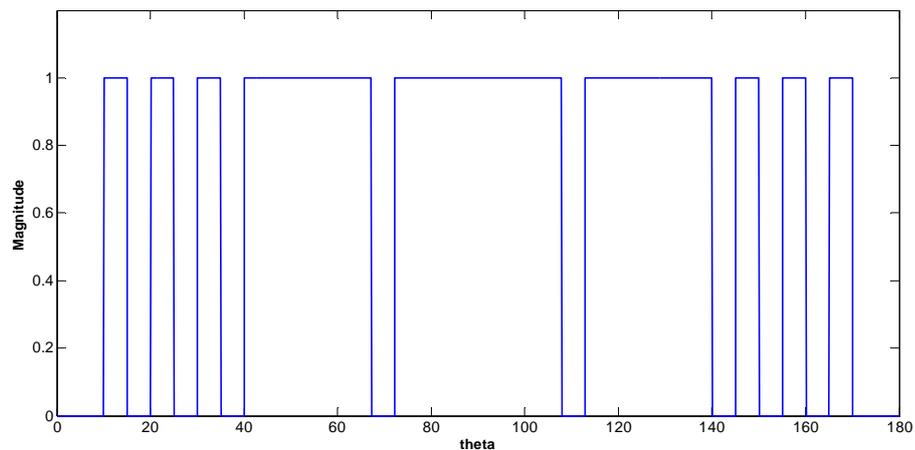
(ข) ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 1,5,7,11,13

รูปที่ 5. จำนวนพัลส์มีค่าเท่ากับ 6

จำนวนพัลส์ขนาด 9 พัลส์ ถูกวิเคราะห์และสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6 ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ด้วยหลักการของ PWM แล้วปรากฏว่าลักษณะของพัลส์ที่ได้มีความสอดคล้องกันกับทฤษฎีที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ โดยลักษณะของพัลส์จะใกล้เคียงกับสัญญาณรูปคลื่นไซน์



(ก) ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 1,11,13



(ข) ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 1,5,7,11,13

รูปที่ 6. จำนวนพัลส์มีค่าเท่ากับ 9

จากสเปกตรัมที่ได้วิเคราะห์มาทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าลักษณะของจำนวนพัลส์ที่เหมาะสมควรมีลักษณะเป็นจำนวนคี่ เช่น จำนวนพัลส์ขนาด 3, 5, 7 หรือ 9 ซึ่งจะทำให้ได้รูปสัญญาณใกล้เคียงกับสัญญาณไซน์มากที่สุด

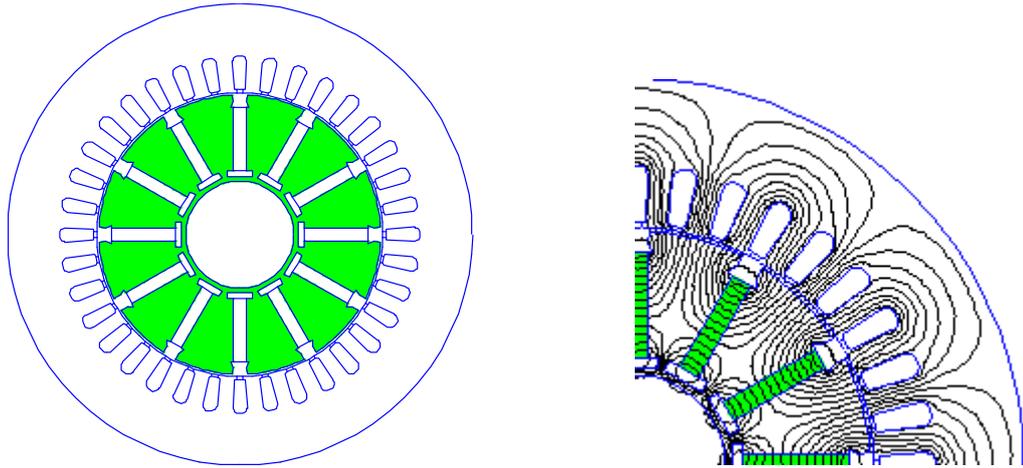
4.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรแบบฝังซึ่งมีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูง

เมื่อได้ผลของสเปคตรัมจากหลักการของ PWM มาแล้วก็จะทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรแบบฝังซึ่งมีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูง โดยการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของมอเตอร์ร่วมกับค่าสเปคตรัมที่ได้มาจากหลักการของ PWM จากนั้นมาทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นการทำงานร่วมกันบนโปรแกรม finite element magnetic และ MATLAB/Simulink เพื่อเป็นการยืนยันและให้เกิดความน่าเชื่อถือจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรแบบฝังซึ่งมีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงแบบมาตรฐาน ตารางที่ 1 เป็นข้อมูลจำเพาะของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวรที่ใช้ในการออกแบบ

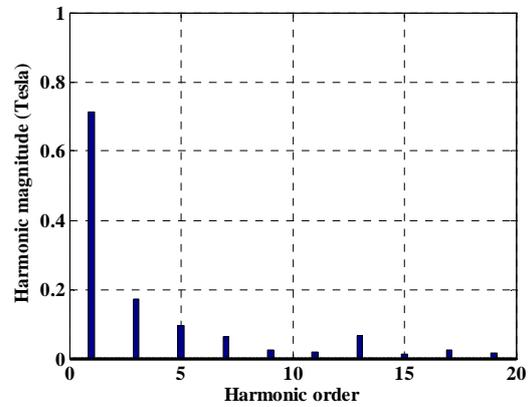
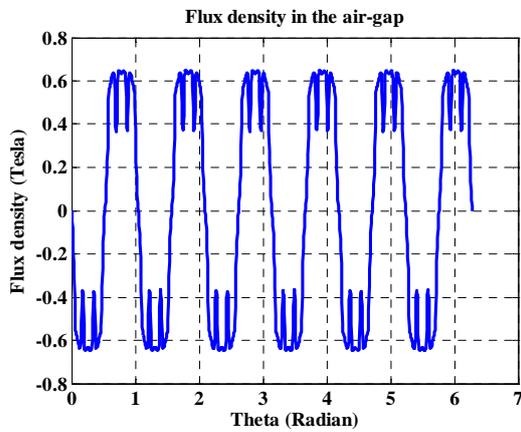
ตารางที่ 1 ข้อมูลจำเพาะของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

Designation	Unit	value
Norminal Speed	rpm	500
Frequency	Hz	50
Number of pole	-	12
Stack length	mm	51.4
Internal diameter	mm	90
External diameter	mm	146
Air-gap (e)	mm	0.75
The height of the magnet (a)	mm	20
Number of slot	-	36
Number of slot/pole/phase (q)	-	1/pole/ph
Magnet Type		SmCo

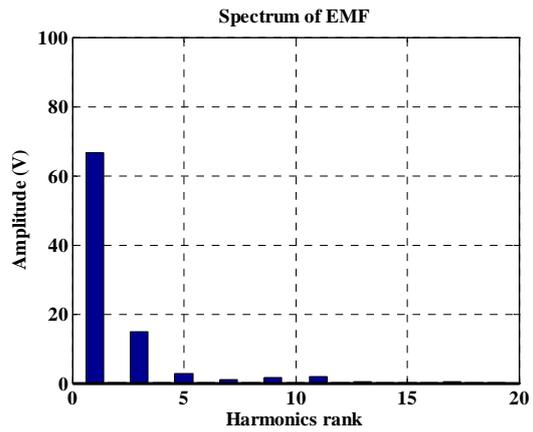
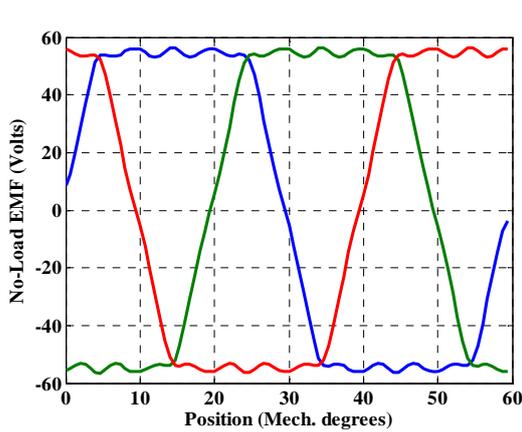
ในรูปที่ 7 เป็นการจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรแบบฝังซึ่งมีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงแบบมาตรฐาน ซึ่งประกอบด้วยลักษณะโครงสร้างและทิศทางการแพร่กระจายของเส้นแรงแม่เหล็ก(รูปที่ 7-ก) ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในช่องว่างอากาศ(รูปที่ 7-ข) สเปคตรัมฮาร์มอนิกส์ลำดับต่างๆ (รูปที่ 7-ค) ตามลำดับ โดยแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ (EMF) ที่ได้สามารถแสดงดังรูปที่ 7-ง และ 7-จ ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นทั้งรูปคลื่นสัญญาณและสเปคตรัม โดยจะสังเกตเห็นได้ว่ารูปสัญญาณ EMF ที่ได้นั้นมีลักษณะเป็น quasi-square



(ก) โครงสร้างของโรเตอร์และทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก



(ข) ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในช่องว่างอากาศ (ค) สเปกตรัมฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆ



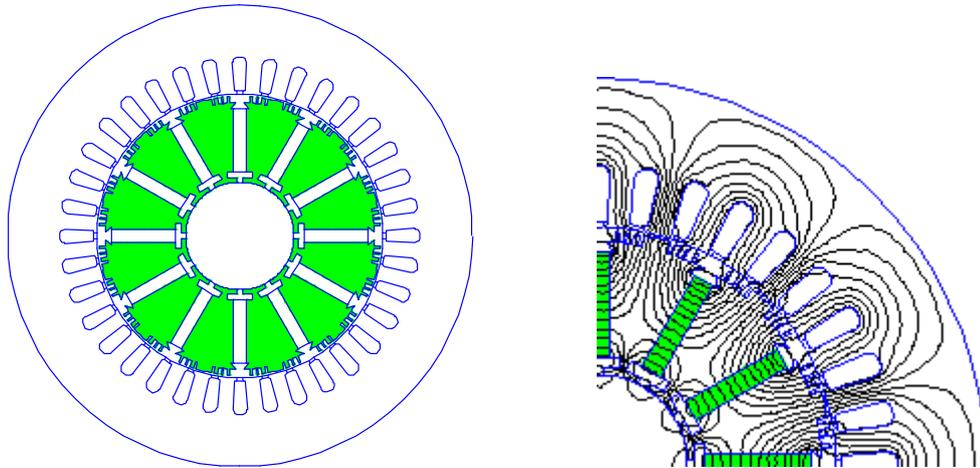
(ง) รูปสัญญาณของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ

(จ) สเปกตรัมของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ

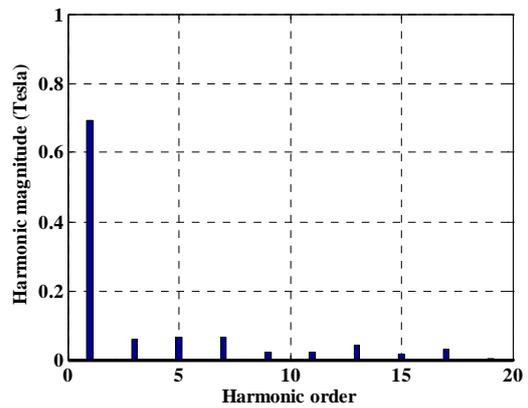
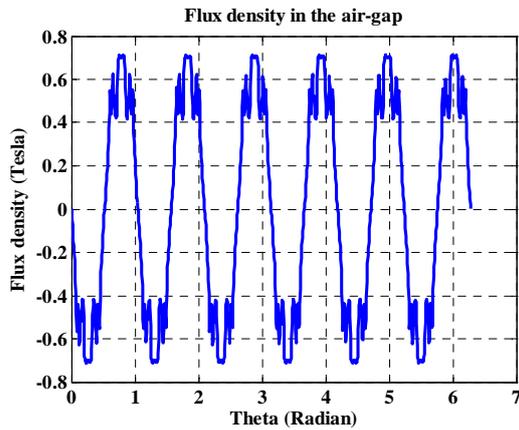
รูปที่ 7. มอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนชนิดแม่เหล็กถาวรแบบฝังซึ่งมีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงแบบมาตรฐาน

สำหรับในงานวิจัยนี้ได้นำเอาผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยหลักการของ PWM มากระทำลงบนโครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนชนิดแม่เหล็กถาวรแบบฝังซึ่งมีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูง

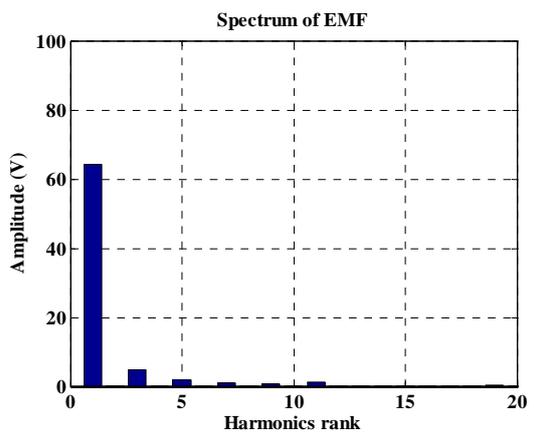
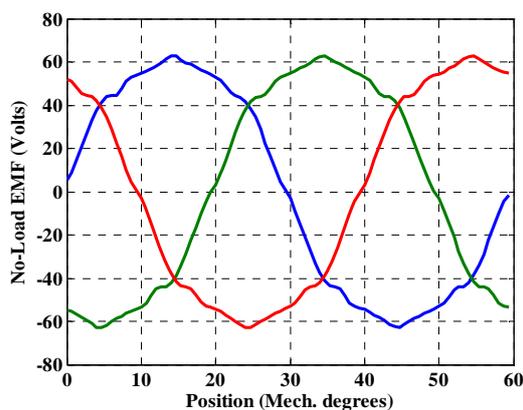
แม่เหล็กสูงเพื่อลดค่าฮาร์โมนิกส์ของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในช่องว่างอากาศแสดงดังรูปที่ 8



(ก) โครงสร้างของโรเตอร์และทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก



(ข) ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในช่องว่างอากาศ (ค) สเปกตรัมฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆ



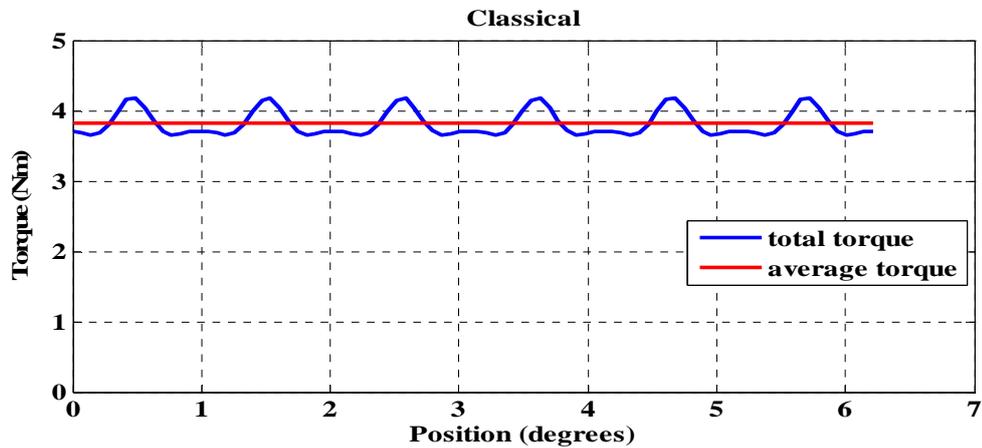
(ง) รูปสัญญาณของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ

(จ) สเปกตรัมของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ

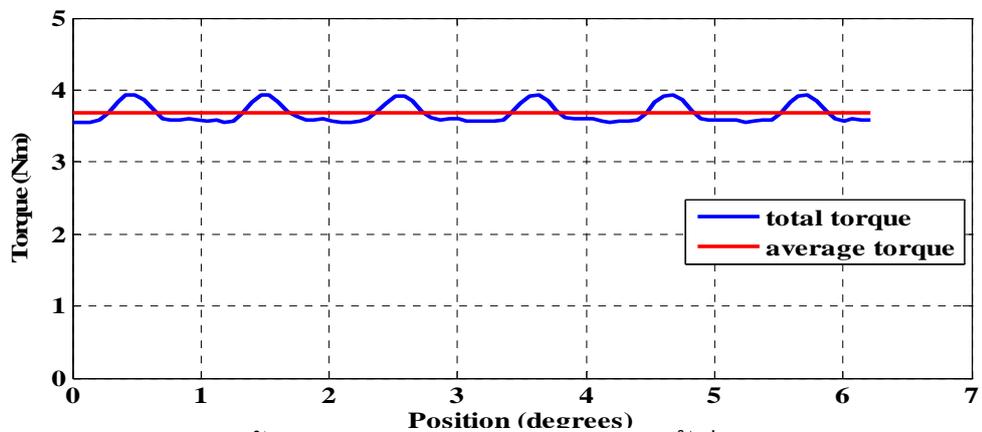
รูปที่ 8. มอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรแบบฝังซึ่งมีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงแบบ PWM

จากรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในช่องว่างอากาศ (รูปที่ 8-ข) มีลักษณะเข้าใกล้สัญญาณไซน์ ซึ่งสเปกตรัมของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำของ fundamental มีค่าประมาณ 64 V โดยฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 และ 5 (รูปที่ 8-ค) ถูกลดทอนลง ซึ่งถือว่าเป็นฮาร์โมนิกที่มีนัยสำคัญ กล่าวคือฮาร์โมนิกที่ลำดับต่ำๆจะมีผลต่อประสิทธิภาพของมอเตอร์เป็นอย่างมาก เมื่อพิจารณารูปสัญญาณของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ (รูปที่ 8-ง) หรือแรงดัน back-EMF ที่ได้จะใกล้เคียงสัญญาณไซน์มากกว่าเมื่อเทียบกับรูปสัญญาณของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรแบบฝังซึ่งมีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงแบบมาตรฐาน

ในรูปที่ 9-10 แสดงแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรแบบฝังทั้งแบบมาตรฐานและแบบ PWM ตามลำดับ โดยจะสังเกตเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยของแรงบิดมีความใกล้เคียงกัน แต่การกระเพื่อมของแรงบิด (ริบเบิล) แบบมาตรฐานจะสูงกว่า ดังนั้นประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบ PWM จึงดีกว่า



รูปที่ 9. แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรแบบฝังซึ่งมีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงแบบ มาตรฐาน



รูปที่ 10. แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรแบบฝังซึ่งมีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงแบบ PWM

4.3 การสร้างต้นแบบมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรแบบฝังซึ่งมีความหนาแน่น เส้นแรงแม่เหล็กสูง

ผลที่ได้จากการจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นการทำงานร่วมกันบนโปรแกรม finite element magnetic และ MATLAB/Simulink แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในช่องว่างอากาศมีลักษณะเข้าใกล้ไซน์ (รูปที่ 8-ข) ซึ่งเป็นผลมาจากการลดค่าฮาร์โมนิกส์ด้วยหลักการของ PWM จึงทำให้แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำหรือแรงดัน EMF ใกล้เคียงสัญญาณไซน์ด้วยเช่นกัน

การสร้างต้นแบบของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรแบบฝังในงานวิจัยนี้ใช้แม่เหล็กถาวรชนิด Samarium Cobalt ($\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$) ซึ่งมีค่าพลังงานอยู่ในช่วง 22-32 MGOe สามารถใช้งานในย่านที่อุณหภูมิสูงๆได้และทนต่อการกัดกร่อน โดยแม่เหล็กชนิดนี้เหมาะสำหรับใช้งานเป็นมอเตอร์ เซนเซอร์ หรืองานเฉพาะทางเช่น ยานยนต์ การบินและอวกาศ หรือทางด้านอาหาร แต่จะมีราคาที่สูงเนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นดังที่กล่าวมาแล้ว ตารางที่ 2 แสดงลักษณะสมบัติของแม่เหล็กถาวรชนิด Samarium Cobalt

ตารางที่ 2 ลักษณะสมบัติของแม่เหล็กถาวรชนิด Samarium Cobalt

Material	Grade	Remanence		Coercivity		Intrinsic Coercivity		Max. Energy Product	
		Br(mT)	Br(kGs)	bHc(kA/m)	bHc(kOe)	iHc (kA/m)	iHc (kOe)	(BH)max (KJ/m ³)	(BH)max (MGOe)
SmCo ₅	S 16	750-800	7.5-8.0	557-637	7.0-8.0	1989	25	111-143	14-18
	S 18	800-930	8.0-9.3	597-677	7.5-8.5	1432	18	127-159	16-20
	S 20	850-980	8.5-9.8	597-677	7.5-8.5	1273	16	143-175	18-22
	S 24	1000	10.0	680	8.5	1195	15	175-190	22-24
Sm ₂ Co ₁₇	S 180	900-1030	9.0-10.3	597-677	7.5-8.5	1194	15	127-159	16-20
	S 22A	900-1030	9.0-10.3	613-693	7.7-8.7	1989	25	159-191	20-24
	S 22B	900-1030	9.0-10.3	613-693	7.7-8.7	1432	18	159-191	20-24
	S 240	980-1080	9.8-10.8	636-716	8.0-9.0	1432	18	175-207	22-26
	S 26A	1000-1130	10.0-11.3	676-756	8.5-9.5	1194	15	191-223	24-28

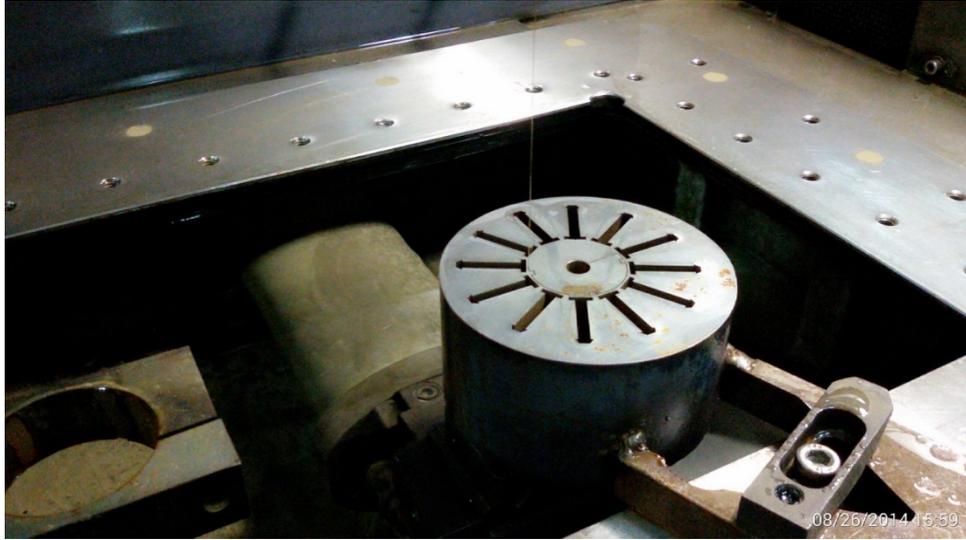
Material	Grade	Remanence		Coercivity		Intrinsic Coercivity		Max. Energy Product	
		Br(mT)	Br(kGs)	bHc(kA/m)	bHc(kOe)	iHc (kA/m)	iHc (kOe)	(BH)max (KJ/m ³)	(BH)max (MGOe)
Sm ₂ Co ₁₇	S 26B	1000-1130	10.0-11.3	676-756	8.5-9.5	796	10	191-223	24-28
	S 280	1030-1130	10.3-11.3	716-796	9.0-10.0	1432	18	207-239	26-30
	S 270	1000-1100	10.0-11.0	357-516	4.5-6.5	413	5.2	183-223	24-28
	S 300	1100-1200	11.0-12.0	438-517	5.5-6.5	454	5.7	223-255	28-32

ขนาดของแท่งแม่เหล็กที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาดต่อชิ้นคือ 4 x 25 x 20 มิลลิเมตร (กว้าง x ยาว x สูง) ดังแสดงในรูปที่ 11

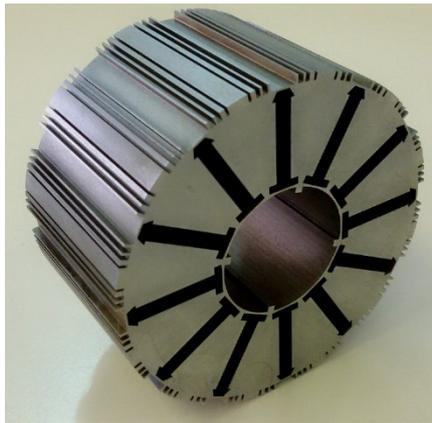


รูปที่ 11. ขนาดของแม่เหล็กถาวรชนิด Samarium Cobalt

การจัดเตรียมแกนโรเตอร์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 12 โดยใช้เหล็กชนิด XC10 จากนั้นนำมาทำการ wire cut ตามขนาดและลักษณะที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งลักษณะโครงสร้างของแกนโรเตอร์จะเป็นแม่เหล็กถาวรชนิดแบบฝังและมีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงผสมกับลักษณะของ PWM ซึ่งจะถูกระทำอยู่บนพื้นผิวของโรเตอร์



(ก) การจัดเตรียมชิ้นงานในการสร้างแกนโรเตอร์



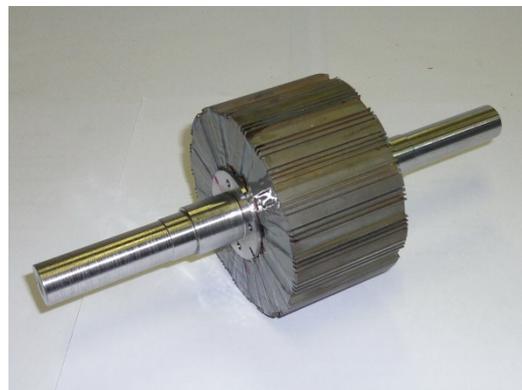
(ข) แกนโรเตอร์ PWM และแกนเฟลา

รูปที่ 12. ขั้นตอนการสร้างแกนโรเตอร์ผสมกับวิธี PWM

การสร้างโรเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวรแบบฝังความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงด้วยวิธี PWM มีลำดับขั้นตอนดังรูปที่ 13 และการวัดปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กที่แพร่กระจายในช่องว่างอากาศแสดงดังรูปที่ 14



(ก) การยัดแท่งแม่เหล็กถาวรเข้ากับแกนโรเตอร์ PWM



(ข) PWM โรเตอร์ที่เสร็จสมบูรณ์

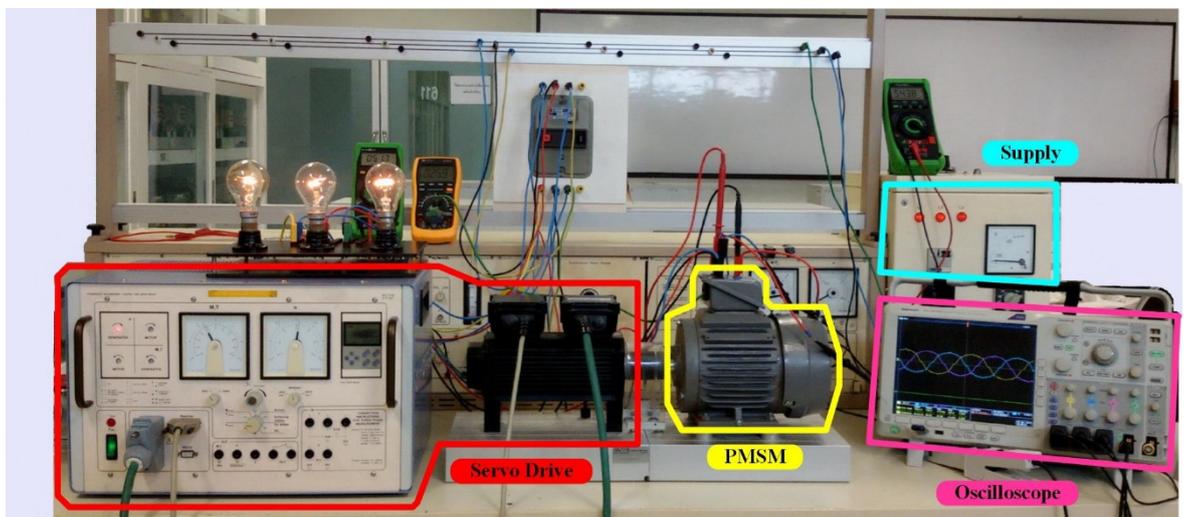
รูปที่ 13. ขั้นตอนการสร้างโรเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวรแบบฝังความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูง



รูปที่ 14. ปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กที่แพร่กระจายในช่องว่างอากาศ

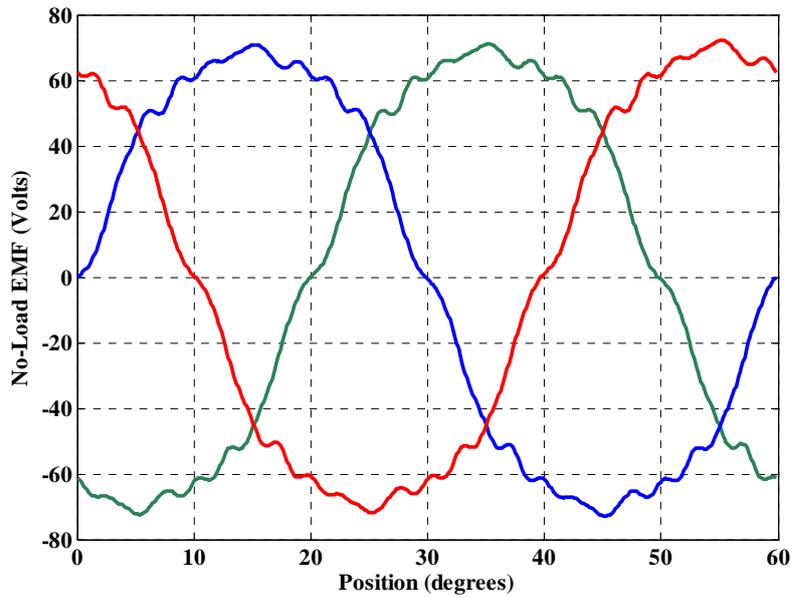
4.4 ผลการทดสอบต้นแบบมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรแบบฝังซึ่งมีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูง

การทดสอบต้นแบบของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรแบบฝังซึ่งมีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูง จากรูปที่ 15. เป็นการทดสอบเบื้องต้นซึ่งไม่มีระบบควบคุมการจ่ายไฟสามเฟสที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟสามเฟส (three-phase power supply) ระบบขับเคลื่อน (servo drive) มอเตอร์ต้นแบบ (PMSM) โดยมีจำนวนขั้วแม่เหล็กคือ 12 ขั้ว ทดสอบที่ความเร็ว 500 รอบและความถี่เท่ากับ 50 Hz

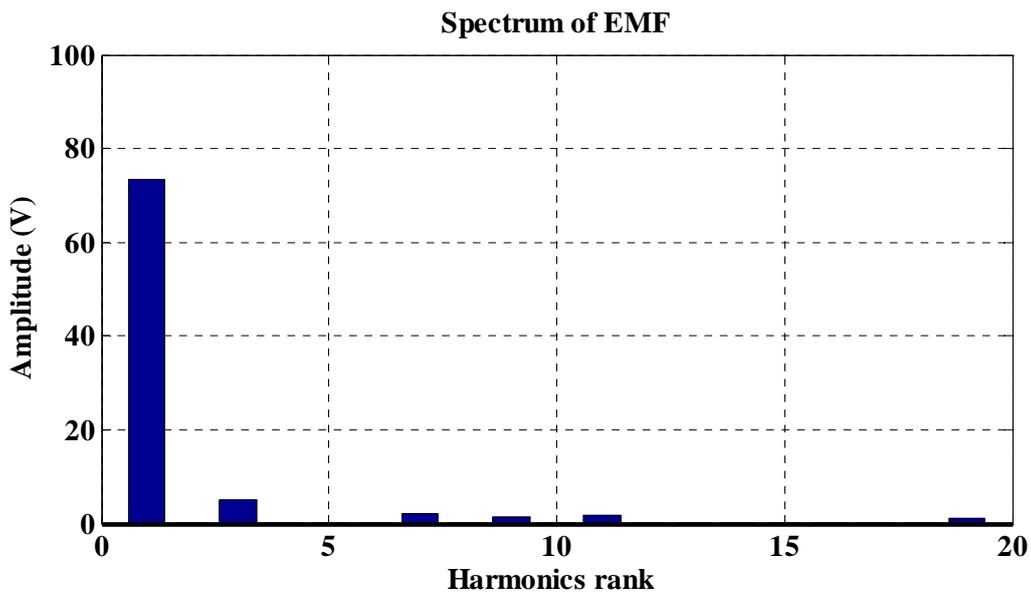


รูปที่ 15. การทดสอบเบื้องต้นของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรแบบฝัง

ลักษณะรูปคลื่นสัญญาณของแรงดัน back-emf ที่ได้จากการทดสอบต้นแบบมีสัญญาณเข้าใกล้ไซน์ดังแสดงในรูปที่ 16 โดยสเปคตรัมของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำของ fundamental มีค่าประมาณ 74 V ซึ่งมีค่าสูงกว่าผลที่ได้จากการจำลองทางคณิตศาสตร์ประมาณ 14.6% ในขณะที่ฮาร์โมนิกส์ที่ 5 มีค่าเท่ากับ 0.32 V คิดเป็นอัตราการลดลงร้อยละ 16.84 ของแรงดัน back-emf จากการจำลองทางคณิตศาสตร์ตามลำดับ



(ก) แรงดัน back-emf ทั้ง 3 เฟส

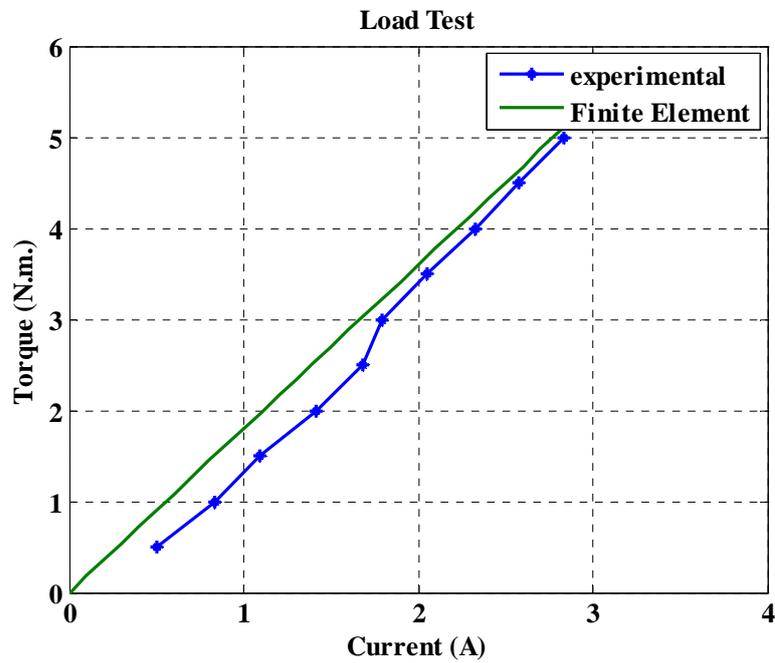


(ข) สเปกตรัมฮาร์โมนิกส์ที่ลำดับต่างๆ

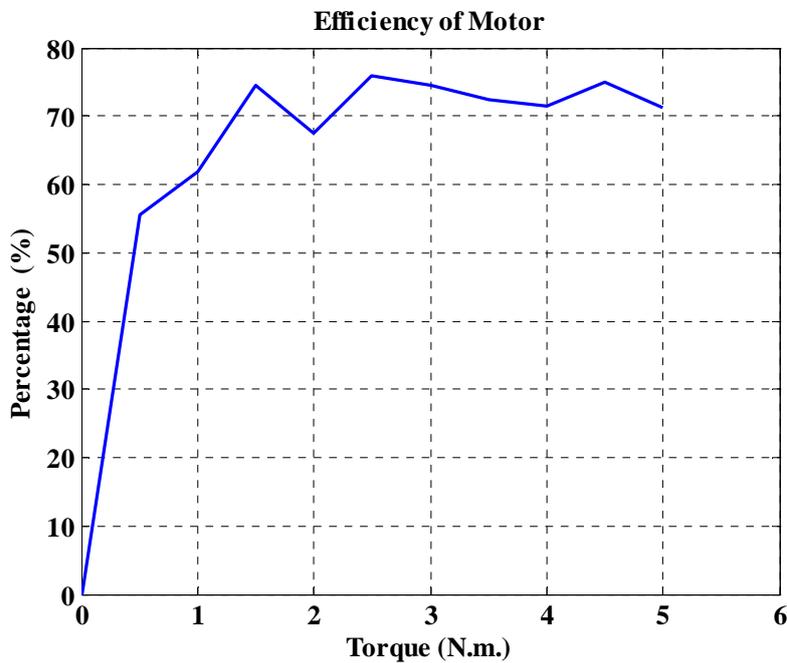
รูปที่ 16. แรงดัน back-emf และสเปกตรัมที่ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆ

การทดสอบในกรณีมีโหลด กราฟทดสอบแรงบิดต่อกระแสแสดงดังรูปที่ 17 ก. จะสังเกตเห็นได้ว่า ผลการทดสอบนั้นเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับทางภาคทฤษฎีซึ่งมาจากการจำลองทางคณิตศาสตร์ (finite element) สำหรับการประสิทธิภาพของมอเตอร์ได้ ทำการทดสอบที่แรงบิด 1-5 นิวตัน-เมตร (รูปที่ 17 ข.) ซึ่งลักษณะของสัญญาณเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับทางภาคทฤษฎีแต่จะมีการกระตุกบ้างซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากลักษณะโครงสร้างของโรเตอร์ โดยปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดย

ใช้ระบบควบคุม ประสิทธิภาพของมอเตอร์ต้นแบบนี้มีค่าประมาณ 70% หากเทียบกับมอเตอร์เดิมที่มาจากผู้ผลิตแล้วอยู่ที่ประมาณ 60%



(ก) แรงบิดต่อกระแส



(ข) ประสิทธิภาพของมอเตอร์ (%)

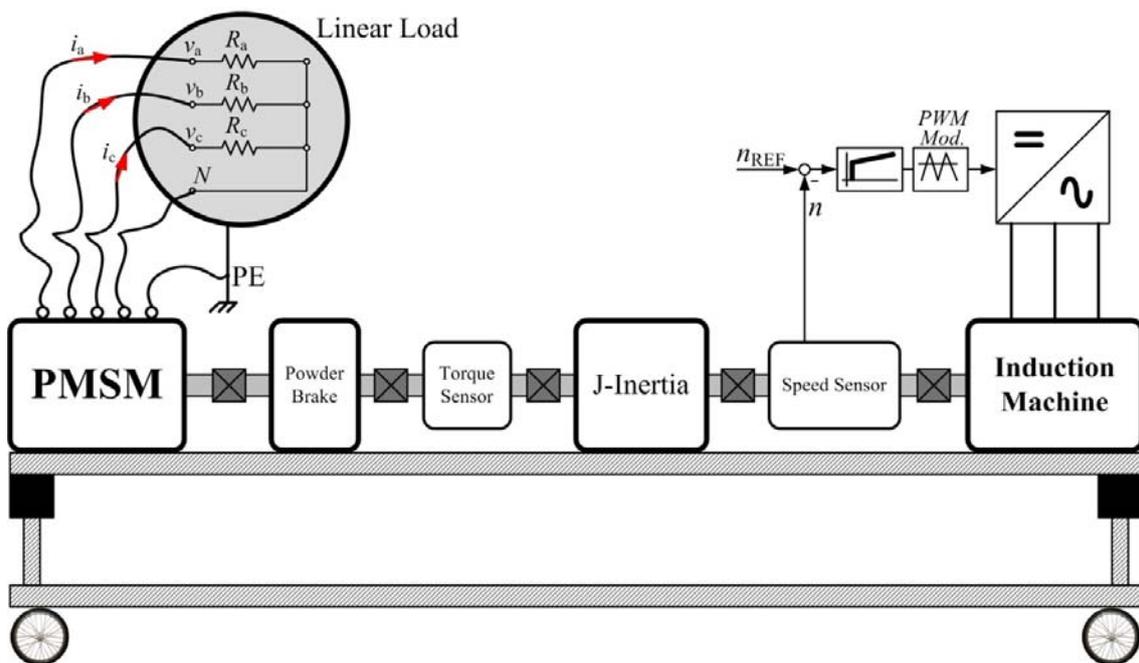
รูปที่ 17. การทดสอบแรงบิดและประสิทธิภาพเบื้องต้นของมอเตอร์ต้นแบบ

เพื่อให้การทดสอบมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการทดสอบมอเตอร์โดยใช้ระบบควบคุมเข้ามาทดสอบ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 โหมดคือ การทดสอบโหมดเจนเนอเรเตอร์ และโหมดการทดสอบเป็นมอเตอร์

4.4.1 โหมดเจนเนอเรเตอร์

4.4.1.1 โหลดที่เป็นเชิงเส้น

การทดสอบสมรรถนะการทำงานของมอเตอร์ต้นแบบสามารถทำได้โดยต่อโหลดเข้าไป ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยการควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์และระบบขับเคลื่อน (resolver) จะเป็นการทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น ผังแทนทดสอบแสดงดังรูปที่ 18



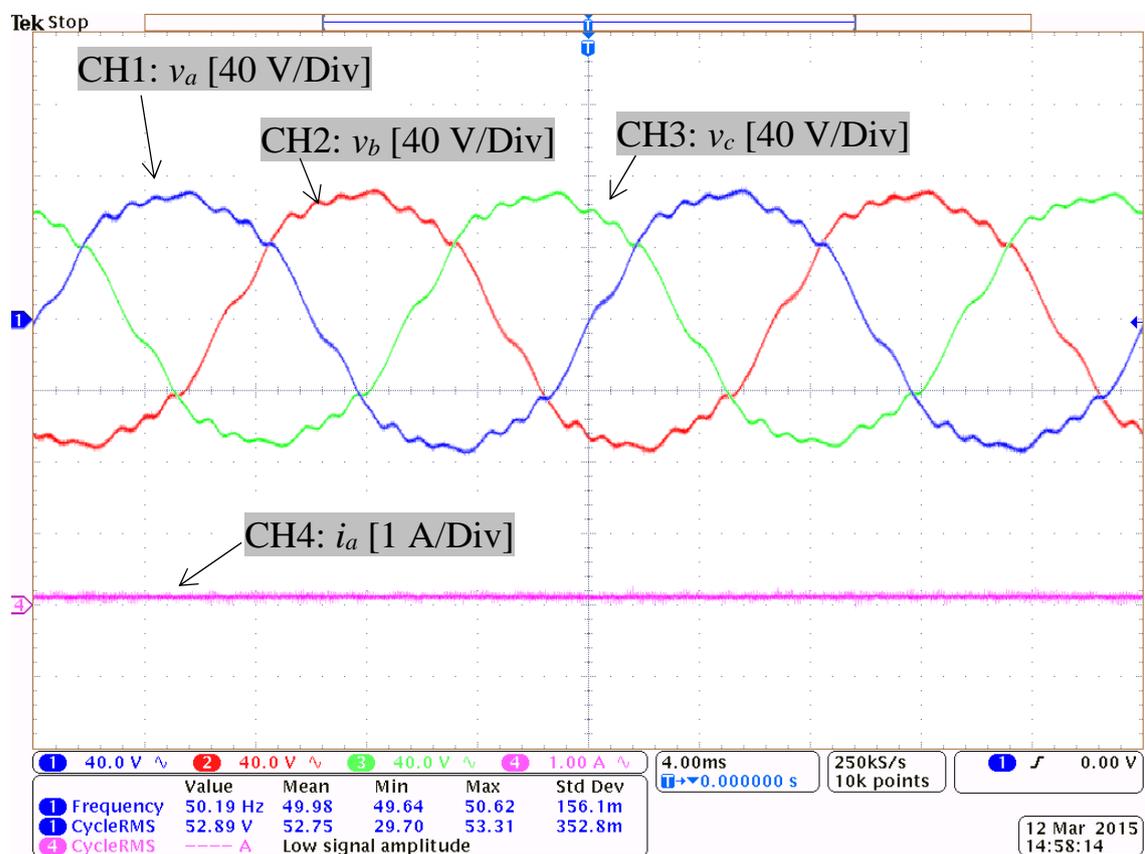
รูปที่ 18. ผังแทนทดสอบ : โหมดเจนเนอเรเตอร์ 3 เฟส แบบโหลดความต้านทานที่เป็นเชิงเส้น

จากผังแทนทดสอบแกนเพลลาของมอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวรจะถูกต่อเข้ากับระบบเบรก เซนเซอร์แรงบิด อุปกรณ์ตรวจวัดความเร็วรอบและมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งมอเตอร์เหนี่ยวนำนี้จะทำงานเป็นมอเตอร์โดยรับแหล่งจ่ายไฟผ่านทางอินเวอร์เตอร์ชนิด 3 เฟส และมีการควบคุมความเร็วรอบแบบวงปิดผ่านทาง dSPACE

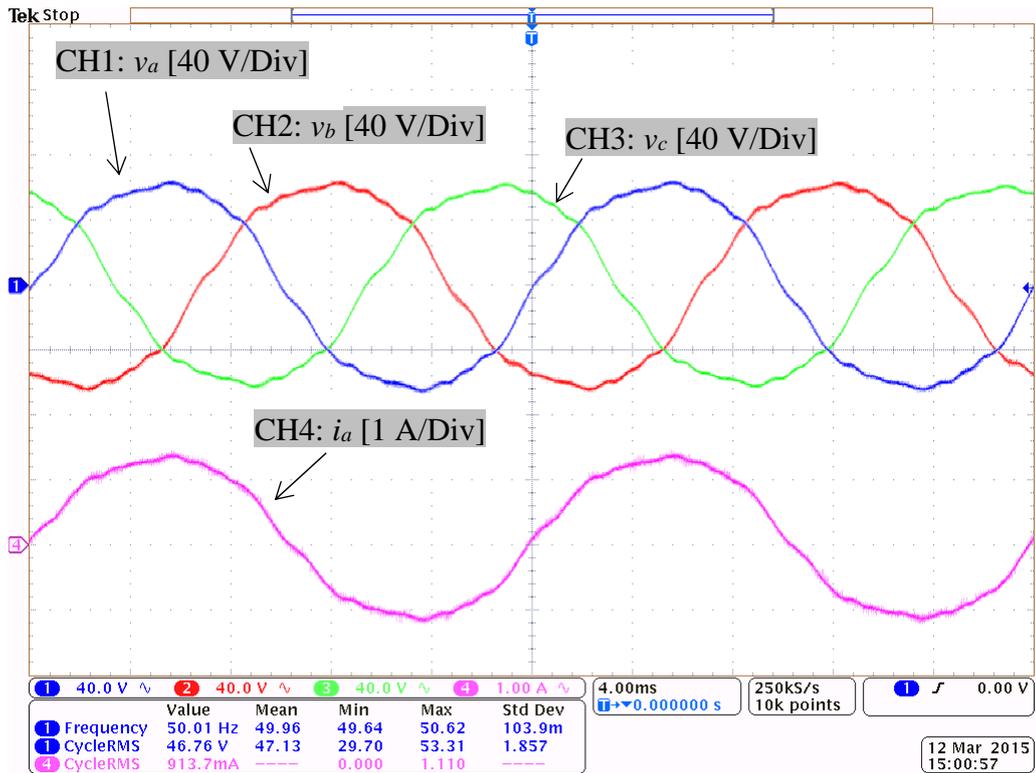
การทดสอบในรูปที่ 19-22 รูปสัญญาณที่ปรากฏบนหน้าจอของออสซิลโลสโคปแสดงแรงดันไฟฟ้าแต่ละเฟสและกระแส ความเร็วรอบของโรเตอร์ที่ 500 รอบ (nominal) ซึ่งใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นตัวขับเคลื่อน โดยที่

- CH1: phase voltage v_a
- CH2: phase voltage v_b
- CH3: phase voltage v_c
- CH4: phase current i_a

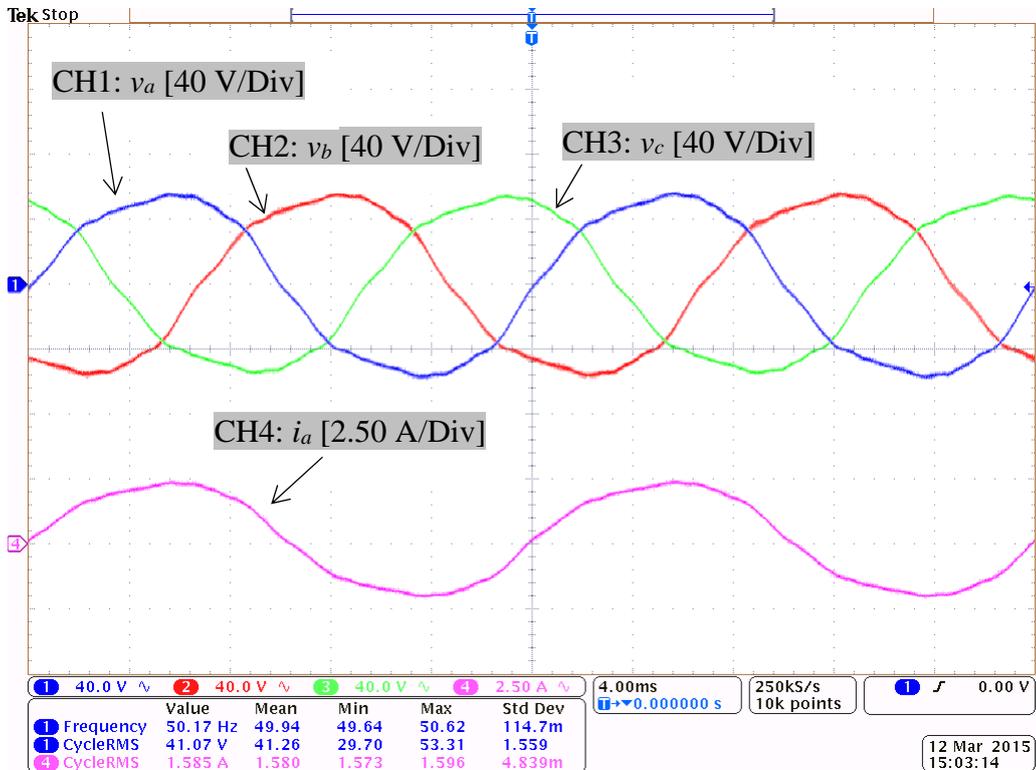
รูปที่ 19 เป็นการทดสอบกรณีไม่มีโหลดซึ่งแรงดัน back-EMF ที่ได้ใกล้เคียงสัญญาณรูปคลื่นไซน์ และแรงดันแต่ละเฟสมีค่าประมาณ 52.89 V ที่ความถี่ 50.19 Hz. ในขณะที่รูป 20-22 กำหนดให้ $R_a = R_b = R_c = 50 \Omega, 25 \Omega$ และ 8Ω ตามลำดับ



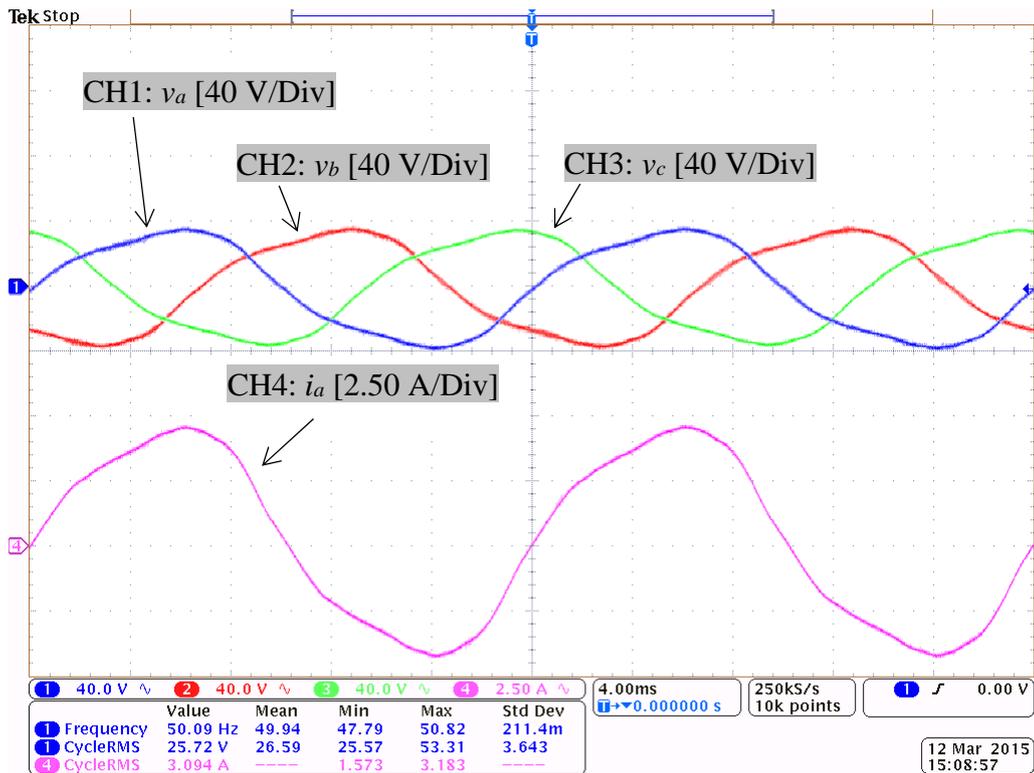
รูปที่ 19. โหมดเจนเนอเรเตอร์ : กรณีไม่มีโหลด ที่ความเร็ว 500 รอบ



รูปที่ 20. โหมดเจนเนอเรเตอร์ : กรณีโหลด = 50Ω ที่ความเร็ว 500 รอบ



รูปที่ 21. โหมดเจนเนอเรเตอร์ : กรณีโหลด = 25Ω ที่ความเร็ว 500 รอบ



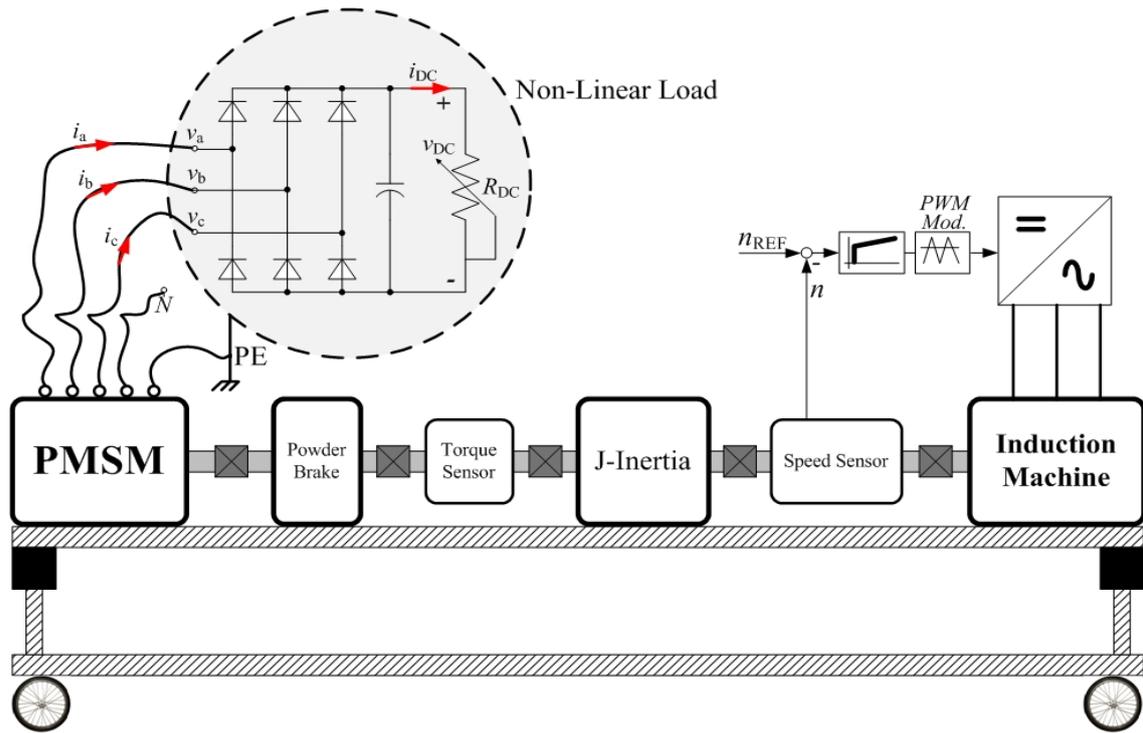
รูปที่ 22. โหมดเจนเนอเรเตอร์ : กรณีโหลด = 8Ω ที่ความเร็ว 500 รอบ

4.4.1.2 โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น

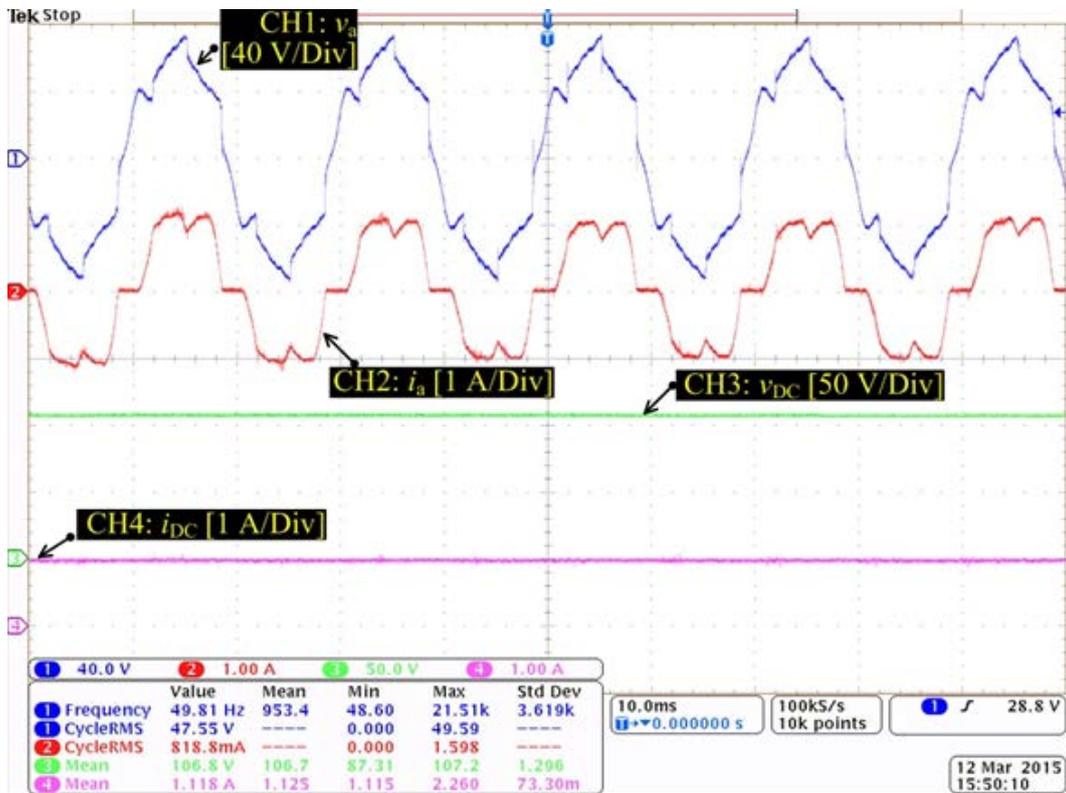
การทดสอบนี้เจนเนอเรเตอร์ถูกต่อเข้ากับ 3-phase full-bridge uncontrolled rectifier ซึ่งเป็นโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (รูปที่ 23) โดยทำการปรับที่ R_{DC} เพื่อคุณลักษณะสมบัติของมอเตอร์ รูปที่ 23-26 แสดงแรงดันและกระแสที่ได้โดยทดสอบที่ความเร็วรอบคงที่ 500 รอบซึ่งถูกขับโดยมอเตอร์เหนี่ยวนำ และกำหนดให้สัญญาณที่วัดได้ซึ่งปรากฏบนหน้าจอออสซิลโลสโคปมีดังนี้

- CH1: phase voltage v_a
- CH2: phase voltage i_a
- CH3: phase voltage v_{DC}
- CH4: phase current i_{DC}

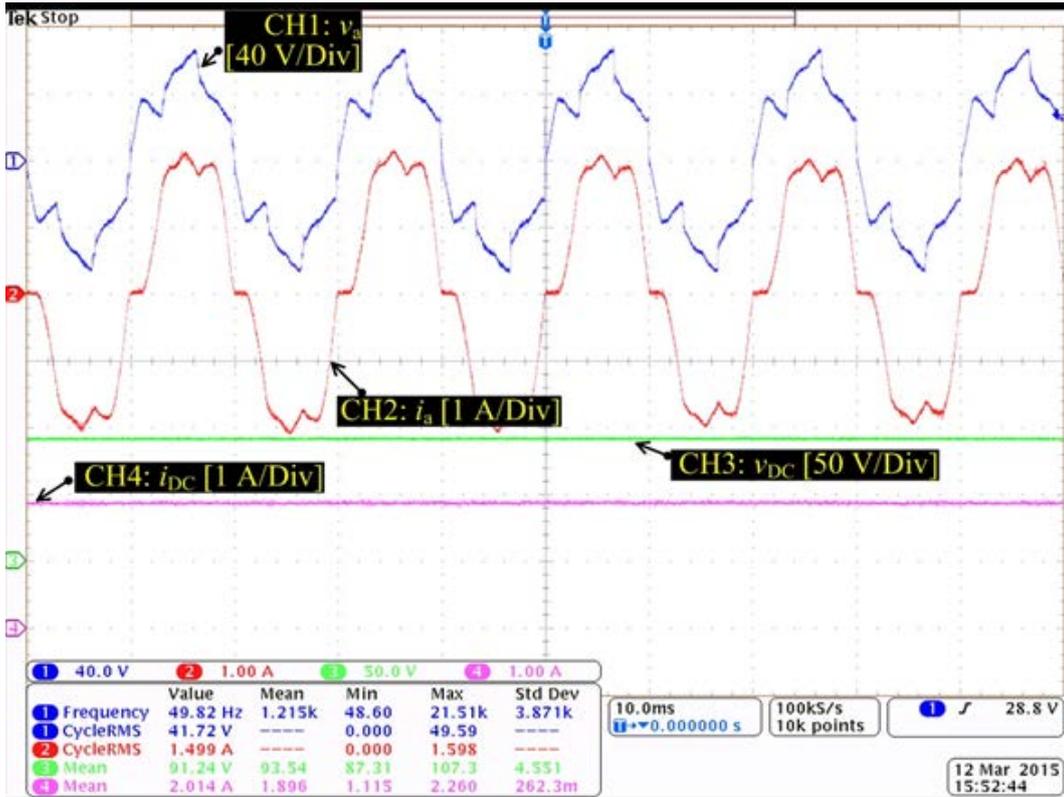
รูปที่ 23-26 แสดงค่ากระแส i_{DC} ในการทดสอบที่วัดได้คือ 1, 2, 3 และ 4 A ตามลำดับ



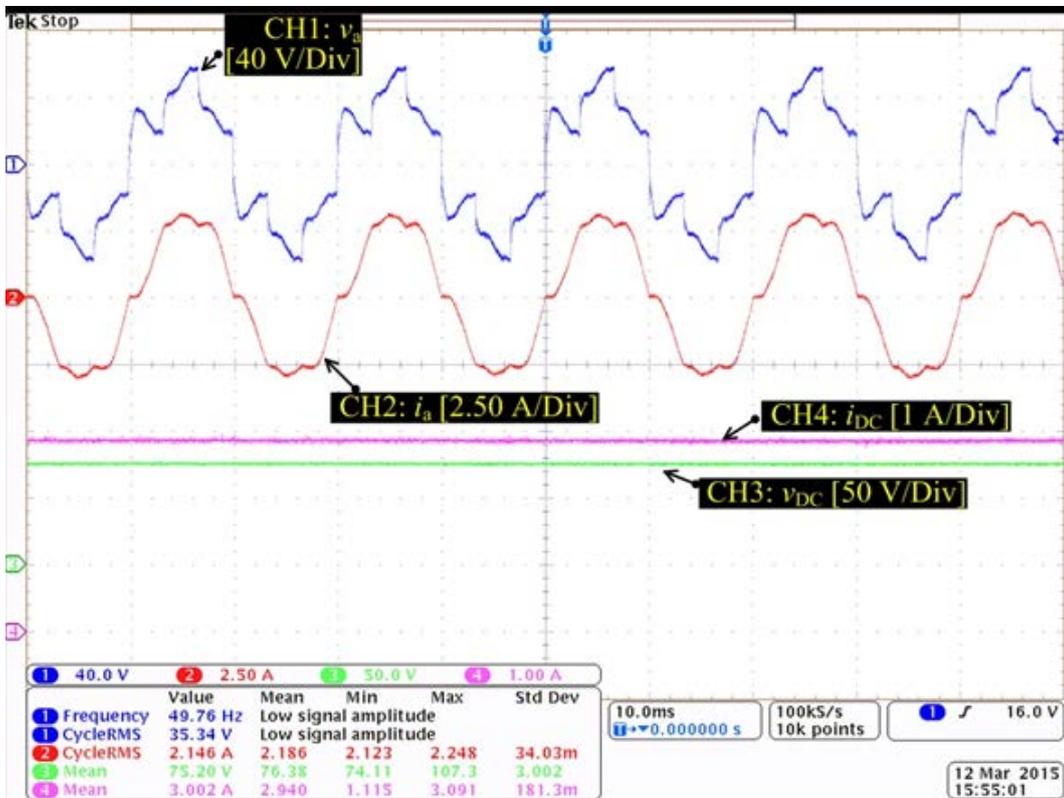
รูปที่ 23. ผังแทนทดสอบ : เจนเนอเรเตอร์ 3 เฟสแบบโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น



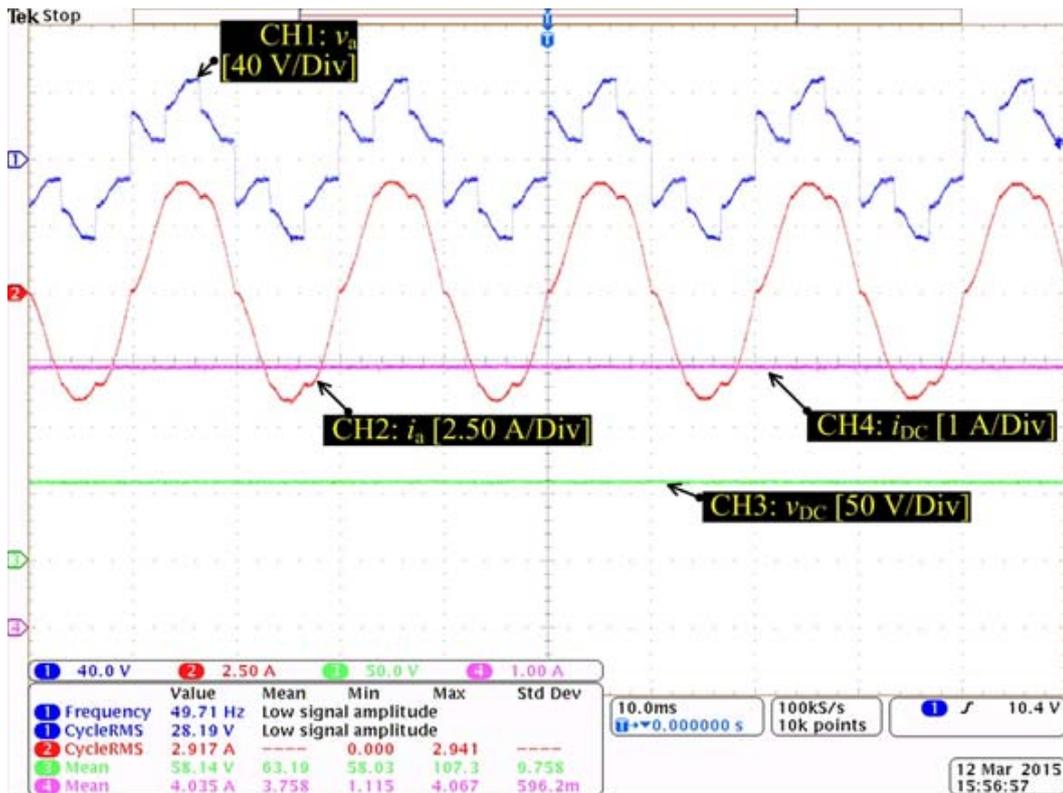
รูปที่ 24. โหลดเจนเนอเรเตอร์ : $i_{DC} = 1$ A ที่ความเร็ว 500 รอบ



รูปที่ 25. โหมดเจนเนอเรเตอร์ : $i_{DC} = 2$ A ที่ความเร็ว 500 รอบ



รูปที่ 26. โหมดเจนเนอเรเตอร์ : $i_{DC} = 3$ A ที่ความเร็ว 500 รอบ

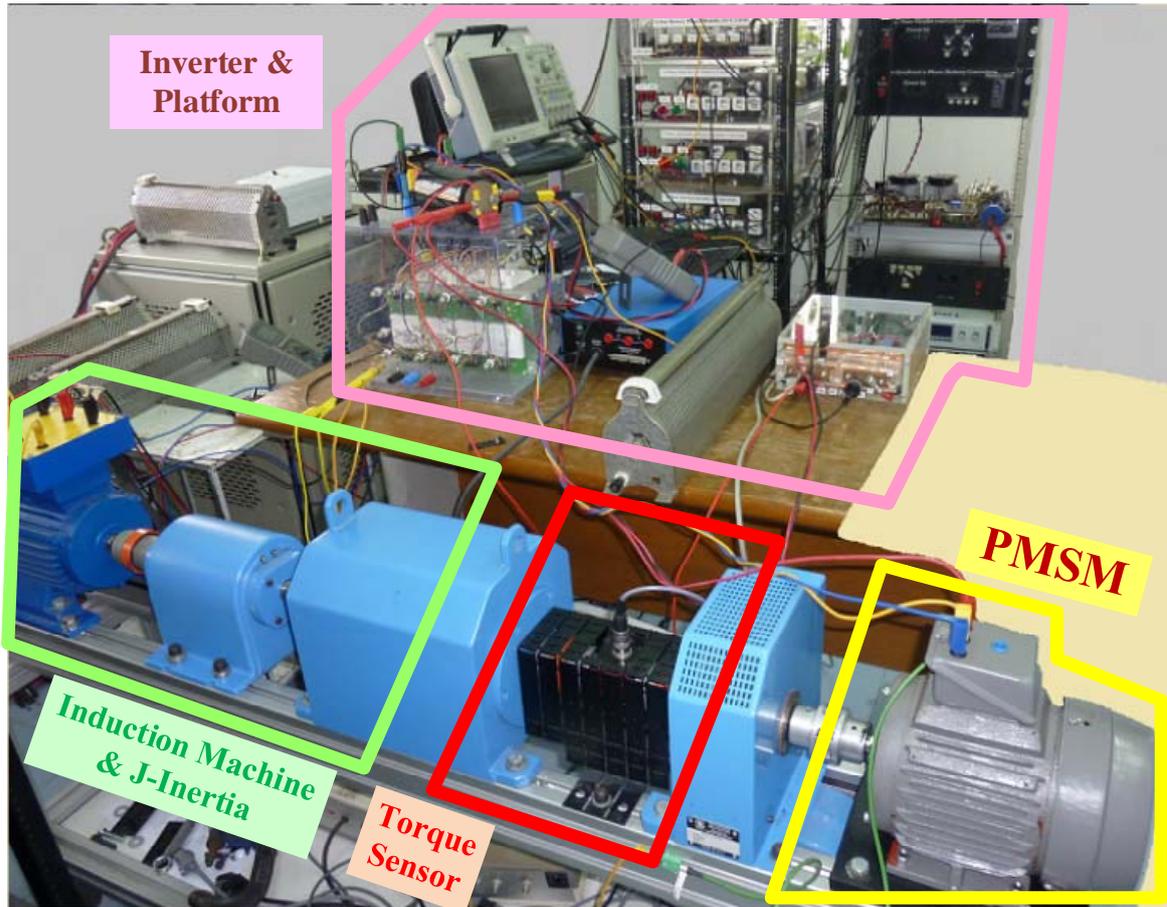


รูปที่ 27. โหมดเจนเนอเรเตอร์ : $i_{DC} = 4 \text{ A}$ ที่ความเร็ว 500 รอบ

4.4.2 โหมดมอเตอร์

4.4.2.1 การควบคุมแบบวงเปิด (V/f)

มอเตอร์ซึ่งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรถูกต่อเข้ากับระบบเบรก เซนเซอร์แรงบิด โมเมนต์ความเฉื่อย อุปกรณ์ตรวจวัดความเร็วรอบและมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งมอเตอร์ซึ่งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรนี้จะทำงานในโหมดมอเตอร์และถูกขับด้วยอินเวอร์เตอร์ 3-เฟส และอาศัยการควบคุมแบบวงเปิดซึ่งทดสอบแรงดันต่อความถี่ (V/f) โมเมนต์ความเฉื่อยจะถูกวัดที่แกนเพลลาและใช้พารามิเตอร์บางตัวเท่านั้นมาทำการวิเคราะห์ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ป้อนให้กับอินเวอร์เตอร์มีค่าคงที่ประมาณ 130 โวลต์ และความถี่อ้างอิงจะถูกกำหนดผ่านทางแพลตฟอร์มการควบคุมด้วย dSPACE ดังรูปที่ 28

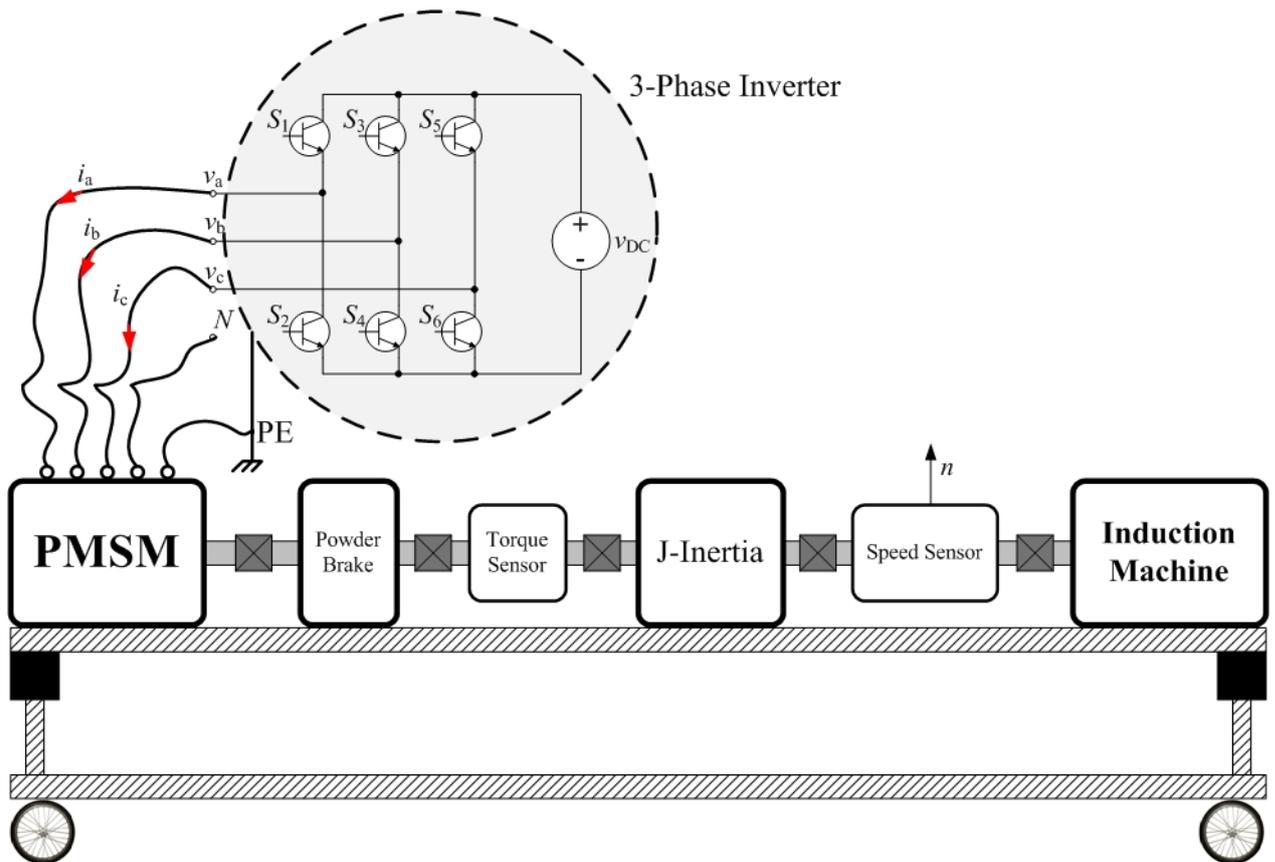


รูปที่ 28. แทนทดสอบที่ใช้งานจริง

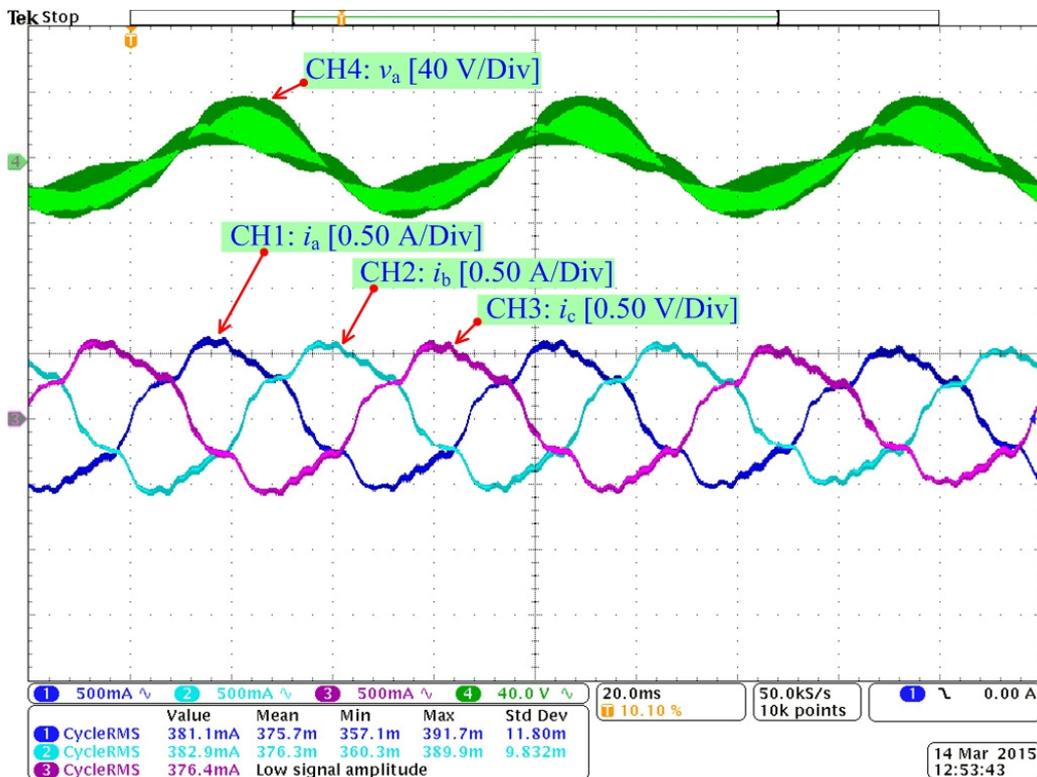
ความถี่ของการสวิตช์ถูกกำหนดเป็นแบบ PWM ซึ่งในการทดสอบกำหนดให้ $f_s = 10$ kHz และความถี่ในการอ้างอิง f_o มีค่า 15 Hz, 25 Hz และ 40 Hz ตามลำดับ ดังรูปที่ 30-32 การวัดสัญญาณที่ปรากฏบนออสซิลโลสโคปมีดังนี้

- CH1: phase voltage v_a
- CH2: phase current i_a
- CH3: phase current i_b
- CH4: phase current i_c

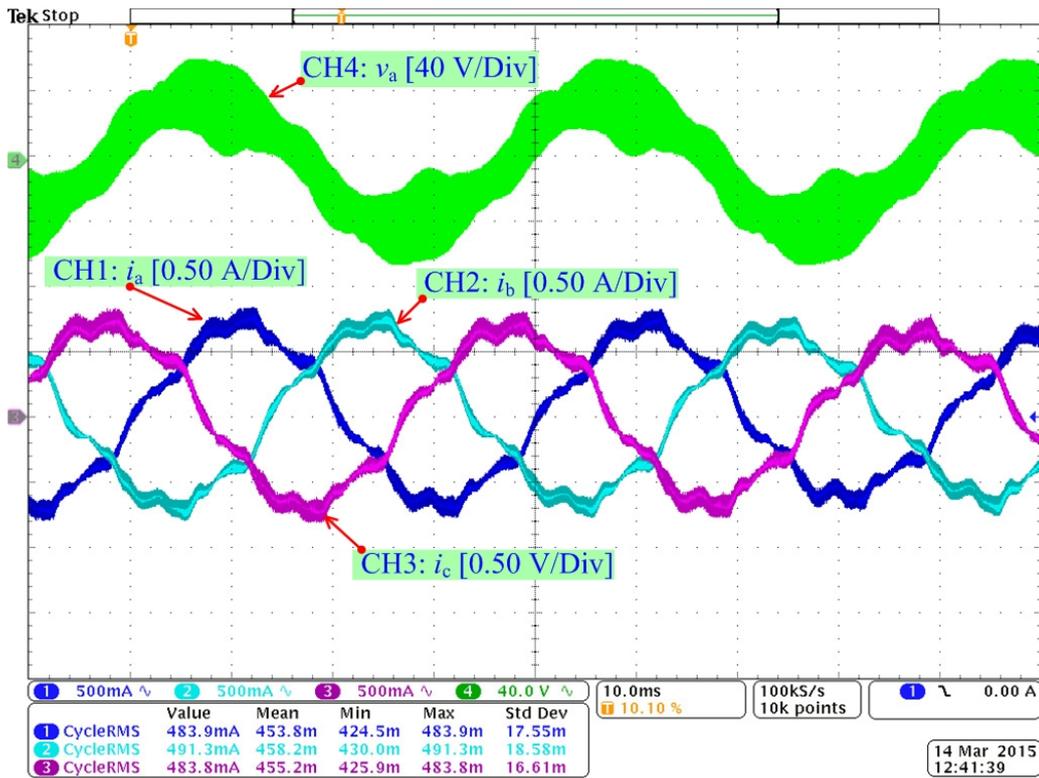
การทดสอบโดยการเปลี่ยนความถี่ในการสวิตช์แบบ PWM : $f_s = 20$ kHz แสดงดังรูปที่ 33-35 ซึ่งใช้ความถี่อ้างอิง ; f_o มีค่า 15 Hz, 25 Hz และ 40 Hz



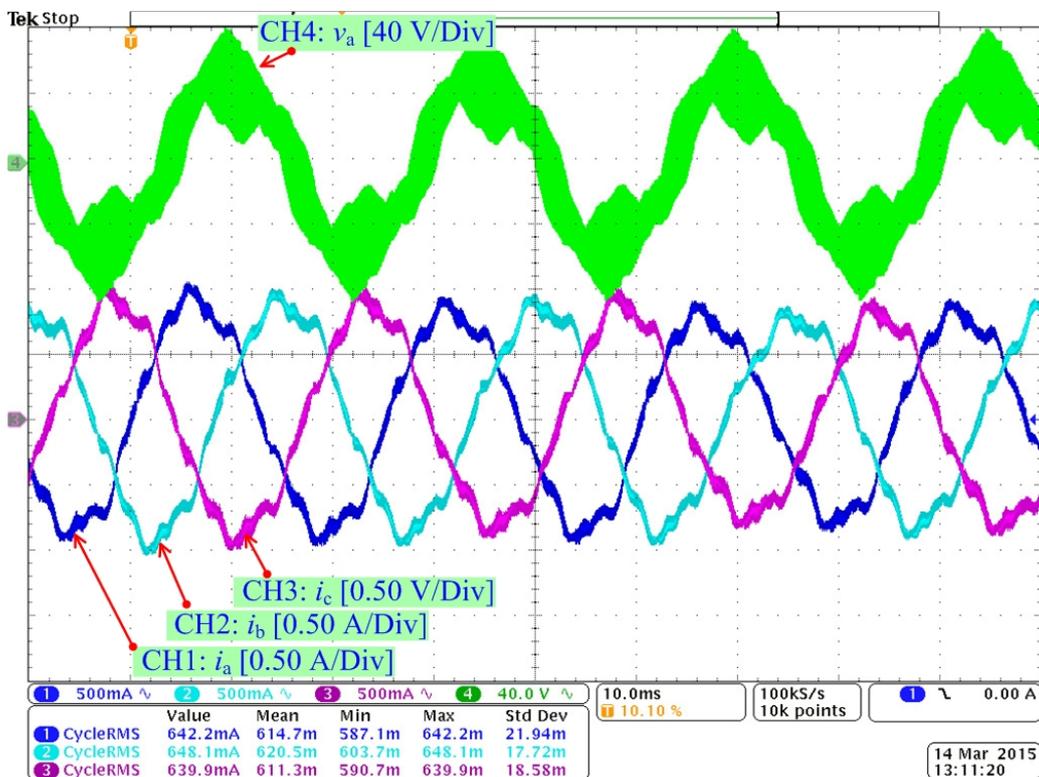
รูปที่ 29. ฟังแทนทดสอบ : โหมดมอเตอร์ โดยใช้อินเวอร์เตอร์ 3 เฟสเป็นแหล่งจ่ายไฟ



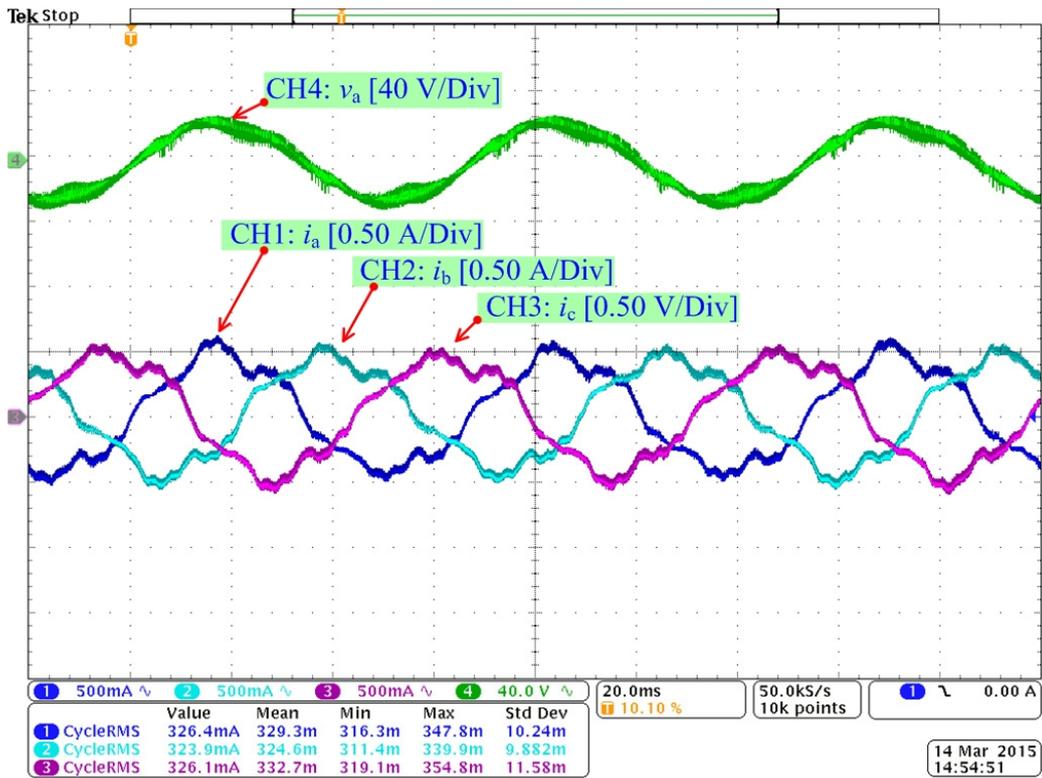
รูปที่ 30. โหมดมอเตอร์ : $f_s = 10 \text{ kHz}$, $f_o = 15 \text{ Hz}$ และทดสอบที่ความเร็ว 150 รอบ



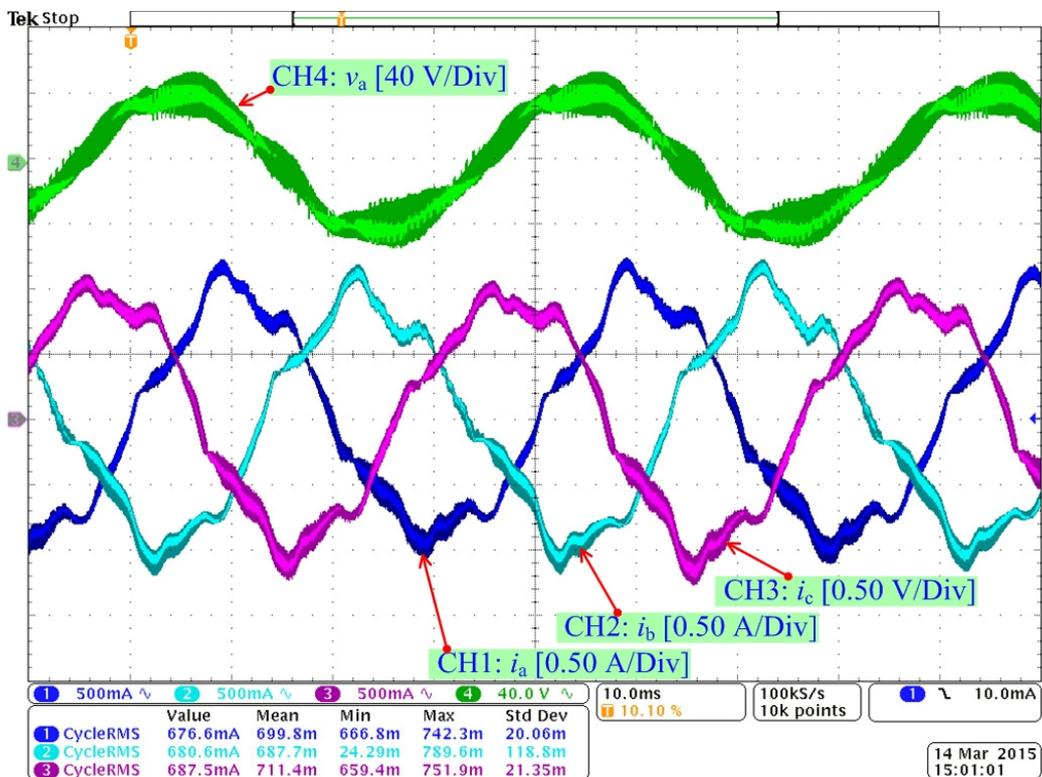
รูปที่ 31. โหมมมอเตอร์ : $f_s = 10 \text{ kHz}$, $f_o = 25 \text{ Hz}$ และทดสอบที่ความเร็ว 250 รอบ



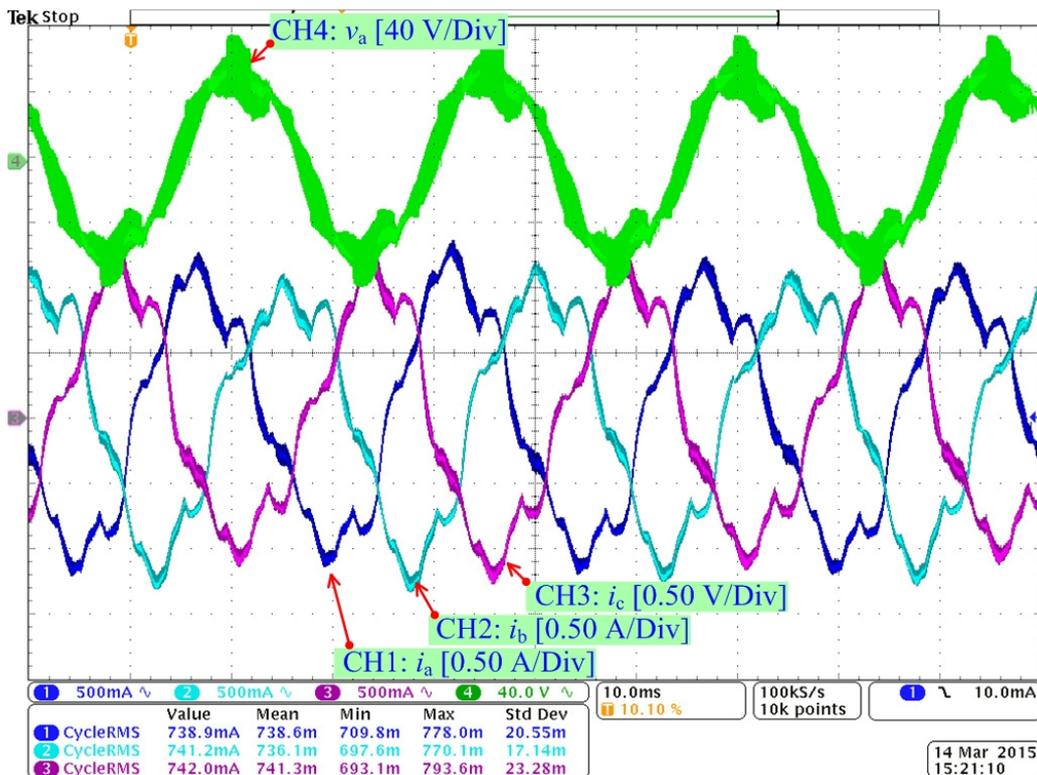
รูปที่ 32. โหมมมอเตอร์ : $f_s = 10 \text{ kHz}$, $f_o = 40 \text{ Hz}$ และทดสอบที่ความเร็ว 400 รอบ



รูปที่ 33. โหมตมอเตอร์ : $f_s = 20 \text{ kHz}$, $f_o = 15 \text{ Hz}$ และทดสอบที่ความเร็ว 150 รอบ



รูปที่ 34. โหมตมอเตอร์ : $f_s = 20 \text{ kHz}$, $f_o = 25 \text{ Hz}$ และทดสอบที่ความเร็ว 250 รอบ



รูปที่ 35. โหมตมอเตอร์ : $f_s = 20 \text{ kHz}$, $f_o = 40 \text{ Hz}$ และทดสอบที่ความเร็ว 400 รอบ

4.5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

เมื่อพิจารณาจากผลการจำลอง การออกแบบและสร้าง การทดสอบต้นแบบของมอเตอร์ ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรแบบฝังในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อยืนยันแนวความคิดการดำเนินการ จัดทำวิจัยสามารถสรุปเป็นผลลัพธ์ที่ได้รับซึ่งมีประเด็นสำคัญดังต่อไปนี้

1. ดำเนินการโครงการตามวัตถุประสงค์และขอบเขตการดำเนินงานวิจัย ตรวจสอบได้จากผลการจำลองและทดสอบ
2. สามารถทดสอบการทำงานของระบบต้นแบบด้วยวิธีการจำลอง การออกแบบ การสร้าง และทดสอบจากต้นแบบจริง รวมถึงสามารถเก็บผลการทดลองสำหรับเผยแพร่ผลงานตีพิมพ์ลงในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ (**IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS 2015**) เพื่อปิดโครงการได้ทันตามระยะเวลาที่กำหนดตามสัญญาภายในระยะเวลา 2 ปี (**3 มิถุนายน 2556 ถึง 2 มิถุนายน 2558**)
3. สามารถนำประเด็นที่ได้จากโครงการนำไปเผยแพร่งานวิจัยในการประชุมวิชาการระดับชาติ และระดับนานาชาติได้
4. ได้รับองค์ความรู้และประสบการณ์ในการบริหารโครงการด้วยตนเองหลังจากจบการศึกษา ระดับปริญญาเอก หากมีปัญหหรือประเด็นข้อสงสัยก็ปรึกษานักวิจัยที่ปรึกษา หรือผู้เชี่ยวชาญในด้านนั้นๆ

4.6 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

สำหรับการดำเนินงานวิจัยในโครงการนี้ มีข้อเสนอแนะการดำเนินงานวิจัยในอนาคตดังต่อไปนี้

1. ศึกษาวิธีการออกแบบระบบการควบคุมแบบวงปิด เพื่อให้ระบบการขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรมีเสถียรภาพยิ่งมากขึ้น
2. ศึกษาและออกแบบโครงสร้างของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานในด้านอื่นๆ เพื่อการประหยัดพลังงาน เช่น มอเตอร์กั๊กหันลมในการผลิตไฟฟ้า มอเตอร์ขับเคลื่อนในระบบการขนส่ง เป็นต้น

Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

1. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ

Sisuda Chaithongsuk, Nouredine Takorabet and Sangkla Kreuawan,
“Reduction of Eddy-Current Losses in Fractional-Slot Concentrated-Winding
Synchronous PM Motors,” IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, March
2015, Vol. 51, No. 3, pp. 8102204(1-4).