

บทที่ 4 ผลการจำลองและผลการทดลอง

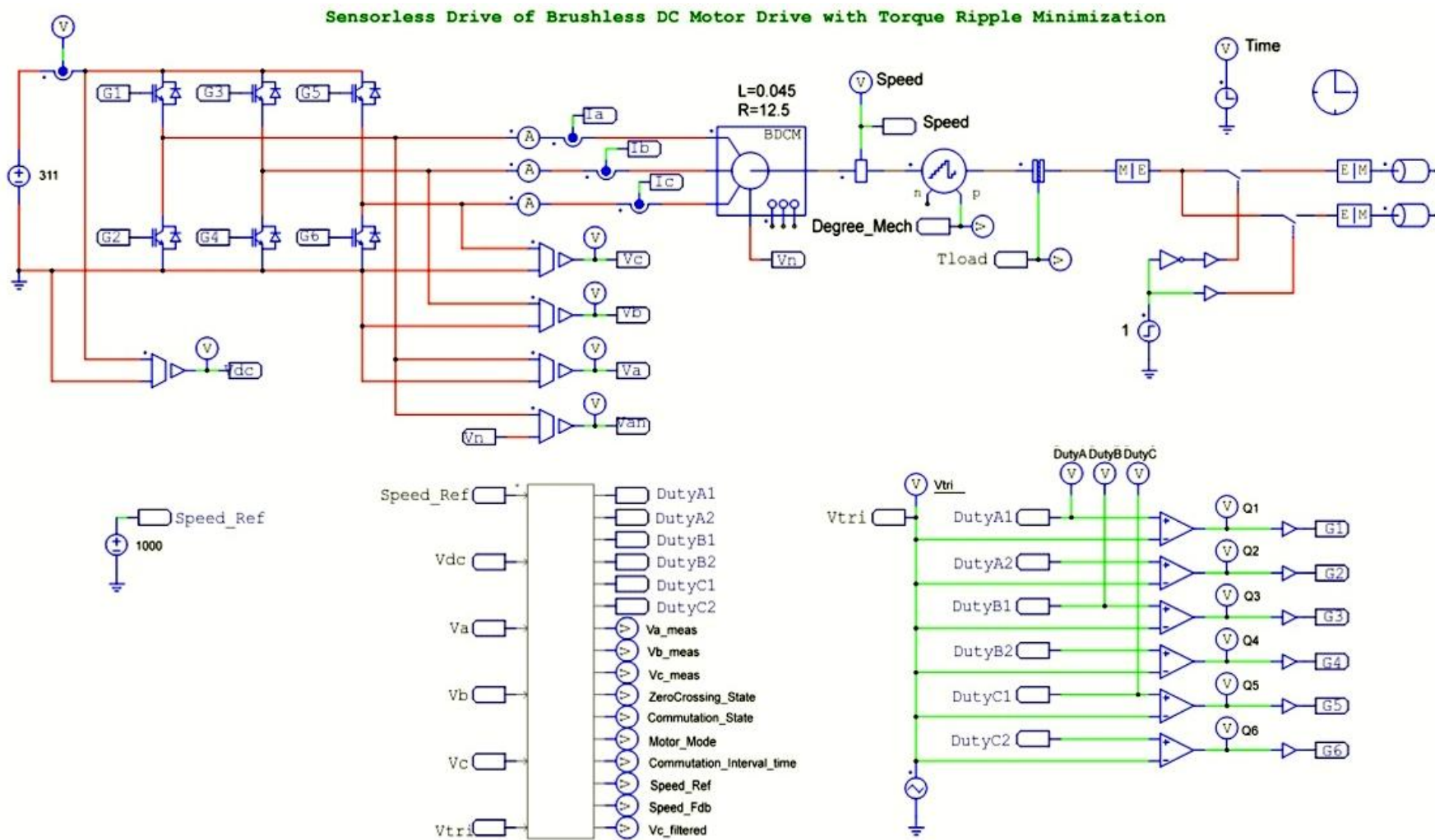
ในบทนี้แสดงผลการจำลองและผลการทดลองของการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบไร้ตัวตรวจจับตำแหน่งพร้อมทั้งลดการกระเพื่อมแรงบิดมอเตอร์ซึ่งแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ผลการจำลองการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยโปรแกรม PSIM และผลการทดลองด้วยชุดวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบไร้ตัวตรวจจับตำแหน่ง

4.1 ผลการจำลอง

เพื่อที่จะพิสูจน์แนวคิดและประสิทธิภาพของการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบไร้ตัวตรวจจับตำแหน่งพร้อมทั้งลดการกระเพื่อมแรงบิดมอเตอร์ จึงแบ่งผลการจำลองการทำงานเป็นส่วนดังนี้

- 1) การเริ่มหมุนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านจากสภาวะหยุดนิ่ง
- 2) การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบไร้ตัวตรวจจับตำแหน่ง ด้วยกระแสไฟฟ้าแบบควาซี-สแควร์ที่มีการชดเชยช่วงเวลาคอมมิวเทชัน
- 3) การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบไร้ตัวตรวจจับตำแหน่ง ด้วยกระแสไฟฟ้าแบบควาซี-ไซน์
- 4) การเปรียบเทียบการลดการกระเพื่อมแรงบิดมอเตอร์และการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์

แบบจำลองการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบไร้ตัวตรวจจับตำแหน่งด้วยโปรแกรม PSIM แสดงดังรูปที่ 4.1 โดยที่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการจำลองทั้งหมดถูกแสดงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แบบจำลองการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบไร้ตัวตรวจจับตำแหน่ง

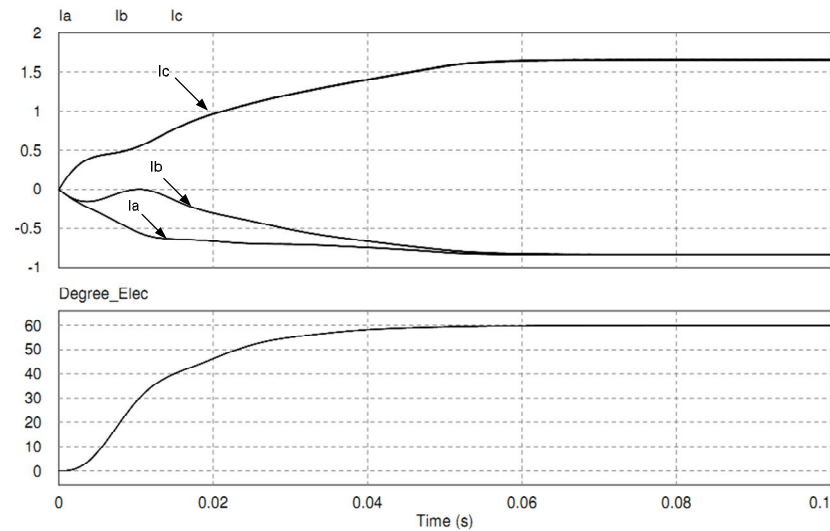
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดที่ใช้ในการจำลอง

พารามิเตอร์	ค่า
แรงดันไฟฟ้าฟีดมอเตอร์	220 V _{ac}
กำลังไฟฟ้าฟีดมอเตอร์	200W
ความเร็วรอบมอเตอร์ฟีด	3000 rpm
ความต้านทานขดลวดมอเตอร์ (R)	12.5 Ohm
ความเหนี่ยวนำขดลวดมอเตอร์ (L)	45 mH
ค่าคงที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (K _e)	0.0338 V/rpm
จำนวนโพล (Pole)	4
ความถี่สวิตซ์ซิง	16 KHz
แรงดันแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง	311 V _{dc}

4.1.1 การเริ่มหมุนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านจากสถานะหยุดนิ่ง

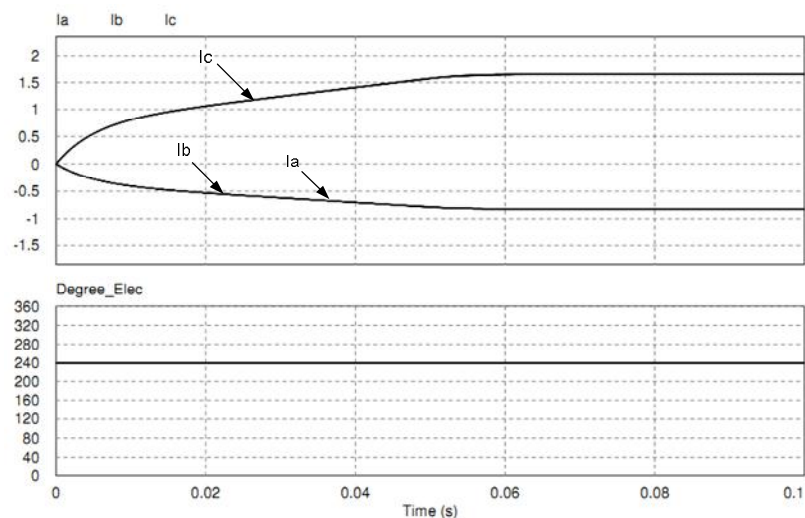
จากที่กล่าวบทที่ 2 ขั้นตอนการเริ่มหมุนมอเตอร์จากสถานะหยุดนิ่งมี 3 ขั้นตอนคือ 1) การบังคับตำแหน่งโรเตอร์ให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเริ่มต้น 2) การขับเคลื่อนมอเตอร์แบบลูปเปิด และ 3) การเปลี่ยนสถานะจากการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบลูปเปิดไปสู่การขับเคลื่อนแบบไรต์วอร์จบังคับตำแหน่ง ดังนั้นจึงนำเสนอผลการจำลองตามลำดับดังต่อไปนี้

ลำดับแรกทำการบังคับโรเตอร์ให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเริ่มต้น โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเข้าที่ขดลวดเฟส C และไหลออกที่เฟส A และ B เป็นเวลา 0.1 วินาที ซึ่งสวิตซ์ Q_5 ทำงานเปิด-ปิด ตามสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลชันด้วยค่าดีวีไอเกิลเริ่มต้นที่ 5% แล้วค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนเท่ากับ 10% เพื่อลดผลการกระเพื่อมแรงบิดช่วงเริ่มต้น ส่วนสวิตซ์ Q_2 และ Q_4 ทำงานต่อเนื่อง ทำให้กระแสไฟฟ้าเฟส I_c ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจากศูนย์ จนเท่ากับ 1.65 A ขณะที่กระแสไฟฟ้าเฟส I_a และ I_b ลดลงจนเท่ากับ -0.825 A ส่งผลให้โรเตอร์สามารถเคลื่อนที่จากตำแหน่งมุม 0 ไปยังตำแหน่งมุม 60 องศาไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 4.2



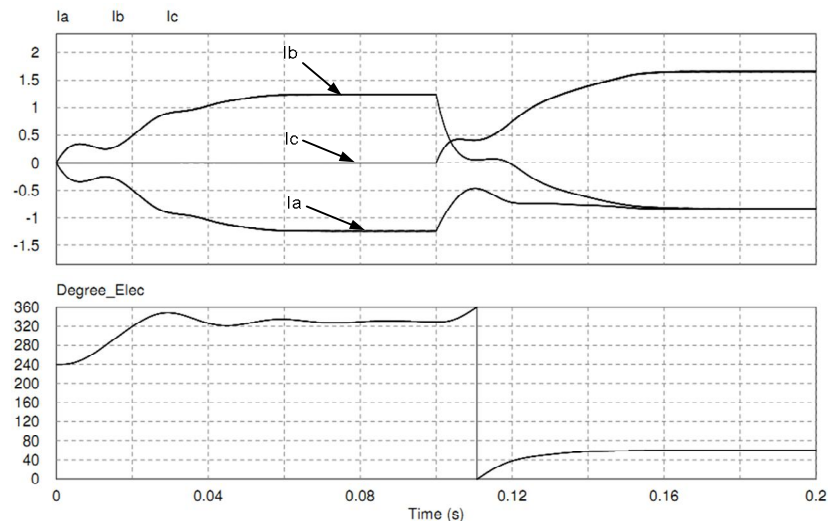
รูปที่ 4.2 กระแสไฟฟ้าเฟสในช่วงการบังคับตำแหน่งโรเตอร์ และ มุมโรเตอร์ ที่ตำแหน่งมุมโรเตอร์ ณ ขณะหยุดนิ่ง 0 องศาไฟฟ้าไปยังตำแหน่งมุม 60 องศาไฟฟ้า

อย่างไรก็ตามการบังคับโรเตอร์ให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเริ่มต้นด้วยวิธีนี้ยังมีจุดอ่อนคือถ้าตำแหน่งมุมโรเตอร์ขณะหยุดนิ่งอยู่ ณ ตำแหน่งตรงกันข้ามกับมุมที่ต้องการบังคับให้เป็นมุมเริ่มต้นอยู่ 180 องศา ทำให้ไม่สามารถบังคับตำแหน่งของโรเตอร์ให้เคลื่อนไปที่ตำแหน่งมุมเริ่มต้นได้ กล่าวคือ ที่ตำแหน่งโรเตอร์ขณะหยุดนิ่งอยู่ที่ตำแหน่ง 240 องศาไฟฟ้า จะวางตัวขนานกับเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก ลัพธ์ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดไฟฟ้าทั้ง 3 เฟสพอดี จึงไม่เกิดแรงบิดมอเตอร์เพื่อหมุนโรเตอร์ให้เคลื่อนไปที่ตำแหน่ง 60 องศาไฟฟ้าได้ดังแสดงรูปที่ 4.3



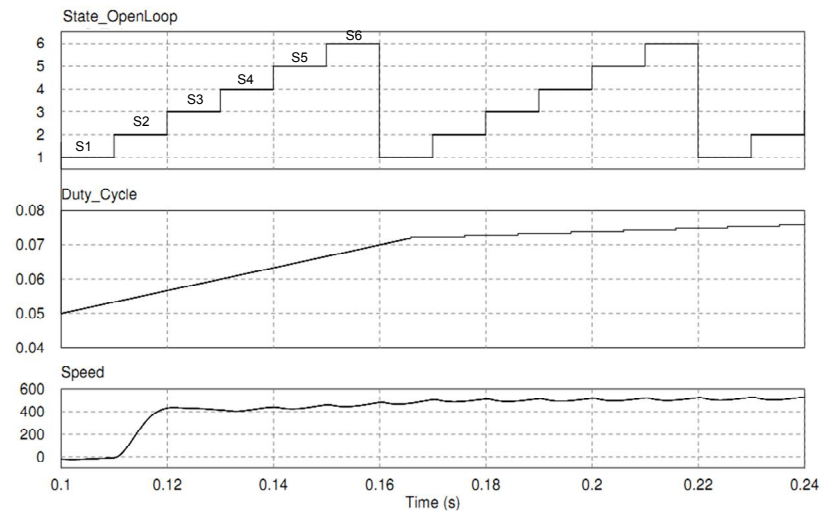
รูปที่ 4.3 กระแสไฟฟ้าเฟสในช่วงการบังคับตำแหน่งโรเตอร์ และ มุมโรเตอร์ที่ตำแหน่งมุมโรเตอร์ ณ ขณะหยุดนิ่ง 240 องศาไฟฟ้า

เพื่อแก้ปัญหานี้ ในทางปฏิบัติจึงใช้การบังคับให้มอเตอร์เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเริ่มต้นแบบ 2 จังหวะ โดยบังคับโรเตอร์ให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง 330 องศาไฟฟ้าก่อน ด้วยการจ่ายแรงดันไฟฟ้า กระแสตรงเข้าที่ขดลวดเฟส B และไหลออกที่ที่เฟส A ค้างไว้เป็นเวลา 0.1 วินาที ต่อจากนั้นบังคับโรเตอร์ให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง 60 องศาโดยจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเข้าที่ขดลวดเฟส C และไหลออกที่เฟส A และ B ค้างไว้เป็นเวลาอีก 0.1 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 4.4



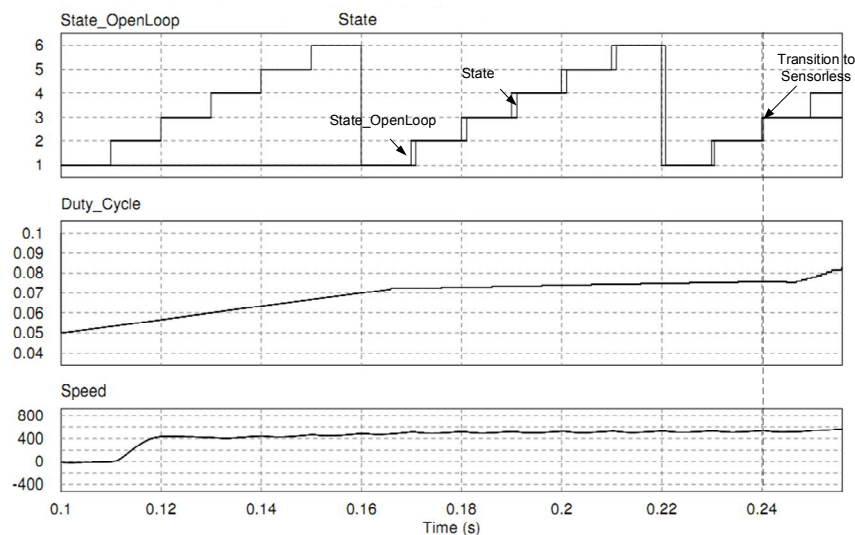
รูปที่ 4.4 กระแสไฟฟ้าเฟสในช่วงการบังคับตำแหน่งโรเตอร์ และ มุมโรเตอร์ ด้วยวิธีการบังคับโรเตอร์เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเริ่มต้นแบบ 2 จังหวะ

เมื่อบังคับโรเตอร์ให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง 60 องศาไฟฟ้าเรียบร้อยแล้ว ลำดับถัดมาทำการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบลูปเปิด โดยสร้างจุดคอมมิวเตชันที่ความถี่ 13.33 Hz แล้วค่อยๆปรับความถี่เพิ่มขึ้นจนเท่ากับ 16.67 Hz (เป็นความถี่ที่โรเตอร์สามารถเคลื่อนที่เปลี่ยนตำแหน่งตามการทำคอมมิวเตชันแต่ละครั้งได้) โดยไม่สนใจตำแหน่งจริงของโรเตอร์ พร้อมกับปรับค่าดีดไชเคิลเพิ่มขึ้นจาก 5 % จนถึง 7.5 % ส่งผลให้ความเร็วรอบมอเตอร์ค่อยๆเพิ่มขึ้นจาก 0 จนถึง 500 rpm ดังแสดงรูปที่ 4.5 ขณะเดียวกันก็ทำการตรวจจับจุดผ่านศูนย์กลางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับตั้งแต่ความเร็วรอบมอเตอร์เท่ากับ 0 จนถึง 500 rpm เพื่อนำข้อมูลนี้ไปหาจุดคอมมิวเตชันซึ่งจะถูกนำไปใช้ใน ช่วงของการเปลี่ยนสถานะจากการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบลูปเปิดไปสู่การขับเคลื่อนแบบไร้ตัวตรวจจับตำแหน่ง



รูปที่ 4.5 ช่วงขับเคลื่อนแบบรูปเปิด สเตต S1-S6 ที่สร้างขึ้น ค่าดีวตี้ไซเคิล และความเร็วรอบมอเตอร์

ลำดับสุดท้ายทำการเปลี่ยนสถานะจากการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบรูปเปิดไปสู่การขับเคลื่อนแบบไร้ตัวตรวจจับตำแหน่ง โดยเปรียบเทียบสเตตที่สร้างขึ้นในช่วงการขับเคลื่อนแบบรูปเปิด (State_OpenLoop) เทียบกับสเตตที่ได้จากจุดผ่านศูนย์กลางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ (State) จากการเปรียบเทียบพบว่า สเตตที่สร้างขึ้น นำหน้าสเตตที่ได้จากจุดผ่านศูนย์กลางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ แสดงว่าโรเตอร์เคลื่อนที่ช้ากว่าการทำคอมมิวเตชันแต่ละครั้ง ดังนั้นตัวควบคุมจึงเพิ่มค่าดีวตี้ไซเคิล เพื่อเร่งให้โรเตอร์หมุนเคลื่อนที่เร็วขึ้นจนทำให้สเตตที่สร้างขึ้นเท่ากับสเตตที่ได้จากจุดผ่านศูนย์กลางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ เมื่อเวลาเปลี่ยนสเตตเท่ากันจะทำการเปลี่ยนการทำงานไปเป็นการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบไร้ตัวตรวจจับตำแหน่งดังแสดง ในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 State_OpenLoop เทียบกับ State ค่าดีวตี้ไซเคิล และความเร็วรอบมอเตอร์

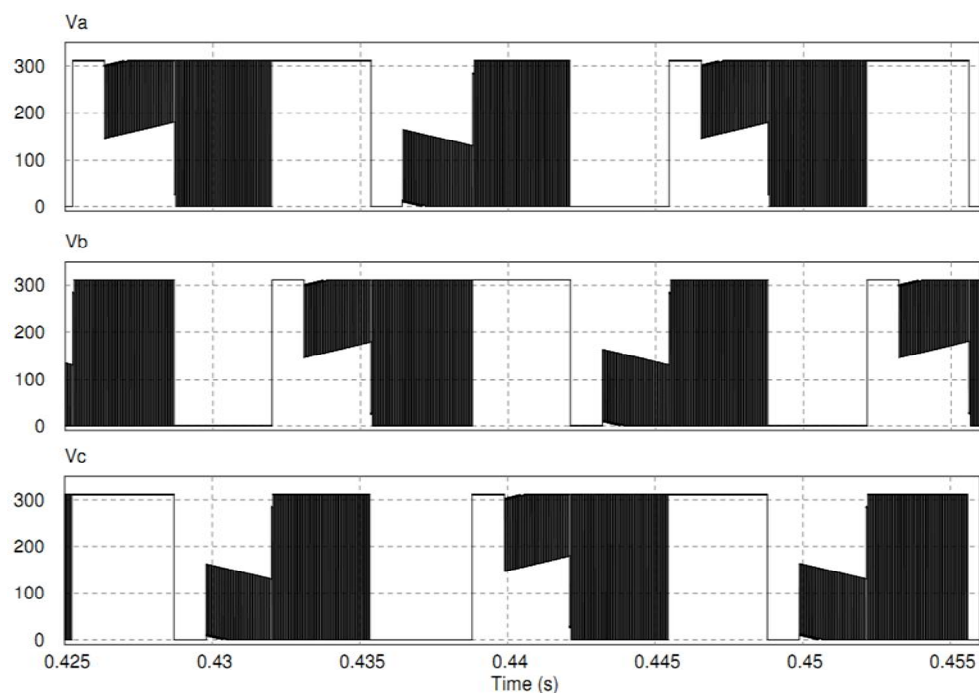
4.1.2 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบไร้ตัวตรวจจับตำแหน่งด้วยกระแสไฟฟ้าแบบควาซิ-สแควร์ที่มีการชดเชยช่วงเวลาคอมมิวเตชัน

ในหัวข้อนี้เสนอผลการจำลองการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบไร้ตัวตรวจจับตำแหน่งด้วยกระแสไฟฟ้าแบบควาซิ-สแควร์ที่มีการชดเชยช่วงเวลาคอมมิวเตชัน โดยทดสอบที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 1500 rpm ซึ่งแบ่งการทดสอบตามลำดับดังต่อไปนี้

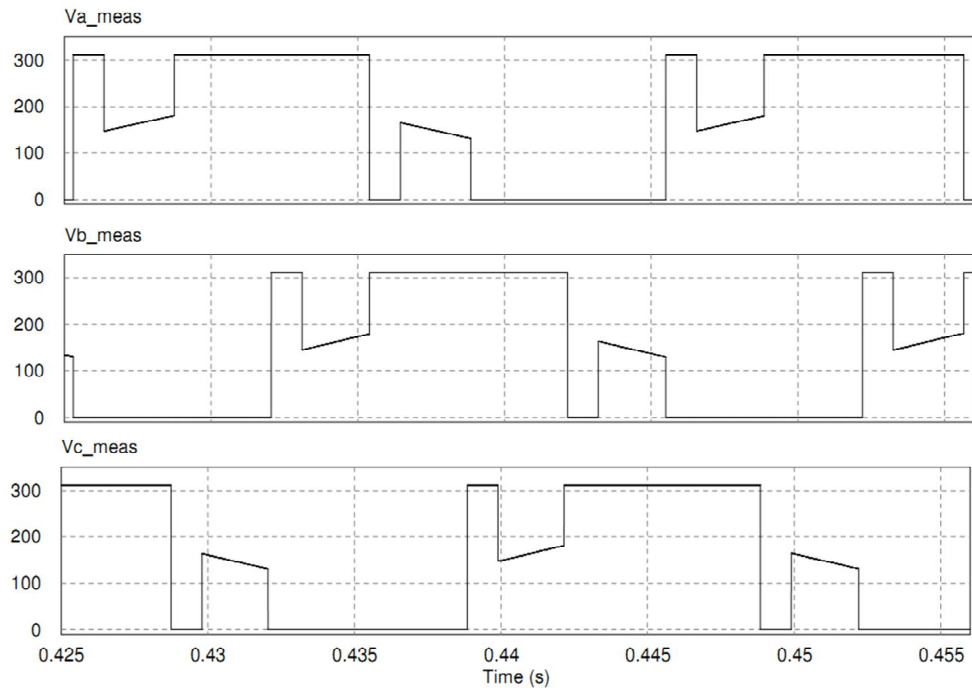
- 1) การตรวจจับแรงดันไฟฟ้าเฟส จุดผ่านศูนย์กลางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ และจุดคอมมิวเตชัน
- 2) การหาช่วงเวลาคอมมิวเตชันและการปรับค่าดีไชเกิลในช่วงเวลาคอมมิวเตชัน

การตรวจจับแรงดันไฟฟ้าเฟส จุดผ่านศูนย์กลางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ และจุดคอมมิวเตชัน

จากที่กล่าวในหัวข้อ 2.2.2 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเฟสที่ถูกปล่อยลอยมีขนาดแรงดันไฟฟ้าไม่คงที่ขึ้นอยู่กับสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลชันของเฟสที่นำกระแสและแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ ดังแสดงรูปที่ 4.7 ทำให้ไม่สามารถนำมาใช้ตรวจจับจุดผ่านศูนย์กลางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับได้โดยตรงจึงจำเป็นต้องมีการกำหนดช่วงการอ่านค่าของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าซึ่งมีทั้งหมด 4 กรณีสตามที่กล่าวมาแล้ว โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้การตรวจวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับในช่วงสัญญาณ PWM On ทั้งขาขึ้นและขาลงของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ ทำให้ได้รูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าเฟสที่วัดในช่วงสัญญาณ PWM On V_a_meas V_b_meas และ V_c_meas ดังแสดงรูปที่ 4.8

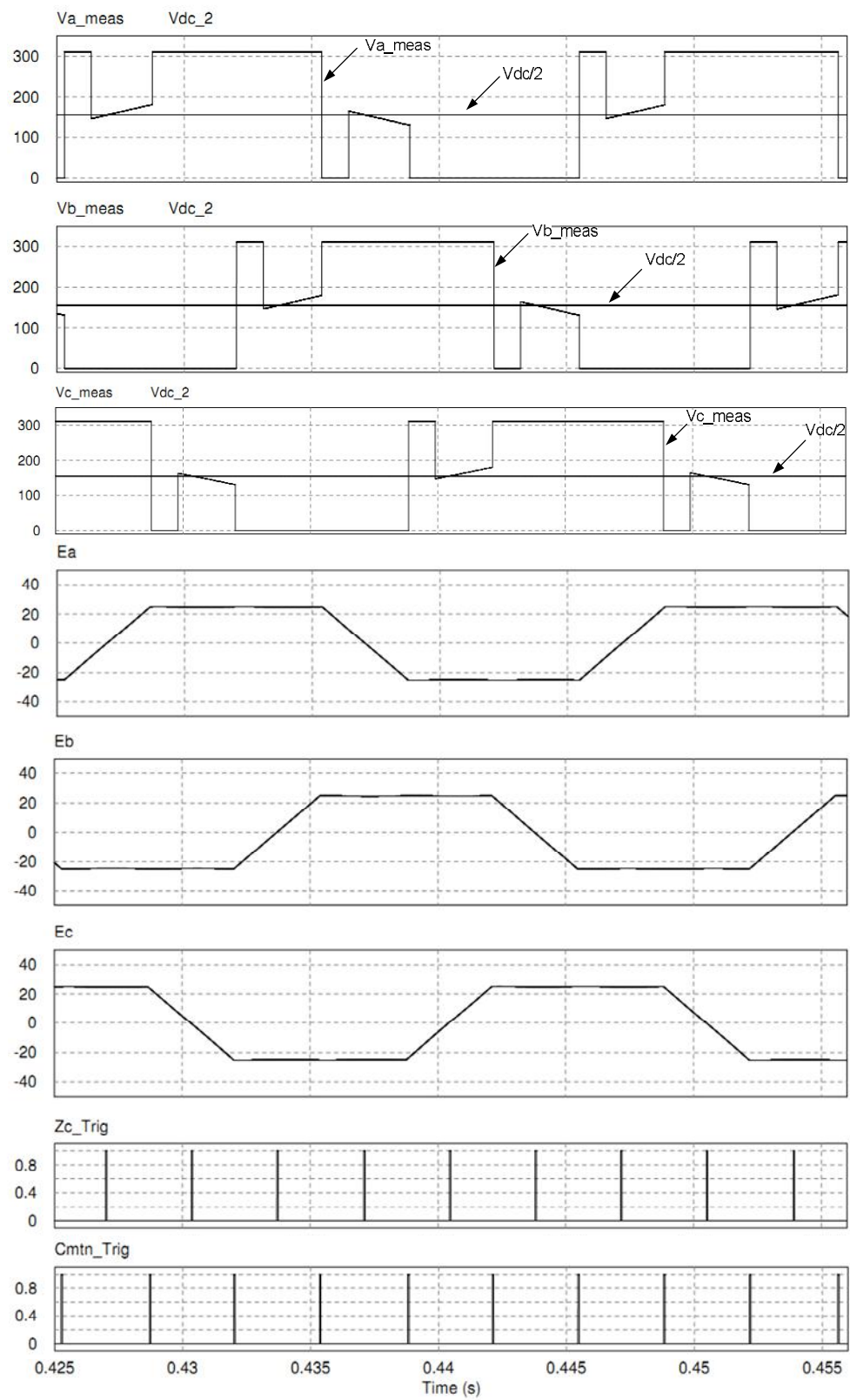


รูปที่ 4.7 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเฟส V_a V_b และ V_c กรณีขับเคลื่อนด้วยกระแสไฟฟ้าแบบควาซิ-สแควร์ที่มีการชดเชยช่วงเวลาคอมมิวเตชัน



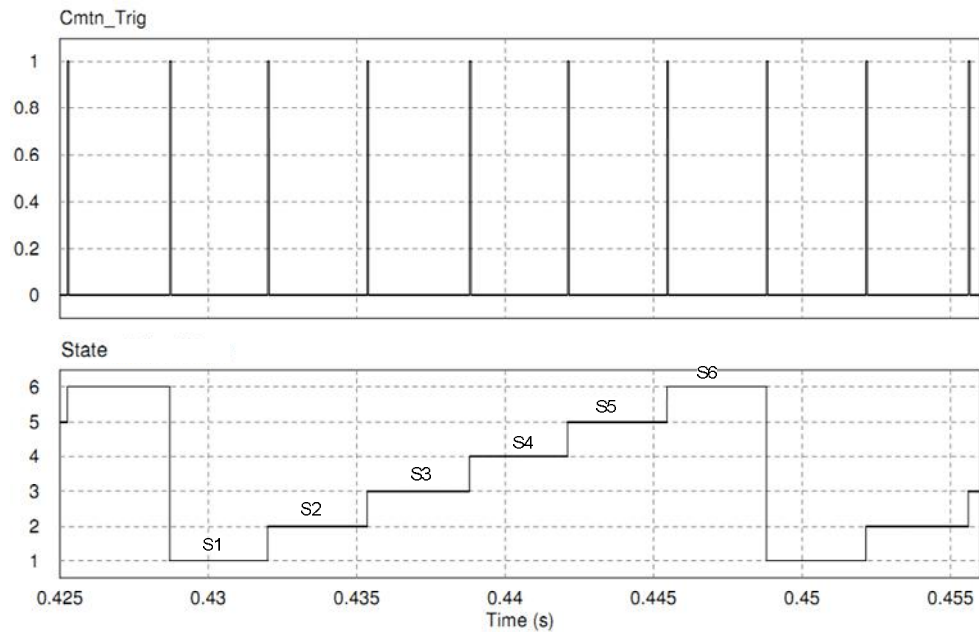
รูปที่ 4.8 แรงดันไฟฟ้าเฟสที่วัดในช่วงสัญญาณ PWM On

จากรูปที่ 4.9 แสดงแรงดันไฟฟ้าเฟสที่วัดในช่วงสัญญาณ PWM On (V_a_meas , V_b_meas และ V_c_meas) แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ (E_a, E_b, E_c) ตำแหน่งจุดผ่านศูนย์กลางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ (Zc_Trig) และจุดคอมมิวเตชัน ($Cmtn_Trig$) เมื่อพิจารณาแรงดันไฟฟ้าเฟส A (V_a_meas) เทียบกับ $V_{dc}/2$ ในช่วงที่แรงดันเฟสถูกปล่อยลอย พบว่าจุดตัดระหว่าง V_a_meas กับ $V_{dc}/2$ เป็นตำแหน่งเดียวกับจุดผ่านศูนย์กลางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับเฟส A (E_a) สำหรับแรงดันไฟฟ้าเฟส B และ C สามารถพิจารณาได้ในทำนองเดียวกัน หลังจากได้ตำแหน่งจุดผ่านศูนย์กลางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับเสร็จเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือทำการกำหนดจุดคอมมิวเตชัน ($Cmtn_Trig$) โดยจุดคอมมิวเตชันล่าหลังจุดผ่านศูนย์กลางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ อยู่ 30 องศาไฟฟ้า ซึ่งตรงกับกึ่งกลางระหว่างจุดผ่านศูนย์กลางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ เมื่อพิจารณาจุดคอมมิวเตชันเทียบกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับในแต่ละเฟส พบว่าจุดคอมมิวเตชันตรงกับจุดเริ่มต้นของแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับในช่วงที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุด แสดงให้เห็นว่าจุดคอมมิวเตชันที่หาได้ถูกต้องตามทฤษฎี



รูปที่ 4.9 แรงดันไฟฟ้าเฟสที่วัดในช่วงสัญญาณ PWM On แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ ตำแหน่งจุดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ และจุดคอมมิวเตชัน

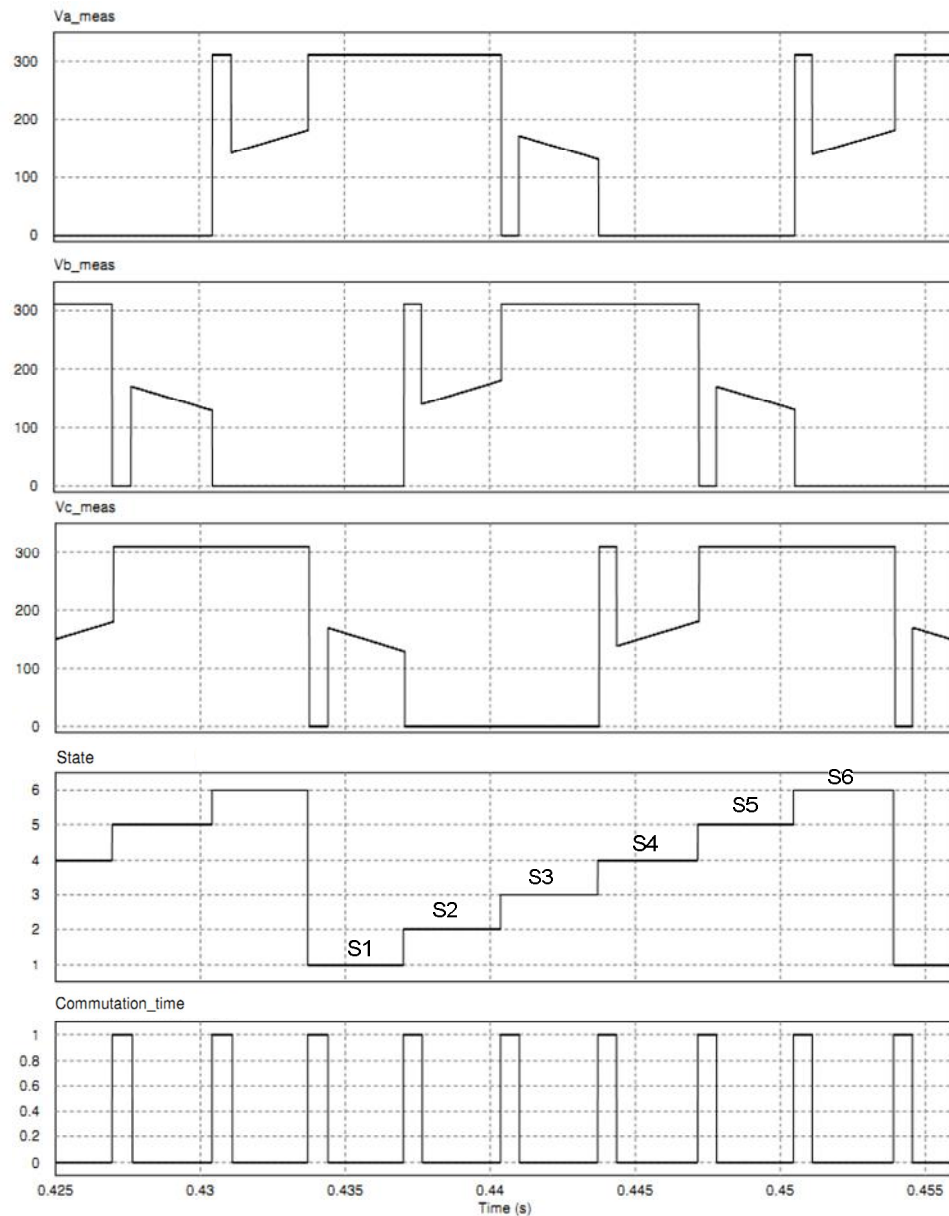
สุดท้ายจุดคอมมิวเตชันจะเป็นตัวกำหนดการเปลี่ยนสเตต ซึ่งมีด้วยกัน 6 ช่วง S1-S6 เพื่อกำหนดสัญญาณสวิตช์ควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าขดลวดมอเตอร์ ดังแสดงรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 จุดคอมมิวเตชัน และสเตต S1-S6

การหาช่วงเวลาคอมมิวเตชันและการปรับค่าดิฟฟิเคิลในช่วงเวลาคอมมิวเตชัน

การหาช่วงเวลาคอมมิวเตชันทำได้โดยการวัดแรงดันเฟส A, B และ C ที่ถูกปล่อยลอย โดยช่วงเวลาคอมมิวเตชันเกิดขึ้นขณะที่ฟรีวิลลิ่งไดโอดนำกระแสซึ่งมีขนาดเท่ากับแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงหรือมีขนาดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับศูนย์แล้วแต่ช่วงการทำงาน ตามที่ได้กล่าวไว้แล้วในตารางที่ 2.3 ทำให้ได้ผลดังแสดงรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 แรงดันไฟฟ้าเฟสที่วัดในช่วงสัญญาณ PWM On สเทต S1-S6 และช่วงเวลาคอมมิวเตชัน

รูปที่ 4.11 แสดงการหาช่วงเวลาคอมมิวเตชัน โดยกราฟรูปบนแสดงแรงดันไฟฟ้าเฟสที่วัดในช่วงสัญญาณ PWM On V_a_meas V_b_meas และ V_c_meas เรียงตามลำดับ กราฟรูปถัดมาแสดงสเทต S1-S6 และกราฟรูปล่างแสดงช่วงเวลาคอมมิวเตชัน (Commutation_time) โดยค่านี้เป็น 1 เมื่อตรวจจับได้ว่ากำลังคอมมิวเตชันและเป็นศูนย์เมื่อทำการคอมมิวเตชันเสร็จแล้ว

ช่วงเวลาคอมมิวเตชัน ถูกนำไปใช้ในการกำหนดช่วงเวลาสำหรับปรับค่าดีวีไอซีเคลของสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลชันสวิตซ์ Q_1-Q_6 เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าในเฟสที่ไม่ได้ทำคอมมิวเตชันให้มีขนาดแรงดันไฟฟ้าคงที่ ซึ่งแต่ละช่วงประกอบด้วย ช่วงเวลาคอมมิวเตชัน กับช่วงนำกระแสไฟฟ้า สลับกัน

โดยช่วงเวลาคอมมิวเตชันถูกขจัดด้วยค่าดีวตี้ไซเคิล D_{cmp} ส่วนช่วงนำกระแสไฟฟ้ายังคงใช้ค่าดีวตี้ไซเคิล D ที่ได้จากตัวควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์แบบ PI จากการชดเชยดังกล่าวส่งผลให้กระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสไม่มีการกระเพื่อมขณะทำการคอมมิวเตชันเหมือนวิธีแบบดั้งเดิม ส่งผลให้การกระเพื่อมแรงบิดมอเตอร์ลดลงดังแสดงรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ช่วงเวลาคอมมิวเตชัน ค่าดีวตี้ไซเคิล กระแสไฟฟ้าและแรงบิดมอเตอร์

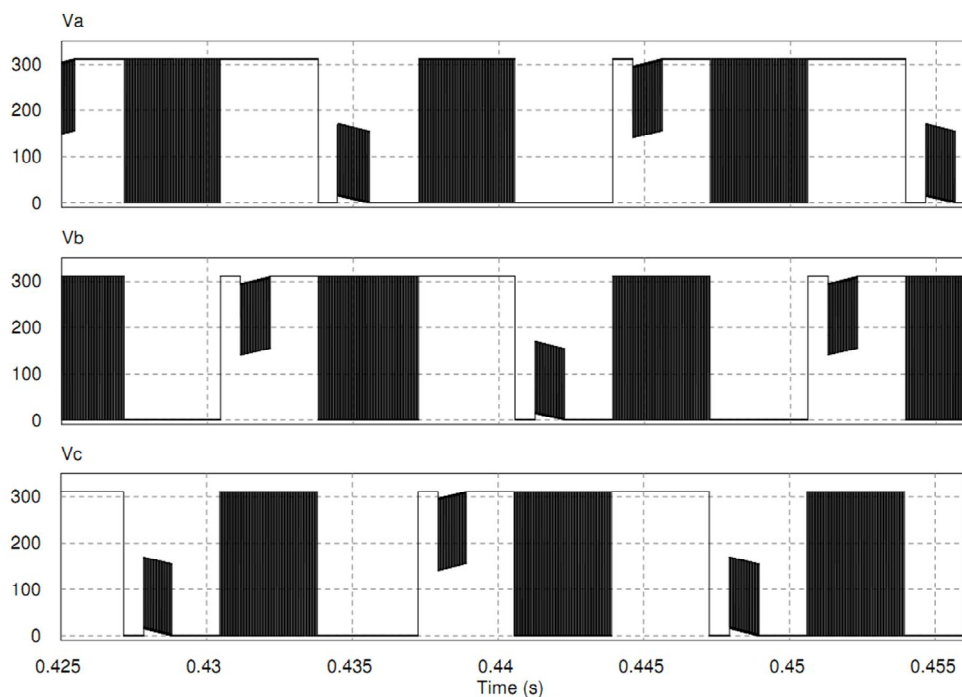
4.1.3 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบไร้ตัวตรวจจับตำแหน่งด้วยกระแสไฟฟ้าแบบควาซิ-ไซน์

ในหัวข้อนี้เสนอผลการจำลองการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบไร้ตัวตรวจจับตำแหน่งด้วยกระแสไฟฟ้าแบบควาซิ-ไซน์ โดยทดสอบที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 1500 rpm ซึ่งแบ่งการทดสอบตามลำดับดังต่อไปนี้

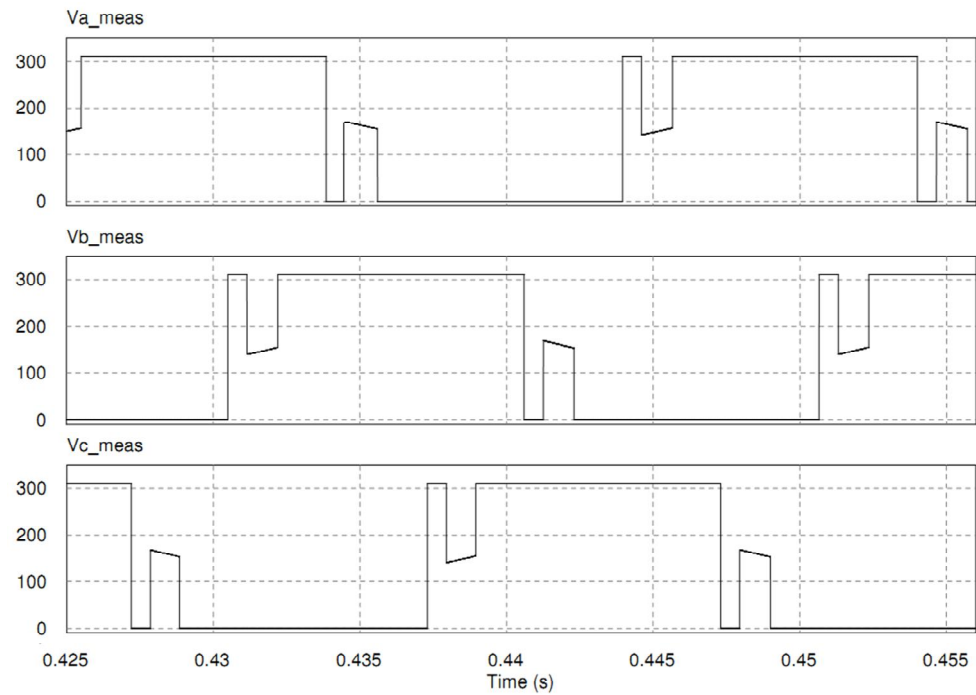
- 1) การตรวจจับแรงดันไฟฟ้าเฟส จุดผ่านศูนย์กลางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ และจุดคอมมิวเตชัน
- 2) การสร้างกระแสไฟฟ้าเฟสแบบควาซิ-ไซน์

การตรวจจับแรงดันไฟฟ้าเฟส จุดผ่านศูนย์กลางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ และจุดคอมมิวเตชัน

จากที่กล่าวในหัวข้อ 2.2.2 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเฟสที่ถูกปล่อยลอยมีขนาดแรงดันไฟฟ้าไม่คงที่ขึ้นอยู่กับสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลชันของเฟสที่นำกระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ ดังแสดงรูปที่ 4.13 ทำให้ไม่สามารถนำมาใช้ตรวจจับจุดผ่านศูนย์กลางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับได้โดยตรงจึงจำเป็นต้องมีการกำหนดช่วงการอ่านค่าของสัญญาณแรงดันไฟฟ้า โดยกำหนดการอ่านค่าของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าช่วงสัญญาณ PWM On เหมือนกับผลจำลองในหัวข้อที่ 4.1.2 ทำให้ได้รูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าเฟสที่วัดในช่วงสัญญาณ PWM On V_a_meas V_b_meas และ V_c_meas ดังแสดงรูปที่ 4.14



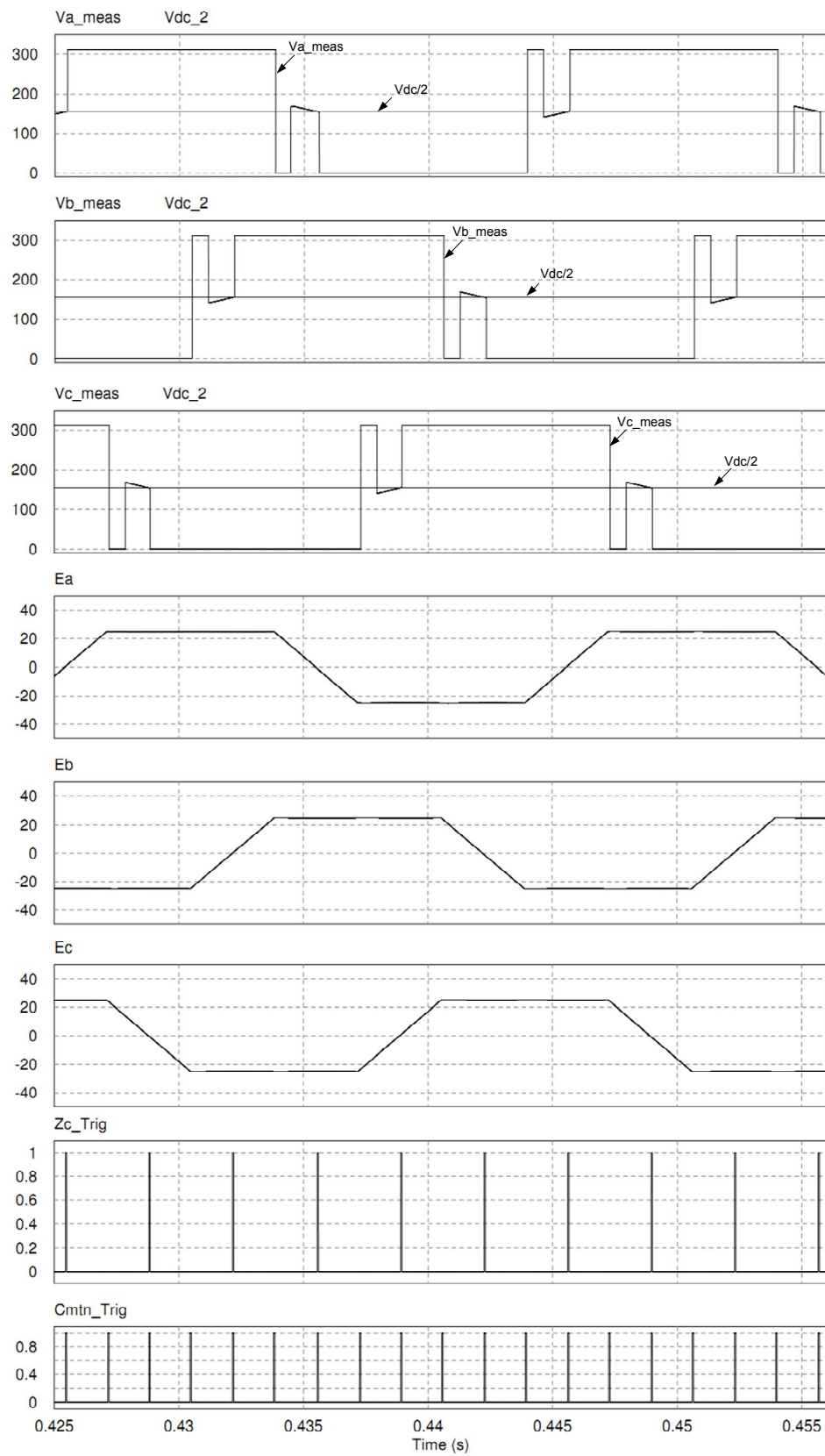
รูปที่ 4.13 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเฟส V_a , V_b และ V_c กรณีขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยกระแสไฟฟ้าแบบควาซิ-ไซน์



รูปที่ 4.14 แรงดันไฟฟ้าเฟสที่วัดในช่วงสัญญาณ PWM On

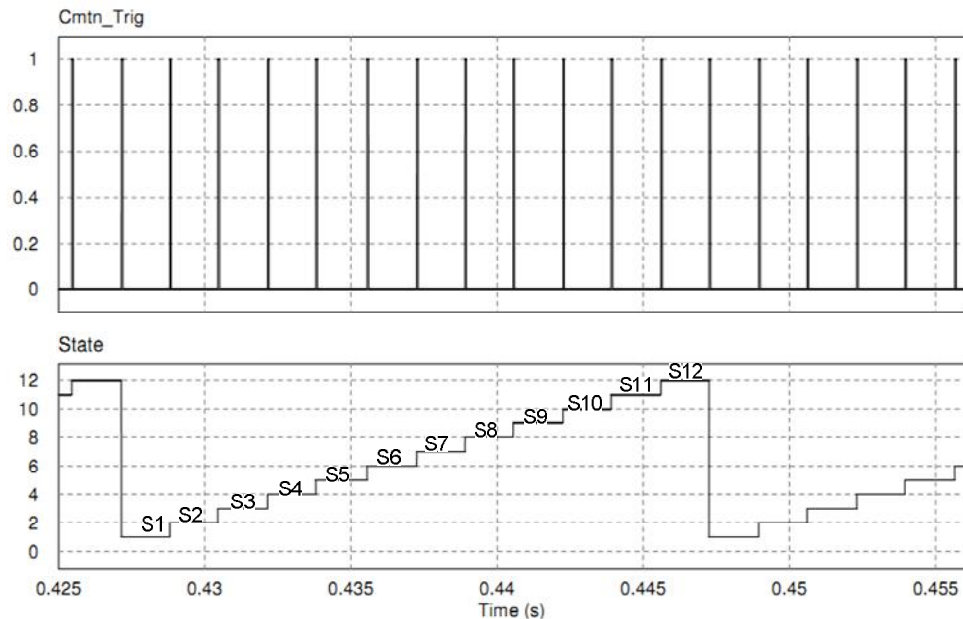
ทำนองเดียวกับการหาจุดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับหาได้จากจุดตัดระหว่าง V_a_meas , V_b_meas และ V_c_meas กับ $V_{dc}/2$ ในช่วงที่แรงดันเฟสถูกปล่อยลอย และกำหนดจุดดังกล่าวให้เป็นจุดผ่านศูนย์แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ (Zc_Trig) เช่นเดียวกับผลจำลองที่ 4.1.2

หลังจากได้ตำแหน่งจุดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับเสร็จเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือทำการกำหนดจุดคอมมิวเตชัน ($Cmtn_Trig$) โดยจุดคอมมิวเตชันนี้ถูกกำหนดให้อยู่ที่ตำแหน่งจุดผ่านศูนย์แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ (Zc_Trig) และตำแหน่งล้าหลังจุดผ่านศูนย์แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ (Zc_Trig) อยู่ 30 องศาไฟฟ้า ทำให้ได้ช่วงคอมมิวเตชันช่วงละ 30 องศาไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 แรงดันไฟฟ้าเฟสที่วัดในช่วงสัญญาณ PWM On แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ ตำแหน่งจุดผ่านศูนย์กลางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ และจุดคอมมิวเตชัน

สุดท้ายจุดคอมมิวเตชันจะเป็นตัวกำหนดการเปลี่ยนสเตท (State) ซึ่งมีด้วยกัน 12 ช่วงคือ S1-S12 เพื่อกำหนดสัญญาณสวิทช์ควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าขดลวดมอเตอร์ ดังแสดงรูปที่ 4.16

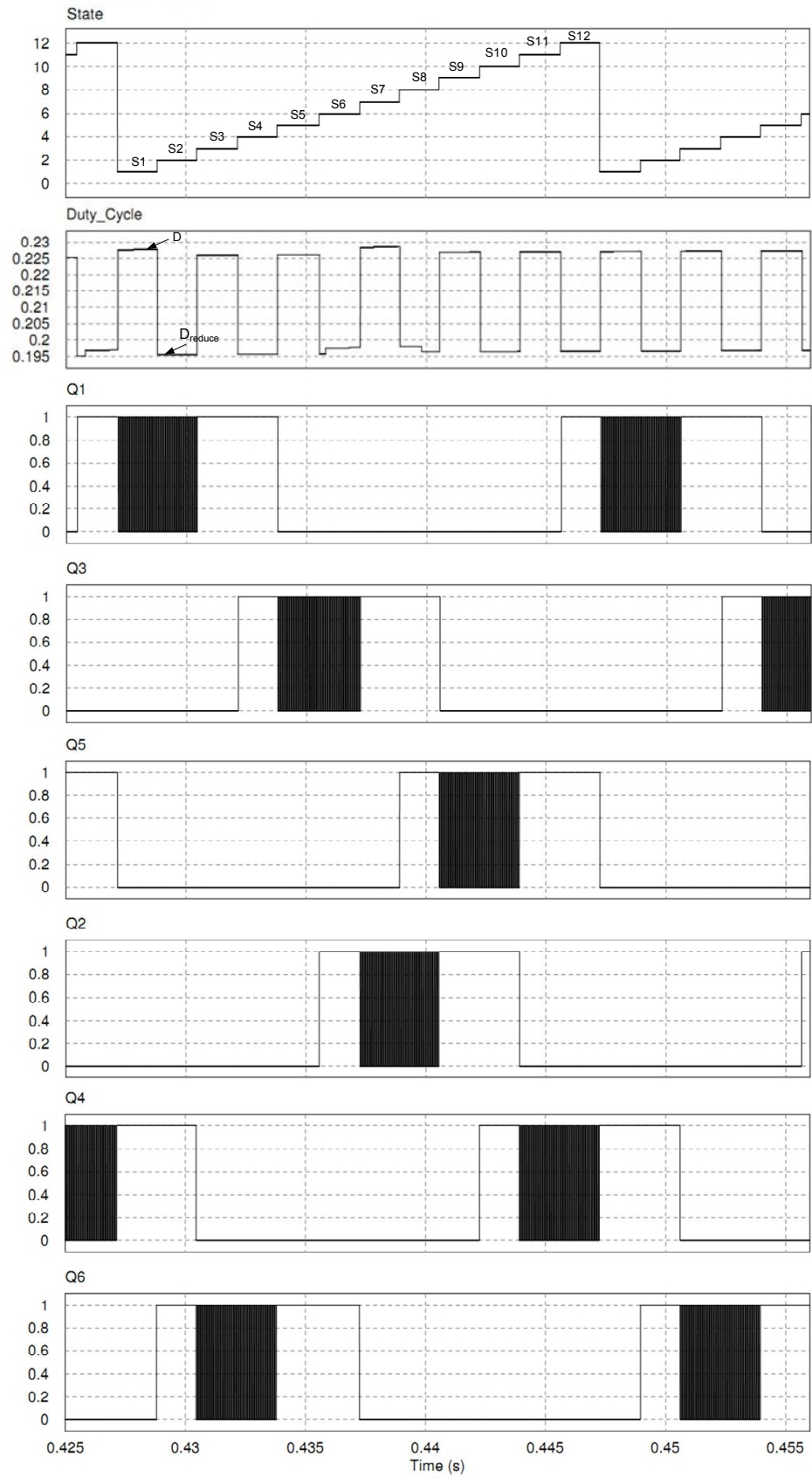


รูปที่ 4.16 จุดคอมมิวเตชัน และสเตท S1-S12

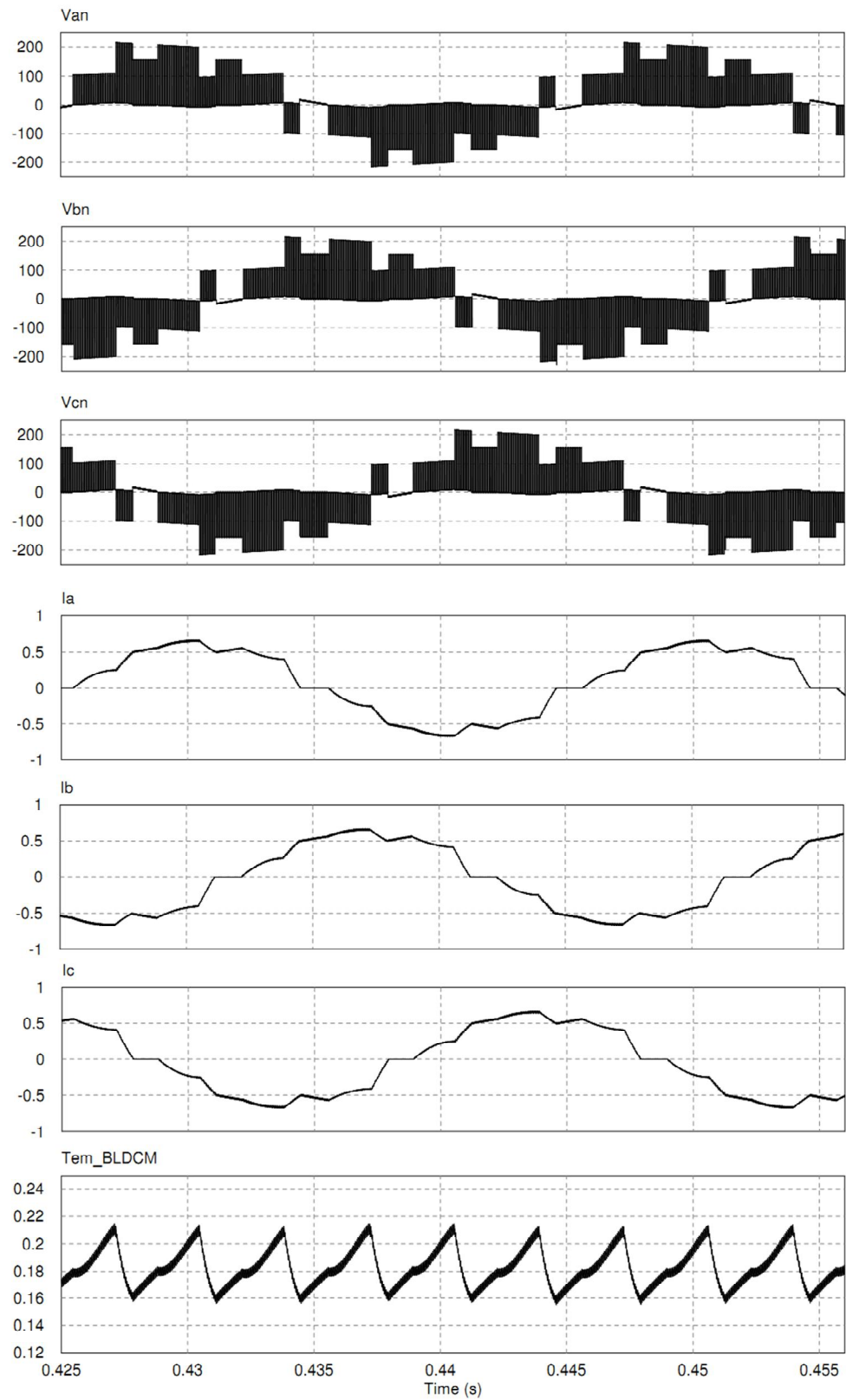
การสร้างกระแสไฟฟ้าเฟสแบบควาซิ-ไซน์

การสร้างกระแสไฟฟ้าเฟสแบบควาซิ-ไซน์ทำได้โดยแบ่งช่วงเป็น 12 ช่วง แต่ละช่วงห่างกัน 30 องศาไฟฟ้า โดยกำหนดให้มีการจ่ายแรงดันไฟฟ้าผ่านขดลวดของมอเตอร์ทีละ 2 เฟสและ 3 เฟส สลับกัน เพื่อให้ขนาดของแรงดันไฟฟ้าจุดนิวทรัลมีค่าแตกต่างกัน ซึ่งควบคุมผ่านสัญญาณขับสวิทช์ $Q_1 - Q_6$ ที่มีค่าดีวีไอเซลล์ 2 ค่า คือ ค่าดีวีไอเซลล์ D ที่ได้จากตัวควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์แบบ PI ที่ใช้ในช่วงการจ่ายแรงดันไฟฟ้าผ่านขดลวดของมอเตอร์ 2 เฟส (S1, S3, S5, S7, S9, S11) และค่าดีวีไอเซลล์ D_{reduce} ที่ใช้ในช่วงการจ่ายแรงดันไฟฟ้าผ่านขดลวดของมอเตอร์ 3 เฟส (S2, S4, S6, S8, S10, S12) ดังแสดงรูปที่ 4.17

ผลของการจ่ายแรงดันไฟฟ้าผ่านขดลวดของมอเตอร์ตามรูปแบบสัญญาณขับสวิทช์ $Q_1 - Q_6$ ทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าเฟสเทียบจุดนิวทรัล V_{an} , V_{bn} และ V_{cn} มีลักษณะใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าเฟสมีลักษณะแบบ ควาซิ-ไซน์และมีการกระเพื่อมแรงบิดมอเตอร์ ดังแสดงรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.17 สเตท S1-S12 ค่าคิวตี้ไซเคิลและสัญญาณขับสวิตช์ $Q_1 - Q_6$



รูปที่ 4.18 แรงดันไฟฟ้าเฟสเทียบจุดนิวทรัล กระแสไฟฟ้าและแรงบิดมอเตอร์

4.1.4 การเปรียบเทียบการลดการกระเพื่อมแรงบิดมอเตอร์และการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์

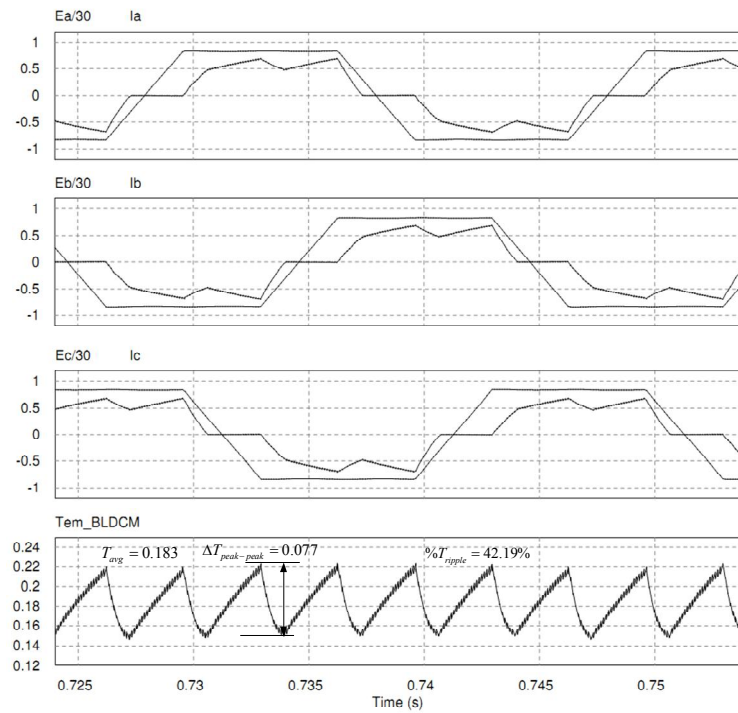
การเปรียบเทียบการลดการกระเพื่อมแรงบิดมอเตอร์

ในหัวข้อนี้เสนอผลการจำลองเพื่อเปรียบเทียบการลดการกระเพื่อมแรงบิดมอเตอร์ด้วยการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านด้วยลักษณะรูปคลื่นของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับแตกต่างกัน คือ สี่เหลี่ยมคางหมู และ ไซน์ โดยทำการทดสอบที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 1500 rpm

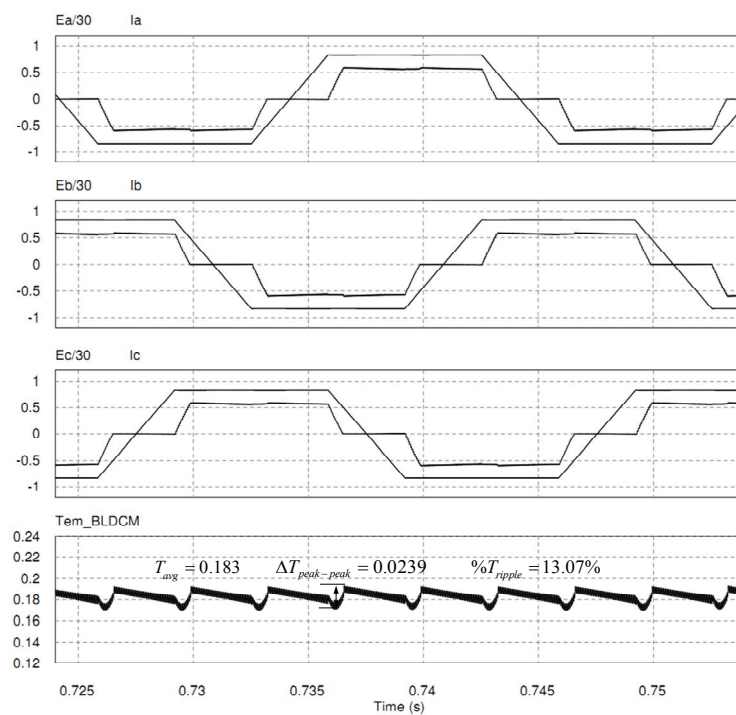
สมรรถนะของการลดการกระเพื่อมแรงบิดมอเตอร์ในการขับเคลื่อนมอเตอร์สามารถประเมินได้โดยใช้ค่าเปอร์เซ็นต์การกระเพื่อมแรงบิดมอเตอร์ ดังแสดงในสมการ (4.1)

$$\%T_{ripple} = \frac{\Delta T_{peak-peak}}{T_{avg}} \times 100\% \quad (4.1)$$

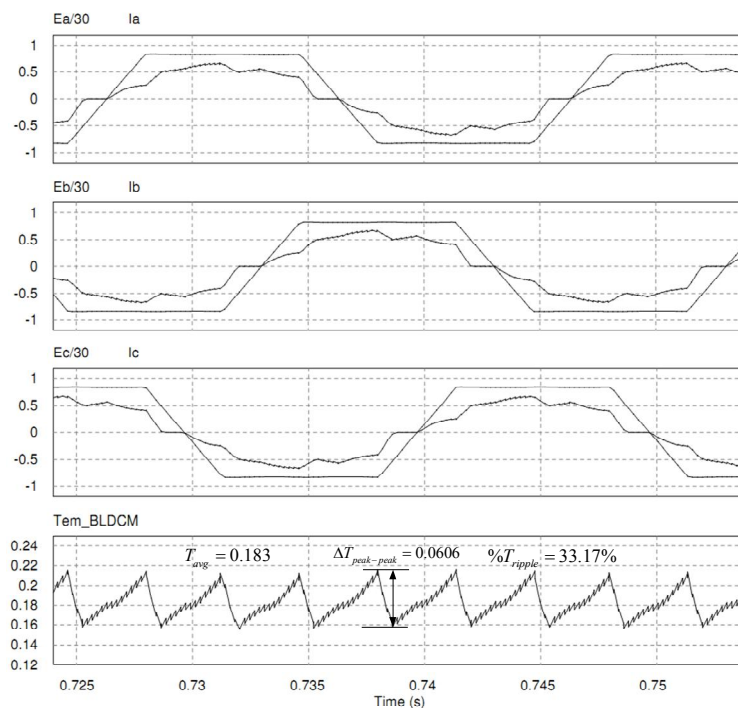
เมื่อทำการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านที่มีลักษณะแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับเป็นสี่เหลี่ยมคางหมู พบว่าการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านด้วยกระแสไฟฟ้าแบบควาซิ-สแควร์ กระแสไฟฟ้าแบบควาซิ-สแควร์ที่มีการชดเชยช่วงเวลาคอมมิวเตชัน และกระแสไฟฟ้าแบบควาซิ-ไซน์ ทำให้เกิดเปอร์เซ็นต์การกระเพื่อมของแรงบิดเท่ากับ 42.2 % 13.07 % และ 33.17% ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.19 -4.21 ซึ่งเห็นได้ว่าการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยกระแสไฟฟ้าแบบควาซิ-สแควร์ที่มีการชดเชยช่วงเวลาคอมมิวเตชัน มีการกระเพื่อมของแรงบิดมอเตอร์น้อยที่สุด



รูปที่ 4.19 กระแสไฟฟ้าเฟสแบบควาซิ-สแควร์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับเฟสแบบสี่เหลี่ยมคางหมู และแรงบิดมอเตอร์

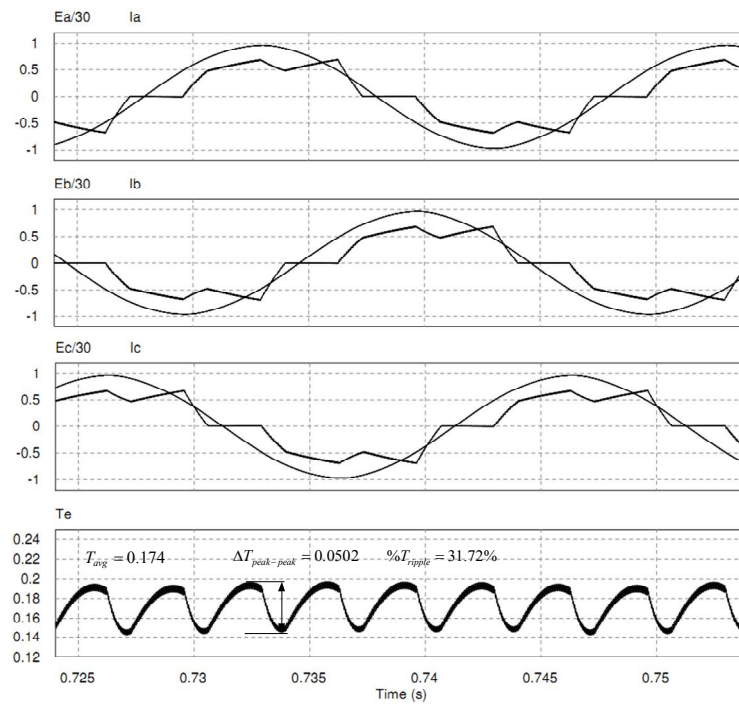


รูปที่ 4.20 กระแสไฟฟ้าเฟสแบบควาซิ-สแควร์ที่มีการชดเชยช่วงเวลาคอมมิวเตชัน แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับเฟสแบบสี่เหลี่ยมคางหมู และแรงบิดมอเตอร์

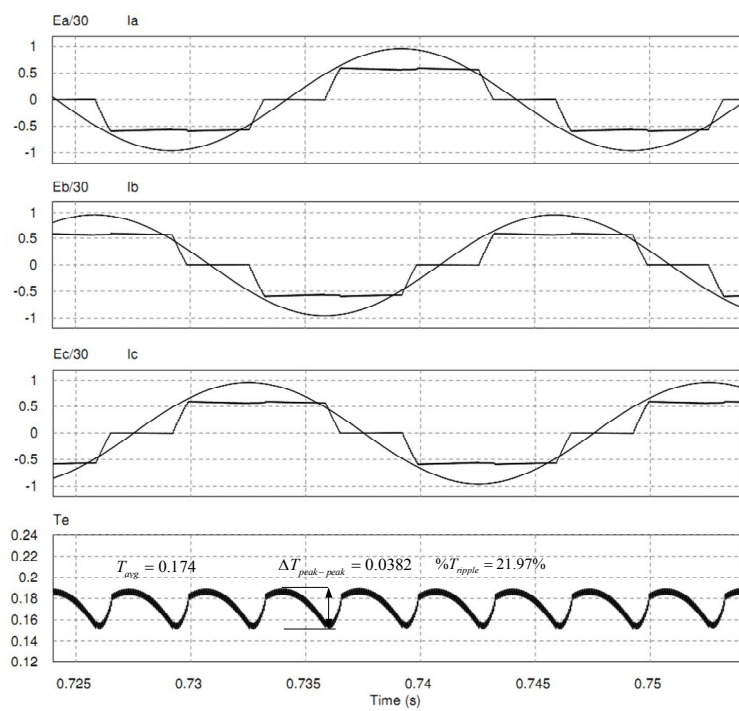


รูปที่ 4.21 กระแสไฟฟ้าเฟสแบบควาซี-ไซน์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับเฟสแบบสี่เหลี่ยมคางหมู และแรงบิดมอเตอร์

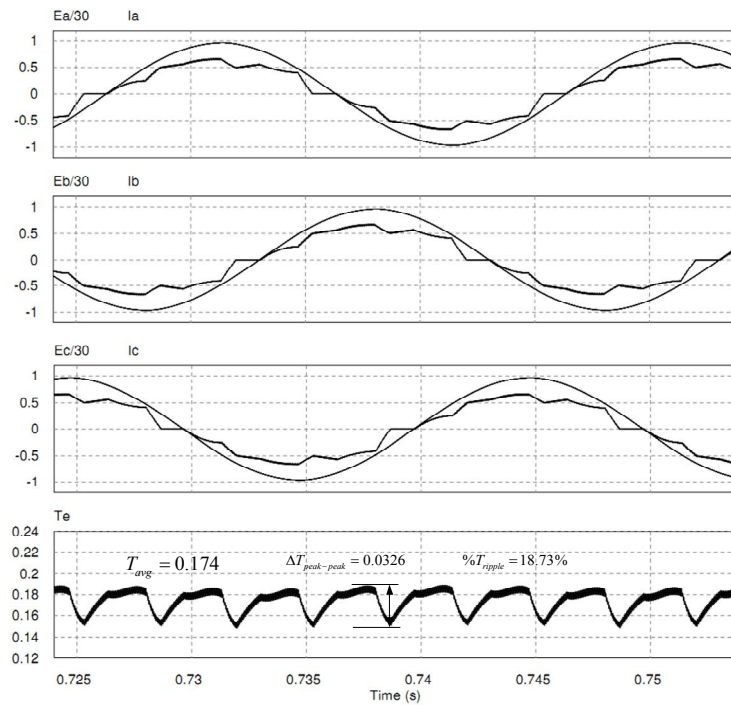
ทำนองเดียวกัน เมื่อทำการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านที่มีลักษณะแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับเป็นไซน์ พบว่าการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านด้วยกระแสไฟฟ้าแบบควาซี-สแควร์ กระแสไฟฟ้าแบบควาซี-สแควร์ที่มีการชดเชยช่วงเวลาคอมมิวเตชันและกระแสไฟฟ้าแบบควาซี-ไซน์ ทำให้เกิดเปอร์เซ็นต์การกระเพื่อมของแรงบิดเท่ากับ 31.72 % 21.97% และ 18.73 % ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.22 – 4.24 ซึ่งเห็นได้ว่าการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยกระแสไฟฟ้าแบบควาซี-ไซน์ มีการกระเพื่อมของแรงบิดมอเตอร์น้อยที่สุด



รูปที่ 4.22 กระแสไฟฟ้าเฟสแบบควาซิ-สแควร์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับเฟสแบบไซน์ และแรงบิดมอเตอร์



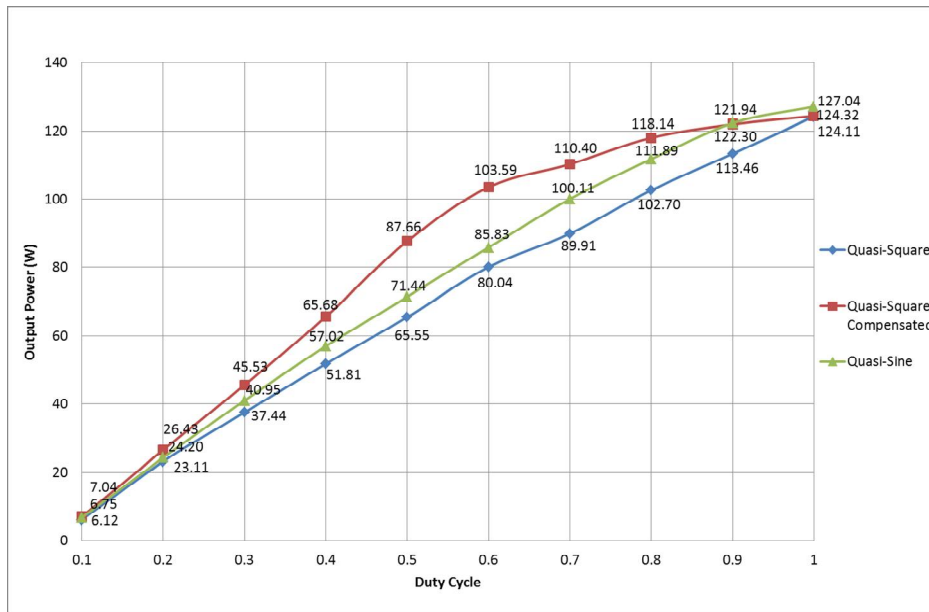
รูปที่ 4.23 กระแสไฟฟ้าเฟสแบบควาซิ-สแควร์ที่มีการชดเชยช่วงคอมมิวเตชัน แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับเฟสแบบไซน์ และแรงบิดมอเตอร์



รูปที่ 4.24 กระแสไฟฟ้าเฟสแบบควาซี-ไซน์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับเฟสแบบไซน์ และแรงบิดมอเตอร์

นอกจากนี้เมื่อทำการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่สภาวะโหลดคงที่ 0.25 N.m และปรับค่าดีวีไอเกิดตั้งแต่ 0.1 ถึง 1 พบว่าการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านด้วยกระแสไฟฟ้าแบบควาซี-ไซน์ที่มีการชดเชยช่วงเวลาคอมมิวเตชันให้กำลังเอาต์พุตมอเตอร์ (Output Power) มากที่สุด ขณะที่การขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยกระแสไฟฟ้าแบบควาซี-ไซน์ให้กำลังเอาต์พุตรองลงมา และการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยกระแสไฟฟ้าแบบควาซี-ไซน์ให้มีการชดเชยช่วงเวลาคอมมิวเตชัน ทำให้กำลังเอาต์พุตมอเตอร์น้อยที่สุด ดังแสดงรูปที่ 4.25 อย่างไรก็ตามเมื่อค่าดีวีไอเกิดมากกว่า 0.6 การขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยกระแสไฟฟ้าแบบควาซี-ไซน์ที่มีการชดเชยช่วงเวลาคอมมิวเตชัน ทำให้ค่าดีวีไอเกิด D_{cmp} ที่ชดเชยช่วงเวลาคอมมิวเตชันนี้มีค่าสูงสุดคงที่เท่ากับ 1 ส่งผลให้กำลังเอาต์พุตลดลง

จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าวิธีที่นำเสนอนอกจากสามารถลดการกระเพื่อมแรงบิดมอเตอร์แล้วยังส่งผลให้ประสิทธิภาพการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านเพิ่มขึ้นอีกด้วย โดยพิจารณาจากกำลังเอาต์พุตมอเตอร์ในรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 การเปรียบเทียบค่าดีไซด์ไซเคิลกับกำลังเอาต์พุตมอเตอร์ด้วยวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านด้วยกระแสไฟฟ้าแบบควาซี-สแควร์ กระแสไฟฟ้าแบบควาซี-สแควร์ที่มีการชดเชยช่วงเวลาคอมมิวเตชัน และกระแสไฟฟ้าแบบควาซี-ไซน์

การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์

ในหัวข้อนี้เสนอผลการจำลองการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์โดยแบ่งการทดสอบเป็น 2 หัวข้อย่อยดังต่อไปนี้

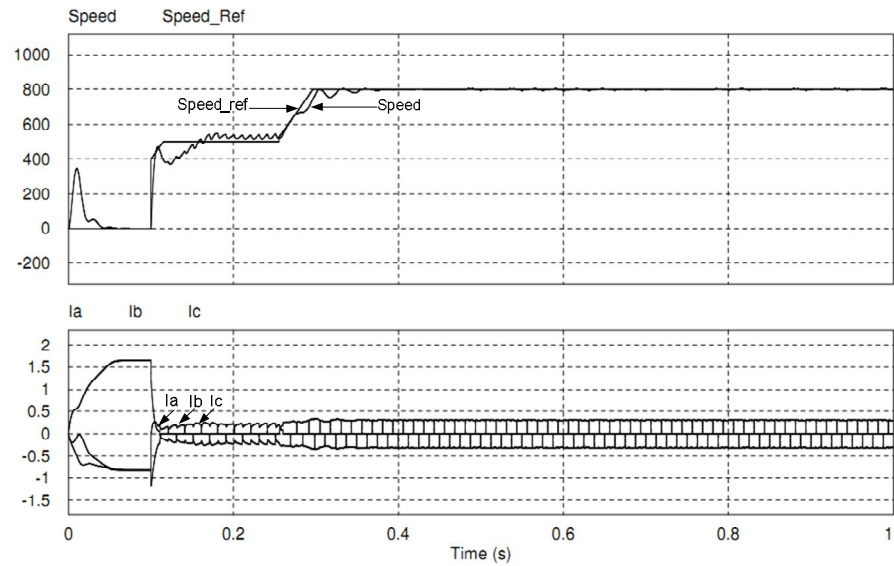
- 1) การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ขณะไม่มีโหลด
- 2) การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ขณะโหลดมีการเปลี่ยนแปลง

การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ขณะไม่มีโหลด

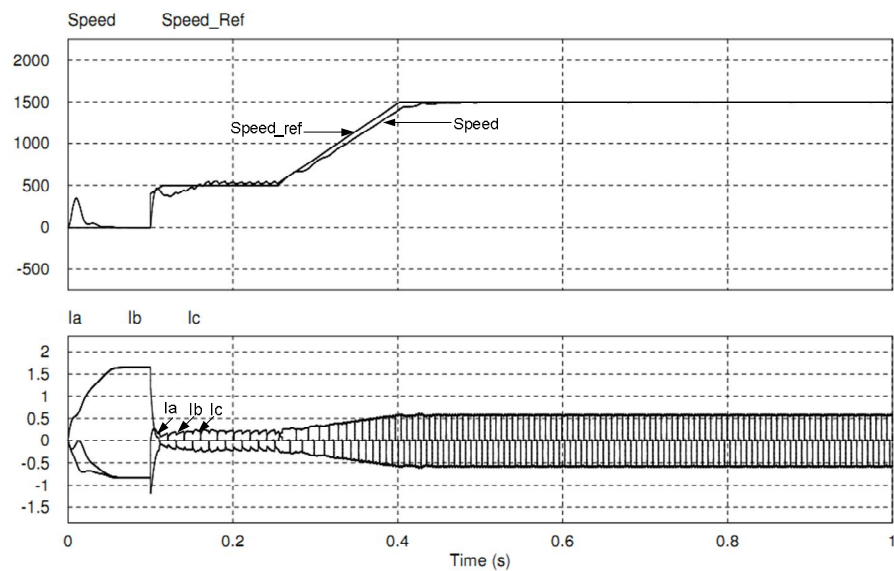
การจำลองเพื่อการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ขณะไม่มีโหลดใช้ตัวควบคุมความเร็วรอบแบบ PI โดยกำหนดค่า $K_p = 0.35$ $T_i = 0.012$ $T = 0.001$ วินาที และกำหนดความเร็วรอบมอเตอร์อ้างอิงที่ 800 rpm, 1500 rpm และ 2500 rpm ตามลำดับ

รูปที่ 4.26 แสดงผลการจำลองการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เมื่อขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยกระแสไฟฟ้าแบบ ควาซี-สแควร์ที่มีการชดเชยช่วงเวลาคอมมิวเตชัน ในการขับเคลื่อนมอเตอร์แบ่งการทำงานออกเป็น 3 ช่วง ช่วงแรกตั้งแต่วินาทีที่ 0 ถึง 0.1 เป็นช่วงการบังคับตำแหน่งโรเตอร์ไปยังตำแหน่งเริ่มต้น ช่วงที่ 2 ตั้งแต่วินาทีที่ 0.1 ถึง 0.3 เป็นช่วงการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบลูปเปิดที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 500 rpm เพื่อให้สามารถตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ด้วยวิธีการตรวจจับจุด

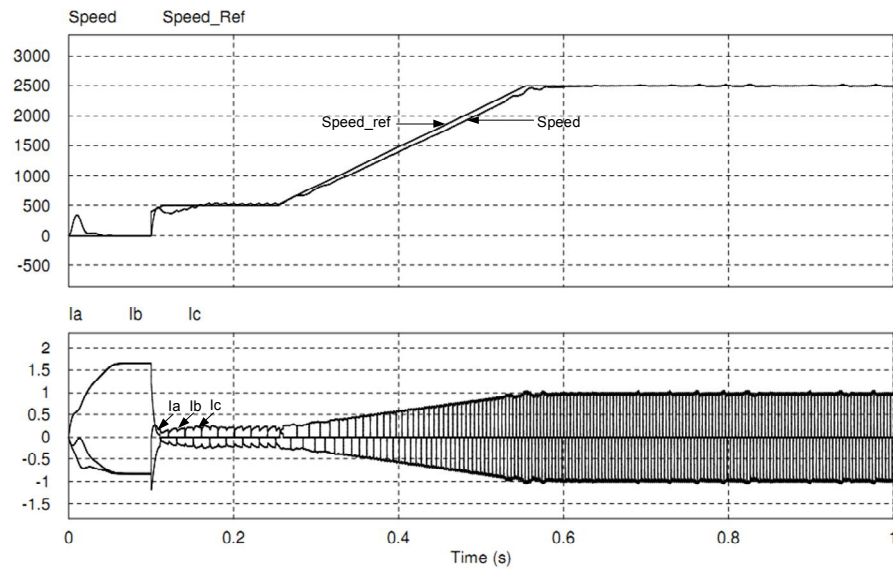
ผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับได้ ก่อนจะเปลี่ยนเข้าสู่ช่วงที่ 3 ตั้งแต่วินาที 0.3 เป็นต้นไปซึ่งเป็นการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบไร้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ โดยมีการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์แบบลูปปิดที่ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ให้เท่ากับความเร็วรอบมอเตอร์อ้างอิงที่กำหนด 800 rpm, 1500 rpm และ 2500 rpm ดังแสดงในรูปที่ 4.25 (ก), (ข) และ (ค) ตามลำดับ



(ก)



(ข)

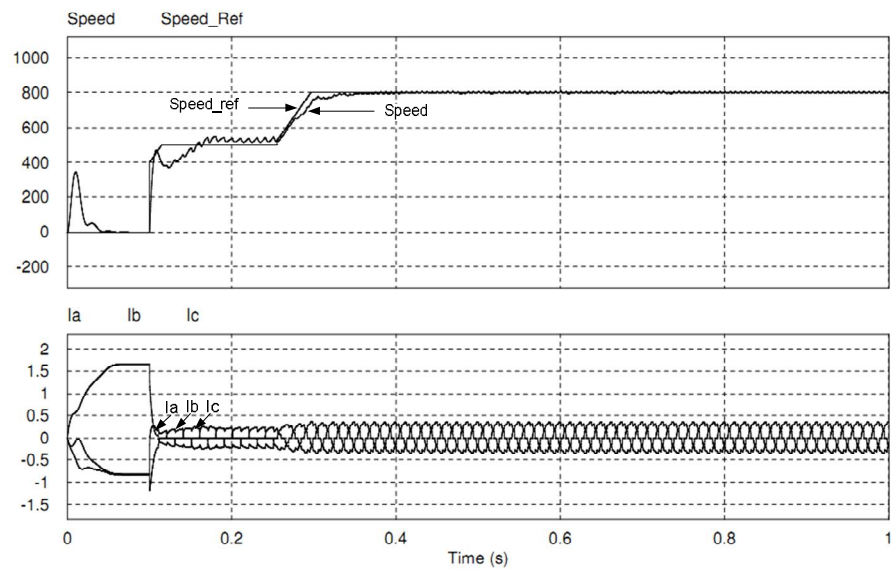


(ค)

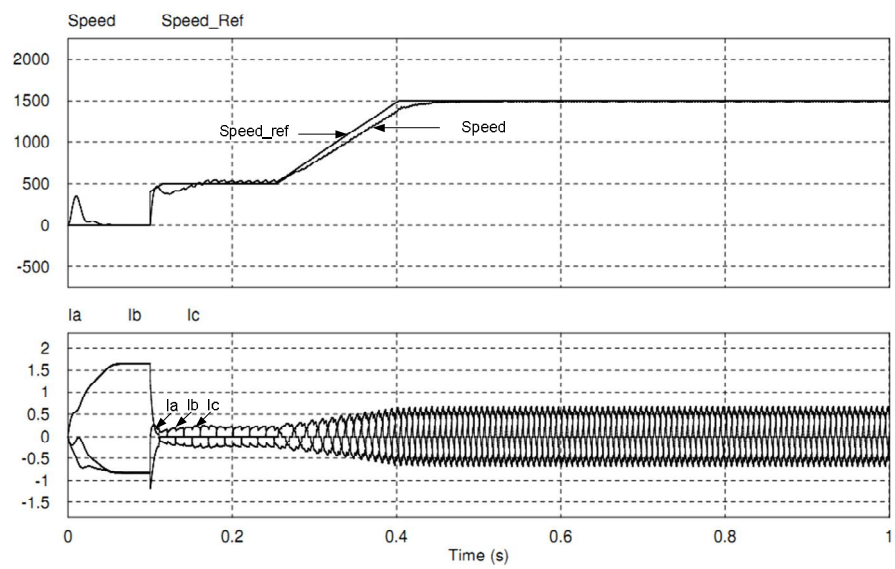
รูปที่ 4.26 การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ที่ความเร็วรอบมอเตอร์อ้างอิงที่กำหนด กรณีขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยกระแสไฟฟ้าควาชิ-สแควร์ที่มีการชดเชยช่วงเวลาคอมมิวเตชัน
(ก) 800 rpm (ข) 1500 rpm (ค) 2500 rpm

เมื่อพิจารณาความเร็วรอบมอเตอร์เทียบกับความเร็วรอบมอเตอร์อ้างอิงในแต่ละช่วงพบว่า ช่วงการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบลูปเปิดความเร็วรอบมอเตอร์มีการกระเพื่อมและมีค่าสูงกว่าความเร็วรอบมอเตอร์อ้างอิงที่กำหนด เนื่องจากในช่วงนี้ไม่ได้มีการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ อีกทั้งการคอมมิวเตชันกระแสไฟฟ้าไม่ถูกต้องจึงส่งผลให้ความเร็วรอบมอเตอร์เกิดการกระเพื่อม ขณะที่ช่วงขับเคลื่อนมอเตอร์แบบไรต์ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์มีการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์โดยใช้ตัวควบคุมแบบ PI จึงสามารถควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ได้ที่ความเร็วรอบมอเตอร์อ้างอิงที่กำหนด 800 rpm, 1500 rpm และ 2500 rpm ตามลำดับ

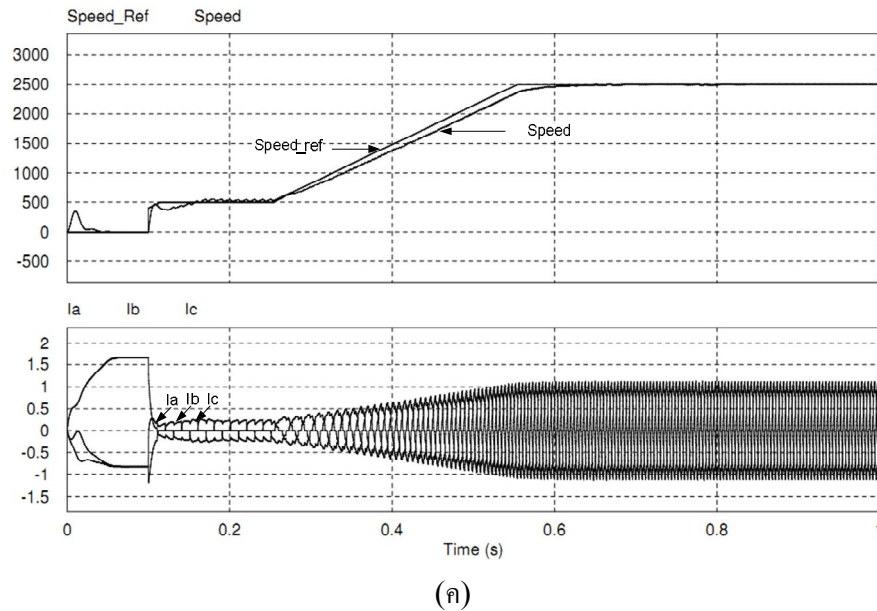
ส่วนการจำลองการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เมื่อขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยกระแสไฟฟ้าแบบ ควาชิ-ไซน์ ในการขับเคลื่อนมอเตอร์นี้แบ่งการทำงานออกเป็น 3 ช่วง เหมือนกับการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เมื่อขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยกระแสไฟฟ้าแบบ ควาชิ-สแควร์ที่มีการชดเชยช่วงเวลาคอมมิวเตชัน ดังแสดงรูปที่ 4.27



(n)



(v)



รูปที่ 4.27 การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ที่ความเร็วอ้างอิงที่กำหนด กรณีขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยกระแสไฟฟ้าควาซี-ไซน์ (ก) 800 rpm (ข) 1500 rpm (ค) 2500 rpm

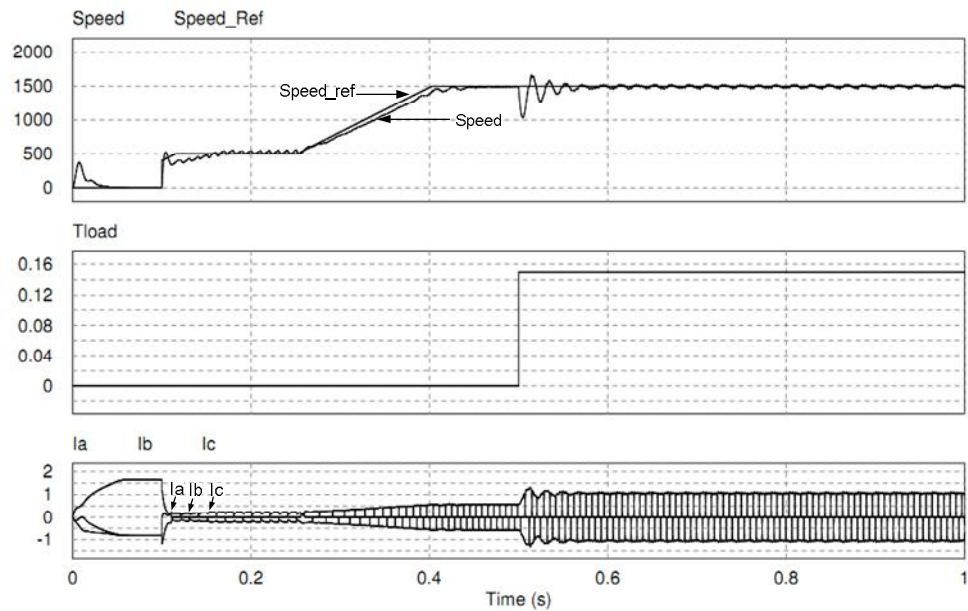
เมื่อพิจารณาความเร็วรอบมอเตอร์เทียบกับความเร็วรอบมอเตอร์อ้างอิงในแต่ละช่วงพบว่า ในช่วงการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบลูปเปิดความเร็วรอบมอเตอร์มีการกระเพื่อมและมีค่าสูงกว่าความเร็วรอบมอเตอร์อ้างอิงที่กำหนด เนื่องจากในช่วงนี้ไม่ได้มีการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ อีกทั้งการคอมมิวเตชันกระแสไฟฟ้าไม่ถูกต้องส่งผลให้ความเร็วรอบมอเตอร์เกิดการกระเพื่อม

ขณะที่ช่วงขับเคลื่อนมอเตอร์แบบไร้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ โดยมีตัวควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์แบบPI สามารถควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ได้ที่ความเร็วรอบมอเตอร์อ้างอิงที่กำหนด 800 rpm, 1500 rpm และ 2500 rpm ตามลำดับ เช่นเดียวกับการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เมื่อขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยกระแสไฟฟ้าแบบ ควาซี-สแควร์ที่มีการชดเชยช่วงคอมมิวเตชัน

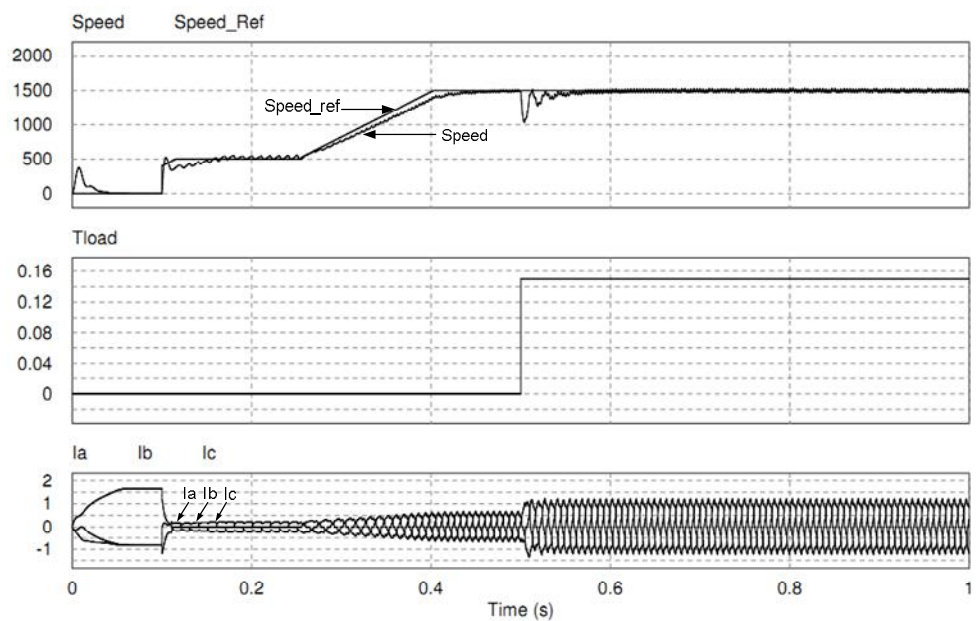
การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ขณะโหลดมีการเปลี่ยนแปลง

การจำลองเพื่อการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ขณะโหลดมีการเปลี่ยนแปลงใช้ตัวควบคุมความเร็วรอบแบบ PI โดยกำหนดค่า $K_p = 0.35$ $T_i = 0.012$ $T = 0.001$ วินาที โดยทำการเปลี่ยนแปลงโหลดขณะมอเตอร์หมุนที่สภาวะคงตัว (Steady State) ที่ความเร็วรอบมอเตอร์อ้างอิง 1500 rpm จาก 0 N.m. เป็น 0.15 N.m. ที่เวลา 0.5 วินาที

การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เมื่อขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยกระแสไฟฟ้าแบบ ควาซี-สแควร์ที่มีการชดเชยช่วงเวลาคอมมิวเตชัน และ กระแสไฟฟ้าแบบ ควาซี-ไซน์ ขณะที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงแสดงดังรูปที่ 4.28- 4.29 ตามลำดับ



รูปที่ 4.28 การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระทางกล กรณีขับเคลื่อนด้วยกระแสไฟฟ้าแบบควาซี-สแควร์ที่มีการชดเชยช่วงเวลาคอมมิวเตชัน



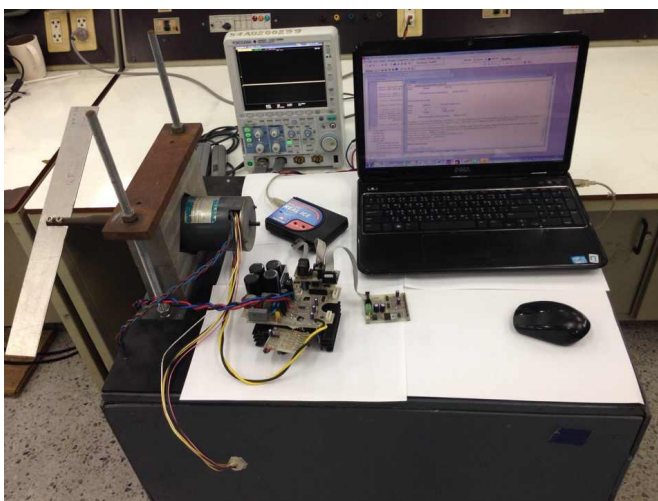
รูปที่ 4.29 การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระทางกล กรณีขับเคลื่อนด้วยกระแสไฟฟ้าแบบควาซี-ไซน์

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.28- 4.29 แม้จะมีการเปลี่ยนแปลงโหลดมอเตอร์ การขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยเทคนิคที่นำเสนอทั้ง 2 วิธียังคงสามารถรักษาความเร็วรอบมอเตอร์ให้เท่ากับความเร็วรอบมอเตอร์อ้างอิงได้

4.2 การทดลองการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบไร้ตัวตรวจจับตำแหน่งพร้อมทั้งลดการกระเพื่อมแรงบิดมอเตอร์

เพื่อยืนยันผลการจำลองของการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบไร้ตัวตรวจจับตำแหน่งพร้อมทั้งลดการกระเพื่อมแรงบิดมอเตอร์ด้วยวิธีที่นำเสนอ ชุดวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบไร้ตัวตรวจจับตำแหน่งได้ถูกออกแบบขึ้นมาดังแสดงรูปที่ 4.30 โดยส่วนการควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์ถูกพัฒนาบนไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC33FJ16GS504 และอุปกรณ์สำหรับการทดลองมีดังนี้

1. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส 220 V_{ac} 50 Hz
2. Oscilloscope ยี่ห้อ YOGOKAWA รุ่น DLM2024
3. Current probe ยี่ห้อ YOGOKAWA รุ่น 701933
4. Differential Probe ยี่ห้อ SAPPHIRE INSTRUMENTS รุ่น SI-9110
5. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน 3 เฟส โดยมีฟีดแบ็คและพารามิเตอร์ดังตารางที่ 4.1
6. โหลดใบพัดทดสอบ มีขนาดกว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 430 มิลลิเมตร และหนา 25 มิลลิเมตร ทำจากวัสดุอลูมิเนียม
7. บอร์ดวงจรการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบไร้ตัวตรวจจับตำแหน่ง



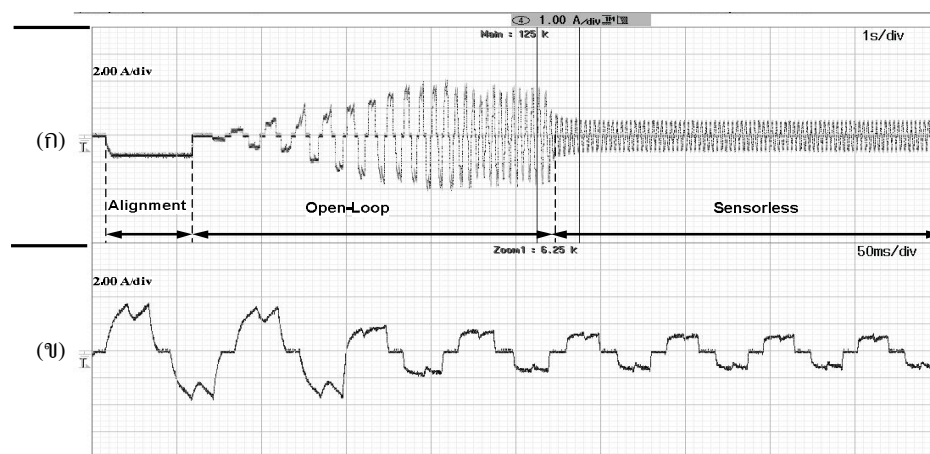
รูปที่ 4.30 ฮาร์ดแวร์ของชุดการทดลองการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบไร้ตัวตรวจจับตำแหน่งพร้อมทั้งลดการกระเพื่อมแรงบิดมอเตอร์

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านที่ประยุกต์ใช้ในงาน ปั๊มน้ำ และ พัดลม ดังนั้นจึงเลือกทำการทดลองขับเคลื่อนมอเตอร์กับโหลดพัดลม ดังแสดงในรูปที่ 4.30 โดยแบ่งการทดลองเป็น 4 ส่วน ดังนี้

- การเริ่มหมุนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านจากสภาวะหยุดนิ่ง
- การทดลองการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบไร้ตัวตรวจจับตำแหน่ง ด้วยกระแสไฟฟ้าแบบควาซี-สแควร์ที่มีการชดเชยช่วงคอมมิวเตชัน
- การทดลองการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบไร้ตัวตรวจจับตำแหน่ง ด้วยกระแสไฟฟ้าแบบควาซี-ไซน์
- การเปรียบเทียบการลดการกระเพื่อมแรงบิดมอเตอร์และการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์

4.2.1 การเริ่มหมุนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านจากสภาวะหยุดนิ่ง

การทดลองเพื่อเริ่มหมุนมอเตอร์ได้ทำการทดลองจากสภาวะหยุดนิ่ง จนถึงความเร็วรอบมอเตอร์ 800 rpm ดังแสดงในรูปที่ 4.31 ช่วงแรกเป็นช่วงการบังคับตำแหน่ง โรเตอร์ไปยังตำแหน่งเริ่มต้นโดยจ่าย แรงดันไฟฟ้าเข้าเฟส B และ ไล่ออกที่เฟส A และ C ค้างไว้เป็นเวลา 1 วินาที ทำให้กระแสไฟฟ้าเฟส A มีค่าคงที่ติดลบ จากนั้นทำการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบลูปเปิดไปที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 500 rpm ก่อนจะเปลี่ยนเข้าสู่ช่วงสุดท้ายซึ่งเป็นการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบไร้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.31 (ก) ผลการทดลองพบว่ากระแสไฟฟ้าเฟส A ในช่วงที่เปลี่ยนจากการขับเคลื่อน มอเตอร์แบบลูปเปิดสามารถเปลี่ยนไปอยู่ในช่วงขับเคลื่อนมอเตอร์แบบไร้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.31 (ข)

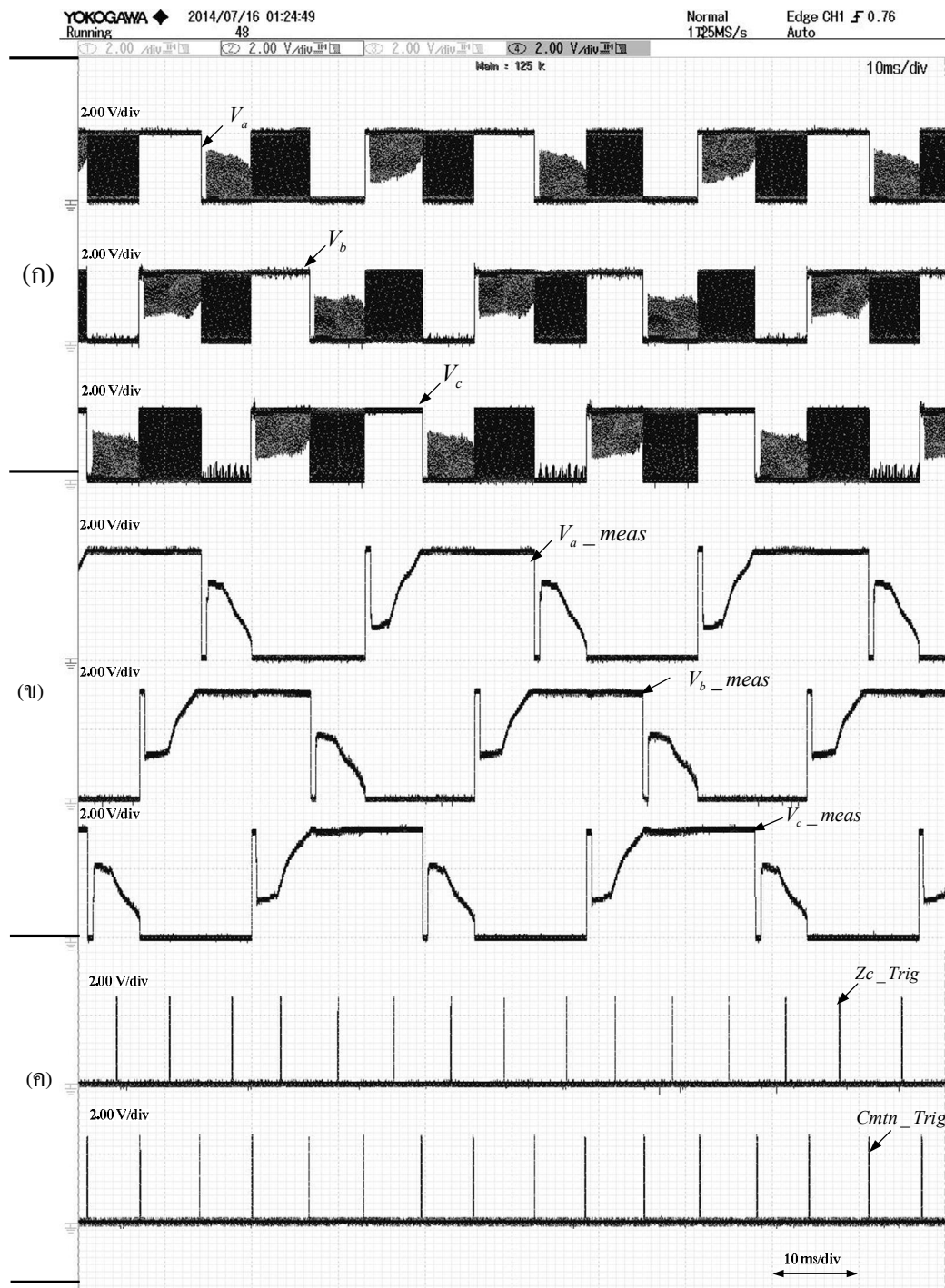


รูปที่ 4.31 กระแสไฟฟ้าเฟส A (ก) ช่วงเวลาการเริ่มหมุนมอเตอร์จากสภาวะหยุดนิ่งจนถึงความเร็วรอบ 800 rpm (ข) การขยายช่วงเวลาจาก 1 s/div เป็น 10 ms/div ในช่วงที่เปลี่ยนจาก Open Loop ไปเป็น Sensorless

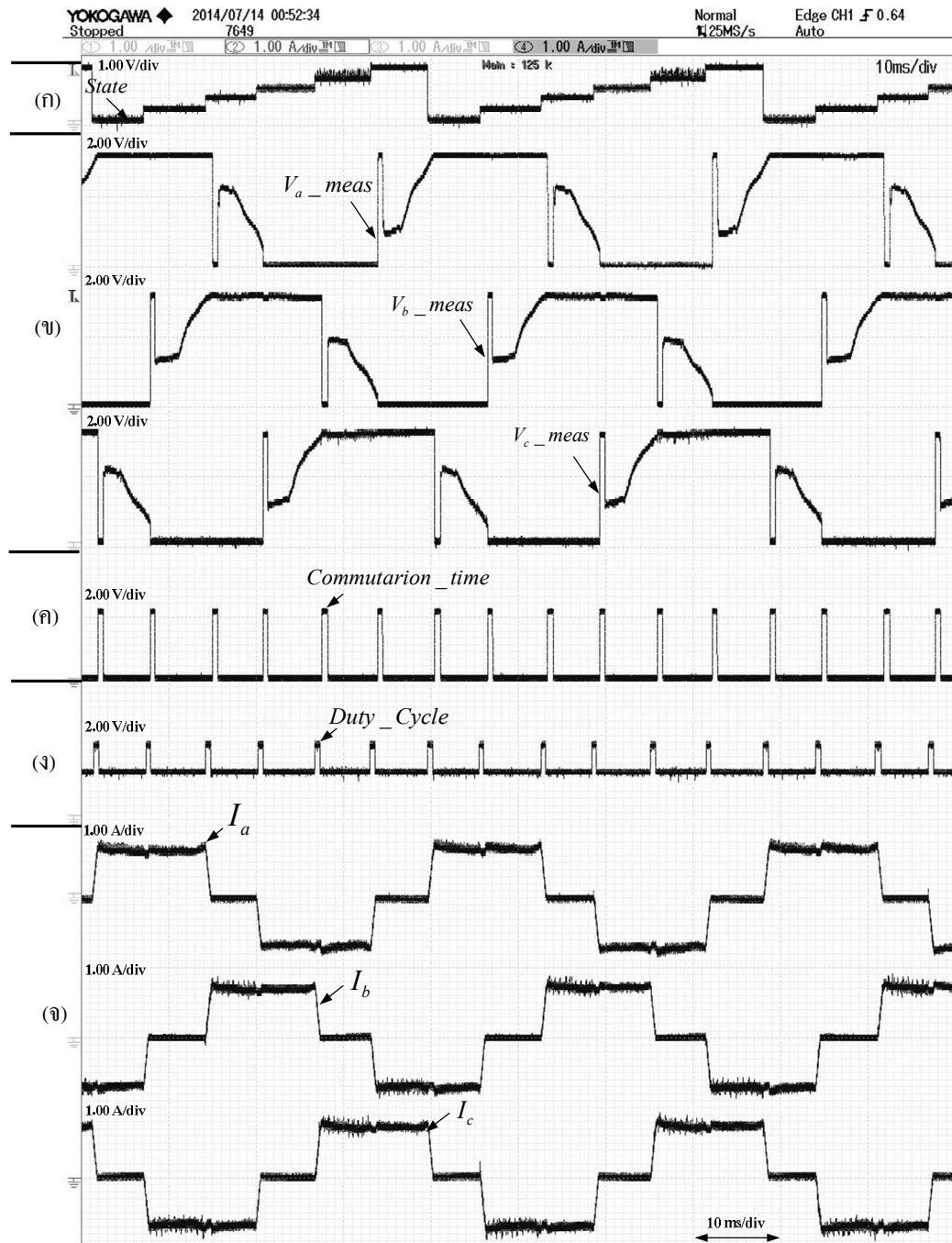
4.2.2 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบไร้ตัวตรวจจับตำแหน่งด้วยกระแสไฟฟ้าแบบควาซี-สแควร์ที่มีการชดเชยช่วงเวลาคอมมิวเตชัน

ในหัวข้อนี้เสนอผลการทดลองการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบไร้ตัวตรวจจับตำแหน่งด้วยกระแสไฟฟ้าแบบควาซี-สแควร์ที่มีการชดเชยช่วงเวลาคอมมิวเตชัน โดยทดสอบที่ความเร็วรอบมอเตอร์มอเตอร์ 800 rpm เมื่อทำการทดลองด้วยวิธีการนี้ แรงดันไฟฟ้าเฟส V_a , V_b และ V_c ที่ผ่านวงจรปรับระดับสัญญาณของแรงดันไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 4.32 (ก) แรงดันไฟฟ้าเฟสเหล่านี้ถูกวัดในช่วงสัญญาณ PWM On ทำให้ได้แรงดันไฟฟ้า V_{a_meas} , V_{b_meas} และ V_{c_meas} ดังแสดงในรูปที่ 4.32 (ข) ซึ่งจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับ $V_{dc}/2$ ทำให้ได้ตำแหน่งจุดผ่านศูนย์แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ (Zc_Trigger) และจุด Zc_Trigger นี้ถูกนำไปใช้หาจุดคอมมิวเตชันดังแสดงในรูปที่ 4.32 (ค) ซึ่งพบว่าจุดคอมมิวเตชันสามารถหาได้เหมือนกับผลการจำลองหัวข้อที่ 4.1.2

จากนั้นจุดคอมมิวเตชันเป็นตัวกำหนดเวลาการเปลี่ยนสเตต (State) ดังแสดงรูปที่ 4.33 (ก) ซึ่งสเตตนี้ นำไปกำหนดการหาช่วงเวลาคอมมิวเตชันตามตารางที่ 2.3 โดยผ่านการวัดแรงดันเฟส V_{a_meas} , V_{b_meas} และ V_{c_meas} ที่แสดงในรูปที่ 4.33 (ข) จึงทำให้ได้ช่วงเวลาคอมมิวเตชันดังแสดงรูปที่ 4.33 (ค) โดยช่วงเวลาคอมมิวเตชันนี้เป็นตัวกำหนดการเปลี่ยนค่าดิ้วดีไอเกิลเพื่อชดเชยแรงดันไฟฟ้าในช่วงเวลาคอมมิวเตชัน ดังแสดงรูปที่ 4.33 (ง) เมื่อทำการปรับค่าดิ้วดีไอเกิลแล้วทำให้กระแสไฟฟ้าเฟส I_a , I_b และ I_c มีลักษณะแบบควาซี-สแควร์ที่ไม่มีการกระเพื่อมของกระแสดังแสดงในรูปที่ 4.33 (จ) ซึ่งเหมือนกับผลการจำลองหัวข้อที่ 4.1.2



รูปที่ 4.32 การหาจุดคอมมิวเตชัน (ก) แรงดันไฟฟ้าเฟส (ข) แรงดันไฟฟ้าเฟสที่วัดในช่วงสัญญาณ PWM On (ค) ตำแหน่งจุดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ และจุดคอมมิวเตชัน



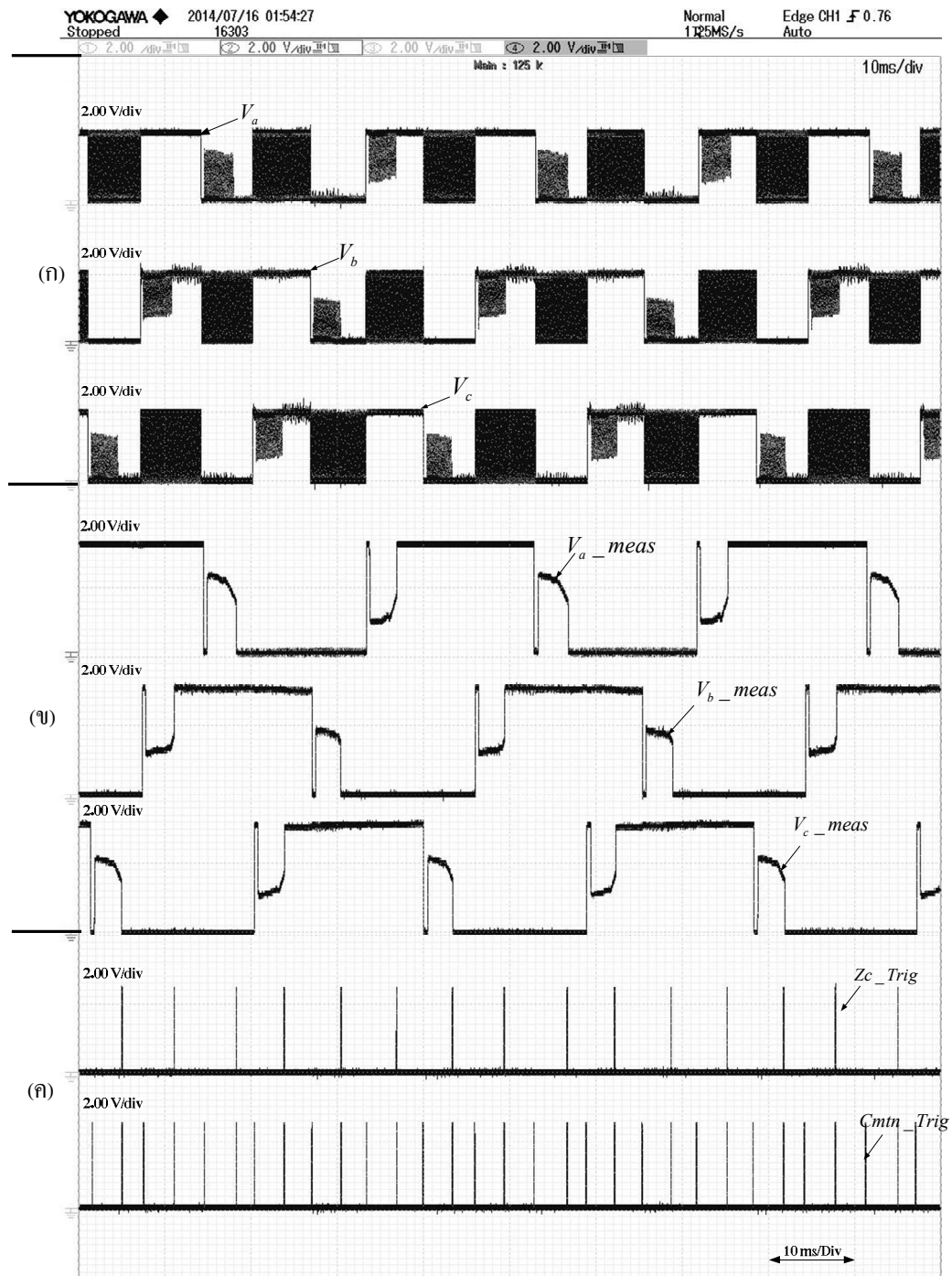
รูปที่ 4.33 การหาช่วงเวลาคอมมิวเตชันและการปรับค่าดีวีไซเคิล (ก) สเตต S1-S6

(ข) แรงดันไฟฟ้าเฟสที่วัดในช่วงสัญญาณ PWM On (ค) ช่วงเวลาคอมมิวเตชัน
(ง) ค่าดีวีไซเคิล (จ) กระแสไฟฟ้าเฟส

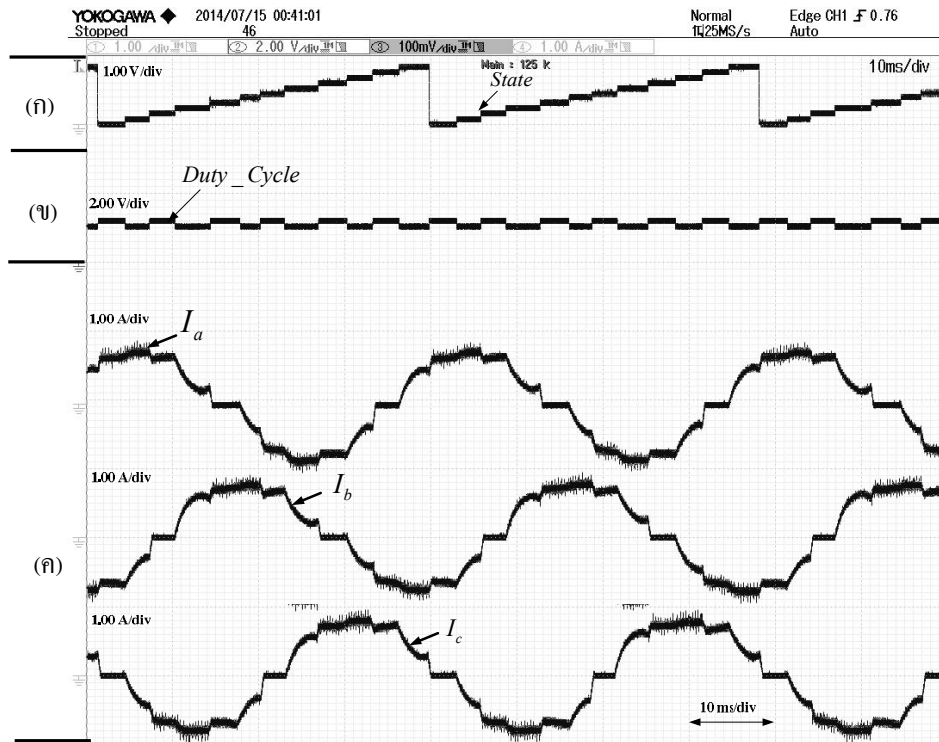
4.2.3 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบไร้ตัวตรวจจับตำแหน่งด้วยกระแสไฟฟ้าแบบควาซิ-ไซน์

ในหัวข้อนี้เสนอผลการทดลองการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบไร้ตัวตรวจจับตำแหน่งด้วยกระแสไฟฟ้าแบบควาซิ-ไซน์ โดยทดสอบที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 800 rpm เมื่อทำการทดลองด้วยวิธีการนี้ แรงดันไฟฟ้าเฟส V_a , V_b และ V_c ที่ผ่านวงจรปรับระดับสัญญาณของแรงดันไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 4.34 (ก) แรงดันไฟฟ้าเฟสเหล่านี้ถูกวัดในช่วงสัญญาณ PWM On ทำให้ได้แรงดันไฟฟ้า V_{a_meas} , V_{b_meas} และ V_{c_meas} ดังแสดงในรูปที่ 4.34 (ข) ซึ่งจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับ $V_{dc}/2$ ทำให้ได้ตำแหน่งจุดผ่านศูนย์แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ (Zc_Trig) และจุด Zc_Trig นี้ถูกนำไปใช้หาจุดคอมมิวเตชันโดยที่จุด Zc_Trig เป็นจุดคอมมิวเตชันด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.34 (ค) ซึ่งพบว่าจุดคอมมิวเตชันสามารถหาได้เหมือนกับผลการจำลองหัวที่ 4.1.3

จากนั้นจุดคอมมิวเตชันเป็นตัวกำหนดการเปลี่ยนสเตต (State) จำนวน 12 ช่วง ดังแสดงรูปที่ 4.35 (ก) ซึ่งช่วงคอมมิวเตชันลำดับเลขก็ถูกปรับด้วยค่าดิฟเฟอเรนเชียลที่ได้จากตัวควบคุมความเร็วแบบ PI และช่วงคอมมิวเตชันลำดับเลขก็ถูกปรับลดลงด้วยค่าดิฟเฟอเรนเชียลที่ได้จากสมการ 2.74 ซึ่งค่าดิฟเฟอเรนเชียลดังแสดงรูปที่ 4.35 (ข) เมื่อขับสวิทช์ด้วยค่าดิฟเฟอเรนเชียลดังกล่าว ทำให้ได้กระแสไฟฟ้าเฟส I_a , I_b และ I_c มีลักษณะแบบควาซิ-ไซน์ดังแสดงในรูปที่ 4.35 (ค) ซึ่งเหมือนกับผลการจำลองหัวที่ 4.1.3



รูปที่ 4.34 การหาจุดคอมมิวเตชัน (ก) แรงดันไฟฟ้าเฟส (ข) แรงดันไฟฟ้าเฟสที่วัดในช่วงสัญญาณ PWM On (ค) ตำแหน่งจุดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับและจุดคอมมิวเตชัน

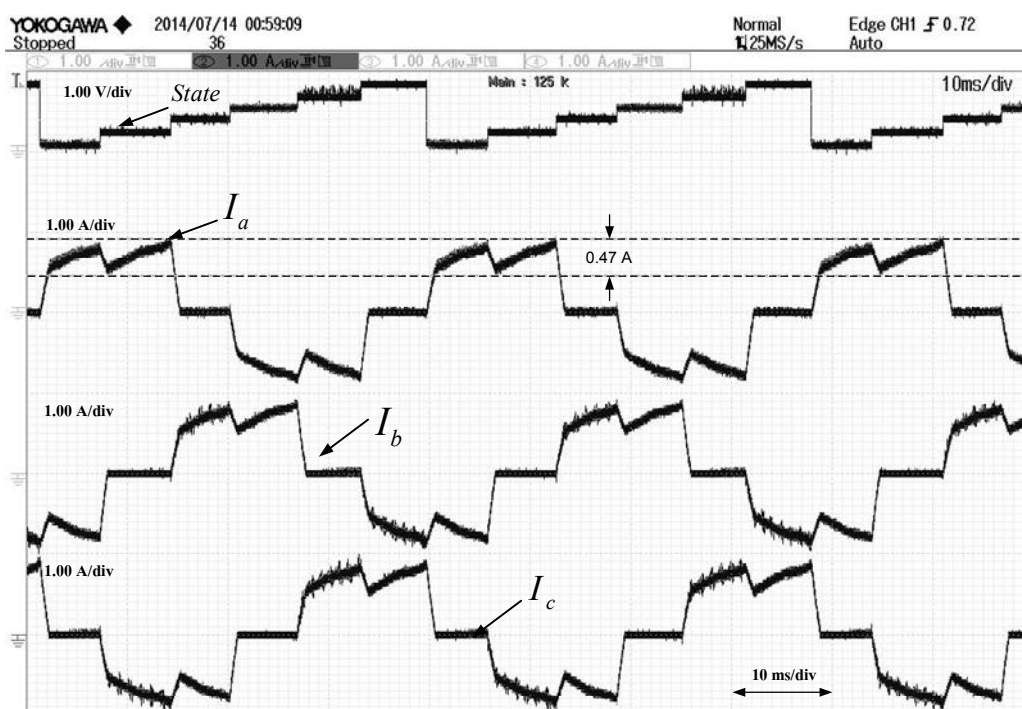


รูปที่ 4.35 การสร้างกระแสไฟฟ้าแบบควาซี-ไซน์ (ก) สเตท S1-S12 (ข) ค่าดิวตี้ไซเคิล
(ค) กระแสไฟฟ้าเฟส

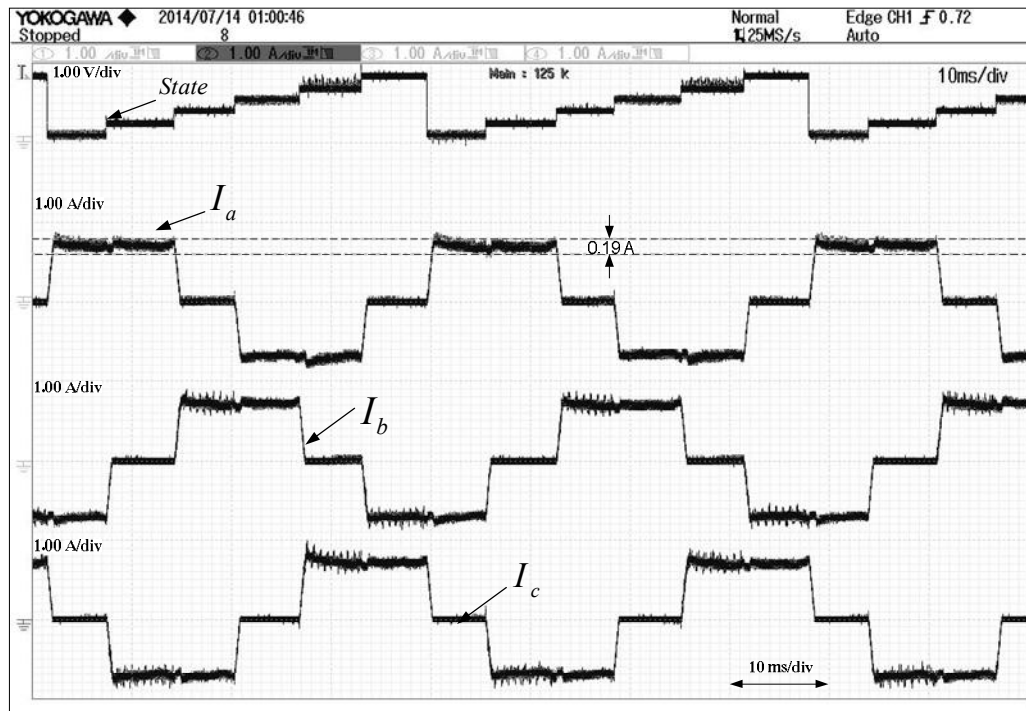
4.2.4 การเปรียบเทียบการลดการกระเพื่อมแรงบิดมอเตอร์และการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์

การเปรียบเทียบการลดการกระเพื่อมแรงบิดมอเตอร์

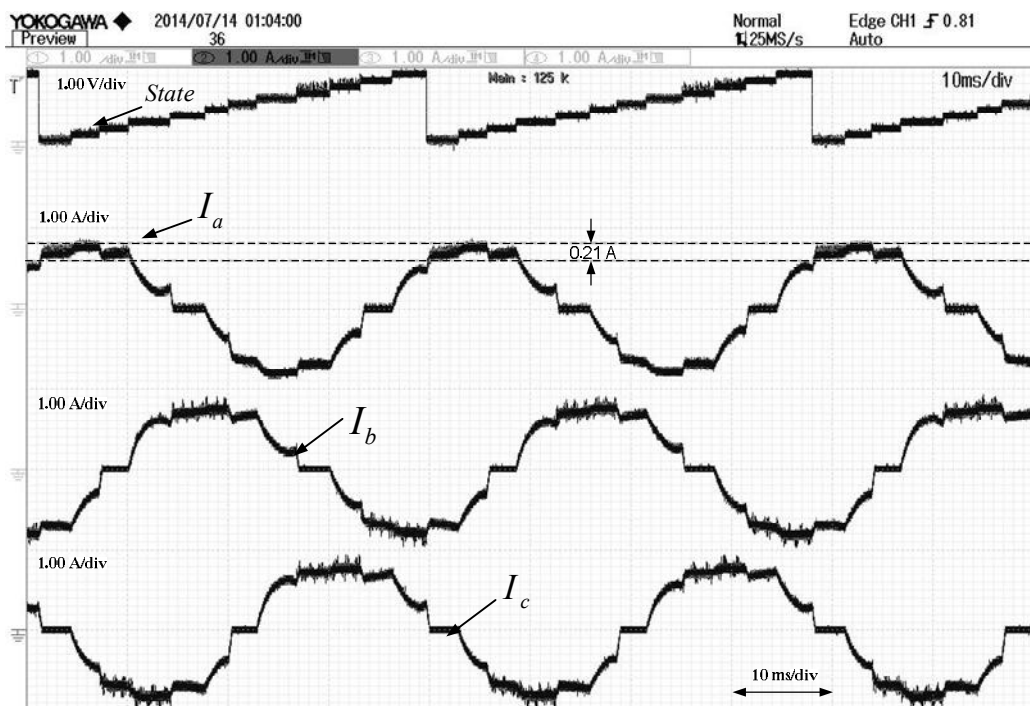
เมื่อทำการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านโดยทดสอบที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 800 rpm พบว่าการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านด้วยกระแสไฟฟ้าแบบควาซี-สแควร์ กระแสไฟฟ้าแบบควาซี-สแควร์ที่มีการชดเชยช่วงเวลาคอมมิวเตชัน และกระแสไฟฟ้าแบบควาซี-ไซน์ ทำให้เกิดการกระเพื่อมของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.47 A 0.19 A และ 0.21 A ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.36-4.38 เนื่องจากการกระเพื่อมกระแสไฟฟ้านี้มีน้อยต่อการกระเพื่อมแรงบิดมอเตอร์ ทำให้สามารถสังเกตการณ์การกระเพื่อมแรงบิดมอเตอร์ได้จากการกระเพื่อมกระแสไฟฟ้า จากการทดลองพบว่า การขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยกระแสไฟฟ้าแบบควาซี-สแควร์ที่มีการชดเชยช่วงเวลาคอมมิวเตชัน มีการกระเพื่อมกระแสไฟฟ้าน้อยที่สุดจึงหมายความว่ามีการกระเพื่อมแรงบิดมือน้อยที่สุดซึ่งให้ผลทำนองเดียวกันกับผลจำลองในหัวข้อที่ 4.1.4



รูปที่ 4.36 สเตทและกระแสไฟฟ้าเฟสแบบควาซี-สแควร์



รูปที่ 4.37 สเกตและกระแสไฟฟ้าเฟสแบบควาซี-สแควร์ที่มีการชดเชยช่วงเวลาคอมมิวเตชั่น

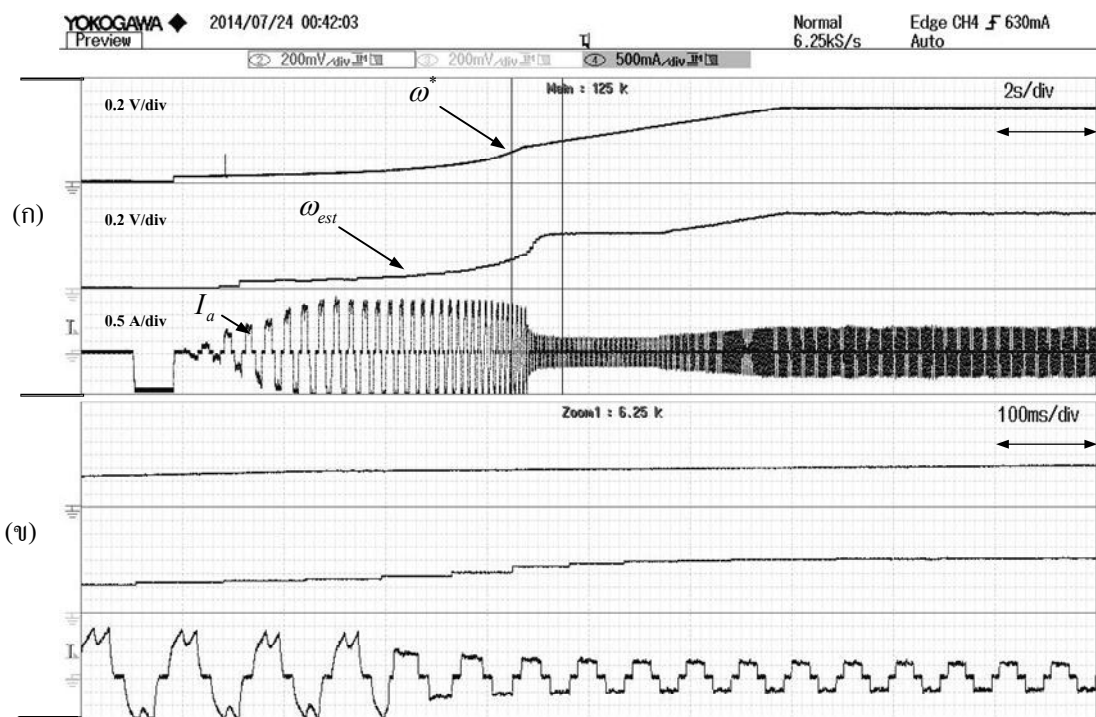


รูปที่ 4.38 สเกตและกระแสไฟฟ้าแบบควาซี-ไซน์

การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์

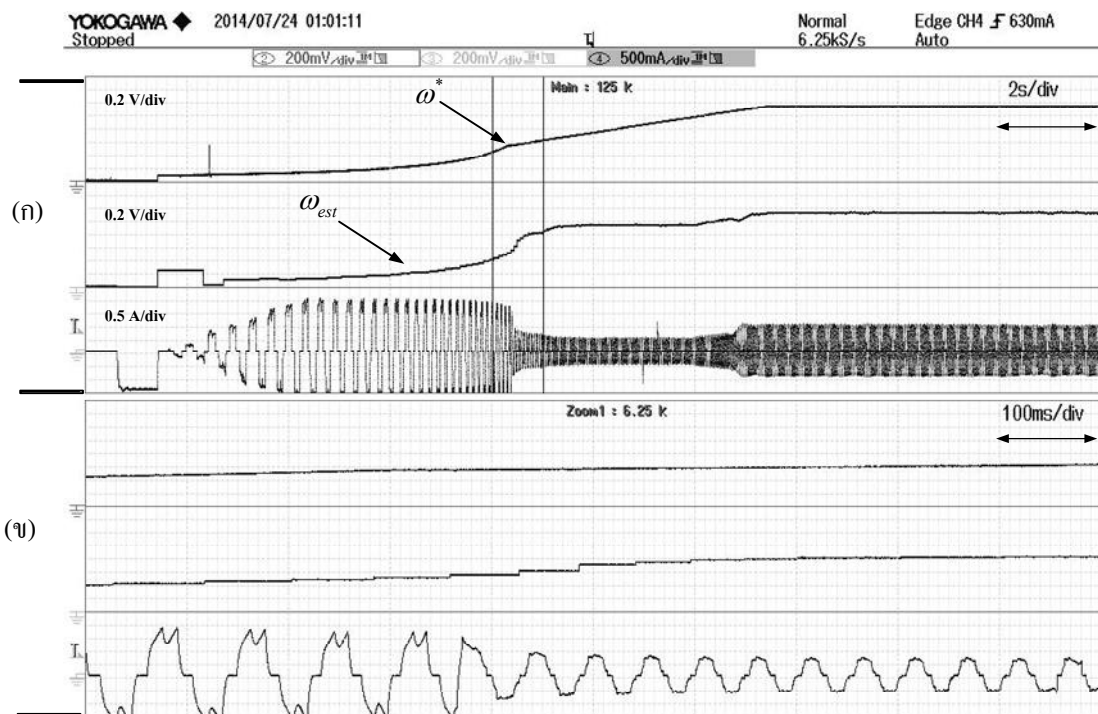
การทดลองเพื่อควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์โดยใช้โพลคัพเดลมซึ่งใช้ตัวควบคุมความเร็วรอบแบบ PI โดยกำหนดค่า $K_p = 0.6$ $T_i = 0.005$ $T = 0.001$ วินาที และกำหนดความเร็วรอบมอเตอร์อ้างอิงที่ 800 rpm

ผลการทดลองการควบคุมความเร็วรอบเมื่อขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยกระแสไฟฟ้าแบบ ควาซิ-สแควร์ที่มีการชดเชยช่วงเวลาคอมมิวเตชัน โดยวัดรูปคลื่นความเร็วรอบมอเตอร์อ้างอิง ω^* ความเร็วรอบมอเตอร์ประมาณ ω_{est} และกระแสไฟฟ้าเฟส A I_a แสดงในรูปที่ 4.39 (ก) พบว่าความเร็วรอบมอเตอร์ประมาณ สามารถติดตามความเร็วรอบมอเตอร์อ้างอิงได้ รูปที่ 4.39 (ข) แสดงผลของความเร็วมอเตอร์อ้างอิง ความเร็วรอบมอเตอร์ประมาณ และกระแสไฟฟ้า I_a ที่ขยายช่วงเวลาจาก 2 s/div เป็น 100 ms/div ในช่วงที่เปลี่ยนจาก Open Loop ไปเป็น Sensorless



รูปที่ 4.39 การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ที่ความเร็ว 800 rpm กรณีขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยกระแสไฟฟ้าควาซิ-สแควร์ที่มีการชดเชยช่วงเวลาคอมมิวเตชัน (ก) ความเร็วรอบมอเตอร์อ้างอิง ω^* ความเร็วรอบมอเตอร์ประมาณ ω_{est} และกระแสไฟฟ้าเฟส A (ข) ภาพขยายช่วงเวลาจาก 2 s/div เป็น 100 ms/div ในช่วงที่เปลี่ยนจาก Open Loop ไปเป็น Sensorless

รูปที่ 4.40 แสดงผลการทดลองการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เมื่อขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยกระแสไฟฟ้าแบบ ควาซี-ไซน์ พบว่าความเร็วรอบมอเตอร์ประมาณ ω_{est} สามารถติดตามความเร็วรอบมอเตอร์อ้างอิง ω^* ตลอดช่วงการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.40 (ก) ซึ่งเหมือนกับการจำลองในหัวข้อที่ 4.1.4 รูปที่ 4.40 (ข) แสดงผลของความเร็วรอบมอเตอร์อ้างอิง ความเร็วรอบมอเตอร์ประมาณ และกระแสไฟฟ้า I_a ที่ขยายช่วงเวลาจาก 2 s/div เป็น 100 ms/div ในช่วงที่เปลี่ยนจาก Open Loop ไปเป็น Sensorless



รูปที่ 4.40 การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ที่ความเร็ว 800 rpm กรณีขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยกระแสไฟฟ้าควาซี-ไซน์ (ก) ความเร็วรอบมอเตอร์อ้างอิง ω^* ความเร็วรอบ มอเตอร์ประมาณ ω_{est} และกระแสไฟฟ้าเฟส A (ข) ภาพขยายช่วงเวลาจาก 2 s/div เป็น 100 ms/div ในช่วงที่เปลี่ยนจาก Open Loop ไปเป็น Sensorless