



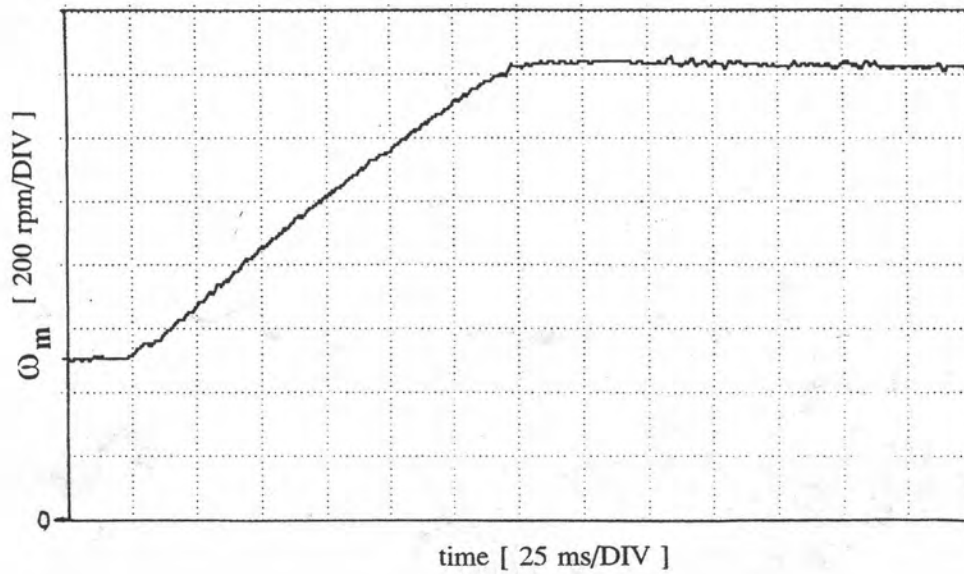
บทที่ 4

ผลการทดสอบระบบ

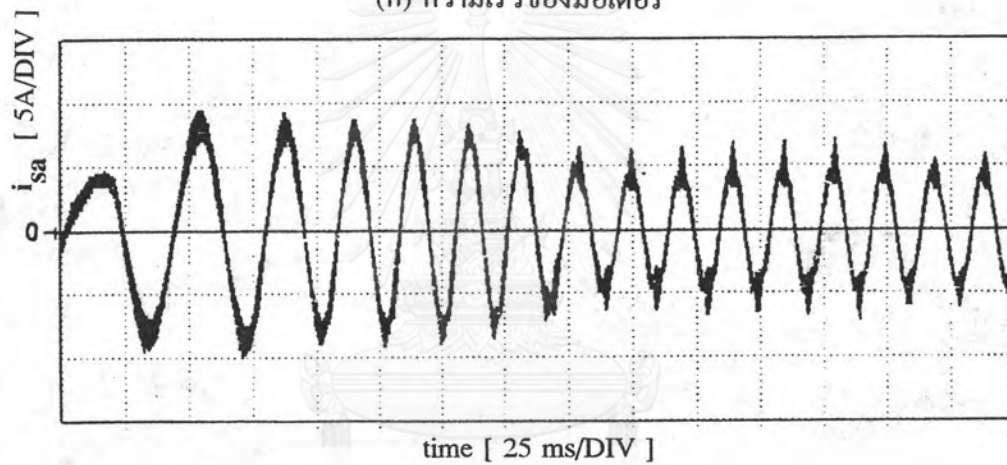
ผลการทดสอบการเร่ง-ลดความเร็ว

โดยอาศัยฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ทั้งระบบที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ในบทนี้เราจะทำการทดสอบการเร่ง-ลดความเร็วจาก 500 \leftrightarrow 1420 rpm. โดยคำสั่งความเร็วจะเป็นแบบขั้น ซึ่งได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ โดยในรูปที่ 4.1(ก) แสดงให้เห็นถึงการตอบสนองของความเร็วของมอเตอร์ต่อคำสั่งแบบขั้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของความเร็วนี้ค่อนข้างจะเป็นเส้นโค้งพอสสมคร ส่วนรูปที่ 4.1(ข) แสดงถึงรูปร่างของกระแสขณะที่มีการเร่งความเร็วกระแสจะเพิ่มจากขณะไม่มีโหลดซึ่งมีค่าขดประมาณ 4.2 A ขึ้นไปเป็นค่าขดประมาณ 8.5 A ซึ่งใกล้เคียงกับค่าสูงสุดที่กำหนดไว้ (8.7 A) แล้วค่อยลดลงทีละน้อยจนกระทั่งความเร็วได้ใกล้เคียงกับความเร็วคำสั่งกะแสจึงตกลงมาเท่ากับกระแสขณะไม่มีโหลด ส่วนการตอบสนองของความเร็วขณะสั่งลดความเร็วแสดงดังรูปที่ 4.2(ก) ซึ่งผลที่ได้จะเป็นเส้นโค้งเช่นเดียวกัน และกระแสขณะลดความเร็วแสดงดังรูปที่ 4.2(ข) จะเห็นว่าขณะที่กระแสเพิ่มขึ้นถึงค่าที่กำหนดแล้วกระแสยังคงเพิ่มขึ้นต่อไปจนกระทั่งความเร็วลดลงจนถึงค่าที่กำหนดกระแสจึงตกลงมาเท่ากับกระแสขณะไม่มีโหลด ซึ่งจากผลของความเร็วและกระแสที่ทดสอบได้นี้ ยังไม่เป็นที่น่าพอใจเนื่องจากว่าถ้าเราสามารถควบคุมแรงบิดได้ตามที่ต้องการ (100 % คงที่) ความเร็วที่ได้จะต้องขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้น (โดยคิดอย่างหยาบๆ ว่ามอเตอร์มีแต่ความเฉื่อย) และกระแสที่เพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดที่กำหนดจะต้องมีลักษณะคงที่

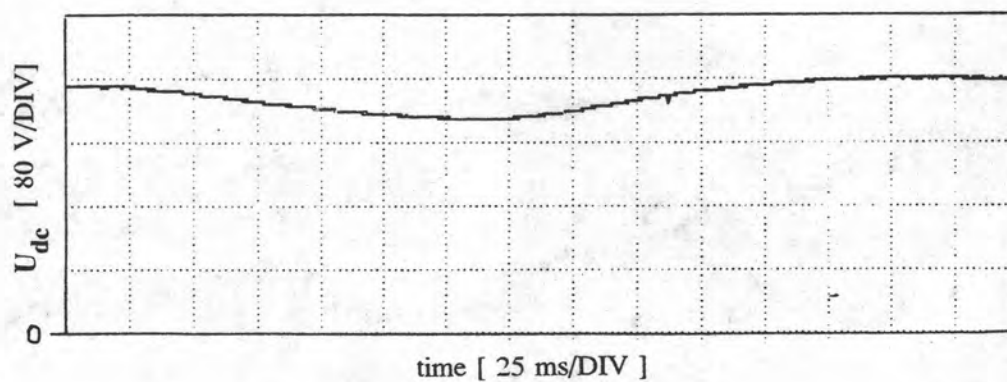
เนื่องจากขณะที่มีการเร่ง-ลดความเร็ว หรือมีการเพิ่ม-ลดโหลด แรงดันไฟตรงที่ได้มาจากวงจรเรียงกระแสที่มีคาปาซิเตอร์ช่วยกรองจะเกิดการเปลี่ยนแปลง กล่าวคือเมื่อมีการเร่งความเร็ว หรือเพิ่มโหลด แรงดันไฟตรงจะตกลง และเมื่อมีการลดความเร็ว หรือลดโหลด แรงดันไฟตรงจะสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.1(ค) และ 4.2(ค) แต่เนื่องจากการคำนวณรูปแบบการสวิตช์เราถือว่าแรงดันไฟตรงมีค่าคงที่ การที่แรงดันไฟตรงมีการเปลี่ยนแปลงตามสภาพการทำงานจึงมีผลทำให้แรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงไม่ได้ตามที่ต้องการจึงเป็นผลให้กระแสที่ไหลเข้าในมอเตอร์มีขนาดแปรตามการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟตรง ดังนั้นจึงต้องมีการชดเชยผลของการเปลี่ยนแปลงนี้



(ก) ความเร็วของมอเตอร์

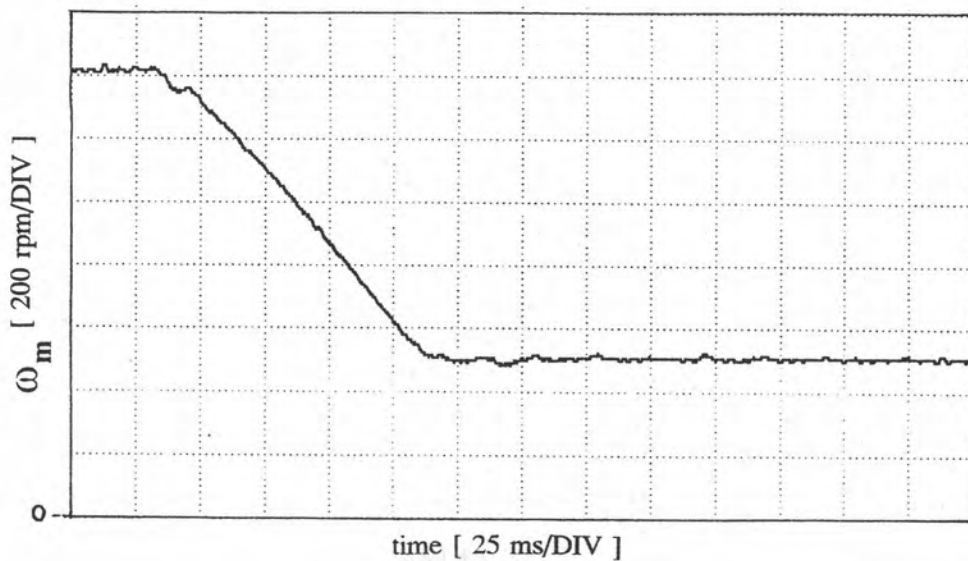


(ข) กระแสของมอเตอร์

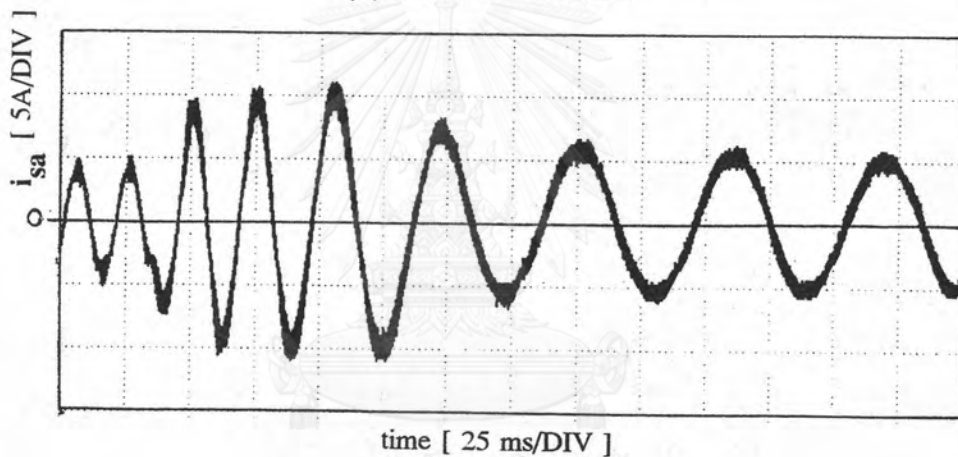


(ค) แรงดันไฟตรง

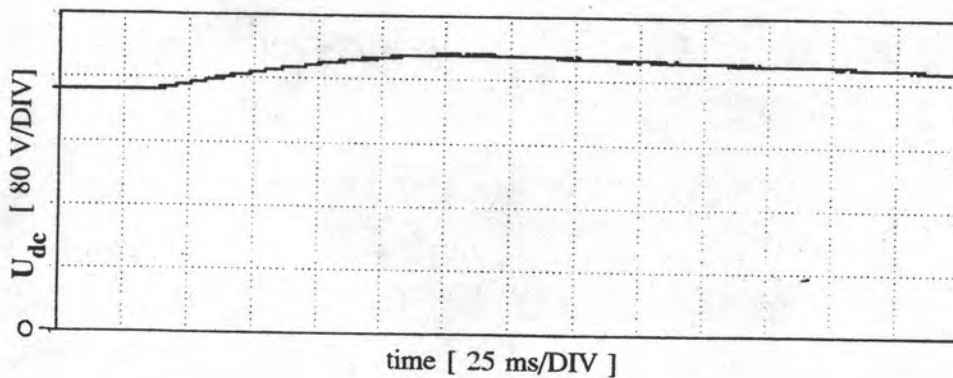
รูปที่ 4.1 การทดสอบการเร่งความเร็วจาก 500 - 1420 rpm.



(ก) ความเร็วของมอเตอร์



(ข) กระแสของมอเตอร์

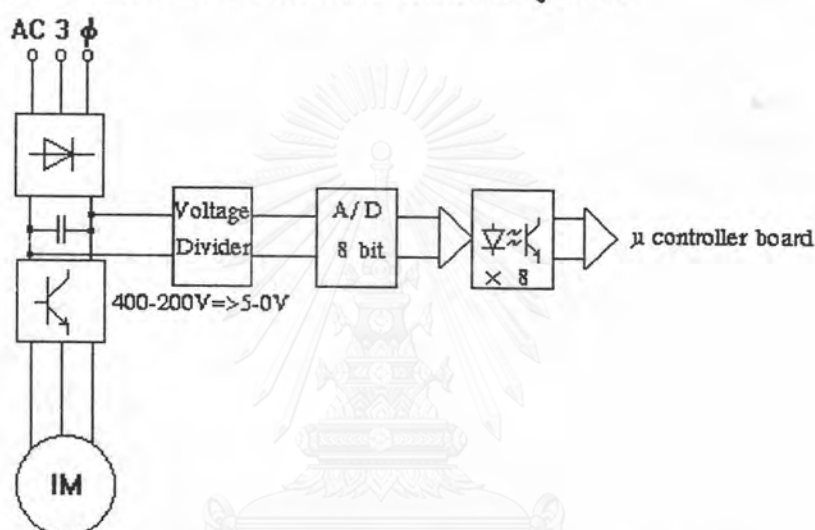


(ค) แรงดันไฟตรง

รูปที่ 4.2 การทดสอบการลดความเร็วจาก 1420 - 500 rpm.

วิธีการทำ PWM โดยคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟตรง

จากหลักการสร้างสัญญาณ PWM ในบทที่ 3 เราได้ตั้งสมมติฐานที่ว่าแรงดันไฟตรงมีค่าคงที่แล้วจึงคำนวณหาความกว้างของพัลส์ โดยใช้แรงดันไฟตรงเป็นฐานในการหาอัตราส่วน ดังนั้นเมื่อแรงดันไฟตรงมีการเปลี่ยนแปลงจึงต้องมีการคำนวณหาอัตราส่วนโดยพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงนี้ด้วย ค่าแรงดันไฟตรงนี้จะต้องมีการตรวจจับมาจากบัสไฟตรง เข้าวงจรแบ่งแรงดัน จากนั้นจึงทำการแปลงแรงดันจากแอนะล็อกมาเป็นดิจิทัล แล้วทำการแยกโคดทางไฟฟ้าก่อนเข้าบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยบล็อกไดอะแกรมแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 บล็อกไดอะแกรมของวงจรตรวจจับแรงดันไฟตรง

โดยที่ไมโครคอนโทรลเลอร์จะนำค่าแรงดันที่ตรวจจับได้นี้ U_{ds} มาทำการคำนวณหาอัตราส่วนกับค่าแรงดันไฟตรงที่ใช้เป็นฐาน U_{dc} ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\sqrt{2} V_{rms}$ (V_{rms} = แรงดันประสิทธิผล) โดยสมการที่ใช้จะเป็นดังต่อไปนี้

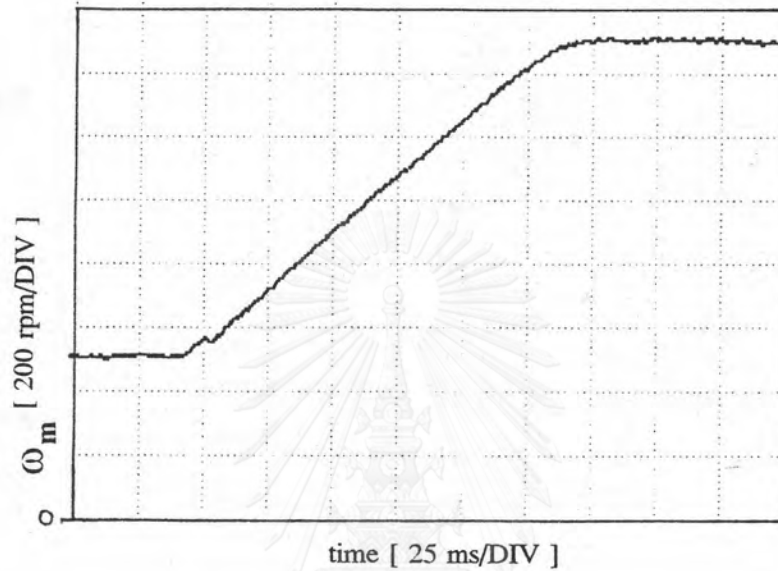
$$v'_d = v_d \cdot \frac{U_{ds}}{U_{dc}} \quad v'_q = v_q \cdot \frac{U_{ds}}{U_{dc}} \quad (4.1)$$

โดยที่ v'_d, v'_q คือแรงดันที่มีชดเชยแล้ว และ

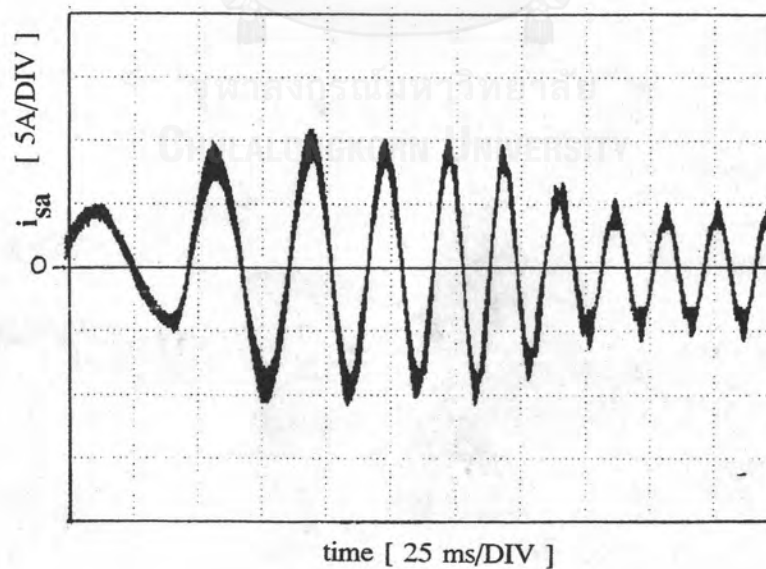
v_d, v_q คือแรงดันก่อนชดเชย โดยปริมาณทั้งหมดอยู่บนแกน d-q

หลังจากที่ได้มีการชดเชยผลของแรงดันไฟตรงผลการทดสอบจะได้ดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 โดยในรูปที่ 4.4(ก) แสดงความเร็วขณะมีคำสั่งเร่งความเร็ว และรูปที่ 4.5(ก) แสดงความเร็วขณะมีคำสั่งลดความเร็ว ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วทั้งขณะเร่งและลดความเร็วจะเป็นเชิงเส้น และกระแสนะเร่งและลดความเร็วดังแสดงในรูปที่ 4.4(ข) และ 4.5(ข) ตามลำดับ จะ

เพิ่มขึ้นถึงค่าสูงสุดที่กำหนดไว้ และจะค่อนข้างคงที่จนความเร็วได้ตามที่ต้องการจึงลดลงเท่ากับ กระแสขณะไม่มีโหลด แสดงว่าเราสามารถควบคุมแรงบิดให้คงที่ที่ 100% ได้ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วและขนาดของกระแสจะไม่ขึ้นกับระดับแรงดันไฟตรงเหมือนกับรูปที่ 4.1 และ 4.2

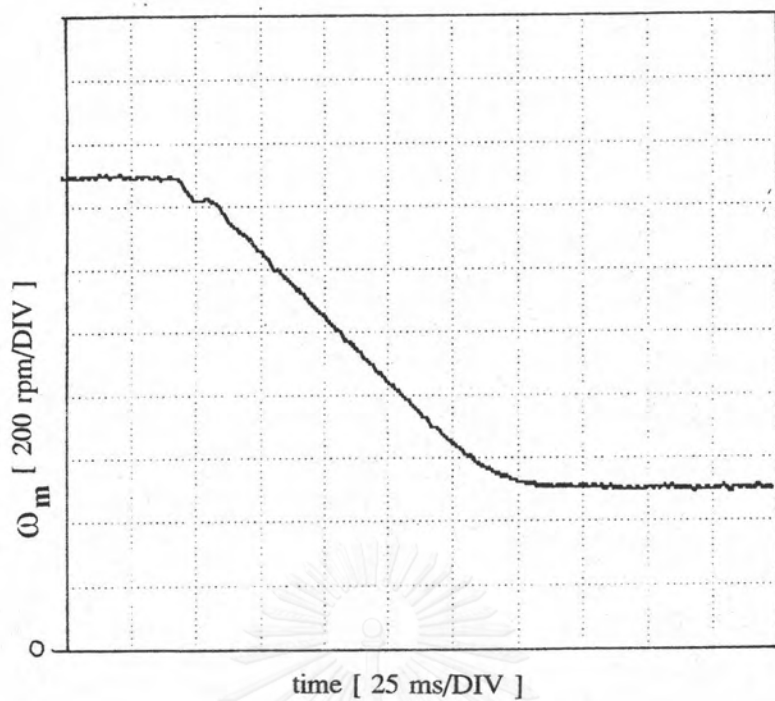


(ก) ความเร็วของมอเตอร์

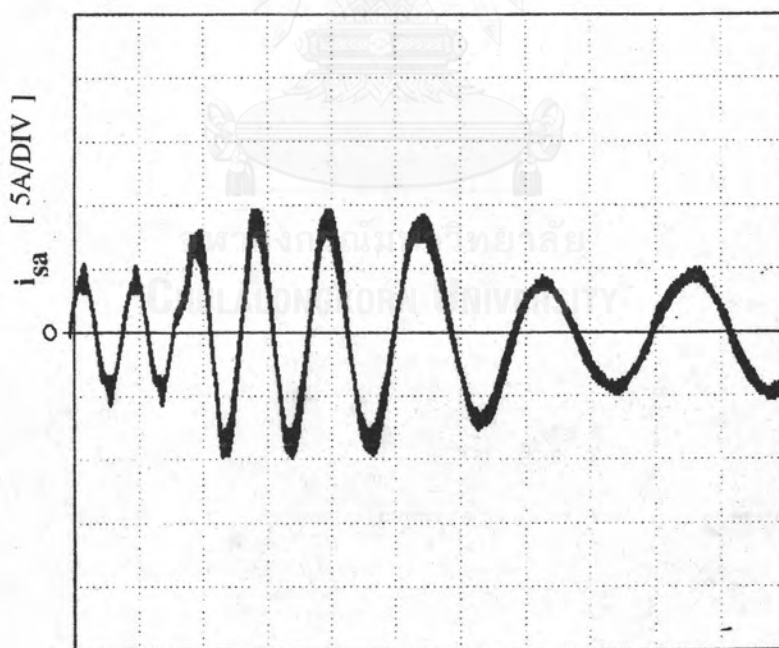


(ข) กระแสของมอเตอร์

รูปที่ 4.4 การทดสอบการเร่งความเร็วเมื่อมีการชดเชยแรงดันไฟตรง



(ก) ความเร็วของมอเตอร์



(ข) กระแสของมอเตอร์

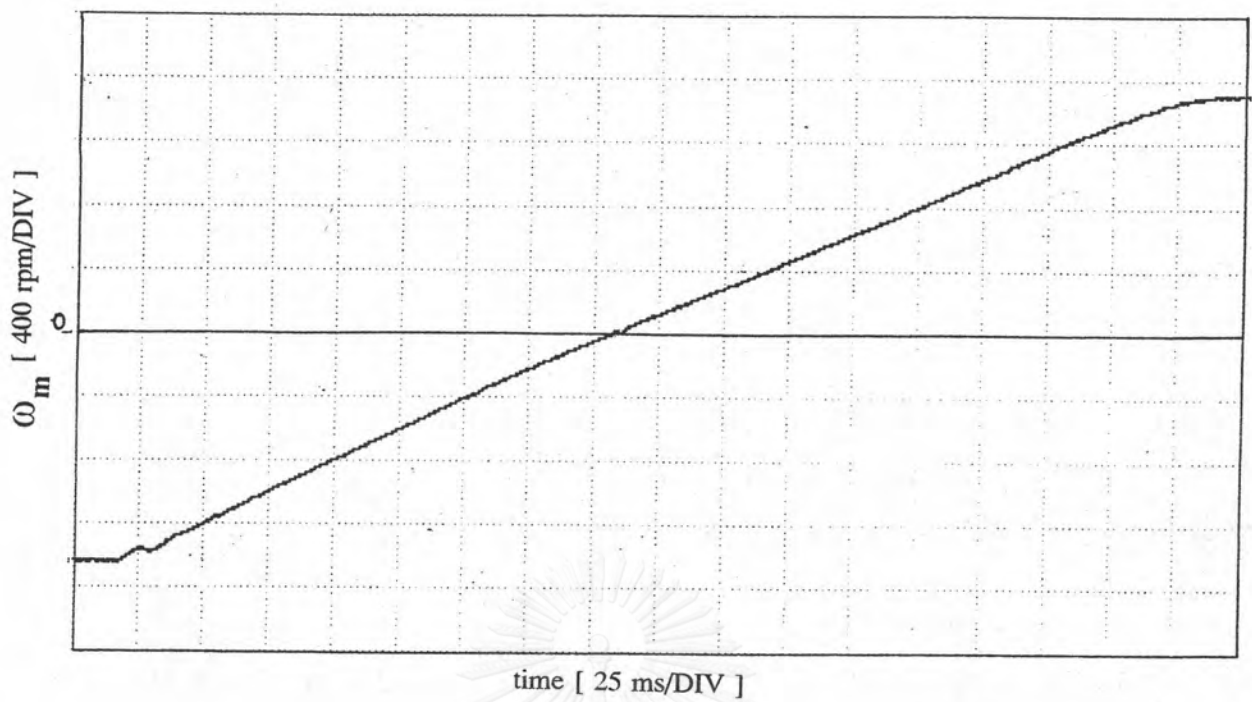
รูปที่ 4.5 การทดสอบการลดความเร็วเมื่อมีการชดเชยแรงดันไฟตรง

ผลการทดสอบการกลับทิศทางการหมุน

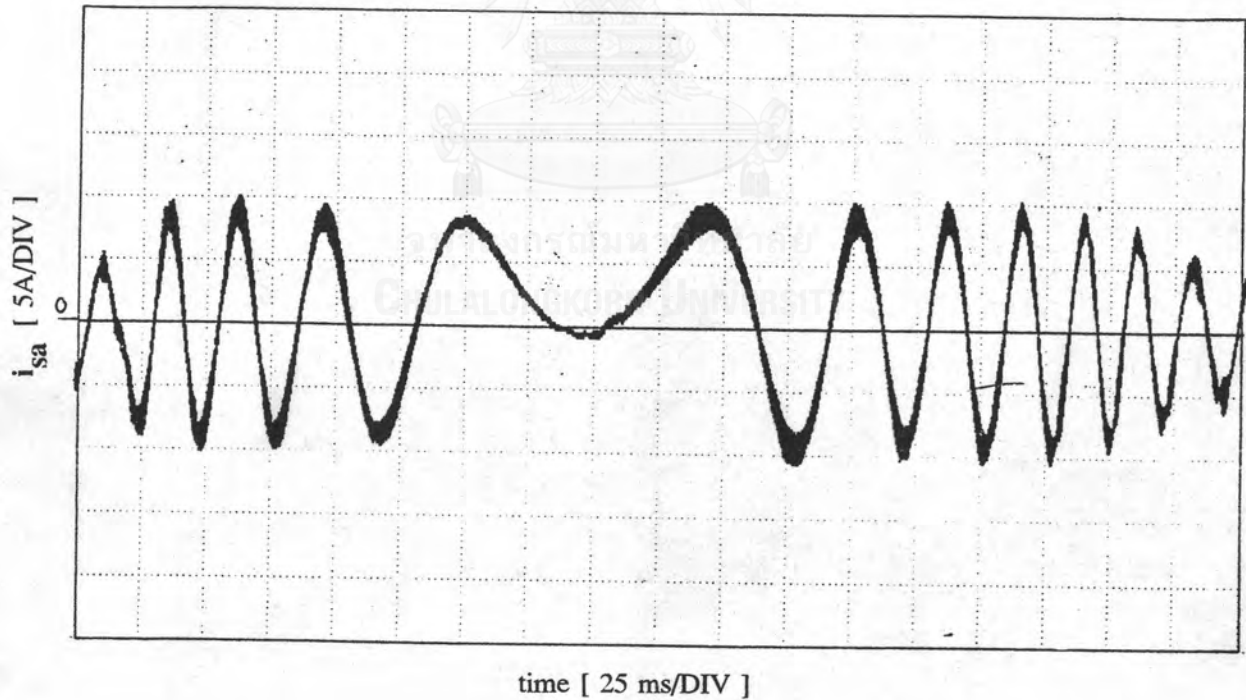
หลังจากได้ทำการปรับปรุงผลของการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟตรงแล้ว จากนั้นจึงทำการทดสอบการกลับทิศทางการหมุนจาก 1420=>-1420 rpm. โดยที่คำสั่งความเร็วจะเป็นแบบขั้นเช่นกัน ซึ่งผลการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 4.6 จากผลการทดสอบจะเห็นว่าได้การเปลี่ยนแปลงความเร็วจากทิศทางหนึ่งไปยังอีกทิศทางหนึ่งมีลักษณะค่อนข้างเป็นเชิงเส้น แต่มีข้อสังเกตว่าขณะที่มอเตอร์กำลังจะมีการกลับทิศทางการหมุน กระแสของมอเตอร์จะลดลงทั้ง ๆ ที่กระแสที่ควรจะได้ควรจะเป็นค่าสูงสุดที่กำหนดไว้ เนื่องจากความเร็วของมอเตอร์ยังต่างจากค่าคำสั่งอยู่มาก เราจึงได้ข้อสังเกตจากรูปผลการทดสอบว่าเมื่อความเร็วลดลง (ความถี่ต่ำลง) แรงดันที่ป้อนให้แก่มอเตอร์จะมีแนวโน้มลดลง และแรงดันที่ลดลงนี้น่าจะเป็นสาเหตุที่ทำให้กระแสมีค่าลดลงกว่าที่ควรจะเป็น ส่วนสาเหตุที่ทำให้แรงดันมีค่าลดลงนั้นสาเหตุประการหนึ่งน่าจะมาจากการประวิงเวลาระหว่างสวิตช์ตัวบนกับสวิตช์ตัวล่าง จึงได้ทำการชดเชยผลของการประวิงเวลานี้ดังจะได้กล่าวต่อไป

หลักการชดเชยผลของการประวิงเวลาระหว่างสวิตช์ตัวบนกับสวิตช์ตัวล่าง

โดยปกติสวิตช์ตัวบนและสวิตช์ตัวล่างของเฟสหนึ่งๆ จะทำงานปิดและเปิดสลับกันไป แต่เนื่องจากสวิตช์กำลังจะต้องใช้เวลาในการตัด-ต่อวงจร ดังนั้นเพื่อเป็นการป้องกันการลัดวงจรระหว่างสวิตช์ตัวบนกับสวิตช์ตัวล่างในกิ่งเดียวกันจะต้องมีการประวิงเวลา ก่อนที่จะมีการสลับกันตัด-ต่อวงจร ยกตัวอย่างเช่นในรูปที่ 3.1(ก) ถ้าต้องการให้สวิตช์ตัวที่ 1 หยุดนำกระแสและสวิตช์ตัวที่ 4 นำกระแสแทน สัญญาณในการส่งนำกระแสที่สวิตช์ตัวที่ 4 จะต้องมีการประวิงเวลาให้สวิตช์ตัวที่ 1 ที่กำลังนำกระแสอยู่และต้องการจะหยุดนำกระแสดับสนิทเสียก่อน จากนั้นจึงสั่งให้สวิตช์ตัวที่ 4 นำกระแสได้ ดังนั้นเราจะต้องเสียเวลาชั่วขณะหนึ่งซึ่งเวลาที่เสียไปนี้จะทำให้แรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ลดลง โดยที่ที่ความเร็วต่ำจะเห็นผลของการลดลงของแรงดันนี้ได้ชัดเจน เนื่องจากที่ความเร็วต่ำจะต้องใช้แรงดันต่ำจึงมีผลกระทบสูงกว่ามาก ดังจะเห็นได้จากผลการทดสอบในรูปที่ 4.7 ถึงรูปที่ 4.12 จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าที่ความถี่ต่ำกระแสที่ได้จะมีการผิดเพี้ยนไปไม่ได้รูปคลื่นไซน์ อีกทั้งขนาดที่ได้จะต่ำกว่าที่ควรจะเป็น ส่วนที่ความถี่สูงจะไม่ค่อยเห็นผลของการลดลงของแรงดันนี้ชัดเจนนัก ดังนั้นจึงต้องมีการชดเชยผลของการประวิงเวลานี้

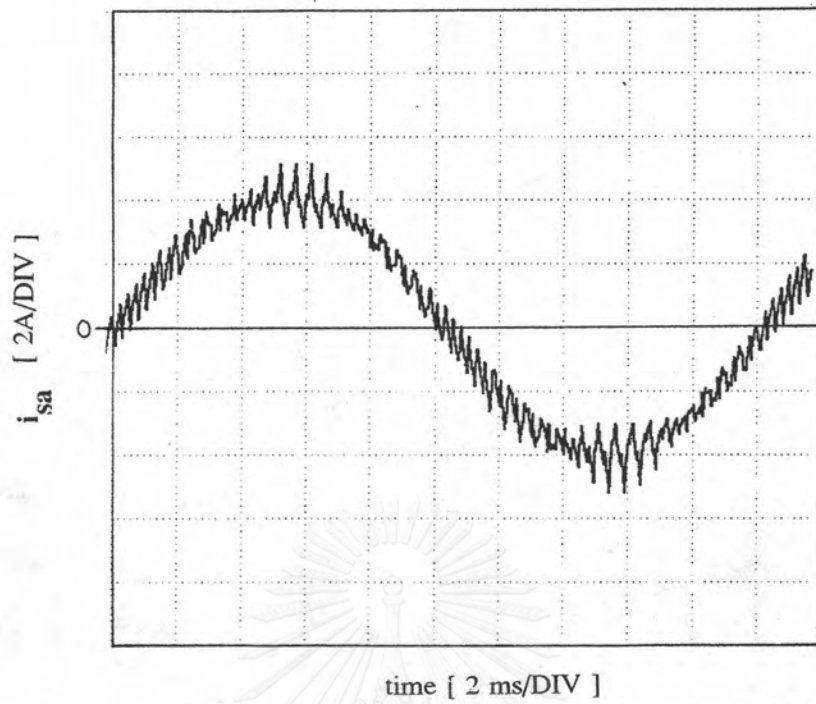


(ก) ความเร็วของมอเตอร์

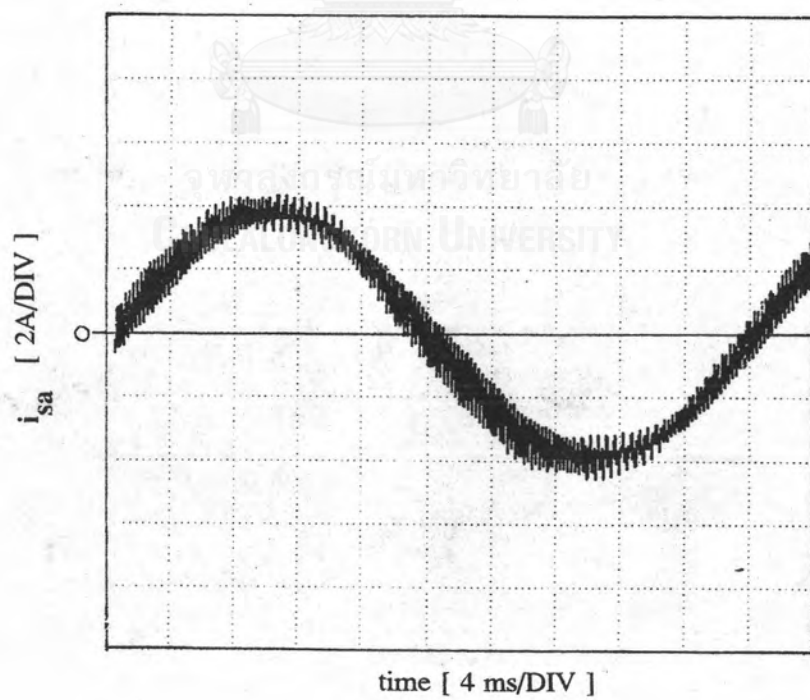


(ข) กระแสของมอเตอร์

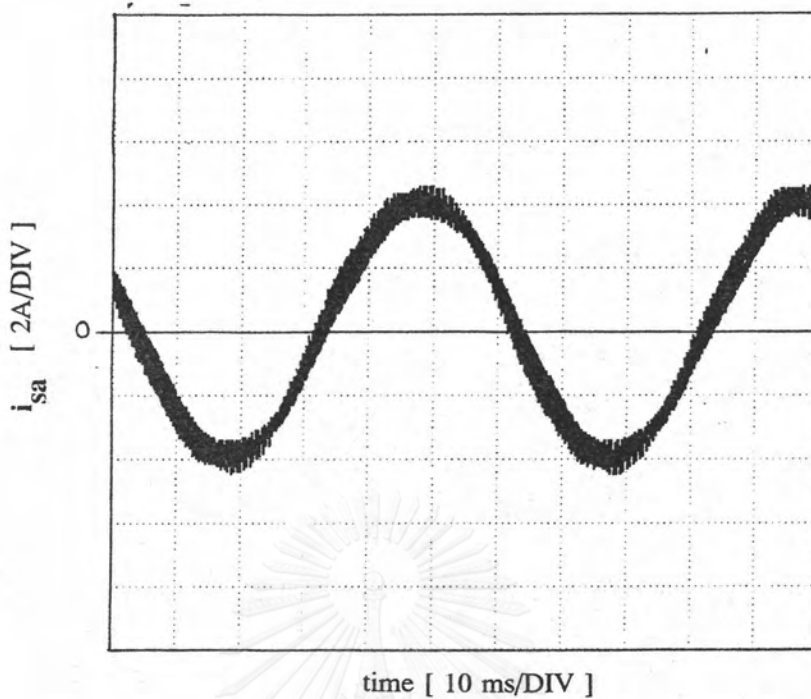
รูปที่ 4.6 การทดสอบการกลับทิศทางการหมุนจาก -1420 - 1420 rpm.



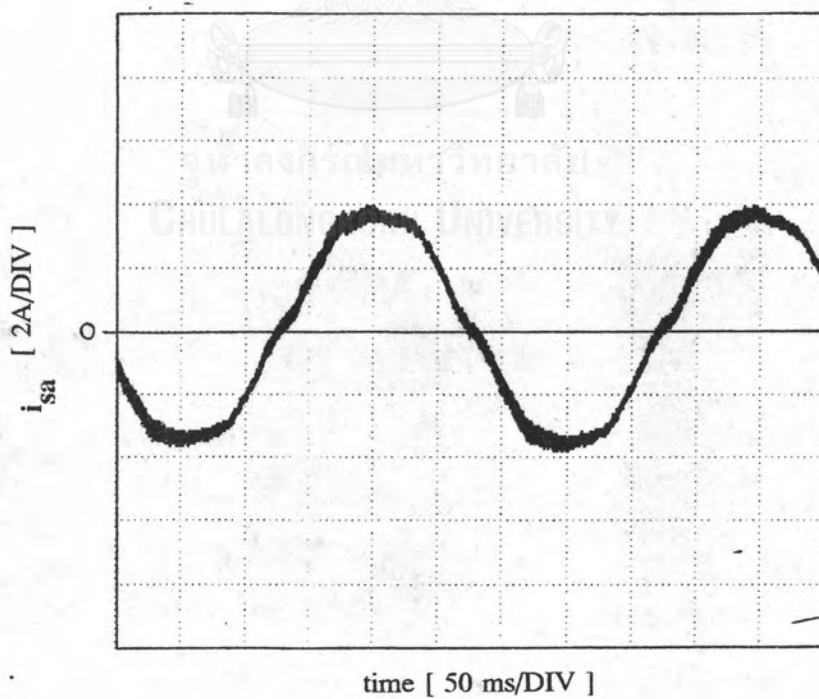
รูปที่ 4.7 กระแสของมอเตอร์ที่ไม่มีการชดเชยการประวิงเวลาที่ความถี่ 50 Hz



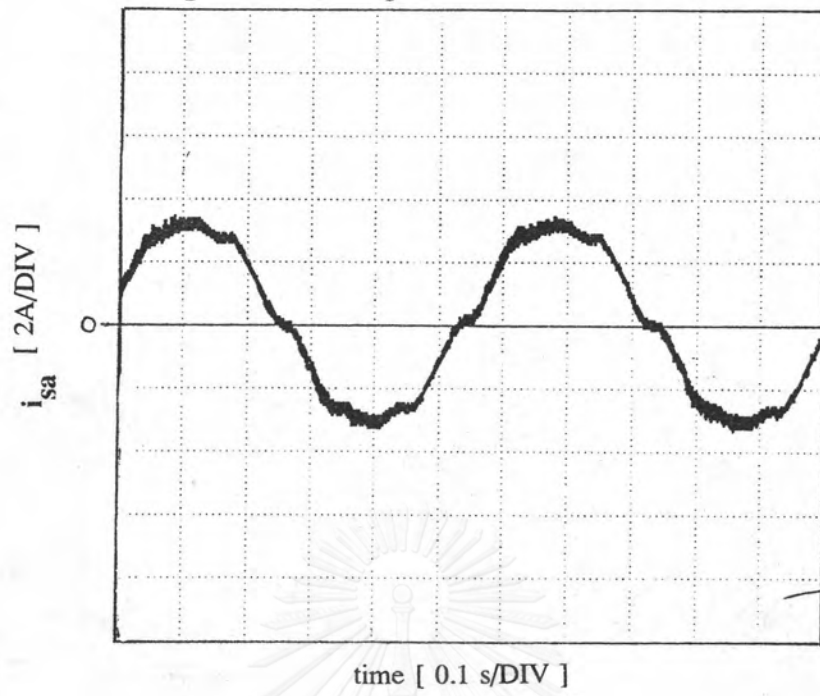
รูปที่ 4.8 กระแสของมอเตอร์ที่ไม่มีการชดเชยการประวิงเวลาที่ความถี่ 25 Hz



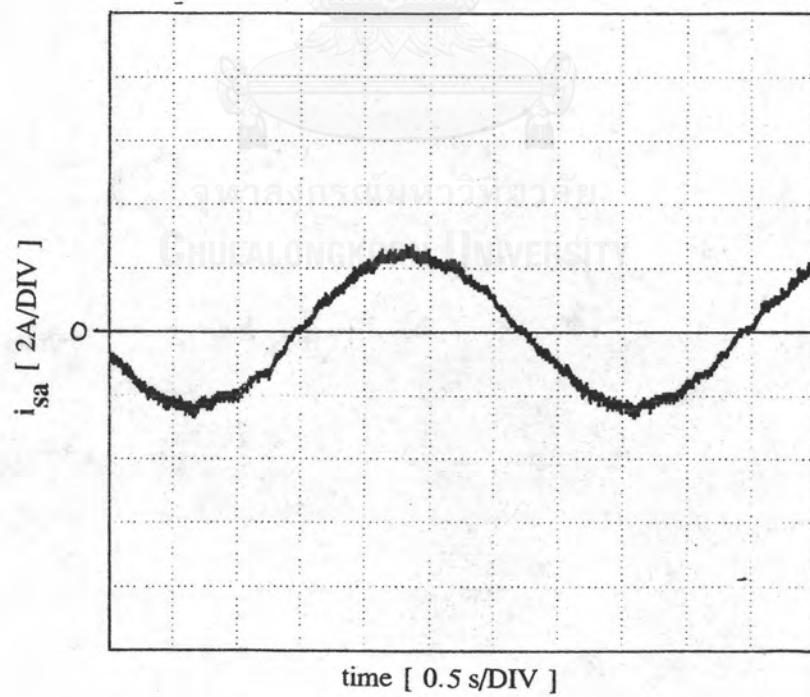
รูปที่ 4.9 กระแสของมอเตอร์ที่ไม่มีการชดเชยการประจุเวลาที่ความถี่ 16.7 Hz



รูปที่ 4.10 กระแสของมอเตอร์ที่ไม่มีการชดเชยการประจุเวลาที่ความถี่ 3.3 Hz



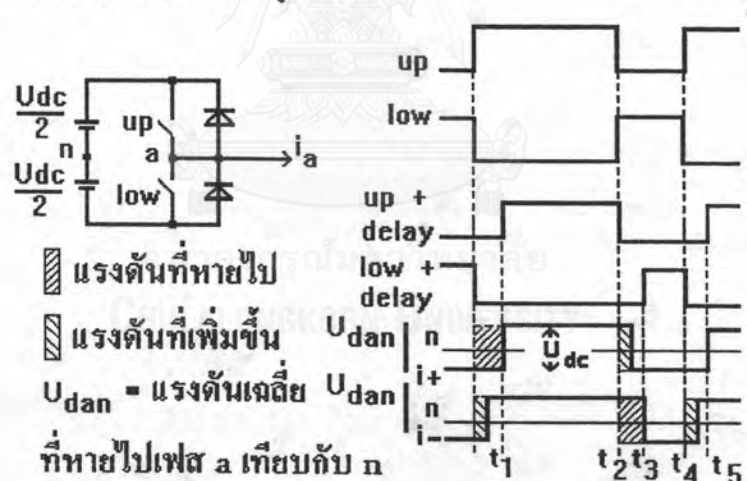
รูปที่ 4.11 กระแสของมอเตอร์ที่ไม่มีการชดเชยการประวิงเวลาที่ความถี่ 1.6 Hz



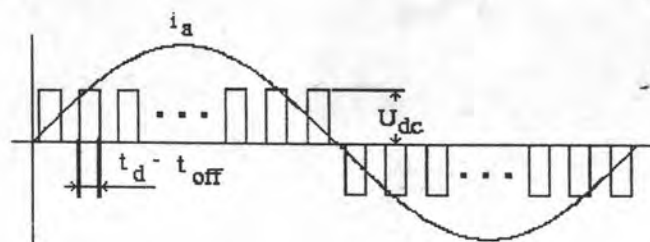
รูปที่ 4.12 กระแสของมอเตอร์ที่ไม่มีการชดเชยการประวิงเวลาที่ความถี่ 0.3 Hz

การวิเคราะห์ค่าแรงดันที่ลดลงเนื่องจากผลของการประวิงเวลา

จากรูปที่ 4.13 ที่เวลา t_1 สวิตช์ตัวบนนำกระแสอยู่ โดยที่สมมติให้กระแสไหลผ่าน สวิตช์ออกไปยังโหลดตามทิศทางที่กำหนดในรูป (i_+) แรงดันที่จุด a เทียบกับจุด n (V_a) จะเท่ากับ $+U_{dc}/2$ จนถึงเวลา t_2 ซึ่งเป็นเวลาที่ต้องการให้สวิตช์ตัวบนหยุดนำกระแส แต่เนื่องจากสวิตช์จะต้องใช้เวลาระยะหนึ่ง (t_{off}) จึงหยุดนำกระแสได้ ดังนั้นแรงดันที่ได้จึงมากกว่าที่ควรจะเป็นอยู่ จำนวนหนึ่ง หลังจากนั้นไดโอดตัวล่างจะเริ่มนำกระแสแทน แรงดัน V_a จะเท่ากับ $-U_{dc}/2$ จนถึงเวลา t_4 ซึ่งเป็นเวลาที่ต้องการให้สวิตช์ตัวบนนำกระแสต่อ แต่สัญญาณที่จะสั่งให้เริ่มนำกระแส ต้องมีการประวิงเวลาอีกระยะ (t_d) ซึ่งจะต้องมากกว่า t_{off} จนถึงเวลา t_5 ช่วงเวลานี้แรงดันที่ควรจะเป็นคือ $+U_{dc}/2$ แต่เรายังไม่สามารถสั่งนำกระแสได้ ไดโอดตัวล่างจึงยังนำกระแสอยู่ แรงดันก็ยังคงเป็น $-U_{dc}/2$ อยู่ ซึ่งช่วงเวลานี้จึงเป็นช่วงเวลาที่แรงดันลดลงไป ดังนั้นแรงดันที่เพิ่มขึ้นเนื่องจาก t_{off} จะน้อยกว่าแรงดันที่ลดลงเนื่องจากการประวิงเวลาทำให้แรงดันที่ได้ลดลง และถ้าสมมติให้กระแสไหลจากโหลดกลับเข้ามา (i_-) ก็จะอธิบายได้ในลักษณะที่คล้ายคลึงกัน แรงดันที่ลดลงเนื่องจากผลของการประวิงเวลานี้แสดงได้ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.13 ไดอะแกรมเวลาแสดงผลของการประวิงเวลา



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่หายไป

ในที่นี้เพื่อความง่ายเราจะแทนแรงดันที่หายไปในรูปแบบที่ 4.14 ด้วยแรงดันแบบสี่เหลี่ยม ที่มีขนาดเท่ากับ U_d ค่าเฉลี่ยของแรงดันพัลส์ดังแสดงในรูปแบบที่ 4.15 โดยที่ค่าแรงดันเฉลี่ยที่หายไปคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$U_d = \frac{U_{dc} \cdot (t_d - t_{off}) \cdot f_c / f}{T} = U_{dc} \cdot (t_d - t_{off}) \cdot f_c \quad (4.2)$$

U_d = แรงดันเฉลี่ยที่หายไป

U_{dc} = แรงดันไฟตรง

f = ความถี่มูลฐาน, $T=1/f$

f_c = ความถี่ในการสวิตช์

t_d = เวลาในการประวิง

t_{off} = เวลาที่สวิตช์ใช้ในการปิดวงจร

แรงดันที่หายไปนี้จะมีเฟสเหมือนกันกับกระแสของเฟสนั้นๆ และเราสามารถหาแรงดันเฟสของแรงดันที่หายไปได้ดังต่อไปนี้

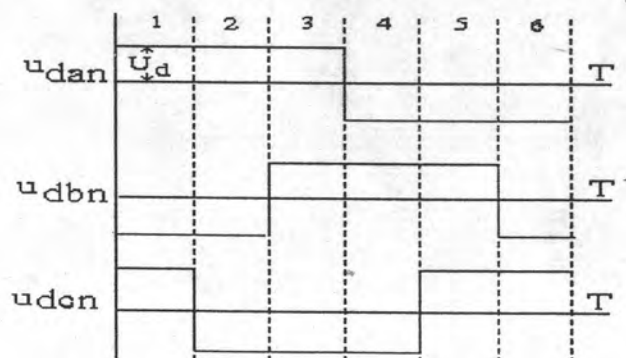
$$\begin{aligned} u_{da} &= u_{dan} - u_{don} \\ u_{db} &= u_{dbn} - u_{don} \\ u_{dc} &= u_{dcn} - u_{don} \\ u_{don} &= \frac{1}{3}(u_{dan} + u_{dbn} + u_{dcn}) \end{aligned} \quad (4.3)$$

โดยที่

u_{da} , u_{db} และ u_{dc} คือ แรงดันเฉลี่ยที่หายไปที่จุด a, b และ c เทียบกับจุดสะเทิน (o) ตามลำดับ

u_{dan} , u_{dbn} และ u_{dcn} คือ แรงดันเฉลี่ยที่หายไปที่จุด a, b และ c เทียบกับจุด n ตามลำดับ

u_{don} คือ แรงดันเฉลี่ยที่หายไปที่เทียบระหว่างจุด o และจุด n



รูปที่ 4.15 แสดงแรงดันเฟสที่หายไปเทียบกับจุด n ของคาปาซิเตอร์

จากสมการที่ (4.3) และรูปที่ 4.15 จะได้แรงดันเฟสของแรงดันที่หายไป ณ ช่วงเวลาต่างๆ ในรูปที่ 4.15 ได้ดังนี้คือ

$$\text{ช่วงที่ 1} \quad u_{da} = U_d - \frac{1}{3}(1-1+1) \cdot U_d = \frac{2}{3}U_d$$

$$\text{ช่วงที่ 2} \quad u_{da} = U_d - \frac{1}{3}(1-1-1) \cdot U_d = \frac{4}{3}U_d$$

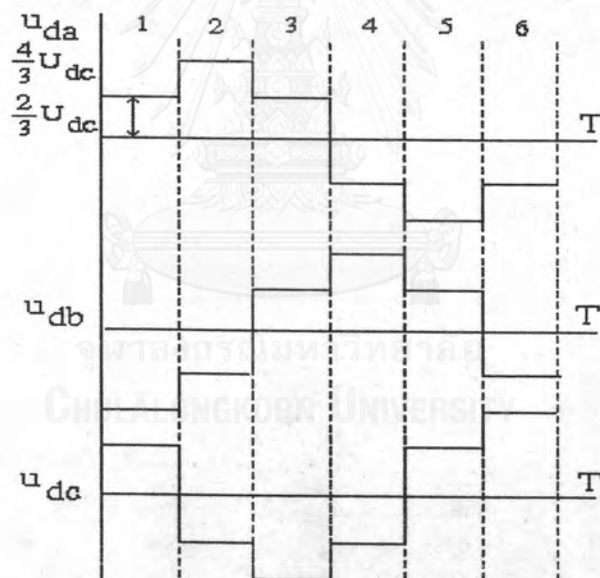
$$\text{ช่วงที่ 3} \quad u_{da} = U_d - \frac{1}{3}(1-1+1) \cdot U_d = \frac{2}{3}U_d$$

$$\text{ช่วงที่ 4} \quad u_{da} = -U_d - \frac{1}{3}(-1+1-1) \cdot U_d = -\frac{2}{3}U_d$$

$$\text{ช่วงที่ 5} \quad u_{da} = -U_d - \frac{1}{3}(-1+1+1) \cdot U_d = -\frac{4}{3}U_d$$

$$\text{ช่วงที่ 6} \quad u_{da} = -U_d - \frac{1}{3}(-1-1+1) \cdot U_d = -\frac{2}{3}U_d$$

ในทำนองเดียวกันแรงดันที่หายไปของเฟส b และ c จะคำนวณได้ในลักษณะเดียวกันกับแรงดันที่หายไปเฟส a ซึ่งจะแสดงแรงดันเฟสทั้ง 3 ของแรงดันที่หายไปดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 แรงดันเฟสของแรงดันที่หายไป

วิธีการชดเชยแรงดันเนื่องจากการประวิงเวลาสวิตช์

เนื่องจากว่าอินเวอร์เตอร์ที่ใช้อาศัยหลักการเวกเตอร์แรงดันในระบบ 2 เฟส ดังนั้นจากรูปที่ 4.16 เราจึงทำการแปลงแรงดันที่หายไปจากระบบ 3 เฟส เป็นระบบ 2 เฟส ได้โดยใช้สมการเช่นเดียวกับสมการที่ (3.3) ดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} u_{dd} \\ u_{dq} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{da} \\ u_{db} \\ u_{dc} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

เพราะฉะนั้นแรงดันที่หายไปในแกน d-q ที่จะต้องบวกเพิ่มเข้าไปในอินเวอร์เตอร์จะมีค่าในช่วงเวลา 1-6 ดังต่อไปนี้

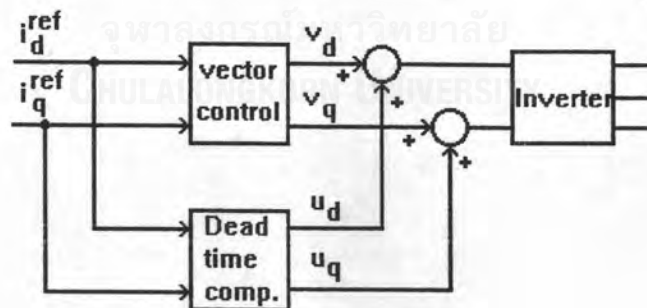
ช่วงเวลาที่ 1	$u_{dd} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{2}{3} + \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{3} - \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{3} \right) \cdot U_d$ $u_{dq} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{4}{3} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{2}{3} \right) \cdot U_d$
ช่วงเวลาที่ 2	$u_{dd} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{4}{3} + \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{3} + \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{3} \right) \cdot U_d$ $u_{dq} = 0$
ช่วงเวลาที่ 3	$u_{dd} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{2}{3} - \frac{1}{2} \cdot \frac{3}{3} + \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{3} \right) \cdot U_d$ $u_{dq} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{2}{3} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{4}{3} \right) \cdot U_d$
ช่วงเวลาที่ 4	$u_{dd} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \left(-\frac{2}{3} - \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{3} + \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{3} \right) \cdot U_d$ $u_{dq} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{4}{3} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{2}{3} \right) \cdot U_d$
ช่วงเวลาที่ 5	$u_{dd} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \left(-\frac{4}{3} - \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{3} - \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{3} \right) \cdot U_d$ $u_{dq} = 0$
ช่วงเวลาที่ 6	$u_{dd} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \left(-\frac{2}{3} + \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{3} - \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{3} \right) \cdot U_d$ $u_{dq} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{2}{3} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{4}{3} \right) \cdot U_d$

ดังนั้นการที่เราจะชดเชยแรงดันนี้ได้เราจะต้องรู้มุมของเวกเตอร์กระแสเดเตอร์ที่เทียบกับแกนอ้างอิงสเตเตอร์เพื่อที่จะได้ทราบว่าเวกเตอร์ของกระแสอยู่ที่ใด และจะต้องชดเชยแรงดันเท่าไร เนื่องจากว่าในวิทยานิพนธ์นี้ไม่มีการป้อนกลับของกระแสเพื่อการควบคุม ดังนั้นจึงได้ทำการคำนวณค่ากระแสเดเตอร์ แทนการใช้กระแสที่เกิดขึ้นจริงซึ่งมีเสนอในงานวิจัยที่มีอยู่ (T. Sukegawa, 1991) การคำนวณค่ากระแสที่ควรจะได้นั้นทำได้โดยการหาขนาดและมุมของกระแสบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ จากที่ได้เคยกล่าวมาแล้วว่าการจะหามุมโดยซอฟต์แวร์นั้นมีความยุ่งยากและเกิดความผิดพลาด แต่เนื่องจากการควบคุมแบบเวกเตอร์ที่เสนอนี้จะควบคุมให้

ฟลักซ์คงที่ ($i_{s\alpha}$ =คงที่) ดังนั้นขนาดและมุมของกระแสเดเตอร์จึงขึ้นอยู่กับกระแสที่ทำให้เกิดแรงบิด $i_{s\beta}$ เพียงอย่างเดียว จึงเป็นการง่ายที่จะหาขนาดและค่ามุม โดยการหาค่าจากตารางตามค่ากระแส $i_{s\beta}$ ที่ต้องการและเนื่องจากค่ามุมของกระแสที่ได้นี้เป็นมุมที่วัดเทียบกับแกนโรเตอร์ฟลักซ์ และมุมของแกนโรเตอร์ฟลักซ์ที่เทียบกับแกนสเตเตอร์เราต้องการหาเพื่อใช้สำหรับการแปลงแกนอยู่แล้ว เราจึงนำมุมทั้งสองนี้มาบวกกันเป็นมุมที่เวกเตอร์ของกระแสเทียบกับแกนสเตเตอร์และนำไปหาค่าแรงดันขดขेषจากตารางที่ 4.1 และบล็อกไดอะแกรมของการชดเชยแสดงได้ดังรูปที่ 4.17

มุมของ เวกเตอร์ กระแส (องศา)	แรงดันที่ต้องชดเชย	
	u_{dd}	u_{dq}
0-60	0.816Ud	-1.414 Ud
60-120	1.632 Ud	0
120-180	0.816 Ud	1.414 Ud
180-240	-0.816 Ud	1.414 Ud
240-300	-1.632 Ud	0
300-360	-0.816 Ud	-1.414 Ud

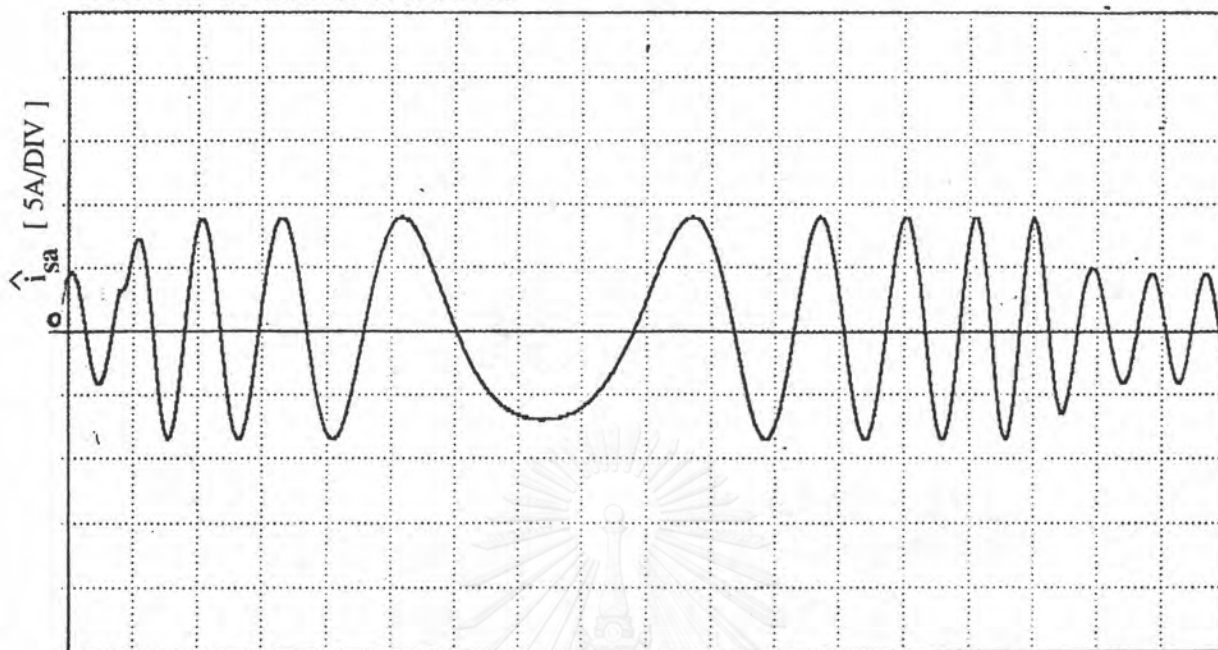
ตารางที่ 4.1 แรงดันในแกน d-q ที่ต้องชดเชยตามมุมของเวกเตอร์กระแสเดเตอร์



รูปที่ 4.17 บล็อกไดอะแกรมของการชดเชยการประวิงเวลา

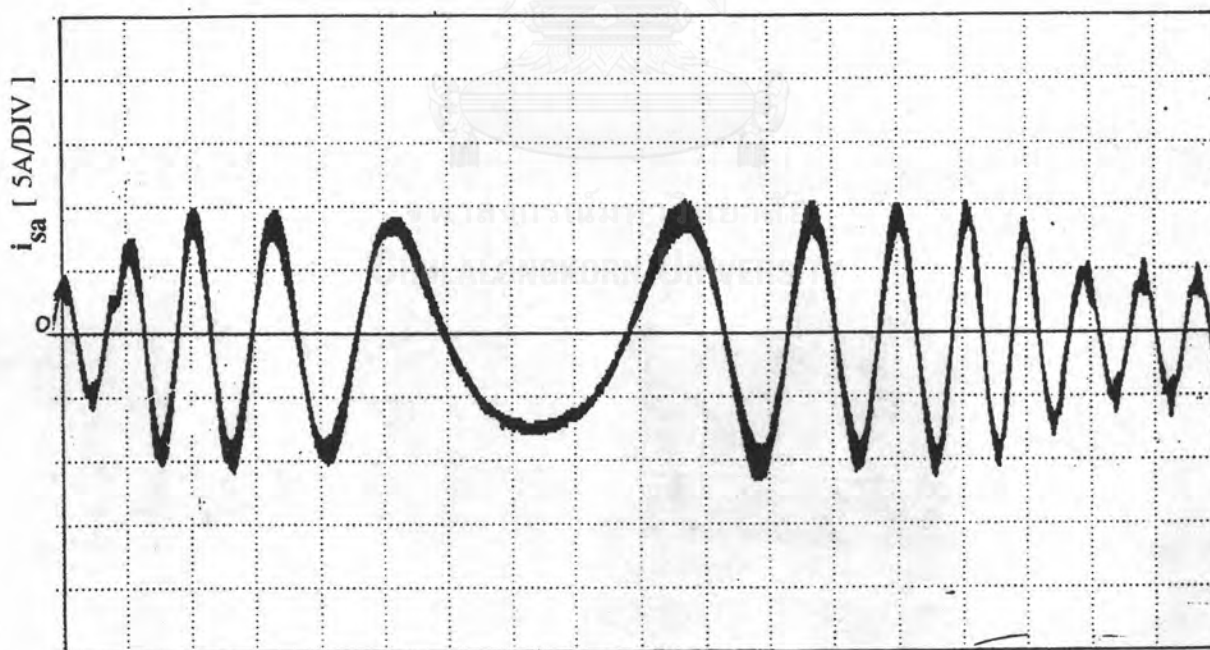
จากขนาดและมุมของกระแสเดเตอร์ที่คำนวณได้เรานำมาผ่านวงจรแปลงจากดิจิตอลมาเป็นแอนะล็อก (D/A converter) เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับกระแสที่วัดได้ ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.18 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระแสที่ได้จากทั้งการวัดและจากการคำนวณ มีขนาดและรูปร่างที่ใกล้เคียงกันมากสามารถใช้แทนกันได้ และจากผลการทดสอบนี้ยังแสดงให้เห็นอีกว่าถ้าเราทำ

การแยกการควบคุมให้มีอิสระต่อกันได้จริง กระแสที่ได้จากทั้งสองวิธีจะต้องมีขนาดและรูปร่างที่เหมือนกัน ซึ่งผลก็เป็นไปตามนั้นจริง



time [25 ms/DIV]

(ก) กระแสที่คำนวณได้

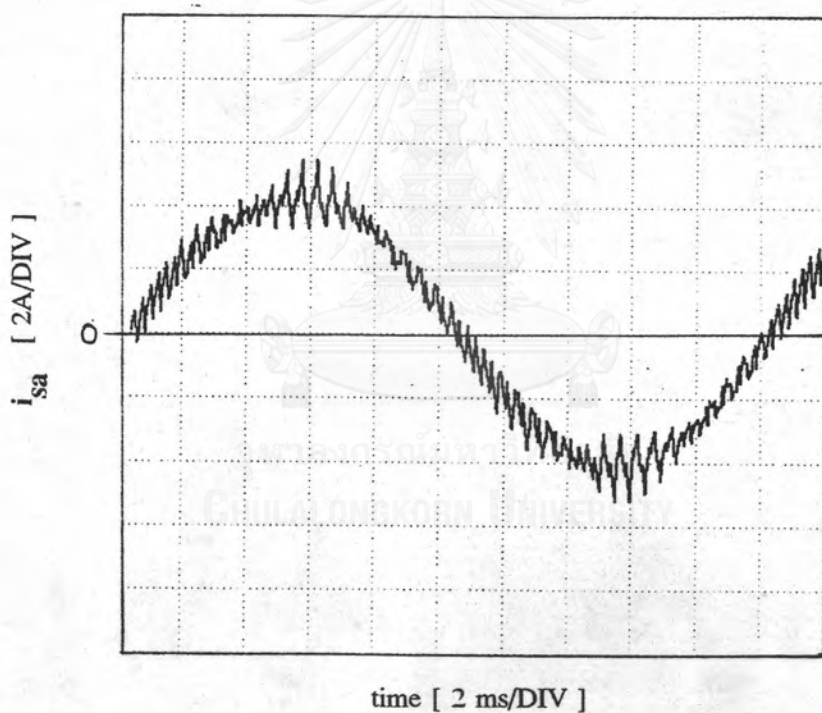


time [25 ms/DIV]

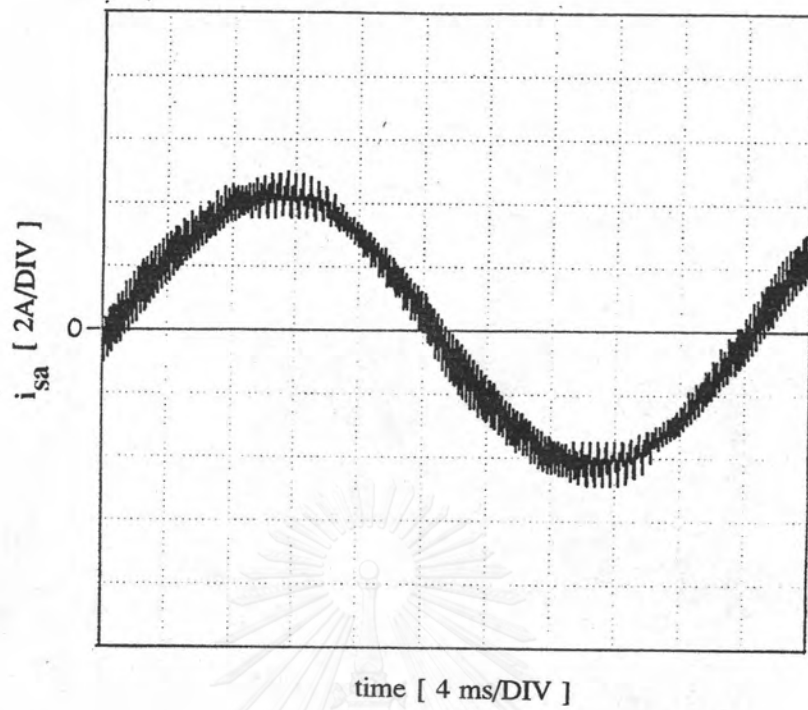
(ข) กระแสที่เกิดขึ้นจริง

รูปที่ 4.18 รูปคลื่นกระแสในกรณีกลับทิศการหมุน หลังการชดเชยผลการประวิงเวลา

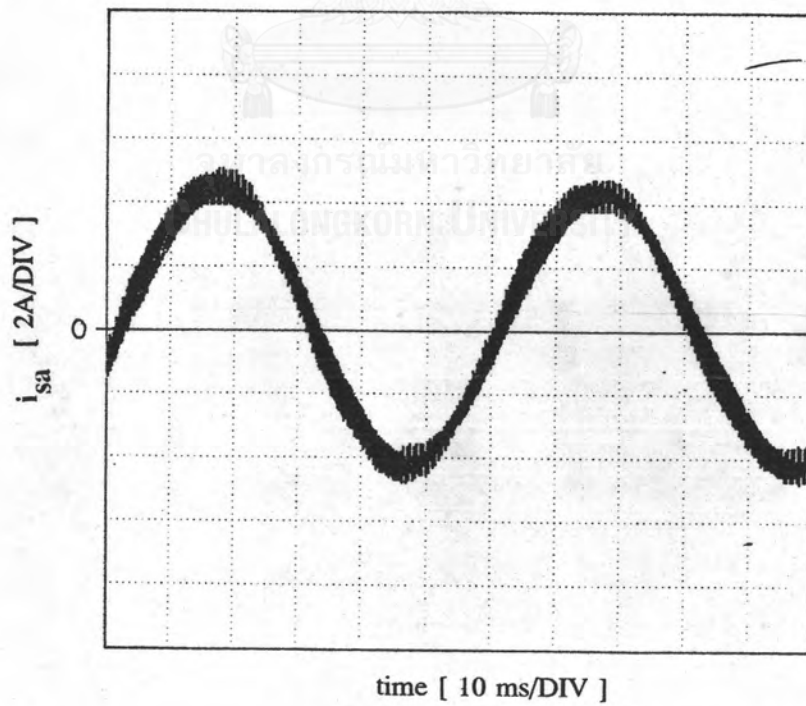
ผลการทดสอบหลังจากมีการชดเชยผลของการประวิงเวลาแสดงดังรูปที่ 4.19-4.24 จากผลการทดสอบที่ได้แสดงให้เห็นถึงลักษณะของกระแสที่มีรูปคลื่นไซน์แม้ว่าที่ความถี่ต่ำ และมีขนาดค่ายอดประมาณ 4.2-4.4 A แต่ที่ความถี่ 0.3 Hz จะสังเกตได้ว่าขนาดค่ายอดจะประมาณ 4 A ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่าที่ควรจะเป็นเล็กน้อย เนื่องจากว่าพัลส์ที่มีขนาดความกว้างน้อยมากแม้ว่าจะมีการชดเชยแรงดันแล้วขนาดก็ยังคงเล็กกว่าเวลาในการประวิง ดังนั้นพัลส์จึงหายไปเนื่องจากวงจรประวิงเวลา ทำให้แรงดันที่ได้มีน้อยกว่าที่ควรจะเป็น



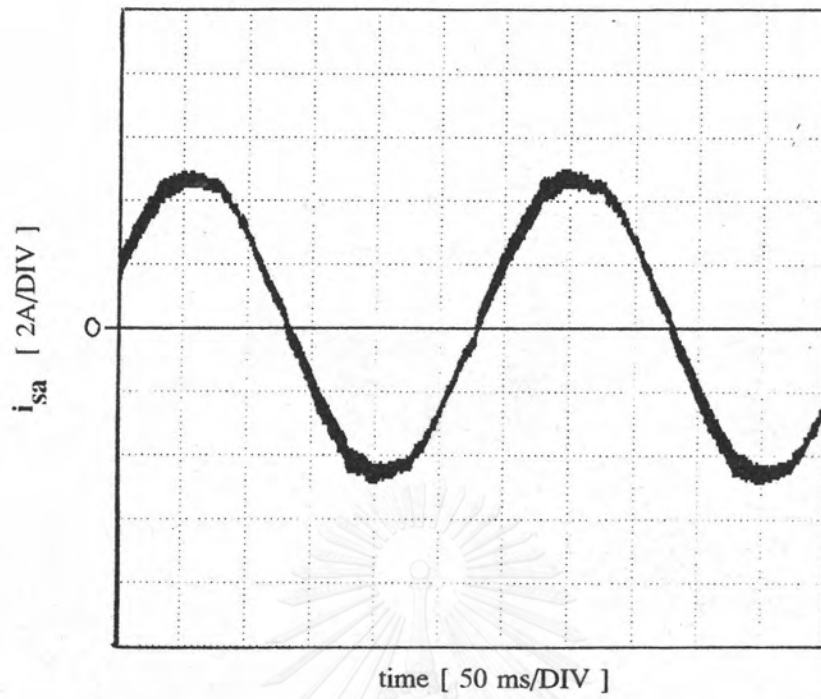
รูปที่ 4.19 กระแสของมอเตอร์ที่มีการชดเชยการประวิงเวลาที่ความถี่ 50 Hz



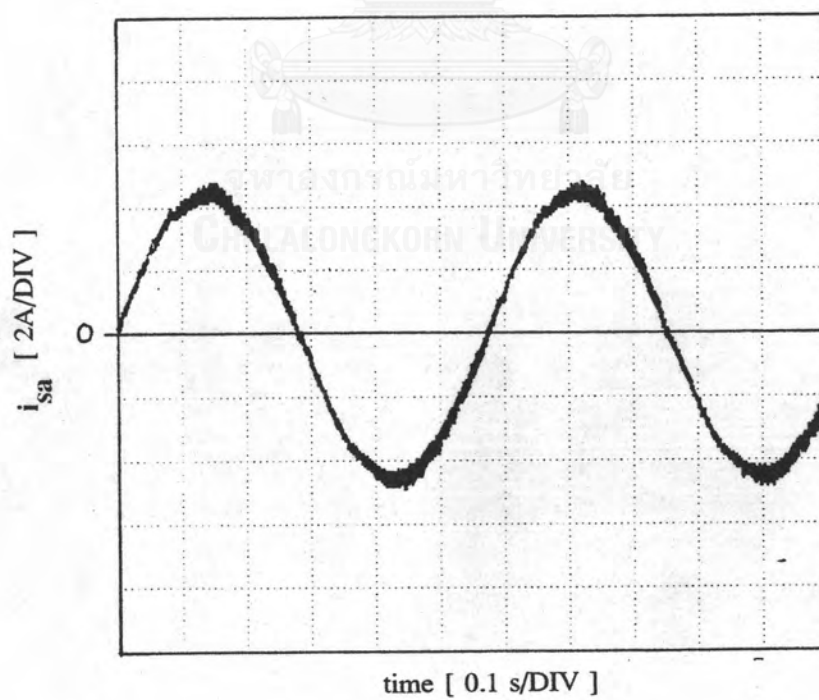
รูปที่ 4.20 กระแสของมอเตอร์ที่มีการชดเชยการประวิงเวลาที่ความถี่ 25 Hz



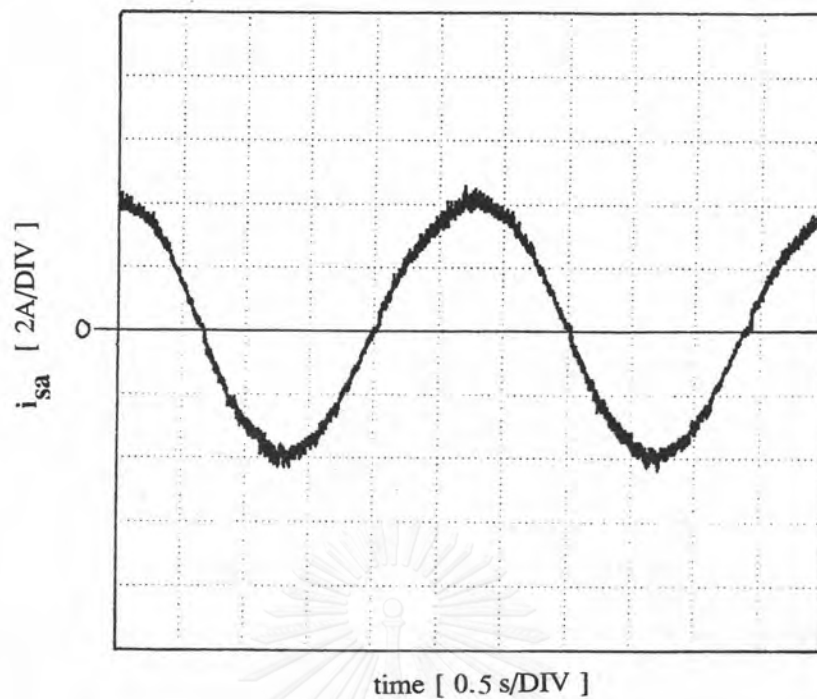
รูปที่ 4.21 กระแสของมอเตอร์ที่มีการชดเชยการประวิงเวลาที่ความถี่ 16.7 Hz



รูปที่ 4.22 กระแสของมอเตอร์ที่มีการชดเชยการประวิงเวลาที่ความถี่ 3.3 Hz



รูปที่ 4.23 กระแสของมอเตอร์ที่มีการชดเชยการประวิงเวลาที่ความถี่ 1.6 Hz



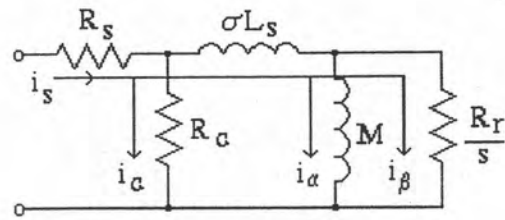
รูปที่ 4.24 กระแสของมอเตอร์ที่มีการชดเชยการประวิงเวลาที่ความถี่ 0.3 Hz

ผลของกระแสที่เกิดจากการสูญเสียในแกนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

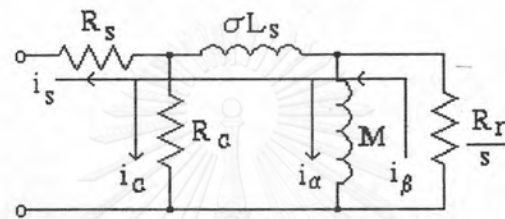
จากการชดเชยผลของการประวิงเวลาข้างต้น เมื่อทำการทดสอบการกลับทิศทางการหมุนผลการทดสอบที่ได้มายังไม่สมบูรณ์นัก (รูปที่ 4.17) กล่าวคือขนาดของกระแสขณะที่มอเตอร์ถูกสั่งให้ลดความเร็วเพื่อจะกลับทิศ กับขนาดของกระแสที่กลับทิศแล้วกำลังเร่งไปสู่ความเร็วที่สั่งไว้ควรจะมีค่าเท่ากัน แต่จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าขนาดของกระแสขณะลดความเร็วจะต่ำกว่าขณะเร่งความเร็ว จึงสันนิษฐานว่าอาจเกิดจากผลของการสูญเสียที่แกนเหล็กของมอเตอร์ เนื่องจากขณะเร่งความเร็วจะต้องจ่ายกระแสที่ทำให้เกิดแรงบิดเพิ่มเข้าไป แต่จะต้องมีกระแสส่วนหนึ่งที่สูญเสียนี้เพิ่มเข้าไปทำให้กระแสสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.25(ก) และขณะลดความเร็วจะต้องมีการดึงกระแสออกจากมอเตอร์เพื่อใช้ในการเบรก ซึ่งกระแสส่วนหนึ่งจะสูญเสียไปในส่วนนี้จึงทำให้กระแสย้อนกลับที่วัดได้มีขนาดต่ำลงดังแสดงในรูปที่ 4.25(ข)

เพื่อเป็นการพิสูจน์ข้อสันนิษฐานนี้จึงได้ทำการจำลองการทำงานของระบบควบคุมแบบเวกเตอร์ที่คำนึงผลของการสูญเสียที่แกนเหล็กของมอเตอร์ดังต่อไปนี้

โดยสมมติฐานที่ว่า การสูญเสียเกิดจากกระแสไหลวนเป็นส่วนใหญ่ (T. Mizuno, 1990) ดังแสดงในรูปที่ 4.26 สมการอนุพันธ์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์แสดงได้ดังสมการที่ (4.5)

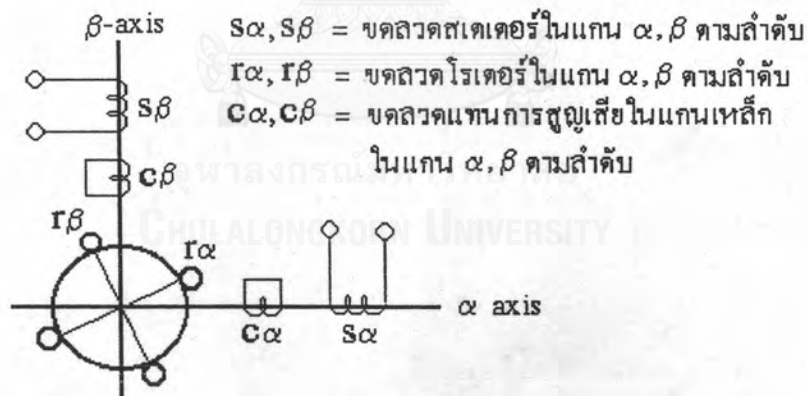


(ก) ขณะเร่งความเร็ว



(ข) ขณะลดความเร็ว

รูปที่ 4.25 วงจรสมมูลของมอเตอร์ที่มีการสูญเสียในแกน



รูปที่ 4.26 แบบจำลองขดลวดของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการสูญเสียในแกน

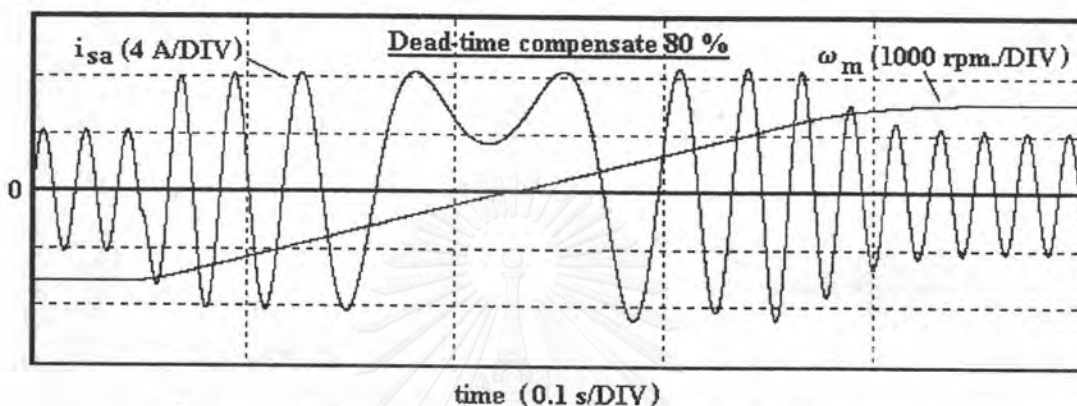
$$\begin{bmatrix} v_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_s + L_s p)I & (M p)I & (M p)I \\ (M(p - J\omega_m))I & (R_r + L_r p)I - J\omega_m L_r & (M(p - J\omega_m))I \\ (M p)I & (M p)I & (R_c + L_c p)I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

โดยที่ $p = \frac{d}{dt}$ $I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ $J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ $\underline{i}_c = \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix}$

R_c = ค่าความต้านทานของวงจรมูลของกระแสไหลวน

L_c = ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรมูลของกระแสไหลวน

จากนั้นจึงทำการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB with SIMULINK โดยคิดว่าอินเวอร์เตอร์ชดเชยผลของการประวิงเวลาได้เพียง 80 % จะได้ผลการจำลองดังรูปที่ 4.27 ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระแสขณะลดความเร็วจะมีขนาดต่ำกว่ากระแสขณะเร่งความเร็ว เป็นไปในลักษณะเดียวกับผลที่ได้จากการทดสอบ



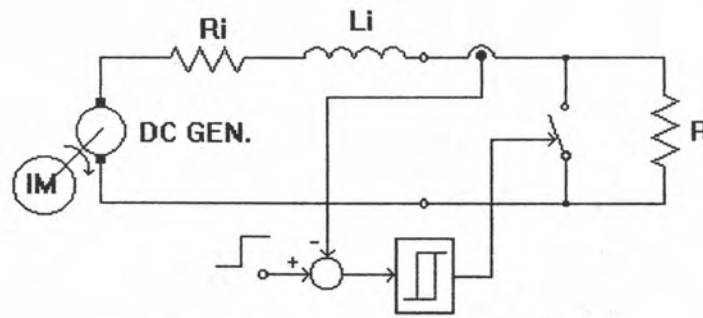
รูปที่ 4.27 ผลการจำลองที่มอเตอร์คำนึงถึงผลของการสูญเสียของแกนเหล็ก

เราพอจะสรุปได้ว่า ในการควบคุมแบบเวกเตอร์โดยการควบคุมแรงดันขาเข้านั้น จะมีผลของการสูญเสียของแกนเหล็ก แต่การสูญเสียนี้จะไม่มีการควบคุมแรงบิดมากนัก เนื่องจากเราควบคุมแรงดันไม่ใช่กระแสเหมือนระบบเวกเตอร์แบบต่างๆ ไป (T. Mizuno, 1990) ในที่นี้เราจึงไม่ได้ทำการแก้ไขหรือเพิ่มเติมระบบควบคุมเวกเตอร์ด้วยเหตุผลดังกล่าวมาข้างต้น

ผลการตอบสนองต่อโหลด

จากนั้นจึงทำการทดสอบผลการตอบสนองต่อโหลดแบบขั้น โดยโหลดจะใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงที่เชื่อมต่อกับมอเตอร์กระแสสลับ แล้วทำการสั่งโหลดแบบขั้นโดยใช้วงจรสับแรงดันไฟตรง (DC Chopper) ดังแสดงในรูปที่ 4.28

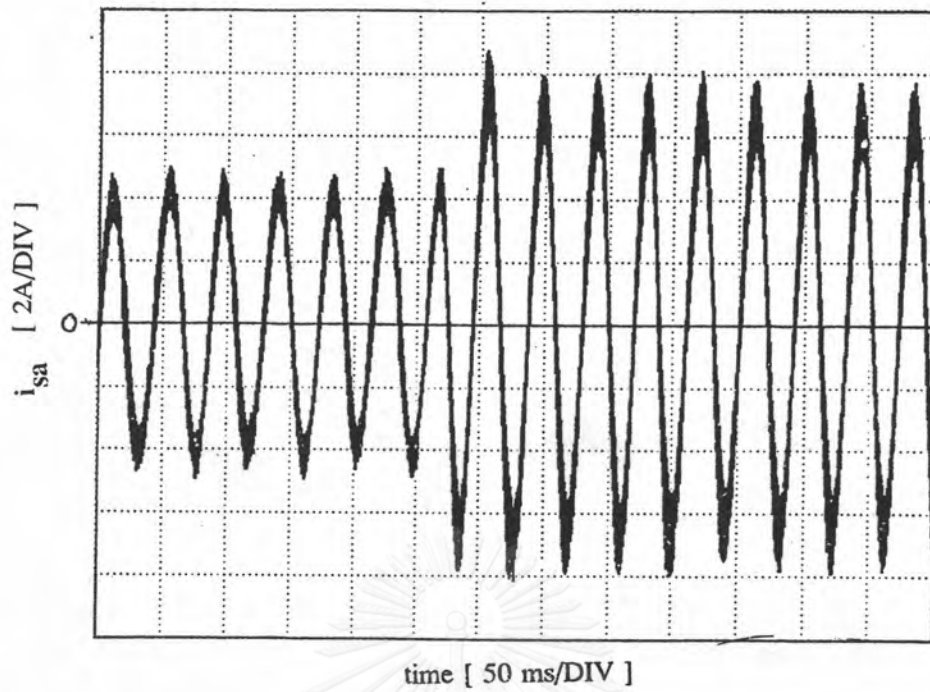
ผลการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 4.29-4.30 จากผลการทดสอบที่ได้แสดงให้เห็นถึงเวลาในการกลับสู่สภาวะความเร็วเดิมประมาณ 0.15 วินาที ซึ่งใกล้เคียงกับผลการจำลองระบบด้วยซอฟต์แวร์ดังแสดงในรูปที่ 2.20 และ 2.21 ซึ่งเป็นสิ่งที่แสดงให้เห็นว่าการตอบสนองของความเร็วต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดเป็นไปอย่างรวดเร็วและความเร็วจะไม่เปลี่ยนแปลงจากค่าที่กำหนดไว้



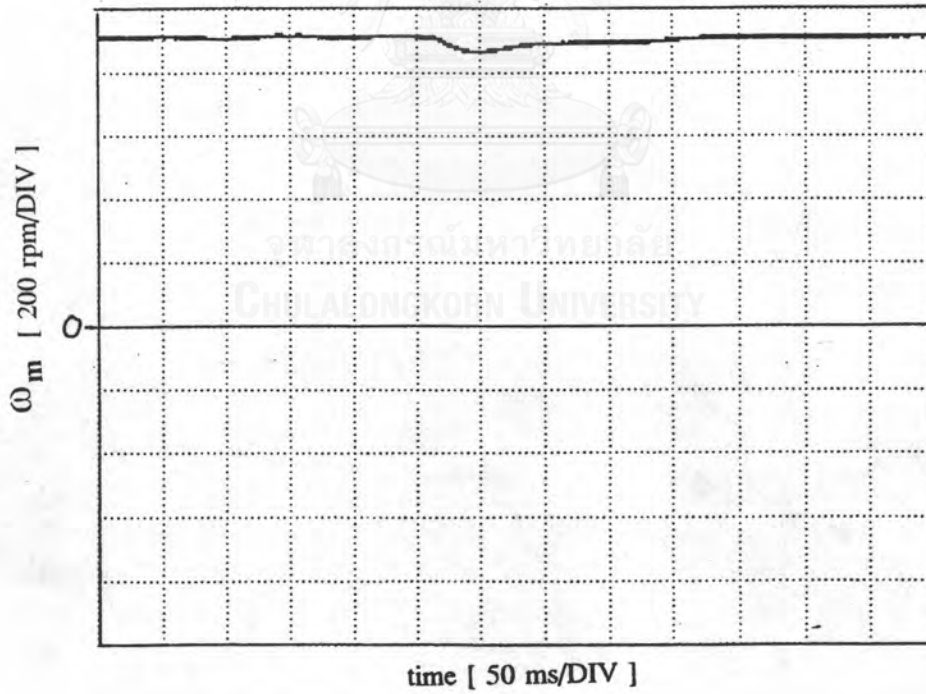
รูปที่ 4.28 แสดงระบบการไหลดแบบขั้น

ผลการตอบสนองต่อคำสั่งความเร็วในช่วงแคบ

ผลการทดสอบนี้จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะสมบัติของระบบควบคุมความเร็วแบบ PI เปรียบเทียบกับการจำลองการทำงานของระบบด้วยซอฟต์แวร์ การทดสอบจะทำการสั่งความเร็วแบบขั้นในช่วงแคบๆ จาก 1000 rpm. เพิ่มเป็น 1100 rpm. และจาก 1100 rpm. ลดเป็น 1000 rpm. เพื่อไม่ให้ตัวควบคุมแบบ PI เกิดการอิมิตัวจนกระทั่งติดค่าจำกัดของกระแส ซึ่งจะทำให้การหาลักษณะสมบัติของระบบควบคุมผิดไป ผลการทดสอบที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.31-4.32 ผลการทดสอบที่ได้แสดงถึงเวลาในการขึ้นของความเร็วจนถึง 90 % ของความเร็วคำสั่งมีค่าประมาณ 0.025 และเวลาที่เข้าสู่ความเร็วคำสั่งมีค่าประมาณ 0.15 วินาที จากผลที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับที่ได้ออกแบบและทำการจำลองการทำงานไว้จะได้ลักษณะที่ใกล้เคียงกันทั้งขนาดและเวลา

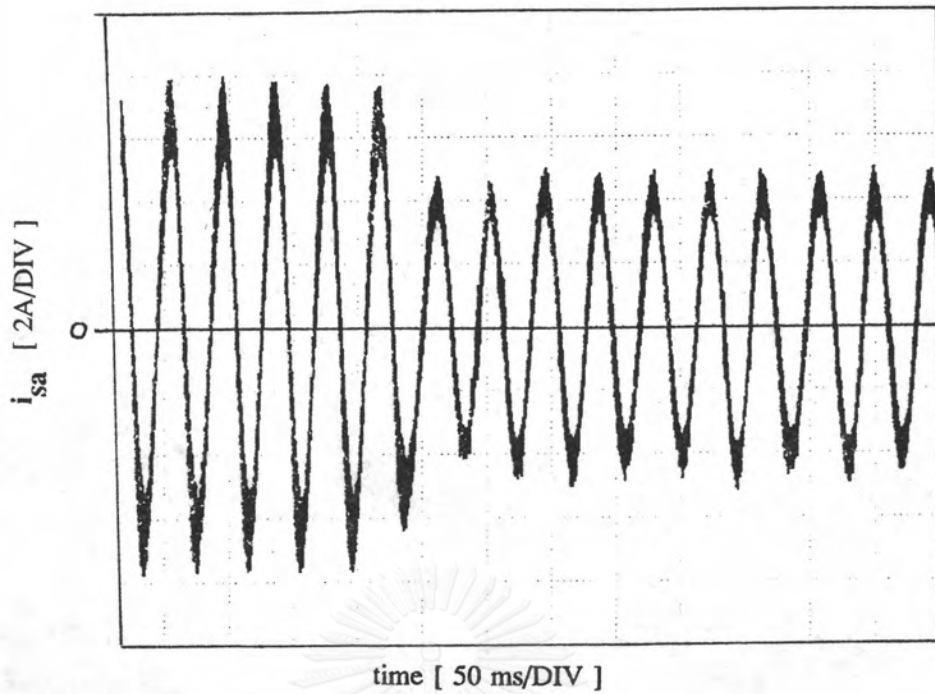


(ก) กระแสของมอเตอร์

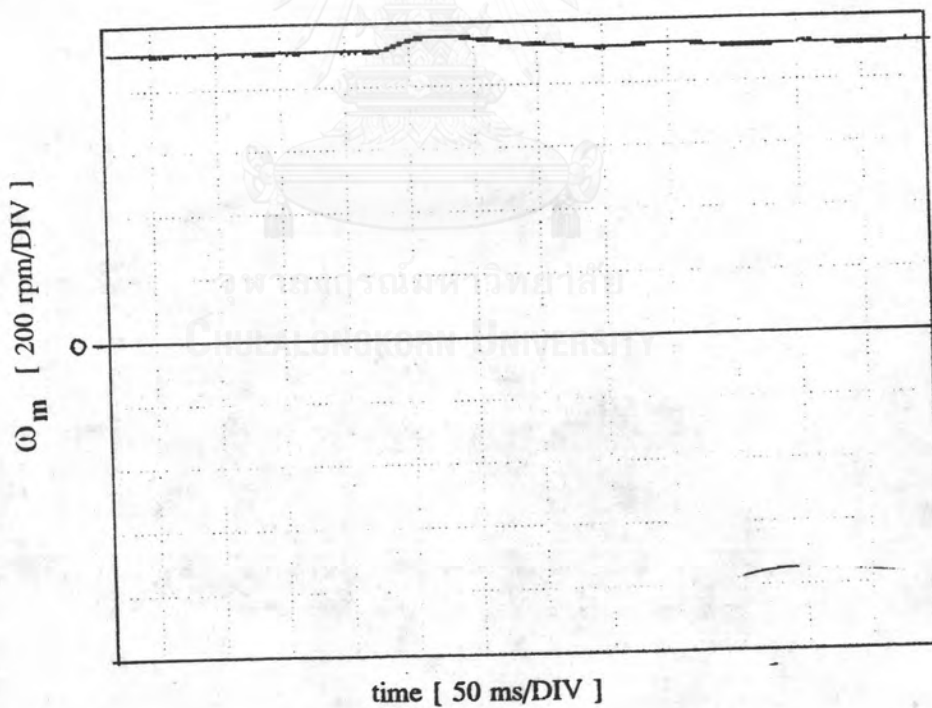


(ข) ความเร็วของมอเตอร์

รูปที่ 4.29 การทดสอบการเพิ่ม โหลดแบบขั้น

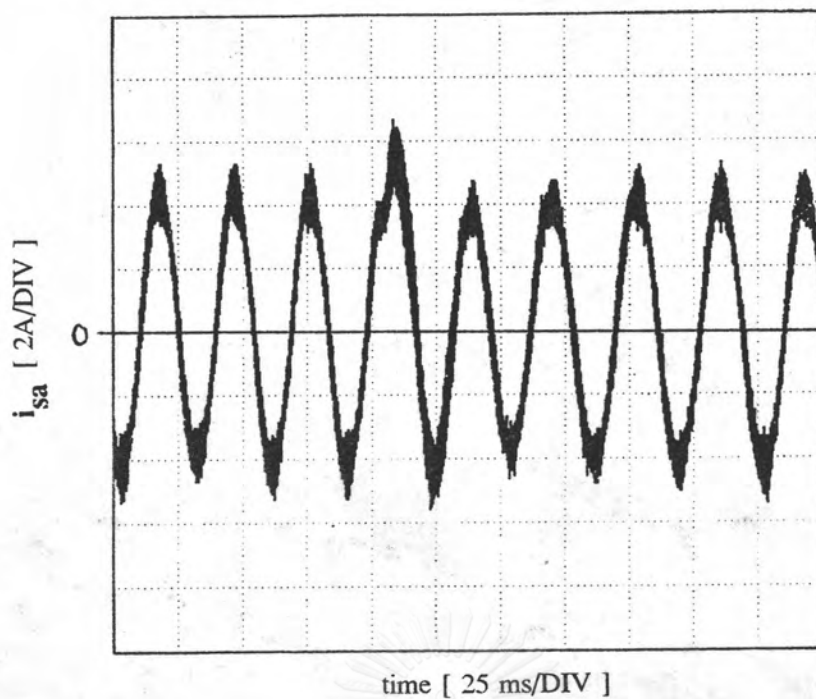


(ก) กระแสของมอเตอร์

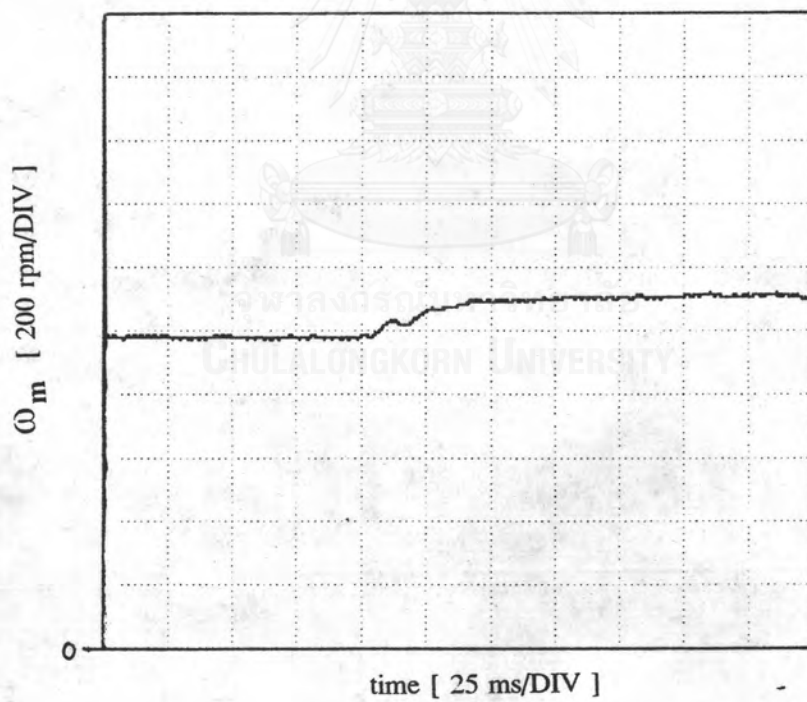


(ข) ความเร็วของมอเตอร์

รูปที่ 4.30 การทดสอบการลดโหลดแบบขั้น

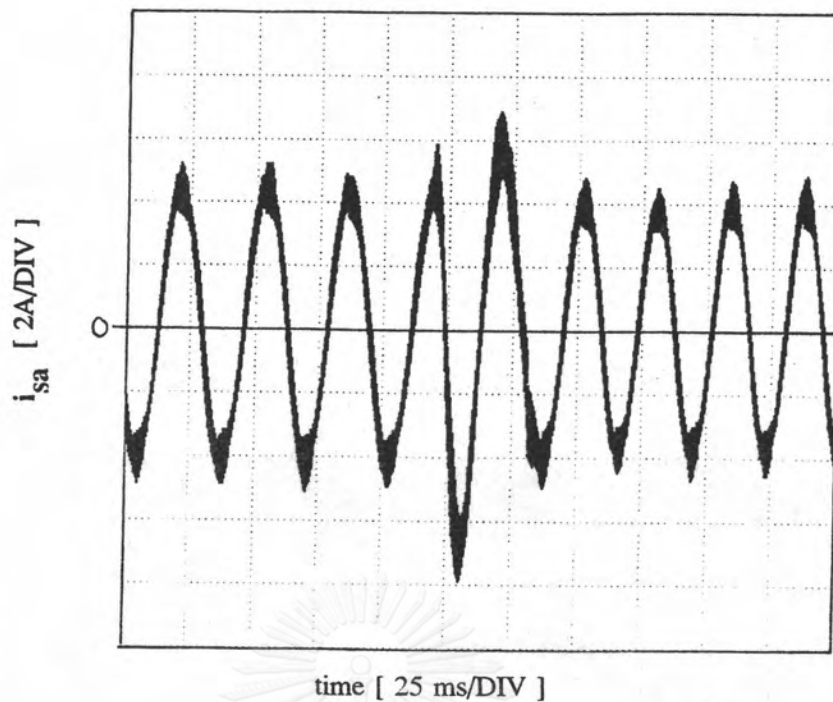


(ก) กระแสของมอเตอร์

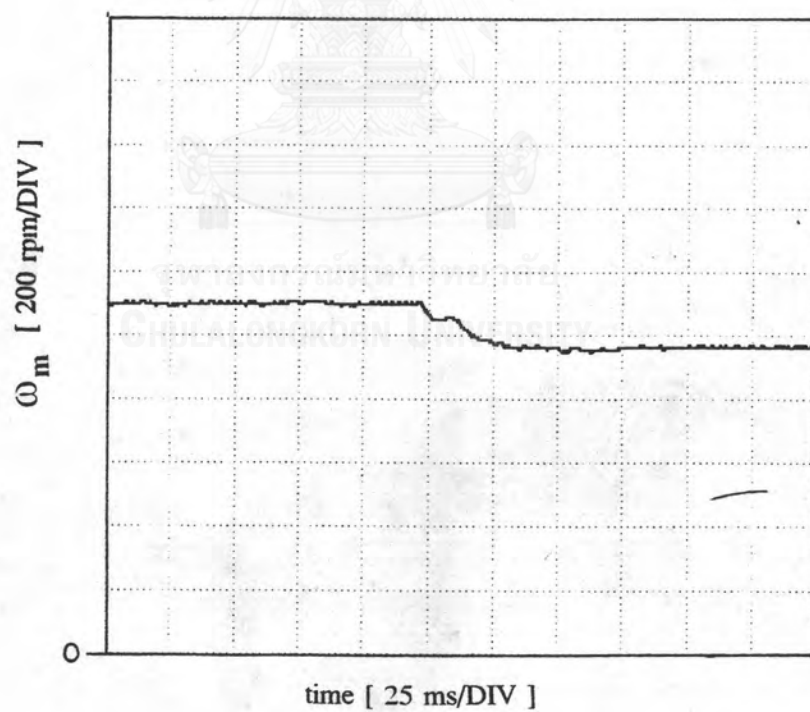


(ข) ความเร็วของมอเตอร์

รูปที่ 4.31 การทดสอบการเพิ่มความเร็วแบบขั้นในช่วงแคบจาก 1000 - 1100 rpm.



(ก) กระแสของมอเตอร์



(ข) ความเร็วของมอเตอร์

รูปที่ 4.32 การทดสอบการลดความเร็วแบบขั้นในช่วงแคบจาก 1100 - 1000 rpm.