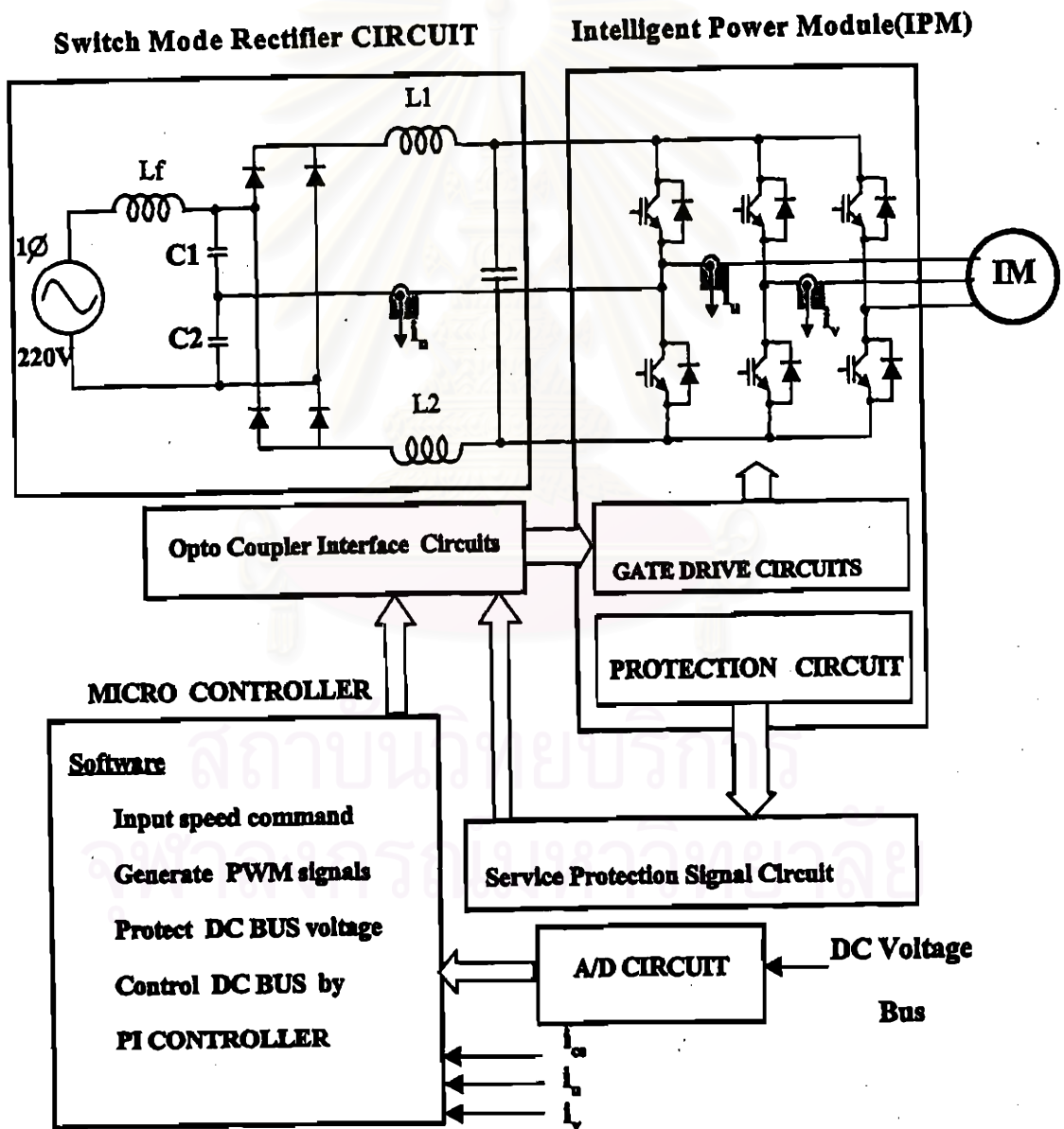


ระบบรวมของวงจรอินเวอร์เตอร์เสมือนต่อแบบวี

4.1 ระบบรวมของวงจร

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงระบบรวมของวงจรอินเวอร์เตอร์เสมือนต่อแบบวี สำหรับโครงสร้างฮาร์ดแวร์โดยรวมของระบบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 โครงสร้างโดยรวมของฮาร์ดแวร์ของระบบ

โครงสร้างโดยรวมระบบจะประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆด้วยกันคือ

1. วงจรเรียงกระแสแบบวิธีสวิทช์แบบสวิทช์คู่
2. วงจรอินเวอร์เตอร์เสมือนต่อแบบวี
3. วงจรควบคุม

สำหรับรายละเอียดในแต่ละส่วนของวงจรมัน เราจะทำการพิจารณาแยกออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของฮาร์ดแวร์ และส่วนซอฟต์แวร์ ดังจะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

4.2 ฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ ของระบบ

4.2.1 ฮาร์ดแวร์ของระบบ

ในส่วนของฮาร์ดแวร์จะประกอบด้วยส่วนต่างๆดังนี้

1) ภาคกำลัง

1.1 วงจรเรียงกระแสแบบวิธีสวิทช์ ประกอบด้วย

- แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ 1 เฟส 220 V
- ตัวเหนี่ยวนำสำหรับกรองกระแสฮาร์มอนิกขนาด 5 mH 1 ตัว
- ตัวเก็บประจุไฟสลับขนาด 10 uF 2 ตัว
- ไดโอดเรียงกระแสแบบ fast recovery 4 ตัว
- ตัวเหนี่ยวนำขนาด 2.5 mH 2 ตัว
- ตัวเก็บประจุไฟตรงขนาด 1100 uF 1 ตัว

1.2 Intelligent Power Module (IPM) ภายในประกอบด้วย

- ชุดสวิทช์กำลังพร้อมไดโอด 6 ชุด
- ชุดขับนำเกตของ IGBT 6 ชุด โดยที่ 3 ชุดบนจะใช้แหล่งจ่ายไฟแยกกัน ส่วน 3 ชุดล่างจะใช้แหล่งจ่ายชุดเดียวกัน
- ชุดวงจรป้องกัน

1.3 แหล่งจ่ายไฟตรง ประกอบด้วย

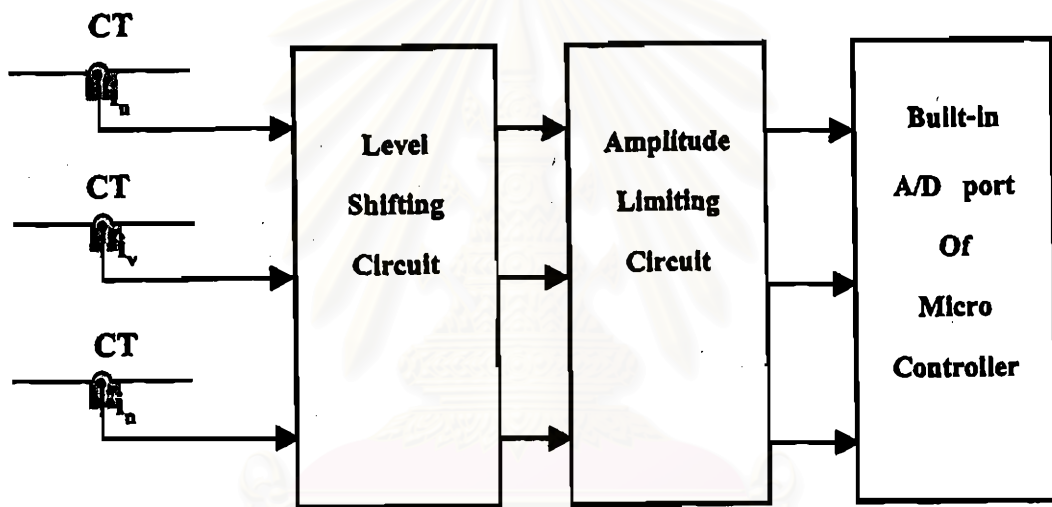
- แหล่งจ่ายไฟตรง +5 V สำหรับไมโครโพรเซสเซอร์
- แหล่งจ่ายไฟตรง ± 15 V สำหรับวงจรแปลงผันสัญญาณคิติดักเป็นแอนะล็อก
- แหล่งจ่ายไฟตรง ± 5 V สำหรับวงจรแปลงผันสัญญาณแอนะล็อกเป็นคิติดัก
- แหล่งจ่ายไฟตรง +5 V สำหรับวงจร Opto Coupler Interface

- แหล่งจ่ายไฟตรง +5 V สำหรับส่วนตรวจจับสัญญาณต่างๆ

2) ภาคการตรวจจับสัญญาณต่างๆ ประกอบด้วย

2.1 ส่วนตรวจจับกระแส

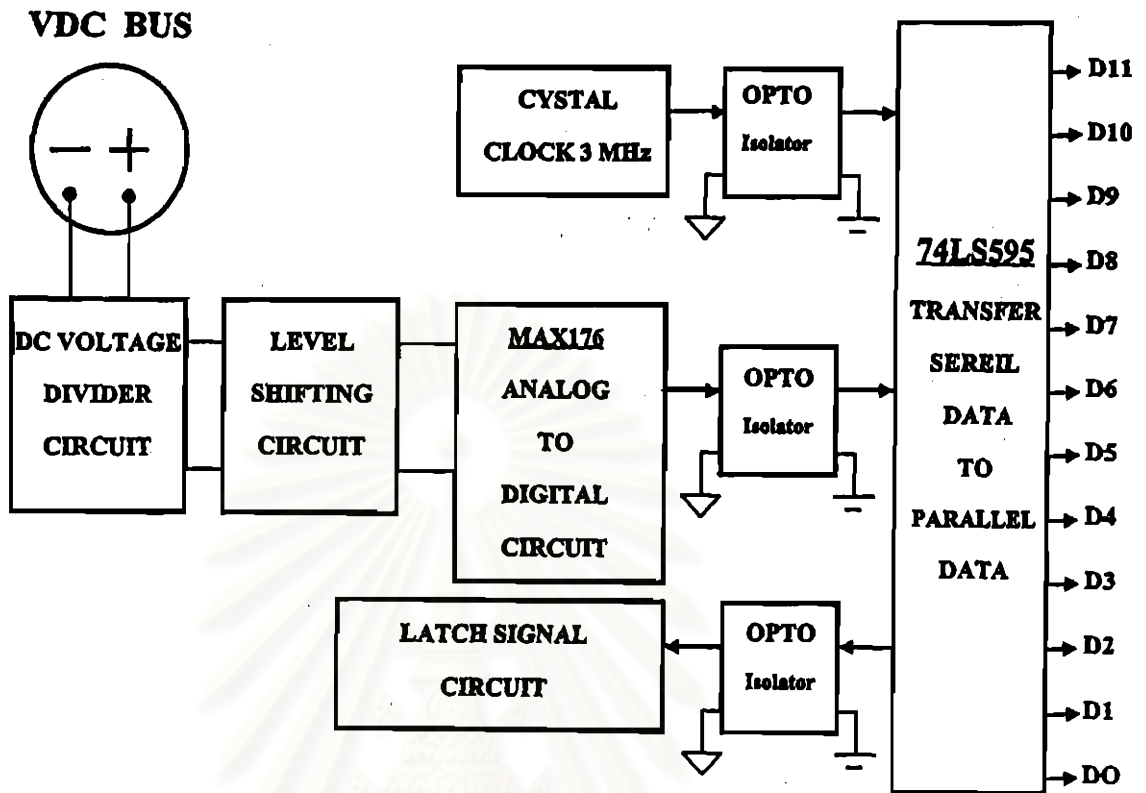
เราจะทำการตรวจจับกระแสในวงจรเพื่อใช้คำนวณค่าชดเชยเวลาประวิงของสวิทช์กำลังดังแสดงได้ในรูปที่ 4.2 ชุดตรวจจับกระแสจะทำการวัดกระแสทางด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ 2 เฟส คือ เฟส U และเฟส V และวัดกระแสที่จุดกึ่งกลางของแหล่งจ่ายไฟกลับ โดยใช้ตัวตรวจจับกระแสตรง (DC-CT) ค่ากระแสที่วัดได้จะถูกนำไปปรับระดับและจำกัดขนาดก่อนจะถูกส่งไปยัง พอร์ตของไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล



รูปที่ 4.2 ส่วนตรวจจับสัญญาณกระแส

2.2 ส่วนตรวจจับแรงดันบัสไฟตรง

ในส่วนนี้จะทำการรับค่าแรงดันบัสไฟตรง มาทำการทอนระดับแรงดันให้มีค่าระดับแรงดันที่ต่ำลง จากนั้นทำการแปลงสัญญาณแอนะล็อกไปอยู่ในรูปแบบสัญญาณดิจิทัลแบบอนุกรม จากนั้นทำการแยกโคจรทางไฟฟ้า โดยใช้ opto isolator การที่สัญญาณข้อมูลแบบดิจิทัลเป็นแบบอนุกรมทำให้การแยกโคจรทางไฟฟ้าสามารถทำได้โดยใช้จำนวน opto isolator น้อยกว่าข้อมูลแบบขนาน ข้อมูลดิจิทัลแบบอนุกรมที่ส่งผ่านจะถูกนำมาแปลงเป็นข้อมูลดิจิทัลแบบขนานเพื่อส่งเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ส่วนตรวจจับแรงดันแบตเตอรี่

3) ภาคการควบคุม ในส่วนนี้จะประกอบด้วย

- ไมโครคอนโทรลเลอร์ SH7032 แบบบอร์คเดียว 1 บอร์ด
- วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกเพื่อการแสดงผล

4) ภาคการป้องกัน

ในส่วนของภาคป้องกันนั้นจะประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนวงจรป้องกันภายใน IPM เอง และส่วนที่เป็นวงจรภายนอกที่รับสัญญาณแจ้งจาก IPM เมื่อเกิดข้อผิดพลาดขึ้นในระบบเพื่อทำการหยุดการทำงานของวงจรขั้วนำเกด

4.2.2 ซอฟต์แวร์ของระบบ

ส่วนของซอฟต์แวร์ที่ใช้ในระบบรวม จะทำหน้าที่หลักๆดังต่อไปนี้

- 1) นำค่าคำสั่งความเร็วและคำนวณหาขนาดของคำสั่งแรงดัน
- 2) สร้างสัญญาณการสวิทช์แบบปรับความกว้างพัลส์โดยวิธีสเปซเวกเตอร์
- 3) รับค่าแรงดันแบตเตอรี่และทำการป้องกันไม่ให้เกินค่าที่กำหนด
- 4) ควบคุมแรงดันแบตเตอรี่ด้วยตัวควบคุมแบบ พีไอ

5) ขดขยค่าเวลาประวงเวลา
 ซอฟต์แวงร้ทงหมคสามารถเขียนแสดงเป็น PDL (Program Development Language) แลล
 แสดงคโคะแกรมเวลาได้คังค่อไปน้

1. โปรแกรมหลัก

ซอฟต์แวร์ โนคูลน้จะใช้การอินเทอร้ปค้ทกๆ 500 μ s แลลโปรแกรมใน
 การบรการอินเทอร้ปค้จะใช้เวลาทงหมคประมาณ 25 μ s

A MAIN PROGRAM FOR V-CONNECTION-LIKE INVERTER

MODULE : MAIN PROGRAM

Initialize

Initialize all variables

Initialize all timers and enable timer interrupt

Loop here and wait for interrupt only

Main program Interrupt Service Routine

Calculate voltage command for inverter

Calculate time period from frequency

Read DC BUS voltage

Input Vdc from external A/D

PI controller to control DC BUS voltage

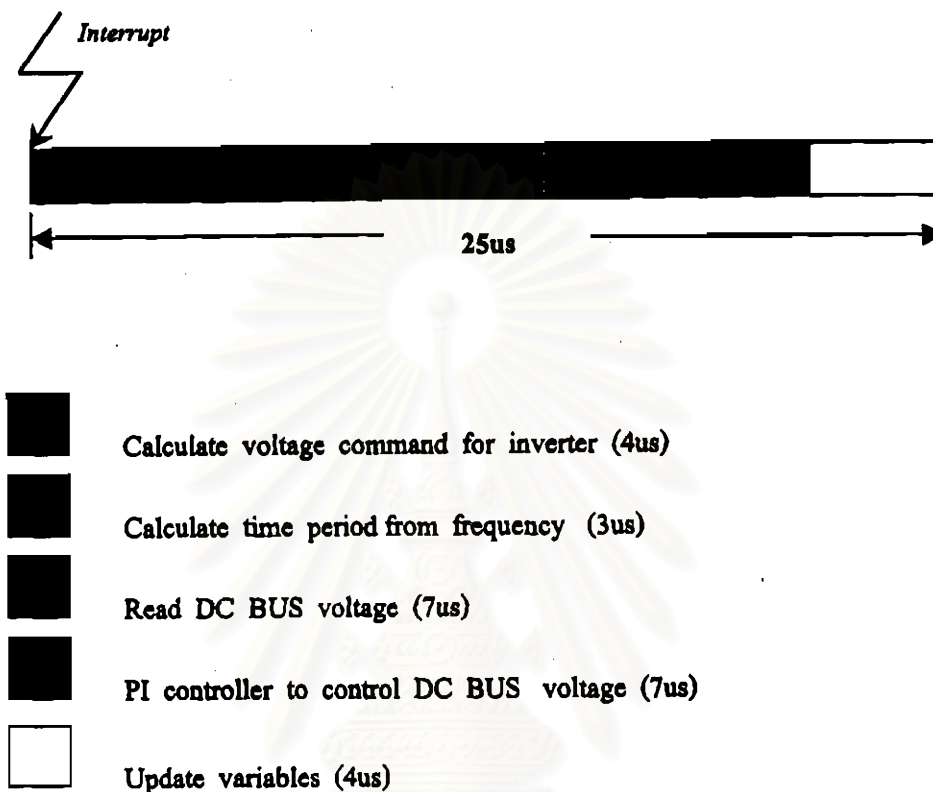
Calculate voltage error

Calculate PI output

Update variable

Return

END MAIN PROGRAM.



รูปที่ 4.4 โค้ดอะแกรณเวลทของซอฟต์แวร์โมดูลของโปรแกรมหลัก

2. โปรแกรมสร้างสัญญาณการสวิตช์

ซอฟต์แวร์โมดูลนี้จะให้บริการแก่อินเทอร์พรัตที่กำหนดโดยคาบเวลาการสวิตช์ ซึ่งความถี่การสวิตช์จะแปรเปลี่ยนไปตามค่าความถี่คำสั่งจากส่วนควบคุมระดับแรงดันไฟตรงของวงจรและโปรแกรมในการบริการอินเทอร์พรัตจะใช้เวลาทั้งหมดประมาณ 72 us

GENERATE PWM PROGRAM FOR V-CONNECTION-LIKE INVERTER

MODULE : GENERATE PWM

Initialize

 Initialize all variables

 Initialize all timers and enable timer interrupt

Loop here and wait for Interrupt only

PWM Interrupt Service Routine

 Update buffer register for generate pulse width.

 Read neutral current i_n

 Input i_n from internal A/D

 Read load currents i_u, i_v

 Input i_u, i_v from internal A/D

 Calculate compensating time

 Read DC BUS voltage

 Input Vdc from external A/D

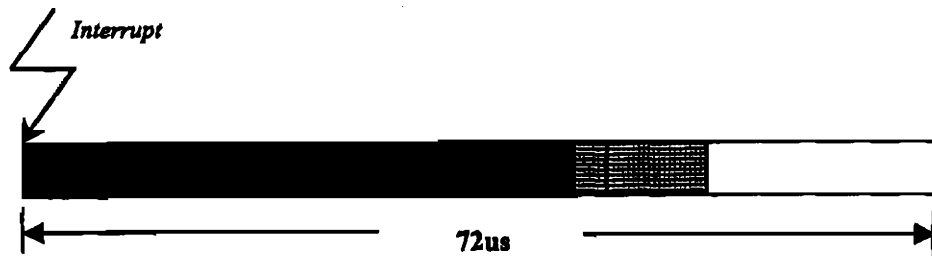
 Protecting Vdc BUS









 Calculate angle of voltage vector

 Calculate switching pattern

 Return

END GENERATE PWM PROGRAM.



-  Update buffer registers for generating PWM signals (2us)
-  Read neutral current i_n (14us)
-  Read load current i_u, i_v (14us)
-  Calculate compensating time (5us)
-  Read DC BUS voltage (7us)
-  Protecting Vdc BUS (2us)
-  Calculate angle of voltage vector (8us)
-  Calculate switching pattern (20us)

รูปที่ 4.5 โค้ดแกรมเวลาของซอฟต์แวร์โมดูลในส่วนสร้างสัญญาณการสวิทช์

4.3 ผลการทดสอบการทำงานของระบบรวม

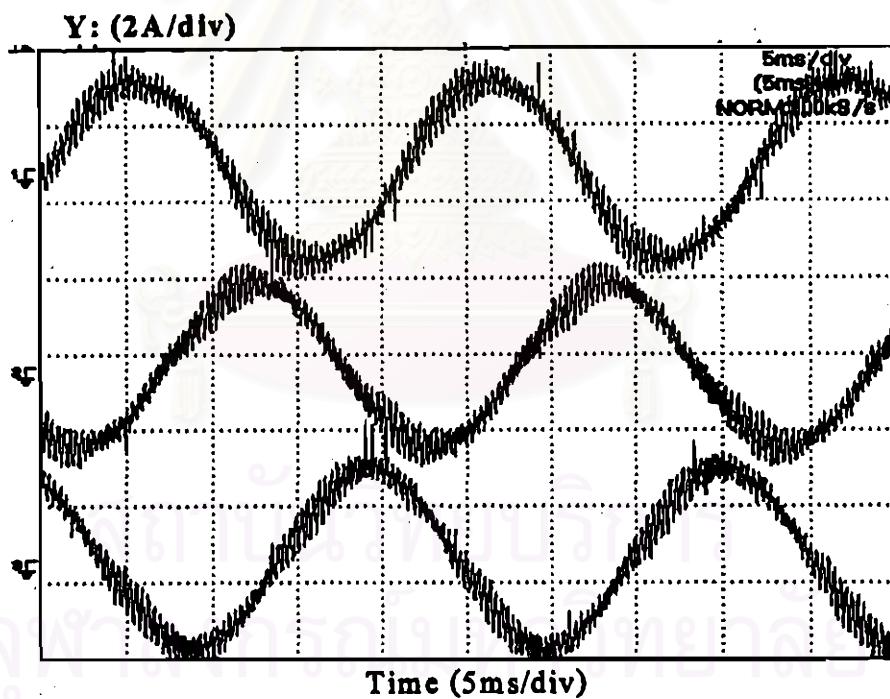
หลังจากที่เราได้ทำการออกแบบและสร้างวงจรจริงตามโครงสร้างระบบรวมดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นเสร็จเรียบร้อยแล้วจึงได้นำวงจรดังกล่าวมาทำการทดสอบผลการทำงาน โดยเราทำการแบ่งหัวข้อในการทดสอบดังนี้

- ก) ผลกระทบของค่าเวลาประวิงต่อการทำงานของวงจร และแนวทางแก้ไข
- ข) ผลการทดสอบการทำงานของระบบรวม ที่มีการชดเชยค่าเวลาประวิง
- ค) ผลการทดสอบการทำงานของระบบรวม เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตั้งความถี่ของอินเวอร์เตอร์

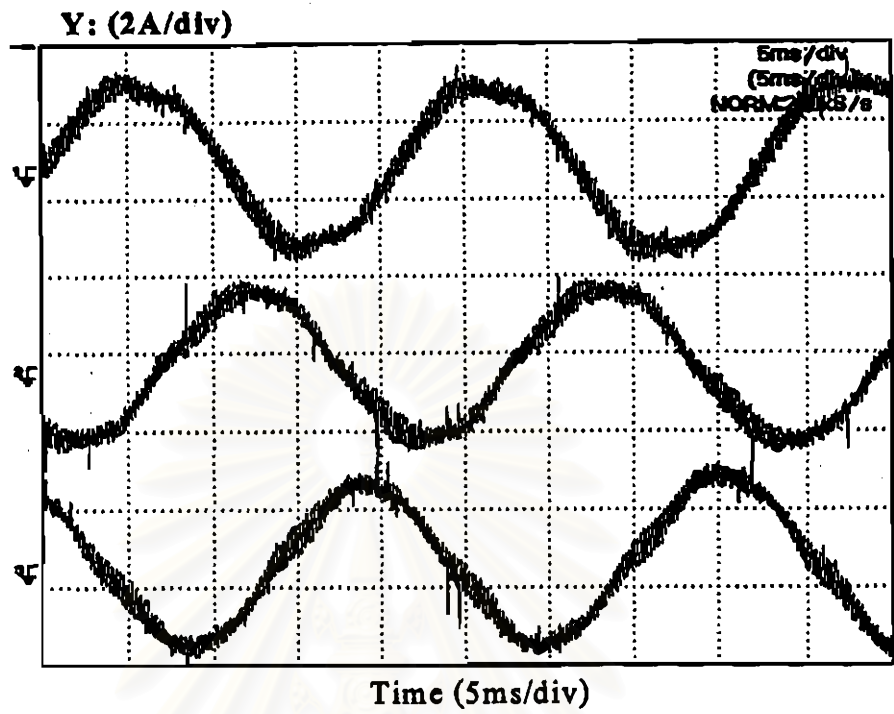
- ง) ผลการทดสอบการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง ที่สภาวะชั่วคราว เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง โหลดแบบขั้น
 ดังมีรายละเอียดในแต่ละหัวข้อดังต่อไปนี้

ก) ผลของค่าเวลาประวิงต่อวงจรรวม และแนวทางแก้ไข

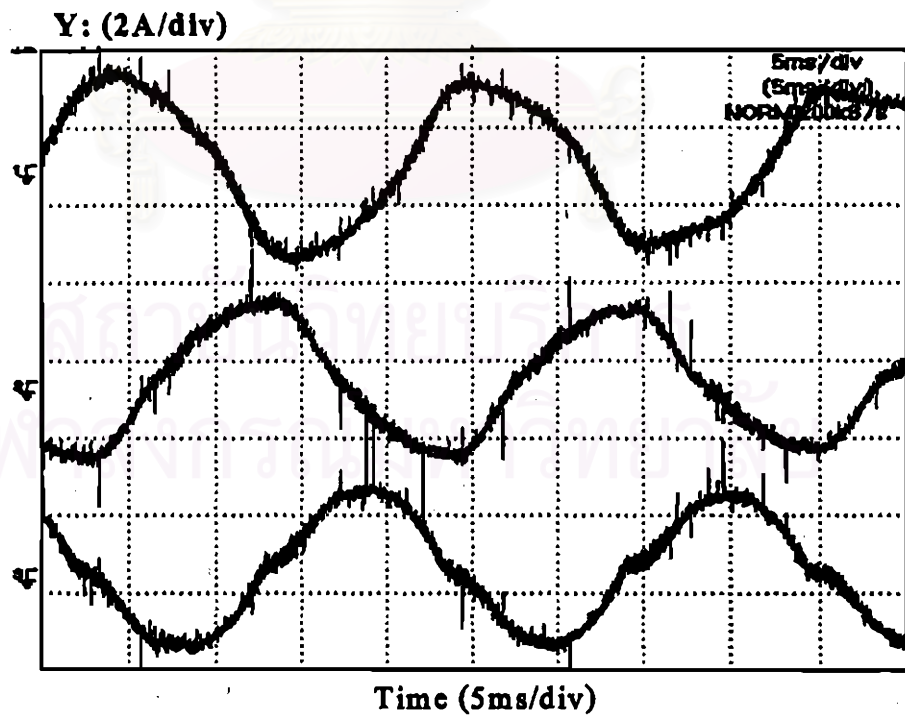
เราทำการทดสอบระบบรวมที่ยังไม่ได้ชดเชยค่าเวลาประวิงโดยแบ่งสภาวะการทำงานเป็นช่วง คือที่ สภาวะโหลดหนัก โหลดปานกลาง และที่สภาวะโหลดเบา โดยมีโหลดเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 220V 370W เพื่อให้วงจรทำงานที่ความถี่การสวิทช์ที่แตกต่างกัน จากค่า ไปสูงตามลำดับ ในที่นี้เรากำหนดให้ค่าตั้งความถี่ของอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 50 Hz และแรงดันบัสไฟตรง 620 V ได้ ผลการทดลองดังแสดงรูปคลื่นกระแสทางด้านออกของทั้งสามเฟสได้ดังรูปที่ 4.6 – 4.8



รูปที่ 4.6 รูปคลื่นกระแสทางด้านออก ของระบบรวมที่สภาวะโหลดหนัก



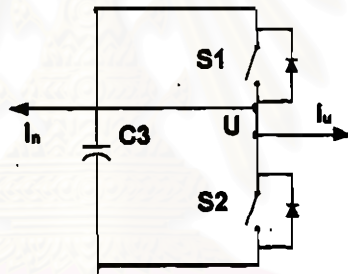
รูปที่ 4.7 รูปคลื่นกระแสทางด้านออก ของระบบรวมที่สถานะ โหลดปานกลาง



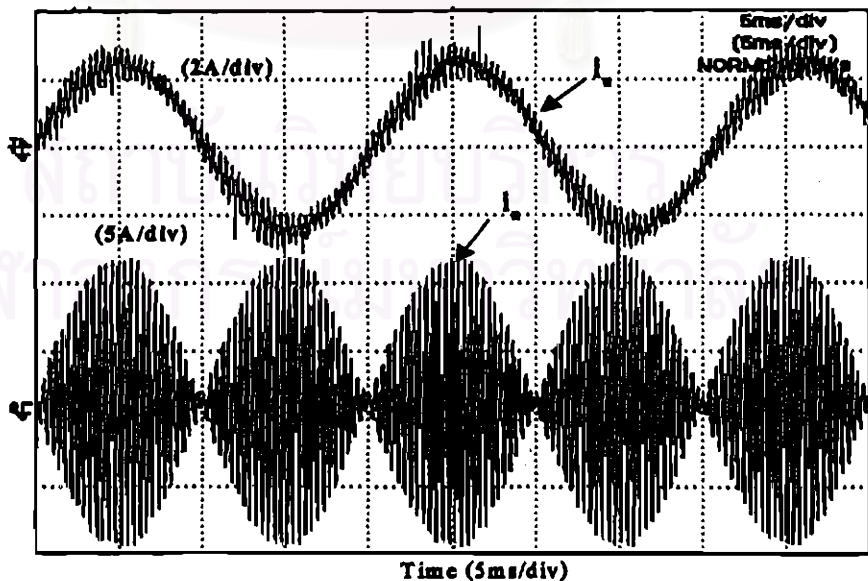
รูปที่ 4.8 รูปคลื่นกระแสทางด้านออก ของระบบรวมที่สถานะ โหลดเบา

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่ารูปคลื่นของกระแสทางด้านออกทั้ง 3 เฟสในทั้ง 3 ภาวะจะมีลักษณะที่แตกต่างกัน โดยรูปคลื่นกระแสที่สภาวะโหลดหนัก(รูปที่ 4.6) ซึ่งทำงานที่ความถี่การสวิตช์ค่าประมาณ 3 kHz จะยังคงมีรูปร่างเป็นไซน์ แต่ที่สภาวะโหลดปานกลาง (รูปที่ 4.7) ความถี่การสวิตช์จะสูงขึ้น รูปคลื่นกระแสทั้งสามจะเริ่มผิดเพี้ยนไปจากรูปไซน์ และที่สภาวะโหลดเบา(รูปที่ 4.8) วงจรจะทำงานที่ความถี่การสวิตช์สูงประมาณ 8kHz รูปคลื่นของกระแสด้านออกจะผิดเพี้ยนไปจากรูปไซน์อย่างมาก จากผลการทดลองดังกล่าวข้างต้น ซึ่งมีการผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสทางด้านออกที่ความถี่การสวิตช์สูงๆ เราจึงตั้งสมมุติฐานว่าความผิดเพี้ยนนี้ น่าจะเกิดจากผลของค่าเวลาประวิงในการสวิตช์ที่ยังมิได้มีการชดเชย เราจึงได้ทำการวิเคราะห์หาผลของค่าเวลาประวิงที่สภาวะต่างๆ เพื่อหาหนทางแก้ไขต่อไป

เมื่อพิจารณารูปวงจรเฉพาะสวิตช์เฟส U ดังรูปที่ 4.9 จะเห็นว่ากระแสที่ไหลผ่านสวิตช์ S1 และ S2 จะประกอบด้วยกระแส 2 ส่วนคือกระแสที่ไหลไปยังแหล่งจ่ายไฟสถับ(i_u) และกระแสที่ไหลไปยังเฟส U ของมอเตอร์(i_u) ซึ่งกระแสทั้งสองส่วนนี้แสดงรูปคลื่นได้ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.9 วงจรเฉพาะส่วนสวิตช์เฟส U



รูปที่ 4.10 รูปคลื่นกระแส i_u และ i_u

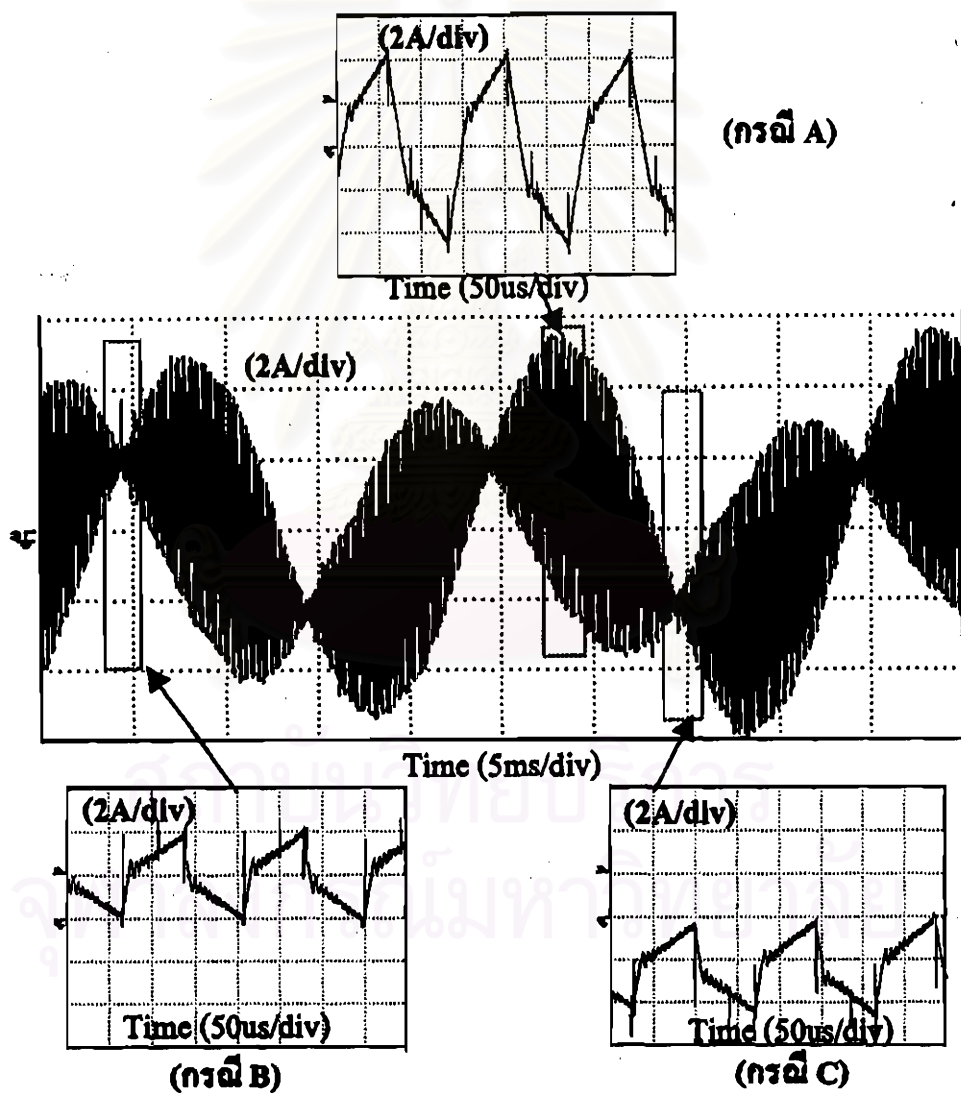
เมื่อพิจารณาผลรวมของกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์ในกิ่งเฟส B นี้จะพบว่า ค่าผลรวมของกระแสจะเป็นไปได้ 3 กรณี ดังนี้คือ

กรณี A ใน 1 คาบการสวิตช์ กระแสผ่านสวิตช์มีทั้งค่าบวกและลบ

กรณี B ใน 1 คาบการสวิตช์ กระแสผ่านสวิตช์มีเฉพาะค่าบวก

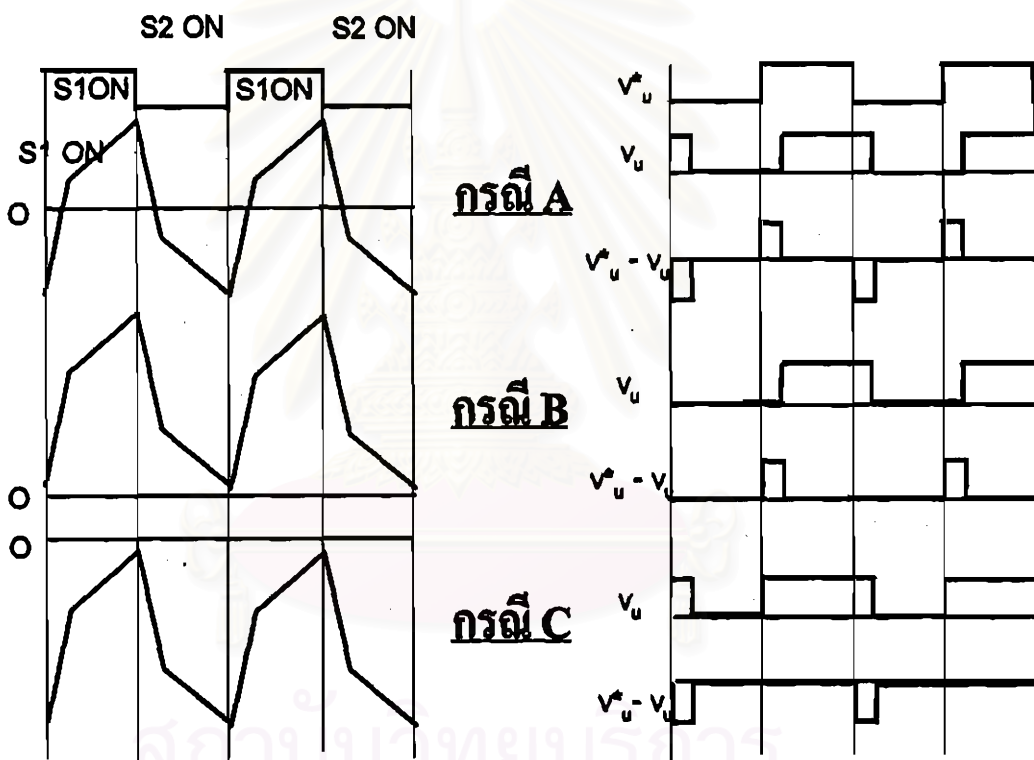
กรณี C ใน 1 คาบการสวิตช์ กระแสผ่านสวิตช์มีเฉพาะค่าลบ

เราสามารถแสดงตัวอย่างผลรวมของกระแสและภาพขยายผลรวมของกระแสทั้ง 3 กรณีได้ ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 รูปคลื่นผลรวมของกระแส i_u และ i_v ที่ไหลผ่านสวิตช์ในกิ่งเฟส B และภาพขยายของทั้ง 3 กรณี

ผลกระทบที่เกิดจากเวลาประวิงขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัยคือขนาดของค่าเวลาประวิงที่ใช้และทิศทาง การไหลของกระแสผ่านสวิทช์ซึ่งในกึ่งเฟส U นี้จะเป็นผลรวมของกระแส i_u และ i_v สำหรับขนาดของค่าเวลาประวิงนั้นเราสามารถลดหรือเพิ่มได้ตามความเหมาะสมซึ่งก็ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสวิทช์กำลังที่เราเลือกใช้ในวงจร ส่วนทิศทาง การไหลของกระแส นั้นเราสามารถนำผลรวมของกระแส i_u และ i_v มาพิจารณาทิศทางและทำการวิเคราะห์เพื่อหาแนวทางในการชดเชยค่าเวลาประวิงได้เป็น 3 กรณีตามลักษณะการไหลของกระแสในหนึ่งคาบการสวิทช์ ดังแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ทิศทางการไหลของกระแสผ่านสวิทช์กับแรงดันที่ขาดหายไป $v_u^* - v_u$ เนื่องจากผลของเวลาประวิง (v_u^* : ค่ากำลังแรงดันเฟส U)

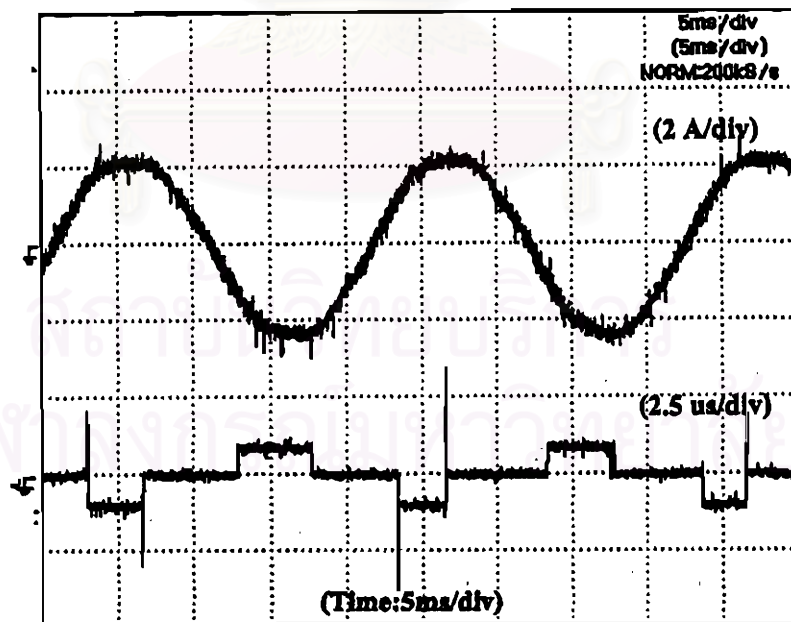
เมื่อ v_u^* คือรูปคลื่นแรงดันคำสั่งที่เราต้องการ v_u คือรูปคลื่นแรงดันที่ได้จริง ผลของค่าเวลาประวิงส่งผลให้รูปคลื่นแรงดันที่ได้จริงมีแรงดันเกินหรือขาด ขึ้นอยู่กับทิศทาง การไหลของกระแสที่ขณะนั้นๆ ดังแสดงแรงดันส่วนที่ขาดและเกิน ($v_u^* - v_u$) ในแต่ละกรณีได้ดังรูปที่ 4.12 นอกจากนี้เรายังสามารถวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของแรงดัน $v_u^* - v_u$ ต่อคาบการสวิทช์ได้ดังนี้

กรณี A ใน 1 คาบการสวิตช์กระแสผ่านสวิตช์มีทั้งค่าบวกและลบ แรงดันซึ่งขาดหายไปเนื่องจากเวลาประวิงมีทั้งค่าบวกและลบซึ่งทำให้ค่าเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์มีค่าเท่ากับศูนย์

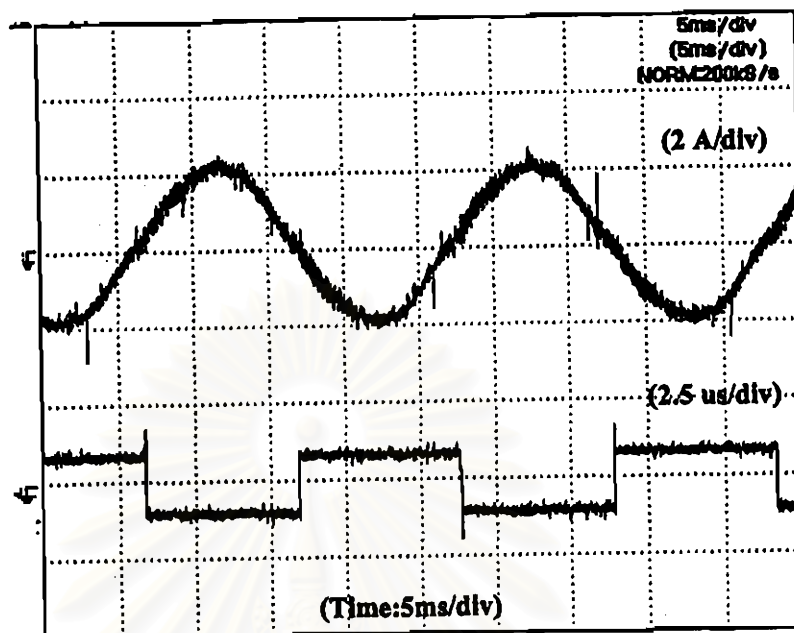
กรณี B ใน 1 คาบการสวิตช์กระแสผ่านสวิตช์มีเฉพาะค่าบวก แรงดันซึ่งขาดหายไปเนื่องจากเวลาประวิงมีเฉพาะค่าบวกซึ่งทำให้ค่าเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์มีค่าเป็นบวก

กรณี C ใน 1 คาบการสวิตช์กระแสผ่านสวิตช์มีเฉพาะค่าลบ แรงดันซึ่งขาดหายไปเนื่องจากเวลาประวิงมีเฉพาะค่าลบซึ่งทำให้ค่าเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์มีค่าเป็นลบ

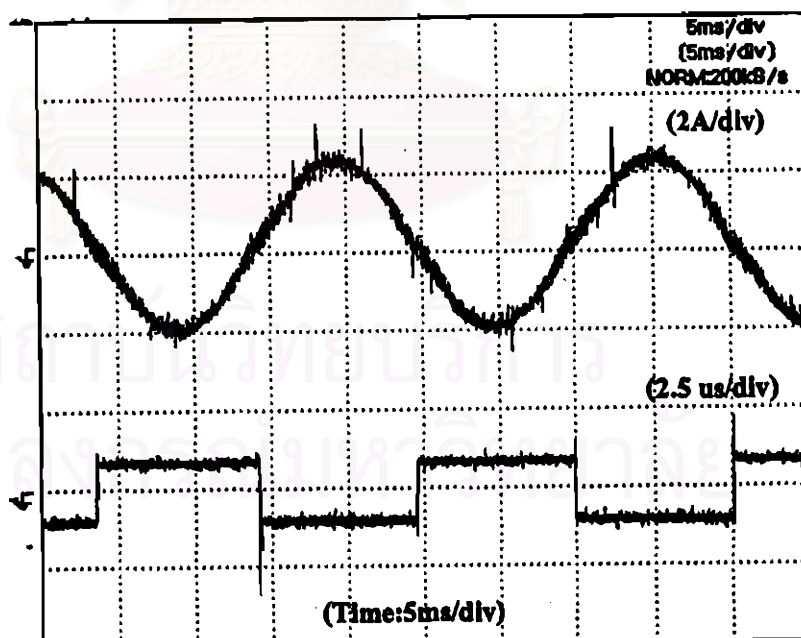
ดังนั้นเราสามารถที่จะชดเชยแรงดันที่เกินหรือขาดหายไปได้โดยการตรวจจับกระแส i_u และ i_v เพื่อหาผลรวมแล้วจึงพิจารณาว่าอยู่ในกรณีใด และทำการชดเชยค่าเวลาประวิงให้ถูกต้องตามทิศทางของกระแสที่ได้ตรวจจับมา เมื่อนำการวิเคราะห์ข้างต้นมาใช้ในวงจรจริง โดยให้วงจรทำงานที่สภาวะโหลดเบาซึ่งวงจรจะทำงานที่ความถี่สูงประมาณ 8 kHz และมีความผิดเพี้ยนของกระแสมากที่สุดเมื่อไม่มีการชดเชยค่าเวลาประวิง ส่วนตัวแปรอื่นๆจะเหมือนกับที่ใช้ในการทดสอบกรณีที่ไม่มีกระแส (รูป 4.8 – 4.10) จะได้ผลการทดลองดังในรูปที่ 4.13 โดยจะแสดงรูปคลื่นกระแสทางด้านออก (i_u, i_v, i_w) เทียบกับค่าเวลาที่ใช้ในการชดเชยค่าเวลาประวิงในแต่ละเฟส (T_{du}, T_{dv}, T_{dw}) ดังในรูปที่ 4.13 ถึง 4.15 ตามลำดับ



รูปที่ 4.13 รูปคลื่นกระแสทางด้านออกของเฟส U (i_u) กับค่าเวลาที่ใช้ในการชดเชยค่าเวลาประวิงในเฟส U (T_{du})



รูปที่ 4.14 รูปคลื่นกระแสทางค่านอกของเฟส V (i_v) กับค่าเวลาที่ใช้ในการชดเชย
ค่าเวลาประจิมในเฟส V (T_{dv})



รูปที่ 4.15 รูปคลื่นกระแสทางค่านอกของเฟส W (i_w) กับค่าเวลาที่ใช้ในการ
ชดเชยค่าเวลาประจิมในเฟส W (T_{dw})

จากผลการทดลองข้างต้นจะเห็นว่า ด้วยแนวทางในการชดเชยค่าเวลาประวิงดังกล่าวข้างต้นนั้น สามารถที่จะแก้ไขผลของค่าเวลาประวิงได้ โดยสังเกตได้จากรูปคลื่นของกระแสในทั้ง 3 เฟสจะมีความผิดเพี้ยนจากรูปไซน์น้อยลงเมื่อเทียบกับรูปที่ 4.8 – 4.10 แม้จะทำการทดลองที่สภาวะโหลดเบา ซึ่งวงจรจะทำงานที่ความถี่สูง โดยที่ค่าเวลาที่ใช้ในการชดเชยค่าเวลาประวิงในเฟส U จะแตกต่างจากเฟส V และ เฟส W เนื่องจากที่เฟส U จะมีลักษณะการชดเชยเป็น 3 กรณีตามค่าเฉลี่ยของแรงดันที่ต้องชดเชยในหนึ่งคาบการสวิตซ์คั้งที่ได้ไว้แล้วข้างต้น

ข) ผลการทดสอบการทำงานของระบบรวม ที่มีการชดเชยค่าเวลาประวิง

ในหัวข้อนี้เราจะทำการทดสอบระบบรวมที่มีการชดเชยค่าเวลาประวิงด้วยวิธีการคั้งที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อก่อน โดยแบ่งสภาวะต่างๆในการทดสอบวงจรแบ่งเป็นหัวข้อต่างๆ ได้ดังนี้

1) เมื่อค่าส่งความถี่ของอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 50 Hz

ในการทดลองในหัวข้อนี้เราจะทำการทดลองโดยให้วงจรอินเวอร์เตอร์เสมือนต่อแบบวิสร้างแรงดันด้านออกมีความถี่ 50 Hz เพื่อขับโหลดมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 370 W ซึ่งมอเตอร์เหนี่ยวนำที่สภาวะโหลดเบา(หมุนตัวเปล่า)จะมีค่ากระแสเดเตอร์ประมาณ 1.4 A เราทำการทดลองวงจร โดยการเปลี่ยนโหลดไปที่ระดับต่างๆ ดังได้ผลการทดลองในแต่ละระดับคั้งนี้

1.1) สภาวะโหลดเบา (0% โหลดพิกัด, กระแสเดเตอร์ ≈ 1.4 A)

รูปที่ 4.17 เป็นผลการทดลองแสดงรูปคลื่นของกระแสด้านออกและกระแสทางด้านเข้า ในการทำงานที่สภาวะโหลดเบา จากผลการทดสอบการทำงานที่ได้จะเห็นว่ารูปคลื่นของกระแสด้านออกทั้ง 3 เฟส มีรูปร่างเป็นไซน์ความถี่ 50 Hz ส่วนรูปคลื่นของกระแสทางด้านเข้าก็มีรูปร่างใกล้เคียงไซน์แต่จะมีกระแสฮาร์มอนิกอันดับสูงกว่าปะปนอยู่บ้าง โดยฮาร์มอนิกหลักๆจะเป็นอันดับที่ 3, 5, 7 และ 9 เมื่อทำการวัดค่าองค์ประกอบฮาร์มอนิก ได้ค่า THD ของกระแสด้านเข้าประมาณ 6.26 % อย่างไรก็ตามในการพิจารณาค่า THD นั้นต้องคำนึงถึงค่า THD ของแรงดันจากแหล่งจ่ายที่ใช้ในการทดลองด้วย ซึ่งในการทดลองนี้จะวัดได้ประมาณ 2.85 % ผลของค่ากระแสฮาร์มอนิกที่อันดับต่างๆมีค่าไม่เกินมาตรฐาน IEC 61000-3-2 Class A ส่วนค่าตัวประกอบกำลัง (PF) ของวงจรที่สภาวะนี้มีค่าเท่ากับ 0.979 ดังแสดงเป็ครีမ်ของกระแสด้านเข้าที่ฮาร์มอนิกอันดับต่างๆคั้งรูปที่ 4.20(ก)

1.2) สภาวะโหลดปานกลาง (50% โหลดพิกัด, กระแสเดเตอร์ ≈ 1.6 A)

ที่สภาวะโหลดปานกลางผลการทดลองแสดงรูปคลื่นของกระแสด้านออกและกระแสทางด้านเข้าของวงจรได้คั้งรูปที่ 4.18 จากผลการทดสอบการทำงานที่ได้จะเห็นว่ารูปคลื่นของกระแสด้านออกทั้ง 3 เฟส มีรูปร่างเป็นไซน์ที่ความถี่ 50 Hz แต่จะสังเกตเห็นว่ากระแสด้านออกจะมีระลอก

คลื่นที่ความถี่การสวิตช์ปรากฏให้เห็นชัดเจนขึ้นทั้งนี้ก็เนื่องจากการทำงานโหลดปานกลางวงจรเรียงกระแสจะปรับความถี่การสวิตช์ให้ต่ำลงเพื่อที่จะดึงพลังงานจากแหล่งจ่ายเข้ามาในวงจรเรียงกระแสมากขึ้น จึงทำให้เรามองเห็นระลอกคลื่นที่ความถี่การสวิตช์ในรูปคลื่นกระแสได้ชัดเจนขึ้น ส่วนรูปคลื่นของกระแสทางด้านเข้าก็มีรูปร่างเป็นไซน์ เมื่อทำการวัดค่าองค์ประกอบฮาร์มอนิก ได้ค่า THD ของกระแสด้านเข้าประมาณ 4.58 % ค่า THD ของแรงดันจากแหล่งจ่ายที่ใช้ในการทดลองประมาณ 2.75 % ผลของค่ากระแสฮาร์มอนิกที่อันดับต่างๆมีค่าไม่เกินมาตรฐาน IEC 61000-3-2 Class A ดังแสดงเป็ครัมของกระแสด้านเข้าที่ฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ ได้ดังรูปที่ 4.20(ข) โดยฮาร์มอนิกอันดับหลักก็ยังคงเป็นอันดับ 3, 5, 7 และ 9 เช่นเดิม ค่าตัวประกอบกำลัง (PF) ของวงจรที่สภาวะนี้มีค่าเท่ากับ 0.996

1.3) สภาวะโหลดหนัก (100% โหลดพิกัด, กระแสเตเตอร์ ≈ 2.0 A)

ที่สภาวะโหลดหนักผลการทดลองแสดงรูปคลื่นของกระแสด้านออกและกระแสด้านเข้าของวงจรได้ดังรูปที่ 4.19 จากผลการทดสอบการทำงานที่ได้จะเห็นว่ารูปคลื่นของกระแสด้านออกทั้ง 3 เฟส มีรูปร่างเป็นไซน์ที่มีความถี่ประมาณ 50 Hz แต่กระแสด้านออกจะมีระลอกคลื่นที่ความถี่การสวิตช์ปรากฏให้เห็นมากขึ้น ทั้งนี้ก็เนื่องจากเหตุผลที่ได้กล่าวในหัวข้อก่อน ส่วนรูปคลื่นของกระแสทางด้านเข้าก็มีรูปร่างเป็นไซน์ เมื่อทำการวัดค่าองค์ประกอบฮาร์มอนิก ได้ค่า THD ของกระแสด้านเข้าประมาณ 4.48 % ค่าตัวประกอบกำลัง (PF) มีค่าเท่ากับ 0.999 ค่า THD ของแรงดันจากแหล่งจ่ายที่ใช้ในการทดลองประมาณ 2.75 % ผลของค่ากระแสฮาร์มอนิกที่อันดับต่างๆมีค่าไม่เกินมาตรฐาน IEC 61000-3-2 Class A ดังแสดงเป็ครัมของกระแสด้านเข้าที่ฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ ได้ดังรูปที่ 4.20(ค) ฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 และ 5 จะมามีค่าประมาณ 3.80 % และ 1.92 % ตามลำดับ จากผลการทดลอง ทั้ง 3 สภาวะ จะพบว่าปริมาณของกระแสฮาร์มอนิกด้านเข้าจะมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อคิดเป็นอัตราส่วนต่อองค์ประกอบหลักมูล ไม่เปลี่ยนแปลงตามความถี่การสวิตช์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงในสมการกระแสขาเข้าที่ (2.62)

2) เมื่อค่าตั้งความถี่ของอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 25 Hz

ในการทดลองในหัวข้อนี้เราจะทำการทดลองโดยให้วงจรอินเวอร์เตอร์เสมือนต่อแบบวีสร้างแรงดันด้านออกความถี่ 25 Hz เพื่อขับมอเตอร์ในสภาวะโหลดต่างๆเช่นเดิม โดยที่ขนาดของแรงดันบัสไฟตรงยังมีขนาดเท่าเดิมคือ 620 V เพื่อศึกษาว่าการเปลี่ยนแปลงความถี่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์มีผลต่อกระแสด้านเข้าหรือไม่

2.1) สภาวะโหลดเบา (0% โหลดพิกัด, กระแสเตเตอร์ ≈ 1.4 A)

ที่สภาวะโหลดเบาผลการทดลองแสดงรูปคลื่นของกระแสด้านออกและกระแสทางด้านเข้าของวงจรได้ดังรูปที่ 4.21 จากผลการทดสอบการทำงานที่ได้จะเห็นว่ารูปคลื่นของกระแสด้านออก

ทั้ง 3 เฟส มีรูปร่างเป็นไซน์ความถี่ 25 Hz ส่วนรูปคลื่นของกระแสทางด้านเข้าก็มีรูปร่างใกล้เคียง ไซน์แต่จะมีกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 3, 5, 7, และ 9 ประปนอยู่ เมื่อทำการวัดค่าองค์ประกอบฮาร์มอนิก ได้ค่า THD ของกระแสด้านเข้าประมาณ 6.93 % ค่าตัวประกอบกำลัง (PF) มีค่าเท่ากับ 0.9607 ค่า THD ของแรงดันจากแหล่งจ่ายที่ใช้ในการทดลองประมาณ 2.7 % ผลของค่ากระแสฮาร์มอนิกที่อันดับต่างๆมีค่าไม่เกินมาตรฐาน IEC 61000-3-2 Class A คึงแสดงเปกตรัมของกระแสด้านเข้าที่ฮาร์มอนิกอันดับต่างๆดังรูปที่ 4.24(ก)

2.2) สภาวะโหลดปานกลาง (50% โหลดพิกัด, กระแสเดเดเตอร์ $\approx 1.6 A$)

ที่สภาวะโหลดปานกลางผลการทดลองแสดงรูปคลื่นของกระแสด้านออกและกระแสทางด้านเข้าของวงจรได้ดังรูปที่ 4.22 จากผลการทดสอบการทำงานที่ได้จะเห็นว่ารูปคลื่นของกระแสด้านออกทั้ง 3 เฟส มีรูปร่างเป็นไซน์ความถี่ 25 Hz กระแสด้านออกจะมีระลอกคลื่นที่ความถี่การสวิตซ์ในขนาดที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนรูปคลื่นของกระแสทางด้านเข้าก็มีรูปร่างเป็น ไซน์ เมื่อทำการวัดค่าองค์ประกอบฮาร์มอนิก ได้ค่า THD ของกระแสด้านเข้าประมาณ 4.80 % ค่าตัวประกอบกำลัง (PF) มีค่าเท่ากับ 0.9914 ค่า THD ของแรงดันจากแหล่งจ่ายที่ใช้ในการทดลองประมาณ 2.6 % ผลของค่ากระแสฮาร์มอนิกที่อันดับต่างๆมีค่าไม่เกินมาตรฐาน IEC 61000-3-2 Class A คึงแสดงเปกตรัมของกระแสด้านเข้าที่ฮาร์มอนิกอันดับต่างๆดังรูปที่ 4.24(ข)

2.3) สภาวะโหลดหนัก (100% โหลดพิกัด, กระแสเดเดเตอร์ $\approx 2.0 A$)

ที่สภาวะโหลดหนักผลการทดลองแสดงรูปคลื่นของกระแสด้านออกและกระแสทางด้านเข้าของวงจรได้ดังรูปที่ 4.23 จากผลการทดสอบการทำงานที่ได้จะเห็นว่ารูปคลื่นของกระแสด้านออกทั้ง 3 เฟส มีรูปร่างเป็น ไซน์ที่ความถี่ 25 Hz กระแสด้านออกจะมีระลอกคลื่นที่ความถี่การสวิตซ์ปรากฏให้เห็นมากขึ้น แต่ขนาดจะเล็กกว่าในกรณีอินเวอร์เตอร์ทำงานที่ 50 Hz ทั้งนี้ก็เนื่องจากว่ากำลังงานขาออกของอินเวอร์เตอร์ลดลงตามความถี่ขาออก ทำให้โหลดของวงจรเรียงกระแสด้านเข้ามีค่าน้อยกว่าในกรณี 50 Hz ผลก็คือวงจรเรียงกระแสจะทำงานที่ความถี่การสวิตซ์ที่สูงกว่ากรณี 50 Hz ระลอกคลื่นของกระแสเดเดเตอร์จึงมีค่าน้อยกว่า ส่วนรูปคลื่นของกระแสทางด้านเข้าก็มีรูปร่างเป็น ไซน์ เมื่อทำการวัดค่าองค์ประกอบฮาร์มอนิก ได้ค่า THD ของกระแสด้านเข้าประมาณ 4.42 % ค่าตัวประกอบกำลัง (PF) มีค่าเท่ากับ 0.996 ค่า THD ของแรงดันจากแหล่งจ่ายที่ใช้ในการทดลองประมาณ 2.7 % ผลของค่ากระแสฮาร์มอนิกที่อันดับต่างๆมีค่าไม่เกินมาตรฐาน IEC 61000-3-2 Class A คึงแสดงเปกตรัมของกระแสด้านเข้าที่ฮาร์มอนิกอันดับต่างๆได้ดังรูปที่ 4.24(ค)

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.21 – 4.24 พบว่าปริมาณกระแสฮาร์มอนิกอันดับหลักคืออันดับที่ 3 นั้น ยังคงมีค่าอยู่ในช่วง 3 – 4 % เช่นเดียวกับกรณีอินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่ 50 Hz ส่วนอันดับที่มีค่ารองลงมาคืออันดับที่ 5 นั้นก็มีค่าประมาณ 2 % เช่นเดิม

3) เมื่อความถี่กำลังเท่ากับ 12.5 Hz

การทดลองในหัวข้อนี้เราจะทำการทดลองโดยให้วงจรอินเวอร์เตอร์เสมือนต่อแบบวี สร้างแรงดันด้านออกความถี่ 12.5 Hz โดยที่ขนาดของแรงดันบัสไฟตรงยังมีขนาดเท่าเดิมคือ 620 V เราทำการทดลองวงจรโดยการเปลี่ยนโหลดไปที่ระดับต่างๆ ดังได้ผลการทดลองในแต่ละระดับดังนี้

3.1) สภาวะโหลดเบา (0% โหลดพิกัด, กระแสเดเทคเตอร์ ≈ 1.4 A)

ที่สภาวะโหลดเบา ผลการทดลองแสดงรูปคลื่นของกระแสด้านออกและกระแสทางด้านเข้าของวงจรได้ดังรูปที่ 4.25 จากผลการทดสอบการทำงานที่ได้จะเห็นว่ารูปคลื่นของกระแสด้านออกทั้ง 3 เฟส มีรูปร่างเป็นไซน์ที่มีความถี่ 12.5 Hz ตามที่ส่งรูปคลื่นของกระแสจะเริ่มมีความผิดเพี้ยนอยู่บ้างเนื่องจากผลของค่าเวลาประวิงที่ชดเชยได้ไม่สมบูรณ์และแรงดันเดเทคเตอร์ที่อินเวอร์เตอร์จ่ายมีค่าน้อย จึงทำให้เห็นผลกระทบของค่าเวลาประวิงสูงกว่ากรณีก่อนๆ มา ส่วนรูปคลื่นของกระแสทางด้านเข้าก็มีรูปร่างใกล้เคียงไซน์แต่จะมีกระแสฮาร์มอนิกปะปนอยู่ ซึ่งฮาร์มอนิกอันดับที่เด่นชัดคืออันดับที่ 13 เมื่อทำการวัดค่าองค์ประกอบฮาร์มอนิกได้ค่า THD ของกระแสด้านเข้าประมาณ 10.22 % มีค่าตัวประกอบกำลัง (PF) มีค่าเท่ากับ 0.943 ค่า THD ของแรงดันจากแหล่งจ่ายที่ใช้ในการทดลองประมาณ 2.7 % ผลของค่ากระแสฮาร์มอนิกที่อันดับต่างๆ มีค่าไม่เกินมาตรฐาน IEC 61000-3-2 Class A ดังแสดงเปกครัมของกระแสด้านเข้าที่ฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ ได้ดังรูปที่ 4.28(ก)

3.2) สภาวะโหลดปานกลาง (50% โหลดพิกัด, กระแสเดเทคเตอร์ ≈ 1.6 A)

ที่สภาวะโหลดปานกลางผลการทดลองแสดงรูปคลื่นของกระแสด้านออกและกระแสทางด้านเข้าของวงจรได้ดังรูปที่ 4.26 จากผลการทดสอบการทำงานที่ได้จะเห็นว่ารูปคลื่นของกระแสด้านออกทั้ง 3 เฟส มีรูปร่างเป็นไซน์ที่มีความถี่ 12.5 Hz กระแสด้านออกจะมีระลอกคลื่นที่ความถี่การสวิตซ์ไม่เพิ่มขึ้นด้วยเหตุผลที่ได้กล่าวมาแล้ว ส่วนรูปคลื่นของกระแสทางด้านเข้าก็มีรูปร่างเป็นไซน์มากขึ้นโดยฮาร์มอนิกหลักอยู่ที่อันดับ 3 และ 9 เมื่อทำการวัดค่าองค์ประกอบฮาร์มอนิก ได้ค่า THD ของกระแสด้านเข้าประมาณ 5.92 % มีค่าตัวประกอบกำลัง (PF) มีค่าเท่ากับ 0.9714 ค่า THD ของแรงดันจากแหล่งจ่ายที่ใช้ในการทดลองประมาณ 2.6 % ผลของค่ากระแสฮาร์มอนิกที่อันดับต่างๆ มีค่าไม่เกินมาตรฐาน IEC 61000-3-2 Class A ดังแสดงเปกครัมของกระแสด้านเข้าที่ฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ ได้ดังรูปที่ 4.28(ข)

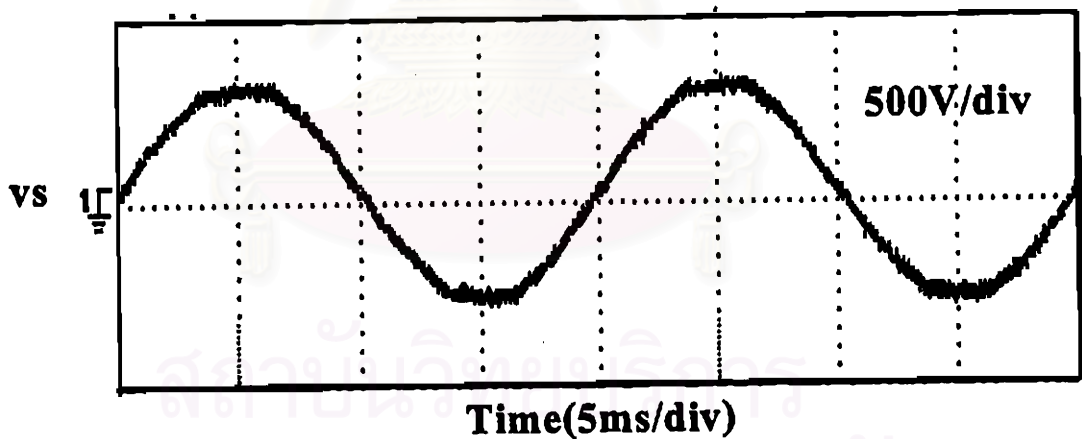
3.3) สภาวะโหลดหนัก (100% โหลดพิกัด, กระแสเดเทคเตอร์ ≈ 2.0 A)

ที่สภาวะโหลดหนักผลการทดลองแสดงรูปคลื่นของกระแสด้านออกและกระแสทางด้านเข้าของวงจรได้ดังรูปที่ 4.27 จากผลการทดสอบการทำงานที่ได้จะเห็นว่ารูปคลื่นของกระแสด้านออกทั้ง 3 เฟส มีรูปร่างเป็นไซน์ที่มีความถี่ 12.5 Hz กระแสด้านออกยังคงมีระลอกคลื่นที่ความถี่การสวิตซ์ต่ำเช่นเดิม ส่วนรูปคลื่นของกระแสทางด้านเข้าก็มีรูปร่างเป็นไซน์โดยฮาร์มอนิกหลักก็ยังคง

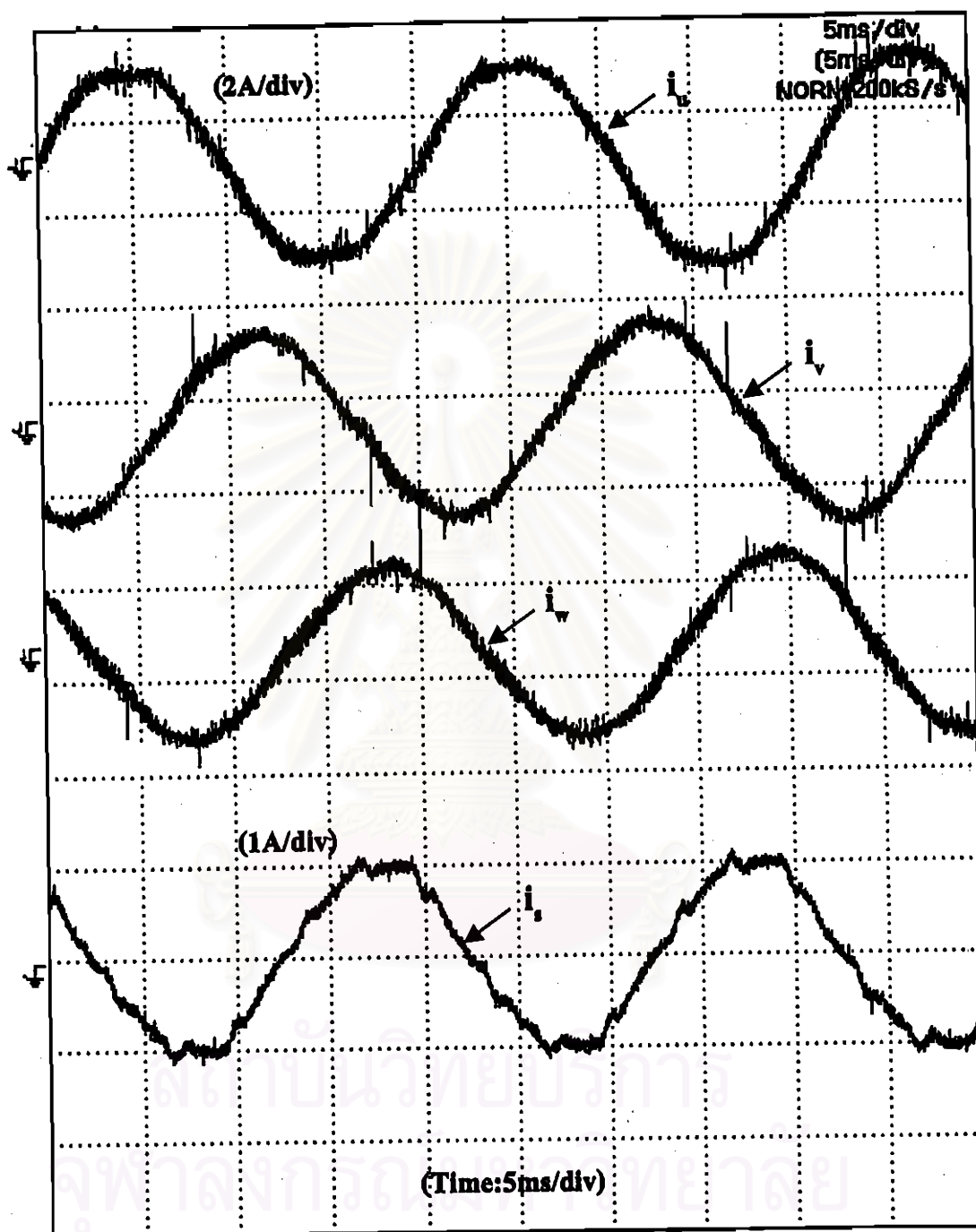
อยู่ที่อันดับ 3 และ 9 เหมือนในกรณีโหลดปานกลาง เมื่อทำการวัดค่าองค์ประกอบฮาร์มอนิก ได้ค่า THD ของกระแสด้านเข้าประมาณ 5.35 % มีค่าตัวประกอบกำลัง (PF) มีค่าเท่ากับ 0.977 ค่า THD ของแรงดันจากแหล่งจ่ายที่ใช้ในการทดลองประมาณ 2.7 % ผลของค่ากระแสฮาร์มอนิกที่อันดับต่างๆมีค่าไม่เกินมาตรฐาน IEC 61000-3-2 Class A ดังแสดงเป็กราฟของกระแสด้านเข้าที่ฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ ได้ดังรูปที่ 4.28(ก)

จากผลการทดลองทั้งหมดเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงความถี่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ณ ค่าโหลดต่างๆ เราสามารถสรุปได้ว่า วงจรอินเวอร์เตอร์เสมือนต่อแบบวีและวงจรเรียงกระแสแบบวิธีสวิทซ์ที่ได้พัฒนาโดยการบูรณาการเข้าด้วยกันนั้น สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยทำให้ฮาร์มอนิกของกระแสด้านเข้าตกลงอย่างมาก ค่า THD อยู่ในช่วงประมาณ 4-5 % และ Total P.F. มีค่าประมาณ 0.9793 รูปคลื่นกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่สูงจนถึงค่า (50 - 12.5 Hz) ก็มีความผิดเพี้ยนจากรูปคลื่นไซน์น้อย แสดงให้เห็นว่าวิธีการชดเชยผลของค่าเวลาประวิงที่นำเสนอ มีประสิทธิภาพดีใช้งานได้จริง

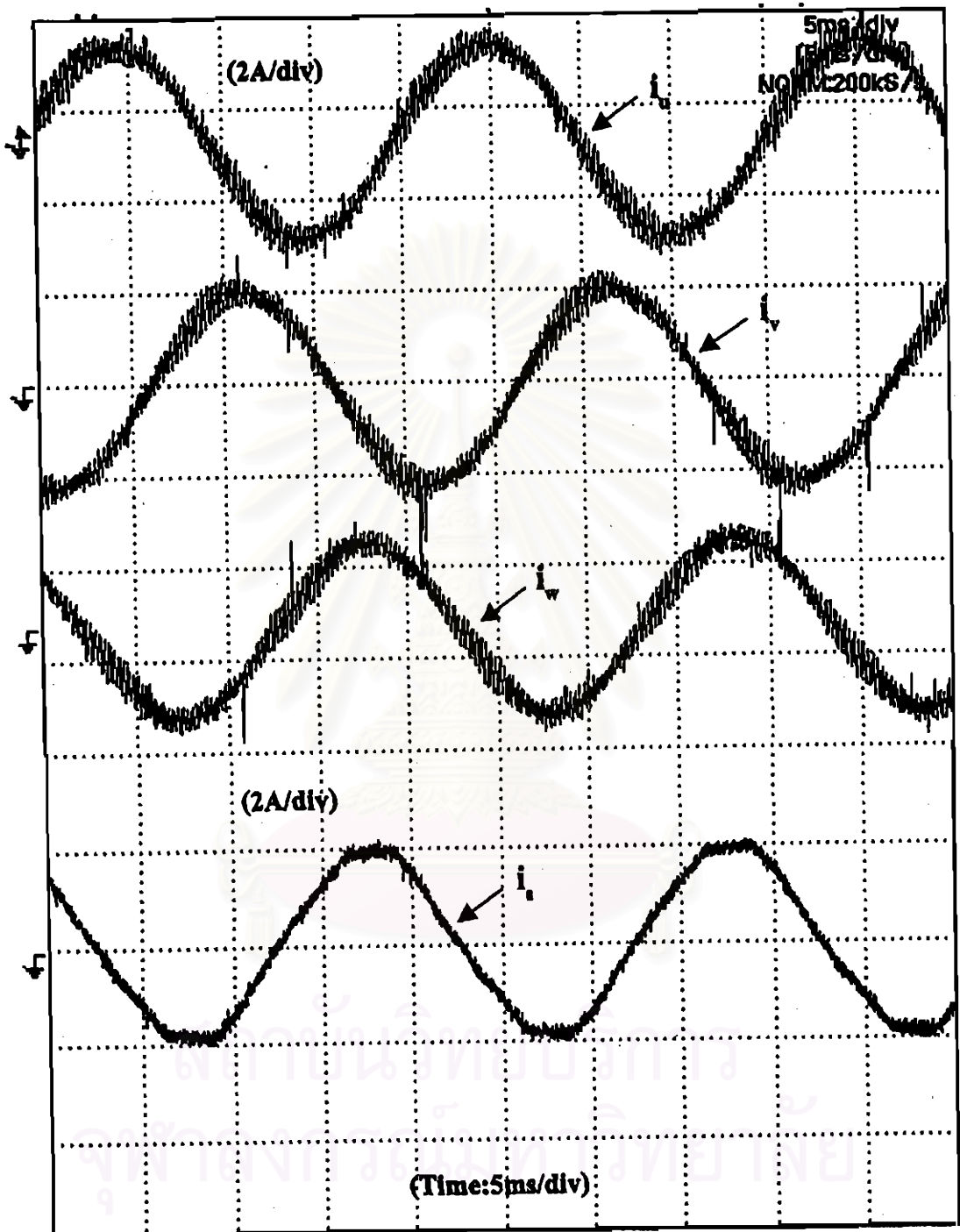
เราทำการแสดงตัวอย่างรูปคลื่นของแรงดันจากแหล่งจ่ายที่ใช้ในการทดลอง เพื่อพิจารณาความเพี้ยนของแรงดันที่มาจากแหล่งจ่าย ได้ดังรูปที่ 4.16



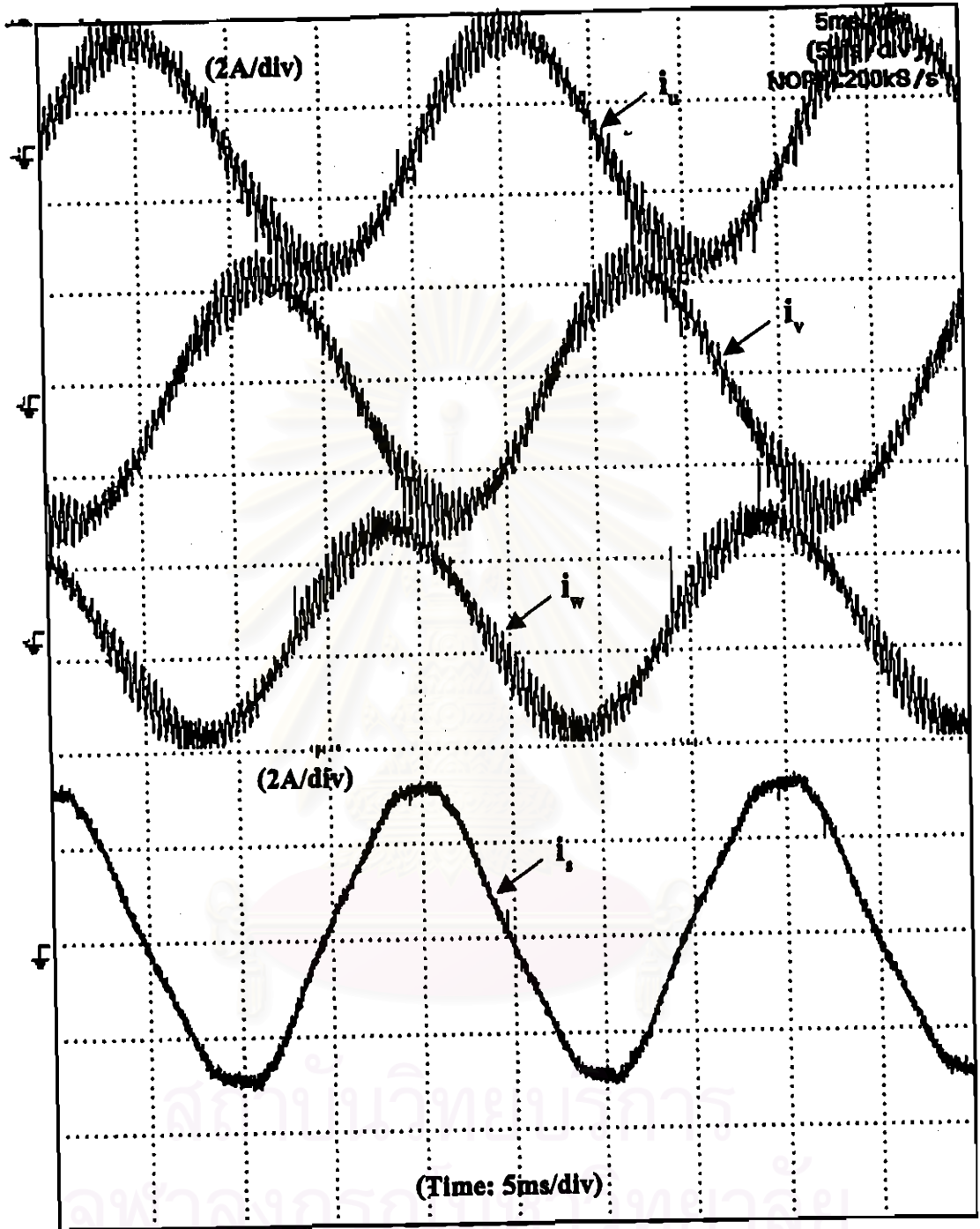
รูปที่ 4.16 รูปคลื่นของแรงดันจากแหล่งจ่ายที่ใช้ในการทดลอง



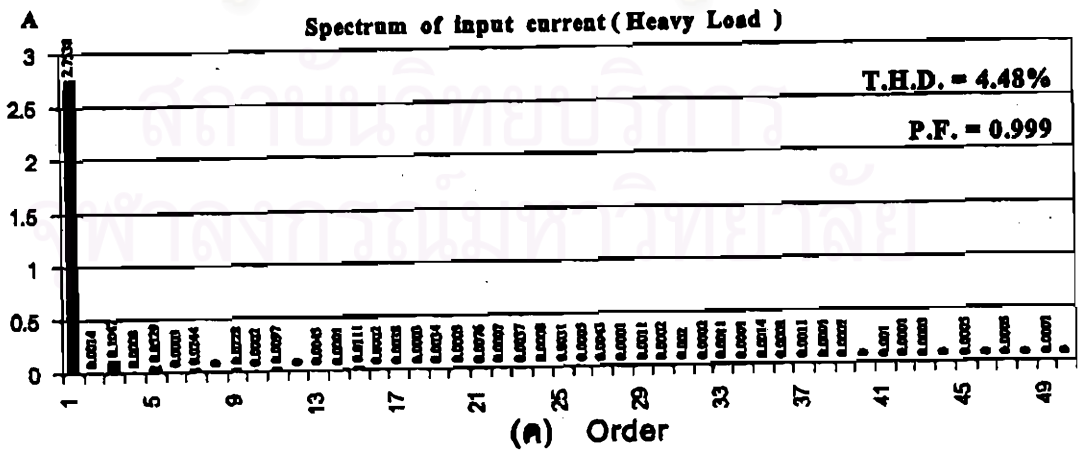
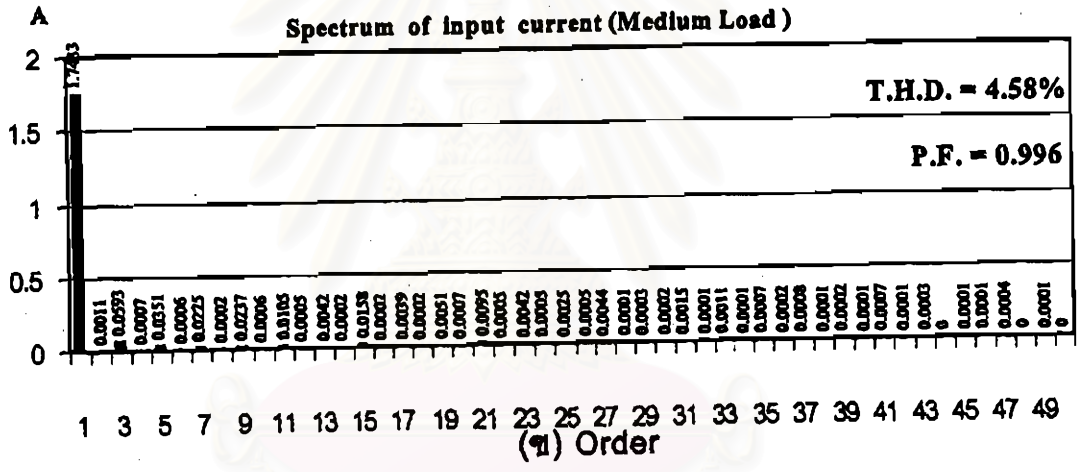
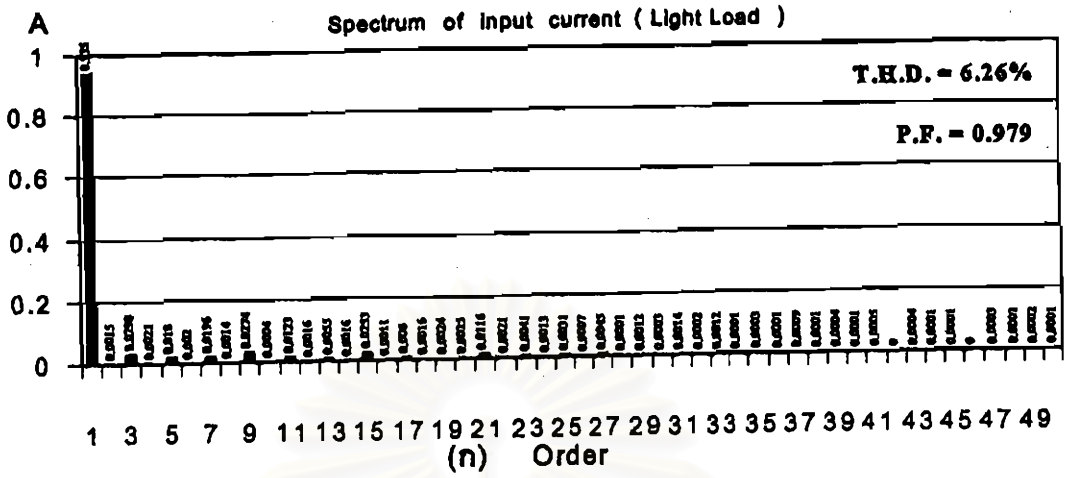
รูปที่ 4.17 รูปคลื่นของกระแสด้านออกและกระแสด้านเข้าของระบบรวมทั้งกำลังความถี่ 50 Hz และสถานะโหลดเบา



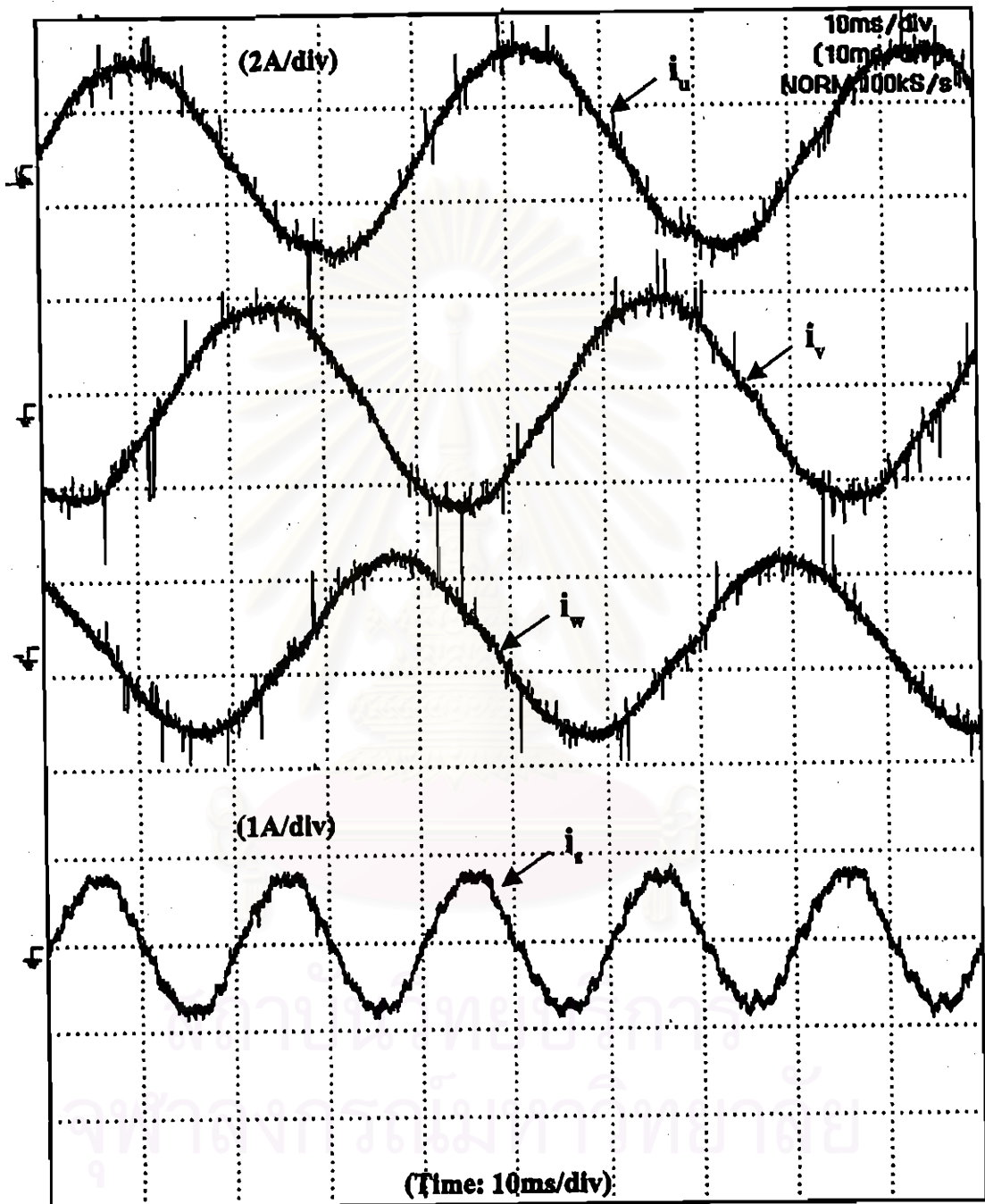
รูปที่ 4.18 รูปคลื่นของกระแสด้านออกและกระแสด้านเข้าของระบบรวม ที่กำลังความถี่ 50 Hz และสภาวะโหลดปานกลาง



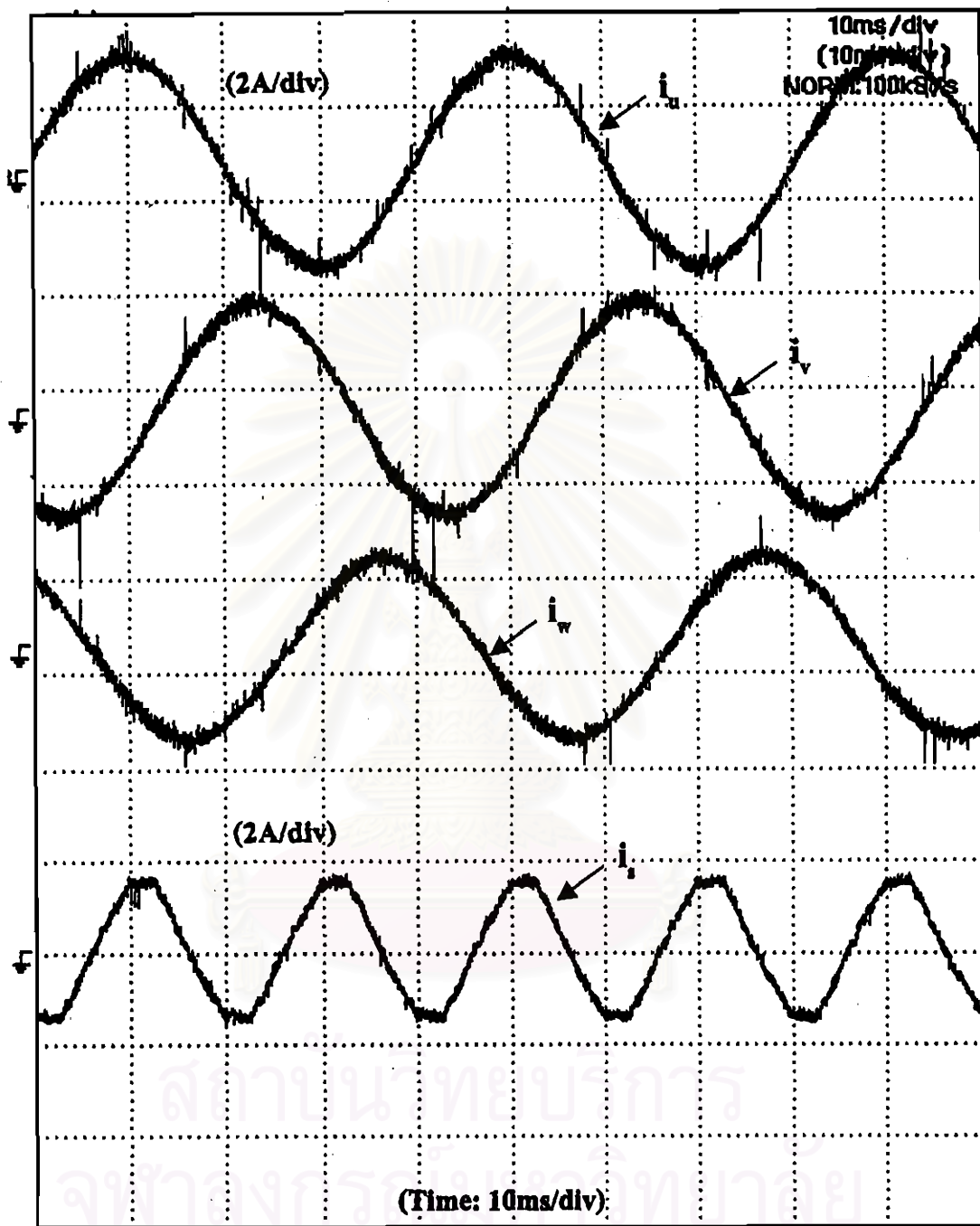
รูปที่ 4.19 รูปคลื่นของกระแสด้านออกและกระแสด้านเข้าของระบบรวม ที่ค่าตั้งความถี่ 50 Hz และสถานะโหลดหนัก



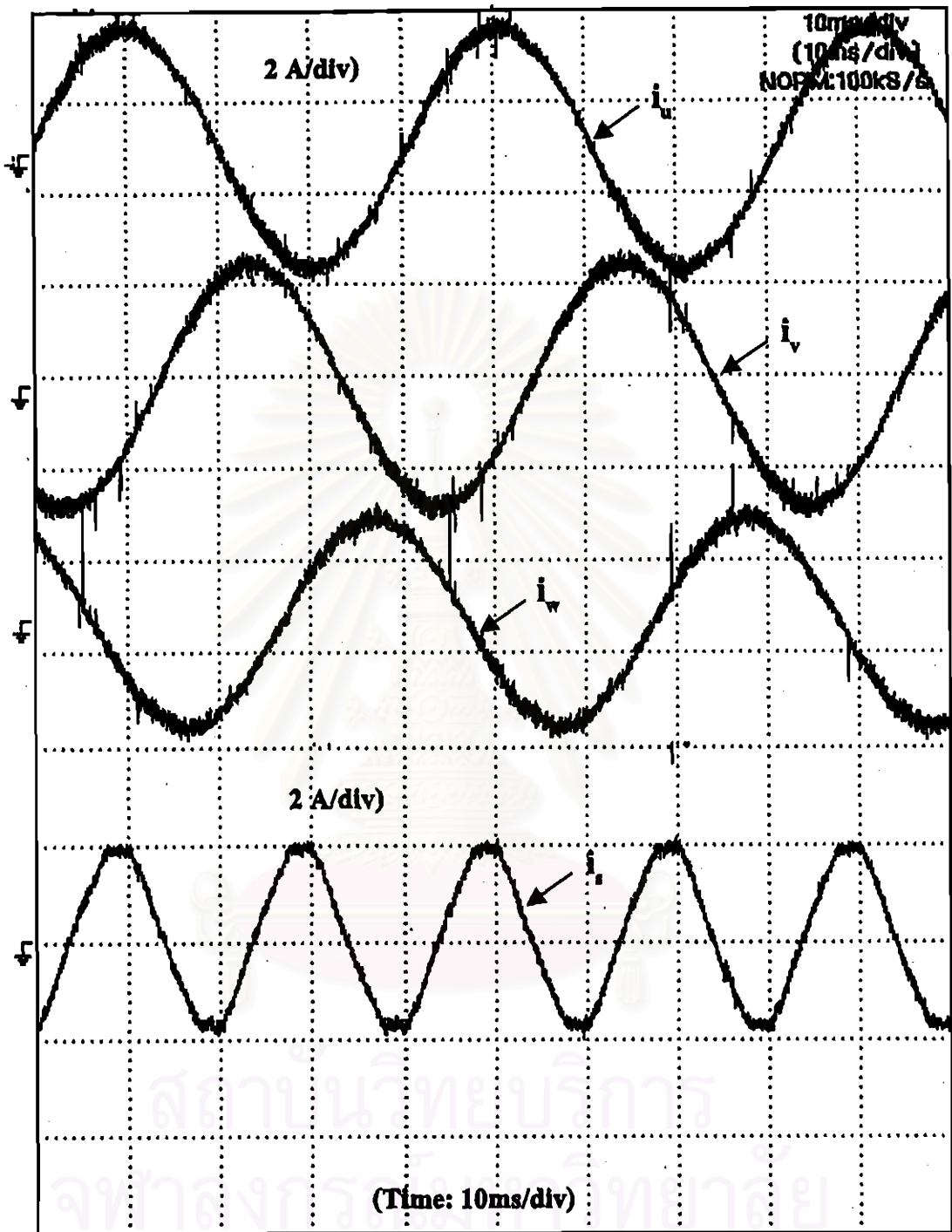
รูปที่ 4.20 สเปกตรัมของกระแสทางด้านเข้าที่สถานะต่างๆ เมื่อวงจรอินเวอร์เตอร์ทำงานที่ค่าตั้งความถี่ 50 Hz



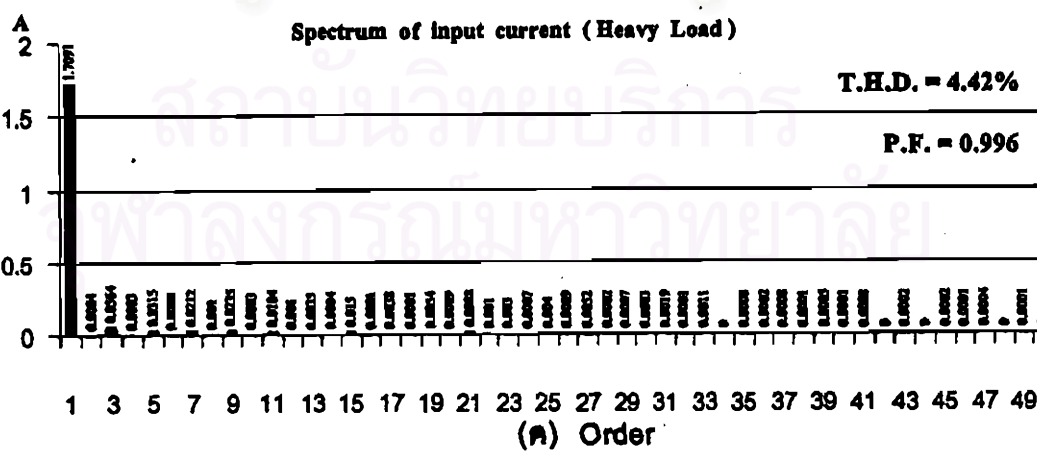
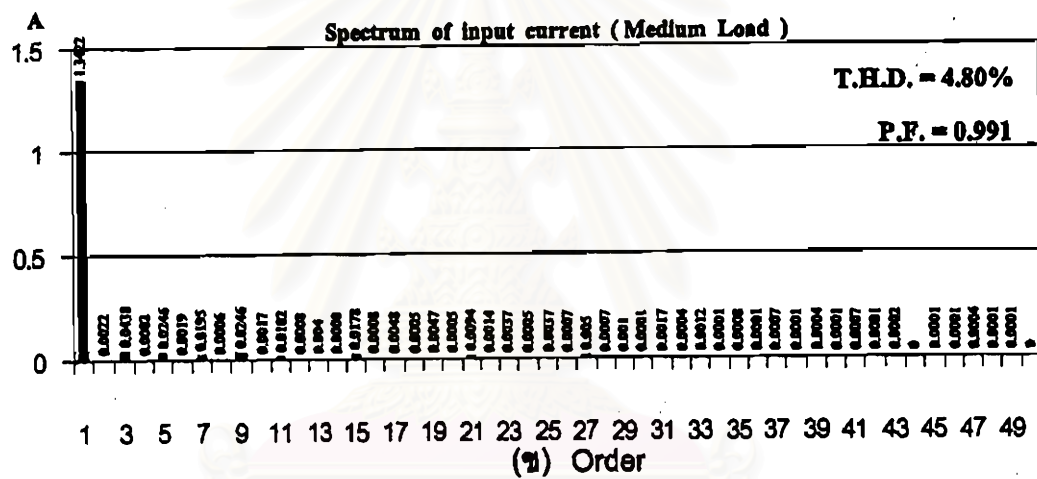
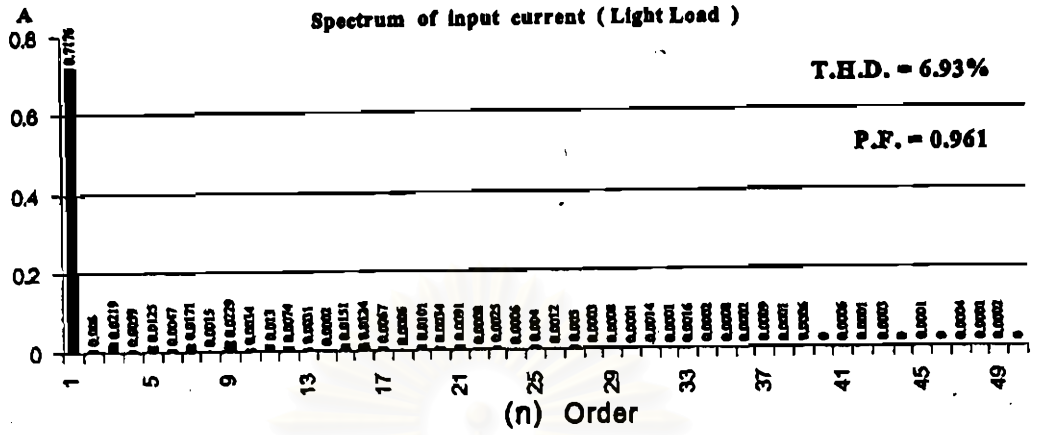
รูปที่ 4.21 รูปคลื่นของกระแสด้านออกและกระแสด้านเข้าของระบบรวม ที่กำลังความถี่ 25 Hz และสภาวะโหลดเบา



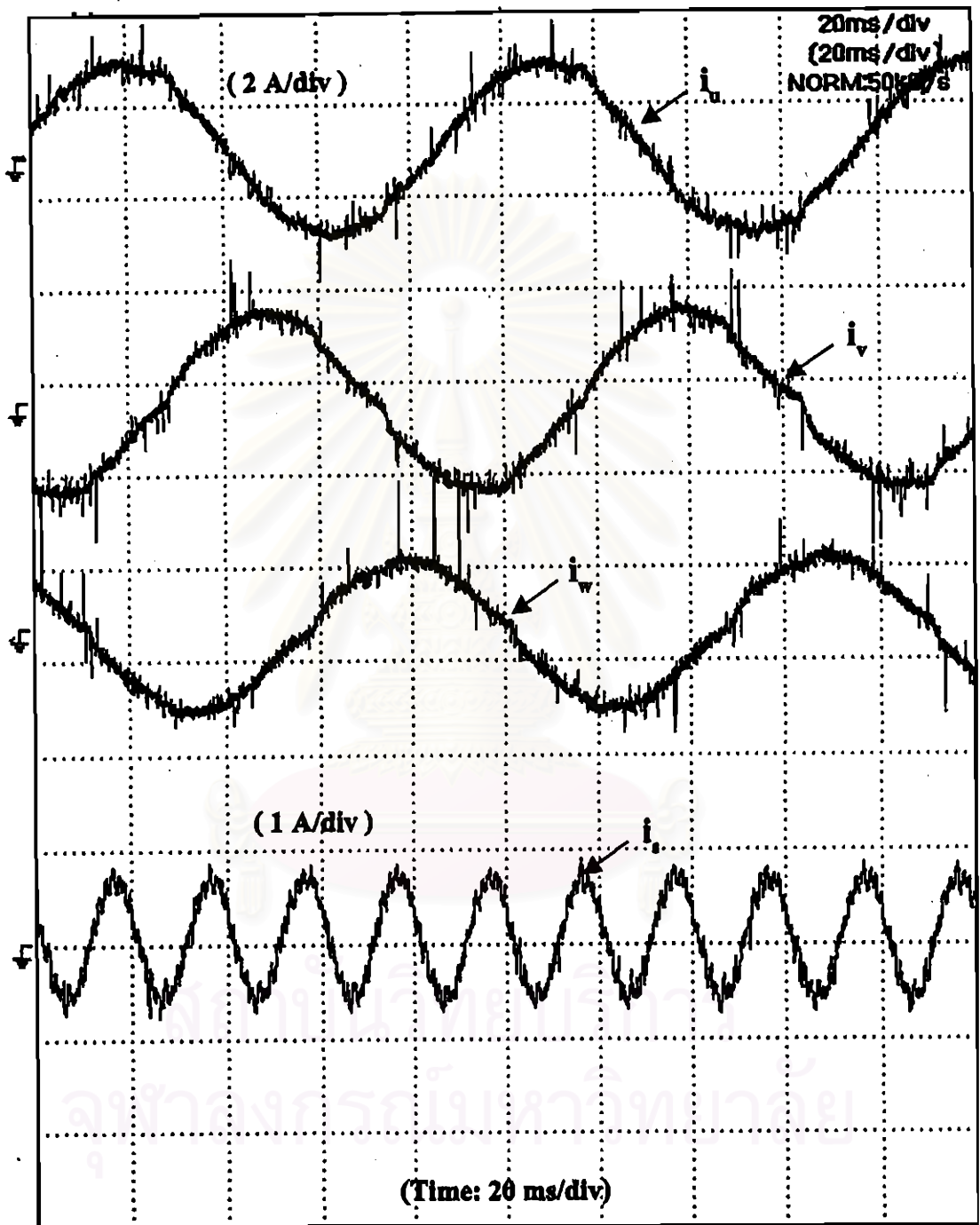
รูปที่ 4.22 รูปคลื่นของกระแสด้านออกและกระแสด้านเข้าของระบบรวม ที่กำลังความถี่ 25 Hz และสถานะโหลดปานกลาง



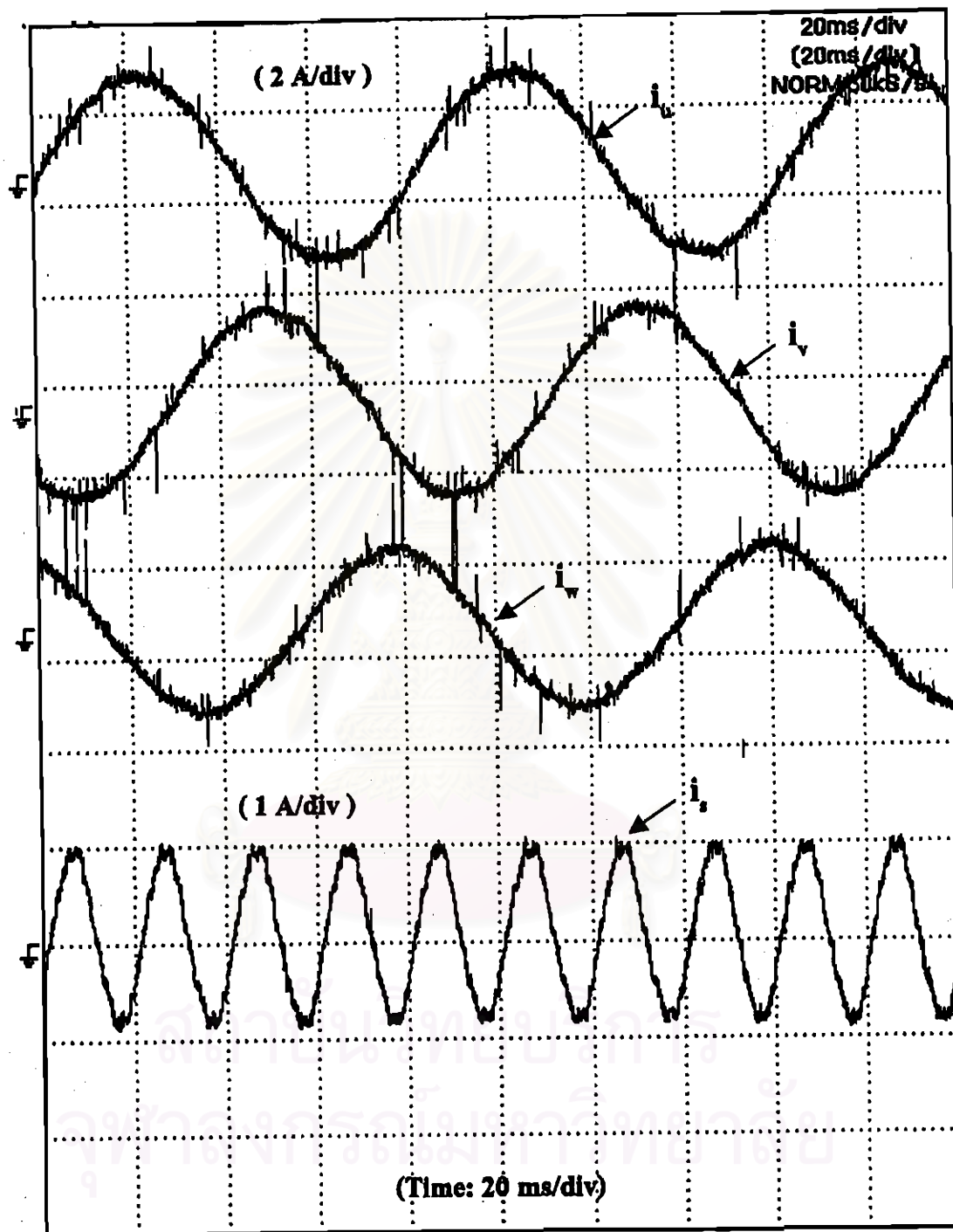
รูปที่ 4.23 รูปคลื่นของกระแสด้านออกและกระแสด้านเข้าของระบบรวม ที่กำลังความถี่ 25 Hz และสถานะโหลดหนัก



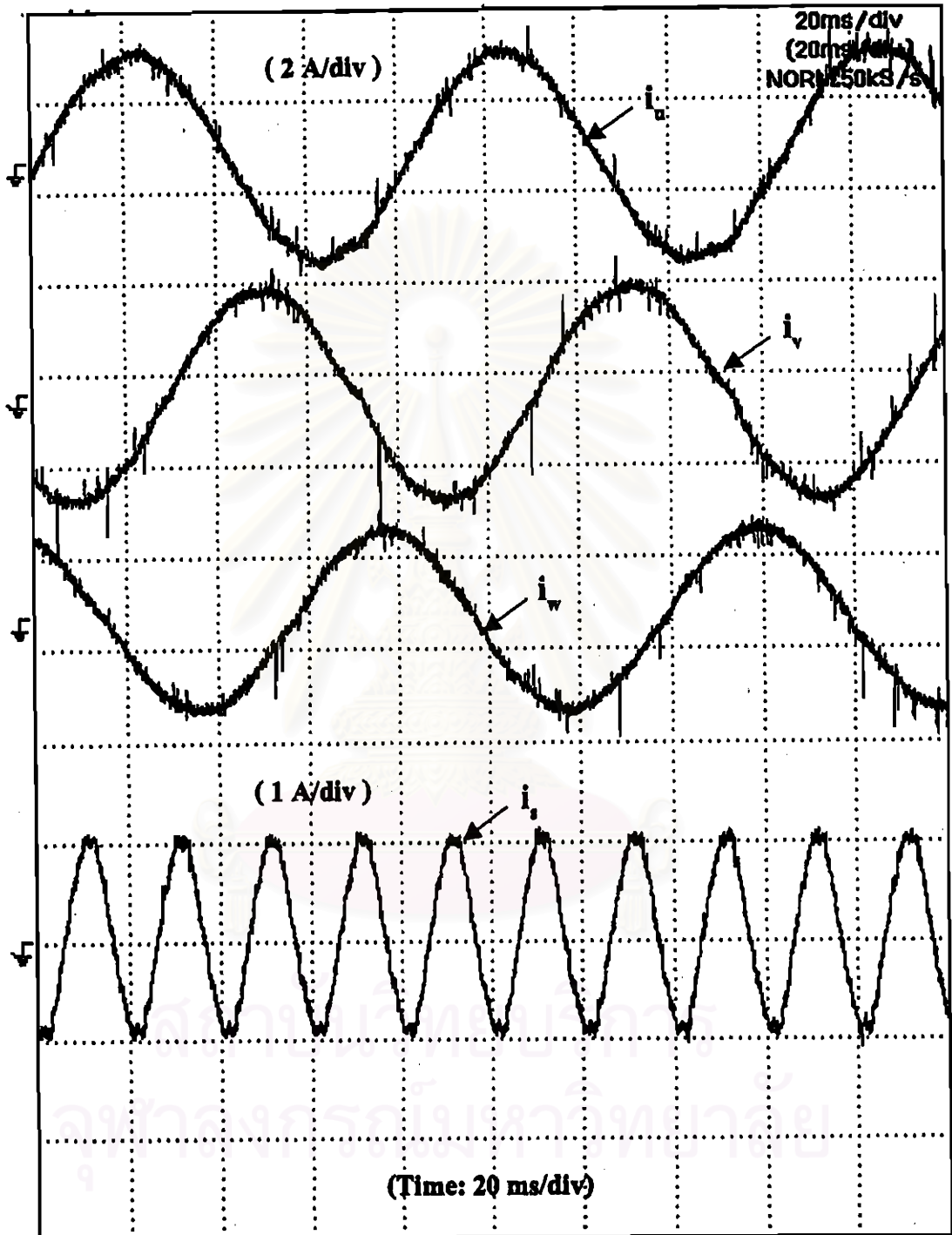
รูปที่ 4.24 สเปกตรัมของกระแสทางค่านเข้าที่สภาวะต่างๆ เมื่อวงจรมอเตอร์ทำงานที่ค่าตั้งความถี่ 25 Hz



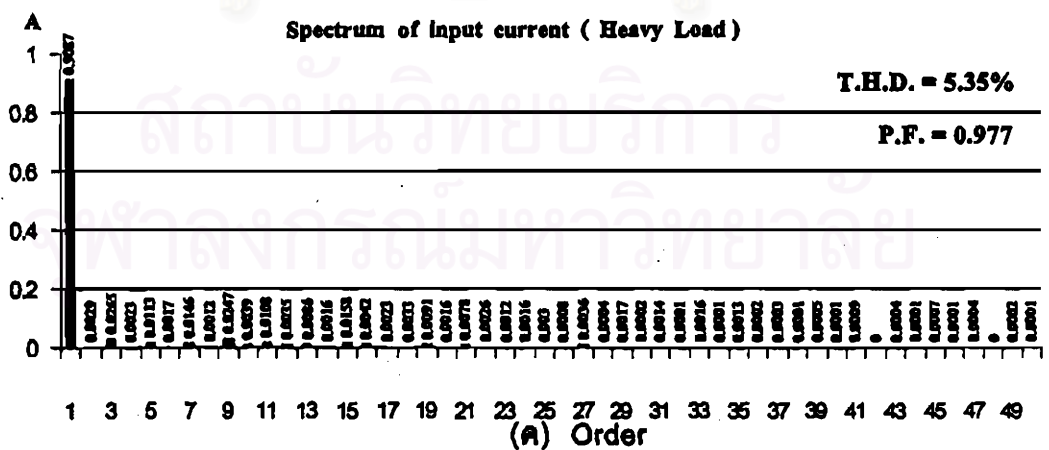
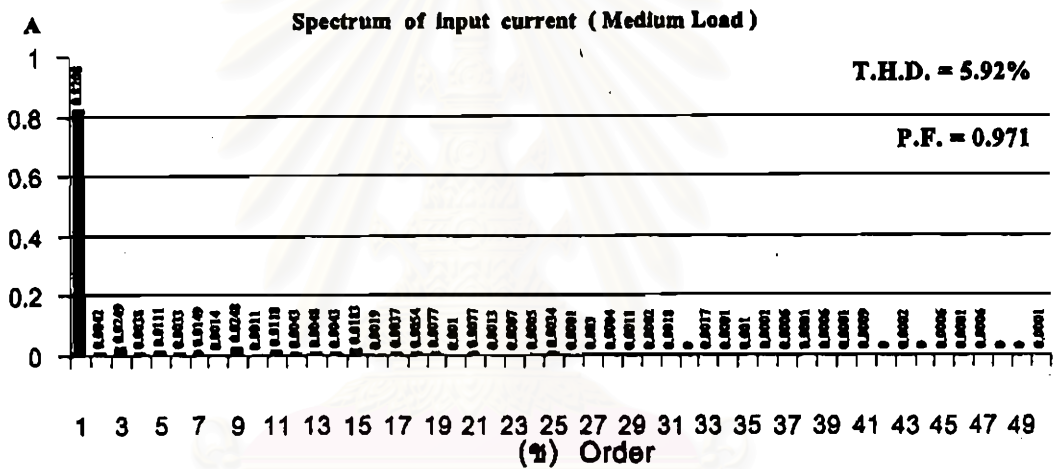
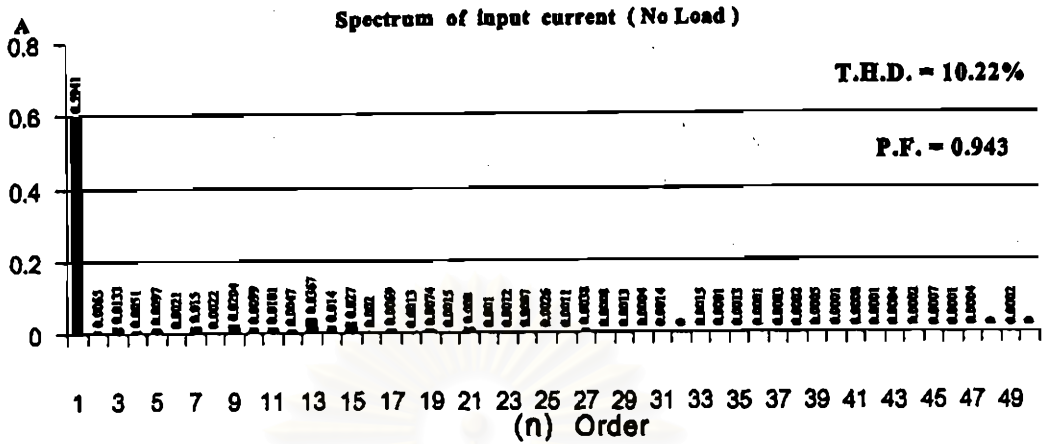
รูปที่ 4.25 รูปคลื่นของกระแสด้านออกและกระแสด้านเข้าของระบบรวม ที่ค่าตั้งความถี่ 12.5 Hz และสถานะ โหลดเบา



รูปที่ 4.26 รูปคลื่นของกระแสด้านออกและกระแสด้านเข้าของระบบรวม ที่กำลังความถี่ 12.5 Hz และสถานะโหลดปานกลาง



รูปที่ 4.27 รูปคลื่นของกระแสด้านออกและกระแสด้านเข้าของระบบรวม ที่กำลังความถี่ 25 Hz และสภาวะโหลดหนัก



รูปที่ 4.28 สเปกตรัมของกระแสทางค่านเข้าที่สภาวะต่างๆ เมื่อวงจรถอนแวนเตอร์ทำงานที่ค่าตั้งความถี่ 12.5 Hz

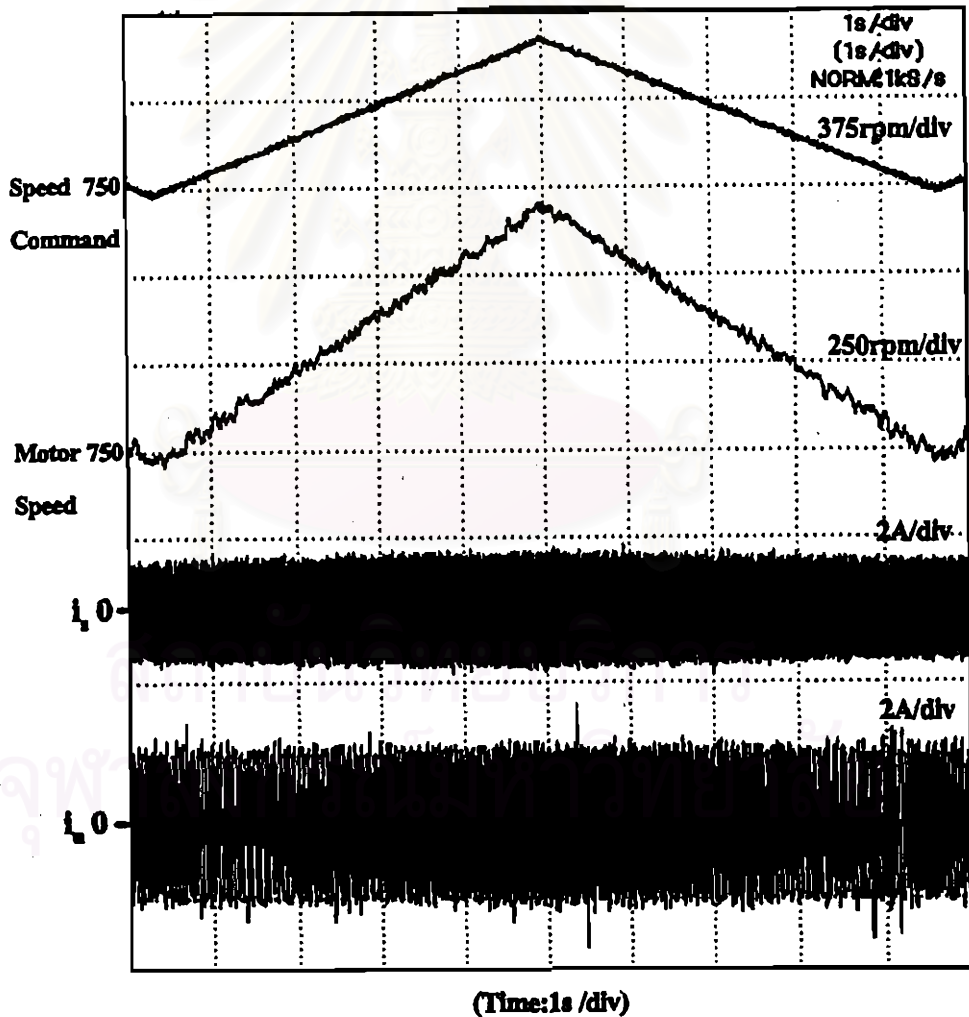
ตารางที่ 4.1 ขนาดกระแสมอนิเตอร์อันดับต่างๆของกระแสด้านเข้าเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน

สถานะโหลด	ความถี่คำสั่ง (Hz)	ขนาดกระแสมอนิเตอร์อันดับต่างๆ (%)		
		3	5	7
มาตรฐาน IEC		14.3	7.12	4.8
โหลดเบา	50	3.19	1.93	2.10
โหลดปานกลาง		3.40	2.01	1.29
โหลดหนัก		3.80	1.92	0.88
โหลดเบา	25	3.05	1.75	2.38
โหลดปานกลาง		3.26	1.84	1.45
โหลดหนัก		3.30	1.85	1.24
โหลดเบา	12.5	2.23	1.63	2.52
โหลดปานกลาง		3.03	1.35	1.81
โหลดหนัก		2.92	1.24	1.61

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

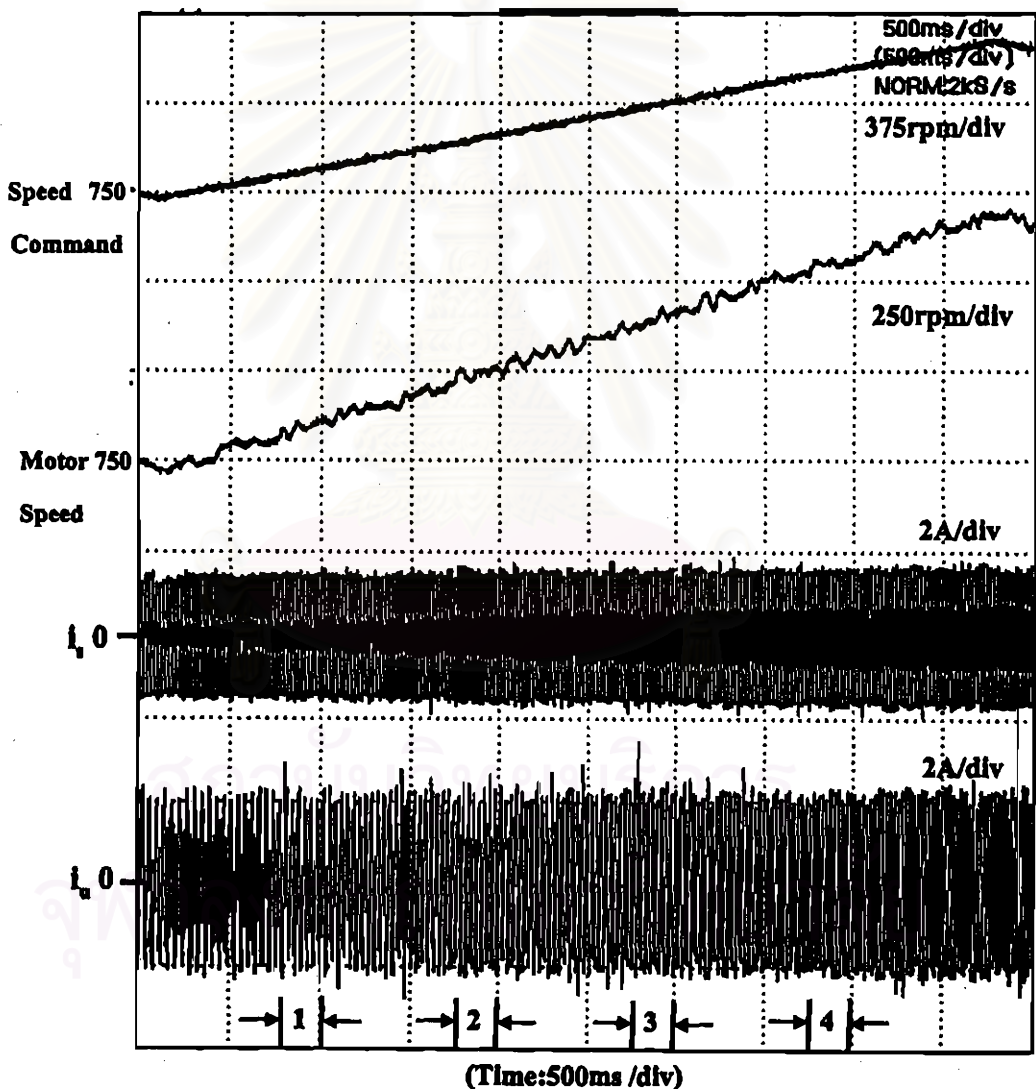
ก) ผลการทดสอบการทำงานของระบบรวม เมื่อมีการเร่งหรือลดความเร็วของมอเตอร์

เพื่อทดสอบการทำงานของวงจรรีเลย์มอเตอร์เสมือนต่อแบบวีว่าสามารถควบคุมความเร็วมอเตอร์ในเชิงพลวัตคือเร่งหรือลดความเร็วโดยการปรับเปลี่ยนคำสั่งความถี่ซึ่งจะเป็นวิธีการพื้นฐานในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้หรือไม่ เราจึงทำการทดสอบโดยให้อินเวอร์เตอร์ทำการเร่งลดความเร็วมอเตอร์โดยการแปรเปลี่ยนคำสั่งความถี่ จาก 25 Hz ไปถึง 50 Hz และลดความถี่ลงจาก 50 Hz เป็น 25 Hz ในลักษณะเชิงเส้นเช่นกันสลับไปมาเช่นนี้เรื่อยไปตลอดการทดลอง ผลการทดลองในรูปที่ 4.29 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความเร็วและความถี่ ตลอดจนลักษณะของกระแสด้านเข้าและกระแสเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ



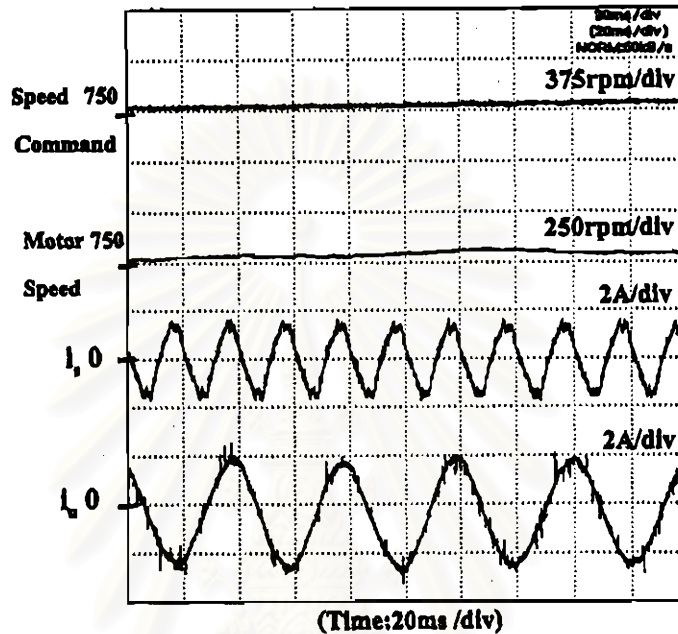
รูปที่ 4.29 ผลการทดลองแสดงการเปลี่ยนแปลงของความเร็วมอเตอร์ กระแสด้านเข้าและกระแสเฟส U ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เมื่อทำการเร่งลดความเร็วระหว่าง 750 rpm และ 1500 rpm

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.29 จะเห็นว่าวงจรมอเตอร์เซอร์โวมอเตอร์เกือบจะเหมือนกับแบบวีที่เรากำลังสร้างขึ้น สามารถแปรเปลี่ยนความเร็วได้ทั้งขาขึ้นและขาลง โดยความเร็วจริงที่สามารถวัดได้นั้นก็จะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามคำสั่งความเร็ว ส่วนรูปคลื่นของกระแสค่านเข้าและกระแสเฟส U ของมอเตอร์ก็ยังคงมีรูปร่างเป็นไซน์ แต่เราไม่สามารถมองเห็นลักษณะรูปคลื่นของกระแสได้ชัดเจนจากผลในรูปที่ 4.29 เราจึงทำการเก็บข้อมูลโดยการขยายสเกลให้ละเอียดขึ้นโดยแบ่งช่วงการเก็บผลการทดลองเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงเร่งความเร็วและช่วงลดความเร็ว ตามลำดับ ได้ผลการทดลองดังนี้ แสดงในรูปที่ 4.30 – 4.39

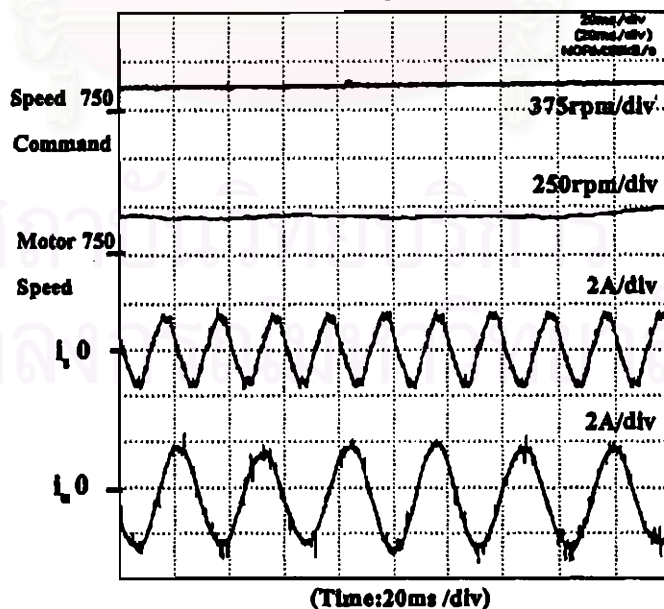


รูปที่ 4.30 ผลการทดลองแสดงการเปลี่ยนแปลงของความเร็วมอเตอร์ กระแสค่านเข้าและกระแสเฟส U ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เมื่อทำการเร่งความเร็วจาก 750 rpm จนถึง 1500 rpm

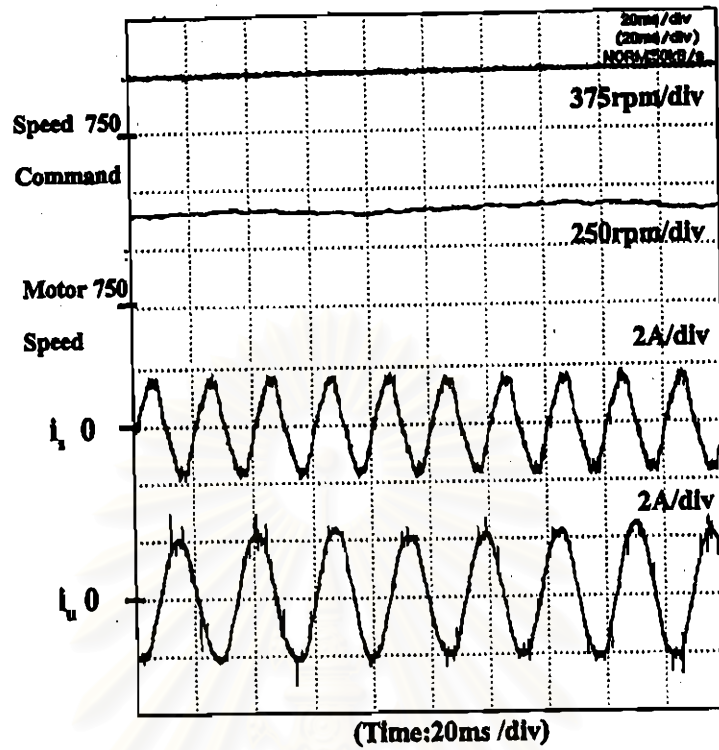
ในช่วงเร่งความเร็วเพื่อความสะดวกในการพิจารณารูปคลื่นของกระแสด้านเข้าและกระแสเฟส B ของมอเตอร์ เราทำการขยายสเกลให้ละเอียดขึ้น โดยแบ่งการเก็บผลเป็น 4 ช่วงเวลาได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.31 ถึง 4.34 ทั้งนี้เราได้แสดงช่วงเวลาทั้ง 4 โดยประมาณไว้ในรูปที่ 4.30 เพื่อประกอบการพิจารณาไว้ด้วย



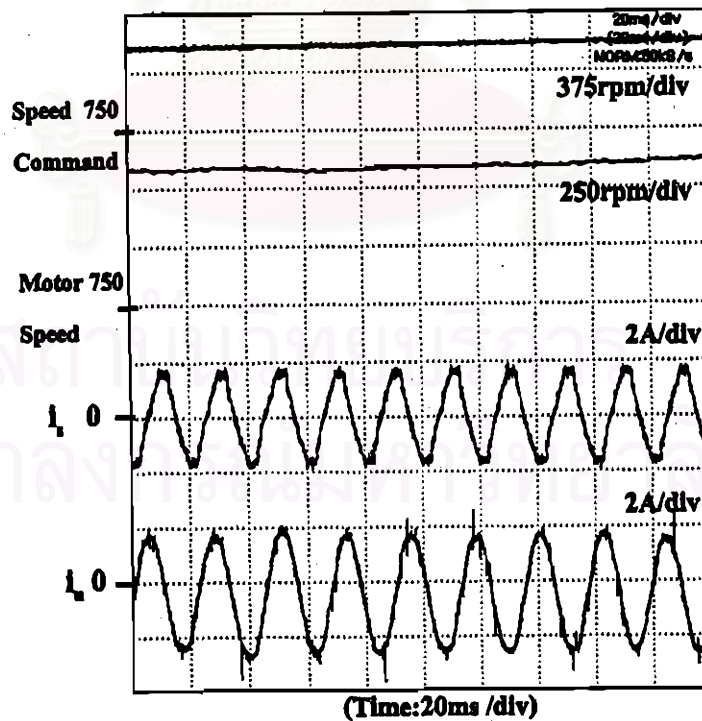
รูปที่ 4.31 รูปคลื่นความเร็วมอเตอร์ กระแสด้านเข้าและกระแสเฟส B ของมอเตอร์เหนี่ยวนำในช่วงเวลาที่ 1 เมื่อทำการเร่งความเร็วจาก 750 rpm ถึง 1500 rpm



รูปที่ 4.32 รูปคลื่นความเร็วมอเตอร์ กระแสด้านเข้าและกระแสเฟส B ของมอเตอร์เหนี่ยวนำในช่วงเวลาที่ 2 เมื่อทำการเร่งความเร็วจาก 750 rpm ถึง 1500 rpm

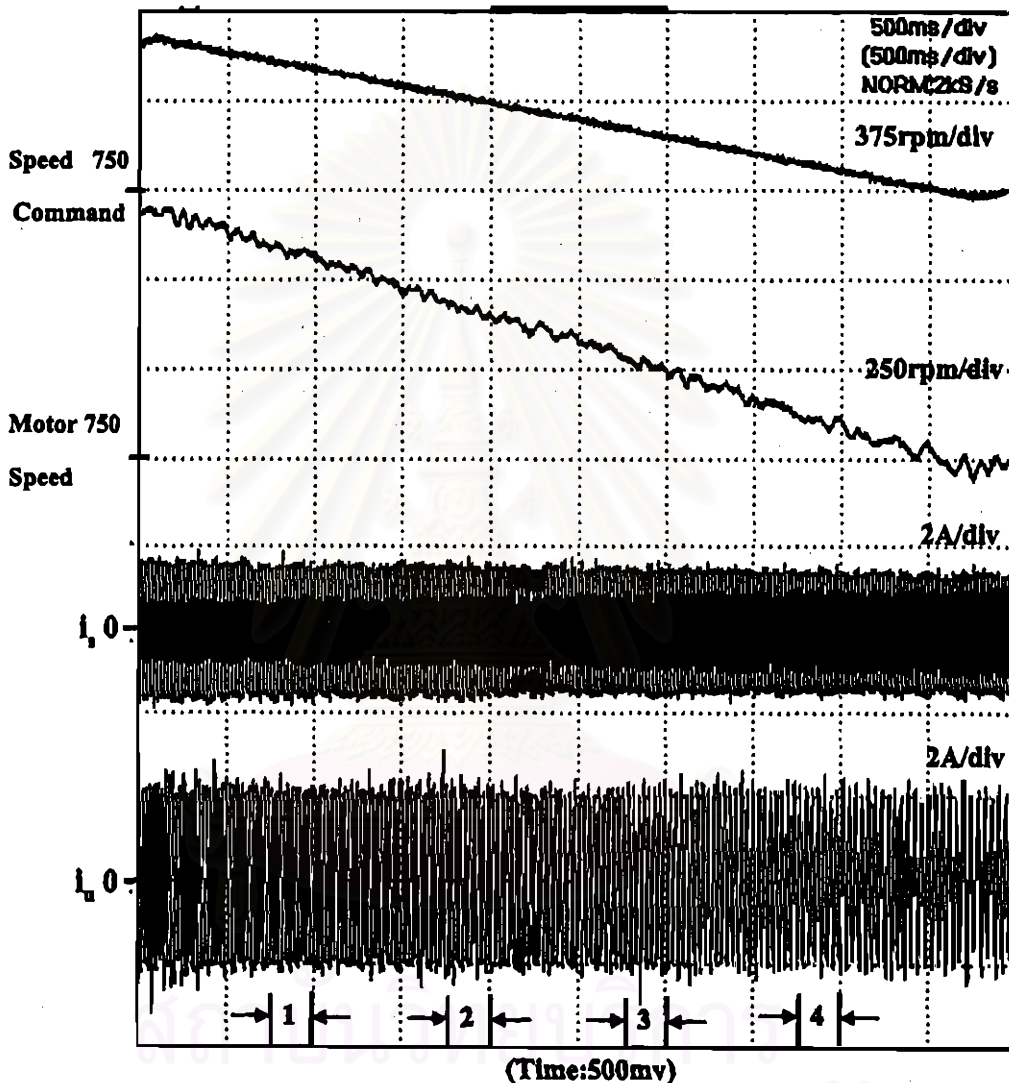


รูปที่ 4.33 รูปคลื่นความเร็วมอเตอร์ กระแสต้านเข้าและกระแสเฟส U ของมอเตอร์เหนี่ยวนำในช่วงเวลาที่ 3 เมื่อทำการเร่งความเร็วจาก 750 rpm ถึง 1500 rpm



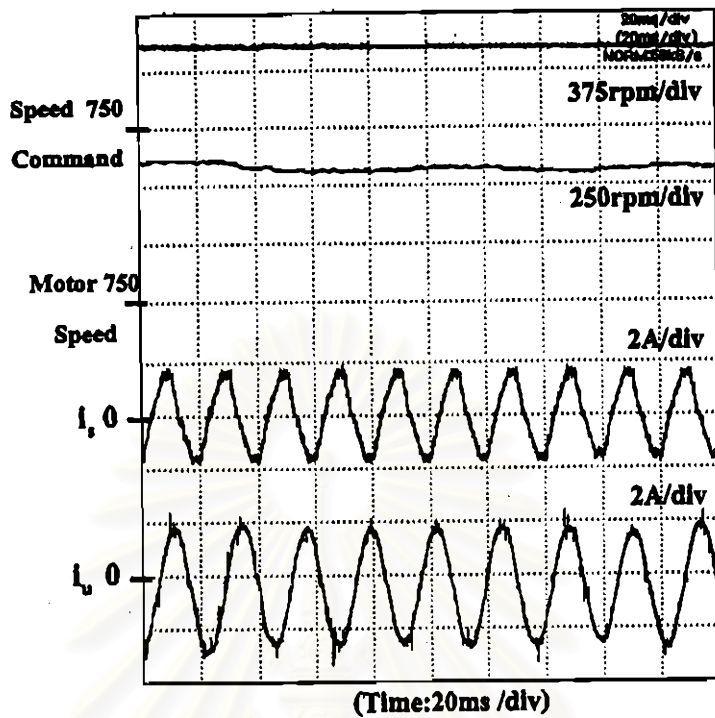
รูปที่ 4.34 รูปคลื่นความเร็วมอเตอร์ กระแสต้านเข้าและกระแสเฟส U ของมอเตอร์เหนี่ยวนำในช่วงเวลาที่ 4 เมื่อทำการเร่งความเร็วจาก 750 rpm ถึง 1500 rpm

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.31 ถึง 4.34 จะพบว่ารูปคลื่นกระแสขาเข้า i_u และกระแสมอเตอร์ i_m มีรูปคลื่นใกล้เคียงไซน์ตามลำดับ ซึ่งหมายความว่า วงจรเรียงกระแสสามารถควบคุมกระแสขาเข้าได้ตลอดเวลาแม้ในช่วงสภาวะชั่วคราวที่มอเตอร์เร่งความเร็วก็ตาม

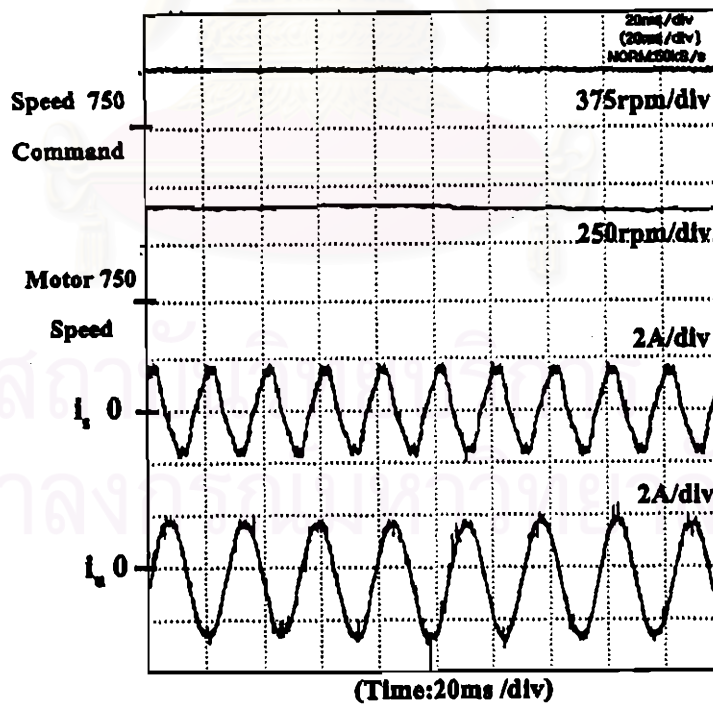


รูปที่ 4.35 ผลการทดลองแสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็วมอเตอร์ กระแสด้านเข้าและกระแสเฟส U ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยลดความเร็วจาก 1500 rpm จนถึง 750 rpm

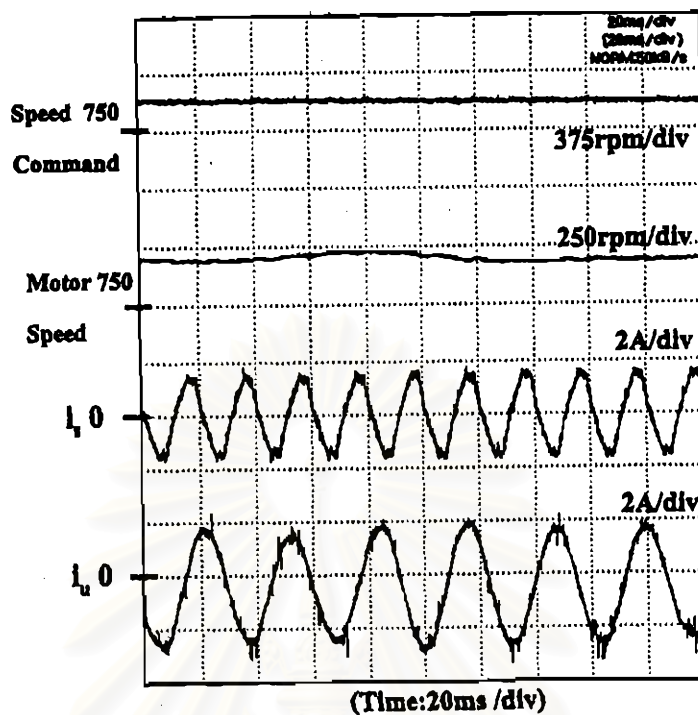
ในทำนองเดียวกันในช่วงลดความเร็วเราทำการขยายสเกลให้ละเอียดขึ้น โดยแบ่งการเก็บผลเป็น 4 ช่วงเวลาเช่นเดียวกันดังได้แสดงช่วงทั้ง 4 โดยประมาณไว้ในรูปที่ 4.35 ผลการทดลองที่ได้ในรูปที่ 4.36 ถึง 4.39 แสดงให้เห็นว่าวงจรเรียงกระแสและวงจรอินเวอร์เตอร์สามารถทำงานในสภาวะชั่วคราวได้ดีเช่นเดียวกันกับในคอนเร่งความเร็ว



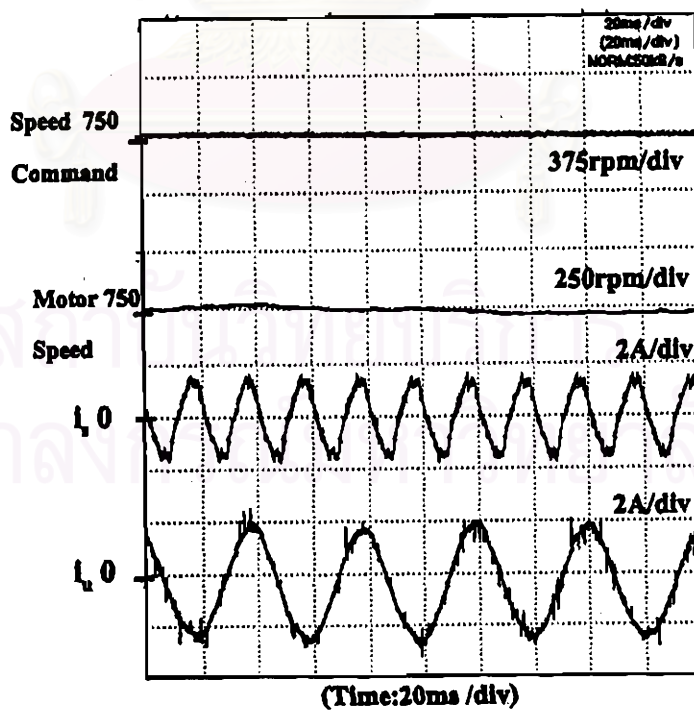
รูปที่ 4.36 รูปคลื่นความเร็วมอเตอร์ กระแสด้านเข้าและกระแสเฟส U ของมอเตอร์เหนี่ยวนำในช่วงเวลาที่ 1 เมื่อลดความเร็วจาก 1500 rpm จนถึง 750 rpm



รูปที่ 4.37 รูปคลื่นความเร็วมอเตอร์ กระแสด้านเข้าและกระแสเฟส U ของมอเตอร์เหนี่ยวนำในช่วงเวลาที่ 2 เมื่อลดความเร็วจาก 1500 rpm จนถึง 750 rpm



รูปที่ 4.38 รูปคลื่นความเร็วมอเตอร์ กระแสค่านเข้าและกระแสเฟส U ของมอเตอร์เหนี่ยวนำในช่วง เวลาที่ 3 เมื่อลดความเร็วจาก 1500 rpm จนถึง 750 rpm



รูปที่ 4.39 รูปคลื่นความเร็วมอเตอร์ กระแสค่านเข้าและกระแสเฟส U ของมอเตอร์เหนี่ยวนำในช่วง เวลาที่ 4 เมื่อลดความเร็วจาก 1500 rpm จนถึง 750 rpm

ง. การทดสอบการควบคุมแรงดันบัลไฟตรง ที่สภาวะชั่วคราว เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้น

ในที่นี้เราจะทำการทดสอบแนวทางการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรเรียงกระแสแบบวิธีสวิตซ์ดั่งได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 2.3 โดยวงจรควบคุมจะทำการแปรเปลี่ยนค่าความถี่การสวิตซ์เพื่อควบคุมการถ่ายเทพลังงานจากแหล่งจ่ายสู่วงจรเรียงกระแส

เราแบ่งหัวข้อในการทดลองออกเป็น 2 ส่วนซึ่งในแต่ละส่วนยังแบ่งออกเป็นข้อย่อยตามขนาดของโหลด และกำหนดค่าตั้งความถี่ของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดลองเป็น 50 Hz ค่าแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิง เท่ากับ 620 V จะได้ผลการทดลองในแต่ละหัวข้อดังนี้

[1] กรณีเพิ่มโหลดของมอเตอร์เป็นแบบขั้น

เราทำการทดลองโดยการใส่โหลดแบบขั้นที่ระดับต่างๆ แล้ววัดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันบัลไฟตรง ความเร็วจริงของมอเตอร์ คาบการสวิตซ์ ตลอดจนกระแสด้านออกในเฟส U และกระแสทางด้านเข้าที่สภาวะชั่วคราว ซึ่งได้ผลการทดลองในแต่ละระดับโหลดดังนี้

กรณีเพิ่มโหลดขนาด 25 % ของโหลดปกติ

ผลการเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นของสัญญาณต่างๆที่สภาวะชั่วคราวที่ได้จากการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.41 จากผลการทดสอบการทำงานที่ได้จะเห็นว่ารูปคลื่นของแรงดันบัลไฟตรงจะตกลงมาเล็กน้อย แต่ตัวควบคุมที่โอก็จะทำการควบคุมคาบการสวิตซ์ ให้มีค่ามากขึ้น(ความถี่การสวิตซ์ต่ำลง) ทำให้กระแสขาเข้ามีค่ามากขึ้นตามสมการที่ (2.62) ค่าตั้งงานที่ดึงจากแหล่งจ่ายจะช่วยชารจ์ตัวเก็บประจุ ให้มีค่าแรงดันสูงขึ้นกลับเข้าสู่ค่าที่ตั้งไว้ โดยใช้เวลาประมาณ 400 ms

กรณีเพิ่มโหลดขนาด 50 % ของโหลดปกติ

ผลการเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นของสัญญาณต่างๆที่สภาวะชั่วคราวแสดงได้ดังรูปที่ 4.42 จากผลการทดสอบการทำงานที่ได้จะเห็นว่ารูปคลื่นของแรงดันบัลไฟตรงจะตกลงมามากกว่าในกรณีโหลดขนาด 25 % แต่ตัวควบคุมที่โอก็จะทำการควบคุมคาบการสวิตซ์ ให้มีค่าสูงจาก 160 us เป็นประมาณ 190 us กระแสขาเข้าจะเพิ่มขึ้น (มากกว่าในกรณีโหลดขนาด 25 %) ทำให้แรงดันไฟตรงที่ตกลงกลับเข้าสู่ค่าที่ตั้งไว้ และใช้เวลาในการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงให้กลับสู่ค่าที่ตั้งไว้ใกล้เคียงมากกว่ากรณีโหลดขนาด 25 % เล็กน้อย

กรณีเพิ่มโหลดขนาด 75% ของโหลดปกติ

ผลการเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นของสัญญาณต่างๆที่สภาวะชั่วคราวแสดงได้ดังรูปที่ 4.43 จากผลการทดสอบการทำงานที่ได้จะเห็นว่ารูปคลื่นของแรงดันบัลไฟตรงจะตกลงมามากกว่าเดิมถึงค่า

ประมาณ 570 V ตัวควบคุมฟิวส์จะทำการควบคุมคาบการสวิตช์ให้มีความสูงขึ้น แต่จะใช้เวลาในการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงให้กลับสู่ค่าที่ตั้งไว้ยาวนานกว่ากรณีก่อนๆ

กรณีเพิ่มโหลดขนาด 100 % ของโหลดปกติ

ผลการเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นของสัญญาณต่างๆที่สถานะชั่วคราวแสดงได้ดังรูปที่ 4.44 จากผลการทดสอบการทำงานที่ได้จะเห็นว่ารูปคลื่นของแรงดันบัสไฟตรงจะตกลงมา ตัวควบคุมฟิวส์จะทำการควบคุมคาบการสวิตช์ให้มีความสูงขึ้น แต่จะใช้เวลาในการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงให้กลับสู่ค่าที่ตั้งไว้ยาวนานขึ้น ลักษณะการตอบสนองของระบบจะค่อนข้างแตกต่างไปจากกรณีก่อนๆทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความถี่จุดทำงานที่แตกต่างกันของวงจรเรียงกระแสแบบวิธีสวิตช์

จะเห็นว่าในกรณีที่เรทำการเพิ่มโหลดขนาดต่างๆให้กับวงจร ค่าแรงดันบัสไฟตรงจะมีค่าลดลงมา จะมากขึ้นก็ขึ้นกับขนาดของโหลด ซึ่งแรงดันบัสจะลดลงมากที่สุดในกรณีโหลดมีขนาด 100 % ของปกติ แรงดันจะลดลงมาจากค่าที่ตั้งไว้ประมาณ 70 V แต่ที่ทุกๆกรณีวงจรควบคุมแบบฟิวส์จะสามารถทำการควบคุมคาบการสวิตช์ให้เพิ่มขึ้นจนสามารถคงค่าแรงดันบัสให้เข้าสู่ค่าที่ตั้งไว้ได้

[2] กรณีลดโหลดแบบขั้น

เราทำการทดลองโดยการลดโหลดแบบขั้นจากโหลดที่ระดับต่างๆ ไปเป็นสถานะไร้โหลด แล้วทำการวัดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันบัสไฟตรง ความเร็วจริงของมอเตอร์ คาบการสวิตช์ ตลอดจนกระแสด้านออกในเฟส U และกระแสทางด้านเข้าที่สถานะชั่วคราว ซึ่งได้ผลการทดลองในแต่ละระดับโหลดดังนี้

กรณีลดโหลดขนาด 25 % ของโหลดปกติ

ผลการเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นของสัญญาณต่างๆที่สถานะชั่วคราวแสดงได้ดังรูปที่ 4.45 จากผลการทดสอบการทำงานที่ได้จะเห็นว่ารูปคลื่นของแรงดันบัสไฟตรงจะเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นน้อยมาก ทั้งนี้ก็เนื่องจากโหลดมีขนาดเล็ก พลังงานที่คืนกลับมาที่บัสไฟตรงจึงมีค่าน้อยการควบคุมคาบการสวิตช์จะเปลี่ยนแปลงไปในทางลดลง ทั้งนี้ก็เพื่อที่จะดึงพลังงานจากแหล่งจ่ายน้อยลง แรงดันไฟตรงที่ลดลงจึงกลับเข้าสู่ค่าที่ตั้งไว้

กรณีลดโหลดขนาด 50 % ของโหลดปกติ

ผลการเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นของสัญญาณต่างๆที่สถานะชั่วคราวแสดงได้ดังรูปที่ 4.46 จากผลการทดสอบการทำงานที่ได้จะเห็นว่ารูปคลื่นของแรงดันบัสไฟตรงจะเปลี่ยนแปลงมากกว่าในกรณีลดโหลด 25 % คาบการสวิตช์ จะถูกปรับลดลงด้วยตัวควบคุมฟิวส์ แรงดันบัสจะกลับเข้าสู่ค่าที่ตั้งไว้โดยใช้เวลาประมาณ 2.5 ๘ ซึ่งเมื่อเทียบกับเวลาที่ใช้ในกรณีเพิ่มโหลดขนาดเท่ากันจะใช้เวลานานกว่ามาก ทั้งนี้ก็เนื่องจากในกรณีของการลดโหลดพลังงานที่กลับเข้ามาที่บัสไฟตรงจะไม่

สามารถส่งคืนกลับให้แหล่งจ่ายได้ เนื่องจากวงจรไดโอดบริดจ์ที่อยู่ในวงจรเรียงกระแสแบบวิธี สวิตซ์จะกันไม่ให้กระแสไหลกลับสู่แหล่งจ่าย การที่บัสไฟตรงสามารถตกลงมาได้นั้นก็เนื่องจากวงจรจะถ่ายเทพลังงานดังกล่าวไปเป็นค่าความสูญเสียต่างๆภายในวงจร ดังนั้นถึงแม้ว่าคาบการสวิตซ์ที่ได้จากการคำนวณจะปรับตัวลดลงมาที่สถานะตัวผู้ตัวแล้วก็ตาม แต่บัสไฟตรงก็จะปรับตัวลดลงอย่างช้าๆ

กรณีลดโหลดขนาด 75 % ของโหลดพิกัด

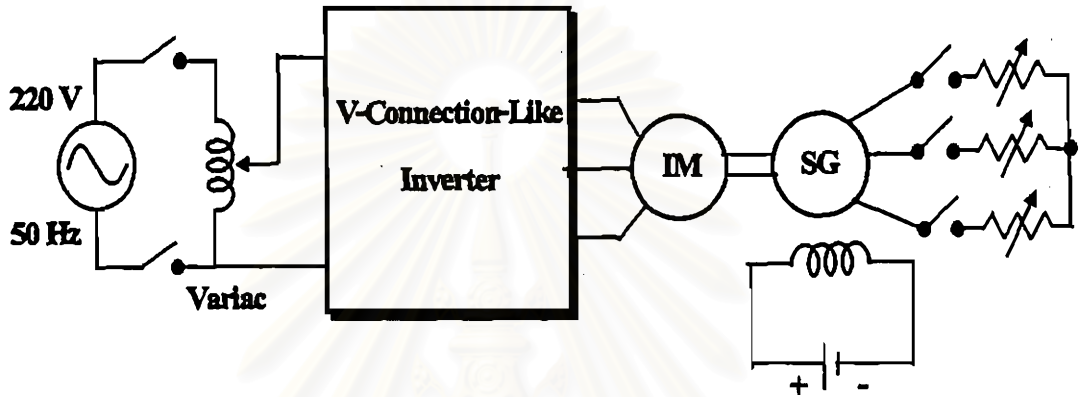
ผลการเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นของสัญญาณต่างๆที่สถานะชั่วคราวแสดงได้ดังรูปที่ 4.47 จากผลการทดสอบการทำงานที่ได้จะเห็นว่ารูปคลื่นของแรงดันบัสไฟตรงจะเปลี่ยนแปลงมากกว่า 2 กรณีแรกคือเพิ่มขึ้นไปถึง 660 V การที่บัสไฟตรงเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นมากในกรณีที่โหลดขนาดใหญ่นั้น อาจทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ภายในวงจรเนื่องจากแรงดันสูงเกินพิกัด ดังนั้นในการทดลองเราจะทำการต่อความต้านทานที่ทำหน้าที่ช่วยในการถ่ายเทพลังงานได้เร็วขึ้นโดยจะต่อเข้ากับบัสไฟตรงเมื่อค่าแรงดันบัสเกินค่าที่กำหนดซึ่งในที่นี้เรากำหนดไว้ 660 V และจากผลการทดลองในรูปที่ 4.47 จะเห็นว่าหลังจากที่โหลดตกลงมา แรงดันบัสจะพุ่งสูงขึ้นไปถึง 660 V ณ เวลานี้วงจรความต้านทานจะต่อเข้ากับบัสไฟตรงเพื่อถ่ายเทพลังงานจากการลดโหลดให้เปลี่ยนไป ในรูปของการสูญเสียที่ความต้านทาน ในช่วงที่วงจรความต้านทานทำงานจะเห็นว่าแรงดันบัสจะมีค่าไม่เกิน 660 V คาบการสวิตซ์จะปรับตัวลดลงเป็นเชิงเส้น และเมื่อพลังงานลดลงจนทำให้แรงดันบัสมีค่าไม่ถึง 660 V วงจรความต้านทานจะถูกตัดออกจากวงจร แรงดันบัสไฟตรงก็จะปรับตัวลดลงอย่างช้าๆเหมือนใน 2 กรณีแรก

กรณีลดโหลดขนาด 100 % ของโหลดพิกัด

ผลการเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นของสัญญาณต่างๆที่สถานะชั่วคราวแสดงได้ดังรูปที่ 4.48 จากผลการทดสอบการทำงานที่ได้จะเห็นว่ารูปคลื่นของแรงดันบัสไฟตรงจะเปลี่ยนแปลงมากขึ้นถึง 660 V ดังนั้นวงจรความต้านทานจึงถูกต่อเข้ากับบัสไฟตรงเพื่อคายพลังงานให้ไปสูญเสียที่ความต้านทาน แรงดันจะคงที่ที่ 660 V อยู่ช่วงหนึ่ง เมื่อพลังงานลดลงจนทำให้บัสไฟตรงมีค่าไม่ถึง 660 V แล้ว วงจรความต้านทานจะถูกปลดออก วงจรควบคุมจะทำการลดคาบการสวิตซ์เพื่อให้แรงดันบัสปรับตัวลดลงสู่ค่าที่ตั้งไว้ โดยใช้เวลาประมาณ 4 s

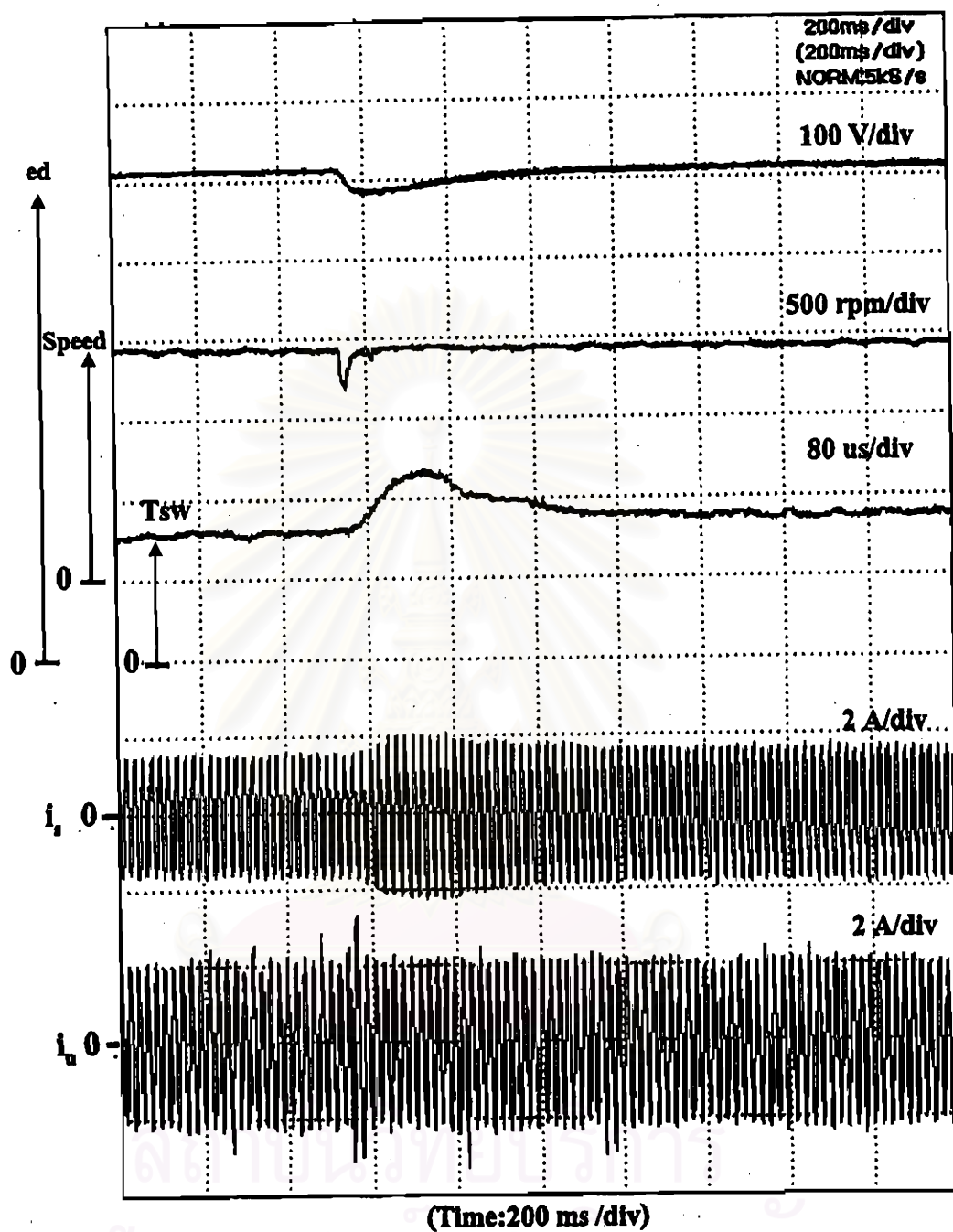
จากผลการทดลองการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงข้างต้น สามารถยืนยันความถูกต้องในการทำงานของวงจรควบคุม ที่จะควบคุมบัสไฟตรงให้คงอยู่ที่ค่าแรงดันที่ตั้งไว้ ซึ่งอาจจะใช้เวลาในการควบคุมที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับขนาดของโหลดที่เปลี่ยนแปลง ดังเหตุผลที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น อีกทั้งผลการทดลองยังสามารถยืนยันความถูกต้องของสมการที่ (2.62) ที่เราใช้เป็นสมการอ้างอิงในการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงอีกด้วย

เราสามารถแสดงระบบรวมที่ใช้ทดลองในหัวข้อนี้ได้ดังรูปที่ 4.40

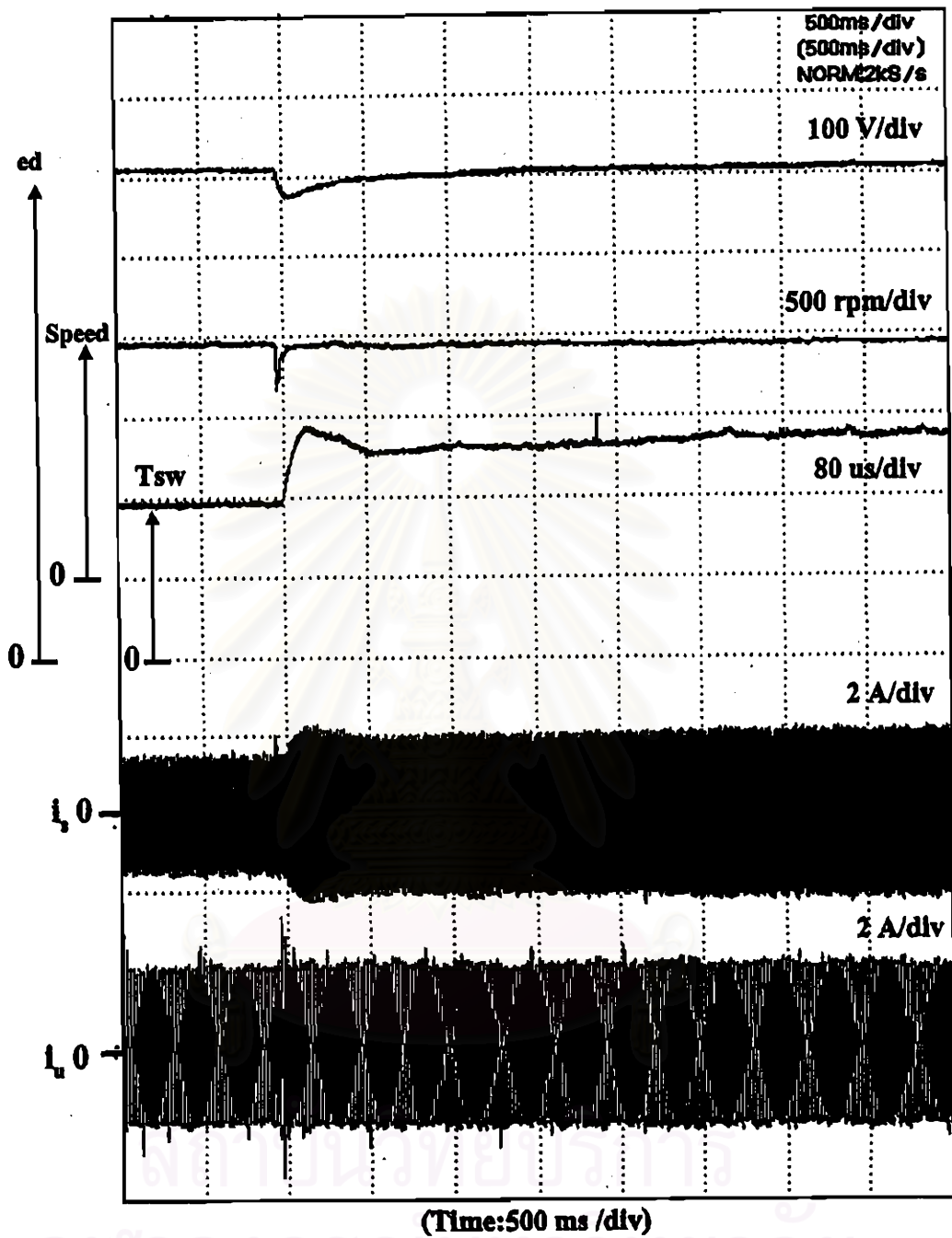


รูปที่ 4.40 ระบบรวมที่ใช้ทดลอง

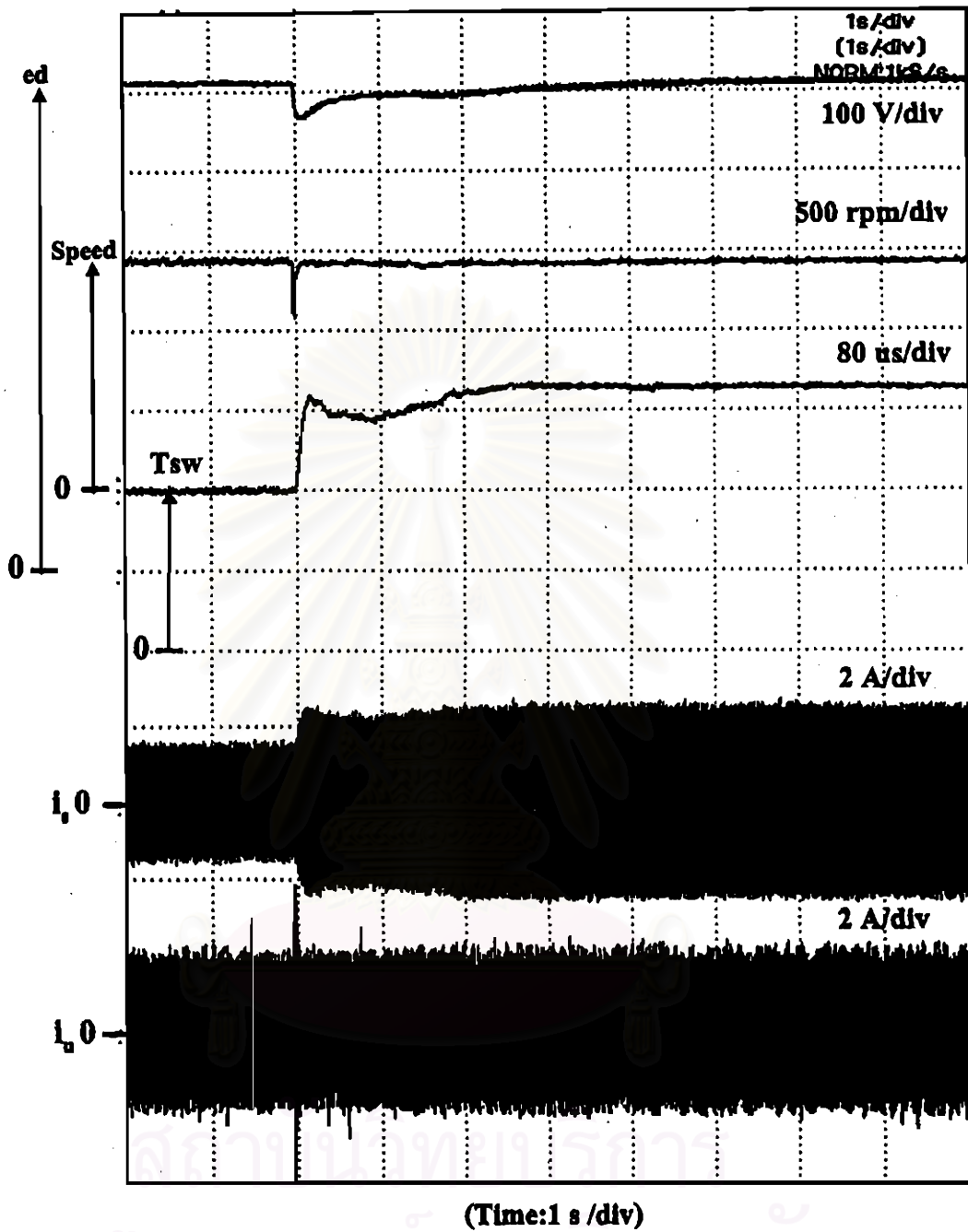
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



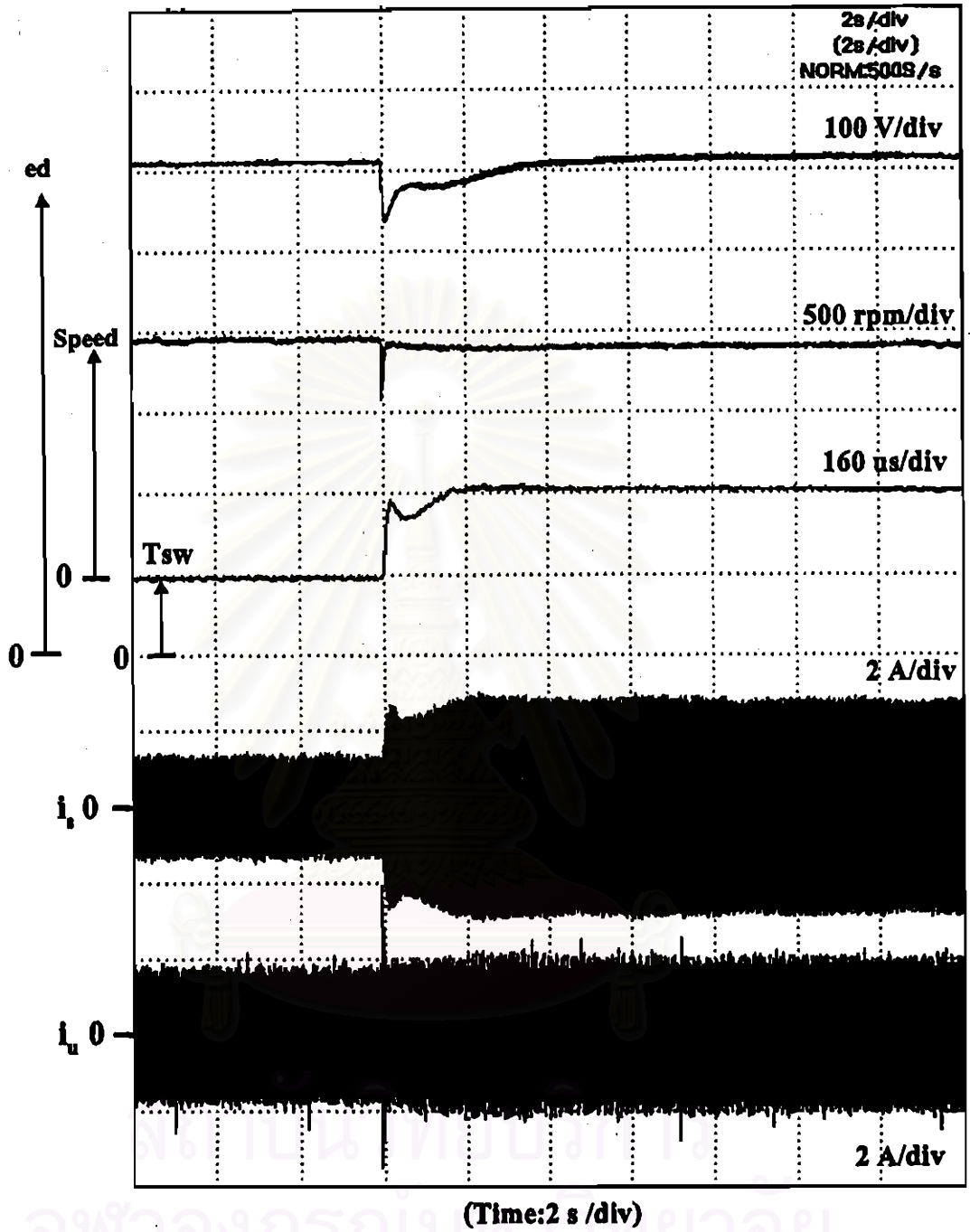
รูปที่ 4.41 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง ที่สภาวะชั่วคราว เมื่อเพิ่มโหลดขนาด 25% ของโหลด
พิกัด



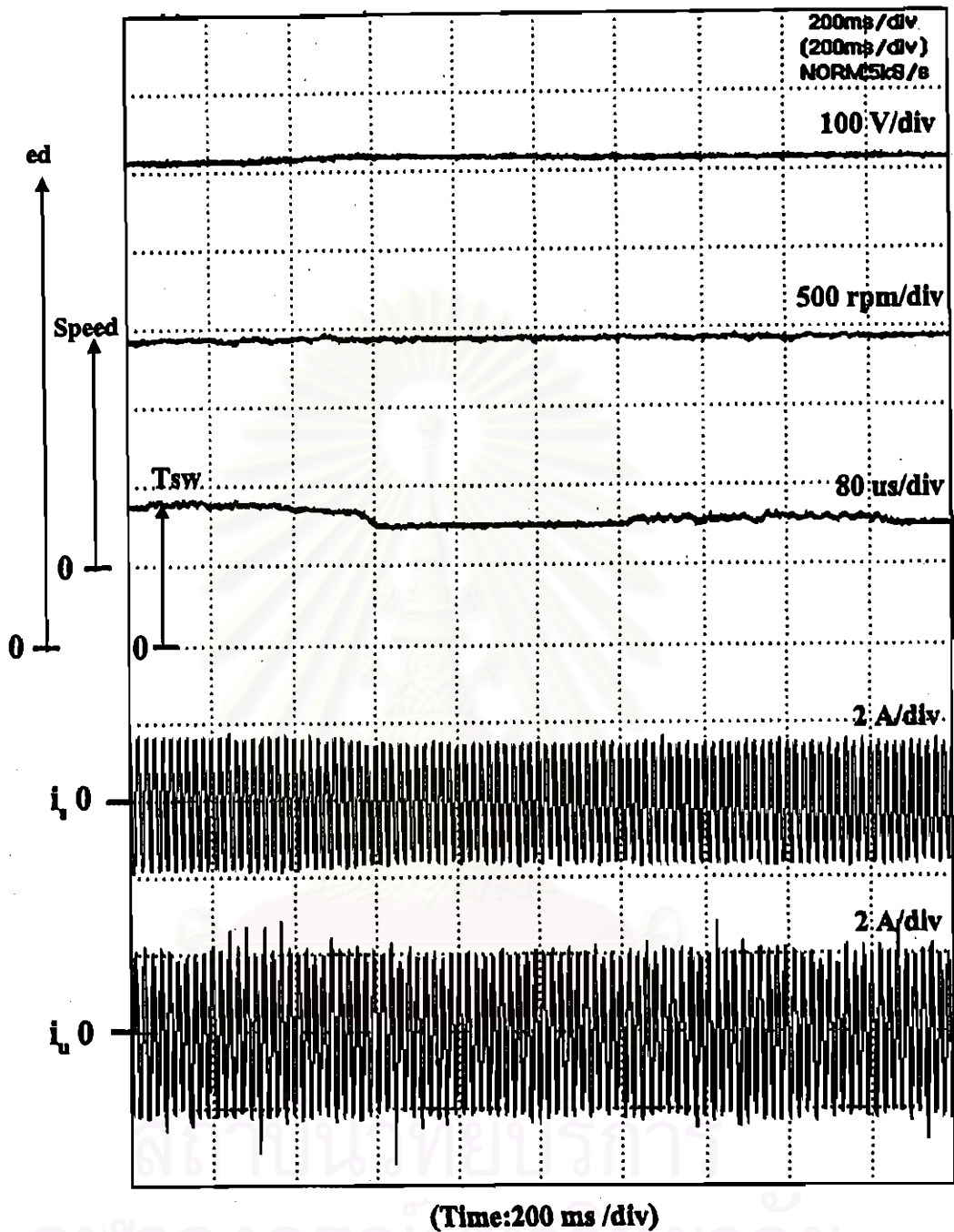
รูปที่ 4.42 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง ที่สถานะชั่วคราว เมื่อเพิ่มโหลดขนาด 50 % ของโหลด
พิกัด



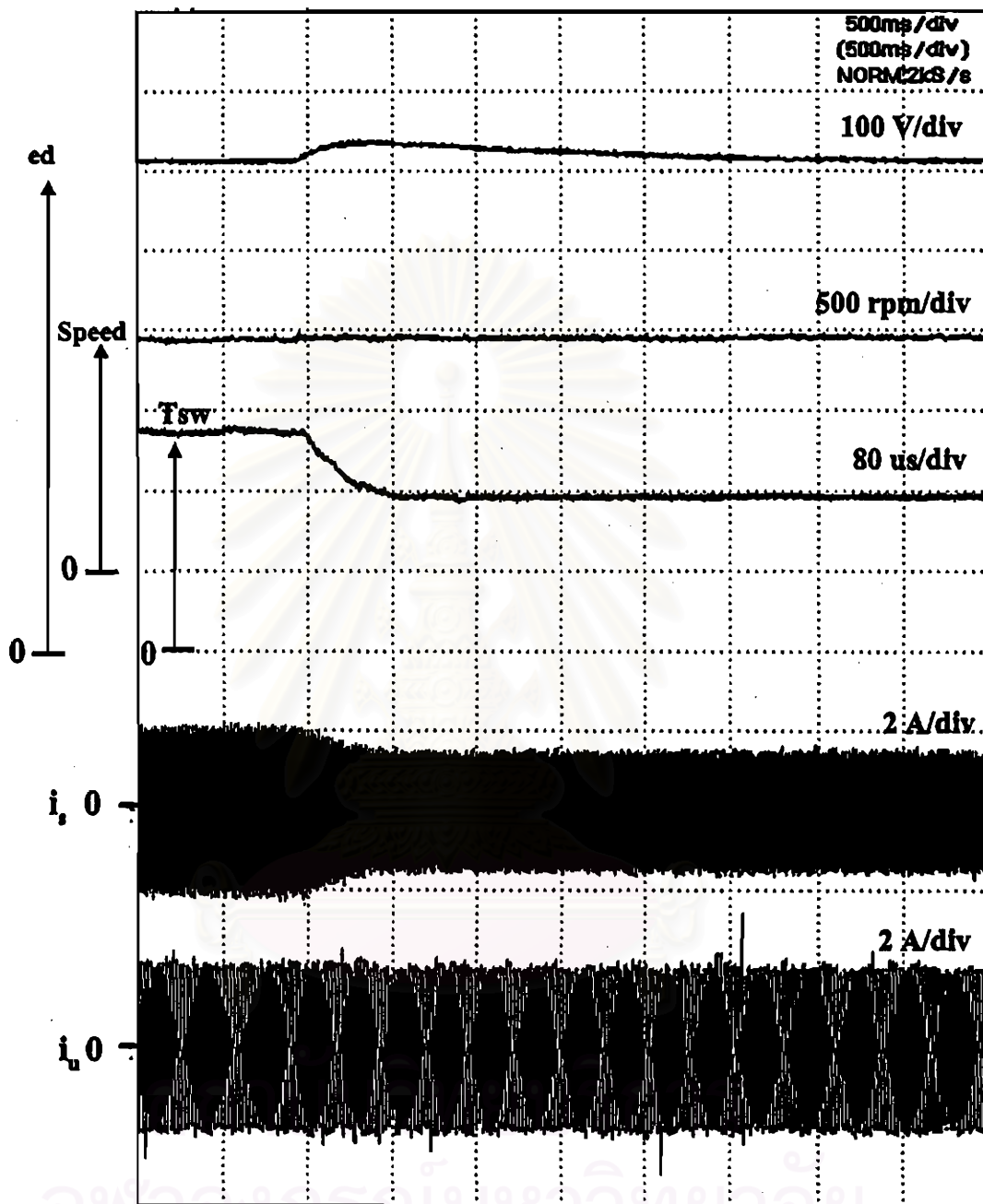
รูปที่ 4.43 ผลการควบคุมแรงดันไฟฟ้าตรง ที่สภาวะชั่วครู่ เมื่อเพิ่มโหลดขนาด 75% ของโหลด พิกัด



รูปที่ 4.44 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง ที่สภาวะชั่วคราว เมื่อเพิ่มโหลดขนาด 100% ของโหลด พิกัด

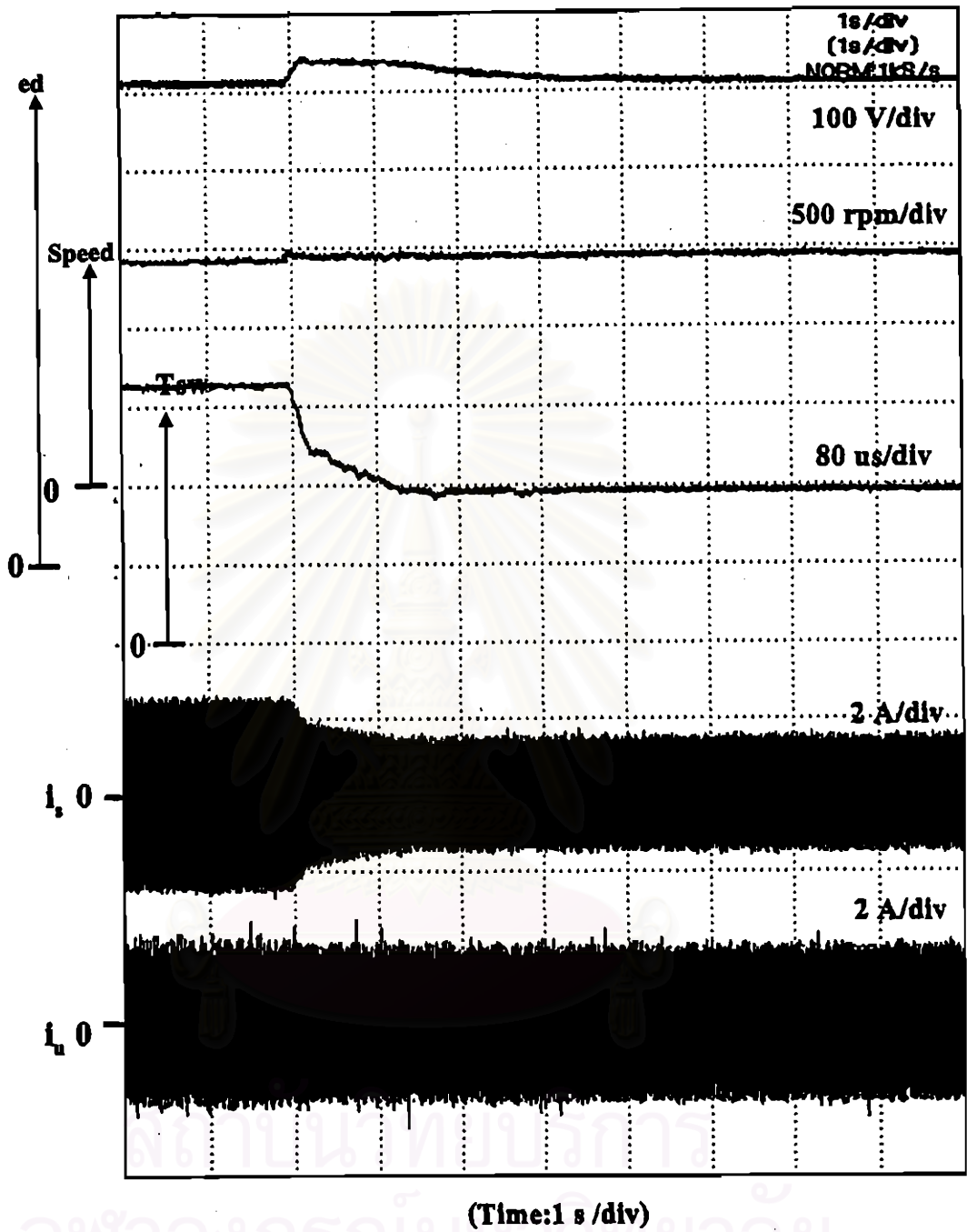


รูปที่ 4.45 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง ที่สภาวะชั่วคราว เมื่อลดโหลดขนาด 25% ของโหลด
พิกัด

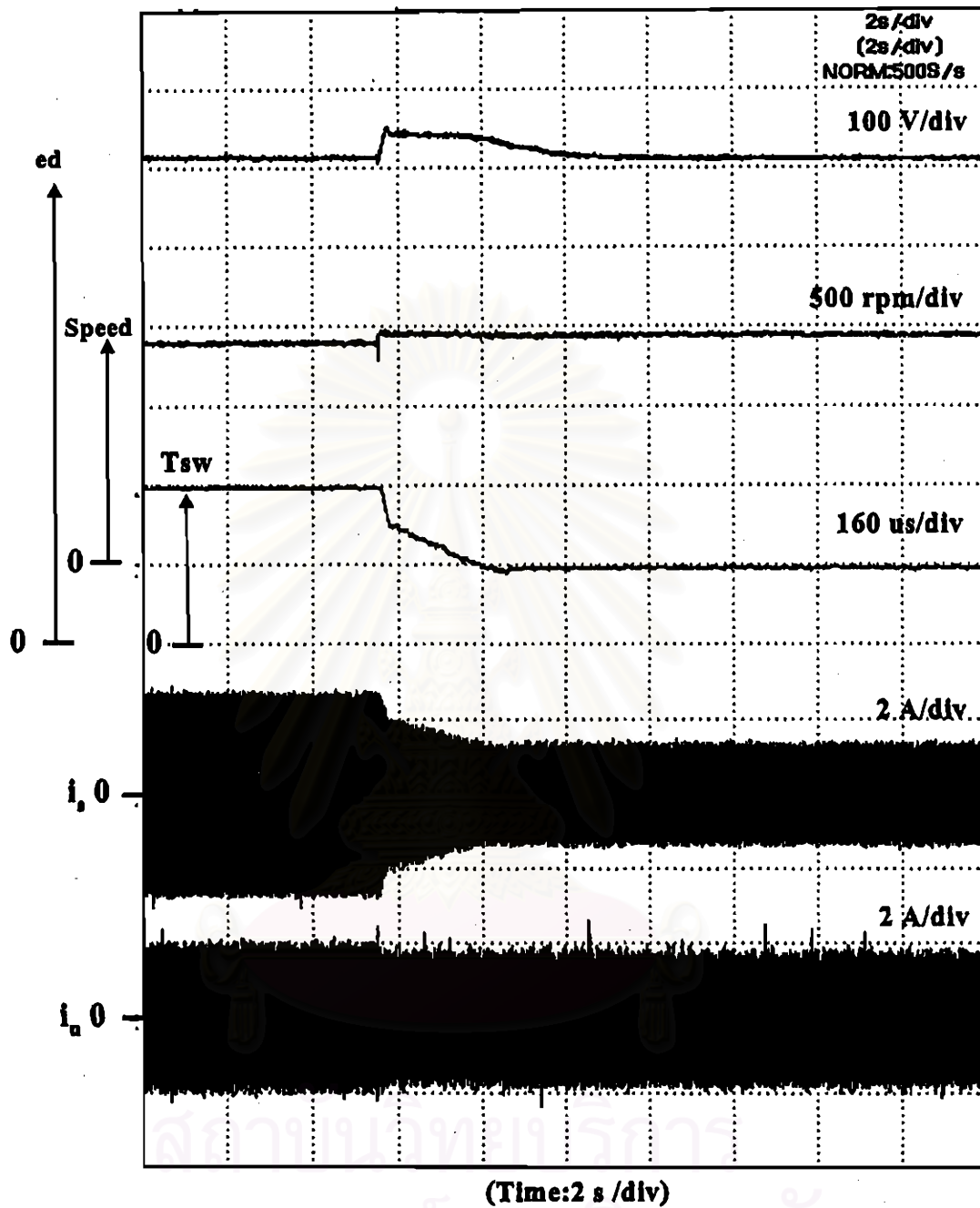


(Time:500 ms /div)

รูปที่ 4.46 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง ที่สถานะชั่วคราว เมื่อลดโหลดขนาด 50% ของโหลด พิกัด



รูปที่ 4.47 ผลการควบคุมแรงดันบิดไฟตรง ที่สถานะชั่วคราว เมื่อลดโหลดขนาด 75 % ของโหลด
พิกัด



รูปที่ 4.48 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง ที่สภาวะชั่วคราว เมื่อลดโหลดขนาด 100% ของโหลด
พิกัด