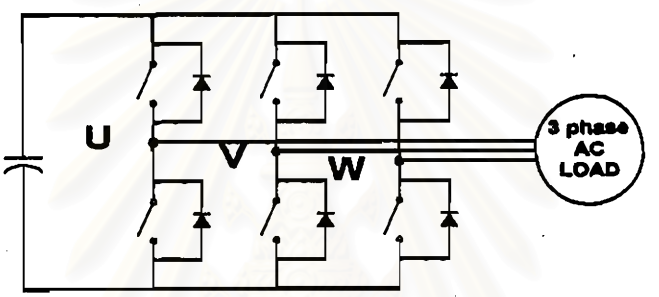
บทที่ 3

วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ที่มีลักษณะเสมือนต่อแบบวี

หลักการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส โดยทั่วไปก็คือการแปลงแรงดันไฟตรงที่ได้รับมาจากวงจรเรียงกระแส ให้เป็นแรงดันไฟสลับ ส่วนประกอบที่สำคัญของวงจรก็คือสวิตช์กำลัง จะมีทั้งหมด 6 ตัว หรือเรียกได้ว่า 3 กิ่ง ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งการสั่งการทำงานของสวิตช์มีหลายแบบขึ้นอยู่กับความต้องการของแรงดันขาออกและประสิทธิภาพของวงจรที่ต้องการ

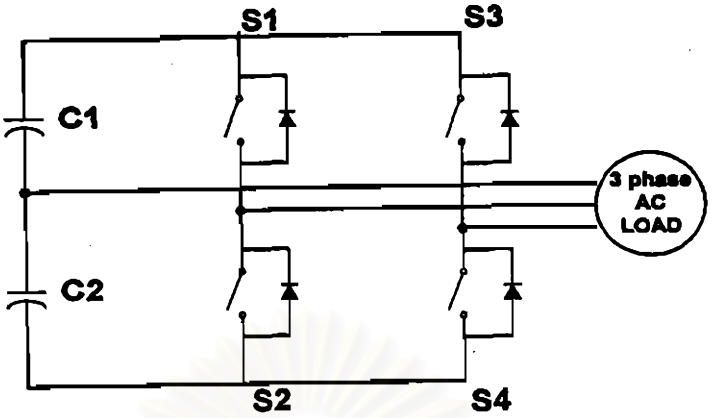


รูปที่ 3.1 วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสแบบทั่วไป

จากรูปเราจะเห็นได้ว่าหากเรานำวงจรอินเวอร์เตอร์แบบทั่วไปนี้ต่อรวมกับวงจรเรียงกระแสแบบวิธีสวิตช์ดังที่ได้กล่าวถึงรายละเอียดในบทที่แล้ว จะมีจำนวนสวิตช์กำลังเพิ่มขึ้นอีก 2 ตัว เมื่อเราพิจารณาวงจรรวมโดยนำวงจรเรียงกระแสแบบวิธีสวิตช์ต่อร่วมกับวงจรอินเวอร์เตอร์ในส่วนหลัง ก็จะมีจำนวนสวิตช์รวม 8 ตัว จากข้อเสียของวงจรรวมที่จำเป็นต้องใช้สวิตช์จำนวนมากขึ้นนี้เอง จึงเป็นที่มาของการศึกษาเพื่อหาวงจรอินเวอร์เตอร์แบบ 3 เฟส ที่มีการใช้จำนวนสวิตช์น้อยลง เพื่อเราจะได้สามารถลดจำนวนสวิตช์ของวงจรรวมให้เหลือเพียง 6 ตัวเท่าเดิม ดังรายละเอียดที่จะได้กล่าวถึงในหัวข้อต่อๆไป

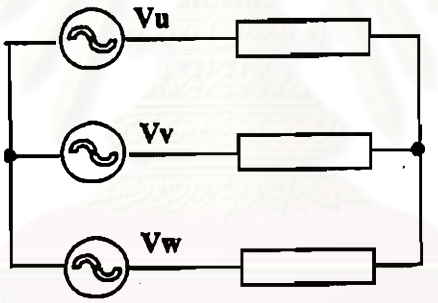
3.1 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ที่มีการต่อแบบวีหรือแบบฮาล์ฟบริดจ์

ในการลดจำนวนสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ จากความเป็นไปได้ของวงจร เราสามารถลดจำนวนสวิตช์ได้มากที่สุด 1 กิ่งสวิตช์ นั่นคือจะเหลือสวิตช์จำนวน 4 ตัว ดังรูปที่ 3.2

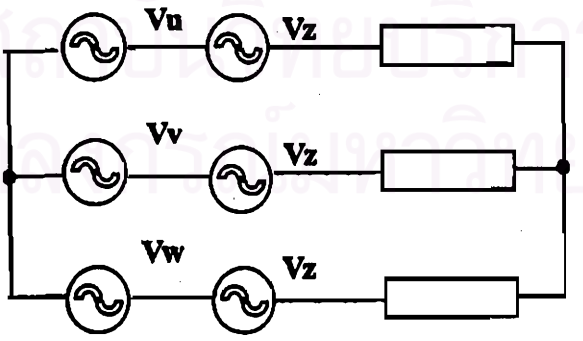


รูปที่ 3.2 วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่มีการต่อแบบวี

จะเห็นว่าการต่อกันของสวิตช์โดยให้จุดหนึ่งเป็นจุดอ้างอิงมีแรงดันเท่ากับจุดกึ่งกลางของบัสไฟตรง(หรือเรียกว่าจุดนิวตรัล)มีลักษณะคล้ายกับการต่อหม้อแปลงสามเฟสแบบวี (V connection or Open-delta-connection Transformer) ที่ยังคงสามารถรักษาแรงดันสายไว้เท่าเดิม เหมือนกรณีใช้หม้อแปลงสามตัวได้ ซึ่งสามารถพิจารณาขั้นตอนการแปลงวงสามเฟสเป็นแบบ Open-delta-connection ได้ดังรูปที่ 3.3 (ก) - (ค)

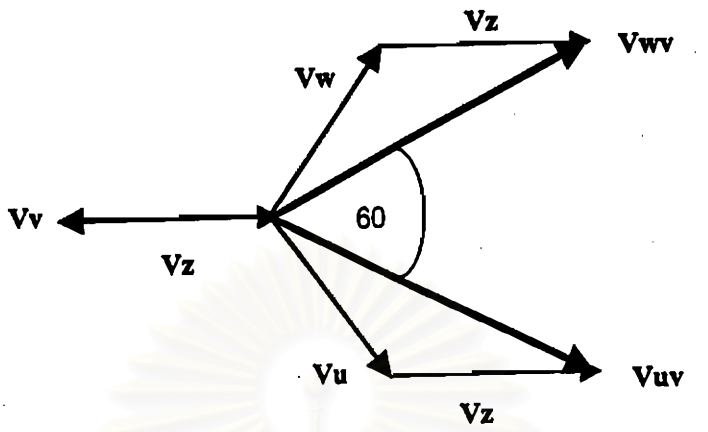


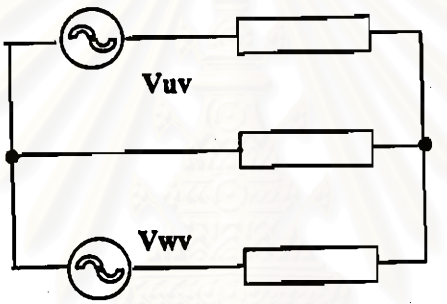
(ก) วงจรของแหล่งจ่ายสามเฟสต่อร่วมกับโหลดสามเฟส



(ข) เมื่อเพิ่มแหล่งจ่าย Vz ต่อเข้ากับวงจรของแหล่งจ่ายสามเฟส

รูปที่ 3.3 รูปวงจรของแหล่งจ่ายแบบ Open Delta Connection





(ค) เฟสเซอร์แรงดัน และรูปวงจรของแหล่งจ่ายแบบ Open Delta Connection

รูปที่ 3.3(ต่อ) รูปวงจรของแหล่งจ่ายแบบ Open Delta Connection

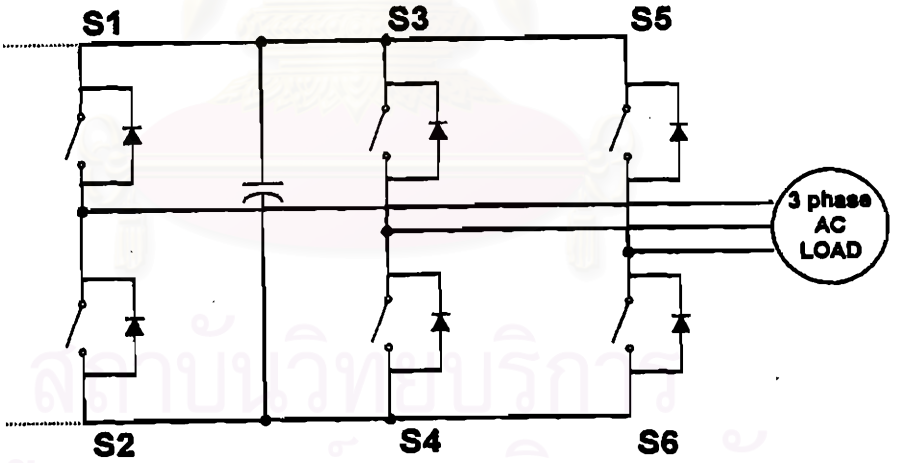
จะพบว่าถ้านำ Vz ซึ่งมีขนาดเท่ากับ Vu ,Vv และ Vw (กรณีโหลดสมดุล) แต่มีทิศทางตรงกันข้ามกับ Vv มาบวกเข้ากับทุกเฟส จะทำให้เฟสเซอร์เดิมมีเฟส Vv ลดขนาดลงเป็นศูนย์ ขณะที่เกิดเวกเตอร์ขึ้นใหม่คือ Vuv กับ Vwv ซึ่งทำมุมกัน 60 องศา มีขนาดเป็น $\sqrt{3}$ เท่าของแรงดันเฟสเดิมซึ่งก็คือขนาดของแรงดันสายเดิมนั่นเอง ทำให้เราได้เฟสเซอร์แรงดันและรูปวงจรของแหล่งจ่ายแบบ Open Delta Connection ดังแสดงในรูปที่ 3.3(ค)

ข้อดีของวงจรอินเวอร์เตอร์ลักษณะนี้คือจะใช้จำนวนสวิตช์เพียง 4 ตัว แต่ข้อเสียของวงจรก็คือ จำเป็นต้องใช้แรงดันบัสไฟตรงสูงขึ้นเป็นสองเท่าของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบปรกติเมื่อต้องการแรงดันด้านออกเท่ากัน ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการสูญเสียในขณะสวิตช์มากขึ้นกว่าเดิม และขนาดกำลังของสวิตช์มีค่าสูงกว่าในกรณีวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ อย่างไรก็ตามในกรณีของวงจรอินเวอร์เตอร์ขนาดเล็กแบบอินพุทเป็นเฟสเดียว แรงดันขาออกจะอยู่ในช่วง 0 - 220V เท่านั้นแรงดันบัส

ไฟตรงที่จำเป็นก็จะมีค่าประมาณ 600V ซึ่งไม่เป็นปัญหาเท่าไหร่ในแง่พิกัดของอุปกรณ์สวิตช์กำลังที่มีอยู่ตามท้องตลาด ดังนั้นปัญหาสำคัญจึงอยู่ที่ความยุ่งยากในการควบคุมแรงดันกึ่งกลางบัสไฟตรงให้มีค่าคงที่เพื่อป้องกันไม่ให้แรงดันขาออกเพี้ยนไป เนื่องจากแรงดันกึ่งกลางบัสไฟตรง ซึ่งใช้ตัวเก็บประจุเป็นตัวแบ่งแรงดันอาจเกิดการเลื่อนของแรงดันขึ้นเหตุผลจากความไม่สมดุลย์ของตัวเก็บประจุที่ใช้ หรือความไม่สมดุลย์ของกระแสที่ไหล ซึ่งอาจทำให้แรงดันที่จุดกึ่งกลางดังกล่าวไม่เป็นศูนย์จริง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องออกแบบวงจรในการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง เพื่อที่จะให้แรงดัน ณ จุดดังกล่าวมีค่าเป็นศูนย์ตลอดเวลา ทำให้วิธีการควบคุมอินเวอร์เตอร์ชนิดนี้ค่อนข้างซับซ้อน

3.2 วงจรอินเวอร์เตอร์เสมือนต่อแบบวี

จากข้อเสียของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีการต่อแบบวีตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น และเพื่อให้สอดคล้องกับแนวคิดหลักในการลดจำนวนสวิตช์กำลังของวงจรรวม และวงจรที่ออกแบบสร้างขึ้นนั้นจะต้องมีการควบคุมที่ไม่ยุ่งยากจนเกินไป ในโครงการวิจัยนี้เราจึงได้นำเสนอวงจรอินเวอร์เตอร์ที่เสมือนต่อแบบวี ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่ลักษณะเสมือนต่อแบบวี

3.2.1 โครงสร้างของวงจร

เมื่อพิจารณาวงจรดังแสดงในรูปที่ 3.4 วงจรจะมีลักษณะเหมือนวงจรอินเวอร์เตอร์แบบ

ทั่วไป คือมีการใช้สวิตช์กำลังจำนวน 6 ตัวด้วยกัน แต่ข้อแตกต่างก็คือ ที่สวิตช์กำลังคู่หน้า S1 และ S2 จะถูกควบคุมการสั่งการเปิดปิดสวิตช์ด้วยเวลาที่เท่ากัน คือมีค่าวัฏจักรงานเป็น 50% ดังนั้นวงจรจึงมิได้ทำงานเหมือนกับวงจรอินเวอร์เตอร์แบบทั่วไป

เมื่อเปรียบเทียบวงจรในรูปที่ 3.4 กับวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีการต่อแบบวีในรูปที่ 3.2 จะเห็นได้ว่าเฟส U ซึ่งเดิมต่ออยู่ที่จุดแบ่งแรงดันของคาปาซิเตอร์ จะเปลี่ยนมาต่อที่จุดกลางระหว่างสวิตช์คู่หน้า โดยอาศัยหลักการว่า เมื่อกำหนดค่าวัฏจักรงานของสวิตช์คู่หน้าให้มีค่าเป็น 50% จะทำให้ค่าเฉลี่ยของแรงดันที่จุดกลางระหว่างสวิตช์มีค่าเท่ากับศูนย์ ก็จะทำให้เราได้ วงจรอินเวอร์เตอร์แบบทั่วไปที่มีความสมมูลกับวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีลักษณะการต่อแบบวี เหตุผลที่ต้องปรับปรุงการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบทั่วไป ให้มีลักษณะดังกล่าว ก็เนื่องจากสวิตช์คู่หน้านี้จะทำงาน 2 หน้าที่ในเวลาเดียวกัน คือทำหน้าที่เป็น ส่วนหนึ่งในวงจรเรียงกระแสเพื่อให้สามารถใช้เทคนิคการสวิตช์ช่วยในการลดความเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสด้านเข้าดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 และอีกหน้าที่หนึ่งก็คือ เป็นส่วนสร้างแรงดันกึ่งกลางของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีลักษณะเสมือนต่อแบบวี ซึ่งทำให้เราไม่จำเป็นต้องมีการควบคุมแรงดันกึ่งกลางเหมือนในกรณีที่ใช้ตัวเก็บประจุแบ่งแรงดันเหมือนในวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีการต่อแบบวี โดยที่เราไม่จำเป็นต้องเพิ่มจำนวนสวิตช์ให้มากกว่าเดิม

แต่จากการที่เราจำกัดอิสระในการเปิดปิดสวิตช์ของสวิตช์คู่หน้าคือให้เปิดปิดโดยใช้เวลาเท่ากัน (วัฏจักรงาน = 50 %) นี้เองส่งผลให้ขอบเขตของแรงดันที่เราสามารถสร้างได้จะลดลงไปครึ่งหนึ่งเมื่อเทียบกับวงจรอินเวอร์เตอร์แบบทั่วไป เมื่อทั้ง 2 วงจรมีขนาดของแรงดันบัสไฟตรงในปริมาณที่เท่ากัน หรือกล่าวในทางกลับกันหากเราต้องการขนาดของแรงดันไฟสลับด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่เสมือนต่อแบบวี ให้มีขนาดเท่ากับแรงดันไฟสลับด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบทั่วไป เราก็จำเป็นต้องเพิ่มขนาดของแรงดันบัสไฟตรงให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเป็น 2 เท่า ดังรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

3.2.2 ผลของค่าวัฏจักรงานคงที่ที่ 50% ต่อขนาดแรงดันบัสไฟตรง

การที่เราใช้ค่าวัฏจักรงานคงที่ที่ 50% ส่งผลให้แรงดันที่เราสามารถสร้างได้มีข้อจำกัด ในที่นี้เราจะวิเคราะห์ข้อจำกัดนี้โดยพิจารณาจากการมอดูเลตโดยวิธีสเปซเวกเตอร์ของวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่เสมือนต่อแบบวี สวิตช์คู่หน้าของวงจรอินเวอร์เตอร์จะถูกบังคับให้มีช่วงเวลาในการเปิดปิดสวิตช์เท่ากันในเวลา 1 คาบการสวิตช์ ดังนั้นเราจำเป็นที่จะต้องพัฒนาวิธีการมอดูเลตที่สอดคล้องกับเงื่อนไขนี้ขึ้นมาใหม่ เพื่อให้เฟส U มีค่าวัฏจักรงานเป็น 50% เราจะแบ่ง 1 คาบการสวิตช์ออกเป็น 2 ส่วน คือ ในครึ่งเวลาแรก(Tsw/2) แรงดันเฟส U จะเป็น 1 และในครึ่งเวลาหลังแรงดันเฟส U จะเป็น 0

ในที่นี้เราพิจารณาการมอดูเลตเฉพาะในเซกเตอร์ที่ 1 (เซกเตอร์อื่นๆสามารถพิจารณาได้ในทำนองเดียวกัน) ดังแสดงในรูปที่ 3.5

<u>โดยนิยามให้</u> Su ,Sv ,Sw คือสถานะการทำงานของสวิตช์ตัวบนในแต่ละเฟส ยกตัวอย่างเช่น

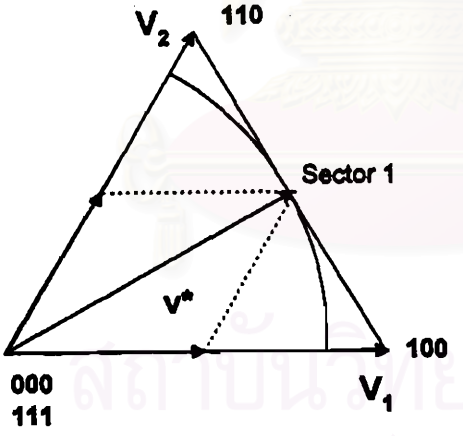
ถ้า Su ,Sv ,Sw = 110 จะได้

Su = 1 หมายถึง สวิตช์ตัวบนของเฟส U ปิดวงจร

Sv = 1 หมายถึง สวิตช์ตัวบนของเฟส V ปิดวงจร

Sw = 0 หมายถึง สวิตช์ตัวบนของเฟส W เปิดวงจร

เวกเตอร์ที่ใช้สร้างแรงดันในเซกเตอร์ที่ 1 จะประกอบด้วยเวกเตอร์ 100(V_1) และ 110(V_2) เพื่อให้ได้แรงดันตามต้องการ โดยกำหนดให้เวลาในการใช้เวกเตอร์ V_1 และ V_2 เป็นเวลา t_1 และ t_2 ตามลำดับ ส่วนเวลาที่เหลือคือ $Tsw/2 - t_1 - t_2$ นั้นเราจะต้องเติมเวกเตอร์ศูนย์ ซึ่งในช่วงนี้เราจะเติมเวกเตอร์ 111 เพื่อให้เฟส U เป็น 1 ตลอด และในช่วงเวลาอีกครึ่งหนึ่งของคาบการสวิตช์เราจะใช้เวกเตอร์ 000 เป็นเวกเตอร์ศูนย์

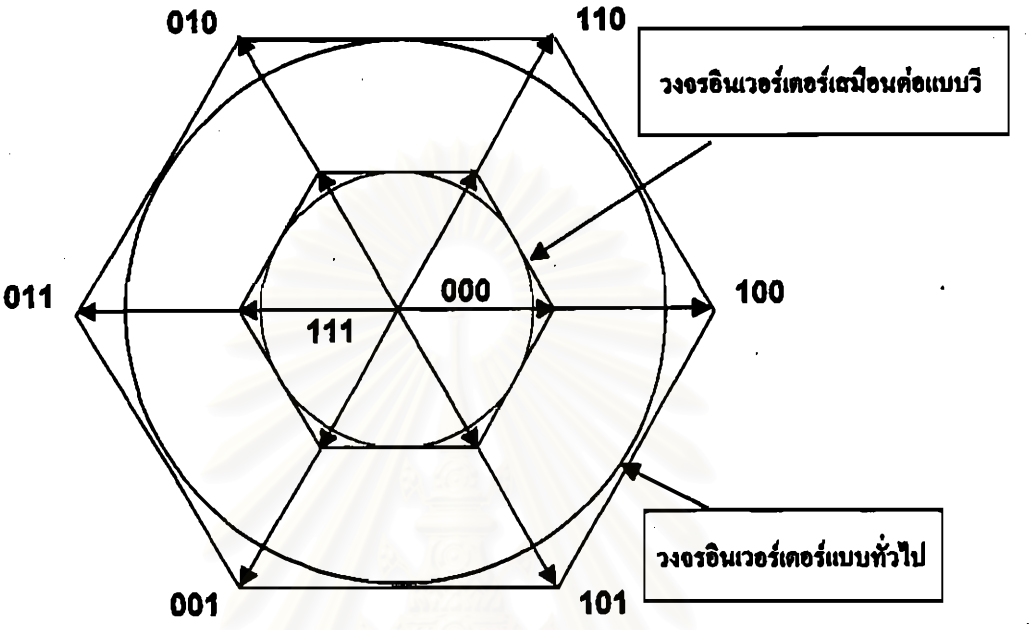


t_1	100
t_2	110
t_0	111
Tsw/2	000

รูปที่ 3.5 การมอดูเลตโดยวิธีสเปซเวกเตอร์ของวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่เสมือนต่อแบบวี เฉพาะในเซกเตอร์ที่ 1

จะเห็นว่าในหนึ่งคาบการสวิตช์นั้น จะมีการสร้างแรงดันด้านออกเพียงครึ่งหนึ่งของเวลาทั้งหมด ส่วนที่เหลืออีกครึ่งหนึ่งจะเป็นเวกเตอร์ศูนย์ซึ่งจะไม่สร้างแรงดันออกมา ดังนั้นเมื่อเทียบกับอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบทั่วไปแล้วหากเราต้องการให้ได้แรงดันด้านออกมีค่าเท่ากัน เราจะต้องเพิ่มขนาดของเวกเตอร์แรงดันเป็น 2 เท่า กล่าวคือเราจะต้องใช้แรงดันบัสไฟตรงเป็น 2 เท่านั่นเอง เราสามารถแสดงเวกเตอร์แรงดันของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่เสมือนต่อแบบวี ได้ดังรูปที่ 3.6 โดยรูปหก

เหลี่ยมรูปเล็กจะเป็นขอบเขตของแรงดันที่สามารถสร้างได้ ส่วนวงกลมวงใหญ่จะเป็นขอบเขตของแรงดันที่วงจรอินเวอร์เตอร์แบบทั่วไปสามารถสร้างได้ ซึ่งทั้งสองวงจรจะใช้แรงดันบัสไฟตรงเท่ากัน



รูปที่ 3.6 ขอบเขตของ สเปซเวกเตอร์แรงดันที่สามารถสร้างได้ของวงจรอินเวอร์เตอร์เสมือนต่อแบบวี เปรียบเทียบกับแบบทั่วไป

อย่างไรก็ตามถ้าหากเราสามารถยอมให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงานที่สวิตช์คู่หน้า คือยอมให้สวิตช์คู่หน้ามีอิสระในการสวิตช์มากขึ้น ก็จะทำให้ขนาดของแรงดันบัสไฟตรงที่วงจรอินเวอร์เตอร์จำเป็นต้องใช้ในการสร้างแรงดันไฟสลับด้านออก ต่ำลดลงได้ (ดังแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ข.) แต่แนวคิดดังกล่าวก็มีข้อเสียตรงที่ว่าสวิตช์คู่หน้านี้ทำหน้าที่สวิตช์คู่ประกอบในวงจรเรียงกระแสในส่วนหน้าด้วย หากมีการแปรเปลี่ยนค่าวัฏจักรงาน ก็จะมีฮาร์มอนิกต่ำปะปนเข้ามากับกระแสทางด้านเข้า ดังได้กล่าวถึงรายละเอียดในบทที่แล้ว อีกทั้งในโครงงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการออกแบบสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์เพื่อใช้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดเล็กแรงดันบัสไฟตรงที่วงจรต้องการจึงไม่สูงมากจนเกินขอบเขตของสวิตช์กำลังที่เราจะสามารถหาได้ตามท้องตลาด ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวข้างต้นเราจึงเลือกใช้ค่าวัฏจักรงานของสวิตช์คู่หน้าคงที่ที่ 50 %

3.3 การควบคุมการสวิตช์ด้วยวิธีสเปซเวกเตอร์

การควบคุมการทำงานของสวิตช์เพื่อให้ได้ขนาดของแรงดันคำสั่งตามที่ต้องการอาศัยแนวคิดการเฉลี่ยทางเวลาเช่นเดียวกันกับวงจรอินเวอร์เตอร์แบบทั่วไป โดยต้องเพิ่มเติมตัวแปรและข้อกำหนดต่างๆดังนี้

โดยที่ V_A และ V_B = เวกเตอร์แรงดันของอินเวอร์เตอร์ที่ประกอบกันเป็นเซกเตอร์ที่แรงดันคำสั่งไปตกอยู่

v^* = แรงดันคำสั่ง

v_a และ v_b = เวกเตอร์แรงดันคำสั่งที่แตกออกจากแรงดันคำสั่งให้อยู่ในแนวแกนของ V_A และ V_B ตามลำดับ

t_a = ช่วงเวลาที่ใช้รูปแบบการสวิตช์เป็น V_A

t_b = ช่วงเวลาที่ใช้รูปแบบการสวิตช์เป็น V_B

t_0 = ช่วงเวลาที่ใช้รูปแบบการสวิตช์เป็นเวกเตอร์ศูนย์ (000)

t_7 = ช่วงเวลาที่ใช้รูปแบบการสวิตช์เป็นเวกเตอร์ศูนย์ (111)

$$Tz = Tz0 + Tz7 = \frac{Tsw}{2}$$

Tz0 = ช่วงเวลาที่ใช้รูปแบบการสวิตช์เป็นเวกเตอร์ศูนย์ (000) เพื่อให้เฟส U มีค่าวัฏจักรงาน 50 %

Tz7 = ช่วงเวลาที่ใช้รูปแบบการสวิตช์เป็นเวกเตอร์ศูนย์ (111) เพื่อให้เฟส U มีค่าวัฏจักรงาน 50 %

สมการการคำนวณทางเวลาสามารถแสดงได้ดังนี้

$$T_{sw} = t_a + t_b + t_0 + t_7 + Tz \tag{3.1}$$

$$v^* T_{sw} = V_A t_a + V_B t_b \tag{3.2}$$

$$v^* = V_A\left[\frac{t_a}{T_{sw}}\right] + V_B\left[\frac{t_b}{T_{sw}}\right] \tag{3.3}$$

$$t_a = \frac{\|v_a\|}{\|V_A\|} T_{sw} \tag{3.4}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$t_b = \frac{\|v_b\|}{\|V_B\|} T_{sw} \qquad (3.5)$$

$$t_0 + t_7 = \frac{Tsw}{2} - t_a - t_b \qquad (3.6)$$

ในการออกแบบรูปแบบการสวิตช์ โดยให้มีการเปลี่ยนแปลงการสวิตช์ทีละตัวและมีลักษณะสมมาตรหรือที่เรียกว่าการสวิตช์แบบขอบคู่ (Double Edges) เราจำเป็นต้องเลือกใช้เวกเตอร์ศูนย์ให้เหมาะสมกันในแต่ละเซกเตอร์ ซึ่งสามารถแสดงรูปแบบการสวิตช์ในแต่ละเฟสได้ ดังตารางที่ 3.1 ถึง 3.3

ตารางที่ 3.1 รูปแบบการสวิตช์ในแต่ละเซกเตอร์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีลักษณะเสมือนต่อแบบวี

เซกเตอร์ที่ 1			เซกเตอร์ที่ 6		
เวลา	Su , Sv , Sw		เวลา	Su , Sv , Sw	
Tz0/2	(000)		Tz0/2	(000)	
$t_a/2$	(100)		$t_a/2$	(100)	
$t_b/2$	(110)		$t_b/2$	(101)	
$t_7/2$	(111)	$Tz0 = t_a + t_b + t_7$	$t_7/2$	(111)	$Tz0 = t_a + t_b + t_7$
$t_7/2$	(111)		$t_7/2$	(111)	
$t_b/2$	(110)		$t_b/2$	(101)	
$t_a/2$	(100)		$t_a/2$	(100)	
Tz0/2	(000)		Tz0/2	(000)	

ตารางที่ 3.2 รูปแบบการสวิตช์ในแต่ละเซกเตอร์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีลักษณะเสมือนต่อแบบวี

เซกเตอร์ที่ 3			เซกเตอร์ที่ 4		
เวลา	Su , Sv , Sw		เวลา	Su , Sv , Sw	
$t_0/2$	(000)		$t_0/2$	(000)	
$t_2/2$	(010)		$t_1/2$	(001)	
$t_0/2$	(011)		$t_0/2$	(011)	
Tz7/2	(111)	$Tz7 = t_1 + t_0 + t_0$	Tz7/2	(111)	$Tz7 = t_1 + t_0 + t_0$
Tz7/2	(111)		Tz7/2	(111)	
$t_0/2$	(011)		$t_0/2$	(011)	
$t_2/2$	(010)		$t_1/2$	(001)	
$t_0/2$	(000)		$t_0/2$	(000)	

ตารางที่ 3.3 รูปแบบการสวิตช์ในแต่ละเซกเตอร์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีลักษณะเสมือนต่อแบบวี

เซกเตอร์ที่ 2			เซกเตอร์ที่ 5		
เวลา	Su , Sv , Sw		เวลา	Su , Sv , Sw	
Tz0/2	(000)		Tz0/2	(000)	
$t_0/2$	(000)		$t_0/2$	(000)	
$t_2/2$	(010)		$t_1/2$	(001)	
$t_0/2$	(110)	$Tz0 = t_0 + t_7$	$t_0/2$	(101)	$Tz0 = t_0 + t_7$
$t_7/2$	(111)	$Tz7 = t_1 + t_0$	$t_7/2$	(111)	$Tz7 = t_1 + t_0$
Tz7/2	(111)		Tz7/2	(111)	
Tz7/2	(111)		Tz7/2	(111)	
$t_7/2$	(111)		$t_7/2$	(111)	
$t_0/2$	(110)		$t_0/2$	(101)	
$t_2/2$	(010)		$t_1/2$	(001)	
$t_0/2$	(000)		$t_0/2$	(000)	
Tz0/2	(000)		Tz0/2	(000)	

<u>การจำลองการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์เสมือนต่อแบบวี</u>

ในการจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์เราจะทำการเปรียบเทียบระหว่างวงจรอินเวอร์เตอร์แบบทั่วไปกับวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีลักษณะเสมือนต่อแบบวี เมื่อทำการมอดูเลตเพื่อให้ได้ขนาดแรงดันด้านออกเท่ากัน โดยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK กำหนดสภาวะการทำงานดังนี้

คำสั่งแรงดันเฟส U $v^*_u = 180\sin(\omega t)$

คำสั่งแรงดันเฟส V $v^*_v = 180\sin(\omega t - 120^\circ)$

คำสั่งแรงดันเฟส W $v^*_w = 180\sin(\omega t + 120^\circ)$

แรงดันบัสไฟตรงของวงจรแบบทั่วไป = 310 V

แรงดันบัสไฟตรงของวงจรที่มีลักษณะเสมือนต่อแบบวี = 620 V

ที่ความถี่การสวิตช์ = 2 kHz และ 20 kHz

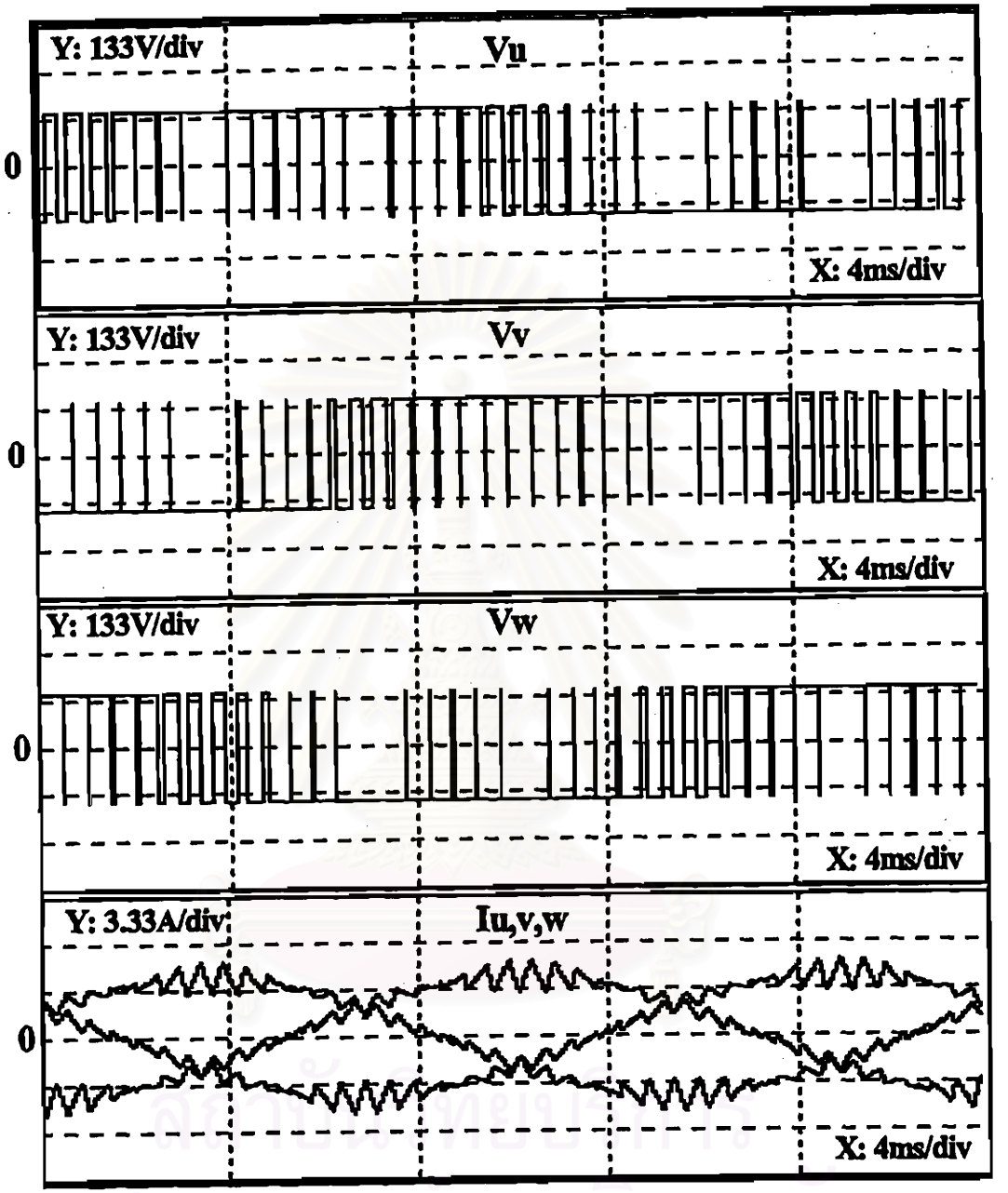
โหลดเป็นแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เราทำการแบ่งหัวข้อในการจำลองการทำงานเป็น 2 หัวข้อดังนี้

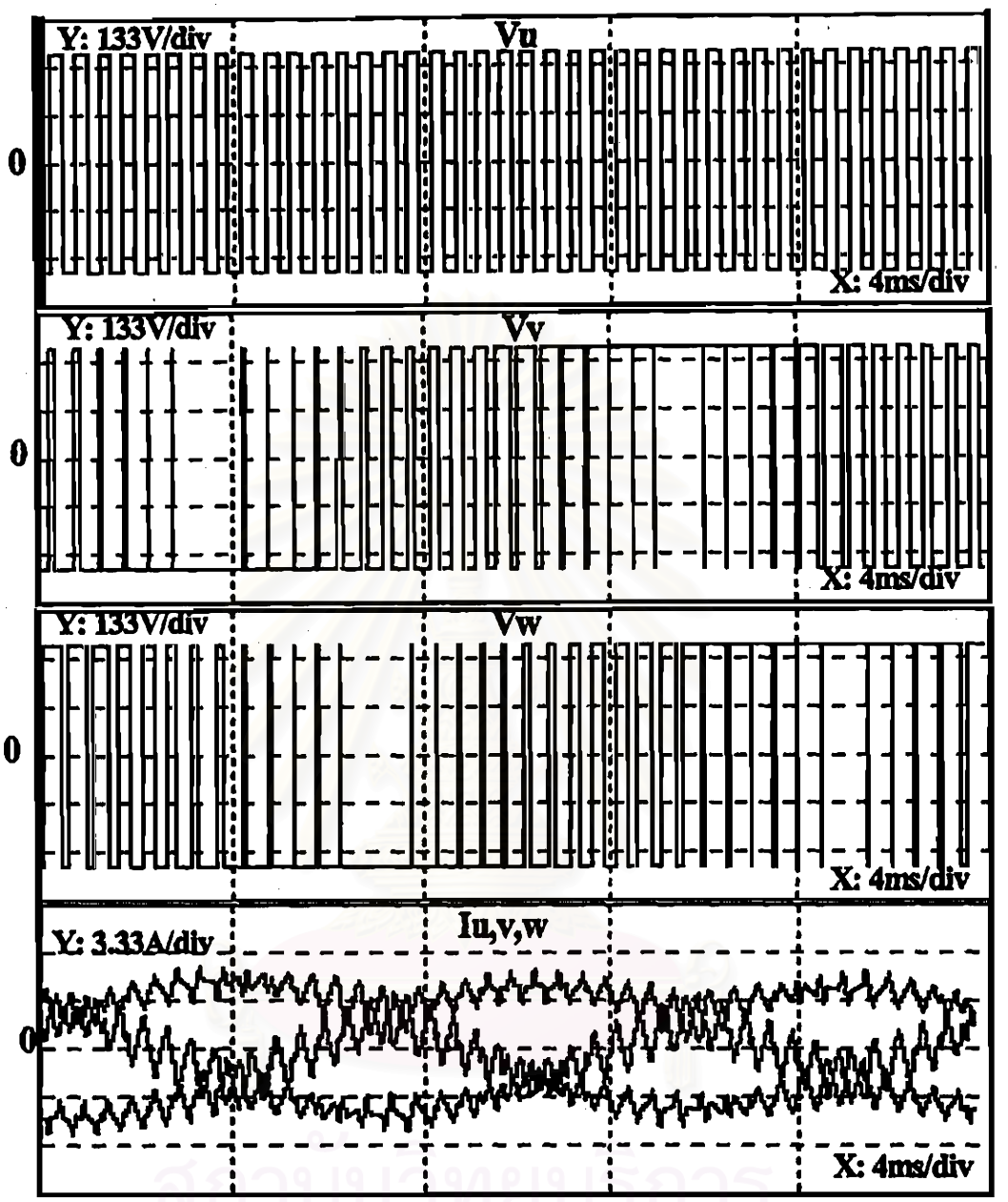
1) การเปรียบการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ทั้งสองแบบที่ความถี่การสวิตช์เท่ากับ 2 kHz
2) การเปรียบการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ทั้งสองแบบที่ความถี่การสวิตช์เท่ากับ 20 kHz

ได้ผลการจำลองการทำงานแสดงในรูปที่ 3.7 ถึง 3.10

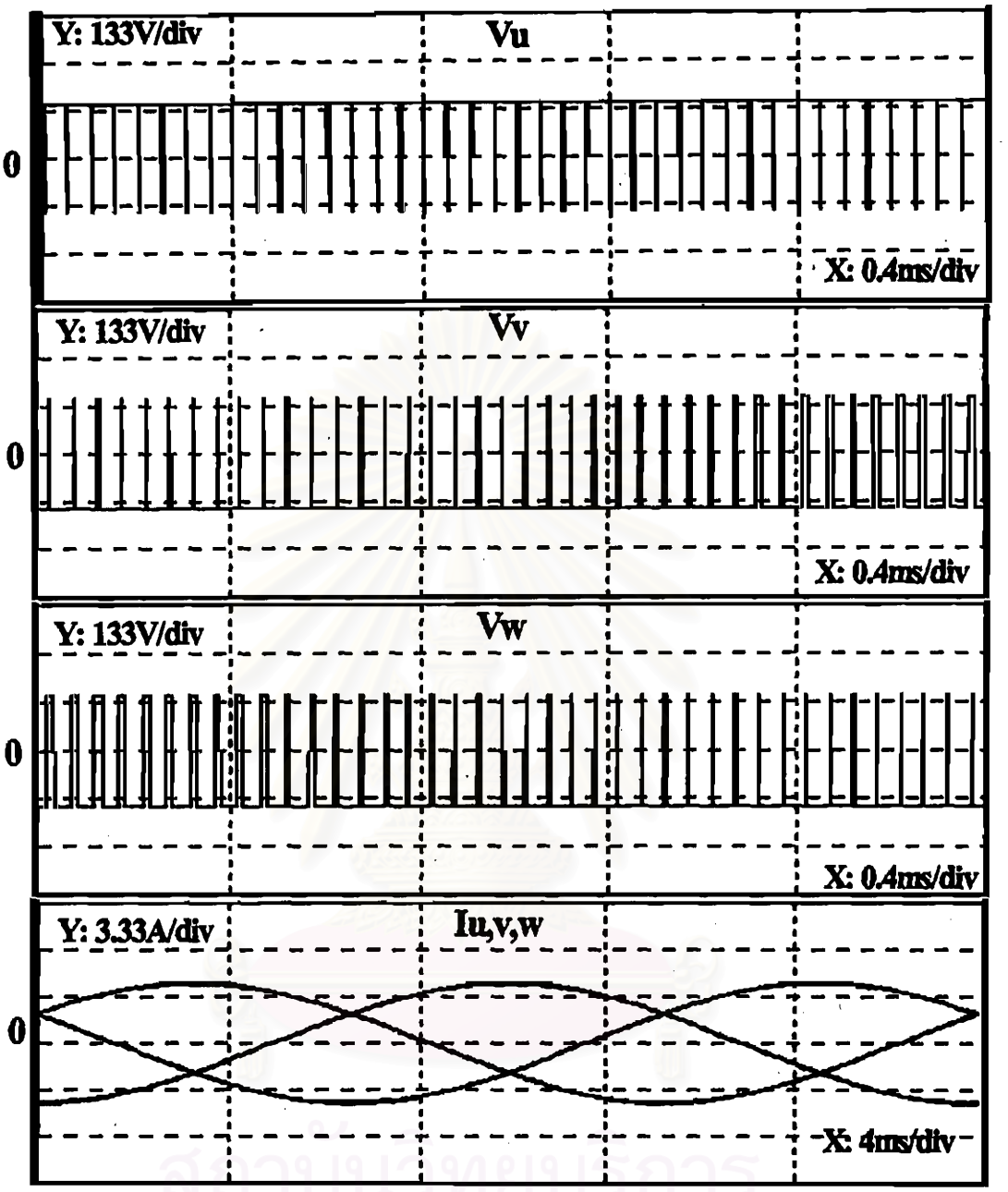
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



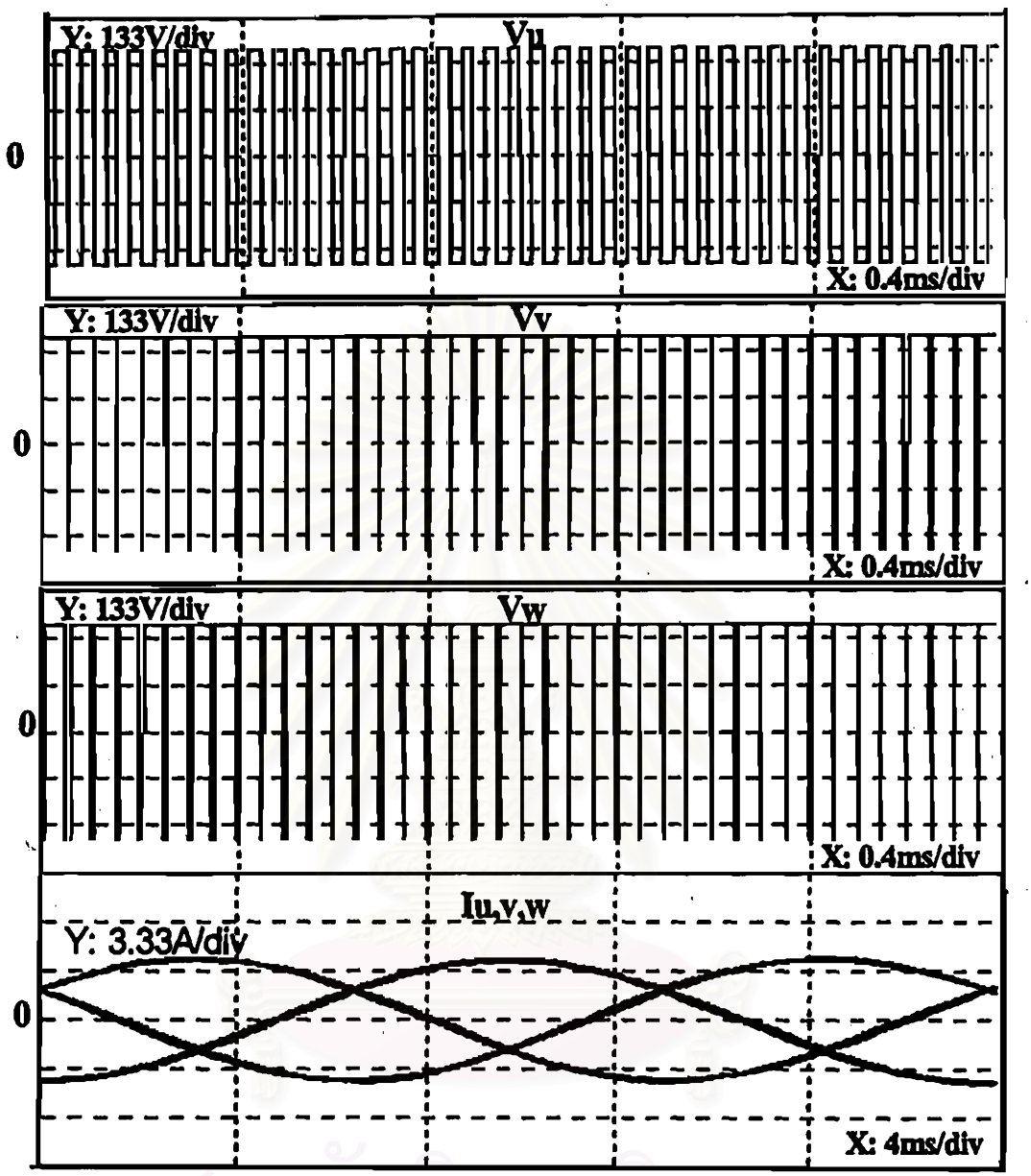
รูปที่ 3.7 รูปคลื่นแรงดันวัดเทียบจุดกึ่งกลางบัสไฟตรงและกระแสด้านออกทั้งสามเฟส กรณีที่ความถี่การสวิตช์เท่ากับ 2 kHz ของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบทั่วไป



รูปที่ 3.8 รูปคลื่นแรงดันวัดเทียบจุดกึ่งกลางบัสไฟตรงและกระแสด้านออกทั้งสามเฟส กรณีที่ความถี่การสวิตช์เท่ากับ 2 kHz ของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีลักษณะเสมือนต่อแบบวี



รูปที่ 3.9 รูปคลื่นแรงดันวัดเทียบจุดกึ่งกลางบัสไฟตรงและกระแสด้านออกทั้งสามเฟส กรณีที่ความถี่การสวิตช์เท่ากับ 20 kHz ของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบทั่วไป



รูปที่ 3.10 รูปคลื่นแรงดันวัดเทียบจุดกึ่งกลางบัสไฟตรงและกระแสด้านออกทั้งสามเฟส กรณีที่ความถี่การสวิตช์เท่ากับ 20 kHz ของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีลักษณะเสมือนต่อแบบวี

จากรูปที่ 3.7 และ 3.8 เมื่อเปรียบเทียบรูปคลื่นแรงดันที่เฟส U ของทั้งสองแบบจะเห็นว่าของแบบทั่วไป จะมีรูปคลื่นการมอดูเลตตามปรกติ ส่วนของแบบเสมือนต่อแบบวีจะมีลักษณะการมอดูเลตที่มีค่าวัฏจักรงานคงที่เป็น 50% ซึ่งทั้งสองวงจรจะให้ขนาดของกระแสทางด้านออกเท่ากัน ผลการจำลองที่ได้ยืนยันถึงความถูกต้องของวิธีการมอดูเลตด้วยสเปซเวกเตอร์ที่พัฒนาขึ้น แต่ขนาดคลื่นระลอกกระแสของวงจรอินเวอร์เตอร์เสมือนต่อแบบวีจะมีขนาดสูงกว่าอินเวอร์เตอร์แบบทั่วไป และจะยิ่งเห็นเด่นชัดขึ้นเมื่อวงจรทำงานที่ค่าความถี่การสวิตช์ต่ำๆ ทั้งนี้เพราะแรงดันบัสไฟตรงของอินเวอร์เตอร์เสมือนต่อแบบวีมีค่าสูงกว่าถึง 2 เท่า

3.4 การปรับปรุงรูปแบบการมอดูเลตของวงจรอินเวอร์เตอร์เสมือนต่อแบบวี

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเทคนิคในทางปฏิบัติ ที่ช่วยปรับปรุงวิธีการคำนวณในการกำหนดรูปแบบการสวิตช์ด้วยวิธีสเปซเวกเตอร์ที่ได้แสดงในหัวข้อก่อน โดยจะทำการหารูปคลื่นแรงดันของแต่ละเฟสที่ใช้วิธีเปรียบเทียบกับคลื่นพาหะสามเหลี่ยมโดยตรง ซึ่งจะทำให้ลดความยุ่งยากซับซ้อนในการคำนวณลงได้มาก

เมื่อกำหนดให้ v_x และ v_y คือองค์ประกอบของเวกเตอร์แรงดันคำสั่ง v^* ที่ต้องการสร้าง โดยปรกติเราจะคำนวณแรงดันเฟส v_u, v_v และ v_w จากสมการ

$$\begin{bmatrix} v_u \\ v_v \\ v_w \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} v_x \\ -\frac{1}{2}v_x + \frac{\sqrt{3}}{2}v_y \\ -\frac{1}{2}v_x - \frac{\sqrt{3}}{2}v_y \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

โดยอาศัยคุณสมบัติที่ว่า เราสามารถบวกแรงดันศูนย์เข้าไปในแรงดันทุกเฟสของสมการที่ (3.7) ได้โดยไม่ทำให้แรงดันเฟสที่โหลดมีค่าเปลี่ยนแปลง และเนื่องจากในการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์เสมือนต่อแบบวีนั้น แรงดันที่เฟส U เทียบกับกึ่งกลางบัสไฟตรงจะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นเราจึงทำการบวกเวกเตอร์แรงดัน v_z (เวกเตอร์ศูนย์) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $-v_u$ เข้าไปในทุกเฟส ทำให้เราได้เมตริกซ์สำหรับการแปลงแกนเวกเตอร์แรงดันจากสเปซเวกเตอร์เป็น 3 เฟส ขึ้นมาใหม่ ซึ่งเหมาะสำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์เสมือนต่อแบบวี ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} 0 \\ v_{vu} \\ v_{wu} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} v_x & & +v_z \\ -\frac{1}{2}v_x & +\frac{\sqrt{3}}{2}v_y & +v_z \\ -\frac{1}{2}v_x & -\frac{\sqrt{3}}{2}v_y & +v_z \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} v_x & & -v_x \\ -\frac{1}{2}v_x & +\frac{\sqrt{3}}{2}v_y & -v_x \\ -\frac{1}{2}v_x & -\frac{\sqrt{3}}{2}v_y & -v_x \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

โดยที่ $$\begin{bmatrix} 0 \\ v_{vu} \\ v_{wu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_u - v_u \\ v_v - v_u \\ v_w - v_u \end{bmatrix}$$

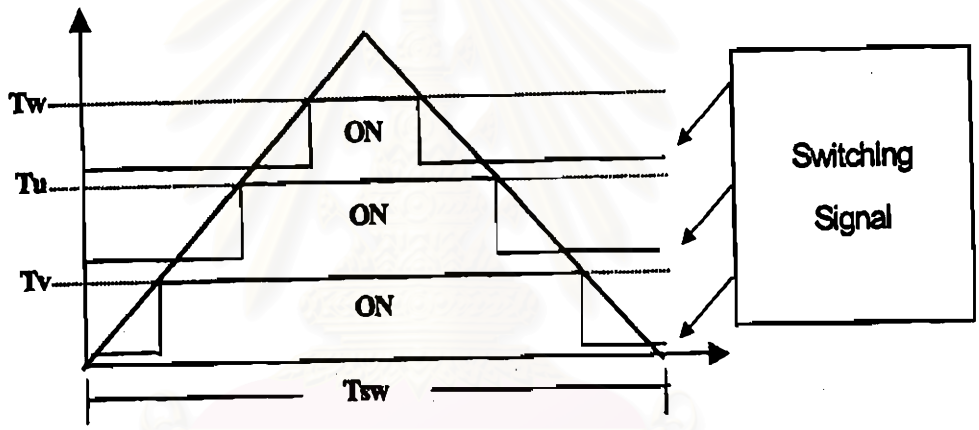
$$\begin{bmatrix} 0 \\ v_{vu} \\ v_{wu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\sqrt{\frac{3}{2}}v_x & +\frac{1}{\sqrt{2}}v_y \\ -\sqrt{\frac{3}{2}}v_x & -\frac{1}{\sqrt{2}}v_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\sqrt{\frac{3}{2}} & +\frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\sqrt{\frac{3}{2}} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

จากนั้นเราจึงสามารถนำค่าแรงดันในแต่ละเฟสมาคำนวณหาระดับสัญญาณที่ใช้ในการกำหนดช่วงเวลาที่ใช้ในการเปิดปิดสวิตช์ของแต่ละเฟส(Tu, Tv, Tw)ได้ โดยใช้หลักการเปรียบเทียบกับคลื่นพาหะสามเหลี่ยมที่มีคาบเป็น Tsw ซึ่งแสดงเป็นสมการในแต่ละเฟสได้ดังสมการที่ (3.10) ค่า (Tu, Tv, Tw) ดังกล่าวนี้จะนำไปใช้เป็นระดับสัญญาณในการเปรียบเทียบกับตัวนับเวลาภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งจะให้เอาท์พุทออกมาเป็นสัญญาณควบคุมการเปิดปิดของสวิตช์ดังแสดงในดังรูปที่ 3.11

$$Tu = \frac{Tsw}{2}$$

$$Tv = \frac{Tsw}{2} - \left(\frac{v_{wu}}{ed/2}\right)\left(\frac{Tsw}{2}\right) = \frac{Tsw}{2}\left(1 - \frac{2v_{wu}}{ed}\right)$$

$$Tw = \frac{Tsw}{2} - \left(\frac{v_{wu}}{ed/2}\right)\left(\frac{Tsw}{2}\right) = \frac{Tsw}{2}\left(1 - \frac{2v_{wu}}{ed}\right) \qquad (3.10)$$



รูปที่ 3.11 การใช้ค่า *Tu,Tv,Tw* ในการเปรียบเทียบกับตัวนับเวลา

จะเห็นว่าเราสามารถคำนวณระดับสัญญาณที่ใช้กำหนดช่วงเวลาการเปิดปิดสวิตช์ได้โดยง่าย เนื่องจากสามารถลดขั้นตอนในการคำนวณแบบเดิมที่ต้องทำการเลือกเซกเตอร์คำนวณช่วงเวลาการใช้เวกเตอร์แต่ละตัวของอินเวอร์เตอร์และคำนวณระดับสัญญาณที่ใช้ในการเปรียบเทียบในแต่ละเซกเตอร์ซึ่งค่อนข้างซับซ้อน เมื่อเรานำแนวคิดใหม่มาใช้ทำให้การเขียนโปรแกรมในทางปฏิบัติเป็นไปได้โดยง่าย

<u>การจำลองการทำงานของวงจรด้วยวิธีการมอดูเลตที่ได้พัฒนาขึ้น</u>

เราจะทำการการจำลองการทำงานของวงจรด้วยวิธีที่ได้พัฒนาขึ้นใหม่ โดยจะทำการมอดูเลตให้ได้ขนาดแรงดันด้านออกเท่ากันการมอดูเลตด้วยวิธีสเปซเวกเตอร์ในหัวข้อที่ 3.3 เปรียบเทียบ

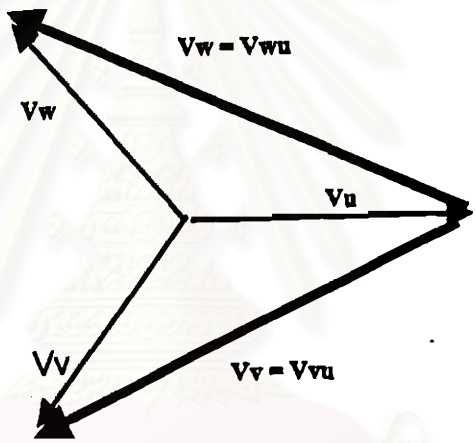
กัน โดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK กำหนดสภาวะการทำงานเหมือนกับในรูปที่ 3.7 ถึง 3.10

คำสั่งแรงดันเฟส U = 0

คำสั่งแรงดันเฟส V = Vvu = $310\sin(\omega t - 150^{\circ})$

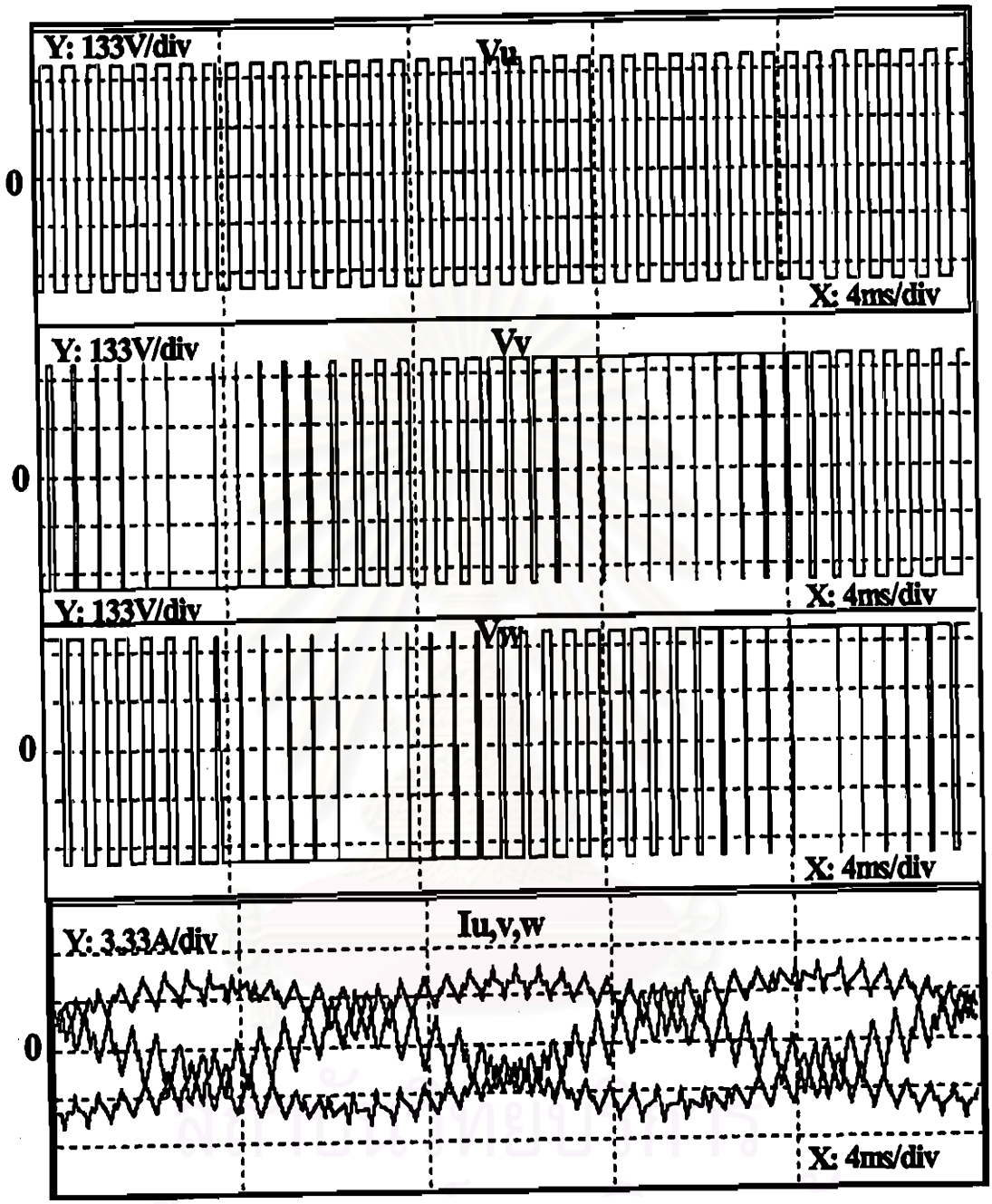
คำสั่งแรงดันเฟส W = Vwu = $310\sin(\omega t + 150^{\circ})$

ค่าแรงดันเฟสที่ใช้ในการเปรียบเทียบกับคลื่นพาหะแสดงได้ดังรูปที่ 3.12 คือ

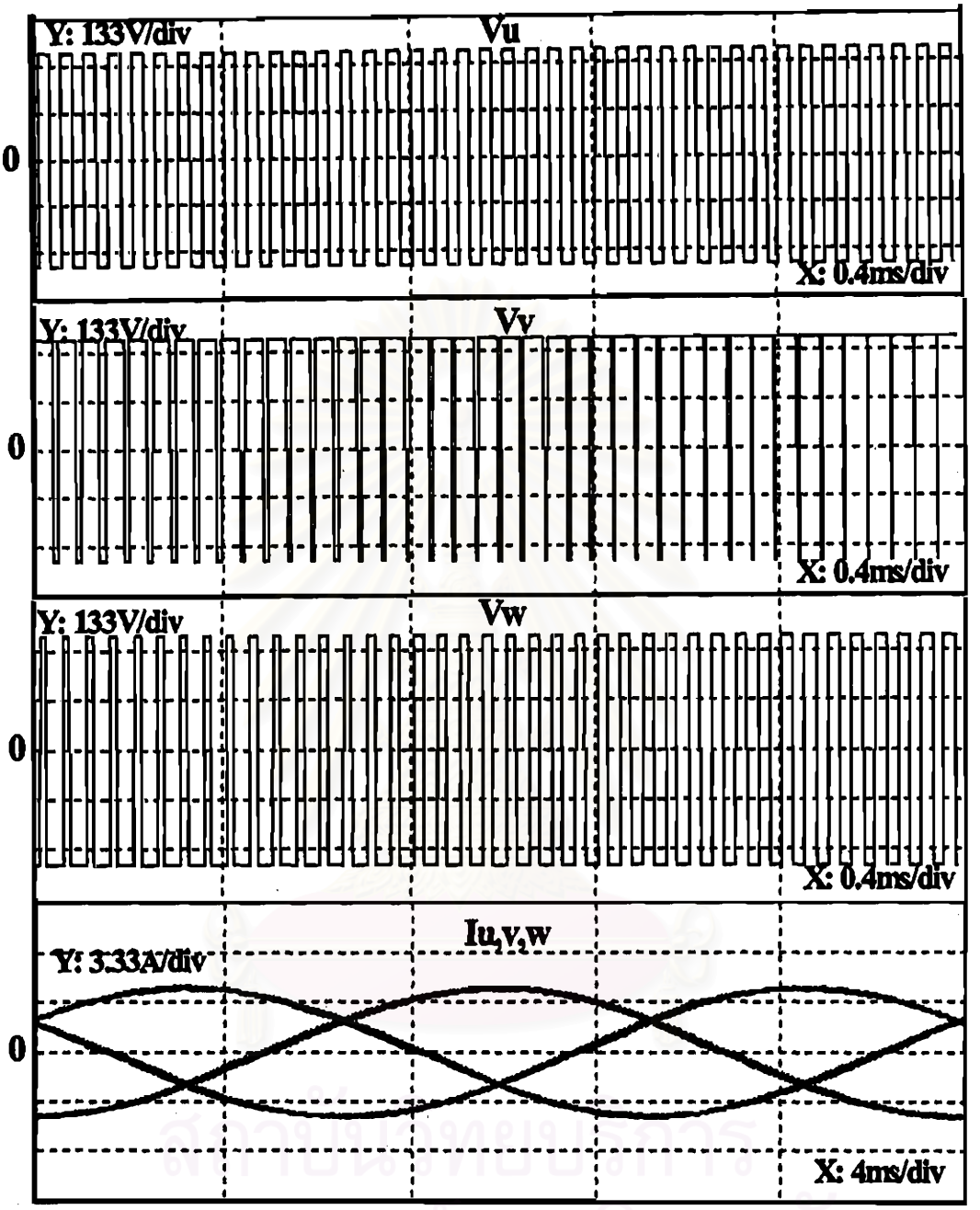


รูปที่ 3.12 เฟสเซอร์ของคำสั่งแรงดันที่ใช้การมอดูเลตแบบที่ได้พัฒนาขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.13 รูปคลื่นแรงดันวัดเทียบจุดกึ่งกลางบัสไฟตรงและกระแสด้านออกทั้งสามเฟส กรณีที่ความถี่การสวิตช์เท่ากับ 2 kHz ของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีลักษณะเสมือนต่อแบบวี กรณีที่ใช้วิธีคำนวณแรงดันเฟสโดยตรง



รูปที่ 3.14 รูปคลื่นแรงดันวัดเทียบจุดกึ่งกลางบัสไฟตรงและกระแสด้านออกทั้งสามเฟส กรณีที่ความถี่การสวิตช์เท่ากับ 20 kHz ของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีลักษณะเสมือนต่อแบบวี กรณีที่ใช้วิธีคำนวณแรงดันเฟสโดยตรง

จากผลการจำลองการทำงานจะเห็นว่าแม้เราจะใช้รูปแบบการมอดูเลตด้วยวิธีคำนวณแรงดันเฟสโดยตรงจะได้ผลการทดลองเหมือนกับที่ใช้วิธีการมอดูเลตด้วยวิธีสเปซเวกเตอร์ ทั้งที่ความถี่ 2kHz และ 20 kHz ซึ่งเป็นการยืนยันถึงความถูกต้องของวิธีการคำนวณที่พัฒนาขึ้น และเราจะใช้วิธีการนี้ในการทดลองจริงต่อไป

3.4 ผลการทดสอบการทำงานของวงอินเวอร์เตอร์เสมือนต่อแบบวี

ในหัวข้อนี้เราจะทำการทดสอบการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์โดยจะแสดงการเปรียบเทียบการทำงานระหว่างวงจรอินเวอร์เตอร์เสมือนต่อแบบวีกับวงจรอินเวอร์เตอร์แบบทั่วไป เพื่อพิจารณาให้เห็นถึงความแตกต่างของรูปแบบการสวิตช์ของวงจรทั้งสองโดยเฉพาะที่เฟส U อีกทั้งยังได้แสดงรูปคลื่นของกระแสทางด้านออกที่จ่ายให้แก่โหลดมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 370 W ในแต่ละเฟสด้วย โดยแบ่งการเปรียบเทียบการทำงานในเงื่อนไขต่างๆดังนี้

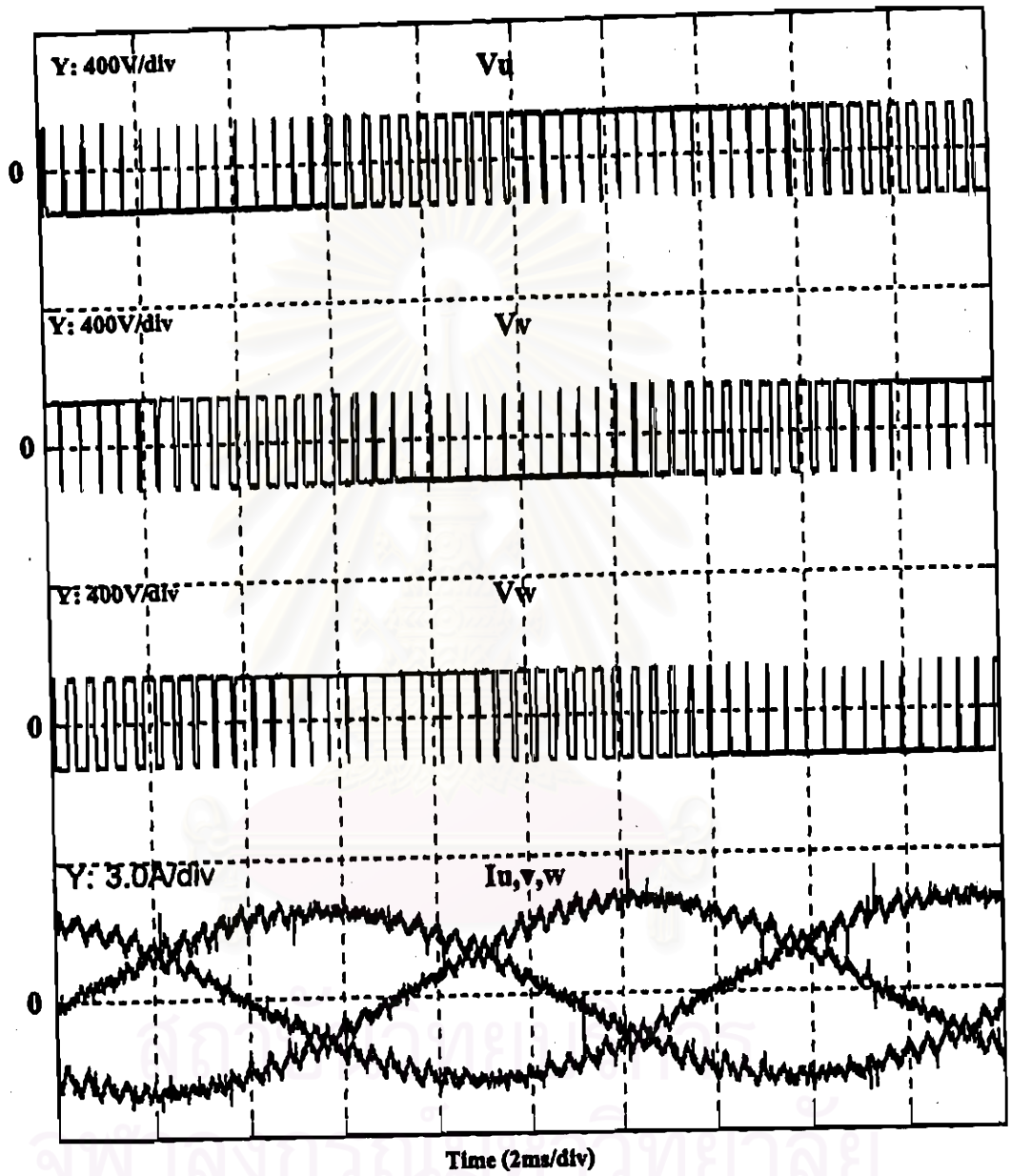
[1] เปรียบเทียบการทำงานที่สภาวะโหลดเบา (180W) ความถี่คำสั่ง 50 Hz

[2] เปรียบเทียบการทำงานที่สภาวะโหลดเบา (180W) ความถี่คำสั่ง 25 Hz

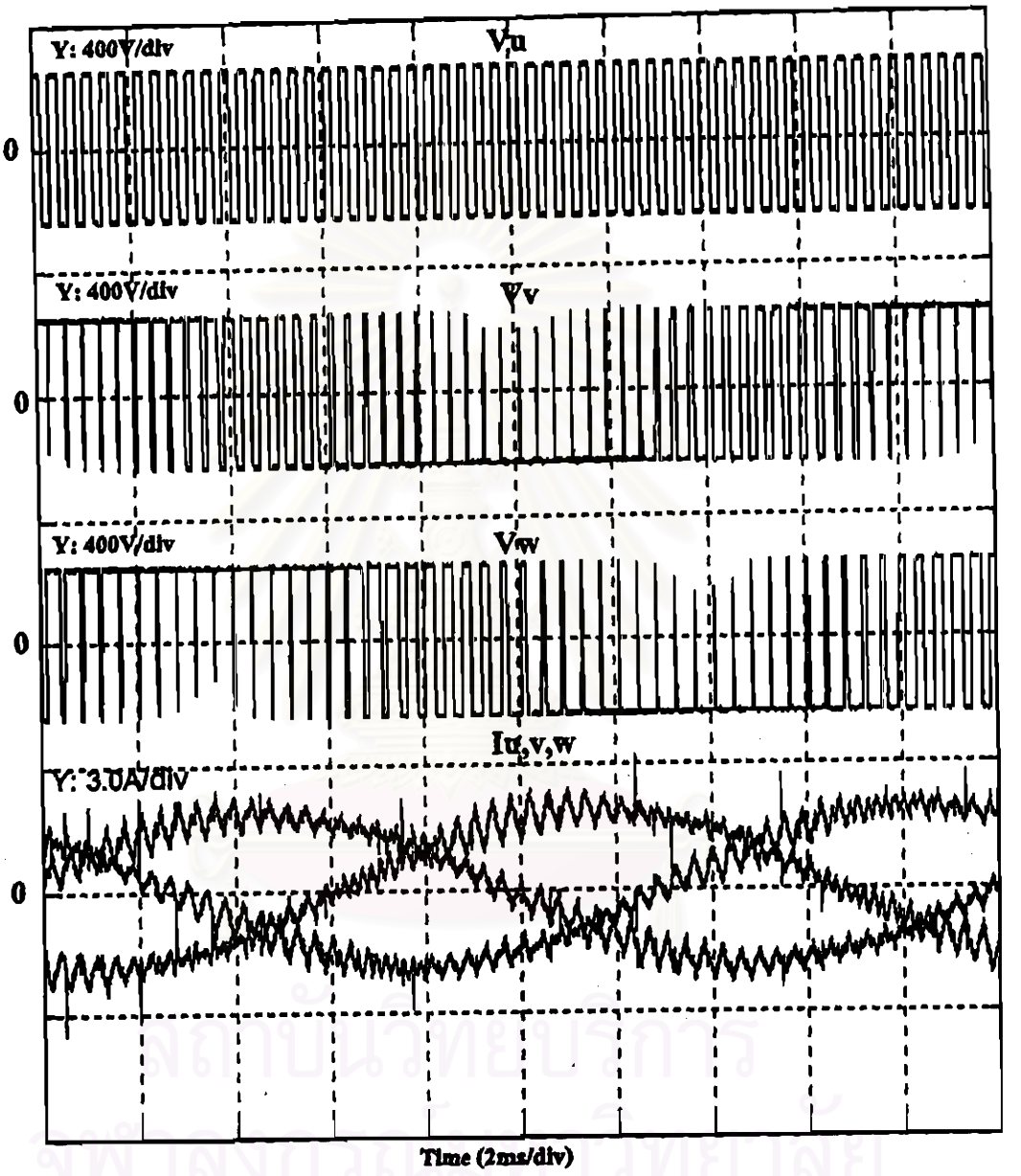
[3] เปรียบเทียบการทำงานที่สภาวะโหลดเบา (180W) ความถี่คำสั่ง 12.5 Hz

ผลการทดสอบแสดงได้ดังในรูปที่ 3.15 ถึง 3.24 ตามลำดับ ทั้งนี้แรงดันบัสไฟตรงของกรณีวงจรอินเวอร์เตอร์แบบทั่วไปเป็น 310 V และของกรณีวงจรอินเวอร์เตอร์เสมือนต่อแบบวีเป็น 620 V

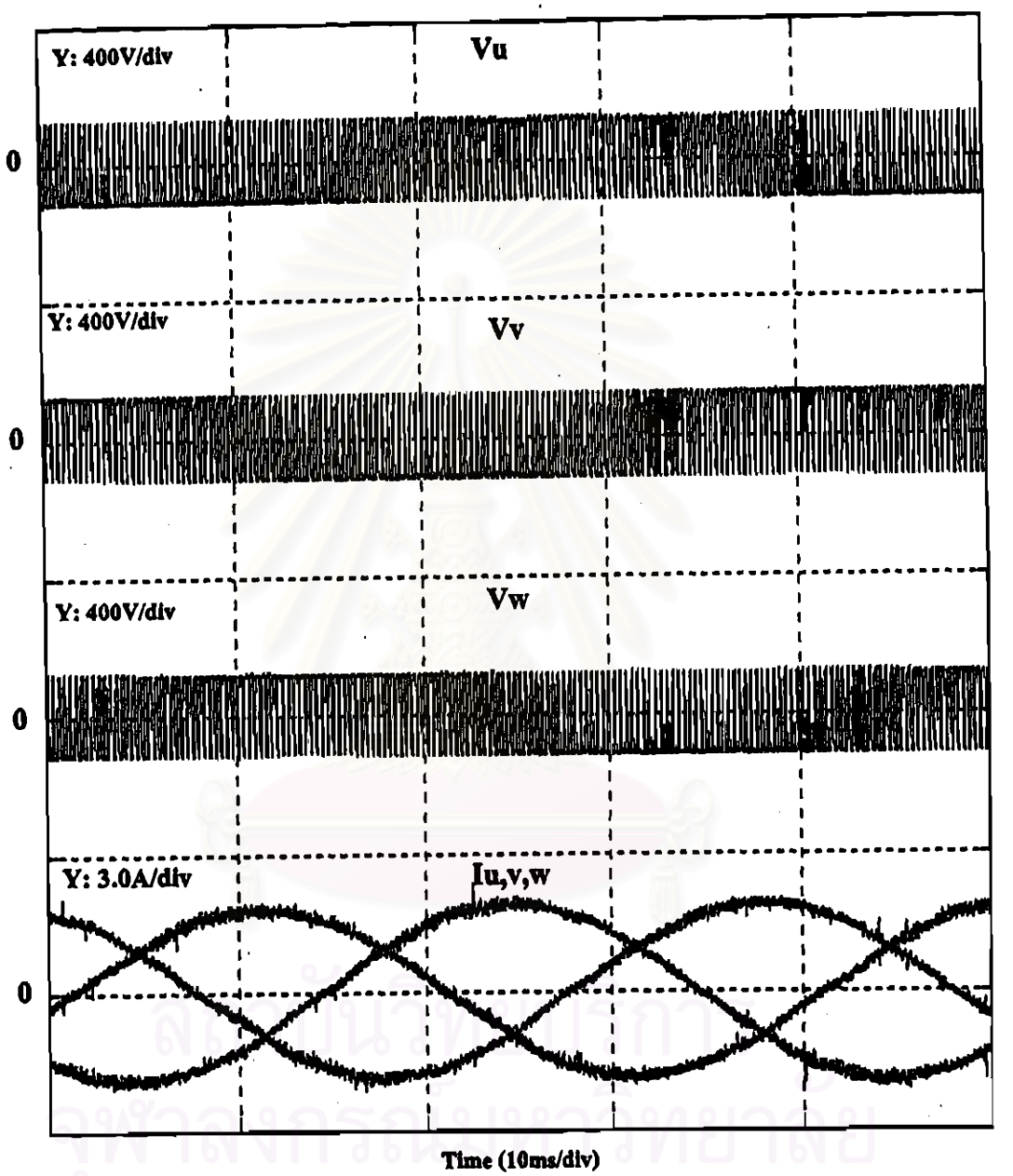
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



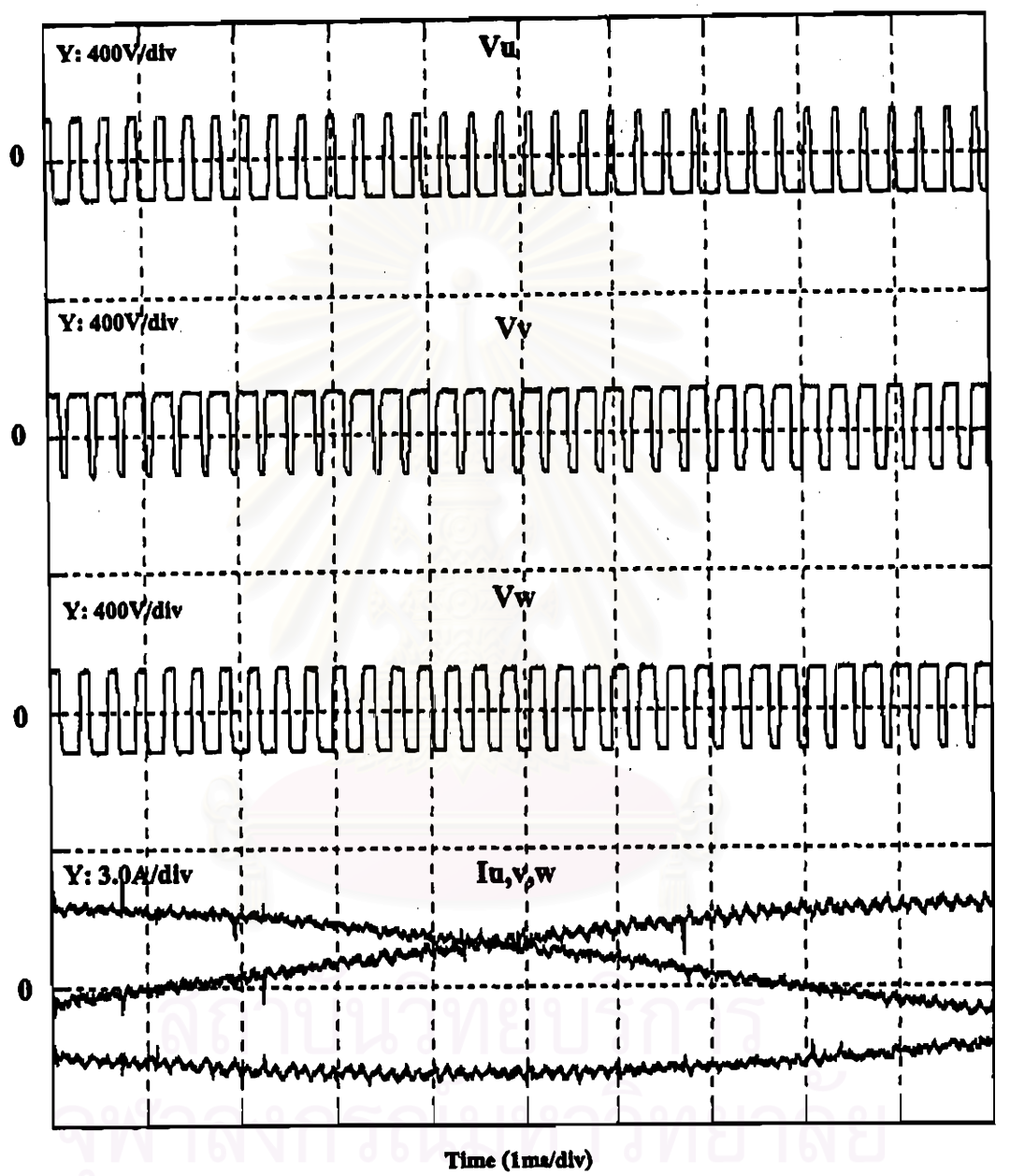
รูปที่ 3.15 รูปคลื่นแรงดันแต่ละเฟสเทียบจุดกึ่งกลางบัสไฟตรงและกระแสด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบทั่วไป ที่ความถี่คำสั่ง 50 Hz โหลดขนาด 180 W



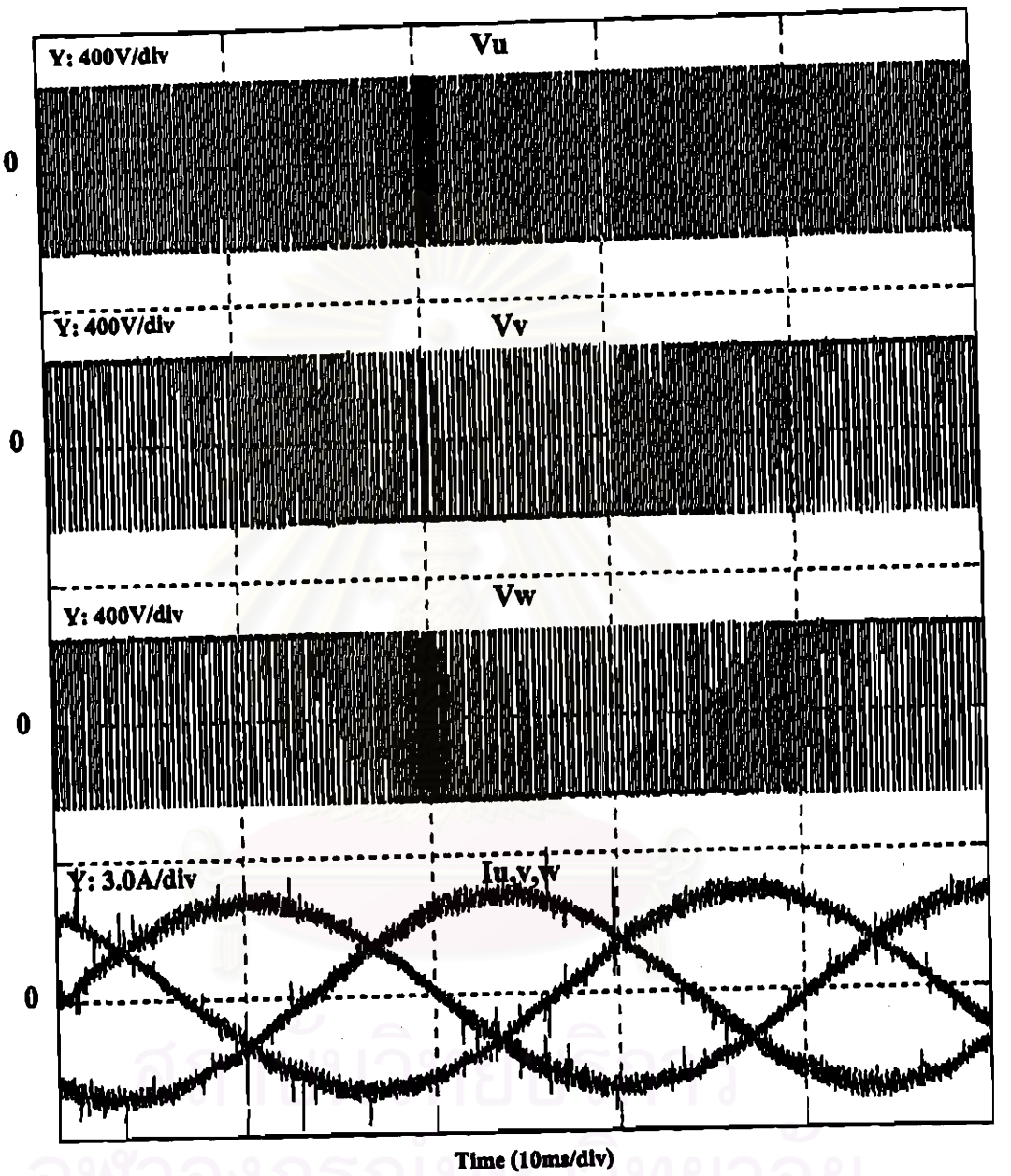
รูปที่ 3.16 รูปคลื่นแรงดันแต่ละเฟสเทียบจุดกึ่งกลางบัสไฟตรงและกระแสด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์เสมือนต่อแบบวี ที่ความถี่คำสั่ง 50 Hz โหลดขนาด 180 W



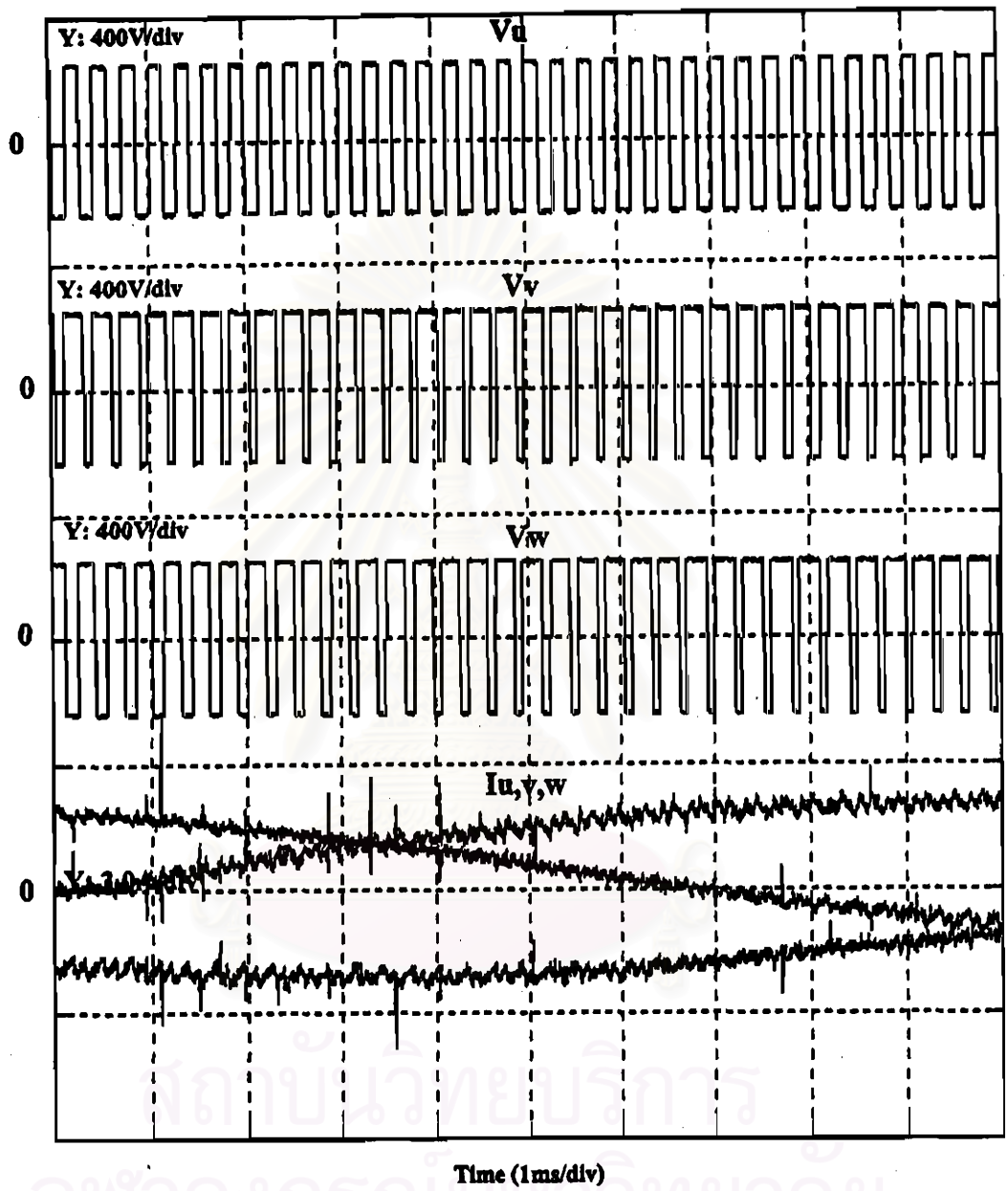
รูปที่ 3.17 รูปคลื่นแรงดันแต่ละเฟสเทียบจุดกึ่งกลางบัสไฟตรงและกระแสด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบทั่วไป ที่ความถี่คำสั่ง 25 Hz โหลดขนาด 180 W



รูปที่ 3.18 ภาพขยายของรูปคลื่นแรงดันแต่ละเฟสเทียบจุดกึ่งกลางบัสไฟตรงและกระแสด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบทั่วไป ในรูปที่ 3.17

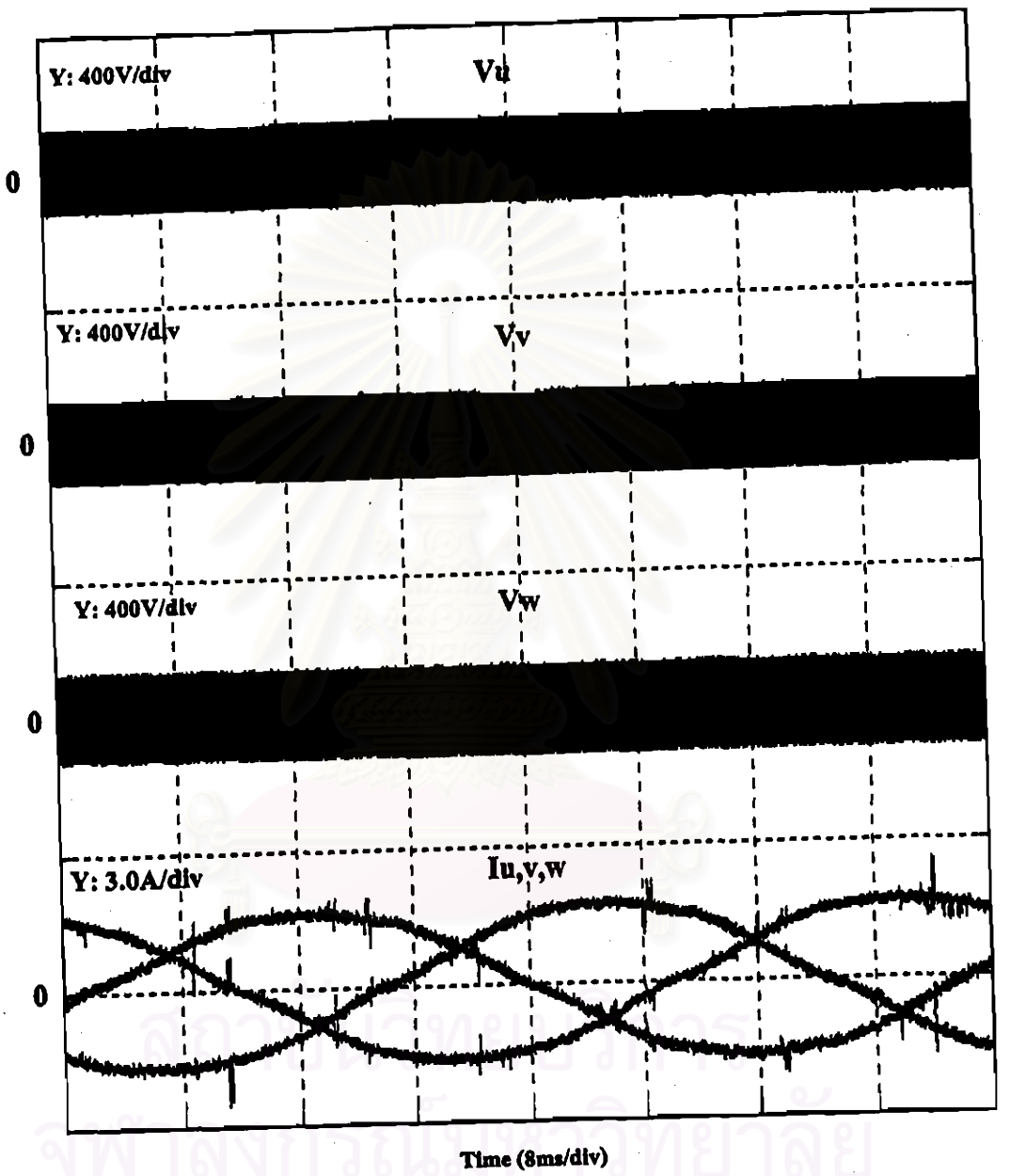


รูปที่ 3.19 รูปคลื่นแรงดันแต่ละเฟสเทียบจุดกึ่งกลางบัสไฟตรงและกระแสด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์เสมือนต่อแบบวี ที่ความถี่คำสั่ง 25 Hz โหลดขนาด 180 W

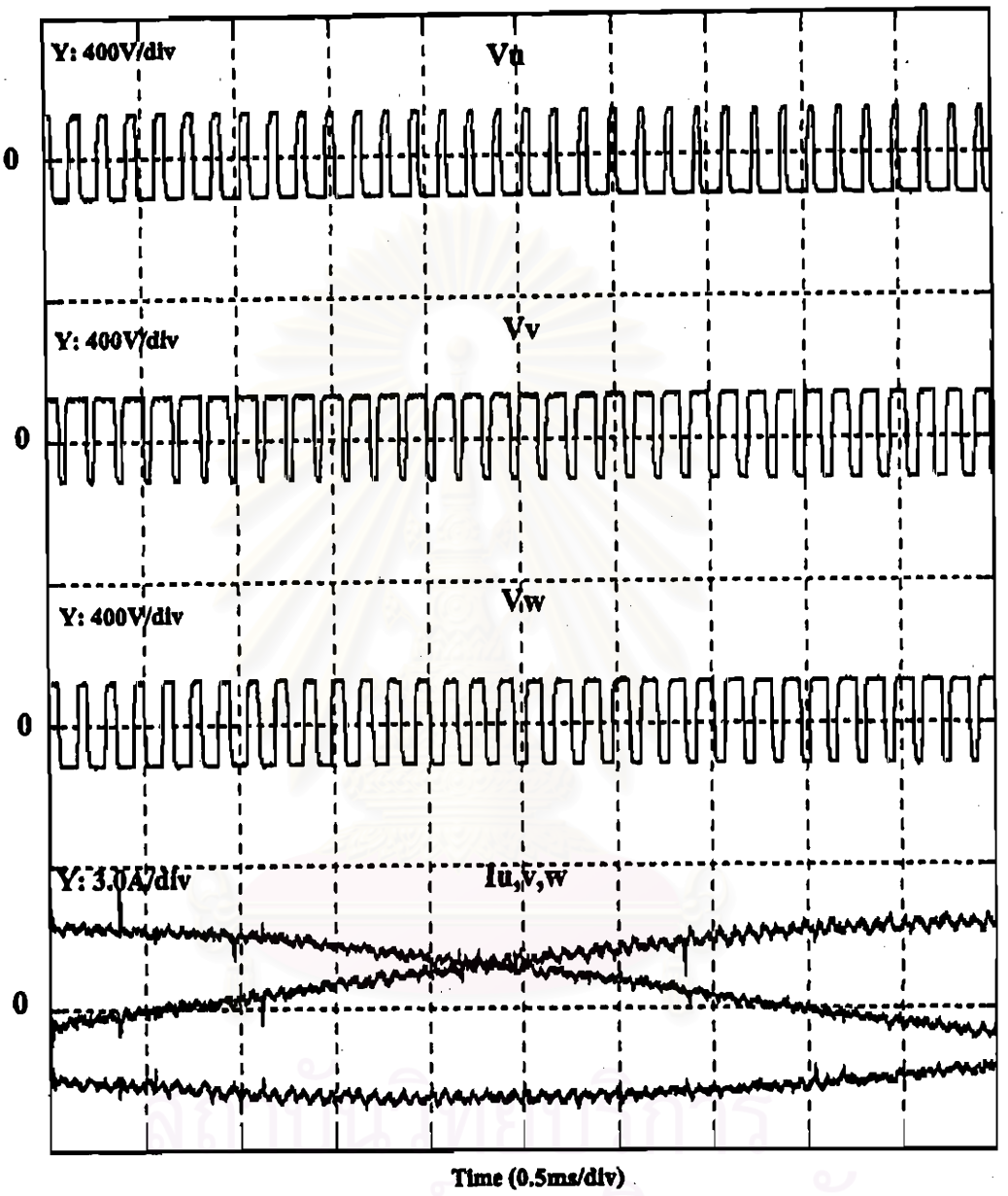


รูปที่ 3.20 ภาพขยายของรูปคลื่นแรงดันแต่ละเฟสเทียบจุดกึ่งกลางบัสไฟตรงและกระแสด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์เสมือนต่อแบบวี ในรูปที่ 3.19

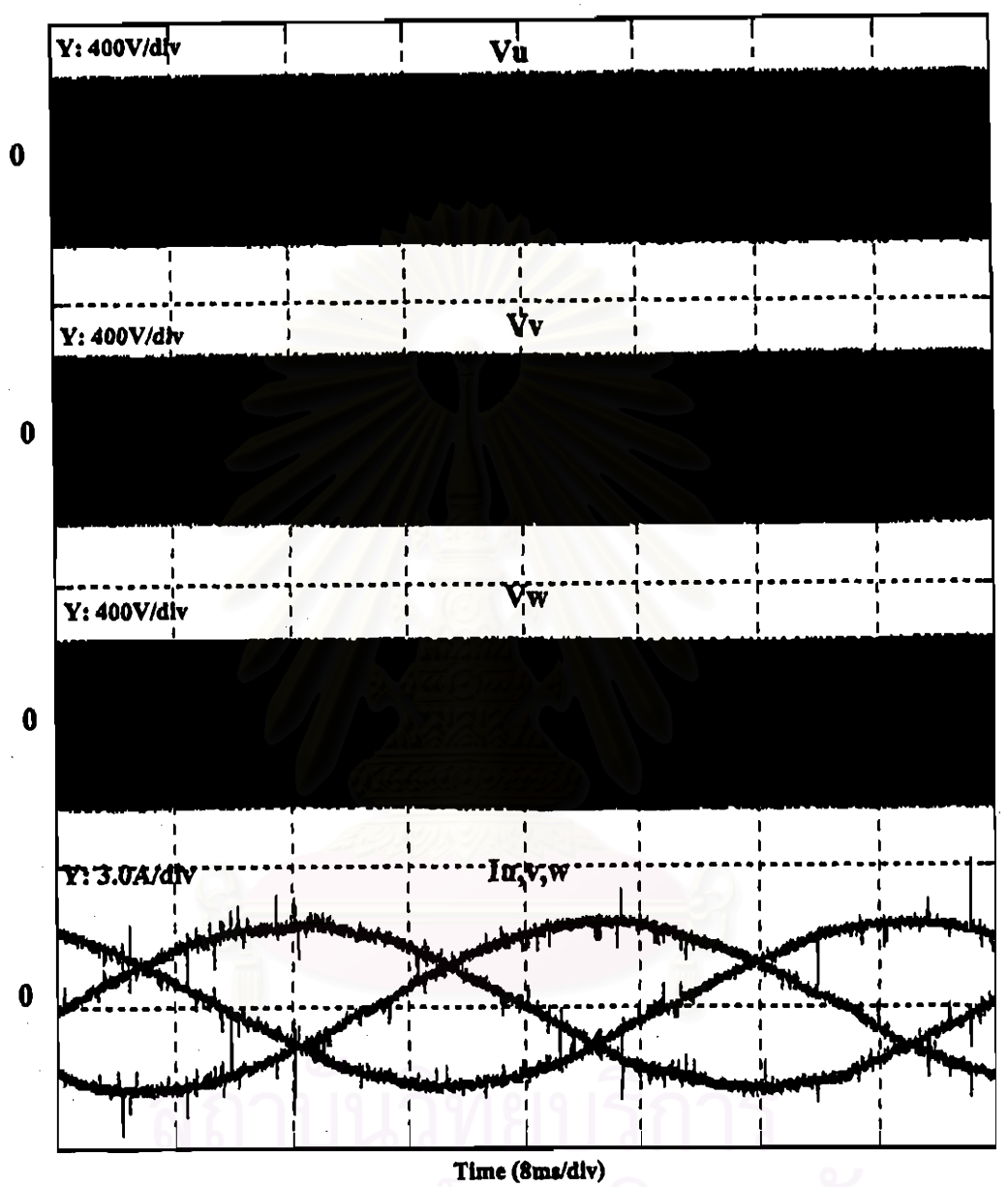
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



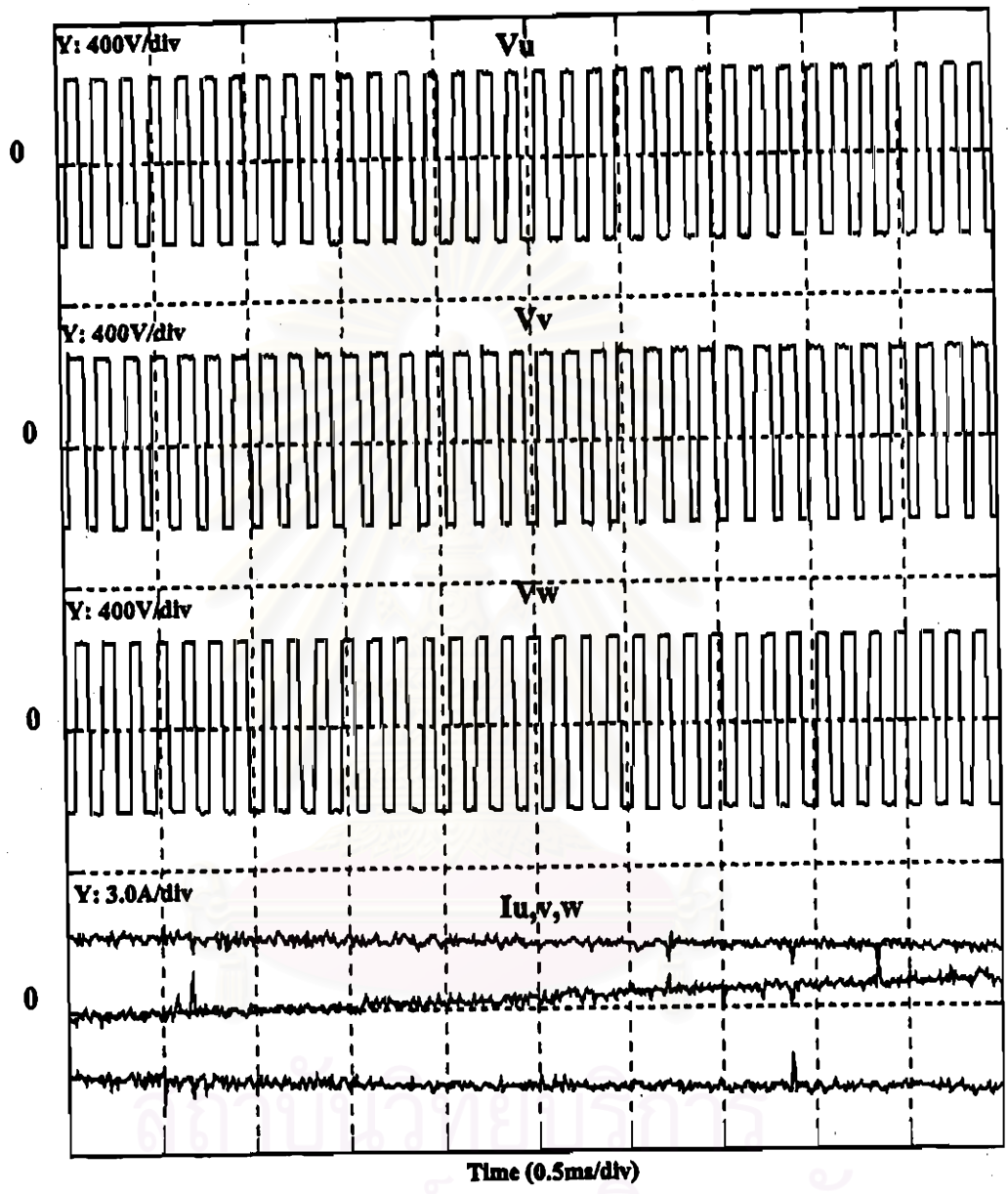
รูปที่ 3.21 รูปคลื่นแรงดันแต่ละเฟสเทียบจุดกึ่งกลางบัสไฟตรงและกระแสด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบทั่วไป ที่ความถี่คำสั่ง 12.5 Hz โหลดขนาด 180 W



รูปที่ 3.22 ภาพขยายของรูปคลื่นแรงดันแต่ละเฟสเทียบจุดกึ่งกลางบัสไฟตรงและกระแสด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบทั่วไป ในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.23 รูปคลื่นแรงดันแต่ละเฟสเทียบจุดกึ่งกลางบัสไฟตรงและกระแสด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์เสมือนต่อแบบวี ที่ความถี่คำสั่ง 12.5 Hz โหลดขนาด 180 W



รูปที่ 3.24 ภาพขยายของรูปคลื่นแรงดันแต่ละเฟสเทียบจุดกึ่งกลางบัสไฟตรงและกระแสด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์เสมือนต่อแบบวี ในรูปที่ 3.23

จากผลการทดสอบวงจรทั้ง 3 หัวข้อ จะได้ผลการทดลองในลักษณะเดียวกัน คือเมื่อพิจารณาแรงดันเฟส U วัดเทียบจุดกึ่งกลางบัสไฟตรง ของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบทั่วไปจะมีรูปคลื่นการมอดูเลตตามปรกติ และมีขนาดแรงดันบัสไฟตรงเป็น 310 V ส่วนวงจรอินเวอร์เตอร์เสมือนต่อแบบวีจะมีลักษณะการมอดูเลตที่เฟส U จะมีค่าวัฏจักรงานคงที่ที่ 50 % ขนาดแรงดันบัสไฟตรง 620 V และเมื่อพิจารณารูปคลื่นกระแสทางด้านออกทั้งสามเฟส ของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบทั่วไปจะมีขนาดของค่าระลอกที่น้อยกว่าแบบเสมือนต่อแบบวี แต่ขนาดค่ายอดของกระแสในทุกกรณีจะมีขนาดใกล้เคียงกันคือประมาณ 2.0 A

เราจึงสามารถที่จะสรุปลักษณะการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์เสมือนต่อแบบวีที่นำเสนอว่าสามารถทำงานแทนวงจรอินเวอร์เตอร์แบบทั่วไปได้ หากแต่เพียงจำเป็นต้องใช้แรงดันบัสไฟตรงที่มีขนาดมากกว่าแบบทั่วไปเป็น 2 เท่า แต่เนื่องจากในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดเล็กที่ใช้กับแรงดัน 220 V ได้แรงดันบัสไฟตรงที่ใช้จึงมีค่าเพียง 620 V จึงสามารถเลือกใช้อุปกรณ์สวิตช์กำลังขนาดแรงดันพิกัด 1200 V ได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย