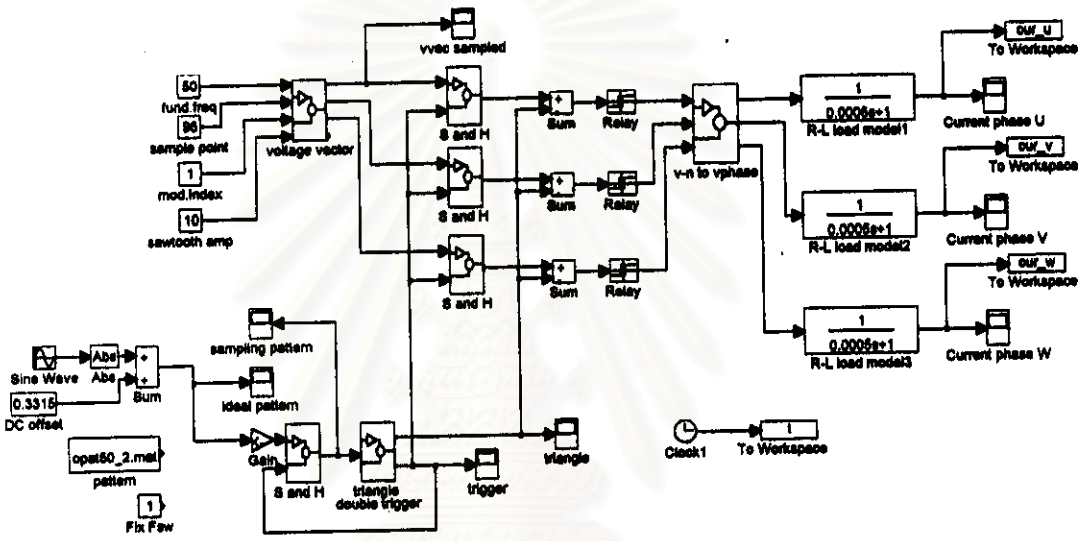
บทที่ 4
การจำลองระบบอินเวอร์เตอร์แบบแปรความถี่การสวิตช์

การสร้างระบบจำลองของอินเวอร์เตอร์แบบแปรความถี่การสวิตช์

การจำลองการทำงานของระบบจะใช้โปรแกรม MATLAB with SIMULINK ในการสร้างแบบจำลอง โดยบล็อกไดอะแกรมของระบบจำลองแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แบบจำลองของระบบอินเวอร์เตอร์แบบแปรความถี่การสวิตช์

หลักการทำงานของแบบจำลองระบบก็คือ การสร้างสัญญาณ PWM โดยเปรียบเทียบระหว่างรูปคลื่นสามเหลี่ยมที่สามารถแปรความถี่การสวิตช์ได้ กับระดับแรงดันที่คำนวณจากหลักการของการสร้างเวกเตอร์แรงดัน โดยจะอยู่ในบล็อกของ voltage vector ดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยบล็อก voltage vector นี้ จะมีการคำนวณเป็นสมการที่ซับซ้อนพอสมควร(ซึ่งอธิบายมาแล้วในบทที่2) ดังนั้นจึงไม่สามารถใช้บล็อกสำเร็จรูปใน SIMULINK มาประกอบกันได้ จึงจำเป็นต้องเขียนเป็นภาษาระดับสูงที่โปรแกรม MATLAB และ SIMULINK สามารถเข้าใจและประมวลผลได้เรียกว่า S-function โดยรายละเอียดของวิธีการเขียน S-function สามารถศึกษาได้จากคู่มือการใช้โปรแกรม SIMULINK

ส่วนประกอบอื่น ๆที่เหลือ สามารถใช้บล็อกสำเร็จรูปในการสร้างได้ทั้งหมด สิ่งที่เราต้องการก็คือ การจับรูปคลื่นของกระแสเฟสของโหลดมาทำการวิเคราะห์หาสเปกตรัมว่ามีการกระจายของสเปกตรัมเป็นอย่างไร โดยจะทำการวัดเปรียบเทียบที่ลักษณะของความถี่การสวิตช์ที่

ต่างกัน 3 แบบคือ ความถี่การสวิตช์คงที่ แปรความถี่การสวิตช์ตามแบบ optimal subcycle และแปรความถี่การสวิตช์ตามแบบค่าสัมบูรณ์ของไซน์โดยลักษณะของความถี่การสวิตช์ทั้งสามแบบสามารถเลือกได้โดยง่ายดังแสดงในรูป 4.1 โดยความถี่การสวิตช์คงที่ และการแปรความถี่ตามแบบค่าสัมบูรณ์ของไซน์จะสามารถใช้บล็อกสำเร็จรูปสร้างฟังก์ชันต่อเนื่องที่ต้องการขึ้นมาได้ ส่วนแบบแผนการสวิตช์แบบ optimal subcycle จะต้องทำการคำนวณทาง numerical และเก็บข้อมูลไว้เป็นไฟล์ เพื่อทำการเรียกใช้ในการจำลองระบบซึ่งจะยุ่งยากกว่าเล็กน้อย รายละเอียดของบล็อกที่สำคัญมีดังนี้

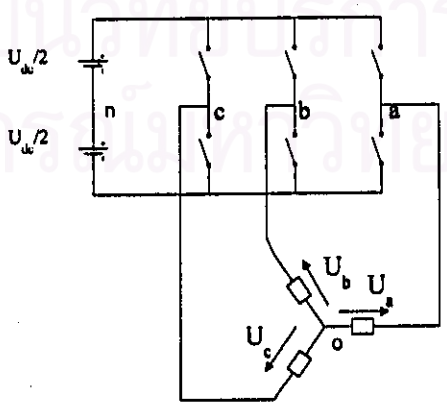
1. <u>บล็อกสเปซเวกเตอร์ของแรงดัน</u>(voltage vector) เป็นตัวกำเนิดค่าความกว้างพัลส์ในแต่ละเฟสตามหลักการของการสร้างสเปซเวกเตอร์ของแรงดัน โดยค่าความกว้างพัลส์ดังกล่าวจะอยู่ในระดับ 0-100% ของแอมพลิจูดของสัญญาณคลื่นสามเหลี่ยม โดยจะรับค่าพารามิเตอร์เข้ามา 4 อย่างคือ 1.ความถี่หลักมูลที่ต้องการ 2.ขนาดการชักตัวอย่างข้อมูลเพื่อการสร้างเวกเตอร์แรงดันใน 1 คาบความถี่หลักมูล(sample point) 3.ดัชนีการมอดูเลต และ 4.แอมพลิจูดของคลื่นสามเหลี่ยม เนื่องจากในการสร้างระบบจริงด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ เราจะใช้การสร้างเวกเตอร์แรงดันด้วยการเปิดตารางร่วมกับการคำนวณ ดังนั้น ค่าที่คำนวณเก็บไว้ในตารางจะมีจำนวนข้อมูลที่แน่นอนค่าหนึ่ง ยกตัวอย่างเช่น ถ้าเราเก็บข้อมูลใน 1 คาบความถี่หลักมูลไว้ 96 ค่า (96 sample points) จะทำให้เรามีข้อมูลของเวกเตอร์แรงดันที่มีการคำนวณที่มุมที่ห่างกันขั้นละ 360°/96 = 3.75° ดังนั้น ยิ่งจำนวนข้อมูลที่ชักตัวอย่างไว้มีมาก ก็จะได้ข้อมูลที่ละเอียดขึ้น แต่ก็เปลืองหน่วยความจำมากขึ้นเช่นกัน ดังนั้นในการจำลองระบบจึงมีการกำเนิดเวกเตอร์แรงดันเป็นขั้น ๆ ให้เหมือนกับระบบจริง

2. <u>บล็อกสัญญาณคลื่นสามเหลี่ยม</u>(triangle and double trigger) เป็นตัวกำเนิดสัญญาณคลื่นสามเหลี่ยมที่สามารถเปลี่ยนความถี่ได้ทุก ๆ ครึ่งคาบการสวิตช์ โดยเมื่อสัญญาณคลื่นสามเหลี่ยมมีค่าสูงสุดหรือมีค่าต่ำสุด จะกำเนิดสัญญาณ trigger ออกมาเพื่อกระตุ้นให้ภาคชักตัวอย่างและคงค่า (sample and hold) ทำงาน เพื่อที่จะนำค่าความถี่การสวิตช์ค่าใหม่ไปใช้ โดยสัญญาณ trigger จะกระตุ้นภาคชักตัวอย่างและคงค่าของสัญญาณสเปซเวกเตอร์ของแรงดันด้วย เพื่อให้การเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณคลื่นสามเหลี่ยมกับสัญญาณสเปซเวกเตอร์ของแรงดันมีค่าที่ถูกต้อง ส่วนแบบแผนการแปรความถี่การสวิตช์จะสามารถเลือกได้ว่าจะใช้ความถี่การสวิตช์คงที่ แปรความถี่การสวิตช์ตามแบบแผนของoptimal subcycle หรือแปรความถี่การสวิตช์ตามแบบแผนของค่าสัมบูรณ์ของไซน์ ซึ่งแบบแผนของความถี่การสวิตช์ที่เลือกจะเป็นฟังก์ชันต่อเนื่องซึ่งภาคกำเนิดรูปคลื่นสามเหลี่ยมจะชักตัวอย่างค่าไปใช้ในแต่ละคาบการสวิตช์

อย่างไรก็ดี เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการแปรความถี่ของคลื่นสามเหลี่ยมกับระบบจริงซึ่งจะใช้ตัวจับเวลาในไมโครคอนโทรลเลอร์ในการเลียนแบบการทำงานของคลื่นสามเหลี่ยม จะพบว่าการแปรความถี่ของคลื่นสามเหลี่ยมจะเป็นการแปรค่าความชันของคลื่นสามเหลี่ยม โดยที่แอมพลิจูดของคลื่นสามเหลี่ยมคงที่ ในขณะที่ในระบบไมโครคอนโทรลเลอร์เมื่อมองในลักษณะว่าเป็นคลื่นสามเหลี่ยมจะเป็นสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีความชันคงที่ แต่แอมพลิจูดเปลี่ยนไป (เนื่องจากสัญญาณนาฬิกาที่ใช้กำเนิดฐานเวลาของตัวจับเวลามีความถี่ที่คงที่) ดังนั้น ในการเขียนซอฟต์แวร์สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์จะต้องมีการปรับให้เหมาะสมด้วย ดังจะแสดงรายละเอียดในบทที่ 5

3. <u>บล็อกเปรียบเทียบสัญญาณ</u> จะทำการเปรียบเทียบสัญญาณระหว่างสัญญาณเวกเตอร์แรงดันกับสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมเพื่อกำเนิดสัญญาณ PWM ในแต่ละเฟสออกมา โดยระดับแรงดันของ PWM ซึ่งในระบบจริงจะขึ้นอยู่กับแหล่งจ่ายไฟตรงจะสามารถตั้งค่าได้ในบล็อก relay ซึ่งบล็อก relay นี้จะเป็นบล็อกฮิสเตอร์ริซีสสำหรับแปลงค่าผลต่างระหว่างระดับแรงดันของบล็อกเวกเตอร์แรงดันกับสัญญาณคลื่นสามเหลี่ยมที่เป็นฟังก์ชันต่อเนื่อง ให้เป็นสัญญาณ PWM ที่มีระดับแรงดันเพียง 2 ระดับคือ $+U_{dc}/2$ และ $-U_{dc}/2$ เมื่อ U_{dc} คือแรงดันของแหล่งจ่ายไฟตรง

4. <u>บล็อกคำนวณแรงดันเฟสของโหลด</u> เนื่องจากเราจะจำลองระบบโดยใช้โหลดเป็น R-L ที่ต่อแบบ Y ดังนั้นแรงดันที่ได้จากบล็อกเปรียบเทียบสัญญาณซึ่งเป็นแรงดันเฟสที่เทียบกับจุดกึ่งกลางของแหล่งจ่ายไฟตรง จะต้องแปลงให้เป็นแรงดันตกคร่อมโหลดในแต่ละเฟสก่อน โดยสามารถแปลงแรงดันดังกล่าวได้ดังนี้



รูปที่ 4.2 แบบจำลองภาคกำลังของระบบของอินเวอร์เตอร์

แรงดันที่ได้จากบล็อกเปรียบเทียบสัญญาณจะเป็นแรงดัน U_{an}, U_{bn} และ U_{cn} ตามลำดับ เราต้องการหาค่า U_a, U_b และ U_c ดังนั้นจะสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$U_a = U_{an} - U_{on} \quad (4.1)$$

$$U_b = U_{bn} - U_{on} \quad (4.2)$$

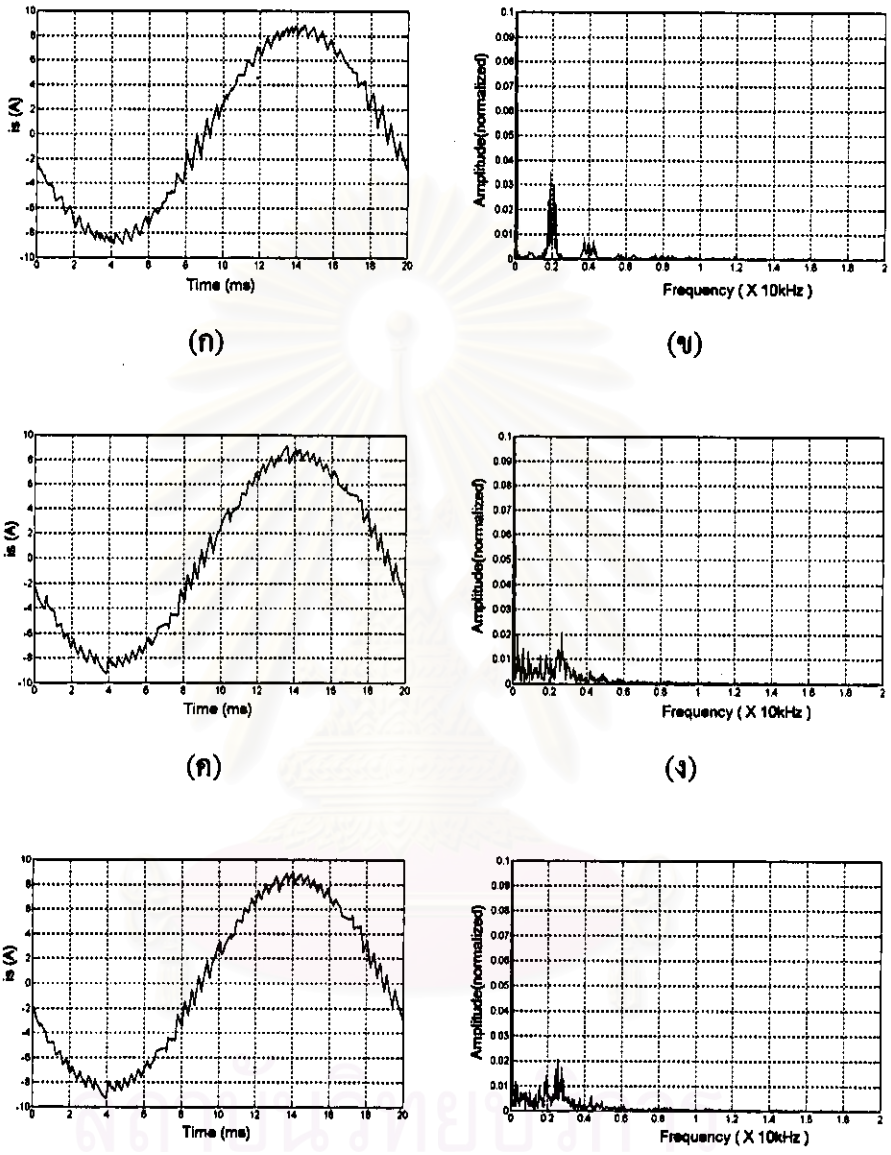
$$U_c = U_{cn} - U_{on} \quad (4.3)$$

$$U_{on} = (U_{an} + U_{bn} + U_{cn}) / 3 \quad (4.4)$$

จากสมการ (4.1) ถึงสมการ (4.4) เราสามารถนำไปสร้างเป็นบล็อกคำนวณแรงดันเฟสของโหลดได้ โดยมีเงื่อนไขว่าอิมพีแดนซ์ของโหลดในแต่ละเฟสต้องเท่ากัน เมื่อได้แรงดันเฟสของโหลดมาแล้วเราจะหากระแสเฟสของโหลด เพื่อนำไปพิจารณาสเปกตรัมของกระแสต่อไป โดยโหลดที่ใช้จะใช้โหลด R-L เนื่องจากการหาแบบแผนการแปรความถี่การสวิตช์ที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 มาจากการคำนวณโดยสมมติว่าโหลดเป็น R-L เช่นกัน จึงจะทำการจำลองระบบให้สอดคล้องกับแบบทฤษฎีในบทที่ 3 เมื่อเราได้สัญญาณของกระแสเฟสของโหลดมาแล้ว เราจะทำการวิเคราะห์สเปกตรัมของกระแสโดยใช้ฟังก์ชัน FFT (Fast Fourier Transform) ของ MATLAB โดยจะวิเคราะห์ในย่านความถี่เสียงคือ 0-20 kHz เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์เรื่องเสียงรบกวนต่อไป

<u>ผลการจำลองระบบ</u>

ในการจำลองระบบจะทำการเปรียบเทียบผลการจำลองระบบระหว่างระบบอินเวอร์เตอร์ที่มีการแปรความถี่การสวิตช์กับระบบที่มีความถี่การสวิตช์คงที่ โดยจะมุ่งพิจารณาที่การกระจายของสเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิก โดยในการจำลองระบบจะใช้ความถี่การสวิตช์เฉลี่ย 2 kHz โดยใช้โหลดเป็น R-L ที่มีค่า R = 1Ω และ L=0.5 mH เท่ากันทุกเฟสและมีแรงดันไฟตรง(dc bus)เท่ากับ 15V โดยต่อโหลดในแบบ Y ผลการจำลองระบบจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ กระแสเฟสของโหลด และ สเปกตรัมของกระแสเฟสของโหลด โดยใช้ฟังก์ชัน FFT ของ MATLAB ในการวิเคราะห์ โดยย่านความถี่จะพิจารณาจาก 0-20kHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่หูมนุษย์ได้ยินเพื่อประโยชน์ในการวิเคราะห์ด้านเสียง โดยขนาดของฮาร์มอนิกของกระแสในรูปจะคิดเป็นค่า normalized เพื่อเปรียบเทียบกับขนาดของกระแสที่ความถี่หลักมูล โดยขนาดของกระแสที่ความถี่หลักมูลมีค่าเป็นหนึ่ง และได้ขยายสเกลให้มีค่าเต็มสเกลเท่ากับ0.1 เพื่อให้เห็นสเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกได้ชัดเจน ผลการจำลองระบบแสดงดังรูปที่4.3 ถึงรูปที่4.7

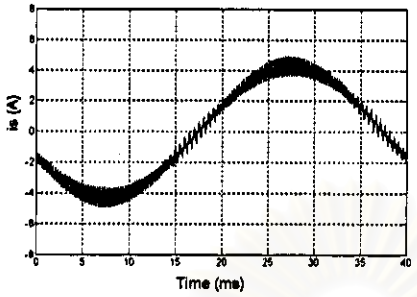


รูปที่4.3 ผลการจำลองระบบที่ความถี่หลักมูล 50Hz

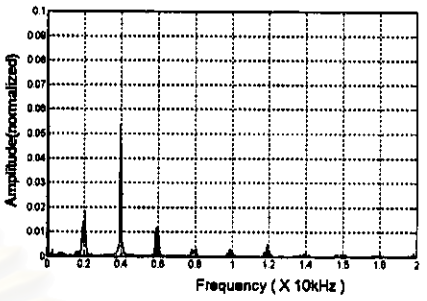
(ก),(ข) กระแสเฟสและสเปกตรัมของกระแสเฟส เมื่อความถี่การสวิตช์คงที่=2kHz

(ค),(ง) กระแสเฟส และสเปกตรัมของกระแสเฟส เมื่อความถี่การสวิตช์เฉลี่ย=2kHz และแปรความถี่ตามแบบแผน optimum subcycle

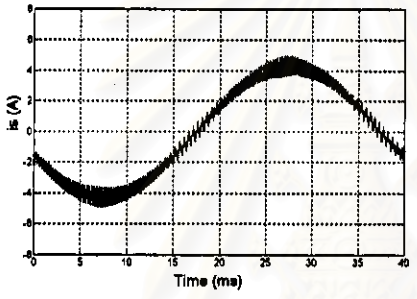
(จ),(ฉ) กระแสเฟส และสเปกตรัมของกระแสเฟส เมื่อความถี่การสวิตช์เฉลี่ย=2kHz และแปรความถี่ตามแบบแผนค่าสัมบูรณ์ของไซน์



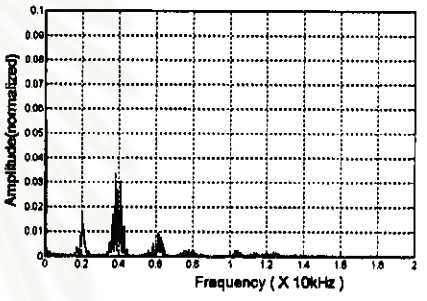
(ก)



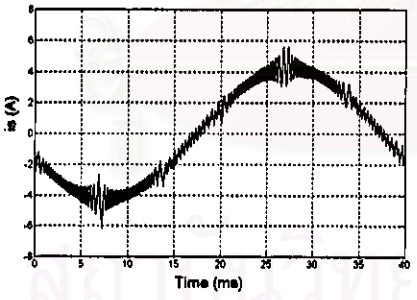
(ข)



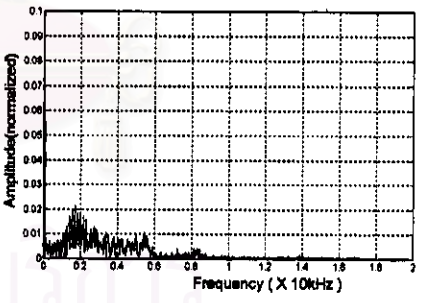
(ค)



(ง)



(จ)



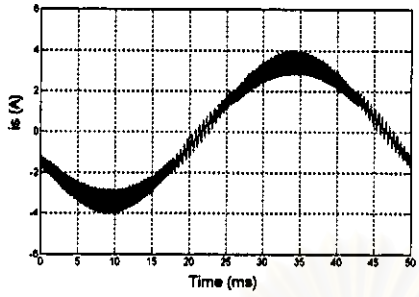
(ฉ)

รูปที่4.4 ผลการจำลองระบบที่ความถี่หลักมูล 25Hz

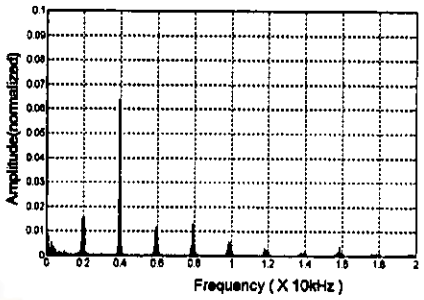
(ก),(ข) กระแสเฟสและสเปกตรัมของกระแสเฟส เมื่อความถี่การสวิตช์คงที่=2kHz

(ค),(ง) กระแสเฟส และสเปกตรัมของกระแสเฟส เมื่อความถี่การสวิตช์เฉลี่ย=2kHz และแปรความถี่ตามแบบแผน optimum subcycle

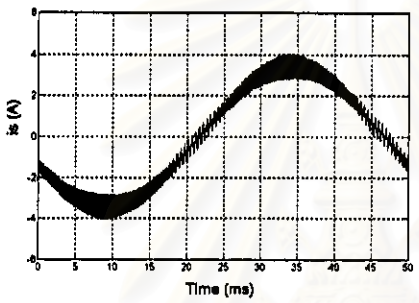
(จ),(ฉ) กระแสเฟส และสเปกตรัมของกระแสเฟส เมื่อความถี่การสวิตช์เฉลี่ย=2kHz และแปรความถี่ตามแบบแผนค่าสัมบูรณ์ของไซน์



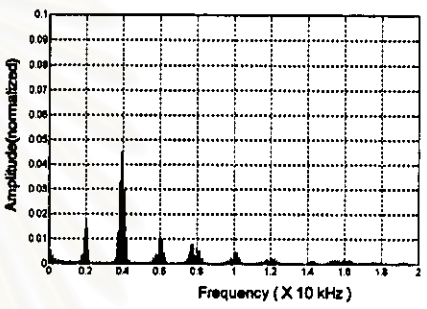
(ก)



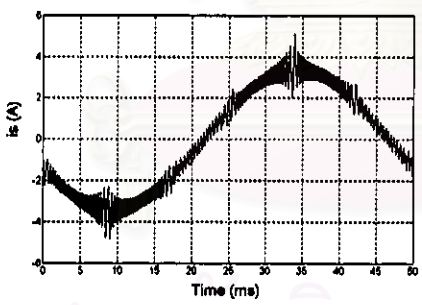
(ข)



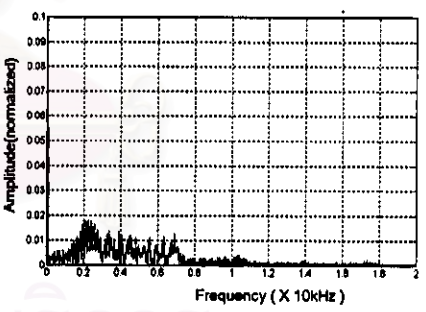
(ค)



(ง)



(จ)



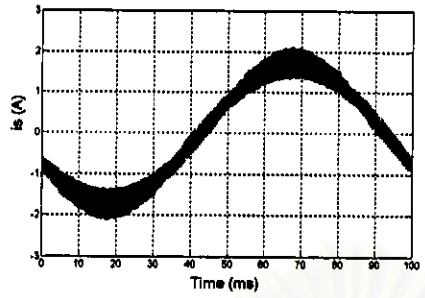
(ฉ)

รูปที่4.5 ผลการจำลองระบบที่ความถี่หลักมูล 20Hz

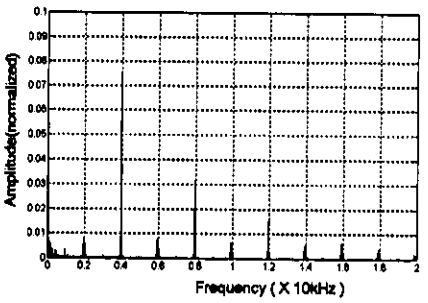
(ก),(ข) กระแสเฟสและสเปกตรัมของกระแสเฟส เมื่อความถี่การสวิตช์คงที่=2kHz

(ค),(ง) กระแสเฟส และสเปกตรัมของกระแสเฟส เมื่อความถี่การสวิตช์เฉลี่ย=2kHz และแปรความถี่ตามแบบแผน optimum subcycle

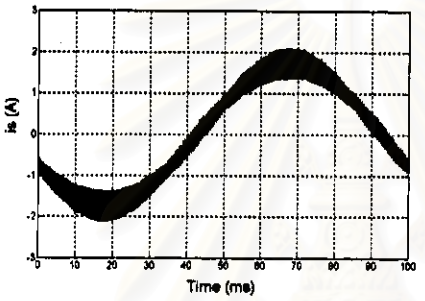
(จ),(ฉ) กระแสเฟส และสเปกตรัมของกระแสเฟส เมื่อความถี่การสวิตช์เฉลี่ย=2kHz และ. แปรความถี่ตามแบบแผนค่าสัมบูรณ์ของไซน์



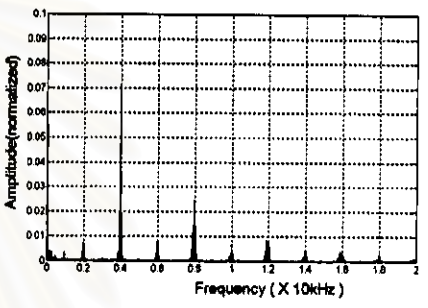
(ก)



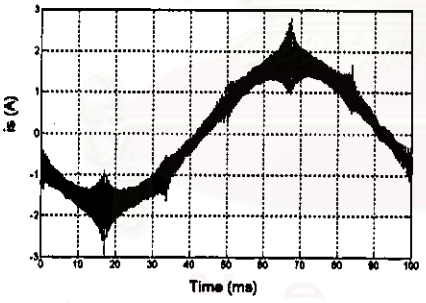
(ข)



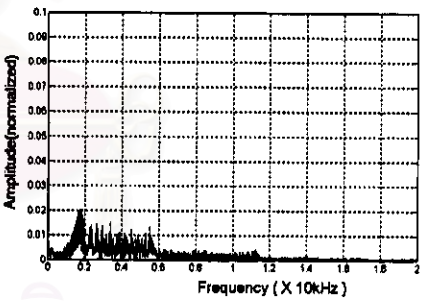
(ค)



(ง)



(จ)



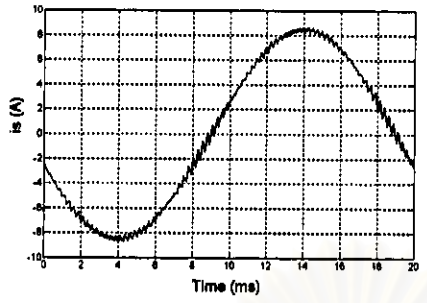
(ฉ)

รูปที่4.6 ผลการจำลองระบบที่ความถี่หลักมูล 10Hz

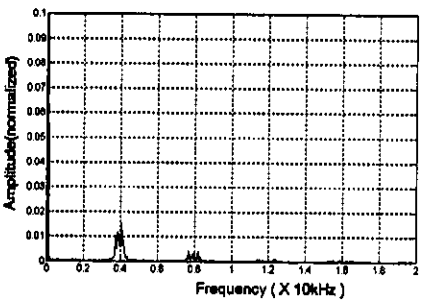
(ก),(ข) กระแสเฟสและสเปกตรัมของกระแสเฟส เมื่อความถี่การสวิตช์คงที่=2kHz

(ค),(ง) กระแสเฟส และสเปกตรัมของกระแสเฟส เมื่อความถี่การสวิตช์เฉลี่ย=2kHz และแปรความถี่ตามแบบแผน optimum subcycle

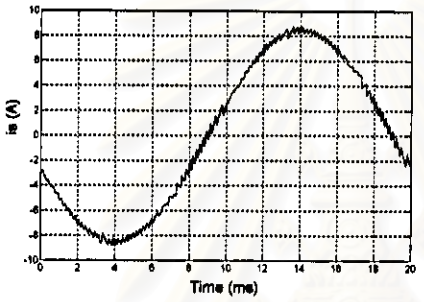
(จ),(ฉ) กระแสเฟส และสเปกตรัมของกระแสเฟส เมื่อความถี่การสวิตช์เฉลี่ย=2kHz และแปรความถี่ตามแบบแผนค่าสัมบูรณ์ของไซน์



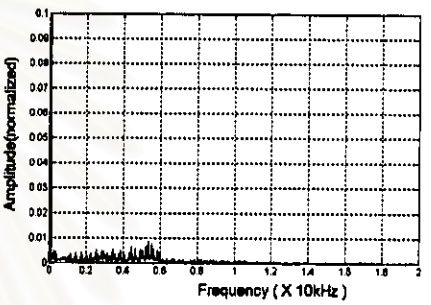
(ก)



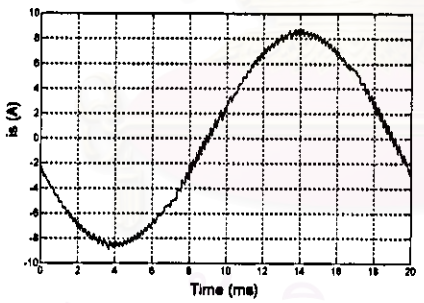
(ข)



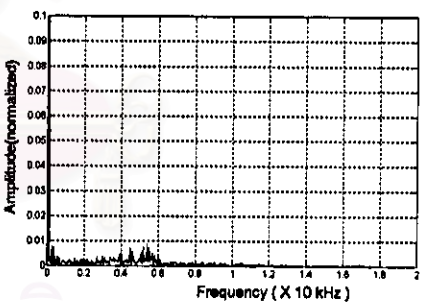
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

รูปที่4.7 ผลการจำลองระบบที่ความถี่หลักมูล 50Hz

(ก),(ข) กระแสเฟสและสเปกตรัมของกระแสเฟส เมื่อความถี่การสวิตช์คงที่=4kHz

(ค),(ง) กระแสเฟส และสเปกตรัมของกระแสเฟส เมื่อความถี่การสวิตช์เฉลี่ย=4kHz และแปรความถี่ตามแบบแผน optimum subcycle

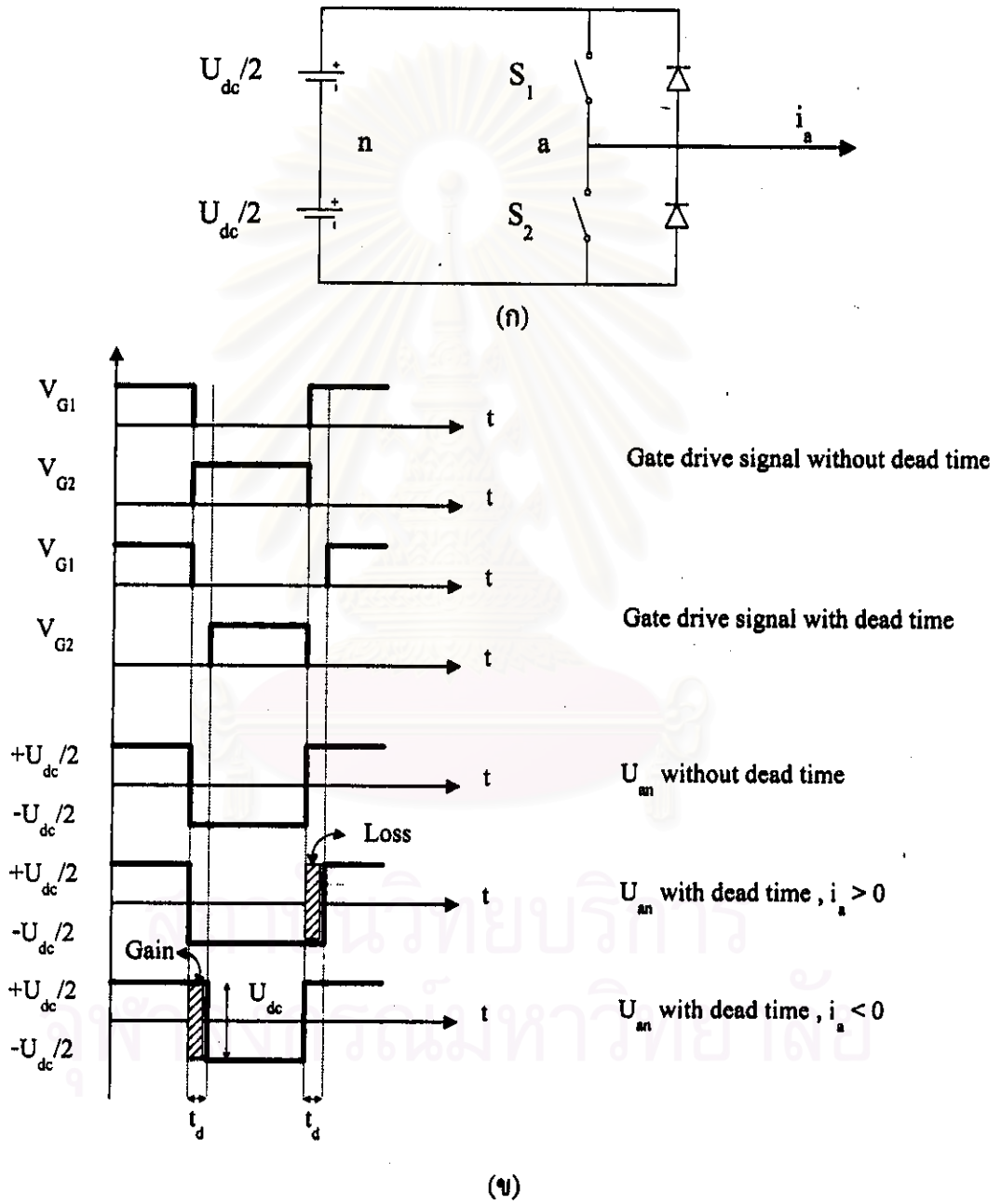
(จ),(ฉ) กระแสเฟส และสเปกตรัมของกระแสเฟส เมื่อความถี่การสวิตช์เฉลี่ย=4kHz และแปรความถี่ตามแบบแผนค่าสัมบูรณ์ของไซน์

จากการจำลองระบบจะพบว่าที่ความถี่หลักมูล 50Hz มีการกระจายของสเปกตรัมที่ไม่ดีนัก แต่ที่ความถี่หลักมูลต่ำลงมาคือ 25Hz, 20Hz และ 10Hz จะมีการกระจายของสเปกตรัมที่ดีกว่า ทั้งนี้เนื่องมาจากที่ความถี่การสวิตช์เฉลี่ยของระบบมีค่าคงที่ ดังนั้น ถ้าความถี่หลักมูลมีค่าสูงจะทำให้จำนวนการชักตัวอย่างข้อมูลของความถี่การสวิตช์มีค่าน้อย ทำให้การแปรความถี่การสวิตช์ไม่ละเอียดพอสเปกตรัมจึงกระจายได้ไม่ดี เมื่อเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของกระแสที่ความถี่หลักมูลเท่ากับ25Hz จะเห็นว่ามีการกระจายของสเปกตรัมที่ดีกว่าเนื่องจากจำนวนการชักตัวอย่างข้อมูลของความถี่การสวิตช์จะมีค่าเป็น 2 เท่าของที่ความถี่หลักมูล 50Hz ดังนั้น จะเห็นว่าจำนวนการชักตัวอย่างข้อมูลของความถี่การสวิตช์เป็นปัจจัยหลักอันหนึ่งในการกำหนดลักษณะการกระจายสเปกตรัมของกระแสด้วย โดยในรูปที่4.7 จะจำลองระบบที่มีความถี่การสวิตช์เฉลี่ย 4kHz ที่ความถี่หลักมูล 50Hz จะเห็นว่าสเปกตรัมของกระแสกระจายได้ดีขึ้น เนื่องจากมีการชักตัวอย่างข้อมูลมากขึ้นนั่นเอง

เนื่องจากระบบที่ออกแบบจะเป็นระบบ v/f คงที่ ดังนั้นดัชนีการมอดูเลตจะแปรผันตรงกับความถี่หลักมูล โดยที่ความถี่หลักมูล 50Hz จะมีดัชนีการมอดูเลตเท่ากับ 1 ดังนั้นจากผลการจำลองระบบจะเห็นว่า ที่ความถี่หลักมูลเท่ากับ 25Hz เมื่อมีการแปรความถี่ตามแบบแผนค่าสัมบูรณ์ของไซน์จะพบว่าความพลิ้ว(ripple) ของกระแสจะมีค่าสูงกว่าในระบบที่มีความถี่การสวิตช์คงที่และระบบที่มีการแปรความถี่ตามแบบแผนของ optimal Subcycle เนื่องจากที่ความถี่หลักมูล 25Hz จะมีดัชนีการมอดูเลตเท่ากับ 0.5 เมื่อเราพิจารณาจากรูปที่ 3.4 แล้วจะเห็นว่าพิสัยการแปรความถี่ที่จะทำให้กระแสมีค่า THD ต่ำสุดตามวิธีการ optimal subcycle นั้นแคบกว่าที่ดัชนีการมอดูเลตเท่ากับ 1 มาก ดังนั้นการแปรความถี่การสวิตช์ที่กว้างกว่าค่า optimum ที่คำนวณไว้ จะทำให้ค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสฮาร์มอนิกในแต่ละ subcycle มีค่าไม่เท่ากัน โดย subcycle ใดมีความถี่การสวิตช์ต่ำกว่าค่า optimum ก็จะมีค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสฮาร์มอนิกสูงขึ้นและ subcycle ใดมีความถี่การสวิตช์สูงกว่าค่า optimum ก็จะมีค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสฮาร์มอนิกลดลง ดังที่เห็นในรูปที่4.4(จ) ส่วนรูปคลื่นกระแสที่ความถี่หลักมูล 20Hz และ 10Hz ก็จะมีลักษณะเช่นเดียวกัน แต่เมื่อพิจารณาถึงสเปกตรัมของกระแสจะเห็นว่าการแปรความถี่การสวิตช์ในแบบแผนค่าสัมบูรณ์ของไซน์จะมีการกระจายที่ดีกว่าแบบความถี่การสวิตช์คงที่และแบบแปรความถี่การสวิตช์ตามแบบแผน optimal subcycle โดยมีการกระจายสเปกตรัมของกระแสออกในช่วงกว้าง ซึ่งจะมีผลในการลดความรำคาญจากเสียงรบกวนของมอเตอร์ลงได้ซึ่งเป็นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้

<u>การจำลองระบบโดยใช้โหลดเป็นแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำและคำนึงผลของเวลาช่วงตาย</u>

เมื่อพิจารณาวงจรของอินเวอร์เตอร์จะพบว่า ค่าเวลาช่วงตาย(dead time)ระหว่างสวิตช์กำลังตัวบนและตัวล่างในกิ่งเดียวกัน จะช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการลัดวงจรของแหล่งจ่ายแรงดัน เนื่องจากสวิตช์กำลังทั้งสองตัวทำงานพร้อมกัน แต่จะส่งผลให้แรงดันที่กำเนิดขึ้นผิดเพี้ยนไปด้วย ดังแสดงใน รูปที่4.8



รูปที่4.8 ผลกระทบจากค่าเวลาช่วงตาย

(ก)แบบจำลองของอินเวอร์เตอร์ในการพิจารณาผลของเวลาช่วงตาย

(ข) แรงดันที่ผิดเพี้ยนไปจากผลของเวลาช่วงตาย

จากรูปที่4.8 จะเห็นว่าค่าแรงดัน U_{an} ที่ผิดเพี้ยนไปจะขึ้นอยู่กับทิศทางของกระแส (ไม่ขึ้นกับขนาดของกระแส) เมื่อกระแส i_a มีทิศทางเป็นบวกแรงดัน U_{an} จะลดลงเนื่องจากไดโอดตัวล่างจะนำกระแสในช่วงที่สวิตช์กำลัง S1 และ S2 เปิดวงจร ส่วนเมื่อกระแส i_a มีทิศทางเป็นลบแรงดัน U_{an} จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากไดโอดตัวบนจะนำกระแสในช่วงที่สวิตช์กำลัง S1 และ S2 เปิดวงจร โดยขนาดของแรงดันที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้(Mohan, Undeland and Robbins, 1989)

$$|U_d| = \frac{t_d}{T_s} * U_{dc} \qquad (4.5)$$

โดย U_d คือ แรงดันเฉลี่ยที่ผิดเพี้ยนไป , t_d คือเวลาช่วงตายและ T_s คือคาบเวลาการสวิตช์

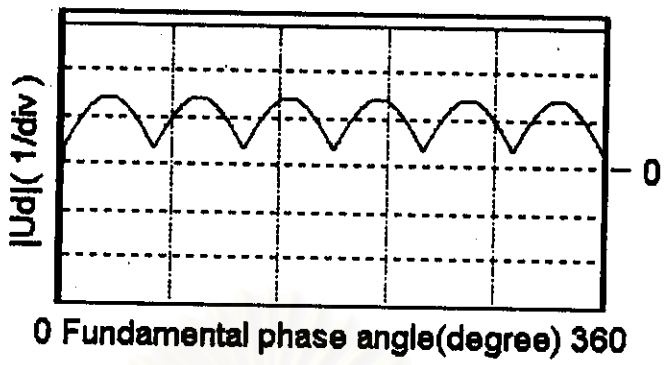
ในระบบที่มีความถี่การสวิตช์คงที่ ค่า T_s และ t_d จะมีค่าคงที่ ซึ่งขึ้นอยู่กับสวิตช์กำลังที่ใช้ในระบบว่ามีความเร็วในการ turn-on , turn-off มากน้อยเพียงไร ดังนั้น ค่า$|U_d|$ ในระบบที่มีความถี่การสวิตช์คงที่จะมีค่าคงที่

ส่วนในระบบที่มีการแปรความถี่การสวิตช์นั้นค่า$|U_d|$จะไม่ใช่ค่าคงที่ เนื่องจากค่า T_s จะแปรไปตามแบบแผนการแปรความถี่ที่เรากำหนดในขณะที่ t_d คงที่ ดังนั้น ในการแปรความถี่ในแบบค่าสัมบูรณ์ของไซน์จะได้ค่าแรงดันที่ผิดเพี้ยนเนื่องจากผลของเวลาช่วงตายดังนี้

$$|U_d| = \frac{t_d}{T_0} * U_{dc} * (1.05|\sin(3\omega t)| + 0.3315) \qquad (4.6)$$

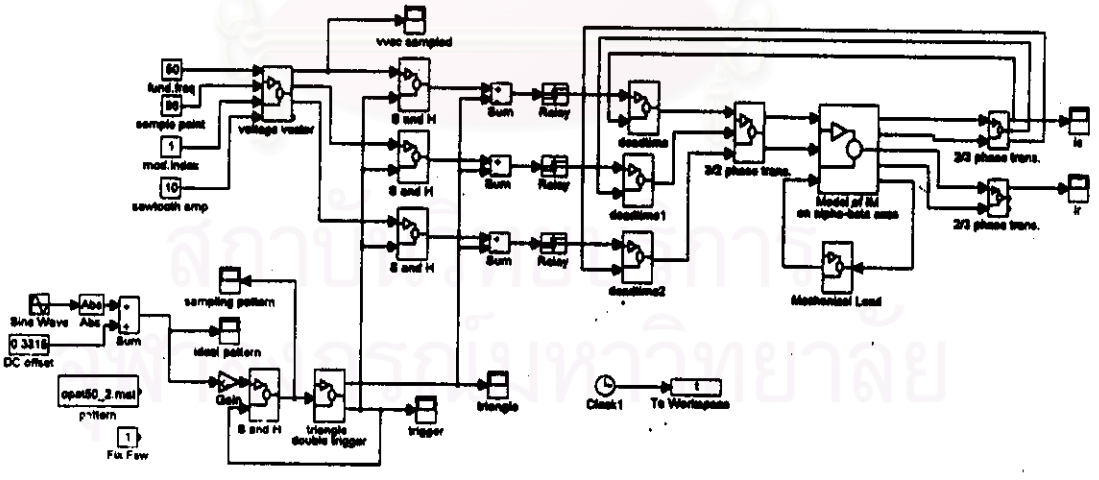
โดย T_0 คือ คาบเวลาการสวิตช์เฉลี่ย

จากสมการที่4.5 จะเห็นว่าที่ความถี่การสวิตช์มีค่าสูง (T_s มีค่าน้อย) จะมีแรงดันที่ผิดเพี้ยนมากกว่าที่ความถี่การสวิตช์มีค่าต่ำ เนื่องจากค่าแรงดันเวลาช่วงตาย t_d มีค่าคงที่ ดังแสดงในรูปที่4.9 โดยแสดงในรูปของค่า normalized ของ$|U_d|$ ($\frac{t_d}{T_0} * U_{dc} = 1$)



รูปที่4.9 แรงดันเฉลี่ยที่ผิดเพี้ยนไปจากผลของเวลาช่วงตายในระบบที่แปรความถี่การสวิตช์ในแบบแผนค่าสัมบูรณ์ของไซน์

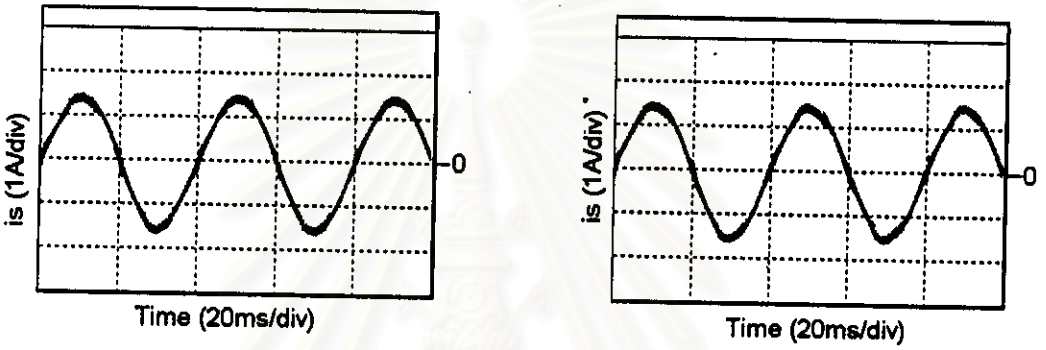
จากแรงดันที่ผิดเพี้ยนจากเวลาช่วงตายซึ่งมีค่าไม่เท่ากันในแต่ละ subcycle ทำให้เราตั้งสมมติฐานว่าอาจทำให้เกิดการผิดเพี้ยนของเวกเตอร์แรงดันที่กำเนิดขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งใน subcycle ที่มีความถี่การสวิตช์สูง ดังนั้นเราจึงจำลองระบบโดยรวมผลจากค่าเวลาช่วงตายเข้าไปด้วยและใช้โหลดเป็นแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อให้ใกล้เคียงระบบจริงมากที่สุดโดยค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำแสดงไว้ในภาคผนวก ค. โดยแบบจำลองดังกล่าวแสดงในรูปที่4.10



รูปที่4.10 แบบจำลองของระบบที่ใช้โหลดเป็นแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำและคำนึงถึงผลของเวลาช่วงตาย

I17594650

โดยในบล็อกของ dead time จะทำการตรวจจับทิศทางของกระแสสเตเตอร์เพื่อสร้างสัญญาณแรงดัน U_{an} ดังรูปที่4.8 โดยถ้ากระแสมีทิศทางเป็นบวกตามรูปที่4.8 จะทำการหน่วงเวลาขอบขาขึ้นของแรงดัน U_{an} และถ้ากระแสมีทิศทางเป็นลบจะหน่วงเวลาขอบขาลงของแรงดัน U_{an} โดยเวลาในการหน่วงสัญญาณแรงดัน U_{an} ก็คือค่าเวลาช่วงตาย t_d นั่นเอง ในการจำลองระบบจะใช้ค่า t_d = 0μs เปรียบเทียบกับ t_d = 4μs ที่ความถี่การสวิตช์เฉลี่ย = 2kHz แรงดันไฟตรง = 300V และความถี่หลักมูล = 25Hz ในสภาวะไม่มีโหลด ผลการจำลองระบบแสดงในรูปที่4.11



(ก) (ข)

รูปที่4.11 กระแสเฟสของมอเตอร์จากการจำลองระบบที่ความถี่มูลฐาน 25 Hz
(ก)แปรความถี่การสวิตช์ในแบบแผนค่าสัมบูรณ์ของไซน์
ที่มีความถี่การสวิตช์เฉลี่ย 2 kHz และมีค่าเวลาประวิง 0 μs
(ข)แปรความถี่การสวิตช์ในแบบแผนค่าสัมบูรณ์ของไซน์
ที่มีความถี่การสวิตช์เฉลี่ย 2 kHz และมีค่าเวลาประวิง 4 μs

ผลที่ได้จากการจำลองระบบจะเห็นว่า ผลจากเวลาช่วงตายทำให้รูปคลื่นกระแสมีความผิดเพี้ยนไปเนื่องจากค่าแรงดันผิดเพี้ยนเฉลี่ยในแต่ละคาบเวลาการสวิตช์มีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นควรลดค่าเวลาช่วงตายให้น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้หรือถ้าไม่สามารถใช้ค่าเวลาช่วงตายที่มีค่าน้อย ๆ ได้เนื่องจากขีดจำกัดทางด้านความเร็วในการสวิตช์ของสวิตช์กำลัง ก็ควรจะมีการชดเชยค่าเวลาช่วงตาย (dead time compensation) เพื่อลดผลกระทบจากค่าเวลาช่วงตาย