

การตรวจจับกระแสของมอเตอร์โดยใช้สัญญาณกระแส
ของโมดูลสวิตช์กำลังอัจฉริยะเฉพาะงาน



นาย ชินภัทร เจริญประยูร

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

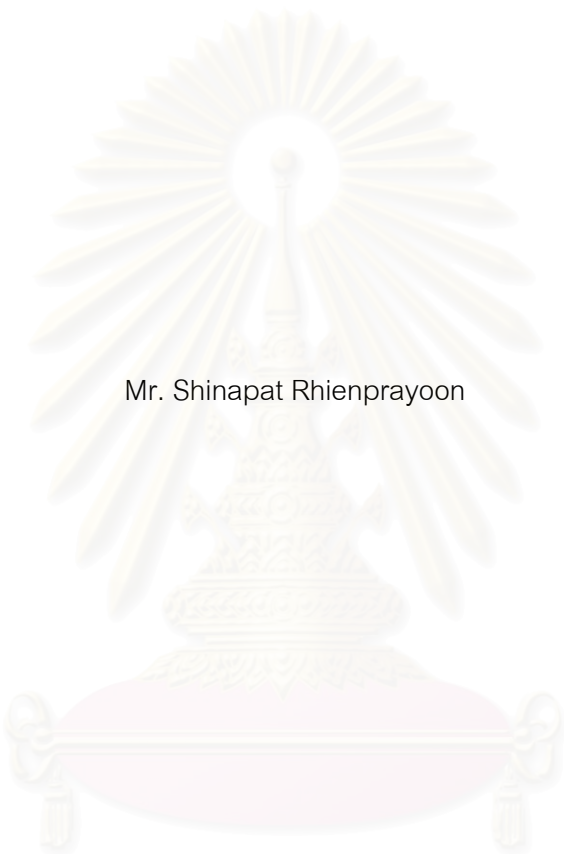
ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-6046-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MOTOR CURRENT DETECTION USING CURRENT SIGNALS OF
APPLICATION SPECIFIC INTELLIGENT POWER MODULES

Mr. Shinapat Rhenprayoon



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic year 2004

ISBN 974-17-6046-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การตรวจจับกระแสของมอเตอร์โดยใช้สัญญาณกระแสของไมโครลสวิตช์
	กำลังอัจฉริยะเฉพาะงาน
โดย	นาย ชินภัทร เหริญประยูร
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุพธนา กุลวิฑิต)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์)

..... กรรมการ
(อาจารย์ สุวิทย์ นาคพีระยุทธ)

สภามหาวิทยาลัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชินภัทร เหริยญประยูร : การตรวจจับกระแสของมอเตอร์โดยใช้สัญญาณกระแสของโมดูลสวิตช์กำลังอัจฉริยะเฉพาะงาน (MOTOR CURRENT DETECTION USING CURRENT SIGNALS OF APPLICATION SPECIFIC INTELLIGENT POWER MODULES) อ. ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์, 77 หน้า. ISBN 974-17-6046-9.

โมดูลสวิตช์กำลังอัจฉริยะเฉพาะงาน (Application Specific Intelligent Power Modules : ASIPM) ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้กับอินเวอร์เตอร์ขนาดเล็ก (100W – 2.2 kW) ASIPM เป็นโมดูลสวิตช์กำลังขนาดเล็ก ที่มีวงจรตรวจจับกระแส ส่วนป้องกันความผิดพลาด และวงจรขั้วนำสวิตช์ติดตั้งพร้อมอยู่ภายใน ทำให้ประหยัดอุปกรณ์หรือวงจรรอบข้างของส่วนสวิตช์กำลังลงได้

วงจรตรวจจับกระแสภายใน ASIPM เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญโดยจะทำหน้าที่ตรวจจับและป้อนข้อมูลของกระแสเพื่อใช้ในการควบคุมหรือป้องกัน ทำให้ผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องติดตั้งตัวตรวจจับกระแสภายนอก อย่างไรก็ตาม คุณสมบัติการตรวจจับกระแสของ ASIPM แต่ละรุ่นยังคงขาดความชัดเจน และลักษณะของวงจรตรวจจับกระแสก็ก่อให้เกิดข้อจำกัดในการตรวจจับกระแสทั้ง 3 เฟสของอินเวอร์เตอร์พร้อม ๆ กัน ปัญหาเรื่องประสิทธิภาพการตรวจจับกระแสที่ยังไม่ดีพอดังกล่าว ทำให้เกิดความจำเป็นที่จะต้องวิเคราะห์คุณสมบัติการตรวจจับกระแสของ ASIPM และต้องพัฒนาอัลกอริทึมในการคำนวณหาค่ากระแสเฟสทั้งสามของอินเวอร์เตอร์เพื่อให้ข้อมูลกระแสที่ได้จาก ASIPM มีความถูกต้องใกล้เคียงกับการใช้ตัวตรวจจับกระแสภายนอกแยกต่างหาก ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาอินเวอร์เตอร์อุตสาหกรรมต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2547

ลายมือชื่อนิติ.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

4570292021 : MAJOR POWER ELECTRONICS

KEY WORD: CURRENT DETECTION / INTELLIGENT POWER MODULES

SHINAPAT RHIEPRAYOON : MOTOR CURRENT DETECTION USING
APPLICATION SPECIFIC INTELLIGENT POWER MODULES. THESIS ADVISOR :
SOMBOON SANGWONGWANICH, Ph.D., 77 pp. ISBN 974-17-6046 -9.

Application Specific Intelligent Power Modules (ASIPM) were developed for low-power inverter applications (100 W – 2.2 kW). ASIPMs consist of compact power modules integrated with internal current sensors, protection units and internal gate drives, resulting in smaller area for installation and lower cost.

Important parts of ASIPMs used in motor control are internal current sensing circuits. They detect and transfer the current data to the controller for control or protection and thus eliminate the need of external current sensors. However, current detection characteristics of each version of ASIPMs are not well investigated and their circuit structures cause some problems in retrieving process of the 3 phase currents. Therefore, the aims of this thesis are, to analyze the current detection characteristics and develop some algorithms to retrieve the real 3 phase currents from ASIPMs current signals.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Electrical Engineering

Field of study Electrical Engineering

Academic year 2004

Student's signature.....

Advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่งจากอาจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในการทำวิจัย เป็นอย่างดีตลอดมา ขอบพระคุณท่านอาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้แก่ผู้เขียนตั้งแต่อดีตจนถึง ปัจจุบัน และวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเสร็จสมบูรณ์ไม่ได้ถ้าไม่มีบุคคลดังต่อไปนี้ ขอขอบคุณ คุณ สุรพงษ์ สุวรรณกวิน ที่ช่วยดูแลการทำวิจัยและให้คำแนะนำในเรื่องต่าง ๆ ขอขอบคุณบริษัท เอ. พี. วาย. เอ็นจิเนียริง ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำวิจัย ขอขอบคุณที่ ๆ ในบริษัท โดยเฉพาะอย่างยิ่ง พี่ชูเกียรติ ที่ให้คำปรึกษาเรื่องอุปกรณ์เป็นอย่างดีตลอดมา รวมถึงรุ่นพี่รุ่นน้อง และเพื่อน ๆ ในห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ให้ความช่วยเหลือในการพัฒนางานวิจัยเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอขอบพระคุณบิดามารดา ผู้ที่ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนในทุก ๆ ด้านและเป็นกำลังใจที่ดีให้กับผู้เขียนเสมอ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 นิยามสัญลักษณ์.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย.....	4
2. การตรวจจํากระแสมอเตอร์โดยใช้สัญญาณกระแสของ ASIPM Version 1, 2	5
2.1 โครงสร้างการตรวจจํากระแสของ ASIPM Version 1, 2	5
2.2 การวิเคราะห์ปัญหาในการตรวจจํากระแสของ ASIPM Version 1, 2	6
2.3 แนวทางแก้ไขปัญหาในการตรวจจํากระแสของ ASIPM Version 1, 2	14
2.4 การนำอัลกอริทึมไปใช้งานจริงในการหากระแสเฟสกรณีที่มีเวลาประวิงแบบทั่วไป.....	15
2.5 ผลจำลองการทำงานการตรวจจํากระแสของ ASIPM Version 1, 2.....	17
2.6 พื้นที่ปัญหาในการตรวจจํากระแสเมื่อใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ SH - 7042	20
2.7 การนำอัลกอริทึมไปใช้งานจริงในการหากระแสเฟสสำหรับ SH-7042.....	23
2.8 ผลการทดลอง.....	27
3. การตรวจจํากระแสมอเตอร์โดยใช้สัญญาณกระแสของ ASIPM Version 3	32
3.1 โครงสร้างการตรวจจํากระแสของ ASIPM Version 3	32
3.2 การวิเคราะห์ปัญหาในการตรวจจํากระแสของ ASIPM Version 3	33
3.3 แนวทางแก้ไขปัญหาในการตรวจจํากระแสของ ASIPM Version 3	34

บทที่

หน้า

3.4 ผลจำลองการทำงานการตรวจจับกระแสของ ASIPM Version 3.....	38
3.5 วิธีการสุ่มค่าและปัญหาในการตรวจจับกระแสเนื่องจากความไม่เป็นอุดมคติของวงจร สุ่มค่า.....	41
3.5 แนวทางแก้ไขปัญหาค้างการตรวจจับกระแสของ ASIPM Version 3.....	44
3.6 การประยุกต์อัลกอริทึมเพื่อใช้ในการคำนวณค่าน่ากระแสเฟสในอุปกรณ์จริง.....	45
3.7 ผลการทดลอง.....	49
4. บทสรุปและข้อเสนอแนะ	56
4.1 สรุปผลงานวิจัย.....	56
4.2 ข้อเสนอแนะ	57
รายการอ้างอิง.....	58
ภาคผนวก.....	59
ภาคผนวก ก ผลของออฟเซตของวงจรตรวจจับกระแสของ ASIPM Version 3 ที่มีต่อการ คำนวณค่าน่ากระแสเฟส.....	60
บทความตีพิมพ์.....	64
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	77

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1	9
2.2	10
3.1	33



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
1.1	การเปรียบเทียบขององค์ประกอบของโมดูลระหว่าง IPM กับ ASIPM	1
1.2	การตรวจจ็ับกระแสของมอเตอร์ด้วยวงจรตรวจจ็ับกระแสภายนอกที่ใช้กันทั่วไป.....	2
2.1	โครงสร้างและรูปแบบการตรวจจ็ับกระแสของ ASIPM Version 1, 2	5
2.2	วงจรตรวจจ็ับกระแสและตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณกระแสที่ตรวจจ็ับได้เทียบกับกระแสจริง.....	6
2.3	รูปสัญญาณขั้วนำสวิตช์ตัวล่าง ของเฟส U ขณะที่เวกเตอร์คำสั่งอยู่ในเซกเตอร์ที่ 3	6
2.4	ผลการห้วงเวลาเมื่อพิจารณา 2 คาบการสวิตช์ต่อเนื่อง.....	7
2.5	วิธีการสร้างเวลาประวิงให้กับสัญญาณขั้วนำสวิตช์โดยทั่วไป	8
2.6	สัญญาณ s ที่ถูกห้วงจากเวลาประวิง (t_{dead}) และเวลาห้วงในการตรวจจ็ับกระแส (t_d) เปรียบเทียบกับสัญญาณ s ที่คำนวณได้	9
2.7	บริเวณที่สามารถตรวจจ็ับกระแสได้โดยใช้ช่วงเวลา t_0 ที่เกิดจากเวกเตอร์ศูนย์ U_0 เพียงลำพัง	10
2.8	พื้นที่ที่ไม่สามารถตรวจจ็ับกระแสเฟส U ในเซกเตอร์ที่ 2 และ 5	12
2.9	พื้นที่ที่ไม่สามารถตรวจจ็ับกระแสเฟส U	13
2.10	พื้นที่ที่ไม่สามารถตรวจจ็ับกระแสเฟส V และเฟส W	13
2.11	พื้นที่ปัญหาในการตรวจจ็ับกระแสเฟส U, V และ W	14
2.12	พื้นที่ปัญหาในการตรวจจ็ับกระแสเมื่อใช้วิธีการหากระแสเฟสที่พัฒนาขึ้นและการมอดูเลตแบบ 2 กิ่ง	15
2.13	แรงดันเฟสเทียบกึ่งกลางบัสไฟตรงขั้นต่ำในการตรวจจ็ับกระแสเฟสกรณีที่มีเวลาประวิงแบบทั่วไป	16
2.14	แผนภาพการคำนวณหากระแสเฟสของ ASIPM Version 1, 2	16
2.15	การหมุนผ่านพื้นที่ปัญหาของเวกเตอร์คำสั่งที่สร้างขึ้นเมื่อใช้การมอดูเลตแบบต่าง ๆ... ..	17
2.16	ผลการตรวจจ็ับกระแสเฟส U เมื่อใช้วิธีการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ปกติไม่ใช่วิธีการหากระแสเฟสที่พัฒนาขึ้น.....	18
2.17	ผลการตรวจจ็ับกระแสเฟส U เมื่อใช้วิธีการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ปกติและใช้วิธีการหากระแสเฟสที่พัฒนาขึ้น.....	19

สารบัญภาพ (ต่อ)

ฉ

รูปที่	หน้า
2.18 ผลการตรวจจذبกระแสเฟส U เมื่อใช้การมอดูเลตแบบ 2 กิ่งและไม่ใช้วิธีการหากระแสเฟสที่พัฒนาขึ้น.....	19
2.19 วิธีการสร้างเวลาประวิงของไมโครคอนโทรลเลอร์ SH - 7042.....	20
2.20 สัญญาณ s ที่ถูกหน่วงจากเวลาประวิง (t_{dead}) และเวลาหน่วงในการตรวจจذبกระแส (t_d) สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ SH - 7042 เปรียบเทียบกับสัญญาณ s ที่คำนวณได้.....	21
2.21 พื้นที่ที่ไม่สามารถตรวจจذبกระแสเฟส U เมื่อใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ SH - 7042	21
2.22 พื้นที่ปัญหาในการตรวจจذبกระแสเฟส U, V และ W สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ SH - 7042	22
2.23 พื้นที่ปัญหาในการตรวจจذبกระแสเมื่อใช้วิธีการหากระแสเฟสที่พัฒนาขึ้นและการมอดูเลตแบบ 2 กิ่งสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ SH - 7042.....	22
2.24 แรงดันเฟสเทียบกึ่งกลางบัสไฟตรงขั้นต่ำในการตรวจจذبกระแสเฟสสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ SH - 7042	23
2.25 ผลการตรวจจذبกระแสเฟส U เมื่อใช้วิธีการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ปกติไม่ใช้วิธีการหากระแสเฟสที่พัฒนาขึ้นสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ SH - 7042	25
2.26 ผลการตรวจจذبกระแสเฟส U เมื่อใช้วิธีการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ปกติและใช้วิธีการหากระแสเฟสที่พัฒนาขึ้นสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ SH - 7042	25
2.27 ผลการตรวจจذبกระแสเฟส U เมื่อใช้การมอดูเลตแบบ 2 กิ่งและไม่ใช้วิธีการหากระแสเฟสที่พัฒนาขึ้นสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ SH - 7042	26
2.28 กระแสตรวจจذبเฟส U เทียบกับกระแสเฟส U จริงเมื่อใช้วิธีการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ปกติที่ความถี่การสวิตช์ 5 kHz และไม่ใช้วิธีการหากระแสเฟสที่พัฒนาขึ้น.....	28
2.29 กระแสตรวจจذبเฟส U เทียบกับกระแสเฟส U จริงเมื่อใช้วิธีการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ปกติที่ความถี่การสวิตช์ 5 kHz และใช้วิธีการหากระแสเฟสที่พัฒนาขึ้น .	28
2.30 กระแสตรวจจذبเฟส U เทียบกับกระแสเฟส U จริงเมื่อใช้วิธีการมอดูเลตแบบ 2 กิ่งที่ความถี่การสวิตช์ 5 kHz และไม่ใช้วิธีการหากระแสเฟสที่พัฒนาขึ้น	29

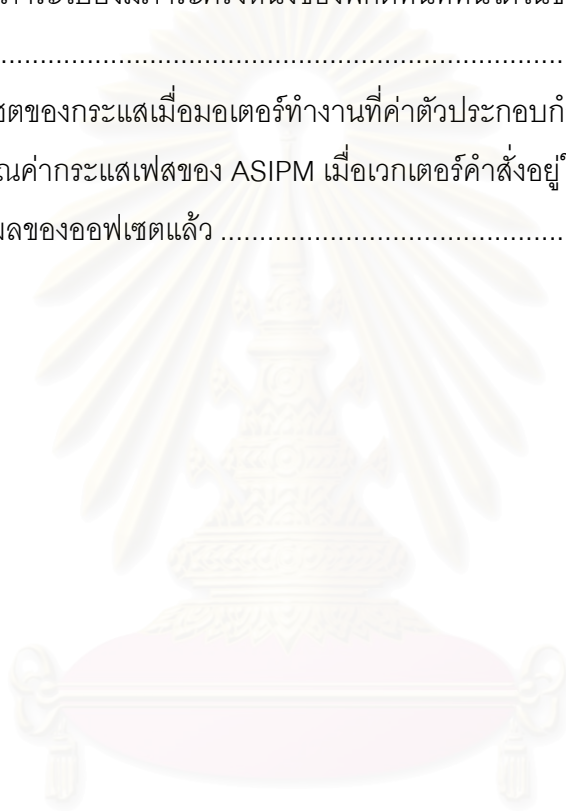
รูปที่	หน้า
2.31 สภาวะชั่วคราวของกระแสตรวจจับเฟส U เทียบกับกระแสเฟส U จริง ใช้วิธีการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ปกติที่ความถี่การสวิตช์ 5 kHz และการหากระแสเฟสที่พัฒนาขึ้น.....	29
2.32 กระแสตรวจจับเฟส U เทียบกับกระแสเฟส U จริงเมื่อใช้วิธีการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ปกติที่ความถี่การสวิตช์ 10 kHz และไม่ใช้วิธีการหากระแสเฟสที่พัฒนาขึ้น.....	30
2.33 กระแสตรวจจับเฟส U เทียบกับกระแสเฟส U จริงเมื่อใช้วิธีการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ปกติที่ความถี่การสวิตช์ 10 kHz และใช้วิธีการหากระแสเฟสที่พัฒนาขึ้น.....	30
2.34 กระแสตรวจจับเฟส U เทียบกับกระแสเฟส U จริงเมื่อใช้วิธีการมอดูเลตแบบ 2 กิ่งที่ความถี่การสวิตช์ 10 kHz และไม่ใช้วิธีการหากระแสเฟสที่พัฒนาขึ้น	31
2.35 สภาวะชั่วคราวของกระแสตรวจจับเฟส U เทียบกับกระแสเฟส U จริง ใช้วิธีการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ปกติที่ความถี่การสวิตช์ 10 kHz และการหากระแสเฟสที่พัฒนาขึ้น.....	31
3.1 โครงสร้างและรูปแบบการตรวจจับกระแสของ ASIPM Version 3	32
3.2 วงจรตรวจจับกระแสของ ASIPM Version 3.....	32
3.3 รูปคลื่นกระแสที่ตรวจจับได้เมื่อใช้เวกเตอร์แบบต่าง ๆ	34
3.4 การคำนวณค่ากระแสเฟสของ ASIPM Version 3 เมื่อเวกเตอร์คำสั่งอยู่ในเซกเตอร์ที่ 1	35
3.5 กระแสของช่วงเวลาการใช้เวกเตอร์ต่าง ๆ เมื่อมอเตอร์ทำงานที่ค่าตัวประกอบกำลังต่างกัน.....	36
3.6 รูปคลื่นสัญญาณกระแสที่ได้จากวงจรตรวจจับของ ASIPM Version 3 เทียบกับกระแส 3 เฟสของมอเตอร์	39
3.7 รูปกระแสเฟส U เมื่อใช้เฉพาะวิธีในแผนภาพในรูปที่ 3.4	39
3.8 รูปกระแสเฟส U เมื่อใช้วิธีในแผนภาพรูปที่ 3.4 พร้อมกับการประมาณค่ากระแสด้วยวงจรเลียนเฟส	40

รูปที่	หน้า
3.9 ตำแหน่งในการสุ่มค่าเมื่อเวกเตอร์คำสั่งอยู่ในเซกเตอร์ที่ 1 และสัญญาณขั้วนำสวิตช์เมื่อไม่มีเวลาประวิงใน 1 คาบการสวิตช์	41
3.10 ค่าระลอกของกระแสของกระแสเฟสหนึ่ง ๆ เมื่อทำการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์เมื่อเวกเตอร์คำสั่งอยู่ในเซกเตอร์ที่ 1	42
3.11 ช่วงเวลาที่จำเป็นในการสุ่มค่ากระแสที่ตำแหน่งเวกเตอร์ศูนย์และเวกเตอร์แอกทีฟในกรณีที่มีเวลาประวิง	43
3.12 พื้นที่ปัญหาในการตรวจจับกระแสของ ASIPM Version 3	44
3.13 พื้นที่ปัญหาในการตรวจจับกระแสของ ASIPM Version 3 เมื่อใช้การมอดูเลตแบบ 2 กิ่ง	44
3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณกระแสของ ASIPM Version 3 กับกระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์	46
3.15 การคำนวณค่ากระแสเฟสของ ASIPM เมื่อเวกเตอร์คำสั่งอยู่ในเซกเตอร์ที่ 1 เมื่อพิจารณาผลของค่าออฟเซตและความคลาดเคลื่อนจากการสุ่มค่ากระแส	47
3.16 คุณสมบัติเชิงความถี่ของวงจรรองเล็กลงเฟส	48
3.17 วงจรที่ใช้ในการทดลอง	49
3.18 สัญญาณกระแสตรวจจับเทียบกับกระแส 3 เฟสขณะขับมอเตอร์ที่ความถี่ 40 Hz.....	51
3.19 สัญญาณกระแสที่สุ่มได้ในแต่ละช่วงเวลากการใช้เวกเตอร์แรงดันในขณะขับมอเตอร์แบบไร้ภาวะที่ความถี่ 40 Hz	52
3.20 สัญญาณกระแสของเวกเตอร์ที่สุ่มได้ในขณะขับมอเตอร์ที่ความถี่ 40 Hz และป้อนภาวะให้กับมอเตอร์ขนาดพิกัด	52
3.21 สัญญาณกระแสเฟส U ที่คำนวณได้เทียบกับกระแสเฟส U จริงขณะขับมอเตอร์แบบไร้ภาวะที่ความถี่ 40 Hz	53
3.22 สัญญาณกระแสเฟส U ที่คำนวณได้โดยใช้การสุ่มค่าเพียง 3 ครั้งในแต่ละคาบการสวิตช์เทียบกับกระแสเฟส U จริงขณะขับมอเตอร์แบบไร้ภาวะที่ความถี่ 40 Hz.....	53
3.23 สัญญาณกระแสเฟส U ที่คำนวณได้เทียบกับกระแสเฟส U จริงขณะขับมอเตอร์ที่ความถี่ 40 Hz และป้อนภาวะขนาดพิกัด.....	54

รูปที่

หน้า

3.24	สัญญาณกระแสเฟส U ที่คำนวณได้เทียบกับกระแสเฟส U จริงขณะทำการเร่งลดความเร็วจาก 25 – 45 Hz	54
3.25	สภาวะชั่วคราวของกระแสคำนวณเฟส U เทียบกับกระแสเฟส U จริงโดยเปลี่ยนแปลงจากช่วงไร้ภาระไปยังมีภาระครึ่งหนึ่งของพิกัดทันทีทันใดในขณะขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ความเร็ว 40 Hz	55
ก.1	ช่วงออฟเซตของกระแสเมื่อมอเตอร์ทำงานที่ค่าตัวประกอบกำลังต่างกัน	61
ก.2	การคำนวณค่ากระแสเฟสของ ASIPM เมื่อเวกเตอร์คำสั่งอยู่ในเซกเตอร์ที่ 1 ที่พิจารณาผลของออฟเซตแล้ว	62



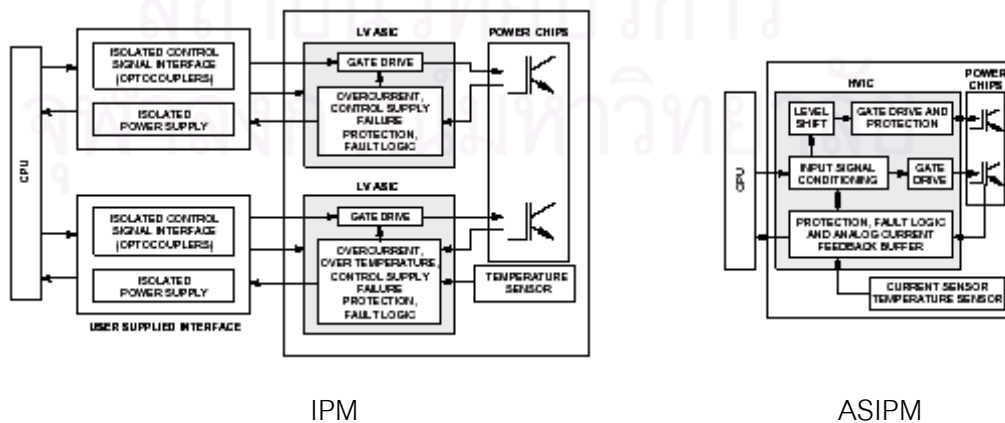
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

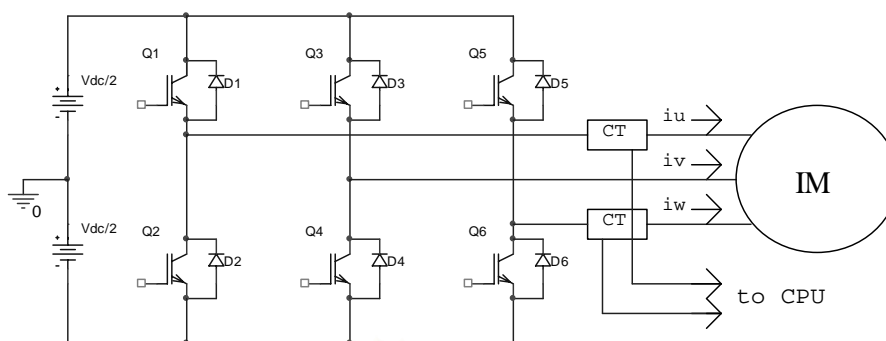
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

หลายทศวรรษที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบันมอเตอร์ไฟสลัปเป็นสิ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในการพัฒนาภาคอุตสาหกรรม ตลอดเวลาได้มีการพัฒนาวิธีการควบคุมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานมอเตอร์ไฟสลัปให้สูงขึ้น อุปกรณ์หนึ่งที่เป็นปัจจัยสำคัญยิ่งต่อการพัฒนาการควบคุมมอเตอร์ไฟสลัปก็คือวงจรรีเลย์อินเวอร์เตอร์ วงจรรีเลย์อินเวอร์เตอร์เป็นชุดสวิตช์ที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณไฟตรงให้กลายเป็นไฟสลัปป้อนให้กับมอเตอร์ โดยสัญญาณไฟสลัปนี้สามารถเปลี่ยนขนาดและความถี่ของสัญญาณตามที่ต้องการซึ่งทำให้เกิดความหลากหลายในการควบคุมมอเตอร์มากขึ้น โดยอินเวอร์เตอร์ที่ใช้กันโดยทั่วไปในปัจจุบันในระดับกำลังต่ำ (100 W – 2.2 kW) จะเป็นโมดูลที่รวบรวมเอาส่วนของสวิตช์กำลัง (ไม่รวมส่วนวงจรรีบนำ) และวงจรรีบนำไว้ภายใน ซึ่งรู้จักกันในชื่อโมดูลสวิตช์กำลังอัจฉริยะ (Intelligent Power Modules : IPM) แต่เนื่องด้วยความต้องการใช้งานอินเวอร์เตอร์เพิ่มสูงขึ้นเป็นอย่างมาก ในไม่กี่ปีที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาโมดูลสวิตช์กำลังอัจฉริยะเฉพาะงาน (Application Specific Intelligent Power Modules : ASIPM) ขึ้นมาได้รวมเอาส่วนของวงจรรีบนำสวิตช์และวงจรรีบนำกระแสเพิ่มเข้าไป ในบางรุ่นยังได้รวมส่วนของวงจรรีเลย์กระแสและวงจรรีบนำของมอเตอร์เอาไว้ให้ด้วย ทำให้ผู้ใช้แทบจะไม่ต้องต่ออุปกรณ์รอบข้างอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติมอีกทำให้ผู้ใช้ประหยัดเวลาในการติดตั้งและลดพื้นที่ติดตั้งลงอีกด้วย ASIPM ที่พิจารณาในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 รุ่นตามประเภทการใช้งาน [1] – [3] โดยในแต่ละรุ่นผู้ผลิตได้รวบรวมฟังก์ชันที่จำเป็นสำหรับงานประเภทนั้นเพื่อให้มีประสิทธิภาพต่อราคาที่สูงสุด



รูปที่ 1.1 การเปรียบเทียบขององค์ประกอบของโมดูลระหว่าง IPM กับ ASIPM



รูปที่ 1.2 การตรวจจับกระแสของมอเตอร์ด้วยวงจรตรวจจับกระแสภายนอกที่ใช้กันทั่วไป

แต่กระนั้นก็ตาม ASIPM ก็ยังไม่ใช้โมดูลสวิตช์กำลังที่ดีพร้อม เนื่องจากลักษณะการติดตั้งวงจรตรวจจับกระแสเอาไว้บนส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์ก่อให้เกิดข้อจำกัดในการตรวจจับกระแสทั้ง 3 เฟสของอินเวอร์เตอร์ [4] - [5] ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพในการควบคุมมอเตอร์โดยตรง จึงเป็นที่มาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ในการที่จะวิเคราะห์คุณสมบัติการตรวจจับกระแสของ ASIPM แต่ละรุ่น ซึ่งยังขาดความชัดเจน และทำการพัฒนาอัลกอริทึมในการคำนวณหาค่ากระแสเฟสทั้งสามของอินเวอร์เตอร์เพื่อให้ข้อมูลกระแสที่ได้จาก ASIPM มีความถูกต้องใกล้เคียงกับการใช้ตัวตรวจจับกระแสภายนอกแยกต่างหาก โดยมีความคาดหวังที่จะทำให้การใช้งาน ASIPM เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นและเป็นประโยชน์ต่อไปในการพัฒนาอินเวอร์เตอร์อุตสาหกรรม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อพัฒนาวิธีการคำนวณหาค่ากระแสเฟสจากข้อมูลกระแสที่ได้จาก ASIPM ให้มีความถูกต้องใกล้เคียงกับการใช้ตัวตรวจจับกระแสภายนอกแยกต่างหาก

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. วิเคราะห์คุณสมบัติการตรวจจับกระแสของ ASIPM ทั้ง 3 รุ่น
2. พัฒนาอัลกอริทึมเพื่อแก้ไขปัญหาและเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจจับกระแสของ ASIPM ทั้ง 3 รุ่น

1.4 นิยามสัญลักษณ์

V_{dc}	:	แรงดันบัลไฟตรงที่ป้อนให้อินเวอร์เตอร์
V_o	:	แรงดันออกของวงจรตรวจจ็ับกระแส
V_{U0}, V_{V0}, V_{W0}	:	แรงดันเฟส U, เฟส V และเฟส W เทียบกึ่งกลางบัลไฟตรง
i_U, i_V, i_W	:	กระแสเฟส U, เฟส V และเฟส W ของมอเตอร์
$i_{110}, i_{100}, i_{000}$:	กระแสที่ตรวจจ็ับได้เมื่อใช้รูปแบบการสวิตช์ในเซกเตอร์ที่ 1
$i_{0^{\circ}}$:	กระแสที่ตรวจจ็ับได้เมื่อมีการขับนำสวิตช์ตัวล่าง 1 เฟส
$i_{00^{\circ}}$:	กระแสที่ตรวจจ็ับได้เมื่อมีการขับนำสวิตช์ตัวล่าง 2 เฟส
ω_0	:	ความถี่หลักมูลของแรงดันและกระแส
f_{pwm}	:	ความถี่การสวิตช์
T	:	คาบการสวิตช์
n	:	ลำดับของคาบการสวิตช์
$U_0 - U_7$:	เวกเตอร์แรงดันของอินเวอร์เตอร์
s	:	สัญญาณขับนำสวิตช์ตัวล่าง
s'	:	สัญญาณขับนำสวิตช์ตัวบน
$t_0 - t_7$:	ช่วงเวลาการใช้เวกเตอร์แรงดัน $U_0 - U_7$ ตามลำดับ
t_A, t_B	:	ช่วงเวลาการใช้เวกเตอร์แรงดันแอกทีฟ
t_s	:	ช่วงเวลาการขับนำสวิตช์ตัวล่าง
t_d	:	เวลาหน่วงของวงจรตรวจจ็ับกระแส
t_{dead}	:	เวลาประวิง
t_{spl}	:	ช่วงเวลาที่ต้องใช้เพื่อสุ่มและคงค่าของวงจร A/D
t_{rs}	:	ช่วงเวลาเริ่มการนำกระแสของสวิตช์
γ	:	มุมเลื่อนเฟสของวงจรกรองแบบ FIR

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นไปใช้กับ ASIPM ในอุตสาหกรรมจริงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของอินเวอร์เตอร์ให้สูงขึ้น

1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาคุณลักษณะและฟังก์ชันการทำงานของ ASIPM ทั้ง 3 รุ่นจากบทความในอดีต
2. ทำการวิเคราะห์ปัญหาในการตรวจจับกระแสของ ASIPM Version 1, 2
3. พัฒนาอัลกอริทึมเพื่อแก้ไขปัญหาในการตรวจจับกระแสของ ASIPM Version 1, 2
4. จำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อตรวจสอบอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นสำหรับ ASIPM Version 1, 2
5. วิเคราะห์ปัญหาในการตรวจจับกระแสเฟสของ ASIPM Version 3
6. พัฒนาอัลกอริทึมเพื่อแก้ไขปัญหาในการตรวจจับกระแสเฟสของ ASIPM Version 3
7. จำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อตรวจสอบอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นสำหรับ ASIPM Version 3
8. เขียนซอฟต์แวร์เพื่อทดสอบการทำงานกับอินเวอร์เตอร์จริง
9. เก็บข้อมูลและสรุปผล
10. เขียนวิทยานิพนธ์



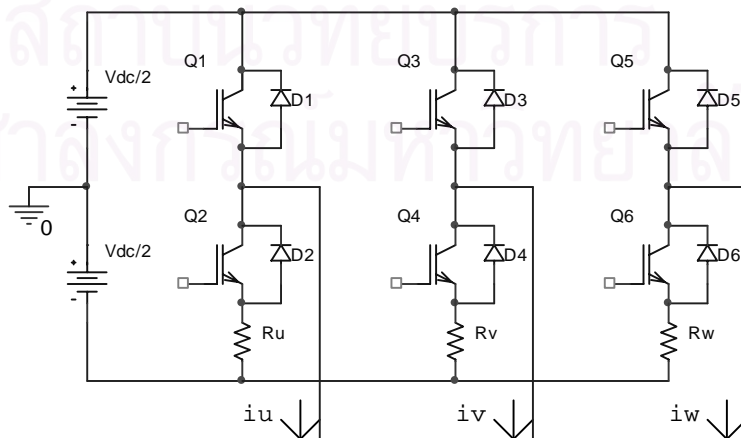
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

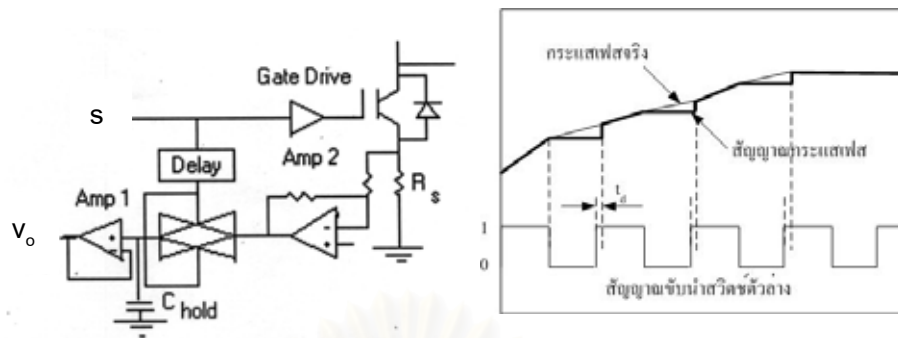
การตรวจจับกระแสของมอเตอร์โดยใช้สัญญาณกระแสของ ASIPM Version 1, 2

2.1 โครงสร้างการตรวจจับกระแสของ ASIPM Version 1, 2

โครงสร้างของ ASIPM Version 1, 2 ในส่วนสวิทช์กำลังแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 การตรวจจับกระแสของทั้ง 2 รุ่น จะอาศัยข้อมูลแรงดันตกคร่อมความต้านทาน R_u , R_v , R_w ที่ต่ออนุกรมกับสวิทช์กำลังตัวล่างเป็นตัวบ่งบอกถึงค่ากระแสไหลผ่านสวิทช์กำลังตัวล่างในขณะนั้น ๆ โดยกระแสในแต่ละเฟสจะถูกตรวจจับก็ต่อเมื่อมีการขับนำสวิทช์ตัวล่างของเฟสนั้น และค่าแรงดันที่ตรวจจับได้จะมีเครื่องหมายตรงข้ามกับเครื่องหมายของกระแสเฟส รูปที่ 2.2 แสดงถึงวงจรตรวจจับกระแสและตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณกระแสที่ตรวจจับได้เทียบกับกระแสจริง การทำงานของวงจรตรวจจับเป็นดังนี้คือ เมื่อมีการขับนำสวิทช์ตัวล่าง ($s = 1$) สัญญาณ s จะถูกหน่วงเวลาเป็นระยะเวลา t_d เพื่อให้ระบบผ่านพ้นสภาวะชั่วคราวของการสวิทช์ แล้วจึงให้วงจรตรวจจับส่งค่ากระแสผ่านสวิทช์แอนาลอกในรูปแรงดันออกมา และเมื่อ $s = 0$ วงจรก็จะคงค่ากระแสสุดท้ายเอาไว้ ดังนั้นใน 1 คาบการสวิทช์ถ้าความกว้างของสัญญาณ $s = 1$ น้อยกว่าเวลาหน่วง (t_d) ค่ากระแสที่ได้จากวงจรตรวจจับในคาบการสวิทช์นั้นจะยังคงเป็นค่าเดิมในคาบการสวิทช์ก่อนหน้า ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของการตรวจจับกระแสได้ เนื่องจากคุณสมบัติการตรวจจับกระแสของ ASIPM มีความสัมพันธ์กับลักษณะการสวิทช์ของอินเวอร์เตอร์ จึงจำเป็นต้องศึกษาคุณสมบัติการตรวจจับกระแสและวิเคราะห์หาสถานการณ์การทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่ทำให้เกิดปัญหาในการตรวจจับกระแส และพัฒนาหาอัลกอริทึมเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว



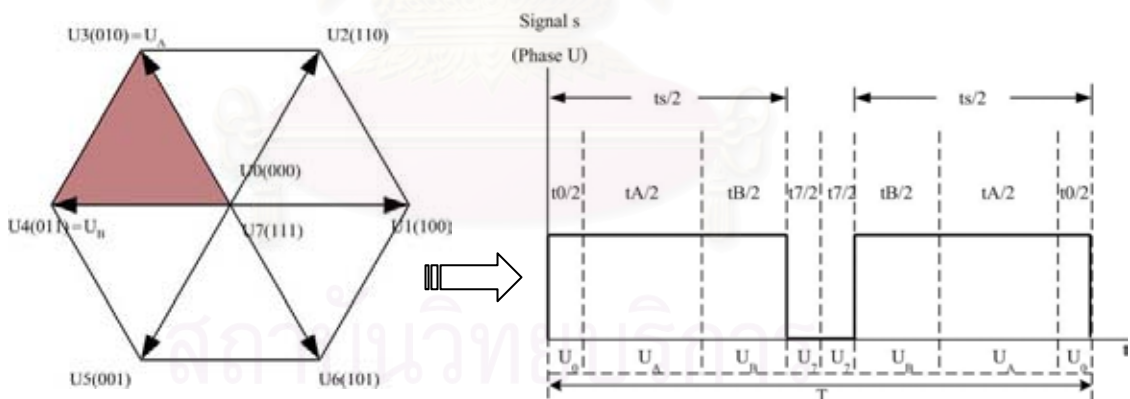
รูปที่ 2.1 โครงสร้างและรูปแบบการตรวจจับกระแสของ ASIPM Version 1, 2



รูปที่ 2.2 วงจรตรวจจับกระแสและตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณกระแสที่ตรวจจับได้ เทียบกับกระแสจริง

2.2 การวิเคราะห์ปัญหาในการตรวจจับกระแสของ ASIPM Version 1, 2

เราจะวิเคราะห์การทำงานโดยใช้ทฤษฎีสเปซเวกเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งเป็นรูปเวกเตอร์แรงดันของอินเวอร์เตอร์และตัวอย่างสัญญาณขับนำสวิตซ์ตัวล่าง (s) ใน 1 คาบการสวิตซ์ของเฟส U ขณะที่เวกเตอร์คำสั่งอยู่ในเซกเตอร์ที่ 3



รูปที่ 2.3 รูปสัญญาณขับนำสวิตซ์ตัวล่างของเฟส U ขณะที่เวกเตอร์คำสั่งอยู่ในเซกเตอร์ที่ 3

โดยทั่วไปเวกเตอร์แรงดันที่ใช้ในการสวิตซ์จะประกอบด้วยเวกเตอร์แรงดันศูนย์ U_0 และ U_7 (zero vectors) และเวกเตอร์แรงดันแอกทีฟ $U_1 - U_6$ (active vectors) จำนวน 2 ตัวซึ่งในที่นี่จะแทนด้วย U_A และ U_B ช่วงเวลาที่ใช้เวกเตอร์แต่ละตัวจะแสดงเป็น t_0 , t_7 , t_A และ t_B ตามลำดับ กำหนดให้สัญลักษณ์เลข 3 หลักหมายถึงสถานะการสวิตซ์ของสวิตซ์ในเฟส U, V และ W ตามลำดับ โดย "1"

หมายถึง มีการขั้บนำสวิตช์ตัวบนของเฟสนั้น ส่วน "0" หมายถึงมีการขั้บนำสวิตช์ตัวล่าง และใน 1 คาบการสวิตช์จะได้ว่า ในการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์

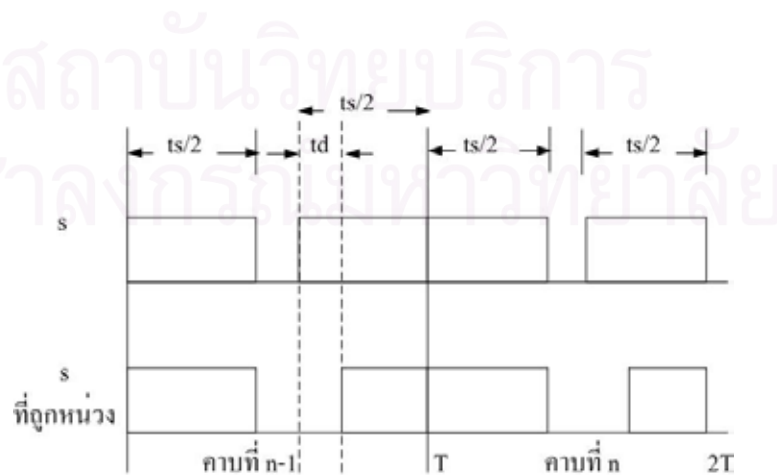
$$\begin{aligned} T &= t_A + t_B + t_0 + t_7 \\ t_0 &= t_7 \end{aligned} \quad (2.1)$$

โดยที่ T คือ คาบการสวิตช์ เมื่อพิจารณารูปที่ 2.3 ในคาบการสวิตช์หนึ่งๆ จะพบว่า ลักษณะของ สัญญาณขั้บนำสวิตช์ตัวล่าง s จะมีความสัมพันธ์กับลักษณะการสวิตช์ของเวกเตอร์แรงดัน U_0 , U_A , U_B และค่า t_0 , t_A , t_B และเมื่อกำหนดให้ t_s คือช่วงเวลาที่ขั้บนำสวิตช์ตัวล่างดังแสดงในรูปที่ 2.3 จะพบว่าปัญหาในการตรวจจบั้บกระแสของ ASIPM 2 รุ่นนี้เกิดขึ้นเมื่อช่วงเวลากการขั้บนำสวิตช์ตัวล่างใน $1/2$ คาบการสวิตช์ ($t_s/2$) น้อยกว่าเวลาหน่วง (t_d) ของสัญญาณ s กล่าวคือ

$$t_s < 2t_d \quad (2.2)$$

ซึ่งจะทำให้วงจรในรูปที่ 2.2 ไม่สามารถตรวจจบั้บกระแสได้ทัน และส่งผลให้ทำให้สัญญาณกระแส ยังคงค่าเดิมไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามค่ากระแสจริง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลของเวลาหน่วง ที่มีต่อสัญญาณขั้บนำสวิตช์ที่ต่อเนื่องกันใน 2 คาบการสวิตช์ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 จะพบว่าปัญหา การตรวจจบั้บกระแสจริง ๆ จะเกิดขึ้นเมื่อ

$$\frac{[t_s(n-1) + t_s(n)]}{2} < t_d \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.4 ผลการหน่วงเวลาเมื่อพิจารณา 2 คาบการสวิตช์ต่อเนื่อง

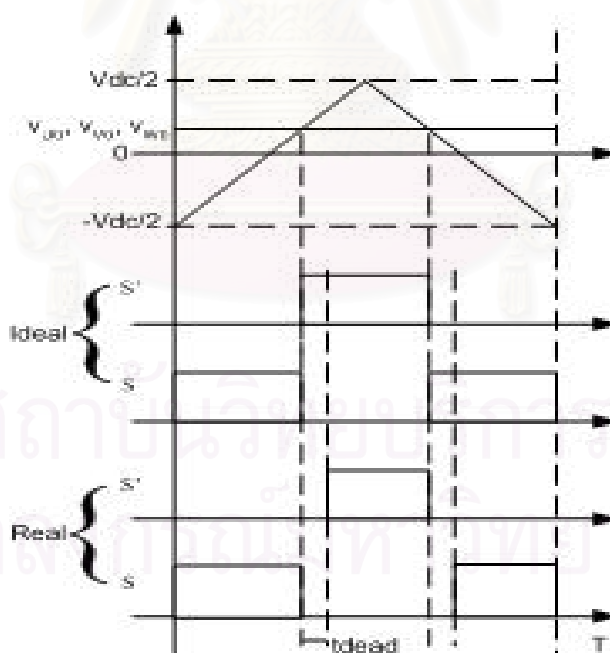
โดยที่ n หมายถึงลำดับของคาบการสวิตช์ นั่นคือผลของช่วงเวลาชั้บนำของคาบก่อนหน้า จะทำให้รูปคลื่นสัญญาณชั้บนำสวิตช์โดยรวมมีพัลส์ที่ยาวนานขึ้น และถ้าพิจารณาโดยประมาณว่า

$$t_s(n-1) \approx t_s(n) \quad (2.4)$$

จะได้ว่าปัญหาการตรวจจ้บกระแสจะเกิดขึ้นเมื่อ

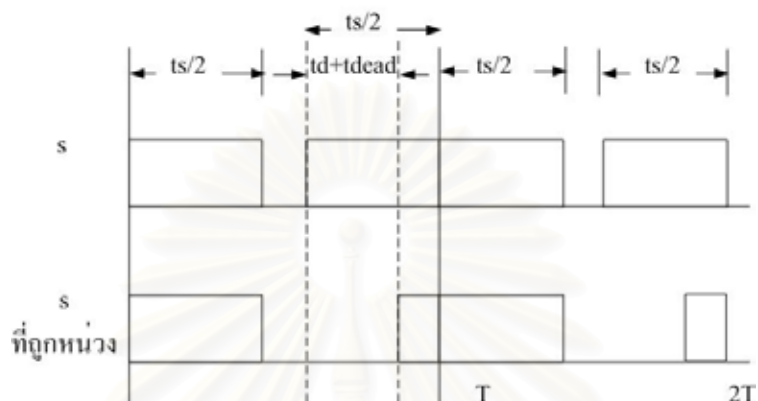
$$t_s < t_d \quad (2.5)$$

ในลำดับถัดไปเราจะวิเคราะห์ปัญหาการตรวจจ้บกระแสโดยคำนึงถึงผลของเวลาประวิง (Deadtime : t_{dead}) ด้วย เนื่องจากเวลาประวิงเป็นสิ่งสำคัญที่ขาดไม่ได้ในการสร้างสัญญาณชั้บนำสวิตช์ หลักการสร้างเวลาประวิงให้กับสัญญาณชั้บนำสวิตช์โดยทั่วไปแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 วิธีการสร้างเวลาประวิงให้กับสัญญาณชั้บนำสวิตช์โดยทั่วไป

จากรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าเวลาประวิงถูกสร้างจากการหน่วงสัญญาณขั้วนำสวิตช์ทั้งตัวบนและตัวล่างเป็นเวลา t_{dead} สัญญาณ s ที่ถูกหน่วงด้วยเวลาประวิง (t_{dead}) และเวลาหน่วงในการตรวจจับกระแส (t_d) เปรียบเทียบกับสัญญาณ s ที่ได้จากการมอดูเลต แสดงได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 สัญญาณ s ที่ถูกหน่วงจากเวลาประวิง (t_{dead}) และเวลาหน่วงในการตรวจจับกระแส (t_d) เปรียบเทียบกับสัญญาณ s ที่ได้จากการมอดูเลต

จากรูปที่ 2.6 จะได้ข้อสรุปว่าปัญหาในการตรวจจับกระแสเมื่อพิจารณาผลของเวลาประวิงจะเกิดขึ้นเมื่อ

$$t_s < t_d + t_{dead} \quad (2.6)$$

จากลักษณะการสวิตช์ของแต่ละเวกเตอร์แรงดันของอินเวอร์เตอร์ เราสามารถสรุปได้ว่า เวกเตอร์แรงดันที่ช่วยในการตรวจจับกระแสแต่ละเฟสในแต่ละเชกเตอร์เป็นดังตารางที่ 2.1 เพราะฉะนั้น ค่า t_s สำหรับเชกเตอร์ที่ 1 – 6 จึงสามารถคำนวณได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 เวกเตอร์แรงดันที่ช่วยในการตรวจจับกระแส

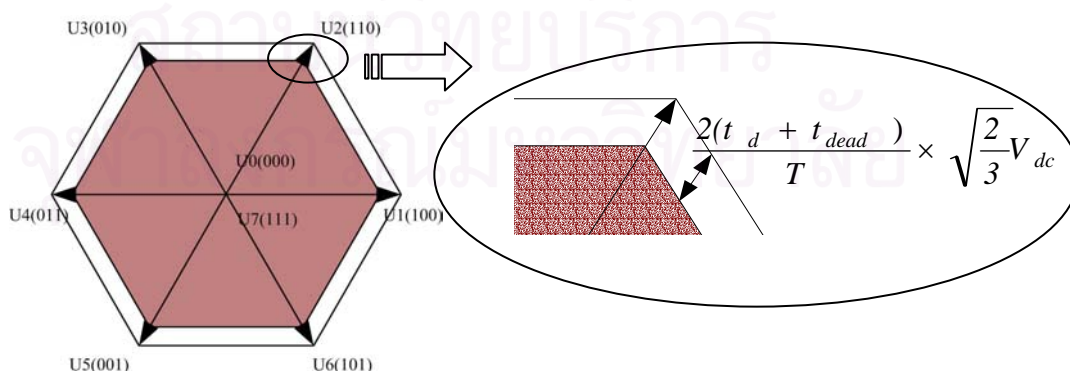
เชกเตอร์ที่	เวกเตอร์แรงดันที่ช่วยในการตรวจจับกระแส		
	เฟส U	เฟส V	เฟส W
1	U_0	U_0, U_1	U_0, U_1, U_2

2	U_0, U_3	U_0	U_0, U_2, U_3
3	U_0, U_3, U_4	U_0	U_0, U_3
4	U_0, U_4, U_5	U_0, U_5	U_0
5	U_0, U_5	U_0, U_5, U_6	U_0
6	U_0	U_0, U_1, U_6	U_0, U_1

ตารางที่ 2.2 ค่าช่วงเวลา t_s ในแต่ละเซกเตอร์

เซกเตอร์ที่	ค่าช่วงเวลา t_s		
	เฟส U	เฟส V	เฟส W
1	t_0	$t_0 + t_1$	$t_0 + t_1 + t_2$
2	$t_0 + t_3$	t_0	$t_0 + t_2 + t_3$
3	$t_0 + t_3 + t_4$	t_0	$t_0 + t_3$
4	$t_0 + t_4 + t_5$	$t_0 + t_5$	t_0
5	$t_0 + t_5$	$t_0 + t_5 + t_6$	t_0
6	t_0	$t_0 + t_1 + t_6$	$t_0 + t_1$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.6) ร่วมกับตารางที่ 2.2 จะได้ข้อสรุปเกี่ยวกับคุณสมบัติในการตรวจจับกระแสของบริเวณต่าง ๆ ในพื้นที่หกเหลี่ยมที่เป็นจุดทำงานของอินเวอร์เตอร์ดังนี้ คือ
(ก) บริเวณที่ตรวจจับกระแสได้โดยใช้เวกเตอร์ศูนย์ U_0



รูปที่ 2.7 บริเวณที่สามารถตรวจจับกระแสได้โดยใช้ช่วงเวลา t_0 ที่เกิดจากเวกเตอร์ศูนย์ U_0 เพียงลำพัง

เนื่องจากมีการใช้เวกเตอร์ศูนย์ $U_0(000)$ ในทุกเซกเตอร์และลักษณะการสวิตช์ “000” ก็ช่วยให้เราสามารถตรวจจับกระแสได้ทุกเฟส ดังนั้นเวกเตอร์ศูนย์ U_0 จึงเป็นเวกเตอร์หลักในการตรวจจับกระแสสำหรับ ASIPM พื้นที่แรงงาในรูปที่ 2.7 คือพื้นที่ที่ $t_0 \geq t_d + t_{dead}$ เมื่อพิจารณาตารางที่ 2.2 ประกอบจะพบว่าเฉพาะช่วงเวลากการใช้เวกเตอร์ $U_0(t_0)$ เพียงเวกเตอร์เดียวก็ทำให้สัญญาณขั้วนำสวิตช์ $s(t_s)$ มีความยาวเพียงพอต่อการตรวจจับกระแส ในพื้นที่นี้เราสามารถตรวจจับกระแสได้ครบทั้ง 3 เฟส จากสมการที่ (2.1) พื้นที่แรงงาในรูปที่ 2.7 กำหนดได้จากความสัมพันธ์

$$t_A + t_B \leq T - 2(t_d + t_{dead}) \quad (2.7)$$

(ข) บริเวณที่ตรวจจับกระแสได้เมื่อใช้ทั้งเวกเตอร์ศูนย์ U_0 ร่วมกับเวกเตอร์แอกทีฟ U_A หรือ U_B การตรวจจับกระแสเฟส U ในแต่ละเซกเตอร์สามารถอธิบายได้ดังนี้

เซกเตอร์ที่ 1 และ 6 เวกเตอร์แอกทีฟทั้ง 2 ตัวในแต่ละเซกเตอร์คือ $U_1(100)$, $U_2(110)$ กับ $U_1(100)$, $U_6(101)$ ไม่ช่วยเพิ่มช่วงเวลา t_s ในการตรวจจับกระแสของเฟส U

เซกเตอร์ที่ 3 และ 4 เวกเตอร์แอกทีฟทั้ง 2 ตัวในแต่ละเซกเตอร์คือ $U_3(010)$, $U_4(011)$ กับ $U_4(011)$, $U_3(001)$ สามารถช่วยเสริมเวกเตอร์ศูนย์ U_0 เพิ่มช่วงเวลา t_s ในการตรวจจับกระแสได้ในทั้ง 2 เซกเตอร์นี้ เงื่อนไขจำเป็นสำหรับการตรวจจับกระแสคือ

$$\begin{aligned} t_0 + t_A + t_B &\geq t_d + t_{dead} \\ T - t_7 &\geq t_d + t_{dead} \end{aligned} \quad (2.8)$$

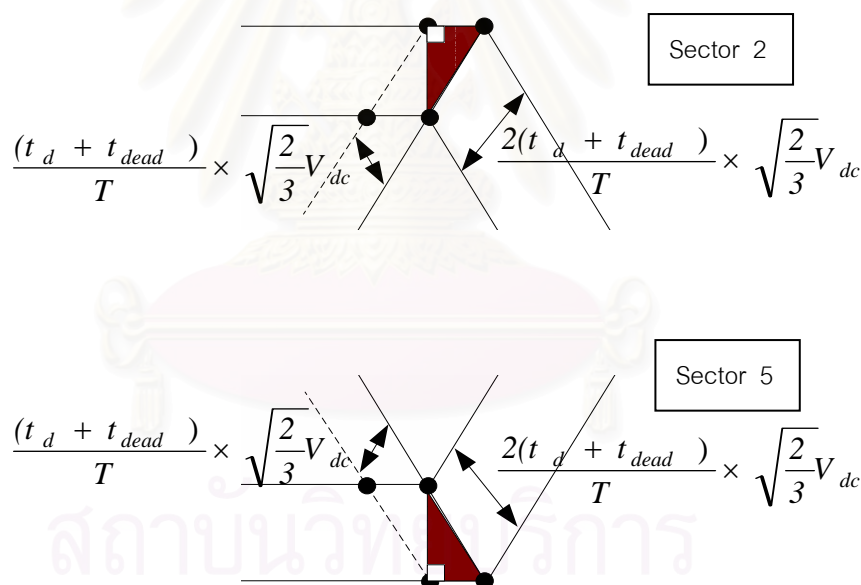
เนื่องจากเงื่อนไขที่ (2.8) เป็นเงื่อนไขที่อ่อนกว่าเงื่อนไขที่ (2.7) อาณาบริเวณของจุดทำงานที่สอดคล้องตามเงื่อนไขที่ (2.8) จึงครอบคลุมบริเวณที่แรงงารูปที่ 2.7 ด้วย และสำหรับบริเวณที่ไม่ได้แรงงาในรูปที่ 2.7 ซึ่งเป็นบริเวณที่มีปัญหาในการตรวจจับกระแสเมื่อใช้เวกเตอร์ t_0 เพียงลำพังโดยที่ $t_0 = t_7 < t_d + t_{dead}$ ซึ่งเมื่อแทนลงในเงื่อนไขในสมการที่ (2.8) จะกลายเป็นสมการที่ (2.9) แทน

$$T \geq 2(t_d + t_{dead}) \quad (2.9)$$

อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปแล้วในทางปฏิบัติคาบเวลาการสวิตช์ T จะมีค่าอยู่ในช่วง $50 \mu\text{s} - 1 \text{ms}$ และ t_d มีค่าเท่ากับ $3 \mu\text{s}$ สำหรับสวิตช์กำลังที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ดังนั้นสมการที่ (2.9) จึงเป็นจริงเสมอ ซึ่งหมายความว่า เราสามารถตรวจจذبกระแสเฟส U ในเซกเตอร์ที่ 3, 4 ได้ทุกสถานะทำงาน เซกเตอร์ที่ 2 และ 5 ในแต่ละเซกเตอร์จะมีเวกเตอร์แอกทีฟ 1 ตัวคือ $U_3(010)$ และ $U_5(001)$ ที่ช่วยเวกเตอร์ศูนย์ U_0 ในการตรวจจذبกระแสในกรณีนี้เงื่อนไขจำเป็นในการตรวจจذبกระแสคือ

$$t_0 + t_A(\text{or } t_B) \geq t_d + t_{dead} \quad (2.10)$$

ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่อ่อนกว่าเงื่อนไขที่ (2.7) จึงครอบคลุมพื้นที่แรงงาในรูปที่ 2.7 เช่นกัน สำหรับบริเวณที่ไม่ได้แรงงาในรูปที่ 2.7 จะได้ว่าบริเวณที่อาจมีปัญหาในการตรวจจذبกระแสแม้จะใช้เวกเตอร์แอกทีฟช่วยก็ตามคือพื้นที่ ABCD ในรูปที่ 2.8

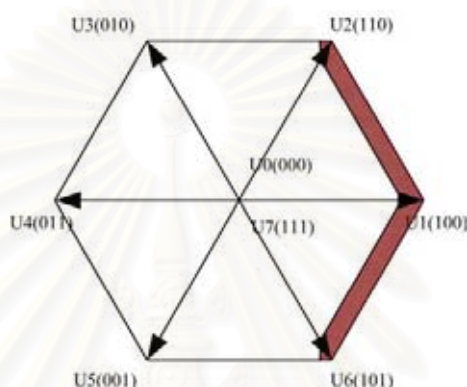


- โดยที่ จุด A : $t_0 = t_d + t_{dead}$ และ $t_A(\text{or } t_B) = 0$
 จุด C : $t_A(\text{or } t_B) = t_d + t_{dead}$ และ $t_0 = 0$
 เส้นตรง AC : $t_0 + t_A(\text{or } t_B) = t_d + t_{dead}$

รูปที่ 2.8 พื้นที่ที่ไม่สามารถตรวจจذبกระแสเฟส U ในเซกเตอร์ที่ 2 และ 5

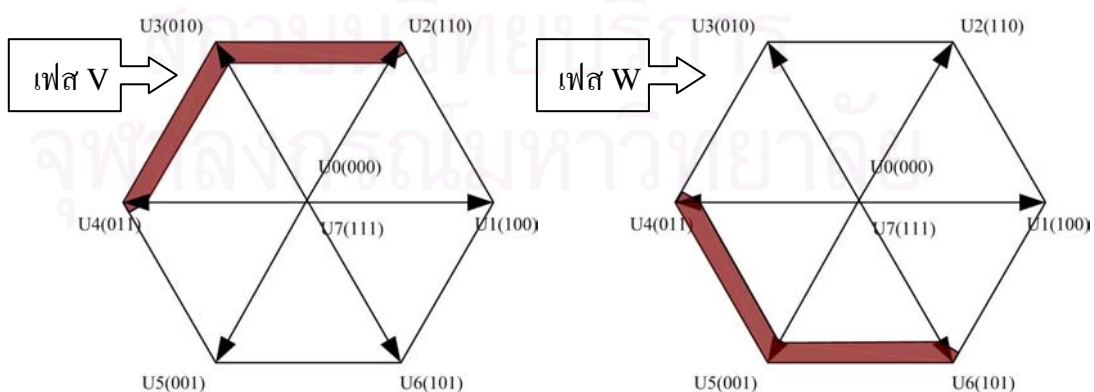
และเมื่อพิจารณาประกอบกับเงื่อนไขของเวลา t_0 จะได้ว่า ถ้าเวกเตอร์แรงดันคำสั่งตกอยู่ในบริเวณสามเหลี่ยม ABC ในรูปที่ 2.8 จะทำให้ $t_0 < t_d + t_{dead}$ และ $t_0 + t_A(ort_B) < t_d + t_{dead}$ ด้วย

ดังนั้นโดยสรุปแล้วพื้นที่ที่ไม่สามารถตรวจจับกระแสเฟส U ได้แม้ใช้เวกเตอร์ศูนย์ U_0 ร่วมกับเวกเตอร์เอกทีฟจะเป็นพื้นที่แรเงาในรูปที่ 2.9

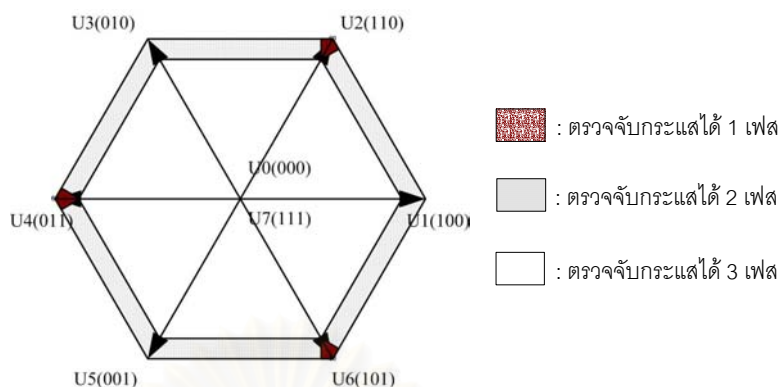


รูปที่ 2.9 พื้นที่ที่ไม่สามารถตรวจจับกระแสเฟส U

ในกรณีของเฟส V และ W เราสามารถใช้หลักการเดียวกันนี้ในการหาพื้นที่ปัญหาและพบว่าพื้นที่ที่ไม่สามารถตรวจจับกระแสของเฟส V และ W จะเลื่อนไปจากพื้นที่ในกรณีเฟส U เป็นมุม 120° และ 240° (ทวนเข็มนาฬิกา) ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 2.10 เมื่อนำรูปที่ 2.9 และ 2.10 มาเขียนรวมกันจะเป็นดังรูปที่ 2.11 ซึ่งพื้นที่ที่แรเงาที่บคือ บริเวณที่เราตรวจจับกระแสได้เพียง 1 เฟส



รูปที่ 2.10 พื้นที่ที่ไม่สามารถตรวจจับกระแสเฟส V และเฟส W



รูปที่ 2.11 พื้นที่ปัญหาในการตรวจจับกระแสเฟส U, V และ W

2.3 แนวทางแก้ไขปัญหาในการตรวจจับกระแสของ ASIPM Version 1, 2

พื้นที่ที่แรเงาบางในรูปที่ 2.11 จะเป็นบริเวณที่เราตรวจจับกระแสไม่ได้เพียงเฟสเดียว ส่วนที่เหลืออีก 2 เฟสนั้นตรวจจับได้ ในกรณีนี้เราสามารถให้ความสัมพันธ์ที่ว่า

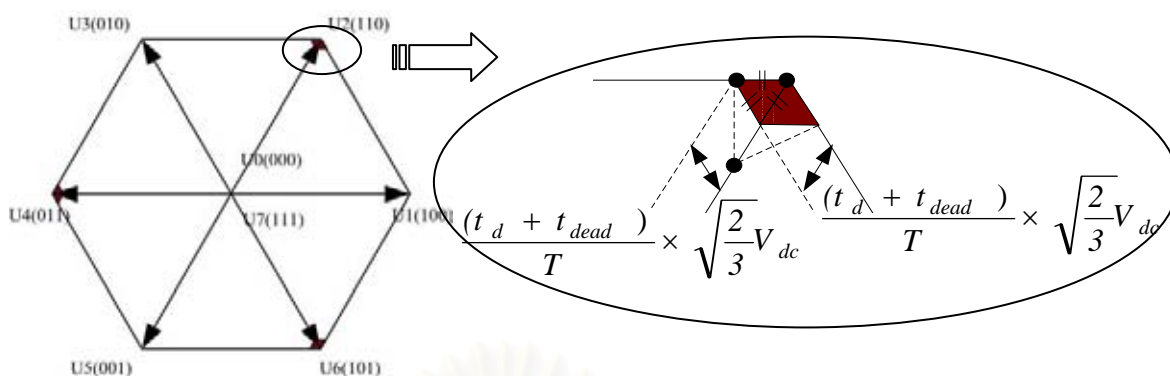
$$i_U + i_V + i_W = 0 \quad (2.11)$$

มาช่วยในการคำนวณหาค่ากระแสในเฟสที่ตรวจจับไม่ได้ ดังนั้นพื้นที่ที่ไม่สามารถตรวจจับกระแสได้ครบ 3 เฟสจึงเหลือเฉพาะส่วนที่แรเงาทึบในรูปที่ 2.11 เท่านั้น

แนวทางหนึ่งในการลดพื้นที่ปัญหาที่ตรวจจับกระแสได้ไม่ครบ 3 เฟสที่เหลือ (ตรวจจับได้เพียงเฟสเดียว) ทำได้โดยการใช้การมอดูเลตแบบ 2 กิ่ง (2 Arms Modulation) ซึ่งเป็นวิธีการมอดูเลตที่ใช้เวกเตอร์ศูนย์เป็น $U_0(000)$ ตลอดทำให้ $t_7(111)$ เป็น 0 ดังสมการ

$$T = t_A + t_B + t_0 \quad (2.12)$$

ซึ่งจะช่วยลดพื้นที่ปัญหาหลงเหลือประมาณครึ่งหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.12



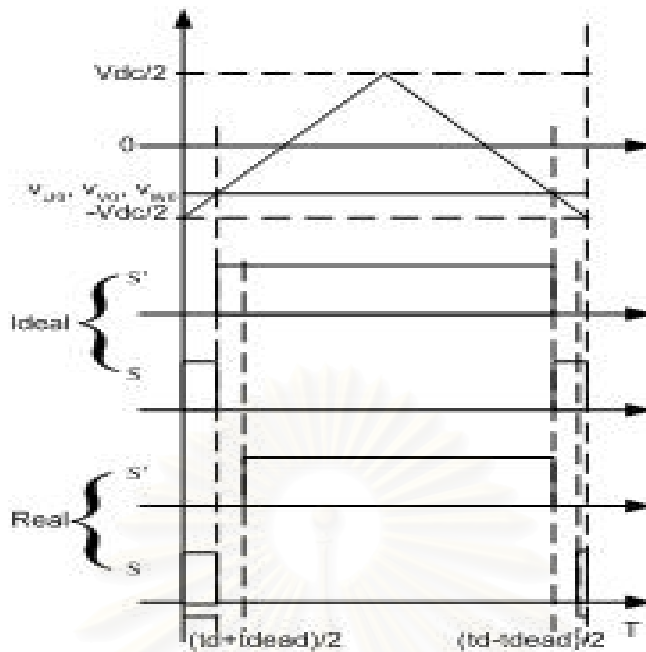
รูปที่ 2.12 พื้นที่ปัญหาในการตรวจจับสนะแสงเมื่อใช้วิธีการหากระแสเฟสที่พัฒนาขึ้น
และใช้การมอดูเลตแบบ 2 กิ่ง

การมอดูเลตวิธีนี้ นอกจากจะช่วยลดปัญหาในการตรวจจับสนะแสงแล้ว ยังช่วยให้รูปคลื่นกระแสที่ได้จากวงจรตรวจจับสนะแสงจริงมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการมอดูเลตแบบปกติ ณ จุดทำงานเดียวกัน ทั้งนี้ก็เนื่องจากมีช่วง t_0 ที่นานขึ้นเป็น 2 เท่า นั่นเอง ช่วงเวลาการคงค่ากระแสจึงสั้นลง นอกจากนี้แล้วจำนวนการสวิตซ์ซึ่งลดลงช่วยลดการสูญเสียเนื่องจากการสวิตซ์ (switching loss) ลง 1/3 อีกด้วย สำหรับพื้นที่ปัญหาที่เหลือนั้น (รูปที่ 2.12) จะพบว่า มีขนาดเล็กมากเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนแก้ปัญหานี้ (รูปที่ 2.8) ประกอบกับ ASIPM ในปัจจุบันมีการตั้งค่า t_d ให้น้อย พื้นที่ส่วนที่เหลือนี้จึงสามารถละเลยได้ในทางปฏิบัติ

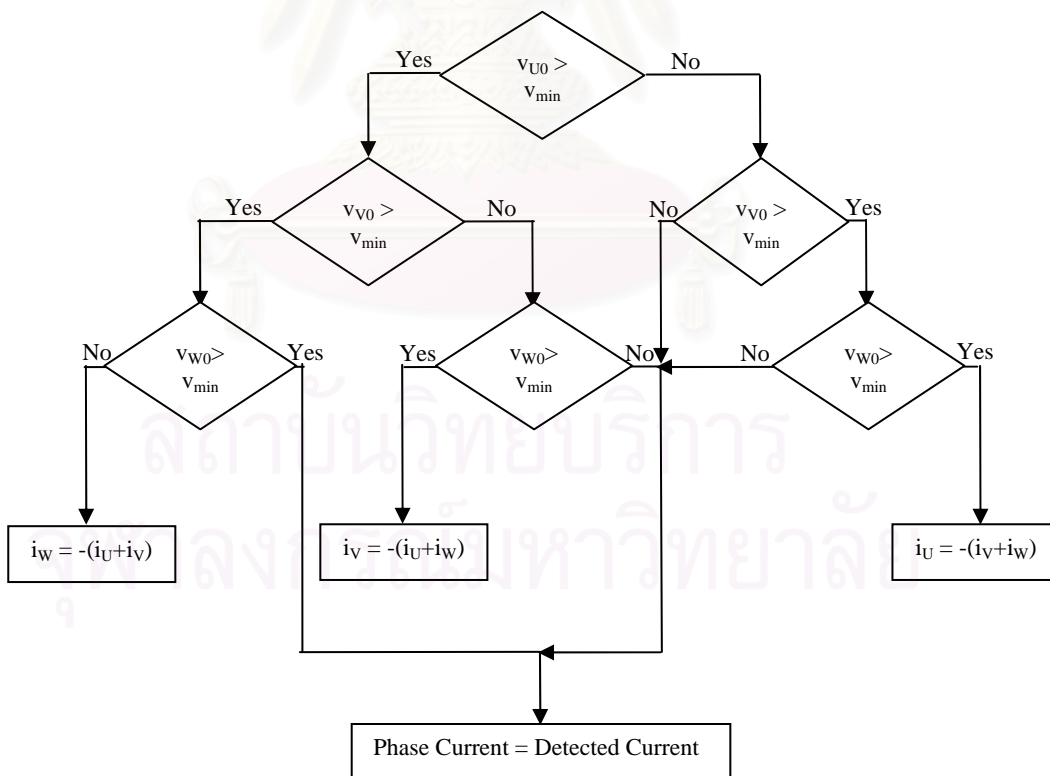
2.4 การนำอัลกอริทึมไปใช้งานจริงในการหากระแสเฟสกรณีที่มีเวลาประวิงแบบทั่วไป

จากการวิเคราะห์พื้นที่ปัญหาในการตรวจจับสนะแสงทั้ง 3 เฟสข้างต้น เราสามารถหาค่ากระแสเฟสที่ตรวจจับสนะแสงไม่ได้ด้วยค่ากระแสอีก 2 เฟสได้ง่าย โดยทำการตรวจสอบสัญญาณแรงดันเฟสเทียบกึ่งกลางบัสไฟตรง (v_{U0} , v_{V0} และ v_{W0}) ซึ่งใช้เปรียบเทียบกับสามเหลี่ยมพาหะว่าแต่ละเฟสมีช่วงเวลา t_s ในคาบการสวิตซ์นั้น ๆ เพียงพอในการตรวจจับสนะแสงซึ่งกำหนดโดยอสมการที่ (2.6) หรือไม่ โดยเงื่อนไขแรงดันเฟสเทียบกึ่งกลางบัสไฟตรงขั้นต่ำในการตรวจจับสนะแสงเฟสกรณีที่มีเวลาประวิงแบบทั่วไปแสดงในอสมการที่ (2.13) และรูปที่ 2.13

$$v_{U0}, v_{V0}, v_{W0} > v_{\min} = \left(\frac{t_d + t_{dead}}{T} - \frac{1}{2} \right) V_{dc} \quad (2.13)$$



รูปที่ 2.13 แรงดันเฟสเทียบกับกลางบัสไฟตรงขั้นต่ำในการตรวจจับกระแสเฟสกรณีที่มีเวลาประวิงแบบทั่วไป

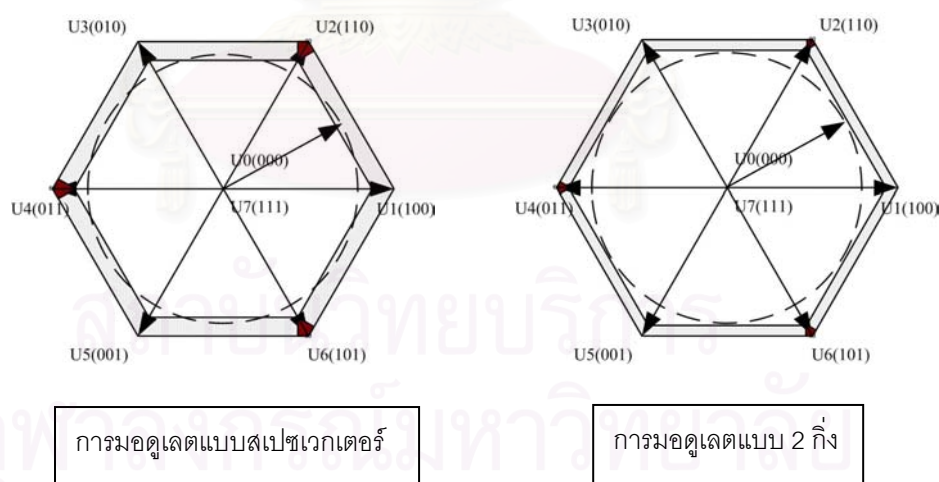


รูปที่ 2.14 แผนภาพการคำนวณหากระแสเฟสของ ASIPM Version 1, 2

ในกรณีที่แรงดันเฟสเทียบกึ่งกลางบัลไฟตรงของเฟสใดเฟสหนึ่งไม่ผ่านเงื่อนไขขั้นต่ำในการตรวจจذبกระแสเราจะใช้ค่ากระแสอีก 2 เฟสมาช่วยหาค่ากระแสของเฟสนั้น แต่ถ้ามีแรงดันมากกว่า 1 เฟสที่ไม่ผ่านเงื่อนไขขั้นต่ำในการตรวจจذبกระแส (อยู่ในส่วนที่แรงเท่ากับในรูปที่ 2.11 และในรูปที่ 2.12) เราก็จะละเลยการใช้งานอัลกอริทึมไปเนื่องจากในกรณีนี้เราตรวจจذبกระแสได้เพียงเฟสเดียวไม่สามารถนำข้อมูลของกระแสเพียง 1 เฟสหากระแสอีก 2 เฟสที่เหลือได้ เราสามารถเขียนอัลกอริทึมในการหากระแสเฟสได้ดังรูปที่ 2.14

2.5 ผลจำลองการทำงานการตรวจจذبกระแสของ ASIPM Version 1, 2

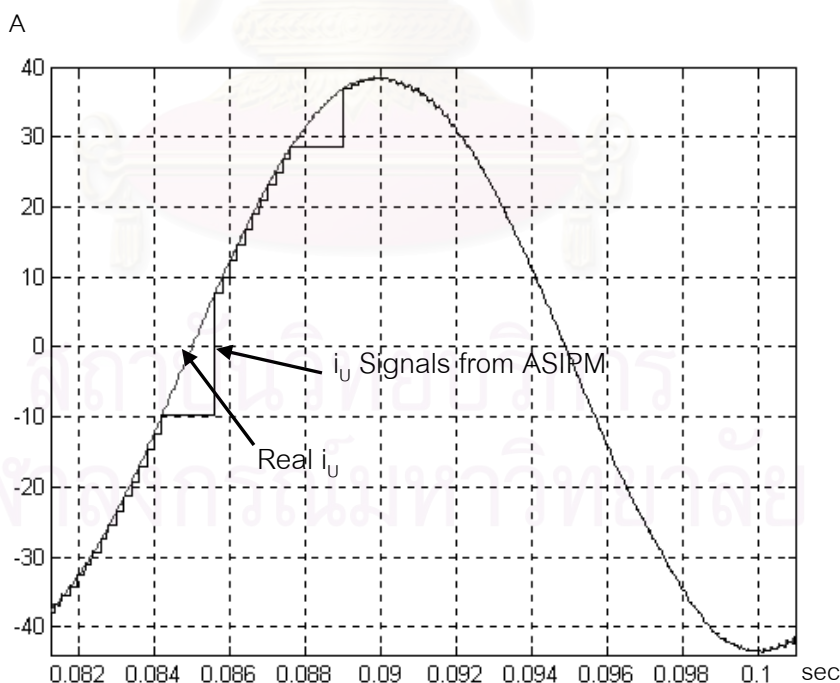
เราทำการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้คือ ความถี่การสวิตช์ (f_{pwm}) = 5 kHz, $t_d = 3 \mu s$, $t_{dead} = 4.5 \mu s$ และแรงดันบัลไฟตรง (V_{dc}) = 560 V ทำการควบคุมแบบ v/f โดยสร้างแรงดันคำสั่งที่มีแรงดันเฟสค่ายอดเท่ากับ 305 V ความถี่ 49.15 Hz เวกเตอร์คำสั่งที่กำหนดนี้จะหมุนผ่านพื้นที่ปัญหาของการมอดูเลตแบบปกติ แต่จะไม่ผ่านพื้นที่ปัญหาเมื่อใช้การมอดูเลตแบบ 2 กิ่งดังแสดงในรูปที่ 2.15 และผลจำลองการทำงานเป็นดังรูปที่ 2.16 – 2.18



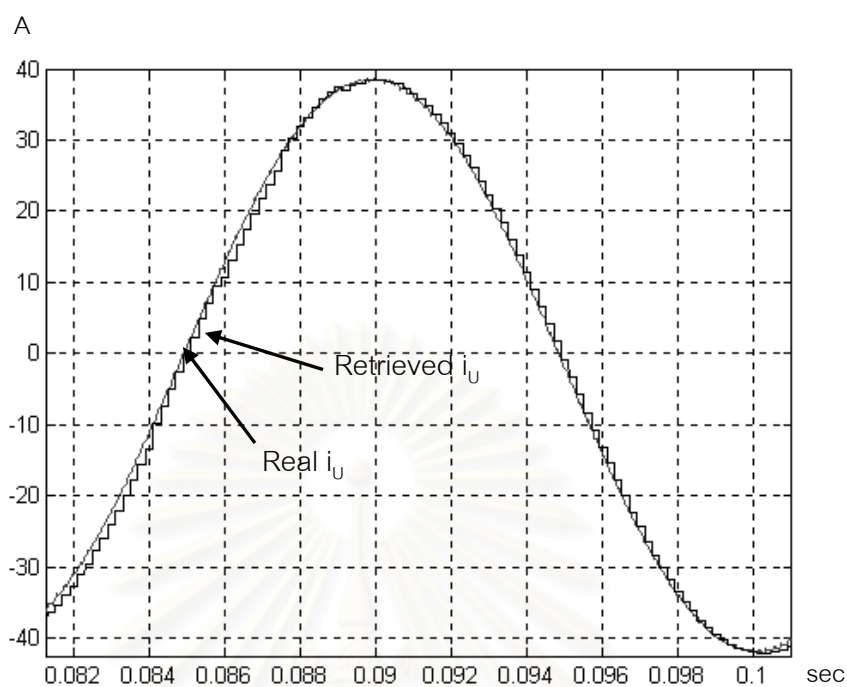
รูปที่ 2.15 การหมุนผ่านพื้นที่ปัญหาของเวกเตอร์คำสั่งที่สร้างขึ้นเมื่อใช้การมอดูเลตแบบต่าง ๆ

จากรูปที่ 2.16 เราสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อเวกเตอร์คำสั่งหมุนผ่านพื้นที่ปัญหา จะทำให้เกิดการตรวจจذبกระแสไม่ได้เนื่องจากสัญญาณขับนำสวิตช์ s มีพัลส์สั้นกว่าเวลาหนึ่งวง

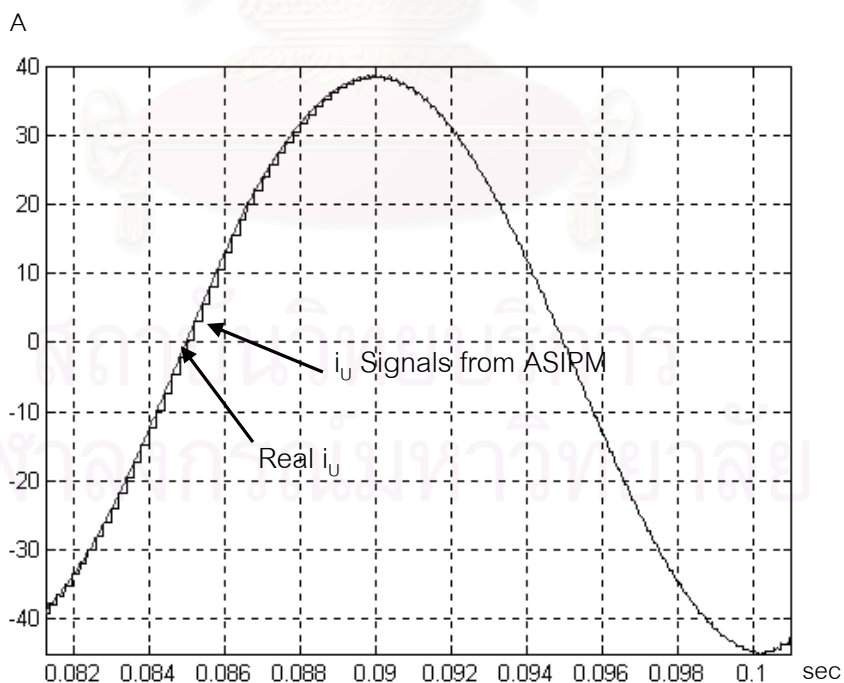
ของวงจรตรวจจับ สัญญาณกระแสที่ได้จึงยังคงค่าเดิมตลอดช่วงเวลานั้น อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้วิธีการหากระแสเฟสที่พัฒนาขึ้นพบว่าช่วงที่ตรวจจับกระแสไม่ได้จะหายไปดังแสดงในรูปที่ 2.17 และเมื่อใช้การมอดูเลตแบบ 2 ก็พบว่าไม่เกิดช่วงที่ตรวจจับกระแสไม่ได้แม้จะไม่ใช้วิธีการหากระแสเฟสที่พัฒนาขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.18 ซึ่งทั้งหมดเป็นการยืนยันว่าการวิเคราะห์และวิธีการแก้ไขปัญหานี้ที่นำเสนอมีความถูกต้อง



รูปที่ 2.16 ผลการตรวจจับกระแสเฟส U เมื่อใช้วิธีการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ปกติ
ไม่ใช้วิธีการหากระแสเฟสที่พัฒนาขึ้น



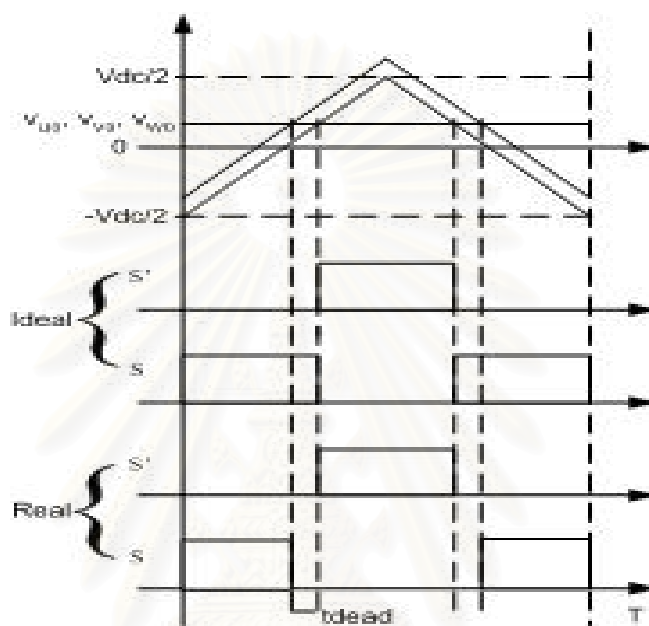
รูปที่ 2.17 ผลการตรวจจับกระแสเฟส U เมื่อใช้วิธีการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ปกติ และใช้วิธีการหากระแสเฟสที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 2.18 ผลการตรวจจับกระแสเฟส U เมื่อใช้การมอดูเลตแบบ 2 กิ่ง และไม่ใช้วิธีการหากระแสเฟสที่พัฒนาขึ้น

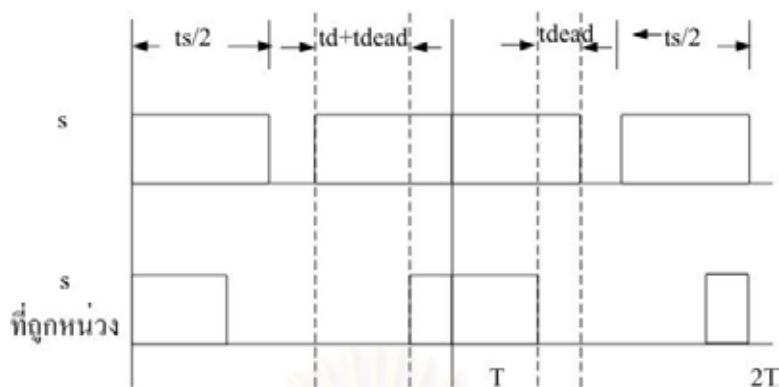
2.6 พื้นที่ปัญหาในการตรวจจับกระแสเมื่อใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ SH - 7042

เนื่องจากการทดลองได้เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีวิธีการสร้างเวลาประวิงที่แตกต่างจากที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 2.2 โดยวิธีการสร้างเวลาประวิงของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ นี้แสดงได้ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 วิธีการสร้างเวลาประวิงของไมโครคอนโทรลเลอร์ SH - 7042

จากรูปที่ 2.19 จะพบว่าผู้ผลิตไมโครคอนโทรลเลอร์ได้เลือกวิธีการสร้างเวลาประวิงโดยการลดช่วงเวลาชับนำสวิตซ์ตัวล่าง (t_u) แต่คงช่วงเวลาการชับนำสวิตซ์ตัวบนเอาไว้ซึ่งแตกต่างกับวิธีที่ใช้โดยทั่วไปดังแสดงในรูปที่ 2.5 เราจำเป็นที่จะต้องทำการวิเคราะห์พื้นที่ปัญหาในการตรวจจับกระแสที่เกิดขึ้นจากการสร้างเวลาประวิงในลักษณะนี้ จากรูปที่ 2.19 เราสามารถอธิบายสัญญาณ s ที่ถูกหน่วงจากเวลาประวิง (t_{dead}) และเวลาหน่วงในการตรวจจับกระแส (t_d) เปรียบเทียบกับสัญญาณ s ที่คำนวณได้จากการมอดูเลตดังรูปที่ 2.20

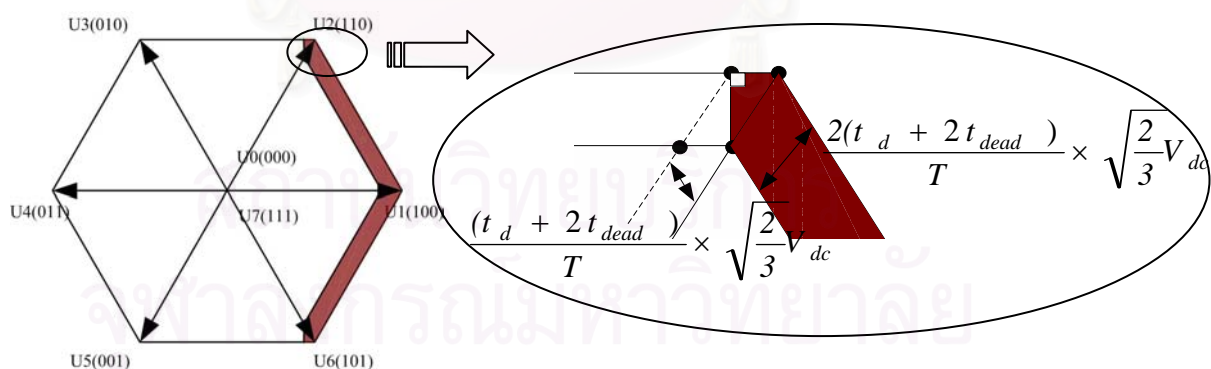


รูปที่ 2.20 สัญญาณ s ที่ถูกหน่วงจากเวลาประวิง (t_{dead}) และเวลาหน่วงในการตรวจจับสนะแสง (t_d) สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ SH – 7042 เปรียบเทียบกับสัญญาณ s ที่คำนวณได้

พื้นที่ปัญหาในการตรวจจับสนะแสงในกรณีนี้เราสามารถวิเคราะห์โดยใช้หลักการเดียวกับในหัวข้อ 2.2 ซึ่งจะได้เงื่อนไขในการตรวจจับสนะแสงเป็น

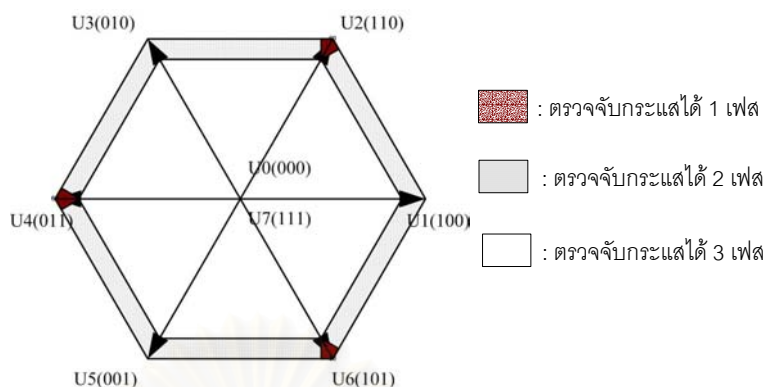
$$t_s < t_d + 2t_{dead} \tag{2.14}$$

เมื่อทำการวิเคราะห์ต่อไปโดยใช้หลักการในหัวข้อ 2.2 เราสามารถหาพื้นที่ที่ไม่สามารถตรวจจับสนะแสงเฟส U ได้ดังรูปที่ 2.21



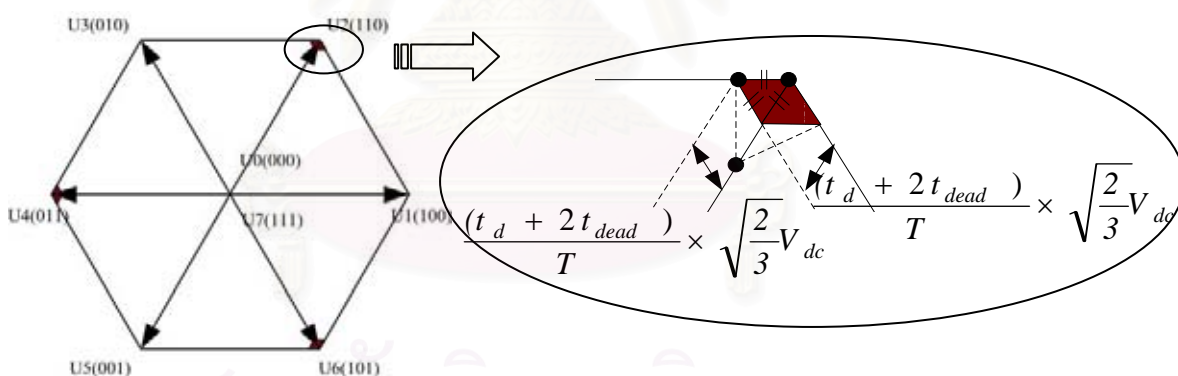
รูปที่ 2.21 พื้นที่ที่ไม่สามารถตรวจจับสนะแสงเฟส U เมื่อใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ SH - 7042

จากรูปที่ 2.21 เราสามารถเขียนพื้นที่ปัญหาในการตรวจจับสนะแสงทั้ง 3 เฟสของการสร้างเวลาประวิงรูปแบบนี้ได้ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 พื้นที่ปัญหาในการตรวจจับสนะไฟ U, V และ W สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ SH - 7042

เราสามารถใช้อัลกอริทึมที่ได้นำเสนอในหัวข้อ 2.3 ช่วยลดพื้นที่ปัญหาในรูปที่ 2.22 ได้เช่นเดียวกัน กล่าวคือใช้ความสัมพันธ์ (2.11) ในช่วงที่ตรวจจับสนะไฟได้ 2 เฟส (ช่วงแรงบางในรูปที่ 2.22) และใช้การมอดูเลตแบบ 2 กิ่ง จะได้พื้นที่ปัญหาที่เหลืออยู่เพียงเล็กน้อยดังแสดงในรูปที่ 2.23

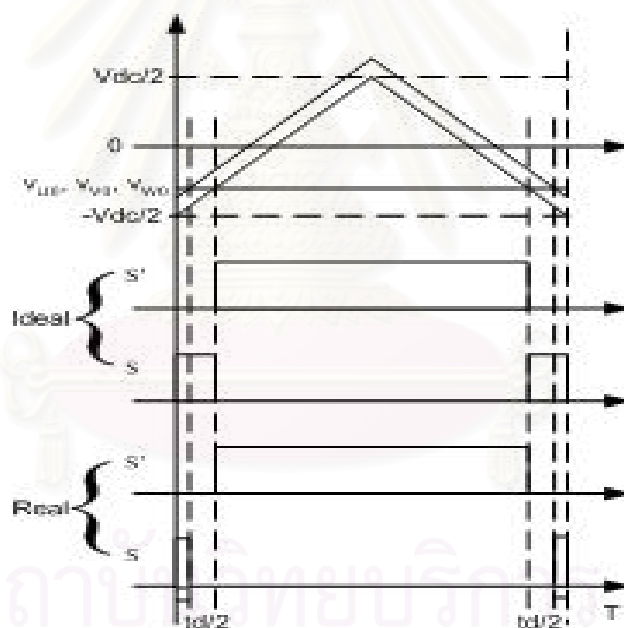


รูปที่ 2.23 พื้นที่ปัญหาในการตรวจจับสนะไฟเมื่อใช้วิธีการหากระแสเฟสที่พัฒนาขึ้น และการมอดูเลตแบบ 2 กิ่งสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ SH - 7042

2.7 การนำอัลกอริทึมไปใช้งานจริงในการหากระแสเฟสสำหรับ SH-7042

จากการวิเคราะห์พื้นที่ปัญหาในการตรวจจับสนกระแสทั้ง 3 เฟสข้างต้น เราสามารถหาค่ากระแสเฟสที่ตรวจจับสนกระแสไม่ได้ด้วยค่ากระแสอีก 2 เฟสได้ง่าย โดยทำการตรวจสอบสัญญาณแรงดันเฟสเทียบกับกึ่งกลางบัสไฟตรง (v_{U0} , v_{V0} และ v_{W0}) ซึ่งใช้เปรียบเทียบกับสามเหลี่ยม พิจารณาว่าแต่ละเฟสมีช่วงเวลา t_s ในคาบการสวิตช์นั้น ๆ เพียงพอในการตรวจจับสนกระแสซึ่งกำหนดโดยสมการที่ (2.14) หรือไม่ โดยเงื่อนไขแรงดันเฟสเทียบกับกึ่งกลางบัสไฟตรงขั้นต่ำในการตรวจจับสนกระแสเฟสกรณีที่มีเวลาประวิงแบบทั่วไปแสดงในสมการที่ (2.15) และรูปที่ 2.24

$$v_{U0}, v_{V0}, v_{W0} > v_{\min} = \left(\frac{t_d + 2t_{\text{dead}}}{T} - \frac{1}{2} \right) V_{dc} \quad (2.15)$$



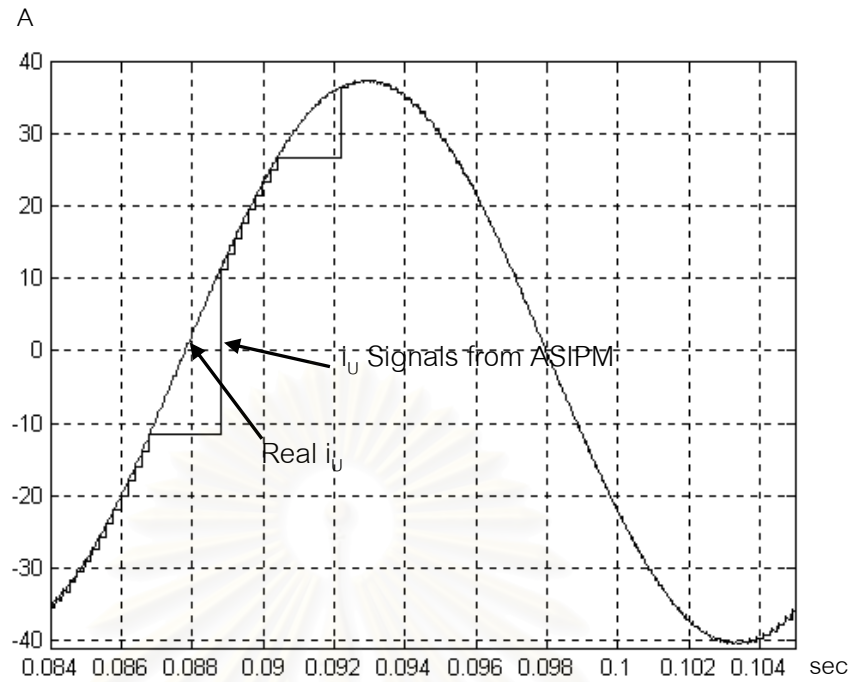
รูปที่ 2.24 แรงดันเฟสเทียบกับกึ่งกลางบัสไฟตรงขั้นต่ำในการตรวจจับสนกระแส
สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ SH – 7042

ในกรณีที่แรงดันเฟสเทียบกับกึ่งกลางบัสไฟตรงของเฟสใดเฟสหนึ่งไม่ผ่านเงื่อนไขขั้นต่ำในการตรวจจับสนกระแสเราจะใช้ค่ากระแสอีก 2 เฟสมาช่วยหาค่ากระแสของเฟสนั้น แต่ถ้ามีแรงดันมากกว่า 1 เฟสที่ไม่ผ่านเงื่อนไขขั้นต่ำในการตรวจจับสนกระแส (อยู่ในส่วนที่แรเงาที่บในรูปที่ 2.22 และในรูปที่ 2.23) เราก็จะละเลยการใช้งานอัลกอริทึมไปเนื่องจากในกรณีนี้เราตรวจจับสน

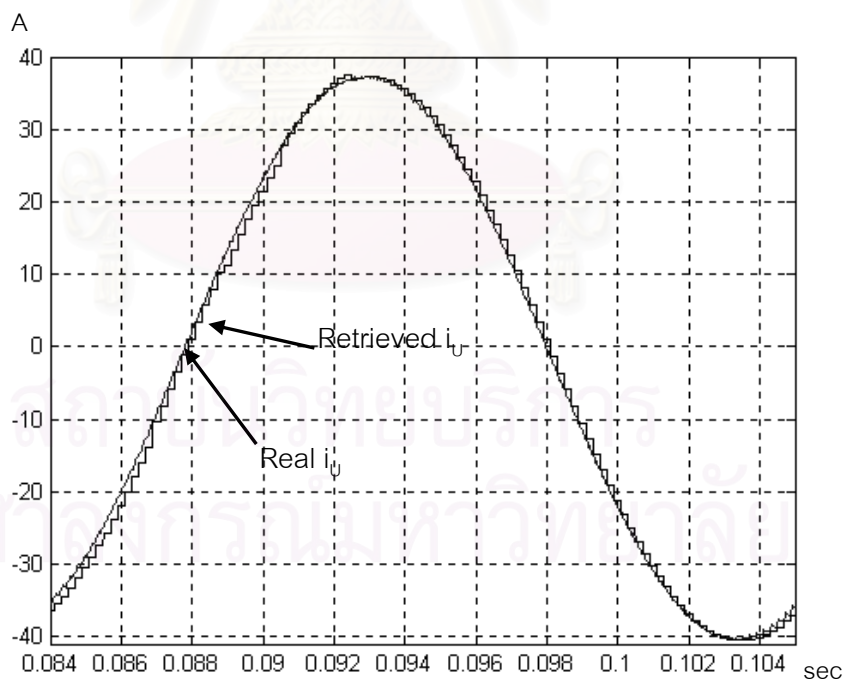
กระแสได้เพียงเฟสเดียวไม่สามารถนำข้อมูลของกระแสเพียง 1 เฟสหากระแสอีก 2 เฟสที่เหลือได้ เราสามารถเขียนอัลกอริทึมในการหากระแสเฟสได้ดังรูปที่ 2.14 โดยที่ v_{\min} ในกรณีนี้มีค่าสอดคล้องกับสมการที่ (2.15)

ในเบื้องต้นเราจะตรวจสอบความถูกต้องของทฤษฎีที่นำเสนอทั้งหมดข้างต้นโดยการจำลองผลด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้คือ ความถี่การสวิตช์ (f_{pwm}) = 5 kHz, $t_d = 3 \mu\text{s}$, $t_{\text{dead}} = 4.5 \mu\text{s}$, แรงดันบัลไฟตรง (V_{dc}) = 560 V ทำการควบคุมแบบ v/f โดยสร้างแรงดันคำสั่งที่มีแรงดันเฟสค่ายอดเท่ากับ 295 V ความถี่ 47.5 Hz เวกเตอร์คำสั่งที่กำหนดนี้จะหมุนผ่านพื้นที่ปัญหาของการมอดูเลตแบบปกติ แต่จะไม่ผ่านพื้นที่ปัญหาเมื่อใช้การมอดูเลตแบบ 2 กิ่งดังแสดงในรูปที่ 2.15 ผลจำลองการทำงานเป็นดังรูปที่ 2.25 – 2.27

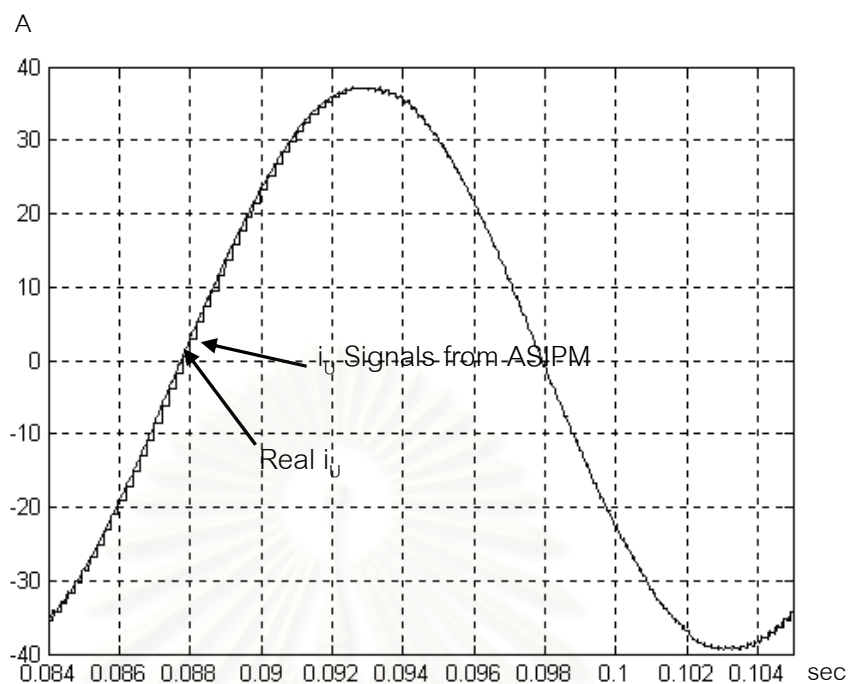
จากรูปที่ 2.25 เราสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อเวกเตอร์คำสั่งหมุนผ่านพื้นที่ปัญหาจะทำให้เกิดการตรวจจับกระแสไม่ได้เนื่องจากสัญญาณขั้วนำสวิตช์ s มีพัลส์สั้นกว่าเวลาหน่วงของวงจรตรวจจับ สัญญาณกระแสที่ได้จึงยังคงค่าเดิมตลอดช่วงเวลานั้น อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้วิธีการหากระแสเฟสที่พัฒนาขึ้นพบว่าช่วงที่ตรวจจับกระแสไม่ได้จะหายไปดังแสดงในรูปที่ 2.26 และเมื่อใช้การมอดูเลตแบบ 2 กิ่งพบว่าไม่เกิดช่วงที่ตรวจจับกระแสไม่ได้แม้จะไม่ใช้วิธีการหากระแสเฟสที่พัฒนาขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.27 ซึ่งทั้งหมดแสดงถึงความถูกต้องของการวิเคราะห์และวิธีการแก้ไขปัญหานำเสนอ



รูปที่ 2.25 ผลการตรวจจับกระแสเฟส U เมื่อใช้วิธีการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ปกติไม่ใช้วิธีการหาค่ากระแสที่พัฒนาขึ้นสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ SH - 7042



รูปที่ 2.26 ผลการตรวจจับกระแสเฟส U เมื่อใช้วิธีการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ปกติและใช้วิธีการหาค่ากระแสที่พัฒนาขึ้นสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ SH - 7042



รูปที่ 2.27 ผลการตรวจจับกระแสเฟส U เมื่อใช้การมอดูเลตแบบ 2 กิ่งและไม่ใช้วิธีการ
หากระแสเฟสที่พัฒนาขึ้นสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ SH – 7042

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.8 ผลการทดลอง

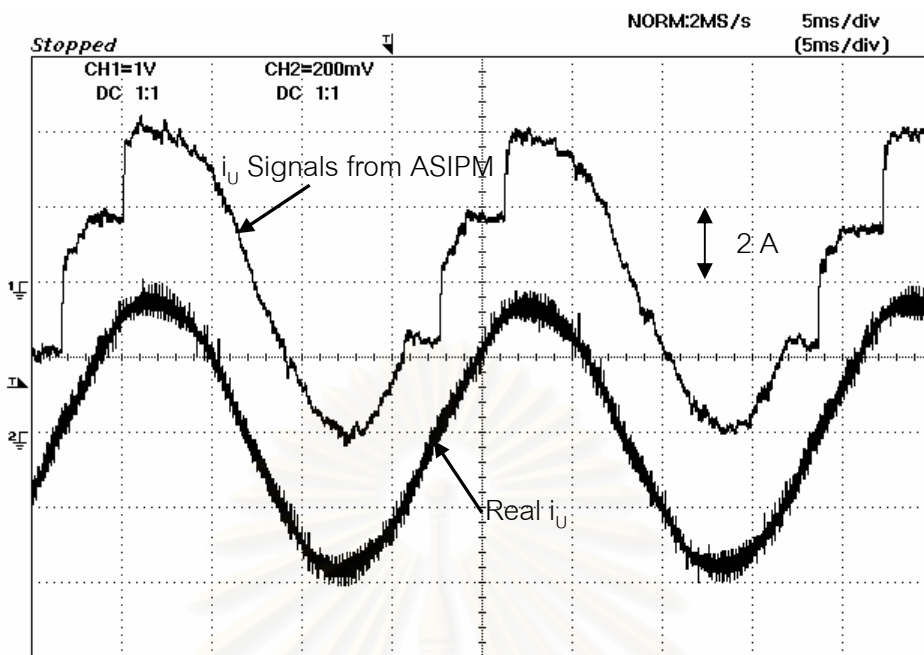
ทำการทดลองโดยมีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เท่ากับการจำลองผลดังนี้คือ ความถี่การสวิตช์ (f_{pwm}) = 5 kHz, $t_d = 3 \mu s$, $t_{dead} = 4.5 \mu s$, แรงดันบัลไฟตรง (V_{dc}) = 560 V ทำการควบคุมแบบ v/f โดยสร้างแรงดันคำสั่งที่มีแรงดันเฟสค่ายอดเท่ากับ 295 V ความถี่ 47.5 Hz เวกเตอร์คำสั่งที่กำหนดนี้จะหมุนผ่านพื้นที่ปัญหาของการมอดูเลตแบบปกติ แต่จะไม่ผ่านพื้นที่ปัญหาเมื่อใช้การมอดูเลตแบบ 2 กิ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 2.28 – 2.30

จากรูปที่ 2.28 เราสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อเวกเตอร์คำสั่งหมุนผ่านพื้นที่ปัญหาจะทำให้เกิดการตรวจจับกระแสไม่ได้เนื่องจากสัญญาณชับนำสวิตช์ s มีพัลส์สั้นกว่าเวลาหนึ่งของวงจรถวจจับสัญญาณกระแสที่ได้จึงยังคงค่าเดิมตลอดช่วงเวลานั้น อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้วิธีการหากระแสเฟสที่พัฒนาขึ้นพบว่าช่วงที่ตรวจจับกระแสไม่ได้จะหายไปดังแสดงในรูปที่ 2.29 และเมื่อใช้การมอดูเลตแบบ 2 กิ่งพบว่าไม่เกิดช่วงที่ตรวจจับกระแสไม่ได้แม้จะไม่ใช้วิธีการหากระแสเฟสที่พัฒนาขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.30 ซึ่งทั้งหมดมีความสอดคล้องกับการจำลองผลในรูปที่ 2.25 -2.27 ซึ่งเป็นการยืนยันว่าการวิเคราะห์และวิธีการแก้ไขปัญหานี้ที่นำเสนอมีความถูกต้อง

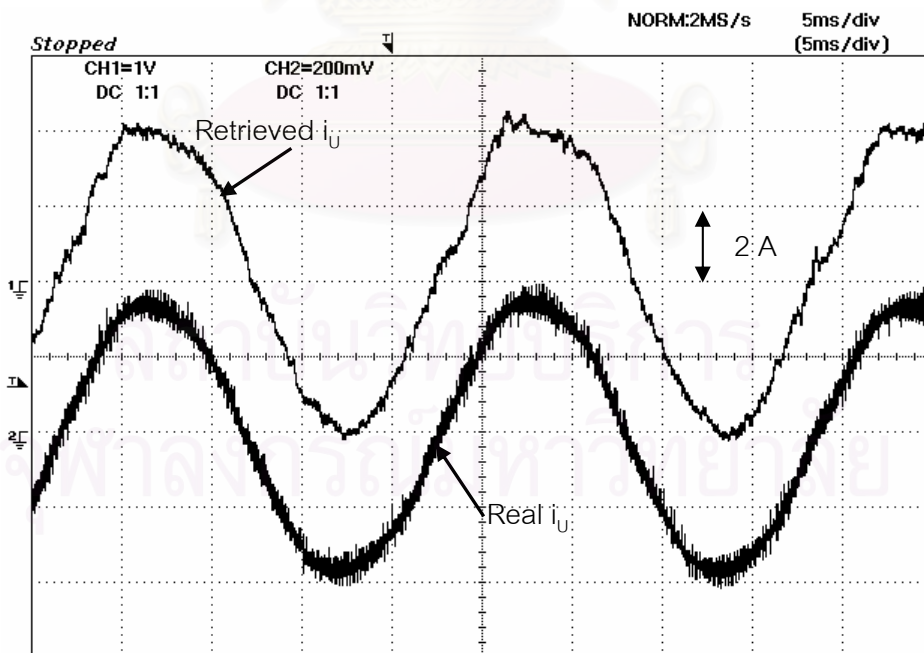
ในรูปที่ 2.31 แสดงการเปรียบเทียบสภาวะชั่วคราวของการสวิตช์ของกระแสตรวจจับเฟส U เทียบกับกระแสเฟส U จริงโดยทำการเปลี่ยนแปลงจากช่วงไร้ภาระไปยังมีภาระขณะที่ใช้วิธีการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ปกติที่ความถี่การสวิตช์ 5 kHz และใช้วิธีการหากระแสเฟสที่พัฒนาขึ้น พบว่ากระแสตรวจจับเฟส U สามารถติดตามกระแสเฟส U จริงได้อย่างถูกต้อง

เราได้ทำการทดลองที่ความถี่การสวิตช์ 10 kHz เพื่อยืนยันถึงความถูกต้องของทฤษฎีที่นำเสนอ โดยใช้พารามิเตอร์ในการทดลองดังนี้คือ $t_d = 3 \mu s$, $t_{dead} = 4.5 \mu s$ และแรงดันบัลไฟตรง (V_{dc}) = 560 V ทำการควบคุมแบบ v/f โดยสร้างแรงดันคำสั่งที่มีแรงดันเฟสค่ายอดเท่ากับ 265 V ความถี่ 42.6 Hz เวกเตอร์คำสั่งที่กำหนดนี้จะหมุนผ่านพื้นที่ปัญหาของการมอดูเลตแบบปกติ แต่จะไม่ผ่านพื้นที่ปัญหาเมื่อใช้การมอดูเลตแบบ 2 กิ่งเช่นกัน ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.32 – 2.34

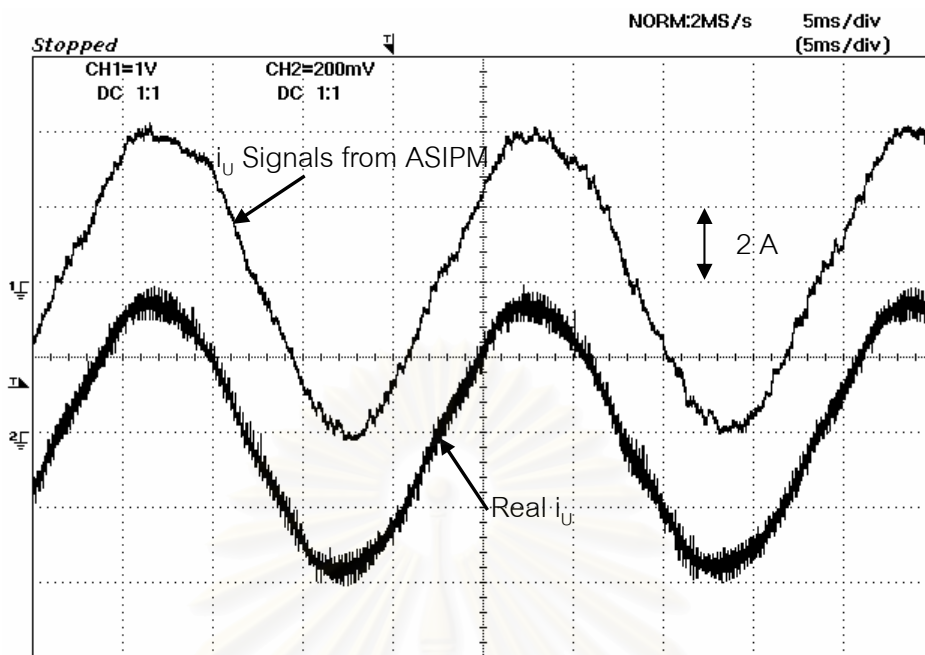
จากรูปที่ 2.32 – 2.34 เราสามารถอธิบายได้ในลักษณะเดียวกันกับรูปที่ 2.28 - 2.30 และในรูปที่ 2.35 ซึ่งทำการทดลองในลักษณะเดียวกับรูปที่ 2.27 เราจะพบว่ากระแสตรวจจับเฟส U สามารถติดตามกระแสเฟส U จริงได้อย่างถูกต้องเช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นการยืนยันถึงความถูกต้องของการวิเคราะห์และวิธีการแก้ไขปัญหานี้ที่นำเสนอ



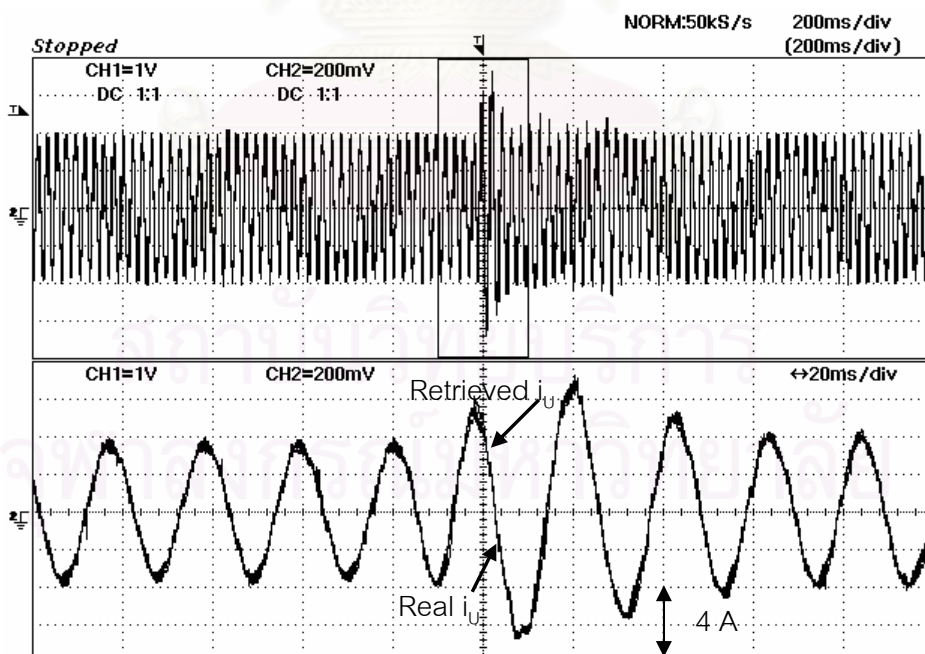
รูปที่ 2.28 กระแสตรวจจับเฟส i_U เทียบกับกระแสเฟส i_U จริงเมื่อใช้วิธีการมอดูเลตแบบสเตซเวกเตอร์ปกติที่ความถี่การสวิตซ์ 5 kHz และไม่ใช้วิธีการหากระแสเฟสที่พัฒนาขึ้น



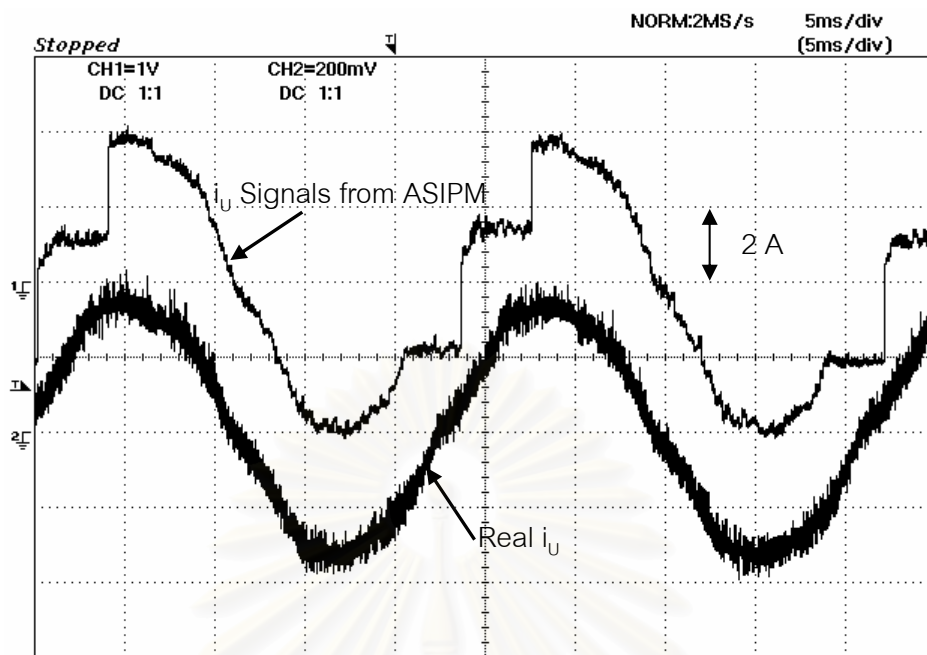
รูปที่ 2.29 กระแสตรวจจับเฟส i_U เทียบกับกระแสเฟส i_U จริงเมื่อใช้วิธีการมอดูเลตแบบสเตซเวกเตอร์ปกติที่ความถี่การสวิตซ์ 5 kHz และใช้วิธีการหากระแสเฟสที่พัฒนาขึ้น



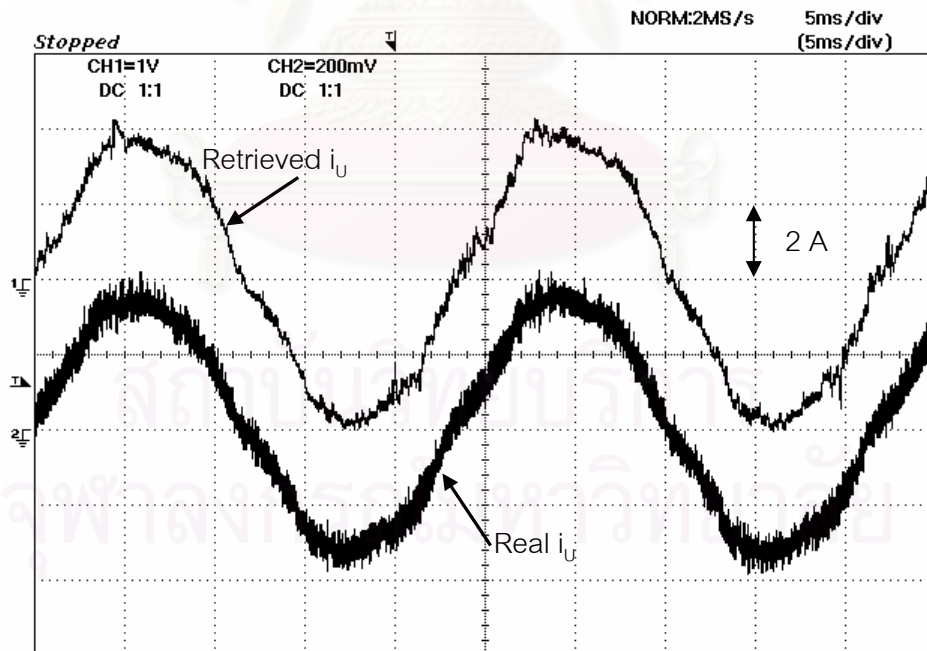
รูปที่ 2.30 กระแสตรวจจับเฟส U เทียบกับกระแสเฟส U จริงเมื่อใช้วิธีการมอดูเลตแบบ 2 กิ่ง ที่ความถี่การสวิตช์ 5 kHz และไม่ใช้วิธีการหากระแสเฟสที่พัฒนาขึ้น



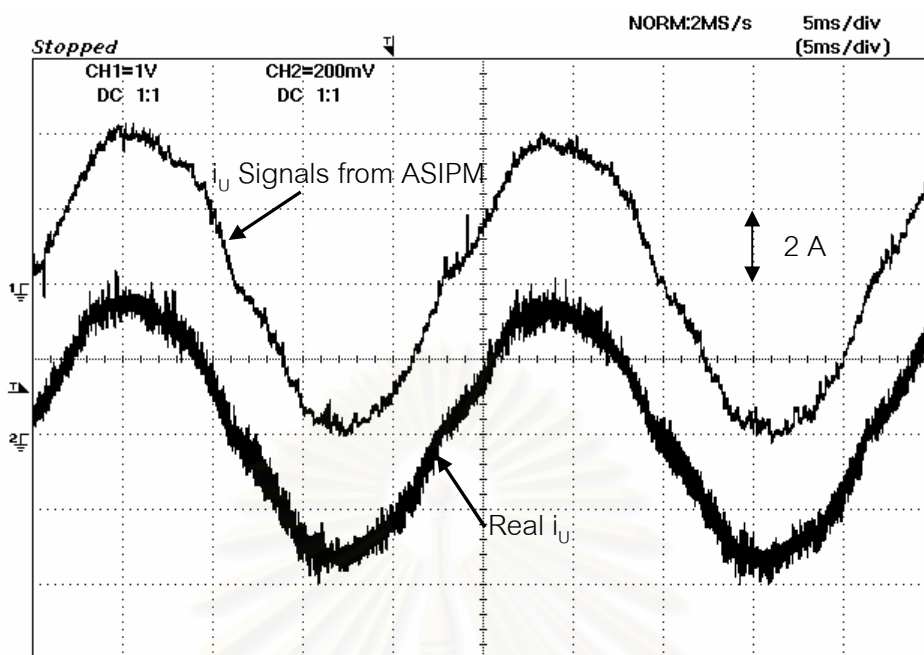
รูปที่ 2.31 สภาวะชั่วคราวของกระแสตรวจจับเฟส U เทียบกับกระแสเฟส U จริง ใช้วิธีการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ปกติที่ความถี่การสวิตช์ 5 kHz และการหากระแสเฟสที่พัฒนาขึ้น



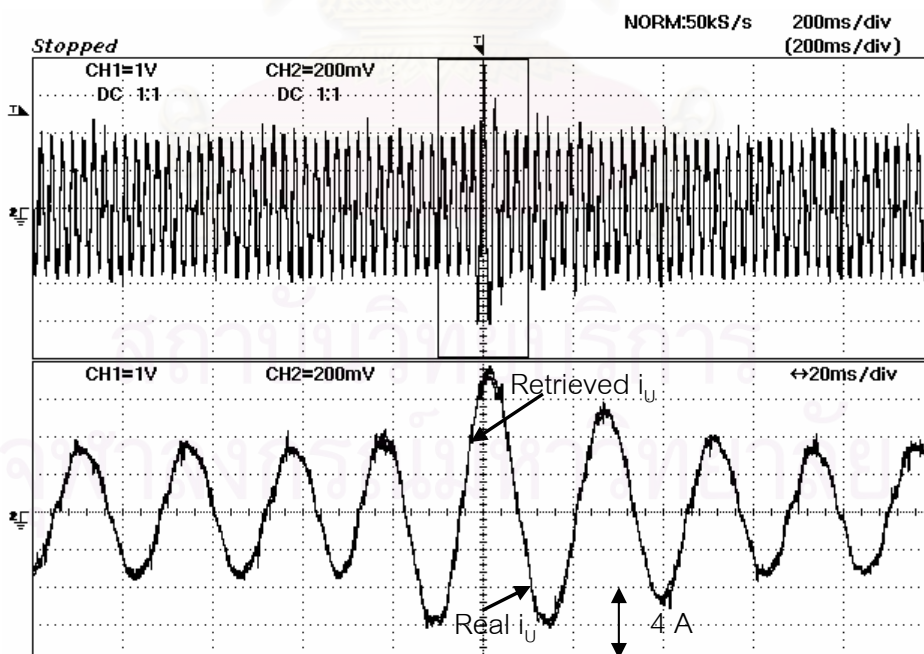
รูปที่ 2.32 กระแสตรวจจับเฟส i_U เทียบกับกระแสเฟส i_U จริงเมื่อใช้วิธีการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ปกติที่ความถี่การสวิตช์ 10 kHz และไม่ใช้วิธีการหากระแสเฟสที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 2.33 กระแสตรวจจับเฟส i_U เทียบกับกระแสเฟส i_U จริงเมื่อใช้วิธีการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ปกติที่ความถี่การสวิตช์ 10 kHz และใช้วิธีการหากระแสเฟสที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 2.34 กระแสตรวจจับเฟส i_U เทียบกับกระแสเฟส i_U จริงเมื่อใช้วิธีการมอดูเลตแบบ 2 กิ่ง ที่ความถี่การสวิตช์ 10 kHz และไม่ใช้วิธีการหากระแสเฟสที่พัฒนาขึ้น



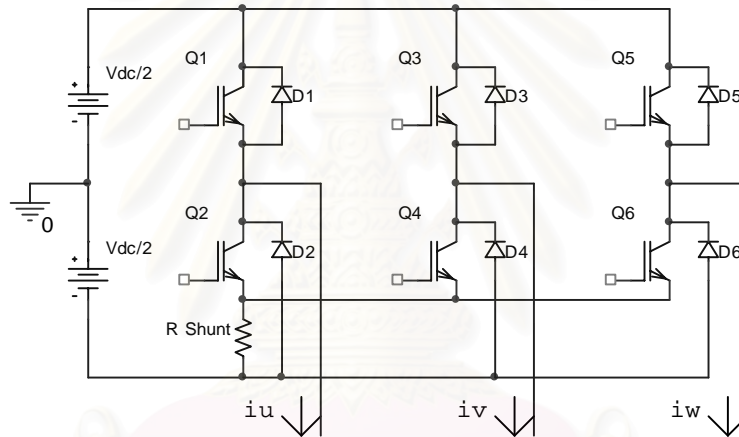
รูปที่ 2.35 สถานะชั่วครู่ของกระแสตรวจจับเฟส i_U เทียบกับกระแสเฟส i_U จริง ใช้วิธีการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ปกติที่ความถี่การสวิตช์ 10 kHz และการหากระแสเฟสที่พัฒนาขึ้น

บทที่ 3

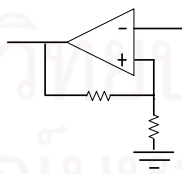
การตรวจจับกระแสของมอเตอร์โดยใช้สัญญาณกระแสของ ASIPM Version 3

3.1 โครงสร้างการตรวจจับกระแสของ ASIPM Version 3

โครงสร้างของ ASIPM Version 3 ในส่วนสวิตช์กำลังเป็นดังรูปที่ 3.1 กระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์ของสวิตช์ตัวกลางของทั้ง 3 เฟสจะรวมกันเป็นกระแสที่ไหลผ่านความต้านทานชันต์ สะท้อนเป็นค่าแรงดันออกของวงจรตรวจจับดังแสดงในรูปที่ 3.2 สัญญาณกระแสที่ตรวจจับได้จะมีค่าเป็นบวกเสมอ



รูปที่ 3.1 โครงสร้างและรูปแบบการตรวจจับกระแสของ ASIPM Version 3



รูปที่ 3.2 วงจรตรวจจับกระแสของ ASIPM Version 3

วงจรตรวจจับกระแสของ ASIPM Version 3 นี้จะแตกต่างจาก ASIPM Version 1, 2 ตรงที่ไม่มีวงจรสุ่มและคงค่ากระแส โดยจะให้ค่าสัญญาณกระแสต่อเนื่องเป็นแบบแอนาลอก และโดยทั่วไปค่า Envelope ของสัญญาณจะแสดงถึงค่ากระแสที่สูงสุดของกระแสทั้ง 3 เฟสในขณะนั้น ๆ

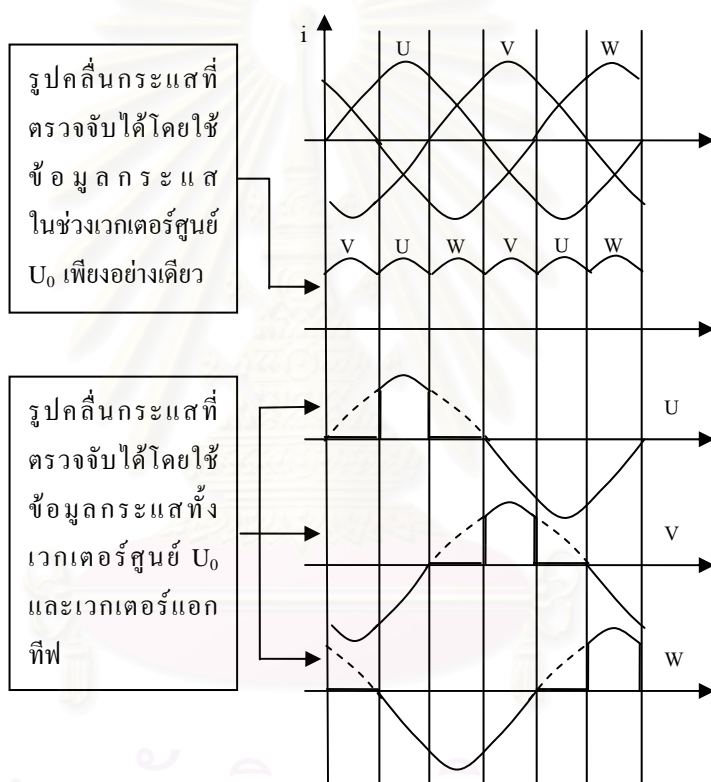
3.2 การวิเคราะห์ปัญหาในการตรวจจับกระแสของ ASIPM Version 3

จากการวิเคราะห์สัญญาณที่ได้จากการตรวจจับกระแสของ ASIPM รุ่นนี้ พบว่าสัญญาณที่ได้จะเป็นค่ากระแสเฟสใดขึ้นอยู่กับรูปแบบการสวิตช์และทิศทางการไหลของกระแสในขณะนั้น ดังสรุปในตารางที่ 3.1 โดยสามารถอธิบายได้ดังตัวอย่างต่อไปนี้ สมมติให้ $i_U > 0$, $i_V > 0$ และ $i_W < 0$ (หมายเหตุ เนื่องจาก $i_U + i_V + i_W = 0$ เสมอ ดังนั้นจะไม่มีกรณีที่ $i_U > 0$, $i_V > 0$, $i_W > 0$ หรือ $i_U < 0$, $i_V < 0$, $i_W < 0$) และสถานะของสวิตช์เป็น “100” เนื่องจากสวิตช์ตัวล่างของเฟส U อยู่ในสถานะ “OFF” กระแสเฟส U จึงไม่ไหลผ่านความต้านทานชั้นดีสำหรับเฟส V นั้นสวิตช์ตัวล่างอยู่ในสถานะ “ON” และเนื่องจากกระแส $i_V > 0$ กระแสเฟส V จึงไหลผ่านไดโอด D_4 และไม่ไหลผ่านความต้านทานชั้นดีเช่นกัน ส่วนเฟส W นั้นสวิตช์ตัวล่างอยู่ในสถานะ “ON” เช่นกัน และเนื่องจากกระแส $i_W < 0$ กระแสเฟส W จึงไหลผ่านทรานซิสเตอร์ Q_6 และความต้านทานชั้นดี เพราะฉะนั้นแรงดันออกของวงจรตรวจจับ v_o จะมีค่าเป็น $v_o = -i_W (> 0)$ หากสถานะการสวิตช์เปลี่ยนเป็น “101” กระแสเฟส W ก็จะไม่ไหลผ่านไดโอด D_5 ของสวิตช์ตัวบนแทน ซึ่งจะทำให้ไม่มีกระแสเฟสใดไหลผ่านความต้านทานชั้นดีเลย ดังนั้น $v_o = 0$ สำหรับกรณีอื่นๆ ในตารางก็สามารถพิจารณาได้ในทำนองเดียวกัน

ตารางที่ 3.1 กระแสที่ตรวจจับได้ของ ASIPM Version 3

$ i _{\max}$	ทิศทางกระแส			สถานะการสวิตช์							
	i_U	i_V	i_W	100	110	010	011	001	101	000	111
$-i_V$	+	-	+	$-i_V$	0	0	0	$-i_V$	$-i_V$	$-i_V$	0
$+i_U$	+	-	-	$+i_U$	$-i_W$	$-i_W$	0	$-i_V$	$-i_V$	$+i_U$	0
$-i_W$	+	+	-	$-i_W$	$-i_W$	$-i_W$	0	0	0	$-i_W$	0
$+i_V$	-	+	-	$-i_W$	$-i_W$	$+i_V$	$-i_U$	$-i_U$	0	$+i_V$	0
$-i_U$	-	+	+	0	0	$-i_U$	$-i_U$	$-i_U$	0	$-i_U$	0
$+i_W$	-	-	+	$-i_V$	0	$-i_U$	$-i_U$	$+i_W$	$-i_V$	$+i_W$	0

จากตารางที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าในช่วงการใช้เวกเตอร์ศูนย์ $U_0(000)$ จะตรวจจับกระแสได้เสมอ และสังเกตได้ว่ากระแสที่ตรวจจับได้ในเวลาที่ใช้ U_0 เป็นค่าสูงสุดของค่าสัมบูรณ์ของกระแสทั้ง 3 เฟสในขณะนั้น ๆ ส่วนช่วงเวลาที่ใช้เวกเตอร์เอกที่พื้นในบางกรณีก็อาจไม่ให้ข้อมูลกระแสเลย และถึงแม้จะให้ข้อมูลกระแสได้แต่ข้อมูลที่ได้ก็อาจเป็นข้อมูลกระแสเฟสเดียวกันกับที่ได้ในช่วงเวลาที่ใช้ U_0 ซึ่งจะทำให้เราได้ข้อมูลกระแสโดยรวมใน 1 คาบการสวิตช์เพียงเฟสเดียว (ดูแถวที่ 1, 3, 5 ของตารางที่ 3) และจากตารางที่ 3.1 เราสามารถคำนวณค่านกระแสเฟส U, V, W ได้ดังแสดงในรูปที่ 3.3 จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นกระแสแต่ละเฟสจะไม่สมบูรณ์เพราะมีช่วงเวลาที่ตรวจจับกระแสได้เพียงเฟสเดียว

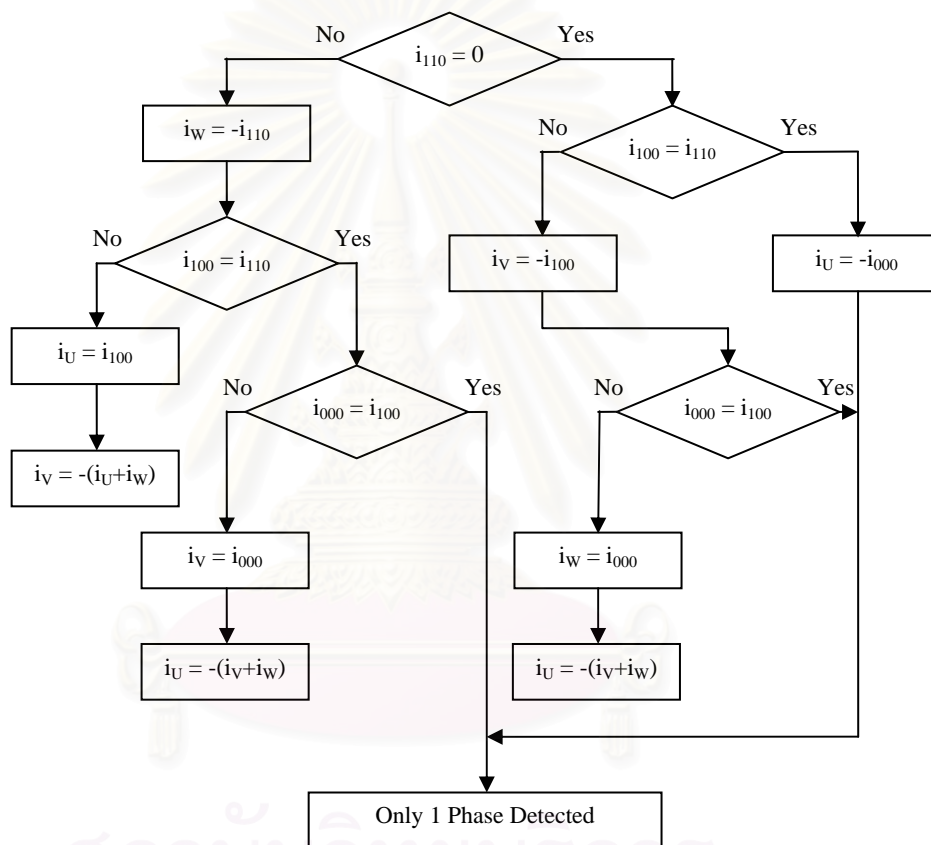


รูปที่ 3.3 รูปคลื่นกระแสที่ตรวจจับได้เมื่อใช้เวกเตอร์แบบต่าง ๆ

3.3 แนวทางแก้ไขปัญหาในการตรวจจับกระแสของ ASIPM Version 3

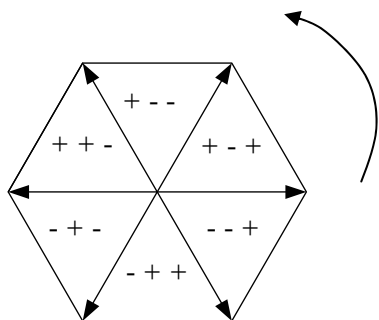
อัลกอริทึมในการหาค่ากระแสเฟสจากสัญญาณกระแสที่ตรวจจับได้ สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้ จากสถานะการสวิตช์ของเวกเตอร์แรงดันที่ใช้ใน 1 คาบการสวิตช์ เราสามารถทราบได้ว่าสัญญาณกระแสที่ตรวจจับเข้ามาในขณะนั้นเป็นกระแสเฟสใดเช่น ในกรณีที่เวกเตอร์แรงดันคำสั่งอยู่ในเซกเตอร์ที่ 1 เวกเตอร์หลักที่ใช้ในการสวิตช์จะประกอบด้วย $U_0(000)$, $U_1(100)$

และ $U_2(110)$ (เราจะไม่ใช่เวกเตอร์ $U_7(111)$ เนื่องจากไม่ให้ข้อมูลของกระแสเฟสใด ๆ) และ ขั้นตอนการหาค่ากระแสเฟสสามารถอธิบายได้ด้วยแผนภาพในรูปที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าสถานะการสวิตช์ในแต่ละเฟสของเวกเตอร์ที่มี ค่าเป็น “0” เป็นเสมือนหน้าต่างที่ส่งผ่านค่ากระแสในแต่ละเฟสผ่านไปยังความต้านทานขั้ว โดยเริ่มจากเวกเตอร์แรกที่ $U_2(110)$ ที่มี “0” เพียงค่าเดียวก่อนไปยังเวกเตอร์แรกที่ $U_1(100)$ ที่มี “0” 2 ค่าและ $U_0(000)$ ที่มี “0” 3 ค่าตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามจากแผนภาพในรูปที่ 3.4 จะมีการที่เรารอตรวจจับกระแสได้เพียงเฟสเดียวเกิดขึ้น ซึ่งไม่ว่าจะใช้วิธีการใดก็ไม่สามารถจะหาค่าจริงของกระแสในเฟสที่เหลืออีก 2 เฟสได้

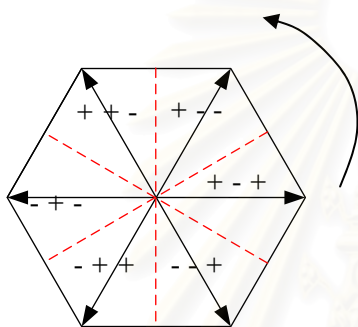


รูปที่ 3.4 การคำนวณค่ากระแสเฟสของ ASIPM Version 3 เมื่อเวกเตอร์คำสั่งอยู่ในเซกเตอร์ที่ 1

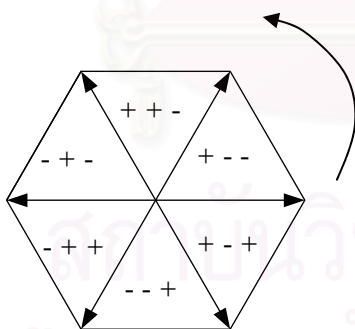
เราสามารถหาค่ากระแสที่ตรวจจับได้ในช่วงเวลาที่ใช้เวกเตอร์แรงดันต่าง ๆ ได้ โดยรูปร่างกระแสที่ตรวจจับได้ในช่วงเวลาที่ใช้เวกเตอร์แรงดันจะขึ้นอยู่กับตัวประกอบกำลังซึ่งแปรตามขนาดภาระของมอเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.5



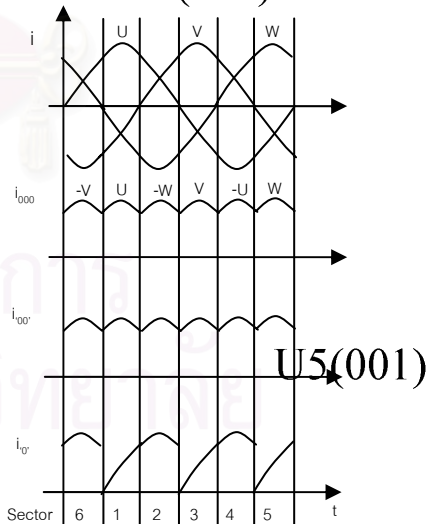
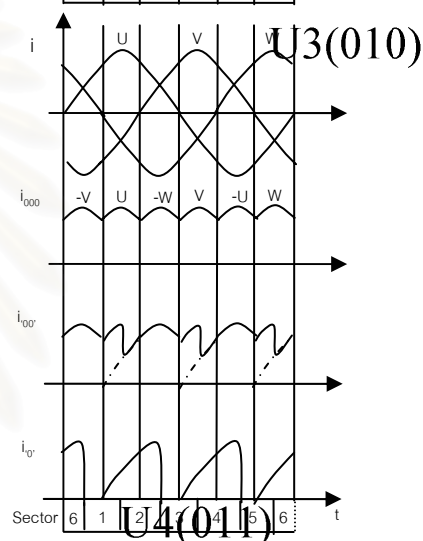
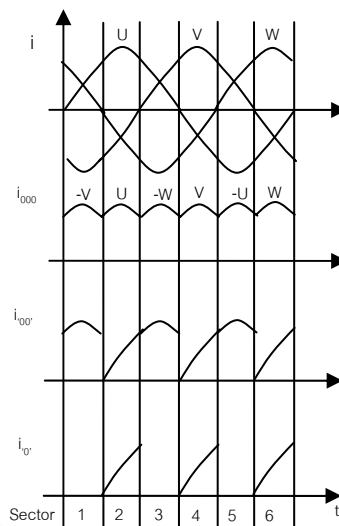
ก. ไม่มีภาระ (PF \cong 0)



ข. มีภาระและ PF = 0.866 lag



ค. มีภาระและ PF = 0.5 lag



เครื่องหมาย +- แสดงทิศทางของกระแสในเฟส U, V และ W ตามลำดับ

i_{0v} : ค่ากระแสที่สุ่มได้ในช่วงเวลาที่ใช้เวกเตอร์แรงดัน $U_2(110)$ หรือ $U_4(011)$ หรือ $U_6(101)$

i_{00v} : ค่ากระแสที่สุ่มได้ในช่วงเวลาที่ใช้เวกเตอร์แรงดัน $U_1(100)$ หรือ $U_3(010)$ หรือ $U_5(001)$

i_{000} : ค่ากระแสที่สุ่มได้ในช่วงเวลาที่ใช้เวกเตอร์แรงดัน $U_0(000)$

รูปที่ 3.5 กระแสของช่วงเวลาการใช้เวกเตอร์ต่าง ๆ เมื่อมอเตอร์ทำงาน
ที่ค่าตัวประกอบกำลังต่างกัน

รูปหกเหลี่ยมทางซ้ายมือในรูปที่ 3.5 แสดงถึงความสัมพันธ์ของทิศทางหรือเครื่องหมายของกระแส 3 เฟสกับเซกเตอร์ของแรงดันคำสั่ง ณ ค่าตัวประกอบกำลังต่าง ๆ ส่วนทางด้านขวามือสัญลักษณ์ i_{000} , i_{100} และ i_{200} แทนกระแสที่ตรวจจับได้เมื่อใช้เวกเตอร์ $U_0(000)$, กระแสที่ตรวจจับได้ในช่วงเวลาที่ใช้เวกเตอร์ที่มีการขับนำสวิตช์ตัวล่าง 2 เฟส (เช่นเวกเตอร์ $U_1(100)$ ในเซกเตอร์ที่ 1) และกระแสที่ตรวจจับได้เมื่อใช้เวกเตอร์ที่มีการขับนำสวิตช์ตัวล่างเพียง 1 เฟส (เช่นเวกเตอร์ $U_2(110)$ ในเซกเตอร์ที่ 1) ตามลำดับ เราสามารถทราบรูปร่างกระแสที่ตรวจจับได้ในแต่ละช่วงเวลากการใช้เวกเตอร์ซึ่งแสดงทางด้านขวามือในรูปที่ 3.5 ได้ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีที่มีกระแส 3 เฟสมีทิศทาง + - + (กระแสเฟส U และ เฟส W มีทิศทางเป็นบวก ส่วนกระแสเฟส V มีทิศทางเป็นลบ) และอยู่ในเซกเตอร์ที่ 1 ซึ่งประกอบไปด้วยเวกเตอร์ $U_0(000)$, $U_1(100)$ และ $U_2(110)$ เราจะทราบว่าตลอดช่วงที่กระแสมีทิศทาง + - + และอยู่ในเซกเตอร์ที่ 1 นี้ $i_{110} = 0$, $i_{100} = -i_v$ และ $i_{000} = -i_v$ ในกรณีของทิศทางกระแสและเซกเตอร์อื่น ๆ ก็พิจารณาได้ในลักษณะเดียวกัน และจะได้รูปร่างกระแสที่ตรวจจับได้ในช่วงเวลาที่ใช้เวกเตอร์ต่าง ๆ ดังแสดงทางด้านขวามือในรูปที่ 3.5 ซึ่งจะพบว่า ถึงแม้รูปร่างของกระแสที่ตรวจจับได้ในช่วงเวลาที่ใช้เวกเตอร์ต่าง ๆ จะมีความแตกต่างกันแต่ผลลัพธ์ของรูปคลื่นกระแสเฟสที่คำนวณคืนได้จะสอดคล้องกับในรูปที่ 3.3 เสมอ

ในช่วงที่ตรวจจับกระแสได้เพียงเฟสเดียวในรูปที่ 3.3 เราจะเสนอวิธีการประมาณค่ากระแส 2 เฟสที่เหลือ โดยอาศัยสมมติฐานที่ว่าในช่วงเวลาสั้น ๆ ที่เรากำลังพิจารณานั้น กระแส 3 เฟสเป็นรูปคลื่นไซน์ที่สมดุล ซึ่งจะทำให้สามารถประมาณค่ากระแสได้โดยใช้วงจรกรอง FIR ในสมการที่ (3.1) ช่วยในการเลื่อนเฟสดังนี้ [7]

$$y(n) = a_0 x(n) - a_1 x(n-1)$$

$$a_0 = \cos \gamma + \frac{\sin \gamma}{\tan \omega_0 T}$$

$$a_1 = \frac{\sin \gamma}{\sin \omega_0 T}$$
(3.1)

โดยที่ $y(n)$ คือ สัญญาณออกที่ทำมุม γ กับ $x(n)$

$x(n)$ คือ สัญญาณกระแสที่ตรวจจับได้ ณ เวลา nT

ω_0 คือ ความถี่หลักมูลของสัญญาณเข้า

T คือ คาบการสวิตช์

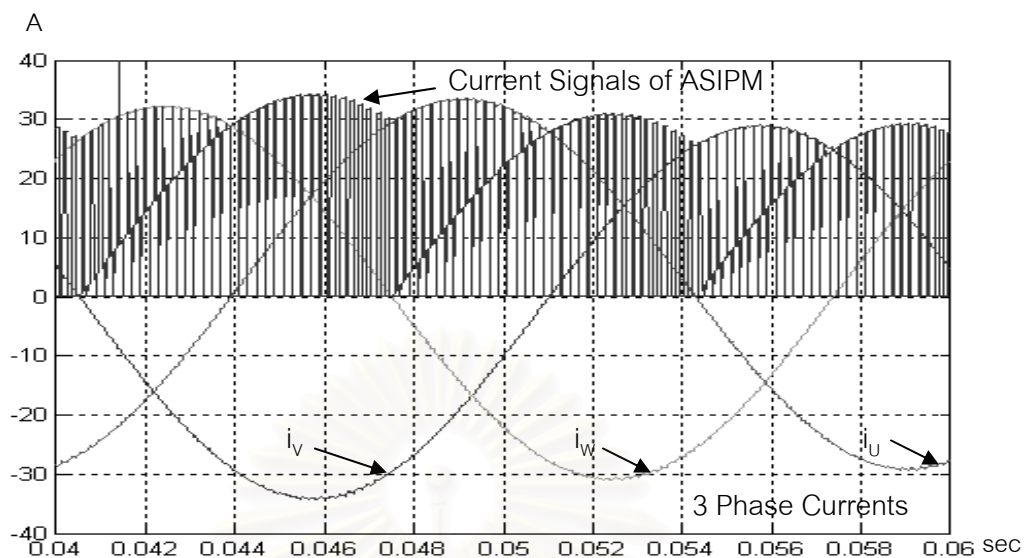
ในที่นี้ γ ที่เลือกใช้คือ 120° ซึ่งค่าสัญญาณกระแสที่ได้จากวงจรจริงจึงเป็นค่ากระแสเฟสที่นำหน้าสัญญาณกระแสด้านเข้าอยู่ 120° แต่จะเป็นกระแสเฟสใดนั้นขึ้นอยู่กับว่าในช่วงที่ตรวจจับกระแสได้ไม่ครบ 3 เฟสนี้เราตรวจจับได้กระแสเฟสใด ซึ่งสามารถทราบได้จากการตรวจสอบตามแผนภาพที่ได้กล่าวมาแล้ว และกระแสอีกเฟสที่เหลือเราสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของผลรวมกระแสเท่ากับศูนย์

3.4 ผลจำลองการทำงานการตรวจจับกระแสของ ASIPM Version 3

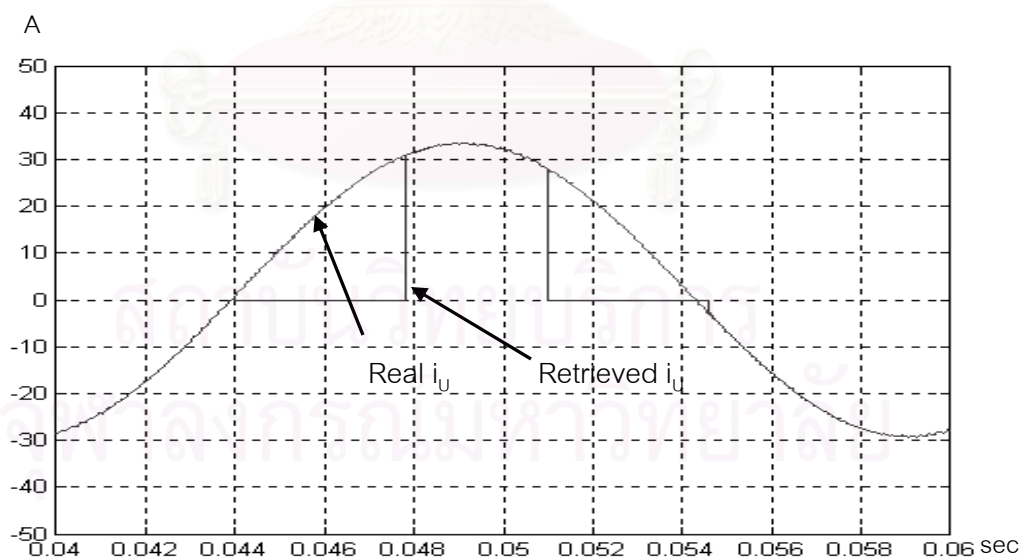
เราจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้คือ ความถี่การสวิตช์ (f_{pwm}) = 5 kHz, แรงดันบัสไฟตรง (V_{dc}) = 540 V แรงดันเฟสคำสั่งเป็นรูปคลื่นไซน์ที่มีค่ายอดเป็น 220 V ความถี่ 50 Hz ได้ผลจำลองการทำงานเป็นดังรูปที่ 3.6 – 3.8

จากรูปที่ 3.6 จะเห็นได้ว่าสัญญาณกระแสที่ได้จากวงจรตรวจจับของ ASIPM Version 3 จะเป็นรูปคลื่นผสมระหว่างกระแสเฟสต่าง ๆ โดยเส้น Envelope จะแสดงถึงค่าสูงสุดของค่าสัมบูรณ์ของกระแส 3 เฟสในขณะนั้น ๆ และเมื่อใช้หลักการคำนวณหาค่ากระแสเฟสที่นำเสนอในแผนภาพในรูปที่ 3.4 เราจะสามารถคำนวณหาค่ากระแสในเฟสหนึ่ง ๆ ได้ถูกต้องเป็นช่วงประมาณ 240° เท่านั้นดังแสดงในรูปที่ 3.7 ส่วนรูปที่ 3.8 นั้นเป็นผลการจำลองเมื่อใช้หลักการประมาณค่ากระแสด้วยการเลื่อนเฟสด้วยวงจรกรองแบบ FIR ร่วมด้วยจะเห็นได้ว่าในช่วงที่ตรวจจับกระแสได้เพียงเฟสเดียว (ซึ่งไม่ใช่เฟส U) เรายังสามารถประมาณค่ากระแสกลับคืนมาได้อย่างถูกต้อง

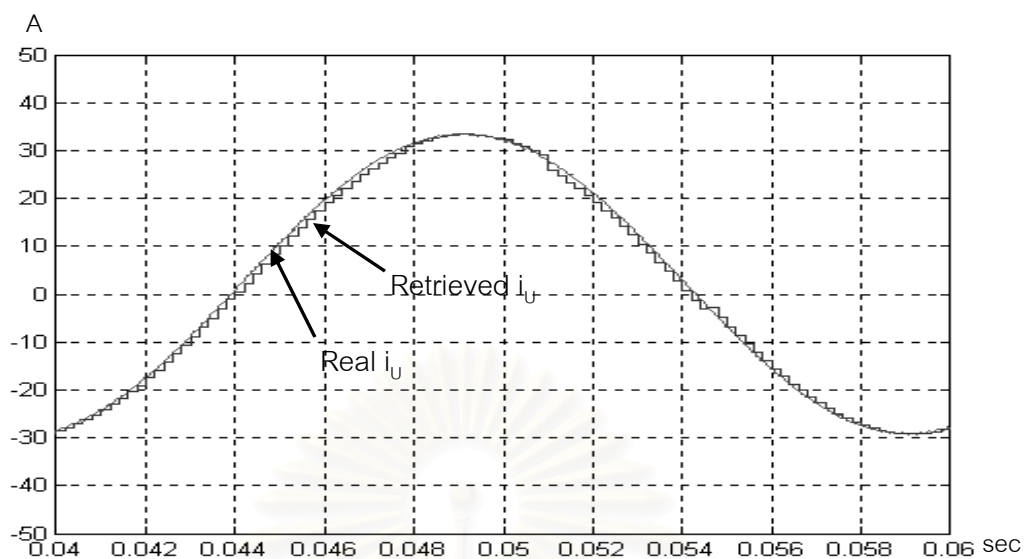
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.6 รูปคลื่นสัญญาณกระแสที่ได้จากวงจรตรวจจับของ ASIPM Version 3
เทียบกับกระแส 3 เฟสของมอเตอร์



รูปที่ 3.7 รูปกระแสเฟส U เมื่อใช้วิธีคำนวณคืนค่าตามแผนภาพรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.8 รูปกระแสเฟส U เมื่อใช้วิธีคำนวณคืนค่าตามแผนภาพรูปที่ 3.4 พร้อมกับ
การประมาณค่ากระแสด้วยวงจรถ่วงเฟส

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

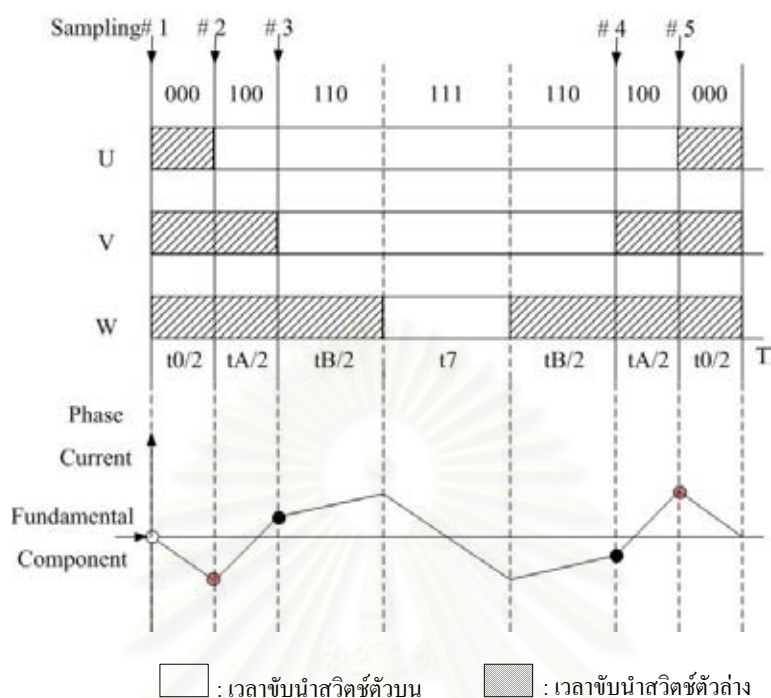
3.5 วิธีการสุ่มค่าและปัญหาในการตรวจจับกระแสเนื่องจากความไม่เป็นอุดมคติของวงจรสุ่มค่า

ข้อมูลกระแสในแต่ละช่วงเวลาการใช้เวกเตอร์แรงดันที่จะนำไปคำนวณค่านกระแสเฟสในอัลกอริทึมที่นำเสนอในแผนภาพในรูปที่ 3.4 ได้มาจากการสุ่มค่าสัญญาณกระแสตรวจจับของ ASIPM ในจังหวะและเวลาที่ถูกต้องในทุกคาบการสวิตช์ วิธีการสุ่มค่ากระแสในช่วงเวลาการใช้เวกเตอร์ทั้ง 3 ค่าในแต่ละคาบการสวิตช์เพื่อใช้ในอัลกอริทึมที่นำเสนอแสดงในรูปที่ 3.9 เมื่อเวกเตอร์คำสั่งอยู่ในเซกเตอร์ที่ 1 และสัญญาณขับนำสวิตช์เป็นแบบอุดมคติไม่มีเวลาประวิง (deadtime)



รูปที่ 3.9 ตำแหน่งในการสุ่มค่ากระแสเมื่อเวกเตอร์คำสั่งอยู่ในเซกเตอร์ที่ 1 และสัญญาณขับนำสวิตช์เมื่อไม่มีเวลาประวิงใน 1 คาบการสวิตช์

การสุ่มค่าครั้งที่ 1 ในรูปที่ 3.9 เราจะได้กระแสของช่วงเวลาที่ใช้เวกเตอร์ $U_0(000)$ การสุ่มค่าครั้งที่ 2 และครั้งที่ 5 ในรูปที่ 3.9 เราจะได้กระแสของช่วงเวลาที่ใช้เวกเตอร์ $U_1(100)$ และการสุ่มค่าครั้งที่ 3 และครั้งที่ 4 เราจะได้กระแสของช่วงเวลาที่ใช้เวกเตอร์ $U_2(110)$ โดยข้อมูลกระแสที่เรานำไปใช้ในการคำนวณจะได้จากการสุ่มค่าครั้งที่ 1, ค่าเฉลี่ยของสัญญาณสุ่มครั้งที่ 2 และครั้งที่ 5 และค่าเฉลี่ยของสัญญาณสุ่มครั้งที่ 3 และครั้งที่ 4 สาเหตุที่เราต้องทำการสุ่มค่าทั้งหมด 5 ครั้งและทำการเฉลี่ยค่าในครั้งที่ 2 และครั้งที่ 5, ครั้งที่ 3 และครั้งที่ 4 ก็เพื่อกำจัดค่าระลอก (Ripple) ของกระแสอันเนื่องมาจากการสวิตช์ [6] ดังแสดงเป็นตัวอย่างในรูปที่ 3.10 ซึ่งแสดงค่าระลอกของกระแสเฟสหนึ่ง ๆ เมื่อทำการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์เมื่อเวกเตอร์คำสั่งอยู่ในเซกเตอร์ที่ 1



รูปที่ 3.10 ค่าระลอกของกระแสของกระแสเฟสหนึ่ง ๆ เมื่อทำการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ เมื่อเวกเตอร์คำสั่งอยู่ในเซกเตอร์ที่ 1

จากรูปจะพบว่าในการสุ่มค่าครั้งที่ 2 และครั้งที่ 3 เราจะสุ่มได้ค่าระลอกปะปนมากับองค์ประกอบหลักมูล เพื่อที่จะกำจัดค่าระลอกออกจากสัญญาณที่สุ่มได้เราจึงจำเป็นต้องใช้ค่าที่สุ่มได้ในครั้งที่ 5 และครั้งที่ 4 ซึ่งจะได้ค่าองค์ประกอบหลักมูลที่ปะปนด้วยค่าระลอกที่มีเครื่องหมายตรงข้าม ดังนั้นเมื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยร่วมกับค่าสัญญาณที่สุ่มได้ในครั้งที่ 2 และ 3 ก็จะได้ผลลัพธ์เฉพาะองค์ประกอบหลักมูล ถ้าเราใช้เฉพาะค่ากระแสจากการสุ่มค่าในครั้งที่ 1, ครั้งที่ 2 และครั้งที่ 3 มาทำการคำนวณค่านกระแสเฟสจะทำให้สัญญาณกระแสเฟสที่ได้ผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณมูลฐานของกระแสจริง ซึ่งจะผิดเพี้ยนมากน้อยนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณของค่าระลอก

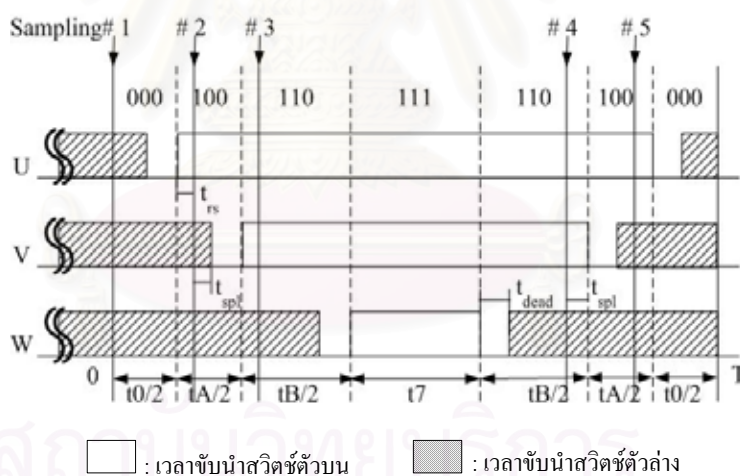
การสุ่มค่าเพื่อให้ได้ค่ากระแสของเวกเตอร์ที่ถูกต้องในการใช้งานจริงนั้นเราต้องพิจารณาผลของสภาวะชั่วคราวของการสวิตช์, เวลาประวิงและยังต้องคำนึงถึงช่วงเวลาที่ต้องใช้เพื่อสุ่มและคงค่า (Sampling and Hold Time : t_{sp}) ของวงจรสุ่มในส่วนของการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตัล (Analog to Digital Converter : A/D) ด้วย โดยในที่นี้จะพิจารณาผลของเวลาประวิงที่มีรูปแบบการสร้างดังรูปที่ 2.19 ซึ่งเป็นรูปแบบที่ใช้ในการทดลอง เราจะได้เงื่อนไขข้อจำกัดในการสุ่มค่ากระแสดังต่อไปนี้ เงื่อนไขข้อจำกัดในการสุ่มค่ากระแสที่ตำแหน่งเวกเตอร์ศูนย์ U_0

(000) คือ ครึ่งหนึ่งของช่วงเวลาการใช้เวกเตอร์ $U_0(t_0/2)$ จะต้องมามีค่ามากกว่า t_{spl} รวมกับ t_{dead} และเงื่อนไขข้อจำกัดในการสุ่มค่ากระแสที่ตำแหน่งเวกเตอร์แอกทีฟ $U_1 - U_0$ คือ ครึ่งหนึ่งของช่วงเวลาขับนำเวกเตอร์แอกทีฟ ($t_A/2$ และ $t_B/2$) จะต้องมากกว่าช่วงเวลาดำเนินการขึ้นของสวิตช์ (Risettime : t_{rs}) รวมกับ t_{spl} รวมกับ t_{dead} ดังแสดงในรูปที่ 3.11 และสรุปเขียนเป็นอสมการได้ดังนี้

$$\frac{t_0}{2} > t_{spl} + t_{dead} \quad (3.2)$$

$$\frac{t_A}{2}, \frac{t_B}{2} > t_{rs} + t_{spl} + t_{dead}$$

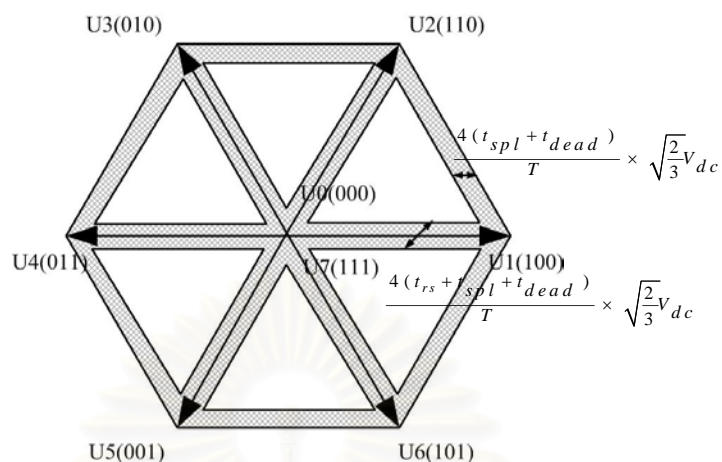
จังหวะการสุ่มค่าครั้งที่ 1 เป็นช่วงการใช้เวกเตอร์ U_0 ต่อเนื่องจากคาบการสวิตช์ก่อนหน้า จึงไม่มีการเปลี่ยนสถานะของสวิตช์ทั้ง 3 เฟสจึงไม่ต้องพิจารณาผลของช่วงเวลาดำเนินการขึ้น (t_{rs}) ในการสุ่มค่าครั้งที่ 2, ครั้งที่ 3, ครั้งที่ 4 และครั้งที่ 5 เป็นจังหวะการเปลี่ยนแปลงสถานะของสวิตช์พอดีจึงมีความจำเป็นต้องห้วงเวลาการสุ่มค่าให้ผ่านพ้นสถานะชั่วคราวของการสวิตช์



รูปที่ 3.11 ช่วงเวลาที่จำเป็นในการสุ่มค่ากระแสที่ตำแหน่งเวกเตอร์ศูนย์และเวกเตอร์แอกทีฟในกรณีที่มีเวลาประวิง

จากผลการวิเคราะห์ข้างต้น พบว่าจะเกิดช่วงที่ตรวจจับกระแสไม่ได้ถ้าช่วงเวลาขับนำของเวกเตอร์แอกทีฟหรือเวกเตอร์ศูนย์น้อยเกินไปกว่าช่วงเวลาที่จำเป็นในการสุ่มค่ากระแส เราสามารถเขียนพื้นที่ปัญหาในการตรวจจับกระแสของ ASIPM บนพื้นที่หกเหลี่ยมของการสร้างแรงดันของอินเวอร์เตอร์ได้ดังรูปที่ 3.12 ในบริเวณพื้นที่ปัญหานี้เราไม่สามารถใช้อัลกอริทึมที่นำเสนอมาคำนวณกระแส

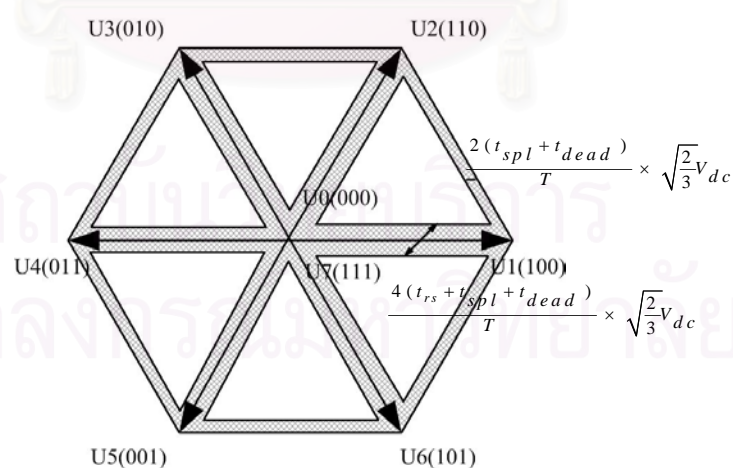
เฟสได้เนื่องจากอัลกอริทึมดังกล่าวจำเป็นที่จะต้องทราบข้อมูลกระแสที่ถูกต้องในทุกช่วงเวลาการใช้เวกเตอร์แต่ละตัว



รูปที่ 3.12 พื้นที่ปัญหาในการตรวจจับกระแสของ ASIPM Version 3

3.5 แนวทางแก้ไขปัญหาลำบากในการตรวจจับกระแสของ ASIPM Version 3

เราสามารถลดพื้นที่ปัญหาในการตรวจจับกระแสในรูปที่ 3.12 ได้โดยใช้การมอดูเลตแบบ 2 กิ่ง (2 Arms(min) Modulation) ซึ่งเป็นการมอดูเลตที่ใช้เวกเตอร์ศูนย์เป็น $U_0(000)$ ตลอด (ไม่ใช่ $U_7(111)$) ซึ่งสามารถลดพื้นที่ปัญหาได้ประมาณ 1/4 เท่าของพื้นที่ปัญหาเดิมดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 พื้นที่ปัญหาในการตรวจจับกระแสของ ASIPM Version 3

เมื่อใช้การมอดูเลตแบบ 2 กิ่ง

จากรูปที่ 3.13 จะพบว่าการมอดูเลตแบบ 2 ก็จะช่วยให้เราสามารถตรวจจับกระแสในช่วงที่เวกเตอร์คำสั่งมีค่ามาก (ช่วงที่ใช้เวกเตอร์ศูนย์น้อย) ได้ดีขึ้น สำหรับพื้นที่ปัญหาที่เหลืออยู่นั้นเมื่อเราพิจารณาตามรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของเวกเตอร์คำสั่งซึ่งจะหมุนทวนเข็มนาฬิกา เราจะพบว่าพื้นที่ปัญหาดังกล่าวแบ่งออกเป็น 6 ช่วงเล็ก ๆ เมื่อเทียบกับขนาดของแต่ละเซกเตอร์ของพื้นที่หกเหลี่ยม เมื่อเวกเตอร์คำสั่งเริ่มผ่านพื้นที่นี้เราอาจใช้ข้อมูลกระแส 3 เฟสที่คำนวณไว้ในคาบการสวิตช์ก่อนหน้ามาประมาณกระแส 3 เฟสในคาบการสวิตช์ปัจจุบันได้โดยอาศัยสมมติฐานเดิมคือกระแส 3 เฟสเป็นรูปคลื่นไซน์สมมูล เราจะทำการแปลงกระแส 3 เฟสในคาบการสวิตช์ก่อนหน้าเป็นสเปซเวกเตอร์และทำการหมุนเวกเตอร์กระแสที่ได้ทวนเข็มนาฬิกาเป็นมุม $\omega_0 T$ rad ซึ่งจะทำให้ได้เวกเตอร์ของกระแสในคาบการสวิตช์ปัจจุบัน จากนั้นแปลงกลับเป็นกระแส 3 เฟสตามเดิม ดังแสดงในสมการที่ (3.3)

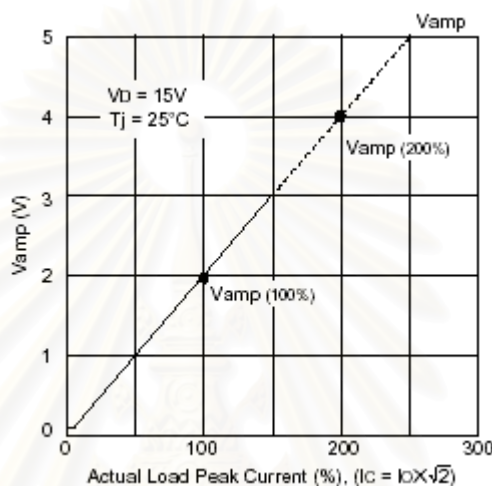
$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} i_x(n-1) \\ i_y(n-1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_U(n-1) \\ i_V(n-1) \\ i_W(n-1) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} i_x(n) \\ i_y(n) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos(\omega_0 T) & -\sin(\omega_0 T) \\ \sin(\omega_0 T) & \cos(\omega_0 T) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_x(n-1) \\ i_y(n-1) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} i_U(n) \\ i_V(n) \\ i_W(n) \end{bmatrix} &= \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_x(n) \\ i_y(n) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.3)$$

เราจะใช้การประมาณค่ากระแส 3 เฟสนี้จนกระทั่งเวกเตอร์คำสั่งผ่านบริเวณพื้นที่ปัญหาไป จากนั้นเราจะใช้อัลกอริทึมในการคำนวณค่ากระแสเฟสตามเดิม

3.6 การประยุกต์อัลกอริทึมเพื่อใช้ในการคำนวณค่าน่ากระแสเฟสในอุปกรณ์จริง

ตัวอย่างอัลกอริทึมในการคำนวณค่าน่ากระแสเฟสเมื่อเวกเตอร์คำสั่งอยู่ในเซกเตอร์ที่ 1 เป็นดังรูปที่ 3.4 เราจะพัฒนาโปรแกรมตามอัลกอริทึมดังกล่าว แต่มีส่วนที่ต้องปรับเปลี่ยนบ้างเนื่องจากในการใช้งานจริงสัญญาณกระแสของ ASIPM จะมีออฟเซต (offset) อยู่ค่าหนึ่งเนื่องจาก ASIPM Version 3 ใช้เพียงแหล่งจ่าย +15 V บ่อนให้กับวงจรรขยายของวงจรตรวจจับกระแส ดังนั้นสัญญาณแรงดันออกของวงจรจึงไม่สามารถลดลงเป็นศูนย์ได้เหมือนวงจร

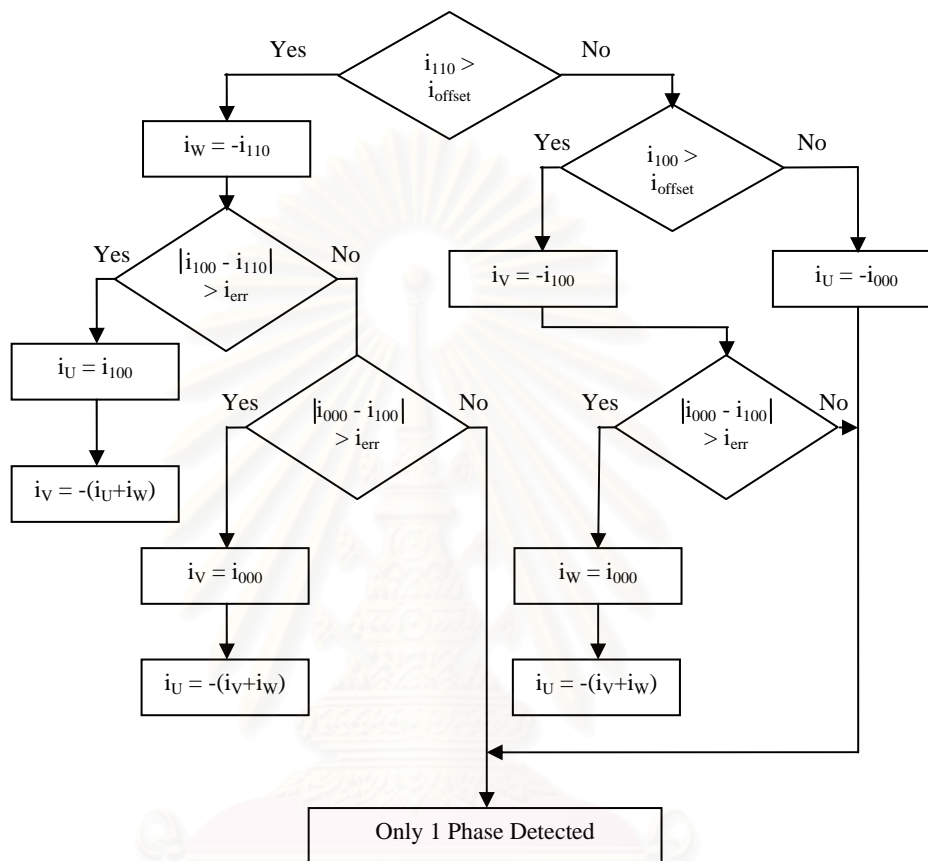
ออปแอมป์ที่มีแหล่งจ่าย $\pm 15\text{ V}$ คุณสมบัติการขยายสัญญาณกระแสในรูปแบบแรงดันคร่อมความต้านทานชันต์ในรูปที่ 3.1 ของ ASIPM Version 3 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงได้ดังในรูปที่ 3.14 ซึ่งจะเห็นว่าถึงแม้กระแสจะเป็นศูนย์แต่สัญญาณแรงดันที่ได้จากวงจรตรวจจับจะเป็นค่าออฟเซตค่าบวกค่าหนึ่งแทนด้วย i_{offset} ในอัลกอริทึมที่นำเสนอจะต้องมีการพิจารณาแยกแยะระหว่างกรณีที่กระแสที่มีค่าใกล้เคียงศูนย์ กับกรณีที่กระแสเป็นศูนย์ ซึ่งในทั้งสองกรณีวงจรตรวจจับจะให้ค่าสัญญาณออกมาเท่ากับ i_{offset} เหมือนกันทำให้เกิดปัญหาในการคำนวณขั้นต่อไปได้



รูปที่ 3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณกระแสของ ASIPM Version 3 กับกระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์

นอกจากนั้นการสุ่มค่ากระแสในแต่ละช่วงเวลาการใช้เวกเตอร์ที่เกิดขึ้น ณ เวลาที่ต่างกัน ทำให้ข้อมูลกระแสที่สุ่มได้ในกรณีที่กระแสเฟสเดียวกันมีค่าไม่เท่ากัน (แต่ยังมีค่าใกล้เคียงกัน) ซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหาได้ เนื่องจากในการคำนวณเราต้องเปรียบเทียบค่ากระแสที่สุ่มมาได้ต่างเวลากันว่าเป็นค่ากระแสในเฟสเดียวกันหรือไม่ ปัญหานี้จะเกิดในกรณีที่กระแส 2 เฟสมีค่าใกล้เคียงกันเพราะการสุ่มค่ากระแส 2 ครั้งหากได้ค่าใกล้เคียงกันก็ไม่สามารถแยกแยะได้ว่าเป็นกรณีที่สุ่มได้ค่ากระแสเฟสเดียวกัน 2 ครั้ง หรือสุ่มได้ค่ากระแสต่างเฟสแต่มีค่าใกล้เคียงกัน จากสาเหตุต่าง ๆ ดังกล่าวทำให้เราต้องพิจารณาค่ากระแสออฟเซต (i_{offset}) และค่ากระแสคลาดเคลื่อนจากการสุ่มค่าต่างเวลา (i_{error}) เพื่อให้อัลกอริทึมมีความถูกต้องในการใช้งานจริง โดย i_{offset} ควรมีค่าสอดคล้องกับค่าออฟเซตสูงสุดในการใช้งานซึ่งสามารถทราบได้จากข้อมูลผู้ผลิต ส่วนการกำหนดค่า i_{error} ควรมีค่าสอดคล้องกับอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของกระแสความถี่มูลฐานในครึ่งคาบการสวิตช์ซึ่งพิจารณาได้จากค่ากระแสพิกัดของอินเวอร์เตอร์เมื่อใช้งานที่ความถี่สูงสุดแต่มีความถี่การสวิตช์ต่ำสุด ตัวอย่างเช่นถ้ากระแสพิกัดจ่ายออกมีค่าเท่ากับ $11\sqrt{2}\text{ A}$ ความถี่การใช้

งานสูงสุดเท่ากับ 50 Hz และความถี่การสวิตช์ต่ำสุดเท่ากับ 2 kHz เราจะได้ค่า i_{err} เท่ากับ 0.77 A เราสามารถเขียนอัลกอริทึมที่ใช้เมื่อพิจารณาผลของออฟเซตและค่ากระแสคลาดเคลื่อนจากการสุ่มค่าต่างเวลาเมื่อเวกเตอร์คำสั่งอยู่ในเซกเตอร์ที่ 1 ได้ดังรูปที่ 3.15

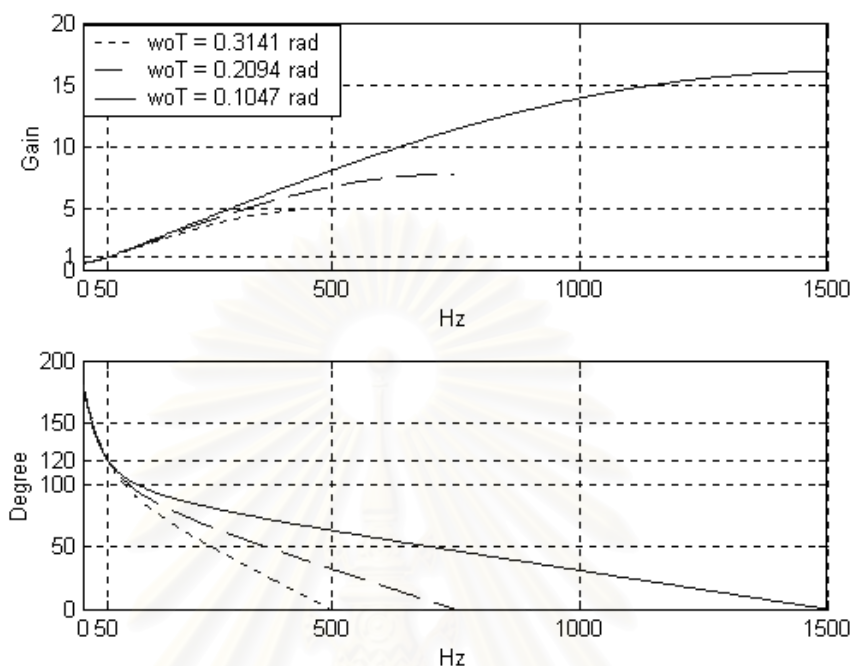


รูปที่ 3.15 การคำนวณค่ากระแสเฟสของ ASIPM เมื่อเวกเตอร์คำสั่งอยู่ในเซกเตอร์ที่ 1 เมื่อพิจารณาผลของค่าออฟเซตและความคลาดเคลื่อนจากการสุ่มค่ากระแส

แต่ถึงกระนั้นเราพบว่าปริมาณออฟเซตยังคงสร้างปัญหาเล็กน้อยในการใช้งานอัลกอริทึมในรูปที่ 3.15 ค่าวนคั้นกระแสเฟสในขณะที่มอเตอร์มีภาระ (ดูในภาคผนวก ก.)

เมื่อเราได้ทำการคำนวณกระแสเฟสด้วยอัลกอริทึมในรูปที่ 3.15 เรียบร้อยแล้ว ในช่วงที่ตรวจจับกระแสได้เฟสเดียว เราจะประมาณค่ากระแสอีก 2 เฟสที่เหลือโดยใช้วงจรกรอง FIR ช่วยในการเลื่อนเฟสดังแสดงในสมการที่ (3.1) วงจรกรอง FIR นี้เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางความถี่ของวงจรกรองนี้จะพบว่ามีคุณสมบัติเป็นวงจรกรองผ่านสูง (High Pass) ดังแสดงในรูปที่

3.16 ซึ่งแสดงคุณสมบัติทางความถี่ของวงจรรองเลื่อนเฟส โดยกำหนดสัญญาณเข้ามีความถี่มูลฐาน (ω_0) เท่ากับ 100π และใช้ความถี่การสวิตช์ ($1/T$) เท่ากับ 3, 6 และ 9 kHz



รูปที่ 3.16 คุณสมบัติทางความถี่ของวงจรรองเลื่อนเฟส

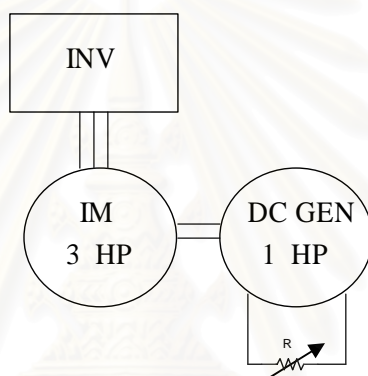
ในการใช้งานจริงถ้าสัญญาณกระแสของ ASIPM มีสัญญาณรบกวนจากวงจรรอบข้าง อาจก่อให้เกิดความผิดพลาดต่อสัญญาณกระแสที่เลื่อนเฟสได้เนื่องจากสัญญาณรบกวนนั้นจะถูกขยายให้มีนัยสำคัญมากขึ้นเมื่อผ่านวงจรรองเลื่อนเฟส แต่จากรูปที่ 3.16 จะเห็นได้ว่าเมื่อ $\omega_0 T$ มีค่ามากขึ้นการขยายของสัญญาณความถี่สูงจะลดลง ซึ่งหมายถึงวงจรรองมีความคงทนต่อสัญญาณรบกวนมากขึ้น จากคุณสมบัตินี้เราอาจเปลี่ยนการใช้ข้อมูล $x(n-1)$ ในสมการที่ (3.1) เป็นการใช้ข้อมูล $x(n-k)$ โดยคงรูปสมการที่ (3.1) เอาไว้อย่างเดิม (เสมือนการลดความถี่การสวิตช์ลง) ซึ่งเราจะได้ $\omega_0 T$ มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น $k\omega_0 T$

วิธีนี้จะทำให้สัญญาณที่ได้นั้นมีความผิดพลาดลดลงและใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์มากขึ้น แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือสัญญาณกระแสขณะเลื่อนเฟสจะมีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงเทียบกับกระแสจริงได้แย่งลงเนื่องจากการใช้ข้อมูลที่ย้อนหลังมากขึ้น แต่ผลกระทบนี้มีค่าไม่มาก ยกตัวอย่างเช่นถ้าเราใช้ความถี่การสวิตช์ 2 kHz ในขณะที่สัญญาณกระแสมีความถี่ 50 Hz ถ้าเราใช้เลือกข้อมูล $x(n-4)$ ในการเลื่อนเฟส จะพบว่าสัญญาณกระแสขณะเลื่อนเฟสจะมีการตอบสนองช้ากว่ากระแสจริงประมาณ 2 ms อย่างไรก็ตาม สำหรับระบบที่ใช้ทำการทดลอง

ปัจจุบันมีสัญญาณรบกวนซึ่งเกิดจากวงจรแปลงผันไฟตรงที่ต่ออยู่ใกล้ ๆ กับ ASIPM จึงเลือกใช้ข้อมูลแบบ $x(n-4)$ เพื่อให้วงจรกรองมีความคงทนต่อสัญญาณรบกวน

3.7 ผลการทดลอง

ทำการทดลองกับมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3 Hp มีภาระเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1 Hp ดังแสดงในรูปที่ 3.17 โดยการใช้การควบคุมแบบ v/f ความถี่การสวิตช์ 3 kHz ทำการสุ่มค่ากระแส 5 ครั้งใน 1 คาบการสวิตช์และใช้การมอดูเลตแบบ 2 กิ่ง ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูป 3.18 - 3.27



รูปที่ 3.17 วงจรที่ใช้ในการทดลอง

ในรูปที่ 3.18 แสดงสัญญาณกระแสตรวจจับของ ASIPM เทียบกับกระแส 3 เฟส ขณะขับมอเตอร์ที่ความถี่ 40 Hz ซึ่งเห็นได้ว่า สัญญาณกระแสตรวจจับเป็นสัญญาณผสมของกระแส 3 เฟสและมีค่าเป็นบวกเสมอเนื่องจากการตรวจจับเฉพาะกระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์ของทั้ง 3 เฟส และ Envelope ของสัญญาณกระแสตรวจจับแสดงถึงค่ากระแสสูงสุดของกระแส 3 เฟสในขณะนั้น ๆ สอดคล้องกับการวิเคราะห์

รูปที่ 3.19 แสดงสัญญาณกระแสที่ตรวจจับได้ในแต่ละช่วงเวลากการใช้เวกเตอร์แรงดันในขณะขับมอเตอร์แบบไร้ภาระที่ความถี่ 40 Hz โดยช่วงเวลาที่แรงทาบ (■) แสดงถึงช่วงที่ไม่สามารถตรวจจับกระแสได้อย่างถูกต้องดังจะเห็นได้ในช่วงดังกล่าวว่าค่ากระแสมีความผิดพลาดและแตกต่างจากช่วงปกติเราจะพบว่ารูปร่างกระแสที่สุ่มได้จะสอดคล้องกับกรณี ก. ในรูปที่ 3.5 รูปที่ 3.20 แสดงสัญญาณกระแสของเวกเตอร์ที่สุ่มได้ในขณะขับมอเตอร์ที่ความถี่ 40 Hz และป้อนภาระขนาดพิกัดให้กับมอเตอร์ เราจะพบว่ารูปร่างกระแสของเวกเตอร์ที่สุ่มได้มีรูปร่าง

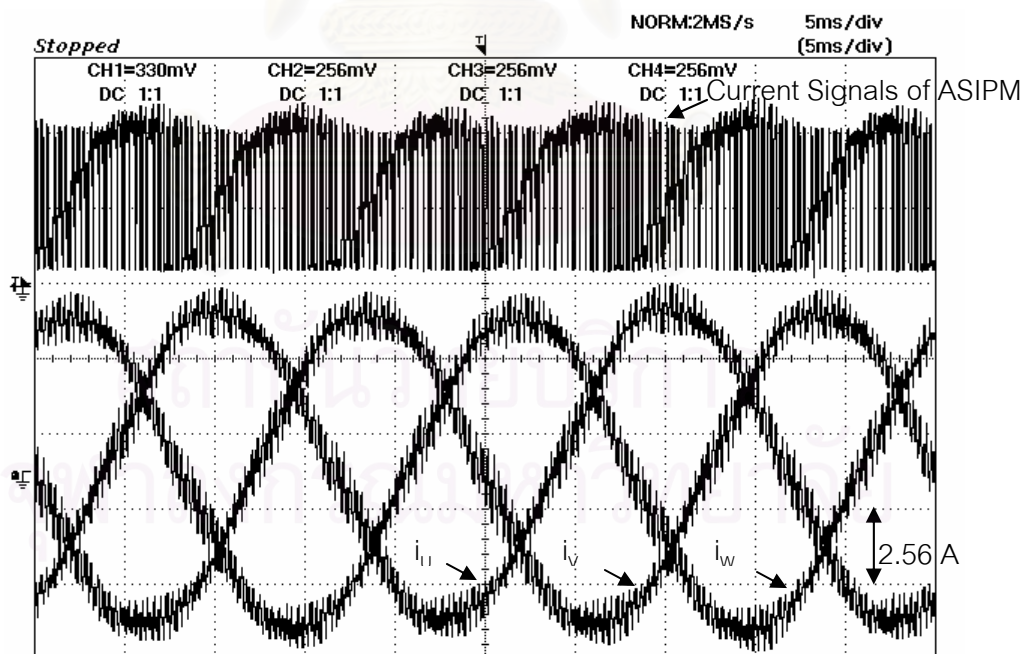
เปลี่ยนแปลงตามภาวะที่ป้อนให้กับมอเตอร์โดยในขณะที่ป้อนภาวะขนาดพิกัด เราพบว่ารูปร่างกระแสที่ตรวจจับได้ในแต่ละช่วงเวลากการใช้เวกเตอร์แรงดันจะสอดคล้องกับกรณี ข. ในรูปที่ 3.5 และช่วงเวลาที่แรงเกาที่บ (■) ในรูปที่ 3.20 แสดงถึงช่วงที่ไม่สามารถตรวจจับกระแสได้อย่างถูกต้องเช่นกัน

รูปที่ 3.21 แสดงสัญญาณกระแสเฟส U ที่คำนวณได้เทียบกับกระแสเฟส U จริง ขณะขับมอเตอร์แบบไร้ภาวะที่ความถี่ 40 Hz ช่วงเวลาที่แรงเกาบาง (■) แสดงถึงช่วงที่ทำการคำนวณกระแสเฟส U จากข้อมูลกระแสเฟส V ด้วยวงจรถ่ายโอนเฟส จะเห็นได้ว่าค่ากระแสที่คำนวณด้วยวิธีนี้มีค่าใกล้เคียงกับกระแสเฟสจริง ส่วนในช่วงเวลาที่แรงเกาที่บ (■) ของรูปที่ 3.21 เป็นช่วงที่ทำการประมาณกระแสเฟสของคาบการสวิตช์ปัจจุบันด้วยข้อมูลกระแสเฟสของคาบการสวิตช์ก่อนหน้า จะเห็นได้ว่ากระแสเฟสที่ได้นั้นใกล้เคียงกับกระแสเฟสจริงเช่นกัน และถ้าเราทำการเปรียบเทียบกับกระแสเฟส U ที่คำนวณได้โดยใช้ข้อมูลกระแสของเวกเตอร์จากการสุ่มค่าเพียงแค่ 3 ครั้งในแต่ละคาบการสวิตช์ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.22 (ไม่ใช้การสุ่มค่าในครั้งที่ 4 และ 5 ในรูปที่ 3.10) เราพบว่ากระแสเฟส U ที่คำนวณได้จากการใช้ข้อมูลกระแสของเวกเตอร์จากการสุ่มค่า 5 ครั้งในแต่ละคาบการสวิตช์จะมีมุมเฟสใกล้เคียงกับกระแสเฟส U จริงมากกว่า อย่างไรก็ตามกระแสเฟส U ที่คำนวณได้ในรูปที่ 3.22 ก็มีค่าและมุมเฟสที่ไม่ได้แตกต่างจากกระแสเฟส U จริงมาก

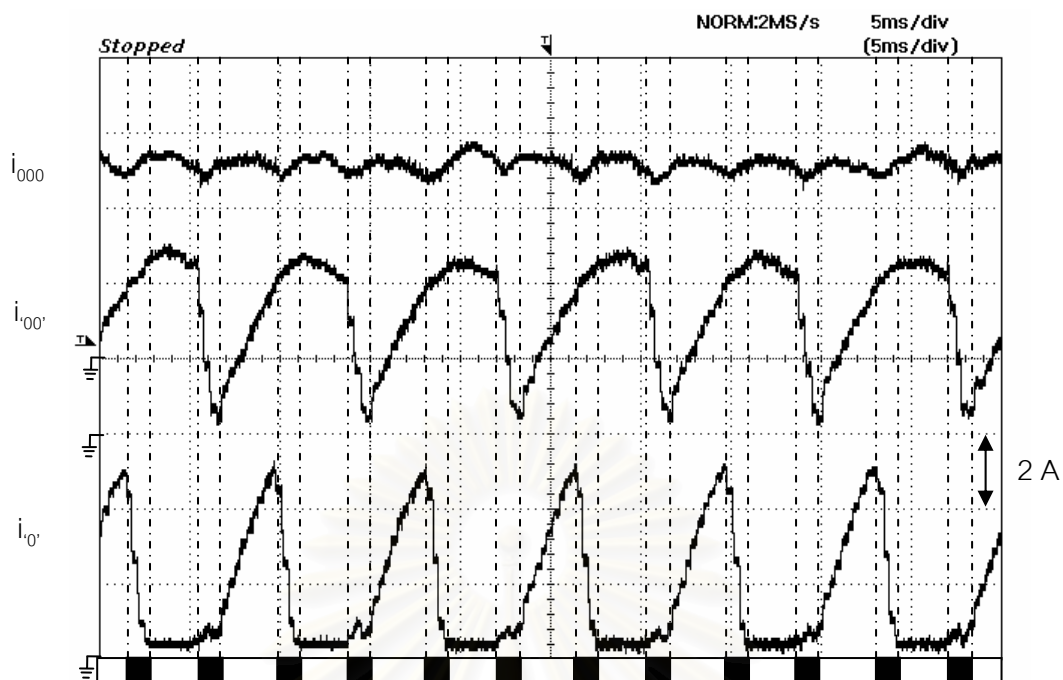
รูปที่ 3.23 แสดงสัญญาณกระแสเฟส U ที่คำนวณได้เทียบกับกระแสเฟส U จริง ขณะขับมอเตอร์ที่ความถี่ 40 Hz และป้อนภาวะขนาดพิกัดให้กับมอเตอร์ ช่วงเวลาที่แรงเกาบาง (■) แสดงถึงช่วงที่ทำการคำนวณกระแสเฟส U จากข้อมูลกระแสเฟส V ด้วยวงจรถ่ายโอนเฟส ส่วนในช่วงเวลาที่แรงเกาที่บ (■) ของรูปที่ 3.23 เป็นช่วงที่ทำการประมาณกระแสเฟสของคาบการสวิตช์ปัจจุบันด้วยข้อมูลกระแสเฟสของคาบการสวิตช์ก่อนหน้า จะพบว่าช่วงที่ทำการคำนวณต่าง ๆ เหล่านี้ (ช่วงที่แรงเกาที่บและบาง) จะแตกต่างจากกรณีขับมอเตอร์ที่สภาวะในรูปที่ 3.21 โดยในรูปที่ 3.23 จะมีช่วงการคำนวณที่สลับไปมาบ่อยครั้งกว่า และในขณะที่มอเตอร์มีภาวะขนาดพิกัดนี้จะได้รับอุปสรรคจากค่าออฟเซตในการคำนวณค่าน่ากระแสเฟสด้วยอัลกอริทึมในแผนภาพรูปที่ 3.15 แต่กระแสเฟสที่ได้นั้นยังคงใกล้เคียงกับกระแสเฟสจริง

รูปที่ 3.24 แสดงสัญญาณกระแสเฟส U ที่คำนวณได้เทียบกับกระแสเฟส U จริง ขณะทำการเร่งลดความเร็วจาก 25 – 45 Hz ในขณะที่มอเตอร์มีภาวะ ซึ่งจะพบว่ากระแสเฟส U ที่คำนวณมีการเปลี่ยนแปลงตามกระแสเฟส U จริงได้ดี แต่จะพบช่วงที่มีความผิดพลาดบ้างเนื่องจากผลของออฟเซตในการคำนวณค่าน่ากระแสเฟสตามอัลกอริทึมในแผนภาพรูปที่ 3.15

รูปที่ 3.25 แสดงการเปรียบเทียบสภาวะชั่วคราวของกระแสค่านวนเฟส U เทียบกับกระแสเฟส U จริงโดยทำการเปลี่ยนแปลงจากช่วงไว้ภาระไปยังมีภาระขนาดครึ่งหนึ่งของพิกัดทันทีทันใดขณะขับมอเตอร์ที่ความถี่ 40 Hz เราจะพบว่ากระแสเฟส U ที่คำนวณได้สามารถปรับเปลี่ยนตามกระแสจริงได้อย่างถูกต้อง

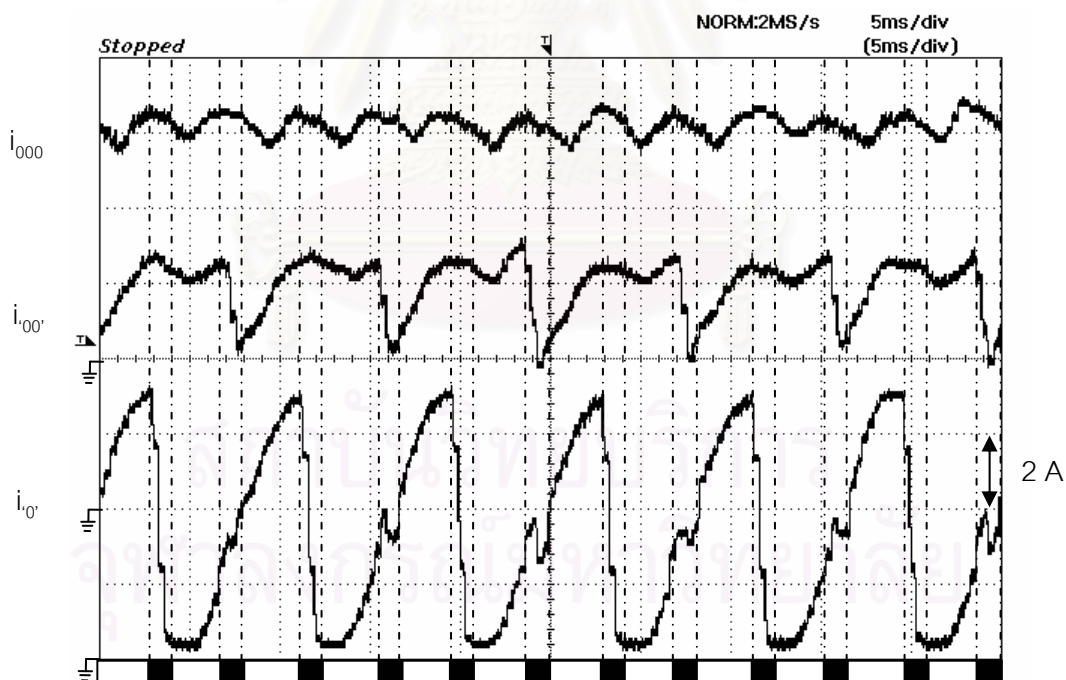


รูปที่ 3.18 สัญญาณกระแสตรวจจับเทียบกับกระแส 3 เฟสขณะขับมอเตอร์ที่ความถี่ 40 Hz



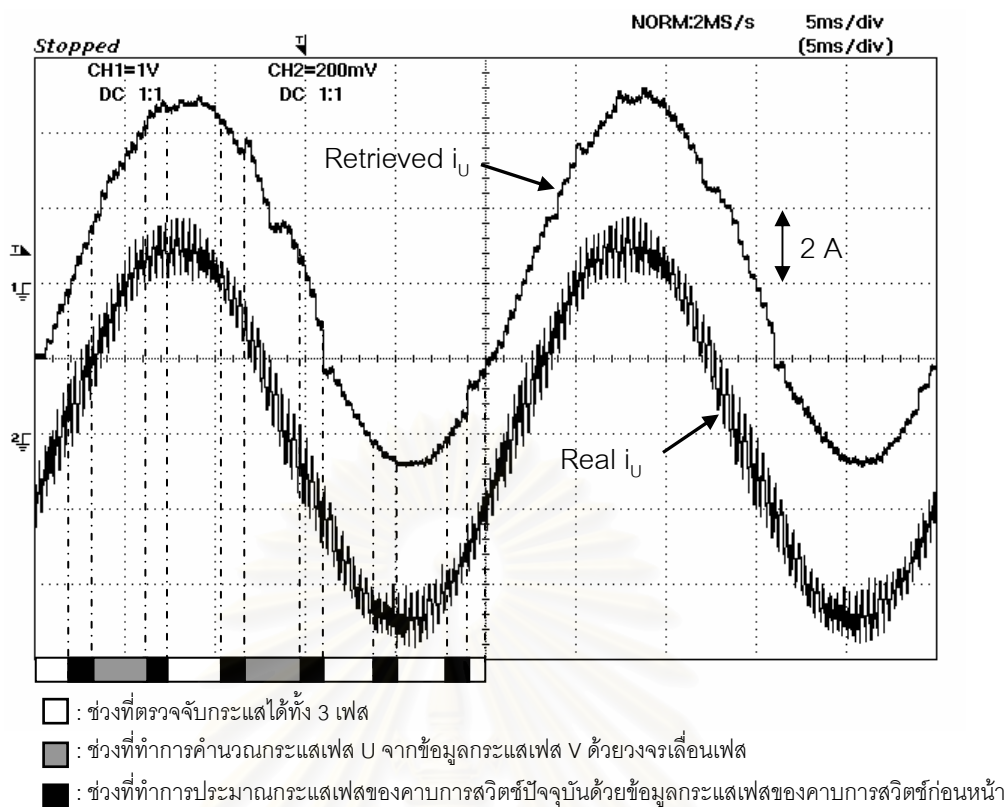
■ : ช่วงที่ไม่สามารถตรวจจับกระแสในช่วงที่ใช้เวกเตอร์ต่าง ๆ ได้อย่างถูกต้อง

รูปที่ 3.19 สัญญาณกระแสที่สุ่มได้ในแต่ละช่วงเวลาการใช้เวกเตอร์แรงดันในขณะขับมอเตอร์แบบไร้กระแสที่ความถี่ 40 Hz

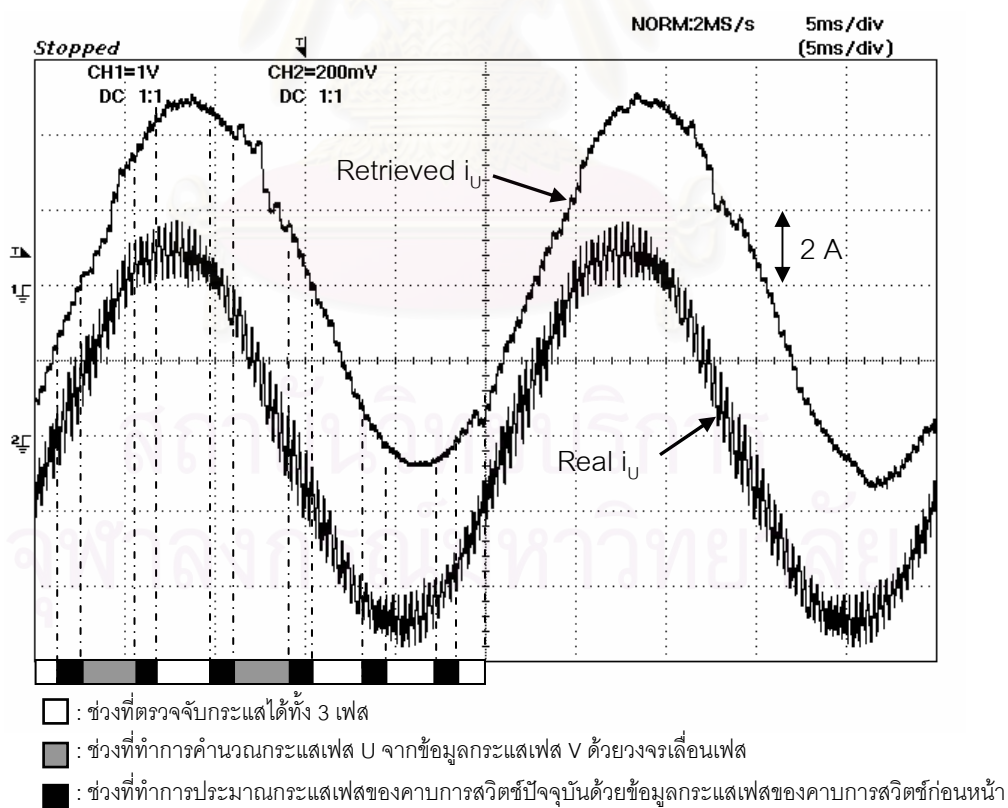


■ : ช่วงที่ไม่สามารถตรวจจับกระแสในช่วงที่ใช้เวกเตอร์ต่าง ๆ ได้อย่างถูกต้อง

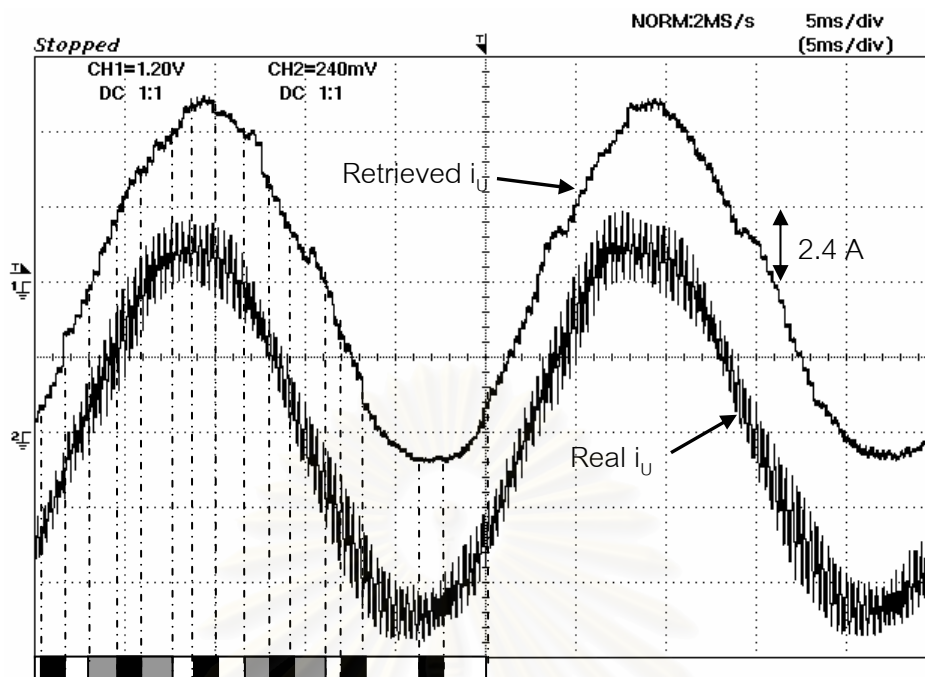
รูปที่ 3.20 สัญญาณกระแสของเวกเตอร์ที่สุ่มได้ในขณะขับมอเตอร์ที่ความถี่ 40 Hz และป้อนภาระให้กับมอเตอร์ขนาดพิกัด



รูปที่ 3.21 สัญญาณกระแสเฟส U ที่คำนวณได้เทียบกับกระแสเฟส U จริง
ขณะขับเคลื่อนมอเตอร์แบบไร้ภาระที่ความถี่ 40 Hz

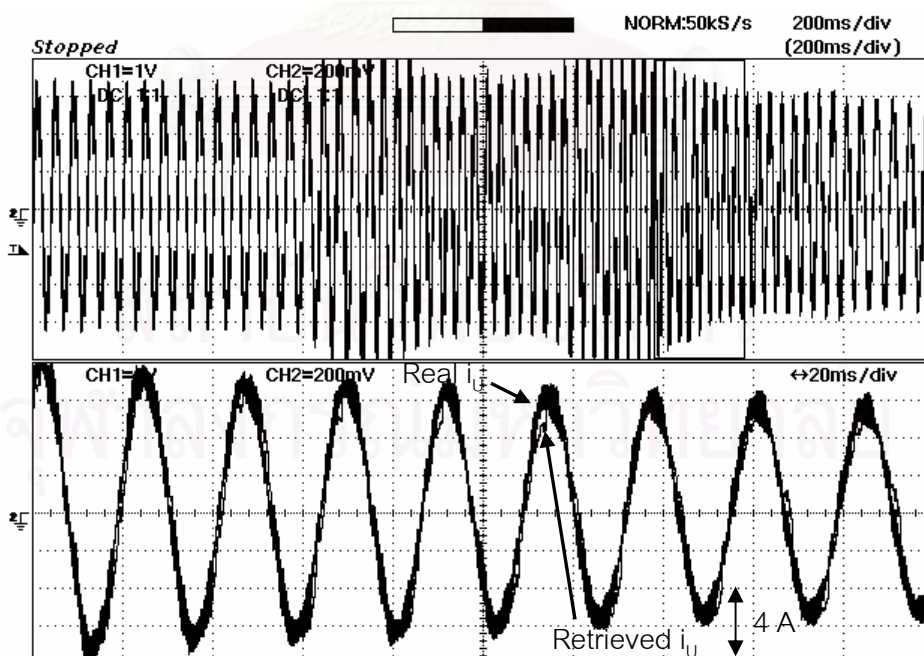


รูปที่ 3.22 สัญญาณกระแสเฟส U ที่คำนวณได้โดยใช้การสุ่มค่าเพียง 3 ครั้งในแต่ละคาบการสวิตช์
เทียบกับกระแสเฟส U จริงขณะขับเคลื่อนมอเตอร์แบบไร้ภาระที่ความถี่ 40 Hz

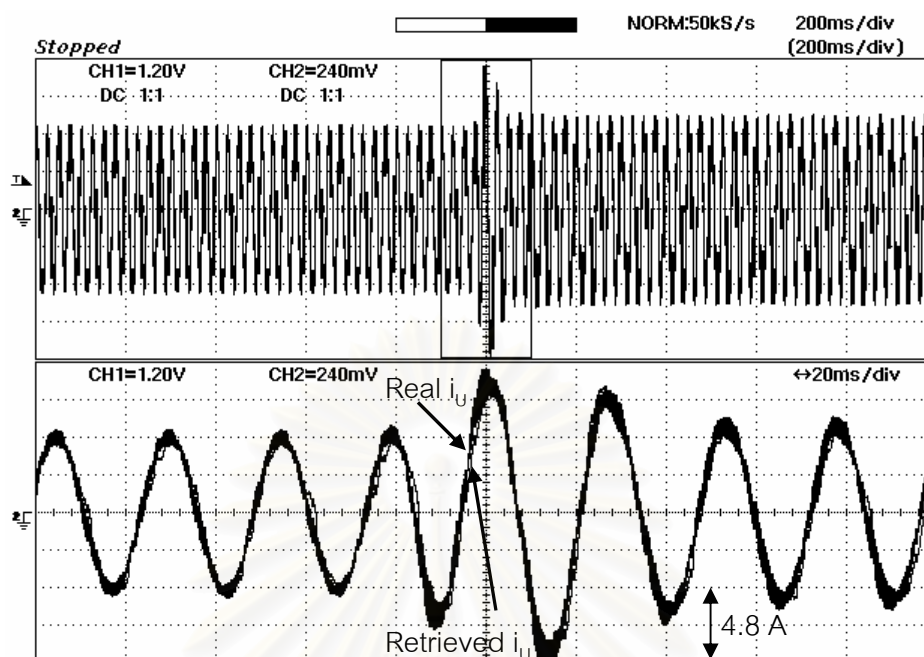


- : ช่วงที่ตรวจจับกระแสได้ทั้ง 3 เฟส
- ▒ : ช่วงที่ทำการคำนวณกระแสเฟส U จากข้อมูลกระแสเฟส V ด้วยวงจรเลื่อนเฟส
- : ช่วงที่ทำการประมาณกระแสเฟสของคาบการสวิตช์ปัจจุบันด้วยข้อมูลกระแสเฟสของคาบการสวิตช์ก่อนหน้า

รูปที่ 3.23 สัญญาณกระแสเฟส U ที่คำนวณได้เทียบกับกระแสเฟส U จริงขณะขับมอเตอร์ ความถี่ 40 Hz และป้อนภาระขนาดพิกัด



รูปที่ 3.24 สัญญาณกระแสเฟส U ที่คำนวณได้เทียบกับกระแสเฟส U จริงขณะทำการเร่งลดความเร็วจาก 25 – 45 Hz



รูปที่ 3.25 สภาวะชั่วครู่ของกระแสคำนวณเฟส U เทียบกับกระแสเฟส U จริงโดยเปลี่ยนแปลงจากช่วงไร้ภาระไปยังมีภาระครึ่งหนึ่งของพิกัดทันทีทันใดขณะขับมอเตอร์ที่ความถี่ 40 Hz

บทที่ 4

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

4.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติการตรวจจับกระแสของ ASIPM ทั้ง 3 รุ่น และนำเสนออัลกอริทึมในการคำนวณค่านกระแสเฟสสำหรับ ASIPM แต่ละรุ่น โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาการตรวจจับกระแสเฟสของมอเตอร์จากข้อมูลสัญญาณกระแสของ ASIPM ให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น เราได้วิเคราะห์พื้นที่ปัญหาในการตรวจจับกระแสของ ASIPM Version 1, 2 พบว่าไม่สามารถตรวจจับกระแสในช่วงที่เวกเตอร์คำสั่งอยู่ใกล้ขอบเขตของพื้นที่มอดูเลต (พื้นที่หกเหลี่ยม) และได้ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติการตรวจจับกระแสของ ASIPM Version 3 พบว่าสัญญาณกระแสที่ตรวจจับเป็นรูปคลื่นผสมของกระแสทั้ง 3 เฟส โดยที่ envelope ของรูปคลื่นแสดงค่าสูงสุดของค่าสัมบูรณ์กระแสทั้ง 3 เฟสในขณะนั้น จากนั้นเราได้เสนออัลกอริทึมในการลดพื้นที่ปัญหาของ ASIPM Version 1, 2 ดังนี้

1. ในช่วงที่ตรวจจับกระแสได้ 2 เฟส ใช้การคำนวณหากระแสเฟสที่ตรวจจับไม่ได้ด้วยข้อมูลกระแส 2 เฟสจากความสัมพันธ์ผลรวมกระแสเท่ากับศูนย์
2. ใช้การมอดูเลตแบบ 2 กิ่งเพื่อลดพื้นที่ปัญหาในช่วงที่ตรวจจับกระแสได้เพียงเฟสเดียว

หลังจากใช้อัลกอริทึมที่นำเสนอ เราพบว่าพื้นที่ปัญหาลดลงไปอย่างมากสามารถตรวจจับกระแสได้เกือบตลอดพื้นที่การมอดูเลต

สำหรับ ASIPM Version 3 เราได้เสนออัลกอริทึมในการคำนวณค่านกระแสเฟสดังนี้

1. ทำการคำนวณค่านกระแสเฟสจากข้อมูลกระแสที่ได้จากช่วงเวลาการใช้เวกเตอร์แรงดันต่าง ๆ
2. ใช้วงจรกรองเลือนเฟสในการคำนวณกระแสอีก 2 เฟสในช่วงที่ได้ข้อมูลกระแสเพียงเฟสเดียวจากช่วงเวลาการใช้เวกเตอร์แรงดัน
3. ใช้การมอดูเลตแบบ 2 กิ่งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจจับกระแสในช่วงที่เวกเตอร์คำสั่งอยู่ใกล้ขอบเขตของพื้นที่การมอดูเลต

หลังจากใช้อัลกอริทึมที่นำเสนอ เราสามารถคำนวณค่านกระแสเฟสได้อย่างถูกต้อง

4.2 ข้อเสนอแนะ

สิ่งที่ต้องพิจารณาในการใช้งานอัลกอริทึมในการคำนวณค่าน้ำค่ากระแสเฟสของ ASIPM Version 3 ก็คือความไวต่อสัญญาณรบกวนของวงจรรองเล็อนเฟส ซึ่งถ้าสัญญาณรบกวนในสัญญาณกระแสตรวจจบัมีปริมาณมากก็จะส่งผลให้กระแสเฟสในช่วงที่คำนวณโดยวงจรรองเล็อนเฟสมีความผิดพลาด ผู้ใช้ควรลดทอนปริมาณสัญญาณรบกวนเหล่านั้นหรือลดความไวของวงจรรองเล็อนเฟสลงในปริมาณที่เหมาะสม และเลือกใช้ความถี่การสวิตซ์ที่ไม่สูงจนเกินไปทำให้สัญญาณรบกวนมีนัยสำคัญลดลงเมื่อนำวงจรรองและซึ่งจะช่วยลดพื้นที่ปัญหาในการตรวจจบักระแสด้วย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] G. Majumdar, K.H. Hussein, M. Iwasaki, H. Kawafuji, T. Iwagami and H. Yoshida, "Novel Intelligent Power Modules for Low-Power Inverters", *Power Electronics Specialists Conference*, 1998, Vol. 2, pp. 1173 – 1179.
- [2] K.H. Hussein, G. Majumdar, M. Iwasaki, T. Oota, M. Fukunaga and H. Iwamoto, "1200 V Compact Subsystem ASIPM for Low-Power Inverters", *Proc. of IPEC – Tokyo 2000*, pp. 513 – 518.
- [3] Iwamoto H., Motto E., Achhammer J., Iwasaki M., Seo M. and Iwagami T., "New Intelligent Power Modules for Appliance Motor Control", *Proc. of APEC – Shanghai 2001*, Vol. 2, pp. 1051 – 1056.
- [4] Francesco Parasiliti, Roberto Petrella, Macro Tursini, "Low Cost Phase Current Sensing in DSP Based AC Drives", *Proc. of ISIE'99 – Bled*, Slovenia, 1999, pp. 1284 – 1289.
- [5] Sibaprasad Chakrabarti, Thomas M. Jahns, Robert D. Lorenz, "A Current Reconstruction Algorithm for Three-Phase Inverters Using Integrated Current Sensors in Low-Side Switches", *Conf. Record of IEEE/IAS Annual Meeting 2003*, Vol. 2, pp. 925 -932.
- [6] Vladimir Blasko, "Analysis of Hybrid PWM Based on Modified Space Vector and Triangle Comparison Methods", *IEEE Tran. on Ind. Appl.*, Vol. 33, No. 4, 1997, pp. 756 – 764.
- [7] Walter A. Elmore, "Pilot Protective Relaying", Marcel Dekker Inc., 2000.

ภาคผนวก ก

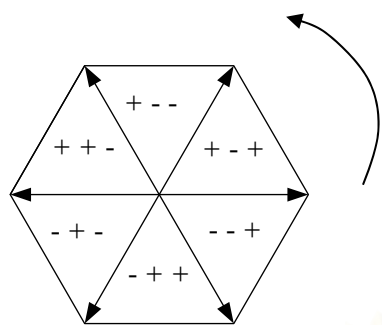
ผลของออฟเซตของวงจรตรวจจับกระแสของ ASIPM Version 3 ที่มีต่อการคำนวณค่าน่ากระแสเฟส

ออฟเซตของวงจรรายของวงจรตรวจจับกระแสของ ASIPM Version 3 ส่งผลให้เราไม่สามารถแยกแยะระหว่างกรณีที่กระแสมีปริมาณน้อยกว่าค่ากระแสออฟเซต กับกรณีที่ไม่มีกระแสไหลผ่านความต้านทานชัณฑ์ โดยในกรณีที่กระแสมีปริมาณน้อยไหลผ่านความต้านทานชัณฑ์ในรูปที่ 3.1 นั้นจะส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในการคำนวณกระแสเฟสด้วยอัลกอริทึมที่นำเสนอได้ซึ่งถึงแม้จะเป็นช่วงสั้น ๆ แต่กระแสเฟสที่คำนวณได้จะมีความแตกต่างจากช่วงปกติ เราจึงได้ทำการปรับปรุงในส่วนย่อยของอัลกอริทึมที่ได้นำเสนอไปเพื่อให้กระแสเฟสที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกระแสจริงมากที่สุด ภายในกรอบเส้นประในรูปที่ ก.1 แสดงช่วงเวลาที่将会เกิดปัญหาจากค่าออฟเซตเมื่อมอเตอร์มีตัวประกอบกำลังต่าง ๆ เราสามารถจำแนกกรณีของความผิดพลาดในการคำนวณกระแสเฟสเนื่องจากผลของออฟเซตได้เป็น 2 กรณีดังนี้

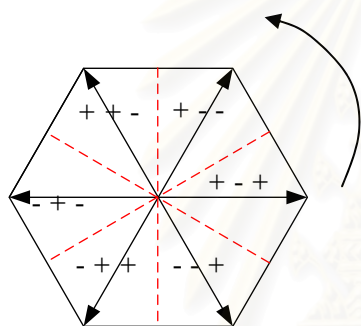
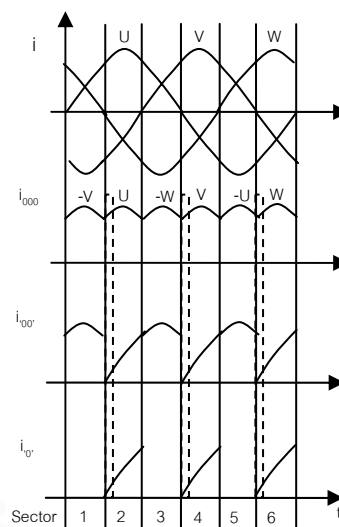
1. กรณีที่อัลกอริทึมเลือกใช้ i_{000} ในการเลื่อนเฟส

กรณีนี้จะเกิดขึ้นเมื่อมอเตอร์ไม่มีภาระดังในกรณี ก. ในรูป ก.1 เนื่องจาก i_{00} และ i_{000} มีค่าต่ำกว่าค่าออฟเซตของวงจรตรวจจับกระแสทำให้อัลกอริทึมในแผนภาพรูปที่ 3.15 ตัดสินว่าตรวจจับได้เฉพาะ i_{000} เพียงเฟสเดียวซึ่งเป็นกระแสที่ผิดเฟสจากเฟสกระแสของ i_{000} จริง ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีที่เวกเตอร์คำสั่งอยู่ในเซกเตอร์ที่ 2 (ในกรอบเส้นประแรกในกรณี ก. ในรูปที่ ก.1) ในกรณีอุดมคติที่ไม่มีค่าออฟเซตเราจะได้ $i_{110} = -i_w$, $i_{010} = -i_w$ และ $i_{000} = i_u$ แต่ถ้ามีค่าออฟเซตเราจะได้ $i_{110} = 0$, $i_{010} = 0$ และ $i_{000} \neq 0$ ซึ่งก็คือสามารถตรวจจับได้เฉพาะ i_{000} และอัลกอริทึมในรูปที่ 3.15 จะให้ผลลัพธ์ของกระแส i_{000} ที่ตรวจจับได้เป็นกระแสเฟส V กล่าวคือ $i_{000} = -i_v$ ซึ่งจะผิดพลาดจากความจริง เพราะ $i_{000} = i_u$ และเมื่อค่ากระแสนี้ถูกนำไปใช้คำนวณผ่านวงจรกรองเลื่อนเฟสก็จะให้ค่ากระแส 3 เฟสที่ผิดพลาดตามมา

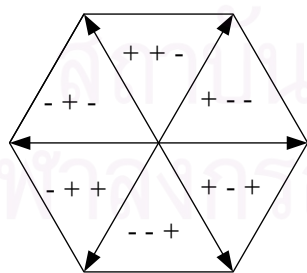
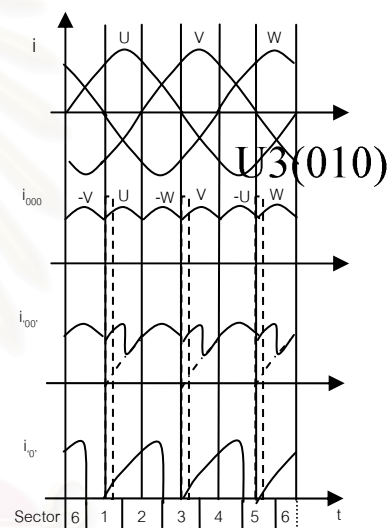
เราสามารถแก้ไขปัญหกรณีนี้นี้ได้โดยการใช้การคำนวณกระแส 3 เฟสในคาบการสวิตช์ปัจจุบันด้วยข้อมูลกระแส 3 เฟสในคาบก่อนหน้าแทนการใช้วงจรกรองเลื่อนเฟส ซึ่งสามารถเขียนอัลกอริทึมที่ได้ปรับปรุงแล้วเมื่อเวกเตอร์คำสั่งอยู่ในเซกเตอร์ที่ 1 ได้ดังแผนภาพในรูป ก.2



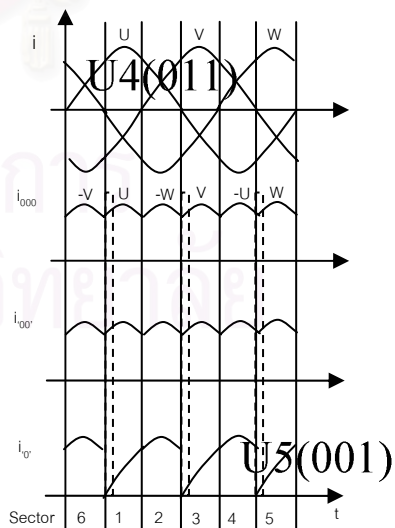
ก. ไม่มีภาระ (PF = 0)



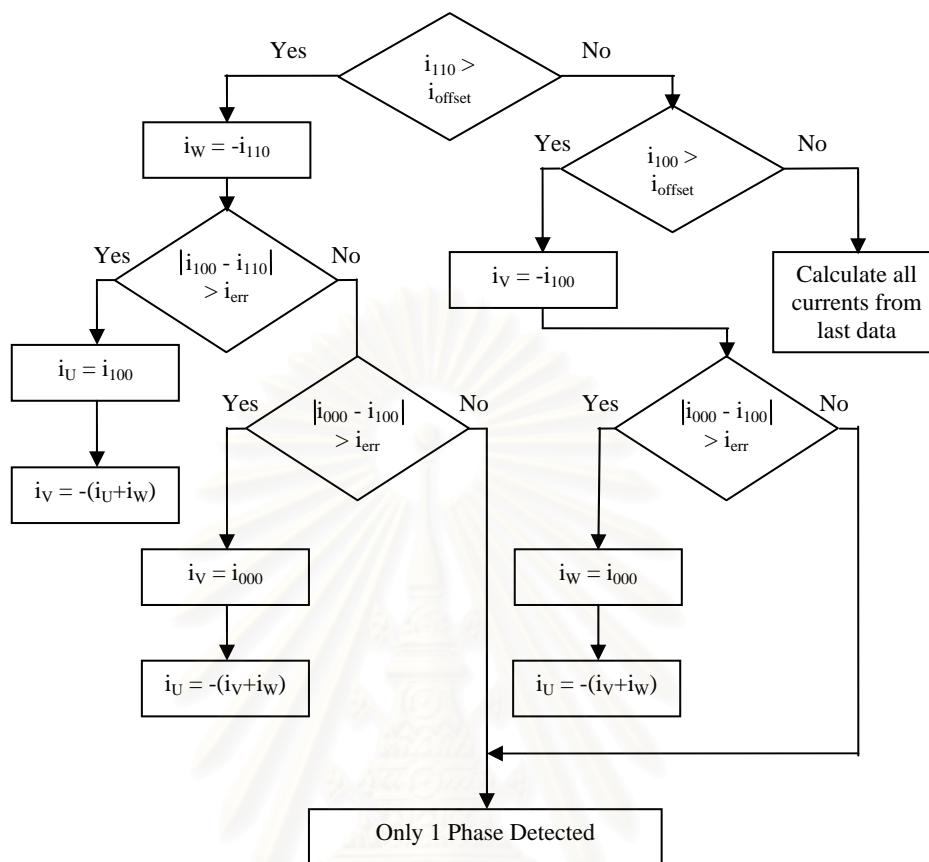
ข. มีภาระ PF = 0.866 lag



ค. มีภาระ PF = 0.5 lag



รูปที่ ก.1 ช่วงออฟเซตของกระแสเมื่อมอเตอร์ทำงานที่ค่าตัวประกอบกำลังต่างกัน



รูปที่ ก.2 การคำนวณค่ากระแสเฟสของ ASIPM เมื่อเวกเตอร์คำสั่งอยู่ในเซกเตอร์ที่ 1 ที่พิจารณาผลของออฟเซตแล้ว

2. กรณีที่อัลกอริทึมตัดสินใจใช้ i_{00} ในการเลื่อนเฟส

กรณีนี้จะเกิดขึ้นเมื่อมอเตอร์มีภาระดังในกรณี ข. และ ค. ในรูป ก.1 เนื่องจาก i_{00} มีค่าต่ำกว่าค่าออฟเซตของวงจรตรวจจับกระแสในขณะที่ i_{00} มีค่าใกล้เคียงกับ i_{000} ทำให้ อัลกอริทึมในแผนภาพรูปที่ 3.15 ตัดสินว่าตรวจจับได้เฉพาะ i_{00} เพียงเฟสเดียวและให้ข้อมูลเฟส ผิดจากเฟสของกระแส i_{00} จริง ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีที่เวกเตอร์คำสั่งอยู่ในเซกเตอร์ที่ 1 (ใน กรอบเส้นประแรกในกรณี ข. และ ค. ในรูปที่ ก.1) หากไม่มีปัญหาออฟเซตเราจะได้ $i_{110} = -i_w$, $i_{100} = i_u$ และ $i_{000} = i_u$ แต่ถ้ามีปัญหาค่าออฟเซตอัลกอริทึมในรูปที่ 3.15 จะให้ผลลัพธ์เป็น $i_{110} = 0$, $i_{100} = -i_v$ และ $i_{000} = -i_v$ ซึ่งผิดเฟสจากกระแสจริง และเมื่อค่ากระแสนี้จะถูกนำไปใช้คำนวณผ่าน วงจรกรองเลื่อนเฟสจะให้ค่ากระแส 3 เฟสที่ผิดพลาด

การแก้ไขปัญหในช่วงเวลานี้ทำได้ยากกว่าในกรณีที่ 1 เนื่องจากก่อนหน้าที่จะเข้าสู่ช่วงเวลานี้ (ในกรอบเส้นประในกรณี ข. และ ค. ในรูปที่ ก.1) จะเป็นช่วงเวลาที่ตรวจจับกระแสได้เพียงเฟสเดียวและมีการใช้ i_{00} ในการประมาณค่ากระแสด้วยการเลื่อนเฟสที่ถูกต้องตามปกติ จึงไม่สามารถพัฒนาอัลกอริทึมที่สังเกตเห็นจุดเริ่มต้นของช่วงเวลานี้ เราแก้ปัญหานี้โดยเปรียบเทียบค่ากระแสที่ได้จากการเลื่อนเฟสในคาบการสวิตช์ปัจจุบันเทียบกับค่ากระแสที่ได้จากการเลื่อนเฟสในคาบการสวิตช์ก่อนหน้าแทน ถ้าทั้ง 2 ค่ามีผลต่างมากกว่าปกติเราก็จะใช้การคำนวณกระแส 3 เฟสในคาบการสวิตช์ปัจจุบันด้วยข้อมูลกระแส 3 เฟสในคาบก่อนหน้าแทนการใช้วงจรกรองเลื่อนเฟส



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



บทความตีพิมพ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- PE11 การปรับปรุงสมรรถนะวิธีการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแรงบิดโดยตรงในช่วงสภาวะคงตัว 624
Improvement of Steady State Performance with Modified Direct Torque Control of Induction Motor
วีรวิธ สุนเลี้ยง เอก ไชยสวัสดิ์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- PE12 การตรวจจับกระแสของมอเตอร์ด้วยโมดูลสวิตซ์กำลังอัจฉริยะเฉพาะงาน 630
Motor Current Detection Using Application Specific Intelligent Power Modules
ชินภัทร เจริญประยูร สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- PE-C
- PE13 วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน 3 เฟสที่ใช้ตัวประมวลสัญญาณดิจิทัลสำหรับประมาณค่ากระแสชดเชยฮาร์มอนิกส์ 636
3-Phase Shunt Active Power Filter Employing Digital Signal Processor for Estimating Compensated Harmonics Current
ศักดิ์ดา สมกุล วิบูลย์ ชื่นแขก พนาฤทธิ์ เศรษฐกุล
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- PE14 เครื่องประจุแบตเตอรี่แบบสร้างคูลสำหรับชุดแบตเตอรี่ที่ค่อนุกรม 642
Battery Equalization Charger for Series Connected Battery Strings
ไพฑูรย์ อังนภารัตน์ อุดมศักดิ์ ชัยชิน วีระพล โมมยะกุล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- PE15 การวิเคราะห์และออกแบบ IGBT คอนเวอร์เตอร์สำหรับการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับผ่านการเชื่อมโยงด้วยไฟฟ้ากระแสตรง 648
Analysis and Design of IGBT Converters for AC Power Transfer via DC Link
อภิวัฒน์ คันธี กำพล ศิริจันทร์พงศ์ วิจิตร กิณเรศ
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
PMC Engineering Development Co., Ltd.
- PE16 การวิเคราะห์และออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดกระตุ้นและทำงานต่อเนื่องด้วยตัวเองที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ทำงานได้สำหรับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ 654
Analysis and Design of Self-Sustained Oscillating Inverter with Vary Frequency Feature for Electronic Ballast
นภดล วิวัชรโกเศศ วิบูลย์ ชื่นแขก
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

การตรวจจับกระแสของมอเตอร์ด้วยโมดูลสวิทช์กำลังอัจฉริยะเฉพาะงาน

Motor Current Detection Using Application Specific Intelligent Power Modules

ชินภัทร เจริญประยูร สมบูรณ์ แสงวงค์วานิชย์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถ.พญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทร 0-2218-6534 e-mail: somboona@netserv.chula.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติและการพัฒนาอัลกอริทึมในการตรวจจับกระแสของมอเตอร์เมื่อใช้อุปกรณ์โมดูลสวิทช์กำลังอัจฉริยะเฉพาะงาน เพื่อให้การใช้อุปกรณ์มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และสามารถนำไปใช้งานควบคุมที่มีความซับซ้อนมากขึ้นได้ โดยผลการจำลองการทำงานที่ได้ยืนยันความถูกต้องของทฤษฎีที่นำเสนอ

คำสำคัญ: การตรวจจับกระแส, โมดูลสวิทช์กำลังอัจฉริยะเฉพาะงาน

Abstract

This article analyses current detection characteristics of the application specific intelligent power modules, and presents a new algorithm to retrieve the motor currents from the sensed current. The new algorithm helps to improve the utilization of the power modules in more complex applications. The simulation results confirm the feasibility of the proposed algorithm.

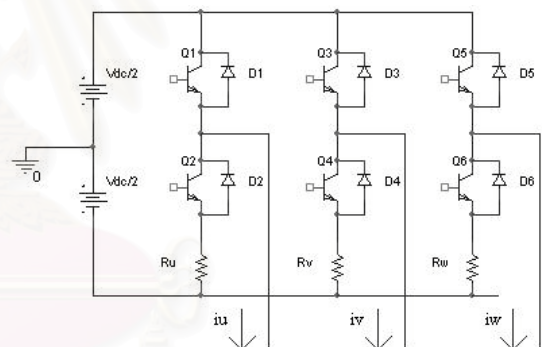
Keywords: Current Detection, Intelligent Power Modules

1. บทนำ

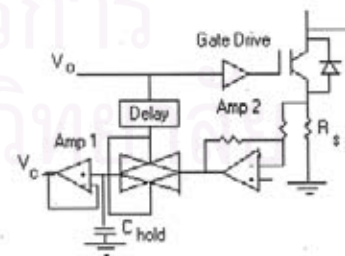
อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟสลับอย่างแพร่หลายทั่วไปในอุตสาหกรรม ในการใช้งานอินเวอร์เตอร์กับมอเตอร์ขนาดเล็ก(100W – 2.2kW) มักจะถูกกำหนดด้วยเรื่องราคาและประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ พื้นที่ติดตั้ง อุปกรณ์รอบข้าง เช่น CT, ชุดวงจรป้องกัน และเรื่องการระบายความร้อน โมดูลสวิทช์กำลังอัจฉริยะเฉพาะงาน(Application Specific Intelligent Power Modules: ASIPM)จึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ปัญหาและตอบสนองความต้องการทั้งหมดเหล่านั้น ASIPM เป็นโมดูลสวิทช์กำลังขนาดเล็ก ที่มีส่วนป้องกันความผิดพลาด และตัวตรวจจับกระแส ติดตั้งพร้อมอยู่ภายใน โดยจะแยกรุ่นหรือ Version ไปตามประเภทของการใช้งานเป็น 3 Version [1]–[3]

ตัวตรวจจับกระแสของ ASIPM มีบทบาทสำคัญคือ จะทำหน้าที่ตรวจจับและป้อนข้อมูลของกระแสเพื่อใช้ในการควบคุมหรือป้องกัน ทำ

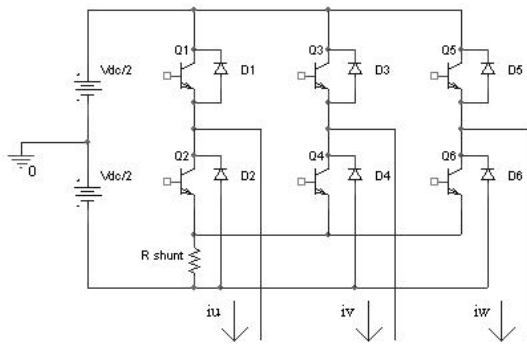
ให้ผู้ใช้งานไม่จำเป็นต้องคิดตั้งวงจรตรวจจับกระแสภายนอก ซึ่งแต่ละ Version จะมีรูปแบบวิธีการตรวจจับกระแสที่แตกต่างกัน โดย Version 1 และ 2 ถูกออกแบบมาสำหรับใช้ในงาน High Performance Drives และมีรูปแบบการตรวจจับกระแสที่ 1 และ 2 กระแสในแต่ละเฟสจะถูกตรวจจับก็ต่อเมื่อมีการขับนำสวิทช์ตัวล่าง โดยค่าที่ตรวจจับได้จะมีทิศทางตรงข้ามกับกระแสเฟส การทำงานของวงจรตรวจจับในรูปที่ 2 เป็นดังนี้ เมื่อมีการขับนำสวิทช์ตัวล่าง(S=1) สัญญาณ S จะถูกหน่วงเวลาเพื่อให้ระบบผ่านพ้นสภาวะชั่วคราวของการสวิทช์แล้วจึงให้วงจรตรวจจับส่งค่ากระแสผ่านสวิทช์ในรูปแรงดันออกมา เมื่อ S=0 วงจรก็จะคงค่ากระแสสุดท้ายเอาไว้



รูปที่ 1 โครงสร้างและตำแหน่งตรวจจับกระแสของ ASIPM Version 1,2



รูปที่ 2 วงจรตรวจจับกระแสของ ASIPM Version 1,2 สำหรับ Version 3 ซึ่งมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3 นั้นถูกออกแบบมาสำหรับใช้กับอินเวอร์เตอร์ในงานควบคุมความเร็วทั่วๆไป รูปแบบของการตรวจจับกระแสของ Version3 เป็นดังนี้คือ



รูปที่ 3 โครงสร้างและการตรวจจ็กระแสของ ASIPM Version 3

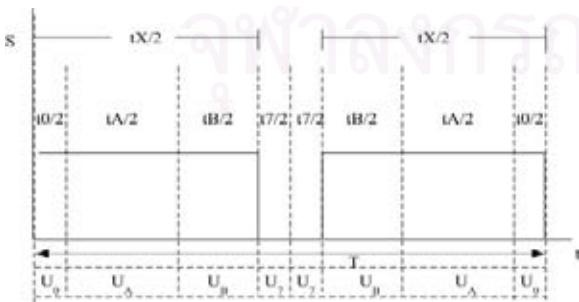
กระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์ของสวิตช์ตัวล่างของทั้ง 3 เฟสจะรวมกันเป็นกระแสที่ไหลผ่านความต้านทานขั้วต่อ สะท้อนเป็นค่าแรงดันออกของวงจรตรวจจ็ สัญญาณกระแสที่ตรวจจ็ได้จะมีค่าเป็นบวกเสมอ และโดยทั่วไปค่า Envelop ของสัญญาณจะแสดงถึงค่ากระแสที่สูงสุดของกระแสทั้ง 3 เฟสในขณะนั้นๆ

อย่างไรก็ตามตัวตรวจจ็กระแสในแต่ละ Version ยังมีความไม่สมบูรณ์ในการใช้งานเกิดขึ้น โดย Version 1,2 จะไม่สามารถตรวจจ็กระแสได้ในบางย่านของแรงดันคำสั่ง ส่วน Version 3 สามารถตรวจจ็กระแสได้เฉพาะค่าสูงสุดของกระแส 3 เฟสในขณะนั้นๆ จึงถูกนำไปใช้ในการป้องกันเท่านั้น ซึ่งเพียงพอในการนำไปใช้งานกับการควบคุมแบบ V/f ทั่วไป แต่ไม่สามารถนำไปใช้ในการควบคุมสมรรถนะสูงที่จำเป็นจะต้องทราบข้อมูลกระแส 3 เฟสในการควบคุม การพัฒนาประสิทธิภาพของการตรวจจ็กระแส จึงเป็นการเพิ่มเติมให้เกิดความสมบูรณ์ในการใช้งาน ASIPM ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อไปในการพัฒนาอินเวอร์เตอร์อุตสาหกรรม

2. การวิเคราะห์คุณสมบัติการตรวจจ็กระแสของ ASIPM

Version 1,2

ตัวอย่างรูปสัญญาณการขับนำของสวิตช์ตัวล่าง(S)ของเฟสหนึ่งใน 1 คาบการสวิตช์เป็นดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 รูปสัญญาณขับนำสวิตช์ตัวล่าง ของเฟสหนึ่งๆ

โดยที่เวกเตอร์แรงดันของอินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 5 ที่ใช้ในการสวิตช์ประกอบด้วยเวกเตอร์แรงดันศูนย์(U_0 และ U_7 :Zero Vectors)และเวกเตอร์แรงดันแอคทีฟ($U_0 - U_6$:Active Vectors)จำนวน 2 ตัวซึ่งในที่นี้จะแทนด้วย U_A และ U_B ช่วงเวลาที่ใช้เวกเตอร์แต่ละตัวจะแสดงเป็น t_0, t_7, t_A และ t_B ตามลำดับ ปัญหาในการตรวจจ็กระแสของ 2 Version นี้ จะเกิดขึ้นเมื่อช่วงเวลากลับนำสวิตช์ใน 1/2 คาบการสวิตช์($t_x/2$)น้อยกว่าเวลาหน่วง(t_d)ของสัญญาณ S ของวงจรในรูปที่ 2 ซึ่งจะทำให้เราไม่สามารถตรวจจ็กระแสได้ทัน และทำให้เกิดการขาดตอนของสัญญาณกระแสได้

ในบทความนี้สัญลักษณ์เลข 3 หลักหมายถึงสถานะการสวิตช์ของสวิตช์ในเฟส U, V และ W ตามลำดับ โดย “1” หมายถึง มีการขับนำสวิตช์ตัวบนของเฟสนั้น ส่วน “0” หมายถึงมีการขับนำสวิตช์ตัวล่าง สำหรับการสวิตช์ที่มีลำดับของเวกเตอร์ดังรูปที่ 4 จะได้ว่า

$$T = t_A + t_B + t_0(000) + t_7(111) \quad (1)$$

$$t_0(000) = t_7(111)$$

เมื่อ T คือ คาบการสวิตช์และถ้ากำหนดให้ t_x คือช่วงเวลาที่ขับนำสวิตช์ตัวล่าง จะพบว่า

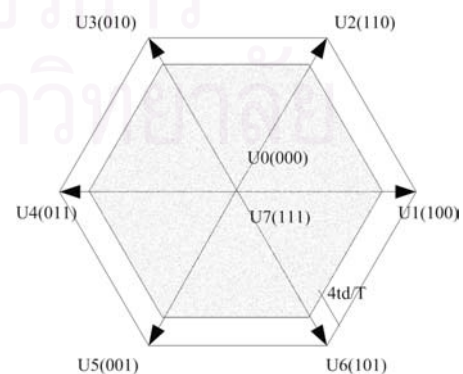
$$t_x = t_A + t_B + t_0(000) \quad (2)$$

เมื่อมองใน 1/2 คาบข้างต้นจะพบว่า ปัญหาการตรวจจ็กระแสจะเกิดขึ้นเมื่อ

$$\frac{t_x}{2} < t_d \quad (3)$$

เราสามารถนำสมการข้างต้นมาพิจารณาคุณสมบัติในการตรวจจ็กระแสของบริเวณบริเวณต่างๆในพื้นที่หกเหลี่ยมในรูปที่ 5 จะได้ผลดังนี้คือ

(ก) บริเวณที่ตรวจจ็กระแสได้โดยใช้เวกเตอร์ศูนย์ U_0



รูปที่ 5 พื้นที่เวกเตอร์แรงดันที่สร้างได้จากอินเวอร์เตอร์และบริเวณที่สามารถตรวจจ็กระแสได้โดยใช้เวกเตอร์ U_0

พื้นที่แรงงานในรูปที่ 5 คือพื้นที่ที่แสดงถึงว่าเฉพาะช่วงเวลาการใช้เวกเตอร์ U_0 เพียงเวกเตอร์เดียวก็สามารถตรวจจذبกระแสได้ กล่าวง่าย ๆ คือ ในพื้นที่แรงงานจะพบว่า $t_0 \geq 2t_D$ ทำให้ตรวจจذبกระแสได้นั่นเอง และในพื้นที่นี้เราสามารถตรวจจذبกระแสได้ครบทั้ง 3 เฟสซึ่งเราอาจเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$t_A + t_B \leq T - 4t_D \quad (4)$$

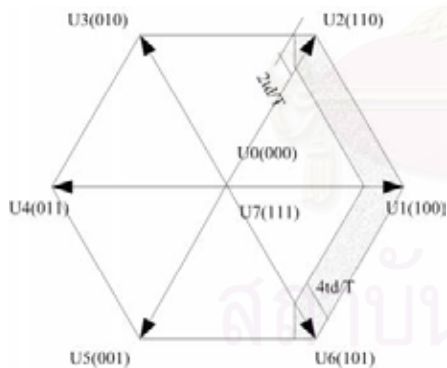
(ข) บริเวณที่ตรวจจذبกระแสได้เมื่อใช้ทั้งเวกเตอร์ศูนย์ U_0 และเวกเตอร์แอกทีฟ U_A หรือ U_B

เราจะอธิบายการตรวจจذبกระแสเฟส U ในแต่ละ Sector ใ้ดังนี้ Sector ที่ 3 และ 4 เวกเตอร์แอกทีฟทั้ง 2 ตัวสามารถช่วยเวกเตอร์ศูนย์ U_0 ตรวจจذبกระแสได้ในช่วงที่ไม่ได้แรงงานของทั้ง 2 Sector ในรูปที่ 5 Sector ที่ 1 และ 6 เวกเตอร์แอกทีฟทั้ง 2 ตัวไม่ช่วยในการตรวจจذبกระแสของเฟส U

Sector ที่ 2 และ 5 จะมีเวกเตอร์แอกทีฟ 1 ตัวที่ช่วยเวกเตอร์ศูนย์ U_0 ในการตรวจจذبกระแสได้ภายใต้เงื่อนไข

$$t_0(000) + t_A \text{ (or } t_B) \geq 2t_D \quad (5)$$

ดังนั้นโดยสรุปแล้วพื้นที่ที่ไม่สามารถตรวจจذبกระแสเฟส U ได้จะเป็นพื้นที่แรงงานในรูปที่ 6



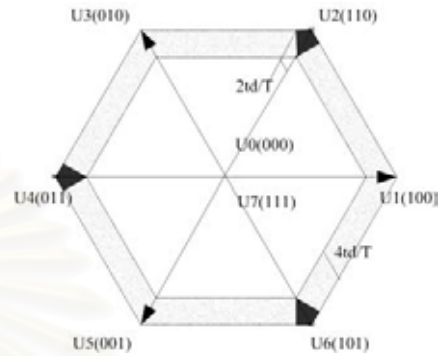
รูปที่ 6 พื้นที่ที่ไม่สามารถตรวจจذبกระแสเฟส U

ในกรณีของเฟส V และ W เราสามารถใช้หลักการเดียวกันนี้ในการหาพื้นที่ปัญหาและพบว่าพื้นที่ที่ไม่สามารถตรวจจذبกระแสของเฟส V และ W จะเลื่อนไปจากของเฟส U เป็นมุม 120° และ 240° (ทวนเข็มนาฬิกา) ตามลำดับ เมื่อนำมาเขียนรวมกันจะเป็นดังรูปที่ 7

พื้นที่ที่แรงงานบางในรูปที่ 7 จะเป็นบริเวณที่เราตรวจจذبกระแสไม่ได้เพียงเฟสเดียว ส่วนที่เหลืออีก 2 เฟสนั้นตรวจจذبได้ เราจึงสามารถใช้ความสัมพันธ์ที่ว่า

$$i_u + i_v + i_w = 0 \quad (6)$$

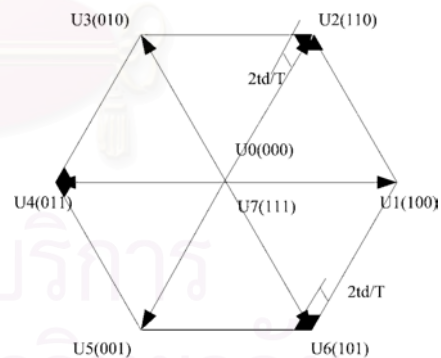
มาช่วยในการคำนวณกระแสในเฟสที่ตรวจจذبไม่ได้ ดังนั้นพื้นที่ที่ไม่สามารถตรวจจذبกระแสได้ครบ 3 เฟสจึงเหลือเฉพาะส่วนที่แรงงานที่บในรูปที่ 7 เท่านั้น



รูปที่ 7 พื้นที่ปัญหาในการตรวจจذبกระแสเฟส U, V และ W

3. การปรับปรุงการตรวจจذبกระแสของ ASIPM Version 1,2

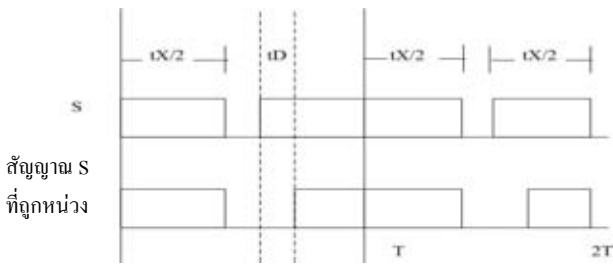
แนวทางหนึ่งในการลดพื้นที่ปัญหาที่ตรวจจذبกระแสได้ไม่ครบ 3 เฟส (ตรวจจذبได้เพียงเฟสเดียว) ทำได้โดยการใช้การมอดูเลตแบบ 2 กิ่ง (2 Arms Modulation) ซึ่งเป็นการสวิตซ์ที่ปรับให้ $t_{r(111)}$ เป็น 0 ซึ่งจะช่วยลดพื้นที่ดังกล่าวไปประมาณครึ่งหนึ่ง ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 พื้นที่ปัญหาในการตรวจจذبกระแสเมื่อใช้การมอดูเลตแบบ 2 กิ่ง

การสวิตซ์วิธีนี้นอกจากจะช่วยลดปัญหาในการตรวจจذبกระแสแล้ว ยังช่วยให้ข้อมูลกระแสที่ได้ใกล้เคียงกระแสจริงมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการสวิตซ์แบบปกติ ณ จุดทำงานเดียวกัน เนื่องจากมีช่วง t_0 ที่นานขึ้นเป็น 2 เท่า นั่นเอง และทำให้จำนวนการสับสวิตซ์ลดลงซึ่งช่วยลด Switching Loss ลงไป 1/3 อีกด้วย

ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อพิจารณาผลของเวลาหน่วงที่มีต่อสัญญาณขับนำสวิตซ์ที่ต่อเนื่องกันใน 2 คาบ ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ผลการหน่วงเวลาเมื่อพิจารณา 2 คาบการสวิตช์ต่อเนื่อง จะพบว่าปัญหาการตรวจจับกระแสจะจริง ๆ เกิดขึ้นเมื่อ

$$\frac{[t_x(n-1) + t_x(n)]}{2} < t_D \quad (7)$$

โดยที่ n หมายถึงลำดับของคาบเวลาการสวิตช์ นั่นคือมีผลของเวลาช้มนำของคาบก่อนหน้า จะทำให้ช่วงเวลาช้มนำสวิตช์โดยรวมยาวนานขึ้นถ้าพิจารณาโดยประมาณว่า

$$t_x(n-1) \approx t_x(n) \quad (8)$$

จะได้ว่าปัญหาการตรวจจับกระแสจะเกิดขึ้นเมื่อ

$$t_x < t_D \quad (9)$$

สมการข้างต้นเมื่อเปรียบเทียบกับสมการที่ (3) จะพบว่าพื้นที่ปัญหาจริงจะลดลงไปจากการพิจารณาในตอนต้น(ดูรูปที่ 8) อีกประมาณครึ่งหนึ่ง

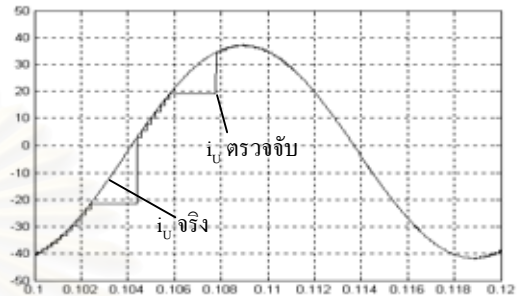
สำหรับพื้นที่ปัญหาที่เหลือนั้นจะพบว่ามิมีขนาดเล็กมากเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนแก้ปัญหารูปที่ 7) ประกอบกับ ASIPM ในปัจจุบันมีการตั้งค่า t_D ให้น้อย พื้นที่ส่วนที่เหลือนี้จึงสามารถละลายได้ในทางปฏิบัติ

4. ผลจำลองการทำงานการตรวจจับกระแสของ ASIPM Version 1,2

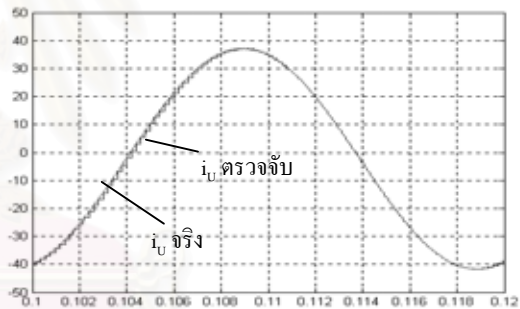
เราทำการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม Matlab โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้คือ ความถี่การสวิตช์(f_{PWM}) 5 kHz, t_D 10 μ s, แรงดันบัลไฟตรง(V_{DC}) 540 V แรงดันคำสั่งเป็นรูปคลื่นไซน์ที่มีค่ายอดเป็น 288 V ความถี่ 50 Hz เวกเตอร์คำสั่งที่กำหนดนี้จะหมุนผ่านพื้นที่ปัญหาของการมอดูเลตแบบปกติ แต่จะไม่ผ่านพื้นที่ปัญหาเมื่อใช้การมอดูเลตแบบ 2 กิ่ง ผลจำลองการทำงานเป็นดังรูปที่ 10 – 12

จากรูปที่ 10 เราสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อเวกเตอร์คำสั่งมีรัศมีหมุนผ่านพื้นที่ปัญหาจะทำให้เกิดการตรวจจับกระแสไม่ได้ และที่เกิดเป็น 2

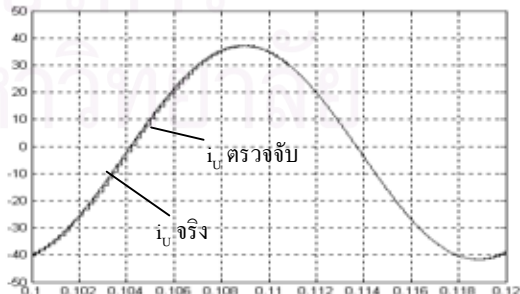
ช่วงก็เพราะผลของคาบต่อเนื่องนั้นทำให้ช่วงที่ตรวจจับไม่ได้ลดลงไปในรูปที่ 11 เมื่อใช้วิธีการหาคะแสเฟสที่พัฒนาขึ้น พบว่าช่วงที่ตรวจจับไม่ได้จะหายไป และในรูปที่ 12 เมื่อใช้การมอดูเลตแบบ 2 กิ่งพบว่าไม่เกิดช่วงที่ตรวจจับกระแสไม่ได้ขึ้น แม้จะไม่ต้องใช้วิธีการหาคะแสเฟสที่พัฒนาขึ้น ซึ่งทั้งหมดเป็นการยืนยันว่าการวิเคราะห์และวิธีการแก้ไขปัญหานี้ที่น่าเสนอถูกต้อง



รูปที่ 10 ผลการตรวจจับกระแสเฟส U เมื่อใช้วิธีการมอดูเลตแบบปกติไม่ใช้วิธีการหาคะแสเฟสที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 11 ผลการตรวจจับกระแสเฟส U เมื่อใช้วิธีการมอดูเลตแบบปกติและใช้วิธีการหาคะแสเฟสที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 12 ผลการตรวจจับกระแสเฟส U เมื่อใช้การมอดูเลตแบบ 2 กิ่งและไม่ใช้วิธีการหาคะแสเฟสที่พัฒนาขึ้น

5. การคำนวณหากระแส 3 เฟสของ ASIPM Version 3

สัญญาณที่ได้จากการตรวจจับกระแสของ ASIPM Version นี้ จะขึ้นอยู่กับรูปแบบการสวิตช์และทิศทางกระแสในขณะนั้น ดังสรุปในตารางที่ 1

ทิศทางกระแส			สถานะการสวิตช์						
i_u	i_v	i_w	100	110	010	011	001	101	000
+	+	-	$-i_w$	$-i_w$	$-i_w$	0	0	0	$-i_w$
+	-	-	$+i_u$	$-i_w$	$-i_w$	0	$-i_v$	$-i_v$	$+i_u$
+	-	+	$-i_v$	0	0	0	$-i_v$	$-i_v$	$-i_v$
-	-	+	$-i_v$	0	$-i_u$	$-i_u$	$+i_w$	$-i_v$	$+i_w$
-	+	+	0	0	$-i_u$	$-i_u$	$-i_u$	0	$-i_u$
-	+	-	$-i_w$	$-i_w$	$+i_v$	$-i_u$	$-i_u$	0	$+i_v$

ตารางที่ 1 กระแสที่ตรวจจับได้ของ ASIPM Version3

จะเห็นได้ว่าช่วงการใช้เวกเตอร์ที่ตรวจจับกระแสได้แน่นอนคือเวกเตอร์ศูนย์ $U_0(000)$ และสังเกตได้ว่ากระแสที่ตรวจจับได้ในช่วงเวลาที่ใช้ U_0 เป็นค่าสูงสุดของกระแสทั้ง 3 เฟสในขณะนั้นๆ และช่วงเวลาที่ใช้เวกเตอร์แอกทีฟก็สามารถให้ข้อมูลกระแสเฟสได้เช่นกัน แต่ข้อมูลที่ได้ อาจเป็นข้อมูลกระแสเฟสเดียวกันกับที่ได้ในช่วงเวลาที่ใช้ U_0 ซึ่งจะทำให้เราได้ข้อมูลกระแสโดยรวมใน 1 คาบการสวิตช์เพียงเฟสเดียว จากสถานะการสวิตช์ของเวกเตอร์แรงดันที่ใช้ใน 1 คาบการสวิตช์ เราสามารถทราบว่าการสวิตช์ที่ตรวจจับเข้ามานั้นเป็นกระแสเฟสใดได้ ดังนี้

ในกรณีที่เวกเตอร์แรงดันคำสั่งอยู่ใน Sector ที่ 1 เวกเตอร์หลักที่ใช้ในการสวิตช์จะประกอบด้วย $U_0(000)$, $U_1(100)$ และ $U_2(110)$ (เราจะไม่ใช้เวกเตอร์ $U_7(111)$ เนื่องจากไม่ให้ข้อมูลของกระแสเฟสใดๆ) สามารถอธิบายได้ด้วยแผนภาพ ดังรูปที่ 13

จะเห็นได้ว่าสถานะการสวิตช์ในแต่ละเฟสของเวกเตอร์ เป็นเสมือนหน้าต่างที่ส่งผ่านค่ากระแสในแต่ละเฟส โดยเริ่มจากเวกเตอร์แอกทีฟ $U_2(110)$ ที่มี "0" เพียงค่าเดียวก่อน ไปยัง เวกเตอร์แอกทีฟ $U_1(100)$ ที่มี "0" 2 ค่าและ $U_0(000)$ ที่มี "0" 3 ค่าตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามจากแผนภาพในรูปที่ 12 มีกรณีที่เรอาจตรวจจับกระแสได้เพียงเฟสเดียว

ในช่วงที่ตรวจจับกระแสได้เฟสเดียวนี้ เราจะนำเสนอวิธีการประมาณค่ากระแส 2 เฟสที่เหลือ โดยอาศัยสมมติฐานที่ว่า กระแส 3 เฟสเป็นรูปคลื่นไซน์ที่สมดุล ซึ่งจะทำได้ประมาณค่ากระแสได้ทั้ง 3 เฟสโดยใช้วงจรกรอง FIR ช่วยในการเลื่อนเฟส [4] ดังนี้

$$y(k) = a_0 x(k) - a_1 x(k-1)$$

$$a_0 = \cos \gamma + \frac{\sin \gamma}{\tan \omega_0 T} \tag{10}$$

$$a_1 = \frac{\sin \gamma}{\sin \omega_0 T}$$

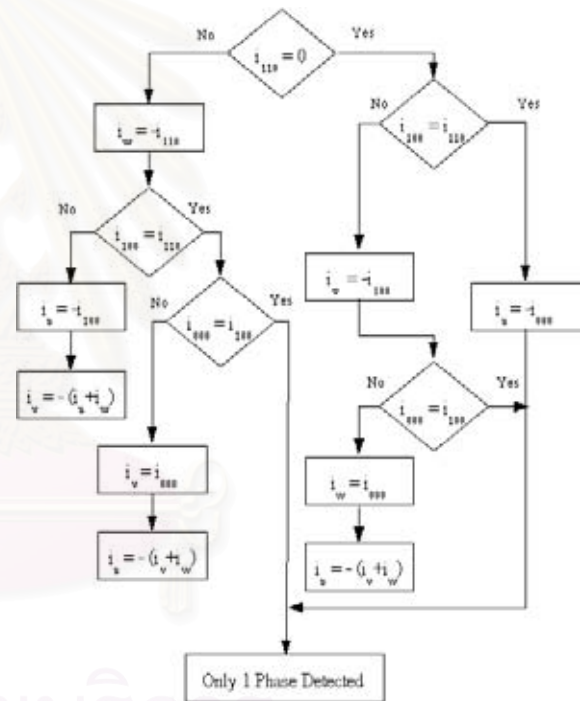
โดย $y(k)$ คือ สัญญาณออกที่ทำมุม γ กับ $x(k)$

$x(k)$ คือ สัญญาณกระแสที่ตรวจจับได้ ณ เวลา k

ω_0 คือ ความถี่หลักมูลของสัญญาณเข้า

T คือ คาบการสุ่ม(Sampling Period)

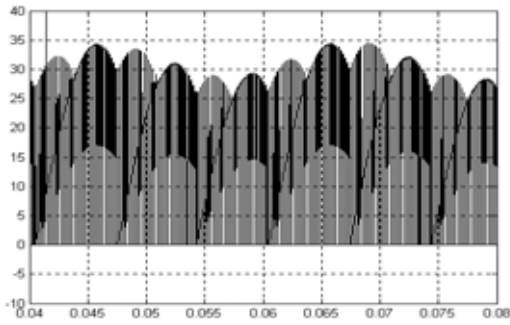
โดยในที่นี้ γ ที่เลือกใช้คือ 120° และ -120° ขึ้นอยู่กับว่าในช่วงที่ตรวจจับได้ไม่ครบ 3 เฟส เราตรวจจับได้กระแสเฟสใด ซึ่งสามารถทราบได้จากการตรวจสอบตามแผนภาพที่ได้กล่าวมาแล้ว



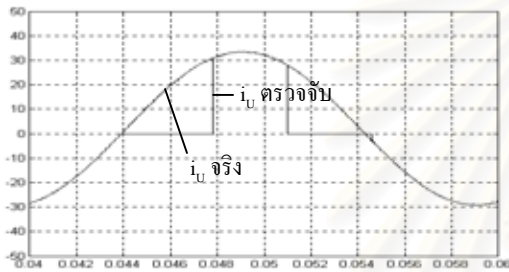
รูปที่ 13 การคำนวณค่ากระแสเฟสของ ASIPM Version 3 เมื่อเวกเตอร์แรงดันคำสั่งอยู่ใน Sector ที่ 1

6. ผลจำลองการทำงานการตรวจจับกระแสของ ASIPM Version 3

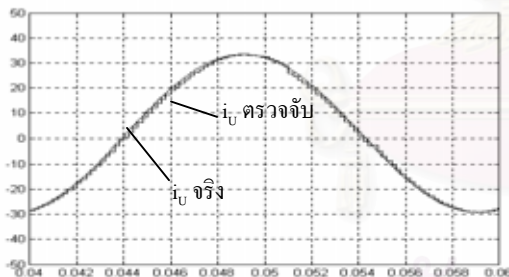
เราทำการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม Matlab กำหนด ค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้คือ ความถี่การสวิตช์(f_{PWM}) 5 kHz, แรงดันบัสไฟตรง(V_{DC}) 540 V แรงดันคำสั่งเป็นรูปคลื่นไซน์ที่มีค่ายอดเป็น 220 V ความถี่ 50 Hz ใช้วิธีการตรวจจับกระแสที่นำเสนอ ได้ผลจำลองการทำงานเป็นดังรูป



รูปที่ 14 รูปคลื่นสัญญาณกระแสที่ตรวจจับได้จากวงจรตรวจจับของ ASIPM Version 3



รูปที่ 15 รูปกระแสเฟส U เมื่อใช้เฉพาะวิธีการตรวจสอบจับกระแสในแผนภาพในรูปที่ 13



รูปที่ 16 รูปกระแสเฟส U เมื่อใช้วิธีการตรวจจับในแผนภาพรูปที่ 13 พร้อมกับการประมาณค่ากระแสด้วยวงจรเลื่อนเฟส

จากรูปที่ 14 จะเห็นได้ว่าสัญญาณกระแสที่ได้จากวงจรตรวจจับของ ASIPM Version 3 จะเป็นรูปคลื่นผสมระหว่างกระแสเฟสต่างๆ โดยเส้น Envelop จะแสดงถึงค่าสูงสุดของกระแส 3 เฟสในขณะนั้นๆ และเมื่อใช้หลักการคำนวณหาค่ากระแสเฟสที่นำเสนอในแผนภาพในรูปที่ 13 เราจะสามารถคำนวณหาค่ากระแสในเฟสหนึ่งๆ ได้เป็นช่วงประมาณ 240° ดังรูปที่ 15 ส่วนรูปที่ 16 นั้นเป็นผลการจำลองเมื่อใช้หลักการประมาณค่ากระแสด้วยการเลื่อนเฟสด้วยวงจรกรองแบบ FIR ด้วย จะเห็นได้ว่าช่วงที่ตรวจจับกระแสได้เพียงเฟสเดียว(ซึ่งไม่ใช่เฟส U) เรายังสามารถประมาณค่ากระแสกลับคืนมาได้ถูกต้อง

7. สรุป

จากการวิเคราะห์พฤติกรรมการทำงานของ ASIPM โดยละเอียดทำให้เราทราบถึงย่านการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่อาจทำให้เกิดปัญหาในการตรวจจับกระแสได้ไม่ครบทั้ง 3 เฟส เรายังได้นำเสนอวิธีการใหม่ในการแก้ปัญหาดังกล่าวสำหรับ ASIPM ทั้ง 3 Version จากผลจำลองการทำงานที่ได้ แสดงให้เห็นว่าผลการวิเคราะห์คุณสมบัติการตรวจจับกระแสของ ASIPM Version ต่างๆ มีความถูกต้องและวิธีการตรวจจับที่นำเสนอสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการตรวจจับกระแสของ ASIPM ให้ดีขึ้นได้จริง

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Eric R. Motto , “Application Specific Intelligent Power Modules – A Novel Approach to System Integration in Low Power Drives” , Powerex Inc.
- [2] K.H. Hussein , G. Majumdar , M. Iwasaki , T. Oota ,M. Fukunaga , and H. Iwamoto , “1200 V Compact Subsystem ASIPM for Low-Power Inverters” , Proc. of IPEC – Tokyo 2000, pp. 513-518
- [3] Bin Huo , Tom Flint and FinBarr Moynihan , “Improved Single Current Sensing Method and Its Realization Based on ADMCF341 DSP Controller” , Analog Devices Inc.
- [4] Walter A. Elmore, “Pilot Protective Relaying” , Marcel Dekker Inc. , 2000.



ชินภัทร เทธิชัยประยูร จบการศึกษาระดับปริญญาตรี (เกียรตินิยมอันดับ 1) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในปีการศึกษา 2544 ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาโท

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สมบูรณ์ แสงวงศ์วัฒนชัย จบการศึกษาระดับปริญญาตรี โท และเอกสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าจากมหาวิทยาลัย NAGOYA ประเทศญี่ปุ่น ในปี พ.ศ. 2528, 2530, และ 2533 ตามลำดับ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ที่ ศธ. 0514.4.3/ คิ 1๗

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
จ.ขอนแก่น 40002

16 สิงหาคม 2547

เรื่อง ผลการพิจารณาบทความ

เรียน คุณชินภัทร เหริชญประยูร (Ref. No. PE 18)

ตามที่ท่านได้ส่งบทความ เรื่อง Practical Limitation and Its Solution in Motor Currents Retrieval Using Application Specific Intelligent Power Modules

เพื่อเข้าร่วมประชุมวิชาการทางไฟฟ้า ครั้งที่ 27 (EECON-27) ในระหว่าง วันที่ 11-12 พฤศจิกายน 2547 ณ โรงแรมโซฟิเทล ราชา ออคิด ขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น นั้น

ทางคณะกรรมการจัดการประชุมวิชาการทางไฟฟ้า ครั้งที่ 27 (EECON-27) ได้พิจารณาแล้วว่บทความของท่าน

ผ่านการพิจารณา ให้ตีพิมพ์ และนำเสนอในการประชุมวิชาการทางไฟฟ้า ครั้งที่ 27 (EECON- 27) โดยขอให้ท่านโปรดปรับปรุงบทความ ตามเอกสารที่แนบมาด้วยนี้ และส่งบทความฉบับสมบูรณ์ พร้อมทั้ง File (Microsoft Office XP) ภายในวันที่ 27 สิงหาคม 2547

ไม่ผ่านการพิจารณา

ทางคณะกรรมการจัดการประชุมวิชาการทางไฟฟ้า ครั้งที่ 27 (EECON-27) ใคร่ขอขอบคุณที่ท่านได้ร่วมส่งบทความ มา ณ. ที่นี้

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

ขอแสดงความนับถือ

(รองศาสตราจารย์ ดร.อภิรัฐ ศิริธราธิวัตร)

ประธานคณะกรรมการจัดการประชุม EECON-27

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

โทรศัพท์.0-4320-2353

โทรสาร. 0-4320-2836

ปีพุทธศักราช ๒๕๔๗ ครบรอบ ๔๐ ปี มหาวิทยาลัยขอนแก่น

"๔๐ ปี มข. ก้าวไกลเพื่อสร้างสรรค์ มุ่งเน้นเพื่อก้าวไกล มหาวิทยาลัยเพื่อชุมชน"

ข้อจำกัดทางปฏิบัติและแนวทางแก้ไข ในการคำนวณค่านำกระแสมอเตอร์เมื่อใช้โมดูลสวิทช์กำลังอัจฉริยะเฉพาะงาน Practical Limitation and Its Solution in Motor Currents Retrieval Using Application Specific Intelligent Power Modules

ชินภัทร เหริยญประยูร และสมบูรณ์ แสงวงศ์วณิชย์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถ.พญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทร 0-2218-6534 E-mail: somboona@netserv.chula.ac.th

บทคัดย่อ

โมดูลสวิทช์กำลังอัจฉริยะเฉพาะงาน (ASIPM) เป็นชุดสวิทช์กำลังที่มีการติดตั้งวงจรตรวจจับกระแสไว้ภายใน ทำให้ผู้ใช้งานไม่จำเป็นต้องติดตั้งวงจรตรวจจับกระแสภายนอก ซึ่งช่วยลดการกระจายค่าใช้จ่ายและพื้นที่ติดตั้ง แต่ปัญหาสำคัญของวงจรตรวจจับกระแสภายในก็คือสัญญาณกระแสตรวจจับไม่ใช่กระแสเฟสโดยตรง และ ASIPM บางรุ่นได้ติดตั้งวงจรตรวจจับกระแสผลรวมของกระแสที่ไหลผ่านสวิทช์ไงานตัวล่างของทั้ง 3 เฟสเพียงวงจรเดียว จำเป็นที่จะต้องใช้อัลกอริทึมเพื่อคำนวณกระแสเฟสจากค่ากระแสที่ตรวจจับได้จาก ASIPM อีกทอดหนึ่ง บทความวิจัยนี้ได้วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเฟสกับกระแสที่ตรวจจับได้ และพัฒนาอัลกอริทึมในการคำนวณกระแสเฟสจากสัญญาณกระแสตรวจจับของ ASIPM พร้อมนำเสนอแนวทางในการใช้งานกับอุปกรณ์จริง โดยผลการทดลองที่ได้ยืนยันความถูกต้องของทฤษฎีที่นำเสนอ

คำสำคัญ : การตรวจจับกระแส, โมดูลสวิทช์กำลังอัจฉริยะ

Abstract

Application Specific Intelligent Power Modules (ASIPM) are power modules which integrate current sensors inside. They create opportunities to eliminate external current sensors, which in turn allows of lower prices and smaller size of implementation. However, the integrated current sensors do not offer the exact phase current data, and some versions of ASIPM have only one current sensors to detect the total current flowing through the three active switches. An algorithm to retrieve the phase current information from the current signal of ASIPM is therefore needed. This article analyzes the relationship between the detected current and the real phase currents, and presents a new algorithm to rebuild the motor current from the sensor current signals of ASIPM together with some solutions to implementation problems. Experimental results are given to confirm the feasibility of the proposed algorithms.

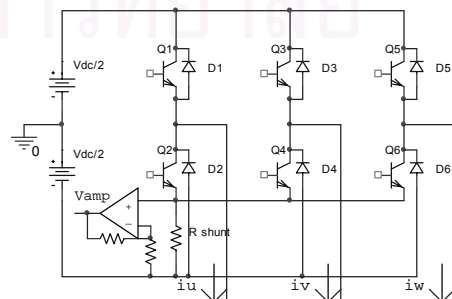
Keywords : Current Detection, Intelligent Power Modules

1. บทนำ

โมดูลสวิทช์กำลังอัจฉริยะเฉพาะงานถูกสร้างขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการของอินเวอร์เตอร์สำหรับมอเตอร์ขนาดเล็ก (100 W – 2.2 kW) ซึ่งปัจจัยที่มีความสำคัญคือเรื่องราคาและพื้นที่ติดตั้ง ASIPM เป็นโมดูลสวิทช์กำลังที่มีวงจรตรวจจับกระแส ส่วนป้องกันความคิดพอง และวงจรขับนำสวิทช์ติดตั้งพร้อมอยู่ภายใน ทำให้ประหยัดอุปกรณ์หรือวงจรรอบข้างของส่วนสวิทช์กำลังลงได้ อินเวอร์เตอร์จึงมีขนาดเล็กและราคาต้นทุนที่ต่ำลงด้วย [1]

แต่ปัญหาที่สำคัญในการใช้งาน ASIPM ก็คือเรื่องของวงจรตรวจจับกระแสภายใน ซึ่งถึงแม้ว่าจะช่วยลดพื้นที่ติดตั้งและค่าใช้จ่ายเมื่อเทียบกับการใช้วงจรตรวจจับกระแสภายนอก แต่ประสิทธิภาพการตรวจจับกระแสที่ได้จะมีความด้อยกว่า เนื่องจากลักษณะของวงจรก่อให้เกิดข้อจำกัดในการตรวจจับกระแสทั้ง 3 เฟส ทำให้สัญญาณกระแสที่ได้ไม่ใช่กระแสเฟสโดยตรง จำเป็นที่จะต้องใช้อัลกอริทึมเพื่อคำนวณกระแสเฟสจากค่ากระแสที่ตรวจจับได้จาก ASIPM อีกทอดหนึ่ง บทความนี้จะพิจารณาเฉพาะ ASIPM ที่มีรูปแบบการตรวจจับกระแสดังรูปที่ 1 โดยจะใช้คุณลักษณะการตรวจจับกระแสและอัลกอริทึมที่นำเสนอในบทความก่อน [5] เป็นพื้นฐานในการสร้างระบบและจะนำเสนอแนวทางการแก้ปัญหาที่เกิดจากการสุ่มสัญญาณและเวลาประวิงเมื่อใช้กับอุปกรณ์จริง เพื่อให้อัลกอริทึมที่นำเสนอใช้งานได้จริงอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจจับกระแสของ ASIPM ให้สูงขึ้นจนสามารถนำไปใช้ในงานควบคุมที่มีความซับซ้อนมากขึ้นได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาอินเวอร์เตอร์อุตสาหกรรมต่อไป

2. คุณลักษณะการตรวจจับกระแสของ ASIPM



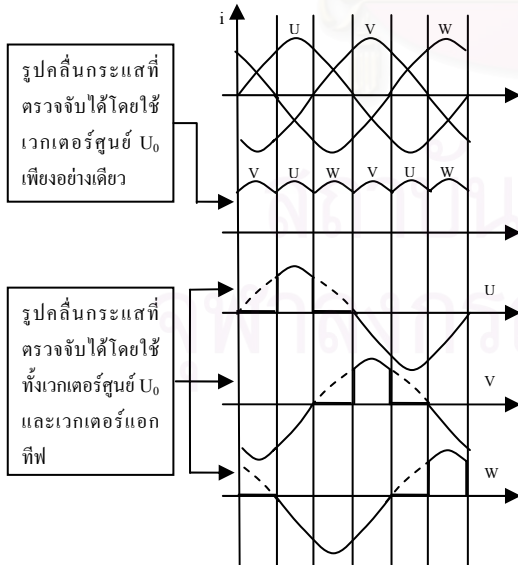
รูปที่ 1 โครงสร้างและรูปแบบการตรวจจับกระแสของ ASIPM ที่พิจารณา

จากรูปที่ 1 กระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์ของสวิตช์ตัวล่างของทั้ง 3 เฟสจะรวมกันเป็นกระแสที่ไหลผ่านความต้านทานขั้วต่อ สะท้อนเป็นค่าแรงดันออกของวงจรตรวจจับ สัญญาณกระแสที่ได้จะเป็นค่ากระแสเฟสใดขึ้นอยู่กับรูปแบบการสวิตช์และทิศทางกระแสไหลของกระแสในขณะนั้น ดังสรุปในตารางที่ 1 โดยสัญลักษณ์เลข 3 หลักหมายถึงสถานะการสวิตช์ของสวิตช์ในเฟส U, V และ W ตามลำดับ โดย “1” หมายถึงมีการขั้วนำสวิตช์ตัวบนของเฟสนั้น ส่วน “0” หมายถึงมีการขั้วนำสวิตช์ตัวล่างของเฟสนั้น

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเฟสกับกระแสที่ตรวจจับได้ของ ASIPM ในเงื่อนไขต่าง ๆ

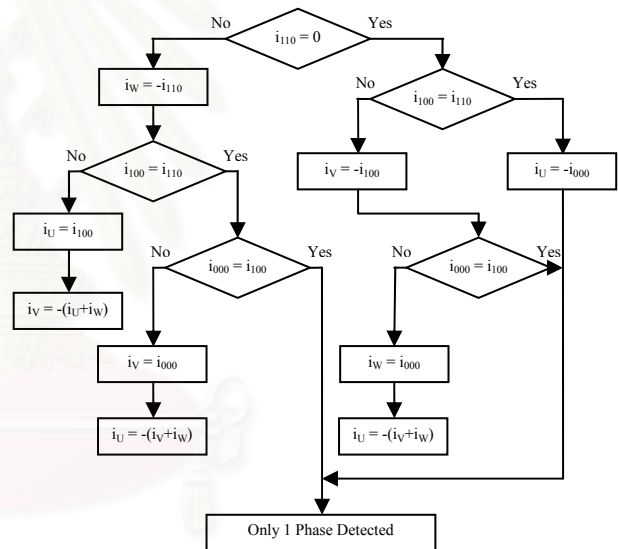
ทิศทางกระแส (i)	สถานะการสวิตช์										
	U	V	W	100	110	010	011	001	101	000	111
+	-	+	$-i_v$	0	0	0	$-i_v$	$-i_v$	$-i_v$	0	0
+	-	-	i_u	$-i_w$	$-i_w$	0	$-i_v$	$-i_v$	i_u	0	0
+	+	-	$-i_w$	$-i_w$	$-i_w$	0	0	0	$-i_w$	0	0
-	+	-	$-i_w$	$-i_w$	i_v	$-i_u$	$-i_u$	0	i_v	0	0
-	+	+	0	0	$-i_u$	$-i_u$	$-i_u$	0	$-i_u$	0	0
-	-	+	$-i_v$	0	$-i_u$	$-i_u$	i_w	$-i_v$	i_w	0	0

3. อัลกอริทึมในการคำนวณกระแสเฟสของ ASIPM



รูปที่ 2 รูปคลื่นกระแสที่ตรวจจับได้เมื่อใช้เวกเตอร์แบบต่าง ๆ

จากข้อมูลในตารางที่ 1 เราสามารถแยกข้อมูลกระแสเฟส U, V และ W ที่ปะปนกันอยู่ได้ดังแสดงในรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นกระแสแต่ละเฟสไม่สมบูรณ์เพราะมีช่วงเวลาที่ตรวจจับกระแสได้เพียงเฟสเดียว อัลกอริทึมในการหากระแส 3 เฟสจากสัญญาณกระแสตรวจจับเพื่อให้ได้กระแสแต่ละเฟสดังรูปที่ 2 สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้ พิจารณาจากสถานะการสวิตช์ของเวกเตอร์แรงดันที่ใช้ใน 1 คาบการสวิตช์ เราสามารถทราบได้ว่าสัญญาณกระแสที่ตรวจจับเข้ามาในขณะนั้นเป็นกระแสเฟสใด เช่น ในกรณีที่เวกเตอร์แรงดันคำสั่งอยู่ในเซกเตอร์ที่ 1 เวกเตอร์หลักที่ใช้ในการสวิตช์จะประกอบด้วย $U_0(000)$, $U_1(100)$ และ $U_2(110)$ (เราจะไม่ใช่เวกเตอร์ $U_7(111)$ เนื่องจากไม่ให้ข้อมูลของกระแสเฟสใด ๆ) ขั้นตอนการหาค่ากระแสเฟสสามารถอธิบายได้ด้วยแผนภาพในรูปที่ 3 不管怎样ก็ตามจากแผนภาพในรูปที่ 3 จะมีกรณีที่เรารวจับกระแสได้เพียงเฟสเดียวเกิดขึ้นซึ่งไม่ว่าจะใช้วิธีการใดก็ไม่สามารถจะหาค่าจริงของกระแสในเฟสที่เหลืออีก 2 เฟสได้ ซึ่งก็คือช่วงที่กระแสเฟสขาดหายไปนรูปที่ 2 นั่นเอง



รูปที่ 3 การคำนวณค่ากระแสเฟสของ ASIPM เมื่อเวกเตอร์คำสั่งอยู่ในเซกเตอร์ที่ 1

ในช่วงที่ตรวจจับกระแสได้เฟสเดียวนี้ เราจะนำเสนอวิธีการประมาณค่ากระแส 2 เฟสที่เหลือ โดยอาศัยสมมติฐานที่ว่าในช่วงเวลาสั้นๆ ที่เรากำลังพิจารณานั้น กระแส 3 เฟสเป็นรูปคลื่นไซน์ที่สมดุล ซึ่งจะทำให้สามารถประมาณค่ากระแสได้โดยใช้วงจรกรอง FIR ช่วยในการเลื่อนเฟส [4] ดังนี้

$$y(n) = a_0 x(n) - a_1 x(n-1) \quad (1)$$

$$a_0 = \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + \frac{\sin\left(\frac{2\pi}{3}\right)}{\tan \omega_0 T}, \quad a_1 = \frac{\sin\left(\frac{2\pi}{3}\right)}{\sin \omega_0 T}$$

โดยที่ $y(n)$ คือสัญญาณออกที่ทำมุม 120° กับ $x(n)$
 $x(n)$ คือสัญญาณกระแสที่ตรวจจับได้ ณ เวลา nT
 ω_0 คือความถี่หลักมูลของสัญญาณเข้า
 T คือคาบการสวิตช์

กระแสอีกเฟสที่เหลือเราสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ผลรวมกระแส 3 เฟสเท่ากับศูนย์

4. การนำอัลกอริทึมไปใช้กับอุปกรณ์จริง

เนื่องจากอัลกอริทึมในการคำนวณกระแสเฟสที่นำเสนอใช้ข้อมูลกระแสจากทุกเวกเตอร์ใน 1 คาบการสวิตช์ยกเว้น U_0 (111) เราจึงต้องทำการสุ่มค่าทั้งหมด 3 ครั้งในแต่ละคาบการสวิตช์ รูปที่ 4 แสดงตำแหน่งในการสุ่มค่าเมื่อเวกเตอร์คำสั่งอยู่ในเซกเตอร์ที่ 1 และสัญญาณชับนำสวิตช์เป็นแบบอุดมคติไม่มีเวลาประวิง (deadtime)

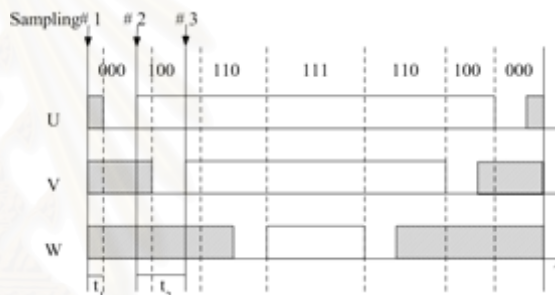


รูปที่ 4 ตำแหน่งในการสุ่มค่าเมื่อเวกเตอร์คำสั่งอยู่ในเซกเตอร์ที่ 1 และสัญญาณชับนำสวิตช์เมื่อไม่มีเวลาประวิงใน 1 คาบการสวิตช์

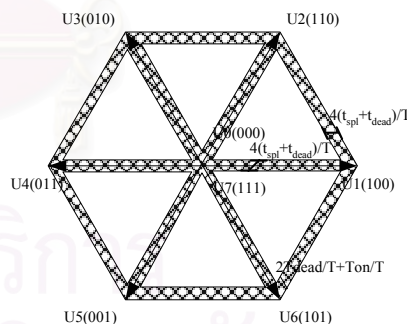
การสุ่มค่าในตำแหน่งดังกล่าวมีข้อดีคือ สามารถหลีกเลี่ยงสภาวะชั่วคราวของการเริ่มชับนำสวิตช์ตัวล่างซึ่งจะสร้างความผิดพลาดต่อสัญญาณกระแสตรวจจับของ ASIPM และสามารถลดผลความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถ่ายของวงจรตรวจจับกระแสในขณะที่กระแสมีค่าน้อย ๆ ได้ แต่ในการใช้งานจริงเราจำเป็นต้องใส่เวลาประวิงให้กับสัญญาณชับนำ (โดย CPU รุ่นที่ทำการทดลองจะทำการลดเวลาการชับนำสวิตช์ตัวล่างลงและจะรักษาช่วงเวลาชับนำสวิตช์ตัวบนไว้) ดังแสดงในรูปที่ 5 และยังคงคำนึงถึงช่วงเวลาที่ต้องใช้เพื่อสุ่มและคงค่า (Sampling and Hold Time : t_{spl}) ของวงจร A/D อีกด้วย ทำให้ต้องพิจารณาเงื่อนไขเหล่านี้เพิ่มเติมเพื่อให้การสุ่มค่าได้ค่ากระแสที่ถูกต้อง เงื่อนไขข้อจำกัดในการสุ่มค่ากระแสที่ตำแหน่งเวกเตอร์ศูนย์ U_0 (000) คือ ครั้งหนึ่งของช่วงเวลาชับนำสวิตช์ตัวล่างที่มีค่าน้อยที่สุด (t_1) จะต้องมีค่ามากกว่า t_{spl} และเงื่อนไขข้อจำกัดในการสุ่มค่ากระแสที่ตำแหน่งเวกเตอร์แอกทีฟ $U_1 - U_6$ คือ ครั้งหนึ่งของช่วงเวลาชับนำเวกเตอร์แอกทีฟ (t_2) จะต้องมีค่ามากกว่า t_{spl} รวมกับ t_{dead} ดังแสดงในรูปที่ 5 และสรุปเขียนเป็นอสมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned} t_1 &> t_{spl} \\ t_2 &> t_{spl} + t_{dead} \end{aligned} \quad (2)$$

จากผลการวิเคราะห์ข้างต้น พบว่าจะเกิดช่วงที่ตรวจจับกระแสไม่ได้ถ้าช่วงเวลาชับนำของเวกเตอร์แอกทีฟหรือเวกเตอร์ศูนย์น้อยเกินไปกว่าช่วงเวลาที่ใช้ในการสุ่มค่ากระแส เราสามารถเขียนพื้นที่ปัญหาในการตรวจจับกระแสของ ASIPM บนพื้นที่หกเหลี่ยมของการสร้างแรงดันของอินเวอร์เตอร์ได้ดังรูปที่ 6 ในบริเวณพื้นที่ปัญหานี้เราไม่สามารถใช้อัลกอริทึมที่นำเสนอมาคำนวณกระแสเฟสได้เนื่องจากอัลกอริทึมดังกล่าวจำเป็นต้องทราบข้อมูลกระแสของทุกเวกเตอร์ที่ถูกต้อง แต่เนื่องจากพื้นที่ปัญหาดังกล่าวแบ่งออกเป็น 6 ช่วงเล็ก ๆ เมื่อเทียบกับขนาดของแต่ละเซกเตอร์ของพื้นที่หกเหลี่ยม เมื่อเวกเตอร์คำสั่งเริ่มผ่านพื้นที่นี้เราอาจใช้ข้อมูลกระแส 3 เฟสที่คำนวณไว้ในคาบการสวิตช์ก่อนหน้ามาประมาณกระแส 3 เฟสในคาบการสวิตช์ปัจจุบันได้โดยใช้สมมติฐานเดิมคือกระแส 3 เฟสเป็นรูปคลื่นไซน์สมดุล เราจะใช้การประมาณค่ากระแส 3 เฟสนี้จนกระทั่งเวกเตอร์คำสั่งผ่านบริเวณพื้นที่ปัญหาไป จากนั้นเราจะใช้อัลกอริทึมในการคำนวณค่ากระแสเฟสตามเดิม



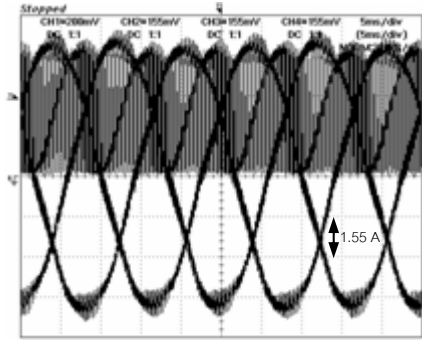
รูปที่ 5 ช่วงเวลาที่จำเป็นในการสุ่มค่าที่ตำแหน่งเวกเตอร์ศูนย์และเวกเตอร์แอกทีฟในกรณีที่มีเวลาประวิง



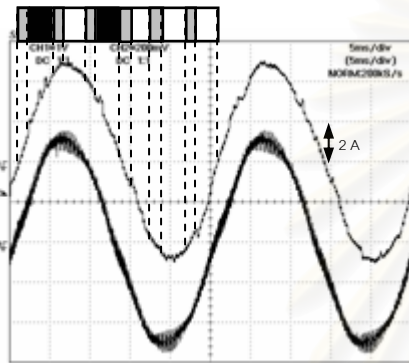
รูปที่ 6 พื้นที่ปัญหาในการตรวจจับกระแสของ ASIPM

5. ผลการทดลอง

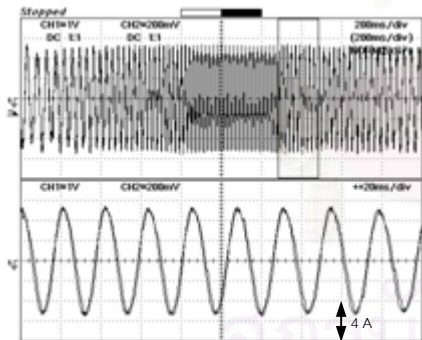
จากการทดลองโดยใช้มอเตอร์ขนาด 2.2 kW ควบคุมแบบ v/f และใช้ความถี่การสวิตช์ 4 kHz ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 7, 8 และ 9 รูปที่ 7 แสดงสัญญาณกระแสตรวจจับของ ASIPM เทียบกับกระแส 3 เฟสขณะชับมอเตอร์ที่ความถี่ 40 Hz ซึ่งจะเห็นได้ว่า สัญญาณกระแสตรวจจับเป็นสัญญาณผสมของกระแส 3 เฟสและมีค่าเป็นบวกเสมอ เนื่องจากมีการตรวจจับเฉพาะกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์ไวงานของทั้ง 3 เฟส



รูปที่ 7 สัญญาณกระแสตรวจจับเทียบกับกระแส 3 เฟส ขณะขับมอเตอร์ที่ความเร็ว 40 Hz



รูปที่ 8 สัญญาณกระแสเฟส U ที่คำนวณได้เทียบกับกระแสเฟส U จริง ขณะขับมอเตอร์ที่ความเร็ว 40 Hz



รูปที่ 9 สัญญาณกระแสเฟส U ที่คำนวณได้เทียบกับกระแสเฟส U จริง ขณะเร่งและลดความเร็วในช่วง 20 – 50 Hz

รูปที่ 8 แสดงสัญญาณกระแสเฟส U ที่คำนวณได้เทียบกับกระแสเฟส U จริงขณะขับมอเตอร์ที่ความเร็ว 40 Hz ช่วงเวลาที่เร่งเข้า (■) แสดงถึงช่วงที่ทำการคำนวณกระแสเฟส U จากข้อมูลกระแสเฟส V ด้วยวงจรเลื่อนเฟส จะเห็นได้ว่าค่ากระแสที่คำนวณด้วยวิธีนี้มีค่าใกล้เคียงกับกระแสเฟสจริง ส่วนในช่วงเวลาที่เร่งบาง (□) ของรูปที่ 8 เป็นช่วงที่ทำการประมาณกระแสเฟสของการสวิตช์ปัจจุบันด้วยข้อมูลกระแสเฟสของการสวิตช์ก่อนหน้า จะเห็นได้ว่ากระแสเฟสที่ได้นั้นใกล้เคียงกับกระแสเฟสจริงเช่นกัน รูปที่ 9 แสดงสัญญาณกระแสเฟส U ที่คำนวณได้

เทียบกับกระแสเฟส U จริง ขณะเร่งและลดความเร็วในช่วง 20 – 50 Hz พบว่ากระแสเฟสคำนวณได้สามารถเปลี่ยนแปลงตามกระแสเฟสจริงได้อย่างถูกต้อง

6. สรุป

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติของการตรวจจับกระแสของ ASIPM ทำให้เราทราบถึงปัญหาในการคำนวณค่ากระแสเฟสจากค่ากระแสที่ได้จาก ASIPM และได้นำเสนอวิธีการเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว ในการสร้างและทดสอบกับอุปกรณ์จริงได้วิเคราะห์ผลของการสุ่มสัญญาณของวงจร A/D และผลของเวลาประวิงประกอบเพิ่มเติมด้วย พร้อมทั้งนำเสนอแนวทางเพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอมีความถูกต้องและสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของการตรวจจับกระแสของ ASIPM ให้ดีขึ้นได้จริง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Eric R. Motto, "Application Specific Intelligent Power Modules – A Novel Approach to System Integration in Low Power Drives", Proc. of Power Systems World Conference, 1998.
- [2] Francesco Parasiliti, Roberto Petrella, Macro Tursini, "Low Cost Phase Current Sensing in DSP Based AC Drives", Proc. of ISIE'99 – Bled, Slovenia, 1999, pp. 1284 – 1289.
- [3] Sibaprasad Chakrabarti, Thomas M. Jahns, Robert D. Lorenz, "A Current Reconstruction Algorithm for Three-Phase Inverters Using Integrated Current Sensors in Low-Side Switches", Proc. of CPES – Blacksburg, Virginia, 2003, pp. 925 – 932.
- [4] Walter A. Elmore, "Pilot Protective Relaying", Marcel Dekker Inc., 2000.
- [5] ชินภัทร เจริญประยูร และสมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์, "การตรวจจับกระแสของมอเตอร์ด้วยไมโครสวิตช์กำลังอัจฉริยะเฉพาะงาน", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 26, 2003, หน้า 630 – 635



ชินภัทร เจริญประยูร จบการศึกษาระดับปริญญาตรี (เกียรตินิยมอันดับ 1) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีในปีการศึกษา 2544 ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์ จบการศึกษาระดับปริญญาตรี โทและเอกสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าจากมหาวิทยาลัย NAGOYA ประเทศญี่ปุ่น ในปี พ.ศ. 2528, 2530, และ 2533 ตามลำดับ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

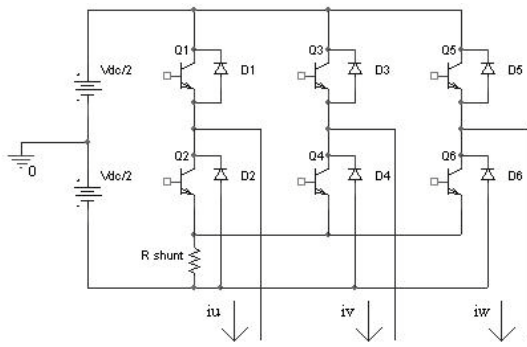
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ชินภัทร เหริญญประยูร เกิดเมื่อวันที่ 24 สิงหาคม พ.ศ. 2523 สำเร็จ การศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับ 1) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีในปีการศึกษา 2544 และได้เข้าศึกษาต่อใน หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยใน ปีการศึกษา 2545

ผลงานวิจัย

1. ชินภัทร เหริญญประยูร และสมบุญณ์ แสงวงศ์วานิชย์ “การตรวจจับกระแสของมอเตอร์ด้วย ไมครูลสวิตซ์กำลังอัจฉริยะเฉพาะงาน” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 26, 2546 : หน้า 630 – 635
2. ชินภัทร เหริญญประยูร และสมบุญณ์ แสงวงศ์วานิชย์ “ข้อจำกัดทางปฏิบัติและแนวทางแก้ไขใน การคำนวณค่าน้ำกระแสสมอเตอร์เมื่อใช้ไมครูลสวิตซ์กำลังอัจฉริยะเฉพาะงาน” การประชุมวิชาการ ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27, 2547

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3 โครงสร้างและการตรวจจ็กระแสของ ASIPM Version3

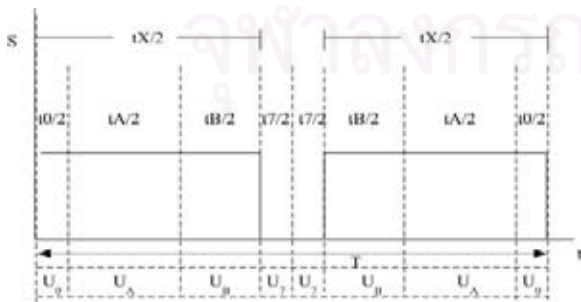
กระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์ของสวิตช์ตัวล่างของทั้ง 3 เฟสจะรวมกันเป็นกระแสที่ไหลผ่านความต้านทานขั้วต่อ สะท้อนเป็นค่าแรงดันออกของวงจรตรวจจ็ สัญญาณกระแสที่ตรวจจ็ได้จะมีค่าเป็นบวกเสมอ และโดยทั่วไปค่า Envelop ของสัญญาณจะแสดงถึงค่ากระแสที่สูงสุดของกระแสทั้ง 3 เฟสในขณะนั้นๆ

อย่างไรก็ตามตัวตรวจจ็กระแสในแต่ละ Version ยังมีความไม่สมบูรณ์ในการใช้งานเกิดขึ้น โดย Version 1,2 จะไม่สามารถตรวจจ็กระแสได้ในบางย่านของแรงดันคำสั่ง ส่วน Version 3 สามารถตรวจจ็กระแสได้เฉพาะค่าสูงสุดของกระแส 3 เฟสในขณะนั้นๆ จึงถูกนำไปใช้ในการป้องกันเท่านั้น ซึ่งเพียงพอในการนำไปใช้งานกับการควบคุมแบบ V/f ทั่วไป แต่ไม่สามารถนำไปใช้ในการควบคุมสมรรถนะสูงที่จำเป็นจะต้องทราบข้อมูลกระแส 3 เฟสในการควบคุม การพัฒนาประสิทธิภาพของการตรวจจ็กระแส จึงเป็นการเพิ่มเติมให้เกิดความสมบูรณ์ในการใช้งาน ASIPM ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อไปในการพัฒนาอินเวอร์เตอร์อุตสาหกรรม

2. การวิเคราะห์คุณสมบัติการตรวจจ็กระแสของ ASIPM

Version 1,2

ตัวอย่างรูปสัญญาณการขั้วนำของสวิตช์ตัวล่าง(S)ของเฟสหนึ่งใน 1 คาบการสวิตช์เป็นดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 รูปสัญญาณขั้วนำสวิตช์ตัวล่าง ของเฟสหนึ่งๆ

โดยที่เวกเตอร์แรงดันของอินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 5 ที่ใช้ในการสวิตช์ประกอบด้วยเวกเตอร์แรงดันศูนย์(U_0 และ U_7 :Zero Vectors)และเวกเตอร์แรงดันแอคทีฟ($U_0 - U_6$:Active Vectors)จำนวน 2 ตัวซึ่งในที่นี้จะแทนด้วย U_A และ U_B ช่วงเวลาที่ใช้เวกเตอร์แต่ละตัวจะแสดงเป็น t_0, t_7, t_A และ t_B ตามลำดับ ปัญหาในการตรวจจ็กระแสของ 2 Version นี้ จะเกิดขึ้นเมื่อช่วงเวลากลับนำสวิตช์ใน 1/2 คาบการสวิตช์($t_x/2$)น้อยกว่าเวลาหน่วง(t_d)ของสัญญาณ S ของวงจรในรูปที่ 2 ซึ่งจะทำให้เราไม่สามารถตรวจจ็กระแสได้ทัน และทำให้เกิดการขาดตอนของสัญญาณกระแสได้

ในบทความนี้สัญลักษณ์เลข 3 หลักหมายถึงสถานะการสวิตช์ของสวิตช์ในเฟส U, V และ W ตามลำดับ โดย “1” หมายถึง มีการขั้วนำสวิตช์ตัวบนของเฟสนั้น ส่วน “0” หมายถึงมีการขั้วนำสวิตช์ตัวล่าง สำหรับการสวิตช์ที่มีลำดับของเวกเตอร์ดังรูปที่ 4 จะได้ว่า

$$T = t_A + t_B + t_0(000) + t_7(111) \quad (1)$$

$$t_0(000) = t_7(111)$$

เมื่อ T คือ คาบการสวิตช์และถ้ากำหนดให้ t_x คือช่วงเวลาที่ขั้วนำสวิตช์ตัวล่าง จะพบว่า

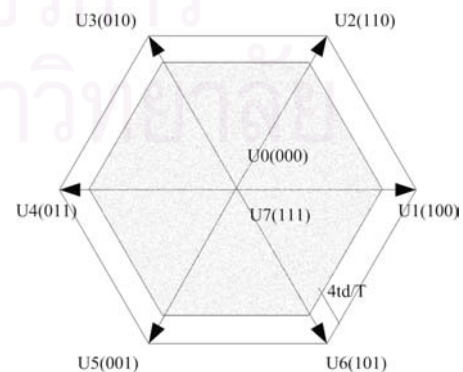
$$t_x = t_A + t_B + t_0(000) \quad (2)$$

เมื่อมองใน 1/2 คาบข้างต้นจะพบว่า ปัญหาการตรวจจ็กระแสจะเกิดขึ้นเมื่อ

$$\frac{t_x}{2} < t_d \quad (3)$$

เราสามารถนำสมการข้างต้นมาพิจารณาคุณสมบัติในการตรวจจ็กระแสของบริเวณบริเวณต่างๆในพื้นที่หกเหลี่ยมในรูปที่ 5 จะได้ผลดังนี้คือ

(ก) บริเวณที่ตรวจจ็กระแสได้โดยใช้เวกเตอร์ศูนย์ U_0



รูปที่ 5 พื้นที่เวกเตอร์แรงดันที่สร้างได้จากอินเวอร์เตอร์และบริเวณที่สามารถตรวจจ็กระแสได้โดยใช้เวกเตอร์ U_0

พื้นที่แรงงานในรูปที่ 5 คือพื้นที่ที่แสดงถึงว่าเฉพาะช่วงเวลาการใช้เวกเตอร์ U_0 เพียงเวกเตอร์เดียวก็สามารถตรวจจذبกระแสได้ กล่าวง่าย ๆ คือ ในพื้นที่แรงงานจะพบว่า $t_0 \geq 2t_D$ ทำให้ตรวจจذبกระแสได้นั่นเอง และในพื้นที่นี้เราสามารถตรวจจذبกระแสได้ครบทั้ง 3 เฟสซึ่งเราอาจเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$t_A + t_B \leq T - 4t_D \quad (4)$$

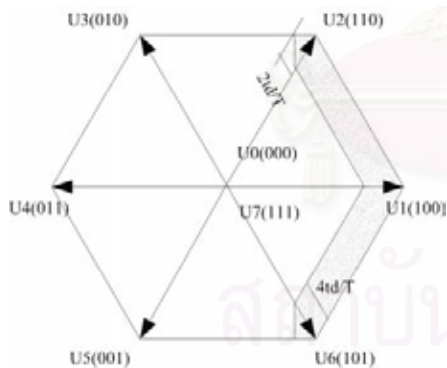
(ข) บริเวณที่ตรวจจذبกระแสได้เมื่อใช้ทั้งเวกเตอร์ศูนย์ U_0 และเวกเตอร์แอกทีฟ U_A หรือ U_B

เราจะอธิบายการตรวจจذبกระแสเฟส U ในแต่ละ Sector ใ้ดังนี้ Sector ที่ 3 และ 4 เวกเตอร์แอกทีฟทั้ง 2 ตัวสามารถช่วยเวกเตอร์ศูนย์ U_0 ตรวจจذبกระแสได้ในช่วงที่ไม่ได้แรงงานของทั้ง 2 Sector ในรูปที่ 5 Sector ที่ 1 และ 6 เวกเตอร์แอกทีฟทั้ง 2 ตัวไม่ช่วยในการตรวจจذبกระแสของเฟส U

Sector ที่ 2 และ 5 จะมีเวกเตอร์แอกทีฟ 1 ตัวที่ช่วยเวกเตอร์ศูนย์ U_0 ในการตรวจจذبกระแสได้ภายใต้เงื่อนไข

$$t_0(000) + t_A \text{ (or } t_B) \geq 2t_D \quad (5)$$

ดังนั้นโดยสรุปแล้วพื้นที่ที่ไม่สามารถตรวจจذبกระแสเฟส U ได้จะเป็นพื้นที่แรงงานในรูปที่ 6



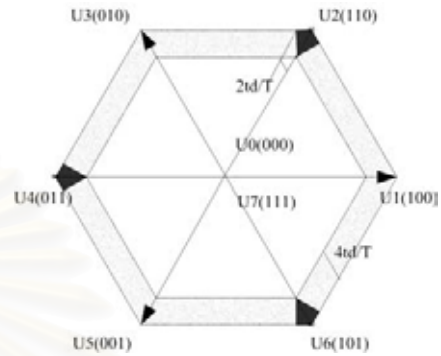
รูปที่ 6 พื้นที่ที่ไม่สามารถตรวจจذبกระแสเฟส U

ในกรณีของเฟส V และ W เราสามารถใช้หลักการเดียวกันนี้ในการหาพื้นที่ปัญหาและพบว่าพื้นที่ที่ไม่สามารถตรวจจذبกระแสของเฟส V และ W จะเลื่อนไปจากของเฟส U เป็นมุม 120° และ 240° (ทวนเข็มนาฬิกา) ตามลำดับ เมื่อนำมาเขียนรวมกันจะเป็นดังรูปที่ 7

พื้นที่ที่แรงงานบางในรูปที่ 7 จะเป็นบริเวณที่เราตรวจจذبกระแสไม่ได้เพียงเฟสเดียว ส่วนที่เหลืออีก 2 เฟสนั้นตรวจจذبได้ เราจึงสามารถใช้ความสัมพันธ์ที่ว่า

$$i_u + i_v + i_w = 0 \quad (6)$$

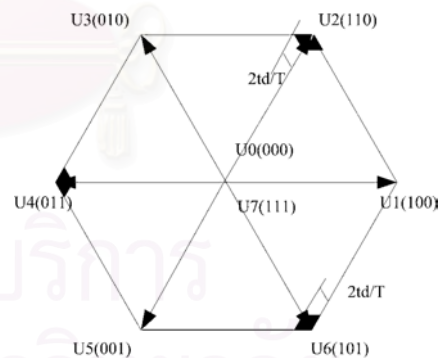
มาช่วยในการคำนวณกระแสในเฟสที่ตรวจจذبไม่ได้ ดังนั้นพื้นที่ที่ไม่สามารถตรวจจذبกระแสได้ครบ 3 เฟสจึงเหลือเฉพาะส่วนที่แรงงานที่บในรูปที่ 7 เท่านั้น



รูปที่ 7 พื้นที่ปัญหาในการตรวจจذبกระแสเฟส U, V และ W

3. การปรับปรุงการตรวจจذبกระแสของ ASIPM Version 1,2

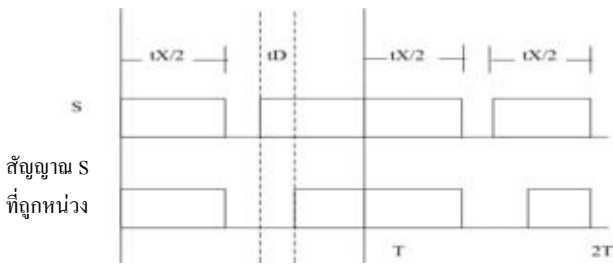
แนวทางหนึ่งในการลดพื้นที่ปัญหาที่ตรวจจذبกระแสได้ไม่ครบ 3 เฟส (ตรวจจذبได้เพียงเฟสเดียว) ทำได้โดยการใช้การมอดูเลตแบบ 2 กิ่ง (2 Arms Modulation) ซึ่งเป็นการสวิตซ์ที่ปรับให้ $t_7(111)$ เป็น 0 ซึ่งจะช่วยลดพื้นที่ดังกล่าวไปประมาณครึ่งหนึ่ง ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 พื้นที่ปัญหาในการตรวจจذبกระแสเมื่อใช้การมอดูเลตแบบ 2 กิ่ง

การสวิตซ์วิธีนี้นอกจากจะช่วยลดปัญหาในการตรวจจذبกระแสแล้ว ยังช่วยให้ข้อมูลกระแสที่ได้ใกล้เคียงกระแสจริงมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการสวิตซ์แบบปกติ ณ จุดทำงานเดียวกัน เนื่องจากมีช่วง t_0 ที่นานขึ้นเป็น 2 เท่า นั่นเอง และทำให้จำนวนการสับสวิตซ์ลดลงซึ่งช่วยลด Switching Loss ลงไป 1/3 อีกด้วย

ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อพิจารณาผลของเวลาหน่วงที่มีต่อสัญญาณขับนำสวิตซ์ที่ต่อเนื่องกันใน 2 คาบ ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ผลการหน่วงเวลาเมื่อพิจารณา 2 คาบการสวิตช์ต่อเนื่อง จะพบว่าปัญหาการตรวจจับกระแสจะจริง ๆ เกิดขึ้นเมื่อ

$$\frac{[t_x(n-1) + t_x(n)]}{2} < t_D \quad (7)$$

โดยที่ n หมายถึงลำดับของคาบเวลาการสวิตช์ นั่นคือมีผลของเวลาช้มนำของคาบก่อนหน้า จะทำให้ช่วงเวลาช้มนำสวิตช์โดยรวมยาวนานขึ้นถ้าพิจารณาโดยประมาณว่า

$$t_x(n-1) \approx t_x(n) \quad (8)$$

จะได้ว่าปัญหาการตรวจจับกระแสจะเกิดขึ้นเมื่อ

$$t_x < t_D \quad (9)$$

สมการข้างต้นเมื่อเปรียบเทียบกับสมการที่ (3) จะพบว่าพื้นที่ปัญหาจริงจะลดลงไปจากการพิจารณาในตอนต้น(ดูรูปที่ 8) อีกประมาณครึ่งหนึ่ง

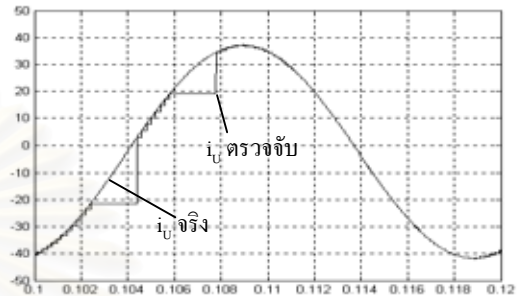
สำหรับพื้นที่ปัญหาที่เหลือนั้นจะพบว่ามิมีขนาดเล็กมากเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนแก้ปัญหารูปที่ 7) ประกอบกับ ASIPM ในปัจจุบันมีการตั้งค่า t_D ให้น้อย พื้นที่ส่วนที่เหลือนี้จึงสามารถละลายได้ในทางปฏิบัติ

4. ผลจำลองการทำงานการตรวจจับกระแสของ ASIPM Version 1,2

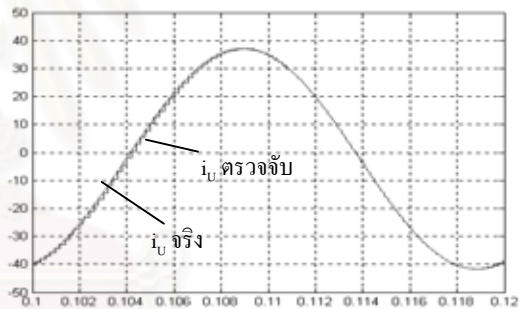
เราทำการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม Matlab โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้คือ ความถี่การสวิตช์(f_{PWM}) 5 kHz, t_D 10 μ s, แรงดันบัลไฟตรง(V_{DC}) 540 V แรงดันคำสั่งเป็นรูปคลื่นไซน์ที่มีค่ายอดเป็น 288 V ความถี่ 50 Hz เวกเตอร์คำสั่งที่กำหนดนี้จะหมุนผ่านพื้นที่ปัญหาของการมอดูเลตแบบปกติ แต่จะไม่ผ่านพื้นที่ปัญหาเมื่อใช้การมอดูเลตแบบ 2 กิ่ง ผลจำลองการทำงานเป็นดังรูปที่ 10 – 12

จากรูปที่ 10 เราสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อเวกเตอร์คำสั่งมีรัศมีหมุนผ่านพื้นที่ปัญหาจะทำให้เกิดการตรวจจับกระแสไม่ได้ และที่เกิดเป็น 2

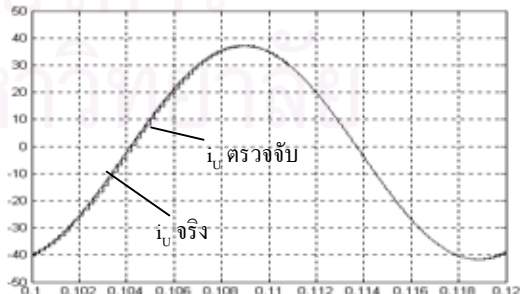
ช่วงก็เพราะผลของคาบต่อเนื่องนั้นทำให้ช่วงที่ตรวจจับไม่ได้ลดลงไปในรูปที่ 11 เมื่อใช้วิธีการหาคะแสเฟสที่พัฒนาขึ้น พบว่าช่วงที่ตรวจจับไม่ได้จะหายไป และในรูปที่ 12 เมื่อใช้การมอดูเลตแบบ 2 กิ่งพบว่าไม่เกิดช่วงที่ตรวจจับกระแสไม่ได้ขึ้น แม้จะไม่ต้องใช้วิธีการหาคะแสเฟสที่พัฒนาขึ้น ซึ่งทั้งหมดเป็นการยืนยันว่าการวิเคราะห์และวิธีการแก้ไขปัญหานี้ที่น่าเสนอถูกต้อง



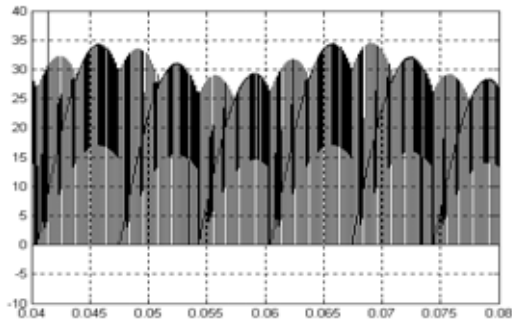
รูปที่ 10 ผลการตรวจจับกระแสเฟส U เมื่อใช้วิธีการมอดูเลตแบบปกติไม่ใช้วิธีการหาคะแสเฟสที่พัฒนาขึ้น



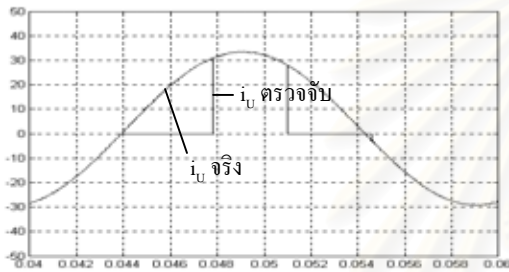
รูปที่ 11 ผลการตรวจจับกระแสเฟส U เมื่อใช้วิธีการมอดูเลตแบบปกติและใช้วิธีการหาคะแสเฟสที่พัฒนาขึ้น



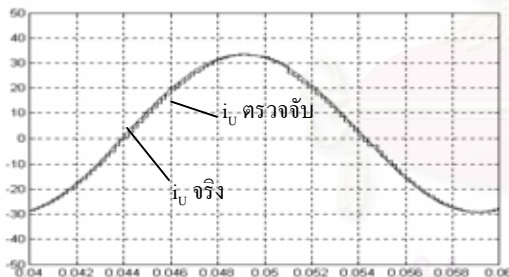
รูปที่ 12 ผลการตรวจจับกระแสเฟส U เมื่อใช้การมอดูเลตแบบ 2 กิ่งและไม่ใช้วิธีการหาคะแสเฟสที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 14 รูปคลื่นสัญญาณกระแสที่ตรวจจับได้จากวงจรตรวจจับของ ASIPM Version 3



รูปที่ 15 รูปกระแสเฟส U เมื่อใช้เฉพาะวิธีการตรวจสอบจับกระแสในแผนภาพในรูปที่ 13



รูปที่ 16 รูปกระแสเฟส U เมื่อใช้วิธีการตรวจจับในแผนภาพรูปที่ 13 พร้อมกับการประมาณค่ากระแสด้วยวงจรเลื่อนเฟส

จากรูปที่ 14 จะเห็นได้ว่าสัญญาณกระแสที่ได้จากวงจรตรวจจับของ ASIPM Version 3 จะเป็นรูปคลื่นผสมระหว่างกระแสเฟสต่างๆ โดยเส้น Envelop จะแสดงถึงค่าสูงสุดของกระแส 3 เฟสในขณะนั้นๆ และเมื่อใช้หลักการคำนวณหาค่ากระแสเฟสที่นำเสนอในแผนภาพในรูปที่ 13 เราจะสามารถคำนวณหาค่ากระแสในเฟสหนึ่งๆ ได้เป็นช่วงประมาณ 240° ดังรูปที่ 15 ส่วนรูปที่ 16 นั้นเป็นผลการจำลองเมื่อใช้หลักการประมาณค่ากระแสด้วยการเลื่อนเฟสด้วยวงจรกรองแบบ FIR ด้วย จะเห็นได้ว่าช่วงที่ตรวจจับกระแสได้เพียงเฟสเดียว(ซึ่งไม่ใช่เฟส U) เรายังสามารถประมาณค่ากระแสกลับคืนมาได้ถูกต้อง

7. สรุป

จากการวิเคราะห์พฤติกรรมการทำงานของ ASIPM โดยละเอียดทำให้เราทราบถึงย่านการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่อาจทำให้เกิดปัญหาในการตรวจจับกระแสได้ไม่ครบทั้ง 3 เฟส เรายังได้นำเสนอวิธีการใหม่ในการแก้ปัญหาดังกล่าวสำหรับ ASIPM ทั้ง 3 Version จากผลจำลองการทำงานที่ได้ แสดงให้เห็นว่าผลการวิเคราะห์คุณสมบัติการตรวจจับกระแสของ ASIPM Version ต่างๆ มีความถูกต้องและวิธีการตรวจจับที่นำเสนอสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการตรวจจับกระแสของ ASIPM ให้ดีขึ้นได้จริง

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Eric R. Motto , “Application Specific Intelligent Power Modules – A Novel Approach to System Integration in Low Power Drives” , Powerex Inc.
- [2] K.H. Hussein , G. Majumdar , M. Iwasaki , T. Oota ,M. Fukunaga , and H. Iwamoto , “1200 V Compact Subsystem ASIPM for Low-Power Inverters” , Proc. of IPEC – Tokyo 2000, pp. 513-518
- [3] Bin Huo , Tom Flint and FinBarr Moynihan , “Improved Single Current Sensing Method and Its Realization Based on ADMCF341 DSP Controller” , Analog Devices Inc.
- [4] Walter A. Elmore, “Pilot Protective Relaying” , Marcel Dekker Inc. , 2000.



ชินภัทร เทธิชญประชูร จบการศึกษาระดับปริญญาตรี (เกียรตินิยมอันดับ 1) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในปีการศึกษา 2544 ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาโท

โทสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สมบูรณ์ แสงวงศ์วัฒนชัย จบการศึกษาระดับปริญญาตรี โท และเอกสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าจากมหาวิทยาลัย NAGOYA ประเทศญี่ปุ่น ในปี พ.ศ. 2528, 2530, และ 2533 ตามลำดับ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ชินภัทร เหริญญประยูร เกิดเมื่อวันที่ 24 สิงหาคม พ.ศ. 2523 สำเร็จ การศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับ 1) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีในปีการศึกษา 2544 และได้เข้าศึกษาต่อใน หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยใน ปีการศึกษา 2545

ผลงานวิจัย

1. ชินภัทร เหริญญประยูร และสมบุญณ์ แสงวงศ์วานิชย์ “การตรวจจับกระแสของมอเตอร์ด้วย ไมโครลสวิตซ์กำลังอัจฉริยะเฉพาะงาน” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 26, 2546 : หน้า 630 – 635
2. ชินภัทร เหริญญประยูร และสมบุญณ์ แสงวงศ์วานิชย์ “ข้อจำกัดทางปฏิบัติและแนวทางแก้ไขใน การคำนวณค่าน้ำกระแสสมอเตอร์เมื่อใช้ไมโครลสวิตซ์กำลังอัจฉริยะเฉพาะงาน” การประชุมวิชาการ ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27, 2547

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย