การควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส ด้วยการควบคุมกระแสเริ่มต้นโดยใช้เทคนิคอะซิงโครนัส พีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์

SOFT START CONTROL FOR A SINGLE-PHASE INDUCTION MOTOR WITH STARTING CURRENT CONTROL USING AN ASYNCHRONOUS PWM AC CHOPPER TECHNIQUE

โกวิท ภูฉลาด

KOWIT PHUCHALAD

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2568

KMITL-2025-EN-M-027-087

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SOFT START CONTROL FOR A SINGLE-PHASE INDUCTION MOTOR WITH STARTING CURRENT CONTROL USING AN ASYNCHRONOUS PWM AC CHOPPER TECHNIQUE

KOWIT PHUCHALAD

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2025

KMITL-2025-EN-M-027-087

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2025

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยการควบคุมกระแสเริ่มต้นโดยใช้เทคนิคอะซิงโครนัสพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์
Thesis Title	SOFT START CONTROL FOR A SINGLE-PHASE INDUCTION MOTOR WITH STARTING CURRENT CONTROL USING AN ASYNCHRONOUS PWM AC CHOPPER TECHNIQUE
นักศึกษา	ว่าที่ร้อยเอกโกวิท ภูฉลาด
รหัสประจำตัว	59601176
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2568
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.เฉลิมชาติ มานพ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ร่วม)	ศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอการควบคุมกระแสขณะเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดตัวเก็บประจุสตาร์ทขนาด 0.5 แรงม้า 230 โวลต์ 4.3 แอมป์ 50 เฮิรตซ์ 4 ขั้ว ด้วยการควบคุมกระแสเริ่มต้นให้คงที่ตามที่ต้องการโดยใช้เทคนิคอะซิงโครนัส พีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ ข้อดีของเทคนิคนี้สามารถลดความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกและสามารถออกตัวได้เมื่อมีแรงบิดทางกลเริ่มต้น และลดกระแสกระชากเมื่อเปรียบเทียบกับการต่อตรง อีกทั้งไม่มีความจำเป็นซิงโครไนส์กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับทำให้ง่ายในการควบคุม โดยการจำลองและทดสอบการทำงานของระบบด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink Version R2024a และไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 Microcontroller เบอร์ TMS320F28379D เพื่อกำเนิดสัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบอะซิงโครนัสใช้ในการควบคุมวงจรกำลังไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสที่มีสวิตช์กำลัง 2 ตัวโดยสัญญาณแรงดันไฟตรงอ้างอิง 1 สัญญาณถูกนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะคลื่นฟันเลื่อยความถี่สูง 1 สัญญาณทำให้ได้สัญญาณพีดับบลิวเอ็มสำหรับการควบคุมสวิตช์ 1 คู่ที่ทำงานสลับกัน ด้วยเทคนิคนี้ทำให้สัญญาณพีดับบลิวเอ็มสามารถสร้างได้ง่ายเนื่องจากสัญญาณพีดับบลิวเอ็มทั้งคู่ไม่จำเป็นต้องซิงโครไนซ์กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส นอกจากนี้ยังได้ทำการสร้างการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลโดยการควบคุมดิวตี้ไซเคิลตามเวลา เพื่อให้มีการเพิ่มแรงดันมูลฐานของมอเตอร์เป็นแบบเชิงเส้นในช่วงเวลาการเริ่มหมุนที่กำหนดซึ่งจะมีการกำหนดรูปแบบการเปลี่ยนความชันแรงดันตามเวลามีค่าต่างๆทำให้มีการลดลงของกระแสขณะเริ่มหมุนอย่างเห็นได้เด่นชัด จากการทดสอบเมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสขณะเริ่มหมุนแบบต่อตรงกับการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลด้วยการปรับอัตราการเปลี่ยนแปลงเปอร์เซนต์ค่าดิวตี้ไซเคิลที่ค่า 20%-90% ตามเวลาที่กำหนดแบบมีโหลดเริ่มต้น 1.3 Nm สามารถลดกระแสช่วงเริ่มหมุนได้ 38% และการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลด้วยการควบคุมกระแสเริ่มต้นแบบมีโหลด 1.3 Nm ที่ค่าควบคุมกระแส 200% และ 150% ของกระแสพิกัดสามารถลดกระแสช่วงเริ่มหมุนได้ 63% และ 75% ตามลำดับผลที่ได้จากการจำลองและการทดสอบสอดคล้องกันดีแสดงให้เห็นถึงกระแสมอเตอร์ขณะเริ่มหมุนพบว่าการควบคุมการเริ่มหมุนโดยเทคนิคอะซิงโครนัส พีดับบลิวเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ ที่นำเสนอสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความเหมาะสมสำหรับการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสที่ต้องการควบคุมแรงบิดได้ในขณะมีโหลดทางกลตอนเริ่มต้น เนื่องจากสามารถลดค่ากระแสขณะเริ่มหมุนและรูปคลื่นกระแสยังเข้าใกล้รูปคลื่นไซน์นั้นทำให้องค์ประกอบฮาร์มอนิกลดลงส่งผลทำให้ลดการกระเพื่อมของแรงบิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	SOFT START CONTROL FOR A SINGLE-PHASE INDUCTION MOTOR WITH STARTING CURRENT CONTROL USING AN ASYNCHRONOUS PWM AC CHOPPER TECHNIQUE
Student	Acting Captain Kowit Phuchalad
Student ID.	59601176
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2025
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Chalermchat Manop
Co-Thesis Advisor	Prof. Dr. Vijit Kinnares

ABSTRACT

This thesis presents the soft start control of a 0.5 HP, 230 V, 4.3 A, 50 Hz, 4 Pole single-phase capacitor start induction motor with constant starting current control as required using an asynchronous PWM AC chopper technique. The advantages of this technique is capability of a reduction in harmonic distortion of motor current, starting with inertial mechanical load and a decrease in inrush current when compared to a direct on line start. Also the synchronization with an AC source is not necessary resulting in simplicity in starting control. The simulation and experiment of system performance by both MATLAB/Simulink Version R2024a and TMS320F28379D C2000 microcontroller for generating asynchronous PWM signals for a single-phase ac-ac power controller with two power switches. A single dc voltage reference signal is used to compare with a sawtooth high frequency carrier signal in order to obtain PWM signals for alternate operation for such pair of switches. This technique allows the ease of PWM generation without necessity of synchronization with the single-phase AC power source. Furthermore, smooth motor startup control with gradual increase in duty cycle with time is implemented for a linear fundamental increase for a given starting time interval under various profiles of a change in voltage slope with time. As a result starting current is reduced significantly when compared to that of direct-on-line (DOL). It is found that soft starting with adjusting the duty cycle percentage from 20% to 90% in a defined value of time under a load of 1.3 Nm, the starting current can be reduced by 38%. The soft start by controlling the constant current under a load of 1.3 Nm at 200% and 150% of the rated current, can reduce the starting current by 63% and 75%, respectively. The results from the simulation and testing are in good agreement showing that the proposed technique is able to effectively operate. It is suitable to the soft start of a single-phase induction motor requiring starting torque with initial mechanical load since the starting current can be reduced and the current waveform approaches a sinusoidal wave shape leading to a reduction in torque pulsation.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาและขอขอบพระคุณจากท่านอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.เฉลิมชาติ มานพ และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ร่วม) ศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ที่คอยแนะนำให้ข้อคิดในการทำงานวิจัยเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพและเป็นระบบมีแบบแผน และการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจนทำให้การดำเนินงานด้านวิจัยเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตลอดจนรุ่นพี่ เพื่อน และน้อง ทั้งในและนอกห้องปฏิบัติการวิจัย 1 ECC-405 (Power Electronics and Machine Control Group :PMC) ที่คอยให้กำลังใจคำปรึกษาการทำงานวิจัย ข้อแนะนำแนวทาง และคอยกระตุ้นข้าพเจ้า อาทิเช่น ผศ.ดร.พูนศรี วรรณการ ผศ.ดร.วัณโน ยีตำ ดร.วิศวรรษ กานติกูล นายศราวุธ สุขขุม นายอุเทน ศิริสุทธิ์ นายสุชาติ คำลือ นายธราธิป แสงกล้า นายสุธนา มครเพศ นายนิคม ก้านจักร นายศิริรัช เชื้อพานิช และโดยเฉพาะนายพัชรพงศ์ กันหารินทร์ ที่ฝึกสอนปฏิบัติและได้เรียนรู้งานในสภาพแวดล้อมการทำงานจริงเพื่อพัฒนาทักษะที่จำเป็นอย่างเป็นรูปธรรมแก่ข้าพเจ้าหรือ (OJT : On the Job Training)

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ รศ.ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล ผศ.ดร.ธีรพล โพธิ์พงศ์วิวัฒน์ ผศ.ดร.นิรุธ จิรสุวรรณกุล รศ.ดร.สมชาติ จิริวิภากร และโดยเฉพาะท่านอาจารย์ที่ข้าพเจ้าเคารพรักคือ รศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช ที่คอยให้กำลังใจข้าพเจ้าตลอดห้วงระยะเวลาที่ท้อแท้อีกทั้งอบรมสั่งสอนด้านวิชาการ ด้านคุณธรรม ให้ขวัญและกำลังใจแก่ข้าพเจ้าอีกทั้งยังเป็นผู้เปิดมุมมองโลกทัศน์ใหม่ๆและยังถามสารทุกข์สุขดิบเวลาเจอกันกับข้าพเจ้า ตลอดจนขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกๆท่านสาขาวิศวกรรมศาสตร์ไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ข้าพเจ้าได้เรียนในรายวิชาต่างๆห่วงที่เป็นบัณฑิต และ รศ.ดร.เวคิน ปิยรัตน์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ได้แนะนำข้อมูลอันเป็นประโยชน์ในการแก้ไขปัญหา และขอขอบพระคุณเอกสารที่ข้าพเจ้าใช้อ้างอิงเพื่อทำงานวิจัยในครั้งนี้และได้ปรับปรุงเนื้อหาจนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.กันยรัตน์ โหละสุต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ผู้ซึ่งเป็นทั้งครูอาจารย์และเสมือนญาติผู้ใหญ่ของข้าพเจ้าที่ข้าพเจ้าเคารพนับถืออย่างสูง ซึ่งท่านได้อบรมสั่งสอนข้าพเจ้าให้คำปรึกษาเรื่องต่างๆ ให้กำลังใจและให้ความเมตตากรุณาต่อข้าพเจ้าและครอบครัวเสมอมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ชาญชัย ทองโสภา สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผู้ที่เปิดมุมมองด้านการติวสอนเป็นทั้งพี่และอาจารย์ข้าพเจ้าสอนข้าพเจ้าห่วงเป็นนักศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูงสาขาวิชาไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานวิทยาเขตขอนแก่น ให้สอบติดภาคต่อเนื่องที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ตลอดจนสอนเทคนิคการทำข้อสอบทำให้ข้าพเจ้าสอบติดการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขอขอบพระคุณนางสาวกัตติกมาส สิทธิคง และนางสาววาทินี วัฒนจตุรพร เจ้าหน้าที่งานวิชาการบัณฑิตศึกษา สำนักงานคณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์ และนายสมคิด ไชยมาดี เจ้าหน้าที่งานทะเบียนระดับบัณฑิตศึกษา สำนักทะเบียนและบริการการศึกษา ที่ค่อยให้กำลังใจคำแนะนำด้านระเบียบและข้อกำหนดต่างๆของบัณฑิตศึกษาแก่ข้าพเจ้า และนางนิภารัตน์ ศรีสุชาติ เจ้าหน้าที่บริหารงานทั่วไป สำนักการเรียนรู้ตลอดชีวิตพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ค่อยช่วยเรียบเรียงและอำนวยความสะดวกด้านการตรวจสอบผลงานทางวิชาการด้วยโปรแกรมป้องกันการคัดลอกผลงานทางวิชาการ และนายนครศักดิ์ แสงศรี เจ้าหน้าที่สนับสนุนด้านวิชาการ ด้านเทคนิคและสโตร์ประจำสาขาวิศวกรรมศาสตร์ไฟฟ้า ที่ค่อยดูแลใส่ใจอำนวยความสะดวกด้านเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทำงานวิจัย และตลอดจนเจ้าหน้าที่ เจ้าหน้าที่รักษาความปลอดภัย แม่บ้าน ตึก ECC ผู้ประกอบการร้านค้าในโรงอาหาร ร้านกาแฟ และร้านสะดวกซื้อทั้งในและนอกสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่อำนวยความสะดวกและมิตรภาพที่ดีต่อกันเสมอมาที่สาขาวิศวกรรมศาสตร์ไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ขอขอบพระคุณครูบาอาจารย์ที่อบรมสั่งสอนข้าพเจ้าทุกๆท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาโรงเรียนบ้านสมศรีมะแปบประชาบำรุง โรงเรียนเชียงแสนวิทยาคม วิทยาลัยเทคนิคมหาสารคาม วิทยาลัยการอาชีพกาญจนาภิเษกหนองจอก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น มหาวิทยาลัยขอนแก่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช และสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาของข้าพเจ้า นายบุญขวัญ ภูฉลาด นางสุธิดา ภูฉลาด และนางสุภาพ ภูฉลาด (ผู้ล่วงลับ) ตลอดจน นางสาวศิรินันท์ ยมศรีเคน นางสาวกรินต์อร พุทธา นางสาวปิยภรณ์ ภูฉลาด และนางสาวฐานิตา พลชม ผู้ซึ่งเป็นพระอรหันต์ของข้าพเจ้า ผู้ให้ทั้งชีวิต ให้สติปัญญา ให้การศึกษา ให้ทุนทรัพย์ ตลอดจนอบรมสั่งสอนให้ข้าพเจ้าเป็นคนดีคนเก่ง และที่ขาดไม่ได้ คือ ญาติ มิตรสหาย และครอบครัวของข้าพเจ้าที่ค่อยเคียงข้างเป็นกำลังใจให้ทั้งยามทุกข์และยามสุข ทำให้ข้าพเจ้ามีกำลังใจจนสามารถฝ่าฟันอุปสรรคจัดทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สุดท้ายนี้สำหรับคุณค่าคุณงามความดีและประโยชน์อันใดพึงมาจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่คุณบิดามารดา ครูบาอาจารย์ บรรพบุรุษทั้งวงศ์ตระกูลภูฉลาด ยมศรีเคน วงศ์ภักดี วงศ์กุล พุทธา พลชม และรัตนมนตรี ตลอดจนเจ้ากรรมนายเวร พระมหากษัตริย์ไทยทุกพระองค์ พระธรรมคำสอนขององค์สมเด็จพระสัมมาสัมพุทธเจ้า ร่วมทั้งแผ่นดินไทยแผ่นดินแม่ซึ่งเป็นแผ่นดินเกิดของข้าพเจ้า

ศักดิ์ ภูฉลาด

(ว่าที่ร้อยเอกโกวิท ภูฉลาด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่ หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....V

สารบัญตาราง.....IX

สารบัญรูป.....X

รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....XX

บทที่ 1 บทนำในการจัดทำงานวิจัย.....1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาในงานวิจัยเป็นมา.....1

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษางานวิจัย.....5

1.3 สมมุติฐานของการศึกษางานวิจัย.....6

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการทำงานวิจัย.....7

1.5 การเปรียบเทียบกับหลักการที่มีอยู่เดิมในงานวิจัย.....10

1.6 ขอบเขตของงานวิจัย.....11

1.7 ขั้นตอนของการศึกษาจัดทำวิทยานิพนธ์.....11

บทที่ 2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสและอุปกรณ์ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องสำหรับในงานวิจัย.....14

2.1 หลักการทำงานมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส.....14

2.2 การเกิดสนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส.....14

2.3 คุณสมบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ท.....16

2.4 มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ท.....16

2.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 เบอร์ TMS320F28379D.....20

บทที่ 3 เทคนิคการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยการควบคุมกระแสเริ่มต้นโดยใช้เทคนิคอะซิงโครนัส พีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์.....24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า

3.1 บทนำ....24

3.2 รูปแบบการกำเนิดสัญญาณพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบอะซิงโครนัส (Asynchronous PWM AC Chopper)....25

3.3 การกำหนดแรงดันเริ่มต้นให้กับวงจรการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลด้วยพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบอะซิงโครนัส (Asynchronous PWM AC Chopper Soft Starter :PWMSS)....29

3.4 สัญญาณพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบซิงโครนัส (Synchronous PWM AC Chopper)....37

3.5 ตัวควบคุมแบบพีไอ....43

3.5.1 ตัวควบคุมแบบสัดส่วนแบบพี....44

3.5.2 ตัวควบคุมแบบสัดส่วนแบบไอ....44

3.6 ผลจากการจำลองเพื่อดูสมรรถนะของมอเตอร์ขณะเริ่มหมุนแบบโดยตรงและแบบนิ่มนวล....46

บทที่ 4 การออกแบบวงจรควบคุมและวงจรกำลังสำหรับการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยการควบคุมกระแสเริ่มต้นโดยใช้เทคนิคอะซิงโครนัสพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์....58

4.1 บทนำการออกแบบระบบวงจรควบคุมและวงจรกำลังสำหรับทดสอบ....58

4.2 วงจรสวิตช์ไอจีบีที (IGBT) แบบสวิตช์ 2 ทางในวงจร PWM AC Chopper....60

4.2.1 สภาวะนำกระแส....62

4.2.2 สภาวะหยุดนำกระแส....63

4.2.3 ลักษณะการสวิตช์....63

4.3 วงจรขับเกตสวิตช์กำลังไอจีบีที....64

4.4 ส่วนวงจรควบคุม....66

4.4.1 การออกแบบวงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ....67

4.4.2 การออกแบบวงจรตรวจจับสัญญาณกระแสไฟฟ้าสลับ....68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า

4.4.3 วงจรประวิงเวลา.....69

4.4.4 การแปลงค่าอนาล็อกเป็นดิจิตอล (Analog to Digital Converter).....71

4.5 วงจรสนับเบอร์.....71

4.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28379D.....73

4.7 สรุปการออกแบบวงจรควบคุมและวงจรกำลัง.....76

บทที่ 5 การออกแบบจำลองระบบการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยการควบคุมกระแสเริ่มต้น โดยใช้เทคนิคอะซิงโครนัส พีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์.78

5.1 บทนำ.....78

5.2 โปรแกรม MATLAB/Simulink Version R2024a 60.....79

5.2.1 การเปิดใช้งานโปรแกรม MATLAB/Simulink Version R2024a.....80

5.3 การจำลองระบบควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยการควบคุมกระแสเริ่มต้นโดยใช้เทคนิคอะซิงโครนัส พีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์.....82

5.4 โปรแกรม Code Composer Studio (CCS) Version 12.4.0.....83

5.4.1 ตัวอย่างการใช้งานโปรแกรม Code Composer Studio (CCS) Version12.4.0.....84

5.5 การจำลองระบบการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสในโปรแกรม MATLAB/Simulink Version R2024a.....92

บทที่ 6 ผลการทดสอบระบบการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยการควบคุมกระแสเริ่มต้นโดยใช้เทคนิคอะซิงโครนัส พีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ ..117

6.1 บทนำการทดสอบระบบการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส.....117

บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยการควบคุมกระแสเริ่มต้นโดยใช้เทคนิคอะซิงโครนัส พีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์.....151

7.1 สรุปผลการวิจัยการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยการควบคุมกระแสเริ่มต้นโดยใช้เทคนิคอะซิงโครนัส พีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์.....151

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า

7.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยและการต่อยอดพัฒนา....155

บรรณานุกรม....157

ภาคผนวก....162

ภาคผนวก ก. ชุดทดลองและอุปกรณ์เครื่องมือวัดที่ใช้ในงานวิจัยการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยการควบคุมกระแสเริ่มต้น โดยใช้เทคนิคอะซิงโครนัส พีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์....163

ภาคผนวก ข. การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสที่ใช้ในงานวิจัยการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยการควบคุมกระแสเริ่มต้น โดยใช้เทคนิคอะซิงโครนัส พีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์....167

ภาคผนวก ค. วงจรต้นแบบที่ใช้ในงานวิจัยการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยการควบคุมกระแสเริ่มต้น โดยใช้เทคนิคอะซิงโครนัส พีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์....176

ภาคผนวก ง. บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าเพื่อใช้สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง....182

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์....219

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

ตารางที่ 3.1 ตารางการเปรียบเทียบระหว่าง Asynchronous PWM AC Chopper กับ Synchronous PWM AC Chopper.....43

ตารางที่ 4.1 สถานะการทำงานลอจิกและมีสัญญาณเอาต์พุตไอซีเบอร์ TLP250.....65

ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดเริ่มหมุนด้วยตัวเก็บประจุที่ใช้สำหรับการจำลอง.....92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

รูปที่ 1.1 วงจรกำลังพื้นฐานของวงจรควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ทด้วยไตรแอคที่เป็นสวิตช์แบบดั้งเดิม....8

รูปที่ 1.2 วงจรกำลังพื้นฐานของวงจรควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ทด้วยเอซี ช็อปเปอร์เป็นสวิตช์แบบดั้งเดิม....8

รูปที่ 1.3 วงจรกำลังพื้นฐานของวงจรควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ทด้วยเอซี ช็อปเปอร์ ที่มีไอจีบีทีเป็นสวิตช์แบบใหม่ที่นำเสนอ....9

รูปที่ 1.4 รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้วยวิธีการควบคุมแบบ Phase Control แบบดั้งเดิม....10

รูปที่ 1.5 รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้วยวิธีการควบคุมแบบ PWM AC Chopper แบบใหม่ที่นำเสนอ....10

รูปที่ 2.1 การต่อขดลวดสเตเตอร์กับระบบไฟฟ้าสองเฟส....14

รูปที่ 2.2 รูปคลื่นไซน์และสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์มอเตอร์ไฟฟ้าสองเฟส....15

รูปที่ 2.3 สัญญาณความแตกต่างระหว่างกระแสที่ไหลในขดรันและขดสตาร์ทที่มีการพันชุดขดลวดทั้งสองจะมีมุมต่างกัน 90 องศาไฟฟ้า....16

รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ท....17

รูปที่ 2.5 การต่อวงจรของคาปาซิเตอร์สตาร์ทมอเตอร์....17

รูปที่ 2.6 เวกเตอร์ไดอะแกรมกระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้าของคาปาซิเตอร์มอเตอร์....17

รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบ....18

รูปที่ 2.8 คาปาซิเตอร์แบบอิเล็กโทรไลต์....18

รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิลและความเร็วรอบของคาปาซิเตอร์มอเตอร์ที่ค่าความจุคาปาซิเตอร์ต่างๆกัน....19

รูปที่ 2.10 วงจรกลับทิศทางการหมุนของคาปาซิเตอร์มอเตอร์....19

รูปที่ 2.11 ลักษณะการใช้งานของคาปาซิเตอร์มอเตอร์....20

รูปที่ 2.12 ชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 เบอร์ TMS320F28379D....21

รูปที่ 2.13 หมายเลขขาพิน ADC บนอุปกรณ์ที่ต่อพ่วงโดยรวม C2000 เบอร์ TMS320F28379D....22

รูปที่ 2.14 คุณสมบัติเด่นโดยรวมของ C2000 เบอร์ TMS320F28379D....23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

รูปที่ 3.1 วงจรกำลังของการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลโดยใช้วงจร เอซี ช็อปเปอร์.....24

รูปที่ 3.2 วงจรกำลังของสัญญาณพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบอะซิงโครนัส (Asynchronous PWM AC Chopper).....25

รูปที่ 3.3 ลูกคลื่นแรงดันที่ขั้วมอเตอร์พีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบอะซิงโครนั (Asynchronous PWM AC Chopper).....26

รูปที่ 3.4 ลูกคลื่นกำหนดสัญญาณพีดับเบิ้ลยูเอ็มแบบอะซิงโครนัส (Asynchronous PWM).....27

รูปที่ 3.5 ลูกคลื่นสัญญาณแรงดันควบคุมที่ถูกปรับขนาดให้เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นตามแกนเวลา.....28

รูปที่ 3.6 ลูกคลื่นสัญญาณ PWM ที่ถูกปรับค่า D ตามแกนเวลาแบบเชิงเส้นเพื่อควบคุมสวิตช์สองทิศทาง.....28

รูปที่ 3.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดิวตี้เรโช D และค่าแรงดันที่ภาระ.....29

รูปที่ 3.8 รูปคลื่นแรงดันไลน์ของมอเตอร์ด้านบนและกระแสของมอเตอร์ด้านล่างที่ได้จากการจำลองด้วยวิธีการที่นำเสนอ.....30

รูปที่ 3.9 รูปสเปคตรัมของแรงดันไลน์ของมอเตอร์ด้านซ้ายและกระแสของมอเตอร์ด้านขวาที่ได้จากการจำลองด้วยวิธีการที่นำเสนอ.....30

รูปที่ 3.10 ลูกคลื่นแรงดันและกระแสของมอเตอร์ที่ค่าดิวตี้ไซเคิล D=10%.....31

รูปที่ 3.11 ลูกคลื่นแรงดันและกระแสของมอเตอร์ที่ค่าดิวตี้ไซเคิล D=50%.....31

รูปที่ 3.12 ลูกคลื่นแรงดันและกระแสของมอเตอร์ที่ค่าดิวตี้ไซเคิล D=90%.....31

รูปที่ 3.13 รูปคลื่นสัญญาณ PWM สำหรับการควบคุมสวิตช์ SW1-SW2.....32

รูปที่ 3.14 วงจรกำลังของสัญญาณพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบอะซิงโครนัส (Asynchronous PWM AC Chopper).....33

รูปที่ 3.15 รูปคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบอะซิงโครนัส (Asynchronous PWM AC Chopper) ในสภาวะการทำงานแต่ละโหมด.....33

รูปที่ 3.16 การทำงานโหมด 1 คือกระแสเป็นบวกและแรงดันเป็นบวก IL(+), VL(+).....34

รูปที่ 3.17 การทำงานโหมด 2 คือกระแสเป็นบวกและแรงดันเป็นศูนย์ IL(+), VL(0).....34

รูปที่ 3.18 การทำงานโหมด 3 คือกระแสเป็นบวกและแรงดันเป็นลบ IL(+), VL(-).....35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

รูปที่ 3.19 การทำงานโหมด 4 คือกระแสเป็นลบและแรงดันเป็นลบ IL(-), VL(-).....35

รูปที่ 3.20 การทำงานโหมด 5 คือกระแสเป็นลบและแรงดันเป็นศูนย์ IL(-), VL(0).....36

รูปที่ 3.21 การทำงานโหมด 6 คือกระแสเป็นลบและแรงดันเป็นบวก IL(-), VL(+).....37

รูปที่ 3.22 วงจรกำลังของสัญญาณพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบซิงโครนัส (Synchronous PWM AC Chopper).....38

รูปที่ 3.23 รูปคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตของพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบซิงโครนัส (Synchronous PWM AC Chopper) ในสภาวะการทำงานแต่ละโหมด.....38

รูปที่ 3.24 การทำงานโหมด 1 คือกระแสเป็นบวกและแรงดันเป็นบวก IL(+), VL(+).....39

รูปที่ 3.25 การทำงานโหมด 2 คือกระแสเป็นบวกและแรงดันเป็นศูนย์ IL(+), VL(0).....39

รูปที่ 3.26 การทำงานโหมด 3 คือกระแสเป็นบวกและแรงดันเป็นลบ IL(+), VL(-).....40

รูปที่ 3.27 การทำงานโหมด 4 คือกระแสเป็นลบและแรงดันเป็นลบ IL(-), VL(-).....40

รูปที่ 3.28 การทำงานโหมด 5 คือกระแสเป็นลบและแรงดันเป็นศูนย์ IL(-), VL(0).....41

รูปที่ 3.29 การทำงานโหมด 6 คือกระแสเป็นลบและแรงดันเป็นบวก IL(-), VL(+).....41

รูปที่ 3.30 สัญญาณขับเกจทั้ง 4 สัญญาณ.....42

รูปที่ 3.31 การกำเนิดสัญญาณขับเกจทั้ง 4 สัญญาณ.....42

รูปที่ 3.32 ตัวควบคุมแบบพี.....44

รูปที่ 3.33 ตัวควบคุมแบบไอ.....45

รูปที่ 3.34 กราฟเส้นคุณลักษณะของ Voltage-Ramp Technique.....46

รูปที่ 3.35 สมรรถนะของมอเตอร์โดยการสตาร์ทแบบต่อโดยตรงจากไลน์ (Direct on-line Starting :DOL).....47

รูปที่ 3.36 สมรรถนะของมอเตอร์ ด้านกำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ กำลังไฟฟ้าที่ปรากฏเฉลี่ย และค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์โดยการสตาร์ทแบบต่อโดยตรงจากไลน์ (Direct on-line Starting :DOL).....48

รูปที่ 3.37 สมรรถนะของมอเตอร์โดยการสตาร์ทแบบนิ่มนวล (PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS) ที่ค่าความชัน S=0.5.....49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

รูปที่ 3.38 สมรรถนะของมอเตอร์ ด้านกระแสที่เข้ามอเตอร์ กำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ และค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์โดยการสตาร์ทแบบนิ่มนวล (PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS) ที่ค่าความชันS=0.5.....50

รูปที่ 3.39 สมรรถนะของมอเตอร์โดยการสตาร์ทแบบนิ่มนวล (PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS) ที่ค่าความชัน S=1.....51

รูปที่ 3.40 สมรรถนะของมอเตอร์ ด้านกระแสที่เข้ามอเตอร์ กำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ และค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์โดยการสตาร์ทแบบนิ่มนวล (PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS) ที่ค่าความชัน S=1.....52

รูปที่ 3.41 สมรรถนะของมอเตอร์โดยการสตาร์ทแบบนิ่มนวล (PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS) ที่ค่าควบคุมกระแสพิกัด 200%.....53

รูปที่ 3.42 สมรรถนะของมอเตอร์ ด้านกระแสที่เข้ามอเตอร์ กำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ และค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์โดยการสตาร์ทแบบนิ่มนวล (PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS) ที่ค่าควบคุมกระแสพิกัด 200%.....54

รูปที่ 3.43 สมรรถนะของมอเตอร์โดยการสตาร์ทแบบนิ่มนวล (PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS) ที่ค่าควบคุมกระแสพิกัด 300%.....55

รูปที่ 3.44 สมรรถนะของมอเตอร์ ด้านกระแสที่เข้ามอเตอร์ กำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ และค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์โดยการสตาร์ทแบบนิ่มนวล (PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS) ที่ค่าควบคุมกระแสพิกัด 300%.....56

รูปที่ 4.1 ภาพรวมโครงสร้างพื้นฐานของระบบที่ใช้ในการทดสอบการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลโดยวิธีการพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบอะซิงโครนัส Asynchronous PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS.....59

รูปที่ 4.2 วงจรควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยไอจีบีทีที่เป็นสวิตช์.....60

รูปที่ 4.3 สัญลักษณ์ของ IGBT ทั้ง 2 แบบ.....61

รูปที่ 4.4 ภาพหน้าตัดโครงสร้างพื้นฐานของ IGBT.....61

รูปที่ 4.5 กราฟแสดงลักษณะคุณสมบัติ IGBT.....62

รูปที่ 4.6 ทิศทางการไหลของอิเล็กตรอนและโฮลในขณะนำกระแส.....62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

รูปที่ 4.7 ลักษณะของกระแสและแรงดันขณะนำกระแสและขณะหยุดนำกระแส....64
รูปที่ 4.8 โครงสร้างภายในของไอซี Optocoupler – Isolator เบอร์ TLP250....65
รูปที่ 4.9 วงจรแยกกราวนด์สัญญาณขับเกต....66
รูปที่ 4.10 Power Transducer Isolator Amplifier (ISO124-NP)....66
รูปที่ 4.11 วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ....67
รูปที่ 4.12 วงจรตรวจจับสัญญาณกระแสไฟฟ้าสลับ....69
รูปที่ 4.13 วงจรประวิงเวลา....70
รูปที่ 4.14 รูปการแบ่งกระแส Io เป็น Is และ Ic....71
รูปที่ 4.15 ช่วงเวลาที่สวิตช์ต่อวงจร....72
รูปที่ 4.16 ไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ C2000 Launch Pad เบอร์ TMS320F28379D....73
รูปที่ 4.17 หมายเลขขาพิน ADC บนอุปกรณ์ที่ต่อพ่วงโดยรวมของ C2000 เบอร์ TMS320F28379D....76
รูปที่ 5.1 โครงสร้างพื้นฐานของระบบที่ใช้ในการจำลองการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวล....78
รูปที่ 5.2 ตัวอย่างบล็อกเซตฟังก์ชันที่มีระบบประกอบด้วย Input, Process และ Output....79
รูปที่ 5.3 การเปิดใช้งานโปรแกรม MATLAB/Simulink Version R2024a....80
รูปที่ 5.4 ส่วนประกอบหน้าต่าง Simulink Start Page....81
รูปที่ 5.5 การเปิดหน้าต่าง Simulink Editor....81
รูปที่ 5.6 การเปิดใช้งาน Simulink Library Browser....82
รูปที่ 5.7 หน้าต่างเปิดใช้งานโปรแกรม Code Composer Studio (CCS) Version 12.4.0....83
รูปที่ 5.8 การตั้งค่า Configuration Parameters ในโปรแกรม MATLAB/Simulink Version R2024a....84
รูปที่ 5.9 บล็อกเซ็ตของ Test_CCS.slx ในโปรแกรม MATLAB/Simulink Version R2024a....84
รูปที่ 5.10 การตั้งค่า Model Configuration Parameters ในโปรแกรม MATLAB/Simulink Version R2024a....85
รูปที่ 5.11 ผลการ Build ผ่านแล้วที่บล็อกเซ็ตของ Test_CCS.out ในโปรแกรม MATLAB/Simulink Version R2024a....86
รูปที่ 5.12 การตั้งชื่อ New Target Configurations....87
รูปที่ 5.13 การตั้งค่าสร้างไฟล์ชื่อที่จะเชื่อมต่อกับโปรกรม CCS....87
รูปที่ 5.14 การตั้งค่าอุปกรณ์ที่จะเชื่อมต่อโปรกรม CCS....88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

รูปที่ 5.15 ค้นหา Target Configurations....88
รูปที่ 5.16 เลือก Launch Selected Configuration....89
รูปที่ 5.17 แสดงการ Disconnected Device ที่ช่อง Debug....89
รูปที่ 5.18 แสดงช่อง Debug....90
รูปที่ 5.19 การทำ Connect Target....90
รูปที่ 5.20 การเชื่อมต่อกับบอร์ด TMS320F28379D....91
รูปที่ 5.21 หยุดการเชื่อมต่อบอร์ด TMS320F28379D....91
รูปที่ 5.22 การจำลองเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลของมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ในโปรแกรม MATLAB/Simulink....92
รูปที่ 5.23 รูปคลื่นของวงจรประวิงเวลาที่ได้จากการจำลอง....93
รูปที่ 5.24 รูปคลื่นสัญญาณของสวิตช์ IGBT ตัวที่ 1 และสวิตช์ IGBT ตัวที่ 2 ตัว ที่ค่าดิวตี้ 60% จากการจำลอง....93
รูปที่ 5.25 รูปคลื่นสัญญาณของสวิตช์ IGBT ตัวที่ 1 และสวิตช์ IGBT ตัวที่ 2 ตัว ที่ค่าดิวตี้ 90%....94
รูปที่ 5.26 รูปคลื่นสัญญาณและฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสที่ค่าดิวตี้ 10% จากการจำลอง....95
รูปที่ 5.27 รูปคลื่นสัญญาณและฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสที่ค่าดิวตี้ 30% จากการจำลอง....96
รูปที่ 5.28 รูปคลื่นสัญญาณและฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสที่ค่าดิวตี้ 50% จากการจำลอง....97
รูปที่ 5.29 รูปคลื่นสัญญาณและฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสที่ค่าดิวตี้ 70% จากการจำลอง....98
รูปที่ 5.30 รูปคลื่นสัญญาณและฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสที่ค่าดิวตี้ 90% จากการจำลอง....99
รูปที่ 5.31 (ก) การจำลองค่าความชันในโปรแกรม MATLAB/Simulink (ข) การเปลี่ยนค่าความชันที่ช่อง Gain Value และ (ค) การเปลี่ยนค่าดิวตี้ที่ช่อง Upper Limit และ Lower Limit..100
รูปที่ 5.32 การจำลองแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 0.5, 1.0, 1.5, 2 และที่ค่าดิวดี้ 5-90%....101
รูปที่ 5.33 การจำลองแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 0.5, 1.0, 1.5, 2 และที่ค่าดิวดี้ 10-90%....102
รูปที่ 5.34 การจำลองแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 0.5, 1.0, 1.5, 2 และที่ค่าดิวดี้ 15-90%....103
รูปที่ 5.35 การจำลองแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 0.5, 1.0, 1.5, 2 และที่ค่าดิวดี้ 20-90%....104

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

รูปที่ 5.36 (ก) การจำลองค่าความชันในโปรแกรม MATLAB/Simulink (ข) การเปลี่ยนค่าใส่โหลดที่ช่อง Final Value.....105

รูปที่ 5.37 การจำลองแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 0.5, 1.0, 1.5, 2 และที่ค่าดิวดี้ 5-90%.....106

รูปที่ 5.38 การจำลองแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 0.5, 1.0, 1.5, 2 และที่ค่าดิวดี้ 10-90%.....107

รูปที่ 5.39 การจำลองแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 0.5, 1.0, 1.5, 2 และที่ค่าดิวดี้ 15-90%.....108

รูปที่ 5.40 การจำลองแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 0.5, 1.0, 1.5, 2 และที่ค่าดิวดี้ 20-90%.....109

รูปที่ 5.41 การจำลองเริ่มหมุนมอเตอร์แบบโดยตรง Direct On Line : DOL.....110

รูปที่ 5.42 การจำลองเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลของมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าดิวตี้ 50% ที่โหลด 1.1 Nm.....111

รูปที่ 5.43 การจำลองเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลของมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าดิวตี้ 90% ที่โหลด 1.1 Nm.....111

รูปที่ 5.44 การจำลองเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลของมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าดิวตี้ 50% ที่โหลด 1.3 Nm.....112

รูปที่ 5.45 การจำลองเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลของมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าดิวตี้ 90% ที่โหลด 1.3 Nm.....113

รูปที่ 5.46 การจำลองเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลของมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าดิวตี้ 50% ที่โหลด 1.8 Nm.....113

รูปที่ 5.47 การจำลองเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลของมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าดิวตี้ 90% ที่โหลด 1.8 Nm.....114

รูปที่ 5.48 การจำลองเริ่มหมุนมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าควบคุมกระแสพิกัด 200% แบบไม่มีโหลดและแบบมีโหลด 1.1 Nm.....115

รูปที่ 5.49 การจำลองเริ่มหมุนมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าควบคุมกระแสพิกัด 250% แบบไม่มีโหลดและแบบมีโหลด 1.1 Nm.....115

รูปที่ 5.50 การจำลองเริ่มหมุนมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าควบคุมกระแสพิกัด 300% แบบไม่มีโหลดและแบบมีโหลด 1.1 Nm.....115

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

รูปที่ 5.51 การจำลองเริ่มหมุนมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าควบคุมกระแสพิกัด 350% แบบไม่มีโหลดและแบบมีโหลด 1.1 Nm.....116
รูปที่ 5.52 การจำลองเริ่มหมุนมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าควบคุมกระแสพิกัด 400% แบบไม่มีโหลดและแบบมีโหลด 1.1 Nm.....116
รูปที่ 6.1 โครงสร้างพื้นฐานของระบบที่ใช้ในการทดสอบการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวล.....118
รูปที่ 6.2 รูปคลื่นของวงจรประวิงเวลาที่ได้จากการทดสอบ.....118
รูปที่ 6.3 การจับขาสัญญาณของสวิตช์ IGBT ตัวที่ 1 และสวิตช์ IGBT ตัวที่ 2 ตัว.....119
รูปที่ 6.4 รูปคลื่นสัญญาณของสวิตช์ IGBT ตัวที่ 1 และสวิตช์ IGBT ตัวที่ 2 ตัว ที่ค่าดิวตี้ 60%.....120
รูปที่ 6.5 รูปคลื่นสัญญาณของสวิตช์ IGBT ตัวที่ 1 และสวิตช์ IGBT ตัวที่ 2 ตัว ที่ค่าดิวตี้ 90%.....121
รูปที่ 6.6 รูปคลื่นสัญญาณและฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสที่ค่าดิวตี้ 10%.....122
รูปที่ 6.7 รูปคลื่นสัญญาณและฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสที่ค่าดิวตี้ 30%.....122
รูปที่ 6.8 รูปคลื่นสัญญาณและฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสที่ค่าดิวตี้ 50%.....123
รูปที่ 6.9 รูปคลื่นสัญญาณและฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสที่ค่าดิวตี้ 70%.....124
รูปที่ 6.10 รูปคลื่นสัญญาณและฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสที่ค่าดิวตี้ 90%.....124
รูปที่ 6.11 การเชื่อมสัญญาณ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS จาก C2000 Microcontroller เบอร์ TMS320F28379D.....125
รูปที่ 6.12 การจำลองเทคนิคการควบคุมกระแสเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลจากทูลบล็อก Simulink และการเปลี่ยนค่าความชันที่ช่อง Gain Value.....127
รูปที่ 6.13 การเปลี่ยนค่าดิวตี้ที่ช่อง Upper Limit และ Lower Limit.....128
รูปที่ 6.14 การทดสอบแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 0.5, 1.0, 1.5, 2 และที่ค่าดิวตี้ 5-90%.....129
รูปที่ 6.15 การทดสอบแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 0.5, 1.0, 1.5, 2 และที่ค่าดิวตี้ 10-90%.....130
รูปที่ 6.16 การทดสอบแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 0.5, 1.0, 1.5, 2 และที่ค่าดิวตี้ 15-90%.....132
รูปที่ 6.17 การทดสอบแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 0.5, 1.0, 1.5, 2 และที่ค่าดิวตี้ 20-90%.....133
รูปที่ 6.18 การทดสอบแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 0.5, 1.0, 1.5, 2 และที่ค่าดิวตี้ 5-90%.....135
รูปที่ 6.19 การทดสอบแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 0.5, 1.0, 1.5, 2 และที่ค่าดิวตี้ 10-90%.....136
รูปที่ 6.20 การทดสอบแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 0.5, 1.0, 1.5, 2 และที่ค่าดิวตี้ 15-90%.....137
รูปที่ 6.21 การทดสอบแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 0.5, 1.0, 1.5, 2 และที่ค่าดิวตี้ 20-90%.....139
รูปที่ 6.22 การทดสอบเริ่มหมุนมอเตอร์แบบโดยตรง Direct On Line : DOL.....139

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

รูปที่ 6.23 การทดสอบเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลของมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าดิวตี้ 50% ที่โหลด 1.1 Nm.....140
รูปที่ 6.24 การทดสอบเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลของมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าดิวตี้ 90% ที่โหลด 1.1 Nm.....141
รูปที่ 6.25 การทดสอบเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลของมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าดิวตี้ 50% ที่โหลด 1.3 Nm.....142
รูปที่ 6.26 การทดสอบเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลของมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าดิวตี้ 90% ที่โหลด 1.3 Nm.....142
รูปที่ 6.27 การทดสอบเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลของมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter PWMSS ที่ค่าดิวตี้ 50% ที่โหลด 1.8 Nm.....143
รูปที่ 6.28 การทดสอบเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลของมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าดิวตี้ 90% ที่โหลด 1.8 Nm.....144
รูปที่ 6.29 การทดสอบเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลของมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าดิวตี้ 50% ที่โหลด 1.1 Nm.....144
รูปที่ 6.30 การทดสอบเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลของมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าดิวตี้ 90% ที่โหลด 1.1 Nm.....145
รูปที่ 6.31 การทดสอบเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลของมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าดิวตี้ 50% ที่โหลด 1.3 Nm.....145
รูปที่ 6.32 การทดสอบเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลของมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าดิวตี้ 90% ที่โหลด 1.3 Nm.....145
รูปที่ 6.33 การทดสอบเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลของมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าดิวตี้ 50% ที่โหลด 1.8 Nm.....146
รูปที่ 6.34 การทดสอบเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลของมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าดิวตี้ 90% ที่โหลด 1.8 Nm.....146
รูปที่ 6.35 กราฟความสัมพันธ์จากการทดสอบเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลของมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าดิวตี้ 50% และ 90% ที่โหลด 1.1 Nm ,1.3 Nm, 1.8 Nm.....148
รูปที่ 6.36 การเริ่มหมุนมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าควบคุมกระแสพิกัด 200% แบบไม่มีโหลดและแบบมีโหลด 1.1 Nm.....148

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

รูปที่ 6.37 การเริ่มหมุนมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าควบคุมกระแสพิกัด 250% แบบไม่มีโหลดและแบบมีโหลด 1.1 Nm.....149
รูปที่ 6.38 การเริ่มหมุนมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าควบคุมกระแสพิกัด 300% แบบไม่มีโหลดและแบบมีโหลด 1.1 Nm.....149
รูปที่ 6.39 การเริ่มหมุนมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าควบคุมกระแสพิกัด 350% แบบไม่มีโหลดและแบบมีโหลด 1.1 Nm.....150
รูปที่ 6.40 การเริ่มหมุนมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าควบคุมกระแสพิกัด 400% แบบไม่มีโหลดและแบบมีโหลด 1.1 Nm.....150
รูปที่ 7.1 การจำลองระบบควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลโดยวิธีการพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์แบบอะซิงโครนัส Asynchronous PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS.....152
รูปที่ 7.2 การทดสอบระบบควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลโดยวิธีการพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์แบบอะซิงโครนัส Asynchronous PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS.....153
รูปที่ 7.3 การเริ่มหมุนมอเตอร์โดยตรง Direct On Line : DOL แบบไม่มีโหลด.....154
รูปที่ 7.4 การเริ่มหมุนมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าควบคุมกระแสพิกัด 200% แบบไม่มีโหลด.....154
รูปที่ 7.5 การเริ่มหมุนมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าควบคุมกระแสพิกัด 200% แบบมีโหลด 1.1 Nm.....155
รูปที่ 7.6 การเริ่มหมุนมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าควบคุมกระแสพิกัด 150% แบบมีโหลด 1.1 Nm.....155

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

a_0	องค์ประกอบไฟตรง
a_n , b_n	องค์ประกอบฟูเรียร์
n	อันดับฮาร์มอนิก
ω_c	ความถี่เชิงมุมของสัญญาณพาหะ
t_{on}	คาบเวลาสวิตช์ ON
t_{off}	คาบเวลาสวิตช์ OFF
T_s	คาบเวลาสวิตช์ซิ่ง
V_{cont}	แอมปลิจูดของสัญญาณแรงดันควบคุม
V_{tri}	แอมปลิจูดของสัญญาณแรงดันพาหะ
D	ค่าดิวตี้เรโซ
Phase Control	การควบคุมเริ่มหมุนโดยควบคุมเฟส
PCSS	การควบคุมเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลโดย Phase Control Soft Starter : PCSS
PWMSS	การควบคุมเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลโดยวิธีการพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์แบบอะซิงโครนัส Asynchronous PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS
S	ความชัน
t	เวลาไต่ขึ้น (sec)
$\%\mathrm{D}_{\mathrm{act}}$	เปอร์เซ็นต์ดิวตี้ไซเคิลค่าจริงตามฟังก์ชั่นเวลา
$\%\mathrm{D}_{\mathrm{fi}}$	เปอร์เซ็นต์ดิวตี้ไซเคิลของค่าที่ต้องการ
$\%\mathrm{D}_{\mathrm{in}}$	เปอร์เซ็นต์ดิวตี้ไซเคิลของค่าที่เริ่มต้น
n_r	ความเร็วซิงโครนัส
n_s	ความเร็วโรเตอร์
s	สลิปมอเตอร์เหนี่ยวนำ
f_r	ความถี่โรเตอร์
f_e	ความถี่สเตเตอร์
V	แรงดันไฟฟ้าพิกัด
I	กระแสไฟฟ้าพิกัด
R	ความต้านทานไฟฟ้า
X	ความต้านทานเสมือน
P_i	กำลังไฟฟ้าขาเข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

P_e	กำลังไฟฟ้าขาออกของโรเตอร์
T_e	แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า
P_o	กำลังทางกลทั้งหมดที่ออกจากมอเตอร์
P_r	ค่าสูญสียจากการหมุนในแกนเหล็ก
T_o	แรงบิดทางกลของมอเตอร์
ω_s	ความเร็วเชิงมุมที่ความเร็วซิงโครนัสมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส
P	จำนวนขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์
f	ความถี่ทางไฟฟ้าของแหล่งจ่าย
ω	ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้า
θ	มุมระหว่าง
V_b	แรงดันไฟฟ้าขณะทดสอบจับยึดโรเตอร์
I_b	กระแสไฟฟ้าขณะทดสอบจับยึดโรเตอร์
P_b	กำลังไฟฟ้าขณะทดสอบจับยึดโรเตอร์
V_{nl}	แรงดันไฟฟ้าขณะทดสอบเมื่อไร้สภาวะทางกล
I_{nl}	กระแสไฟฟ้าขณะทดสอบเมื่อไร้สภาวะทางกล
P_{nl}	กำลังไฟฟ้าขณะทดสอบเมื่อไร้สภาวะทางกล
I_p	กระแสไฟฟ้าสูงสุด (Peak current : I max, I peak)
V_p	แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (Peak voltage : V max, V peak)
P_p	ค่ากำลังไฟฟ้าชั่วขณะ (V peak * I peak)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำในการจัดทำงานวิจัย

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาในงานวิจัย

ในปัจจุบันนี้เราคงจะปฏิเสธไม่ได้ว่าเครื่องจักรกลที่ใช้ในการเปลี่ยนรูปพลังงานจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลที่นิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายก็คือมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ [1], [7] ได้เข้ามามีบทบาทอย่างมากทั้งในชีวิตประจำวันและการทำงาน เนื่องมาจากลักษณะโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ไม่จำเป็นต้องมีการดูแลรักษามากนัก เพื่อใช้สำหรับอำนวยความสะดวกสบายโดยเฉพาะอย่างยิ่งเครื่องจักรกลไฟฟ้าประเภทมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส (Single Phase Induction Motor: SPIM) ซึ่งนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งภาคอุตสาหกรรม และภาคเกษตรกรรม เนื่องมาจากมีโครงสร้างที่มีความแข็งแรงทนทาน ใช้งานได้ง่าย บำรุงรักษาน้อย และที่สำคัญราคาไม่สูงมากนัก สำหรับการนำไปใช้ขึ้นอยู่กับลักษณะของงานในชีวิตประจำวันที่ใช้อยู่ตามบ้านเรือน อย่างเช่น พัดลม เครื่องม้วน เครื่องเจาะ ปั๊มน้ำ เครื่องซักผ้า และคอมเฟรสเซอร์ในเครื่องปรับอากาศ ระบบไฟฟ้าในบ้านเรือน โดยทั่วไปจะเป็นไฟฟ้าเฟสเดียวเพราะมีความสะดวกสะบาย ราคาไม่แพง เป็นต้น เราเรียกลักษณะใช้มอเตอร์เปลี่ยนรูปพลังงานว่า ภาระของมอเตอร์ (Load Motor) ซึ่งลักษณะงานภาระของมอเตอร์ที่ใช้ก็แตกต่างกัน เช่น ภาระเบา ภาระปานกลาง และภาระหนัก อาจจะคงที่หรือไม่คงที่ขึ้นอยู่กับช่วงระยะเวลาและลักษณะงานภาระของมอเตอร์ ถ้ามอเตอร์ทำงานที่ภาระเบาจะส่งผลต่อประสิทธิภาพและตัวประกอบกำลังค่อนข้างต่ำ และหากใช้มอเตอร์ที่ภาระเบาเป็นจำนวนมากจะทำให้เกิดการค่าสูญเสียค่อนข้างสูง ดังนั้นการจะหาวิธีที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์จึงเป็นเรื่องที่ควรตระหนัก

ถึงแม้ว่าในปัจจุบันนี้ด้วยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีทำให้มีการสร้างและออกแบบมอเตอร์นั้นยังคงอยู่ในระดับของการวิจัยในห้องปฏิบัติการอีกทั้งลักษณะงานเฉพาะทางที่นำมอเตอร์สมัยใหม่มาใช้ยังมีไม่มากนัก ในขณะที่ลักษณะงานทั่วไปในการนำมอเตอร์มาใช้งานนั้นมอเตอร์เหนี่ยวนำก็สามารถตอบโจทย์การใช้งานได้เพียงพอแล้วนั้น จึงทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำยังคงถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยมอเตอร์เหนี่ยวนำหากแบ่งตามชนิดของโรเตอร์สามารถแบ่งออกได้ 2 ชนิด คือแบบกรงกระรอก (Squirrel Cage Rotor) และชนิดขดลวดพันที่โรเตอร์ (Wound Rotor) โดยชนิดกรงกระรอกนั้นใช้กับงานทั่วไปที่ไม่ต้องการแรงบิดหรือการเริ่มหมุนแบบพิเศษจึงทำให้เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย [1-20] ในขณะที่ชนิดขดลวดพันที่โรเตอร์ถูกนำมาใช้ลักษณะงานที่ต้องการแรงบิดเริ่มหมุนที่สูงกว่าชนิดกรงกระรอก โดยขดลวดทางด้านโรเตอร์สามารถต่อกับต่อกับตัวต้านทานภายนอกได้เพื่อใช้ในการเพิ่มสมรรถนะทางด้านแรงบิดให้กับมอเตอร์ชนิดนี้ นั้นทำให้มีการต่อใช้งานที่ซับซ้อนมากกว่าชนิดกรงกระรอกดังนั้นมอเตอร์ชนิดนี้จึงเหมาะกับบางงานเท่านั้น แต่หากแบ่งชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของมอเตอร์เหนี่ยวนำตามแหล่งจ่ายไฟฟ้าแล้วสามารถแบ่งออกได้ 2 ชนิด คือ 1 เฟส และ 3 เฟส ซึ่งชนิด 1 เฟส ถูกนำมาใช้ในบ้านพักอาศัยหรือสำนักงานที่ใช้ระบบไฟฟ้า 1 เฟส ส่วนใหญ่มอเตอร์ชนิดนี้เป็นแบบกรงกระรอกและมีขนาดแรงม้าต่ำกว่า 7.5 แรงม้า [30] ถ้ากรณีที่ระบบไฟฟ้า 3 เฟส เข้าถึงและต้องใช้มอเตอร์ในการขับเคลื่อนภาระตั้งแต่ 10 แรงม้า ขึ้นไปมอเตอร์ชนิด 3 เฟส จึงถูกเลือกใช้งานมากกว่าโดยเฉพาะอย่างยิ่งในโรงงานอุตสาหกรรมที่ต้องการขับเคลื่อนภาระที่แรงม้าสูงๆ และไม่ต้องการเปลี่ยนความเร็วรอบให้กับภาระที่ขับเคลื่อน [28], [30] นั้นจึงทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบกรงกระรอกยังเป็นที่นิยมใช้มาจนถึงปัจจุบัน [29]

การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำให้เริ่มต้นทำงานนั้นสามารถควบคุมได้ 3 วิธี ได้แก่ วิธีที่ 1 เรียกว่าการต่อแหล่งจ่ายเข้ามอเตอร์โดยตรง (Direct Online Starting) ซึ่งส่วนใหญ่ใช้กับมอเตอร์ขนาดแรงม้าไม่สูงมาก วิธีการนี้มอเตอร์ใช้กระแสประมาณ 5-7 เท่าของกระแสพิกัดและนอกจากนี้หากนำไปใช้กับมอเตอร์ที่มีภาระเบา ผลที่ได้ก็คือทำให้อัตราเร่งของโรเตอร์สูงเกินไปเนื่องจากมอเตอร์มีแรงบิดขณะเริ่มหมุนสูง ทำให้เกิดการกระชากและเกิดการแกว่งของแรงบิดที่เพลาในระยะยาวทำให้ชุดส่งกำลังและชุดเกียร์เกิดการชำรุดได้ [29], [31] วิธีที่ 2 เรียกว่าการลดแรงดันขณะเริ่มหมุน (Reduce Voltage Starting) วิธีการนี้นำมาใช้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีขนาดพิกัดมากกว่า 7.5 แรงม้าทั้งนี้ก็เนื่องมาจากมอเตอร์กินกระแสขณะเริ่มหมุนสูงมากทำให้เกิดแรงดันตกในสายไฟฟ้าชั่วขณะ ซึ่งส่งผลกระทบต่อภาระอื่นได้ [35] วิธีการนี้ได้มีวิวัฒนาการเริ่มตั้งแต่การใช้วงจรแบบสตาร์-เดลต้า ผลของการเริ่มหมุนมอเตอร์แบบนี้ทำให้แรงบิดของมอเตอร์ลดลงเหลือ 1 ใน 3 ของแรงบิดที่พิกัดซึ่งหากมอเตอร์มีขนาดแรงม้าสูงๆก็ทำให้มอเตอร์ใช้กระแสสูงในการเริ่มหมุนด้วย ดังนั้นในภาคอุตสาหกรรมที่จำเป็นต้องใช้มอเตอร์ขนาดแรงม้าสูงในกระบวนการผลิตและอาจมีจำนวนหลายตัว หากมีการเริ่มต้นการทำงานพร้อมกันทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับแรงดันตกในระบบซึ่งอาจส่งผลเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นที่ต่อใช้ระบบไฟฟ้าร่วมกัน [29], [30] นั้นทำให้จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์อื่นมาต่อร่วมเพื่อลดผลกระทบจากการเริ่มต้นทำงานให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งในอดีตที่ผ่านมามีวิวัฒนาการในการควบคุมการเริ่มหมุนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหลายๆรูปแบบ ได้แก่ การใช้หม้อแปลงปรับแรงดัน (Auto Transformer) ที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคมักใช้งานโดยการมาปรับขนาดแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ซึ่งเป็นวิธีการดั้งเดิมซึ่งสามารถค่อยๆปรับขนาดแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ได้แต่มีค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูงเพราะต้องใช้ขนาดหม้อแปลงที่สูงตามขนาดมอเตอร์ด้วย ในขณะที่ในปัจจุบันได้มีการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังมาใช้ในการควบคุมหรือที่เราเรียกว่าการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวล (Soft Start Controlling) โดยใช้หลักการควบคุมเฟส (Phase Control) ส่วนมากใช้ไทรีสเตอร์ต่อสลับหัวท้ายแล้วควบคุมมุมจุดชนวน ซึ่งหลักการนี้สามารถควบคุมแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำได้อีกวิธีการหนึ่งและเป็นที่นิยมในปัจจุบัน ถึงแม้ว่าวิธีเริ่มหมุนแบบนี้ทำให้รูปคลื่นแรงดันและกระแสผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ก็ตาม [25-28] ส่วนวิธีที่ 3 นั้นคือการใช้อินเวอร์เตอร์ในการปรับความถี่ให้กับมอเตอร์ซึ่งวิธีนี้สามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ได้อีกด้วย แต่วิธีการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นี้หากไม่ค่อยนิยมนำมาใช้ขับเคลื่อนภาระทั่วไปเพราะว่ามีค่าใช้จ่ายที่สูงกว่าแบบที่ใช้การไทรีสเตอร์ในการควบคุมการเริ่มหมุน

ในงานวิจัยนี้ได้เน้นการศึกษาและนำเสนอการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ท โดยการเปลี่ยนวงจรกำลังระบบเดิมที่ใช้การควบคุมเฟสมาใช้วงจรกำลังเอซี ช็อปเปอร์ ซึ่งใช้หลักการปรับค่าดิวตี้เรโชให้กับวงจรกำลังซึ่งทำหน้าที่ควบคุมแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ เมื่อค้นคว้างานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันพบว่าส่วนใหญ่ยังคงใช้วิธีการควบคุมเฟสให้กับไทรีสเตอร์ที่ต่อแบบสลับหัวท้ายแล้วใช้การปรับขนาดมุมจุดชนวนเพื่อปรับขนาดแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ซึ่งข้อเสียของหลักการนี้ทำให้รูปคลื่นกระแสผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ทโดยใช้เทคนิคอะซิงโครนัส พีดับเบิ้ลยูเอ็มเอซี ช็อปเปอร์ ที่มีข้อดีทำให้รูปคลื่นกระแสไม่ผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์โดยได้มีการค้นคว้า และรวบรวมข้อมูลวิจัยต่างๆ ในอดีตดังนี้ [20]

Venkata V. Sastry, M. Rajendra Prasad และ T. V.Sivakumar [25] ได้นำเสนอการควบคุมให้มอเตอร์เริ่มหมุนแบบนิ่มนวลโดยการควบคุมแรงดันที่เหมาะสมเพื่อจ่ายให้กับมอเตอร์โดยใช้การควบคุมแรงดันที่ตกคร่อมไทรีสเตอร์ พบว่าใช้วิธีการตรวจจับสัญญากระแสแล้วทำการกรองเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาฟันเลื่อยทำให้ได้สัญญาณที่ใช้ขับไทริสเตอร์ ผลที่ได้คือกราฟความเร็วรอบของมอเตอร์มีการกระเพื่อมในช่วงเริ่มต้น ทั้งนี้เนื่องมาจากผลของแรงดันและกระแสผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์

G. Zenginobuz, I. Cadirci, M. Ermis และ C. Barlak [26] ได้ศึกษาการปรับขนาดแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ที่จ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส โดยการควบคุมมุมจุดชนวนที่เหมาะสมให้กับมอเตอร์พบว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถควบคุมให้มอเตอร์เริ่มหมุนแบบนิ่มนวลได้ นอกจากนี้ผู้วิจัยยังนำเสนอการนำสัญญาณกระแสมาป้อนกลับในระบบเพื่อควบคุมขนาดแอมพลิจูดของกระแสให้คงที่อย่างไรก็ตามถึงสามารถควบคุมแอมพลิจูดของรูปคลื่นกระแสไว้ได้ แต่รูปคลื่นกระแสในช่วงที่แรงดันยังไม่เข้าสู่สภาวะคงตัวยังคงมีการผิดเพี้ยนอยู่

Bilal Saracoglu, Murat Kale และ Engin Ozdemir [27] ได้นำเสนอการปรับขนาดแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส โดยใช้วงจรเอซี ช็อปเปอร์ โดยใช้สวิตช์ทั้งหมด 8 ตัว ต่อเป็นวงจรกำลังซึ่งจำเป็นต้องมีการตรวจจับค่าศูนย์ (Zero Crossing) ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าทั้งสามเฟสผลที่ได้จากงานวิจัยนี้คือ รูปคลื่นแรงดันมีความผิดเพี้ยนเนื่องจากแรงดันที่จ่ายไปให้มอเตอร์มีการช็อปตามความถี่สวิตช์ชิ่ง นั้นคือรูปคลื่นแรงดันมีองค์ประกอบฮาร์มอนิกอันดับสูงแต่รูปคลื่นกระแสเข้าใกล้รูปคลื่นไซน์ส่วนผลสรุปจากงานวิจัยที่พบ คือการปรับขนาดแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์โดยใช้วงจรเอซี ช็อปเปอร์ช่วยให้มอเตอร์มีประสิทธิภาพสูงขึ้น กล่าวคือการปรับขนาดแรงดันลงส่งผลให้ค่ามุมประกอบกำลังดีขึ้นกำลังไฟฟ้าด้านอินพุตลดลงและทำให้ประสิทธิภาพของตัวมอเตอร์ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Hamdy A. Ashour และ Rania A. lbrahim [28] ได้ทำการเปรียบเทียบการปรับขนาดแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์โดยใช้วงจรควบคุมเฟสพบว่าทั้งรูปคลื่นแรงดันและกระแสมีความผิดเพี้ยน โดยเมื่อนำมาพล็อตสเปกตรัมสิ่งที่ยืนยันได้ชัดเจนก็คือรูปคลื่นทั้งสองมีองค์ประกอบฮาร์มอนิกอันดับต่ำซึ่งส่งผลต่อแรงบิดของมอเตอร์

G. Bhuvaneswari, Chares S และ Manjula G. Nair [29] ได้นำเสนอการนำแอคทีฟฟิลเตอร์มาใช้ในการแก้ปัญหารูปคลื่นกระแสของเครื่องควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวล (Soft-Starter) เนื่องจากวิธีการเริ่มหมุนที่ใช้การควบคุมเฟสทำให้กระแสผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ โดยงานวิจัยนี้สามารถแก้ไขรูปคลื่นกระแสทั้งสามเฟสให้เข้าใกล้รูปคลื่นไซน์ได้แต่วิธีการนี้มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงจึงไม่เหมาะสมที่นำมาใช้แก้ปัญหา

Deniz Yildirim และ Murat Bilgic [30] ได้ใช้วงจรเอซี ช็อปเปอร์ระบบหนึ่งเฟสมาใช้เป็นวงจรกำลังโดยใช้สวิตช์ 4 ตัวและมีรูปแบบในการสร้างสัญญาณเหมือนกับกรณีสามเฟส โดยในการวิจัยนี้ทำการปรับขนาดแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์พัดลมชนิดหนึ่งเฟสพบว่ามีการใช้ความถี่สวิตช์ชิ่งสูงและได้มีการออกแบบวงจรกรองสัญญาณแรงดันก่อนเข้าวงจรกำลังของวงจรเอซี ช็อปเปอร์ ทั้งนี้เพื่อลดผลกระทบที่เกิดจากความถี่สวิตช์ชิ่งนั้นเอง ผลที่ได้อีกอย่างหนึ่งก็คือเมื่อนำผลกราฟแรงบิด-ความเร็วรอบมาวิเคราะห์ผลพบว่าที่นำเสนอได้คุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบต่ำกว่ากรณีจ่ายแรงดันไซน์

Jose Thankachan และ Saly George [31] ได้นำเสนอการนำวงจรเอซี ช็อปเปอร์ที่ใช้สวิตช์ 8 ตัว ซึ่งมีวงจรกำลังเหมือนกับ Bilal Saracoglu, Murat Kale และ Engin Ozdemir [24] และนั้นต้องมีการใช้วงจรตรวจจับแรงดันศูนย์เช่นเดียวกันจึงสามารถสร้างรูปแบบการควบคุมสวิตช์ทั้ง 8 ตัวได้ นั้นทำให้มีความซับซ้อนและยุ่งยากในการควบคุมแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส โดยในงานวิจัยทำการจำลองปรับความถี่สวิตช์ชิ่งและปรับค่าดิวตี้ไซเคิลหรือค่าดิวตี้เรโช (Duty Cycle หรือ Duty Ratio: D) เพื่อศึกษาค่ามุมประกอบกำลังของมอเตอร์

A.N. Arvindan [32] ได้นำเสนอการนำวงจรสวิตช์แบบสองทิศทางมาต่อเป็นวงจรกำลังเพื่อควบคุมภาระโหลดแบบ RL อนุกรมต่อสามเฟสแบบสตาร์โดยทำการวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันและกระแสทั้งของแหล่งจ่ายและของภาระ ผลที่ได้คือ วงจรที่นำเสนอสามารถควบคุมขนาดแรงดันที่จ่ายให้ภาระและยังสามารถควบคุมการไหลของพลังงานจากแหล่งจ่ายไปยังภาระโดยใช้สวิตช์แบบสองทิศทาง

A. E. Fitzgerald, C. Kingsely, และ S. D. [33]; N. A. Ahmed, k. Amei, และ M. Sakui, [34] และ S. E. Oliveira [35] ได้กล่าวถึงการดัดแปลงมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสให้รันได้เสมือนกับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส โดยการนำคาปาซิเตอร์ต่อคร่อมขอลวดหนึ่งขด โดยการดัดแปลงในลักษณะนี้ทำให้แรงดัน และกระแสทั้งสามเฟสที่สเตเตอร์มีความสมดุลของขนาดมุมมากที่สุด โดยการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาค่าคาปาซิเตอร์ที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพในทำงานให้เกิดความสมดุลสูงสุด เพื่อทำการดัดแปลงมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมีสมรรถนะเหมือนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

M. J. Melfi และ S. D. Umans [36]; J. Larabee, B. Pellegrino, และ B. Fick [37] ได้กล่าวถึงปัญหาที่เกิดจากกระแสในขณะสตาร์ทที่สูงเมื่อทำการต่อแบบต่อตรง ยังมีวิธีการในการลดกระแสขณะสตาร์ทหลากหลาย เช่น การสตาร์ทสตาร์-รันเดลต้า การใช้หม้อแปลงอัตโนมัติในแต่ละวิธีการจะมีศักยภาพในการลดกระแสขณะสตาร์ทที่แตกต่างกันออกไป

V. Thanyaphirak, V. Kinnares, และ A. Kunakorn [38]; V. Thanyaphirak, V. Kinnares, และ A. Kunakorn [39] ได้กล่าวถึงการใช้พีดับบิวเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์มาทำให้เกิดการสตาร์ทแบบนิ่มนวล คุณลักษณะเมื่อทำการเปรียบเทียบกับการควบคุมเฟสโดยการควบคุมมุมจุดฉนวน ซึ่งพบว่าการควบคุมพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าจะมีความเป็นเชิงเส้นมากกว่าในขณะทำการสตาร์ท ผลก็คือจะมีแรงบิลเริ่มหมุนที่ราบเรียบกว่าลูกคลื่นกระแสขณะสตาร์ทจะมีความใกล้เคียงลูกคลื่นไซน์มากกว่าการควบคุมมุมจุดฉนวน

Said A. Deraz, และ Haitham Z. Azazi [40] ได้กล่าวถึงวิธีการสตาร์ทแบบนิ่มนวล โดยใช้ไทรริสเตอร์ควบคุมมุมจุดฉนวนซึ่งสามารถที่จะควบคุมกระแสและแรงบิลในขณะสตาร์ท อย่างไรก็ตามในรูปแบบการสตาร์ทโดยวิธีนี้ก็ยังมีข้อเสียก็คือจะทำให้เกิดฮาร์มอนิกส์ทั้งกระแสและแรงดัน ซึ่งจะส่งผลต่อค่าความสูญเสียที่เพิ่มมากขึ้นไม่ว่าจะเป็นสูญเสียในตัวนำ ความสูญเสียในแกนเหล็ก ฮาร์มอนิกส์ของกระแสจะเป็นผลให้ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ต่ำลงและค่า Displacement Power เปลี่ยนแปลงตามมุมจุดฉนวน

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษางานวิจัย

ต้องการศึกษาและทำการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ทเพิ่มสมรรถะในขณะเริ่มหมุนอย่างนิ่มนวลด้วยการควบคุมกระแสเริ่มต้น โดยการป้อนพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ เพื่อทำการเริ่มหมุนอย่างแบบนิ่มนวล จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังที่ได้กล่าวมาในเบื้องต้นแล้วนั้นอาจจะสามารถกล่าวสรุปได้ว่าการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสให้การเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลนั้นยังคงมีการใช้หลักการเดิมนั้นคือ การควบคุมขนาดแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ โดยการนำไทรีสเตอร์จำนวน 2 ตัว นำมาต่อแบบสลับขั้วดังรูปที่ 1.1 แล้วสร้างวงจรขับไทรีสเตอร์หนึ่งเฟสมาควบคุมขนาดแรงดันตั้งแต่เริ่มต้นหมุนจึงถึงเข้าสู่สภาวะคงตัวซึ่งนั้นคือการปรับมุมจุดชนวนให้กับไทรีสเตอร์ ปัญหาที่เกิดขึ้นของวิธีการนี้คือรูปคลื่นแรงดันและกระแสมีความผิดเพี้ยนหรือมีองค์ประกอบฮาร์มอนิกอันดับต่ำรวมอยู่ด้วย [25-26], [28-29] นั้นส่งผลทำให้แรงบิลแม่เหล็กมีการกระเพื่อมและนอกจากนี้การสร้างวงจรขับไทรีสเตอร์ยังมีความยุ่งยากจำเป็นต้องใช้วงจรตรวจจับแรงดันศูนย์อีกทั้งขนาดแรงดันที่ปรับได้โดยการปรับมุมจุดชนวนตามเวลานั้นขนาดแรงดันไม่เป็นเชิงเส้น โดยการแก้ปัญหาความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสจากการใช้งานเครื่องควบคุมการเริ่มหมุนแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิ่มนวลอาจต้องใช้วงจรแอคตีฟ ฟิลเตอร์ [29] มาช่วยแก้ปัญหาผลกระทบที่เกิดจากตัวมันซึ่งนั้นเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายมากขึ้น และในขณะที่เป็นวงจรเอซี ช็อปเปอร์ สามารถแก้ไขฮาร์มอนิกส์อันดับต่ำของกระแสได้ แต่จำเป็นต้องใช้สวิตช์หลายตัวทำให้มีความยุ่งยากเมื่อนำมาควบคุมขนาดแรงดันให้กับมอเตอร์ [30-32] งานวิจัยนี้จึงสนใจการออกแบบและการสร้างวงจรเอซี ช็อปเปอร์แบบหนึ่งเฟสนั้นเพื่อนำมาใช้ในการควบคุมมอเตอร์ให้เริ่มหมุนแบบนิ่มนวลเพื่อลดปัญหาความผิดเพี้ยนของกระแส อีกทั้งวงจรกำลังที่สร้างขึ้นเน้นไปที่การควบคุมแบบง่ายเพื่อให้สามารถพัฒนาไปสู่ภาคเกษตรกรรมและภาคอุตสาหกรรมได้ วงจรสวิตช์แบบสองทิศทางจำนวน 1 ตัวถูกนำมาใช้เป็นวงจรกำลังทำหน้าที่ควบคุมการไหลของพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไปหามอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสและใช้วงจรสวิตช์แบบสองทางอีกจำนวน 1 ตัว เพื่อทำหน้าที่เป็นฟรีวิลลิ่งให้กับมอเตอร์ทั้งนี้เพื่อให้แรงดันที่ตกคร่อมมอเตอร์ลดลงเป็นศูนย์ โดยรูปแบบการสร้างสัญญาณควบคุมนั้นใช้เพียงสัญญาณเดียวแต่สามารถควบคุมการสวิตช์ของสวิตช์สองทิศทางทั้งหนึ่งเฟสได้ นั้นก็อาจจะหมายถึงวิธีการที่ใช้ในการกำเนิดสัญญาณควบคุมสามารถสร้างได้ง่ายซึ่งเราจะเรียกวิธีการแบบนี้ว่าการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสโดยใช้วงจรเอซี ช็อปเปอร์ นั้นเอง

1.3 สมมุติฐานของการศึกษางานวิจัย

มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ทเมื่อยังไม่เริ่มหมุนจะมีค่าอิมพีแดนซ์ค่อนข้างต่ำถ้าแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์มีขนาดเท่ากับแรงดันที่พิกัดนั้นทำให้มอเตอร์กินกระแสสูง มอเตอร์จึงออกตัวอย่างรวดเร็วจนมีลักษณะเป็นการกระชากเนื่องจากโรเตอร์มีอัตราเร่งค่อนข้างสูง ดังนั้นตามหลักการในการควบคุมมอเตอร์ให้เริ่มหมุนแบบนิ่มนวลก็คือ การควบคุมขนาดแรงดันเริ่มต้นให้มีค่ามากพอที่จะทำให้มอเตอร์สามารถหมุนออกตัวไปได้และกระแสในช่วงเริ่มหมุนไม่พุ่งขึ้นสูงเหมือนกรณีที่จ่ายแรงดันที่พิกัด เมื่อมอเตอร์เริ่มหมุนและแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์ก็จะค่อยๆเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้กระแสมอเตอร์เริ่มค่อยเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และหลังจากนั้นเมื่อแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์เพิ่มขึ้นก่อนถึงแรงดันที่พิกัดทำให้กระแสมอเตอร์เพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดและความเร็วรอบมอเตอร์เข้าใกล้ความเร็วซิงโครนัสหลังจากนั้นเมื่อแรงดันมอเตอร์เพิ่มขึ้นถึงแรงดันพิกัดทำให้กระแสมอเตอร์ลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งหลักการดังที่ได้กล่าวมาแล้วได้มีผู้วิจัยหลายท่านนำหลักเทคนิคการควบคุมเฟสมาใช้ในการควบคุมการเริ่มหมุนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ แต่หลักการควบคุมเฟสนี้จะมีข้อเสียคือในช่วงที่มอเตอร์เริ่มหมุนจนถึงความเร็วซิงโครนัสทำให้มีรูปคลื่นแรงดันและกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์ผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ซึ่งส่งผลต่อแรงบิดแม่เหล็กของมอเตอร์ ดังนั้นหากต้องการให้รูปคลื่นแรงดันและกระแสเป็นรูปคลื่นไซน์จำเป็นต้องเปลี่ยนวงจรกำลังนั้นคือการใช้วงจรเอซี ช็อปเปอร์ซึ่งเป็นวงจรที่ใช้การสับรูปคลื่นแรงดันของแหล่งจ่ายโดยใช้ความถี่สูงสวิตช์ซิ่ง โดยขนาดแรงดันสามารถปรับค่าได้แบบเชิงเส้น หลักการนี้ทำให้รูปคลื่นกระแสเข้าใกล้รูปคลื่นไซน์ในขณะที่รูปคลื่นแรงดันมีองค์ประกอบอันดับสูงเกิดขึ้นตามความถี่สวิตช์ซิ่งนั้นทำให้ไม่มีการสูญเสียจากฮาร์มอนิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลดีต่อมาก็คือทำให้แรงบิดมีการกระเพื่อมลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับหลักการใช้เทคนิคการควบคุมเฟสในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการออกแบบการควบคุมวงจรกำลังที่ไม่ซับซ้อนเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรเอซี ช็อปเปอร์แบบดั้งเดิมนั้นเอง [25-28]

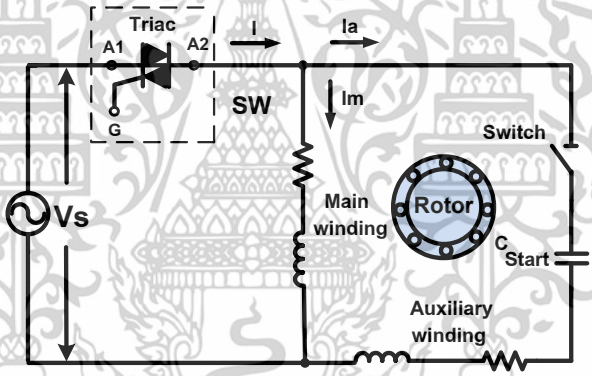
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการทำงานวิจัย

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นด้วยแล้วพบว่าเรื่องการควบคุมเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ทที่มีขายอยู่ในท้องตลาดทุกวันนี้นั้นส่วนใหญ่จะใช้หลักการควบคุมเฟสของแรงดัน โดยใช้พื้นฐานจากวงจรควบคุมการปรับขนาดแรงดัน (AC Voltage Controllers) [33-34] ซึ่งวงจรกำลังของวงจรดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 1.1 โดยวงจรกำลังแบบนี้ได้ใช้ SCR ซึ่งมีการพัฒนาการมาอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่วงจรเอซี ช็อปเปอร์แบบดั้งเดิมที่ใช้ควบคุมแรงดันไฟฟ้าหนึ่งเฟส นั้นในงานวิจัยที่ผ่านมาใช้สวิตช์จำนวน 4 ตัว ในการควบคุมวงจรกำลัง [27], [31-32] แสดงดังรูปที่ 1.2 จะเป็นรูปแบบที่ Synchronous PWM AC Chopper จะมีความซับซ้อนในการสร้างที่มากกว่า โดยยังต้องใช้วงจร Zero Crossing ที่พัฒนาระบบการควบคุมแบบดั้งเดิมโดยมีวัตถุประสงค์ทำให้คลื่นกระแสเข้าใกล้รูปคลื่นไซน์ เนื่องจากจำนวนสวิตช์ที่มากขึ้นนั้นทำให้การสร้างรูปแบบในการสวิตช์มีความซับซ้อนมากขึ้นทำให้ยังไม่เป็นที่นิยมนำมาใช้ในภาคอุตสาหกรรมมากนัก ดังนั้นในรูปแบบการสร้างวงจรควบคุมให้กับวงจรกำลังของระบบเดิมดังรูปที่ 1.1 การควบคุมเฟสและการควบคุม Synchronous PWM AC Chopper นั้นต้องมีการใช้วงจรการตรวจจับแรงดันศูนย์ของแรงดันทั้งหนึ่งเฟสเพื่อนำไปสร้างสัญญาณควบคุมทำให้มีความซับซ้อนในการสร้างสัญญาณควบคุม ซึ่งหากวงจรตรวจจับแรงดันศูนย์ผิดปกติแล้วจะส่งให้การสร้างสัญญาณไปขับวงจรกำลังมีปัญหาด้วย ซึ่งส่งผลเสียหายต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นเอง และในขณะที่วงจรเอซี ช็อปเปอร์ Asynchronous PWM AC Chopper ที่นำเสนอใช้สวิตช์จำนวน 2 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 1.3 โดยในการวิจัยนี้ใช้วงจรสวิตช์สองทิศทางมาต่อเป็นวงจรกำลังเพื่อควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสโดย SW1 ทำหน้าที่ควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าซึ่งสามารถควบคุมได้ทั้งไซเคิ้ลบวกและไซเคิ้ลลบ ไดโอดที่ต่อร่วมอยู่กับสวิตช์นั้นทำหน้าที่ปิดกั้นการไหลของกระแสไฟฟ้าทั้งสองไซเคิ้ล ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของไดโอดที่ยินยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ก็ต่อเมื่อได้รับไบอัสตรง ดังนั้นถึงแม้ว่าสวิตช์ถูกทำให้อยู่ในสภาวะ ON แต่ไดโอดยังทำหน้าที่เป็นตัวปิดกั้นทางเดินของกระแส ในขณะที่ SW2 ทำหน้าที่เสมือนเป็นฟรีวิลลิ่งไดโอดให้มอเตอร์ กล่าวคือทำหน้าที่ให้แรงดันที่ตกคร่อมมอเตอร์ในแต่ละสภาวะลดลงเป็นศูนย์นั้นเอง ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสซึ่งก็คือคุณสมบัติของวงจร RL อนุกรมกระแสที่ไหลผ่านตัวมันยังคงไหลในทิศทางเดิม ดังนั้น SW2 จึงถูกควบคุมให้อยู่ในสภาวะ ON โดยสัญญาณที่สร้างขึ้นมานั้นใช้เพียงสัญญาณเดียวหรือสัญญาณที่ควบคุมการสวิตช์ของ SW1 ถูกควบคุมโดยสัญญาณเดียวกัน ในขณะที่สัญญาณที่ควบคุม SW2 เป็นสัญญาณที่ตรงกันข้ามกับสัญญาณที่ควบคุม SW1 นอกจากนี้สัญญาณควบคุมทั้งหมดไม่จำเป็นต้องซิงโครไนซ์กับสัญญาณ

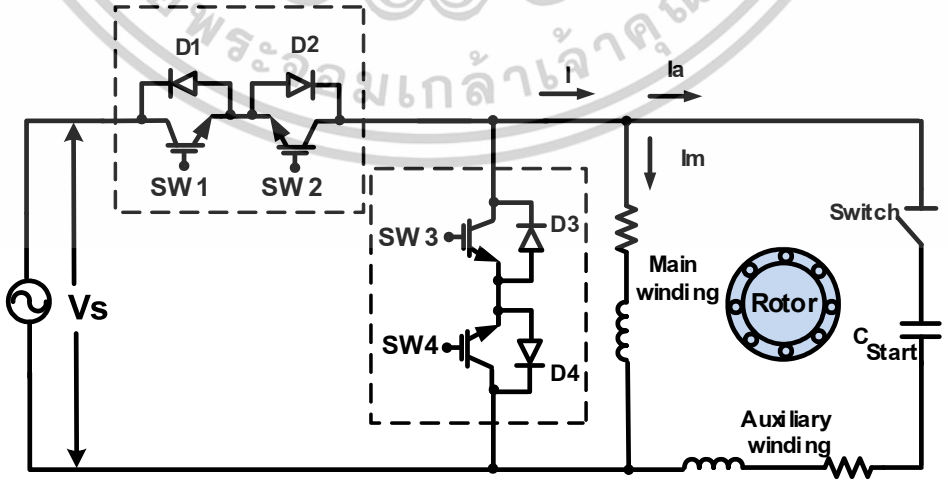
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันแหล่งจ่ายทั้งหนึ่งเฟสหรือเรียกว่าวิธีการแบบ Asynchronous PWM AC Chopper ดังนั้นการสร้างสัญญาณด้วยวิธีการที่นำเสนอสามารถสร้างได้ง่ายกว่าวิธีการแบบดั้งเดิมทั้งการควบคุมเฟสและการควบคุม Synchronous PWM AC Chopper นั้นเอง

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะนำเสนอการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยการควบคุมกระแสเริ่มต้น โดยใช้เทคนิคอะซิงโครนัส พีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ ตามรูปที่ 1.3 ที่เปรียบเทียบวิธีการแบบดั้งเดิมตามรูปที่ 1.1 และรูปที่ 1.2 โดยวิธีการที่นำเสนอจะมีองค์ประกอบด้วยวงจรกรองสัญญาณทางด้านขาเข้าวงจรพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ และบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 Microcontroller เบอร์ TMS320F28379D ที่สร้างสัญญาณพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ ประกอบด้วย IGBT 2 ตัวเป็นสวิตช์ เพื่อสร้างสัญญาณแรงดันช็อปเปอร์ที่ป้อนเข้าขดลวดของมอเตอร์ได้สัญญาณขับเกจ IGBT จะสร้างจากไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 Microcontroller เบอร์ TMS320F28379D และจะทำให้เกาะติดกับจุดผ่านศูนย์ของแรงดันขาเข้าของวงจรกำลัง ในช่วงเวลาเริ่มหมุนสามารถเพิ่มแรงดันที่ป้อนเข้ามอเตอร์แบบเชิงเส้นเพื่อให้เกิดการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวล



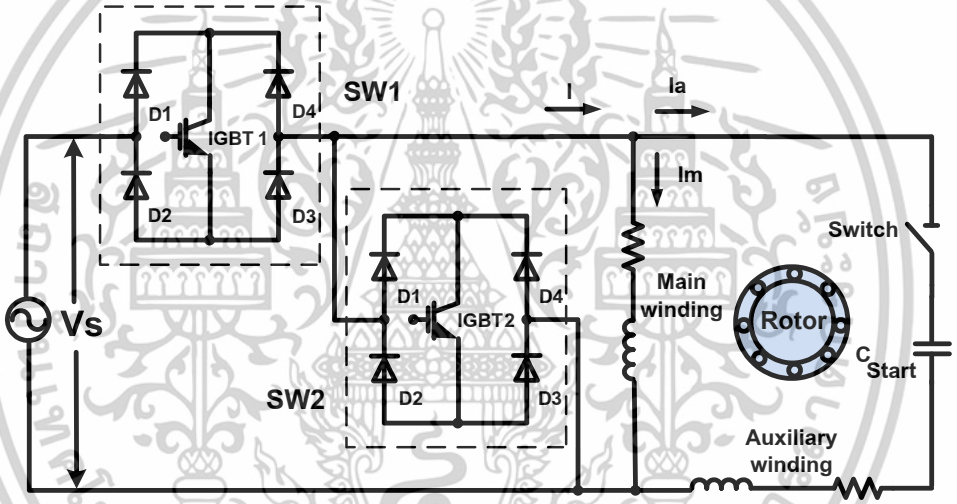
รูปที่ 1.1 วงจรกำลังพื้นฐานของวงจรควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ทด้วยไตรแอคที่เป็นสวิตช์แบบดั้งเดิม



รูปที่ 1.2 วงจรกำลังพื้นฐานของวงจรควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ทด้วยเอซี ช็อปเปอร์เป็นสวิตช์แบบดั้งเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 1.1 และรูปที่ 1.2 รูปด้านบนเป็นการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ทด้วยไตรแอคที่เป็นสวิตช์แบบดั้งเดิมจะเป็นการควบคุมแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์โดยใช้เทคนิคการควบคุมเฟส และวงจรควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ทด้วยเอซี ช็อปเปอร์เป็นสวิตช์แบบดั้งเดิม วิธีการนี้จะส่งผลต่อรูปคลื่นแรงดันและกระแสทำให้เกิดค่าฮาร์มอนิกอันดับต่ำปะปนมาเกิดการสูญเสียในมอเตอร์และอุปกรณ์ไฟฟ้าข้างเคียงที่ต่อใช้งานร่วมกัน ดังนั้นในบทความนี้จึงนำเสนอวิธีการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ทด้วยไอจีบีทีเป็นสวิตช์สองทางแบบใหม่ที่นำเสนอ จากรูปที่ 1.3 รูปด้านล่างเป็นการควบคุมแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์โดยใช้เทคนิคการควบคุมพัลส์วิดมอดูเลตชั่น เอซี ช็อปเปอร์ วิธีการนี้จะช่วยลดผลกระทบของรูปคลื่นแรงดันและกระแสที่มีค่าฮาร์มอนิกอันดับต่ำปะปน ช่วยลดการสูญเสียในมอเตอร์และผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าข้างเคียงที่ใช้งานร่วมกัน



รูปที่ 1.3 วงจรกำลังพื้นฐานของวงจรควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ทด้วยเอซี ช็อปเปอร์ ที่มีไอจีบีทีเป็นสวิตช์แบบใหม่ที่นำเสนอ

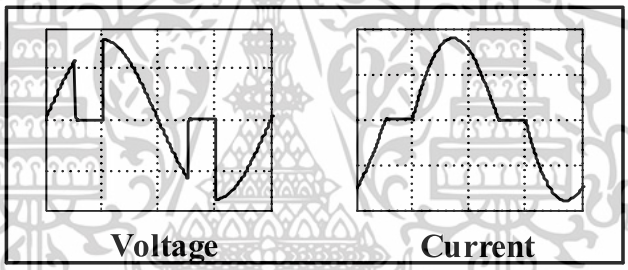
สำหรับบทความนี้ได้นำเสนอเทคนิคการควบคุมพัลส์วิดมอดูเลตชั่น เอซี ช็อปเปอร์ แบบใหม่ที่นำเสนอด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 Microcontroller เบอร์ TMS320F28379D สำหรับการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลในการประหยัดพลังงานในมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดตัวเก็บประจุช่วยหรือแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ทในการเริ่มหมุนที่ 50 ไมโครฟารัด ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น SC-KR ขนาด 1/2 แรงม้า หรือ 0.4 กิโลวัตต์ 230 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ 4.3 แอมป์ 4 ขั้ว และความเร็วรอบที่พิกัดที่ 1,430 รอบต่อนาที ในวงจรกำลังของพัลส์วิดมอดูเลตชั่น เอซี ช็อปเปอร์การทำงานร่วมกันระหว่างไอจีบีทีและไดโอดเป็นสวิตช์สองทาง ในบทความได้นำเสนอการออกแบบสร้างวงจรควบคุมได้มีการตรวจสอบการทำงานทั้งทางทฤษฎีการจำลองและการทดสอบ พบว่าการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวล PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่นำเสนอนี้จะช่วยลดกระแสเริ่มต้นได้มากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

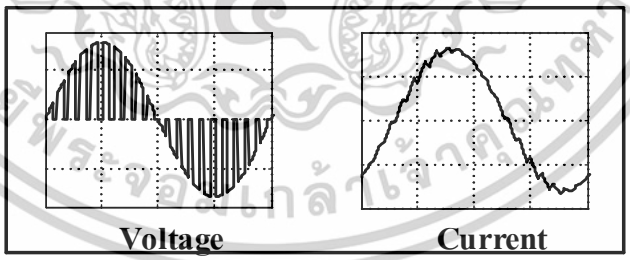
วิธีการเริ่มหมุนแบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับมอเตอร์โดยตรง Direct On Line Control : DOC และการควบคุมเริ่มหมุนแบบ Phase Control หรือ Phase Control Soft Starter : PCSS แบบดั้งเดิม

1.5 การเปรียบเทียบกับหลักการที่มีอยู่เดิมในงานวิจัย

จากรูปที่ 1.4 รูปด้านล่างเป็นรูปคลื่นแรงดันและกระแสโดยใช้วิธีการควบคุมแบบ Phase Control หรือ Phase Control Soft Starter : PCSS แบบดั้งเดิมจะเห็นได้ว่ารูปคลื่นแรงดันและกระแสมีความผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ทำให้เกิดฮาร์มอนิกอันดับต่ำ และรูปที่ 1.5 รูปด้านล่างเป็นรูปคลื่นแรงดันและกระแสโดยใช้วิธีการควบคุมด้วยพัลส์วิดมอเลตชั่น เอซี ช็อปเปอร์ PWM AC Chopper หรือ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS แบบใหม่ที่นำเสนอจะเห็นได้ว่ารูปคลื่นแรงดันและกระแสเข้าใกล้รูปคลื่นไซน์ ทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากฮาร์มอนิกต่ำกว่ากรณีที่ใช้วิธีการควบคุมแบบ Phase Control



รูปที่ 1.4 รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้วยวิธีการควบคุมแบบ Phase Control แบบดั้งเดิม



รูปที่ 1.5 รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้วยวิธีการควบคุมแบบ PWM AC Chopper แบบใหม่ที่นำเสนอ

การเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลนี้จะใช้เทคนิคสร้างสัญญาณควบคุมพัลส์วิดมอเลตชั่น เอซี ช็อปเปอร์ หรือ (PWM AC Chopper) ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 Microcontroller เบอร์ TMS320F28379D ที่ใช้ในการควบคุมวงจรกำลังแบบเอซี ช็อปเปอร์ ไฟฟ้าหนึ่งเฟส จำนวน 1 ชุดและสามารถนำไปใช้ควบคุมวงจรกำลัง และหลักการวิเคราะห์โหมดการทำงานที่นำเสนอนี้ไม่จำเป็นต้องสร้างสัญญาณควบคุมให้ซิงโครไนซ์กับสัญญาณของแหล่งจ่ายและนอกจากนี้สัญญาณที่ใช้ควบคุมสวิตช์ทั้ง 2 ตัวที่สร้างขึ้นมา 1 ชุดสามารถควบคุมสวิตช์ทั้งหมดได้ง่ายกว่าระบบเดิมที่มีการออกแบบสัญญาณควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ต้องซิงโครไนซ์กับสัญญาณของแหล่งจ่ายไฟฟ้าหนึ่งเฟสและสวิตช์แต่ละตัวที่ต้องถูกควบคุมแยกกันชัดเจน

1.6 ขอบเขตของงานวิจัย

จากวัตถุประสงค์และจุดมุ่งหมายแนวคิดในการทำงานวิจัยจึงนำมาสู่การพัฒนาและปรับปรุงการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ทโดยใช้หลักการแบบอะซิงโครนัส พีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ (Asynchronous PWM AC Chopper) จึงได้กำหนดขอบเขตของการวิจัยบนแนวทางดังต่อไปนี้

- การออกแบบวงจรกำลังแบบ เอซี ช็อปเปอร์ ไฟฟ้าหนึ่งเฟสเพื่อใช้ในการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดตัวเก็บประจุช่วยหรือแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ทที่ 50 ไมโครฟารัด ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น SC-KR มีขนาดพิกัด 1/2 แรงม้า หรือ 0.4 กิโลวัตต์ 230 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ 4.3 แอมป์ 4 ขั้ว และความเร็วรอบที่พิกัดที่ 1,430 รอบต่อนาที

- การออกแบบสัญญาณด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 Microcontroller เบอร์ TMS320F28379D ที่ใช้ในการควบคุมวงจรกำลังแบบ เอซี ช็อปเปอร์ หนึ่งเฟส จำนวน 1 ชุด และสามารถนำไปใช้ควบคุมวงจรกำลังหนึ่งและการจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink Version R2024a ได้

- สามารถกำหนดแรงดันเริ่มต้น กระแสและความชันของสัญญาณแรงดันควบคุมตามแกนเวลาให้สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าหนึ่งเฟสเป็นแบบเชิงเส้นตามที่กำหนดได้

- สามารถทำการออกแบบการจำลองและทดสอบความสอดคล้องความถูกต้องที่นำเสนอกับระบบเดิมเพื่อเปรียบเทียบรูปคลื่นแรงดัน กระแส สเปรคตรัมของแรงดันและกระแสได้

1.7 ขั้นตอนของการศึกษาจัดทำวิทยานิพนธ์

สำหรับงานวิจัยที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์เรื่องการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยการควบคุมกระแสเริ่มต้นโดยใช้เทคนิคอะซิงโครนัส พีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ เล่มนี้เริ่มต้นด้วยการศึกษาข้อมูลที่รวบรวมจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ททั้งในอดีตที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบันจากนั้นได้สรุปข้อดี ข้อด้อยของระบบเดิมเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการตั้งเป็นโจทย์วิจัยรวมถึงการปรับปรุงและพัฒนาระบบควบคุมแบบใหม่ที่สามารถสร้างชุดวงจรควบคุมได้ง่ายสะดวกกว่าวิธีการแบบเดิมเพื่อพัฒนาเป็นต้นแบบต่อยอดในเชิงพาณิชย์ได้ และด้วยเหตุผลดังที่ได้กล่าวมาจึงได้แบ่งเนื้อหาของงานวิจัยออกเป็น 7 บท ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำในการจัดทำงานวิจัยได้กล่าวถึงความเป็นมาของปัญหา วัตถุประสงค์และสมมุติฐานในการทำวิจัยแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย ตลอดจนเปรียบเทียบหลักการวิธีแบบเดิมกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการวิธีที่นำเสนอและขอบเขตในการวิจัยเรื่องการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ทด้วยการควบคุมกระแสเริ่มต้นโดยใช้เทคนิคอะซิงโครนัสพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ (Asynchronous PWM AC Chopper)

บทที่ 2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ทและอุปกรณ์ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องสำหรับใช้ในงานวิจัย โดยอธิบายทฤษฎีคุณลักษณะการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสและอุปกรณ์ ทั้งการเกิดสนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส ชนิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ท การต่อวงจร เวกเตอร์ไดอะแกรมกระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้า ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิลและความเร็วรอบของคาปาซิเตอร์มอเตอร์ที่ค่าความจุคาปาซิเตอร์ต่างๆกัน และอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับงานวิจัย ไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 Microcontroller เบอร์ TMS320F28379D เป็นต้น

บทที่ 3 เทคนิคการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยการควบคุมกระแสเริ่มต้นโดยใช้เทคนิคอะซิงโครนัส พีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ (PWM AC Chopper) สำหรับการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส โดยอธิบายถึงรูปแบบการกำเนิดสัญญาณแบบพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบอะซิงโครนัส (Asynchronous PWM AC Chopper : PWMSS) การกำหนดแรงดันเริ่มต้นให้วงจร PWMSS และรูปของสัญญาณพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบซิงโครนัส (Synchronous PWM AC Chopper) ซึ่งจะได้อธิบายโหมดการทำงานของรูปสัญญาณพีดับเบิ้ลยูเอ็มเอซี ช็อปเปอร์ทั้ง 2 แบบในแต่ละโหมดการทำงานสัญญาณทั้ง 6 โหมด

บทที่ 4 การออกแบบวงจรควบคุมและวงจรกำลังสำหรับการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยการควบคุมกระแสเริ่มต้นโดยใช้เทคนิคอะซิงโครนัสพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ โดยอธิบายถึงแรงบิลของมอเตอร์ในขณะที่ทำการลดแรงดันขับเคลื่อนวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส ลักษณะแรงบิดเปรียบเทียบกับความเร็วในขณะที่ทำการลดแรงดัน หลักการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวล คุณลักษณะของ Volage-Ramp Technique การเปรียบเทียบการจำลองดูคุณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสที่เริ่มหมุนแบบนิ่มนวลเปรียบเวลาในแต่ละทุกเงื่อนไขของการเริ่มหมุน

บทที่ 5 การออกแบบจำลองระบบการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยการควบคุมกระแสเริ่มต้น โดยใช้เทคนิคอะซิงโครนัส พีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ โดยการอธิบายกรณีศึกษาที่ใช้ในการวิจัยผลที่ได้จากการจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink Version R2024a และโปรแกรม (Code Composer Studio :CCS) Version 12.4.0 ในการคอมไฟร์โค้ดภาษาซี (C) ลงในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 Microcontroller เบอร์ TMS320F28379D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6 ผลการทดสอบระบบการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยการควบคุมกระแสเริ่มต้นโดยใช้เทคนิคอะซิงโครนัส พีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ด้วยวิธีการ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่นำเสนอโดยอธิบายถึงกรณีที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้แก่ การกำหนดสัญญาณควบคุมโดยการเขียนวงจรควบคุมในโปรแกรม MATLAB/Simulink Version R2024a แล้วทำการกำเนิดโค้ดภาษาซี (C) หลังจากนั้นจึงใช้โปรแกรม (Code Composer Studio :CCS) Version 12.4.0 ในการคอมไฟร์โค้ดภาษาซี (C) ลงในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 Microcontroller เบอร์ TMS320F28379D เพื่อส่งสัญญาณควบคุมออกสู่วงจรภายนอกและผลจากการทดสอบสามารถยืนยันความถูกต้องได้เนื่องจากมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลองได้

บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะงานวิจัยการออกแบบวงจรควบคุมและวงจรกำลังสำหรับการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยการควบคุมกระแสเริ่มต้นโดยใช้เทคนิคอะซิงโครนัส พีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ (Soft Start Control for a Single-Phase Induction Motor With Starting Current Control Using an Asynchronous PWM AC Chopper Technique) ตลอดจนได้อธิบายสรุปรายละเอียดของงานวิจัยทั้งหมดรวมถึงข้อเสนอแนะและข้อแนะนำงานวิจัยที่น่าสนใจต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

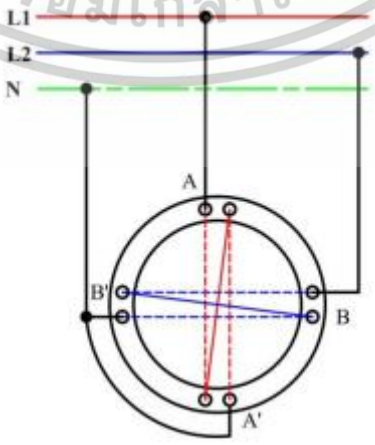
บทที่ 2
ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสและอุปกรณ์ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องสำหรับในงานวิจัย

2.1 หลักการทำงานมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส

การทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสอาศัยหลักการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าและมีองค์ประกอบที่สำคัญคือ ตัวนำไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก และการเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไปตัดกับตัวนำไฟฟ้า หลักการนี้ได้นำไปสร้างเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีใช้กันอย่างแพร่หลาย เมื่ออธิบายถึงหลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ การจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับขดลวดที่สเตเตอร์จะเกิดสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์สนามแม่เหล็กจะเหนี่ยวนำไปยังตัวโรเตอร์หรือตัวหมุนส่งผลให้เกิดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำไหลภายในตัวโรเตอร์ โดยกระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวโรเตอร์จะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมาต้านกับสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์ เกิดแรงผลักระหว่างขั้วแม่เหล็กทำให้โรเตอร์หมุนไปในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กซึ่งมีความเร็วรอบช้ากว่าความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน

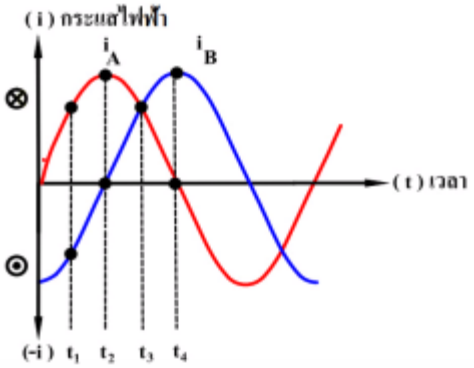
2.2 การเกิดสนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับทำงานโดยอาศัยการเกิดสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์ด้วยการเคลื่อนที่ตัดกับตัวนำโรเตอร์ เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับขดลวดที่พันอยู่ในสเตเตอร์ส่งผลให้สนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงและเคลื่อนที่ไปรอบๆ สเตเตอร์ด้วยความเร็วคงที่การต่อขดลวดสเตเตอร์จะประกอบด้วยขดลวด 2 ชุด ซึ่งวางห่างกัน 90 องศาทางไฟฟ้า และรับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ขดลวดเสมือนเป็นระบบไฟฟ้า 2 เฟส เนื่องจากแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ (Sine wave) ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนรอบตัวนำที่พันอยู่ในร่องสเตเตอร์ ตามหลักการที่ได้กล่าวมาจะสอดคล้องกับทฤษฎีและหลักการทำงานของสปลิตเฟสมอเตอร์

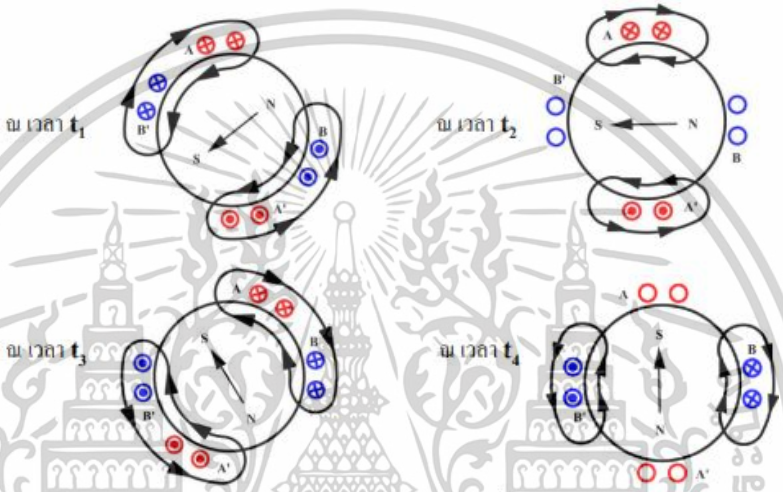


รูปที่ 2.1 การต่อขดลวดสเตเตอร์กับระบบไฟฟ้าสองเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) รูปคลื่นไซน์ในระบบไฟฟ้าสองเฟส



(ข) การเกิดสนามแม่เหล็กหมุน

รูปที่ 2.2 รูปคลื่นไซน์และสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์มอเตอร์ไฟฟ้าสองเฟส

เมื่อพิจารณาจาก รูปที่ 2.2 การต่อขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าสองเฟส และดังรูปที่ 2.2 (ก) รูปคลื่นไซน์ระบบไฟฟ้าสองเฟสต่างเฟสเป็นมุม 90 องศาทางไฟฟ้า กำหนดให้กระแสไฟฟ้าครึ่งรอบบวกของรูปคลื่นไซน์ของแต่ละเฟสไหลเข้าต้นขดลวดและไหลออกปลายขดลวด (โดยเฟส A ไหลเข้าต้น A และไหลออกปลาย A’) และ (เฟส B ไหลเข้าต้น B และไหลออกปลาย B’) สำหรับกระแสไฟฟ้าในครึ่งรอบลบไหลเข้าปลายขดลวดและไหลออกต้นขดลวด (เฟส A ไหลเข้าปลาย A’ และไหลออกต้น A) และ (เฟส B ไหลเข้าปลาย B’ และไหลออกต้น B) และดังรูปที่ 2.2 (ข) ณ เวลา t1 iA เป็นบวก iB เป็นลบ ณ เวลา t2 iA เป็นบวก iB เป็นศูนย์ ณ เวลา t3 iA เป็นบวก iB เป็นบวก ณ เวลา t4 iA เป็นศูนย์ iB เป็นบวก กำหนดให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าขดลวดตัวนำ มีสัญลักษณ์เป็น ⊗ และกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากขดลวดตัวนำ ⊙ ดังนั้นเมื่อพิจารณาเส้นแรงแม่เหล็กรวมที่เกิดขึ้นตามทิศทางของลูกศรตามการเปลี่ยนแปลงของเวลาในรูปคลื่นไซน์ที่ t1 - t4 พบว่าเส้นแรงแม่เหล็กจะหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาเปรียบเสมือนการเกิดสนามแม่เหล็กหมุนที่ขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้า

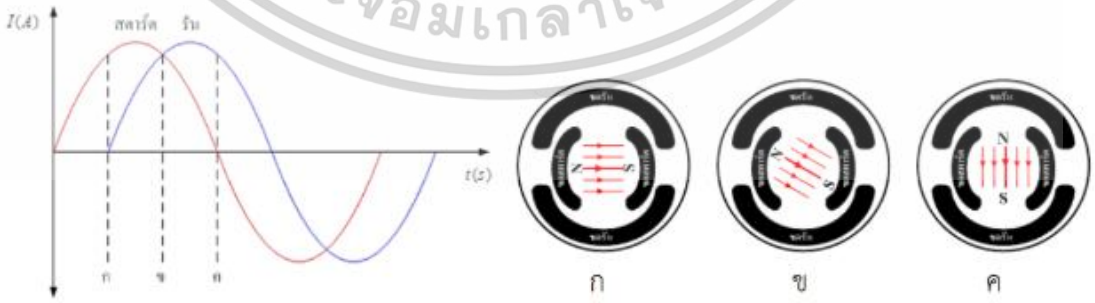
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 คุณสมบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ท

มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ทเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาดเล็ก เนื่องจากใช้กับไฟฟ้าชนิดหนึ่งเฟสสองสายแล้ว จึงมักมีการใช้งานตามบ้านเรือนทั่วไปที่ติดตั้งเป็นเครื่องต้นกำลังในเครื่องใช้ไฟฟ้า เช่น เครื่องรีดแผ่นยางพารา เครื่องบดหมู เครื่องซักผ้า เครื่องบดน้ำแข็ง สายพานลำเลียง คอมเพรสเซอร์ของตู้เย็น คอมเพรสเซอร์ของเครื่องปรับอากาศ ปั๊มน้ำอัตโนมัติ เป็นต้น มีอยู่หลายชนิดแต่ชนิดที่พบบ่อยใช้อยู่ทั่วไปหนึ่งในนั้นคือ มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ทที่ใช้สำหรับงานวิจัยโดยเฉพาะช่วงการควบคุมกระแสเริ่มต้นแบบวิธีดั้งเดิมและแบบที่นำเสนอด้วยวิธีการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวล ดั้งนั้นจึงต้องเรียนรู้และศึกษาพื้นฐานของทฤษฎีการทำงานและการควบคุมของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ท

2.4 มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ท

เนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบสปลิตเฟสมอเตอร์มีแรงเดินค่อนข้างต่ำเพราะว่ากระแสไฟฟ้าในขดลวดชุดสตาร์ทกับขอลวดชุดรันต่างเฟสกันเป็นมุมโดยประมาณ 30-50 องศาไฟฟ้า ดังนั้นเมื่อต้องการให้มอเตอร์มีแรงบิดเริ่มเดินสูงจะต้องใช้คาปาซิเตอร์ต่อเข้ากับวงจรขอลวดชุดสตาร์ท เพื่อให้กระแสไฟฟ้าในขดลวดทั้งสองชุดมีมุมต่างเฟสกันมากยิ่งขึ้นประมาณเกือบ 90 องศาไฟฟ้า คาปาซิเตอร์มอเตอร์ (Capacitor motor) แบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ คาปาซิเตอร์สตาร์ทมอเตอร์ (Capacitor start motor : ที่ใช้สำหรับการทดสอบในงานวิจัย) คาปาซิเตอร์รันมอเตอร์ (Capacitor run motor) และ คาปาซิเตอร์สตาร์ทและรันมอเตอร์ (Capacitor start and run motor) แต่ละชนิดมีคุณลักษณะที่แตกต่างกันและสิ่งที่เหมือนกันก็คือ มีขดลวดสเตเตอร์จำนวน 2 ชุด ซึ่งขดลวดชุดรันกับขดลวดชุดสตาร์ทความมุมห่างกัน 90 องศาไฟฟ้า และขดลวดชุดสตาร์ทจะมีคาปาซิเตอร์ต่ออยู่เสมอ ดังรูปที่ 2.3 แสดงในลักษณะรูปสัญญาณและขดลวดสองชุด ด้านซ้ายมือคือความต่างเฟสระหว่างกระแสที่ไหลในขดรันและขดสตาร์ท และขวามือคือลักษณะการพันขดลวดซึ่งขอลวดทั้งสองจะมีมุมต่างกัน 90 องศาไฟฟ้า



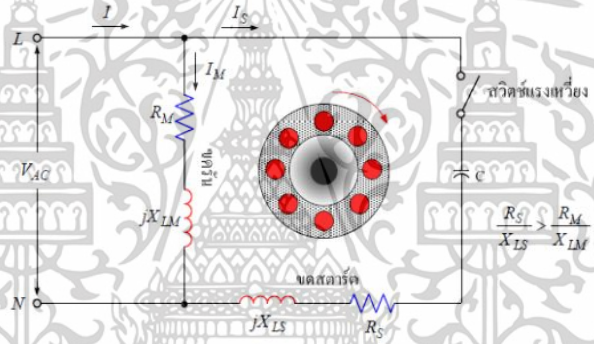
รูปที่ 2.3 สัญญาณความแตกต่างระหว่างกระแสที่ไหลในขดรันและขดสตาร์ทที่มีการพันชุดขดลวดทั้งสองจะมีมุมต่างกัน 90 องศาไฟฟ้า

สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ท (Capacitor start motor) มอเตอร์แบบนี้มีส่วนประกอบเหมือนกับสปลิตเฟสมอเตอร์แต่เพิ่มคาปาซิเตอร์อีก 1 ตัว เพื่อต่อ

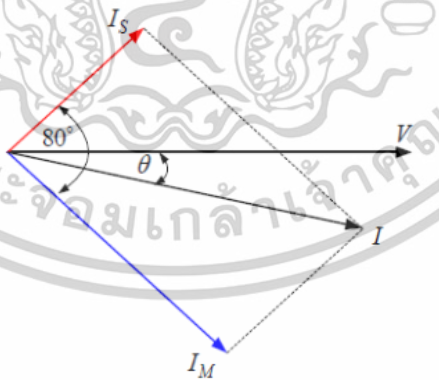
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุกรมกับขดสตาร์ทเท่านั้นเมื่อต่อคาปาซิเตอร์อนุกรมกับขดลวดชุดสตาร์ทแล้ว ทำให้กระแสไฟฟ้าของขดลวดชุดสตาร์ท (I_S) นำหน้าแรงเคลื่อนไฟฟ้า (V) ที่ป้อนให้กับมอเตอร์ซึ่งจะนำหน้ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าความจุของคาปาซิเตอร์ส่วนกระแสไฟฟ้าของขดลวดชุดรันยังคงล้าหลังแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหมือนเดิม จากเวกเตอร์ไดอะแกรมดังแสดงในรูปที่ 2.6 กระแสไฟฟ้าของขดลวดชุดสตาร์ทนำหน้ากระแสไฟฟ้าของขดลวดชุดรัน (I_M) ประมาณเกือบ 90 องศาไฟฟ้า

รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ท



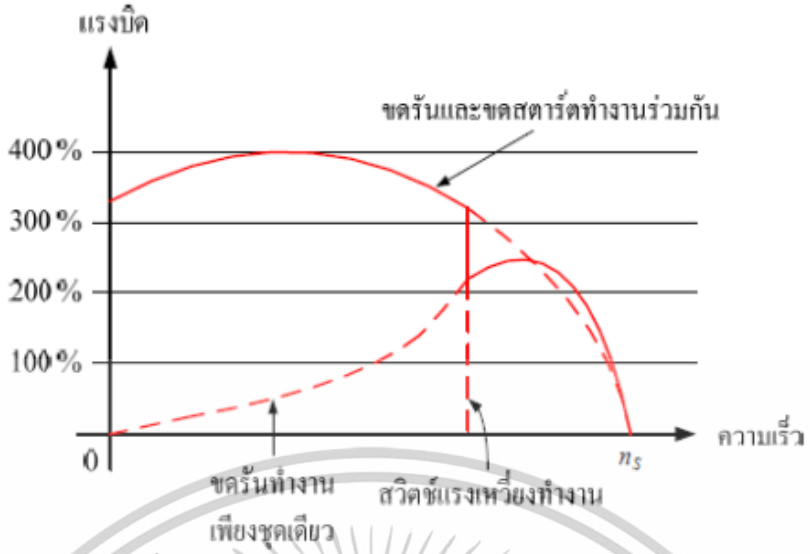
รูปที่ 2.5 การต่อวงจรของคาปาซิเตอร์สตาร์ทมอเตอร์



รูปที่ 2.6 เวกเตอร์ไดอะแกรมกระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้าของคาปาซิเตอร์มอเตอร์

หลักการทำงานของคาปาซิเตอร์มอเตอร์เหมือนกับสปลิตเฟสมอเตอร์เมื่อมอเตอร์หมุนได้ความเร็วประมาณ 75% ของความเร็วเต็มพิกัดสวิตช์แรงเหวี่ยงจะเปิดวงจรขดลวดชุดสตาร์ทและคาปาซิเตอร์ออกมอเตอร์จะทำงานต่อไปโดยอาศัยขดลวดชุดรันเพียงชุดเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

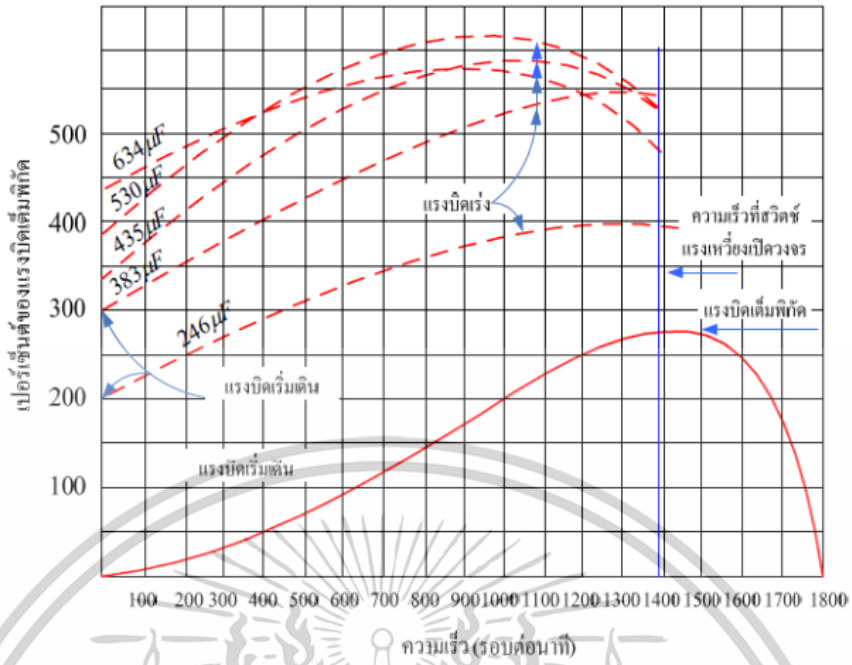


รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบ

คุณลักษณะและการนำไปใช้งานการต่อคาปาซิเตอร์เข้าไปในวงจรขดลวดชุดสตาร์ททำให้มอเตอร์แบบนี้มีแรงบิดเริ่มเดินสูงประมาณ 350-450% ของแรงบิดเต็มพิกัดมีแรงบิดสูงสุดประมาณ 540% ของแรงบิดเต็มพิกัดมีค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์และประสิทธิภาพเมื่อโหลดเต็มพิกัดประมาณ 80-95% และ 55-65% ตามลำดับและมีกระแสขณะเริ่มสตาร์ทประมาณ 400-500% ของกระแสเต็มพิกัดเมื่อเปรียบเทียบกับสปลิตเฟสมอเตอร์ที่ขนาดเท่ากันกระแสเริ่มเดินจะต่ำกว่าและให้แรงบิดสูงกว่า

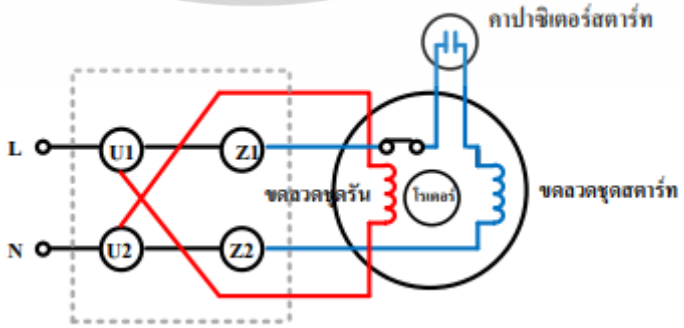
รูปที่ 2.8 คาปาซิเตอร์แบบอิเล็กโทรไลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของคาปาซิเตอร์มอเตอร์ที่ค่าความจุคาปาซิเตอร์ต่างๆกัน

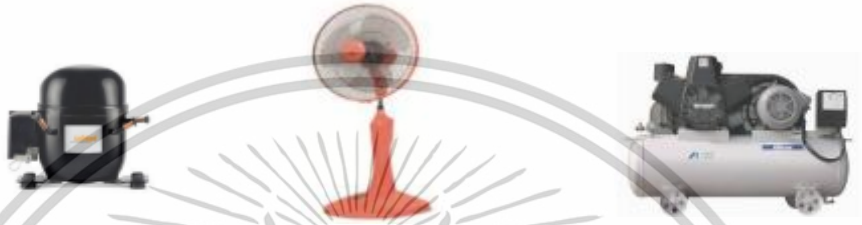
พิกัดกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ทแบบนี้ประมาณ 1/8-1 แรงม้า จึงเหมาะกับงานประเภทปั้มน้ำชนิดต่างๆคอมเพรสเซอร์ เครื่องบดน้ำแข็ง เครื่องรีดแผ่นยางพารา เครื่องบดหมู เครื่องซักผ้า สายพานลำเลียง เครื่องเจาะ หินเจียระไน และงานขับโหลดด้วยสายพานที่มีความฝืดสูงๆ ค่าความจุของคาปาซิเตอร์ที่มีความเหมาะสมใช้กับมอเตอร์นั้นมีความจุตั้งแต่ 21-189μF ทนพิกัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้ไม่น้อยกว่า 220V และเป็นคาปาซิเตอร์แบบอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้กับแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับดังแสดงในรูปที่ 2.8 และรูปที่ 2.10 ในการควบคุมทิศทางการกลับทางหมุนคาปาซิเตอร์มอเตอร์ทำได้เช่นเดียวกันกับสปลิตเฟสมอเตอร์คือ สามารถทำได้ด้วยการกลับสลับคู่ปลายสายของขดลวดเพียงชุดเดียว โดยกลับที่ขดลวดชุดรันหรือขดลวดชุดสตาร์ทอย่างใดอย่างหนึ่งเมื่อทำการต่อวงจรและกลับเฟสของแรงดันไฟฟ้าก็จะไม่มีผลต่อการกลับทิศทางการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้า



รูปที่ 2.10 วงจรกลับทิศทางการหมุนของคาปาซิเตอร์มอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการใช้งานคาปาซิเตอร์มอเตอร์ลักษณะเด่นของคาปาซิเตอร์มอเตอร์ก็คือ มอเตอร์ไฟฟ้าใช้กระแสไฟฟ้าตอนเริ่มหมุนต่ำโดยมีแรงบิดเริ่มหมุนสูงและให้ความเร็วรอบคงที่ ส่วนคาปาซิเตอร์สตาร์ทมอเตอร์เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีขนาดเล็กและมีแรงบิดเริ่มหมุนสูงกว่าสปลิตเฟสมอเตอร์ นิยมนำไปใช้เป็นตัวขับคอมเพรสเซอร์ขนาดเล็กในตู้เย็น ส่วนคาปาซิเตอร์รันมอเตอร์เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีขนาดไม่ถึง 1 แรงม้า นิยมใช้กับเครื่องใช้ไฟฟ้าประเภทพัดลม และส่วนคาปาซิเตอร์สตาร์ทและรันมอเตอร์เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่ตั้งแต่ 1-10 แรงม้า นิยมนำไปใช้เป็นเครื่องอัดอากาศขนาดใหญ่ดังรูปที่ 2.11 ลักษณะการใช้งานของคาปาซิเตอร์มอเตอร์ที่เห็นในชีวิตประจำวัน



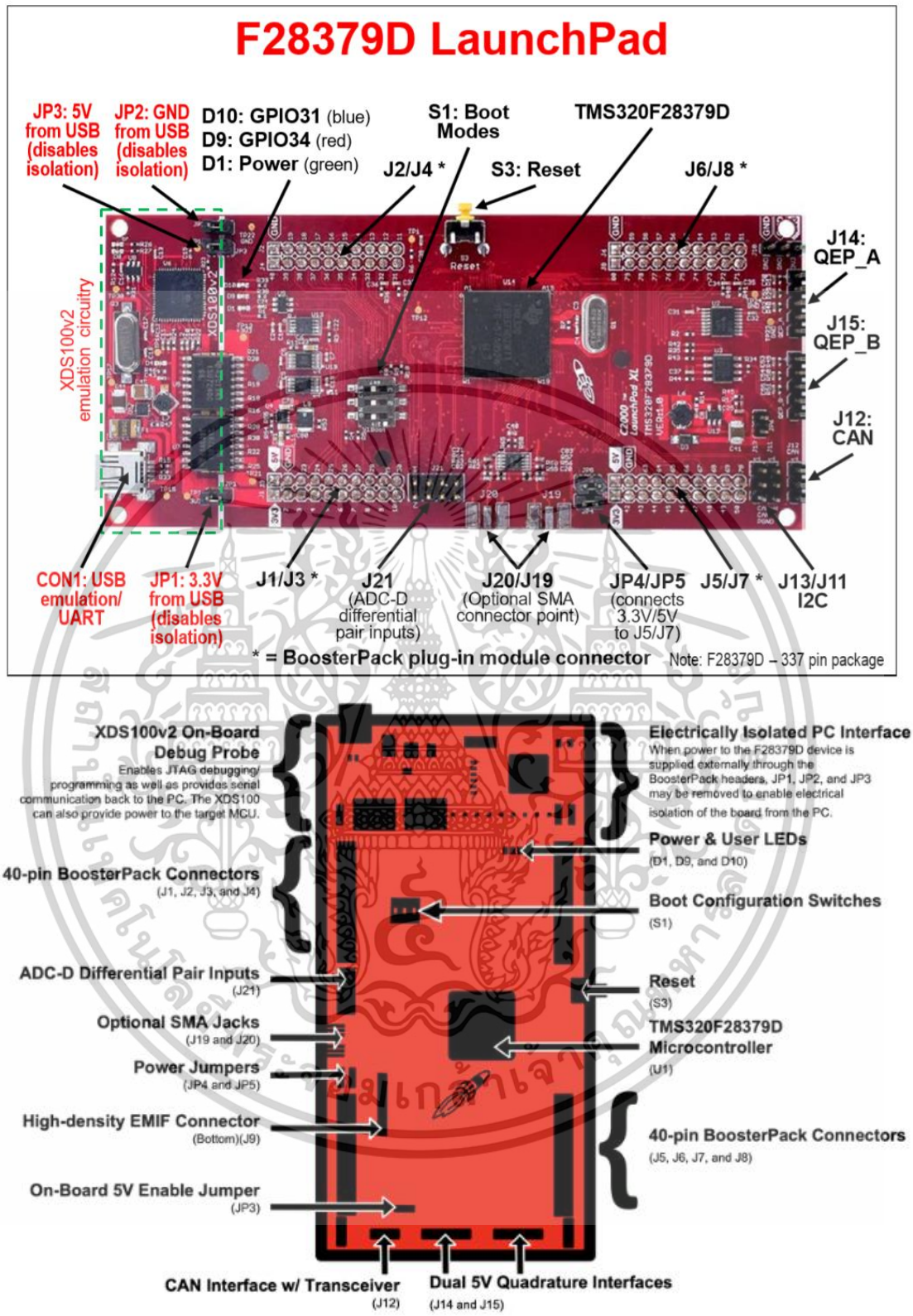
(ก) คอมเพรสเซอร์ **(ข)** พัดลม **(ค)** เครื่องอัดอากาศ

รูปที่ 2.11 ลักษณะการใช้งานของคาปาซิเตอร์มอเตอร์

2.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 เบอร์ TMS320F28379D

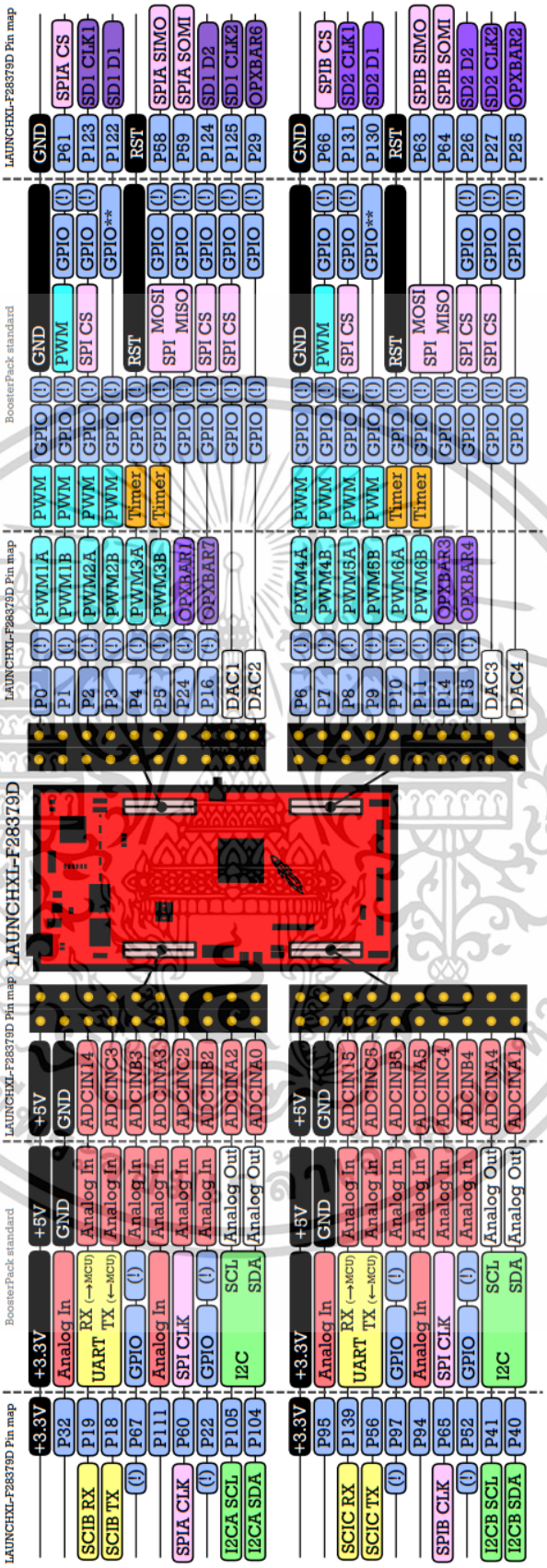
ไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับการประยุกต์ใช้งานอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ข้อมูลเบื้องต้นของ C2000 Microcontroller เบอร์ TMS320F28379D เป็นรุ่นที่ใช้ในงานวิจัย และ C2000 คือชื่อตระกูลไมโครคอนโทรลเลอร์ 32 บิต จาก Texas Instrument Inc. ผู้ผลิต DSP Microcontroller และไอซีต่างๆ โดย Texas Instruments ได้กำหนดชื่อตระกูลอย่างเป็นทางการของไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ Real-time Control ว่า C2000 ซึ่งถูกจัดให้เป็น Digital Signal Controller (DSC) หากเป็นตระกูลอื่นที่ไม่ใช่ C2000 เช่น C5000 หรือ C6000 จะถูกจัดให้เป็น Digital Signal Processor (DSP) ที่เน้นใช้งานประมวลผลสัญญาณดิจิตอลเป็นส่วนใหญ่ เช่น ประมวลผลวิดีโอ และมินิคอมพิวเตอร์ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 ชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 เบอร์ TMS320F28379D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 หมายเลขขาพิน ADC บนอุปกรณ์ที่ต่อพ่วงโดยรวมของ C2000 เบอร์ TMS320F28379D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TMS320F2837xD Dual-Core Real-Time Microcontrollers

1 Features

- Dual-core architecture
  - Two TMS320C28x 32-bit CPUs
  - 200MHz
  - IEEE 754 single-precision Floating-Point Unit (FPU)
  - Trigonometric Math Unit (TMU)
  - Viterbi/Complex Math Unit (VCU-II)
- Two programmable Control Law Accelerators (CLAs)
  - 200MHz
  - IEEE 754 single-precision floating-point instructions
  - Executes code independently of main CPU
- On-chip memory
  - 512KB (256KW) or 1MB (512KW) of flash (ECC-protected)
  - 172KB (86KW) or 204KB (102KW) of RAM (ECC-protected or parity-protected)
  - Dual-zone security supporting third-party development
  - Unique identification number
- Clock and system control
  - Two internal zero-pin 10MHz oscillators
  - On-chip crystal oscillator
  - Windowed watchdog timer module
  - Missing clock detection circuitry
- 1.2V core, 3.3V I/O design
- System peripherals
  - Two External Memory Interfaces (EMIFs) with ASRAM and SDRAM support
  - Dual 6-channel Direct Memory Access (DMA) controllers
  - Up to 169 individually programmable, multiplexed General-Purpose Input/Output (GPIO) pins with input filtering
  - Expanded Peripheral Interrupt controller (ePIE)
  - Multiple Low-Power Mode (LPM) support with external wakeup
- Communications peripherals
  - USB 2.0 (MAC + PHY)
  - Support for 12-pin 3.3V-compatible Universal Parallel Port (uPP) interface
  - Two Controller Area Network (CAN) modules (pin-bootable)
  - Three high-speed (up to 50MHz) SPI ports (pin-bootable)
  - Two Multichannel Buffered Serial Ports (McBSPs)
  - Four Serial Communications Interfaces (SCI/UART) (pin-bootable)
  - Two I2C interfaces (pin-bootable)
- Analog subsystem
  - Up to four Analog-to-Digital Converters (ADCs)
    - 16-bit mode
      - 1.1MSPS each (up to 4.4MSPS system throughput)
      - Differential inputs
      - Up to 12 external channels
    - 12-bit mode
      - 3.5MSPS each (up to 14MSPS system throughput)
      - Single-ended inputs
      - Up to 24 external channels
    - Single Sample-and-Hold (S/H) on each ADC
    - Hardware-integrated post-processing of ADC conversions
      - Saturating offset calibration
      - Error from setpoint calculation
      - High, low, and zero-crossing compare, with interrupt capability
      - Trigger-to-sample delay capture
  - Eight windowed comparators with 12-bit Digital-to-Analog Converter (DAC) references
  - Three 12-bit buffered DAC outputs
- Enhanced control peripherals
  - 24 Pulse Width Modulator (PWM) channels with enhanced features
  - 16 High-Resolution Pulse Width Modulator (HRPWM) channels
    - High resolution on both A and B channels of 8 PWM modules
    - Dead-band support (on both standard and high resolution)
  - Six Enhanced Capture (eCAP) modules
  - Three Enhanced Quadrature Encoder Pulse (eQEP) modules
  - Eight Sigma-Delta Filter Module (SDFM) input channels, 2 parallel filters per channel
    - Standard SDFM data filtering
    - Comparator filter for fast action for out of range
- Configurable Logic Block (CLB)
  - Augments existing peripheral capability
  - Supports position manager solutions

An IMPORTANT NOTICE at the end of this data sheet addresses availability, warranty, changes, use in safety-critical applications, intellectual property matters and other important disclaimers. PRODUCTION DATA.

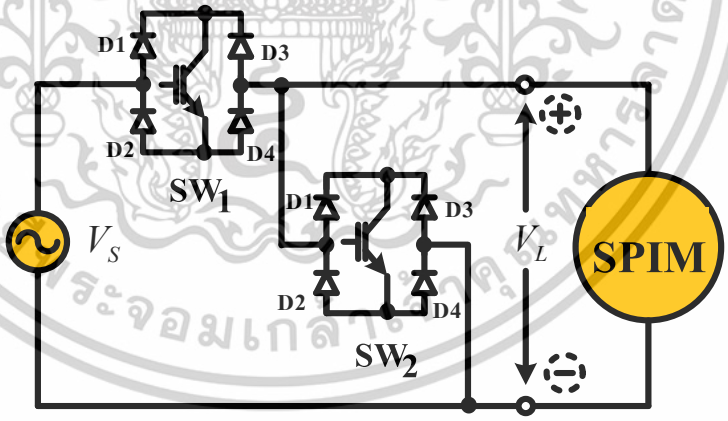
รูปที่ 2.14 คุณสมบัติเด่นโดยรวมของ C2000 เบอร์ TMS320F28379D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
เทคนิคการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยการควบคุมกระแสเริ่มต้นโดยใช้เทคนิคอะซิงโครนัส พีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์การเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งโดยใช้วงจรเอซี ช็อปเปอร์ หนึ่งเฟส ซึ่งเป็นวงจรกำลังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าเป็นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสสลับ โดยสัญญาณที่สร้างขึ้นมาเพื่อควบคุมสวิตช์ทั้ง 2 ตัวนั้นเป็นสัญญาณที่มีความถี่สูงเพื่อทำให้คลื่นกระแสที่ไหลมอเตอร์นั้นใกล้รูปคลื่นไซน์ ซึ่งถ้าสามารถควบคุมขนาดแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ขณะเริ่มหมุนให้สามารถปรับขนาดแรงดันได้ตามแกนเวลาให้มีค่าแรงดันต่ำ และเมื่อเวลาผ่านไปหากสามารถควบคุมขนาดแรงดันที่จ่ายเข้ามอเตอร์ก่อนที่เข้าสู่สภาวะคงตัวมีขนาดแรงดันค่อยๆเพิ่มขึ้นนั้นทำให้กระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ถูกปรับให้ค่อยๆเพิ่มขึ้นด้วยจนเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัวกระแสมอเตอร์จะค่อยๆลดลงและนั้นคือทำให้มอเตอร์มีการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวล โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะเรียกวิธีการนี้ว่าการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลด้วยพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบอะซิงโครนัส (Asynchronous PWM AC Chopper Soft Starter :PWMSS)



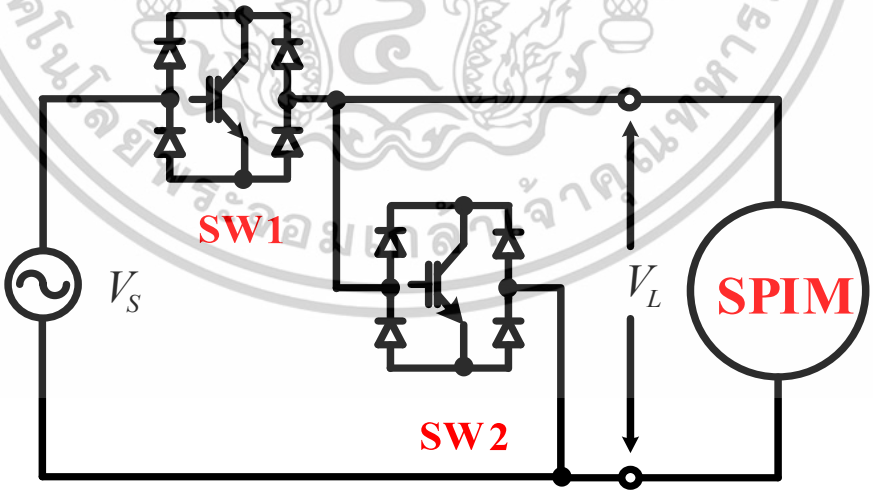
รูปที่ 3.1 วงจรกำลังของการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลโดยใช้วงจร เอซี ช็อปเปอร์

การทำงานของรูปสัญญาณพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ (Pulse Width Modulation : PWM AC Chopper) ในรูปของสัญญาณพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบอะซิงโครนัส (Asynchronous PWM AC Chopper) และรูปของสัญญาณพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบซิงโครนัส (Synchronous PWM AC Chopper) ซึ่งจะได้อธิบายโหมดการทำงานของรูปสัญญาณพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ ทั้ง 2 แบบในแต่ละโหมด ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 รูปแบบการกำเนิดสัญญาณพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบอะซิงโครนัส (Asynchronous PWM AC Chopper)

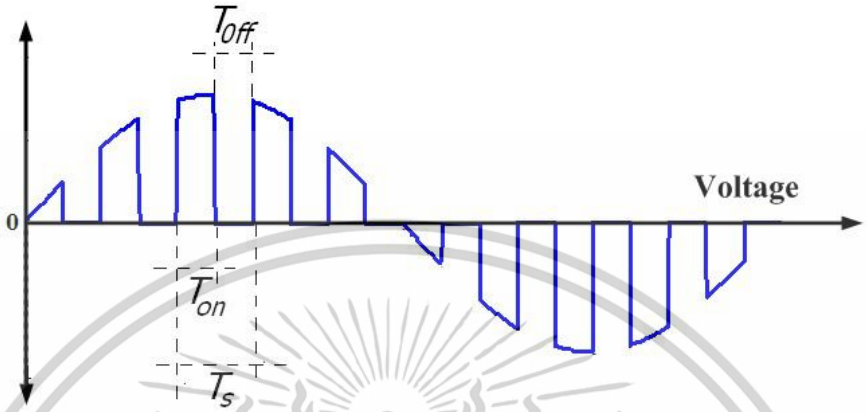
ในวงจรกำลังของสัญญาณพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบอะซิงโครนัส (Asynchronous PWM AC Chopper) จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังถูกนำมาต่อร่วมกันแบบสวิตช์สองทิศทางโดยใช้ IGBT ต่อกับไดโอดเพื่อทำหน้าที่เป็นสวิตช์กำลังสองทิศทางทำให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลได้ทั้งสองทิศทาง ซึ่งสามารถควบคุมแรงดันที่ป้อนเข้ามอเตอร์ SPIM (Single Phase Induction Motor) โดยการปรับอัตราส่วนดิวตี้ของสัญญาณ PWM ที่ใช้ในการสลับการ เปิด-ปิด (ON-OFF) เพื่อสลับการทำงานของโดยสวิตช์ SW1 ทำหน้าที่ควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไปยังภาระซึ่งสามารถควบคุมได้ไซเคิ้ลบวกและไซเคิ้ลลบ และในขณะ SW2 ทำหน้าที่เสมือนฟรีวิลลิ่งไดโอดกล่าวคือทำให้แรงดันที่ตกคล่อมมอเตอร์ในแต่ละสภาวะลดลงเป็นศูนย์ หลังจากนั้นพลังงานที่มอเตอร์เก็บสะสมไว้ในรูปของสนามแม่เหล็กหรือในช่วง SW2 ทำงานในสภาวะ ON จะถูกคายพลังงานผ่าน SW2 นั้นหมายถึง SW1 ทำงานสลับกันกับ SW2 ตลอดเวลา โดยสัญญาณที่สร้างขึ้นนี้ไม่ต้องการสัญญาณอ้างอิงแรงดันหนึ่งเฟส เนื่องจากสัญญาณดังกล่าวไม่จำเป็นต้องซิงโครไนซ์กับสัญญาณของแหล่งจ่ายหนึ่งเฟส นั้นทำให้การสร้างสัญญาณ PWM สามารถสร้างได้ง่ายเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเดิม ในวิทยานิพนธ์นี้จึงจะเรียกว่าสัญญาณควบคุมว่า สัญญาณพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบอะซิงโครนัส (Asynchronous PWM AC Chopper) แสดงดังรูปที่ 3.2 และจะแสดงรูปแบบสัญญาณโดยเทคนิคในการควบคุมลูกคลื่นแรงดันและกระแส ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.3 ซึ่งแสดงให้เห็นลูกคลื่นแรงดันและกระแสที่ได้จากแบบจำลองเมื่อทำการปรับอัตราส่วนดิวตี้ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.4, 3.5 และ 3.6



รูปที่ 3.2 วงจรกำลังของสัญญาณพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบอะซิงโครนัส (Asynchronous PWM AC Chopper)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขณะที่รูปคลื่นแรงดันช็อปเปอร์ของมอเตอร์ต่อเฟสและฟังก์ชั่นของสัญญาณ PWM แสดงดังรูปที่ 3.2 ซึ่งแรงดันช็อปเปอร์สามารถคำนวณได้จากผลคูณระหว่างแรงดันของแหล่งจ่ายกับฟังก์ชั่นของสัญญาณ PWM โดยที่ฟังก์ชันดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1



รูปที่ 3.3 ลูกคลื่นแรงดันที่ขั้วมอเตอร์พีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบอะซิงโครนัส (Asynchronous PWM AC Chopper)

เมื่อ D คือดิวตี้ไซเคิล (Duty cycle) ซึ่งแสดงไว้ใน (3.1)

$$f_{PWM}(t) = a_o + \sum_{n=1}^{\infty}(a_n cos\, n\omega_c t + b_n sin\, n\omega_c t) \tag{3.1}$$

เมื่อ a_o = องค์ประกอบไฟตรง

a_n , b_n = องค์ประกอบฟูเรียร์

n = อันดับฮาร์มอนิก

ω_c = ความถี่เชิงมุมของสัญญาณพาหะ

โดยที่ a_o, a_n และ b_n หาได้จากสมการที่ 3.2, 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ

$$a_o = \frac{T_{on}}{T_s} = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} = \frac{V_{cont}}{V_{tri}} = D \tag{3.2}$$

$$\mathrm{a_n} = \frac{1}{\mathrm{n\pi}}\sin(2\mathrm{n\pi D}) \tag{3.3}$$

$$b_n = -\frac{1}{n\pi}[1 + \cos(2n\pi D)] \tag{3.4}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ t_{on} = คาบเวลาสวิตช์ ON

t_{off} = คาบเวลาสวิตช์ OFF

T_s = คาบเวลาสวิตช์ชิ่ง

V_{cont} = แอมปลิจูดของสัญญาณแรงดันควบคุม

V_{tri} = แอมปลิจูดของสัญญาณแรงดันพาหะ

D = ค่าดิวตี้เรโช

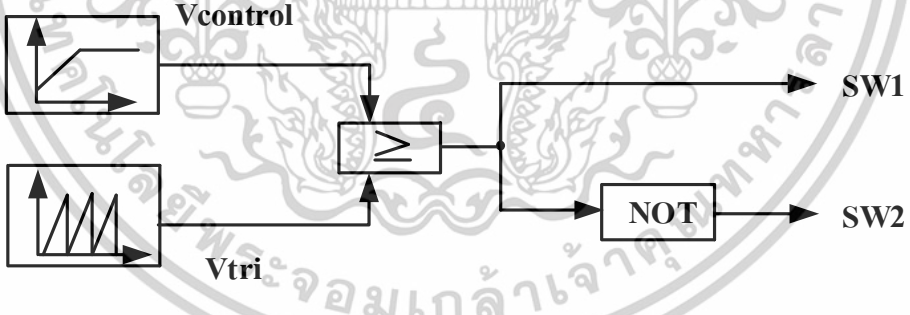
ดังนั้นแรงดันช็อปเปอร์ต่อเฟสที่จ่ายให้กับมอเตอร์สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3.5

$$v_M(t) = v_S(t).f_{PWM}(t) = V_m sin\omega_t.f_{PWM}(t) \quad (3.5)$$

แทนสมการที่ 3.1 ลงในสมการที่ 3.5 จะได้สมการที่ 3.6

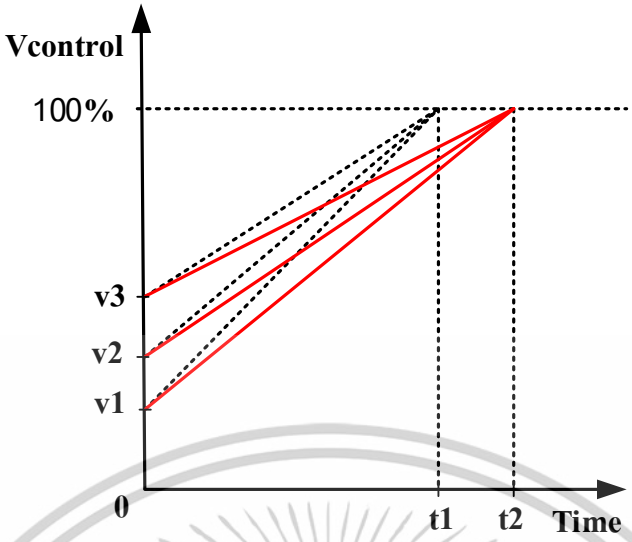
$$v_M(t) = a_o V_m \sin\omega_t + \sum_{n=1}^{\infty}[a_n V_m(cos\, n\omega_c t.sin\,\omega_t) + b_n V_m(sin\, n\omega_c t.sin\,\omega_t) \quad (3.6)$$

$$V_{M1} = a_o V_m sin\,\omega_t = D.V_m sin\,\omega_t \quad (3.7)$$

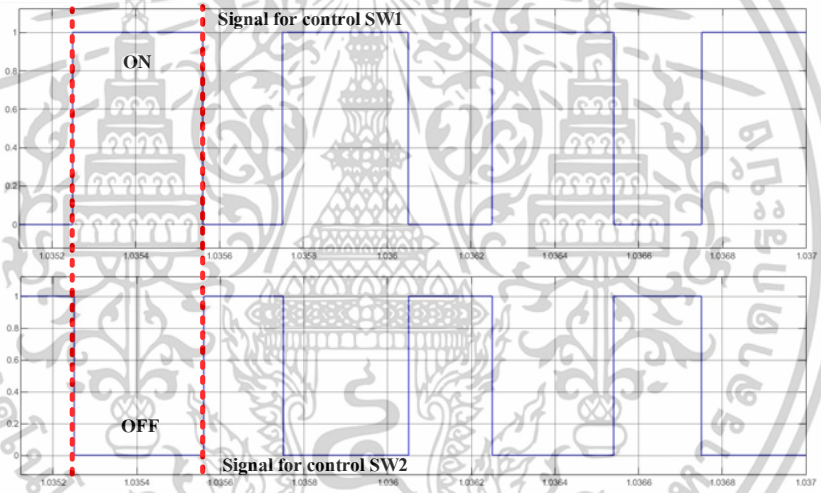


รูปที่ 3.4 ลูกคลื่นกำหนดสัญญาณพีดับเบิ้ลยูเอ็มแบบอะซิงโครนัส (Asynchronous PWM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ลูกคลื่นสัญญาณแรงดันควบคุมที่ถูกปรับขนาดให้เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นตามแกนเวลา



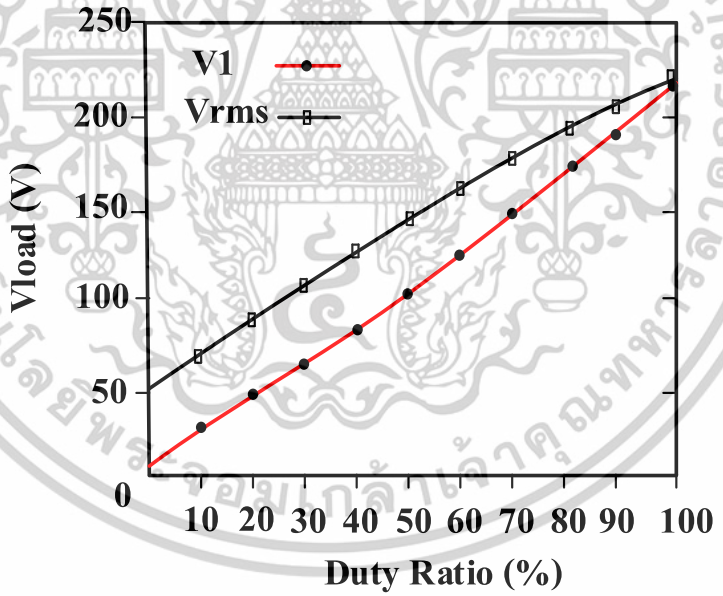
รูปที่ 3.6 ลูกคลื่นสัญญาณ PWM ที่ถูกปรับค่า D ตามแกนเวลาแบบเชิงเส้นเพื่อควบคุมสวิตช์สองทิศทาง

ในบทความวิจัยนี้จะใช้ความถี่สูงที่ควบคุมสัญญาณ PWM คือ 2 kHz เพื่อใช้สำหรับการสวิตช์กำลัง IGBT ที่ใช้กับ Asynchronous PWM AC Chopper ในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดตัวประจุสตาร์ทขนาด 0.5 แรงม้า 230 โวลต์ 4.3 แอมป์ 50 เฮิรตซ์ 4 ขั้ว สำหรับการควบคุมสัญญาณ PWM ที่ใช้ความถี่สูงมากหรือน้อยกว่า 2 kHz ในทางปฏิบัติงานวิจัยนั้นจะส่งผลกระทบด้านความร้อนสะสม ค่าความสูญเสียเพราะโมดูลของ IGBT ที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยที่ต้องการนั้นต้องดูค่าของข้อมูลด้านเฉพาะเช่น กระแสหรือค่าแรงดันสูงสุดที่สามารถทนขีดจำกัดอื่นๆและลักษณะของการนำไปใช้กับชนิดของโหลดที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การกำหนดแรงดันเริ่มต้นให้กับวงจรการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลด้วยพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบอะซิงโครนัส (Asynchronous PWM AC Chopper Soft Starter :PWMSS)

ในการกำหนดแรงดันเริ่มต้นให้กับวงจร PWMSS สามารถกำหนดได้โดยไม่ต้องคำนึงถึงภาระนั้นคือไม่ว่าภาระเป็นชนิดใดก็ตามค่าแรงดันที่ความถี่หลักมูลฐานจะแปรผันตามค่าดิวตี้เรโช D ตามสมการ 4.7 ดังนั้นวิธีการ PWMSS สามารถปรับขนาดแรงดันได้เป็นเชิงเส้นซึ่งสะดวกและง่ายกว่าวิธีการ PCSS โดยเมื่อหากนำค่าอิมพีแดนซ์เท่าเทียบของมอเตอร์ขณะอยู่กับที่นำไปจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink Version R2024a แล้วทำการปรับค่าดิวตี้เรโช D เพื่อหาค่าแรงดันที่ภาระหลังจากนั้นเมื่อนำค่ามาพล็อตกราฟจะความสัมพันธ์ระหว่างค่าดิวตี้เรโช D กับค่าแรงดันที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์เทียบเท่าของมอเตอร์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.7 ซึ่งเมื่อพิจารณาที่แรงดันเริ่มต้นตามงานวิจัยนี้ที่ค่าดิวตี้เรโช D เท่ากับ 10%, 20% และ 30% ของแรงดันที่พิกัดทำให้ได้ค่าแรงดันเท่ากับ 30 โวลต์, 48 โวลต์ และ 62 โวลต์ ตามลำดับ ดังนั้นกราฟสัญญาณที่ควบคุมด้วยวิธี PWMSS ที่ได้นำเสนอดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งได้จากการกำหนดค่าความชันของกราฟตามสมการที่ 3.5 ซึ่งเหมือนกับวิธีการของ PCSS แต่จะมีค่าความชันโดยวิธีนี้เป็นบวกในขณะที่วิธีการ PCSS เป็นลบ

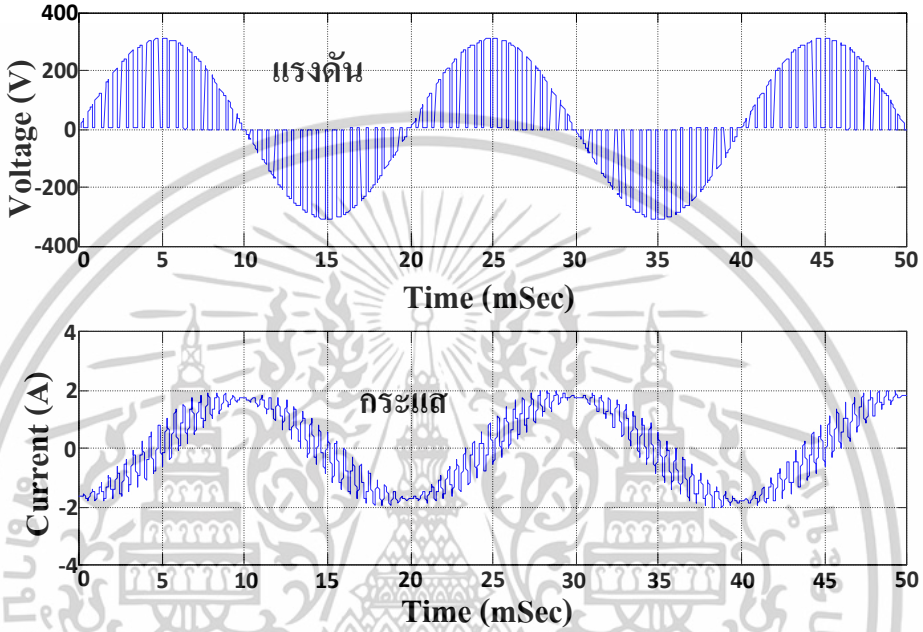


รูปที่ 3.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดิวตี้เรโช D และค่าแรงดันที่ภาระ

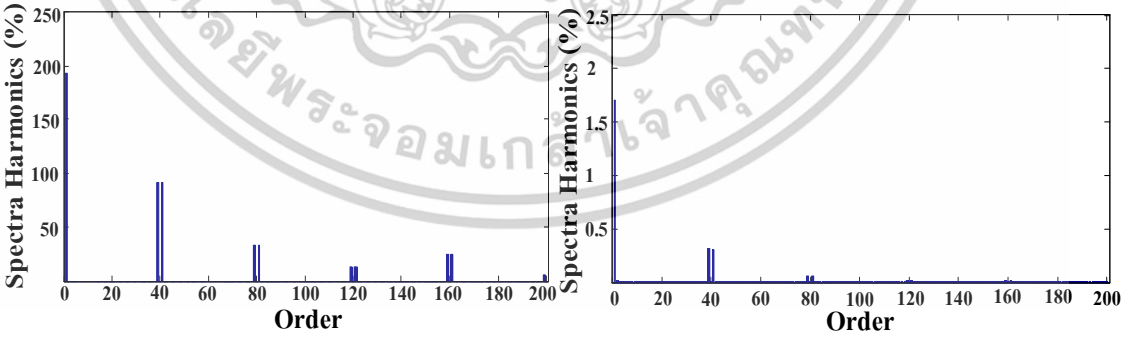
ด้วยวิธีการที่ได้นำเสนอเมื่อทำการจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink Version R2024a ทำให้ได้รูปคลื่นแรงดันไลน์ของมอเตอร์และกระแสของมอเตอร์ดังได้แสดงในรูปที่ 3.8 ซึ่งจะพบว่ารูปคลื่นแรงดันไลน์ของมอเตอร์เป็นลักษณะรูปคลื่นไซน์ที่ถูกช็อป เมื่อนำไปพล็อตสเปคตรัมทำให้เห็นองค์ประกอบของฮาร์มอนิกอันดับสูงตามความถี่สวิตช์ชิ่งดังแสดงในรูปที่ 3.9 และในขณะที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปคลื่นกระแสนั้นจะเข้าใกล้รูปคลื่นไซน์ซึ่งเมื่อนำไปพล็อตสเปคตรัมพบว่ามีองค์ประกอบของฮาร์มอนิกอันดับสูงตามความถี่สวิตช์ชิ่งเช่นเดียวกัน ซึ่งจะมีลักษณะความสัมพันธ์กันทั้งรูปคลื่นแรงดันไลน์ของมอเตอร์และกระแสของมอเตอร์ และรูปสเปคตรัมของแรงดันไลน์ของมอเตอร์และกระแสของมอเตอร์ที่มีองค์ประกอบของฮาร์มอนิกอันดับสูงตามความถี่สวิตช์ชิ่งและความถี่หลักมูลฐานนั่นเอง

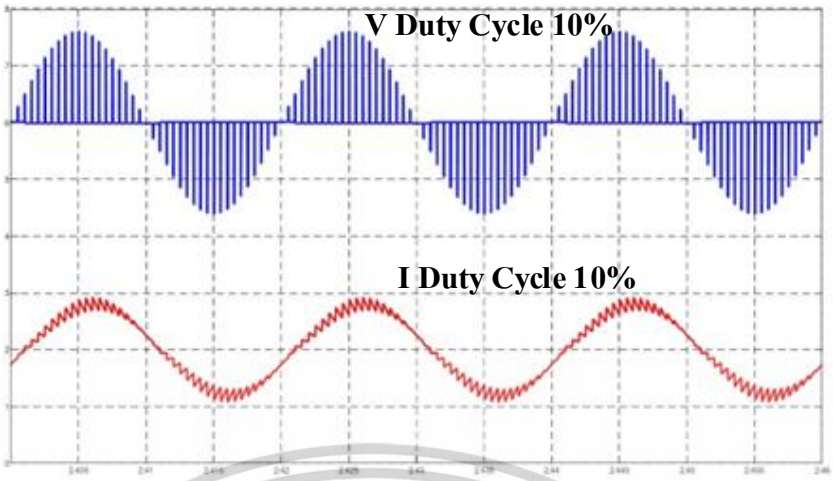


รูปที่ 3.8 รูปคลื่นแรงดันไลน์ของมอเตอร์ด้านบนและกระแสของมอเตอร์ด้านล่างที่ได้จากการจำลองด้วยวิธีการที่นำเสนอ

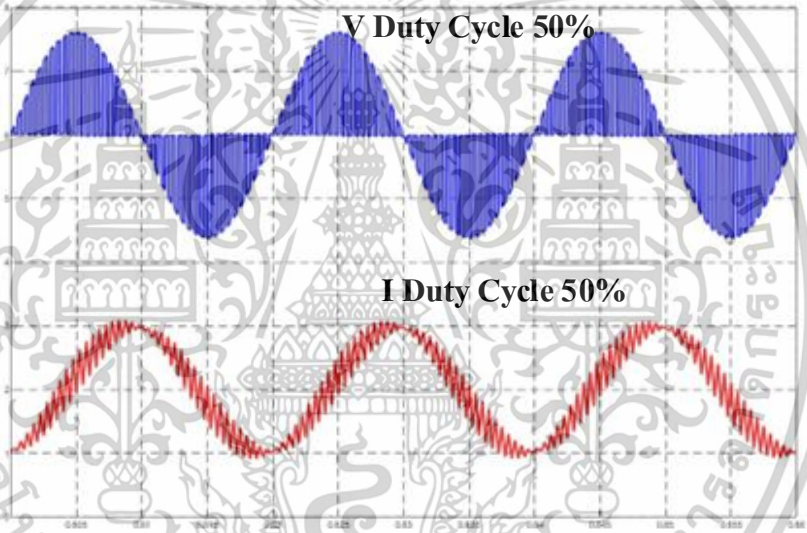


รูปที่ 3.9 รูปสเปคตรัมของแรงดันไลน์ของมอเตอร์ด้านซ้ายและกระแสของมอเตอร์ด้านขวาที่ได้จากการจำลองด้วยวิธีการที่นำเสนอ

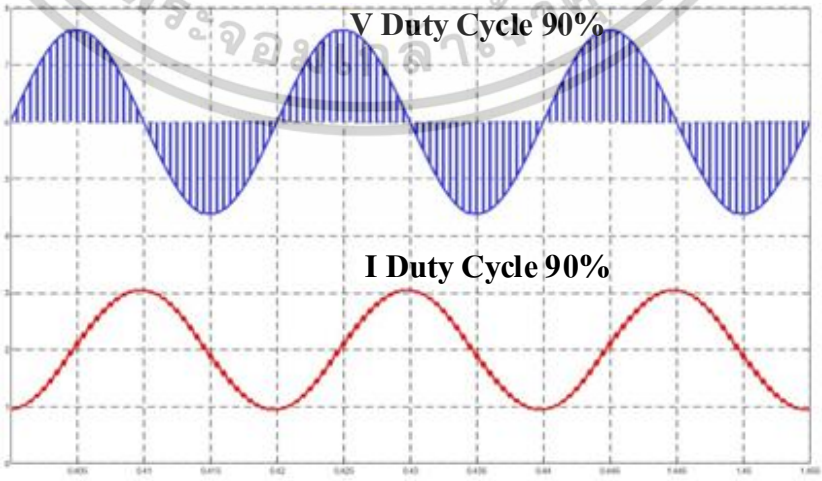
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 ลูกคลื่นแรงดันและกระแสของมอเตอร์ที่ค่าดิวตี้ไซเคิล D=10%



รูปที่ 3.11 ลูกคลื่นแรงดันและกระแสของมอเตอร์ที่ค่าดิวตี้ไซเคิล D=50%



รูปที่ 3.12 ลูกคลื่นแรงดันและกระแสของมอเตอร์ที่ค่าดิวตี้ไซเคิล D=90%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าแรงดันที่ป้อนเข้าวงจรกำลังของ PWM AC Chopper และ (V_s) จะแสดงไว้ใน (3.8)

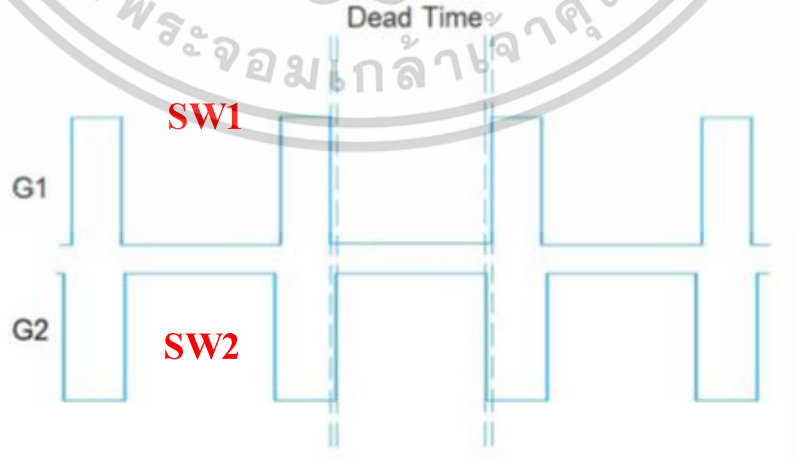
$$V_s(t) = V_{sm}\sin(\omega t) \tag{3.8}$$

เมื่อ ω และ V_{sm} คือ ความถี่เชิงมุมและค่าสูงสุดของแรงดันป้อนเข้าฟังก์ชันในการสับสวิตช์ $\mathrm{F}(t)$ แสดงให้เห็นใน (3.9) ในเทอมของ ωc (ความถี่ในการสับสวิตช์) และ D (ดิวตี้ไซเคิล) และลำดับของฮาร์มอนิกส์ใน (3.9) ซึ่งอยู่ในรูปของอนุกรมฟรูเรียร์ (Fourier Series) แรงดันขาออกของวงจรเอซี ช็อปเปอร์ ที่เกิดขึ้นฉับพลัน $V_m(t)$ จะได้จากผลคูณของฟังก์ชั่นในการสับสวิตช์กับแรงดันขาเข้าใน (3.10)

$$\mathrm{F}(t) = D + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\sin nD\pi}{n\pi}\sin(n\omega_c t) \tag{3.9}$$

$$V_m(t) = F(t)V_s(t) \tag{3.10}$$

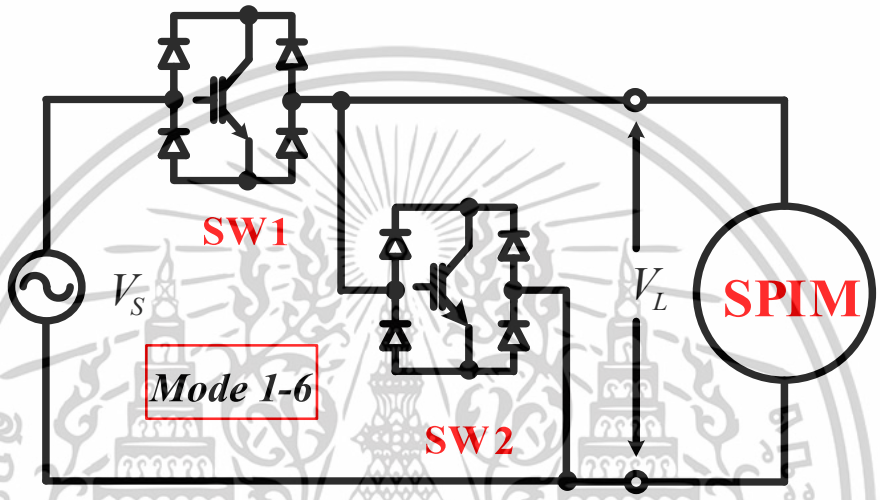
สัญญาณที่ใช้ในการขับเกตของ SW1 และ SW2 จะแสดงไว้ดังรูป 3.13 ซึ่งจะทำให้ SW1 และSW2 สลับกันทำงานในขณะที่ SW1 สวิตช์ ON, SW2 จะต้อง OFF และ SW1 สวิตช์ OFF, SW2 จะต้อง ON โดยทั่วไปแล้ว วงจรเอซี ช็อปเปอร์ แบบอะซิงโครนัส (Asynchronous AC Chopper) จะไม่จำเป็นต้องสร้างวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ (Zero Crossing) แต่ยังคงต้องมีการปรับแต่งวงจรโดยการใส่ค่าเผื่อเวลาหรือวงจรประวิงเวลา (Dead Time) เพื่อมิให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์เพาเวอร์สวิตช์ชิ่ง โดยสัญญาณ G1 นำไปขับเกตของ SW1 และสัญญาณ G2 จะนำไปขับเกตของ SW2



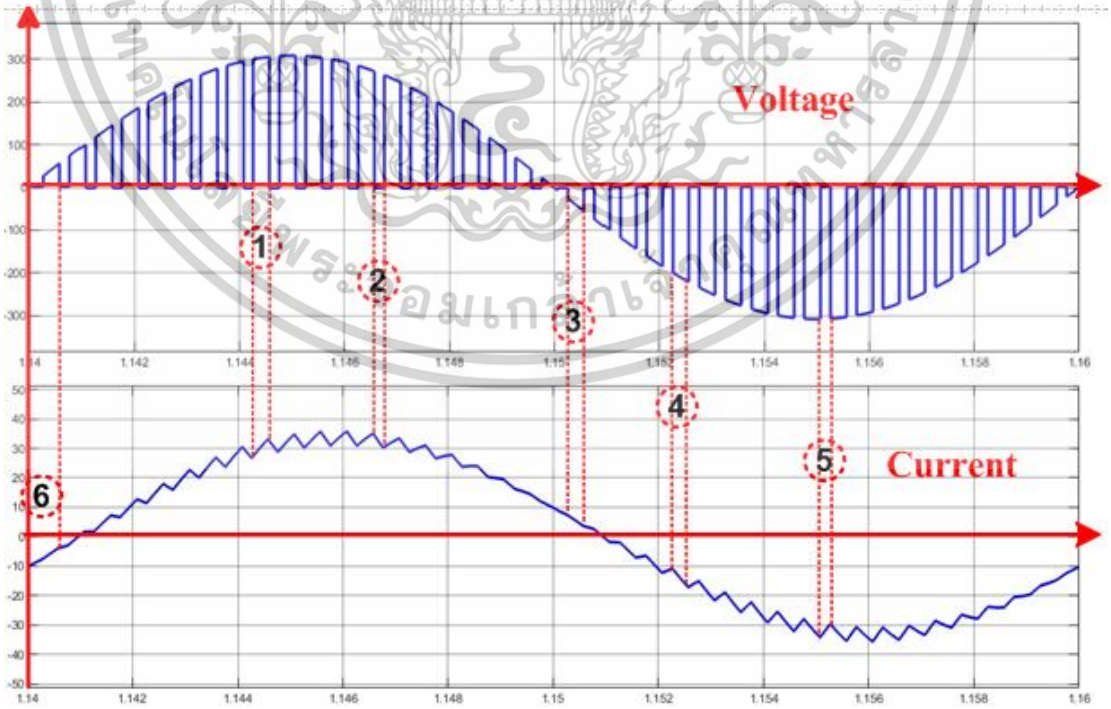
รูปที่ 3.13 รูปคลื่นสัญญาณ PWM สำหรับการควบคุมสวิตช์ SW1-SW2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบอะซิงโครนัส (Asynchronous PWM AC Chopper) ในสภาวะการทำงานแต่ละโหมดก็ยังคงใช้ที่ความถี่สูงแรงดันไฟฟ้าอินพุตจะถูกตัดเป็นช่วง (Chop) ตามสัญญาณคลื่นพีดับเบิ้ลยูเอ็ม PWM ทำให้ค่าแรงดันเอาต์พุตลดลงตาม ส่งผลทำให้ค่าแรงดันเอาต์พุตลดลงตามอัตราส่วนของช่วงเวลาของการนำกระแสต่อคาบเวลาของการนำกระแสต่อค่าเวลาของการ Switching โดยการทำงานของวงจรกำลังของสัญญาณพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบอะซิงโครนัส (Asynchronous PWM AC Chopper) สามารถแบ่งเป็น 6 โหมดดังนี้

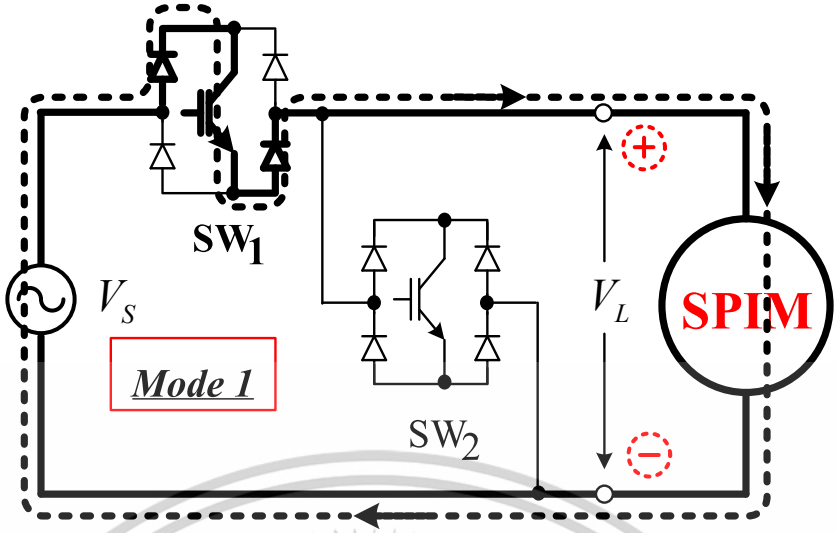


รูปที่ 3.14 วงจรกำลังของสัญญาณพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบอะซิงโครนัส (Asynchronous PWM AC Chopper)



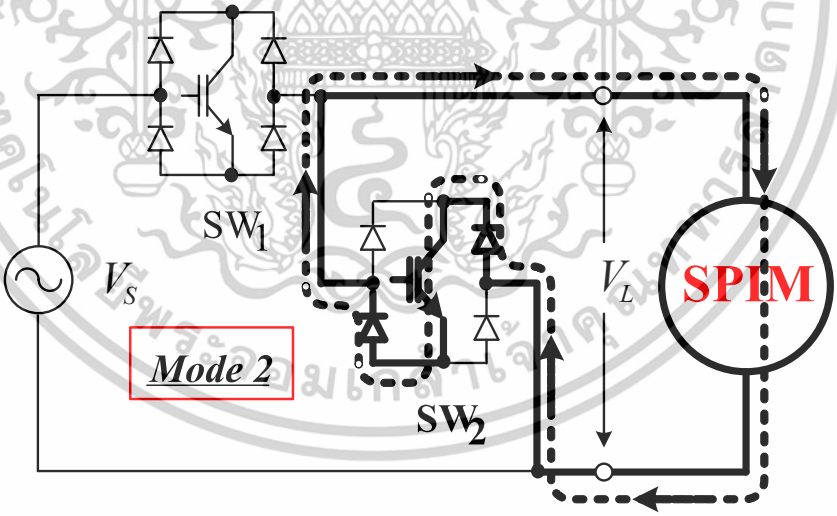
รูปที่ 3.15 รูปคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบอะซิงโครนัส (Asynchronous PWM AC Chopper) ในสภาวะการทำงานแต่ละโหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 การทำงานโหมด 1 คือกระแสเป็นบวกและแรงดันเป็นบวก IL(+), VL(+) แหล่งจ่ายด้านบวกพลังงานให้กับมอเตอร์โหมด 1 และ โหมด 4 ทำงานตรงกันข้ามกัน

โหมดที่ 1 (Powering Mode) : SW1 อยู่ในสภาวะ ON และ SW2 อยู่ในสภาวะ OFF โดยโหมดนี้เรียกว่าโหมดจ่ายกำลังไฟฟ้าไซเคิลบวก โดยแรงดันที่ตกคร่อมมอเตอร์เป็นบวก VL(+) และกระแสเป็นบวก IL(+) ซึ่งกระแสไหลจากแหล่งจ่ายผ่านไดโอด SW1 และมอเตอร์แล้วครบวงจรที่แหล่งจ่าย จึงทำให้กำลังในโหมดนี้เป็นบวก ทิศทางการไหลของกระแส ศักย์ของแรงดันและลักษณะของรูปคลื่นแรงดันและกระแส สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.16 และ รูปที่ 3.15 ตามลำดับตำแหน่งที่ 1

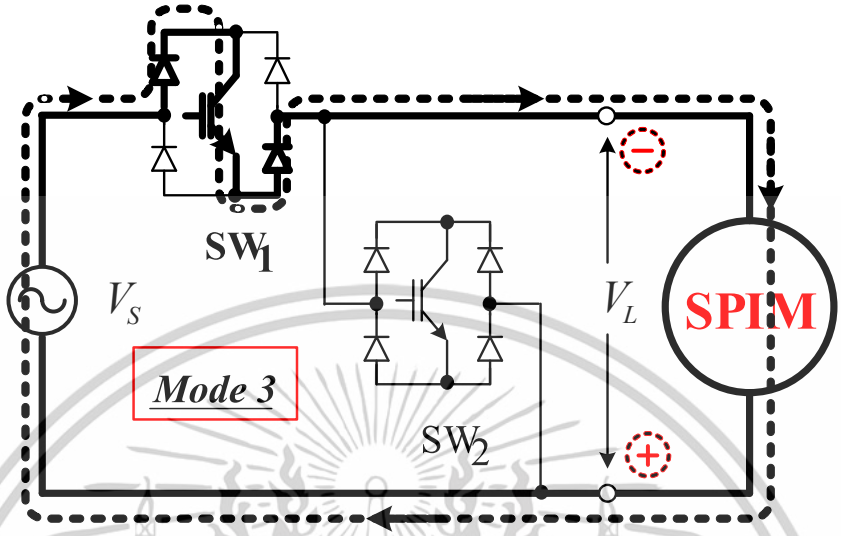


รูปที่ 3.17 การทำงานโหมด 2 คือกระแสเป็นบวกและแรงดันเป็นศูนย์ IL(+), VL(0) มอเตอร์คืนกระแสเป็นบวกทางเดิมผ่านสวิตช์ตัวที่ 2 โหมด 2 และ โหมด 5 ทำงานตรงกันข้ามกัน

โหมดที่ 2 (Freewheeling Mode) : SW1 อยู่ในสภาวะ OFF และ SW2 อยู่ในสภาวะ ON โดยโหมดนี้เรียกว่าโหมดฟรีวีลไซเคิลบวก โดยแรงดันที่ตกคร่อมมอเตอร์จะเป็นศูนย์ VL(0) ส่วนกระแสเป็นบวก IL(+) ซึ่งกระแสจากโหมดที่ 1 จะค่อยๆลดลง โดยจะไหลผ่านไดโอด SW2 แล้วครบวงจรที่มอเตอร์ ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของมอเตอร์ที่กระแสยังคงไหลในทิศทางเดิมถึงแม้ว่าไม่ได้รับ

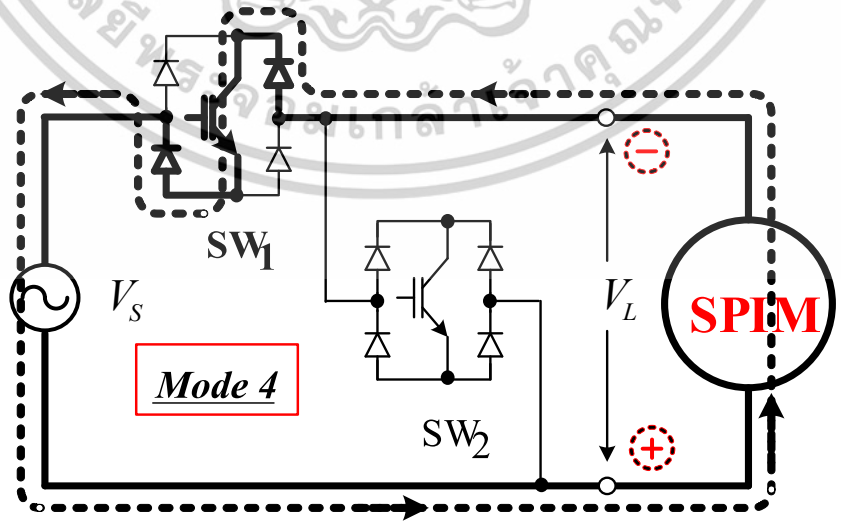
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานจากแหล่งจ่ายก็ตาม จึงทำให้กำลังในโหมดนี้เป็นศูนย์ ทิศทางการไหลของกระแส ศักย์ของแรงดันและลักษณะของรูปคลื่นแรงดันและกระแส สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.17 และ รูปที่ 3.15 ตามลำดับตำแหน่งที่ 2



รูปที่ 3.18 การทำงานโหมด 3 คือกระแสเป็นบวกและแรงดันเป็นลบ IL(+), VL(-) แหล่งจ่ายคืนแรงดันเป็นลบให้กับมอเตอร์ผ่านสวิตช์ตัวที่ 1 โหมด 3 และ โหมด 6 ทำงานตรงกันข้ามกัน

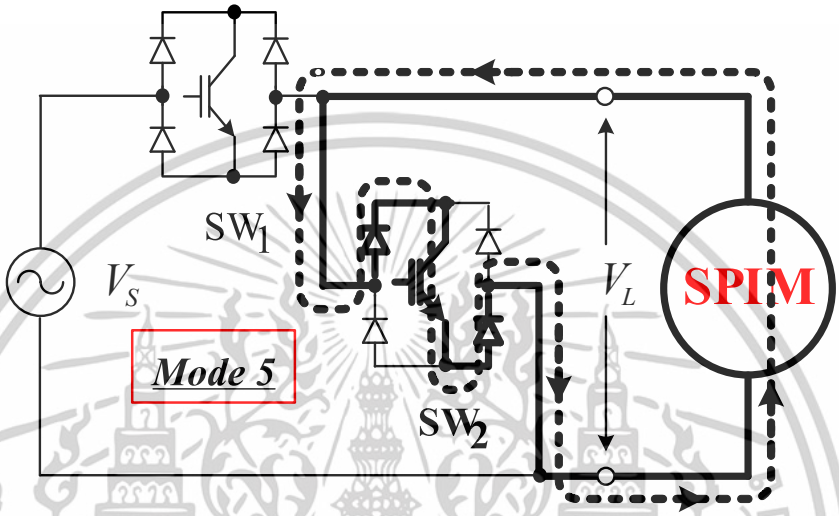
โหมดที่ 3 (Regenerative Mode) : SW1 อยู่ในสภาวะ ON และ SW2 อยู่ในสภาวะ OFF โดยโหมดนี้เรียกว่าโหมดรีเจนเนอร์เรทีฟไซเคิลบวก โดยแรงดันที่ตกคร่อมมอเตอร์จะเป็นลบ VL(-) ส่วนกระแสเป็นบวก IL(+) ซึ่งกระแสไหลจากแหล่งจ่ายผ่านไดโอด SW1 และมอเตอร์ แล้วครบวงจรที่แหล่งจ่าย ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของมอเตอร์จะทำให้กระแสล้าหลังแรงดัน โดยที่ถึงแม้ว่าแรงดันจะเริ่มกลับสัญญาณไปอยู่ในไซเคิลลบแล้วแต่กระแสยังอยู่ในไซเคิลบวก จึงทำให้กำลังไฟฟ้าในโหมดนี้เป็นลบ ทิศทางการไหลของกระแส ศักย์ของแรงดันและลักษณะของรูปคลื่นแรงดันและกระแส สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.18 และ รูปที่ 3.15 ตามลำดับตำแหน่งที่ 3



รูปที่ 3.19 การทำงานโหมด 4 คือกระแสเป็นลบและแรงดันเป็นลบ IL(-), VL(-) แหล่งจ่ายพลังงานด้านลบให้กับมอเตอร์โหมด 4 และ โหมด 1 ทำงานตรงกันข้ามกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

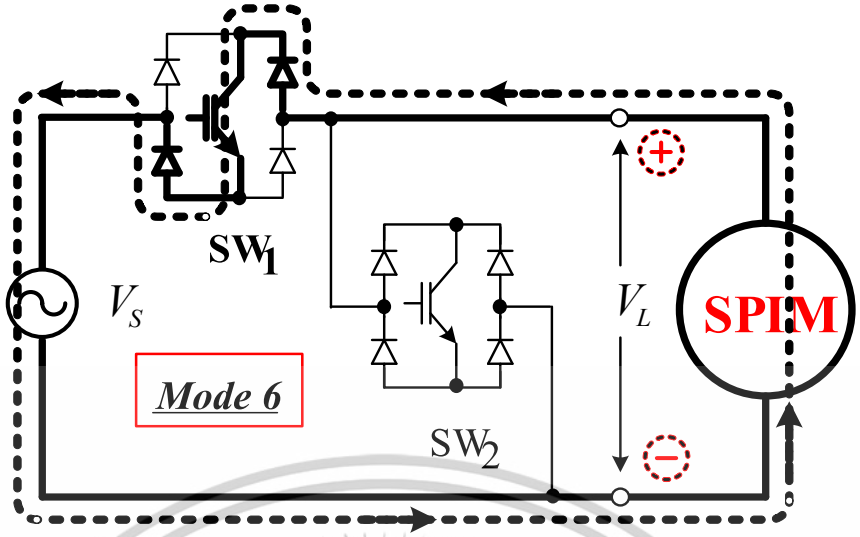
โหมดที่ 4 (Powering Mode) : SW1 อยู่ในสภาวะ ON และ SW2 อยู่ในสภาวะ OFF โดยโหมดนี้เรียกว่าโหมดจ่ายกำลังไฟฟ้าไซเคิลลบ โดยแรงดันที่ตกคร่อมมอเตอร์เป็นบวก VL(-) และกระแสเป็นลบ IL(-) ซึ่งกระแสไหลจากแหล่งจ่ายผ่านมอเตอร์ ไดโอด และ SW1 แล้วครบวงจรที่แหล่งจ่าย จึงทำให้กำลังในโหมดนี้เป็นบวก ทิศทางการไหลของกระแส ศักย์ของแรงดันและลักษณะของรูปคลื่นแรงดันและกระแส สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.19 และ รูปที่ 3.15 ตามลำดับตำแหน่งที่ 4



รูปที่ 3.20 การทำงานโหมด 5 คือกระแสเป็นลบและแรงดันเป็นศูนย์ IL(-), VL(0) มอเตอร์กินกระแสเป็นลบทางตรงกันข้ามผ่านสวิตช์ตัวที่ 2 โหมด 5 และ โหมด 2 ทำงานตรงกันข้ามกัน

โหมดที่ 5 (Freewheeling Mode) : SW1 อยู่ในสภาวะ OFF และ SW2 อยู่ในสภาวะ ON โดยโหมดนี้เรียกว่าโหมดฟรีวีลไซเคิลลบ โดยแรงดันที่ตกคร่อมมอเตอร์จะเป็นศูนย์ VL(0) ส่วนกระแสเป็นลบ IL(-) ซึ่งกระแสจากโหมดที่ 4 จะค่อยๆลดลง โดยจะไหลผ่าน ไดโอด SW2 แล้วครบวงจรที่มอเตอร์ ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของมอเตอร์ที่กระแสยังคงไหลในทิศทางเดิมถึงแม้ว่าไม่ได้รับพลังงานจากแหล่งจ่ายก็ตาม จึงทำให้กำลังในโหมดนี้เป็นศูนย์ ทิศทางการไหลของกระแส ศักย์ของแรงดันและลักษณะของรูปคลื่นแรงดันและกระแส สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.20 และ รูปที่ 3.15 ตามลำดับตำแหน่งที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



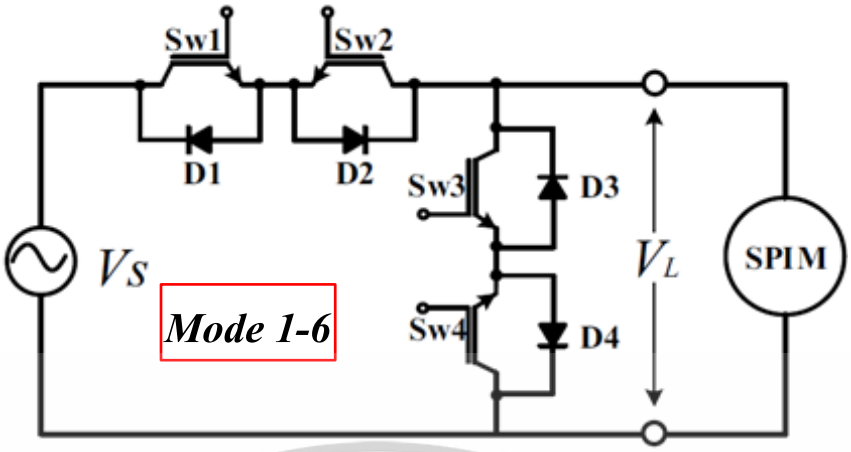
รูปที่ 3.21 การทำงานโหมด 6 คือกระแสเป็นลบและแรงดันเป็นบวก IL(-), VL(+) แหล่งจ่ายคืนแรงดันเป็นบวกให้กับมอเตอร์ผ่านสวิตช์ตัวที่ 1 โหมด 6 และ โหมด 3 ทำงานตรงกันข้ามกัน

โหมดที่ 6 (Regenerative Mode) : SW1 อยู่ในสภาวะ ON และ SW2 อยู่ในสภาวะ OFF โดยโหมดนี้เรียกว่าโหมดรีเจนเนอร์เรทีฟไซเคิลลบ โดยแรงดันที่ตกคร่อมมอเตอร์จะเป็นบวก VL(+) ส่วนกระแสเป็นลบ IL(-) ซึ่งกระแสไหลจากแหล่งจ่ายผ่านมอเตอร์ ไดโอด และ SW1 แล้วครบวงจรที่แหล่งจ่าย ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของมอเตอร์จะทำให้กระแสล้าหลังแรงดัน โดยที่ถึงแม้ว่าแรงดันจะเริ่มกลับสัญญาณไปอยู่ในไซเคิลบวกแล้ว แต่กระแสยังอยู่ในไซเคิลลบ จึงทำให้กำลังไฟฟ้าในโหมดนี้เป็นลบทิศทางการไหลของกระแส ศักย์ของแรงดันและลักษณะของรูปคลื่นแรงดันและกระแสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.21 และ รูปที่ 3.15 ตามลำดับตำแหน่งที่ 6

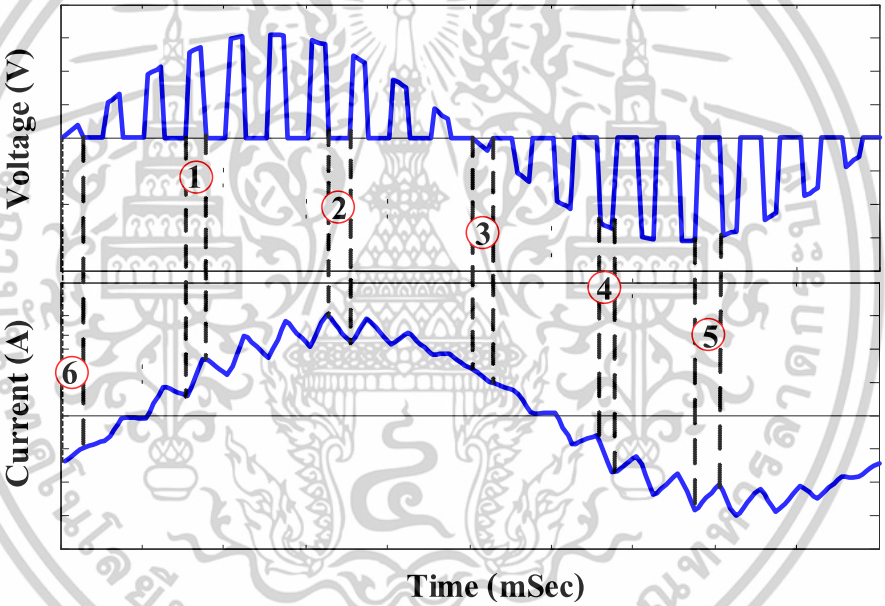
3.4 สัญญาณพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบซิงโครนัส (Synchronous PWM AC Chopper)

การทำงานของคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตของพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบซิงโครนัส (Synchronous PWM AC Chopper) ในสภาวะการทำงานแต่ละโหมดก็ยังคงใช้ที่ความถี่สูงแรงดันไฟฟ้าอินพุตจะถูกตัดเป็นช่วง (Chop) ตามสัญญาณคลื่นพีดับบิวเอ็ม PWM ทำให้ค่าแรงดันเอาต์พุตลดลงตาม ทำให้ค่าแรงดันเอาต์พุตลดลงตามอัตราส่วนของช่วงเวลาของการนำกระแสต่อคาบเวลาของการนำกระแสต่อค่าเวลาของการ Switching โดยการทำงานของวงจรกำลังของสัญญาณพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบซิงโครนัส (Synchronous PWM AC Chopper) แสดงได้ดังรูปที่ 3.22 และ รูปที่ 3.23 สามารถแบ่งเป็น 6 โหมดดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

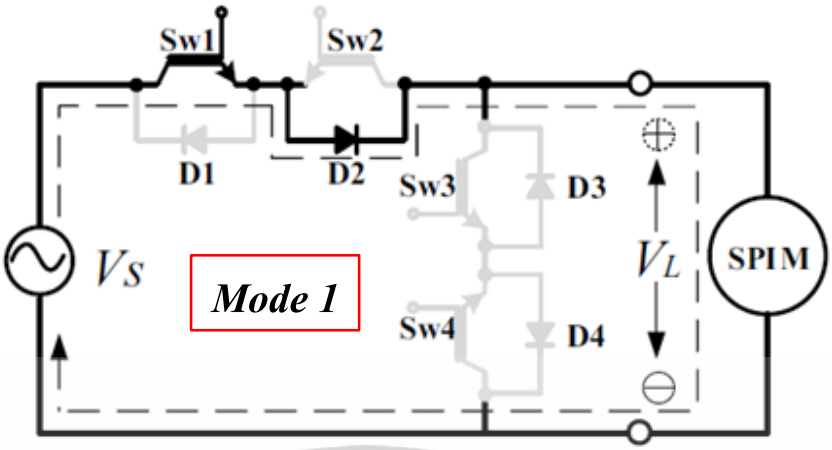


รูปที่ 3.22 วงจรกำลังของสัญญาณพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบซิงโครนัส (Synchronous PWM AC Chopper)



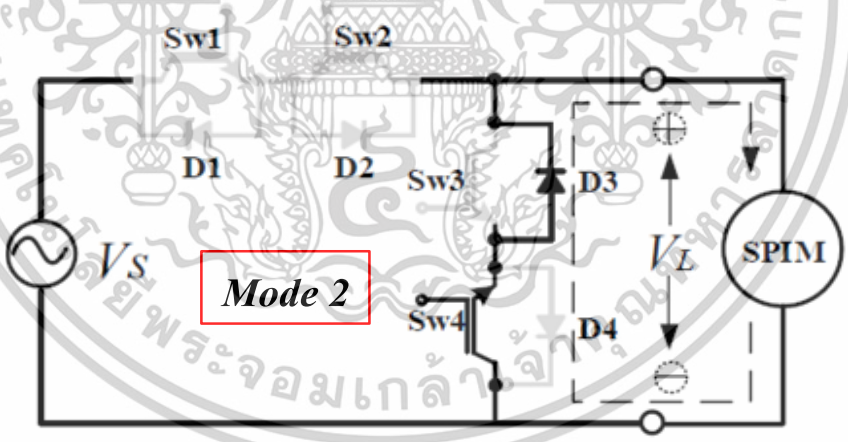
รูปที่ 3.23 รูปคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตของพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบซิงโครนัส (Synchronous PWM AC Chopper) ในสภาวะการทำงานแต่ละโหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.24 การทำงานโหมด 1 คือกระแสเป็นบวกและแรงดันเป็นบวก IL(+), VL(+)

โหมดที่ 1 (Powering Mode) : SW1 อยู่ในสภาวะ ON และ SW2 อยู่ในสภาวะ OFF และ SW3 อยู่ในสภาวะ OFF และ SW4 อยู่ในสภาวะ OFF โดยโหมดนี้เรียกว่าโหมดจ่ายกำลังไฟฟ้าไซเคิลบวก โดยแรงดันที่ตกคร่อมมอเตอร์เป็นบวก VL(+) และกระแสเป็นบวก IL(+) ซึ่งกระแสไหลจากแหล่งจ่ายผ่าน SW1 ไดโอด D2 และมอเตอร์ แล้วครบวงจรที่แหล่งจ่าย จึงทำให้กำลังในโหมดนี้เป็นบวกทิศทางการไหลของกระแส ศักย์ของแรงดันและลักษณะของรูปคลื่นแรงดันและกระแส สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.24 และ รูปที่ 3.23 ตำแหน่งวงกลมเลขที่ 1

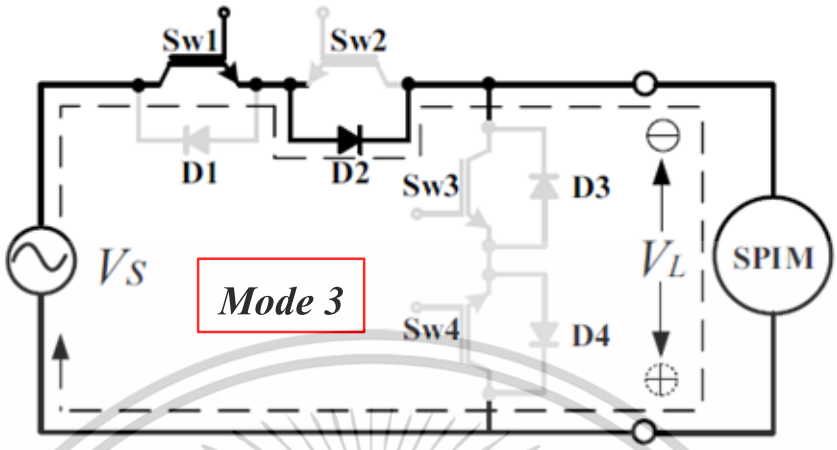


รูปที่ 3.25 การทำงานโหมด 2 คือกระแสเป็นบวกและแรงดันเป็นศูนย์ IL(+), VL(0)

โหมดที่ 2 (Freewheeling Mode) : SW1 อยู่ในสภาวะ OFF และ SW2 อยู่ในสภาวะ OFF และ SW3 อยู่ในสภาวะ OFF และ SW4 อยู่ในสภาวะ ON โดยโหมดนี้เรียกว่าโหมดฟรีวีลไซเคิลบวก โดยแรงดันที่ตกคร่อมมอเตอร์จะเป็นศูนย์ VL(0) ส่วนกระแสเป็นบวก IL(+) ซึ่งกระแสจากโหมดที่ 1 จะค่อยๆลดลงโดยจะไหลผ่านไดโอด SW4 ไดโอด D3 แล้วครบวงจรที่มอเตอร์ ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของมอเตอร์ที่กระแสยังคงไหลในทิศทางเดิมถึงแม้ว่าไม่ได้รับพลังงานจากแหล่งจ่ายก็ตาม จึงทำให้กำลังในโหมดนี้เป็นศูนย์ ทิศทางการไหลของกระแส ศักย์ของแรงดันและ

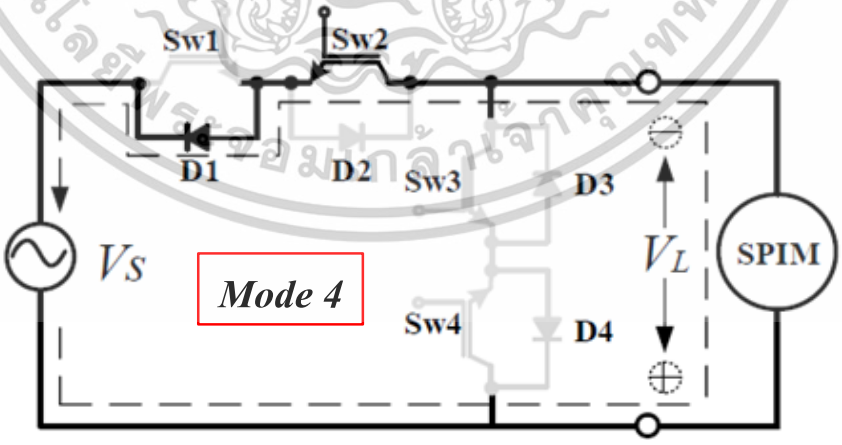
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะของรูปคลื่นแรงดันและกระแสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.25 และ รูปที่ 3.23 ตำแหน่งวงกลมเลขที่ 2



รูปที่ 3.26 การทำงานโหมด 3 คือกระแสเป็นบวกและแรงดันเป็นลบ IL(+), VL(-)

โหมดที่ 3 (Regenerative Mode) : SW1 อยู่ในสภาวะ ON และ SW2 อยู่ในสภาวะ OFF และ SW3 อยู่ในสภาวะ OFF และ SW4 อยู่ในสภาวะ OFF โดยโหมดนี้เรียกว่าโหมดรีเจนเนอร์เรทีฟ ไซเคิลบวก โดยแรงดันที่ตกคร่อมมอเตอร์จะเป็นลบ VL(-) ส่วนกระแสเป็นบวก IL(+) ซึ่งกระแสไหลจากแหล่งจ่ายผ่าน SW1 ไดโอด D2 และมอเตอร์ แล้วครบวงจรที่แหล่งจ่าย ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของมอเตอร์จะทำให้กระแสล้าหลังแรงดัน โดยที่ถึงแม้ว่าแรงดันจะเริ่มกลับสัญญาณไปอยู่ในไซเคิลลบแล้วแต่กระแสยังอยู่ในไซเคิลบวก จึงทำให้กำลังไฟฟ้าในโหมดนี้เป็นลบ ทิศทางการไหลของกระแสศักย์ของแรงดันและลักษณะของรูปคลื่นแรงดันและกระแส สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.26 และ รูปที่ 3.23 ตำแหน่งวงกลมเลขที่ 3

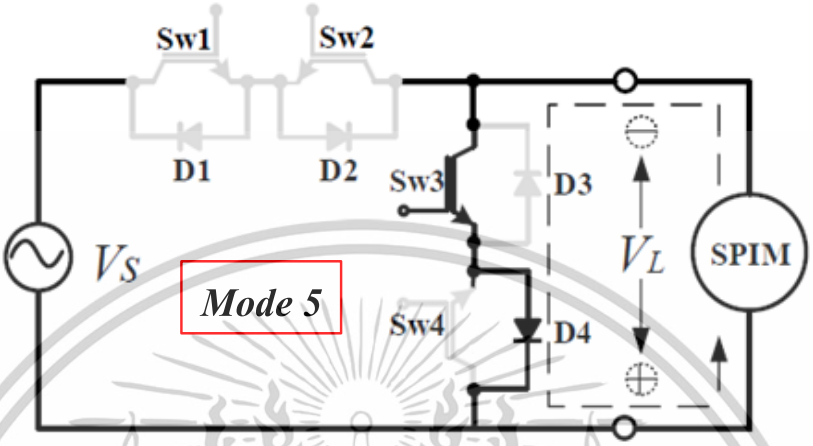


รูปที่ 3.27 การทำงานโหมด 4 คือกระแสเป็นลบและแรงดันเป็นลบ IL(-), VL(-)

โหมดที่ 4 (Powering Mode) : SW1 อยู่ในสภาวะ OFF และ SW2 อยู่ในสภาวะ ON และ SW3 อยู่ในสภาวะ OFF และ SW4 อยู่ในสภาวะ OFF โดยโหมดนี้เรียกว่าโหมดจ่ายกำลังไฟฟ้าไซเคิล

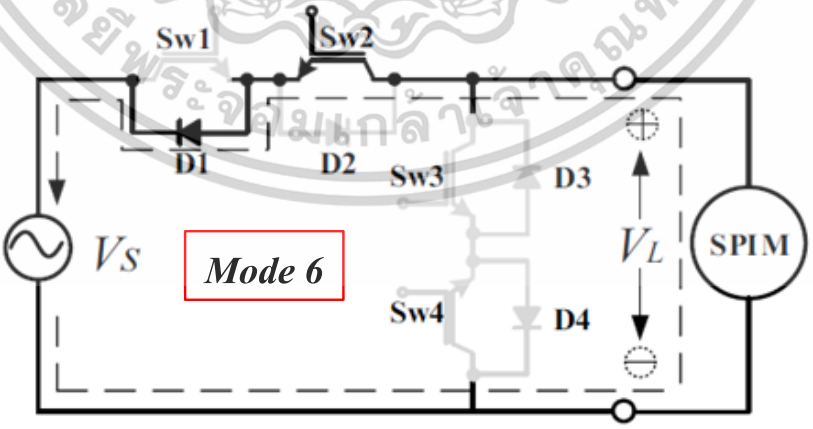
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลบ โดยแรงดันที่ตกคร่อมมอเตอร์เป็นบวก VL(-) และกระแสเป็นลบ IL(-) ซึ่งกระแสไหลจากแหล่งจ่ายผ่าน SW2ไดโอด D1 มอเตอร์ และแล้วครบวงจรที่แหล่งจ่าย จึงทำให้กำลังในโหมดนี้เป็นบวก ทิศทางการไหลของกระแส ศักย์ของแรงดันและลักษณะของรูปคลื่นแรงดันและกระแส สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.27 และ รูปที่ 3.23 ตำแหน่งวงกลมเลขที่ 4



รูปที่ 3.28 การทำงานโหมด 5 คือกระแสเป็นลบและแรงดันเป็นศูนย์ IL(-), VL(0)

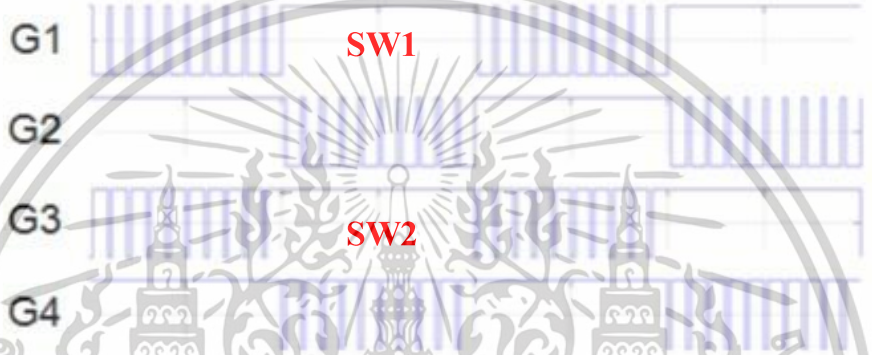
โหมดที่ 5 (Freewheeling Mode) : SW1 อยู่ในสภาวะ OFF และ SW2 อยู่ในสภาวะ OFF และ SW3 อยู่ในสภาวะ ON และ SW4 อยู่ในสภาวะ OFF โดยโหมดนี้เรียกว่าโหมดฟรีวีลไซเคิล ลบ โดยแรงดันที่ตกคร่อมมอเตอร์จะเป็นศูนย์ VL(0) ส่วนกระแสเป็นลบ IL(-) ซึ่งกระแสจากโหมดที่ 4 จะค่อยๆลดลง โดยจะไหลผ่าน SW3 ไดโอด D4 แล้วครบวงจรที่มอเตอร์ ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของมอเตอร์ที่กระแสยังคงไหลในทิศทางเดิมถึงแม้ว่าไม่ได้รับพลังงานจากแหล่งจ่ายก็ตาม จึงทำให้กำลังในโหมดนี้เป็นศูนย์ ทิศทางการไหลของกระแส ศักย์ของแรงดันและลักษณะของรูปคลื่นแรงดันและกระแส สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.28 และ รูปที่ 3.23 ตำแหน่งวงกลมเลขที่ 5



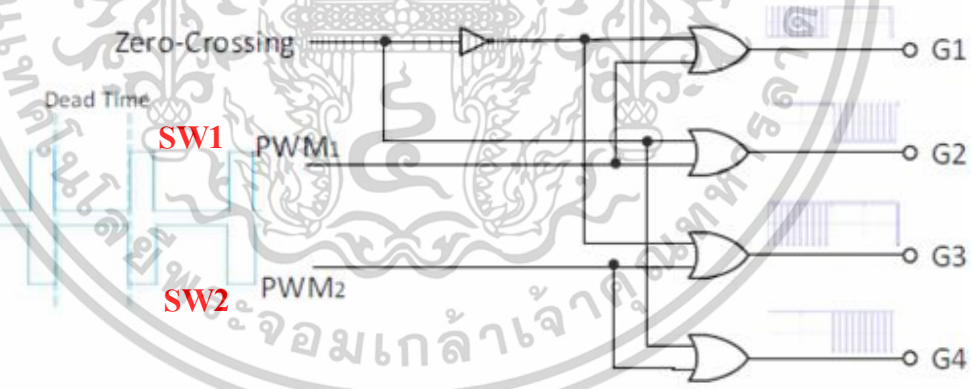
รูปที่ 3.29 การทำงานโหมด 6 คือกระแสเป็นลบและแรงดันเป็นบวก IL(-), VL(+)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โหมดที่ 6 (Regenerative Mode) : SW1 อยู่ในสภาวะ OFF และ SW2 อยู่ในสภาวะ ON และ SW3 อยู่ในสภาวะ OFF และ SW4 อยู่ในสภาวะ OFF โดยโหมดนี้เรียกว่าโหมดรีเจนเนอร์เรทีฟไซเคิลลบ โดยแรงดันที่ตกคร่อมมอเตอร์จะเป็นบวก VL(+) ส่วนกระแสเป็นลบ IL(-) ซึ่งกระแสไหลจากแหล่งจ่ายผ่าน SW2 ไดโอด D1 และมอเตอร์ แล้วครบวงจรที่แหล่งจ่าย ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของมอเตอร์จะทำให้กระแสล้าหลังแรงดัน โดยที่ถึงแม้ว่าแรงดันจะเริ่มกลับสัญญาณไปอยู่ในไซเคิลบวกแล้ว แต่กระแสยังอยู่ในไซเคิลลบ จึงทำให้กำลังไฟฟ้าในโหมดนี้เป็นลบ ทิศทางการไหลของกระแส ศักย์ของแรงดันและลักษณะของรูปคลื่นแรงดันและกระแส สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.29 และ รูปที่ 3.23 ตำแหน่งวงกลมเลขที่ 6



รูปที่ 3.30 สัญญาณขับเกจทั้ง 4 สัญญาณ

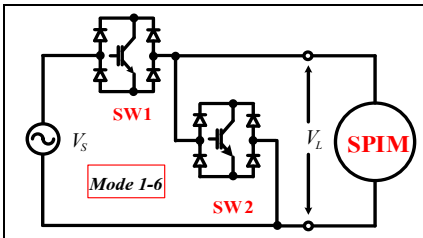
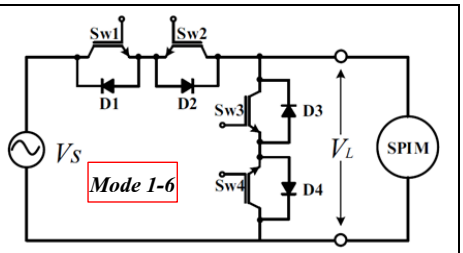


รูปที่ 3.31 การกำเนิดสัญญาณขับเกจทั้ง 4 สัญญาณ

การสร้างสัญญาณขับเกต G1, G2, G3 และ G4 ของสวิตช์ SW1 และ SW2 จะต้องใช้วงจรตรวจจับผ่านศูนย์ (Zero-Crossing) ดังรูปที่ 3.30 เพื่อรวมกับสัญญาณ PWM1 และ PWM2 ที่มีการสร้าง Dead Time หรือวงจรประวิงเวลาระหว่างขอบขาขึ้น และขอบขาลงของสัญญาณ ด้วย Logic Gate (OR Gate และ Inverter) จะกำเนิดสัญญาณขับเกต G1, G2, G3 และ G4 ดังรูปที่ 3.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ตารางการเปรียบเทียบระหว่าง Asynchronous PWM AC Chopper กับ Synchronous PWM AC Chopper

		
ข้อเปรียบเทียบ	Asynchronous	Synchronous
สวิตช์ (IGBT)	2 อุปกรณ์	4 อุปกรณ์
Fast Recovery Diode	8 อุปกรณ์	2 อุปกรณ์
สัญญาณขับเกต	2 สัญญาณ	4 สัญญาณ
Zero Crossing	ไม่ต้องใช้	ใช้

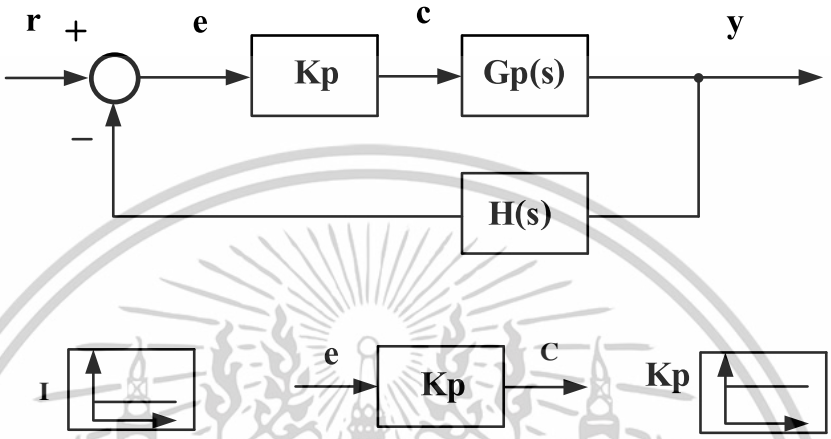
จากตารางที่ 3-1 ทำการเปรียบเทียบรายละเอียดของวงจรทั้ง 2 แบบ คือ พีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบอะซิงโครนัส (Asynchronous PWM AC Chopper) และจะเห็นได้ว่าจากตารางด้านบนรูปแบบพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบซิงโครนัส (Synchronous PWM AC Chopper) จะมีความซับซ้อนในการสร้างที่มากกว่า โดยยังต้องใช้วงจร Zero Crossing เพื่อสร้างสัญญาณขับเกตทั้ง 4 สัญญาณ แต่ยังต้องคงต้องทดสอบทาง Practical เพื่อหาข้อสรุปต่อไปทางงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.5 ตัวควบคุมแบบพีไอ

ตัวควบคุมแบบพีไอเป็นตัวควบคุมที่พบบ่อยมากที่สุดในงานอุตสาหกรรมทั่วไปเพราะเป็นตัวควบคุมที่ใช้งานง่ายการปรับค่าเกนอาศัยหลักการที่ไม่ได้ซับซ้อนมาก แต่ให้ผลตอบสนองเป็นที่ยอมรับได้สามารถปรับแต่งการควบคุมได้ง่ายเมื่อต้องการระบบควบคุมแบบพีไอมีตัวควบคุมย่อย 2 ตัว คือ 1 ตัวควบคุมแบบสัดส่วนหรือตัวควบคุมพี และ 2 ตัวควบคุมแบบปริพันธ์หรือตัวควบคุมไอ ในการควบคุมระบบทั่วไปมักใช้งานตัวควบคุมร่วมกัน เช่น การควบคุมแบบพีไอ การควบคุมแบบพีดี โดยงานวิจัยนี้จะยกตัวอย่างเป็นการควบคุมแบบพีไอ ซึ่งรายละเอียดการทำงานของตัวควบคุมมีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.1 ตัวควบคุมแบบสัดส่วนแบบพี เป็นตัวควบคุมแบบสัดส่วนหรือควบคุมแบบพีตัวควบคุมแบบนี้จะนำเอาสัญญาณค่าความผิดพลาดระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณเอาต์พุตมาเป็นอินพุตของตัวควบคุมแล้วตัวควบคุมจะทำการสร้างสัญญาณเอาต์พุตด้วยการขยายสัญญาณความผิดพลาดดังกล่าวด้วยค่าเกนของตัวควบคุมบล็อกไดอะแกรมและลักษณะของการประมวลผลสัญญาณเป็นดังรูปที่ 3.32



รูปที่ 3.32 ตัวควบคุมแบบพี

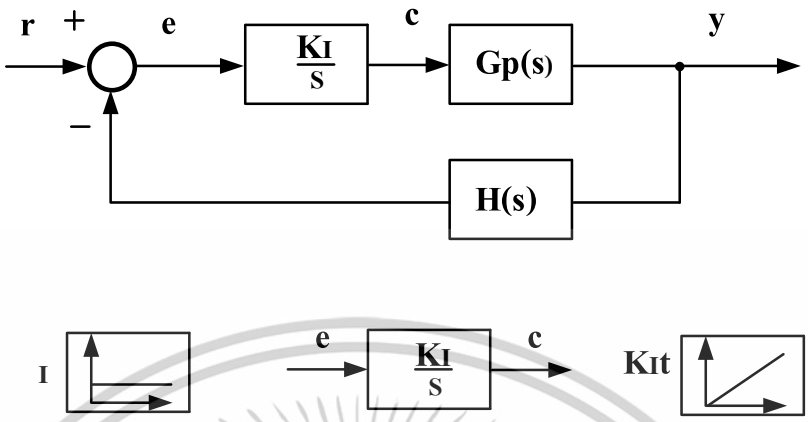
จากจุดเด่นของตัวควบคุมแบบนี้เมื่อนำไปใช้งานก็คือ การปรับค่าเกนให้สูงขึ้นจะมีผลทำให้ระบบมีผลตอบสนองที่เร็วขึ้น ปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นในการนำไปใช้งานก็คือถ้านำไปใช้กับระบบชนิด 0 (System Type 0) ตัวควบคุมแบบนี้จะไม่สามารถขจัดค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวได้แต่ก็สามารถทำให้ค่าความผิดพลาดดังกล่าวมีค่าน้อยลงได้ด้วยการปรับค่าเกนให้สูง ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วการปรับค่าเกนให้สูงมากขนาดไหนเอาต์พุตที่ออกจริงๆ จากตัวควบคุมมักมีค่าจำกัดและการปรับเกนให้มีค่าสูงสำหรับระบบที่มีอันดับสูง อาจจะทำให้ได้ผลตอบสนองที่ไม่เป็นที่พึงประสงค์เช่นการปรับเกนให้สูงขึ้นสำหรับระบบอับดับสอง ผลที่ตามมาก็คือค่าพุ่งเกินก็จะสูงขึ้นตามด้วยซึ่งอาจจะเป็นอันตรายต่อระบบได้

3.5.2 ตัวควบคุมแบบสัดส่วนแบบไอ ตัวควบคุมแบบปริพันธ์หรือตัวควบคุมแบบไอตัวควบคุมแบบนี้จะนำสัญญาณความผิดพลาดระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณเอาต์พุตมาเป็นอินพุตของตัวควบคุม แล้วตัวควบคุมจะทำการสร้างสัญญาณเอาต์พุตด้วยการอินทริกรัลสัญญาณความผิดพลาดดังกล่าวแล้วคูณด้วยค่าเกนของตัวควบคุมบล็อกไดอะแกรมและลักษณะของการประมวลผลสัญญาณผลสัญญาณเป็นดังรูปที่ 3.33

จากจุดเด่นของตัวควบคุมแบบนี้เมื่อนำไปใช้งานก็คือ นำไปใช้กับระบบชนิด 0 (System Type 0) ตัวควบคุมแบบนี้จะสามารถขจัดค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวได้ ข้อด้อยที่อาจจะเกิดขึ้นในการนำไปใช้งานก็คือ ตัวควบคุมแบบนี้ไม่สามารถลดผลของการพุ่งเกินของผลตอบสนองได้และการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรับเกนให้มีค่าสูงอาจจะทำให้ได้ผลตอบสนองที่ไม่เป็นที่พึงประสงค์ เช่นการปรับเกนให้สูงขึ้นอาจจะมีผลทำให้ผลตอบสนองของระบบเกิดการแกว่งตัวได้

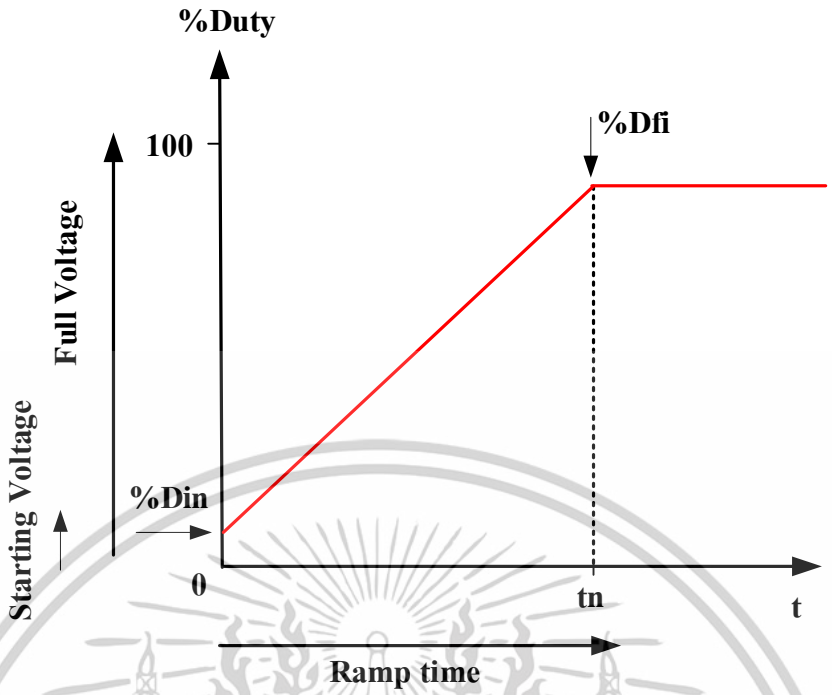


รูปที่ 3.33 ตัวควบคุมแบบไอ

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าหากนำตัวควบคุมแบบพีไปใช้กับระบบที่เป็นอันดับหนึ่งผลตอบสนองที่ได้จะมีค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัว ซึ่งสามารถลดผลกระทบได้ด้วยการเพิ่มค่าเกนของตัวควบคุมให้สูงขึ้น สำหรับการนำไปใช้กับระบบที่มีอันดับสูงกว่านั้นและเป็นระบบชนิด 0 ค่าความพลาดในสภาวะคงตัวก็จะยังคงมีค่าอยู่ และการลดผลกระทบด้วยการปรับค่าเกนของตัวควบคุมพีให้สูงขึ้นอาจจะส่งผลให้การพุ่งเกินมีค่าสูงขึ้นได้ ถ้าหากใช้ตัวควบคุมร่วมกันระหว่าง พี กับ ไอ หรือตัวควบคุมแบบพีไอกับระบบนี้แล้ว ตัวควบคุมแบบไอจะช่วยขจัดค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวแต่ผลตอบสนองที่ได้จะยังมีค่าพุ่งเกินเหมือนเดิม แต่ค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวก็จะยังคงอยู่ดังนั้นถ้าหากใช้ตัวควบคุมร่วมกันระหว่าง พี และ ไอ ด้วยการปรับค่าเกนให้เหมาะสมกับระบบนั้นๆ ก็จะได้ผลตอบสนองแบบหน่วงต่ำกว่าวิกฤตที่มีค่าพุ่งเกินเหมาะสมกับระบบนั้น

การทดสอบหาค่าเกนที่เหมาะสมของตัวควบคุมแบบพีไอจะเห็นได้ว่าการที่ได้ผลตอบสนองที่เหมาะสมของตัวควบคุมแต่ละแบบนั้นขึ้นอยู่กับอันดับ และชนิดของระบบเป็นสำคัญและระบบแต่ละระบบมีค่าเกนที่เหมาะสมต่างๆ กันออกไปทั้งนี้ยังต้องรวมไปถึงข้อกำหนดคุณลักษณะในการออกแบบด้วย เพื่อให้ได้ผลตอบสนองเป็นไปดังที่ผู้ใช้และผู้ออกแบบพึงพอใจการให้ได้มาซึ่งค่าเกนที่เหมาะสมสำหรับระบบทั่วๆ ไปที่อาจจะมีอันดับสูงเป็นเรื่องที่ค่อนข้างยากในที่นี้จะนำเสนอวิธีการทดสอบระบบเพื่อหาค่าเกนที่เหมาะสมของตัวควบคุมแบบ พีไอ ที่เป็นที่นิยมมีด้วยกันอยู่ 2 วิธี คือ 1 วิธีการของซีเกลอร์-นิโคล (Ziegler-Nichols Compensation) และ 2 วิธีการของเชน-ฮรอน-เรสวิก หรือซีเฮสอาร์ (Chien-Hrones-Reswick or CHR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.34 กราฟเส้นคุณลักษณะของ Voltage-Ramp Technique

$$\%D_{act}(t) = St + \%D_{in} \tag{3.11}$$

เมื่อ

S = ความชัน

t = เวลาไต่ขึ้น (sec)

$\%D_{act}$ = เปอร์เซ็นต์ดิวตี้ไซเคิลค่าจริงตามฟังก์ชั่นเวลา

$\%D_{fi}$ = เปอร์เซ็นต์ดิวตี้ไซเคิลของค่าที่ต้องการ

$\%D_{in}$ = เปอร์เซ็นต์ดิวตี้ไซเคิลของค่าที่เริ่มต้น

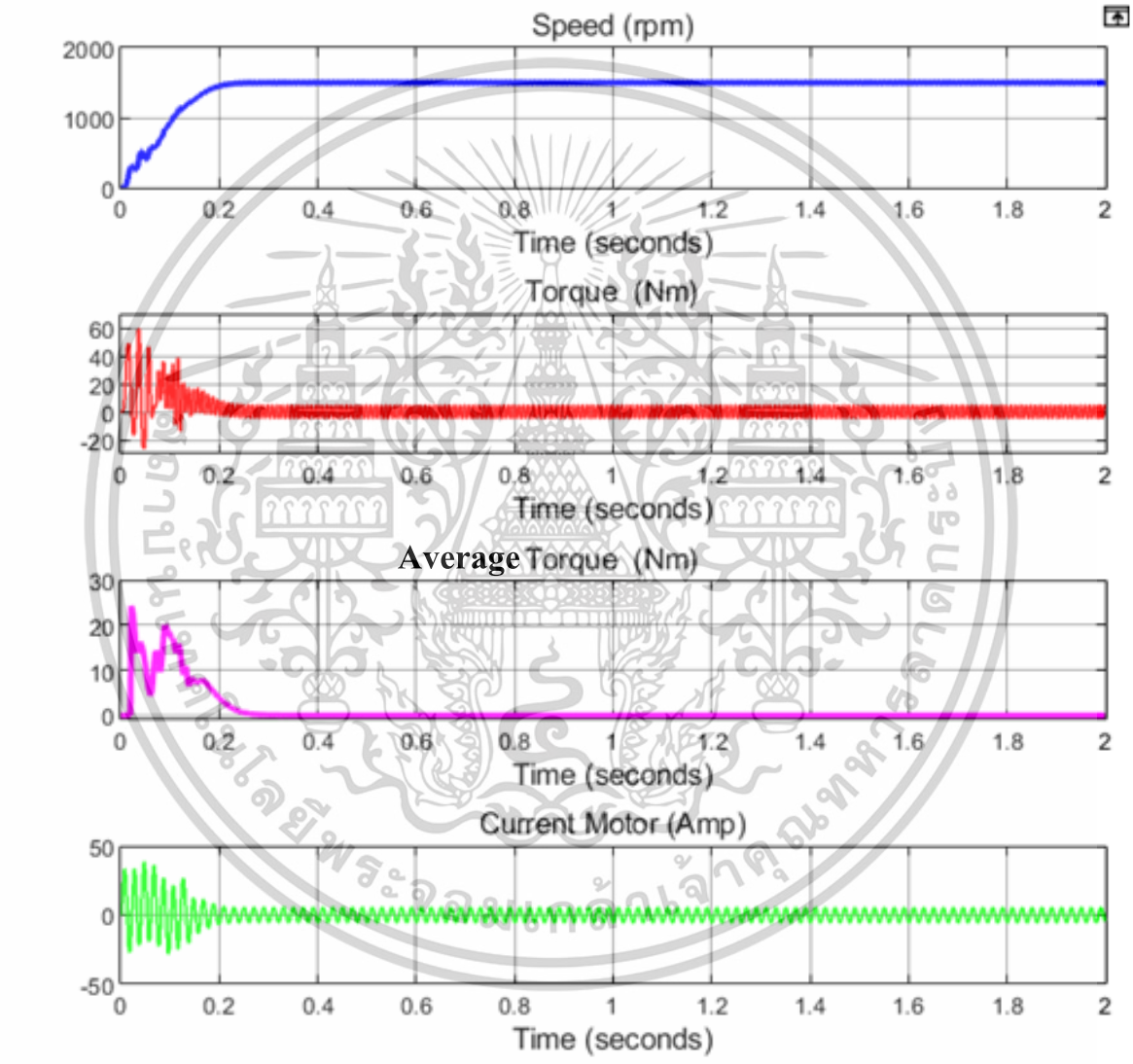
ซึ่งนั่นแสดงว่าสามารถควบคุมแรงดันเพิ่มสูงขึ้นแบบมีอัตราการเร่งแบบ Voltage-Ramp ได้ตามความต้องการโดยการปรับ Duty Cycle

3.6 ผลจากการจำลองเพื่อดูสมรรถนะของมอเตอร์ขณะเริ่มหมุนแบบโดยตรงและแบบนิ่มนวล

จากพารามิเตอร์ของมอเตอร์ได้จากการทดสอบในตารางที่ 5.1 ของบทที่ 5 และภาคผนวก ข. มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดตัวเก็บประจุช่วยหรือแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ทที่ 50 ไมโครฟารัด ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น SC-KR มีขนาดพิกัด 1/2 แรงม้า หรือ 0.4 กิโลวัตต์ 230 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ 4.3 แอมป์ 4 ขั้ว และความเร็วรอบที่พิกัดที่ 1,430 รอบต่อนาที โดยวิธีการ No-Load Test และ

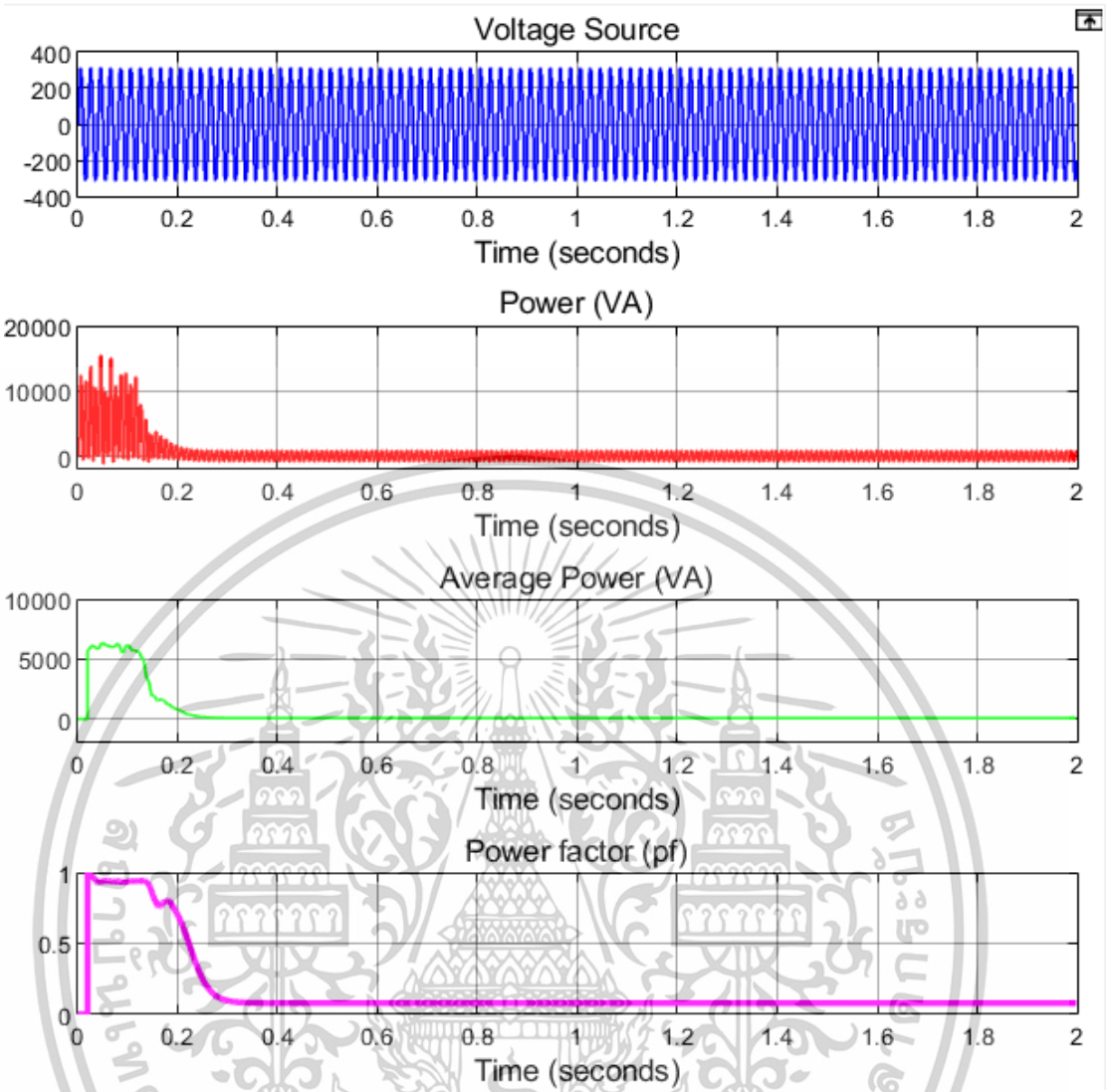
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Lock Rotor Test ใช้ในการจำลองการลดแรงดันแสดงในรูป 3.33 – 3.42 เพื่อเปรียบเทียบ ความเร็ว แรงบิดเริ่มต้น กระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ กำลังไฟฟ้าปรากฏและตัวประกอบกำลัง โดยการปรับลดแรงดันที่ป้อนเข้ามอเตอร์ของการสตาร์ทแบบต่อโดยตรงจากไลน์ (Direct on-line Starting :DOL) กระแสขณะสตาร์ทจะสูงมากประมาณ 7-8 เท่าหรือที่ 30-32 แอมป์ เมื่อเทียบจากกระแสพิกัด 4.3 แอมป์ ผลการตอบสนองทางไดนามิกส์ของความเร็วจะสูงมากเพราะ Maximum Average Electromagnetic Torque มีค่า 20 Nm โดยประมาณการกระเพื่อมของแรงบิด (Electromagnetic Torque Pulsation) สูงขึ้นด้วย



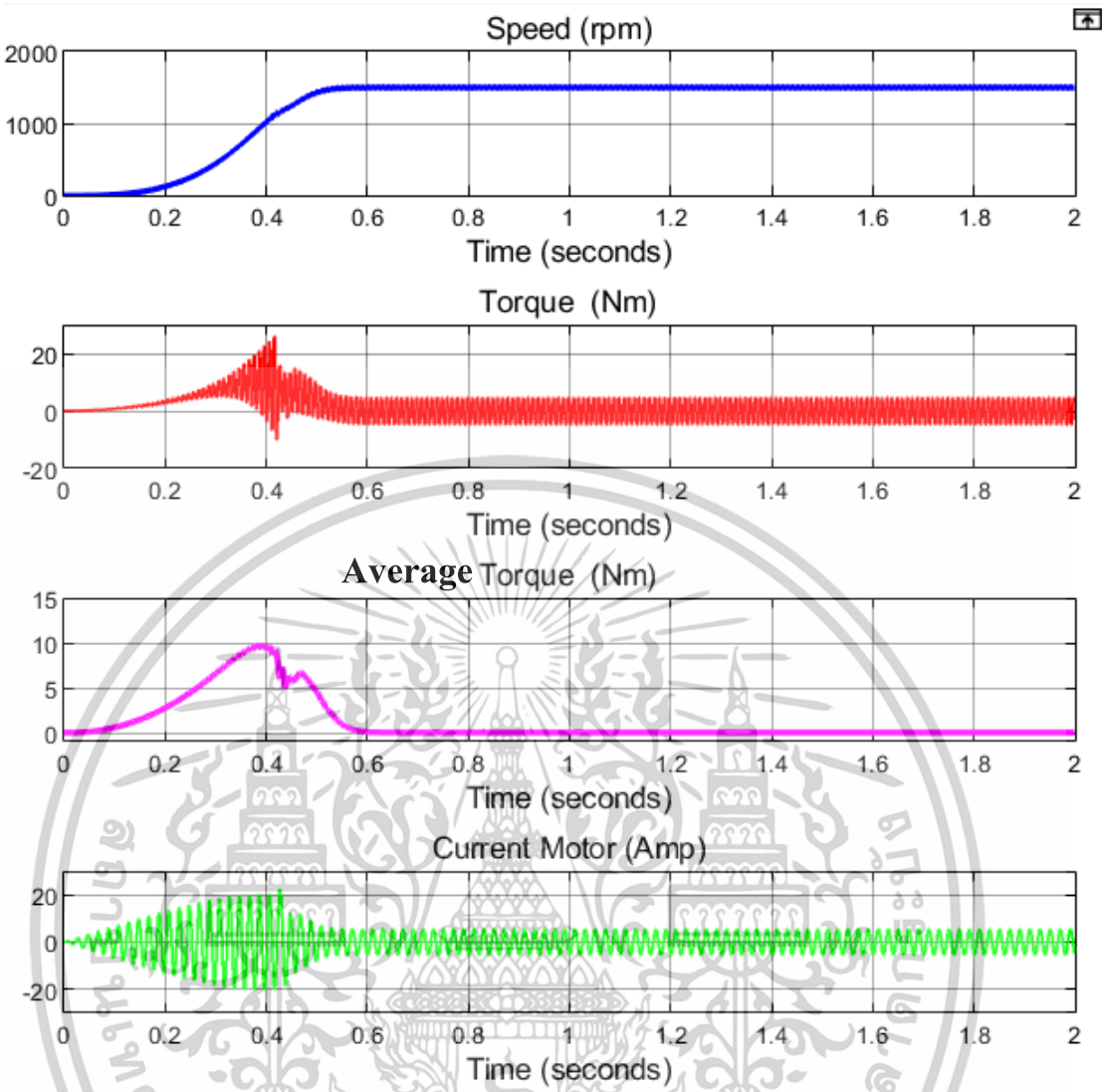
รูปที่ 3.35 สมรรถนะของมอเตอร์โดยการสตาร์ทแบบต่อโดยตรงจากไลน์ (Direct on-line Starting :DOL)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



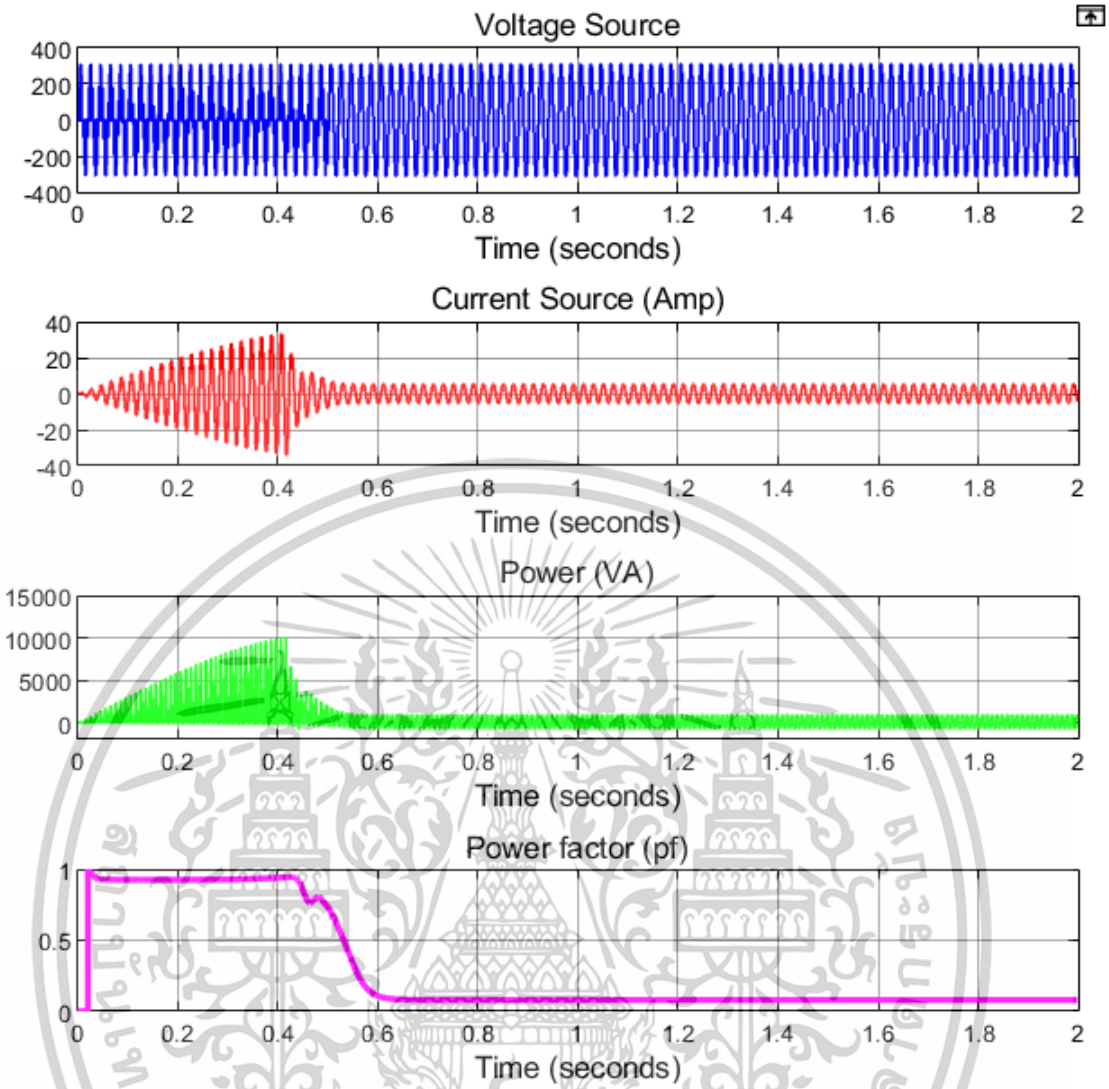
รูปที่ 3.36 สมรรถนะของมอเตอร์ ด้านกำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ กำลังไฟฟ้าที่ปรากฏเฉลี่ย และค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์โดยการสตาร์ทแบบต่อโดยตรงจากไลน์ (Direct on-line Starting :DOL)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



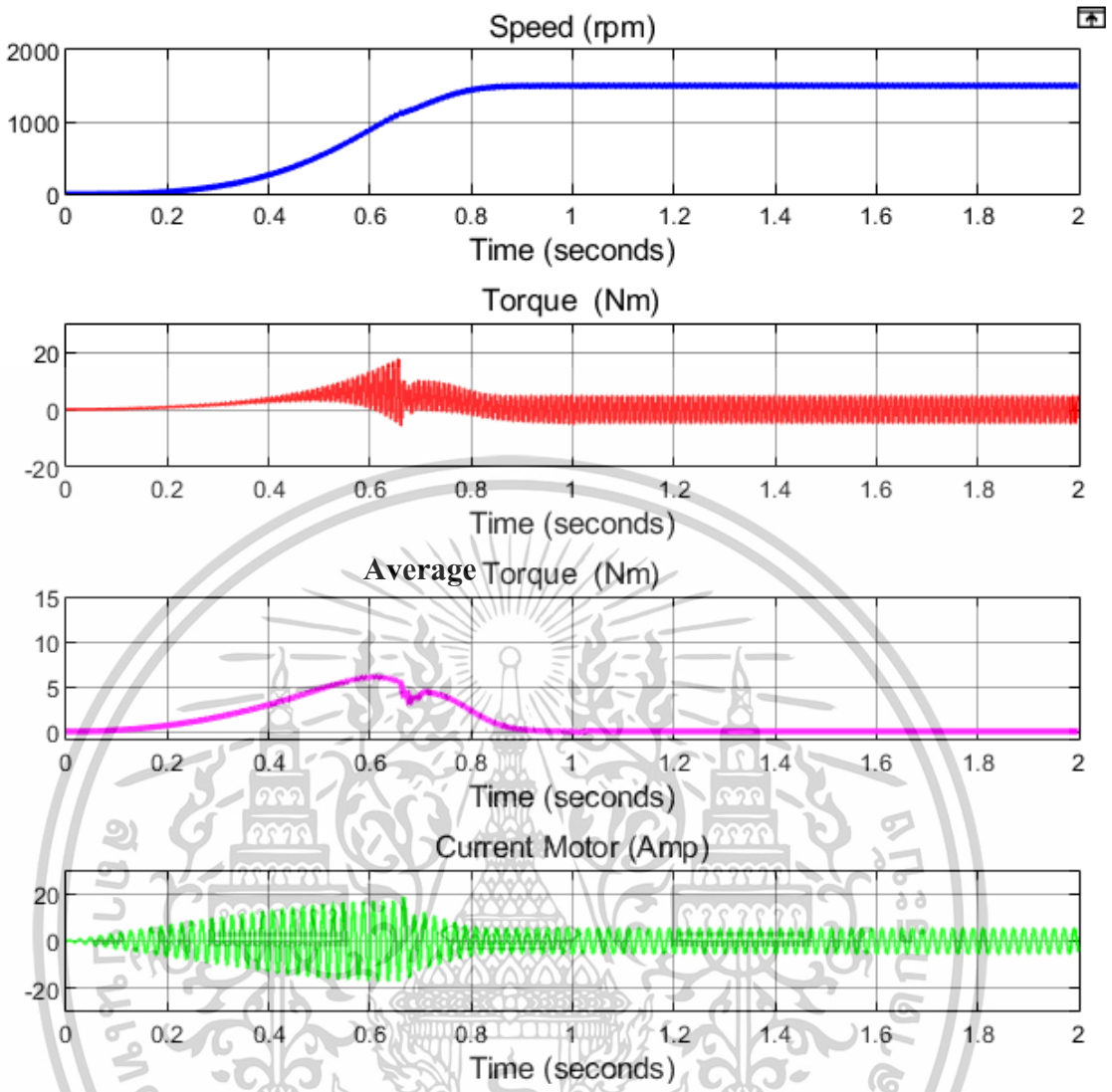
รูปที่ 3.37 สมรรถนะของมอเตอร์โดยการสตาร์ทแบบนิ่มนวล (PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS) ที่ค่าความชัน S=0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



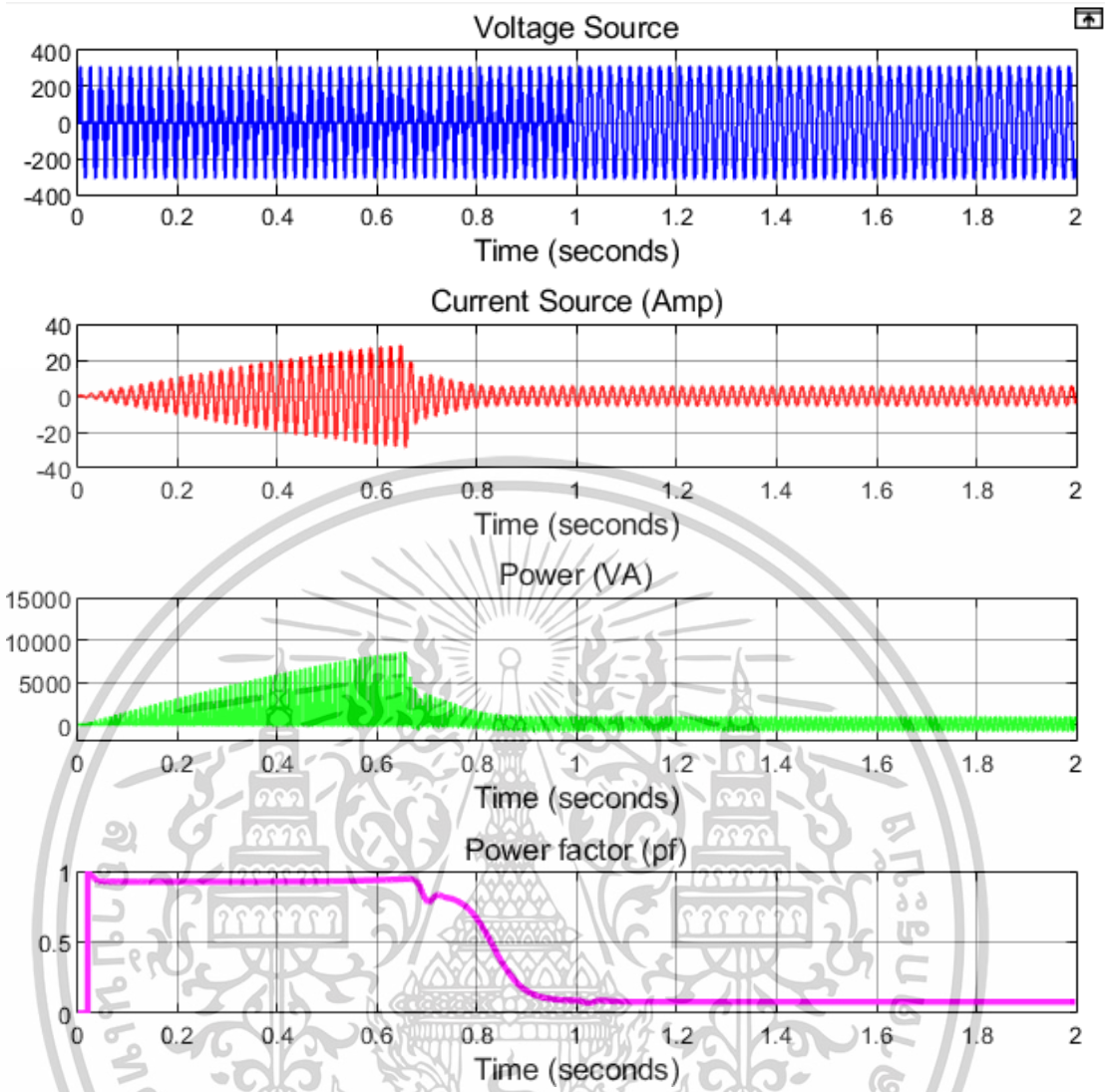
รูปที่ 3.38 สมรรถนะของมอเตอร์ ด้านกระแสที่เข้ามอเตอร์ กำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ และค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์โดยการสตาร์ทแบบนิ่มนวล (PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS) ที่ค่าความชัน S=0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



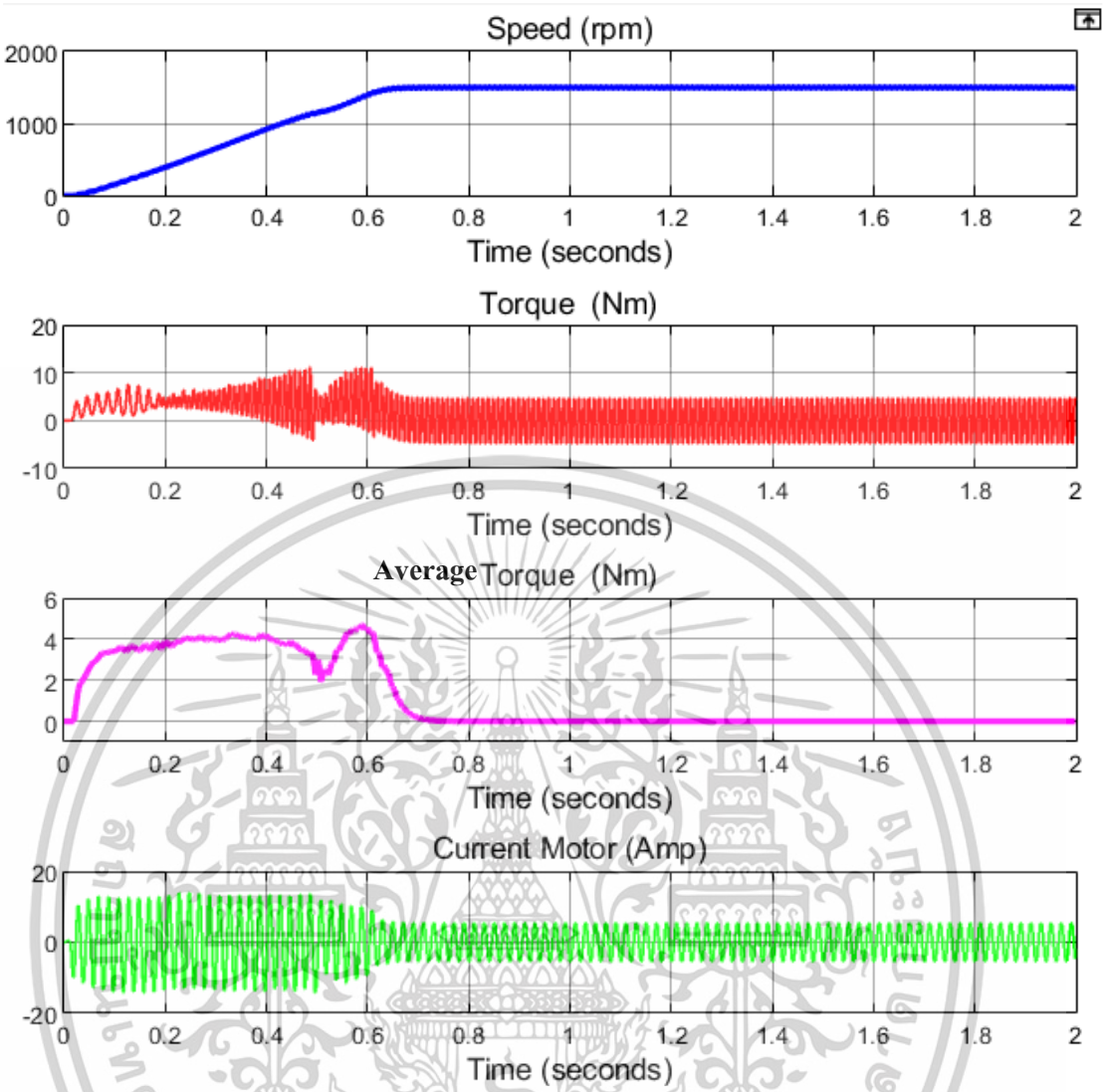
รูปที่ 3.39 สมรรถนะของมอเตอร์โดยการสตาร์ทแบบนิ่มนวล (PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS) ที่ค่าความชัน S=1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



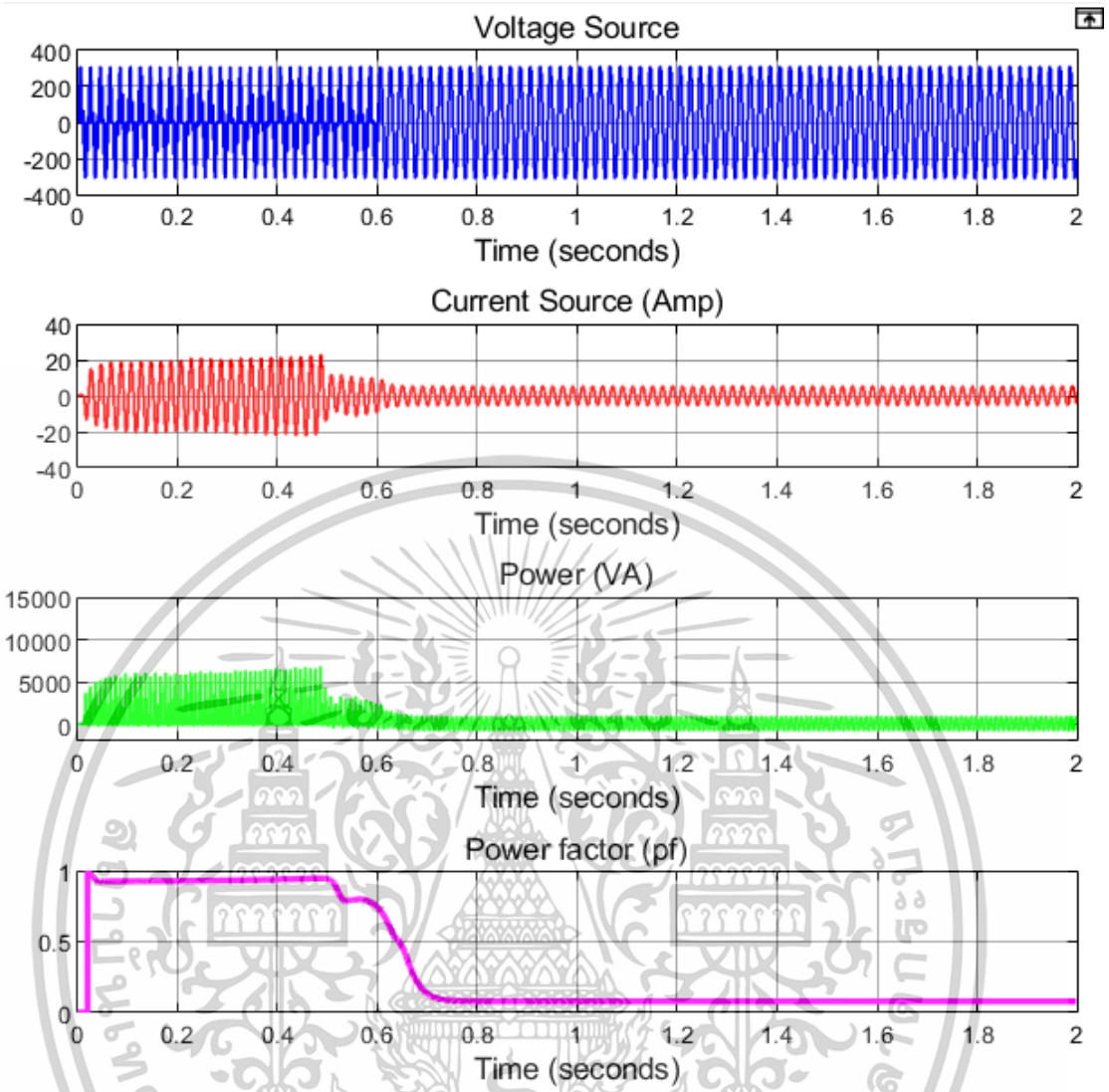
รูปที่ 3.40 สมรรถนะของมอเตอร์ ด้านกระแสที่เข้ามอเตอร์ กำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ และค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์โดยการสตาร์ทแบบนิ่มนวล (PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS) ที่ค่าความชัน S=1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



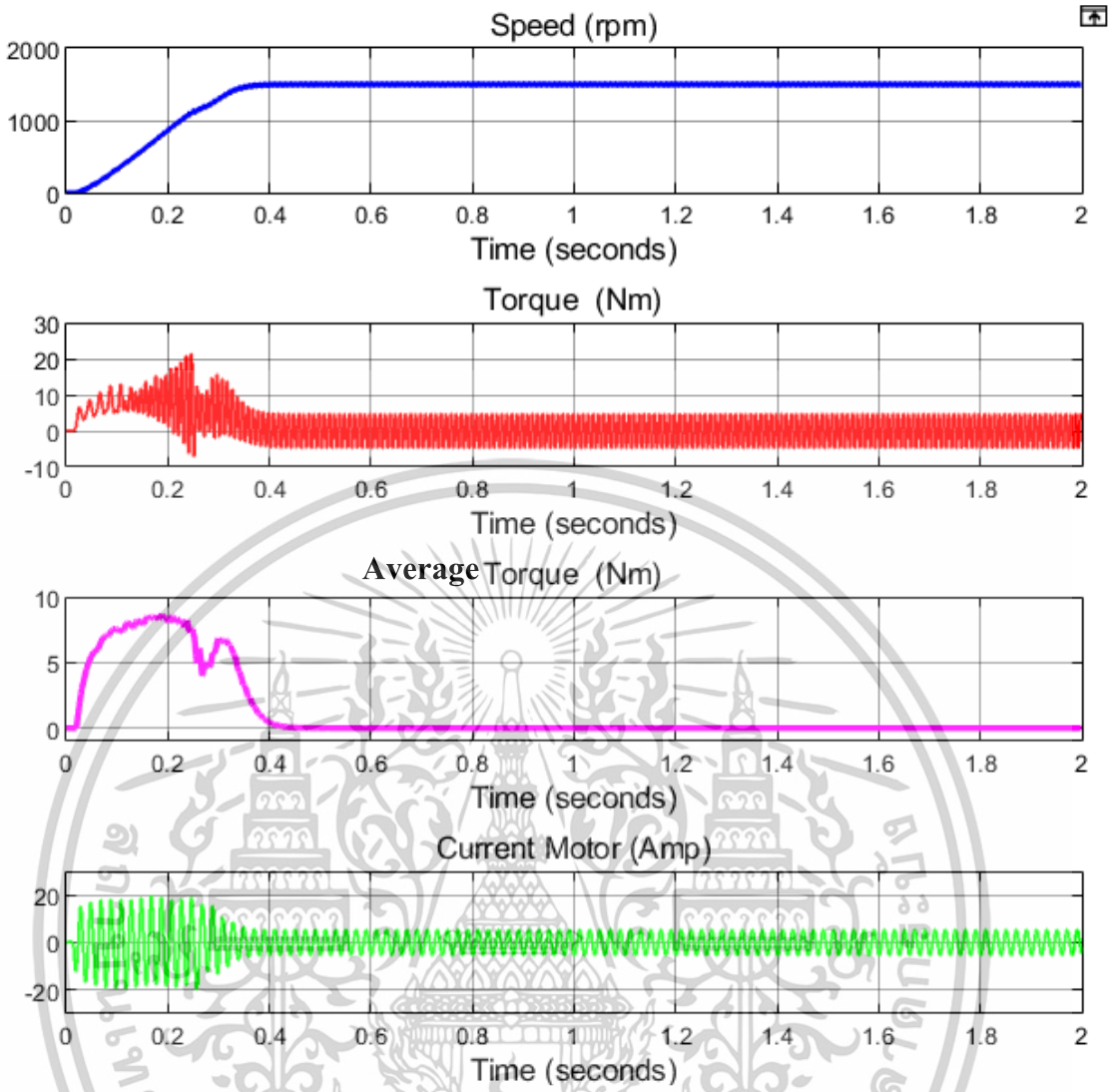
รูปที่ 3.41 สมรรถนะของมอเตอร์โดยการสตาร์ทแบบนิ่มนวล (PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS) ที่ค่าควบคุมกระแสพิกัด 200%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



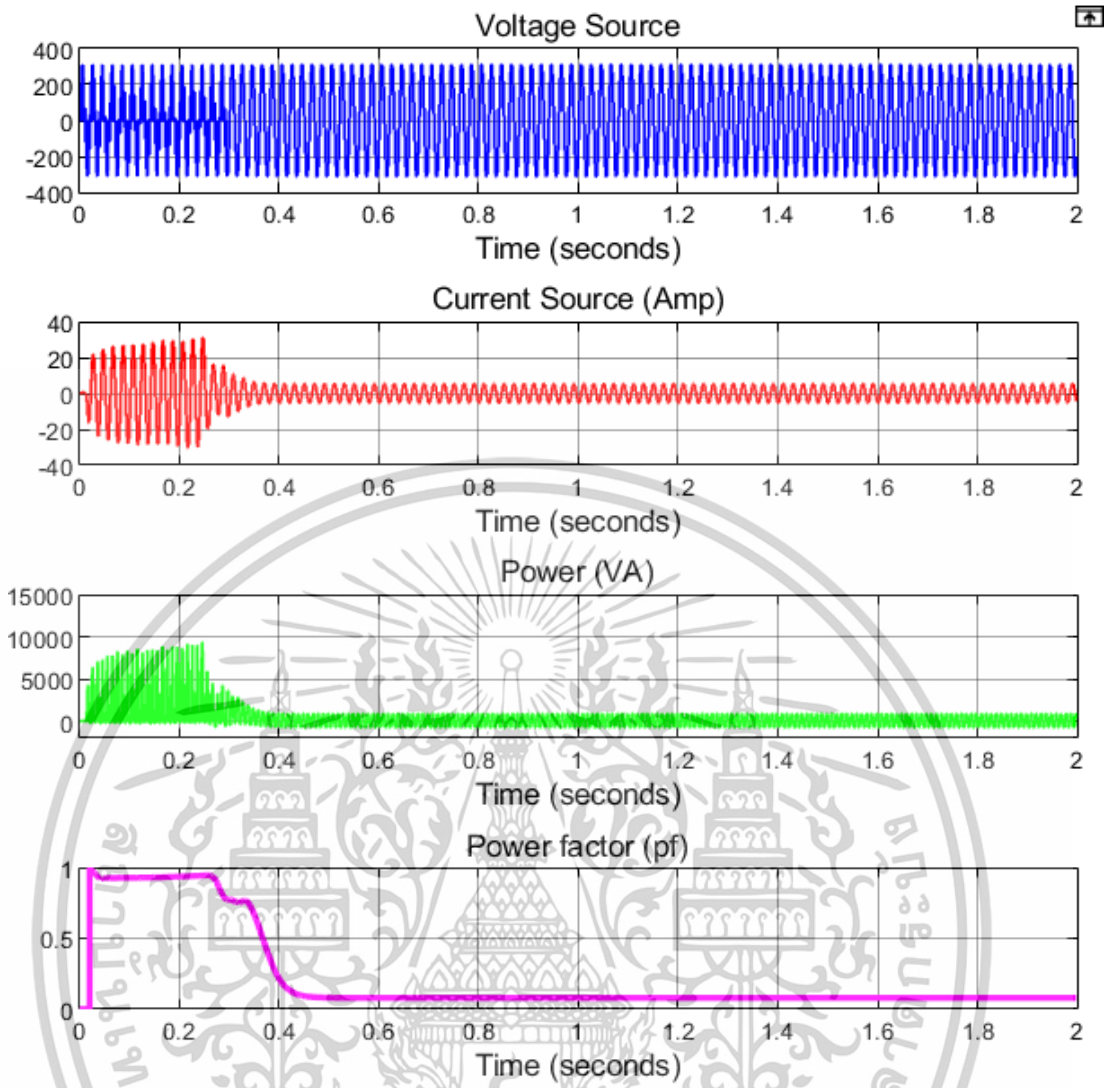
รูปที่ 3.42 สมรรถนะของมอเตอร์ ด้านกระแสที่เข้ามอเตอร์ กำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ และค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์โดยการสตาร์ทแบบนิ่มนวล (PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS) ที่ค่าควบคุมกระแสพิกัด 200%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.43 สมรรถนะของมอเตอร์โดยการสตาร์ทแบบนิ่มนวล (PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS) ที่ค่าควบคุมกระแสพิกัด 300%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.44 สมรรถนะของมอเตอร์ ด้านกระแสที่เข้ามอเตอร์ กำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ และค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์โดยการสตาร์ทแบบนิ่มนวล (PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS) ที่ค่าควบคุมกระแสพิกัด 300%

จากผลในรูปที่ 3.38, 3.40 จะพบว่าถ้าทำการลดแรงดันป้อนเข้ามอเตอร์จะทำให้กระแสในขณะสตาร์ทลดลงจาก 38 แอมป์ เหลือ 25 แอมป์ แต่เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวจะนานขึ้นมีค่าเท่ากับ 0.5 วินาที และ 1 วินาที ตามลำดับและผลที่ตามมาในขณะที่ทำการลดแรงดันป้อนเข้ามอเตอร์นั้น จะส่งผลทำให้การกระเพื่อมของแรงบิดขณะสตาร์ทลดลง ตัวประกอบกำลังสูงขึ้น ในขณะที่ความเร็วมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเข้าสู่สภาวะคงที่ 1,430 รอบต่อนาที, 1,429 รอบต่อนาที

จากหลักการดังกล่าวทำให้มีแนวคิดปรับปรุงวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ทที่ต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าหนึ่งเฟสที่เริ่มสตาร์ทแบบนิ่มนวลใช้งานในงานปรับปรุงสมรรนะของการขับเคลื่อนมอเตอร์ในงานวิจัยนี้ โดยทำการควบคุมแรงดันและพลังงานที่จ่ายไปยังมอเตอร์ได้โดยค่อยๆเพิ่มแรงดันตามการตั้งเวลา Ramp Up ด้วยการใช้วงจร (PWM AC Chopper

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Soft Starter : PWMSS) เพื่อทำให้เกิดการออกตัวอย่างนิ่มนวลความเร็วที่ค่อยๆเพิ่มขึ้นจะช่วยลดแรงฉุดหรือแรงกระชากในขณะออกตัว ซึ่งจะช่วยลดการสึกหรือของอุปกรณ์ต่างๆ เช่น โซ่ สายพาน เกียร์ หรือเฟืองทด และอุปกรณ์อื่นๆได้ นอกจากนั้นยังช่วยในเรื่องการลดกระแส (Current Limiting) ขณะสตาร์ท และจะทำการทดสอบด้วยการจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink Version R2024a

จากรูปที่ 3.35, 3.37, 3.39 จะแสดงให้เห็นสมรรถนะในช่วงเริ่มสตาร์ทโดยมีการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการสตาร์ท โดยทำการค่าตั้งต้นของ Duty Cycle ทำการปรับค่า Voltage-Ramp ดังรูปที่ 3.34 ซึ่งจะแสดงผลการตอบสนองทางไดนามิกส์ของความเร็วพบว่ารูปที่ 3.35 จะมีผลการตอบสนองที่เร็วกว่า รูปที่ 3.37 และรูปที่ 3.39 โดยกำหนดเงื่อนไขการสตาร์ทแบบนิ่มนวล PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS) ที่ค่าความชัน S=0.5 และที่ค่าความชัน S=1 ซึ่งจะเห็นว่าที่ค่าความชัน S=0.5 จะมี Maximum Average Torque ที่สูงกว่าค่าความชัน S=1 อย่างเห็นได้ชัดซึ่งจะเป็นผลให้กระแสขณะสตาร์ทสูงขึ้นด้วย แต่ทั้งนี้ในสองเงื่อนไขการสตาร์ทก็ยังมีกระแสขณะสตาร์ทที่ต่ำกว่าการสตาร์ทแบบต่อโดยตรงจากไลน์ (Direct on-line Starting :DOL) การกระเพื่อมของแรงบิดทั้งสองเงื่อนไขจะเกิดขึ้นเนื่องจากความไม่สมดุลของกระแสในขดลวด และในรูป 3.35 ก็ยังชี้ให้เห็นว่าการสตาร์ทแบบ DOL ใช้เวลาในการสตาร์ทที่สั้นกว่าแต่จะมีการแกว่งของความเร็วก่อนที่จะเข้าสู่สภาวะคงตัว

จากรูปที่ 3.36, 3.38, 3.40 จะแสดงให้เห็นว่าพลังงานที่เพิ่มขึ้นในช่วงสตาร์ทมอเตอร์จะปรากฏว่าการใช้วิธีการสตาร์ทแบบนิ่มนวล (PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS) จะให้การแกว่งของความเร็วที่น้อยกว่า และใช้พลังงานในการเริ่มสตาร์ทที่ต่ำกว่าการเริ่มสตาร์ทแบบต่อโดยตรงจากไลน์ (Direct on-line Starting :DOL) และได้นำเสนอเทคนิค Voltage-Ramp เพื่อปรับปรุงสมรรนะของการสตาร์ทมอเตอร์เพื่อให้เกิดความนิ่มนวลในขณะสตาร์ท และลดกระแสขณะสตาร์ทโดยการควบคุมแรงดันที่ป้อนเข้ามอเตอร์ด้วย PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS เพื่อป้องกันปัญหาที่เกิดขึ้นกับระบบแมกคานิกส์ซึ่งเกิดจากการแกว่งของความเร็วและประโยชน์ที่ได้รับจากการประยุกต์ใช้งานจะช่วยลดความเคลียดของระบบกลไกที่ไปขับโหลดและการเพื่อมของแรงบิดมอเตอร์มีอัตราเร่งอย่างราบเรียบในขณะสตาร์ท และยังใช้พลังงานในขณะทำการสตาร์ทน้อยกว่าการสตาร์ทแบบต่อโดยตรงจากไลน์ (Direct on-line Starting :DOL) ได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

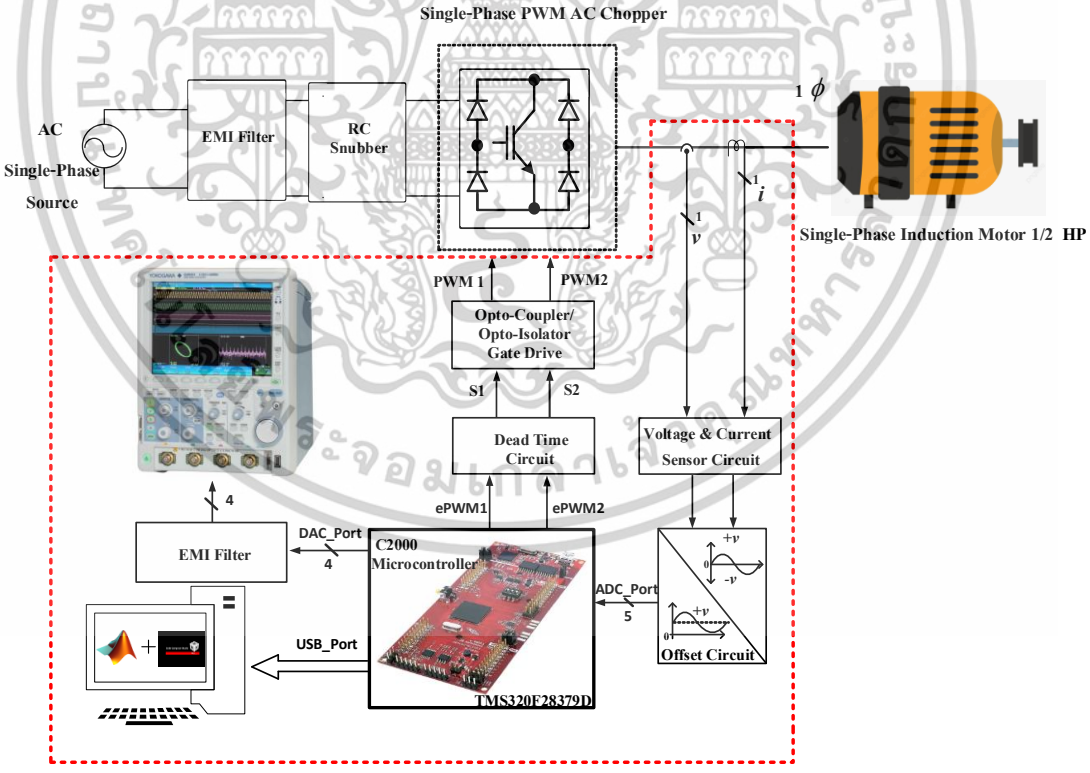
บทที่ 4
การออกแบบวงจรควบคุมและวงจรกำลังสำหรับการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยการควบคุมกระแสเริ่มต้นโดยใช้เทคนิคอะซิงโครนัสพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์

4.1 บทนำการออกแบบระบบวงจรควบคุมและวงจรกำลังสำหรับทดสอบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสร้างระบบสำหรับทดสอบจริงที่ใช้ในการทดสอบระบบควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลโดยวิธีการพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบอะซิงโครนัส Asynchronous PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ทโดยการใช้หลักการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลด้วยพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบอะซิงโครนัส (Asynchronous PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS) โดยตรงการออกแบบและสร้างขึ้นนี้ประกอบไปด้วยภาคจ่ายกำลังคือ วงจรสวิตช์ไอจีบีที (IGBT) แบบสวิตช์ 2 ทาง ยี่ห้อ G30N60B3D รุ่น HGTG30N60B3D ขนาด 60 แอมป์, 600 โวลต์ วงจรไดโอดเป็นสวิตช์สองทาง 8 ตัว แบบ Fast Recovery Diode ยี่ห้อ RURG5060 รุ่น RURG5060 ขนาด 50 แอมป์ 600 โวลต์ วงจรกรองสัญญาณ EMI Noise Filter ยี่ห้อ Delta Electronics ขนาด 10 แอมป์ ค่า L คือ 2X2 มิลลิเฮนรี ค่า R คือ 470 โอห์ม ค่า C คือ 2X0.47 ไมโครฟารัด ป้องกันสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าซึ่งจะนำมาต่อร่วมเข้ากับวงจรควบคุมและระบบป้องกันวงจร วงจรออปโตคัปเปลอร์ป้องกันการชนกันของไฟฟ้า Opto-Coupler/Opto-Isolator วงจรสนับเบอร์ RC Snubbers ใช้ค่าตัวต้านทานไวร์วาวด์หุ้มฮิทซิงค์ (Aluminium Housed Resistor) R คือ 50 วัตต์ 40 โอห์ม แบบ J และค่าตัวเก็บประจุแบบไมลา (Mylar capacitor) C คือ 474 K 630M สำหรับป้องกันวงจรจากไฟกระชาก วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 15 โวลต์ DC Switching Power Supply และภาคจ่ายควบคุม คือ วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดัน, วงจรตรวจจับสัญญาณกระแส, วงจรประวิงเวลาหรือ Dead Time และไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 Microcontroller รุ่น TMS320F28379D เพื่อป้อนสัญญาณการควบคุมให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดตัวเก็บประจุช่วยหรือแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ทในการเริ่มหมุน 50 ไมโครฟารัด ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น SC-KR ขนาด 1/2 แรงม้า หรือ 0.4 กิโลวัตต์ 230 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ 4.3 แอมป์ 4 ขั้ว และความเร็วรอบที่พิกัดที่ 1,430 รอบต่อนาที จากรูปที่ 4.1 จะเป็นการแสดงภาพรวมโครงสร้างของโครงสร้างพื้นฐานของระบบที่ใช้ในการทดสอบการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลโดยวิธีการพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบอะซิงโครนัส Asynchronous PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS โดยวงจรด้านขาเข้าจะต่อกับระบบไฟฟ้าจากการไฟฟ้าของไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสสลับ 1 เฟส มาผ่านวงจร EMI Noise Filter ป้องกันสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าซึ่งจะนำมาต่อร่วมเข้ากับวงจรควบคุมและระบบป้องกันวงจรจากนั้นนำไฟฟ้าผ่านวงจรสนับเบอร์ RC Snubbers สำหรับป้องกันวงจรจากไฟกระชากผ่านวงจรสวิตช์ไอจีบีที (IGBT) แบบสวิตช์ 2 ทางในวงจร PWM AC Chopper สัญญาณขับผ่านขาเกตทั้ง 2 ขา หรือ G1 และ G2 ของวงจรออปโตคัปเปลอร์ป้องกันการชนกันของไฟฟ้า Opto-Coupler/Opto-Isolator ด้วย TPL250 ผ่านวงจรวงจรประวิงเวลาหรือ Dead Time ที่ตั้งค่า 6 µs เพื่อป้อนสัญญาณการควบคุมให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดตัวเก็บประจุช่วยหรือแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ทในการเริ่มหมุน 50 ไมโครฟารัด ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น SC-KR ขนาด 1/2 แรงม้า หรือ 0.4 กิโลวัตต์ 230 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ 4.3 แอมป์ 4 ขั้ว และความเร็วรอบที่พิกัดที่ 1,430 รอบต่อนาที โดยกระบวนการทั้งหมดการกำหนดสัญญาณควบคุมโดยการเขียนวงจรควบคุมในโปรแกรม MATLAB/Simulink Version R2024a แล้วทำการกำเนิดโค้ดภาษาซี (C) หลังจากนั้นจึงใช้โปรแกรม (Code Composer Studio :CCS) Version 12.4.0 ในการคอมไพร์โค้ดภาษาซี (C) จะควบคุมโดยชุดประมวลผลไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล C2000 TMS320F28379D ตัวประมวลผลดังกล่าวจะมีการทำงานที่เชื่อมต่อกับระบบคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ตรวจสอบสภาวะการทำงานของบอร์ดที่ใช้ในการควบคุม โดยรายละเอียดของวงจรต่างๆ จะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

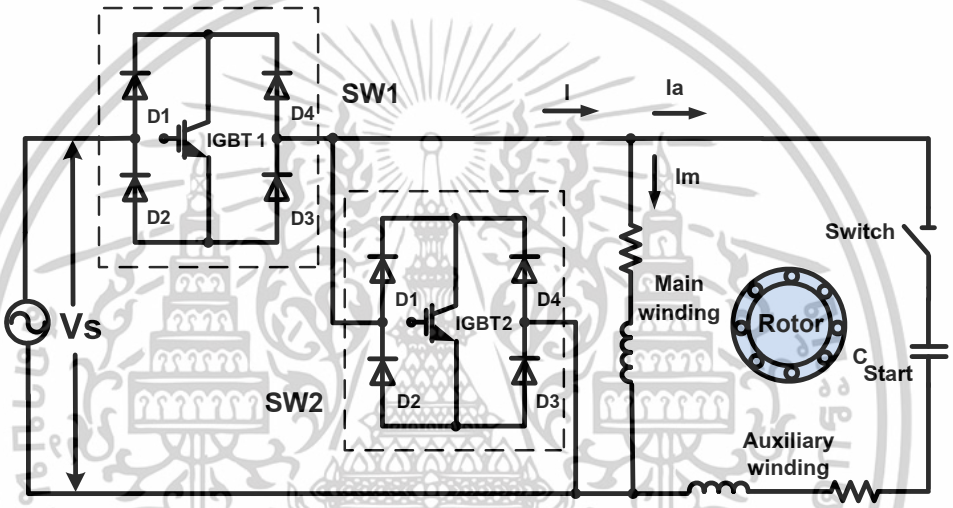


รูปที่ 4.1 ภาพรวมโครงสร้างพื้นฐานของระบบที่ใช้ในการทดสอบการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลโดยวิธีการพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ซ็อปเปอร์ แบบอะซิงโครนัส Asynchronous PWM AC Chopper Soft Starter: PWMSS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 วงจรสวิตช์ไอจีบีที (IGBT) แบบสวิตช์ 2 ทางในวงจร PWM AC Chopper [18]

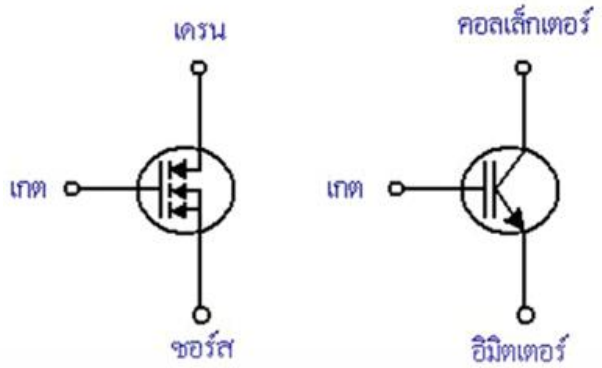
การสร้างชุดวงจรสวิตช์ไอจีบีที (IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor) ใช้เป็นสวิตช์ 2 ทางในวงจร PWM AC Chopper เพื่อใช้ในการควบคุมมอเตอร์หนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ท ซึ่งชุดดังกล่าวจะประกอบไปด้วยวงจรสวิตช์ไอจีบีที (IGBT) แบบสวิตช์ตัวที่ 1 และแบบสวิตช์ตัวที่ 2 จะมีไอจีบีที 2 ตัว คือ ยี่ห้อ G30N60B3D รุ่น HGTG30N60B3D ขนาด 60 แอมป์ 600 โวลต์ และวงจรไดโอดเป็นสวิตช์สองทาง 8 ตัว แบบ Fast Recovery Diode ยี่ห้อ RURG5060 รุ่น RURG5060 ขนาด 50 แอมป์ 600 โวลต์ ประกอบกันเป็นสวิตช์ 2 ทางทำงานสลับกันแบบ 6 โหมดการทำงานจะแสดงลักษณะการควบคุมไว้ในรูปที่ 4.2 และได้กล่าวในบทที่ 3 เรื่องการทำงานในแต่ละโหมดไว้แล้ว



รูปที่ 4.2 วงจรควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยไอจีบีทีที่เป็นสวิตช์

การทำงาน IGBT ค่อนข้างจะเป็นอุปกรณ์ที่ใหม่อยู่แต่พอจะมีใช้กันบ้างและมีจำหน่ายกันหลายเบอร์ด้วยกันจึงมีสัญลักษณ์อยู่หลายรูปแบบด้วยกันขึ้นอยู่กับผู้ผลิตว่าจะใช้สัญลักษณ์ใดเป็นสัญลักษณ์ประจำสินค้าที่ผลิตขึ้นส่วนมากจะมีอยู่ 2 แบบดังรูปที่ 4.3 ซึ่งเป็นสัญลักษณ์และชื่อเรียกขาต่างๆของ IGBT ชนิดเอ็นแชนเนลจากรูป (ก) จะเห็นว่ามีสัญลักษณ์คล้ายกับมอสเฟสมากเพียงแต่สัญลักษณ์จะมีลูกศรเพิ่มขึ้นมาตรงขาเดรนลักษณะของลูกศรจะชี้เข้าหาตัวหรือชี้เข้าหาชั้นของซิลิคอนภายในตัว IGBT (ข) จะเหมือนกับสัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์แต่ตรงขาเกตหรือขาเบสของทรานซิสเตอร์จะเพิ่มขีดขึ้นมาอีกหนึ่งขีดเพื่อให้เห็นว่าขีดที่เพิ่มมานั้นไม่ได้ต่อถึงกันโดยตรงกับขาที่ต่อออกมาภายนอก

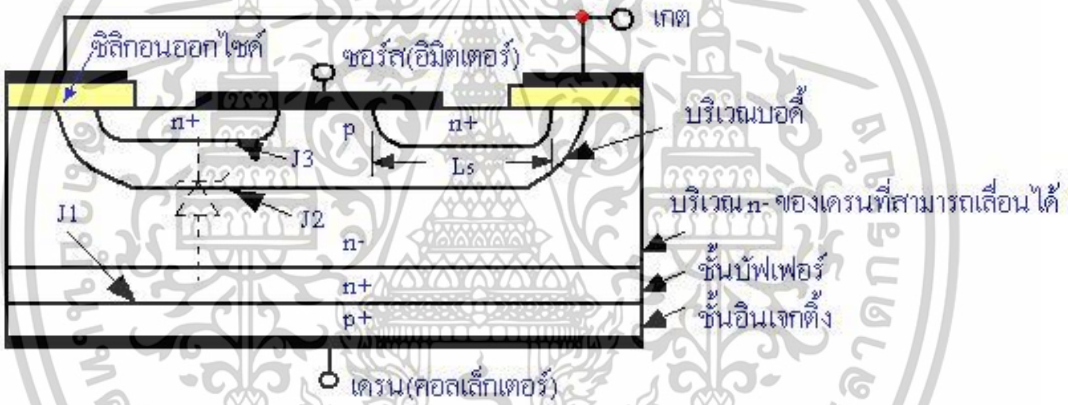
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) สัญลักษณ์ของ IGBT แบบมอสเฟส **(ข)** สัญลักษณ์ของ IGBT แบบทรานซิสเตอร์

รูปที่ 4.3 สัญลักษณ์ของ IGBT ทั้ง 2 แบบ

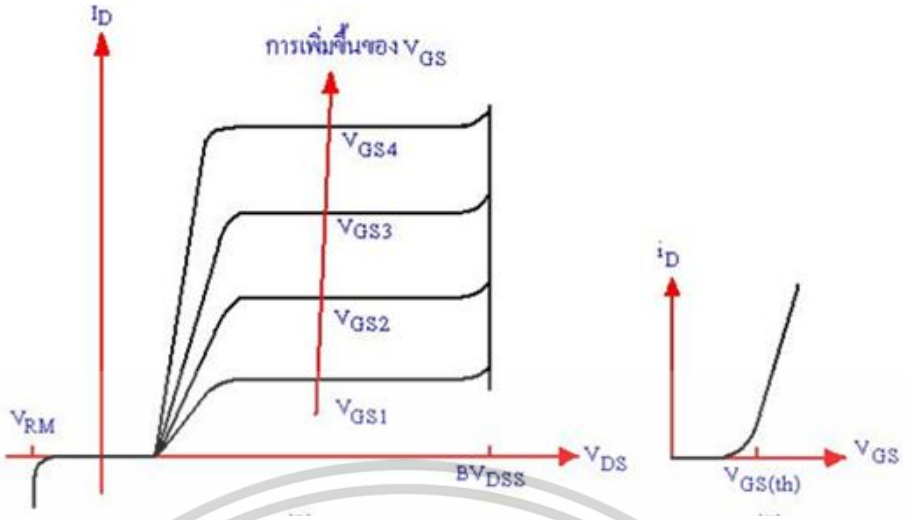
โครงสร้างของ IGBT ชนิดเอ็นแชนเนลแสดงเป็นภาพตัดขวางได้ดังรูป 4.4



รูปที่ 4.4 ภาพหน้าตัดโครงสร้างพื้นฐานของ IGBT

จากรูปที่ 4.5 กราฟแสดงให้เห็นว่าส่วนใหญ่ของเส้นกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงแต่จะเริ่มโค้งที่กระแสเดรนต่ำๆนั่นก็คือจุดที่แรงดันระหว่างขาเกตและขาซอร์สต่ำลงใกล้แรงดันจุดเริ่มเปลี่ยนสภาวะการทำงานจุด Threshold Voltage: VGS(th) โดยถ้าแรงดันระหว่างเกตและซอร์สนี้ต่ำกว่าแรงดันที่จุด VGS(th) แล้ว IGBT จะอยู่ในสภาวะหยุดนำกระแสหรือคัทออฟในกรณีของ IGBT ชนิดพีแชนเนลนั้นคุณสมบัติจะคล้ายกับเอ็นแชนเนลแต่โครงสร้างและสัญลักษณ์มีลักษณะตรงกันข้ามกับเอ็นแชนเนล (ก) กราฟแสดงคุณสมบัติระหว่างกระแสและแรงดันของ IGBT และ (ข) กราฟแสดงลักษณะสมบัติการถ่ายโอนของ IGBT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

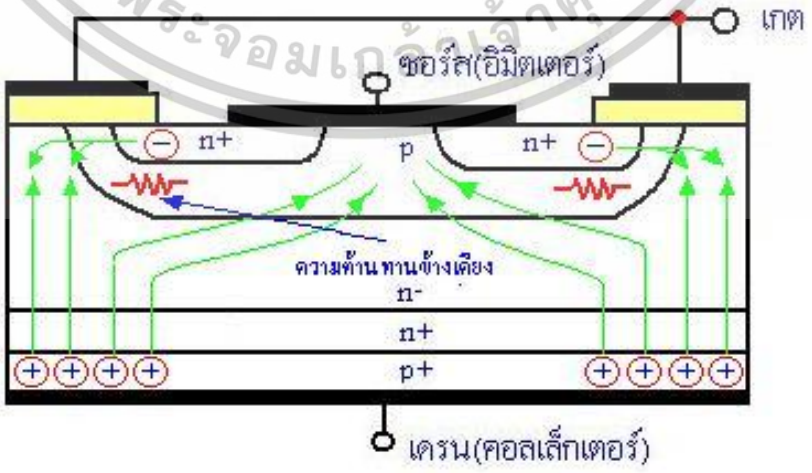


(ก) กราฟแสดงคุณสมบัติระหว่างกระแสและแรงดันของ IGBT **(ข)** กราฟการถ่ายโอนของ IGBT

รูปที่ 4.5 กราฟแสดงลักษณะคุณสมบัติ IGBT

4.2.1 สภาวะนำกระแส

กระแสอิเล็กตรอนที่ไหลจากขาซอร์สผ่านบริเวณใต้เกตมายังบริเวณรอยเลื่อน n- จะรวมกับโฮลที่เป็นพาหนะข้างน้อยที่ถูกฉีดมาจากชั้นอินเจ็กติ้ง p+ เพราะรอยต่อ J1 ได้รับแรงดันไบอัสตรงทำให้ IGBT อยู่ในสภาวะนำกระแสเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าจากเดรนไปซอร์สได้การรวมกันของโฮลและอิเล็กตรอนภายในบริเวณ n- เรียกว่าการมอดูเลตสภาพนำ (Conductivity Modulation) ผลการมอดูเลตนี้จะทำให้ความต้านทานของบริเวณ n- มีค่าต่ำลงเป็นการเพิ่มความสามารถในการขับผ่านกระแสได้สูงขึ้น ซึ่งมีลักษณะเหมือนเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ผลของความต้านทานที่ลดลงทำให้แรงดันตกคร่อมที่สภาวะนำกระแสลดต่ำลงด้วยการสูญเสียกำลังงานขณะนำกระแสจึงลดลงด้วยทิศทางการไหลของอิเล็กตรอนและโฮลแสดงดังรูป 4.6



รูปที่ 4.6 ทิศทางการไหลของอิเล็กตรอนและโฮลในขณะนำกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 สภาวะหยุดนำกระแส

การลดบริเวณความหนาของ n- ลงแต่ยังคงความสามารถของอัตราทนแรงดันตรงไว้สามารถทำได้โดยเพิ่มชั้นบัฟเฟอร์ n+ เข้าไปเพื่อป้องกันการแตะกันของบริเวณปลอดพาหะกับบริเวณอินเจ็กติ้ง p+ ซึ่งจะเรียก IGBT ชนิดนี้ว่า IGBT แบบไม่สมมาตรและจากการลดความหนาแน่นของบริเวณรอยเลื่อน n- จะช่วยส่งผลให้เกิดข้อดีสองประการคือ

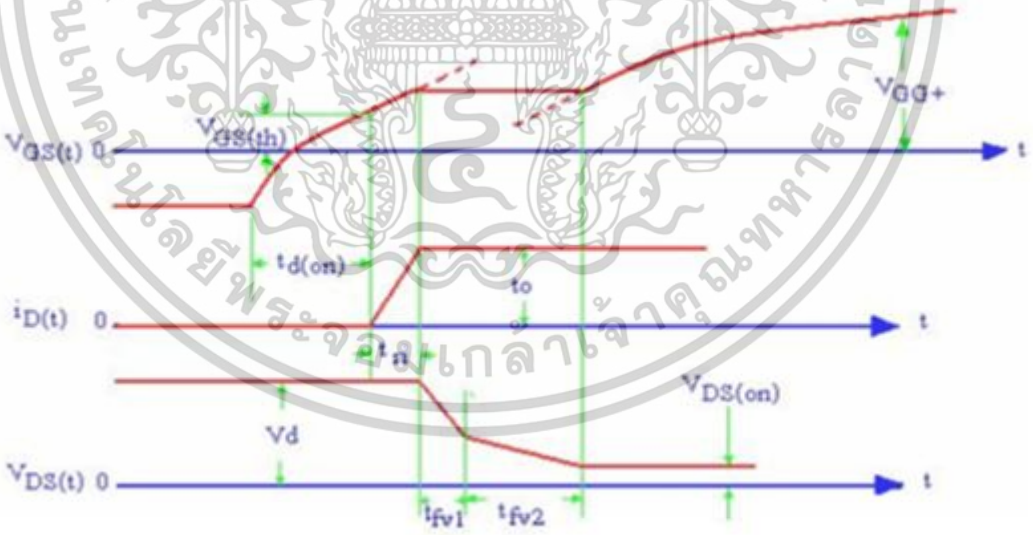
1. ทำให้แรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสต่ำลงเป็นผลให้การสูญเสียกำลังงานลดน้อยลงด้วย

2. ช่วยลดช่วงเวลาหยุดนำกระแสให้สั้นลงได้

แต่ข้อเสียของการเพิ่มชั้นบัฟเฟอร์ n+ ก็คือจะลดความสามารถของอัตราทนแรงดันย้อนกลับให้เหลือน้อยลงเพียงไม่กี่สิบโวลต์ ทั้งนี้เมื่อ IGBT ได้รับแรงดันไบอัสกลับที่ขาเดรนรอยต่อ J1 ซึ่งทั้งสองข้างมีความหนาแน่นในการโด๊ปของสารมากจะไม่สามารถทนแรงดันย้อนกลับได้สูง ดังนั้น IGBT ชนิดนี้ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

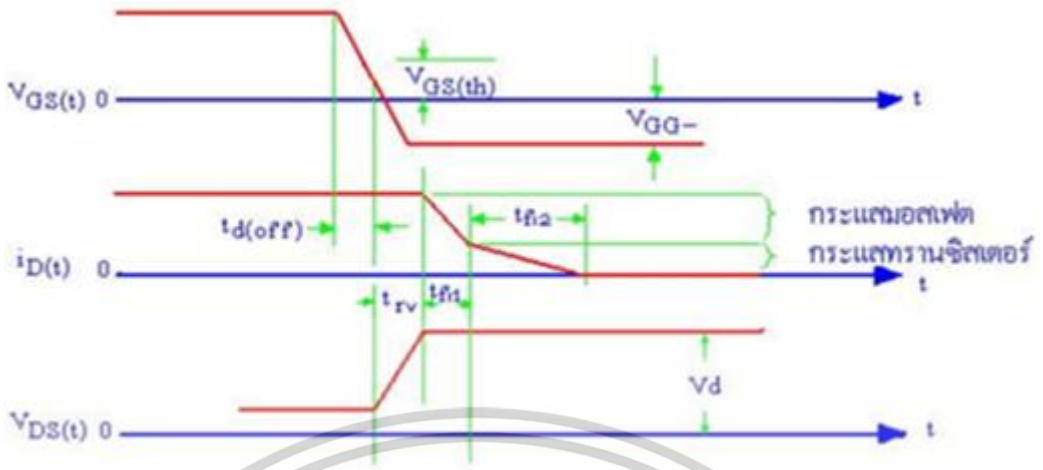
4.2.3 ลักษณะการสวิตช์

ลักษณะของสัญญาณกระแสและแรงดันในช่วงเวลาที่เกิดการนำกระแสและหยุดนำกระแส แสดงไว้ในรูปที่ 4.7 (ก) ลักษณะของกระแสและแรงดันขณะนำกระแสและ (ข) ลักษณะของกระแสและแรงดันขณะหยุดนำกระแส



(ก) ลักษณะของกระแสและแรงดันขณะนำกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) ลักษณะของกระแสและแรงดันขณะหยุดนำกระแส

รูปที่ 4.7 ลักษณะของกระแสและแรงดันขณะนำกระแสและขณะหยุดนำกระแส

ในรูปที่ 4.7 (ก) โดยช่วงเวลาในการนำกระแสของ IGBT มีลักษณะการนำกระแสคล้ายกับการนำกระแสของมอสเฟตคือจะมีเวลาก่อนการนำกระแส td(on) นับตั้งแต่เวลาที่แรงดันระหว่างเกตกับซอร์สอยู่ในช่วง VGG- จนถึง VGS(th) ความจริงแล้วการป้อนแรงดันนี้จะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดจากค่า VGG- เป็น VGG+ แต่มีลักษณะเป็นเอ็กซ์โปเนนเชียลเหตุที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากผลการชาร์จประจุของตัวเก็บประจุระหว่างเกตกับซอร์สและเกตกับเดรนภายใน IGBT แรงดันที่ขาเดรนจะยังคงที่ในช่วงเวลาขาขึ้น(tri)หรือในช่วงเวลาที่กระแสเดรนยังไม่ถึงค่ากระแสทำงาน (Io) หลังจากนั้นกระแสเดรนก็จะคงที่แต่แรงดันจะจะตกลงสู่ค่า VSD(on) โดยแบ่งช่วงเวลาลงเป็นสองช่วง คือช่วง tfv1 เป็นช่วงที่ทำงานอยู่ในย่านความต้านทานสูง (Rchannel) ส่วน tfv2 ช่วงที่ทำงานอยู่ในช่วงความต้านทานต่ำ (Rchannel) และในรูปที่ 4.7 (ข) เป็นรูปแสดงลักษณะกระแสและแรงดันในช่วงเวลาที่ IGBT หยุดนำกระแส จะเห็นได้ว่ากระแสเดรนยังคงที่อยู่ตลอดช่วงเวลาที่แรงดันขาเดรนเพิ่มขึ้น และมีช่วงเวลาลงของกระแสเดรนที่แตกต่างชัดเจนสองช่วงโดยช่วงแรก tfi1 จะเป็นช่วงหยุดนำกระแสของมอสเฟตภายใน IGBT และช่วง tfi2 จะเป็นช่วงหยุดนำกระแสของทรานซิสเตอร์พีเอ็นพี ซึ่งจะช้ากว่ามอสเฟตทำให้ช่วงเวลานี้นานกว่าช่วงแรกและมีการสูญเสียกำลังงานมากในช่วงนี้

4.3 วงจรขับเกตสวิตช์กำลังไอจีบีที [23]

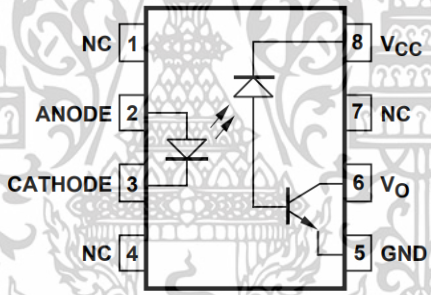
การควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลังแบบไอจีบีทีสวิตช์ 2 ทางจำเป็นต้องมีวงจรแยกกราวนด์ (Isolate) ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานจำนวน 2 ตัว เพื่อแยกกราวนด์ระหว่างสวิตช์กำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบไอจีบีทีสวิตช์ 2 ทางกับชุดประมวลผลไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 Microcontroller รุ่น TMS320F28379D ในการออกแบบวงจรแยกกราวนด์สัญญาณขับเกต ทางผู้วิจัยได้เลือกไอซีแบบแยกสัญญาณความถี่สูงหรือไอซี Optocoupler – Isolator ที่มีหลักการทำงานโดยอาศัยหลักการส่งสัญญาณผ่านการเปล่งแสงและรับแสงของตัวหลอดแอลอีดี โดยสัญญาณจะถูกส่งผ่านตัวรับแสงที่อยู่อีกด้านของไอซี จึงทำให้ไอซีชนิดนี้สามารถส่งสัญญาณโดยแยกลูปวงจรควบคุมตามเป้าหมายที่ต้องการออกแบบไว้ โดยได้เลือกใช้งานไอซีเบอร์ TLP250 ซึ่งสามารถศึกษาการทำงานได้จากตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สถานะการทำงานลอจิกและมีสัญญาณเอาต์พุตไอซีเบอร์ TLP250

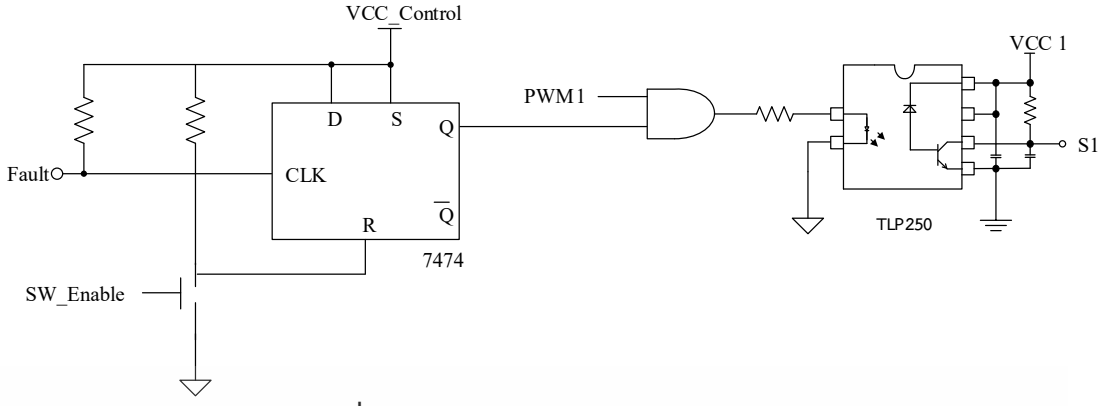
ระดับลอจิก	แรงดันที่ขาเกต (V)
ON	LOW
OFF	HIGH



รูปที่ 4.8 โครงสร้างภายในของไอซี Optocoupler – Isolator เบอร์ TLP250

และเพื่อรับรองฟังก์ชันการตรวจจับสัญญาณฟอลต์จากตัวโมดูล ทางผู้วิจัยยังได้เลือกใช้ไอซีเบอร์ TLP250 ที่ได้กล่าวมาข้างต้นมาใช้ โดยนำข้อดีจากการที่สามารถทำงานได้ที่ความถี่สูงและมีความไวต่อการรับส่งสัญญาณ หากมีการตรวจจับสัญญาณฟอลต์เจอ สัญญาณจะถูกส่งไปยังไอซีฟลิปฟล็อปเบอร์ 7474 เพื่อทำการหยุดจ่ายสัญญาณพัลส์ให้กับวงจรแยกกราวนด์ขับสัญญาณ โดยหลักการคือการนำสัญญาณ Enable มาเข้าไอซี AND กับสัญญาณพัลส์ จากนั้นจึงป้อนให้กับไอซี TLP250 ที่ทำงานในส่วนขับเกตสัญญาณ โดยการออกแบบวงจรทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นแสดงในรูปที่ 4.9 ด้านล่าง

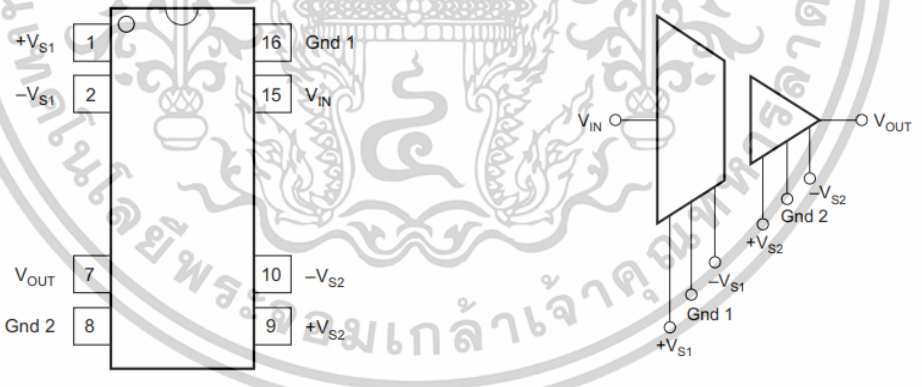
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 วงจรแยกกราวนด์สัญญาณขับเกต

4.4 ส่วนวงจรควบคุม [23]

วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าด้านวงจรกำลังมีขนาดที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดพิกัดแรงดันด้านภาคควบคุมที่ใช้เพียง 3.0 โวลต์ เพื่อความปลอดภัยของระบบควบคุมเมื่อเกิดการลัดวงจรของภาคกำลัง จึงออกแบบให้ทั้ง 2 ส่วนนี้ แยกลูปวงจรแยกออกจากกัน จึงออกแบบใช้ Power Transducer Isolator Amplifier (ISO124-NP) ซึ่งเป็นไอซีที่สามารถส่งสัญญาณทางด้านเอาต์พุตมีขนาดเท่ากันกับอินพุต โดยที่ด้านอินพุตและเอาต์พุตมีแยกออกจากกันโดยอิสระแต่ก็มีขอบเขตของสัญญาณจำกัดสูงสุดที่ระดับแรงดันไฟเลี้ยงของไอซี โดยลักษณะตัวถังและโครงสร้างภายในแสดงได้ดังรูปที่ 4.10



(ก) ตัวถังไอซี (ข) โครงสร้างภายในของ ISO124-NP

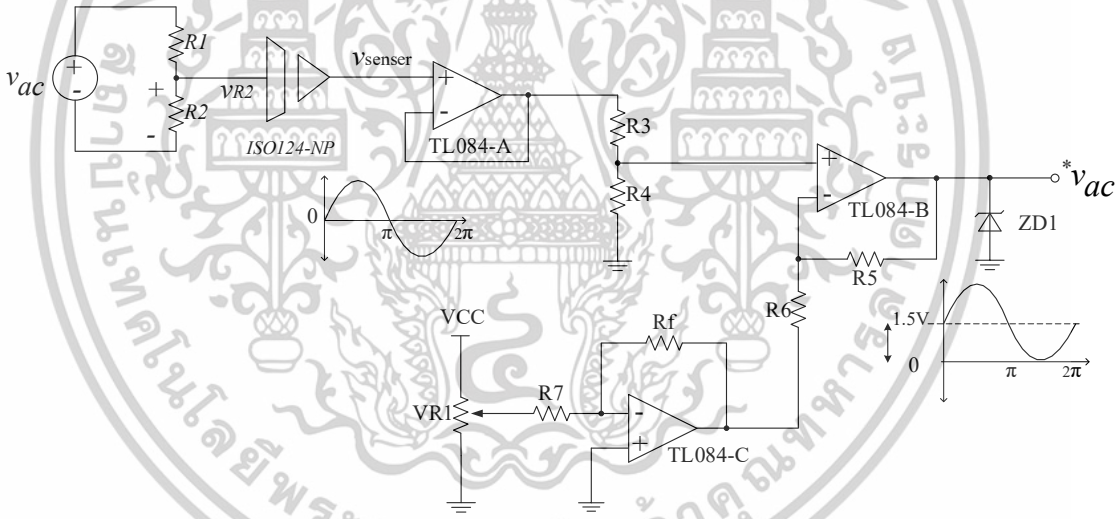
รูปที่ 4.10 Power Transducer Isolator Amplifier (ISO124-NP)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1 การออกแบบวงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับได้ออกแบบใช้ Power Transducer Isolator amplifier (ISO124-NP) เช่นเดียวกับวงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟตรงเนื่องจากมีสมบัติการแยกกราวนด์สัญญาณออกจากกราวนด์ในวงจรกำลังเพื่อป้องกันวงจรควบคุมไม่ให้เกิดความเสียหายเมื่อเกิดการลัดวงจรในวงจรกำลัง

เนื่องจากสัญญาณเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ มีสัญญาณที่เป็นซีกบวกและลบโดยพิกัดของขนาดแรงดันที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้มีพิกัดประมาณ 220 Vrms ซึ่งเป็นสัญญาณที่ไม่สามารถป้อนให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ได้โดยตรงจึงทำการออกแบบวงจรแบ่งแรงดันให้มีขนาด 3.0 โวลต์ พร้อมกับออกแบบวงจรยกระดับสัญญาณที่สามารถปรับขนาดได้ โดยมีแนวคิดคือทำการปรับระดับตำแหน่งจุดตัดศูนย์ของสัญญาณให้สูงขึ้นที่ 1.5 โวลต์ จะส่งผลให้สัญญาณในซีกลบมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่ง 0 โวลต์ สามารถพิจารณาวงจรใช้งานและสัญญาณที่ออกจากวงจรดังกล่าวได้ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ทางผู้วิจัยขอยกตัวอย่างสัญญาณที่ใช้เป็นอินพุตให้กับวงจรเป็นสัญญาณไซน์อ้างอิงเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณา



รูปที่ 4.11 วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

วงจรปรับขนาดและวงจรยกระดับอ้างอิงศูนย์สัญญาณไซน์ได้ออกแบบระดับสัญญาณรูปคลื่นไซน์ให้สูงขึ้นจากเส้นอ้างอิงศูนย์ขึ้นมา 1.5 โวลต์ ปรับขนาดสัญญาณในย่านที่เหมาะสมสำหรับป้อนให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยมีสัญญาณเป็นไฟตรงที่มีลักษณะเป็นคลื่นไซน์ จำกัดขนาดของสัญญาณไม่ให้เกิน 3.1 โวลต์ ด้วยซีเนอร์ไดโอด สามารถสมการแสดงการหาค่าความไวของการตรวจจับสัญญาณและเขียนวงจรการปรับขนาดและยกระดับสัญญาณแรงดัน ได้ดังสมการที่ (4.1) และ (4.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_o = \frac{V_g R_1}{R_1 + R_2} \times \left(\frac{R_5}{R_6} \right) + 1.5V \quad (4.1)$$

$$Gain = \frac{V_o}{V_s} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \times \left(\frac{R_5}{R_6} \right) \quad (4.2)$$

4.4.2 การออกแบบวงจรตรวจจับสัญญาณกระแสไฟฟ้าสลับ

วงจรตรวจจับสัญญาณกระแสไฟฟ้าสลับใช้ตัวตรวจจับสัญญาณแบบ Current Transducer (LEM LA25-NP) ซึ่งใช้หลักการตรวจจับสัญญาณกระแสด้วยปรากฏการณ์ Hall Effect ในการรับสัญญาณกระแสโดยมีอัตราส่วนของกระแสขาออกต่อขาเข้าคือ 1:1000 ในการออกแบบนั้นมีวงจรสำหรับปรับขนาดสัญญาณ และวงจรยกระดับสัญญาณให้อยู่ในย่านที่เหมาะสมแล้วส่งผ่านเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์เช่นเดียวกับวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อให้สัญญาณกระแสกระแสไฟฟ้าสลับที่มีทั้งซีกบวกและซีกลบให้เป็นสัญญาณไฟตรงที่มีรูปคลื่นแบบสัญญาณไซน์ โดยสามารถเขียนสมการแสดงการหาค่าความไวของการตรวจจับสัญญาณได้ดังสมการที่ (4.3) และ (4.4) พร้อมทั้งแสดงวงจรการปรับขนาดและยกระดับสัญญาณกระแสที่ได้ออกแบบใช้งานได้ดังรูปที่ 4.12

อัตราขยายสัญญาณด้านเอาต์พุต

$$V_o = \frac{-I_p R_{sense} R_2}{1000 \times R_1} + 1.5V \quad (4.3)$$

ค่าความไวตรวจจับสัญญาณ

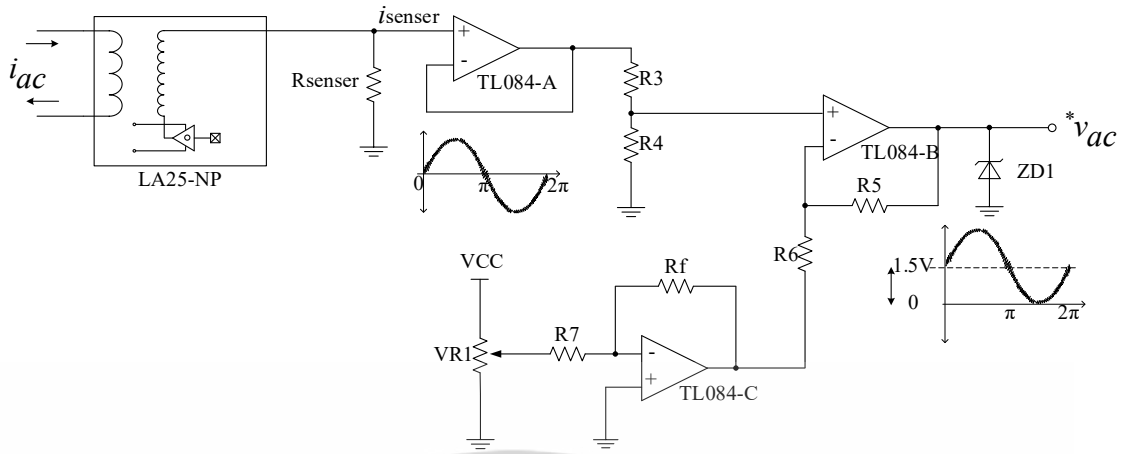
$$Sensitivity = \frac{V_o}{I_p} = \frac{R_{sense} R_2}{1000 \times R_1} \quad Volt / Amp \quad (4.4)$$

เมื่อ

i_P คือ สัญญาณกระแสเอาต์พุตของ LA25-NP

R_{sense} คือ ตัวต้านทานสร้างแรงดันของสัญญาณกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 วงจรตรวจจับสัญญาณกระแสไฟฟ้าสลับ

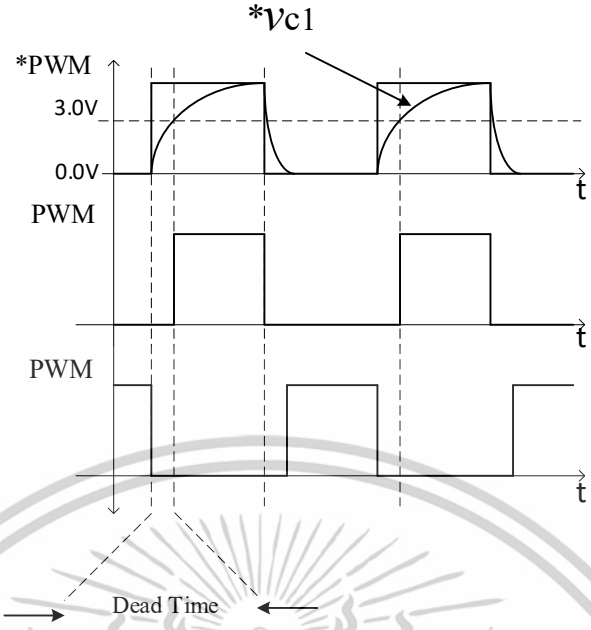
4.4.3 วงจรประวิงเวลา

การประวิงเวลาคือหน่วงเวลาการสวิตช์ระหว่างกิ่งบนและกิ่งล่างเพื่อไม่ให้เกิดการสวิตช์พร้อมกันแบบทันทีทันใดสามารถป้องกันการลัดวงจรในระหว่างการทำงานได้ หลักการพื้นฐานที่ออกกแบบแนวคิดมาจากวงจร RC Resonance โดยใช้หลักการชาร์จประจุต่อคาบเวลาของตัวเก็บประจุที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดมาเปรียบเทียบกับระดับสัญญาณลอจิกของ NOT Gate ที่จะมีสถานะเอาต์พุตเป็น 1 เมื่อระดับสัญญาณมากกว่า 3.0 โวลต์การคำนวณหาค่าแรงดันเก็บประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุสามารถหาได้จากสมการที่ (4.5)

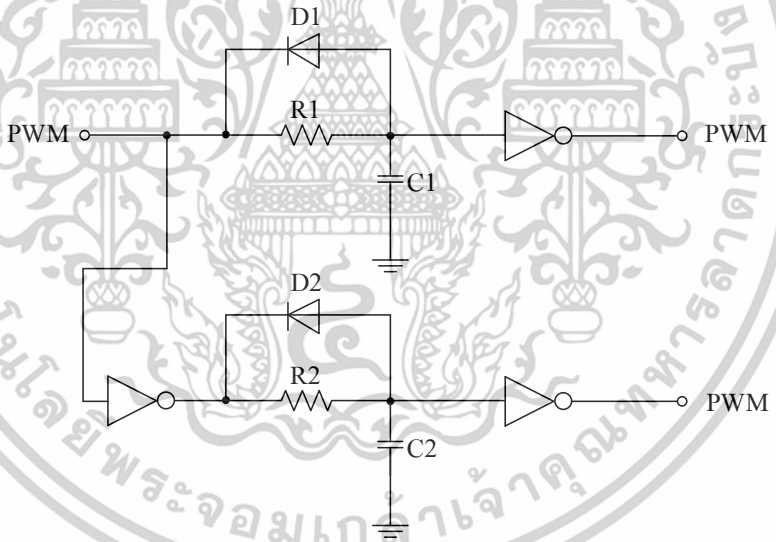
$$V_{Low} = 5 \times e^{\frac{t}{RC}} \tag{4.5}$$

โดยที่ V_{Low} จะเป็นค่าแรงดันของสถานะลอจิก 0 จากการคายประจุของค่าตัวเก็บประจุเพื่อนำมาป้อนเข้าสู่ลอจิก NOT Gate ของไอซี 7404 เมื่อนำมาออกแบบสร้างวงจรจะได้ดังรูปที่ 4.13 (ก) แสดงหลักการทำงานและวงจรประวิงเวลาที่ได้ออกแบบไว้ในรูปที่ 4.13 (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) หลักการทำงานของวงจรประวิงเวลา



(ข) วงจรประวิงเวลาที่ออกแบบ

รูปที่ 4.13 วงจรประวิงเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.4 การแปลงค่าอนาล็อกเป็นดิจิตอล (Analog to Digital Converter)

สัญญาณจากการตรวจจับค่าแรงดันและกระแสจากวงจรออปแอมป์ที่ออกแบบในหัวข้อที่ 4.4.1 – 4.4.2 เอาต์พุตของสัญญาณจะมีขนาดแรงดันอยู่ในระดับช่วง 0.0 โวลต์ - 3.0 โวลต์ ซึ่งเป็นขนาดแรงดันอนาล็อกสูงสุดที่ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถรับได้

สัญญาณอนาล็อกที่ป้อนให้กับ Analog Modules (ADCs) ค่าดิจิตอลที่แปลงค่ามาจากอนาล็อกจะมีค่าสูงสุดขึ้นอยู่กับจำนวนความละเอียดของฟังก์ชันรับค่าที่เป็นสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์แต่ละตัว ซึ่งจะมีข้อมูลค่าดิจิตอลสูงสุดเป็นค่ากำลังสองของจำนวนบิตของฟังก์ชันอนาล็อกสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในการวิทยานิพนธ์นี้มีความละเอียดที่ 12 บิต จะมีค่าเท่ากับ

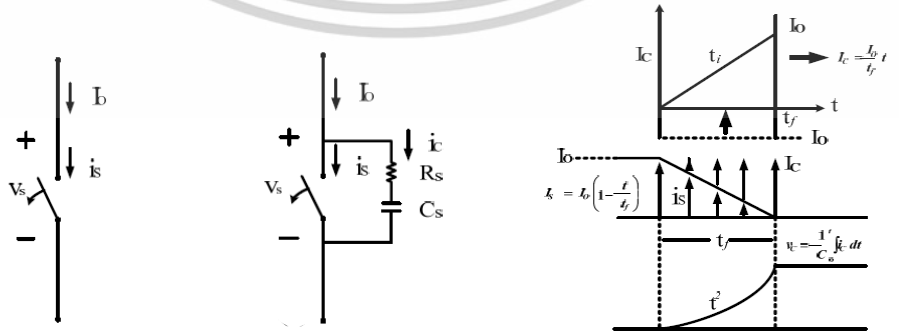
$$DigitalValue = 2^{12bit} = 4095_{oct} \quad (4.6)$$

การแปลงค่าอนาล็อกเป็นดิจิตอลเพื่อเป็นการเปลี่ยนรูปแบบการคำนวณจากขนาดสัญญาณที่มีความต่อเนื่องมาเป็นขนาดลำดับตัวเลขในระบบฐานสิบ เพื่อให้รองรับการประมวลที่เป็นแบบดิจิตอลโดยการนำไปประมวลผลในระบบที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งเป็นขนาดจริงทางระบบไฟฟ้าและขนาดเวกเตอร์หรือทิศทางของสัญญาณที่กล่าวมาทั้งหมดเราจำต้องแปลงค่าสัญญาณดิจิตอลมาเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าที่มีขนาดและทิศทางเท่ากับสัญญาณจริงที่ได้ออกไว้

ซึ่งการแปลงค่าดิจิตอลมาเป็นขนาดและทิศทางจริงของระบบไฟฟ้าขึ้นอยู่กับลักษณะการออกแบบค่าอัตราส่วนขยายและลดทอนของวงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันและกระแสในหัวข้อที่ 4.4.1 – 4.4.2

4.5 วงจรสนับเบอร์

การคำนวณหาค่าคาปาซิแตนซ์ของวงจรสนับเบอร์



(ก) การไหลของกระแส Io **(ข)** การไหลของกระแส Is **(ค)** การไหลของกระแส Ic

รูปที่ 4.14 รูปการแบ่งกระแส Io เป็น Is และ Ic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

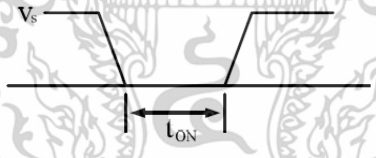
จากรูปที่ 4.14 (ก) จะเห็นได้ว่ากระแสมีทิศทางการไหลทางเดียวตลอดเมื่อสวิตช์ทำงานในลักษณะตัดต่อวงจรจะทำให้กระแสเกิดการหยุดไหลในทันทีทันใด จึงทำให้เกิดแรงดันสไปค์จากการที่กระแสเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดอันเป็นผลมาจากค่า L ในแหล่งจ่าย ดังนั้นจึงต้องสร้างเส้นทางการไหลใหม่ให้กับกระแสโดยดังใน รูปที่ 4.14 (ข) เมื่อสวิตช์จากออกแล้วกระแส (Io) ก็ยังไหลไปในทิศทางเดิมแล้วค่อยๆลดลง ดังในรูปที่ 4.14 (ค) จะเห็นได้ว่ามีทางให้กระแสไหลได้สองทางโดยการใส่วงจร RsCs สนับเบอร์เพิ่มเข้าไปในวงจร จากนั้นจึงต้องหาค่าของ RsCs สนับเบอร์ที่ใส่เข้าไป โดยเริ่มจากการคำนวณหาที่มาของสมการหาค่า Cs ของสนับเบอร์ จากลักษณะการ แบ่งกระการแบ่งกระแส Io เป็น Is และ Ic จากรูปที่ 4.14 (ค) เมื่อแรงดันที่ตกคร่อม Cs มีค่าเท่ากับแรงดันแหล่งจ่าย กระแสที่ไหลผ่าน Cs จะหยุดไหลดังนั้น *Vc* เท่ากับ *Vs* จะได้ดังในสมการที่ (4.7)

$$v_S = \frac{1}{Cs}\int_0^{tf} iC\,dt \tag{4.7}$$

$$v_S = \frac{1}{Cs}\int_0^{tf} Io\frac{t}{tf}dt \quad \text{จาก} \quad v_S = \frac{Io}{tf}t \tag{4.8}$$

จะได้สมการ c_S ดังนี้ $$c_S = \frac{Iotf}{2vf}t \tag{4.9}$$

การคำนวณหาค่าความต้านทานของวงจรสนับเบอร์ในรูปที่ 4.15 ช่วงเวลาที่สวิตช์นำกระแส (ton) จะต้องมากพอที่จะให้ตัวเก็บประจุ (C) สนับเบอร์คายประจุได้หมดก่อนที่สวิตช์จะหยุดนำกระแสในครึ่งต่อไปซึ่งโดยทั่วไปแล้วเวลาที่ใช้ในการคายประจุจะมีค่าประมาณ 5 τ



รูปที่ 4.15 ช่วงเวลาที่สวิตช์ต่อวงจร

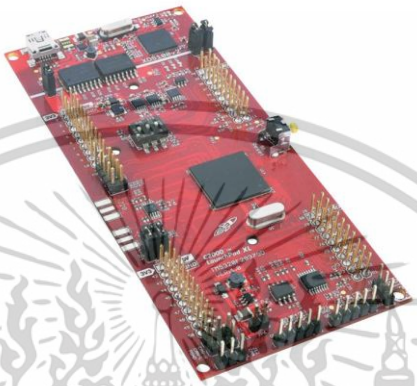
หาค่า Rs ได้จากสมการ $$R_S = \frac{Vd}{0.2*Io}t \tag{4.10}$$

สามารถวิเคราะห์และคำนวณวงจร RC สนับเบอร์ที่ใช้ในวงจรเอซีช็อปเปอร์เพื่อลดทอนแรงดันสไปค์ที่เกิดจากการ ON-OFF ของอุปกรณ์สวิตช์ผ่านอินดักแตนซ์ Ls ของแหล่งจ่ายทำให้วงจรสามารถทำงานได้เป็นปกติโดยไม่เกิดความเสียหายจากแรงดันสไปค์ดังกล่าว ในวงจรเอซีช็อปเปอร์ที่มีการออกแบบ LC ฟิลเตอร์ที่ดีจะต้องสามารถกำจัดฮาร์มอนิกส์ลำดับต่ำสุดได้ถึงลำดับที่ 39 สำหรับระดับความถี่สวิตชิ่งเท่ากับ 2kHz ซึ่งในกรณีนี้ LC ฟิลเตอร์จะมีขนาดเล็กและสามารถปล่อยผ่านแรงดันความถี่ 50Hz ออกเอาต์พุตได้เกือบทั้งหมดในขณะเดียวกันก็สามารถดักจับแรงดันความถี่ 2kHz ไม่ให้ออกเอาต์พุตได้เกือบทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28379D

กระบวนการทำงานของระบบส่งจ่ายกระแสไฟฟ้าคืนสู่ระบบโครงข่ายมีส่วนควบคุมการทำงานที่สำคัญคือไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อให้ระบบที่ได้ออกแบบไว้มีการทำงานที่ถูกต้องและสอดคล้องสัมพันธ์กันระหว่างการทดสอบจริงและการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ การใช้ช่วงเวลาชักค่า (Sample Time) จำเป็นต้องคำนวณให้มีความสอดคล้องต่อความสามารถของไมโครคอนโทรลเลอร์และใช้ช่วงเวลาที่เท่ากันกับการจำลองในระบบคอมพิวเตอร์อีกด้วย



รูปที่ 4.16 ไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ C2000 Launch Pad เบอร์ TMS320F28379D

ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ C2000 Launch-Pad เบอร์ TMS320F28379D มีการใช้ชุดคำสั่งแบบ Embedded Composer แปลงชุดคำสั่งการทำงานจากระบบการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK มีคุณสมบัติการใช้งานและสมรรถนะการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังนี้

1. ไมโครคอนโทรลเลอร์ใช้ซีพียูด้วยเทคโนโลยีตระกูลซีมอส (CMOS)
    - ความถี่ในการประมวลผลเท่ากับ 200 MHz (ความเร็วรอบประมวลผล 5 นาโนวินาที)
    - แรงดันซีพียู 1.9 โวลต์/1.8 โวลต์ และแรงดันพอร์ตอินพุตและเอาต์พุตเท่ากับ 3.3 โวลต์
2. ซีพียูประสิทธิภาพสูง ขนาด 32 บิต (TMS320F28xxx)
    - มาตรฐาน IEEE-754 Single-Precision Floating-Point Unit (FPU)
    - Trigonometric Math Unit (TMU)
    - Viterbi/Complex Math Unit (VCU-II)
    - Unified Memory Programming Model
    - Code-Efficient (in C/C++ and Assembly)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. On-Ship Memory
    - 512KB (256KW) or 1MB (512KW) of Flash (ECC-Protected)
    - 132KB (66KW) or 164KB (82KW) of RAM
    - Dual-Zone Security Supporting Third-Party Development
    - Unique Identification Number

4. Clock and System Control
    - Two Internal Zero-Pin 10MHz Oscilloscope
    - On-Chip Crystal Oscillator
    - Windowed Watchdog Timer Module
    - Missing Clock Detection Circuitry
5. Analog Subsystem
    - Up to Four Analog to Digital Converters (ADCs)
    - 16-bit Mode
    - 1.1 MSPS Each (Up to 4.4-MSPS system Throughput)
    - Single-Ended Input
    - Up to 24 External Channels
    - Single Sample and Hold (S/H) on Each ADC
    - Hardware-Integrated Post-Processing of ADC Converter
    - Saturating Offset Calibration
    - Error of Set Point Calculation
    - High, Low and Zero-Crossing Compare with Interrupt Capability
    - Trigger to Sample Delay Capture
    - Eight Windowed Comparators with 12-bit Digital to Analog (DAC)
    - Three 12-Bit Buffered DAC Outputs
6. Enhanced Control Peripherals
    - 24 PWM Channels with Enhanced Features
    - 16 High-Resolution Pulse Width Modulator (HRPWM) Channels
    - High Resolution on Both A and B Channels of 8 PWM Modules
    - Dead-Band Support (on Both Standard and High Resolution)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Six Enhanced Capture (eCAP) Modules
- Three Enhanced Quadrature Encoder Pulse (eQEP) Modules

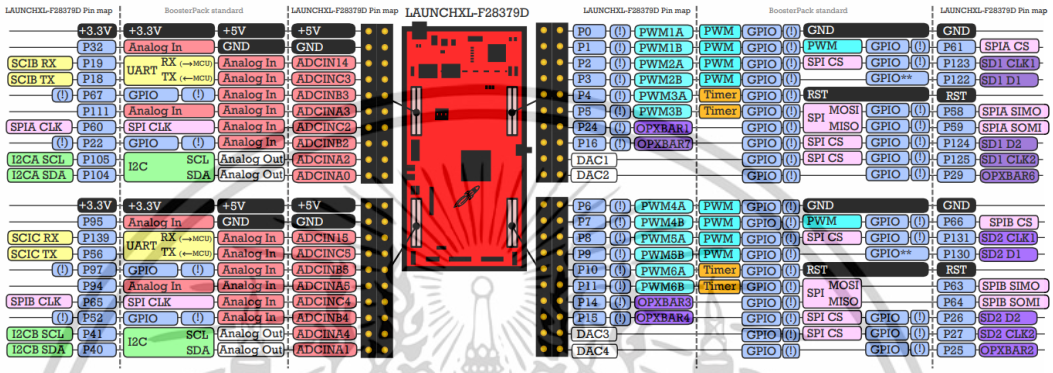
7. Peripheral Interrupt Expansion (PIE) Block That Supports all 58 Peripheral
8. 128-Bit Security Key/Lock
   - Protects Flash/OTP/RAM Block
   - Prevents Firmware Reverse Engineering
9. Enhanced Control Peripherals
   - Up to 18 PWM Output
   - Up to 6 HRPWM Output With 150 ps MEP Resolution
   - Up to 6 Even Capture Inputs
   - Up to 2 Quadrature Encoder Interfaces
   - Up to 8 32-Bit Timers (6 for eCAPs and 2 for eQEPs)
   - Up to 9 16-Bit Times (6 for ePWMs and 3XINTCRs)
10. Three 32-Bit CPU Timers
11. Serial Port Peripherals
   - Up to 2 CAN Modules
   - Up to 3 SCI (UART) Module
   - Up to 2 McBSP Module (Configurable as SPI)
   - One SPI Module
   - One Inter-Integrated-Circuit (I2C) Bus
12. 12-Bit ADC, 16 Channels
   - 80 ns Conversion Rate
   - 2x8 Channel Input Multiplexer
   - Two Sample and Hold
   - Single/Simultaneous Conversions
   - Internal or External Reference
13. Up to 88 Individually Programmable, GPIO pins With Input Filtering
14. JTAG Boundary Scan Support
15. Advanced Emulation Functions
   - Analyze and Breakpoint Functions

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Real-Time Debug via Hardware

16. Deployment Support Includes

- ANSI C/C++ Compiler /Assembler /Linker
- Code Composer Studio™ IDE
- DSP/BIOS™
- Digital Motor Control and Digital Power Software Libraries



รูปที่ 4.17 หมายเลขขาพิน ADC บนอุปกรณ์ที่ต่อพ่วงโดยรวมของ C2000 เบอร์ TMS320F28379D

สำหรับซอฟแวร์สำหรับพัฒนาไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 เบอร์ TMS320F28379D การพัฒนาระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ต้องใช้ทั้งฮาร์ดแวร์และซอฟแวร์ และสำหรับการทดลองนี้จะแนะนำซอฟแวร์ที่ใช้ในการโปรแกรมซอร์สโค้ดลงไปในไมโครคอนโทรลเลอร์และโปรแกรมคอมไพเลอร์ซึ่งมีโปรแกรม 2 ตัว คือซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวต่อไปในบทที่ 5

1. โปรแกรม Code Composer Studio : CCS Version 12.4.0 เป็นโปรแกรมในการคอมไฟร์โค้ดภาษาซี (C) ลงในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 Microcontroller เบอร์ TMS320F28379D

2. โปรแกรม MATLAB/Simulink Version R2024a จะทำการกำเนิดโค้ดภาษาซี (C) เป็นโปรแกรมคอมไพเลอร์บล็อกไดอะแกรม

จากข้อมูลคุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 เบอร์ TMS320F28379D ที่กล่าวในข้างต้นนับว่าเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีประสิทธิภาพและสมรรถนะในการทำงานและการคำนวณทางคณิตศาสตร์รวมถึงการประมวลผลสัญญาณดิจิตอลอยู่ในระดับที่สูง

4.7 สรุปการออกแบบวงจรควบคุมและวงจรกำลัง

ในบทที่ 4 ได้กล่าวถึงการออกแบบวงจรเพื่อสร้างชุดทดสอบของระบบควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลโดยวิธีการพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบอะซิงโครนัส Asynchronous PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ท ทั้งภาควงจรกำลังและภาควงจรควบคุมซึ่งประกอบไปด้วยวงจรกรองสัญญาณ EMI Noise Filter,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

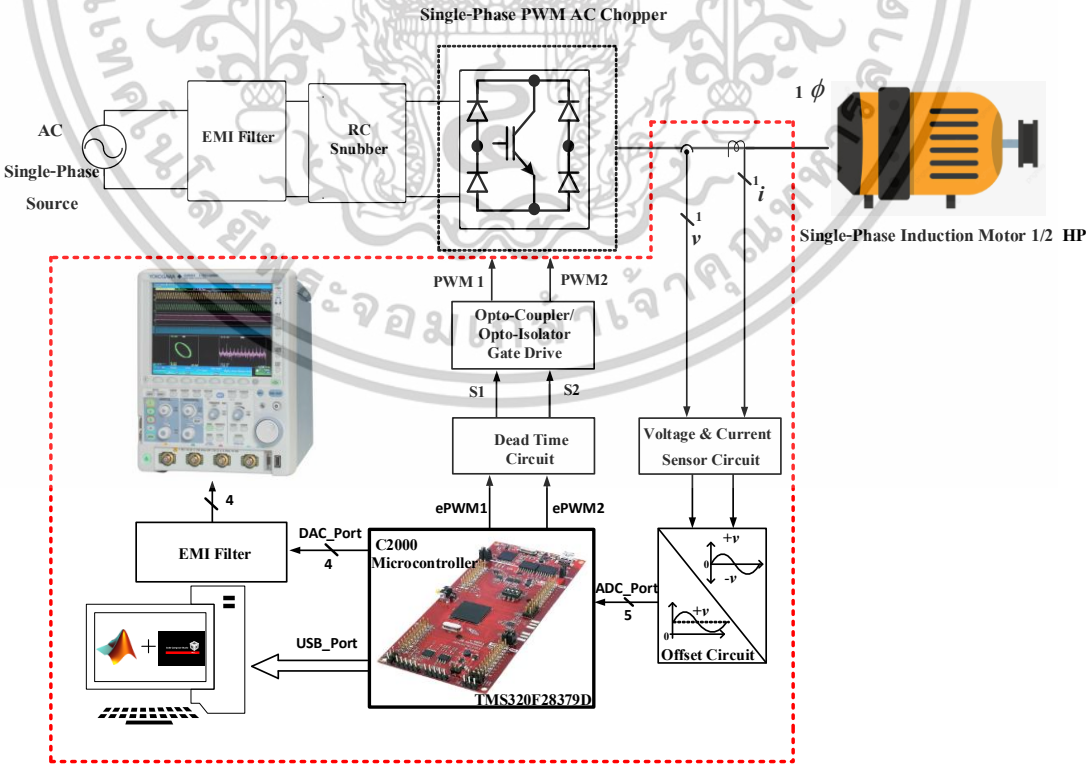
วงจรสวิตช์ไอจีบีที (IGBT), วงจรแยกกราวนด์สัญญาณขับเกตของวงจรกำลังและวงจรควบคุมเบอร์ TLP250, วงจรไดโอดเป็นสวิตช์สองทาง 8 ตัวแบบ Fast Recovery Diode, วงจรสนับเบอร์, วงจรขับเกตสวิตช์กำลังไอจีบีทีแบบสวิตช์ 2 ทาง, วงจรประวิงเวลา และวงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ โดยในงานวิจัยนี้จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันและกระแสของมอเตอร์เพื่อนำไปใช้ในส่วนของการคำนวณหากระแสของมอเตอร์โดยจะถูกคำนวณผ่านตัวประมวณผลไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 Microcontroller เบอร์ TMS320F28379D ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
การออกแบบจำลองระบบการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยการควบคุมกระแสเริ่มต้นโดยใช้เทคนิคอะซิงโครนัส พีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์

5.1 บทนำ

ในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงการใช้งานโปรแกรม MATLAB/Simulink Version R2024a จำลองการทำงานของระบบควบคุมกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส โดยมีการตรวจจับกระแสมอเตอร์เพื่อมาประมวลผลในลูปควบคุมกระแส ที่ใช้ในงานระบบการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยการควบคุมกระแสเริ่มต้น โดยใช้เทคนิคอะซิงโครนัส พีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ มีการออกแบบของสัญญาณแบบพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบอะซิงโครนัส (Asynchronous PWM AC Chopper) นำไปประยุกต์ใช้กับโปรแกรม (Code Composer Studio :CCS) Version 12.4.0 ในการคอมไพร์โค้ดภาษาซี (C) ลงในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 Microcontroller เบอร์ TMS320F28379D เป็นตัวสร้างสัญญาณ PWM AC Chopper เพื่อสร้างแรงดันไฟฟ้าแบบสวิตช์ชิ่งไปที่ขาเกตและตัวสวิตช์ไอจีบีทีเพื่อไปขับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส จะแสดงให้เห็นในโครงสร้างพื้นฐานของระบบดังรูปที่ 5.1 ด้านล่าง

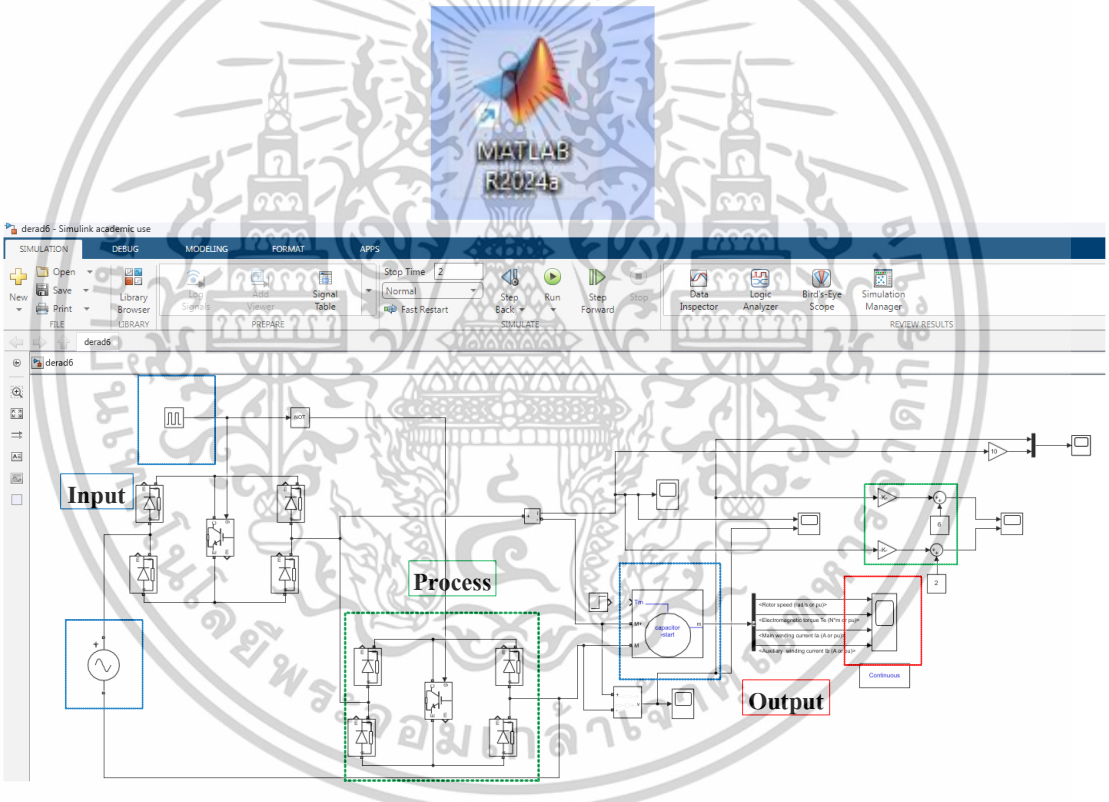


รูปที่ 5.1 โครงสร้างพื้นฐานของระบบที่ใช้ในการจำลองการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 โปรแกรม MATLAB/Simulink Version R2024a

ลักษณะของโปรแกรม MATLAB/Simulink Version R2024a จะถูกออกแบบและสร้างโดยบริษัท MathWorks ได้พัฒนาขึ้นสำหรับใช้ในงานสร้างแบบจำลองระบบพลวัต (Dynamic System Modeling) ต่างๆในรูปของบล็อกเซต (Block Sets) หรือจะเรียกอีกชื่อว่าบล็อกไดอะแกรม (Block Diagram) มีลักษณะเป็นรูปแสดงที่ 5.2 ด้านล่าง คือ เป็นการโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้ภาษาที่เป็นรูปภาพหรือกราฟฟิก ซึ่งบล็อกแต่ละบล็อกนั้นจะเปรียบเสมือนฟังก์ชันหรือคำสั่งต่างๆที่กำหนดให้มีการทำงานแตกต่างกันไป โดยในแต่บล็อกนั้นจะประกอบด้วย Input, Process และ Output สำหรับการเชื่อมต่อกับบล็อกเซตค่าอื่นๆให้เป็นระบบหรือโครงข่ายของโปรแกรมเกิดขึ้น



รูปที่ 5.2 ตัวอย่างบล็อกเซตฟังก์ชันที่มีระบบประกอบด้วย Input, Process และ Output

นอกจากใช้สร้างเป็นโปรแกรมได้แล้วยังสามารถจำลองการทำงาน (Simulating) และการวิเคราะห์ระบบได้อีกด้วย MATLAB/Simulink Version R2024a ได้รวบรวมบล็อกเซตต่างๆไว้เป็นชุดไลบรารี (Block Set Libraries) มากมายเช่นเดียวกันซึ่งถูกนำไปใช้ในงานอย่างแพร่หลายสำหรับการออกแบบโมเดลการสร้างแบบจำลองสำหรับระบบควบคุมอัตโนมัติการประมวลผลสัญญาณดิจิตอลและการประมวลผลภาพแบบดิจิตอล ซึ่งเราจะสามารถแปลงจากบล็อกเซตให้เป็นโค๊ดภาษาซี

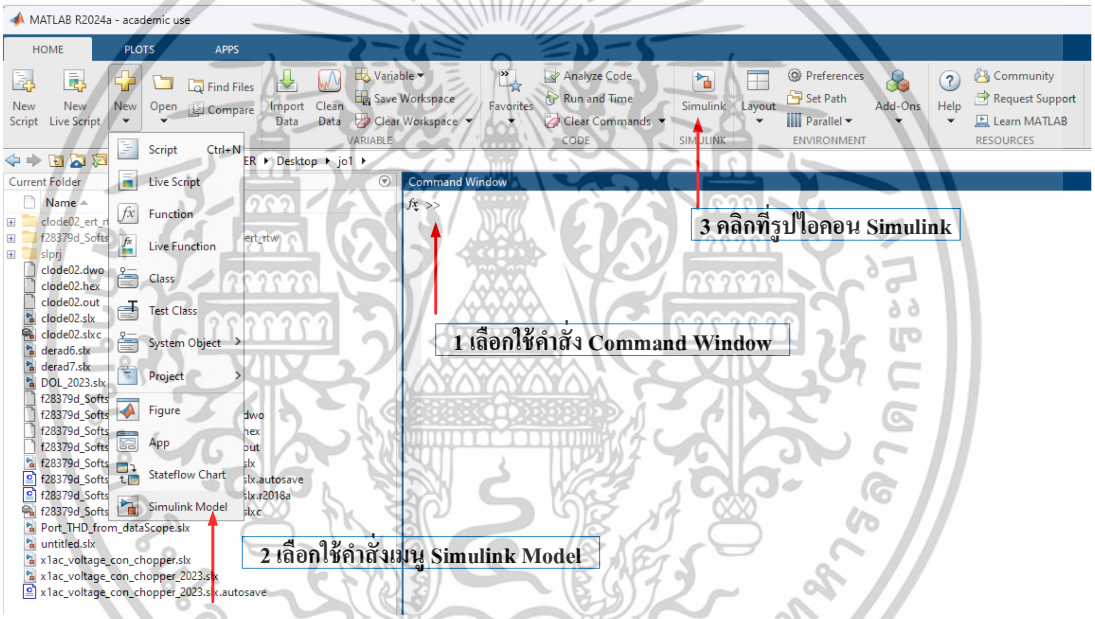
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้อีกทั้งสามารถทำงานร่วมกับโปรแกรมอื่นๆได้อีกไม่ว่าจะเป็นโปรแกรม (Code Composer Studio :CCS) เป็นต้น

5.2.1 การเปิดใช้งานโปรแกรม MATLAB/Simulink Version R2024a

โปรแกรม MATLAB/Simulink Version R2024a จะทำงานภายใต้ MATLAB Desktop (IDE) ดังนั้นเมื่อเราติดตั้งโปรแกรม MATLAB/Simulink เรียบร้อยทำการเปิดโปรแกรมที่ Desktop เพื่อใช้งานในส่วนของ Simulink โดยจะมีอยู่ที่ 3 วิธี ตามรูปด้านล่างที่ 5.3

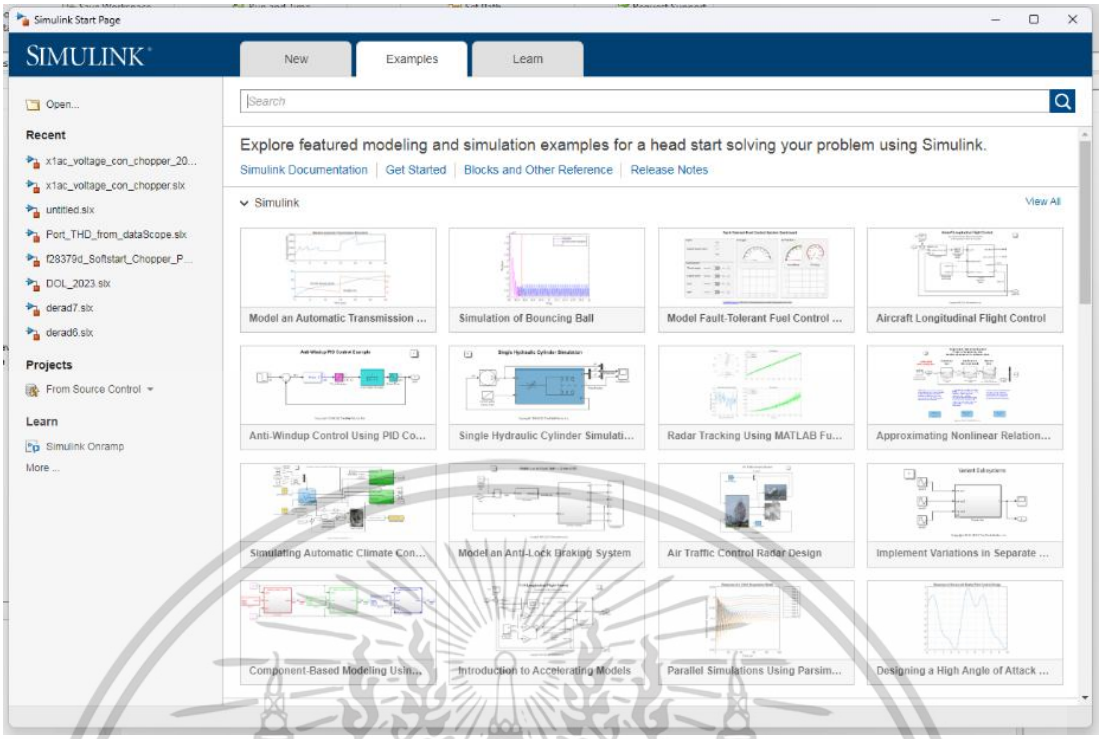
1. การเปิดโดยใช้คำสั่ง Simulink ที่หน้าต่าง Command Window
2. การเปิดโดยเมนู Simulink Model บนแท็บเมนูที่ Home (Contextual Tab)
3. การเปิดโดยการคลิกที่ไอคอน Simulink บนหน้าต่าง MATLAB Desktop



รูปที่ 5.3 การเปิดใช้งานโปรแกรม MATLAB/Simulink Version R2024a

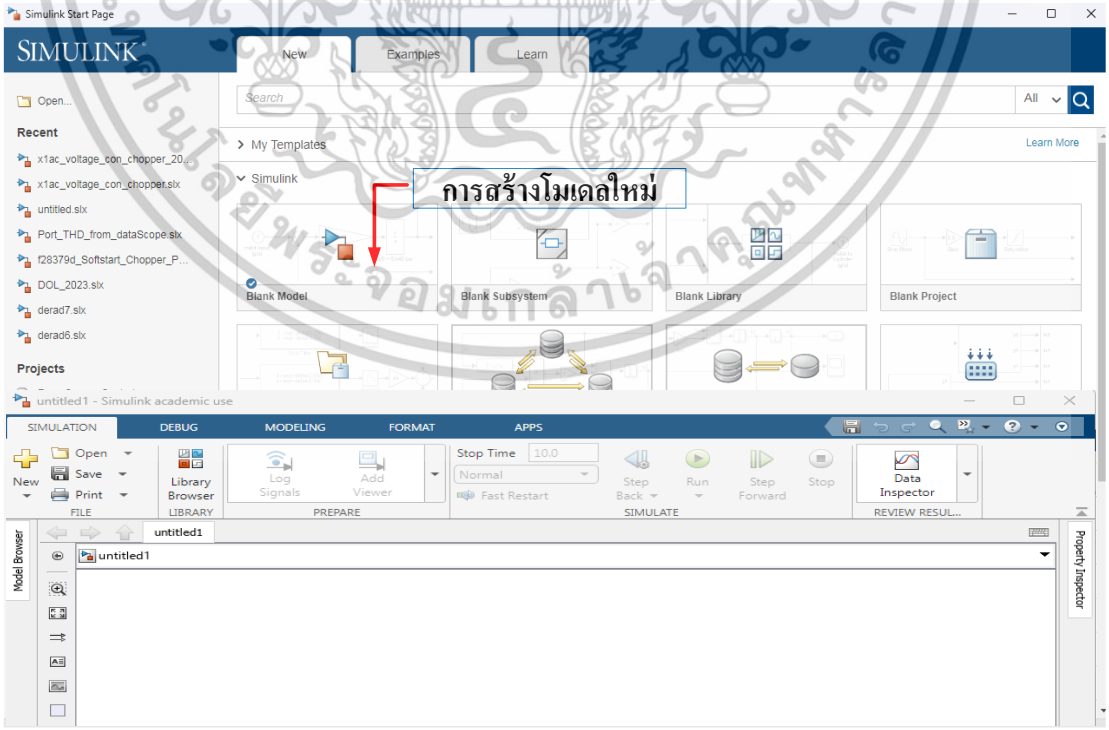
เมื่อทำการเปิด Simulink ใช้งานจะแสดงหน้าต่าง Simulink Start Page โดยหน้าต่างนี้จะมีจุดมุ่งหมายในการให้ผู้ใช้งานมีความสะดวกมากขึ้น เช่น เปิดใช้งานที่เคยทำไว้แล้วหรือสร้างงานใหม่ตามหมวดหมู่ประเภทต่างๆ และศึกษาเรียนรู้เกี่ยวกับโมเดล Simulink ที่โปรแกรมได้จัดเตรียมเป็นหมวดหมู่ให้ดังรูปแสดงที่ 5.4 ด้านล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



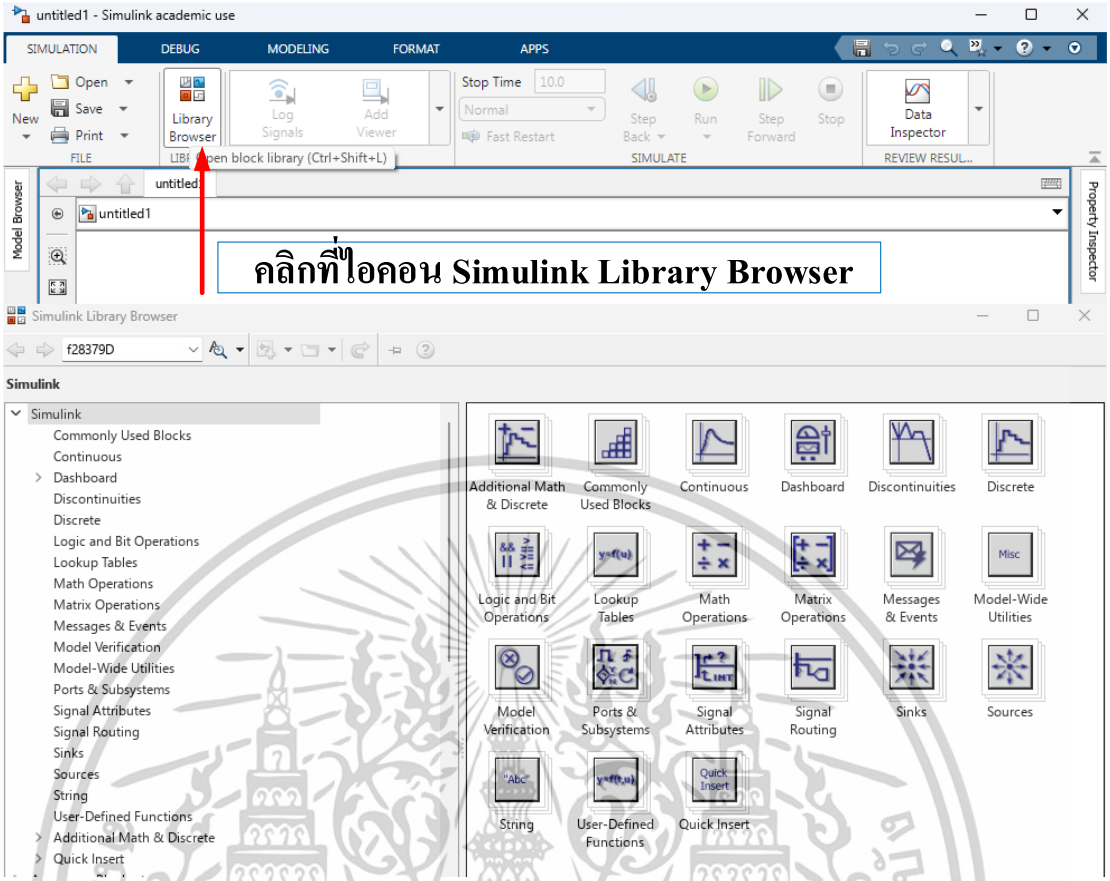
รูปที่ 5.4 ส่วนประกอบหน้าต่าง Simulink Start Page

สำหรับในการสร้างโมเดลใหม่ในการ Simulink ให้ทำการเลือกเปิดใช้งาน Simulink Editor โดยทำการคลิกที่ไอคอน Blank Model บนหน้าต่าง Simulink Start Page ดังแสดงในรูปที่ 5.5 ด้านล่าง



รูปที่ 5.5 การเปิดหน้าต่าง Simulink Editor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 การเปิดใช้งาน Simulink Library Browser

5.3 การจำลองระบบควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยการควบคุมกระแสเริ่มต้นโดยใช้เทคนิคอะซิงโครนัส พีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์

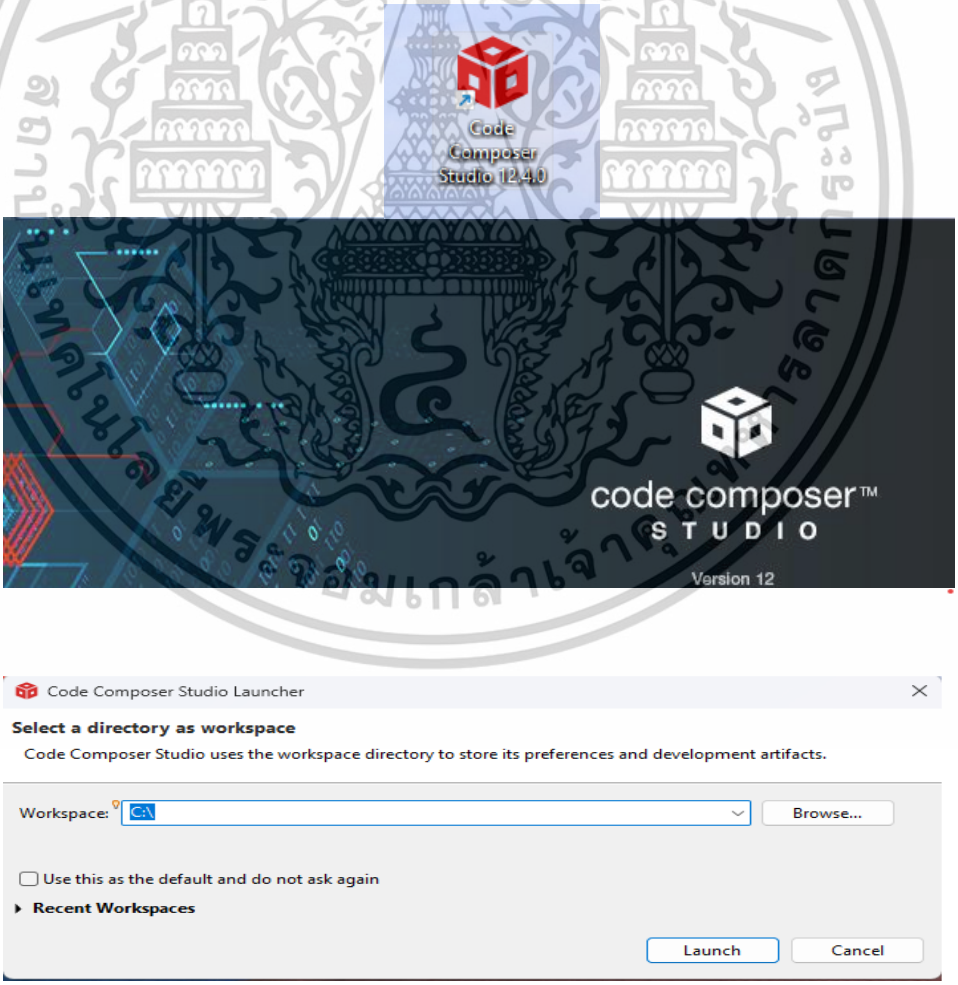
ลักษณะของโปรแกรม MATLAB/Simulink Version R2024a จะถูกออกแบบและสร้างโดยบริษัท MathWorks ได้พัฒนาขึ้นสำหรับใช้ในงานสร้างแบบจำลองระบบพลวัต (Dynamic System Modeling) ต่างๆในรูปของบล็อกเซต (Block Sets) หรือจะเรียกอีกชื่อว่าบล็อกไดอะแกรม (Block Diagram) มีลักษณะเป็นรูปแสดงที่ 5.2 ด้านล่าง คือ เป็นการโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้ภาษาที่เป็นรูปภาพหรือกราฟฟิก ซึ่งบล็อกแต่ละบล็อกนั้นจะเปรียบเสมือนฟังก์ชันหรือคำสั่งต่างๆที่กำหนดให้มีการทำงานแตกต่างกันไป โดยในแต่บล็อกนั้นจะประกอบด้วย Input, Process และ Output สำหรับการเชื่อมต่อกับบล็อกเซตค่าอื่นๆให้เป็นระบบหรือโครงข่ายของโปรแกรมเกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 โปรแกรม Code Composer Studio (CCS) Version 12.4.0

โปรแกรม Code Composer Studio (CCS) Version 12.4.0 เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการช่วยพัฒนาโปรแกรมหรือจะเรียกว่า Integrated Development Environment (IDE) Tool ของบริษัท Texas Instruments ใช้ Common Object File Format (COFF) หรือไฟล์นามสกุล .COFF ในการพัฒนาโปรแกรมให้สามารถใช้ประโยชน์ให้สูงสุด โดยที่โค้ดไฟล์ของแต่ละโค้ดถูกเรียกว่า “โมดูล” ซึ่งถูกเขียนแยกกันอย่างอิสระ โดยจะรวบรวมทรัพยากรที่จำเป็นในการทำงานของแต่ละโมดูล สำหรับการเขียนโมดูลนี้สามารถเขียนได้โดยการใช้ CCS ด้วยโปรแกรมภาษา Assembly ที่มีนามสกุลของไฟล์เป็น .ASM และโปรแกรมภาษาซีที่มีนามสกุลของไฟล์เป็น .C

สำหรับโปรแกรม Code Composer Studio (CCS) Version 12.4.0 ที่แสดงตามรูปที่ 5.8 ประกอบไปด้วย Editor, Compiler, Assembler, Linker และ Automatic Build Process นอกจากนี้ยังสามารถแสดงผลกราฟที่เชื่อมต่อระหว่างอินพุต และเอาต์พุตหลายๆโมดูลถูกเชื่อมต่อละระบบของโมดูล โดย Linker ใช้ Command File (CMD) เพื่อที่จะแยกแยะในส่วนของการจองพื้นที่ในหน่วยความจำที่เหมาะสมในแต่ละโมดูลเพื่อนำไปสู่ขบวนการแปลงไฟล์เป็นนามสกุล .OUT ต่อไป

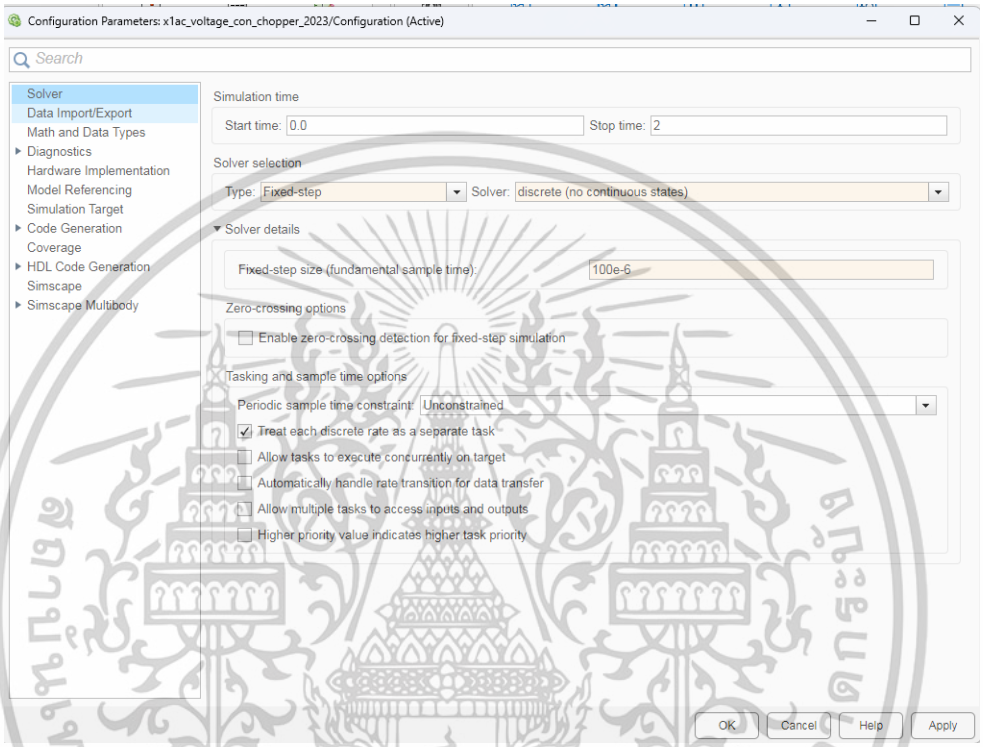


รูปที่ 5.7 หน้าต่างเปิดใช้งานโปรแกรม Code Composer Studio (CCS) Version 12.4.0

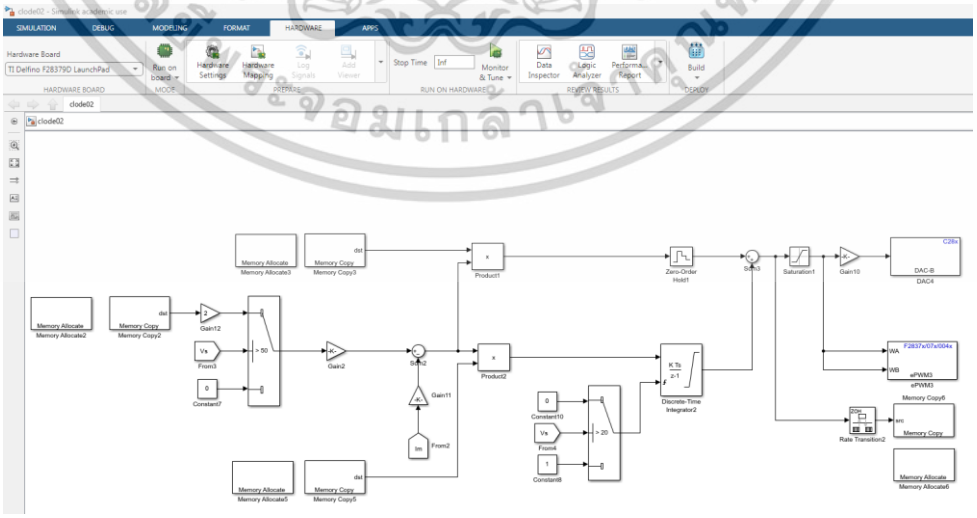
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.1 ตัวอย่างการใช้งานโปรแกรม Code Composer Studio (CCS) Version12.4.0

ตัวอย่างการใช้งานโปรแกรม Code Composer Studio (CCS) Version12.4.0 ทำการโหลดชื่อไฟล์ Test_CCS.slx ในโปรแกรม MATLAB/Simulink Version R2024a ซึ่งโปรแกรมจะแสดงบล็อกเซ็ตของสัญญาณ PWM ที่ถูกนำไปมอดูเลชันผ่านบล็อก ePWM และบล็อก DAC-A จะประกาศสัญญาณออกเป็น PWM ดังรูปที่ 5.9 ด้านล่าง



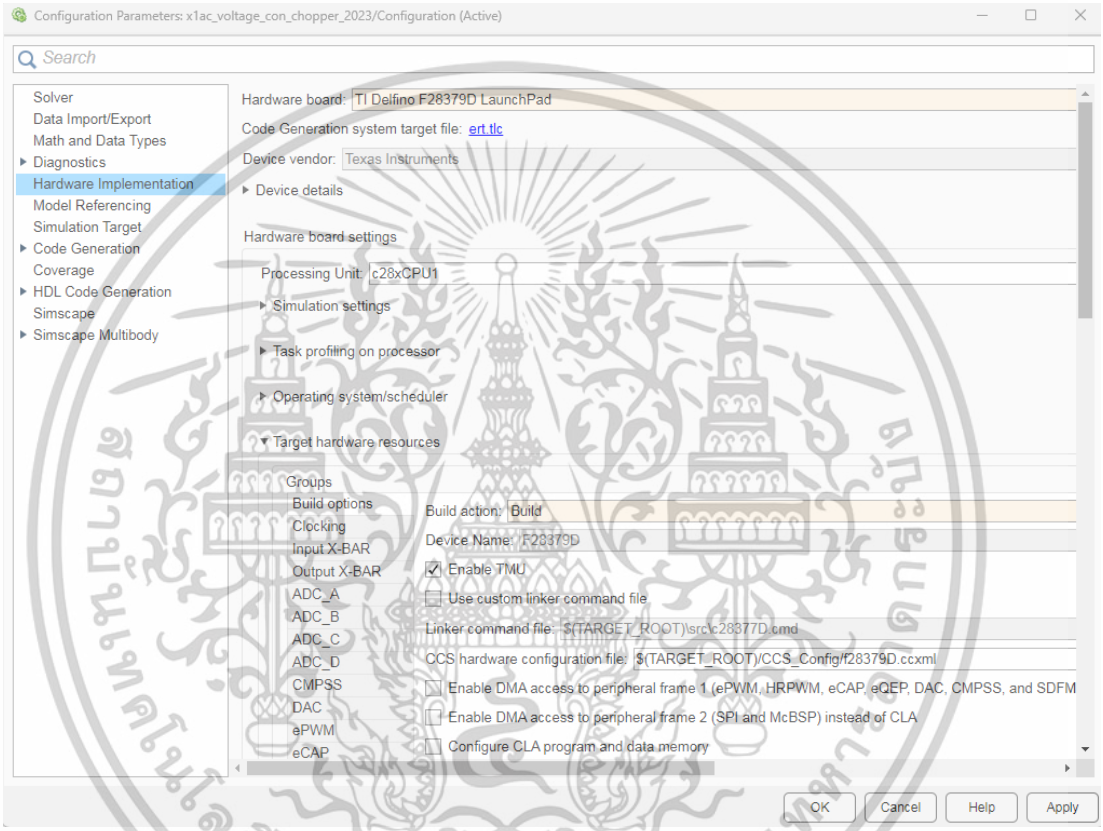
รูปที่ 5.8 การตั้งค่า Configuration Parameters ในโปรแกรม MATLAB/Simulink Version R2024a



รูปที่ 5.9 บล็อกเซ็ตของ Test_CCS.slx ในโปรแกรม MATLAB/Simulink Version R2024a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

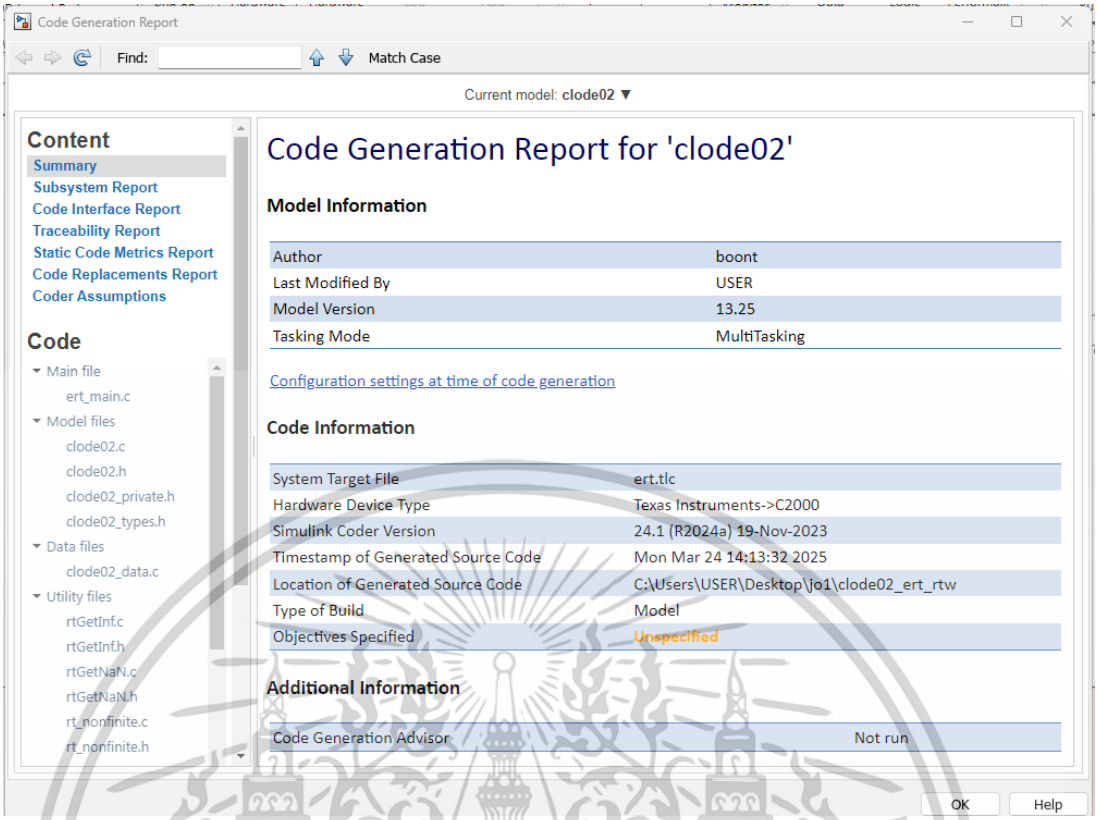
ในการใช้งานโปรแกรม Code Composer Studio (CCS) Version12.4.0 ร่วมกับโปรแกรม MATLAB/Simulink Version R2024a จะต้องตั้งค่า Stop Time ให้เป็น Inf โดยมีการตั้งค่า Solver Option ให้เป็น Fixed-Step และ Discrete (No Continuous States) ในการกำหนดช่วงเวลาของ Sample Time ให้กำหนดเป็น 100e-6 หรือ (100ไมโครวินาที) หากไม่สามารถ Build ได้ให้ปรับช่วงเวลาให้สูงขึ้นและให้ไปเลือก Ti Delfino F28379D Launch Pad ที่ Hardware Implementation และเลือก Build Action ให้เป็น Build ดังแสดงในรูปที่ 5.10 ด้านล่าง



รูปที่ 5.10 การตั้งค่า Model Configuration Parameters ในโปรแกรม MATLAB/Simulink Version R2024a

ทำการ Build บล็อกเซ็ตของ Test_CCS.slx โปรแกรมตัวอย่างเมื่อ Build ผ่านแล้วจะได้ไฟล์ File Test_CCS.out ที่ Folder File หน้า Workspace ดังแสดงในรูปที่ 5.11 ด้านล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



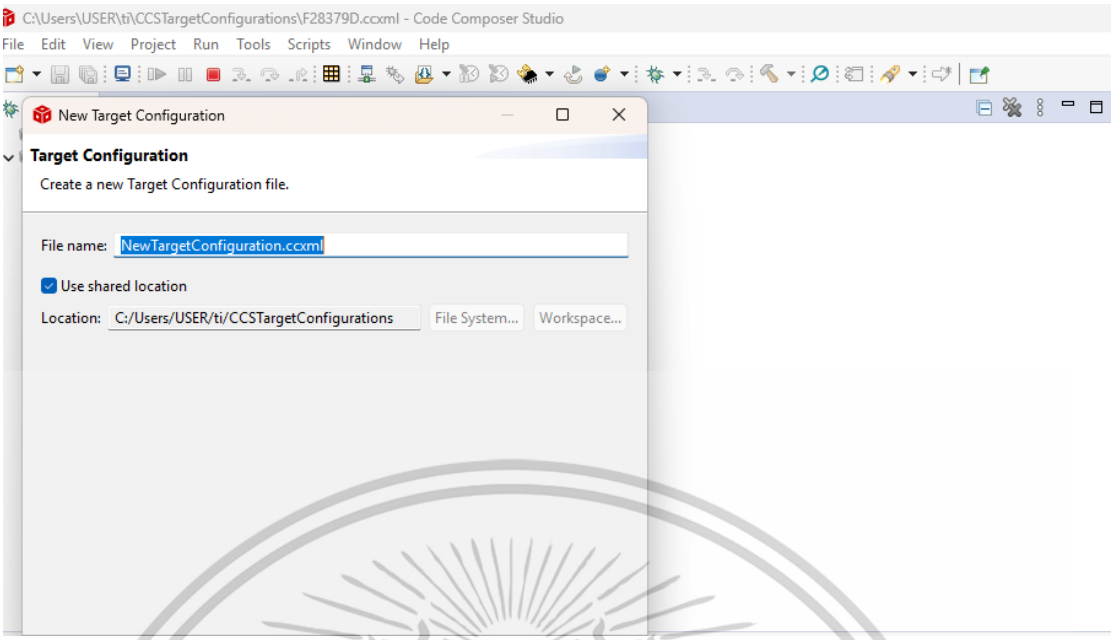
รูปที่ 5.11 ผลการ Build ผ่านแล้วที่บล็อกเซ็ตของ Test_CCS.out ในโปรแกรม MATLAB/Simulink Version R2024a

ลำดับขั้นตอนการเชื่อมต่อและการรันโปรแกรมใน Code Composer Studio (CCS) Version12.4.0 และ MATLAB/Simulink Version R2024a มีดังนี้

1. ให้คลิกเลือก New Target Configuration
2. การตั้งค่าเป้าหมายเป็น Spectrum Digital DSK-EVM-eZdsp Onboard USB Debug Prone
3. การกำหนด Type Filter Text เป็น TMS320F28379D จากนั้นทำการกดบันทึก Save

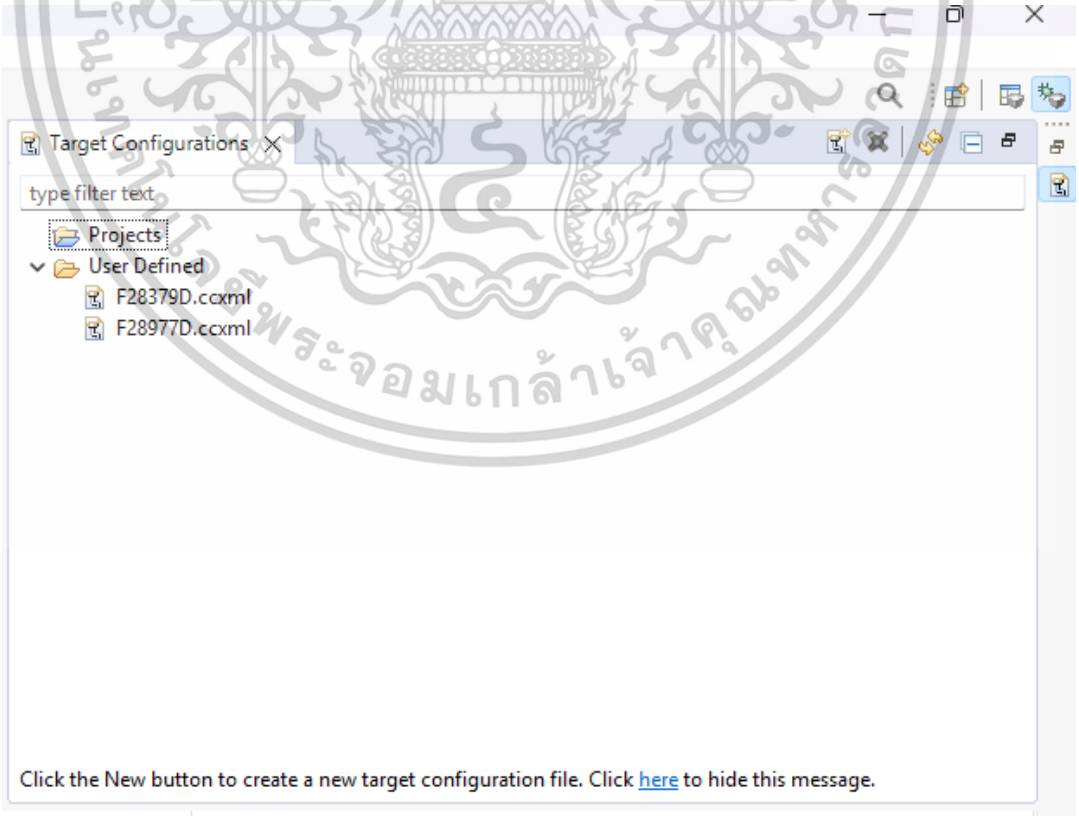
ขั้นตอนที่ 1 ทำการเลือก New Target Configurations จะแสดงขึ้น ต่อมาให้ทำการตั้งชื่อ Target ที่ต้องการที่ช่อง File name ซึ่งในที่นี้ใช้ชื่อว่า TMS320F28379D_Test จากนั้นทำการ Finish

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 การตั้งชื่อ New Target Configurations

ขั้นตอนที่ 2 การตั้งค่าอุปกรณ์ที่จะเชื่อมต่อกับโปรแกรม CCS นั้นก็คือ TMS320F28379D โดยการคลิกเลือกแท็ป TMS320F28379D_Test ซึ่งเป็นชื่อที่ได้ตั้งไว้ในขั้นตอนที่ 1

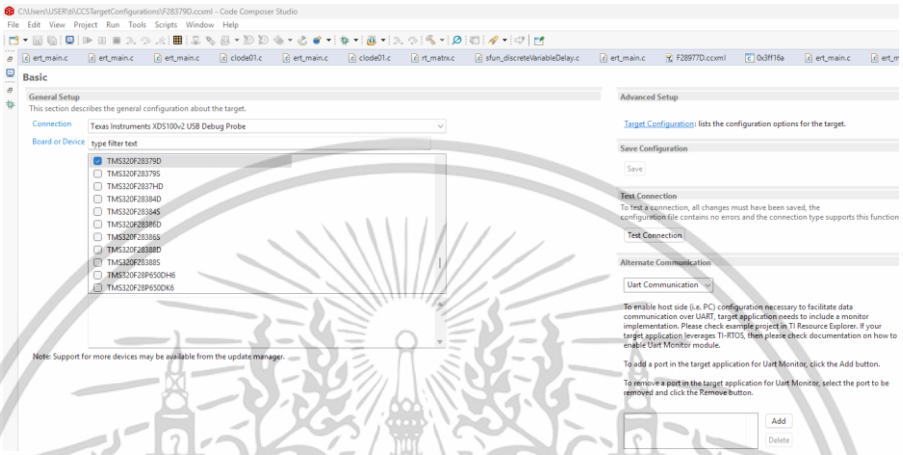


รูปที่ 5.13 การตั้งค่าสร้างไฟล์ชื่อที่จะเชื่อมต่อกับโปรกรม CCS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

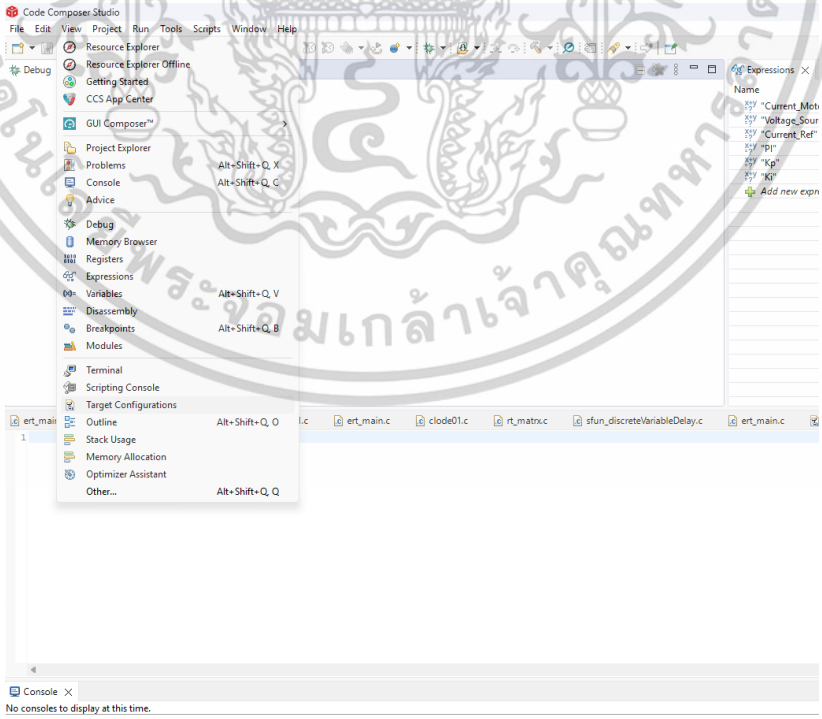
ขั้นตอนที่ 3 จากนั้นมาที่หัวข้อ Connection โดยปกติโปรแกรมจะตั้งค่ามาตรฐานเป็น Texas Instruments Simulator ให้ทำการเปลี่ยนเป็น Texas Instruments XDS100v2 USB Debug Probe

ขั้นตอนที่ 4 มาที่หัวข้อ Board or Device ทำการเลือกเป็น TMS320F28379D จากนั้นคลิก Save และ Test Configuration



รูปที่ 5.14 การตั้งค่าอุปกรณ์ที่จะเชื่อมต่อโปรกรม CCS

ขั้นตอนที่ 5 ต่อมาจะเห็นที่หน้าต่าง Target Configurations ในกรณีที่หาไม่พบสามารถเรียกขึ้นมาโดยคลิกที่ View จากนั้นเลือก Target Configurations

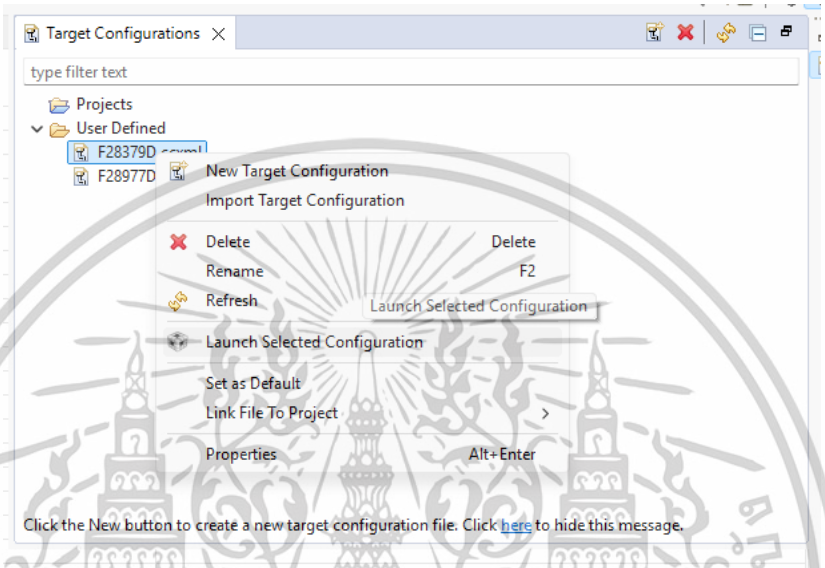


รูปที่ 5.15 ค้นหา Target Configurations

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

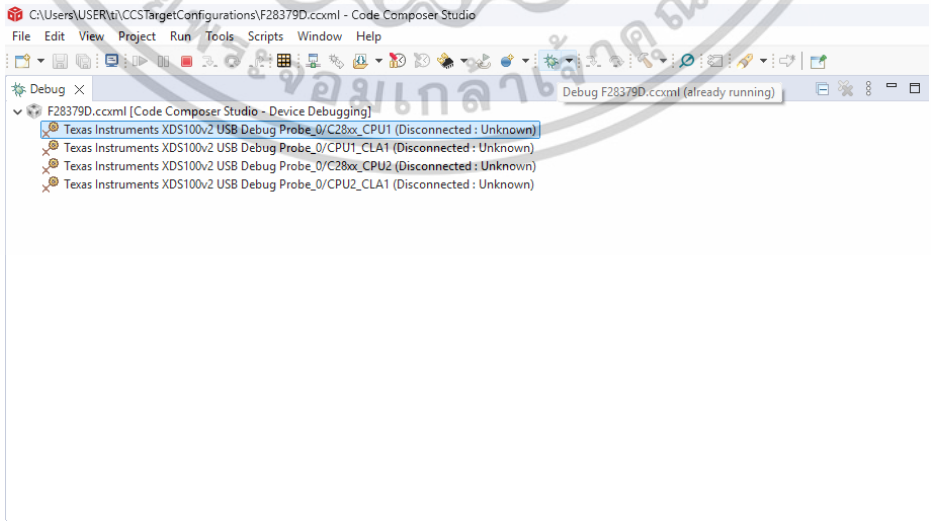
ขั้นตอนที่ 6 จะเห็นได้ว่าโปรแกรมจะทำการสร้างไฟล์ขึ้นที่โฟลเดอร์ User Defined โดยใช้ชื่อตามที่ได้ตั้งไว้ในขั้นตอนที่ 1 TMS320F28379D_Test

ขั้นตอนที่ 7 ทำการ Run Target ที่ได้ทำการ Config ไว้โดยการคลิกขวาที่มีชื่อตามที่ตั้งไว้แล้วเลือก Launch Selected Configuration



รูปที่ 5.16 เลือก Launch Selected Configuration

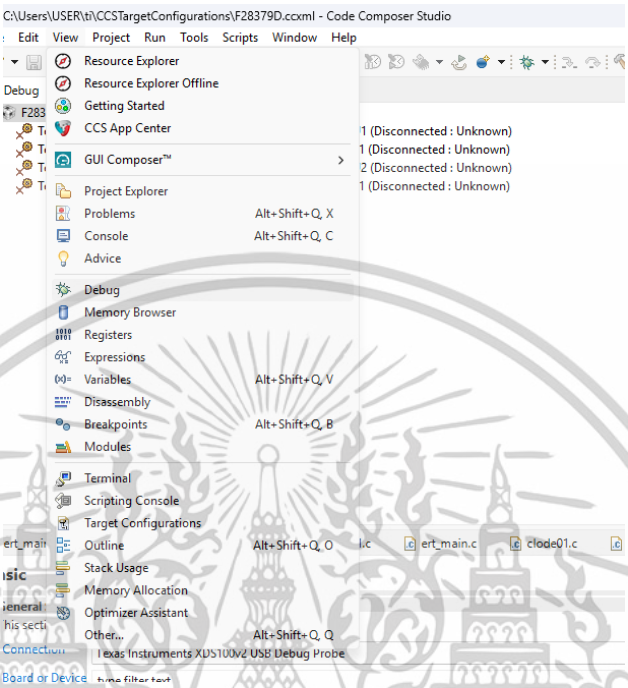
ขั้นตอนที่ 8 หลังจากที่คลิก Launch Selected Configuration แล้วโปรแกรมจะแสดงหน้าต่าง Progress เพื่อแสดงการทำงานและเมื่อหน้าต่าง Progress หายไปที่ช่อง Debug จะแสดงรายละเอียดของ Target ที่ตั้งค่าไว้ในกรณีที่โปรแกรมไม่แสดง Debug หรือถูกปิดไว้สามารถเปิดได้โดยคลิกที่ View แล้วเลือก Debug



รูปที่ 5.17 แสดงการ Disconnected Device ที่ช่อง Debug

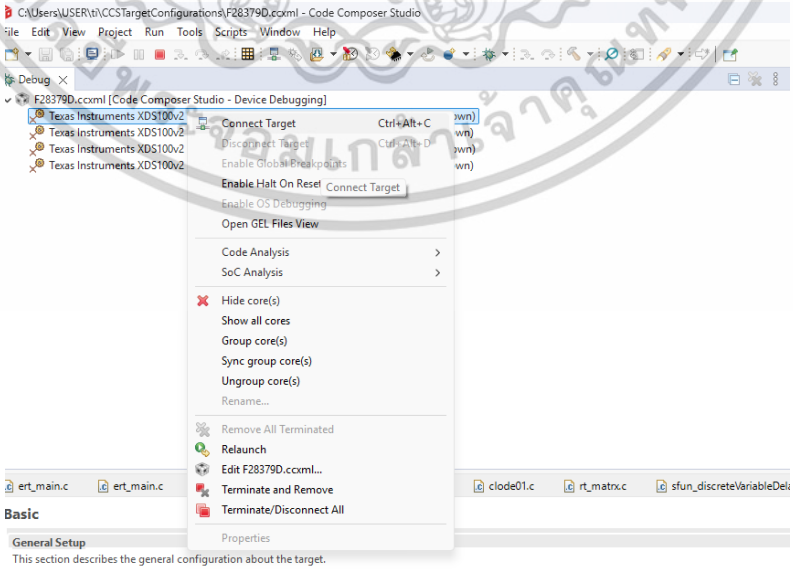
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 9 เมื่อช่อง Debug ถูกเรียกใช้งานจะแสดงดังรูปที่ขั้นตอน 12 จะพบว่าบอร์ด TMS320F28379D อยู่ในโหมด Disconnected Device นั้นยังไม่ได้มีการเชื่อมต่อซึ่งสามารถสังเกตได้ที่ช่อง Disassembly จะไม่มีข้อมูลใดๆแสดงออกมา



รูปที่ 5.18 แสดงช่อง Debug

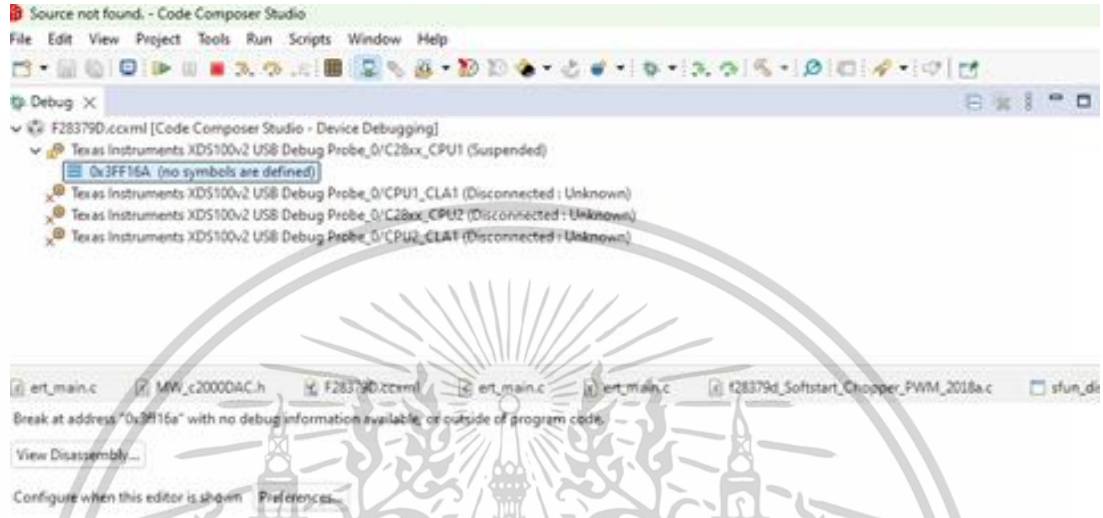
ขั้นตอนที่ 10 การเชื่อมต่อโปรแกรม CCS กับบอร์ด TMS320F28379D สามารถทำได้โดยคลิกขวาที่ Texas instruments XDS100v2 USB Debug Probe_o/C28xx_CPU1 จากนั้นเลือก Connect Target



รูปที่ 5.19 การทำ Connect Target

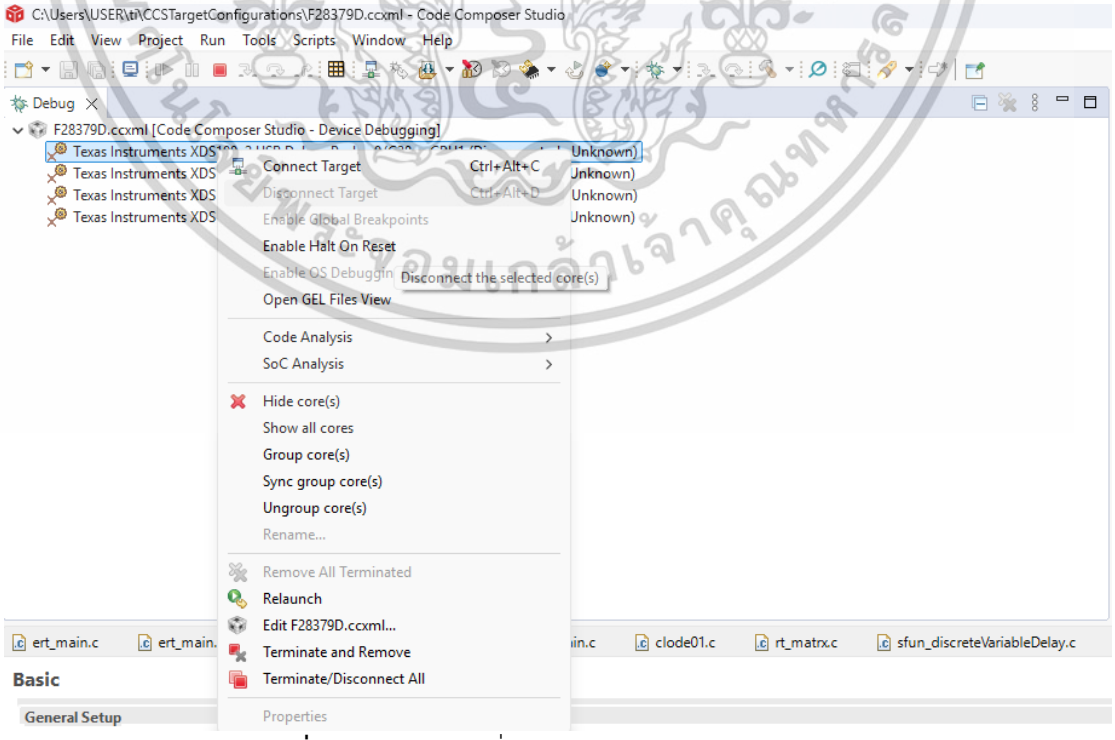
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 11 หลังจากที่เลือก Connect Target เพื่อเชื่อมต่อแล้ว Disconnected Device จะหายไปและสังเกต Disassembly จะมีข้อมูลแสดงออกมาซึ่งหมายถึงโปรแกรม CCS เชื่อมต่อกับบอร์ด TMS320F28379D แล้ว



รูปที่ 5.20 การเชื่อมต่อกับบอร์ด TMS320F28379D

ขั้นตอนที่ 12 ในกรณีที่จะหยุดเชื่อมต่อกับบอร์ด TMS320F28379D สามารถทำได้โดยคลิกขวาที่ Texas instruments XDS100v2 USB Debug Probe_o/C28xx_CPU1 จากนั้นเลือกที่ Disconnect Target



รูปที่ 5.21 หยุดการเชื่อมต่อบอร์ด TMS320F28379D

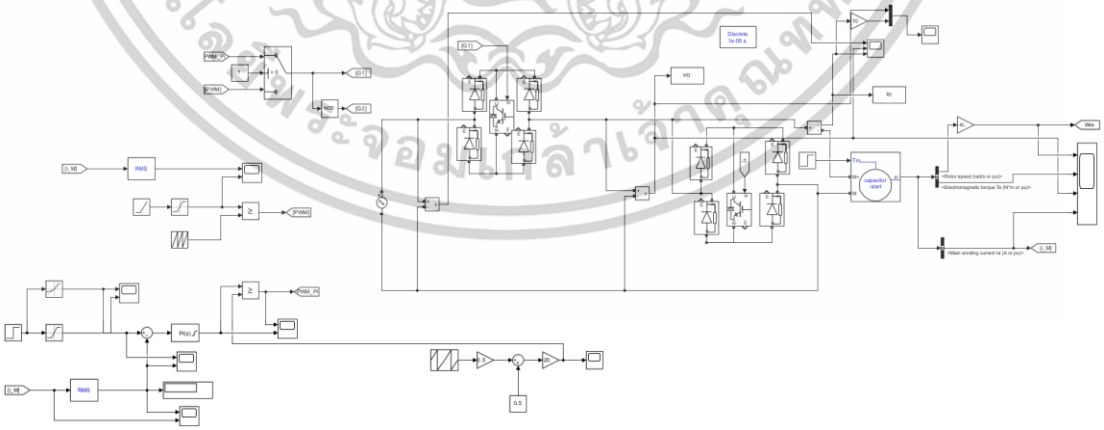
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5 การจำลองระบบการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส ในโปรแกรม MATLAB/Simulink Version R2024a

สำหรับการจำลองระบบการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสในโปรแกรม MATLAB/Simulink Version R2024a ซึ่งแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดเริ่มหมุนด้วยตัวเก็บประจุที่ใช้สำหรับการจำลองต้องหาค่าพารามิเตอร์เพื่อแทนค่าลงในโปรแกรม MATLAB/Simulink การหาค่าพารามิเตอร์ตามภาคผนวก ข. ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดตัวเก็บประจุช่วยหรือแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ทที่ 50 ไมโครฟารัด ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น SC-KR มีขนาดพิกัด 1/2 แรงม้า หรือ 0.4 กิโลวัตต์ 230 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ 4.3 แอมป์ 4 ขั้ว และความเร็วรอบที่พิกัดที่ 1,430 รอบต่อนาที ผลจากการจำลองเพื่อนำมาเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันและกระแส และรูปฮาร์มอนิกแรงดันและกระแสนอกจากนี้แล้วยังสามารถนำมาวิเคราะห์พฤติกรรมกระแสมอเตอร์เพื่อนำมาจัดสร้างชุดทดสอบจริงในงานระบบควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลโดยวิธีการพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบอะซิงโครนัส Asynchronous PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ซึ่งจะได้จำลองและอธิบายการทำงานวิจัยในโปรแกรม MATLAB/Simulink

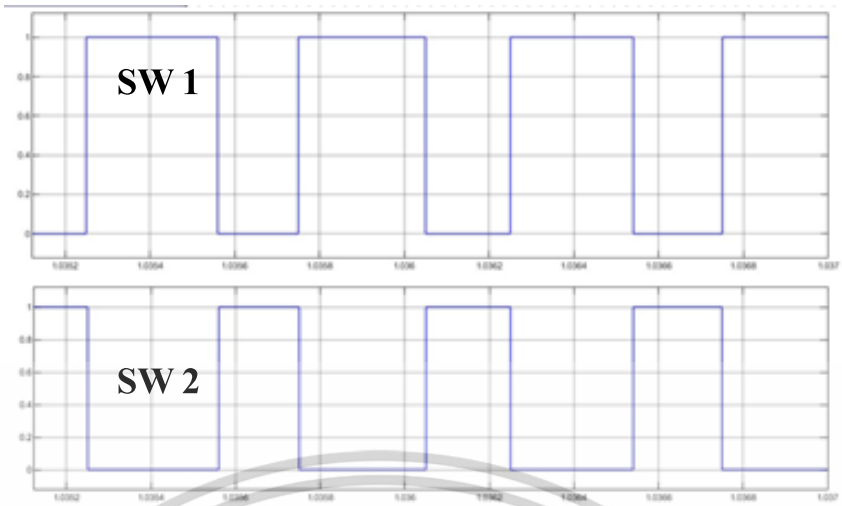
ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดเริ่มหมุนด้วยตัวเก็บประจุที่ใช้สำหรับการจำลอง

Power	Voltage	Current	Frequency	Poles	Speed
0.4 kW (1/2HP)	230 V	4.3 A	50 Hz	4 Pole	1430 rpm
R_s	R_r	l_{ls}	l_{lr}	L_m	J
1.7846 Ω	3.67 Ω	0.01088 mH	0.01088 mH	0.3210 mH	$kg.m^2$



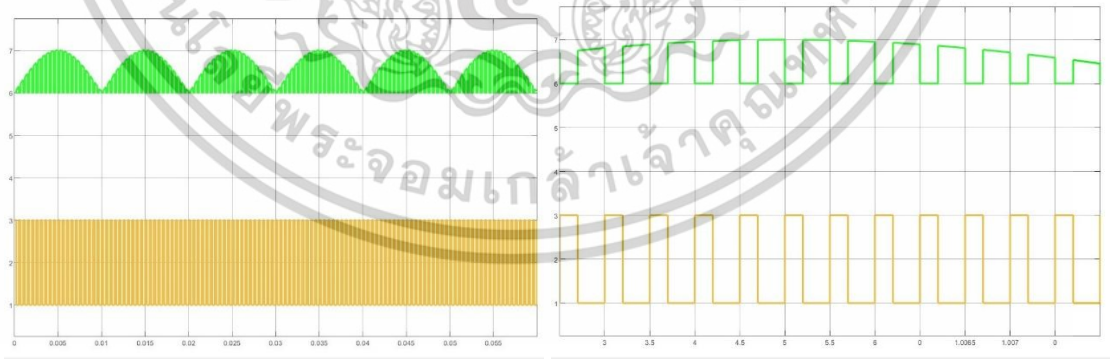
รูปที่ 5.22 การจำลองเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลของมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ในโปรแกรม MATLAB/Simulink

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.23 รูปคลื่นของวงจรประวิงเวลาที่ได้จากการจำลอง

(ก) สัญญาณสวิตช์ IGBT ตัวที่ 1 ที่ดิวตี้ 60% **(ข)** ขยายสัญญาณสวิตช์ IGBT ตัวที่ 1 ที่ดิวตี้ 60%



(ค) สัญญาณสวิตช์ IGBT ตัวที่ 2 ที่ดิวตี้ 60% **(ง)** ขยายสัญญาณสวิตช์ IGBT ตัวที่ 2 ที่ดิวตี้ 60%

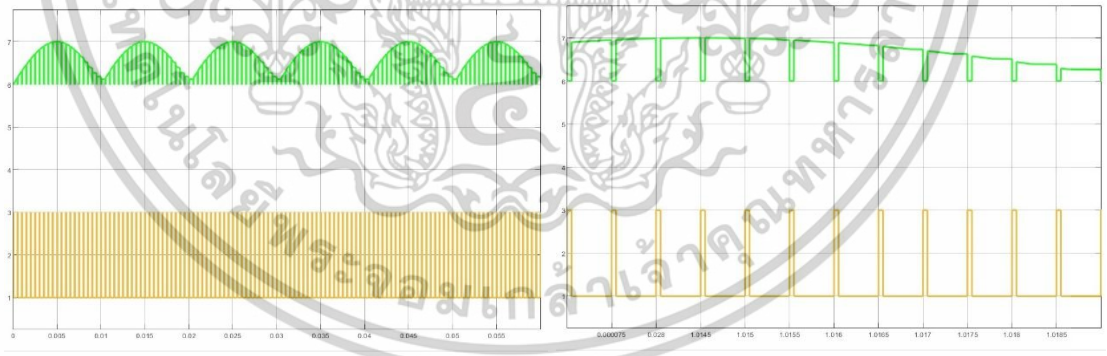
รูปที่ 5.24 รูปคลื่นสัญญาณของสวิตช์ IGBT ตัวที่ 1 และสวิตช์ IGBT ตัวที่ 2 ตัว ที่ค่าดิวตี้ 60%

โดยจากรูป 5.23 สัญญาณที่ได้จากภาคเอาต์พุตจะเป็นสัญญาณที่กลับเฟสอินพุตและช่วง Dead Time หรือวงจรประวิงเวลาของการทำงานสวิตช์ตัวที่ 1 และสวิตช์ตัวที่ 2 ที่ได้จากการต่อวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จริงเทียบโดยสัญญาณช่วงที่หนึ่งลงก็จะเป็นจังหวะเดียวกับช่วงที่สองขึ้นเราจึงทำการหน่วงเวลาในช่วงขาลงและขาขึ้นทั้งสองสัญญาณที่ 6 µs สำหรับในการทดสอบที่ตั้งค่าไว้ที่จะแสดงรูปคลื่นของสองสัญญาณที่ออกมาสองสัญญาณนั้นจะมีค่าของการ ON, OFF ต่างกัน และรูปที่ 5.24 เป็นรูปคลื่นสัญญาณของสวิตช์ IGBT ตัวที่ 1 และสวิตช์ IGBT ตัวที่ 2 ตัว ที่ค่าดิวตี้ 60% จะเห็นได้ว่ารูป (ก) และ (ข) เป็นรูปคลื่นสัญญาณของสวิตช์ IGBT ตัวที่ 1 ที่ค่าดิวตี้ 60% โดยรูป (ข) เป็นการซูมเข้าไปดูเนื้อพัลส์กว้างการทำงานของสัญญาณที่ทำงานสลับกันสายโพรบ CH4 จับขา IGBT ที่ขา Gate และสายโพรบ CH3 จับที่ขา Source ส่วนรูป (ค) และ (ง) รูปคลื่นสัญญาณสวิตช์ IGBT ตัวที่ 2 ที่ค่าดิวตี้ 60% โดยรูป (ง) เป็นการซูมเข้าไปดูเนื้อพัลส์กว้างการทำงานของสัญญาณที่ทำงานสลับกันสายโพรบ CH4 จับขา IGBT ที่ขา Gate และสายโพรบ CH3 จับที่ขา Source

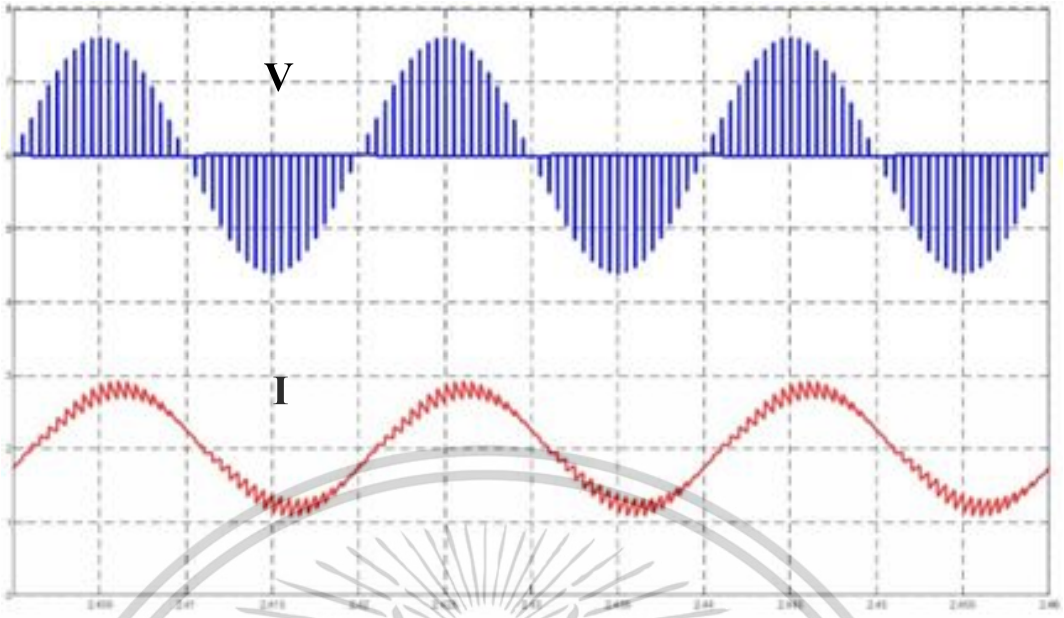
(ก) สัญญาณสวิตช์ IGBT ตัวที่ 1 ที่ดิวตี้ 90% **(ข)** ขยายสัญญาณสวิตช์ IGBT ตัวที่ 1 ที่ดิวตี้ 90%



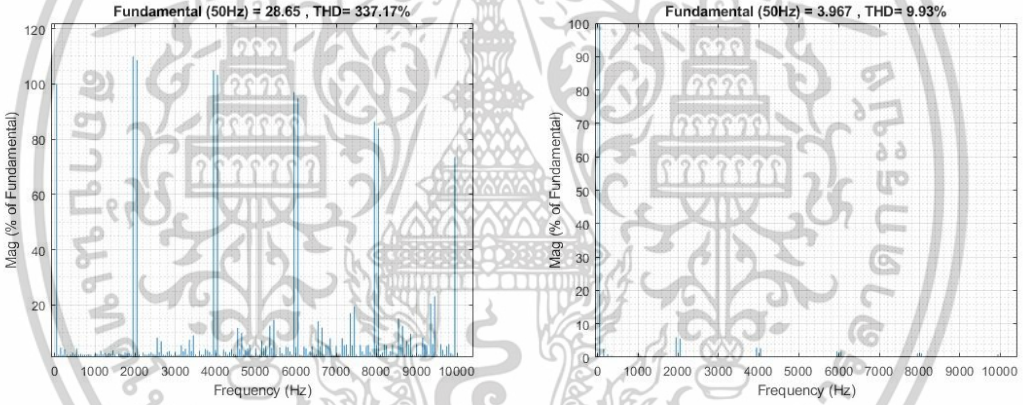
(ค) สัญญาณสวิตช์ IGBT ตัวที่ 2 ที่ดิวตี้ 90% **(ง)** ขยายสัญญาณสวิตช์ IGBT ตัวที่ 2 ที่ดิวตี้ 90%

รูปที่ 5.25 รูปคลื่นสัญญาณของสวิตช์ IGBT ตัวที่ 1 และสวิตช์ IGBT ตัวที่ 2 ตัว ที่ค่าดิวตี้ 90%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



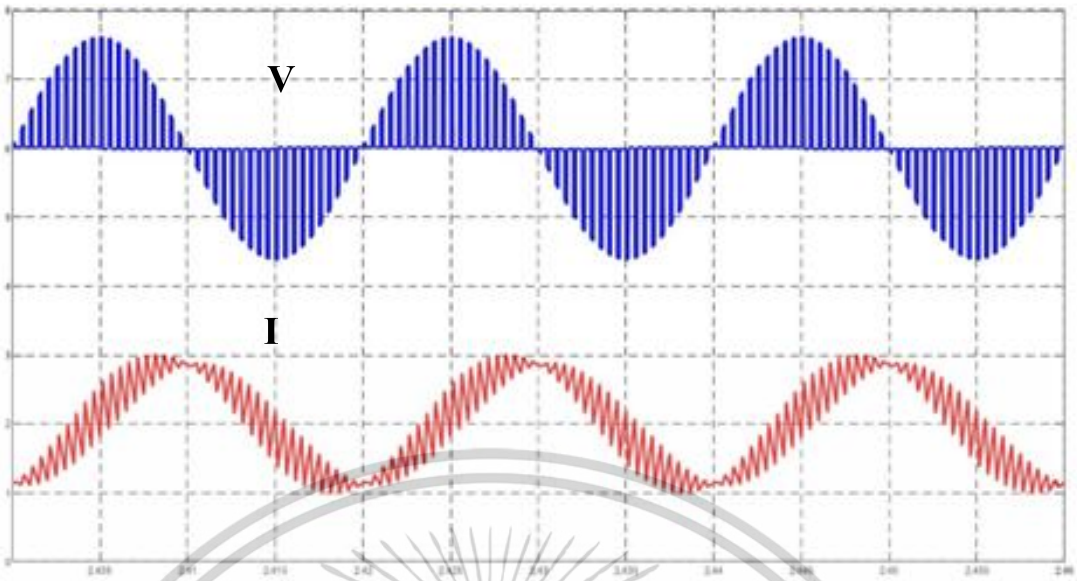
(ก) สัญญาณคลื่นแรงดันและกระแสดิวตี้ 10%



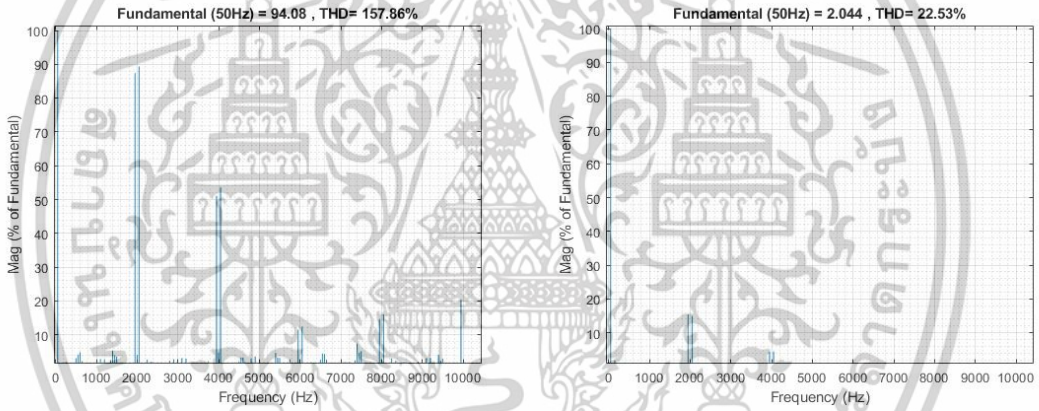
(ข) ฮาร์มอนิกของแรงดันที่ค่าดิวตี้ 10% **(ค)** ฮาร์มอนิกของกระแสที่ค่าดิวตี้ 10%

รูปที่ 5.26 รูปคลื่นสัญญาณและฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสที่ค่าดิวตี้ 10% จากการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



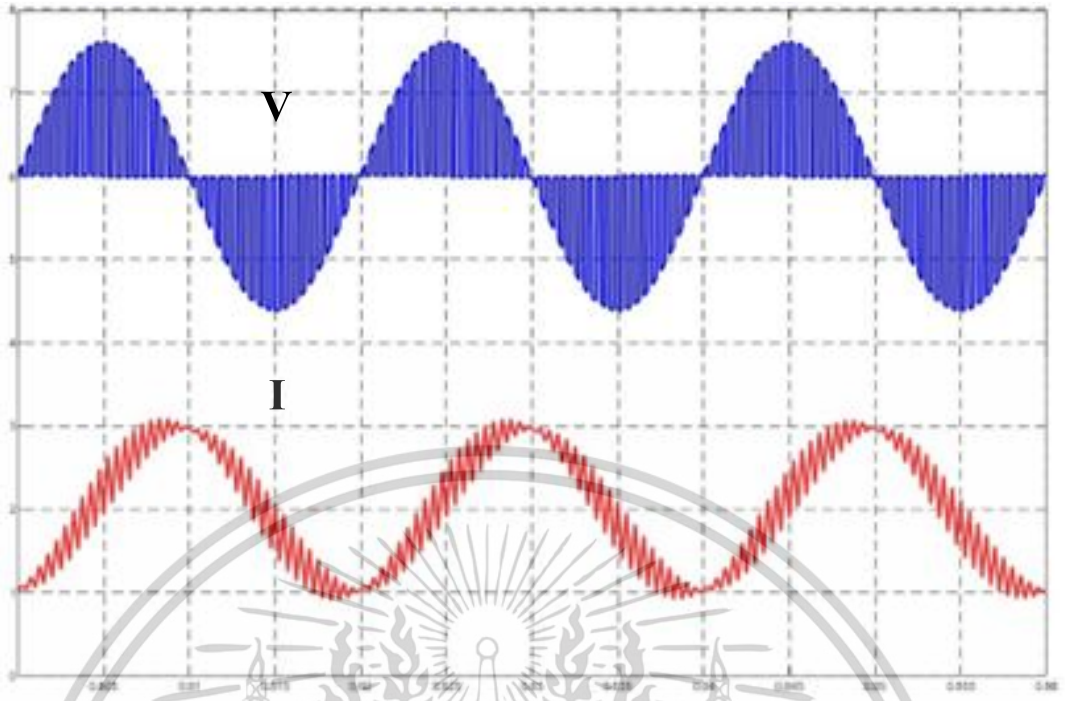
(ก) สัญญาณคลื่นแรงดันและกระแสดิวตี้ 30%



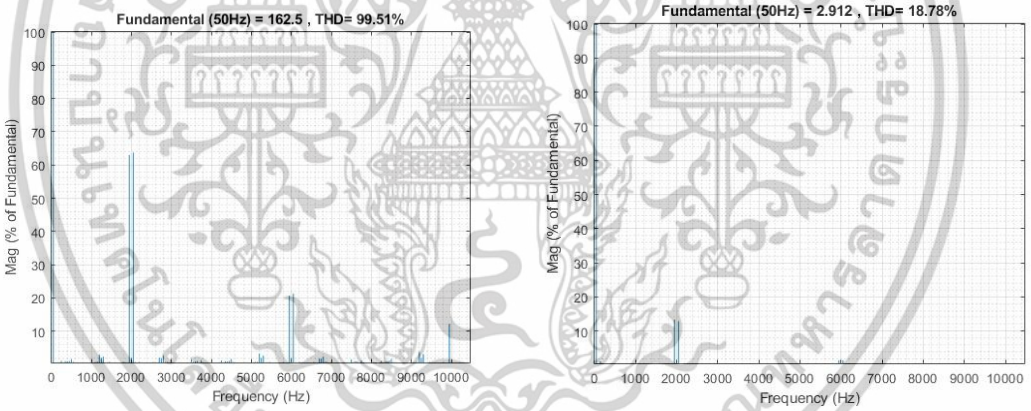
(ข) ฮาร์มอนิกของแรงดันที่ค่าดิวตี้ 30% **(ค)** ฮาร์มอนิกของกระแสที่ค่าดิวตี้ 30%

รูปที่ 5.27 รูปคลื่นสัญญาณและฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสที่ค่าดิวตี้ 30% จากการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



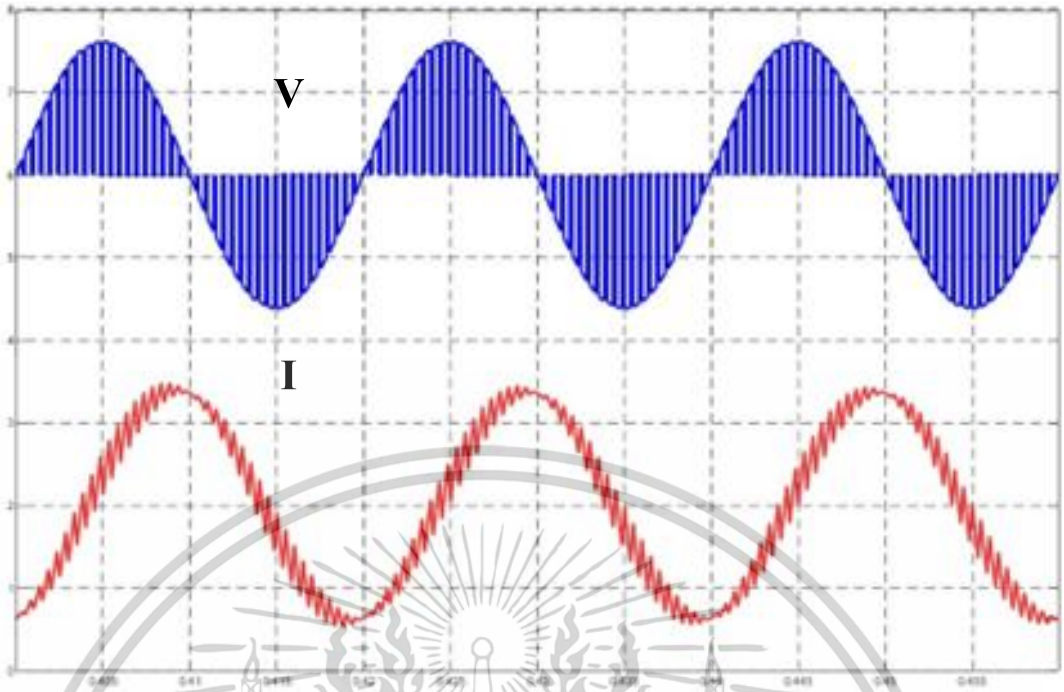
(ก) สัญญาณคลื่นแรงดันและกระแสดิวตี้ 50%



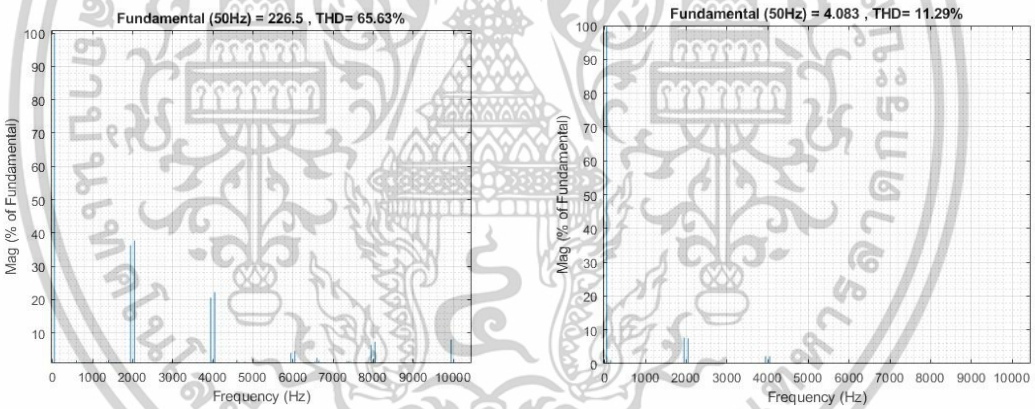
(ข) ฮาร์มอนิกของแรงดันที่ค่าดิวตี้ 50% **(ค)** ฮาร์มอนิกของกระแสที่ค่าดิวตี้ 50%

รูปที่ 5.28 รูปคลื่นสัญญาณและฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสที่ค่าดิวตี้ 50% จากการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



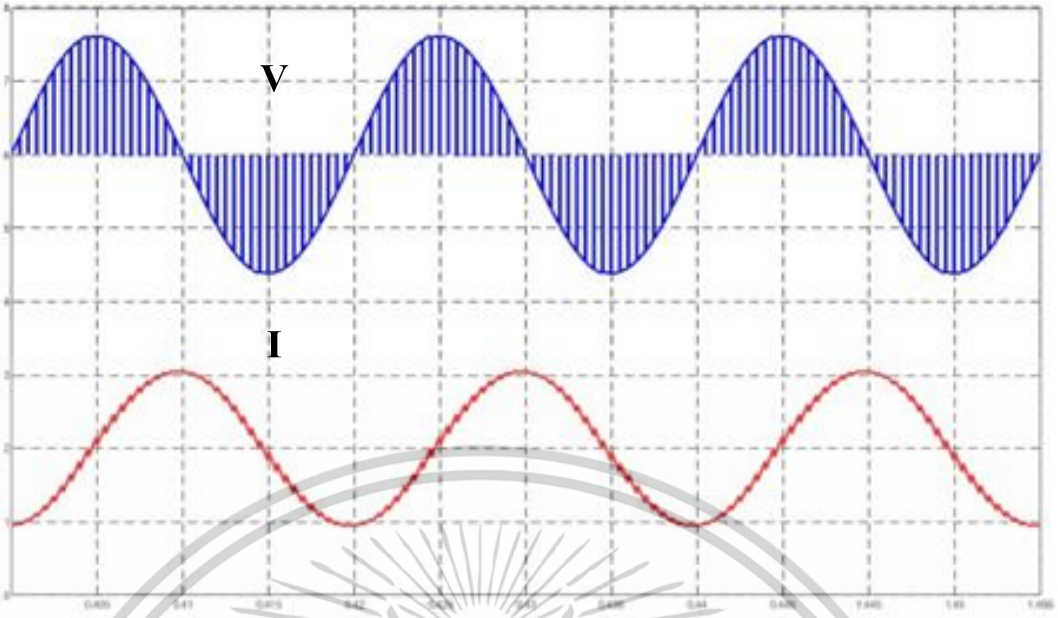
(ก) สัญญาณคลื่นแรงดันและกระแสดิวตี้ 70%



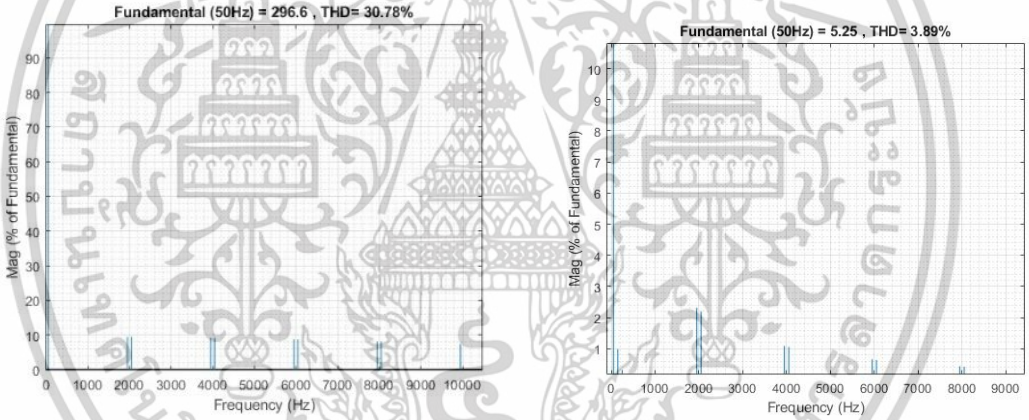
(ข) ฮาร์มอนิกของแรงดันที่ค่าดิวตี้ 70% **(ค)** ฮาร์มอนิกของกระแสที่ค่าดิวตี้ 70%

รูปที่ 5.29 รูปคลื่นสัญญาณและฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสที่ค่าดิวตี้ 70% จากการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) สัญญาณคลื่นแรงดันและกระแสดิวตี้ 90%

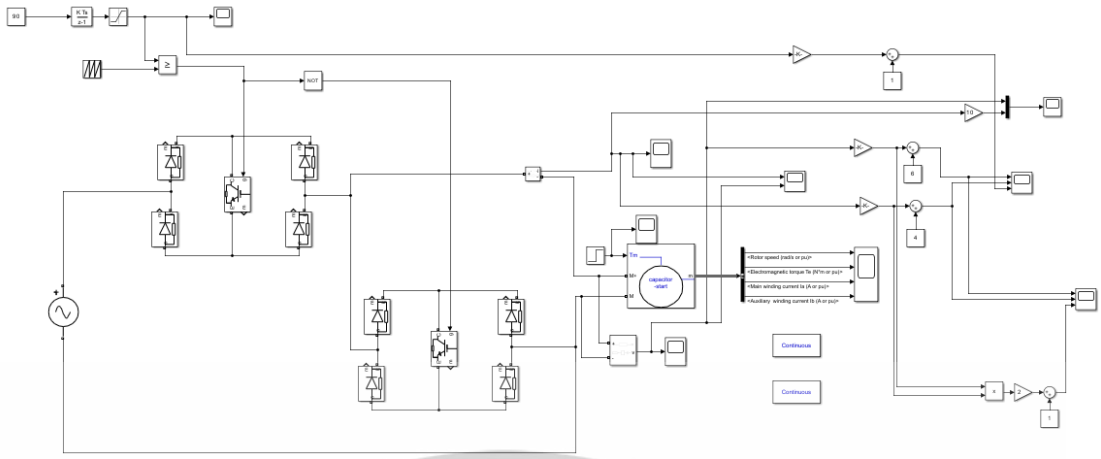


(ข) ฮาร์มอนิกของแรงดันที่ค่าดิวตี้ 90% **(ค)** ฮาร์มอนิกของกระแสที่ค่าดิวตี้ 90%

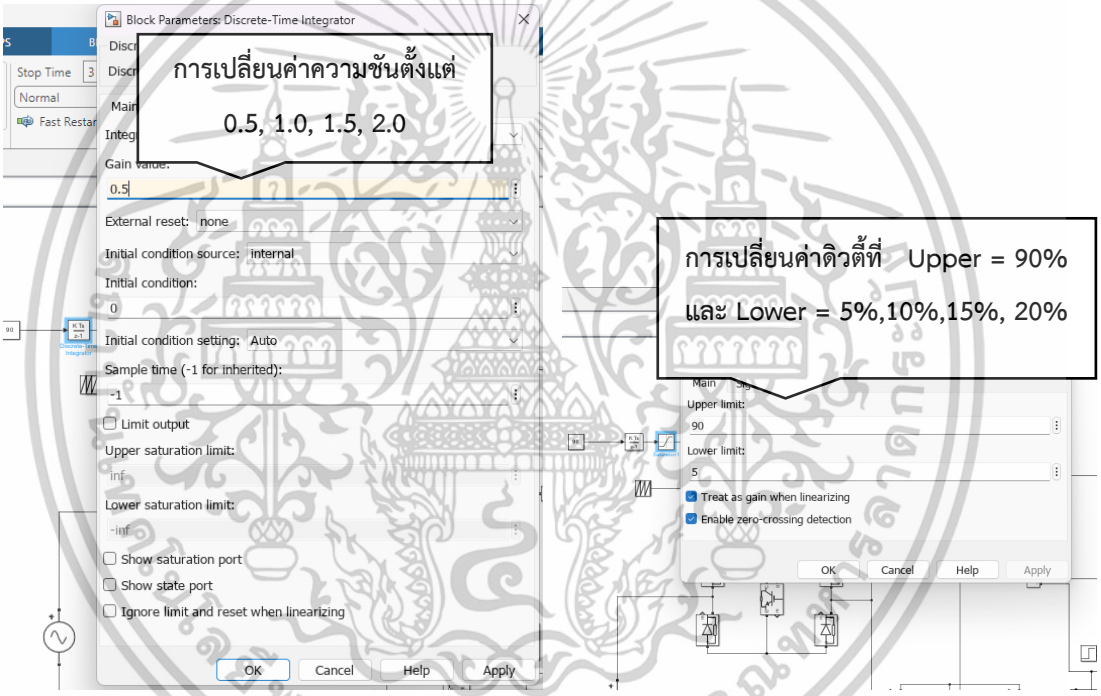
รูปที่ 5.30 รูปคลื่นสัญญาณและฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสที่ค่าดิวตี้ 90% จากการจำลอง

การจำลองแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชันตั้งแต่ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 และที่ค่าดิวตี้ 5-90%, 10-90%, 15-90% และ 20-90% เพื่อดูลักษณะพฤติกรรมความสัมพันธ์ของสัญญาณแรงดันและกระแสในแต่ช่วงค่าความชันและช่วงค่าดิวตี้ที่มีการใช้พลังงานเป็นค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้ชั่วขณะ (Instantaneous) โดยจากรูปที่ 5.31 (ก) การจำลองค่าความชันในโปรแกรม MATLAB/Simulink (ข) การเปลี่ยนค่าความชันที่ช่อง Gain Value และ (ค) การเปลี่ยนค่าดิวตี้ที่ช่อง Upper Limit และ Lower Limit ซึ่งจะได้อธิบายรายละเอียดตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

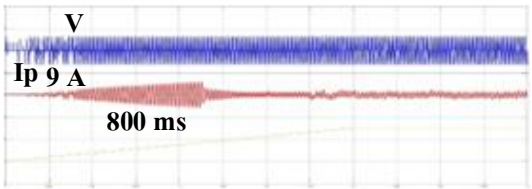


(ก) การจำลองจากโปรแกรม MATLAB/Simulink

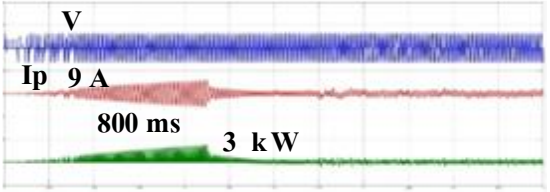


(ข) การเปลี่ยนค่าความชันที่ช่อง Gain Value **(ค)** การเปลี่ยนค่าดิวตี้ที่ช่อง Upper - Lower

รูปที่ 5.31 (ก) การจำลองค่าความชันในโปรแกรม MATLAB/Simulink (ข) การเปลี่ยนค่าความชันที่ช่อง Gain Value และ (ค) การเปลี่ยนค่าดิวตี้ที่ช่อง Upper Limit และ Lower Limit



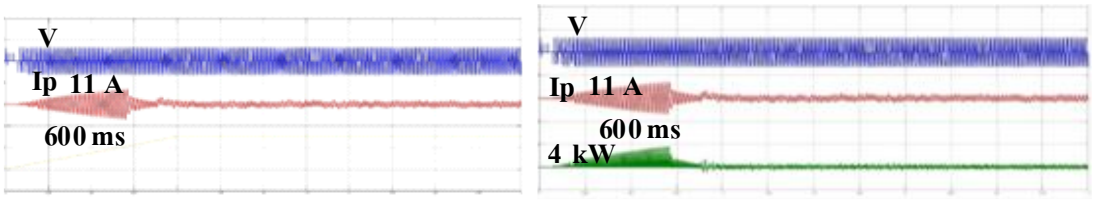
(ก) ค่าความชันตามเวลาที่ 0.5



(ข) กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวตี้ 5-90%

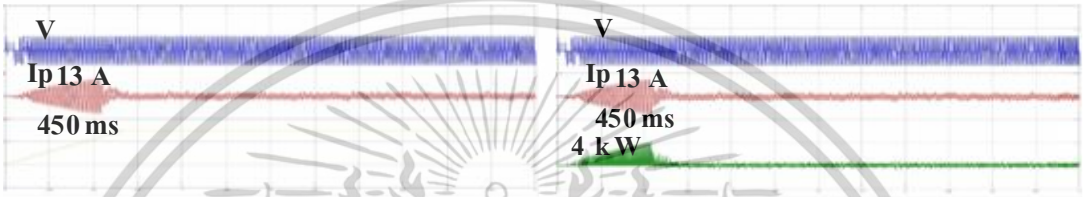
การจำลองแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 0.5 และที่ค่าดิวตี้ 5-90%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



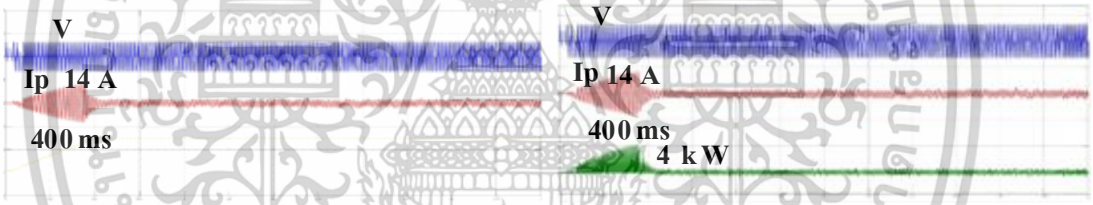
(ค) ค่าความชันตามเวลาที่ 1.0 **(ง)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 5-90%

การจำลองแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 1.0 และที่ค่าดิวดี้ 5-90%



(จ) ค่าความชันตามเวลาที่ 1.5 **(ฉ)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 5-90%

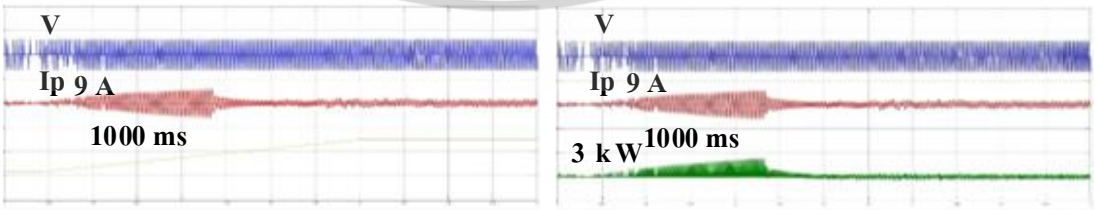
การจำลองแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 1.5 และที่ค่าดิวดี้ 5-90%



(ช) **(ซ)**

การจำลองแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 2.0 และที่ค่าดิวดี้ 5-90%

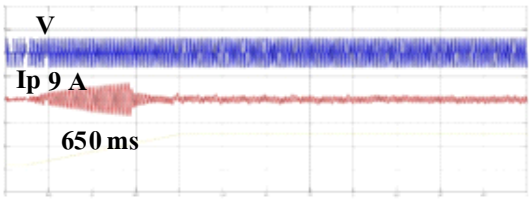
รูปที่ 5.32 การจำลองแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และที่ค่าดิวดี้ 5-90% เป็นค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้ชั่วขณะ (Instantaneous)

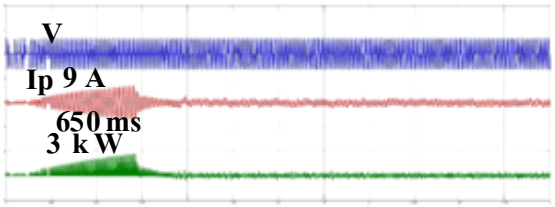


(ก) ค่าความชันตามเวลาที่ 0.5 **(ข)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 10-90%

การจำลองแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 0.5 และที่ค่าดิวดี้ 10-90%

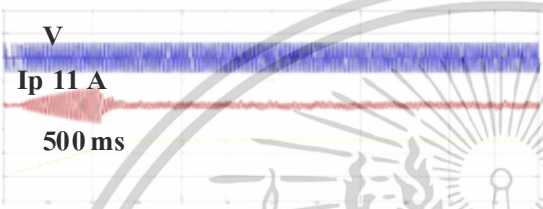
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

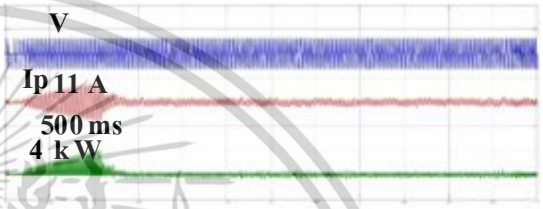




(ค) ค่าความชันตามเวลาที่ 1.0 **(ง)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 10-90%

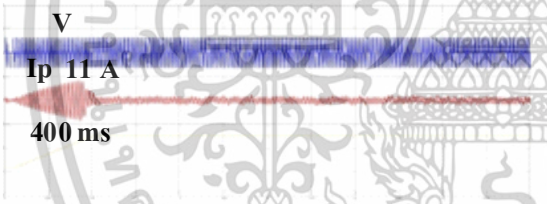
การจำลองแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 1.0 และที่ค่าดิวดี้ 10-90%

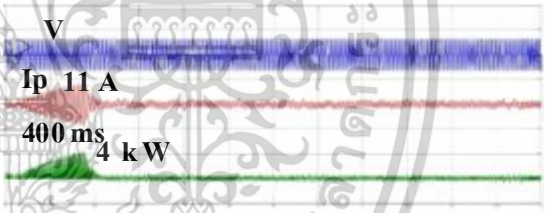




(จ) ค่าความชันตามเวลาที่ 1.5 **(ฉ)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 10-90%

การจำลองแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 1.5 และที่ค่าดิวดี้ 10-90%

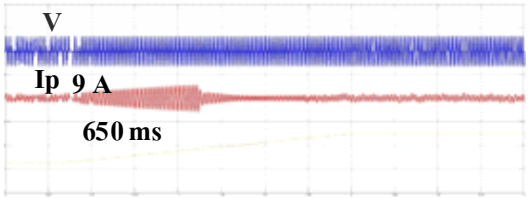


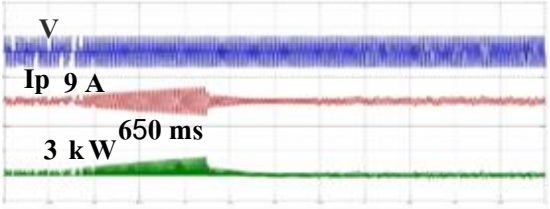


(ช) ค่าความชันตามเวลาที่ 2.0 **(ซ)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 10-90%

การจำลองแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 2.0 และที่ค่าดิวดี้ 10-90%

รูปที่ 5.33 การจำลองแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และที่ค่าดิวดี้ 10-90% เป็นค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้ชั่วขณะ (Instantaneous)

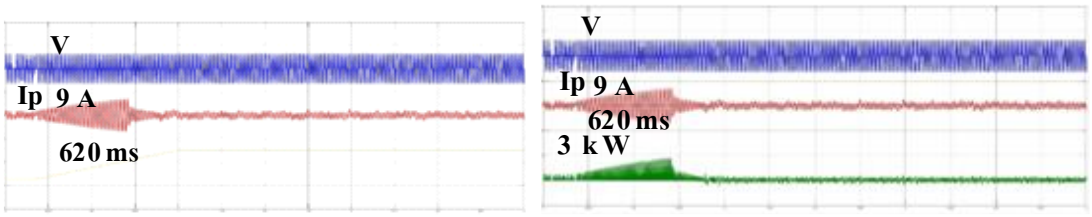




(ก) ค่าความชันตามเวลาที่ 0.5 **(ข)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 15-90%

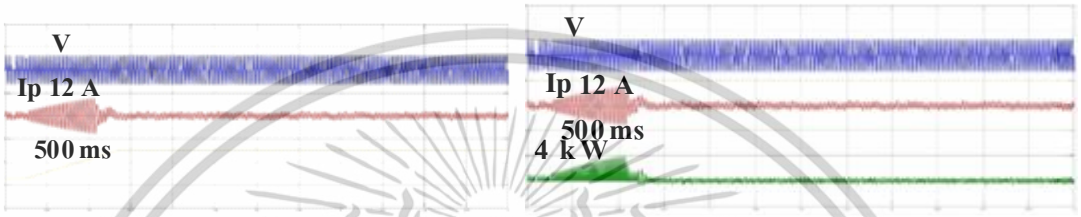
การจำลองแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 0.5 และที่ค่าดิวดี้ 15-90%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



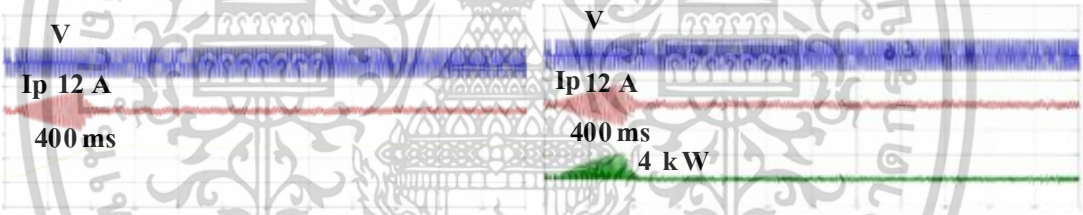
(ค) ค่าความชันตามเวลาที่ 1.0 **(ง)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 15-90%

การจำลองแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 1.0 และที่ค่าดิวดี้ 15-90%



(จ) ค่าความชันตามเวลาที่ 1.5 **(ฉ)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 15-90%

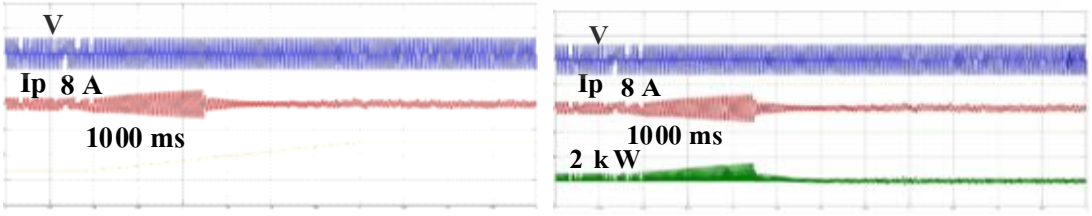
การจำลองแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 1.5 และที่ค่าดิวดี้ 15-90%



(ช) ค่าความชันตามเวลาที่ 2.0 **(ซ)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 15-90%

การจำลองแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 2.0 และที่ค่าดิวดี้ 15-90%

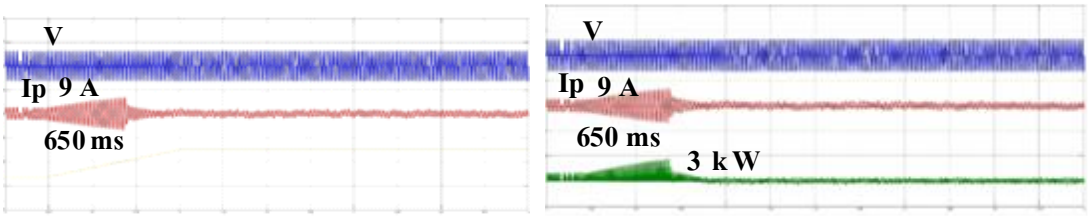
รูปที่ 5.34 การจำลองแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และที่ค่าดิวดี้ 15-90% เป็นค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้ชั่วขณะ (Instantaneous)



(ก) ค่าความชันตามเวลาที่ 0.5 **(ข)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 20-90%

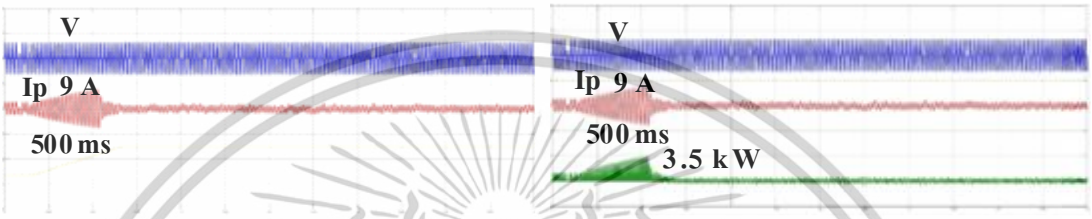
การจำลองแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 0.5 และที่ค่าดิวดี้ 20-90%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



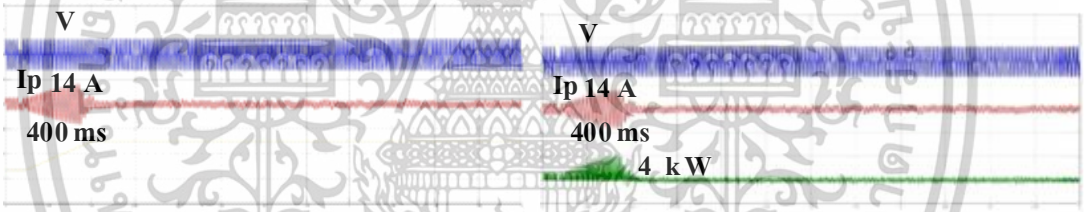
(ค) ค่าความชันตามเวลาที่ 1.0 **(ง)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 20-90%

การจำลองแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 1.0 และที่ค่าดิวดี้ 20-90%



(จ) ค่าความชันตามเวลาที่ 1.5 **(ฉ)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 20-90%

การจำลองแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 1.5 และที่ค่าดิวดี้ 20-90%



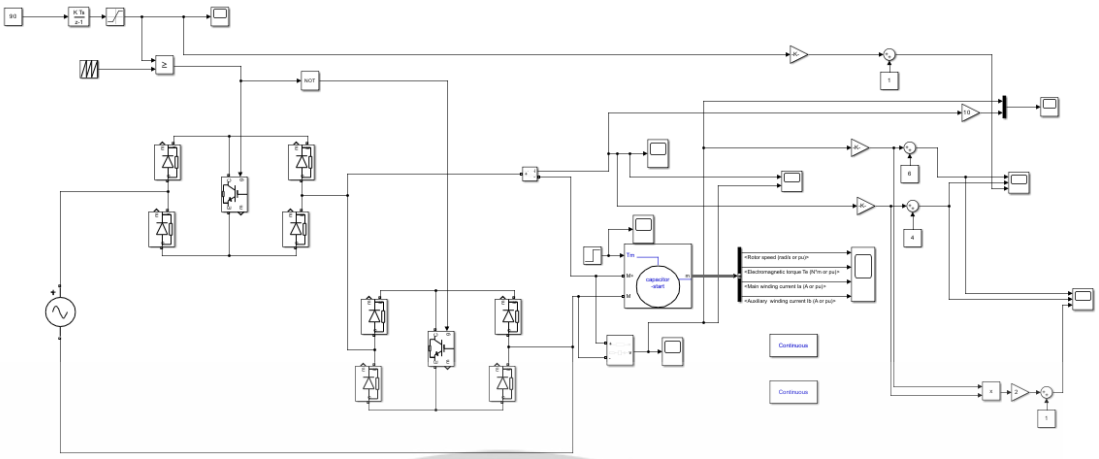
(ช) ค่าความชันตามเวลาที่ 2.0 **(ซ)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 20-90%

การจำลองแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 2.0 และที่ค่าดิวดี้ 20-90%

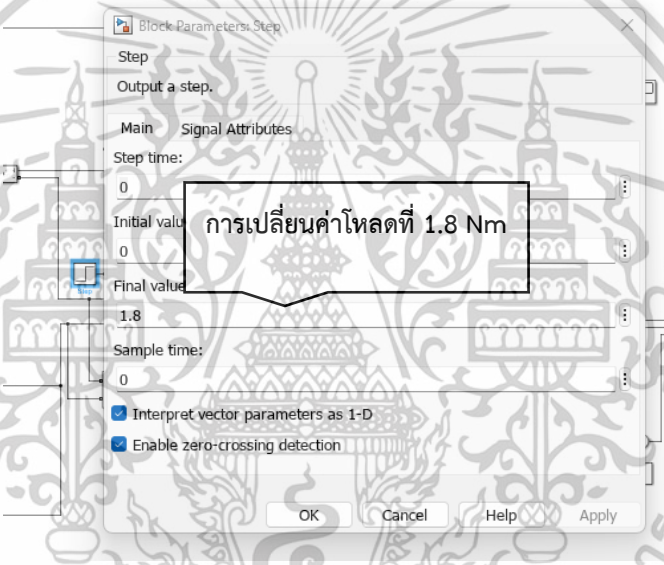
รูปที่ 5.35 การจำลองแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และที่ค่าดิวดี้ 20-90% เป็นค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้ชั่วขณะ (Instantaneous)

การจำลองแบบมีโหลดที่ค่าความชันตั้งแต่ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 และที่ค่าดิวดี้ 5-90%, 10-90%, 15-90% และ 20-90% เพื่อดูลักษณะพฤติกรรมความสัมพันธ์ของสัญญาณแรงดันและกระแสในแต่ช่วงค่าความชันและช่วงค่าดิวตี้ที่มีการใช้พลังงานเป็นค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้ชั่วขณะ (Instantaneous) โดยจากรูปที่ 5.36 การจำลองค่าความชันในโปรแกรม MATLAB/Simulink (ข) การเปลี่ยนค่าใส่โหลดที่ช่อง Final Value ในที่จะใส่โหลดที่ 1.8 Nm ซึ่งจะได้อธิบายในรูปต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

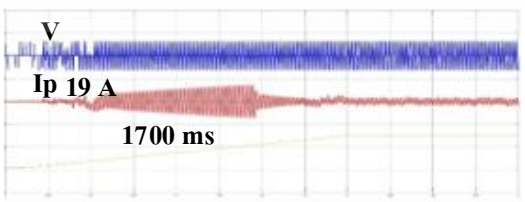


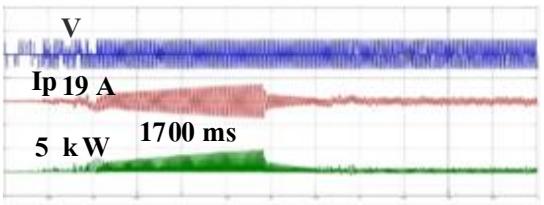
(ก) การจำลองค่าความชันในโปรแกรม MATLAB/Simulink



(ข) การเปลี่ยนค่าใส่โหลดที่ช่อง Final Value

รูปที่ 5.36 (ก) การจำลองค่าความชันในโปรแกรม MATLAB/Simulink (ข) การเปลี่ยนค่าใส่โหลดที่ช่อง Final Value

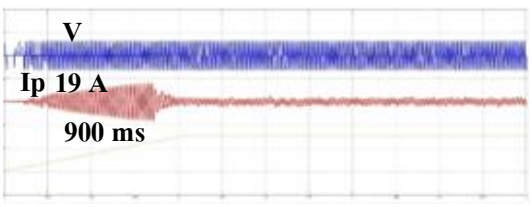


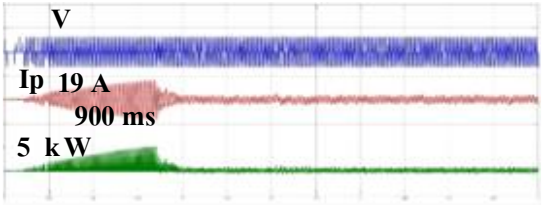


(ก) ค่าความชันตามเวลาที่ 0.5 **(ข)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวตี้ 5-90%

การจำลองแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 0.5 และที่ค่าดิวตี้ 5-90%

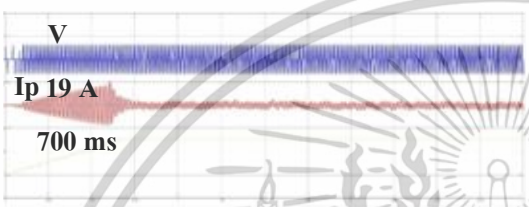
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

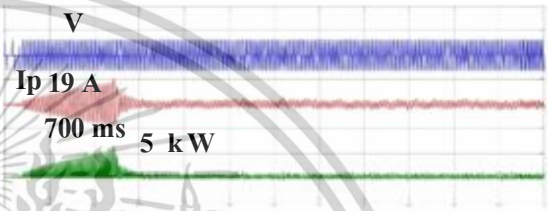




(ค) ค่าความชันตามเวลาที่ 1.0 **(ง)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 5-90%

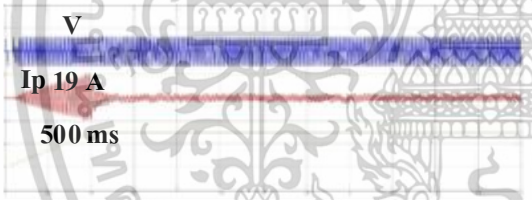
การจำลองแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 1.0 และที่ค่าดิวดี้ 5-90%

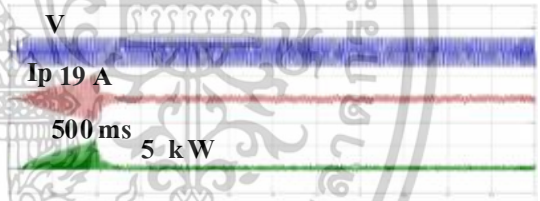




(จ) ค่าความชันตามเวลาที่ 1.5 **(ฉ)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 5-90%

การจำลองแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 1.5 และที่ค่าดิวดี้ 5-90%

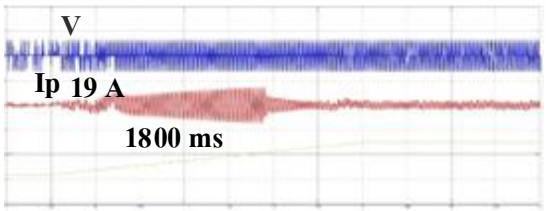


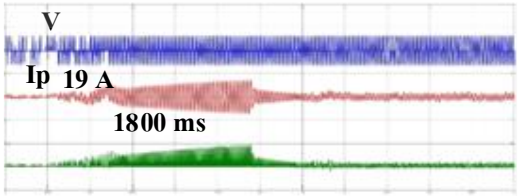


(ช) ค่าความชันตามเวลาที่ 2.0 **(ซ)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 5-90%

การจำลองแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 2.0 และที่ค่าดิวดี้ 5-90%

รูปที่ 5.37 การจำลองแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และที่ค่าดิวดี้ 5-90% เป็นค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้ชั่วขณะ (Instantaneous)

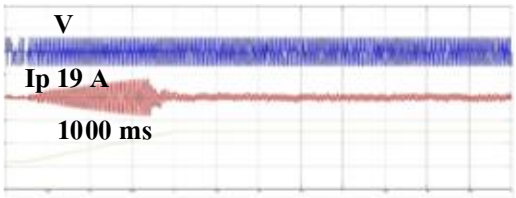


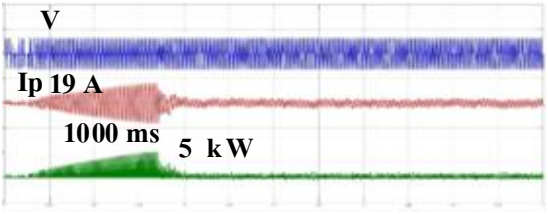


(ก) ค่าความชันตามเวลาที่ 0.5 **(ข)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 10-90%

การจำลองแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 0.5 และที่ค่าดิวดี้ 10-90%

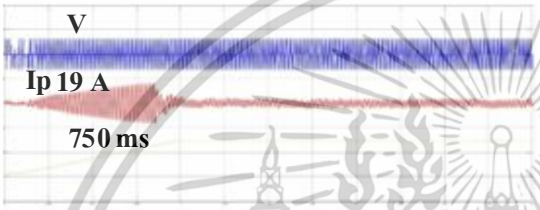
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

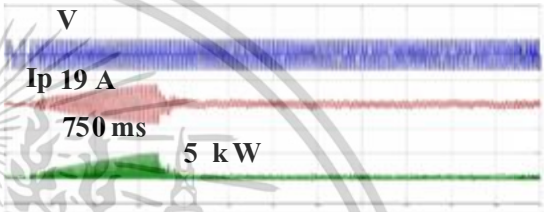




(ค) ค่าความชันตามเวลาที่ 1.0 **(ง)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 10-90%

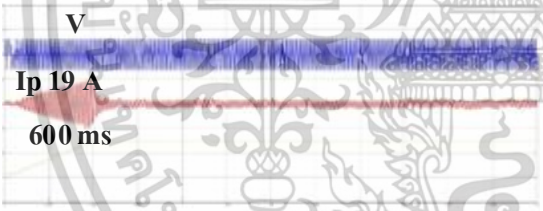
การจำลองแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 1.0 และที่ค่าดิวดี้ 10-90%

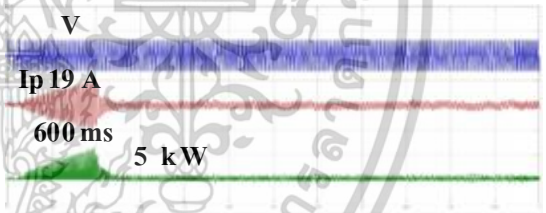




(จ) ค่าความชันตามเวลาที่ 1.5 **(ฉ)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 10-90%

การจำลองแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 1.5 และที่ค่าดิวดี้ 10-90%

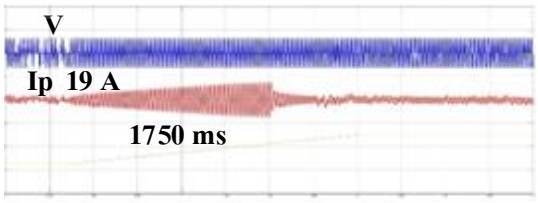


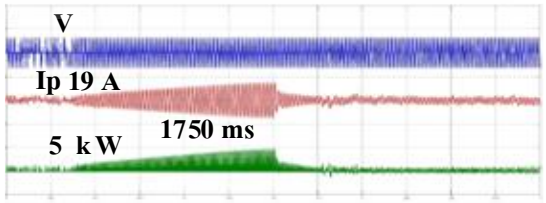


(ช) ค่าความชันตามเวลาที่ 2.0 **(ซ)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 10-90%

การจำลองแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 2.0 และที่ค่าดิวดี้ 10-90%

รูปที่ 5.38 การจำลองแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และที่ค่าดิวดี้ 10-90%
เป็นค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้ชั่วขณะ (Instantaneous)

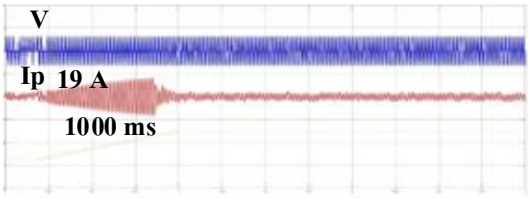


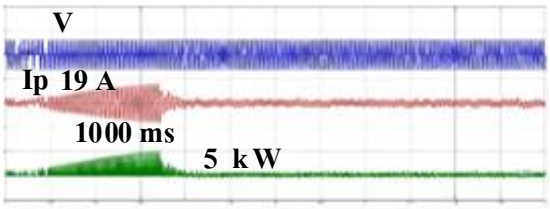


(ก) ค่าความชันตามเวลาที่ 0.5 **(ข)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 15-90%

การจำลองแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 0.5 และที่ค่าดิวดี้ 15-90%

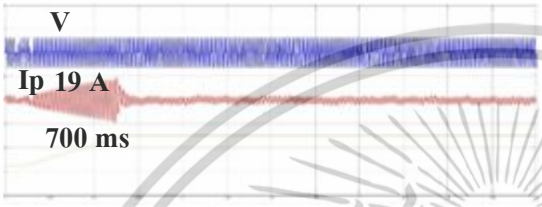
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

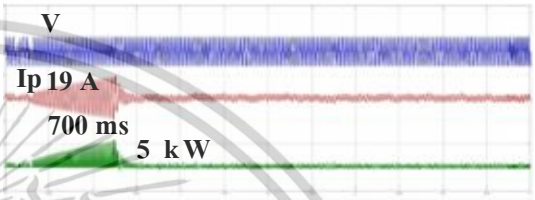




(ค) ค่าความชันตามเวลาที่ 1.0 **(ง)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 15-90%

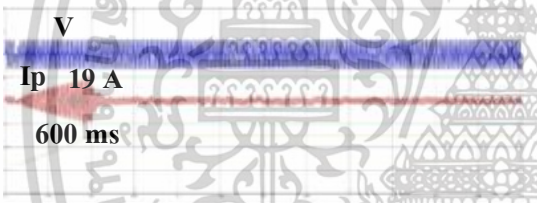
การจำลองแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 1.0 และที่ค่าดิวดี้ 15-90%

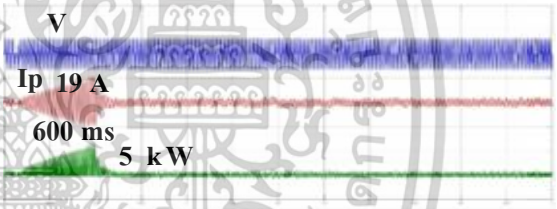




(จ) ค่าความชันตามเวลาที่ 1.5 **(ฉ)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 15-90%

การจำลองแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 1.5 และที่ค่าดิวดี้ 15-90%

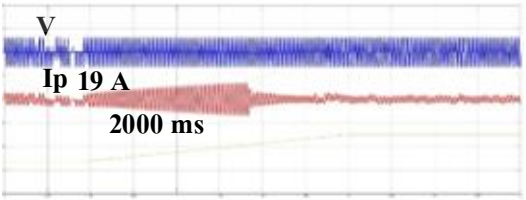


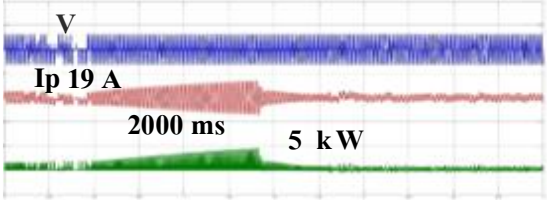


(ช) ค่าความชันตามเวลาที่ 2.0 **(ซ)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 15-90%

การจำลองแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 2.0 และที่ค่าดิวดี้ 15-90%

รูปที่ 5.39 การจำลองแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และที่ค่าดิวดี้ 15-90% เป็นค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้ชั่วขณะ (Instantaneous)

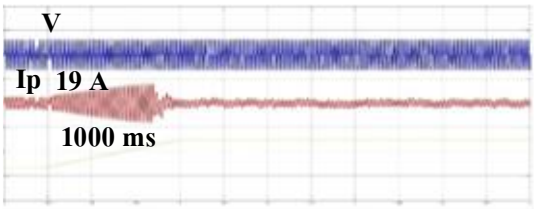




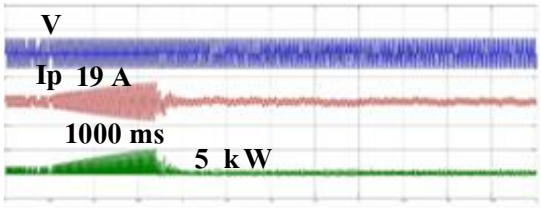
(ก) ค่าความชันตามเวลาที่ 0.5 **(ข)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 20-90%

การจำลองแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 0.5 และที่ค่าดิวดี้ 20-90%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

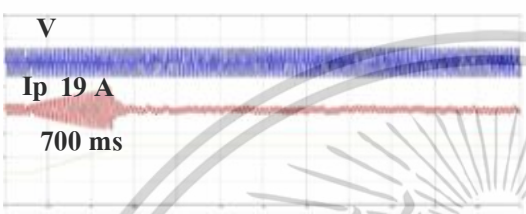


(ค) ค่าความชันตามเวลาที่ 1.0

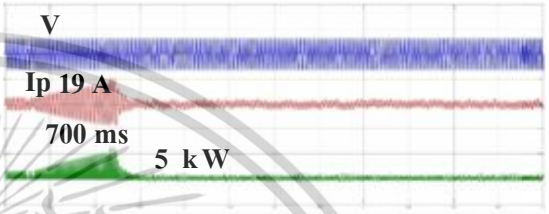


(ง) กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 20-90%

การจำลองแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 1.0 และที่ค่าดิวดี้ 20-90%

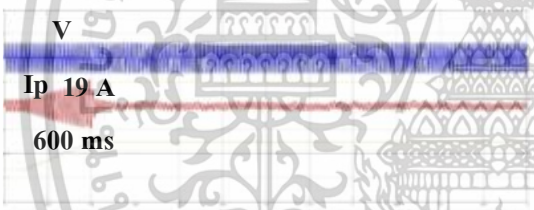


(จ) ค่าความชันตามเวลาที่ 1.5

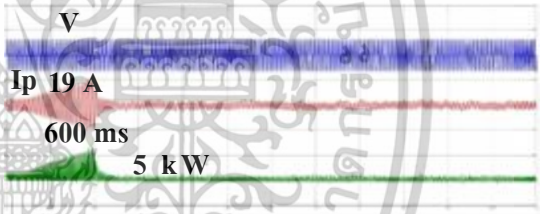


(ฉ) กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 20-90%

การจำลองแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 1.5 และที่ค่าดิวดี้ 20-90%



(ช) ค่าความชันตามเวลาที่ 2.0



(ซ) กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 20-90%

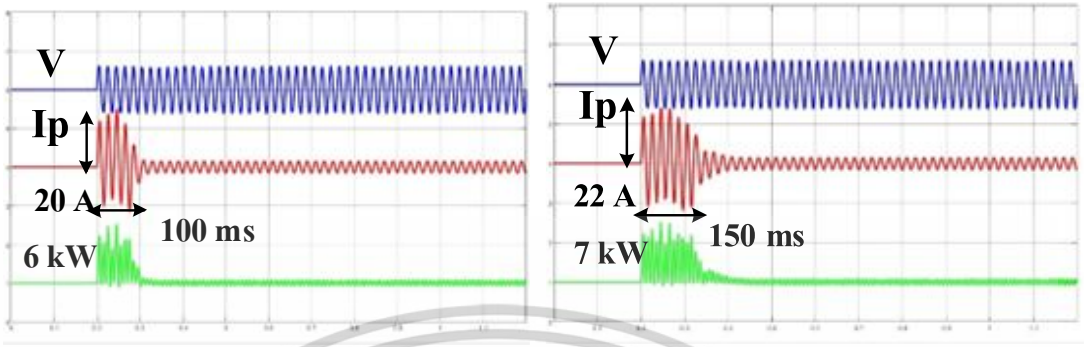
การจำลองแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 2.0 และที่ค่าดิวดี้ 20-90%

รูปที่ 5.40 การจำลองแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และที่ค่าดิวดี้ 20-90% เป็นค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้ชั่วขณะ (Instantaneous)

การจำลองสตาร์ทมอเตอร์แบบโดยตรง Direct On Line : DOL รูป (ก) เป็นการสตาร์ทมอเตอร์แบบโดยตรงที่ไม่มีโหลด และรูป (ข) เป็นการสตาร์ทมอเตอร์แบบโดยตรงที่ใส่โหลดเข้าไปที่ 1.3 Nm เพื่อดูความสัมพันธ์ของค่ากระแสขณะทำการเริ่มต้นการหมุนและค่าพลังงานเป็นค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้ชั่วขณะ (Instantaneous) ที่ใช้เข้าไปเพื่อทำการเปรียบเทียบซึ่งจะพบว่าการหมุนโดยตรงแบบไม่มีโหลดกินพลังงานน้อยกว่าแบบมีโหลดเกือบครึ่งและช่วงระยะเวลาจะสั้นกว่า สรุปกล่าวคือการเริ่มต้นค่าความชันมากจะใช้เวลาน้อย กินกระแสมากและพลังงานมากในชั่วขณะซึ่งเป็นผลคูณของแรงดันและกระแสจะมีพลังงานสละน้อยคือมอเตอร์จะไม่ร้อนมาก แต่หากค่าเริ่มต้นมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

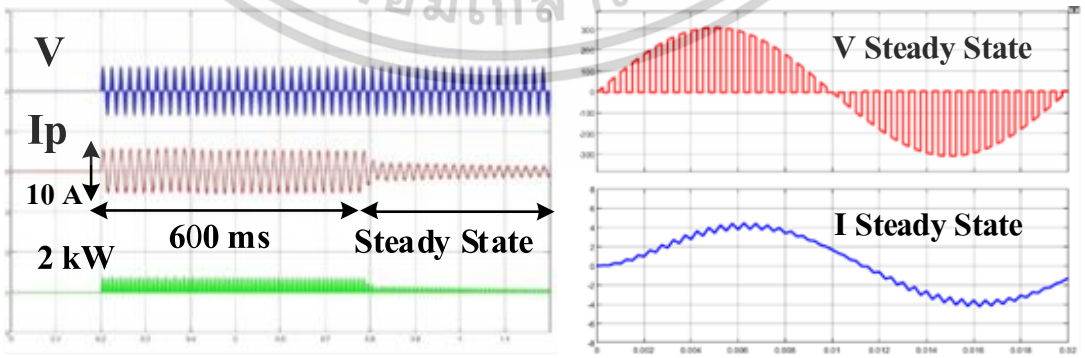
ค่าความชันน้อยจะใช้เวลามาก กินกระแสน้อยและพลังงานน้อยในชั่วขณะซึ่งเป็นผลคูณของแรงดันและกระแสจะมีพลังงานสละน้อยคือมอเตอร์จะมีความร้อนนั้นเอง



(ก) DOL แบบไม่มีโหลด **(ข)** DOL แบบมีโหลด 1.3 Nm

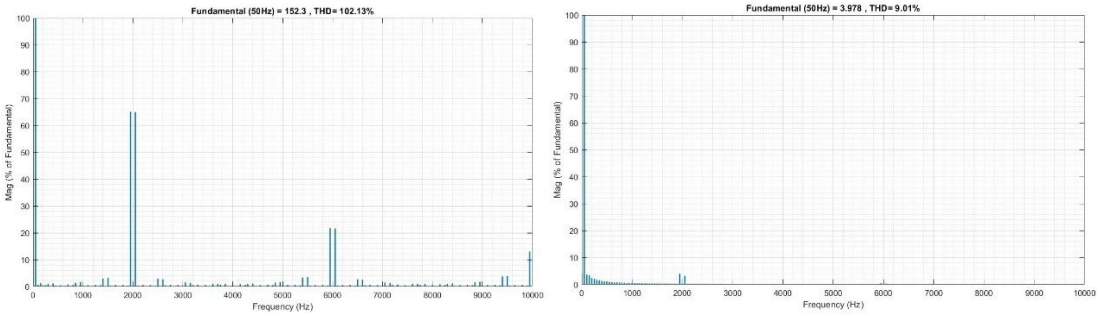
รูปที่ 5.41 การจำลองเริ่มหมุนมอเตอร์แบบโดยตรง Direct On Line : DOL เป็นค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้ชั่วขณะ (Instantaneous)

การจำลองสตาร์ทมอเตอร์แบบการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ทด้วยโดยวิธีการพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบอะซิงโครนัส Asynchronous PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS โดยการควบคุมการป้อนกลับที่กระแสของมอเตอร์สำหรับสำหรับการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลและการทำงานที่ค่าดิวตี้ 50% และ 90% ที่โหลด 1.1 Nm ,1.3 Nm และ 1.8 Nm เพื่อดูความสัมพันธ์ของค่ากระแสค่าแรงดันขณะทำการเริ่มต้นการหมุนและค่าพลังงานเป็นค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้ชั่วขณะ (Instantaneous) เพื่อดูสถานะการทำงานของการทดสอบเปรียบเทียบช่วงเข้าสู่การทำงานสภาวะคงที่ (Steady State) ของรูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแส และค่าของ ฮาร์มอ นิกของคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสที่ค่าดิวตี้ 50% และ 90% ซึ่งจะได้กล่าวในลำดับต่อไป



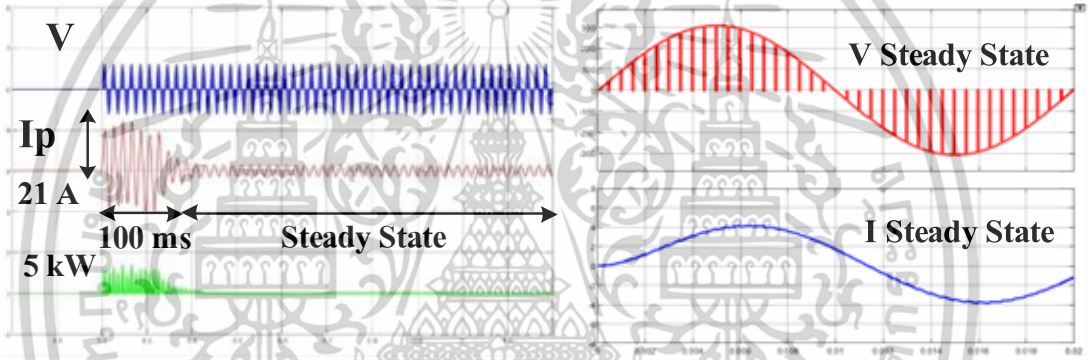
(ก) PWMSS แบบมีโหลด 1.1 Nm ที่ดิวตี้ 50% **(ข)** ช่วงแรงดันและกระแสคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

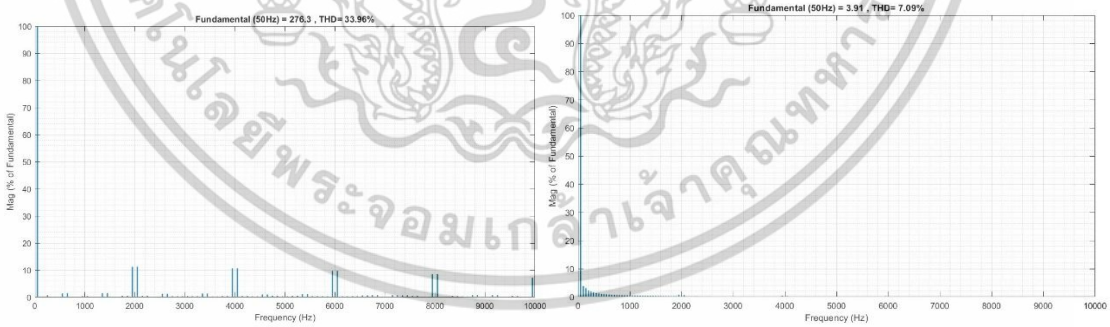


(ค) ฮาร์มอนิกของแรงดันที่ค่าดิวตี้ 50% **(ง)** ฮาร์มอนิกของกระแสที่ค่าดิวตี้ 50%

รูปที่ 5.42 การจำลองเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลของมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าดิวตี้ 50% ที่โหลด 1.1 Nm



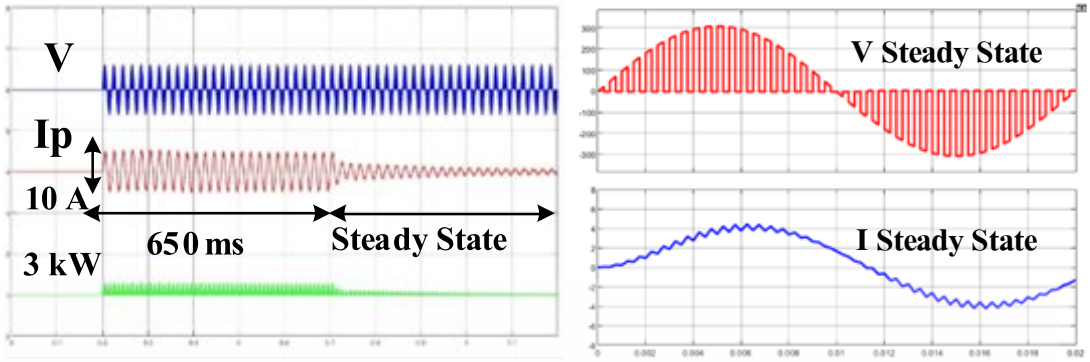
(ก) PWMSS แบบมีโหลด 1.1 Nm ที่ดิวตี้ 90% **(ข)** ช่วงแรงดันและกระแสคงที่



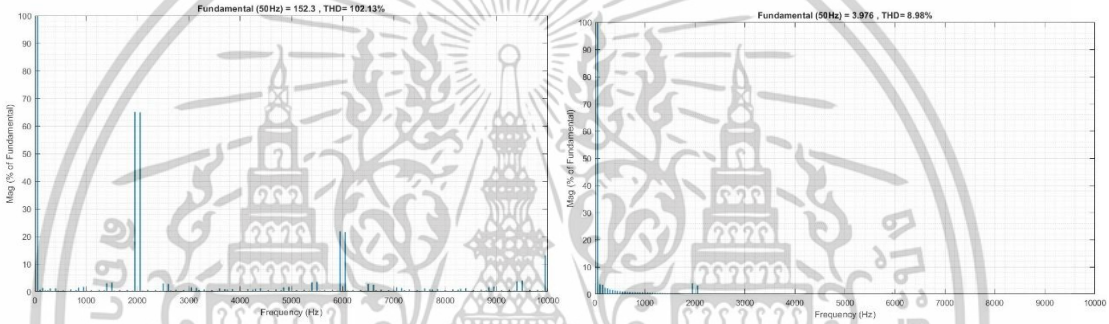
(ค) ฮาร์มอนิกของแรงดันที่ค่าดิวตี้ 90% **(ง)** ฮาร์มอนิกของกระแสที่ค่าดิวตี้ 90%

รูปที่ 5.43 การจำลองเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลของมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าดิวตี้ 90% ที่โหลด 1.1 Nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

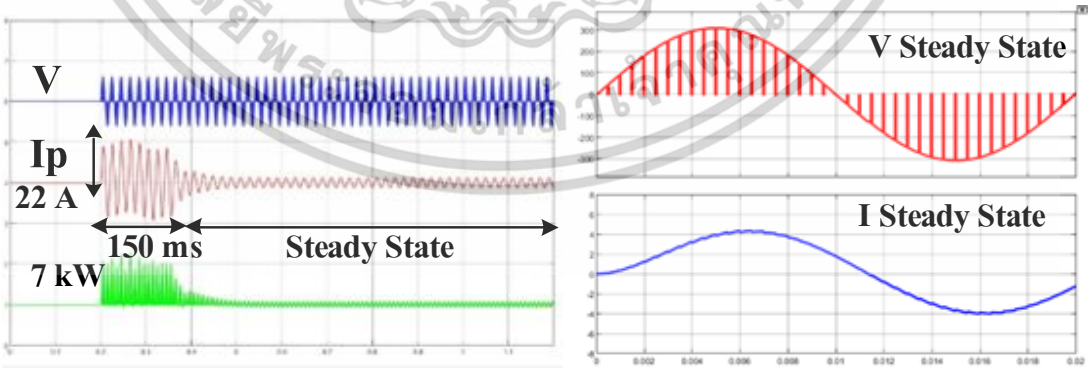


(ก) PWMSS แบบมีโหลด 1.3 Nm ที่ดิวตี้ 50% **(ข)** ช่วงแรงดันและกระแสคงที่



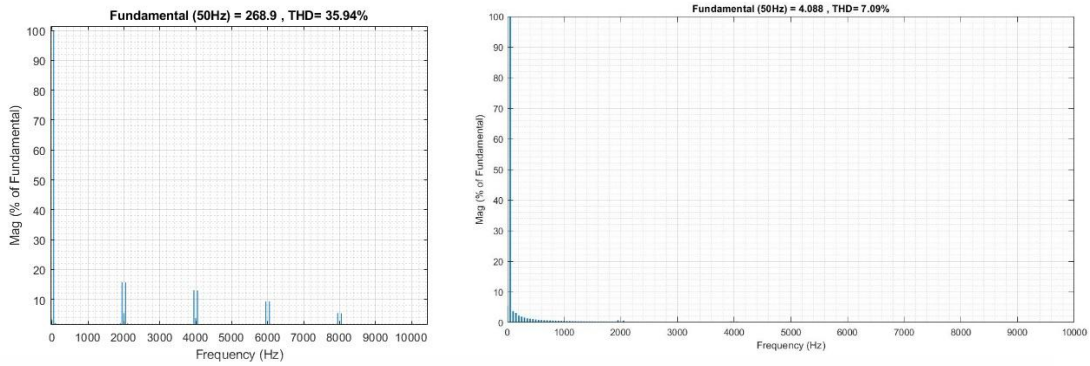
(ค) ฮาร์มอนิกของแรงดันที่ค่าดิวตี้ 50% **(ง)** ฮาร์มอนิกของกระแสที่ค่าดิวตี้ 50%

รูปที่ 5.44 การจำลองเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลของมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าดิวตี้ 50% ที่โหลด 1.3 Nm



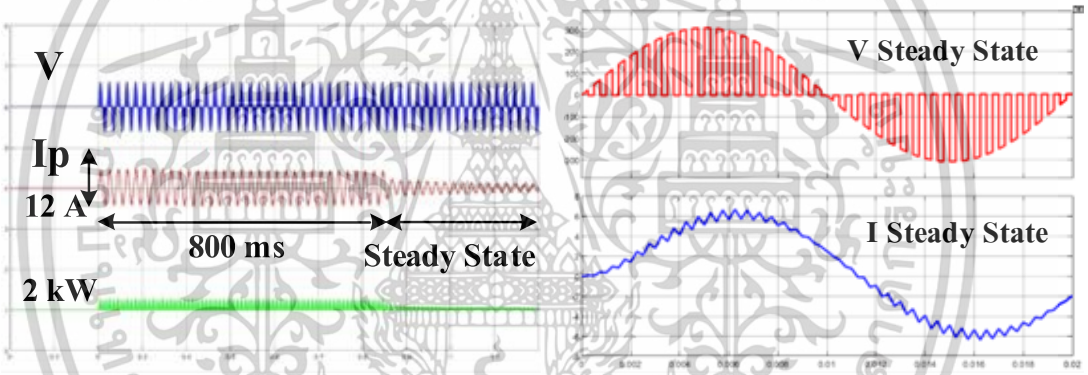
(ก) PWMSS แบบมีโหลด 1.3 Nm ที่ดิวตี้ 90% **(ข)** ช่วงแรงดันและกระแสคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

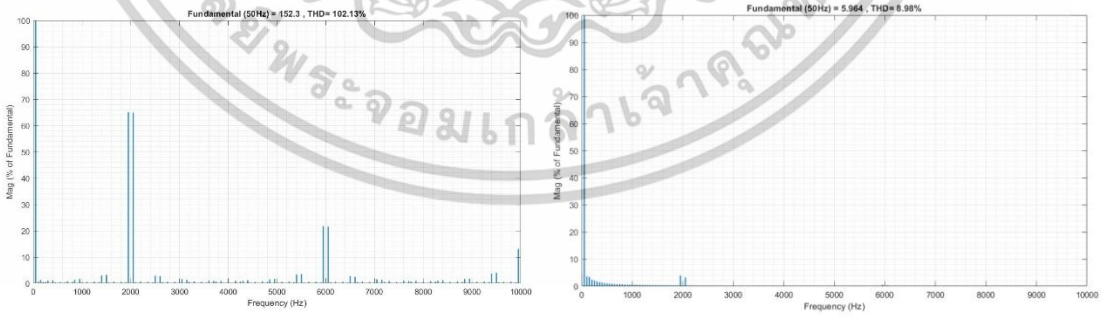


(ค) ฮาร์มอนิกของแรงดันที่ค่าดิวตี้ 90% **(ง)** ฮาร์มอนิกของกระแสที่ค่าดิวตี้ 90%

รูปที่ 5.45 การจำลองเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลของมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าดิวตี้ 90% ที่โหลด 1.3 Nm



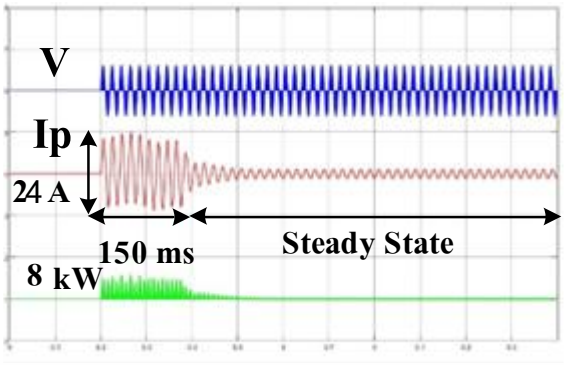
(ก) PWMSS แบบมีโหลด 1.8 Nm ที่ดิวตี้ 50% **(ข)** ช่วงแรงดันและกระแสคงที่

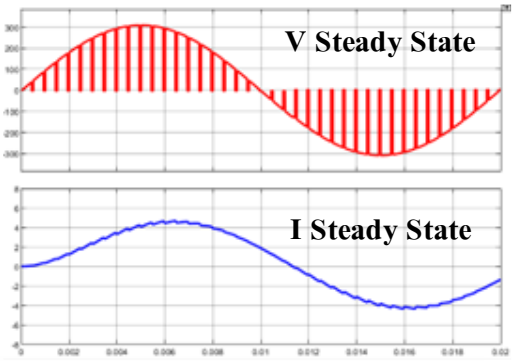


(ค) ฮาร์มอนิกของแรงดันที่ค่าดิวตี้ 50% **(ง)** ฮาร์มอนิกของกระแสที่ค่าดิวตี้ 50%

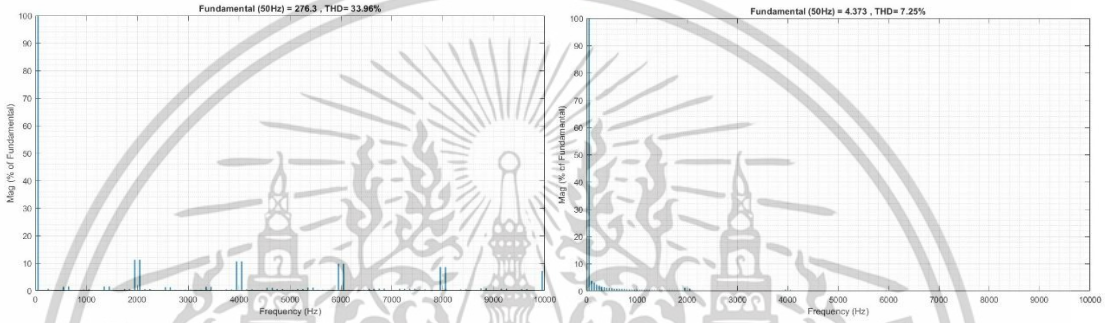
รูปที่ 5.46 การจำลองเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลของมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าดิวตี้ 50% ที่โหลด 1.8 Nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





(ก) PWMSS แบบมีโหลด 1.8 Nm ที่ดิวตี้ 90% **(ข)** ช่วงแรงดันและกระแสคงที่

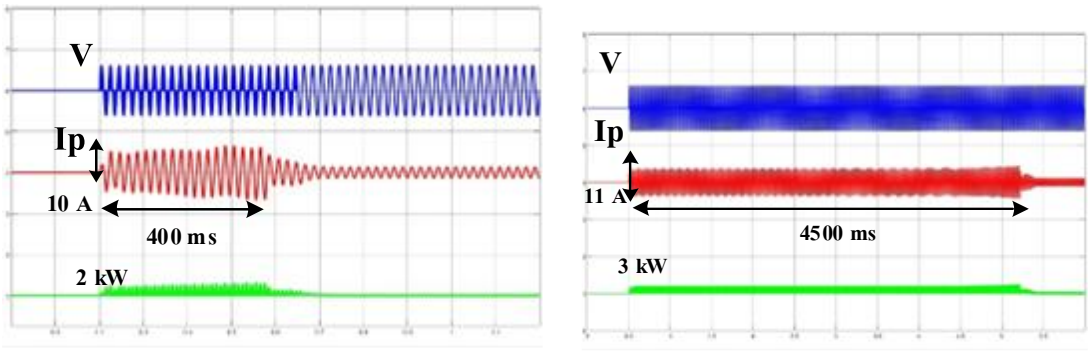


(ค) ฮาร์มอนิกของแรงดันที่ค่าดิวตี้ 90% **(ง)** ฮาร์มอนิกของกระแสที่ค่าดิวตี้ 90%

รูปที่ 5.47 การจำลองเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลของมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าดิวตี้ 90% ที่โหลด 1.8 Nm

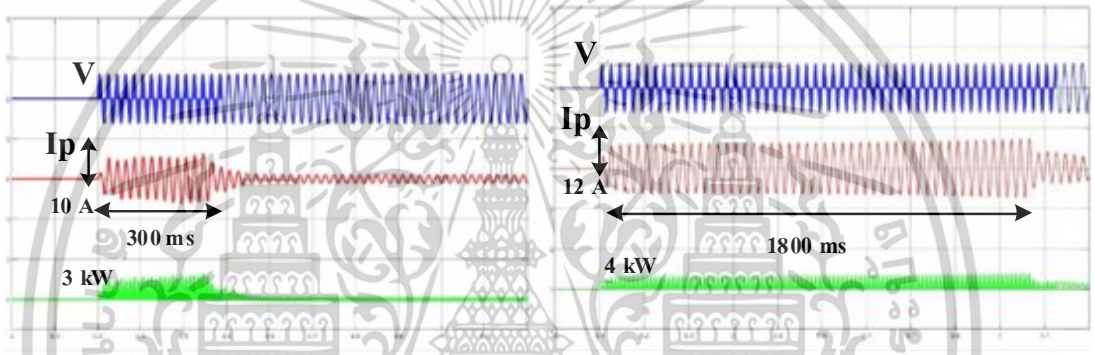
เป็นการจำลองสตาร์ทมอเตอร์แบบการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ทด้วยโดยวิธีการพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบอะซิงโครนัส Asynchronous PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS โดยการควบคุมการป้อนกลับที่กระแสของมอเตอร์สำหรับสำหรับการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลที่ค่าควบคุมกระแสพิกัด 200%, 250% ,300%, 350%, และ 400% โดยการเปรียบแบบไม่มีโหลดและแบบมีโหลดที่ 1.1 Nm เพื่อดูความสัมพันธ์ของค่าควบคุมกระแสพิกัดและระยะเวลาขณะทำการเริ่มต้นการหมุนและค่าพลังงานเป็นค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้ชั่วขณะ (Instantaneous) ซึ่งจะได้กล่าวในลำดับต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



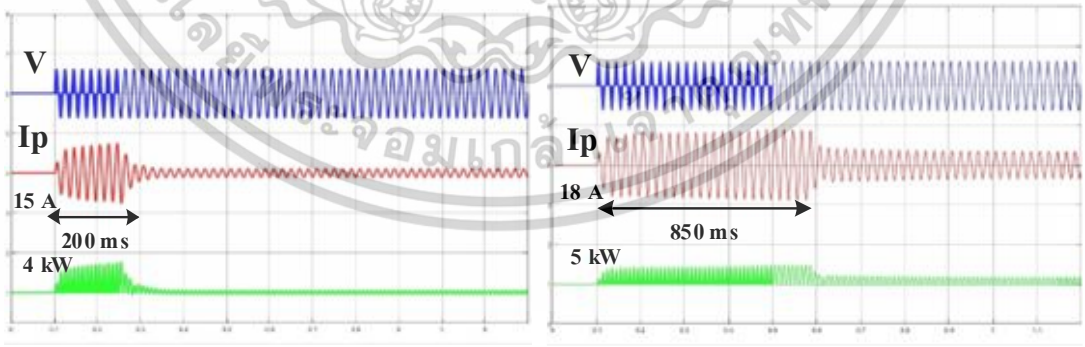
(ก) PWMSS ควบคุมกระแสพิกัด 200% ไม่มีโหลด **(ข)** PWMSS ควบคุมกระแสพิกัด 200% มีโหลด

รูปที่ 5.48 การจำลองเริ่มหมุนมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าควบคุมกระแสพิกัด 200% แบบไม่มีโหลดและแบบมีโหลด 1.1 Nm



(ก) PWMSS ควบคุมกระแสพิกัด 250% ไม่มีโหลด **(ข)** PWMSS ควบคุมกระแสพิกัด 250% มีโหลด

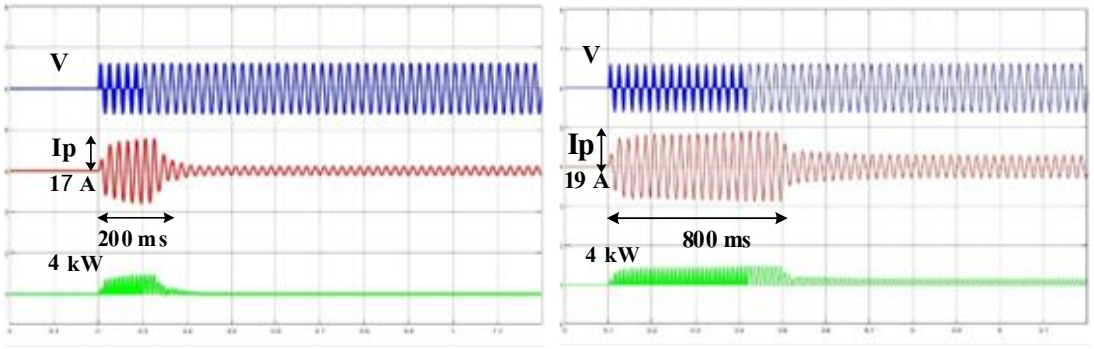
รูปที่ 5.49 การจำลองเริ่มหมุนมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าควบคุมกระแสพิกัด 250% แบบไม่มีโหลดและแบบมีโหลด 1.1 Nm



(ก) PWMSS ควบคุมกระแสพิกัด 300% ไม่มีโหลด **(ข)** PWMSS ควบคุมกระแสพิกัด 300% มีโหลด

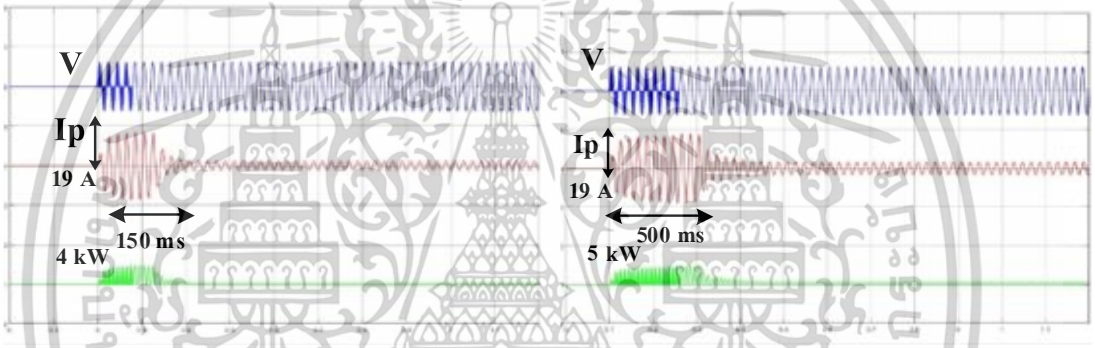
รูปที่ 5.50 การจำลองเริ่มหมุนมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าควบคุมกระแสพิกัด 300% แบบไม่มีโหลดและแบบมีโหลด 1.1 Nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) PWMSS ควบคุมกระแสพิกัด 350% ไม่มีโหลด **(ข)** PWMSS ควบคุมกระแสพิกัด 350% มีโหลด

รูปที่ 5.51 การจำลองเริ่มหมุนมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าควบคุมกระแสพิกัด 350% แบบไม่มีโหลดและแบบมีโหลด 1.1 Nm



(ก) PWMSS ควบคุมกระแสพิกัด 400% ไม่มีโหลด **(ข)** PWMSS ควบคุมกระแสพิกัด 400% มีโหลด

รูปที่ 5.52 การจำลองเริ่มหมุนมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าควบคุมกระแสพิกัด 400% แบบไม่มีโหลดและแบบมีโหลด 1.1 Nm

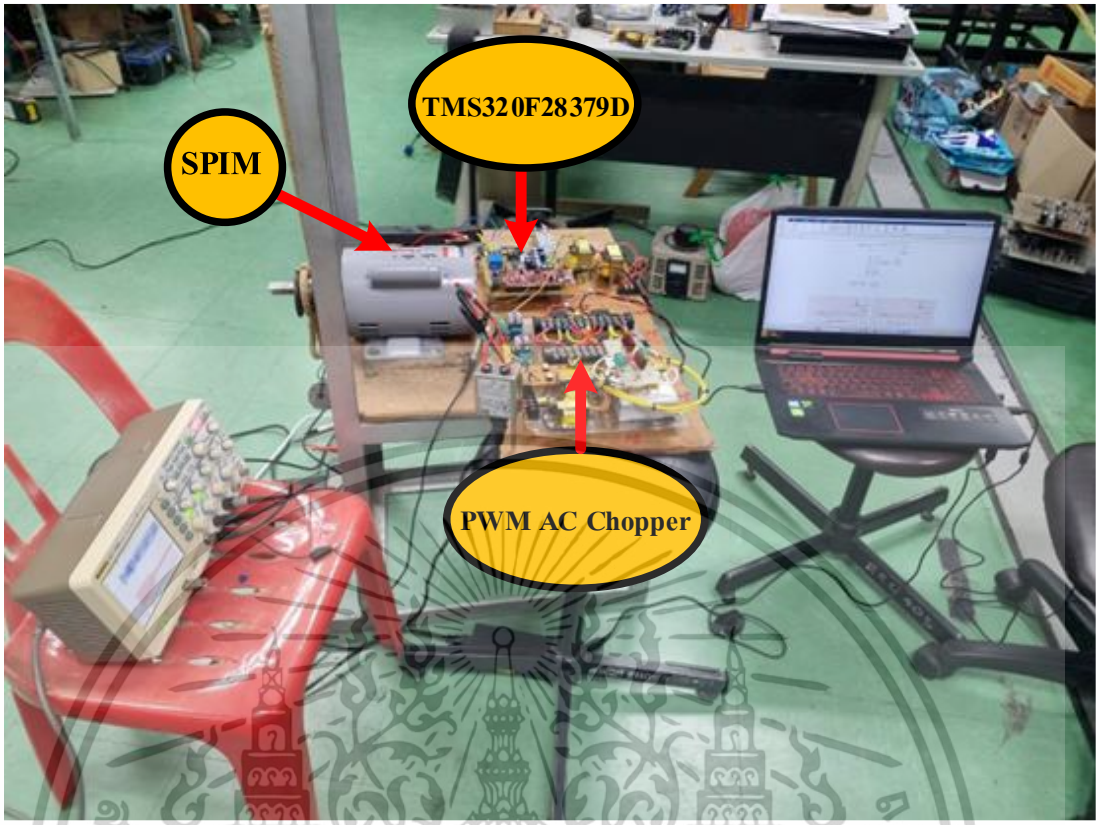
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
ผลการทดสอบระบบการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยการควบคุมกระแสเริ่มต้นโดยใช้เทคนิคอะซิงโครนัส พีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์

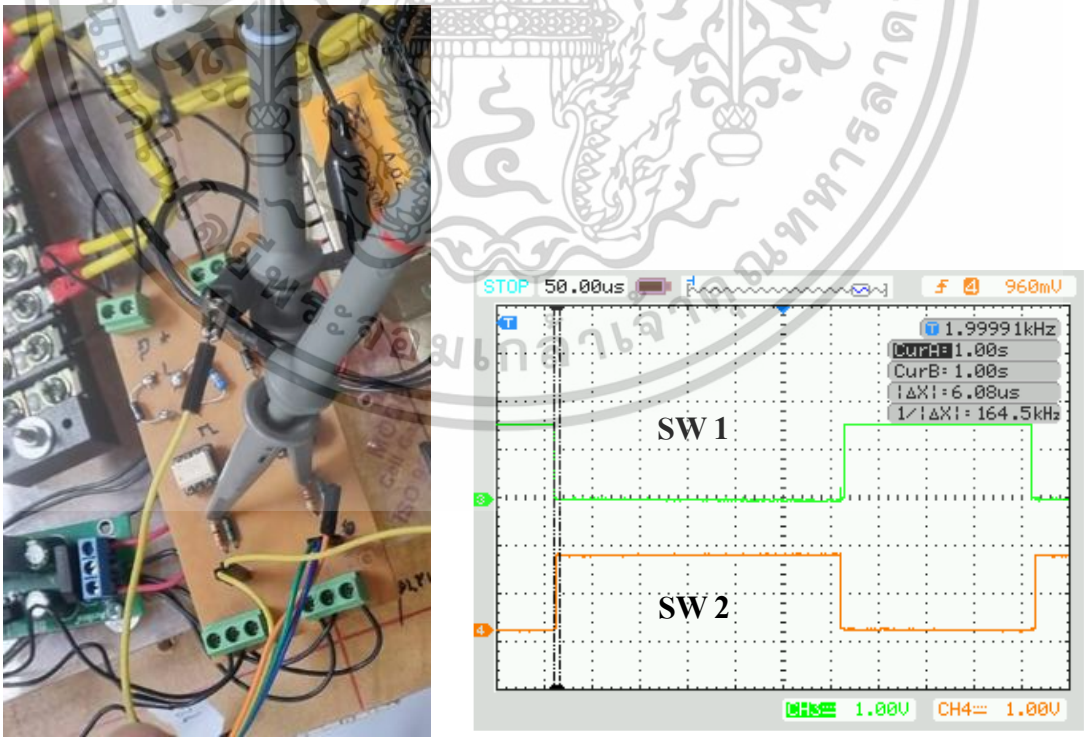
6.1 บทนำการทดสอบระบบการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

สำหรับในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบระบบการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยการควบคุมกระแสเริ่มต้นโดยใช้เทคนิคอะซิงโครนัส พีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ (Soft Start Control for a Single-Phase Induction Motor With Starting Current Control Using an Asynchronous PWM AC Chopper Technique) ด้วยวิธีการ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่นำเสนอ ได้แก่ การกำหนดสัญญาณควบคุมโดยการเขียนวงจรควบคุมในโปรแกรม MATLAB/Simulink Version R2024a แล้วทำการกำเนิดโค้ดภาษาซี (C) หลังจากนั้นจึงใช้โปรแกรม (Code Composer Studio :CCS) Version 12.4.0 ในการคอมไพร์โค้ดภาษาซี (C) ลงในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 Microcontroller เบอร์ TMS320F28379D เพื่อส่งสัญญาณควบคุมออกสู่วงจรภายนอกผ่านวงจรออปโตคัปเปลอร์ (Opto-Coupler) ซึ่งเป็นวงจรควบคุมและแยกกราว์วงจรกำลังได้สวิตช์ตัวที่ 1 และสวิตช์ตัวที่ 2 ขอบขาขึ้นและขาลงสร้างชุดสัญญาณอินพุตกับชุดขับเกตของไอจีบีที IGBT ออกจากกันโดยเด็ดขาดเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเอาต์พุตเพราะภาควงจรกำลังซึ่งมีแรงดันและกระแสที่สูงมาก อีกทั้งป้องกันการรบกวนและความเสียหายอันเนื่องมาจากการลัดวงจรหรือการทำงานที่ผิดปกติของวงจรกำลัง และสัญญาณที่ได้จากภาคเอาต์พุตจะเป็นสัญญาณที่กลับเฟสอินพุตและช่วง Dead Time หรือวงจรประวิงเวลาของการทำงานสวิตช์ตัวที่ 1 และสวิตช์ตัวที่ 2 ที่ได้จากการต่อวงจรจริงเทียบโดยสัญญาณช่วงที่หนึ่งลงก็จะเป็นจังหวะเดียวกับช่วงที่สองขึ้นเราจึงทำการหน่วงเวลาในช่วงขาลงและขาขึ้นทั้งสองสัญญาณที่ 6 μs สำหรับในการทดสอบที่ตั้งค่าไว้ที่จะแสดงรูปคลื่นของสองสัญญาณที่ออกมาสองสัญญาณนั้นจะมีค่าของการ ON, OFF ต่างกัน ผลจากการทดสอบสามารถยืนยันความถูกต้องได้เนื่องจากมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลองได้ในบทที่ 5 โดยจะแสดงผลการทดสอบตามรายละเอียดและรูปจากการทดสอบดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.1 โครงสร้างพื้นฐานของระบบที่ใช้ในการทดสอบการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวล

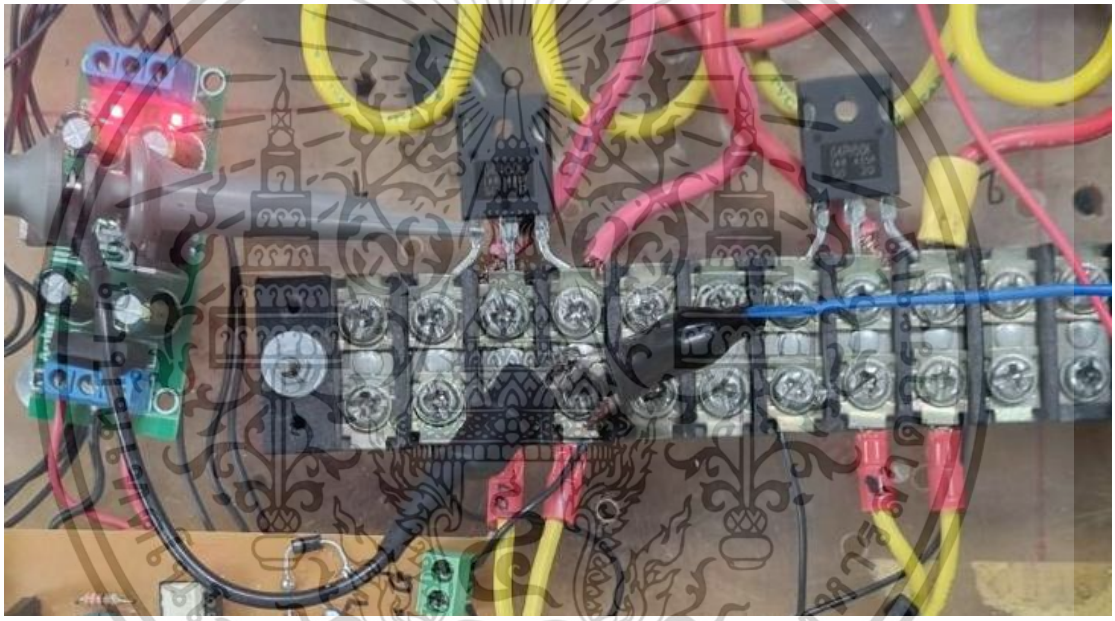


(ก) วัดขาสัญญาณ TLP 250 ทั้ง 2 ตัว **(ข)** เปรียบเทียบ 2 สัญญาณเพื่อดูค่าประวิงเวลา

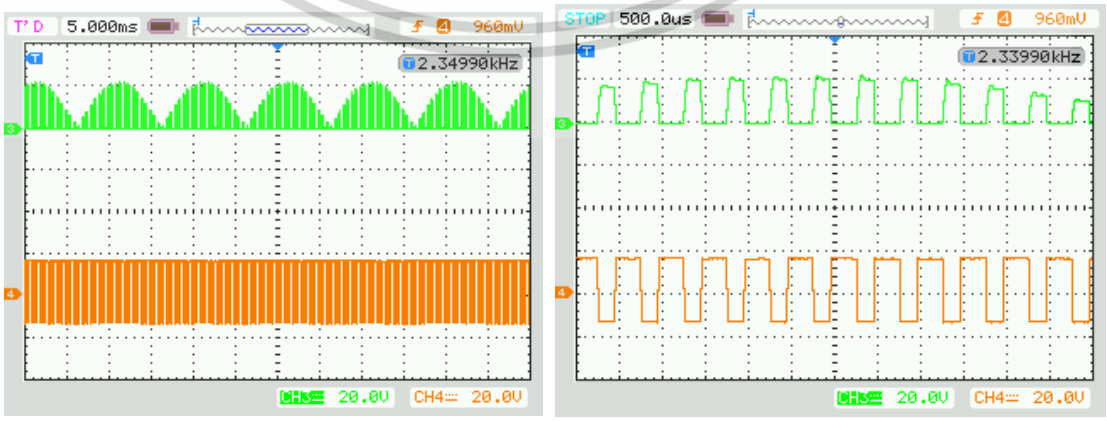
รูปที่ 6.2 รูปคลื่นของวงจรประวิงเวลาที่ได้จากการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 6.2 (ก) เป็นการใช้สายโพรบ CH3 จับสัญญาณเข้าตัวที่ 1 ก่อนเข้าวงจรออปโตคัปเปลอร์ TLP250 และสายโพรบ CH4 จับสัญญาณเข้าตัวที่ 2 ก่อนเข้าวงจรออปโตคัปเปลอร์ TLP250 ของออสซิลโลสโคป (ข) เป็นรูปคลื่นของวงจรประวิงเวลาที่ได้จากการทดสอบที่สัญญาณแสดงออกจากหน้าจอของออสซิลโลสโคป โดยการจับทำการจับดูสัญญาณที่สร้างขึ้นของทั้งสองสัญญาณคือสัญญาณตัวที่ 1 และสัญญาณตัวที่ 2 ก่อนป้อนสัญญาณเข้าวงจรขับเกตไอจีบีทีเป็นการทำงานตรงกันข้ามกันทั้งสองสัญญาณโดยการตั้งค่าของวงจรประวิงเวลาที่ได้จากการทดสอบที่ค่า 6 µs จากการทดสอบเดิมใช้ที่ค่าไว้ที่ 3 µs ส่งผลให้วงจรเกิดความร้อนบ่อยครั้งจึงปรึกษาอาจารย์เปลี่ยนช่วงค่า Dead Time ใหม่ โดยใช้สัญญาณความถี่สวิตช์สูงที่ใช้คือ 2 kHz สำหรับเป็นตัวสวิตช์สองสัญญาณออกมาเพื่อที่จะนำไปเข้าวงจรขับในลำดับต่อไป

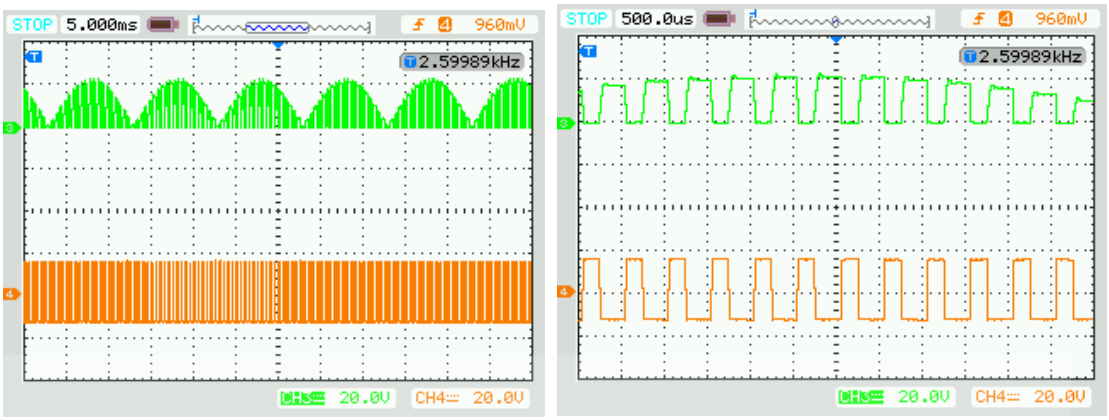


รูปที่ 6.3 การจับขาสัญญาณของสวิตช์ IGBT ตัวที่ 1 และสวิตช์ IGBT ตัวที่ 2 ตัว



(ก) สัญญาณสวิตช์ IGBT ตัวที่ 1 ที่ดิวตี้ 60% **(ข)** ขยายสัญญาณสวิตช์ IGBT ตัวที่ 1 ที่ดิวตี้ 60%

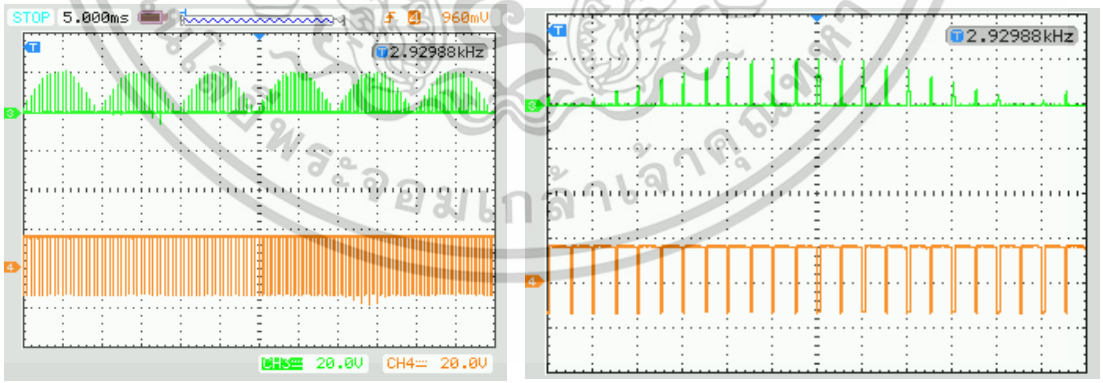
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) สัญญาณสวิตช์ IGBT ตัวที่ 2 ที่ดิวตี้ 60% **(ง)** ขยายสัญญาณสวิตช์ IGBT ตัวที่ 2 ที่ดิวตี้ 60%

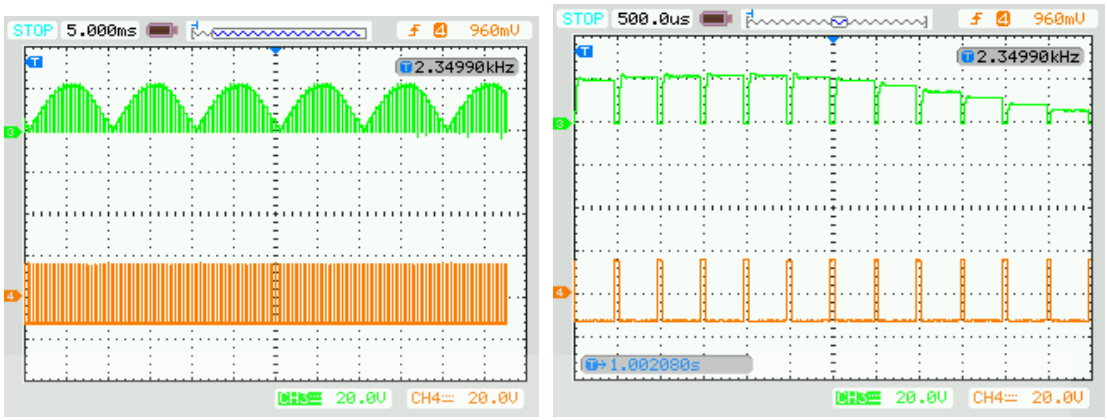
รูปที่ 6.4 รูปคลื่นสัญญาณของสวิตช์ IGBT ตัวที่ 1 และสวิตช์ IGBT ตัวที่ 2 ตัว ที่ค่าดิวตี้ 60%

จากรูป 6.3 เป็นการทดสอบวัดจับขาสัญญาณของออสซิลโลสโคปสายโพรบ CH3 จับขา IGBT ที่ขา Source และสายโพรบ CH4 จับขา IGBT ที่ขา Gate โดยรูป 6.4 เป็นรูปคลื่นสัญญาณของสวิตช์ IGBT ตัวที่ 1 และสวิตช์ IGBT ตัวที่ 2 ตัว ที่ค่าดิวตี้ 60% จะเห็นได้ว่ารูป (ก) และ (ข) เป็นรูปคลื่นสัญญาณของสวิตช์ IGBT ตัวที่ 1 ที่ค่าดิวตี้ 60% โดยรูป (ข) เป็นการซูมเข้าไปดูเนื้อพัลส์กว้างการทำงานของสัญญาณที่ทำงานสลับกันสายโพรบ CH4 จับขา IGBT ที่ขา Gate และสายโพรบ CH3 จับที่ขา Source ส่วนรูป (ค) และ (ง) รูปคลื่นสัญญาณสวิตช์ IGBT ตัวที่ 2 ที่ค่าดิวตี้ 60% โดยรูป (ง) เป็นการซูมเข้าไปดูเนื้อพัลส์กว้างการทำงานของสัญญาณที่ทำงานสลับกันสายโพรบ CH4 จับขา IGBT ที่ขา Gate และสายโพรบ CH3 จับที่ขา Source



(ก) สัญญาณสวิตช์ IGBT ตัวที่ 1 ที่ดิวตี้ 60% **(ข)** ขยายสัญญาณสวิตช์ IGBT ตัวที่ 1 ที่ดิวตี้ 60%

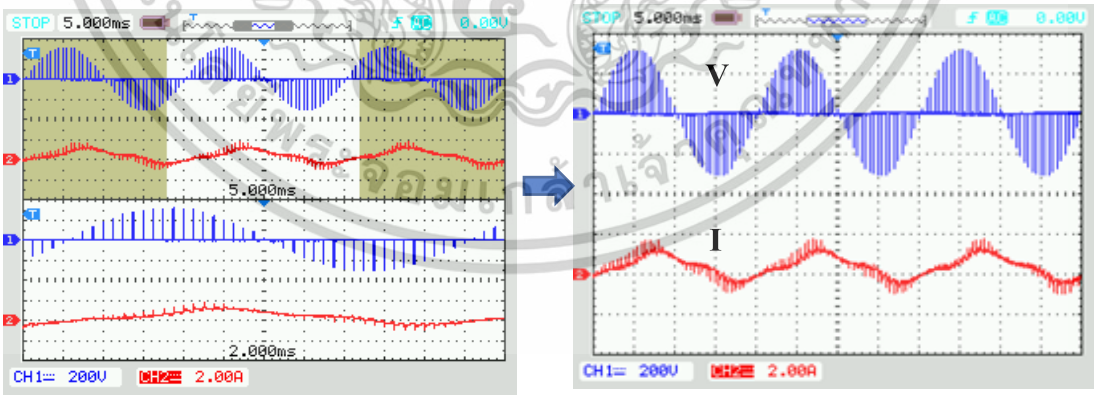
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) สัญญาณสวิตช์ IGBT ตัวที่ 2 ที่ดิวตี้ 90% **(ง)** ขยายสัญญาณสวิตช์ IGBT ตัวที่ 2 ที่ดิวตี้ 90%

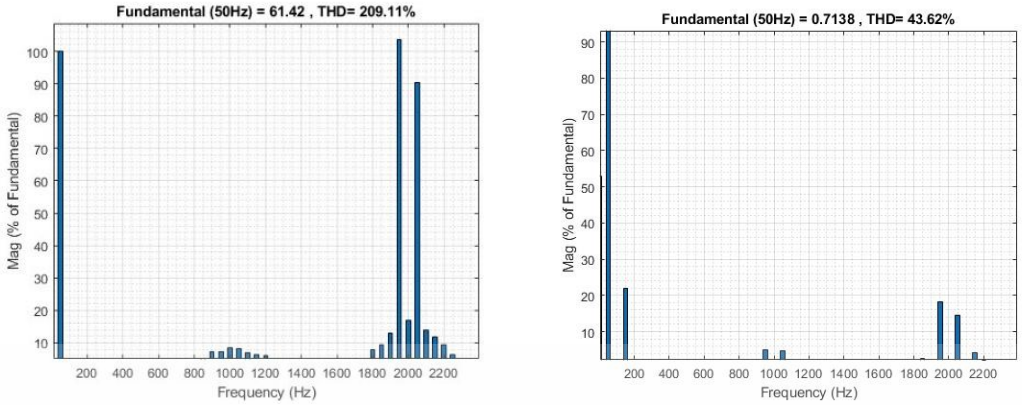
รูปที่ 6.5 รูปคลื่นสัญญาณของสวิตช์ IGBT ตัวที่ 1 และสวิตช์ IGBT ตัวที่ 2 ตัว ที่ค่าดิวตี้ 90%

จากรูป 6.3 เป็นการทดสอบวัดจับขาสัญญาณของออสซิลโลสโคปสายโพรบ CH3 จับขา IGBT ที่ขา Source และสายโพรบ CH4 จับขา IGBT ที่ขา Gate โดยรูป 6.5 เป็นรูปคลื่นสัญญาณของสวิตช์ IGBT ตัวที่ 1 และสวิตช์ IGBT ตัวที่ 2 ตัว ที่ค่าดิวตี้ 90% จะเห็นได้ว่ารูป (ก) และ (ข) เป็นรูปคลื่นสัญญาณของสวิตช์ IGBT ตัวที่ 1 ที่ค่าดิวตี้ 90% โดยรูป (ข) เป็นการซูมเข้าไปดูเนื้อพัลส์แคบการทำงานของสัญญาณที่ทำงานสลับกันสายโพรบ CH4 จับขา IGBT ที่ขา Gate และสายโพรบ CH3 จับที่ขา Source ส่วนรูป (ค) และ (ง) รูปคลื่นสัญญาณสวิตช์ IGBT ตัวที่ 2 ที่ค่าดิวตี้ 90% โดยรูป (ง) เป็นการซูมเข้าไปดูเนื้อพัลส์แคบการทำงานของสัญญาณที่ทำงานสลับกันสายโพรบ CH4 จับขา IGBT ที่ขา Gate และสายโพรบ CH3 จับที่ขา Source



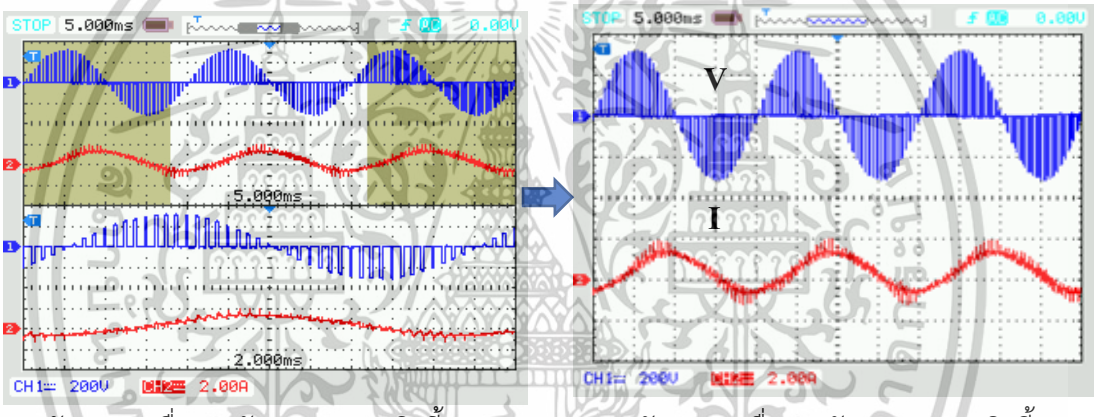
(ก) สัญญาณคลื่นแรงดันและกระแสดิวตี้ 10% **(ข)** ขยายสัญญาณคลื่นแรงดันและกระแสดิวตี้ 10%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

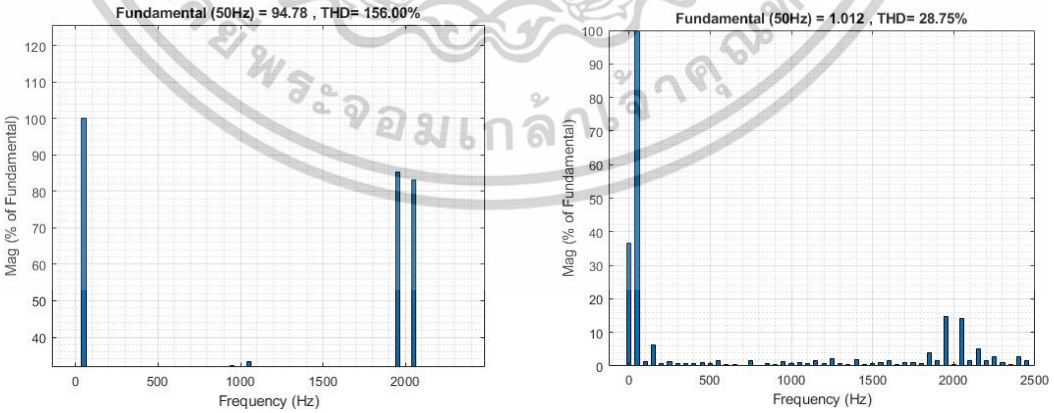


(ค) ฮาร์มอนิกของแรงดันที่ค่าดิวตี้ 10% **(ง)** ฮาร์มอนิกของกระแสที่ค่าดิวตี้ 10%

รูปที่ 6.6 รูปคลื่นสัญญาณและฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสที่ค่าดิวตี้ 10%



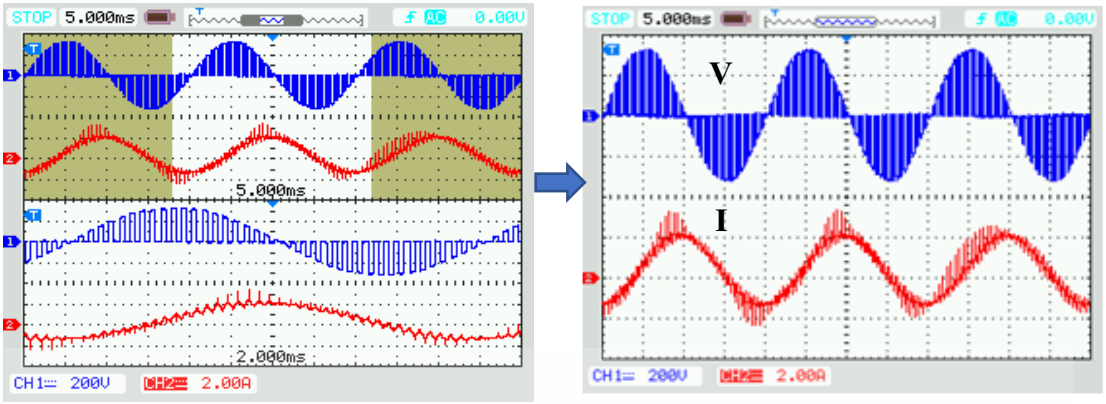
(ก) สัญญาณคลื่นแรงดันและกระแสดิวตี้ 30% **(ข)** ขยายสัญญาณคลื่นแรงดันและกระแสดิวตี้ 30%



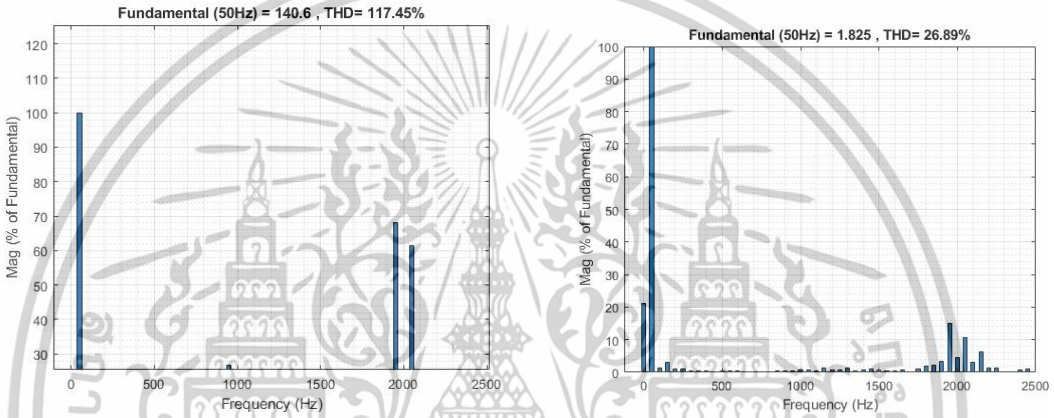
(ค) ฮาร์มอนิกของแรงดันที่ค่าดิวตี้ 30% **(ง)** ฮาร์มอนิกของกระแสที่ค่าดิวตี้ 30%

รูปที่ 6.7 รูปคลื่นสัญญาณและฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสที่ค่าดิวตี้ 30%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

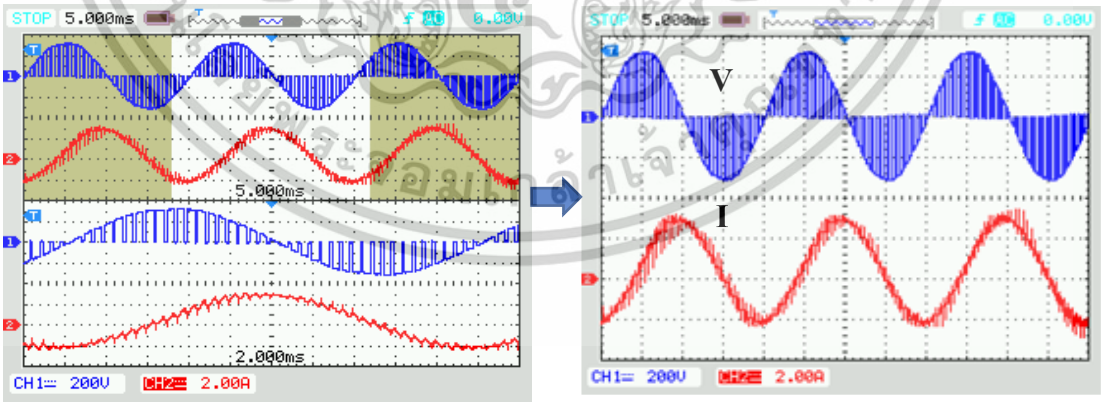


(ก) สัญญาณคลื่นแรงดันและกระแสดิวตี้ 50% **(ข)** ขยายสัญญาณคลื่นแรงดันและกระแสดิวตี้ 50%



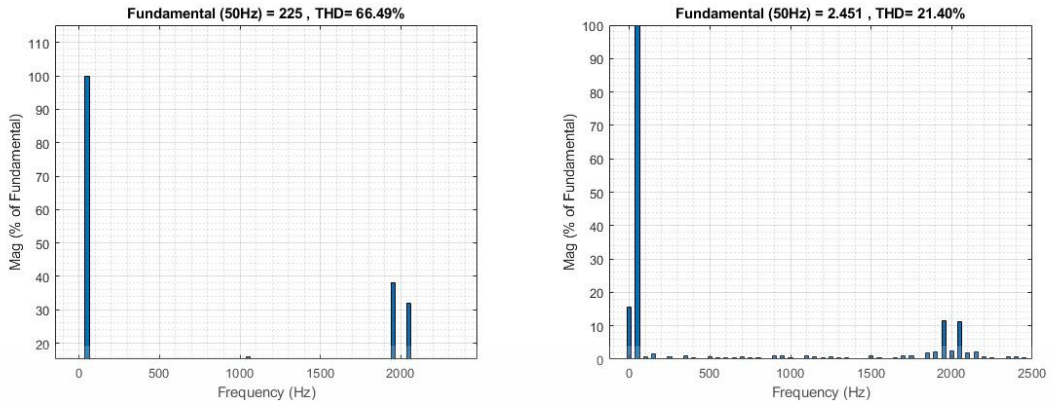
(ค) ฮาร์มอนิกของแรงดันที่ค่าดิวตี้ 50% **(ง)** ฮาร์มอนิกของกระแสที่ค่าดิวตี้ 50%

รูปที่ 6.8 รูปคลื่นสัญญาณและฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสที่ค่าดิวตี้ 50%



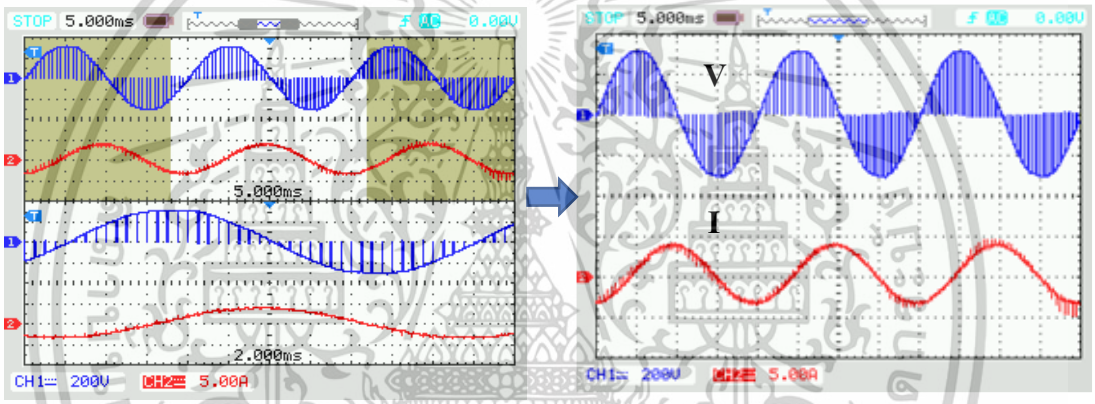
(ก) สัญญาณคลื่นแรงดันและกระแสดิวตี้ 70% **(ข)** ขยายสัญญาณคลื่นแรงดันและกระแสดิวตี้ 70%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

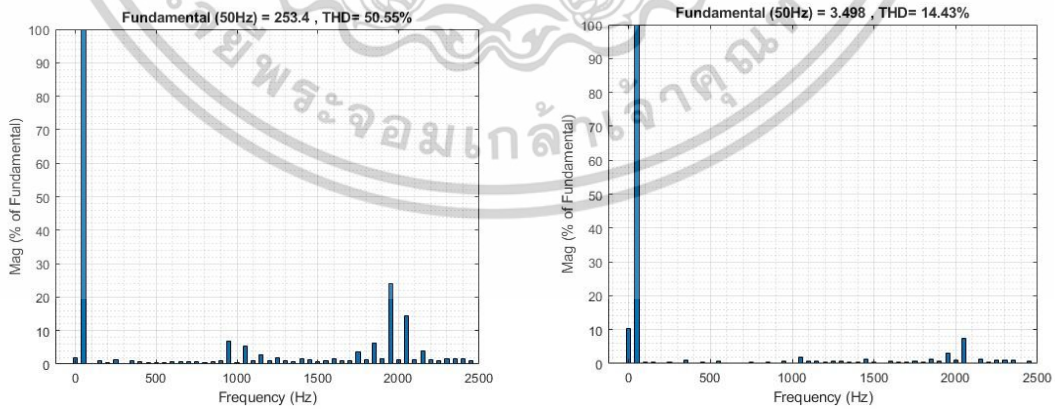


(ค) ฮาร์มอนิกของแรงดันที่ค่าดิวตี้ 70% **(ง)** ฮาร์มอนิกของกระแสที่ค่าดิวตี้ 70%

รูปที่ 6.9 รูปคลื่นสัญญาณและฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสที่ค่าดิวตี้ 70%



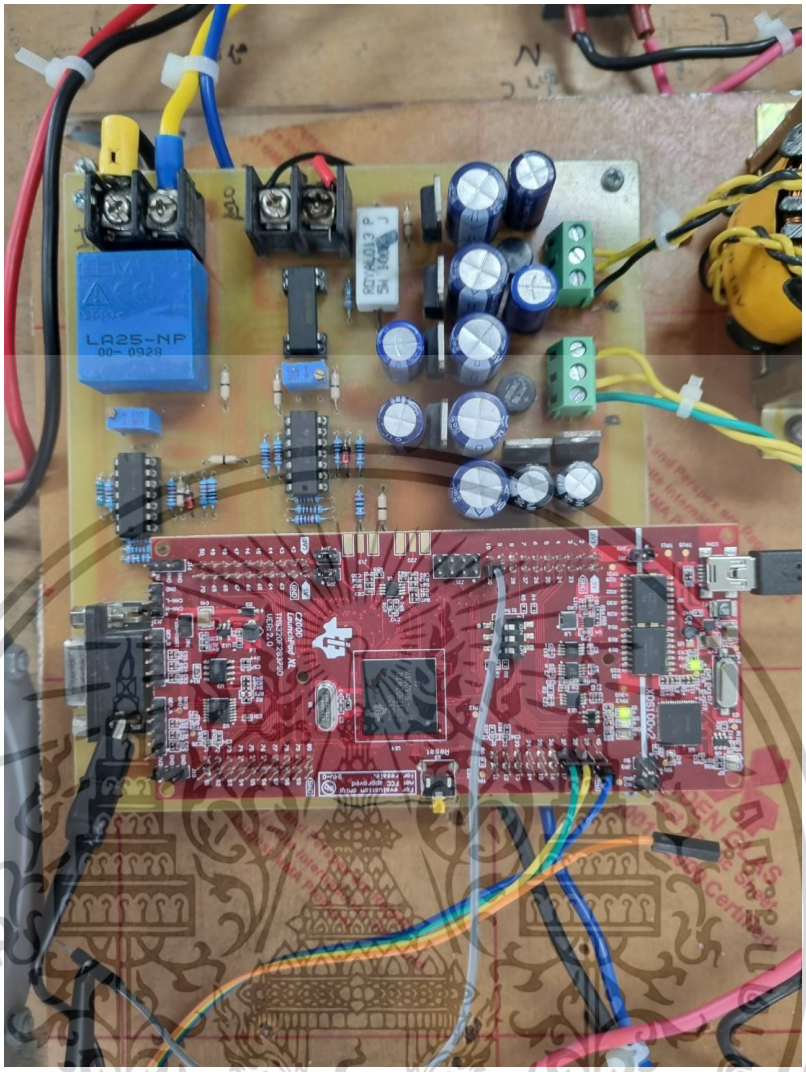
(ก) สัญญาณคลื่นแรงดันและกระแสดิวตี้ 90% **(ข)** ขยายสัญญาณคลื่นแรงดันและกระแสดิวตี้ 90%



(ค) ฮาร์มอนิกของแรงดันที่ค่าดิวตี้ 90% **(ง)** ฮาร์มอนิกของกระแสที่ค่าดิวตี้ 90%

รูปที่ 6.10 รูปคลื่นสัญญาณและฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสที่ค่าดิวตี้ 90%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

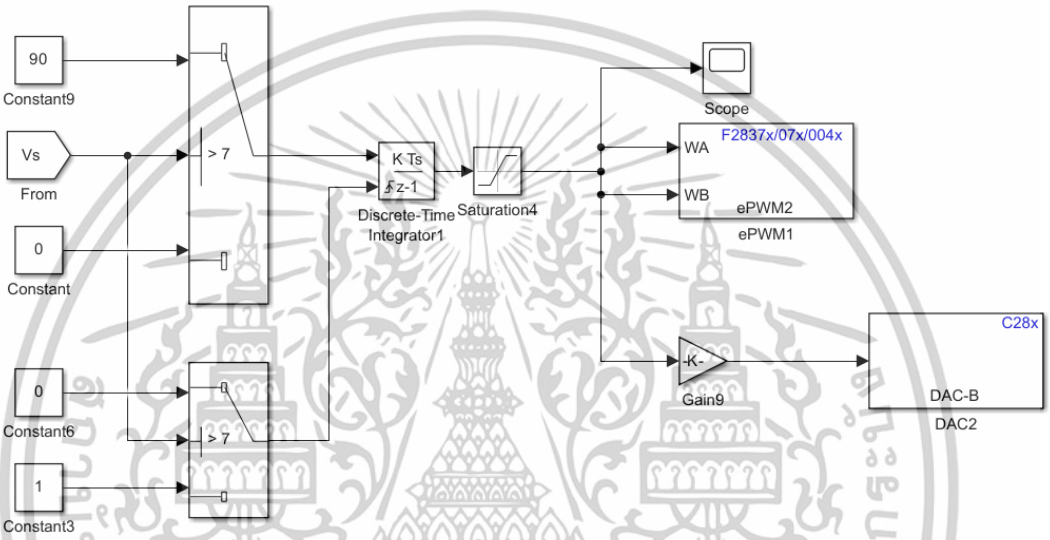


รูปที่ 6.11 การเชื่อมสัญญาณ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS จาก C2000 Microcontroller เบอร์ TMS320F28379D

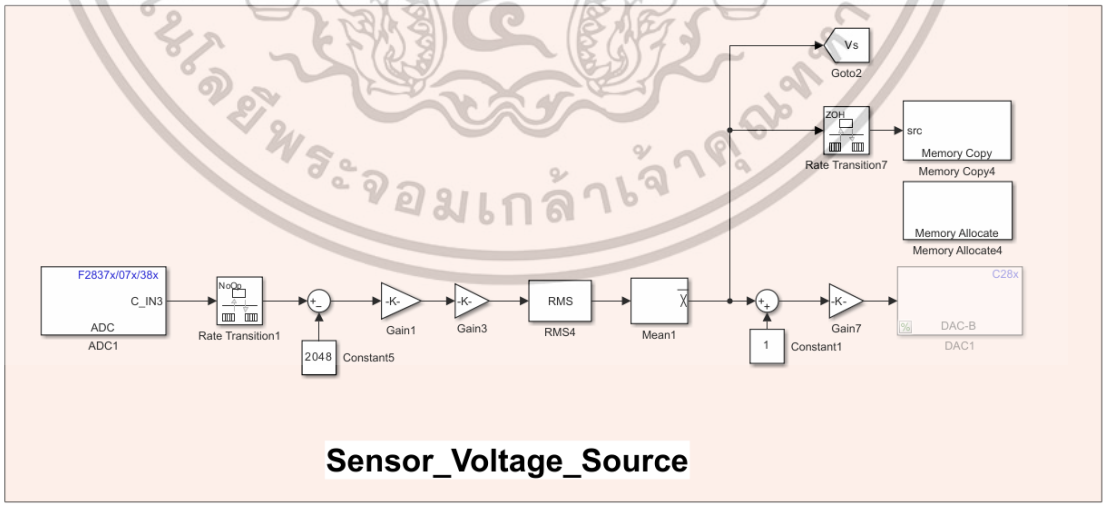
จากรูปที่ 6.11 เป็นการรับสัญญาณควบคุมโดยการเขียนวงจรควบคุมในโปรแกรม MATLAB/Simulink Version R2024a แล้วทำการกำเนิดโค้ดภาษาซี (C) หลังจากนั้นจึงใช้โปรแกรม (Code Composer Studio :CCS) Version 12.4.0 ในการคอมไฟร์โค้ดภาษาซี (C) ลงในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 Microcontroller เบอร์ TMS320F28379D เพื่อส่งสัญญาณควบคุมออกสู่วงจรภายนอกโดยตัวบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งสัญญาณกราวด์ที่ขา 20 และสัญญาณควบคุมกระแสแบบ Soft Starter ที่ขา 35 ส่งไปให้สวิตช์ตัวที่ 1 และขา 36 ส่งไปให้สวิตช์ตัวที่ 2 และสัญญาณควบคุมกระแสป้อนกลับแบบ PI Soft Starter ที่ขา 37 ส่งไปให้สวิตช์ตัวที่ 1 และขา 38 ส่งไปให้สวิตช์ตัวที่ 2 ซึ่งจะได้กล่าวในลำดับต่อไปในการทดสอบตามรูปด้านล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชันตั้งแต่ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2 และที่ค่าดิวตี้ 5-90%, 10-90%, 15-90% และ 20-90% เพื่อดูลักษณะพฤติกรรมความสัมพันธ์ของสัญญาณแรงดันและกระแสในแต่ช่วงค่าความชันและช่วงค่าดิวตี้ที่มีการใช้พลังงาน เป็นค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้ชั่วขณะ (Instantaneous) โดยจากรูปที่ 6.12 เราสามารถทำการปรับเปลี่ยนค่าความชันได้ตั้งแต่ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2 สำหรับในการทดสอบ และรูปที่ 6.13 สามารถทำการปรับเปลี่ยนค่าดิวตี้ในย่านการทดสอบที่ช่อง Upper Limit และ Lower Limit ในการทดสอบนี้จะใช้ที่ค่าดิวตี้ 5-90%, 10-90%, 15-90% และ 20-90% ซึ่งจะกล่าวในรูปที่ 6.14 – 6.17 ตามลำดับ

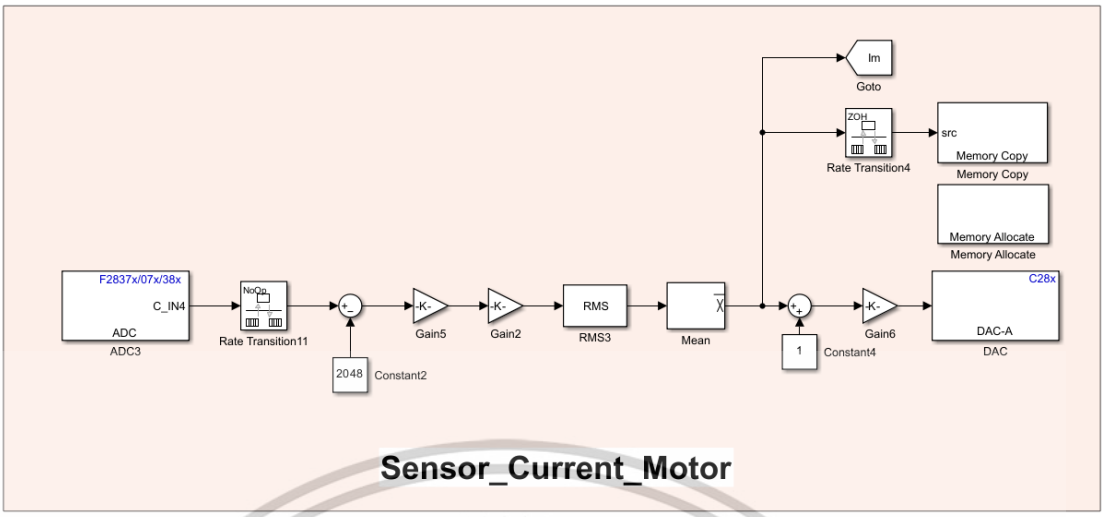


(ก) การจำลองเทคนิคการควบคุมกระแสเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลจากทูลบล็อก Simulink Library

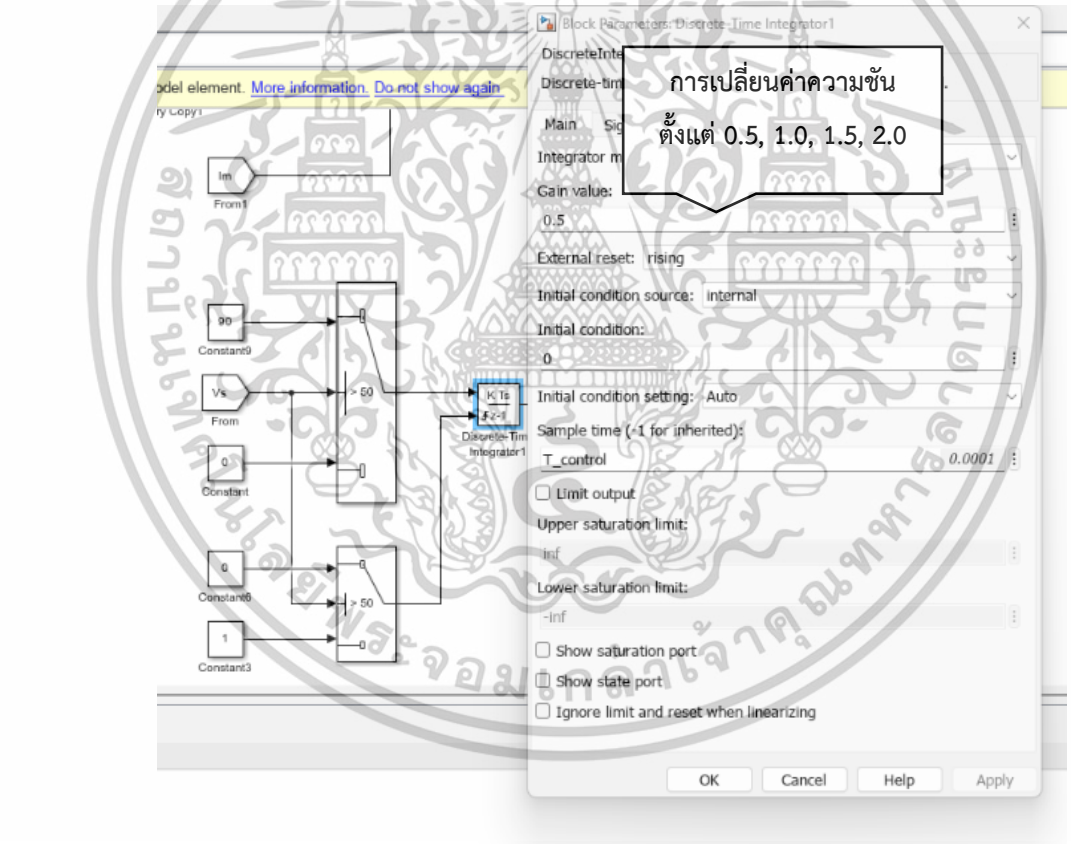


(ข) ชุด ADC ตรวจจับวัดแรงดันแปลงอนาล็อกเป็นดิจิตอลที่แหล่งจ่ายมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



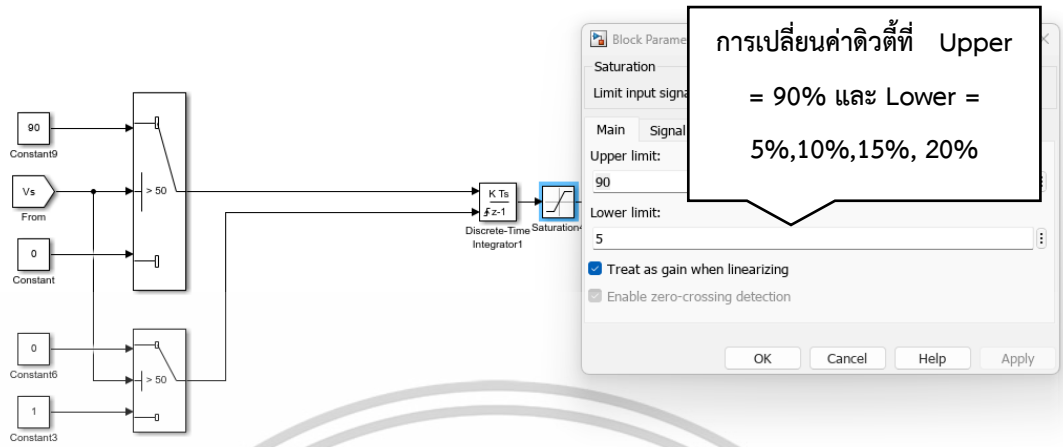
(ค) ชุด ADC ตรวจจับแรงดันแปลงอนาล็อกเป็นดิจิตอลที่แหล่งจ่ายมอเตอร์



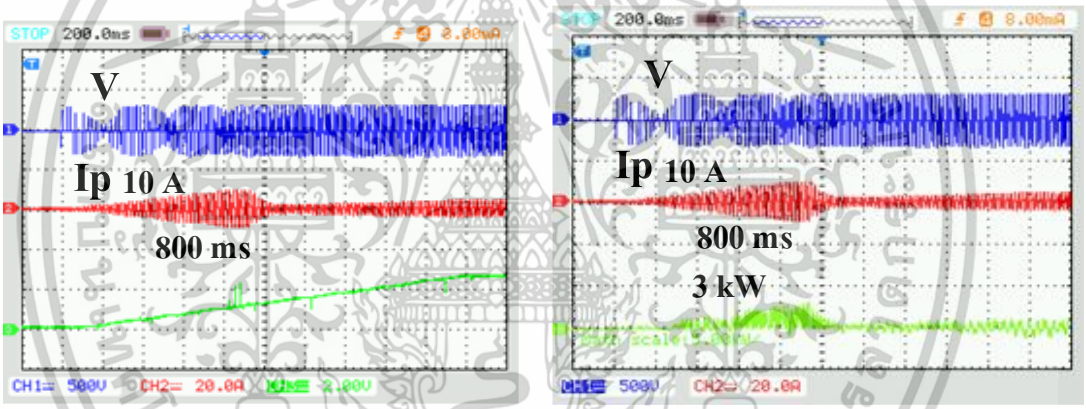
(ง) การเปลี่ยนค่าความชัน

รูปที่ 6.12 การจำลองเทคนิคการควบคุมกระแสเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลจากทูลบล็อก Simulink Library และการเปลี่ยนค่าความชันที่ช่อง Gain Value

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

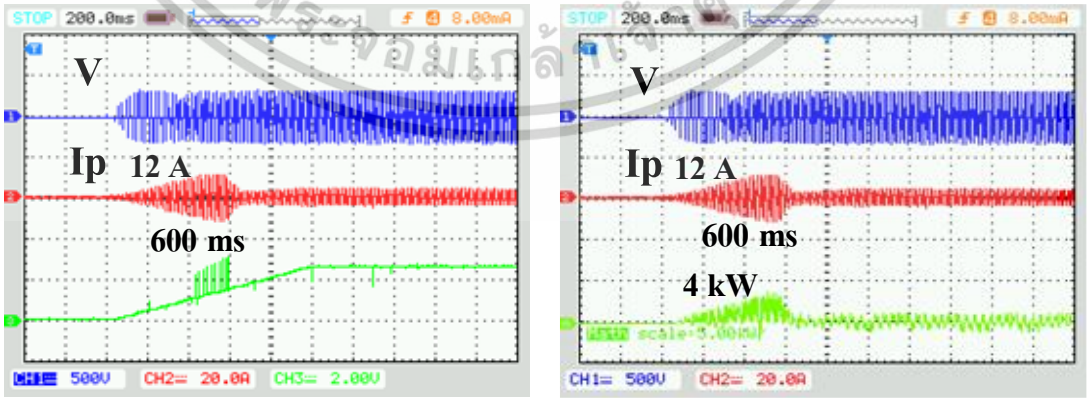


รูปที่ 6.13 การเปลี่ยนค่าดิวตี้ที่ช่อง Upper Limit และ Lower Limit



(ก) ค่าความชันตามเวลาที่ 0.5 **(ข)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 5-90%

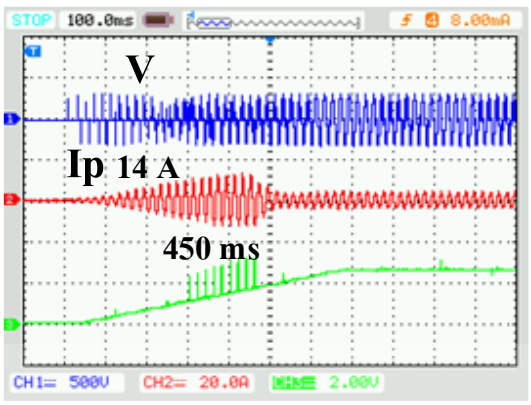
การทดสอบแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 0.5 และที่ค่าดิวดี้ 5-90%

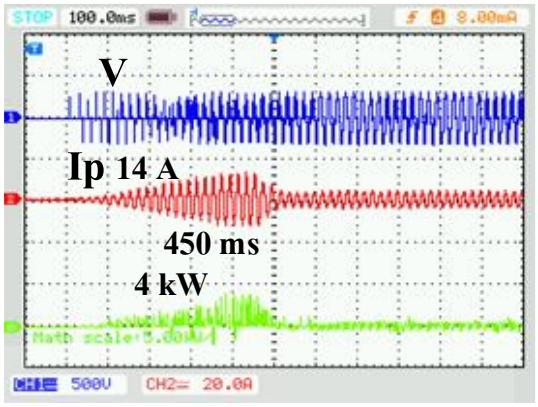


(ค) ค่าความชันตามเวลาที่ 1.0 **(ง)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 5-90%

การทดสอบแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 1.0 และที่ค่าดิวดี้ 5-90%

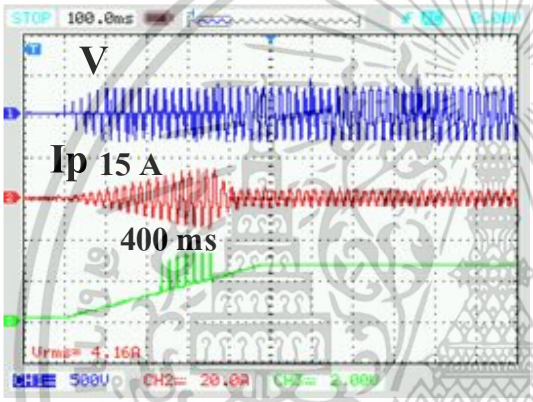
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

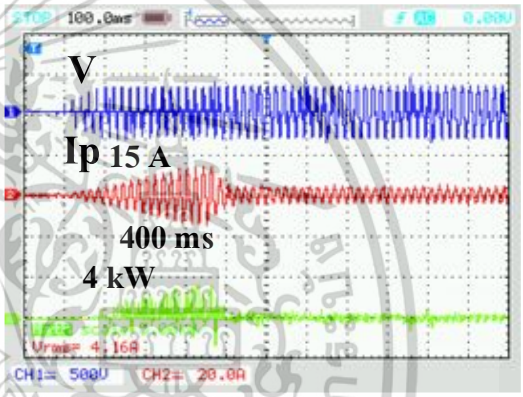




(จ) ค่าความชันตามเวลาที่ 1.5 **(ฉ)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 5-90%

การทดสอบแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 1.5 และที่ค่าดิวดี้ 5-90%



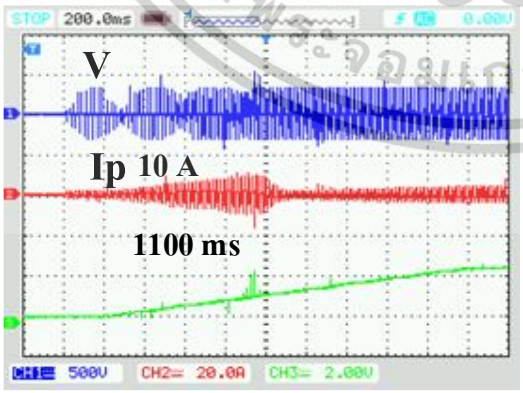


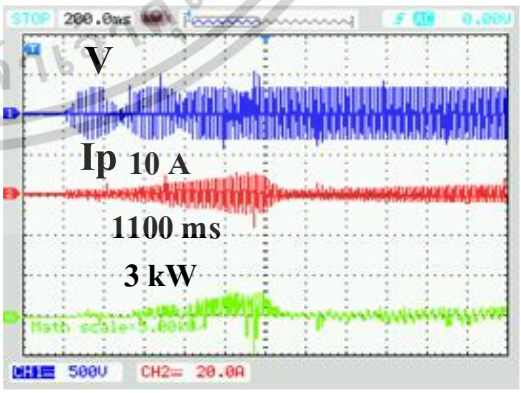
(ช) ค่าความชันตามเวลาที่ 2.0 **(ซ)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 5-90%

การทดสอบแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 2.0 และที่ค่าดิวดี้ 5-90%

รูปที่ 6.14 การทดสอบแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และที่ค่าดิวดี้ 5-90%

เป็นค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้ชั่วขณะ (Instantaneous)

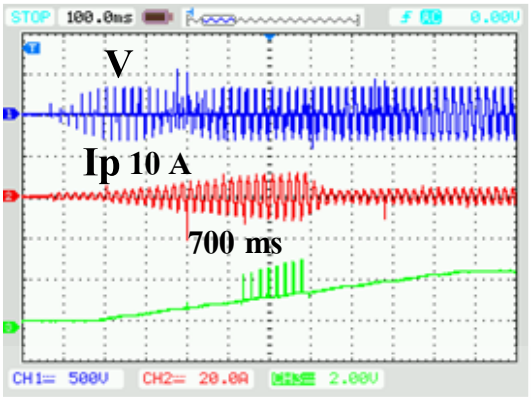


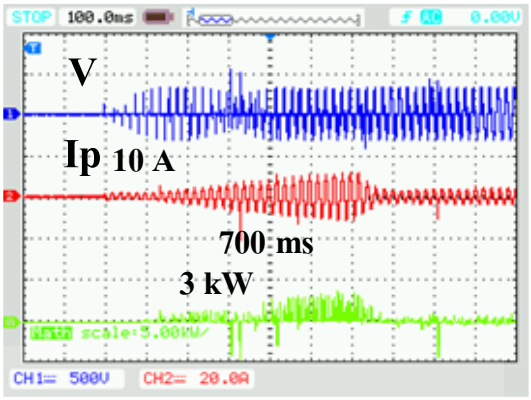


(ก) ค่าความชันตามเวลาที่ 0.5 **(ข)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 10-90%

การทดสอบแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 0.5 และที่ค่าดิวดี้ 10-90%

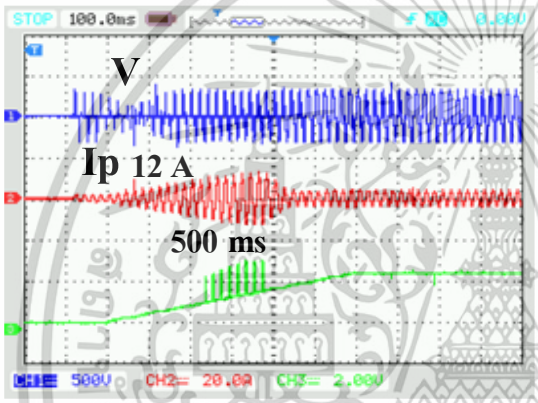
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

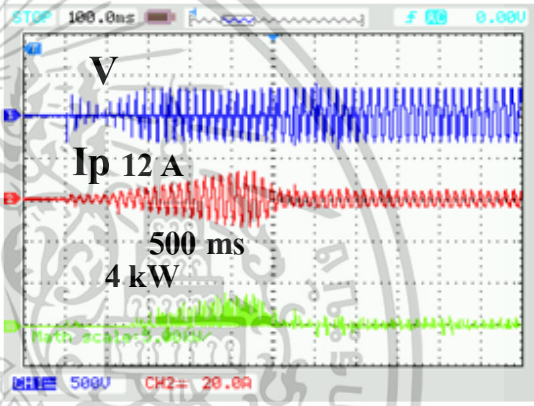




(ค) ค่าความชันตามเวลาที่ 1.0 **(ง)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 10-90%

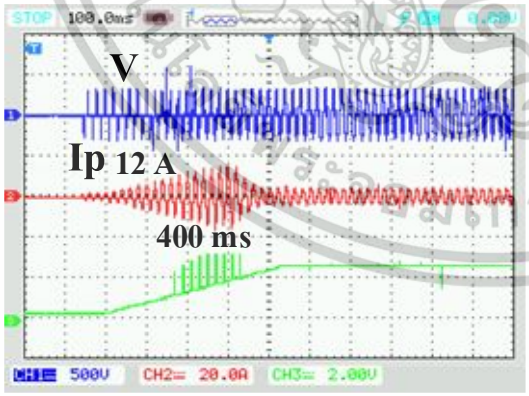
การทดสอบแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 1.0 และที่ค่าดิวดี้ 10-90%

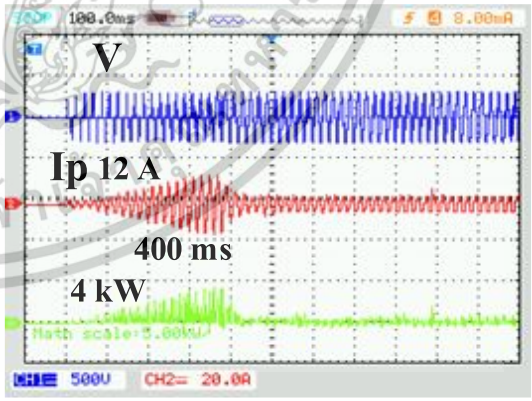




(จ) ค่าความชันตามเวลาที่ 1.5 **(ฉ)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 10-90%

การทดสอบแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 1.5 และที่ค่าดิวดี้ 10-90%





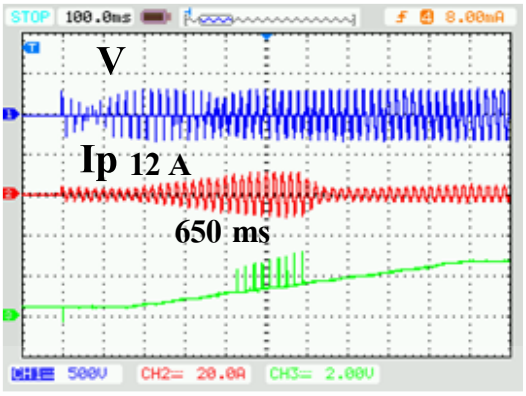
(ช) ค่าความชันตามเวลาที่ 2.0 **(ซ)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 10-90%

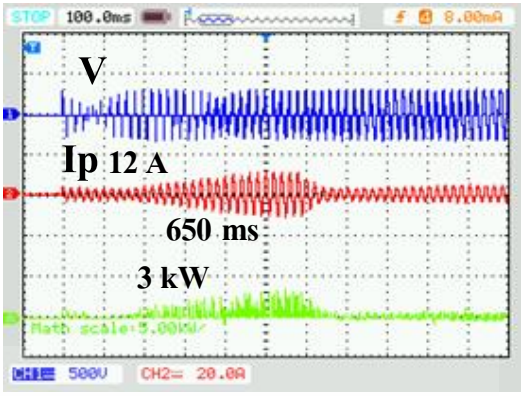
การทดสอบแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 2.0 และที่ค่าดิวดี้ 10-90%

รูปที่ 6.15 การทดสอบแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และที่ค่าดิวดี้ 10-90%

เป็นค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้ชั่วขณะ (Instantaneous)

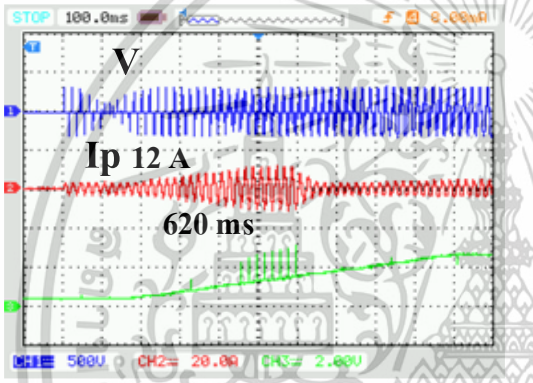
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

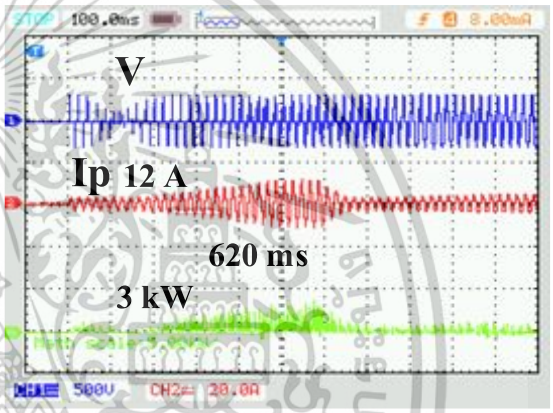




(ก) ค่าความชันตามเวลาที่ 0.5 **(ข)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 15-90%

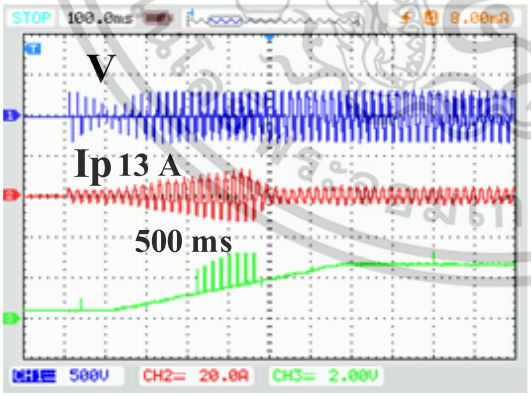
การทดสอบแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 0.5 และที่ค่าดิวดี้ 15-90%

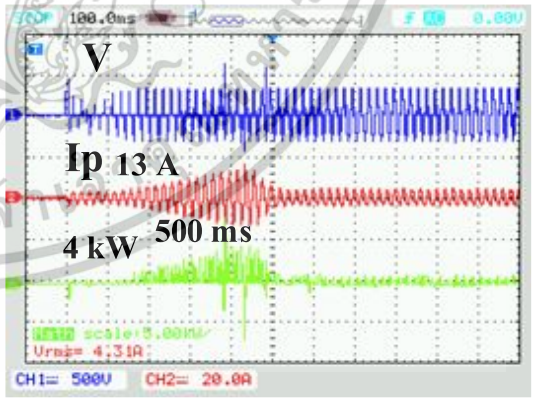




(ค) ค่าความชันตามเวลาที่ 1.0 **(ง)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 15-90%

การทดสอบแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 1.0 และที่ค่าดิวดี้ 15-90%

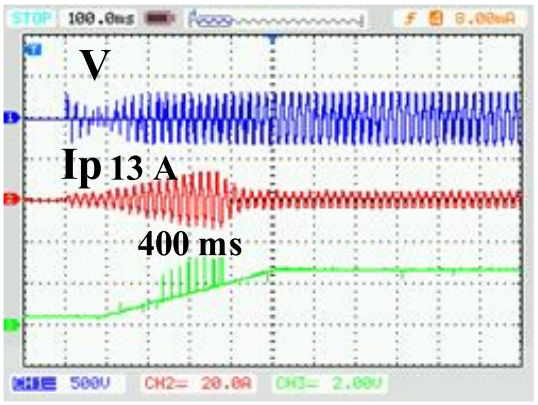




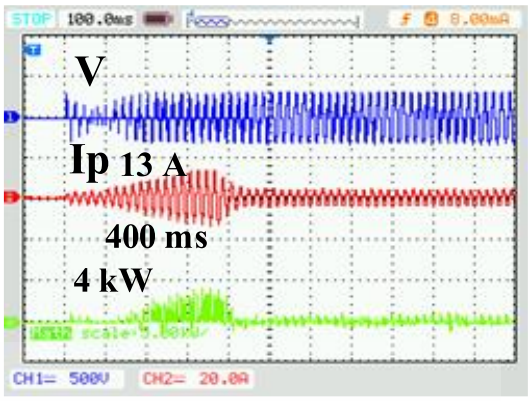
(จ) ค่าความชันตามเวลาที่ 1.5 **(ฉ)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 15-90%

การทดสอบแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 1.5 และที่ค่าดิวดี้ 15-90%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



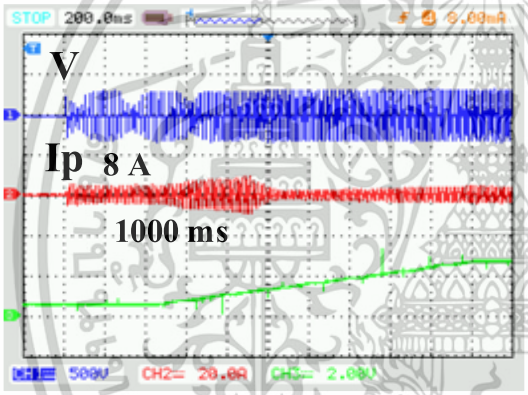
(ช) ค่าความชันตามเวลาที่ 2.0



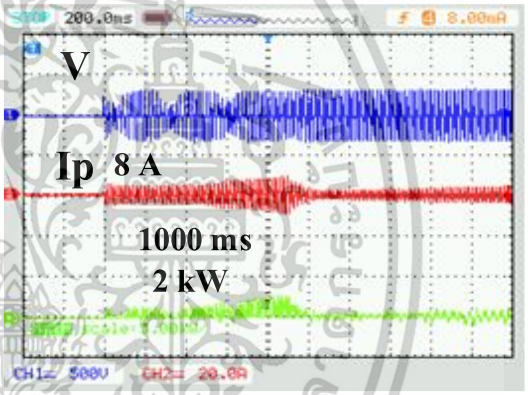
(ซ) กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 15-90%

การทดสอบแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 2.0 และที่ค่าดิวดี้ 15-90%

รูปที่ 6.16 การทดสอบแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และที่ค่าดิวดี้ 15-90% เป็นค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้ชั่วขณะ (Instantaneous)

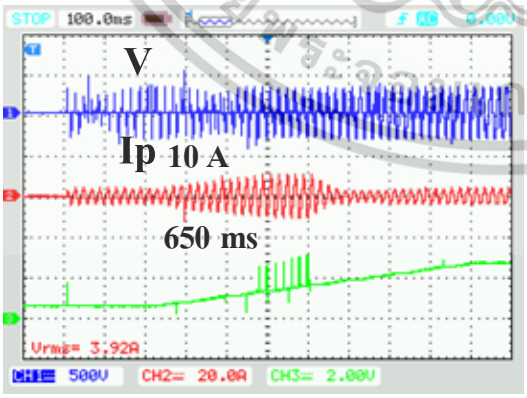


(ก) ค่าความชันตามเวลาที่ 0.5

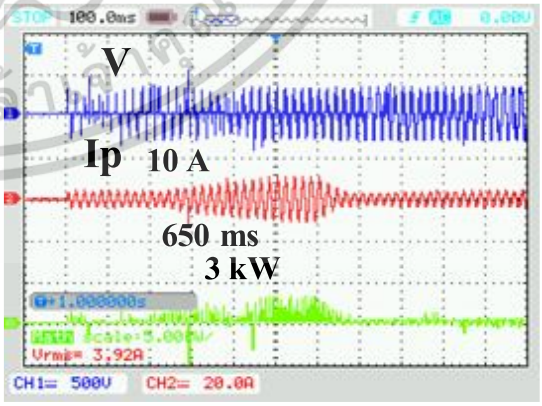


(ข) กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 20-90%

การทดสอบแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 0.5 และที่ค่าดิวดี้ 20-90%



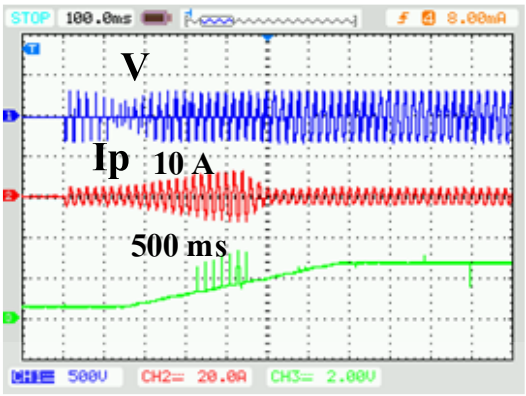
(ค) ค่าความชันตามเวลาที่ 1.0



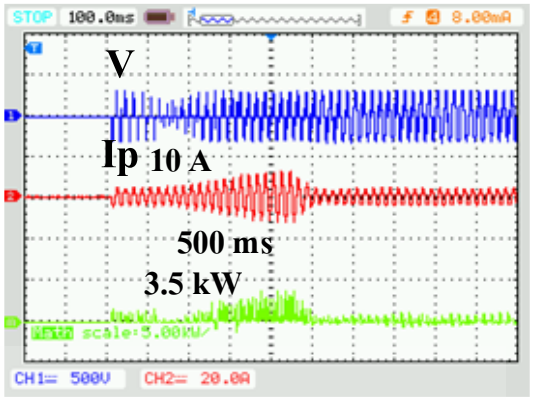
(ง) กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 20-90%

การทดสอบแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 1.0 และที่ค่าดิวดี้ 20-90%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

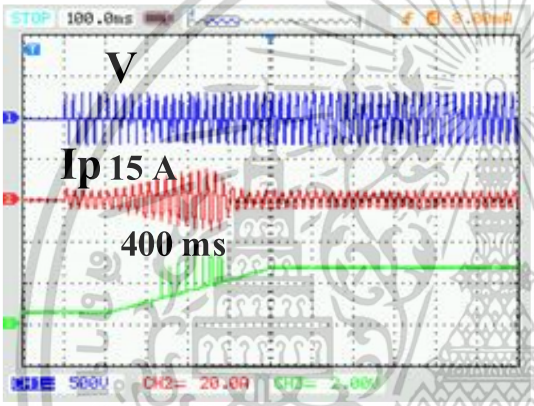


(จ) ค่าความชันตามเวลาที่ 1.5

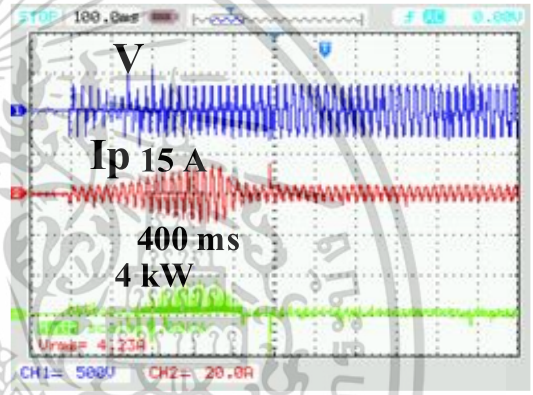


(ฉ) กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 20-90%

การทดสอบแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 1.5 และที่ค่าดิวดี้ 20-90%



(ช) ค่าความชันตามเวลาที่ 2.0



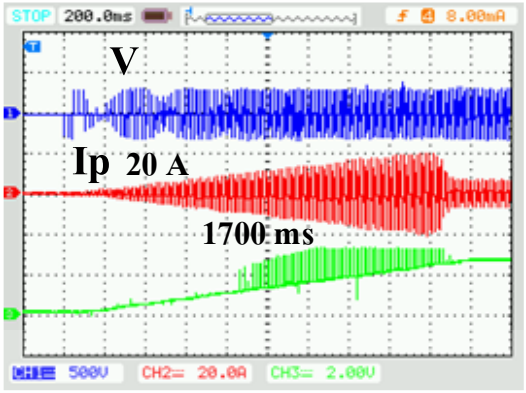
(ซ) กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 20-90%

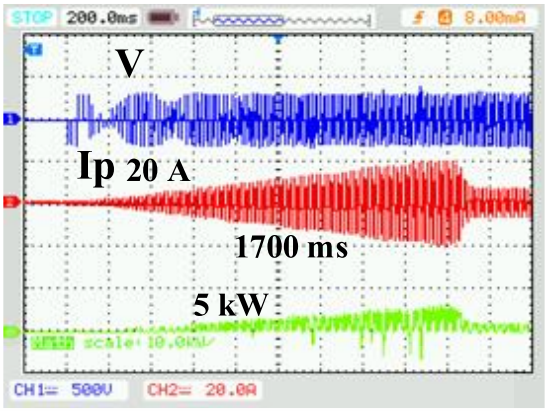
การทดสอบแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 2.0 และที่ค่าดิวดี้ 20-90%

รูปที่ 6.17 การทดสอบแบบไม่มีโหลดที่ค่าความชัน 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และที่ค่าดิวดี้ 20-90% เป็นค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้ชั่วขณะ (Instantaneous)

การทดสอบแบบมีโหลดที่ค่าความชันตั้งแต่ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 และที่ค่าดิวดี้ 5-90%, 10-90%, 15-90% และ 20-90% เพื่อดูลักษณะพฤติกรรมความสัมพันธ์ของสัญญาณแรงดันและกระแสในแต่ช่วงค่าความชันและช่วงค่าดิวดี้ที่มีการใช้พลังงานเป็นค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้ชั่วขณะ (Instantaneous) โดยจากรูปที่ 6.12 เราสามารถทำการปรับเปลี่ยนค่าความชันได้ตั้งแต่ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 สำหรับในการทดสอบ และรูปที่ 6.13 สามารถทำการปรับเปลี่ยนค่าดิวดี้ในย่านการทดสอบที่ช่อง Upper Limit และ Lower Limit ในการทดสอบนี้จะใช้ที่ค่าดิวดี้ 5-90%, 10-90%, 15-90% และ 20-90% ซึ่งจะกล่าวในรูปที่ 6.18 – 6.21 ตามลำดับ

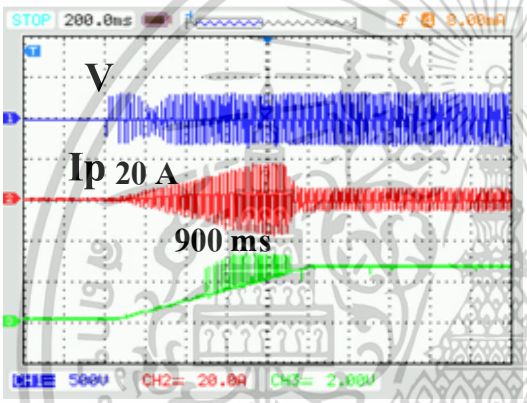
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

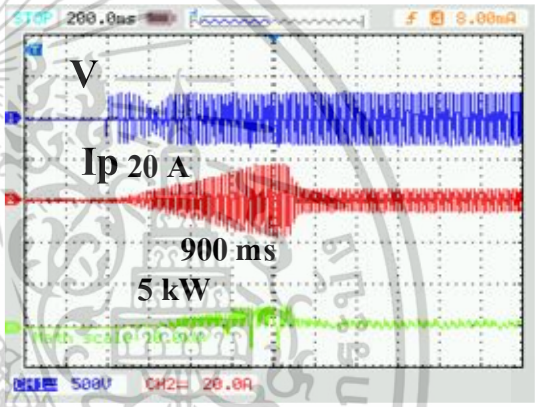




(ก) ค่าความชันตามเวลาที่ 0.5 **(ข)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 5-90%

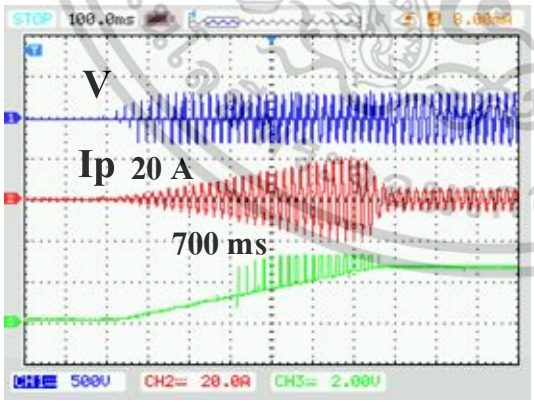
การทดสอบแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 0.5 และที่ค่าดิวดี้ 5-90%

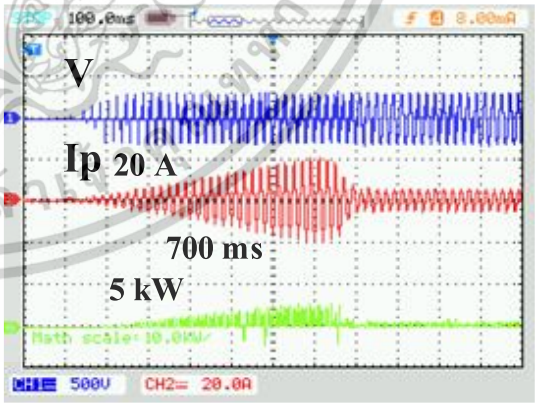




(ค) ค่าความชันตามเวลาที่ 1.0 **(ง)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 5-90%

การทดสอบแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 1.0 และที่คาดิวดี้ 5-90%

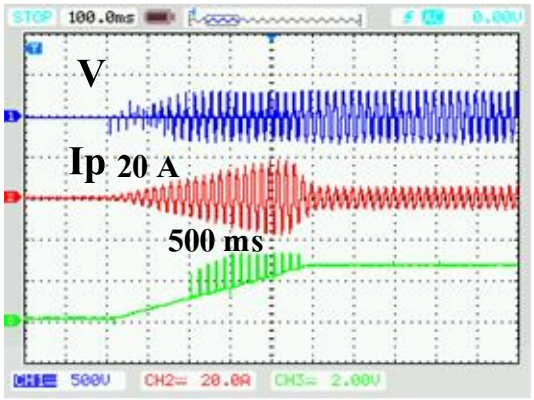




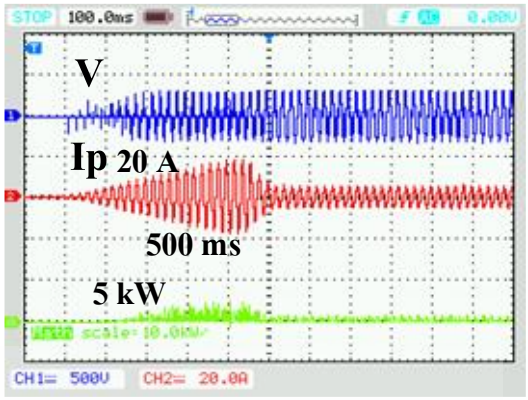
(จ) ค่าความชันตามเวลาที่ 1.5 **(ฉ)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 5-90%

การทดสอบแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 1.5 และที่ค่าดิวดี้ 5-90%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



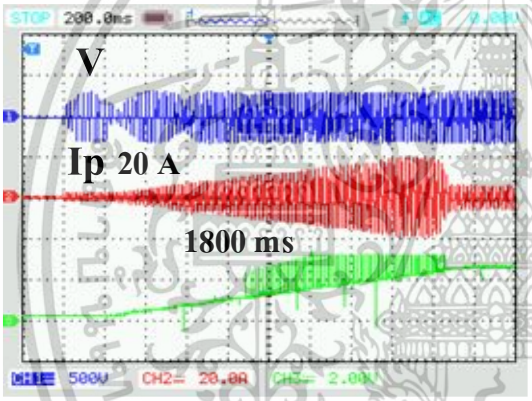
(ช) ค่าความชันตามเวลาที่ 2.0



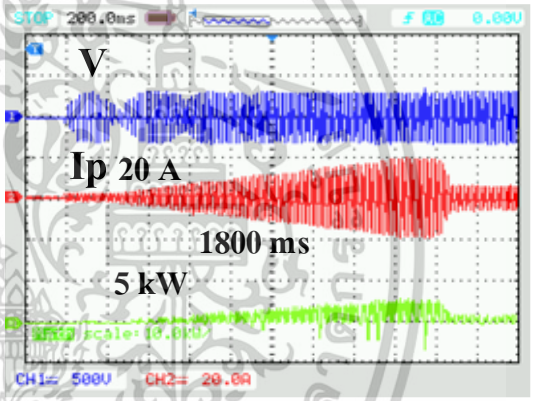
(ซ) กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 5-90%

การทดสอบแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 2.0 และที่ค่าดิวดี้ 5-90%

รูปที่ 6.18 การทดสอบแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และที่ค่าดิวดี้ 5-90% เป็นค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้ชั่วขณะ (Instantaneous)

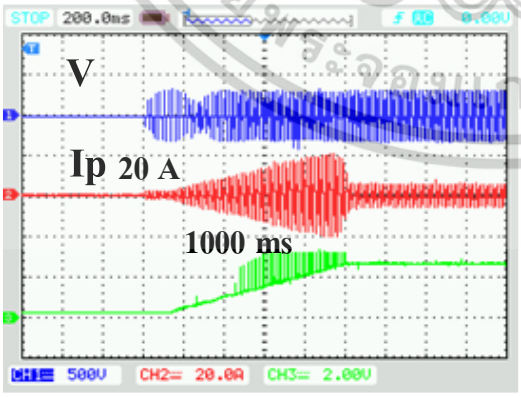


(ก) ค่าความชันตามเวลาที่ 0.5

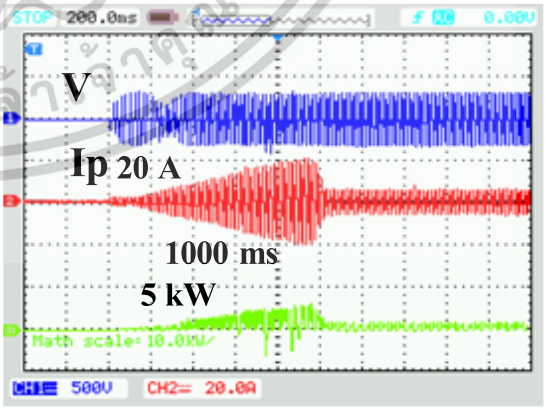


(ข) กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 10-90%

การทดสอบแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 0.5 และที่ค่าดิวดี้ 10-90%



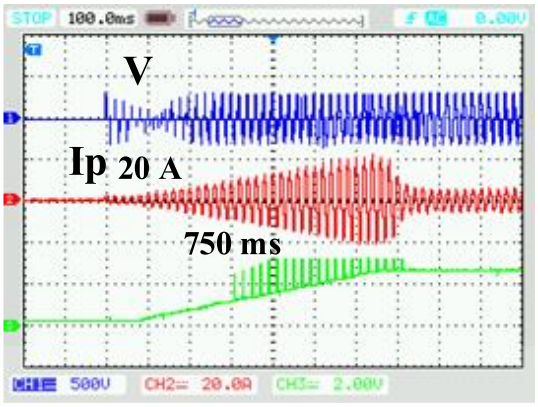
(ค) ค่าความชันตามเวลาที่ 1.0

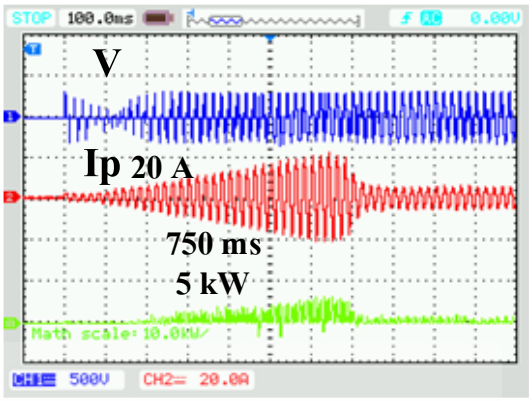


(ง) กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 10-90%

การทดสอบแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 1.0 และที่ค่าดิวดี้ 10-90%

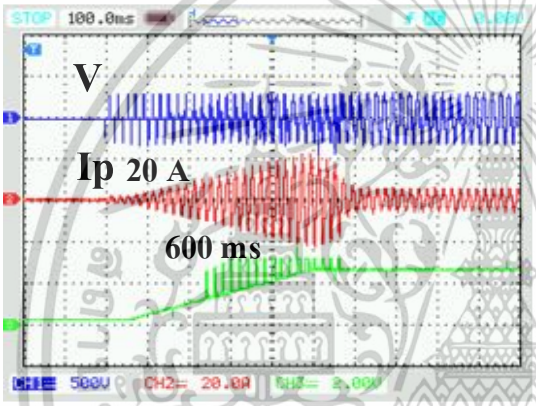
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

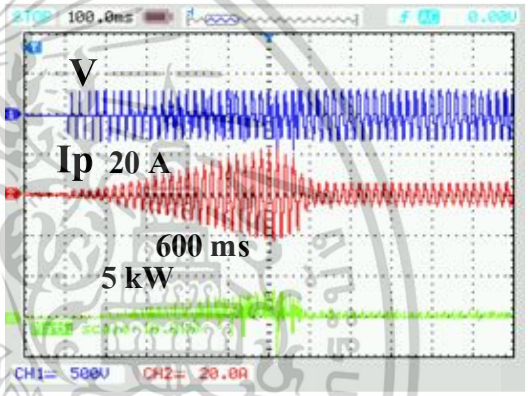




(จ) ค่าความชันตามเวลาที่ 1.5 **(ฉ)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 10-90%

การทดสอบแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 1.5 และที่ค่าดิวดี้ 10-90 %



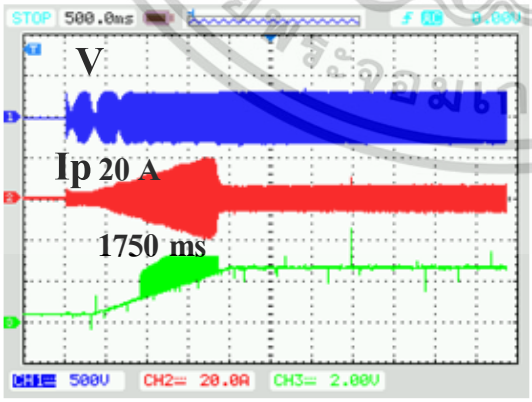


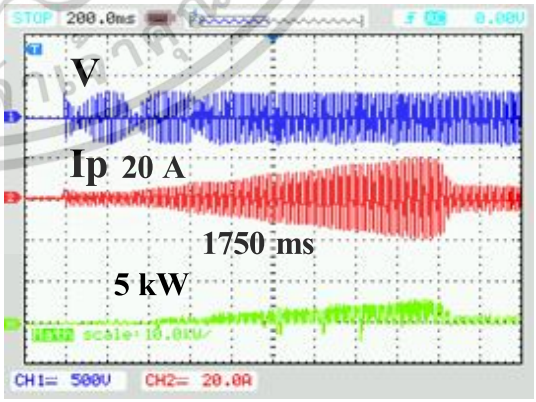
(ช) ค่าความชันตามเวลาที่ 2.0 **(ซ)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 10-90%

การทดสอบแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 2 และที่ค่าดิวดี้ 10-90%

รูปที่ 6.19 การทดสอบแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และที่ค่าดิวดี้ 10-90%

เป็นค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้ชั่วขณะ (Instantaneous)

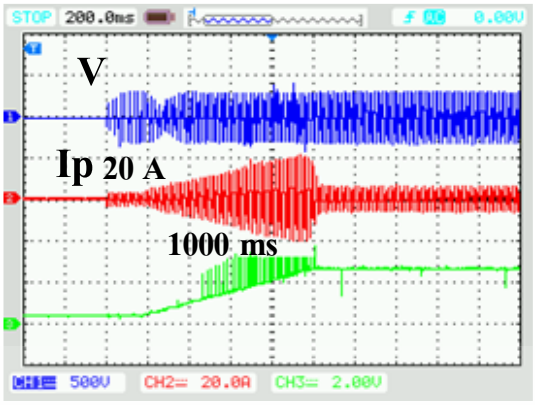


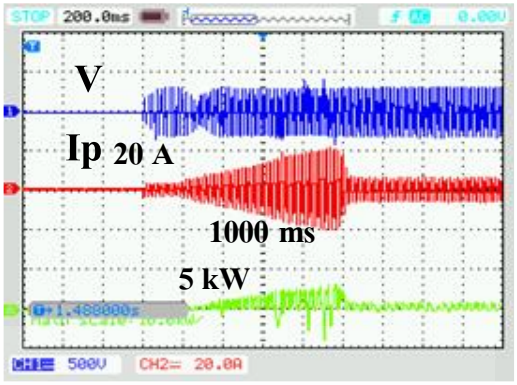


(ก) ค่าความชันตามเวลาที่ 0.5 **(ข)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 15-90%

การทดสอบแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 0.5 และที่ค่าดิวดี้ 15-90%

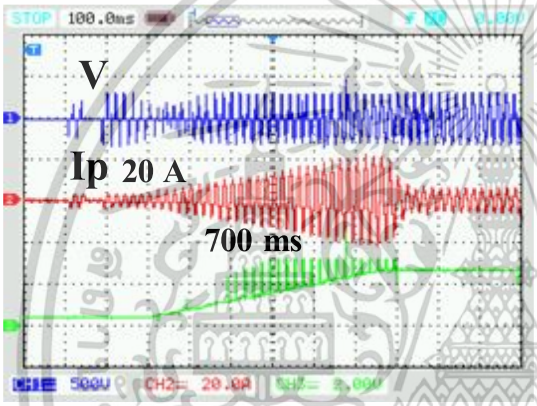
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

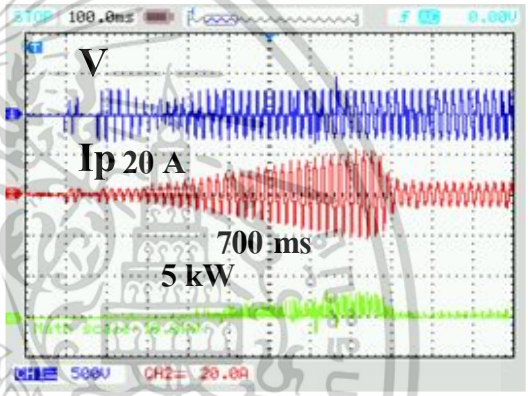




(ค) ค่าความชันตามเวลาที่ 1.0 **(ง)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 15-90%

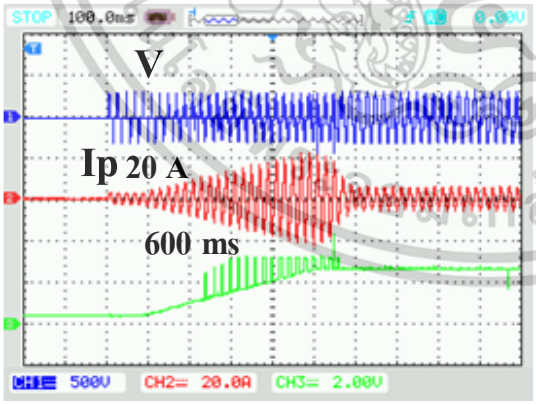
การทดสอบแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 1.0 และที่ค่าดิวดี้ 15-90%

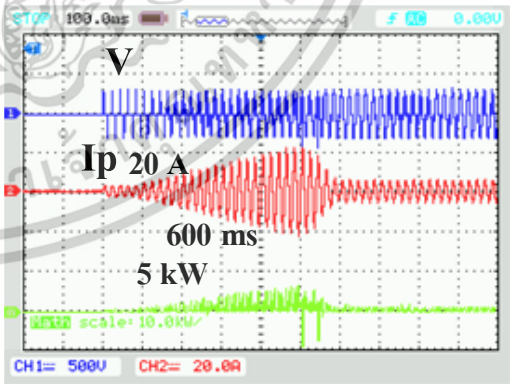




(จ) ค่าความชันตามเวลาที่ 1.5 **(ฉ)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 15-90%

การทดสอบแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 1.5 และที่ค่าดิวดี้ 15-90%





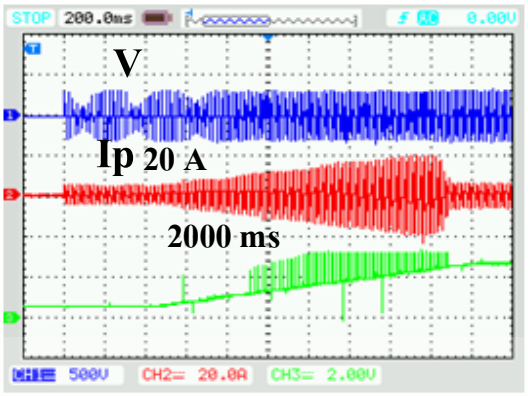
(ช) ค่าความชันตามเวลาที่ 2.0 **(ซ)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 15-90%

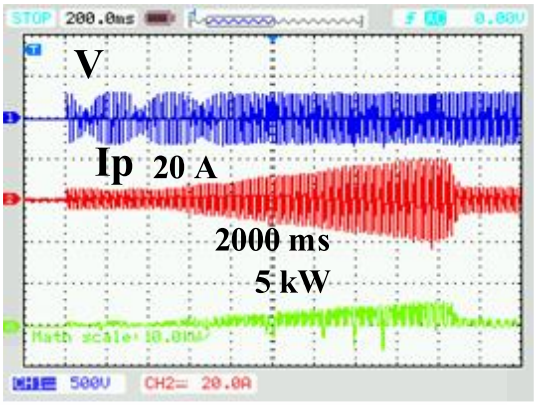
การทดสอบแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 2.0 และที่ค่าดิวดี้ 15-90%

รูปที่ 6.20 การทดสอบแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และที่ค่าดิวดี้ 15-90%

เป็นค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้ชั่วขณะ (Instantaneous)

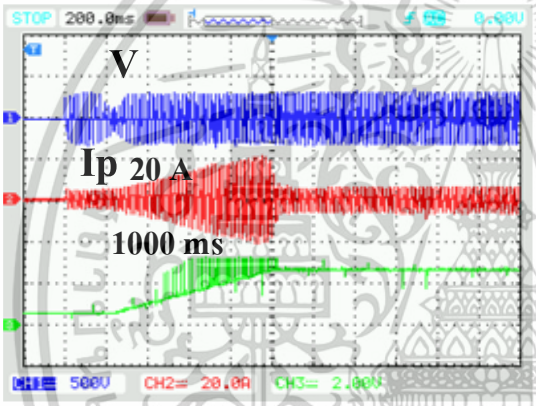
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

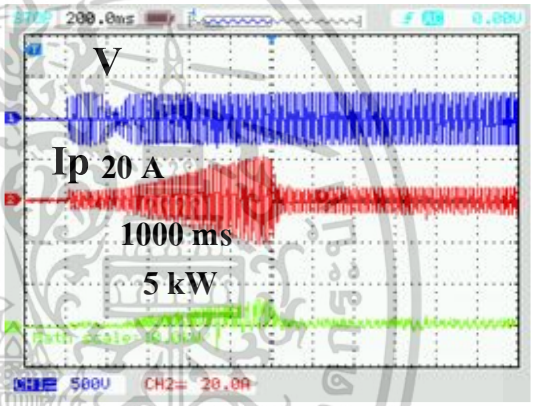




(ก) ค่าความชันตามเวลาที่ 0.5 **(ข)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 20-90%

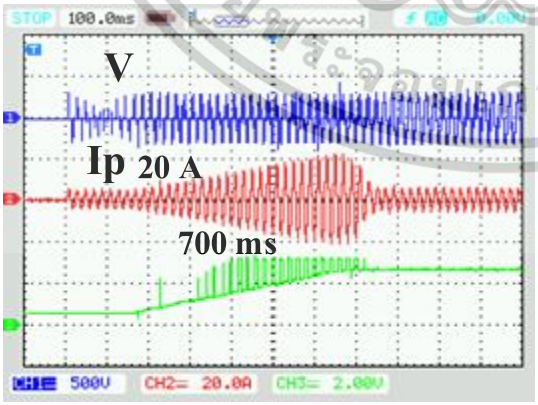
การทดสอบแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 0.5 และที่ค่าดิวดี้ 20-90%

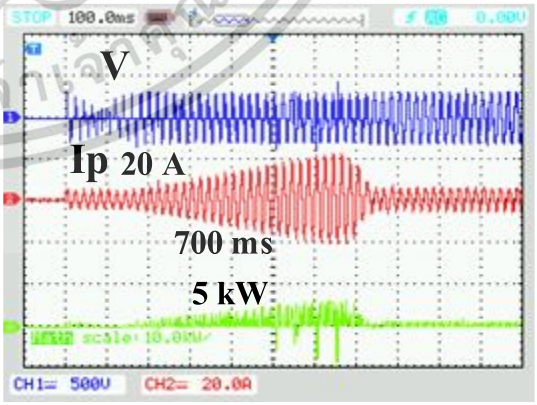




(ค) ค่าความชันตามเวลาที่ 1.0 **(ง)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 20-90%

การทดสอบแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 1.0 และที่ค่าดิวดี้ 20-90%

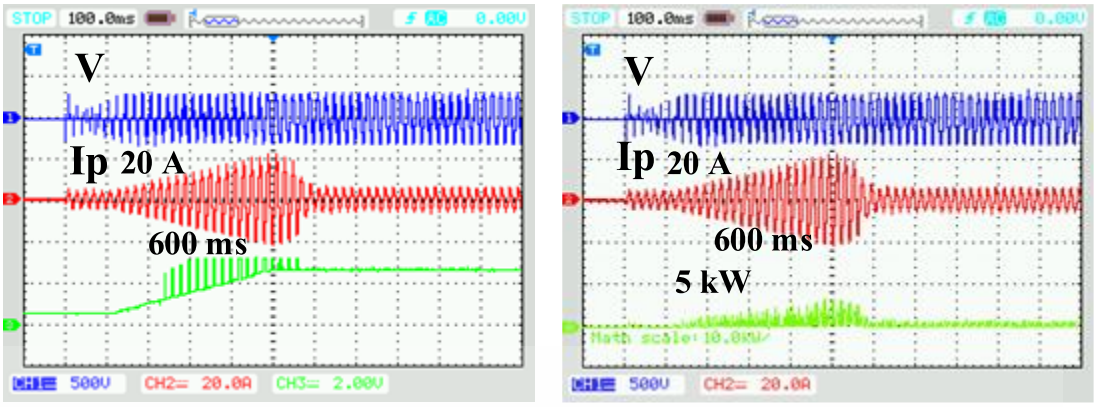




(จ) ค่าความชันตามเวลาที่ 1.5 **(ฉ)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 20-90%

การทดสอบแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 1.5 และที่ค่าดิวดี้ 20-90%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

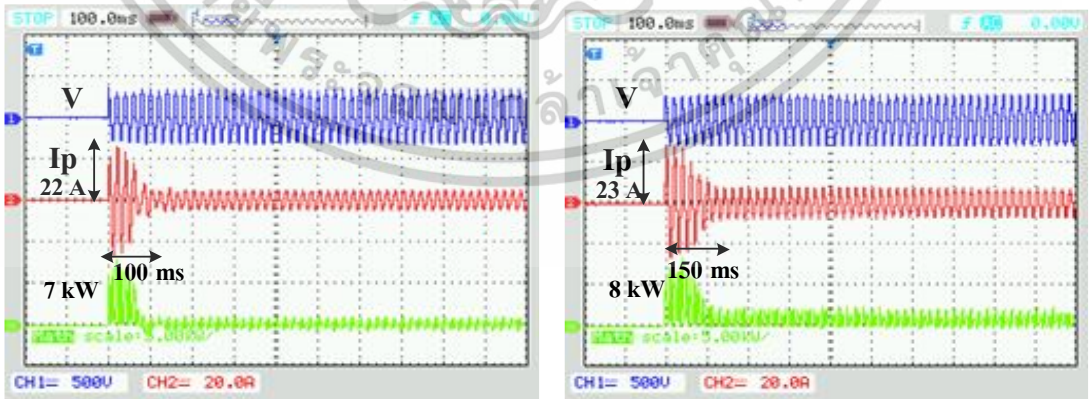


(ช) ค่าความชันตามเวลาที่ 2.0 **(ซ)** กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ดิวดี้ 20-90%

การทดสอบแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 2.0 และที่ค่าดิวดี้ 20-90%

รูปที่ 6.21 การทดสอบแบบมีโหลดที่ค่าความชัน 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และที่ค่าดิวดี้ 20-90% เป็นค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้ชั่วขณะ (Instantaneous)

การทดสอบสตาร์ทมอเตอร์แบบโดยตรง Direct On Line : DOL รูป (ก) เป็นการสตาร์ทมอเตอร์แบบโดยตรงที่ไม่มีโหลด และรูป (ข) เป็นการสตาร์ทมอเตอร์แบบโดยตรงที่ใส่โหลดเข้าไปที่ 1.3 Nm เพื่อดูความสัมพันธ์ของค่ากระแสขณะทำการเริ่มต้นการหมุนและค่าพลังงานที่ใช้เข้าไปเพื่อทำการเปรียบเทียบซึ่งจะพบว่าการหมุนโดยตรงแบบไม่มีโหลดกินพลังงานน้อยกว่าแบบมีโหลดเกือบครึ่งและช่วงระยะเวลาจะสั้นกว่า สรุปกล่าวคือการเริ่มต้นค่าความชันมากจะใช้เวลาน้อย กินกระแสมากและพลังงานมากในชั่วขณะซึ่งเป็นผลคูณของแรงดันและกระแสจะมีพลังงานสละน้อยคือมอเตอร์จะไม่ร้อนมาก แต่หากค่าเริ่มต้นมีค่าความชันน้อยจะใช้เวลามาก กินกระแสน้อยและพลังงานน้อยในชั่วขณะซึ่งเป็นผลคูณของแรงดันและกระแสจะมีพลังงานสละน้อยคือมอเตอร์จะมีความร้อนนั้นเอง

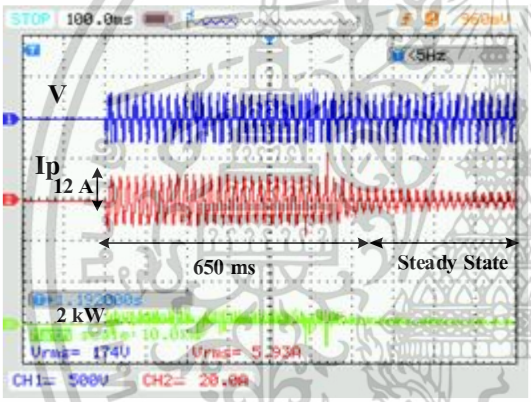


(ก) DOL แบบไม่มีโหลด **(ข)** DOL แบบมีโหลด 1.3 Nm

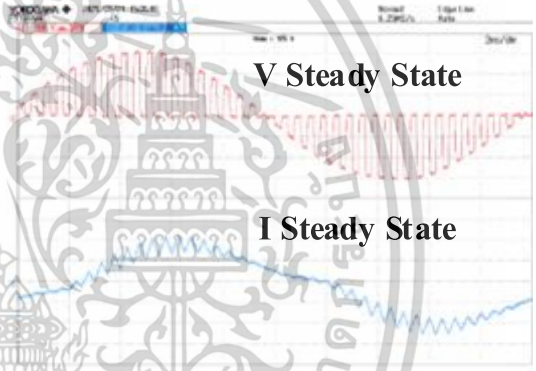
รูปที่ 6.22 การทดสอบเริ่มหมุนมอเตอร์แบบโดยตรง Direct On Line : DOL เป็นค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้ชั่วขณะ (Instantaneous)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

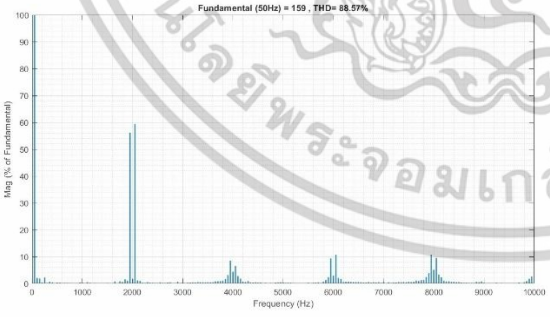
การทดสอบสตาร์ทมอเตอร์แบบการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ทด้วยโดยวิธีการพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบอะซิงโครนัส Asynchronous PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS โดยการควบคุมการป้อนกลับที่กระแสของมอเตอร์สำหรับสำหรับการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลและการทำงานที่ค่าดิวตี้ 50% และ 90% ที่โหลด 1.1 Nm ,1.3 Nm และ 1.8 Nm เพื่อดูความสัมพันธ์ของค่ากระแสค่าแรงดันขณะทำการเริ่มต้นการหมุนและค่าพลังงานที่ใช้ไปเพื่อดูสถานะการทำงานของการทดสอบเปรียบเทียบช่วงเข้าสู่การทำงานสภาวะคงที่ (Steady State) ของรูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแส และค่าของฮาร์มอนิกของคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสที่ค่าดิวตี้ 50% และ 90% ด้านที่มีการช็อปเปอร์ที่ความถี่ 2 kHz ซึ่งจะได้กล่าวในลำดับต่อไป



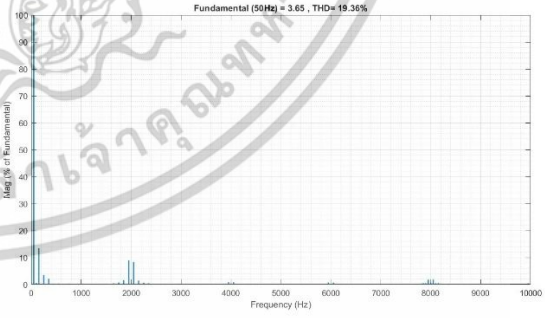
(ก) PWMSS แบบมีโหลด 1.1 Nm ที่ดิวตี้ 50%



(ข) ช่วงแรงดันและกระแสคงที่



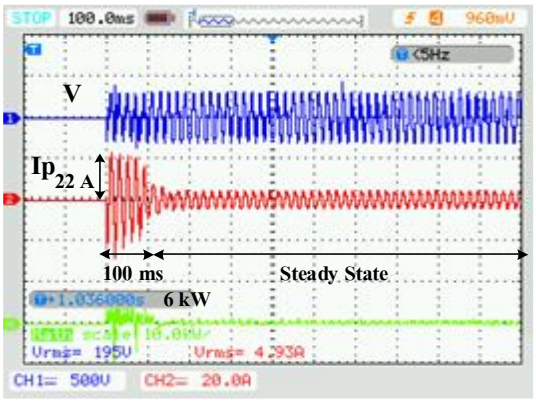
(ค) ฮาร์มอนิกของแรงดันที่ค่าดิวตี้ 50%

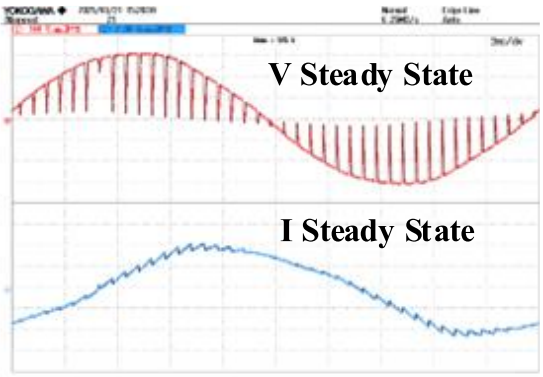


(ง) ฮาร์มอนิกของกระแสที่ค่าดิวตี้ 50%

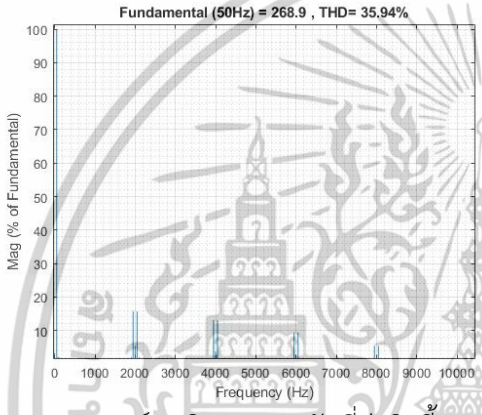
รูปที่ 6.23 การทดสอบเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลของมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าดิวตี้ 50% ที่โหลด 1.1 Nm

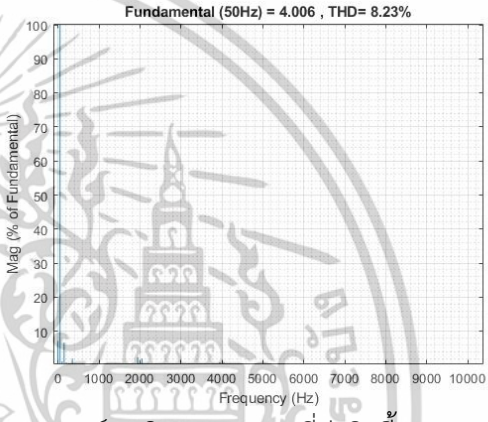
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





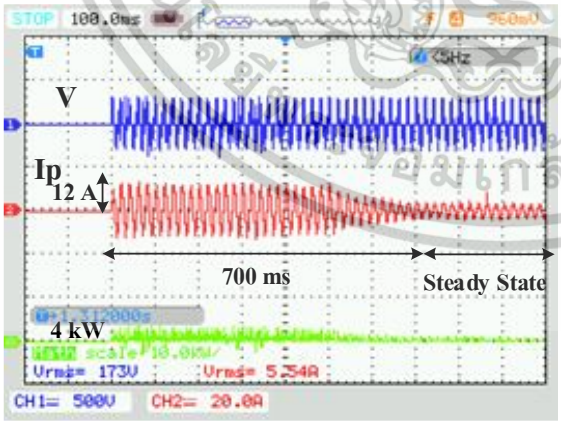
(ก) PWMSS แบบมีโหลด 1.1 Nm ที่ดิวตี้ 90% **(ข)** ช่วงแรงดันและกระแสคงที่

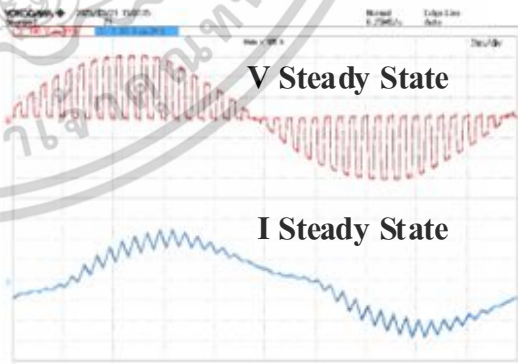




(ค) ฮาร์มอนิกของแรงดันที่ค่าดิวตี้ 90% **(ง)** ฮาร์มอนิกของกระแสที่ค่าดิวตี้ 90%

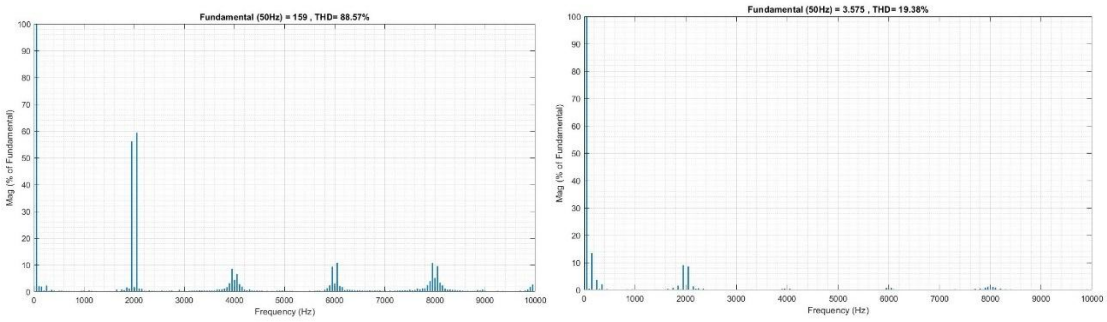
รูปที่ 6.24 การทดสอบเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลของมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าดิวตี้ 90% ที่โหลด 1.1 Nm





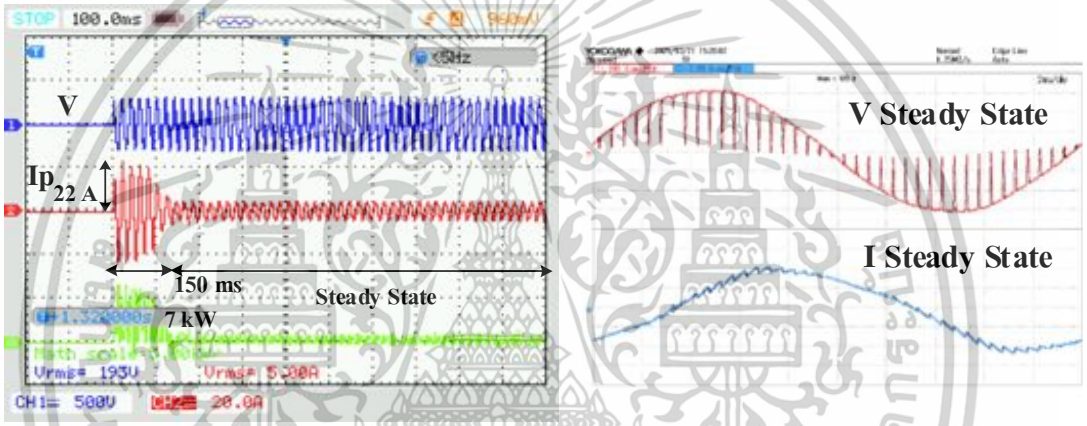
(ก) PWMSS แบบมีโหลด 1.3 Nm ที่ดิวตี้ 50% **(ข)** ช่วงแรงดันและกระแสคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

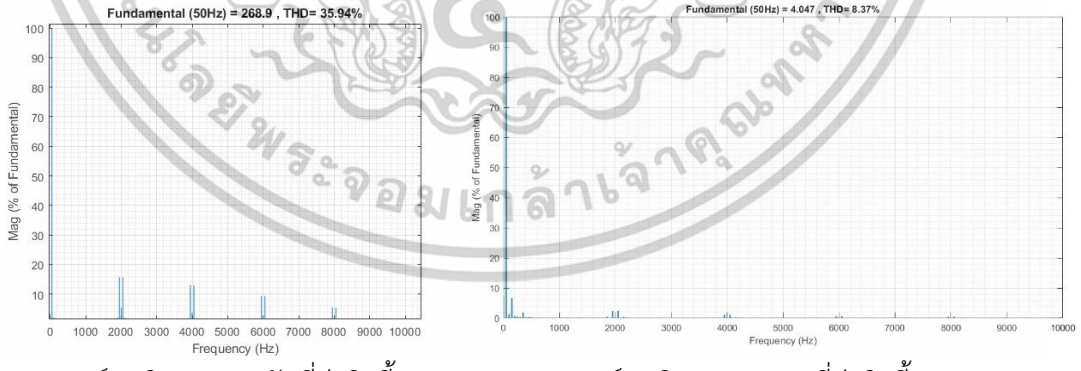


(ค) ฮาร์มอนิกของแรงดันที่ค่าดิวตี้ 50% **(ง)** ฮาร์มอนิกของกระแสที่ค่าดิวตี้ 50%

รูปที่ 6.25 การทดสอบเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลของมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าดิวตี้ 50% ที่โหลด 1.3 Nm



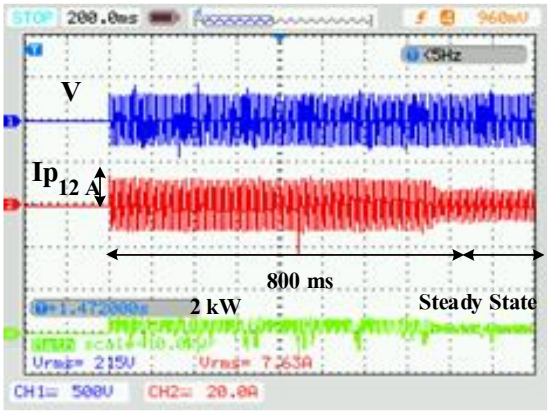
(ก) PWMSS แบบมีโหลด 1.3 Nm ที่ดิวตี้ 90% **(ข)** ช่วงแรงดันและกระแสคงที่



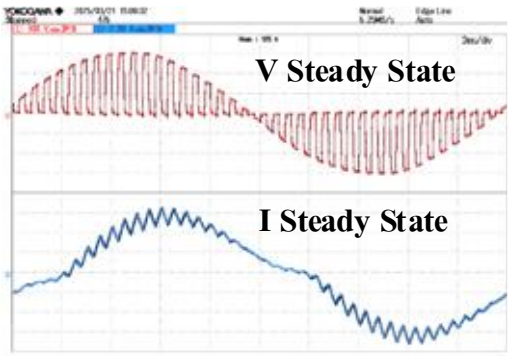
(ค) ฮาร์มอนิกของแรงดันที่ค่าดิวตี้ 90% **(ง)** ฮาร์มอนิกของกระแสที่ค่าดิวตี้ 90%

รูปที่ 6.26 การทดสอบเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลของมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าดิวตี้ 90% ที่โหลด 1.3 Nm

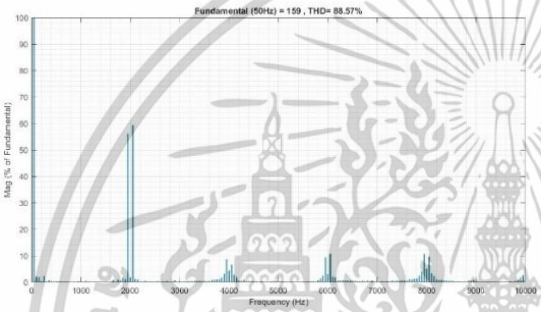
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



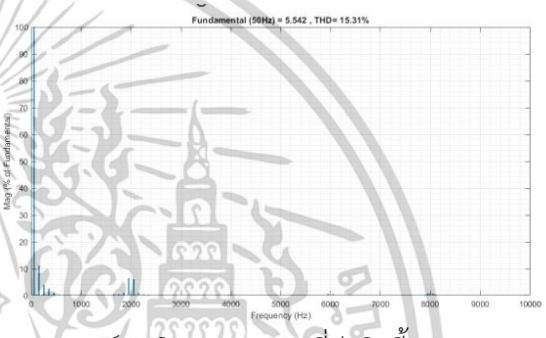
(ก) PWMSS แบบมีโหลด 1.8 Nm ที่ดิวตี้ 50%



(ข) ช่วงแรงดันและกระแสคงที่

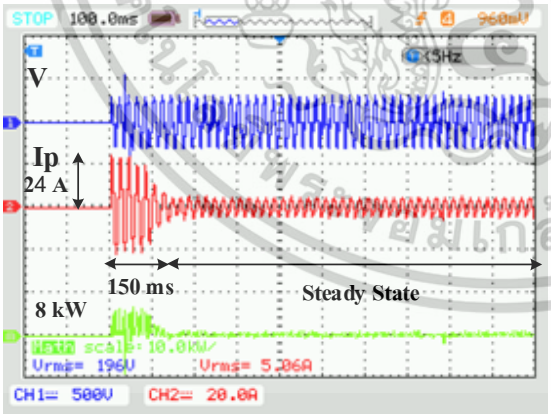


(ค) ฮาร์มอนิกของแรงดันที่ค่าดิวตี้ 50%

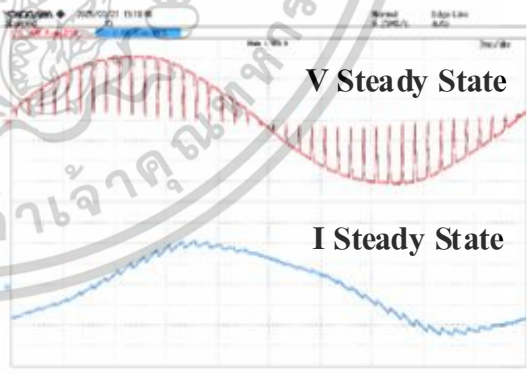


(ง) ฮาร์มอนิกของกระแสที่ค่าดิวตี้ 50%

รูปที่ 6.27 การทดสอบเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลของมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าดิวตี้ 50% ที่โหลด 1.8 Nm

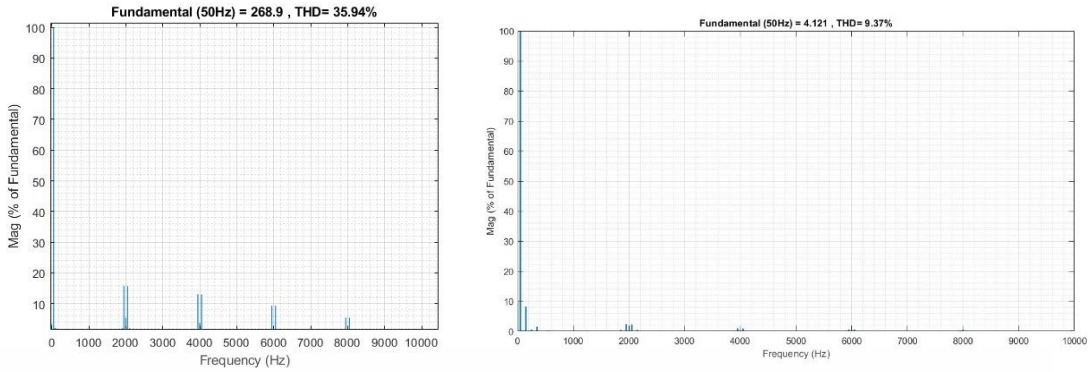


(ก) PWMSS แบบมีโหลด 1.8 Nm ที่ดิวตี้ 90%



(ข) ช่วงแรงดันและกระแสคงที่

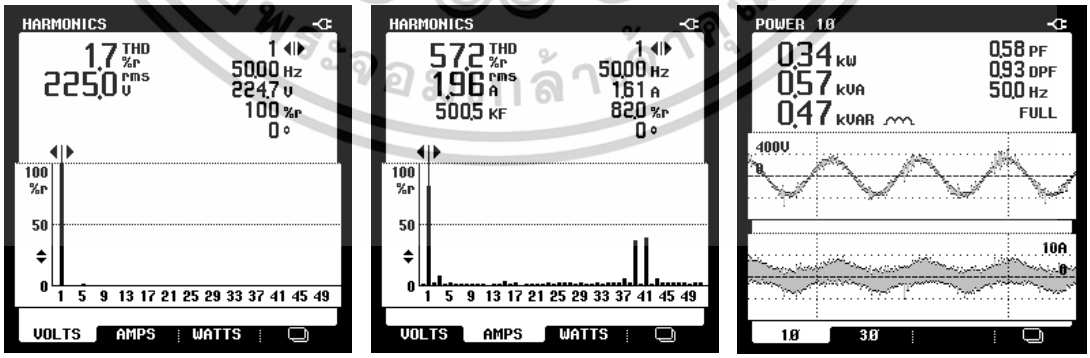
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) ฮาร์มอนิกของแรงดันที่ค่าดิวตี้ 90% **(ง)** ฮาร์มอนิกของกระแสที่ค่าดิวตี้ 90%

รูปที่ 6.28 การทดสอบเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลของมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าดิวตี้ 90% ที่โหลด 1.8 Nm

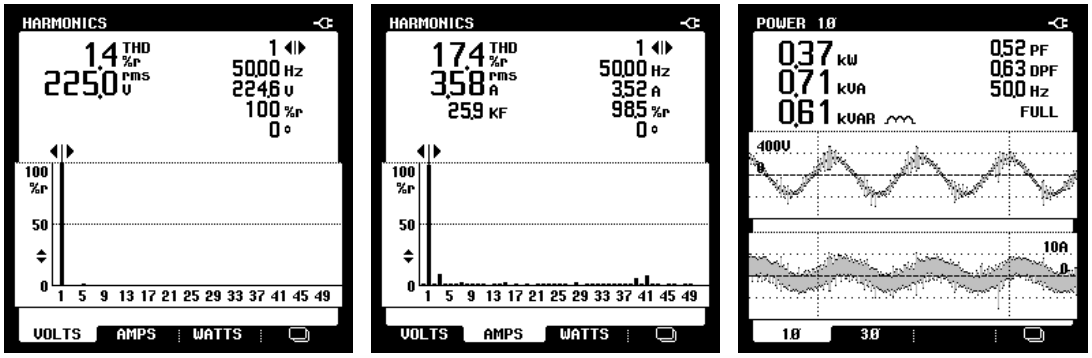
รูปที่ 6.29 - 6.34 ผลจากการวัดค่าด้านหน้าช็อปเปอร์ที่ความถี่ 50 Hz จากเครื่องวัด Fluke รุ่น Fluke 43B/003 Power Quality Analyzer ที่จะสอดคล้องกับรูปที่ 6.23 - 6.28 สตาร์ทมอเตอร์แบบการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ทด้วยโดยวิธีการพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบอะซิงโครนัส Asynchronous PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS โดยการควบคุมการป้อนกลับที่กระแสของมอเตอร์สำหรับสำหรับการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลและการทำงานที่ค่าดิวตี้ 50% และ 90% ที่โหลด 1.1 Nm ,1.3 Nm และ 1.8 Nm เพื่อดูความสัมพันธ์ของรูปคลื่นและรูปกราฟของสัญญาณแรงดัน กระแส และค่าของฮาร์มอนิกของคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสที่ค่าดิวตี้ 50% และ 90% ขณะทำการเริ่มต้นการหมุนและค่าพลังงานเป็นค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้ชั่วขณะ (Instantaneous) เพื่อดูสถานะการทำงานของการทดสอบ



(ก) ฮาร์มอนิกของแรงดัน **(ข)** ฮาร์มอนิกของกระแส **(ค)** ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้า

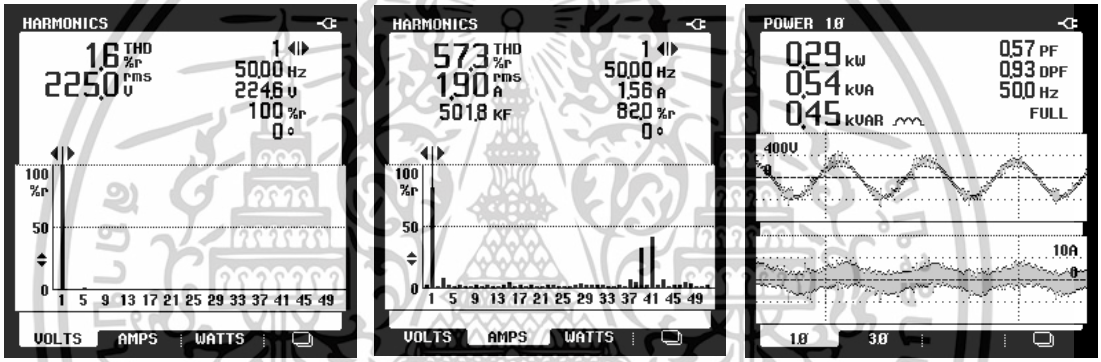
รูปที่ 6.29 การทดสอบเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลของมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าดิวตี้ 50% ที่โหลด 1.1 Nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



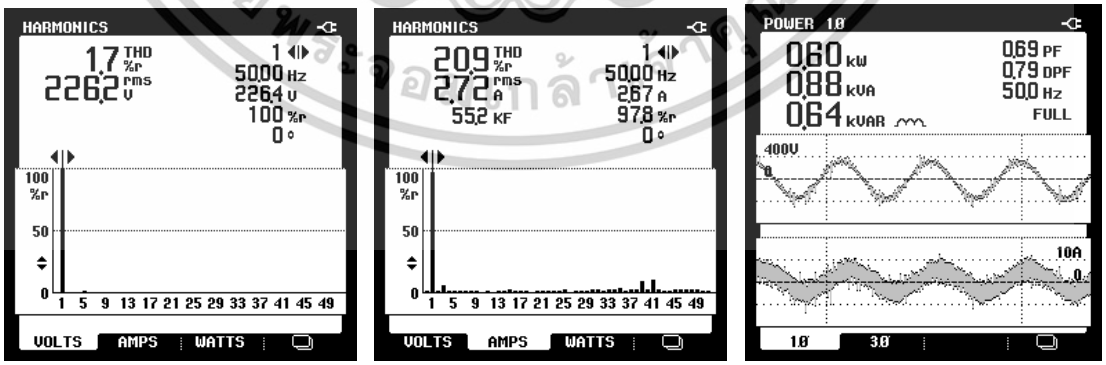
(ก) ฮาร์มอนิกของแรงดัน **(ข)** ฮาร์มอนิกของกระแส **(ค)** ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้า

รูปที่ 6.30 การทดสอบเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลของมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าดิวตี้ 90% ที่โหลด 1.1 Nm



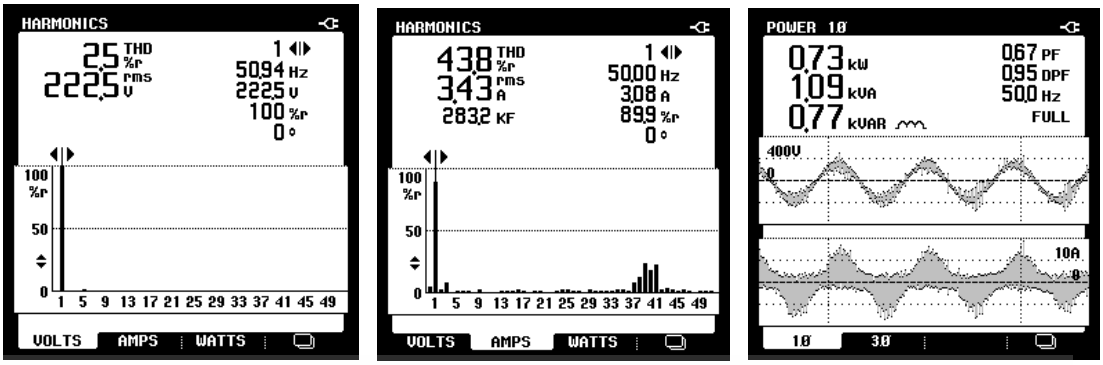
(ก) ฮาร์มอนิกของแรงดัน **(ข)** ฮาร์มอนิกของกระแส **(ค)** ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้า

รูปที่ 6.31 การทดสอบเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลของมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าดิวตี้ 50% ที่โหลด 1.3 Nm



(ก) ฮาร์มอนิกของแรงดัน **(ข)** ฮาร์มอนิกของกระแส **(ค)** ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้า **รูปที่ 6.32** การทดสอบเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลของมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าดิวตี้ 90% ที่โหลด 1.3 Nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

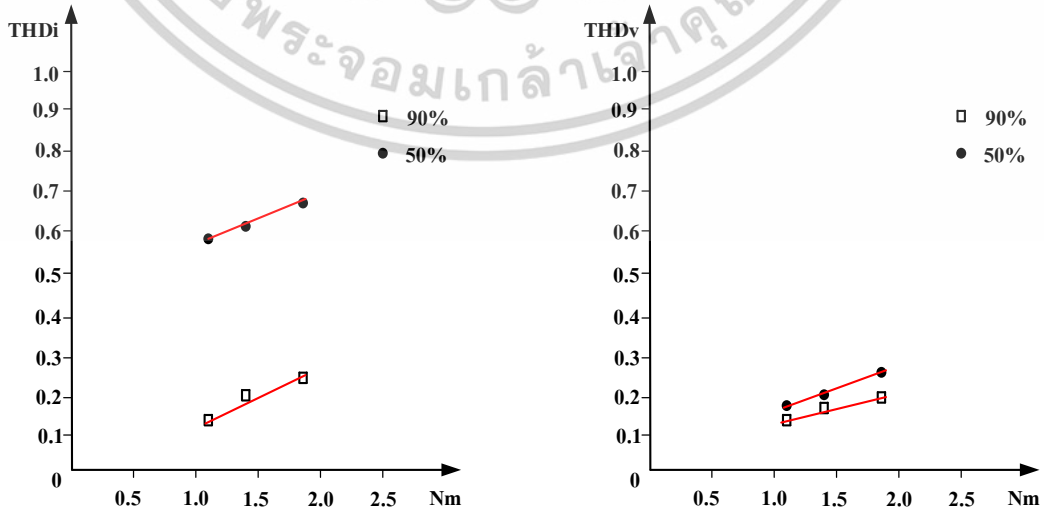


(ก) ฮาร์มอนิกของแรงดัน **(ข)** ฮาร์มอนิกของกระแส **(ค)** ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้า

รูปที่ 6.33 การทดสอบเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลของมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าดิวตี้ 50% ที่โหลด 1.8 Nm

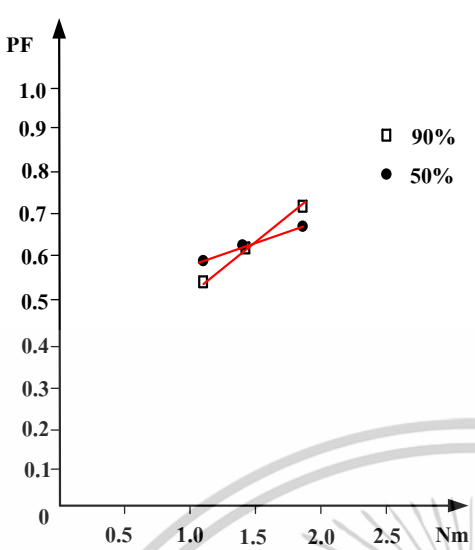
(ก) ฮาร์มอนิกของแรงดัน **(ข)** ฮาร์มอนิกของกระแส **(ค)** ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้า

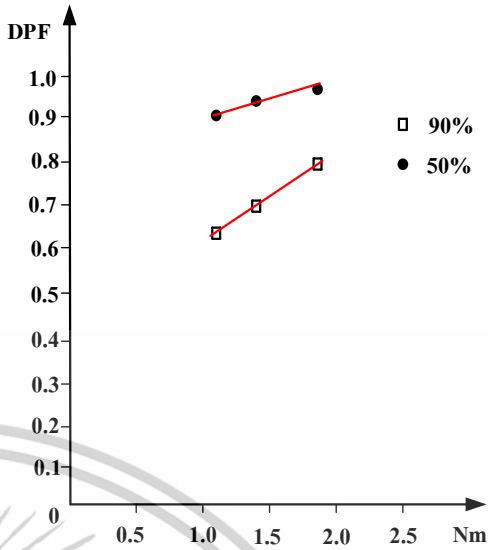
รูปที่ 6.34 การทดสอบเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลของมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าดิวตี้ 90% ที่โหลด 1.8 Nm



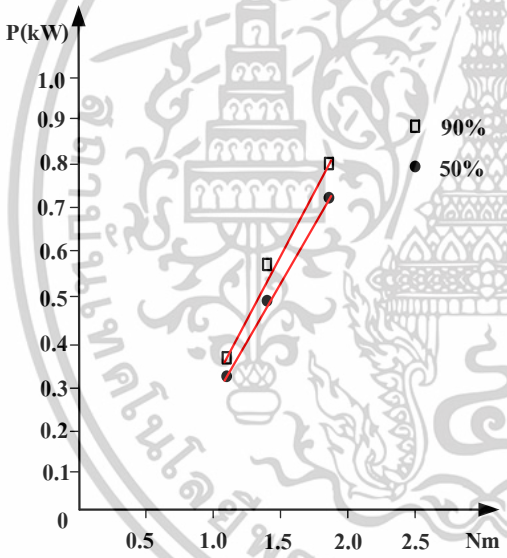
(ก) ฮาร์มอนิกของกระแสที่ค่าดิวตี้ 50%-90% **(ข)** ฮาร์มอนิกของแรงดันที่ค่าดิวตี้ 50%-90%

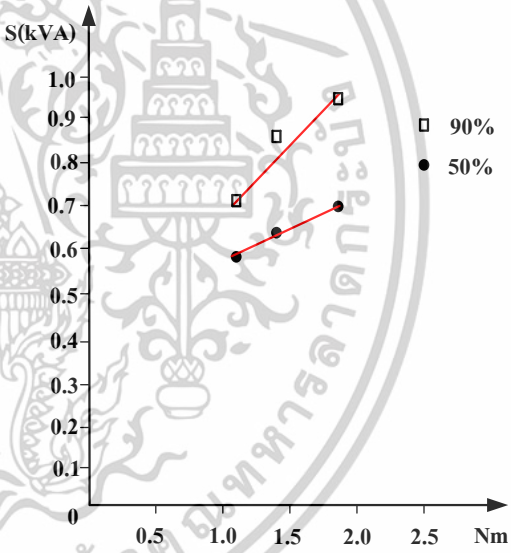
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





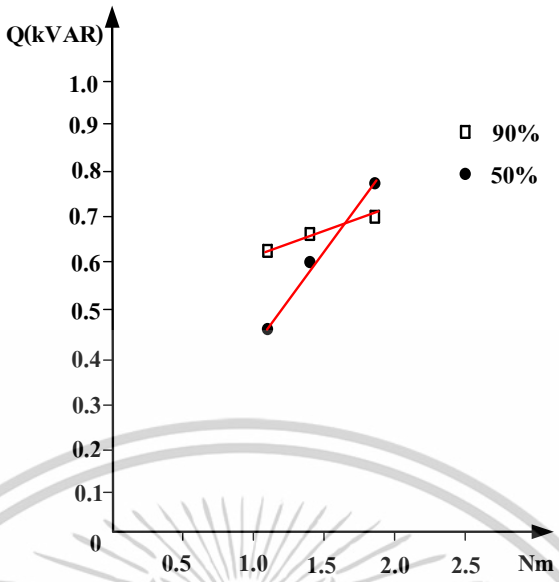
(ค) ตัวประกอบกำลังที่ดิวตี้ 50%-90% **(ง)** ตัวประกอบกำลังการแทนที่ที่ดิวตี้ 50%-90%





(จ) กำลังไฟฟ้าจริงที่ดิวตี้ 50%-90% **(ฉ)** กำลังไฟฟ้าปรากฏที่ดิวตี้ 50%-90%

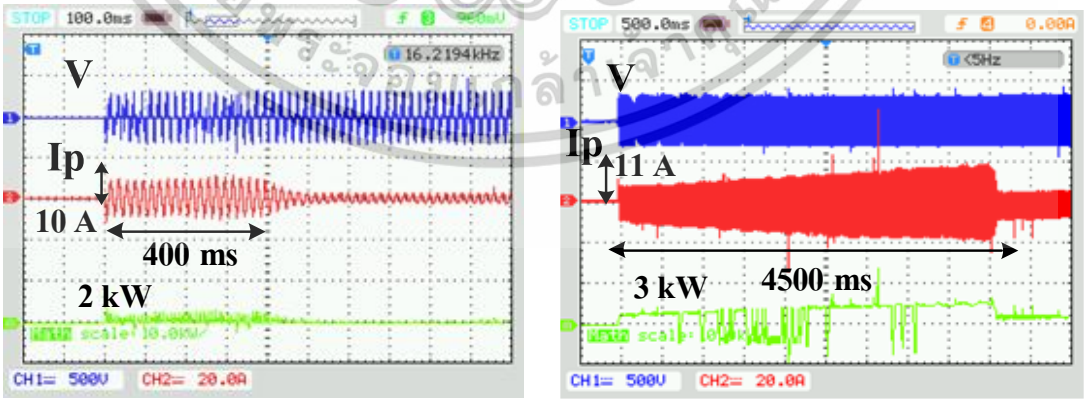
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ช) กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ดิวตี้ 50%-90%

รูปที่ 6.35 กราฟความสัมพันธ์จากการทดสอบเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลของมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าดิวตี้ 50% และ 90% ที่โหลด 1.1 Nm ,1.3 Nm, 1.8 Nm

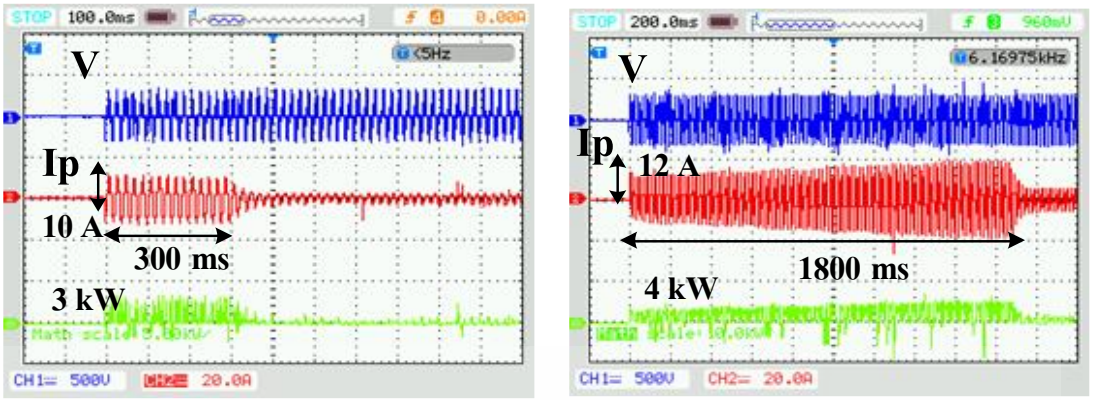
เป็นการทดสอบสตาร์ทมอเตอร์แบบการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ทด้วยโดยวิธีการพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบอะซิงโครนัส Asynchronous PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS โดยการควบคุมการป้อนกลับที่กระแสของมอเตอร์สำหรับสำหรับการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลที่ค่าควบคุมกระแสพิกัด 200%, 250% ,300%, 350% และ 400% โดยการเปรียบแบบไม่มีโหลดและแบบมีโหลดที่ 1.1 Nm เพื่อดูความสัมพันธ์ของค่าควบคุมกระแสพิกัดและระยะเวลาขณะทำการเริ่มต้นการหมุนและค่าพลังงานเป็นค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้ชั่วขณะ (Instantaneous) ซึ่งจะได้กล่าวในลำดับต่อไป



(ก) PWMSS ควบคุมกระแสพิกัด 200% ไม่มีโหลด **(ข)** PWMSS ควบคุมกระแสพิกัด 200% มีโหลด

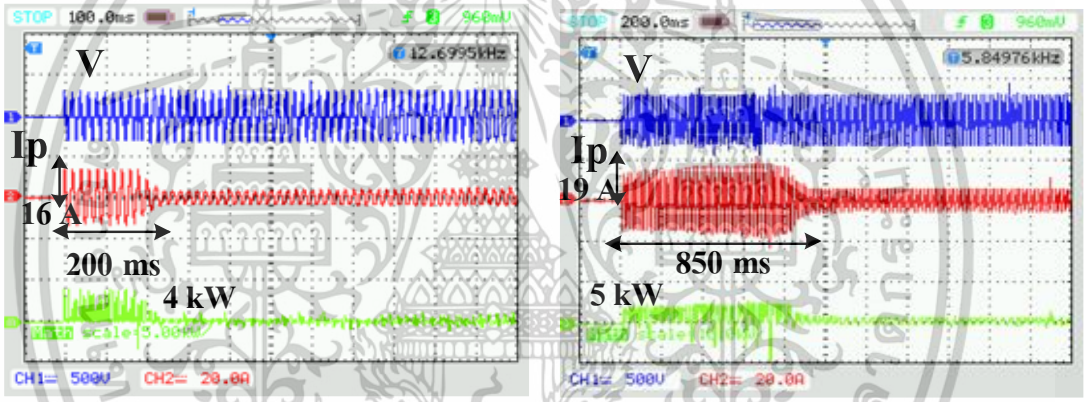
รูปที่ 6.36 การเริ่มหมุนมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าควบคุมกระแสพิกัด 200% แบบไม่มีโหลดและแบบมีโหลด 1.1 Nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) PWMSS ควบคุมกระแสพิกัด 250% ไม่มีโหลด **(ข)** PWMSS ควบคุมกระแสพิกัด 250% มีโหลด

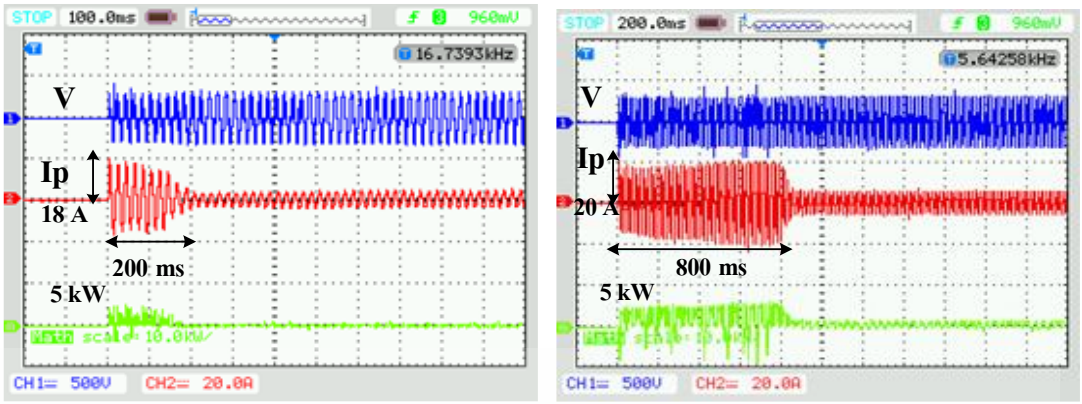
รูปที่ 6.37 การเริ่มหมุนมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าควบคุมกระแสพิกัด 250% แบบไม่มีโหลดและแบบมีโหลด 1.1 Nm



(ก) PWMSS ควบคุมกระแสพิกัด 300% ไม่มีโหลด **(ข)** PWMSS ควบคุมกระแสพิกัด 300% มีโหลด

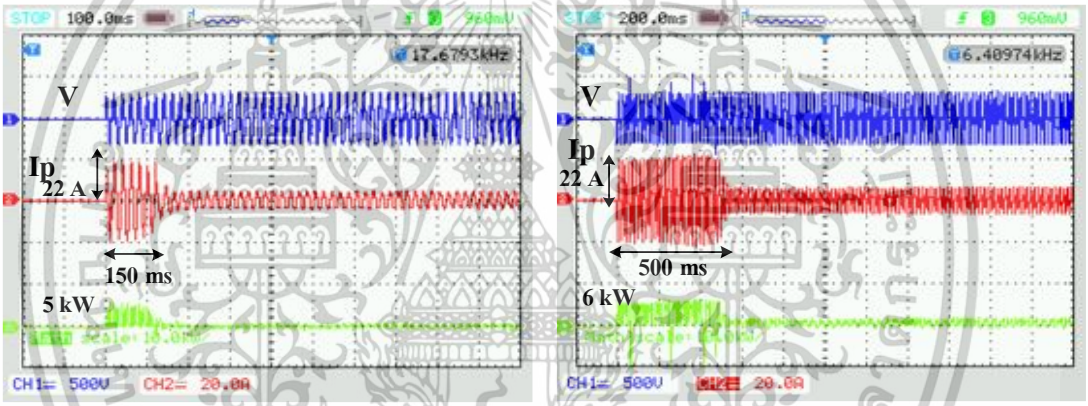
รูปที่ 6.38 การเริ่มหมุนมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าควบคุมกระแสพิกัด 300% แบบไม่มีโหลดและแบบมีโหลด 1.1 Nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) PWMSS ควบคุมกระแสพิกัด 350% ไม่มีโหลด **(ข)** PWMSS ควบคุมกระแสพิกัด 350% มีโหลด

รูปที่ 6.39 การเริ่มหมุนมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าควบคุมกระแสพิกัด 350% แบบไม่มีโหลดและแบบมีโหลด 1.1 Nm



(ก) PWMSS ควบคุมกระแสพิกัด 400% ไม่มีโหลด **(ข)** PWMSS ควบคุมกระแสพิกัด 400% มีโหลด

รูปที่ 6.40 การเริ่มหมุนมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าควบคุมกระแสพิกัด 400% แบบไม่มีโหลดและแบบมีโหลด 1.1 Nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

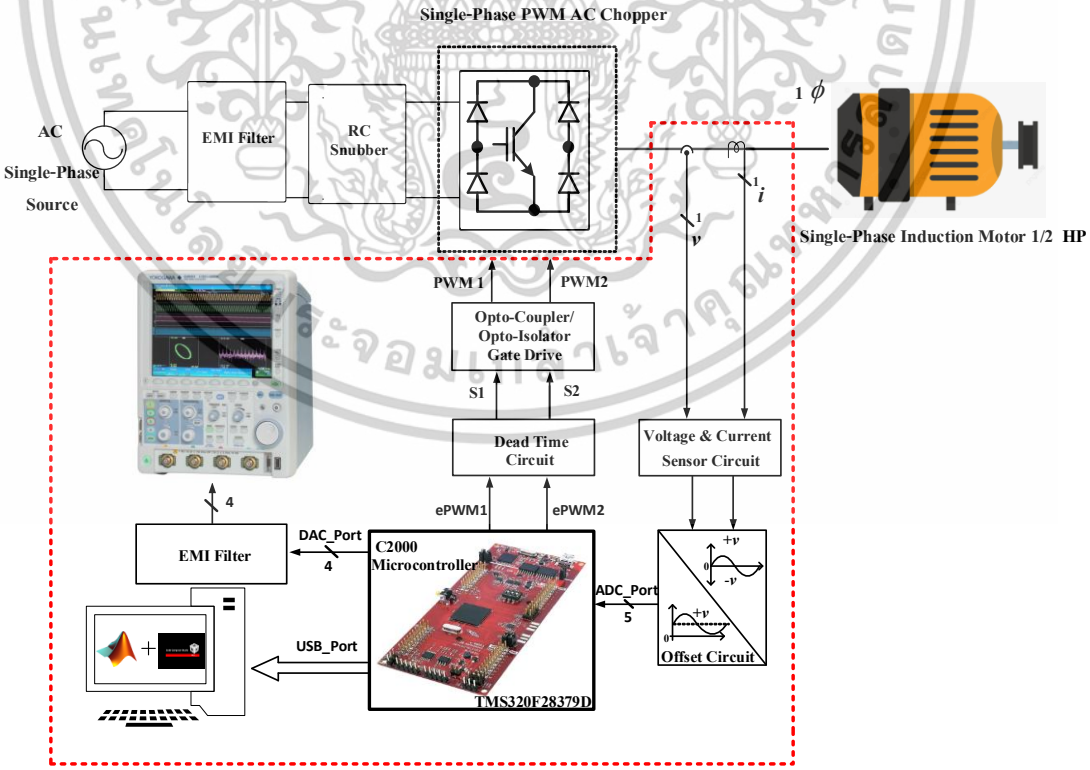
บทที่ 7
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยการควบคุมกระแสเริ่มต้นโดยใช้เทคนิคอะซิงโครนัส พีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์

7.1 สรุปผลการวิจัยการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยการควบคุมกระแสเริ่มต้นโดยใช้เทคนิคอะซิงโครนัส พีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์

สำหรับวิทยานิพนธ์ในงานวิจัยเล่มนี้ได้นำเสนอการออกแบบวงจรควบคุมและวงจรกำลังสำหรับการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยการควบคุมกระแสเริ่มต้นโดยใช้เทคนิคอะซิงโครนัส พีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ (Soft Start Control for a Single-Phase Induction Motor With Starting Current Control Using an Asynchronous PWM AC Chopper Technique) ซึ่งจะเป็นวิธีการควบคุมระบบการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลโดยวิธีการพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบอะซิงโครนัส Asynchronous PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่นำเสนอสำหรับการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ทขณะเริ่มหมุนแบบนิ่มนวล โดยมีหลักการทำงานคือใช้สวิตช์แบบสองทิศทางในการสร้างวงจรกำลังซึ่งจะเป็นวิธีการที่นำเสนอนี้สามารถสร้างวงจรควบคุมได้ง่ายมีความสะดวกและไม่ซับซ้อนเหมือนวิธีการเดิมที่มีการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ทขณะเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลโดยวิธีการพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบซิงโครนัส (Synchronous PWM AC Chopper) ที่ผ่านมากล่าวคือใช้สัญญาณเพียงหนึ่งคู่ไปควบคุมวงจรกำลังหนึ่งเฟสซึ่งสัญญาณที่สร้างขึ้นไม่จำเป็นต้องให้ซิงโครไนซ์กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสของการไฟฟ้า นอกจากนี้แล้วรูปคลื่นกระแสของมอเตอร์ยังเข้าใกล้รูปคลื่นไซน์ซึ่งจะช่วยลดปัญหาทางด้านคุณภาพไฟฟ้าได้ดีขึ้น ด้วยข้อดีที่ได้กล่าวมานี้เองของวิธีการควบคุมที่นำเสนอยังสามารถปรับขนาดแรงดันตั้งแต่เริ่มต้นไปจนถึงสภาวะคงตัวได้แบบเชิงเส้นนั้นทำให้สเตเตอร์ฟลักซ์มีความเป็นเชิงเส้นตามไปด้วย ซึ่งจะส่งผลดีต่อแรงบิดแม่เหล็กของมอเตอร์มีความราบเรียบทำให้มอเตอร์เริ่มหมุนออกตัวได้นิ่มนวลกว่าวิธีการเดิมผลจากการจำลองในบทที่ 5 และผลจากการทดสอบในบทที่ 6 สามารถพิสูจน์การยืนยันได้อย่างชัดเจนและสิ่งที่จะเพิ่มเติมคือวิธีการที่ได้นำเสนอสามารถกำหนดแรงดันเริ่มต้นและค่าเวลาความได้ง่ายมีความเป็นเชิงเส้นดีกว่าวิธีการเดิม กล่าวคือทั้งเป็นการช่วยยืดอายุของมอเตอร์ ไม่ลดงานที่เคยทำอยู่โดยมอเตอร์ยังคงทำงานที่ความเร็วรอบคงที่ เป็นอุปกรณ์เสริมโดยไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนมอเตอร์ หรือขั้นตอนการผลิต ลดการสูญเสียที่เป็นภาระค่าใช้จ่ายโดยไม่จำเป็น มีระบบ Soft Start ทำให้ค่าบำรุงรักษา

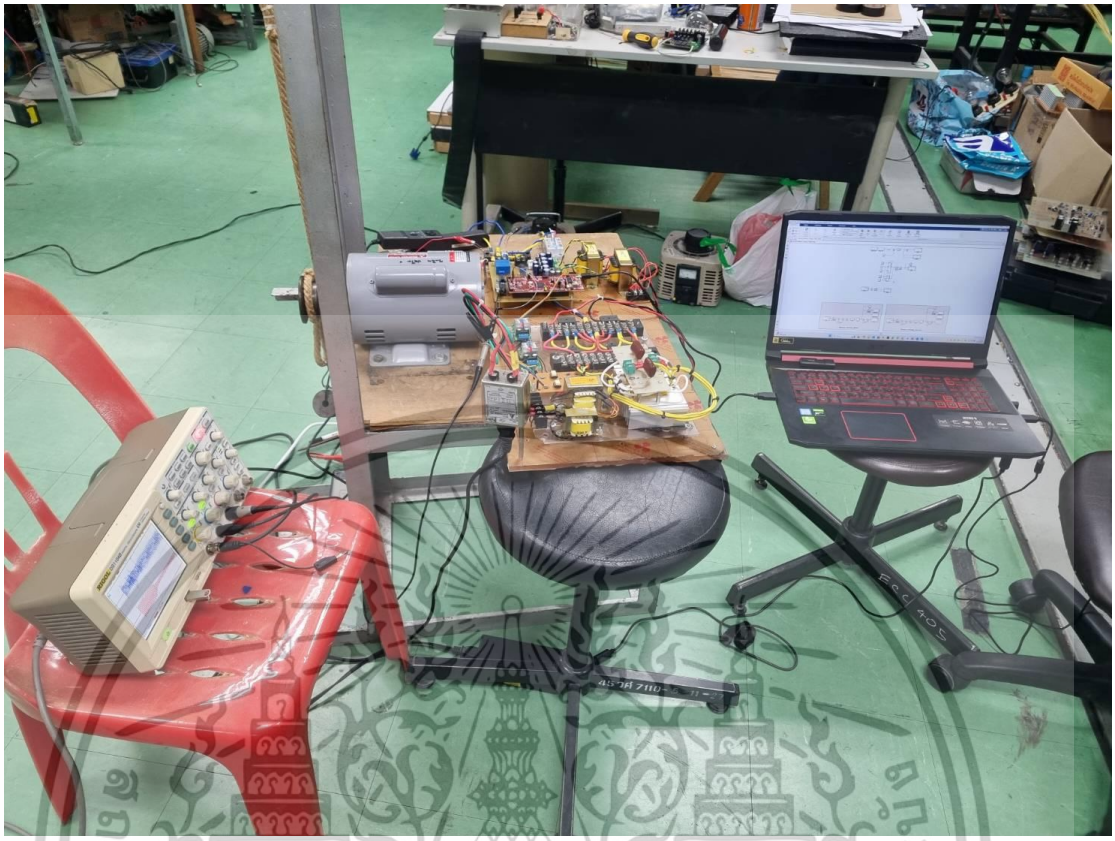
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์และระบบส่งกำลังลดลง ระบบ Soft Start สามารถใช้แทน Star Delta Start ได้ทันที และลดความเครียด การสั่นสะเทือนและเสียงที่เกิดจากการทำงานของมอเตอร์ และทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยและการพัฒนาต่อยอดไปสู่ลักษณะงานเชิงพาณิชย์ได้ด้วย รูปที่ 7.1 - 7.2 แสดงให้เห็นถึงการจำลองและการทดสอบระบบควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลโดยวิธีการพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบอะซิงโครนัส Asynchronous PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ซึ่งจะเห็นว่าการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลโดยวิธี PWMSS ที่นำเสนอสามารถแก้ปัญหาทางความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสได้กล่าวคือรูปคลื่นกระแสที่เกิดจากวิธีการนี้จะเข้าใกล้รูปคลื่นไซน์ในขณะที่รูปคลื่นแรงดันมีค่าเพียงฮาร์มอนิกอันดับสูงตามความถี่สวิตช์ซึ่งซึ่งไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของมอเตอร์ ในขณะที่การกำหนดแรงดันเริ่มต้นสามารถทำได้ง่ายโดยการปรับค่าดิวตี้เรโซซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ไม่ซับซ้อนและนอกจากนี้แล้วขนาดแรงดันที่ถูกปรับตามแกนเวลานั้นเป็นเชิงเส้นในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้วงจรสวิตช์สองทิศทางนำมาต่อเป็นวงจรกำลังหนึ่งเฟสเพื่อใช้ควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์เริ่มหมุนให้หมุนแบบนิ่มนวลซึ่งสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมจะใช้สัญญาณเพียงหนึ่งคู่ในการควบคุมวงจรกำลังหนึ่งเฟสและสัญญาณที่สร้างขึ้นมาไม่จำเป็นต้องซิงโครไนซ์กับสัญญาณที่แหล่งจ่ายหนึ่งเฟสและจากการจำลองการควบคุมการเริ่มหมุนให้กับมอเตอร์หนึ่งเฟสแบบนิ่มนวลระหว่างวิธีการเดิมกับวิธีการใหม่ที่นำเสนอสามารถกำหนดเวลาความชันให้ยาวนานขึ้นไม่ส่งผลต่อรูปคลื่นกระแสมอเตอร์และนั้นทำให้แรงบิดแม่เหล็กมีความราบเรียบทำให้มอเตอร์มีการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลมากกว่าวิธีการเดิมสามารถยืนยันได้จากผลทดสอบ



รูปที่ 7.1 การจำลองระบบควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลโดยวิธีการพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์แบบอะซิงโครนัส Asynchronous PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

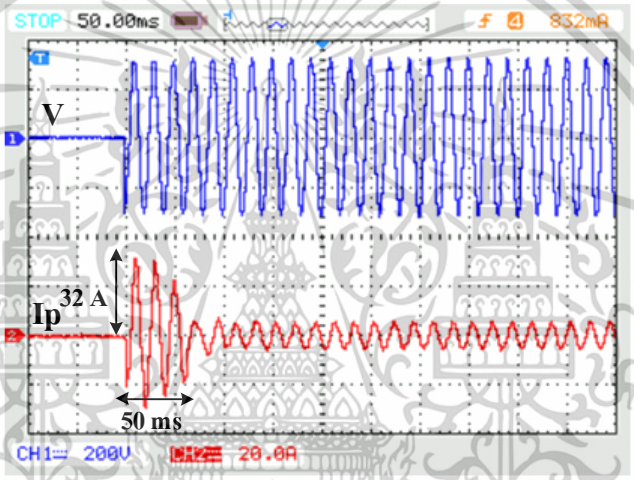


รูปที่ 7.2 การทดสอบระบบควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลโดยวิธีการพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบอะซิงโครนัส Asynchronous PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS

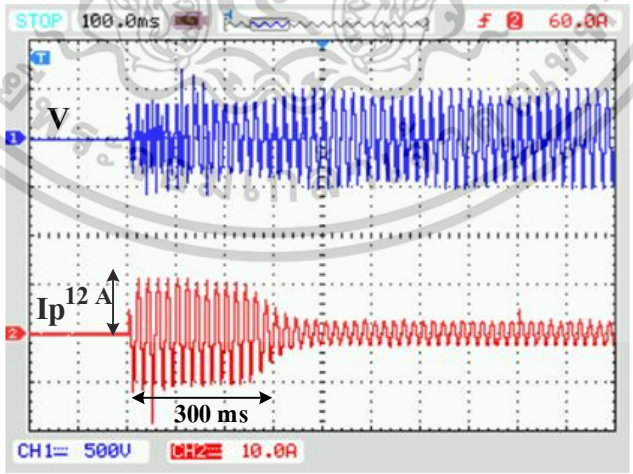
การเริ่มหมุนมอเตอร์โดยตรงหรือแบบ Direct On Line : DOL ดังรูปที่ 7.3 จากรูปจะเห็นได้ว่ามอเตอร์ขณะเริ่มหมุนจะมีค่ากระแสพีคที่ 32 แอมป์หรือกระแสอาเอ็มเอส 22 แอมป์ ซึ่งเกินจากพิกัดของมอเตอร์ (พิกัดกระแสพีคของมอเตอร์ 4.3 แอมป์) ประมาณ 7 เท่า แต่ใช้เวลาในการเริ่มหมุนสั้นที่ 50ms เป็นการทดสอบแบบไม่มีโหลดโดยการตั้งสเกลความเร็ว 50ms/ช่อง สเกลแรงดัน CH1=200V/div สเกลกระแส CH2 = 20A/div และเปรียบเทียบกับวิธีการเริ่มหมุนมอเตอร์แบบนิ่มนวลหรือแบบวิธีการพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์ แบบอะซิงโครนัส Asynchronous PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ส่วนค่าควบคุมกระแสพิกัด 200% ดังรูปที่ 7.4 จากรูปจากเห็นได้ว่ามอเตอร์ขณะเริ่มหมุนจะมีค่ากระแสพีคที่ 12 แอมป์หรือกระแสอาเอ็มเอส 8.4 แอมป์ ใช้เวลาที่ 300ms ซึ่งจะใช้เวลานานกว่าแบบเริ่มหมุนแบบ DOL แบบไม่มีโหลดโดยการตั้งสเกลความเร็ว 100ms/ช่อง สเกลแรงดัน CH1=500V/div สเกลกระแส CH2 = 10A/div ส่วนค่าควบคุมกระแสพิกัด 200% ดังรูปที่ 7.5 จากรูปจากเห็นได้ว่ามอเตอร์ขณะเริ่มหมุนจะมีค่ากระแสพีคที่ 12 แอมป์หรือกระแสอาเอ็มเอส 8.4 แอมป์ แบบมีโหลด 1.1 Nm ใช้เวลา 500ms โดยการตั้งสเกลความเร็ว 100ms/ช่อง สเกลแรงดัน CH1=500V/div สเกลกระแส CH2 = 10A/div และเทียบกับส่วนค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควบคุมกระแสพิกัด 150% ดังรูปที่ 7.6 จากรูปจากเห็นได้ว่ามอเตอร์ขณะเริ่มหมุนจะมีค่ากระแสพีคที่ 8 แอมป์หรือกระแสอาเอ็มเอส 5.6 แอมป์ แบบมีโหลด 1.1 Nm ใช้เวลา 700ms โดยการตั้งสเกลความเร็ว 100ms/ช่อง สเกลแรงดัน CH1=500V/div สเกลกระแส CH2 = 10A/div ตามลำดับจากการทดสอบระบบจริงที่ได้สร้างฮาร์ดแวร์ทั้งใน DOL ใช้กระแสพีคเริ่มหมุนที่ 32 แอมป์และ PWMSS ใช้กระแสพีคเริ่มหมุนที่ 12 แอมป์ สามารถลดกระแสเริ่มหมุนลดลงได้ถึงประมาณ 60-70% ของกระแสพิกัดของมอเตอร์ และที่นำเสนอทั้งสองวิธีการนี้จะเห็นว่าผลการทดสอบช่วยยืนยันถูกต้องของวิธีการที่นำเสนอว่าสามารถควบคุมการทำงานของมอเตอร์ให้ทำการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลได้จริงโดยผลที่ได้มีความสอดคล้องและมีทิศทางไปในทางเดียวกันกับผลจากการจำลองเช่นรูปคลื่นกระแสมอเตอร์โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่มีการกำหนดค่าความชันยาวนานเกินไปตามแสดงในรูปที่ 7.3 - รูปที่ 7.6 ตามลำดับ

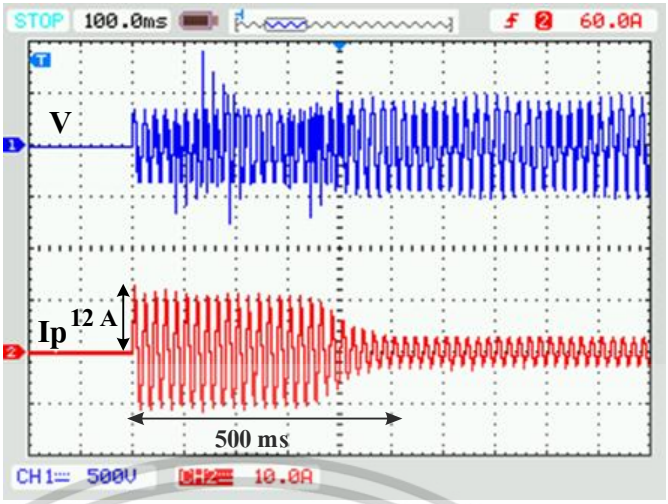


รูปที่ 7.3 การเริ่มหมุนมอเตอร์โดยตรง Direct On Line : DOL แบบไม่มีโหลด

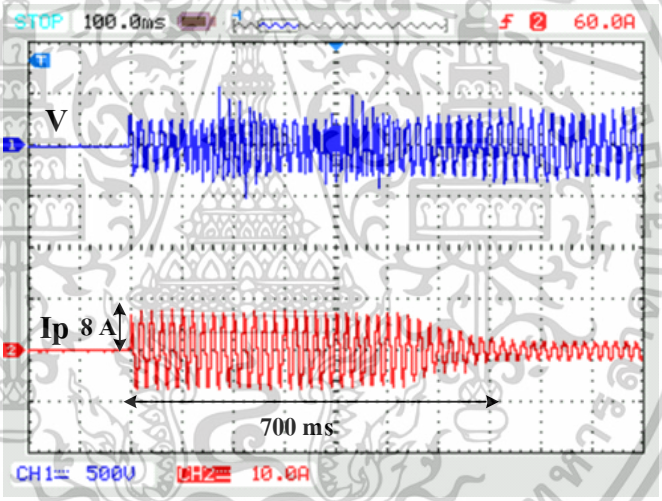


รูปที่ 7.4 การเริ่มหมุนมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าควบคุมกระแสพิกัด 200% แบบไม่มีโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.5 การเริ่มหมุนมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าควบคุมกระแสพิกัด 200% แบบมีโหลด 1.1 Nm



รูปที่ 7.6 การเริ่มหมุนมอเตอร์แบบ PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS ที่ค่าควบคุมกระแสพิกัด 150% แบบมีโหลด 1.1 Nm

7.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยและการต่อยอดพัฒนา

สำหรับงานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการนำเสนอการเริ่มหมุนแบบเปรียบเทียบด้วยวิธีการดั้งเดิมคือ 1. การต่อแหล่งจ่ายเข้ามอเตอร์โดยตรงหรือการสตาร์ทมอเตอร์โดยตรง Direct On Line : DOL) หรือ Direct Online Starting) 2. ใช้หลักการควบคุมเฟส (Phase Control) ส่วนมากใช้ไทรีสเตอร์ต่อสลับหัวท้ายแล้วควบคุมมุมจุดชนวน และวิธีที่ 3. การควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวล (Soft Start Controlling หรือ Phase Control Soft Starter : PCSS) ที่ได้นำเสนอในการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ทด้วยโดยวิธีการพีดับเบิ้ลยูเอ็มเอซี ช็อปเปอร์ แบบอะซิงโครนัส Asynchronous PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการควบคุมการป้อนกลับที่กระแสของมอเตอร์สำหรับสำหรับการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวล และการทำงานวิจัยนี้เราสามารถพัฒนาเพื่อต่อยอดและข้อควรระวังขณะทำการทดสอบมีวิธีการดังนี้

1. แนวทางการพัฒนาต่อยอดสำหรับการใช้เทคนิคการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ทด้วยโดยวิธีการพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ซ็อปเปอร์แบบอะซิงโครนัส Asynchronous PWM AC Chopper Soft Starter : PWMSS สามารถควบคุมด้วยวิธีการใช้เทคนิคฟัซซีลอจิก (Fuzzy Logic) และการใช้เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) ใช้หลักการควบคุมซึ่งจะเป็นอีกวิธีที่ง่ายต่อการทำวิจัยและเปรียบเทียบกับการควบคุมการป้อนกลับ PI ที่กระแสของมอเตอร์สำหรับสำหรับการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลที่นำเสนอ

2. สำหรับงานวิจัยการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยการควบคุมกระแสเริ่มต้นโดยใช้เทคนิคอะซิงโครนัส พีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ซ็อปเปอร์ นี้เหมาะสำหรับมอเตอร์ขนาดเล็กที่มีลักษณะการใช้งานบ่อยครั้งเพื่อลดแรงสูญเสียด้านทางกลหรือการส่งกำลังของมอเตอร์ โดยการต่อเข้าด้วยกันโดยตรงโดยใช้คัปปลิ้งแบบแข็ง แบบยืดหยุ่น หรือคัปปลิ้งแบบเริ่มหมุน หรือจะเป็นแบบมีสลิปนิรภัย ใช้สายพานขับต่ออีกทอด แรงกดที่จุดแบริ่งแต่ละตัวะทำให้เกิดปัญหาตามมาในภายหลังซึ่งอาจจะทำให้เพลาคด งอ หรือหักได้ เครื่องจักรต้นกำลังมากกว่า 90% ในอุตสาหกรรมจะเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าทำหน้าที่แปลงพลังงานจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานทางกลเพื่อขับโหลดแต่หากพัฒนาต่อยอดสามารถทำงานวิจัยเป็นมอเตอร์สามเฟสที่มีกำลังแรงม้าสูงที่ใช้เน้นไปในงานภาคอุตสาหกรรมเป็นหลัก

3. ในขณะทำการทดสอบระบบจริงนั้นมักจะเจอชุดฮาร์ดแวร์จะมีปัญหาบ่อยครั้งเนื่องจากขณะทำการทดสอบเกิดการสั่นสะเทือนจากมอเตอร์ขณะเริ่มหมุนที่ทำการเปิด – ปิดสวิตช์ เพราะเกิดจากการวางชุดฮาร์ดแวร์ติดกับมอเตอร์ขณะที่ทำการทดสอบจึงทำให้ชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ได้รับผลกระทบต่ออุปกรณ์หลวมที่จุดต่อรอยเชื่อมวงจรและเกิดการลัดวงจรเกิดขึ้น วิธีการแก้ไขควรแยกชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ออกจากมอเตอร์และควรทำแผ่นปริ๊นวงจรเป็นชุดเดียวกันและจัดวางอุปกรณ์ให้เหมาะสมไม่ห่างและใกล้ชิดจนเกินไปเพื่อง่ายแต่การซ่อมแซมและปรับปรุงหากมีข้อแก้ไขวงจร อีกข้อการทดสอบควรใช้เซือกลูกตุ้มที่มีขนาดเล็กกว่าล้อร่องเพลาจะช่วยให้การทดสอบได้ค่าที่ใกล้เคียงและไม่เกิดความต่อตัวอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์และข้อควรระวังอีกเรื่องสำหรับวงจร RC Snubber ที่ใช้เพื่อลดแรงดันไฟกระชากหรือไฟกระชากเมื่อสวิตช์เปิดหรือปิดมอเตอร์มักจะเกิดความร้อนสูงและระเบิดได้ง่ายโดยเฉพาะช่วงที่ใสภาระหรือใส่โหลดให้กับมอเตอร์ไม่ควรเปิดทิ้งไว้เวลานานรีบวัดค่าและเก็บผลการทดลอง การออกแบบวงจร RC สนับเบอร์ที่ดีและเหมาะสมนั้นจะช่วยให้การทดลองนั้นออกมาดีลดความร้อนสะสมและการระเบิดของวงจร และอีกข้อควรระวังก็คือการใช้ไอจีบีทีต่อเป็นแบบสวิตช์สองทิศทางในส่วนของวงจรกำลังควรเลือกใช้ค่าที่มีการทนกระแสสูงเผื่อไว้เนื่องจากขนาดกระแสของมอเตอร์ขณะเริ่มหมุนจะมีค่ากระแสสูง และควรเลือกอุปกรณ์ไอจีบีทีที่มีค่าทนกระแสสูงเข้าไว้และนั้นยอมแลกกับค่าใช้จ่ายที่ซื้ออุปกรณ์ที่มีราคาสูงด้วยเช่นกันนั้นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] โกวิท ภูฉลาด และคณะ. 2555. “เทคนิคการปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้วยพัลส์วิดมอดูเลตชั่น เอซี ช็อปเปอร์ สำหรับการประหยัดพลังงานในมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส.” หน้า 88. ใน **การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8.** มหาสารคาม : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.

[2] โกวิท ภูฉลาด และคณะ. 2558. “การควบคุมพัลส์วิดมอดูเลตชั่น เอซี ช็อปเปอร์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับการประหยัดพลังงานในมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส.” หน้า 774-777. ใน **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า กลุ่มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลและสถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ครั้งที่ 7.** กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.

[3] โกวิท ภูฉลาด และคณะ. 2560. “การประเมินสมรรถนะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสถูกขับเคลื่อนด้วยพัลส์วิดมอดูเลตชั่น เอซี ช็อปเปอร์หนึ่งเฟส.” หน้า 44-47. ใน **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า กลุ่มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลและสถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ครั้งที่ 9.** จันทบุรี : คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี.

[4] โกวิท ภูฉลาด และคณะ. 2560. “ตู้อบไฟฟ้าควบคุมด้วยเทคนิคควบคุมไซเคิล.” หน้า 474-479. ใน **การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13.** เชียงใหม่ : วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

[5] โกวิท ภูฉลาด และคณะ. 2561. “การขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านโดยปราศจากตัวตรวจจับ.” หน้า 174-177. ใน **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 10.** กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน.

[6] สุชาติ คำลือ และ วิจิตร กิณเรศ. 2554. “ชุดควบคุมประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส.” หน้า 509-512. ใน **การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 34.** กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม.

[7] สุชาติ คำลือ และคณะ. 2554. “ชุดประหยัดพลังงานสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสโดยการควบคุมตัวประกอบกำลัง” หน้า 673-678. ใน **การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7.** ปทุมธานี : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

[8] วีระ ธันยาภิรักษ์ และคณะ. 2555. “การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสเพื่อการประหยัดพลังงานโดยใช้การควบคุมแบบพัลส์วิดมอดูเลชั่น เอซี ช็อปเปอร์.” หน้า 337-340. ใน **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครั้งที่ 9. นครราชสีมา : คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน.

[9] สันติสุข สว่างกล้า และประสพโชค โห้ทองคำ. 2565. “การจำลองวงจรเอซี-เอซี เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสทดสอบกับโหลดแบบพาสซีฟที่ใช้การปรับความถี่ในการสวิทช์.” หน้า 149-152. ใน **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 14.** สุพรรณบุรี : คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์สุพรรณบุรี.

[10] สารเดช วรนาวิน. 2555. **“การชดเชยแรงดันตกชั่วขณะด้วยเอซี-ซอปเปอร์ โดยการควบคุมแรงดันชั่วขณะ.”** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[11] เบญญทิพย์ พิพิธสุนทร. 2558. **“การประเมินสมรรถนะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสซึ่งถูกป้อนด้วยพีดับยูเอ็มอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส.”** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[12] อธิปัตย์ ศรีผาวงศ์ และคณะ. 2554. **“การปรับปรุงตัวประกอบกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยวิธีพัลส์วิดมอเลชั่น เอซี ซ็อปเปอร์.”** ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[13] ณัฐพงษ์ ประพฤติ. 2560. **“การปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้าและการลดกระแสกระชากของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับประยุกต์ใช้งานกับพลังงานลม.”** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.

[14] ศุภณัฐ สบาย และคณะ. 2558. **“ตู้อบไฟฟ้าควบคุมด้วยไซเคิลคอนโทรล.”** ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[15] วิชาญ สร้อยคำ. 2548. **“การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดเฟสเดียวด้วย พีดับบลิวเอ็ม เอซีซอปเปอร์.”** ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมระบบวัดคุม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.

[16] พัชรวี วีระศิลป์ และคณะ. 2559. **“การขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปลงถ่าน โดยปราศจากตัวตรวจจับ.”** ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[17] ชาย กังวานสุระ และคณะ. 2553. **“การควบคุมเพาเวอร์แฟคเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส.”** ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[18] ณัฐวุฒิ ด่านวานิชกุล และคณะ. 2555. **“การปรับปรุงตัวประกอบกำลังมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสด้วยพีดับบลิวเอ็มเอซี ช็อปเปอร์หนึ่งเฟส.”** ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[19] สุชาติ คำลือ. 2555. **“ชุดควบคุมประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว.”** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[20] วีระ ธันยาภิรักษ์. 2559. **“การควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยใช้เทคนิคอะซิงโครนัส พีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์.”** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[21] ชวพร บำรุงพฤกษ์. 2563. **“การสตาร์ทแบบนิ่มนวล และการประเมินสมรรถนะของการดัดแปลงมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ถูกป้อนด้วยพีดับบิวเอ็ม เอซี-ชอปเปอร์ 1 เฟส.”** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[23] พัชรพงศ์ กันหารินทร์. 2566. **“การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสอาศัยเทคนิคฟัซซีลอจิกใช้หลักการควบคุมแบบเวกเตอร์โดยตรง.”** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[24] ณัฐพงษ์ ประพฤติ. 2560. **“การปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้าและการลดกระแสกระชากของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับประยุกต์ใช้งานกับพลังงานลม.”** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.

[25] Venkata V. Sastry, M. Rajendra Prasad and T. V.Sivakumar, “Optimal Soft Starting of Voltage-Controller-Fed IM Drive Based on Voltage Across Thyristor.” **IEEE Transactions on Power Electronics.,** Vol.12, No.6. 1997, pp.1041-1051.

[26] G. Zenginobuz, I. Cadirci, M. Ermis and C. Barlak, “Performance Optimization of Induction Motors During Voltage-Controlled Soft Starting.” **IEEE Transactions on Energy Conversion.,** Vol. 19, Issue 2, 2004, pp.278-288.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[27] Bilal Saracoglu, Murat Kale and Engin Ozdemir, "A novel Technique for Optimal Control of Induction Motor Fed by PWM IGBT AC Chopper." **IEEE 35™ Annual Power Electronics Specialists Conf.,** Vol.5, 2004, pp.3353-3358.

[28] Hamdy A. Ashour and Rania A. lbrahim, "Implementation and Analysis of Microcontroller Based Soft Starters for Three Phase Induction Motor." **The International Conference on Computer as a Tool, EUROCON 2007.,** 2007, pp.2193-2199.

[29] G. Bhuvaneswari, Chares S and Manjula G. Nair, "Power Quality Studies on a Soft-Start for an Induction Motor." **IEEE/PES 2008 Transmission and Distribution Conf.,** 2008, pp.1-6.

[30] Deniz Yildirim and Murat Bilgic, "PWM AC Chopper Control of Single-Phase Induction Motor for Varible-Speed Fan Application." **IEEE Industrial Electronics 34™ Annual Conf.,** 2008, pp.1337-1342.

[31] Jose Thankachan and Saly George, "A Novel Switching Scheme for Three Phase PWM AC Chopper Fed Induction Motor." **IEEE 5™ Proc. IICPE 2012,** 2012, pp.1-4.

[32] A.N. Arvindan, "Investigation for Power Quality in PWM AC Controller Feeding a 3-Phase 3-Wire Wye Load." **IEEE 2™ Proc. ICEES 2014.,** 2014, pp.194-201.

[33] A.E. Fitzgerald, C. Kingsely, and S.D. Umans. **Electric machinery.** McGraw-Hill. 6™ Edition, 2003.

[34] N. A. Ahmed, k. Amei, and M. Sakui, "AC Chopper Voltage Controller-Fed Single-Phase Induction Motor Employing Symmetrical PWM Control Technique." **Electric Power System Research.,** Vol. 55, Issue 1, July 2000, pp.15-25.

[35] S. E. Oliveira, "Operation of Three-Phase Induction Motors Connected to One-Phase Supply." **IEEE Transactions on Energy Conversion.,** Vol. 5, No.4, Dec 1990, pp.713-718.

[36] M. J. Melfi and S. D. Umans, "Squirrel-Cage Induction Motors: Understanding Starting Transients." **IEEE Industry Applications Magazine.,** Vol.18, Issue 6, Nov 2012, pp.28-36.

[37] J. Larabee, B. Pellegrino, and B. Flik, "Induction Motor Starting Methods and Issues." **Annual Petroleum and Chemical Industry Conference.,** Sep 2005, pp.217-222.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[38] V. Thanyaphirak, V. Kinnares, and A. Kunakorn, “Soft Starting Control Scheme for Three-Phase Induction Motor Fed by PWM AC Chopper.” **International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)**., Oct 2014.

[39] V. Thanyaphirak, V. Kinnares, and A. Kunakorn, “Comparison of Starting Current Characteristics for Three-Phase Induction Motor Due to Phase-Control Soft Starter and Asynchronous PWM AC Chopper.” **Journal of Electrical Engineering and Technology.,** Vol.12, No.3, May 2017, pp.1090-1110.

[40] Said A. Deraz, and Haitham Z. Azazi, “Current Limiting Soft Starter for Three-Phase Induction Motor Drive System Using PMW AC Chopper.” **IET Power Electronics.,** Vol. 10, Issue 11, Sep 2017, pp.1298-1306.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ชุดทดลองและอุปกรณ์เครื่องมือวัดที่ใช้ในงานวิจัยการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยการควบคุมกระแสเริ่มต้น โดยใช้เทคนิคอะซิงโครนัสพีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์

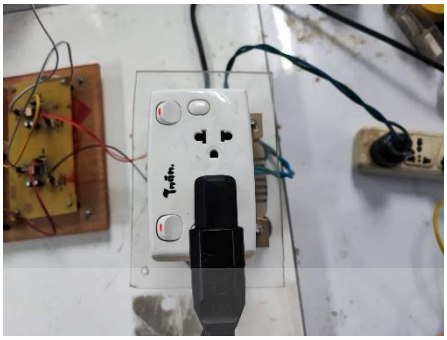
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือวัด	รายละเอียด
	Clip Probes รุ่น P6000 For DC 100MHz x1 x10 600V สายโพรบสำหรับใช้งานกับออสซิลโลสโคป
	Oscilloscope Rigol รุ่น DS1104B ออสซิลโลสโคป
	Differential Voltage Probe TECPEL รุ่น DP-25 โพรบวัดแบบดิฟเฟอเรนเชียลสำหรับใช้งานกับออสซิลโลสโคป
	Current Probe TEKTRONIC รุ่น A622 แคลมป์วัดกระแส AC/DC ความละเอียดสูงสำหรับใช้งานกับออสซิลโลสโคป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือวัด	รายละเอียด
	Digital Multimeter FLUKE รุ่น Fluke 114 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์
	Digital Laser RPM Tachometer Non Contact Measurement Tool รุ่น DT2234C+ เครื่องวัดความเร็วรอบ เครื่องวัดรอบ เลเซอร์ วัดความเร็วรอบ
	Portable Electronic Scale รุ่น WH-A08 เครื่องชั่งน้ำหนักพกพา แบบแขวน ดิจิตอล 50 kg.
	Variable Transformer 1 Phase (VARIAC) รุ่น PDG-2000VA หม้อแปลงปรับค่าแรงดันไฟฟ้า 1 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือวัด	รายละเอียด
	หม้อแปลง Isolation หรือ Isolation Transformer รุ่นหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส 380V./220V. 1Amp. 250VA Isolate
	Fluke รุ่น Fluke 43B/003 Power Quality Analyzer
	เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ (Vernier Caliper) รุ่นขนาด 6 นิ้ว INSIZE 1108-150 (150 มม.)
	โน๊ตบุ๊คเกมมิ่ง Acer Notebook รุ่น Nitro 5 AN515-58-729S i7 Gen12 สีดำ (Obsidian Black)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสที่ใช้ในงานวิจัยการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยการควบคุมกระแสเริ่มต้น โดยใช้เทคนิคอะซิงโครนัส พีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดเริ่มหมุนด้วยตัวเก็บประจุ

เพื่อให้บรรลุถึงความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ดังนั้นในส่วนนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบและการหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดเริ่มหมุนด้วยตัวเก็บประจุ โดยมีป้ายพิกัดมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดเริ่มหมุนด้วยตัวเก็บประจุตามตารางด้านล่างดังนี้

ตารางที่ ข-1 ป้ายพิกัดมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดเริ่มหมุนด้วยตัวเก็บประจุ

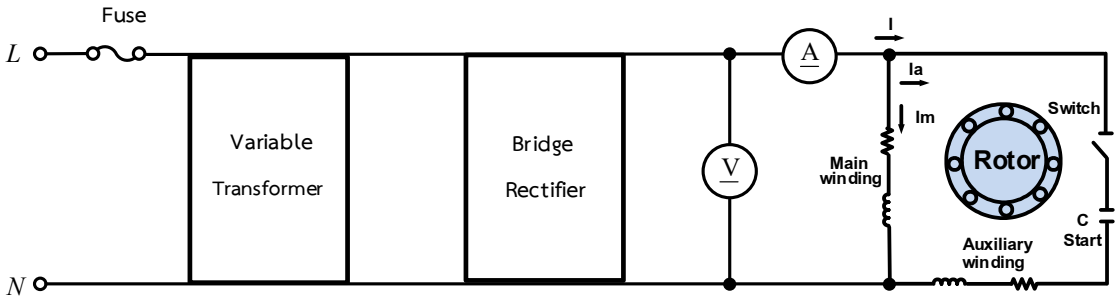
1/2 HP (0.4 kW) 4 POLE CAPACITOR 50 μF TYPE SC-KR					
Hz	50	50	60	FRAME	80M
V	220	230	220	RATING	S1
A	4.3	4.3	3.6	TH. CLASS	120(E)
rpm	1430	1430	1720	BEARING	6203ZZ
JEC-2137-2000 IP20 IC01					6202ZZ

ในส่วนของการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดเริ่มหมุนด้วยตัวเก็บประจุ เพื่อใช้เป็นพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์และนำค่าพารามิเตอร์ไปจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink Version R2024a ได้จากหลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดเริ่มหมุนด้วยตัวเก็บประจุเมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำหมุนได้ประมาณ 75% ของความเร็วซิงโครนัส สวิตช์แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางจะตัดการทำงานของขดลวดช่วยออก ดังนั้นวงจรสมมูลจึงพิจารณาเฉพาะในส่วนของขดลวดหลักเพียงอย่างเดียว และในงานวิจัยนี้เลือกใช้วงจรสมมูลกรณีไม่คิดความสูญเสียในแกนเหล็ก เนื่องจากพิจารณาความสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าคงที่และเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดเริ่มหมุนด้วยตัวเก็บประจุหาได้จากการทดสอบดังต่อไปนี้

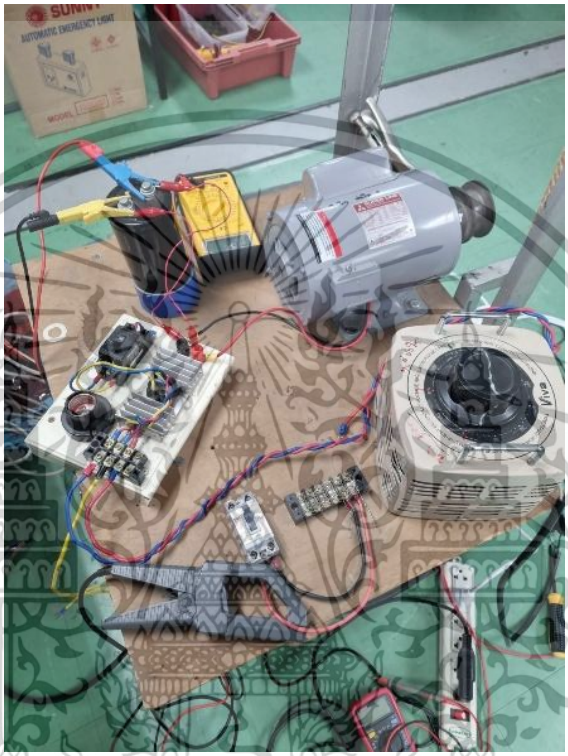
1.1 การทดสอบด้วยการป้อนค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC Test) ในขดลวดหลักและขดลวดช่วย

การทดสอบด้วยการป้อนค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานที่สเตเตอร์ (R_1) วงจรการทดสอบและตารางบันทึกผลการทดสอบ แสดงดังรูปที่ ข-1 และตารางที่ ข-2 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Single-Phase Induction Motor 1/2 HP



รูปที่ ข-1 วงจรการทดสอบด้วยการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

ตารางที่ ข-2 ผลการทดสอบด้วยการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

V_{dc} (V)	1.08	2.57	4.42	6.10	8.11	9.28
I_{dc} (A)	0.24	1.04	2.12	3.05	4.17	4.82

ความต้านทานที่สเตเตอร์ (R_1) ระหว่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

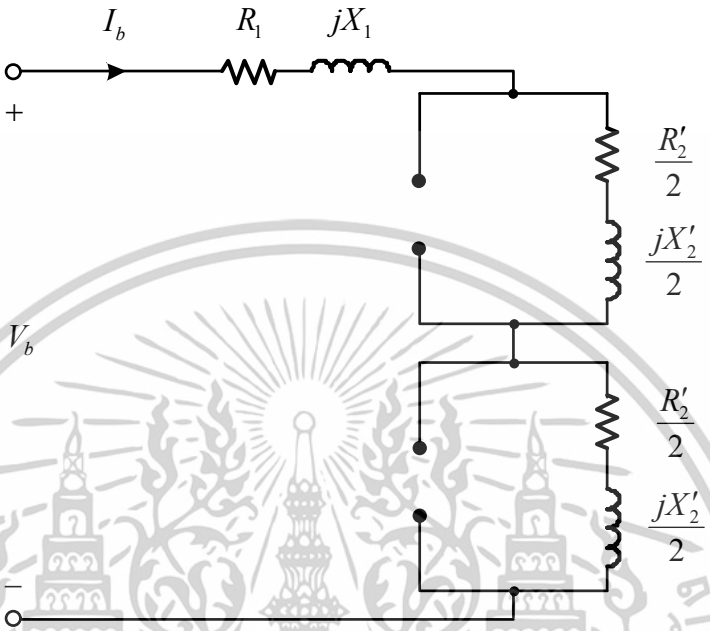
$$R_1 = R_{dc} = \frac{\Delta V_{dc}}{\Delta I_{dc}} \qquad \text{(ข.1)}$$

ค่าความชันของสมการเส้นตรง y = 1.7846x+0.6677 คือค่าความต้านทานที่สเตเตอร์ ดังนั้น จะได้ค่าความต้านทานที่สเตเตอร์ (R_1) เท่ากับ 1.7846 Ω

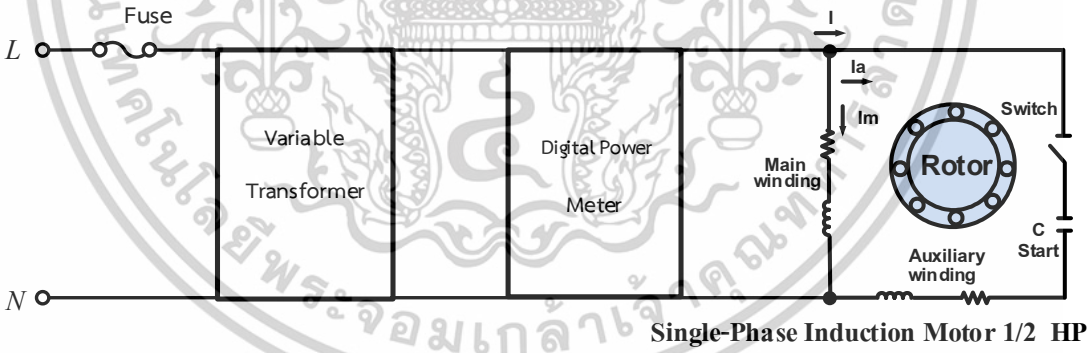
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 การทดสอบการจับยึดโรเตอร์ (Blocked Rotor Test)

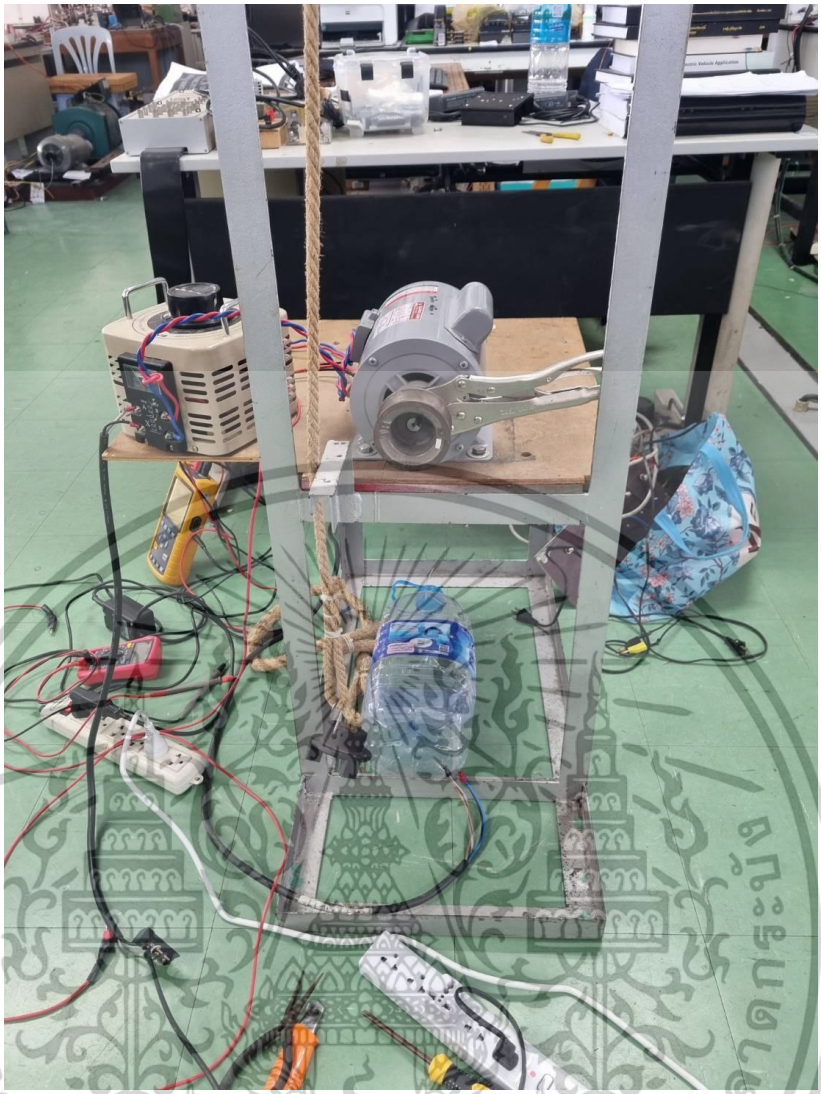
การทดสอบการจับยึดโรเตอร์เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลดังรูปที่ ข-2 วงจรการทดสอบและตารางบันทึกผลการทดสอบ แสดงดังรูปที่ ข-3 และตารางที่ ข-3 ตามลำดับ



รูปที่ ข-2 วงจรสมมูลการทดสอบการจับยึดโรเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-3 วงจรการทดสอบการจับยึดโรเตอร์

ตารางที่ ข-3 ผลการทดสอบการจับยึดโรเตอร์

V_b (V)	I_b (A)	P_b (W)	Power Factor
48.56	4.78	171.70	0.695

จากรูปที่ ข-2 สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงดังสมการที่ (ข.2) ถึงสมการที่ (ข.5) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X_b = \frac{\sqrt{(V_b I_b)^2 - P_b^2}}{I_b^2} \quad \text{(ข.2)}$$

$$X_1 = X_2' = \frac{X_b}{2} \quad \text{(ข.3)}$$

$$R_b = \frac{P_b}{I_b^2} \quad \text{(ข.4)}$$

$$R_2' = (R_b - R_1)\left(\frac{X_2' + X_m}{X_m}\right)^2 \quad \text{(ข.5)}$$

เมื่อ V_b คือ แรงดันไฟฟ้าขณะทดสอบจับยึดโรเตอร์

I_b คือ กระแสไฟฟ้าขณะทดสอบจับยึดโรเตอร์

P_b คือ กำลังไฟฟ้าขณะทดสอบจับยึดโรเตอร์

จากผลการทดสอบการจับยึดโรเตอร์ ดังตารางที่ ข-3 และจากสมการที่ (ข.2) และสมการที่ (ข.4) สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลการทดสอบการจับยึดโรเตอร์ ได้ดังนี้

$$X_b = \frac{\sqrt{(48.56x4.78)^2 - (171.70)^2}}{(4.78)^2} = 6.8362\ \Omega$$

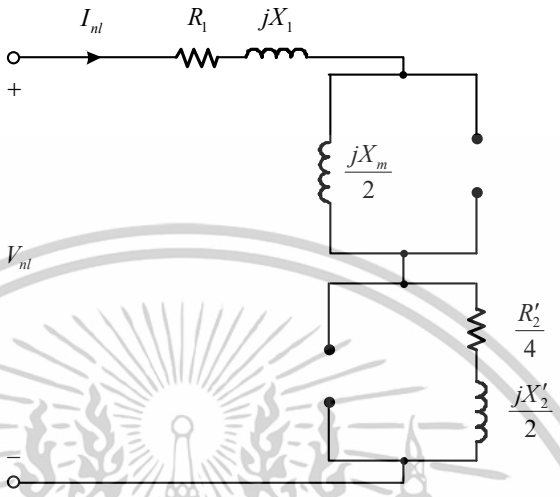
$$R_b = \frac{171.70}{(4.78)^2} = 7.5147\ \Omega$$

แทนค่า $X_b = 6.8362\ \Omega$ ลงในสมการที่ (ข.3) จะได้ค่า $X_1 = X_2' = 3.4181\ \Omega$ สำหรับค่าพารามิเตอร์ R_2' จากสมการที่ (ข.5) ต้องใช้ค่าพารามิเตอร์ X_m ที่ได้จากการทดสอบเมื่อไร้สภาวะทางกลในการคำนวณด้วย

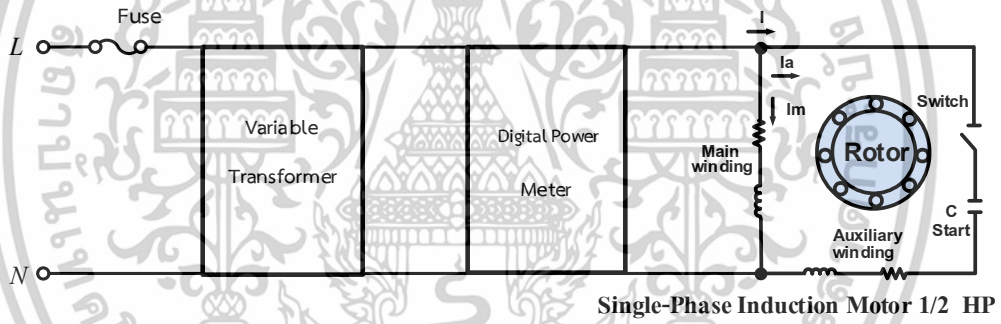
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

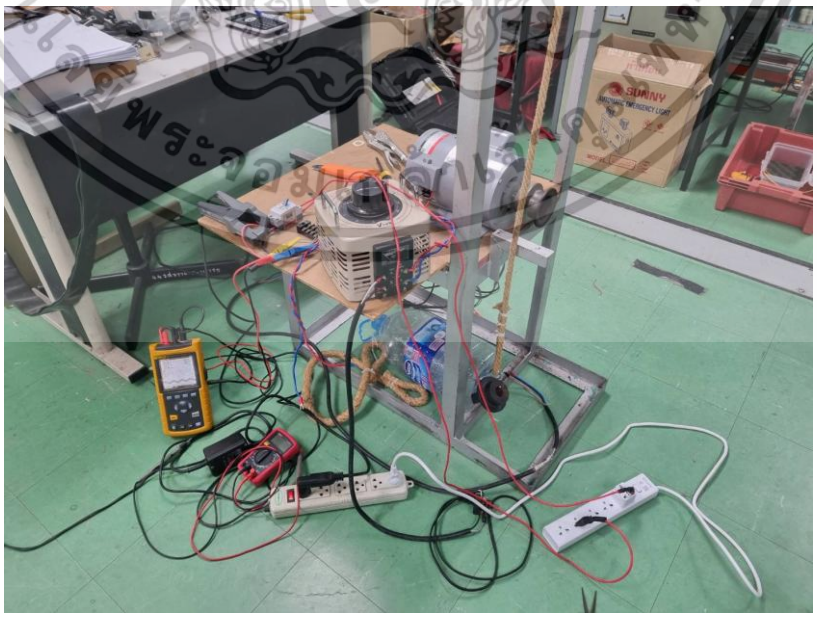
1.3 การทดสอบเมื่อขณะไร้สภาวะทางกล (No Load Test)

การทดสอบเมื่อขณะไร้สภาวะทางกลเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลดังรูปที่ ข-4 วงจรการทดสอบและตารางบันทึกผลการทดสอบ แสดงดังรูปที่ ข-5 และตารางที่ ข-4 ตามลำดับ



รูปที่ ข-4 วงจรสมมูลการทดสอบเมื่อขณะไร้สภาวะทางกล





รูปที่ ข-5 วงจรการทดสอบเมื่อขณะไร้สภาวะทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-4 ผลการทดสอบเมื่อขณะไร้สภาวะทางกล

V_{nl} (V)	I_{nl} (A)	P_{nl} (W)	Power factor	n_r (rpm)
220.14	3.90	146.10	0.170	1498

จากรูปที่ ข-4 สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงดังสมการที่ (ข.6) ถึงสมการที่ (ข.8) ตามลำดับ

$$X_{nl} = \frac{\sqrt{(V_{nl}I_{nl})^2 - P_{nl}^2}}{I_{nl}^2} \qquad \text{(ข.6)}$$

$$X_{nl} = X_1 + \frac{X_m}{2} + \frac{X_2'}{2} \qquad \text{(ข.7)}$$

แทนค่า X_1 และ X_2' จากสมการที่ (ข.3) ลงในสมการที่ (ข.7) พร้อมทั้งจัดรูปสมการใหม่จะได้ค่าพารามิเตอร์ X_m แสดงดังสมการที่ (ข.8)

$$X_m = 2X_{nl} - 1.5X_b \qquad \text{(ข.8)}$$

เมื่อ V_{nl} คือ แรงดันไฟฟ้าขณะทดสอบเมื่อไร้สภาวะทางกล

I_{nl} คือ กระแสไฟฟ้าขณะทดสอบเมื่อไร้สภาวะทางกล

P_{nl} คือ กำลังไฟฟ้าขณะทดสอบเมื่อไร้สภาวะทางกล

จากผลการทดสอบเมื่อไร้สภาวะทางกล ดังตารางที่ ข-4 และจากสมการที่ (ข.6) สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลการทดสอบเมื่อไร้สภาวะทางกล ได้ดังนี้

$$X_{nl} = \frac{\sqrt{(220.14x3.90)^2 - (146.10)^2}}{(3.90)^2} = 55.6229\ \Omega$$

แทนค่า $X_{nl} = 55.6229\ \Omega$ และแทนค่า $X_b = 6.8362\ \Omega$ จากการทดสอบการจับยึดโรเตอร์ ลงในสมการที่ (ข.8) จะได้ค่า $X_m = 2(55.6229) - 1.5(6.8362) = 100.9915\ \Omega$

แทนค่า $R_1 = 1.7846\ \Omega$ จากการทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง $R_b = 7.5147\ \Omega$ และ $X_2' = 3.4181\ \Omega$ จากการทดสอบการจับยึดโรเตอร์และ $X_m = 100.9915\ \Omega$ จากการทดสอบเมื่อไร้สภาวะทางกล ลงในสมการที่ (ข.5) คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ R_2' ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

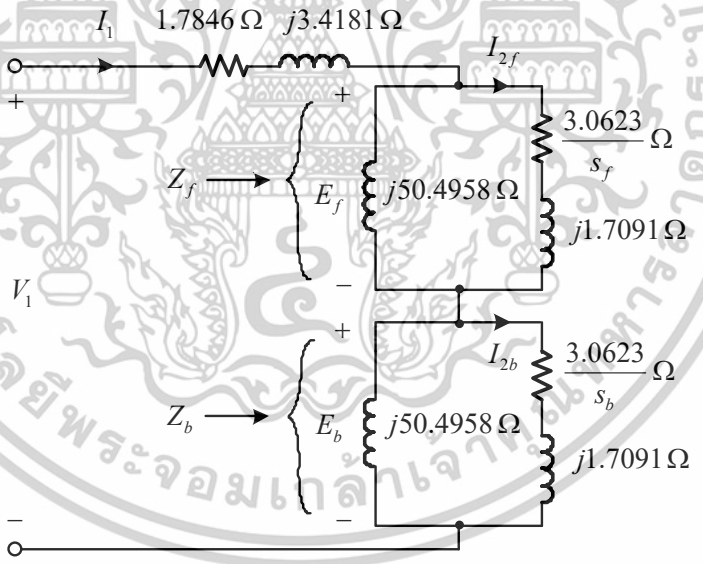
$$R_2' = (7.5147 - 1.7846)\left(\frac{3.4181 + 100.9915}{100.9915}\right)^2 = 6.1245\ \ \Omega$$

จากผลการทดสอบด้วยป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง การทดสอบการจับยึดโรเตอร์ และการทดสอบเมื่อไร้สภาวะทางกล สรุปค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดเริ่มหมุนด้วยตัวเก็บประจุแสดงดังตารางที่ ข-5

ตารางที่ ข-5 ค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดเริ่มหมุนด้วยตัวเก็บประจุ

R_1 (Ω)	R_2' (Ω)	X_1 (Ω)	X_2' (Ω)	X_m (Ω)
1.7846	6.1245	3.4181	3.4181	100.9915

แทนค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูล จากตารางที่ ข-5 จะได้ค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยงนำหนึ่งเฟสชนิดเริ่มหมุนด้วยตัวเก็บประจุแสดงดังรูปที่ ข-6



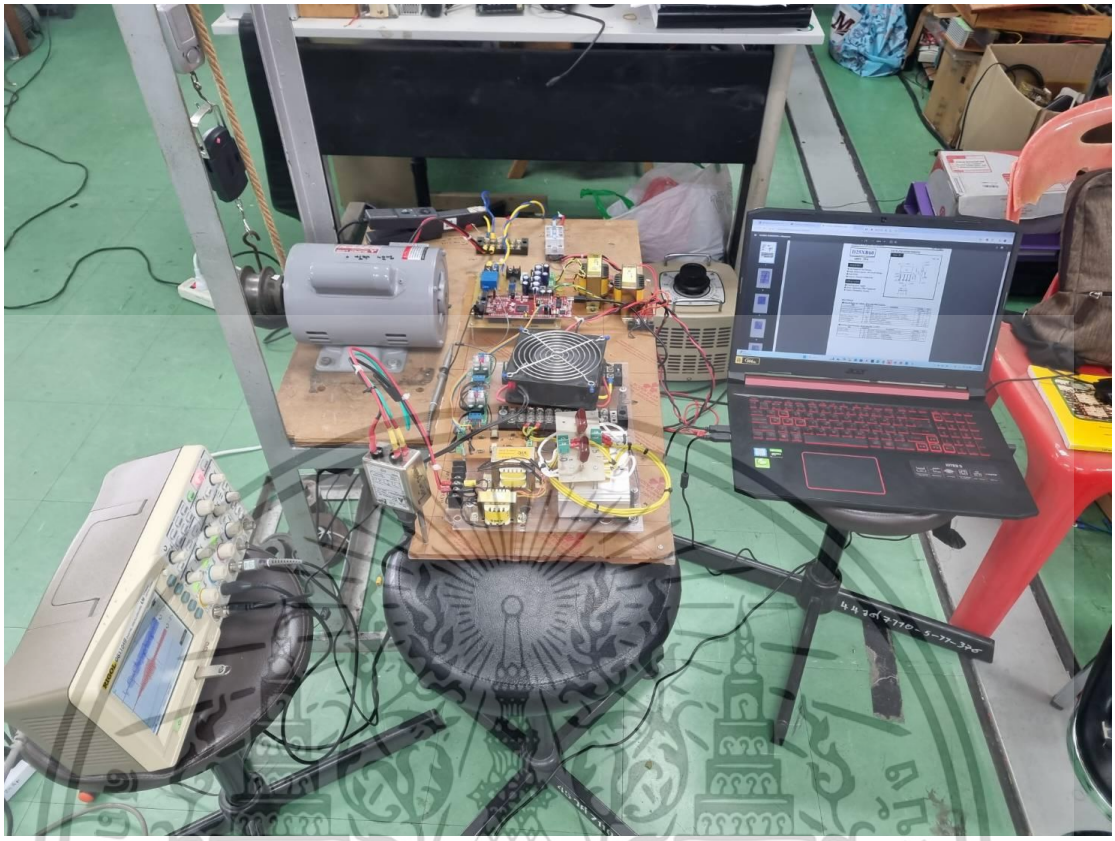
รูปที่ ข-6 ค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดเริ่มหมุนด้วยตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

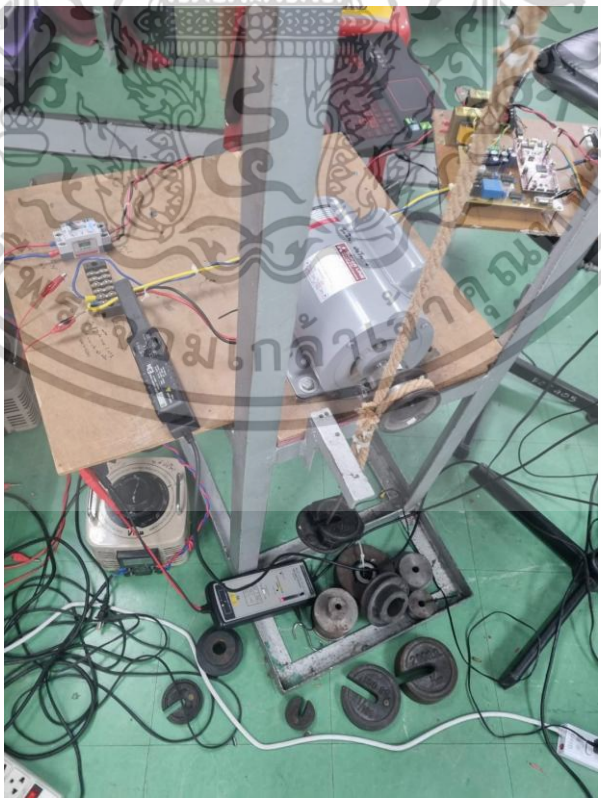
ภาคผนวก ค.

วงจรต้นแบบที่ใช้ในงานวิจัยการควบคุมการเริ่มหมุนแบบนิ่มนวลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยการควบคุมกระแสเริ่มต้น โดยใช้เทคนิคอะซิงโครนัส พีดับเบิ้ลยูเอ็ม เอซี ช็อปเปอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

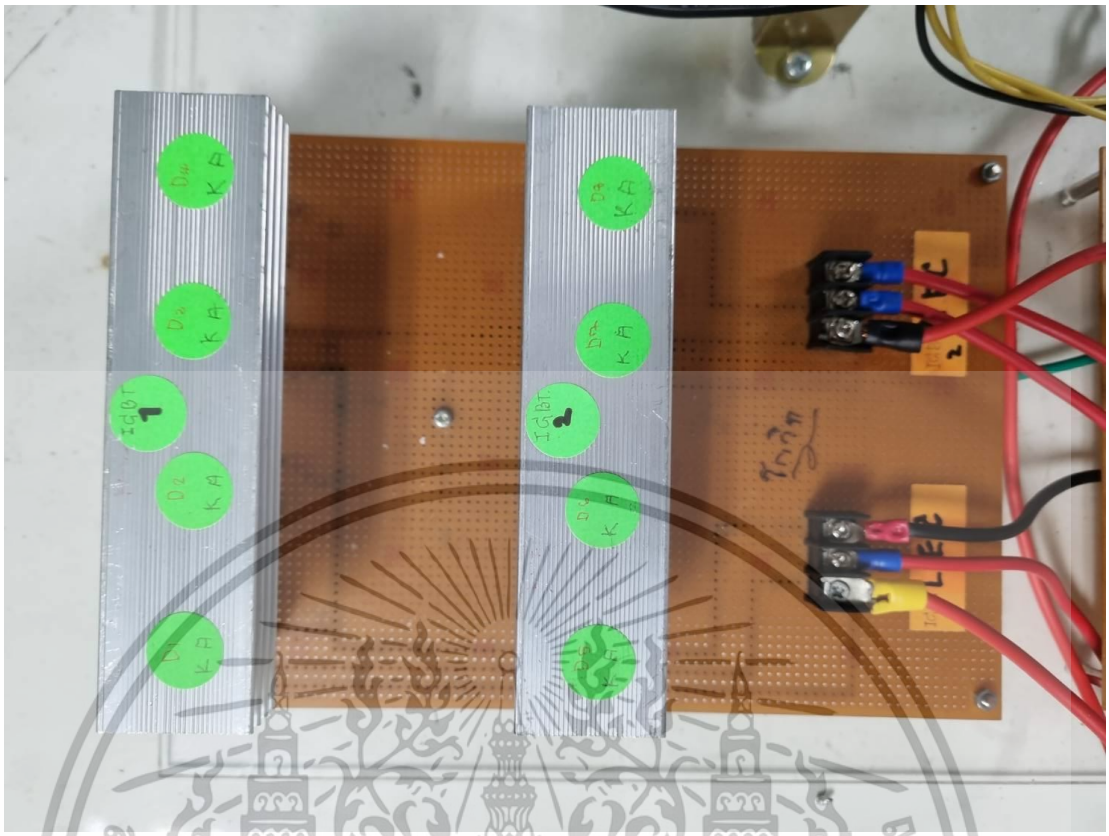


รูปที่ ค-1 ภาพรวมของชุดวงจรต้นแบบสำหรับใช้ในงานวิจัย

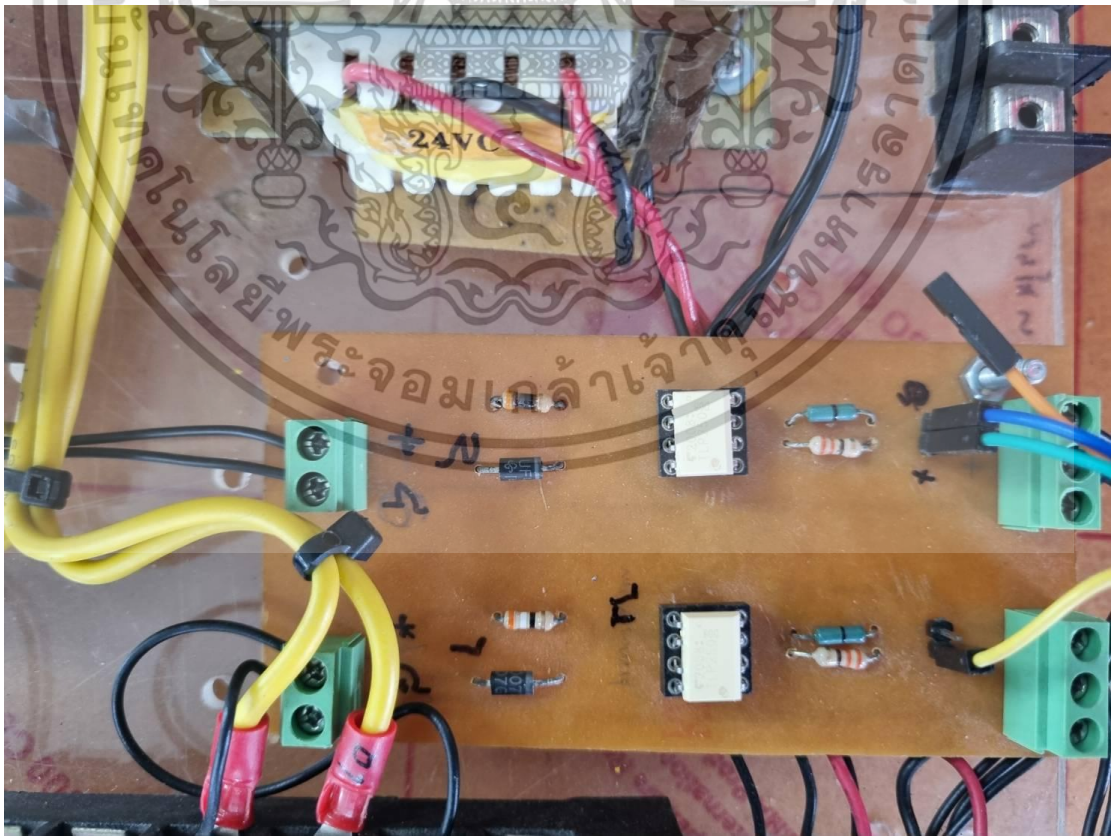


รูปที่ ค-2 มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดเริ่มหมุนด้วยตัวเก็บประจุสำหรับใช้ในงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

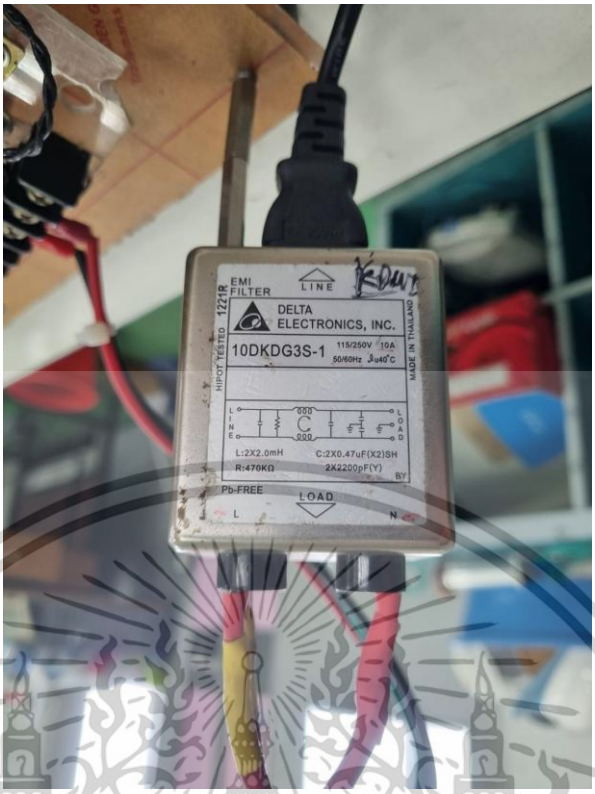


รูปที่ ค-3 วงจรไดโอดเป็นสวิตช์สองทาง 8 ตัว แบบ Fast Recovery Diode

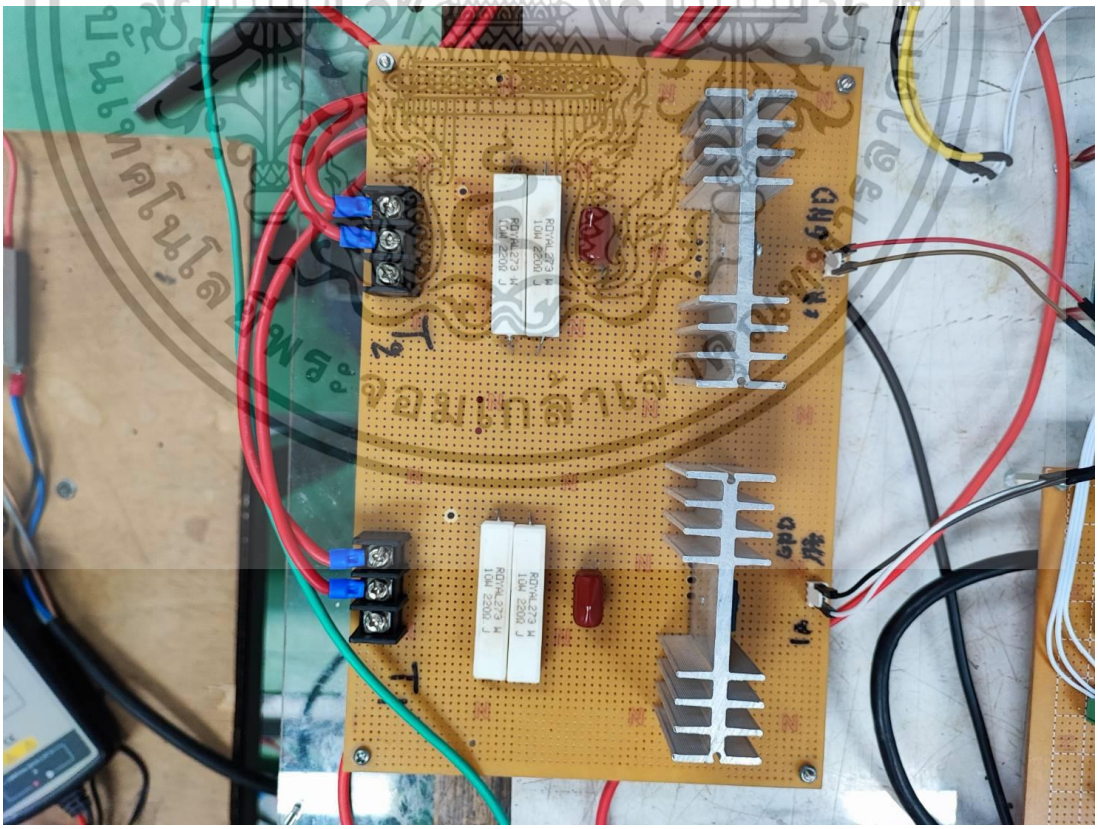


รูปที่ ค-4 วงจรออปโตคัปเปลอร์ป้องกันการชนกันของไฟฟ้า Opto-Coupler/Opto-Isolator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

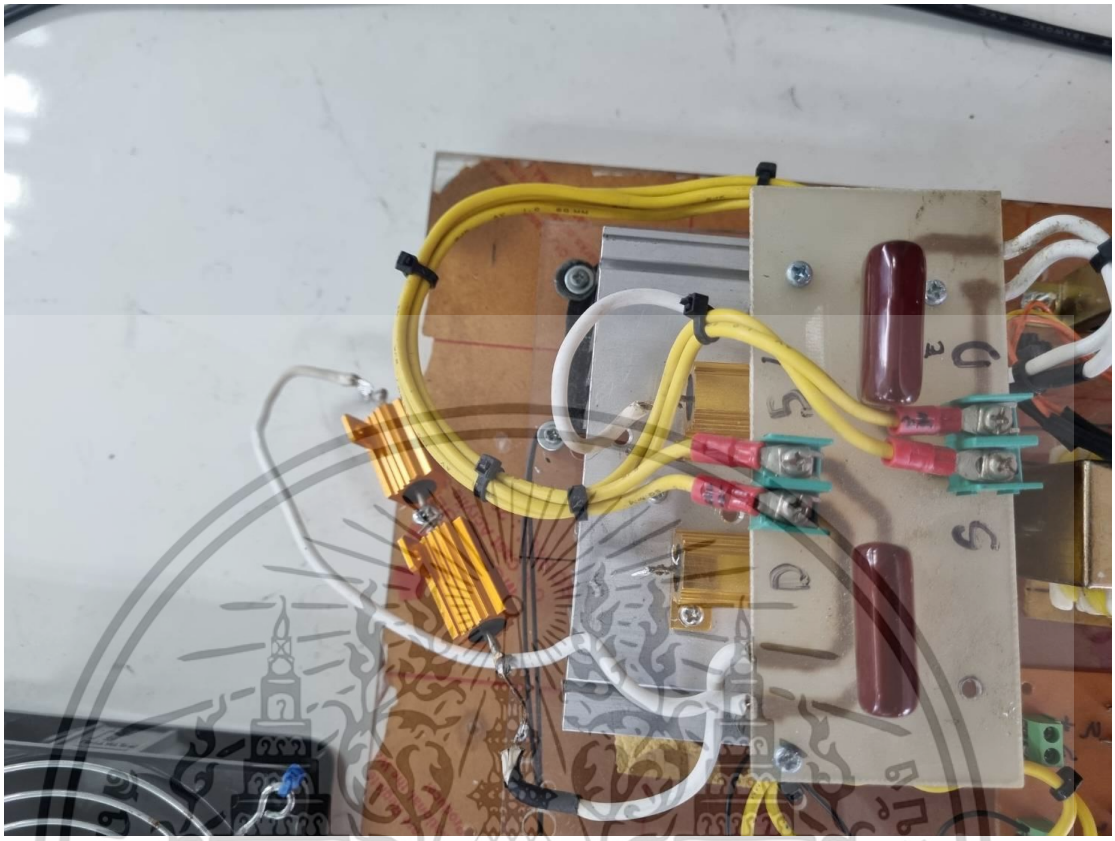


รูปที่ ค-5 วงจรกรองสัญญาณ EMI Noise Filter ป้องกันสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า

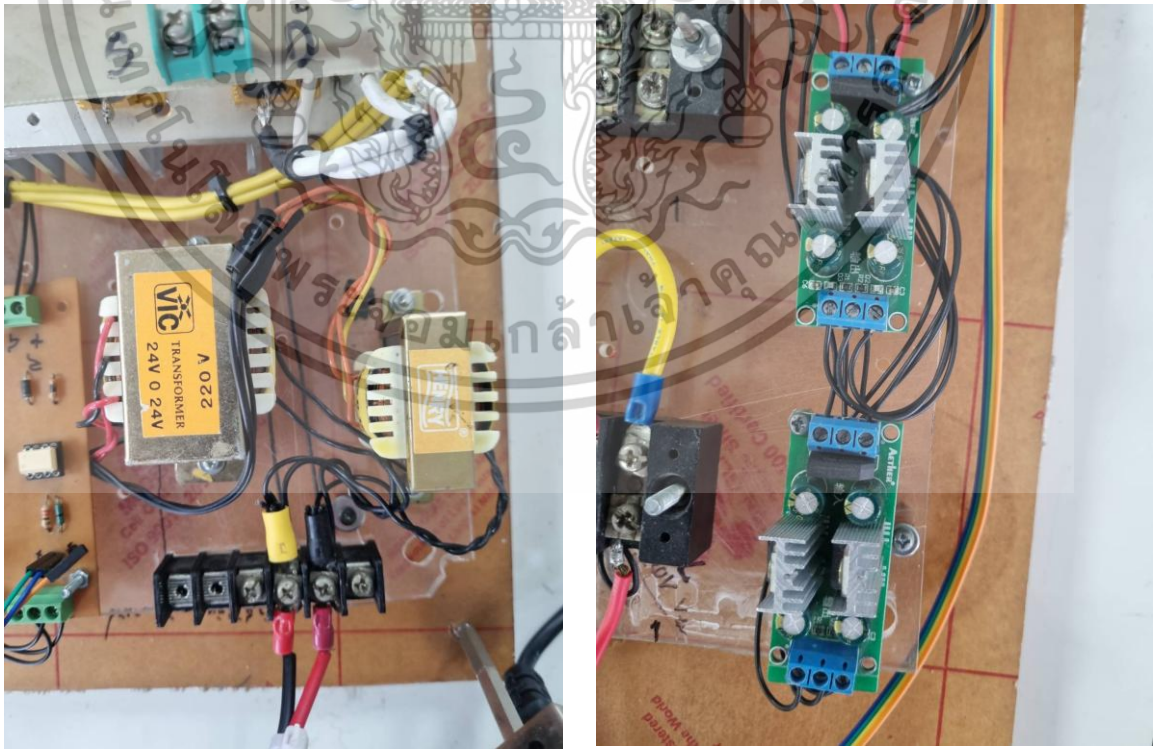


รูปที่ ค-6 วงจรสวิตช์ไอจีบีที (IGBT) แบบสวิตช์ 2 ทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

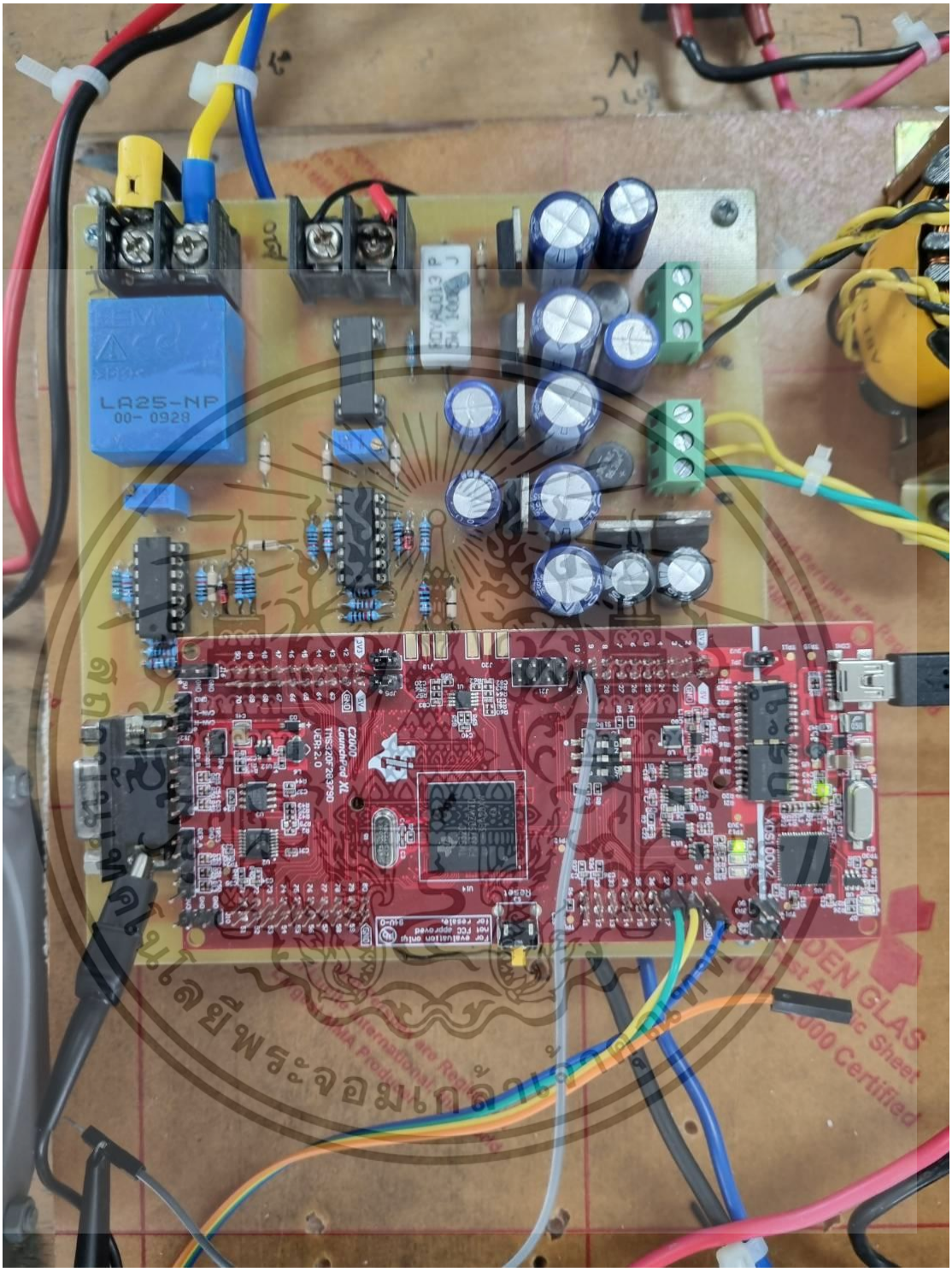


รูปที่ ค-7 วงจรสนับเบอร์ RC Snubbers สำหรับป้องกันวงจรจากไฟกระชาก



รูปที่ ค-8 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 15V DC Switching Power Supply

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค-9 วงจรตรวจจับสัญญาณสัญญาณแรงดัน, วงจรตรวจจับสัญญาณสัญญาณกระแส, วงจรประวิงเวลาหรือ Dead Time และไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 Microcontroller รุ่น TMS320F28379D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.

บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าเพื่อใช้สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ พิเศษ/2555

คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย
จังหวัดมหาสารคาม

1 เมษายน 2555

เรื่อง ตอบรับบทความวิจัยสำหรับนำเสนอในการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8

เรียน **คุณ โกวิท ภูฉลาด**

ตามที่ท่านได้ส่งบทความเรื่อง **การปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้วยพัลส์วิดมอดูเลชั่น เอซี ช็อปเปอร์ สำหรับการประหยัดพลังงานในมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส** เลขที่บทความ **EC34** เพื่อนำเสนอในการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8 ณ โรงแรมตักสิลา จังหวัดมหาสารคาม ระหว่างวันที่ 2 – 4 พฤษภาคม 2555 ทางคณะกรรมการจัดการประชุม ขอแจ้งให้ท่านทราบว่าบทความวิจัยของท่านได้ผ่านการพิจารณาให้นำเสนอภาคบรรยาย และขอให้ท่านได้ดำเนินการลงทะเบียนเข้าร่วมงานประชุมตามเอกสารแนบภายในวันที่ 20 เมษายน 2555 เพื่อจะดำเนินการนำบทความฉบับเต็มของท่านจัดพิมพ์ในรายงานการประชุมต่อไป

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

ขอแสดงความนับถือ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บพิธ บุปผโชติ)
ประธานคณะกรรมการอำนวยการจัดการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8

คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
โทร. 043-754322-40 ต่อ 3086 โทรสาร 043-754316

ref.No : 2088

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8
วันที่ 2-4 พฤษภาคม พ.ศ. 2555 จังหวัดมหาสารคาม

เทคนิคการปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้วยพัลส์วิดมอดูเลชั่น เอซี ช็อปเปอร์ สำหรับการประหยัดพลังงานในมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

Variable AC Voltage Technique using a PWM AC Chopper for Energy Saving in a Single-Phase Induction Motor

โกวิท ภูฉลาด[1,*], อธิปัตย์ ศรีผาวงศ์[1], วีระ ธันยาภิรักษ์[2], ประเสริฐ สอระสัน[3] และ วิจิตร กิณเรศ[1]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 ถนนฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10520

[2] สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร เลขที่ 199 ถนนพังโคน-ราชธานี ตำบลพังโคน อำเภอพังโคน จังหวัดสกลนคร 47160

[3] สาขางานติดตั้งไฟฟ้าและสาขางานเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม สาขาวิชาไฟฟ้ากำลัง แผนกวิชาช่างไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัยเทคนิคมหาสารคาม เลขที่ 460 ถนนนครสวรรค์ ตำบลตลาด อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม 44000

*E-mail: hikowit@gmail.com, โทรศัพท์ 0-2326-4550, โทรสาร 0-2326-4550

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอเทคนิคการปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับโดยใช้พัลส์วิดมอดูเลชั่น เอซี ช็อปเปอร์ ซึ่งใช้ไอจีบีทีทำงานร่วมกับไดโอดต่อกันแบบเต็มบริดจ์เป็นสวิตช์สองทาง สำหรับการประหยัดพลังงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดคาปาซิเตอร์สตาร์ทขนาด ¼ แรงม้า 220 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ พัลส์วิดมอดูเลชั่น เอซี ช็อปเปอร์ ที่นำเสนอจะให้ข้อดีในเรื่องการลดกระแสฮาร์มอนิกเมื่อเปรียบเทียบกับการปรับแรงดันด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมโดยใช้การควบคุมเฟสด้วยไตรแอคเป็นตัวสวิตช์ ในบทความนี้ยังได้มีการวิเคราะห์การทำงานของเอซี ช็อปเปอร์อย่างละเอียด มีการออกแบบและสร้างวงจรควบคุม ได้มีการตรวจสอบการทำงานทั้งทางทฤษฎีและทดลอง จากการทดสอบพบว่าที่ภาระเบาของมอเตอร์การปรับแรงดันที่เหมาะสมโดยใช้เอซี ช็อปเปอร์ สามารถทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการป้อนแรงดันที่พิกัดให้กับมอเตอร์

คำหลัก: มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส, พัลส์วิดมอดูเลชั่น เอซี ช็อปเปอร์, ฮาร์มอนิก

Abstract

This paper presents a technique of varying AC voltage using a pulse width modulation (PWM) AC chopper with insulated gate transistor (IGBT) in conjuetion with diodes formed in a full bridge as a bidirectional switch for energy saving of a ¼ HP, 220 V, 50 Hz capacitor start type single induction motor. The proposed PWM AC chopper offers an advantage in terms of a harmonic current reduction when compared with a conventional technique using a phase control method using triac as a switch. In this paper, an analysis of operation of the proposed PWM AC chopper is fully given. Design and implementation are also included. Both theory and experiment are verified. From the experiment, it has

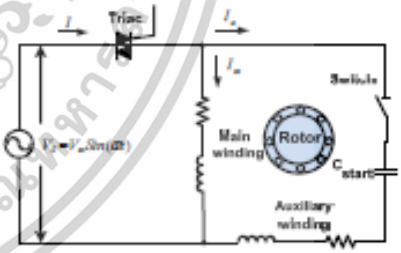
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

founded that, at a light load condition, an appropriate voltage level obtained from the proposed PWM AC chopper gives higher efficiency compared with applied motor voltage with the rated value.

Keywords: Single Phase Induction Motor, PWM AC Chopper, Harmonic.

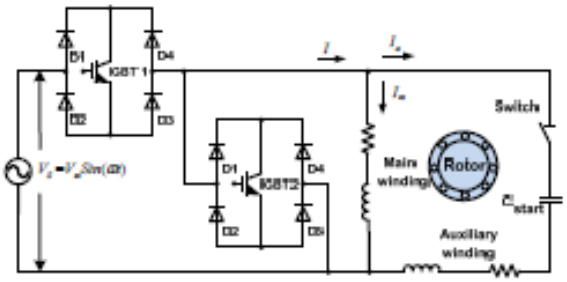
1. บทนำ

ปัจจุบันพบว่าเครื่องจักรกลไฟฟ้าเข้ามามีบทบาทในการทำงานมากขึ้นทั้งนี้เนื่องจากความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยี อีกทั้งการขยายตัวทางเศรษฐกิจที่เพิ่มขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งภาคอุตสาหกรรมและภาคเกษตรกรรม ทั้งนี้เนื่องจากการใช้เครื่องจักรกลไฟฟ้าสามารถอำนวยความสะดวกในการใช้งานและประยุกต์ใช้กับงานอื่นๆได้หลากหลาย โดยเฉพาะมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสซึ่งสามารถพบได้ในภาคอุตสาหกรรมและภาคเกษตรกรรมครัวเรือน เนื่องจากโครงสร้างมีความแข็งแรงและทนทานต่อสภาพภูมิอากาศ อีกทั้งไม่ต้องมีการบำรุงรักษาบ่อยครั้งและที่สำคัญมีราคาไม่สูงมากสามารถหาซื้อได้ทั่วไป จึงทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก ในอดีตมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสนี้จะมีขนาดของแรงม้าที่ต่ำแต่ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเพิ่มขนาดของแรงม้าเพื่อให้สามารถนำไปใช้กับงานที่ต้องการภาระหนักได้ สำหรับพลังงานกลที่ได้จะมีการนำไปใช้ขึ้นอยู่กับลักษณะของงาน เช่น พัดลม, เครื่องบด, เครื่องรีด, เครื่องเจาะ, และเครื่องม้วน เป็นต้น เราเรียกลักษณะของงานที่ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสในการเปลี่ยนรูปพลังงานว่า "ภาระมอเตอร์ (Load Motor)" ซึ่งลักษณะงานแต่ละชนิดก็จะเป็นภาระการทำงานที่แตกต่างกันของมอเตอร์ เช่น ภาระเบา ภาระปานกลาง และภาระหนัก อาจจะคงที่หรือไม่คงที่ขึ้นอยู่กับช่วงระยะเวลาของมอเตอร์ซึ่งเป็นคุณสมบัติของแต่ละภาระมอเตอร์ ภาระของมอเตอร์จะส่งผลต่อประสิทธิภาพและค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ที่ต่ำทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานค่อนข้างสูง ดังนั้นถ้าหากภาคอุตสาหกรรมและภาคเกษตรกรรมที่ใช้มอเตอร์เป็นสิ่งกำลังให้กับภาระเบาเป็นจำนวนมากก็จะทำให้เกิดการสูญเสียมาก ดังนั้นการหาวิธีที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์จึงเป็นเรื่องที่ควรตระหนัก [1,2] จากรูปที่ 1 เป็นการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยไตรแอคที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์วงจรกำลังในการควบคุมมอเตอร์ ซึ่งเป็นการควบคุมแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์โดยใช้เทคนิคการควบคุมเฟส วิธีการนี้จะส่งผลต่อรูปคลื่นแรงดันและกระแสทำให้มีฮาร์มอนิกอันดับต่ำปะปนทำให้เกิดการสูญเสียในมอเตอร์ เนื่องจากฮาร์มอนิกจะส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าข้างเคียงที่ใช้ไฟร่วมกัน ดังนั้นในบทความนี้จึงได้นำเสนอวิธีการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยไอจีบีทีที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์สองทาง 2 ตัว ทำงานสลับกันด้วยเทคนิคพัลส์วิดมอดูเลชั่น เอซี ช็อปเปอร์ เพื่อลดค่าฮาร์มอนิกที่ปะปน ตามรูปที่ 2



รูปที่ 1 วงจรการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยไตรแอคแบบดั้งเดิม

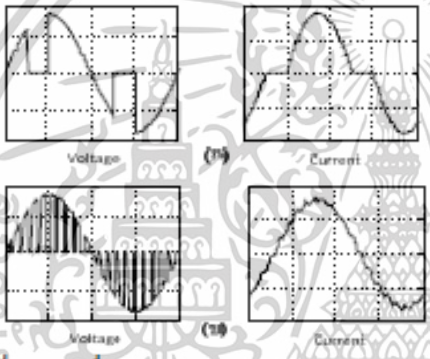
2. ทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์โหมดการทำงานของพัลส์วิดมอดูเลชั่น เอซี ช็อปเปอร์



รูปที่ 2 วงจรการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยไอจีบีทีที่เป็นสวิตช์สองทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3 (ก) ด้านซ้ายเป็นรูปคลื่นแรงดันและด้านขวาเป็นรูปคลื่นกระแสโดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบ Phase Control ซึ่งรูปคลื่นแรงดันและกระแสมีฮาร์มอนิกอันดับต่ำปะปนในรูปคลื่นจะไม่เข้าใกล้ไซน์ รูปที่ 3 (ข) ด้านซ้ายเป็นรูปคลื่นแรงดันและด้านขวาเป็นรูปคลื่นกระแสโดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบ PWM AC Chopper ซึ่งรูปคลื่นกระแสจะเข้าใกล้ไซน์ จึงทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากฮาร์มอนิกต่ำกว่ากรณีที่ใช้เทคนิคการควบคุมแบบ Phase Control



รูปที่ 3 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสมอเตอร์ (ก) วิธีการแบบ Phase Control แบบดั้งเดิม (ข) หลักการ PWM AC Chopper ที่ได้นำเสนอ

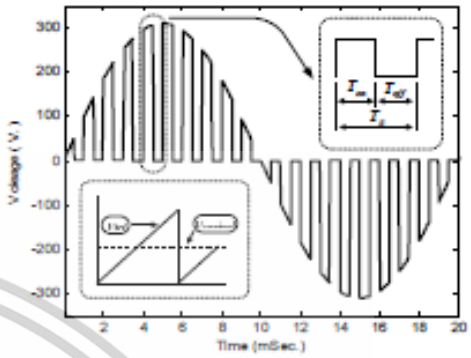
รูปคลื่นแรงดันจะถูกควบคุมตามค่า (Duty Ratio หรือ Duty Cycle: D) ซึ่งค่าดิวตี้ไซเคิลจะเป็นอัตราส่วนของช่วงเวลาการสวิตช์นำกระแสของสวิตช์ตัวที่ 1 (SW_1) ต่อคาบเวลาของการสวิตช์ ดังสมการที่ (1) ซึ่งขนาดแรงดันที่ได้จะเป็นตามสมการที่ (2) และสามารถคำนวณหาค่าประสิทธิผลของแรงดันที่โหลดได้จากสมการที่ (3)

$$D=\frac{T_{on}}{T_s}=\frac{T_{on}}{T_{on}+T_{off}} \quad (1)$$

เมื่อ T_{on} คือ ช่วงเวลานำกระแสของสวิตช์ตัวที่ 1 (SW_1) แต่เป็นช่วงเวลาไม่นำกระแสของสวิตช์ตัวที่ 2 (SW_2), s

T_{off} คือ ช่วงเวลานำกระแสของสวิตช์ตัวที่ 2 (SW_2) แต่เป็นช่วงเวลานำกระแสของสวิตช์ตัวที่ 1 (SW_1), s

T_s คือ ช่วงคาบเวลาของการสวิตช์, s



รูปที่ 4 สัญญาณการควบคุมแรงดันแบบ PWM

$$v_{L1}(t)=DV_m Sin(\omega t) \quad (2)$$

เมื่อ $v_{L1}(t)$ คือ ค่าแรงดันเอาต์พุตมูลฐานไฟฟ้าชั่วขณะที่เวลา t ใดๆ, V

D คือ ค่าดิวตี้ไซเคิล

V_m คือ ค่าแรงดันสูงสุดคลื่นไซน์, V

$$v_{L1rms}=\frac{DV_m}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

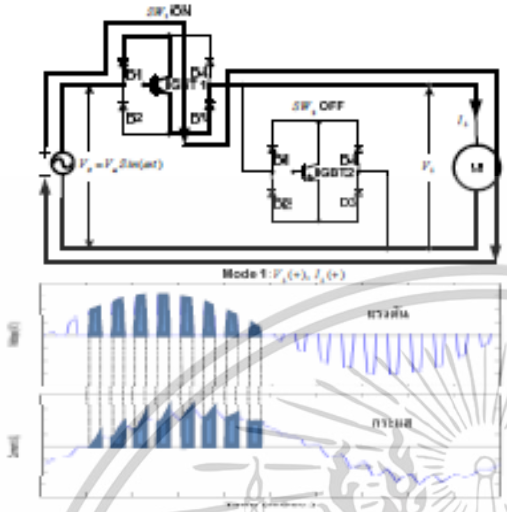
v_{L1rms} คือ ค่าแรงดันประสิทธิผล, V

หลักการวิเคราะห์วงจรโหมดการทำงานของพัลส์วิดมอดูเลชั่น เอซี ช็อปเปอร์ นั้นสามารถแบ่งลักษณะการทำงานออกเป็น 3 ประเภท และลักษณะช่วงเวลาในการทำงานของแต่ละประเภทแบ่งออกเป็น 6 โหมด ซึ่งจะได้อธิบายลักษณะประเภทการทำงานในแต่ละโหมดดังนี้

2.1 โหมดจ่ายกำลังไฟฟ้า

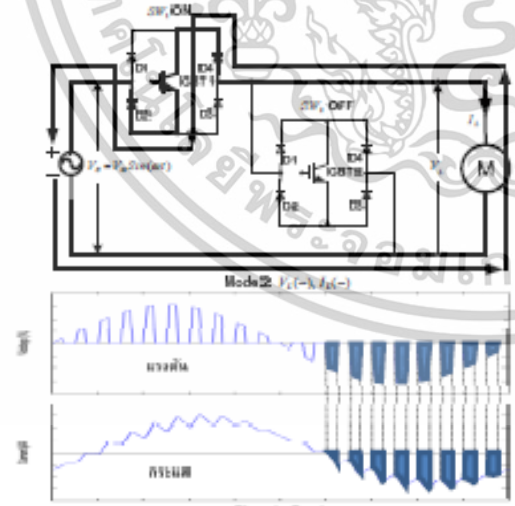
โหมดที่ 1 เป็นโหมดที่จ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดในช่วงที่แรงดันเป็นบวกและกระแสเป็นบวก โดยสวิตช์ตัวที่ 2 เปิดวงจร (SW_2, OFF) สวิตช์ตัวที่ 1 ปิดวงจร (SW_1, ON) ทำให้กระแสไหลผ่านไดโอดตัวที่ 1 ไอจีบีทีตัวที่ 1 และไดโอดตัวที่ 3 ไปยังโหลด ดังรูปที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5 โหมดที่ 1 โหมดจ่ายกำลังไฟฟ้าช่วงแรงดันเป็นบวกและกระแสเป็นบวก

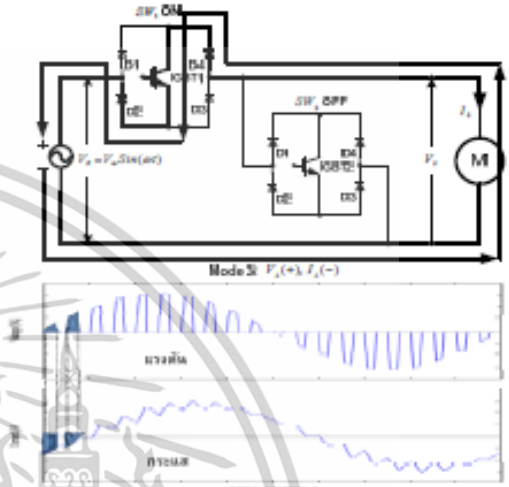
โหมดที่ 2 เป็นโหมดที่จ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดในช่วงที่แรงดันเป็นลบและกระแสเป็นลบ โดยสวิตช์ตัวที่ 2 เปิดวงจร (SW_2, OFF) สวิตช์ตัวที่ 1 ปิดวงจร (SW_1, ON) ทำให้กระแสไหลผ่านไดโอดตัวที่ 2 ไอจีบีทีตัวที่ 1 และไดโอดตัวที่ 4 ไปยังโหลด ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 โหมดที่ 2 โหมดจ่ายกำลังไฟฟ้าช่วงแรงดันเป็นลบและกระแสเป็นลบ

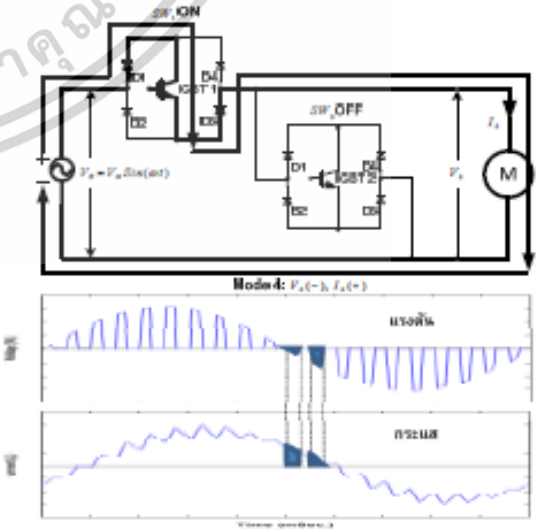
2.2 โหมดคืนกำลังไฟฟ้า

โหมดที่ 3 เป็นโหมดที่รับกำลังไฟฟ้าคืนจากโหลดในช่วงที่แรงดันเป็นบวกและกระแสเป็นลบ โดยสวิตช์ตัวที่ 2 เปิดวงจร (SW_2, OFF) สวิตช์ตัวที่ 1 ปิดวงจร (SW_1, ON) ทำให้กระแสไหลผ่านไดโอดตัวที่ 2 ไอจีบีทีตัวที่ 1 และไดโอดตัวที่ 4 ไปยังโหลด ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 โหมดที่ 3 โหมดคืนกำลังไฟฟ้าช่วงแรงดันเป็นบวกและกระแสเป็นลบ

โหมดที่ 4 เป็นโหมดที่รับกำลังไฟฟ้าคืนจากโหลดในช่วงที่แรงดันเป็นลบและกระแสเป็นบวก โดยสวิตช์ตัวที่ 2 เปิดวงจร (SW_2, OFF) สวิตช์ตัวที่ 1 ปิดวงจร (SW_1, ON) ทำให้กระแสไหลผ่านไดโอดตัวที่ 1 ไอจีบีทีตัวที่ 1 และไดโอดตัวที่ 3 ไปยังโหลด ดังรูปที่ 8

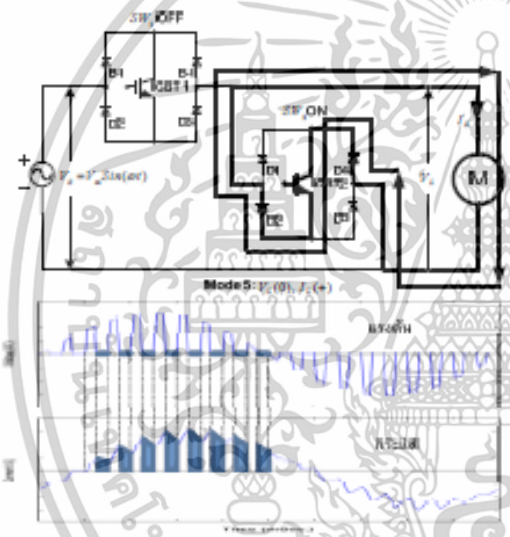


รูปที่ 8 โหมดที่ 4 โหมดคืนกำลังไฟฟ้าช่วงแรงดันเป็นลบและกระแสเป็นบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

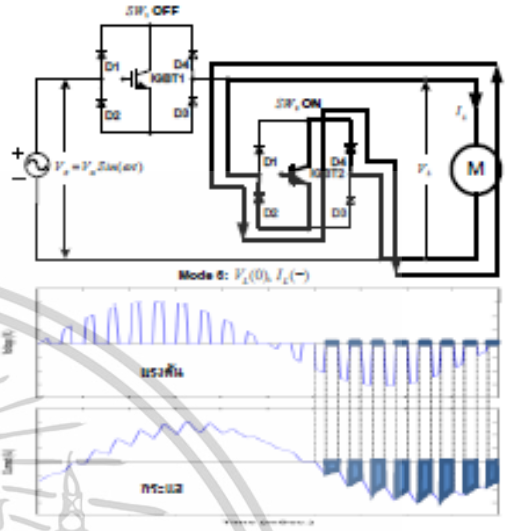
2.3 โหมดกระแสไหลเวียนอิสระ

โหมดที่ 5 เป็นโหมดที่กระแสไหลเวียนอิสระในโหลดเนื่องจากมีพลังงานสะสมในขดลวดจ่ายกำลังไฟฟ้าคืนให้โหลดในช่วงที่แรงดันเป็นศูนย์และกระแสเป็นบวก โดยสวิตช์ตัวที่ 1 เปิดวงจร(SW_1, OFF) สวิตช์ตัวที่ 2 ปิดวงจร (SW_2, ON) ทำให้กระแสไหลผ่านไดโอดตัวที่ 2 ไอจีบีทีตัวที่ 2 และไดโอดตัวที่ 4 ไปยังโหลด ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 โหมดที่ 5 โหมดกระแสไหลเวียนอิสระช่วงแรงดันเป็นศูนย์และกระแสเป็นบวก

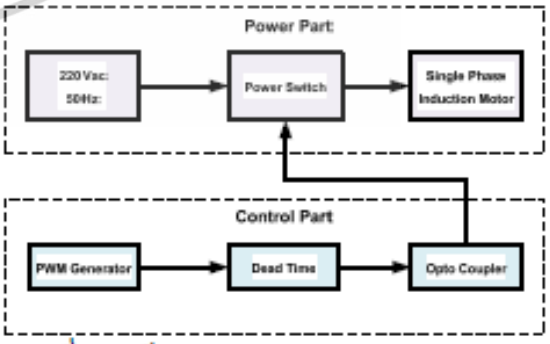
โหมดที่ 6 เป็นโหมดที่กระแสไหลเวียนอิสระในโหลดเนื่องจากมีพลังงานสะสมในขดลวดจ่ายกำลังไฟฟ้าคืนให้โหลดในช่วงที่แรงดันเป็นศูนย์และกระแสเป็นลบ โดยสวิตช์ตัวที่ 1 เปิดวงจร (SW_1, OFF) สวิตช์ตัวที่ 2 ปิดวงจร (SW_2, ON) ทำให้กระแสไหลผ่านไดโอดตัวที่ 2 ไอจีบีทีตัวที่ 2 และไดโอดตัวที่ 4 ไปยังโหลด ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 โหมดที่ 6 โหมดกระแสไหลเวียนอิสระช่วงแรงดันเป็นศูนย์และกระแสเป็นลบ

3. การควบคุมการทำงานของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบอนาล็อก

จากรูปที่ 11 เป็นการทำงานของชุดควบคุมการทำงานของการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส โดยจะแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นภาคกำลังและส่วนที่เป็นภาคควบคุม โดยมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสจะทำงานเมื่อมีสัญญาณควบคุมที่มาจากตัวสร้างสัญญาณ PWM โดยผ่านวงจรขับเกตที่สร้างจากตัวออปโต้คัปเปลอร์ (Opto Coupler) และสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะมาควบคุมสวิตช์ไอจีบีทีทั้งสองตัวเพื่อให้มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสทำงาน

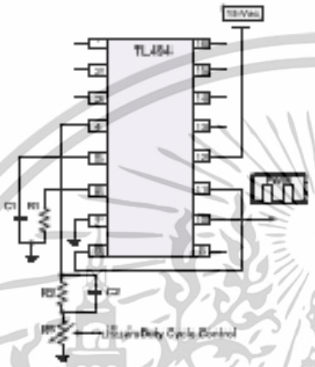


รูปที่ 11 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานแต่ละส่วนของวงจร

จากรูปที่ 12 การออกแบบสร้างรูปของสัญญาณ PWM โดยกำหนดความถี่สวิตชิ่งที่ 1.5 kHz ซึ่งจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า R_T = 100 kΩ (R2 อนุกรม R3) และ C_T = 3.3 nF จากสมการที่ (4) และจากการอ่านค่ากราฟตามรูปที่13 โดยสัญญาณ PWM ที่ได้ออกแบบสามารถปรับขนาดของสัญญาณให้มีขนาดกว้างและแคบได้โดยปรับค่าที่ตัวต้านทานปรับค่าได้ R3



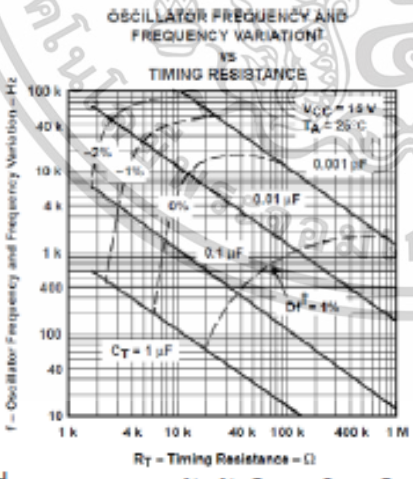
รูปที่ 12 วงจรการควบคุมสร้างสัญญาณ PWM

$$f_{osc} \approx \frac{1.1}{R_T C_T} \quad (4)$$

เมื่อ f_{osc} คือ ค่าความถี่ออสซิลเลเตอร์, Hz

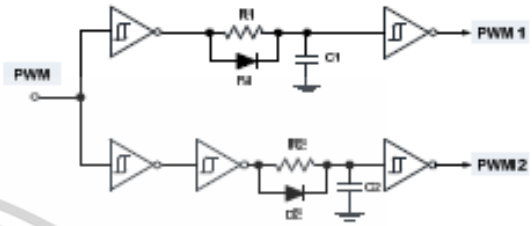
R_T คือ ค่าตัวต้านทานรวม, Ω

C_T คือ ค่าตัวเก็บประจุรวม, F



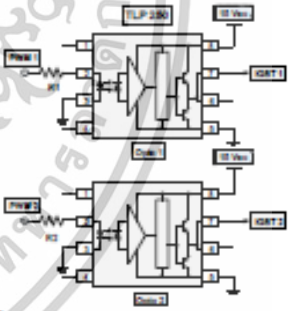
รูปที่ 13 กราฟความสัมพันธ์พารามิเตอร์สำหรับวงจรออสซิลเลเตอร์ของไอซี TL494

จากรูปที่ 14 เป็นวงจรเดดไทม์ (Dead Time) ทำหน้าที่แยกสัญญาณโดยการสร้างวงจรเดดไทม์ไปควบคุมสวิตช์ไอจีบีทีตัวที่ 1 (SW_1) และสวิตช์ไอจีบีทีตัวที่ 2 (SW_2) ไม่ให้ทำงานพร้อมกันในขณะที่มีการเปลี่ยนสภาวะการทำงานอันเป็นผลให้สวิตช์ไอจีบีทีเกิดการลัดวงจรและเกิดความเสียหายได้



รูปที่ 14 วงจรกำหนดเวลา Dead Time ของสัญญาณควบคุม

จากรูปที่ 15 เป็นวงจรออปโต้ไอโซเลเตอร์ (Opto – Isolator) หรือที่เรียกว่าออปโต้คัปเปลอร์ (Opto - Coupler) จะรับสัญญาณ PWM มาจากวงจรเดดไทม์ ซึ่งทำหน้าที่แยกกราวด์ระหว่างวงจรควบคุมของสัญญาณ PWM 1 กับ PWM 2 กับวงจรกำลังของสวิตช์ IGBT 1 กับ สวิตช์ IGBT 2 ในการเปลี่ยนสภาวะการทำงานของวงจร

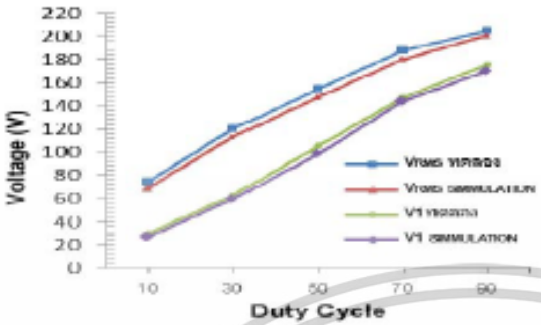


รูปที่ 15 วงจร Drive and Isolate

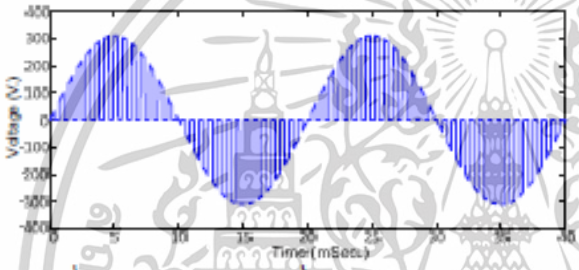
4. ผลการจำลองและผลจากการทดสอบ

จากการทดสอบในขั้นแรกได้มีการจำลองระบบการทำงานโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink โดยทำการปรับค่าค่าดิวตี้ไซเคิลตั้งแต่ 10 - 90 % ให้กับวงจรควบคุมจะพบว่าค่าแรงดันประสิทธิผล (V_{rms}) และค่าแรงดันที่ความถี่หลักมูลฐาน (V_1) ที่จ่ายให้กับมอเตอร์จะแปรผันตามค่าค่าดิวตี้ไซเคิลในขณะค่าที่ได้จากการทดสอบเมื่อนำมาพล็อตในกราฟเดียวกัน ดังรูปที่ 16 จะพบว่าผลการทดสอบที่ได้จะมีความสอดคล้องกับผลจากการจำลอง นั่นคือค่าแรงดันทั้งสองจะเพิ่มขึ้นตามค่าค่าดิวตี้ไซเคิลนั่นเอง

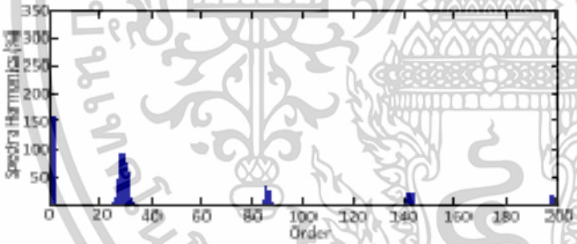
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



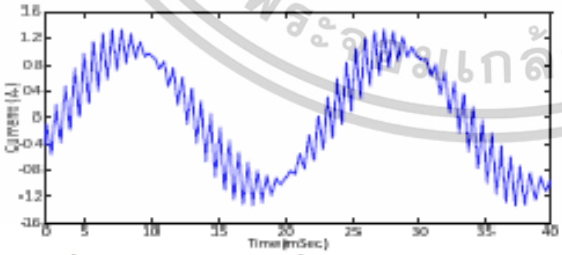
รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าค่าดิวตี้ไซเคิลกับแรงดันเอาต์พุต



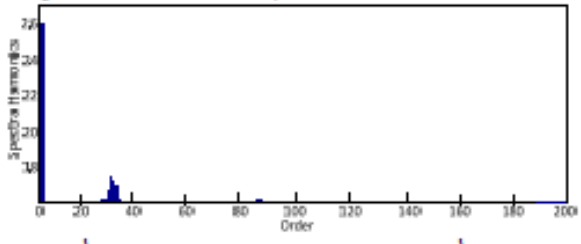
รูปที่ 17 แรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการจำลอง



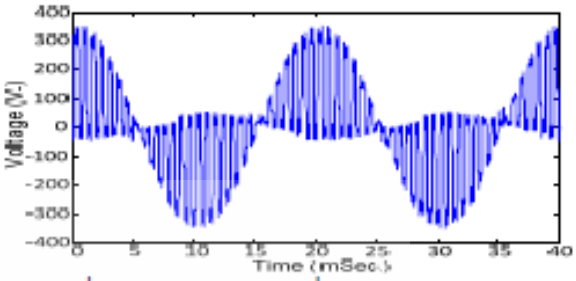
รูปที่ 18 สเปกตรัมของแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการจำลอง



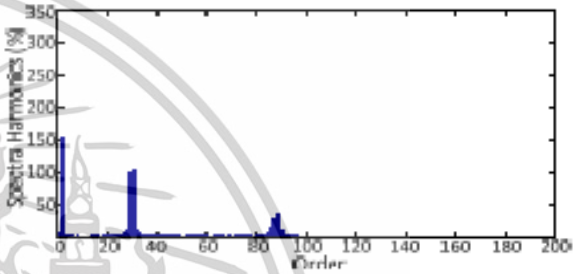
รูปที่ 19 กระแสเอาต์พุตที่ได้จากการจำลอง



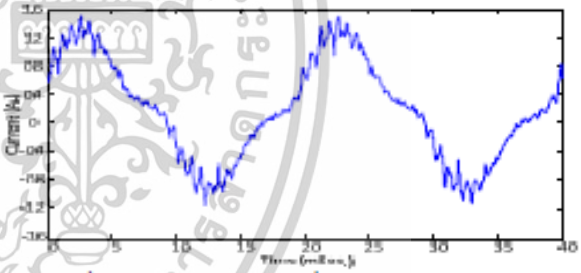
รูปที่ 20 สเปกตรัมของกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการจำลอง



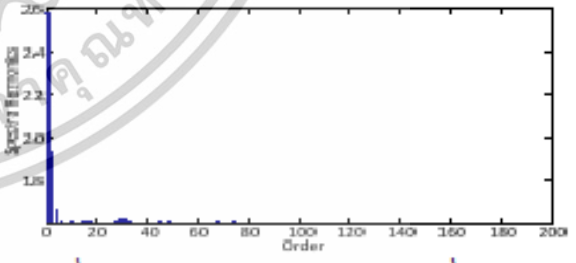
รูปที่ 21 แรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการทดสอบ



รูปที่ 22 สเปกตรัมของแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการทดสอบ



รูปที่ 23 กระแสเอาต์พุตที่ได้จากการทดสอบ



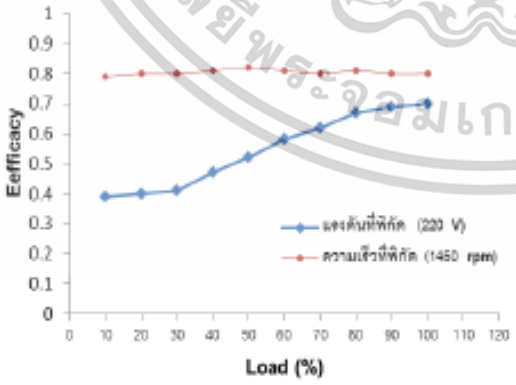
รูปที่ 24 สเปกตรัมของกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการทดสอบ

จากการจำลองและการทดสอบโดยใช้พัลส์วิดมอดูเลชั่น เอซี ซ็อปเปอร์ รูปคลื่นทั้ง 2 ลักษณะจะพบว่ารูปคลื่นแรงดันที่ความถี่การสวิตช์ 1.5 kHz จะมีอันดับฮาร์มอนิกเป็นจำนวนเท่าของความถี่ที่ได้จากการ Sampling สัญญาณ ส่วนรูปคลื่นของกระแสจะไม่ค่อยมีฮาร์มอนิกปรากฏให้เห็นเหตุเพราะว่าลักษณะของสัญญาณกระแสมีความใกล้เคียงกับสัญญาณจาก

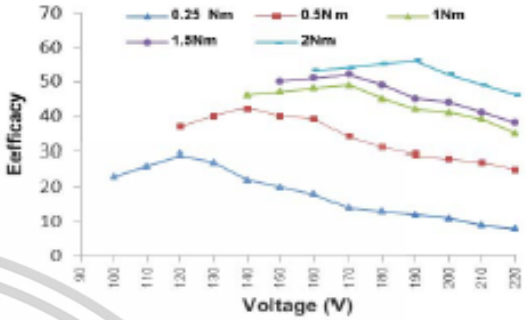
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แหล่งจ่าย ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าวิธีการใช้พัลส์วิดมอดูเลชั่น เอซี ช็อปเปอร์ นี้สามารถที่จะลดกระแสฮาร์มอนิกของระบบลงได้ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีควบคุมมุมจุดชนวนของสวิตช์ที่ใช้เป็นตัวไตรแอค ซึ่งเป็นผลดีกับอุปกรณ์ไฟฟ้าข้างเคียง

รูปที่ 25 เป็นรูปที่ได้ทำการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างการป้อนแรงดันที่พิกัด (220 V) กับการปรับแรงดันที่เหมาะสมโดยใช้เอซี ช็อปเปอร์ เพื่อให้ได้ความเร็วที่พิกัดแล้ววัดตัวประกอบกำลังและประสิทธิภาพการทำงาน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแรงดันที่พิกัดตัวประกอบกำลังจะต่ำที่ภาระเบาและจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อภาระโหลดเพิ่มขึ้น ในขณะที่ทำการปรับแรงดันเพื่อให้ความเร็วรอบคงที่ที่พิกัดตลอดย่านการทำงานของโหลดจะทำให้ตัวประกอบกำลังอยู่ที่ประมาณ 0.8 จากนั้นได้ทำการลดแรงดันลงโดยการปรับค่าดิวตี้ไซเคิลเพื่อหาประสิทธิภาพสูงสุดในแต่ละย่านของโหลดการทำงาน โดยมอเตอร์มีการทำงานที่ความเร็วรอบที่พิกัด (1,450 rpm) ดังรูปที่ 26 ซึ่งจะพบว่าในแต่ละย่านของโหลดการทำงานจะมีแรงดันที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดการทำงานมีประสิทธิภาพสูงที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะการทำงานที่ภาระเบา



รูปที่ 25 ประสิทธิภาพระหว่างแรงดันที่พิกัดและการควบคุมแรงดันให้ได้ความเร็วพิกัด



รูปที่ 26 ประสิทธิภาพและแรงดันไฟฟ้าในแต่ละย่านโหลดการทำงาน

5. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังด้วยเทคนิคการปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับโดยใช้พัลส์วิดมอดูเลชั่น เอซี ช็อปเปอร์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์สำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดคาปาซิเตอร์สตาร์ท โดยวิธีการลดแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ซึ่งเกี่ยวข้องกับการปรับค่าดิวตี้ไซเคิลนั่นเองและช่วยในการลดกระแสฮาร์มอนิกของระบบเป็นผลทำให้การสูญเสียในมอเตอร์ลดลงและยังสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์นำไปสู่การประหยัดพลังงานไฟฟ้าโดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะการทำงานของมอเตอร์ที่ภาระเบาให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

6. เอกสารอ้างอิง

[1] วีระ ธันยาภิรักษ์ และ วิจิตร กิณเรศ (2546). การควบคุมประสิทธิภาพและตัวประกอบกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำ, *วารสาร Industrial Technology Review*, 106, กุมภาพันธ์ 2546, หน้า 92 - 96.

[2] สุชาติ คำลือ, ชาย กังวานสุระ, ณัฐพล อังควานิช, ณัฐภูมิ แสงเพชร์, วีระ ธันยาภิรักษ์ และ วิจิตร กิณเรศ (2554). ชุดประหยัดพลังงานสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสโดยการควบคุมตัวประกอบกำลัง, *การประชุมเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 7 (E – NETT 7th) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี*, 3 – 5 พฤษภาคม 2554, หน้า 673 – 678.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Conference Topics

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
- ระบบควบคุมและการวัด (CT)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิตอล (DS)
- พลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน (ES)
- งานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
- นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ (IN)

คณะกรรมการจัดการประชุมวิชาการ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพ 10120
http://www.eenet2015.org

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า กลุ่มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลและสถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ครั้งที่ ๗

๑๐ มีนาคม ๒๕๕๘

เรื่อง แจ้งผลการพิจารณาบทความ EENET2015

เรียน โกวิท กุลฉาย
อธิโดย ศุวัฒรางค์
ชีระ ธีนยาธิรักษ์
วิจิตร กิ่นแจ่ม

ตามที่ท่านได้ส่งบทความเพื่อเข้าร่วมงานประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า กลุ่มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลและสถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ครั้งที่ ๗ (EENET2015) ระหว่างวันที่ ๒๗ - ๒๘ พฤษภาคม ๒๕๕๘ ณ โรงแรม A-ONE The Royal Cruise เมืองพัทยา จังหวัดชลบุรี นั้น ในหัวเรื่อง

" การควบคุมพัลส์วิดมอดูเลชั่น เอซี ซิงโครไนซ์
ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับการประหยัดพลังงานในมอเตอร์ตัดเฟียวน้ำหนึ่งเฟส "

ในการนี้ คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการประจำเครือข่าย มีความยินดีที่จะเรียนให้ท่านทราบว่า บทความเรื่องดังกล่าวได้ **" ผ่านการพิจารณา "** โดยผู้ทรงคุณวุฒิให้นำเสนอปากเปล่า (Oral Presentation) ในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า กลุ่มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลและสถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ครั้งที่ ๗ (EENET2015) นี้ด้วย

จึงเรียนมาเพื่อทราบ

ถึงชื่อ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปราโมทย์ อนันต์วราพงษ์)
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
ประธานกรรมการดำเนินงาน
การประชุมวิชาการ EENET2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7
Proceedings of the 7th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2015 (EENET 2015)

การควบคุมพัลส์วิดมอดูเลตชั่น เอซี ช็อปเปอร์ ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับการประหยัดพลังงานในมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

Control of a PWM AC Chopper by Microcontroller for Energy Saving in a Single-Phase Induction Motor

โกวิท ภูลอด [1] อธิปัตย์ ศรีสว่างศรี [1] วีระ ธันยกภิรักษ์ [2] และ วิจิตร กิณเรศ [1]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตสุวรรณภูมิ
เลขที่ 1 หมู่ 2 ซอยฉลองกรุง 1 ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร โทรศัพท์ 089-9942005, 032-691645 ต่อ 6
E-mail: hikowit@gmail.com

[2]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
เลขที่ 199 หมู่ 3 ถนนพังโคน-วาริชภูมิ ตำบลพังโคน อำเภอพังโคน จังหวัดสกลนคร โทรศัพท์ 042-772391 ต่อ 2 E-mail: veeramuti@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอเทคนิคการควบคุมพัลส์วิดมอดูเลตชั่น เอซี ช็อปเปอร์ ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับการประหยัดพลังงานในมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส ชนิดตัวเก็บประจุช่วยในการเริ่มหมุน ขนาด 1/4 แรงม้า 220 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ ในวงจรกำลังของพัลส์วิดมอดูเลตชั่น เอซี ช็อปเปอร์ ทำงานร่วมกันระหว่างไอจีบีทีและไดโอดเป็นสวิตช์สองทาง ในบทความได้นำเสนอการออกแบบสร้างวงจรควบคุม ได้มีการตรวจสอบการทำงานทั้งทางทฤษฎีการคำนวณ และการทดสอบ พบว่าในสภาวะภาระของมอเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงตามค่าต่างๆ จะปรับแรงดันที่เหมาะสมเพื่อให้ค่าประกอบกำลังสูงที่สุดเท่าที่จะทำได้ ทำให้เกิดประสิทธิภาพของมอเตอร์สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการป้อนแรงดันที่พิกัดให้กับมอเตอร์

คำสำคัญ: มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส, ไมโครคอนโทรลเลอร์, พัลส์วิดมอดูเลตชั่น, เอซี ช็อปเปอร์, ฮาร์มอนิก

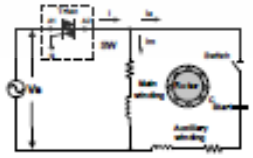
Abstract

This paper presents a control scheme of a PWM AC chopper using a microcontroller for energy saving in a 1/4 HP, 220 V, 50 Hz capacitor start type single-phase induction motor. The proposed PWM AC chopper uses bidirectional switches with the combination diodes and IGBTs. In this paper, an analysis of operation of the proposed PWM AC chopper is fully given. Design and implementation are also included. Both theory and experiment are verified. From the testing results, it has founded that, at a light load condition, an appropriate voltage level obtained from the proposed PWM AC chopper gives higher efficiency compared with applied motor voltage with the rated value.

Keywords: single phase induction motor, microcontroller, pulse width modulation, ac chopper, harmonic

1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้เราคงจะปฏิเสธไม่ได้ว่าอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าได้เข้ามามีบทบาทอย่างมากทั้งในชีวิตประจำวันและการทำงาน ทั้งนี้เพื่อใช้สำหรับอำนวยความสะดวกสบาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเครื่องจักรกลไฟฟ้าประเภทมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส (Single Phase Induction Motor: SPIM) ซึ่งนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งภาคอุตสาหกรรม และภาคเกษตรกรรม เนื่องมาจากมีโครงสร้างที่แข็งแรง ใช้งานได้ง่าย บำรุงรักษาน้อย และที่สำคัญราคาไม่สูงมากนัก สำหรับการนำไปใช้ขึ้นอยู่กับลักษณะของงาน เช่น พัดลม เครื่องบ้วน เครื่องเจาะ เป็นต้น เราเรียกลักษณะใช้มอเตอร์เปลี่ยนรูปพลังงานว่า ภาระของมอเตอร์ (Load motor) ซึ่งลักษณะงานภาระของมอเตอร์ที่ใช้ก็แตกต่างกัน เช่น ภาระเบาและภาระหนัก อาจจะคงที่หรือไม่คงที่ขึ้นอยู่กับช่วงระยะเวลาและลักษณะงานภาระของมอเตอร์ ถ้ามอเตอร์ทำงานที่ภาระเบาจะส่งผลต่อประสิทธิภาพและตัวประกอบกำลังต่อนข้างต่ำ และหากใช้มอเตอร์ที่ภาระเบาเป็นจำนวนมากจะทำให้เกิดการสูญเสียต่อนข้างสูง ดังนั้นการจะหาวิธีที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์จึงเป็นเรื่องที่ควรตระหนัก



รูปที่ 1 วงจรควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยไตรแอคที่เป็นสวิตช์

จากรูปที่ 1 รูปด้านบนเป็นการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยไตรแอคที่เป็นสวิตช์จะเป็นการควบคุมแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์โดยใช้เทคนิคการควบคุมเฟส วิธีการนี้จะส่งผลต่อรูปคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

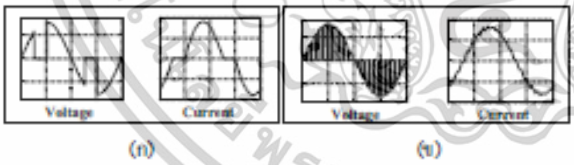
บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7
Proceedings of the 7th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2015 (EENET 2015)

แรงดันและกระแสทำให้เกิดค่าสารมอนิกอันดับต่ำปะปนมาทำให้เกิดการสูญเสียในมอเตอร์และอุปกรณ์ไฟฟ้าข้างเคียงที่ต่อใช้งานร่วมกัน ดังนั้นในบทความนี้จึงนำเสนอวิธีการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยไอจีบีทีเป็นสวิตช์สองทาง จากรูปที่ 2 รูปด้านล่างเป็นการควบคุมแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์โดยใช้เทคนิคการควบคุมพัลส์วิดมอดูเลตชั่น เอซี ช็อปเปอร์ วิธีการนี้จะช่วยลดผลกระทบของรูปคลื่นแรงดันและกระแสที่มีค่าสารมอนิกอันดับต่ำปะปน ช่วยลดการสูญเสียในมอเตอร์และผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าข้างเคียงที่ใช้งานร่วมกัน

รูปที่ 2 วงจรควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยไอจีบีทีที่เป็นสวิตช์

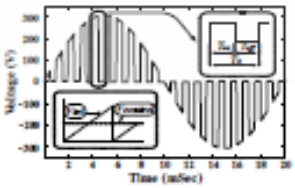
2. เทคนิคการควบคุมพัลส์วิดมอดูเลตชั่น เอซี ชอปเปอร์ และหลักการวิเคราะห์โหมดการทำงาน

จากรูปที่ 2 (ก) รูปด้านล่างเป็นรูปคลื่นแรงดันและกระแสโดยใช้วิธีการควบคุมแบบ Phase control จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นแรงดันและกระแสมีความผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ทำให้เกิดสารมอนิกอันดับต่ำ และรูปที่ 2 (ข) รูปด้านล่างเป็นรูปคลื่นแรงดันและกระแสโดยใช้วิธีการควบคุมแบบ PWM AC Chopper จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นแรงดันและกระแสเข้าใกล้รูปคลื่นไซน์ ทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากสารมอนิกลดกว่ากรณีที่ใช้วิธีการควบคุมแบบ Phase control



(ก) (ข)

รูปที่ 2 รูปคลื่นแรงดันและกระแส
(ก) วิธีการควบคุมแบบ Phase control (ข) วิธีการควบคุมแบบ PWM AC Chopper



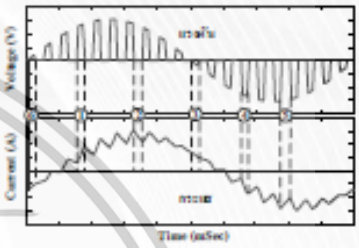
รูปที่ 3 สัญญาณการควบคุมแรงดันด้วยวิธีการแบบ PWM

จากรูปที่ 3 รูปด้านบนเป็นสัญญาณอ้างอิงเปรียบเทียบกันกับสัญญาณควบคุมก่อนเข้าวงจรกำเนิดสัญญาณ PWM ขนาดของแรงดันที่จะจ่ายให้กับมอเตอร์จะถูกควบคุมตามค่า (Duty ratio: D) ดังสมการที่ 1 ส่วนขนาดแรงดันที่ได้จะเป็นไปตามสมการที่ 2 และขนาดแรงดันเอาต์พุตมูลฐานไฟฟ้าจะถูกควบคุมตามค่า (Duty cycle: D) ดังสมการที่ 3 [1]

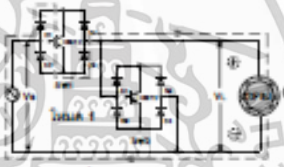
$$D=\frac{T_{on}}{T_s}=\frac{T_{on}}{T_{on}+T_{off}} \quad (1)$$

$$v_{L1}(t)=DV_m Sin(\omega t) \quad (2)$$

$$V_{L1,rms}=\frac{DV_m}{\sqrt{2}} \quad (3)$$



รูปที่ 4 รูปคลื่นแรงดันและกระแสในการวิเคราะห์โหมดการทำงาน

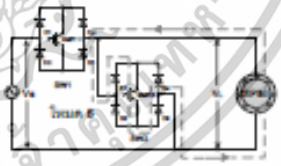


รูปที่ 4 (ก) $V_L(+), I_L(+)$

รูปที่ 4 (ข) $V_L(0), I_L(+)$

รูปที่ 4 (ค) $V_L(-), I_L(+)$

รูปที่ 4 (ง) $V_L(-), I_L(-)$



รูปที่ 4 (จ) $V_L(0), I_L(-)$

รูปที่ 4 (ฉ) $V_L(+), I_L(-)$

โหมดที่ 1 จากรูปที่ 4 (ก) $V_L(+), I_L(+)$ รูปด้านบนเป็นโหมดจ่ายกำลังไฟฟ้าช่วงแรงดันเป็นบวกและกระแสเป็นบวก โดยสวิตช์ตัวที่ 2 เปิดวงจร สวิตช์ตัวที่ 1 ปิดวงจรกระแสไหลผ่านไดโอดตัวที่ 1 กับ 3 และโหลด โหมดที่ 2 จากรูปที่ 4 (ข) $V_L(0), I_L(+)$ รูปด้านบนเป็นโหมดกระแสไหลวนอิสระช่วงแรงดันเป็นศูนย์กระแสเป็นบวก โดยสวิตช์ตัวที่ 1 เปิดวงจร สวิตช์ตัวที่ 2 ปิดวงจรกระแสไหลผ่านไดโอดตัวที่ 2 กับ 4 และโหลด โหมดที่ 3 จากรูปที่ 4 (ค) $V_L(-), I_L(+)$ รูปด้านบนเป็นโหมดคืนกำลังไฟฟ้าช่วงแรงดันเป็นลบและกระแสเป็นบวก โดยสวิตช์ตัวที่ 1 ปิดวงจร สวิตช์ตัวที่ 2 เปิดวงจรกระแสไหลผ่านไดโอดตัวที่ 1 กับ 3 และโหลด โหมดที่ 4 จากรูปที่ 4 (ง) $V_L(-), I_L(-)$ รูปด้านบนเป็น โหมดจ่าย

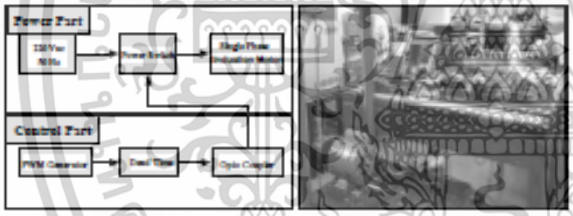
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7
Proceedings of the 7th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2015 (EENET 2015)

กำลังไฟฟ้าช่วงแรงดันเป็นลบและกระแสเป็นลบ โดยสวิตช์ตัวที่ 2 เปิดวงจร สวิตช์ตัวที่ 1 ปิดวงจรกระแสไหลผ่านไดโอดตัวที่ 2 กับ 4 และโหลด โหมดที่ 5 จากรูปที่ 4 (จ) $V_i(0)$, $I_i(-)$ รูปด้านบนเป็นโหมดกระแสไหลเวียนอิสระช่วงแรงดันเป็นศูนย์กระแสเป็นลบ โดยสวิตช์ตัวที่ 1 เปิดวงจร สวิตช์ตัวที่ 2 ปิดวงจรกระแสไหลผ่านไดโอดตัวที่ 1 กับ 3 และโหลด โหมดที่ 6 จากรูปที่ 4 (ฉ) $V_i(+)$, $I_i(-)$ รูปด้านบน โหมดคืนกำลังไฟฟ้าช่วงแรงดันเป็นบวกและกระแสเป็นลบ โดยสวิตช์ตัวที่ 2 เปิดวงจร สวิตช์ตัวที่ 1 ปิดวงจรกระแสไหลผ่านไดโอดตัวที่ 2 กับ 4 และโหลด

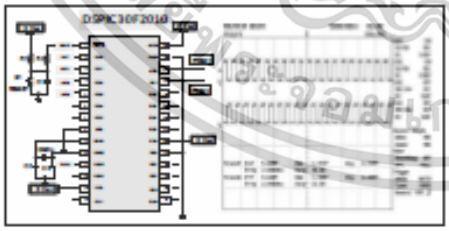
3. การควบคุมการทำงานของชุดขับเกตสื่อสารแบบแยกสัญญาณหนึ่งเฟสแบบดิจิตอล

สำหรับการสร้างชุดควบคุมของบอดเดอร์หนึ่งเฟสนั้นได้แบ่งลักษณะการทำงานออกเป็น 2 ส่วน ด้วยกันคือ ส่วนที่เป็นภาคกำลังประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้า สวิตช์กำลังแบบไอจีบีทีบอดเดอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส และส่วนที่เป็นภาคควบคุมประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดสัญญาณ PWM วงจรหน่วงเวลา วงจรแยกกราวด์ดังรูปที่ 5 รูปด้านล่าง (ก) และ (ข)



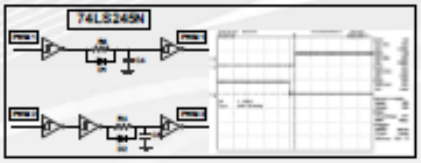
(ก) (ข)

รูปที่ 5 (ก) บล็อกไดอะแกรมการทำงานของระบบ (ข) ชิ้นงานจริงที่ใช้ในการทดสอบของระบบ



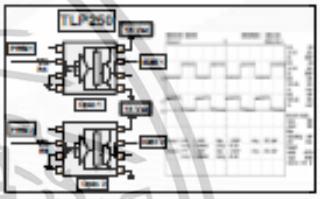
รูปที่ 6 วงจรกำเนิดสัญญาณ PWM

จากรูปที่ 6 รูปด้านบนเป็นสัญญาณควบคุม PWM ที่สร้างจากไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล DSPIC30F2010 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ R1 = 10 kΩ, R2 = 2 kΩ, C1 = 0.1μF, C2 = 33pF, C3 = 33pF และความถี่สัญญาณนาฬิกา 5 MHz กำหนดความถี่สวิตช์ชิ่งของสัญญาณที่ 2 kHz และสร้างสัญญาณ PWM สองสัญญาณที่มีการทำงานตรงข้ามกันออกมา เพื่อนำไปควบคุมวงจรกำลังให้ทำงานที่กำหนดตามค่าความถี่ในการสวิตช์ชิ่งของอุปกรณ์



รูปที่ 7 วงจรหน่วงเวลา Dead time ของสัญญาณ PWM

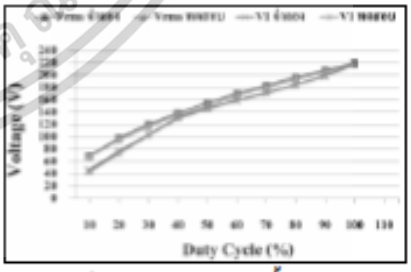
จากรูปที่ 7 รูปด้านบนเป็นวงจรหน่วงเวลาโดยจะรับสัญญาณ PWM 1 และ PWM 2 ที่สร้างขึ้นนี้จะผ่านไอซีเบอร์ 74LS245N ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ R3 = 10 kΩ, R4 =10 kΩ, D1 = 1N5819, D2 = 1N5819, C4 = 0.1μF, C5 = 0.1μF เพื่อสร้างสัญญาณหน่วงเวลาที่ 1.5 μS เป็นช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการนำกระแสและหยุดกระแสของไอจีบีทีให้กับวงจรเพื่อป้องกันสัญญาณ PWM 1 และ PWM 2 ในช่วงเวลาที่สัญญาณทั้งสองทำงานสลับกัน



รูปที่ 8 วงจรแยกกราวด์ Drive and isolate ของสัญญาณ PWM

รูปที่ 8 รูปด้านบนเป็นไอซีเบอร์ TLP250 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ R5 = 500 kΩ, R6 = 500 kΩ เป็นวงจรแยกกราวด์จะรับสัญญาณ PWM 1 และ PWM 2 จากวงจรหน่วงเวลา Dead time เข้ามาเพื่อไปควบคุมวงจรกำลัง โดยวงจรนี้จะทำการแยกกราวด์ของวงจรควบคุมออกจากวงจรกำลังเพื่อป้องกันอุปกรณ์เสียหายขณะทำผิดปกติหรือลัดวงจร

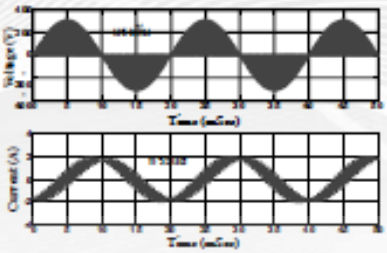
4. ผลการจำลองและผลการทดสอบในการปรับค่าดิวตี้ไซเคิลที่มีความสัมพันธ์กับแรงดัน



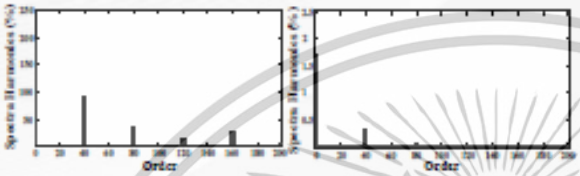
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างการปรับค่าดิวตี้ไซเคิลกับแรงดันที่จำลองและแรงดันที่ทดสอบ

จากรูปที่ 9 รูปด้านบนเป็นการจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink และเทียบกับการทดสอบโดยการปรับค่าดิวตี้ไซเคิลตั้งแต่ 10% -100% ให้กับวงจรพบว่าค่าแรงดันประสิทธิผล (Vrms) และค่าแรงดันความถี่หลักมูลฐาน (V1) ที่จ่ายให้กับบอดเดอร์จะมีค่าแปรผันตามค่าดิวตี้ไซเคิลในทิศทางเดียวทั้งสองการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



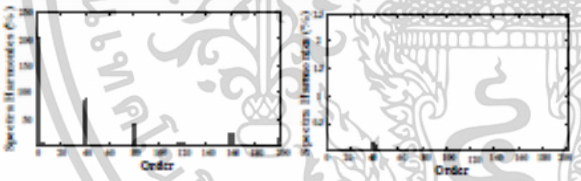
รูปที่ 10 รูปคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการจำลอง



(ก) (ข)

รูปที่ 11 (ก) สเปกตรัมแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการจำลอง (ข) สเปกตรัมกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการจำลอง

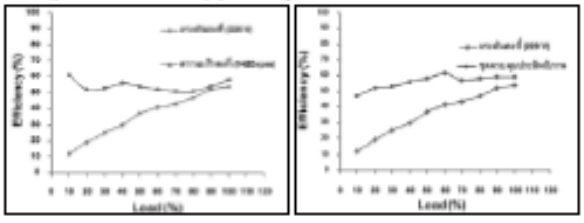
รูปที่ 12 รูปคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการทดสอบ



(ก) (ข)

รูปที่ 13 (ก) สเปกตรัมแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการทดสอบ (ข) สเปกตรัมกระแสเอาต์พุตที่ได้จากการทดสอบ

จากรูปที่ 10 รูปที่ 11 (ก) และ (ข) จากการจำลอง และจากรูปที่ 12 รูปที่ 13 (ก) และ (ข) จากการทดสอบรูปด้านบนโดยใช้เทคนิคการควบคุมพัลส์วิดมอดูเลชั่น เอซี ชอปเปอร์ที่ความถี่สวิตช์ชิ่ง 2 kHz จะมีฮาร์มอนิกเป็นจำนวนเท่าของความถี่ และไม่เกิดมีฮาร์มอนิกอันดับต่ำปรากฏให้เห็นแสดงว่าสัญญาณของรูปคลื่นกระแสจะเข้าใกล้ไซน์นั้นเอง

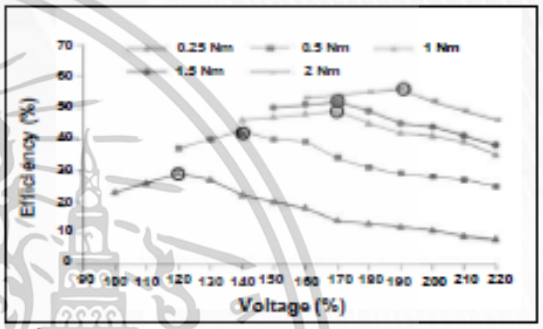


(ก) (ข)

รูปที่ 14 กราฟประสิทธิภาพและภาระของมอเตอร์

(ก) แรงดันที่พิกัดและความเร็วที่พิกัดมอเตอร์ (ข) แรงดันที่พิกัดและชุดควบคุมประสิทธิภาพ

จากรูปที่ 14 (ก) รูปด้านบนเป็นการทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ระหว่างการป้อนแรงดันที่พิกัด (220 V) และความเร็วพิกัดมอเตอร์ที่ (1,450 rpm) เพื่อหาความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพในขณะที่ทำการเปลี่ยนภาระในค่าต่างๆ และจากรูปที่ 14 (ข) รูปด้านบนเป็นการเปรียบเทียบระหว่างผลของการจ่ายแรงดันที่พิกัดและชุดควบคุมประสิทธิภาพ พบว่าชุดควบคุมประสิทธิภาพสามารถเพิ่มทำการทำงานของมอเตอร์ได้โดยเฉพาะในสภาวะเบาของมอเตอร์



รูปที่ 15 การควบคุมประสิทธิภาพระหว่างแรงดันในแต่ละย่านภาระ

จากรูปที่ 15 รูปด้านบนเมื่อพล็อตกราฟแสดงให้เห็นว่าในสภาวะภาระเบาจะทำการลดแรงดัน โดยการปรับค่าดิวตี้ไซคิลที่ภาระค่าที่แตกต่างกัน เพื่อจะหาค่าประสิทธิภาพที่ดีและเหมาะสมที่สุดในแต่ละภาระต่างๆ และทำให้ทราบถึงจุดวงกลมสีดำ "o" ที่วงรอบจุดที่สูงที่สุดในเส้นกราฟแต่ละย่านภาระของมอเตอร์เป็นจุดที่ทำให้เกิดค่าประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในแต่ละภาระของมอเตอร์

5. สรุป

สำหรับบทความนี้ได้นำเสนอการควบคุมพัลส์วิดมอดูเลชั่น เอซี ชอปเปอร์ ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับการประหยัดพลังงานในมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดตัวเก็บประจุช่วยในการเริ่มหมุน โดยวิธีการลดแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ โดยการปรับค่าดิวตี้ไซคิลของเอซี ชอปเปอร์นั้นเอง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ ซึ่งเป็นการลดความสูญในแกนเหล็กซึ่งขึ้นอยู่กับแรงดันที่ป้อนยกกำลังสองที่ภาระเบา เมื่อเปรียบเทียบกับการป้อนแรงดันที่พิกัดให้กับมอเตอร์หลักการนี้ให้ข้อดีในการลดกระแสฮาร์มอนิกของระบบนั้นเอง

เอกสารอ้างอิง

[1] Nabil A. Ahmed, Kenji Amei and Mazaaki Sakui, "AC chopper voltage controller – fed single – phase induction motor employing symmetrical pwm control," *Elsevier Science*, Electric power systems research, vol. 1, no. 1, pp. 15 – 25, March 1999.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า กลุ่มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลและสถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ครั้งที่ ๙

๑๔ มีนาคม ๒๕๖๐

เรื่อง แจ้งผลการพิจารณาบทความ EENET2017

เรียน คุณโกวิท ภูฉลาด คุณณัฐวุฒิ ด่านวานิชกุล คุณตุลธร ศักดีแก้ว คุณยุพดา ชนะชัย
คุณประหยัด กองสุข คุณเฉลิมชาติ มานพ และคุณวิจิตร กิณเรศ

ตามที่ท่านได้ส่งบทความเพื่อเข้าร่วมงานประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๙ (The 9th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology : EENET2017) กลุ่มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลและสถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ซึ่งจะจัดขึ้นระหว่างวันที่ ๒ - ๔ พฤษภาคม ๒๕๖๐ ณ โรงแรมเคพีแกรนด์ อำเภอเมือง จังหวัดจันทบุรี ในหัวข้อเรื่อง

" การประเมินสมรรถนะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสถูกขับเคลื่อนด้วยพัลส์วิดมอดูเลตชั่น เอซี ช็อปเปอร์หนึ่งเฟส "

ในการนี้ คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการประจำเครือข่าย มีความยินดีที่จะเรียนให้ท่านทราบว่า บทความเรื่องดังกล่าวได้ **" ผ่านการพิจารณา "** โดยผู้ทรงคุณวุฒิให้นำเสนอแบบปากเปล่า (Oral Presentation) ในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า กลุ่มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลและสถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ครั้งที่ ๙ (EENET2017) แล้ว

จึงเรียนมาเพื่อทราบ

ลงชื่อ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มนัส คงศักดิ์)
ประธานกรรมการดำเนินงาน
การประชุมวิชาการ EENET2017

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมการเกษตร
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี
๑๓๓ ม.๑๐ ตำบลพลวง อำเภอเขาคิชฌกูฏ จังหวัดจันทบุรี ๒๒๒๑๐
โทรศัพท์ ๐๓๙-๓๐๗-๒๖๓-๕ โทรสาร ๐๓๙-๓๐๗-๒๖๘

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2017 (EENET 2017)

PW

การประเมินสมรรถนะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสถูกขับเคลื่อนด้วยพัลส์วิดมอดูเลตชั่น เอซี ช็อปเปอร์หนึ่งเฟส

Performance Evaluation of a Three-Phase Induction Motor Driven by a Single-Phase Pulse Width Modulation AC Chopper

โกวิท ภูจลาล [1] ณัฐวุฒิ ล่านวานิชกุล [1] คุลธร ภักดีแก้ว [1] ยุทลา ชนะชัย [1] ประยัด กองสุข [1] เฉลิมชาติ มานพ [1] และ วิจิตร กิณเรศ [2]

[1]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่ 1 หมู่ 2 ซอยฉลองกรุง 1 ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร โทรศัพท์ 08-9994-2005

E-mail: bikouvit@gmail.com

[2]สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี

เลขที่ 131 หมู่ 10 ถนนบ้าราศนราดูร ตำบลพลวง อำเภอเขาคิชฌกูฏ จังหวัดจันทบุรี โทรศัพท์ 08-4976-6622

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอการประเมินสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 2 แรงม้า 220 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ ขับเคลื่อนด้วยพัลส์วิดมอดูเลตชั่น เอซี ช็อปเปอร์หนึ่งเฟส โดยปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่มีการต่อตัวเก็บประจุเข้าไปหนึ่งตัว โดยไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ DSPIC30F4011 ทำหน้าที่สร้างสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลตชั่น เอซี ช็อปเปอร์ควบคุมไอจีบีทีที่ทำงานร่วมกับไดโอดต่อกันแบบเต็มบริดจ์เป็นสวิตช์สองทาง ได้ทำการทดสอบที่สภาวะโหลดต่างๆ ที่ปรับแรงดันให้เหมาะสมพบว่าวิธีการที่นำเสนอให้ตัวประกอบกำลังและประสิทธิภาพสูงกว่าวิธีการป้อนแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าหนึ่งเฟส

คำสำคัญ: มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส, ไมโครคอนโทรลเลอร์, พัลส์วิดมอดูเลตชั่น เอซี ช็อปเปอร์

Abstract

This paper presents performance evaluation of a 2 HP, 220 V, 50 Hz three-phase induction motor fed by a 1-phase pulse width modulation (PWM) AC Chopper. The single-phase variable voltage is applied to the three-phase induction motor connected with one capacitor A DSPIC30F4011 microcontroller is used to generate PWM signals for controlling IGBTs that work together with full bridge diodes acting as two way switches. Testing under various load level is given. With the suitable voltage, the proposed method gives higher both power factor and efficiency than a conventional single-phase supply.

Keywords: three - phase induction motor, microcontroller, pulse width modulation ac chopper

1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้จะพบว่าในโรงงานอุตสาหกรรมแทบทุกแห่งจะต้องมีมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส (Three-phase induction motor) ซึ่งทำหน้าที่ในการเปลี่ยนรูปพลังงานจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล เรียกลักษณะของงานที่ต้องใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในการเปลี่ยนรูปพลังงานว่า ภาระของมอเตอร์ (Load motor) ซึ่งลักษณะงานแต่ละชนิดก็จะเป็นภาระที่ต่างกันของมอเตอร์ ซึ่งภาระของมอเตอร์นี้จะส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ กล่าวคือมอเตอร์เมื่อทำงานที่ภาระเบาจะมีประสิทธิภาพและค่าตัวประกอบกำลังต่อนข้างต่ำ เนื่องจากมอเตอร์เกิดการสูญเสียที่แกนเหล็กค่อนข้างสูง ดังนั้นถ้าหากโรงงานที่ใช้มอเตอร์เป็นตัวส่งกำลังให้กับภาระเบาเป็นจำนวนมากก็จะทำให้เกิดการสูญเสียที่สูงตามไปด้วย จึงมีการหาวิธีที่จะเพิ่มประสิทธิภาพจึงเป็นเรื่องที่ควรตระหนัก และในบางสถานการณ์ที่ไม่สามารถหาแหล่งจ่ายไฟฟ้าสามเฟสได้อาจจะเนื่องมาจากอยู่ห่างไกลในชนบทหรือมีการปั่นไฟฟ้าใช้เองซึ่งมีเฉพาะเป็นไฟฟ้าหนึ่งเฟส (Single-phase) แต่มีความจำเป็นต้องใช้มอเตอร์ตัวใหญ่ย่อมเป็นการยากที่จะหาซื้อมอเตอร์ชนิดหนึ่งเฟสที่มีขนาดใหญ่ เพราะโดยส่วนใหญ่จะผลิตมาเป็นมอเตอร์ชนิดสามเฟสเสียส่วนใหญ่ และเมื่อมอเตอร์ตัวใหญ่มากๆ ชุดเริ่มหมุนหรืออุปกรณ์อาจจะไม่สามารถหาได้ ดังนั้นการดัดแปลงเอามอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมาใช้กับไฟฟ้าหนึ่งเฟสก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่พอจะช่วยแก้ปัญหาได้ [1-4]

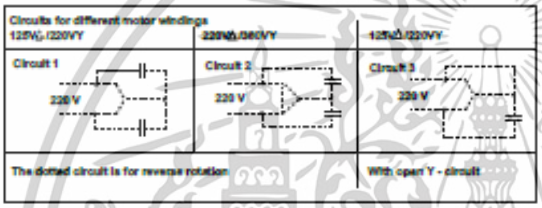
2. การนำมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมาต่อกับไฟฟ้าหนึ่งเฟส

ปัญหาการนำเอามอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมาใช้กับไฟฟ้าหนึ่งเฟสคือไม่สามารถเริ่มหมุนมอเตอร์ โดยใช้ไฟฟ้าหนึ่งเฟสได้เพราะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

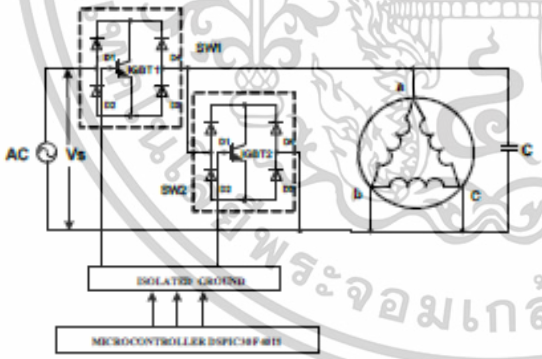
แรงบิดล็อกโรเตอร์หรือแรงบิดเริ่มหมุนจะมีค่าต่ำมาก และลักษณะคุณสมบัติขณะเริ่มหมุนจะไม่ค่อยดีนัก ทำให้มอเตอร์แบบนี้เหมาะสำหรับขับโหลดแบบพัดลม และใช้ได้กับเครื่องจักรที่เริ่มหมุนแบบตัวเปล่าหรือไม่มีโหลดต่อกับมอเตอร์ เทคนิคอย่างหนึ่งเพื่อช่วยแก้ปัญหาโดยการติดตั้งคาปาซิเตอร์หรือตัวเก็บประจุพ่วงเข้าไปกับขั้วของมอเตอร์ คาปาซิเตอร์จะทำหน้าที่ทำให้กระแสนำหน้าแรงดันหรือเกิดมุมต่างเฟสทางไฟฟ้าทำให้เกิดแรงบิดสูงขึ้นกว่าเดิม

สำหรับมอเตอร์ที่มีขั้วออกมาสามขั้วดังรูปที่ 1 เป็นลักษณะการต่อคาปาซิเตอร์ที่จะทำให้มอเตอร์หมุนไปในทิศทางหนึ่ง ซึ่งอาจจะตามเข็มนาฬิกาหรือทวนเข็มนาฬิกาก็ได้แต่ถ้าเปลี่ยนการต่อคาปาซิเตอร์ตามเส้นประทิศทางการหมุนของมอเตอร์ก็จะกลับทิศทางการหมุนจากทิศทางแรกได้ดังรูปข้างล่าง



รูปที่ 1 การต่อคาปาซิเตอร์

การต่อคาปาซิเตอร์แสดงในไดอะแกรมข้างบนกำลังของมอเตอร์ที่ต่อกับไฟฟ้าหนึ่งเฟสจะมีค่าประมาณ 60% ถึง 80% ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสและแรงบิดล็อกโรเตอร์หรือแรงบิดเริ่มหมุนจะมีค่าประมาณ 25% ถึง 35% ของแรงบิดที่กัดเดิม



รูปที่ 2 วงจรมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสด้วยพัลส์วิดมอดูเลตชั่น เอซีซ็อปเปอร์หนึ่งเฟส

3. การจำลองทางคณิตศาสตร์

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสสามารถทำงานได้โดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าหนึ่งเฟสได้โดยการต่อตัวเก็บประจุกับขดลวดสเตเตอร์ (Stator winding) การวิเคราะห์องค์ประกอบขณะที่ไม่สมมาตร การเปลี่ยนรูปกำลังงานอินวาเรียน (Power invariant) สามเฟสองค์ประกอบสมมาตรดังแสดงในสมการที่ (1) [1-2]

$$[C]=\frac{1}{\sqrt{3}}\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ a^2 & a & 1\\ a & a^2 & 1\end{bmatrix} \quad (1)$$

ที่ $a=e^{j2\pi/3}$

U_a, U_b, U_c คือ องค์ประกอบแรงดันชั่วขณะของแต่ละเฟส

$$[U]_{abc}=[C][U]^{+-o} \quad (2)$$

$$[U]_{abc}=[U_a\ U_b\ U_c]^t \quad (3)$$

$$[U]^{+-o}=[U^+\ U^-\ U^o]^t \quad (4)$$

U^+, U^-, U^o คือ ลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์ ตามลำดับปริมาณลำดับศูนย์จะไม่มีและปริมาณลำดับลบเป็นสัดส่วนจำนวนเชิงซ้อนของปริมาณลำดับบวกวงจรสมมูลลำดับบวกของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสดังรูปที่ 3 ด้านล่าง

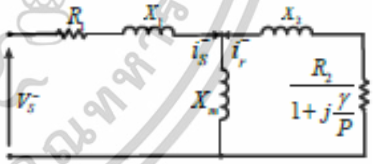
รูปที่ 3 วงจรสมมูลลำดับบวก

$$V_s^+=(R_1+X_1P)i_s^+ +X_mP(i_s^+ +i_r^+)$$

$$o=\frac{V_r^+}{1-j(\gamma/P)}$$

$$o=\left(\frac{R_2}{1-j(\gamma/P)}+X_2P\right)i_r^+ +X_mP(i_s^+ +i_r^+) \quad (5)$$

เมื่อวงจรสมมูลของลำดับลบแทนที่ j ด้วย $-j$ ในสมการที่ 5



รูปที่ 4 วงจรสมมูลลำดับลบ

$$V_s^-=(R_1+X_1P)i_s^- +X_mP(i_s^- +i_r^-)$$

$$o=\frac{V_r^-}{1+j(\gamma/P)}$$

$$o=\left(\frac{R_2}{1+j(\gamma/P)}+X_2P\right)i_r^- +X_mP(i_s^- +i_r^-) \quad (6)$$

สมการที่ 3 และสมการที่ 4 เป็นจำนวนเชิงซ้อนเพราะฉะนั้นทำให้เข้าใจง่ายๆ คือแรงดันและกระแสลำดับบวกซึ่งเป็นจำนวนเชิงซ้อนสามารถเขียนได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9
Proceedings of the 9th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2017 (EENET 2017)

PW

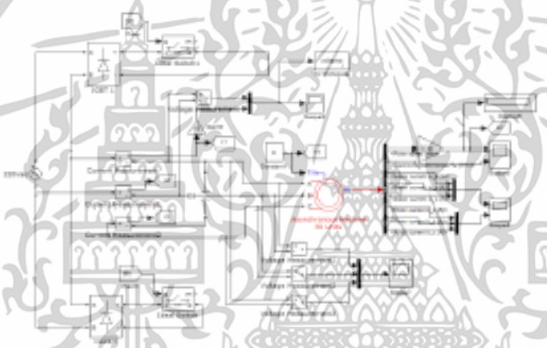
$$V_s^+ = V_{sx} + jV_{sy}, \quad i_s^+ = i_{sx} + ji_{sy},$$
$$V_r^+ = V_{rx} + jV_{ry}, \quad i_r^+ = i_{rx} + ji_{ry}, \tag{7}$$

ในลักษณะเดียวกันสมการที่ 7 เป็นลำดับลบดังนั้นแรงบิดสนามแม่เหล็กของลำดับบวกสามารถเขียนได้ดังนี้ [2, 4]

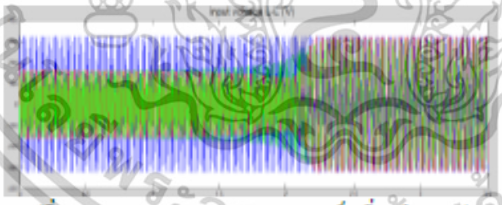
$$T_e = \frac{jX_m}{\omega_s}\left(i_r^+ i_s^- - i_s^+ i_r^-\right) \tag{8}$$

4. การประเมินสมรรถนะ

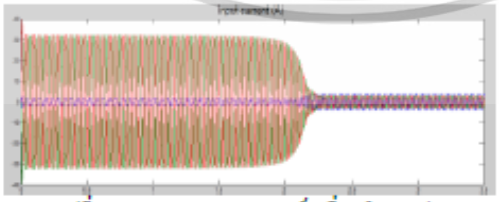
จากการทดสอบใช้ค่าพารามิเตอร์โดยมีตัวเก็บประจุที่ต่อกับขดลวดสเตเตอร์ 40 μF ควบคุมไอจีบีทีที่ทำงานร่วมกับไดโอดต่อกันแบบเต็มบริดจ์เป็นสวิตช์สองทาง ที่แรงดันและความถี่มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 2 แรงม้า 220/380 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ 4 โพล 6.1/3.4 แอมป์ ต่อแบบเดลต้า



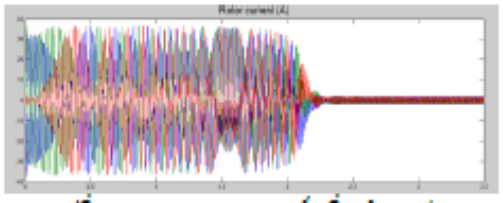
รูปที่ 5 วงจรจำลองภาคกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส
ด้วยวิธีพัลส์วิดมอดูเลตชั่น เอซี ร็อปเปอร์หนึ่งเฟส



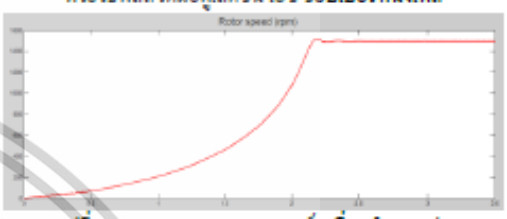
รูปที่ 6 Input voltage line-line (V) มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส
ด้วยวิธีพัลส์วิดมอดูเลตชั่น เอซี ร็อปเปอร์หนึ่งเฟส



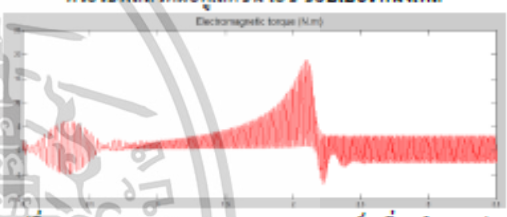
รูปที่ 7 Input current (A) มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส
ด้วยวิธีพัลส์วิดมอดูเลตชั่น เอซี ร็อปเปอร์หนึ่งเฟส



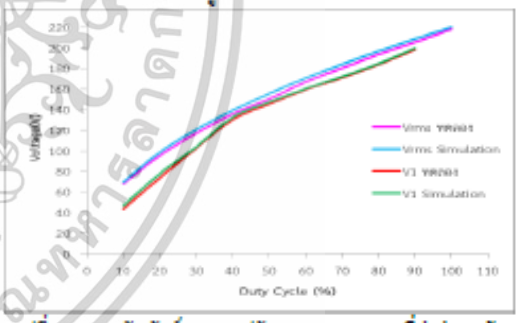
รูปที่ 8 Rotor current (A) มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส
ด้วยวิธีพัลส์วิดมอดูเลตชั่น เอซี ร็อปเปอร์หนึ่งเฟส



รูปที่ 9 Rotor speed (rpm) มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส
ด้วยวิธีพัลส์วิดมอดูเลตชั่น เอซี ร็อปเปอร์หนึ่งเฟส



รูปที่ 10 Electromagnetic torque (N.m) มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส
ด้วยวิธีพัลส์วิดมอดูเลตชั่น เอซี ร็อปเปอร์หนึ่งเฟส



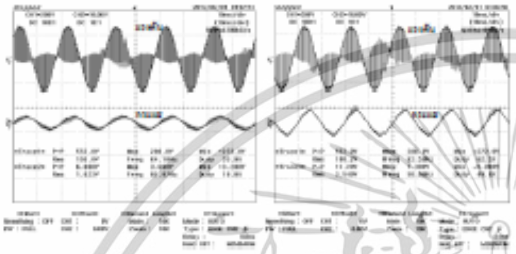
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ของการปรับ Duty cycle (%) ที่ค่าต่างๆ กับแรงดันไฟฟ้า (V)

(ก) (ข)

รูปที่ 12 ฮาร์มอนิกของแรงดันที่ได้จากการจำลอง (ก) และการทดสอบ (ข) ที่ภาระโหลด 2 kg (0.94 N.m) Duty cycle 90%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

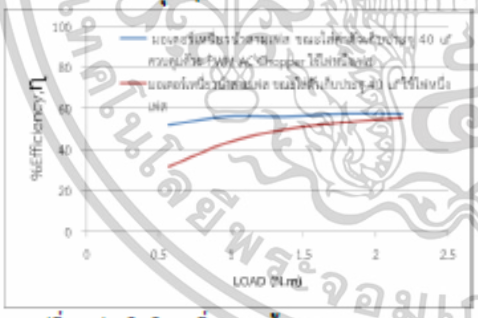
การทำงานของวงจรควบคุมโดยพัลส์วิดมอดูเลตชั่น เอซี ช็อปเปอร์ ลักษณะฮาร์มอนิกของแรงดันที่ความถี่การสวิตช์ 2 kHz จะมีอันดับฮาร์มอนิกที่เป็นฮาร์มอนิกอันดับต่ำเป็นจำนวนเท่าของความถี่ตามสมการ (nK±1) โดยที่ n = 1,2,3,4,...และ K คือ อัตราส่วนระหว่างความถี่ของการสวิตช์ 2 kHz กับความถี่ของแหล่งจ่าย 50 Hz ดังนั้นจะเกิดฮาร์มอนิกที่อันดับ 39,41,79,81,119,121,...ซึ่งเป็นอันดับฮาร์มอนิกที่ใกล้เคียงกับฮาร์มอนิกที่ต่ำดังรูปที่ 13 แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสที่โหลดต่างกัน



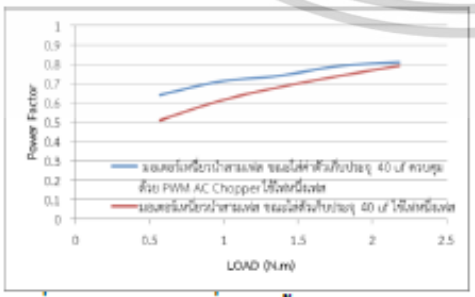
(ก) (ข)

รูปที่ 13 คลื่นแรงดัน (บน) คลื่นกระแส (ล่าง) การทำงานที่ (ก) ภาระโหลด 1 kg (0.57 N.m) (ข) ภาระโหลด 5 kg (2.18 N.m)

การเปรียบเทียบตัวประกอบกำลังและประสิทธิภาพระหว่างผลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ขณะใส่ค่าตัวเก็บประจุ 40 μF ควบคุมด้วยพัลส์วิดมอดูเลตชั่น เอซี ช็อปเปอร์ที่มีการปรับค่าดิวตี้ไซเคิลหรือรอบการทำงาน (Duty cycle: D) ให้เหมาะสมที่สภาวะโหลดต่างๆ เปรียบเทียบกับการใช้ไฟฟ้าหนึ่งเฟสกับผลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขณะใส่ค่าตัวเก็บประจุ 40 μF ใช้ไฟฟ้าหนึ่งเฟสเป็นดังนี้



รูปที่ 14 ประสิทธิภาพที่ควบคุมด้วย PWM AC Chopper



รูปที่ 15 ตัวประกอบกำลังที่ควบคุมด้วย PWM AC Chopper

รูปที่ 14 และรูปที่15 พบว่าในสภาวะโหลดเบาค่าประสิทธิภาพและตัวประกอบกำลังจะต่ำ ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียที่เปล่าประโยชน์สิ้นเปลืองพลังงาน เมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขณะใส่ค่าตัวเก็บประจุ 40 μF ควบคุมด้วย PWM AC Chopper ใช้ไฟฟ้าหนึ่งเฟสจะพบว่าสามารถที่จะปรับปรุงค่าประสิทธิภาพและตัวประกอบกำลังการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ขณะต่อตัวเก็บประจุ 40 μF ทำให้มีตัวประกอบกำลังที่ดีขึ้นและมีประสิทธิภาพทำงานที่สูงขึ้น นำไปสู่การประหยัดพลังงานสามารถนำไปต่อยอดพัฒนาในทางอุตสาหกรรมได้ต่อไป

5. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการประเมินสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสด้วยวิธีพัลส์วิดมอดูเลตชั่น เอซี ช็อปเปอร์หนึ่งเฟสเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์สำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ใช้กับแหล่งจ่ายไฟฟ้าหนึ่งเฟส โดยต่อกับตัวเก็บประจุที่มีค่าเหมาะสมที่สุด

เอกสารอ้างอิง

[1] Gofuku Toyoma, "AC chopper voltage controller-fed single-phase induction motor employing symmetrical PWM control technique," Electrical and Electronic Department, Faculty of engineering Toyama University, Japan, 1999.

[2] อานันทวัฒน์ คุณากร, "การพัฒนามอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสเพื่อใช้กับไฟเฟสเดียวโดยต่อแบบแยกเฟส," วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2538.

[3] โกวิท ภูฉลาด, อธิปัตย์ ศรีผาวงศ์, วีระ ธันยาภิรักษ์ และวิจิตร ศิณเรศ. "เทคนิคการปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้วยพัลส์วิดมอดูเลตชั่น เอซี ช็อปเปอร์สำหรับการประหยัดพลังงานในมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส," การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8 (E-NETT 8th) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม 2-4 พฤษภาคม 2555.

[4] เบญญทิพย์ พิทิธสุนทร, ชวพร บำรุงพฤกษ์, ชัยวุฒ ชูรักษ์, และวิจิตร ศิณเรศ. "การประเมินสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสด้วยพีดับเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสชนิดไบโพลาร์," การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 10 (E-NETT 10th) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 4-6 มิถุนายน 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ ศธ 0523.28/ว 150

วิทยาลัยพลังงานทดแทน
มหาวิทยาลัยแม่โจ้ อ.สันทราย
จ.เชียงใหม่ ๕๐๒๙๐

1 พฤษภาคม 2560

เรื่อง ตอบรับบทความเพื่อเข้าร่วมการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13

เรียน นาย โกวิท ภูฉลาด

ตามที่ท่านได้สมัครส่งบทความวิจัยเรื่อง **"ตู้อบไฟฟ้าควบคุมด้วยไซเคิลคอนโทรล"** รหัสบทความ "ENETT13-CE-265" เพื่อนำเสนอในงานประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13" (13th Conference On Energy Network of Thailand (E-NETT13th)) ในระหว่างวันที่ 31 พฤษภาคม – 2 มิถุนายน 2560 ณ โรงแรม ดีเอ็นเพรส เชียงใหม่ จ.เชียงใหม่ นั้น

บัดนี้ คณะกรรมการฝ่ายวิชาการได้พิจารณาบทความของท่านเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ผลงานของท่าน **"ผ่านการพิจารณา"** และได้รับตอบรับให้นำเสนอประเภท **"Oral Presentation"** ในการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13 (13th Conference On Energy Network of Thailand (E-NETT13th)) โดยท่านสามารถตรวจสอบกำหนดการนำเสนอ และรายละเอียดการเตรียมข้อมูลการนำเสนอได้ทางเว็บไซต์ http://www.e-nett.org อนึ่ง ในส่วนของการ**ตีพิมพ์บทความฉบับเต็มนั้น** ขณะนี้อยู่ในกระบวนการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิ ท่านจะได้รับอีเมลแจ้งสถานะรายงานความก้าวหน้าของบทความจากทางคณะกรรมการจัดการประชุมต่อไป

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

ขอแสดงความนับถือ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ คุษฎี)
ผู้อำนวยการ วิทยาลัยพลังงานทดแทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13
31 พฤษภาคม – 2 มิถุนายน 2560 ณ โรงแรม ดิเอ็มเพรส เชียงใหม่

ตู้อบไฟฟ้าควบคุมด้วยเทคนิคควบคุมไซเคิล
Electric Oven Controlled by Cycle Control Technique

โกวิท ภูฉลาด[1]*, นาวี รุจิตามพ์[1], ศุภณัฐ สบาย[1], ปิยพร จำริญพานิช[1], พรนภัส ศรีศตสุข[1], เฉลิมชาติ มานพ[1] และ วิจิตร กิณเรศ[1]

[1] ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เลขที่ 1 หมู่ 2 ซอยฉลองกรุง 1 ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10520

*ผู้ติดต่อ: E-mail: Hikowit@gmail.com, เบอร์โทรศัพท์: 08-9994-2005, เบอร์โทรสาร: 0-3242-6084

บทคัดย่อ

บทความวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอตู้อบไฟฟ้าควบคุมด้วยเทคนิคควบคุมไซเคิล โดยวิธีการปรับเปอร์เซนต์ ON และ OFF ของคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส 50 เฮิรตซ์ ที่ป้อนให้กับหลอดไฟอินฟราเรดภายในตู้อบไฟฟ้า โดยบทความวิจัยนี้ได้นำเสนอหลักการควบคุมด้วยกันสองวิธีคือ การควบคุมแบบวงเปิดและการควบคุมแบบมีตัวป้อนกลับอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ซึ่งเป็นตัวเซนเซอร์อุณหภูมิภายในตู้อบไฟฟ้า ด้วยสองวิธีการที่นำเสนอ คือวิธีการที่หนึ่งใช้เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างดิวตี้ไซเคิลต่างๆกับค่ากำลังไฟฟ้าขาออก และวิธีการที่สองใช้วัดอุณหภูมิเพื่อเพิ่มจำนวนลูกคลื่นให้อุณหภูมิเข้าใกล้ค่าที่ตั้งไว้และลดจำนวนลูกคลื่นเมื่อค่าของอุณหภูมิเลยค่าที่ตั้งไว้ บทความวิจัยนี้นำเสนอในรูปแบบของผลการทดลองและผลการจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink R2014a พบว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องและจากผลการทดลองของการควบคุมแบบมีตัวป้อนกลับอุณหภูมิที่ 80 – 120 องศาเซลเซียส ที่ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด 600 วัตต์ และเมื่อปรับค่าเปอร์เซ็นต์ ON ให้จะมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ได้กำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้น พบว่าอุณหภูมิมีค่าลู่เข้าสู่ค่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ ดังนั้นผลการทดลองจึงเป็นที่น่าพอใจ

คำหลัก: เทคนิคควบคุมไซเคิล, ตู้อบไฟฟ้า, ไมโครคอนโทรลเลอร์, เทอร์โมคัปเปิล, การควบคุมอุณหภูมิ

Abstract

This research paper is presents an electric oven controlled by cycle control technique with adjustable ON and OFF percentage of single phase sinusoidal waveform at 50 Hz which feed infrared bulb in the oven. This research paper is presents control with two methods are namely first method is used for determined relationship of duty cycle versus output power second method is used for fixed temperature is nearly setpoint value and decreasing amount sinusoidal waveform. When over value of temperature setpoint value. This paper is presents implementation results and simulation results by using program MATLAB/Simulink R2014a. Which is found that corresponding results from this now implementation result of feedback temperature control, we can vary between 80 and 120 celsius degree at the maximum wattage of 600 watts and when ON percent is increased, output power will increase, is found that the temperature is approached setpoint value temperature, there fore implementation result is satisfied.

Keywords: Cycle control technique, Electric oven, Microcontroller, Thermocouple, Temperature control.

1. บทนำ

การควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากแหล่งจ่ายไฟสลับ 1 เฟส 50 เฮิรตซ์ ไปยังด้านโหลดหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ สามารถทำได้ 2 วิธี คือการควบคุมโดยวิธีแบบเฟสคอนโทรล และวิธีแบบไซเคิลคอนโทรล ในบทความนี้ได้นำเสนอวิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าวิธีแบบไซเคิลคอนโทรลซึ่งจะให้ข้อดีในแง่ของการปรับได้ต่อเนื่องเหมาะสำหรับโหลดความร้อนเนื่องจากไม่ต้องการตอบสนองที่เร็ว ส่วนข้อเสียคือไม่มีความต่อเนื่องของสัญญาณรูปคลื่นที่ขาดไปจึงไม่เหมาะกับระบบที่ตอบสนองเร็ว เช่น ระบบทางไฟฟ้า เป็นต้น โดยในที่นี้จะใช้โหลดเป็นตู้อบซึ่งมีหลอดไฟอินฟราเรดซึ่งเป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนภายในตู้อบ จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล C2000 เบอร์ TMS320F28335 เป็นตัวทำหน้าที่ควบคุมติดต่อสื่อสารข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์กับโหลด โดยจะทำการสร้างคลื่นแรงดันเอาต์พุตวิธีแบบไซเคิลคอนโทรล ซึ่งจะจำลองคลื่นแรงดันเอาต์พุตด้วยแบบวิธีไซเคิลคอนโทรลแบบวงเปิด (Open Loop) และแบบที่สองการควบคุมแบบวงปิดหรือแบบมีตัวป้อนกลับอุณหภูมิ (Close Loop) โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ซึ่งเป็น

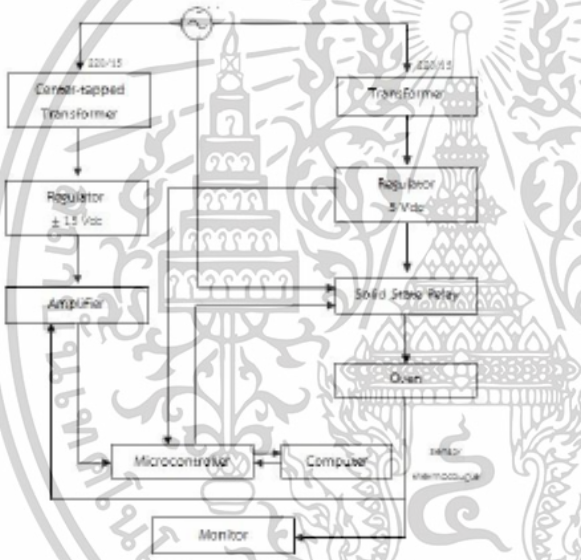
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13
31 พฤษภาคม – 2 มิถุนายน 2560 ณ โรงแรม ดิเอ็มเพรส เชียงใหม่

ตัวเซนเซอร์อุณหภูมิภายในตู้อบไฟฟ้า เพื่อเปรียบเทียบค่าแรงดันระหว่างผลจากการจำลองและผลจากการทดลอง และนำไปควบคุมอุณหภูมิภายในตู้อบที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด 600 วัตต์ ซึ่งปรากฏว่าสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ในช่วง 80-120 องศาเซลเซียส และสามารถนำค่าที่ได้จากการทดลองตามมาบันทึกค่าและทำการเปรียบเทียบโดยพล็อตกราฟพบว่าอุณหภูมิที่ได้บันทึกค่ามีความใกล้เคียงลู่เข้าสู่ค่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ [1-6]

2. การออกแบบส่วนการควบคุมอุณหภูมิ

การออกแบบในส่วนของการสร้างสัญญาณควบคุมอุณหภูมิโดยใช้วิธีไซเคิลคอนโทรลสามารถแสดงด้วยบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 1 ด้านล่าง



รูปที่ 1 บล็อกไดอะแกรมหลักการสร้างสัญญาณควบคุมวิธีไซเคิลคอนโทรลแบบดิจิตอล

ซึ่งแบ่งได้เป็นส่วนประกอบหลักๆตามบล็อกไดอะแกรมตามรูปที่ 1 ได้ดังนี้

1. ส่วนของคอมพิวเตอร์: ทำหน้าที่สร้างสัญญาณแรงดันแบบไซเคิลคอนโทรลโดยใช้ MATLAB/Simulink และยังเป็นส่วนที่ใช้เก็บโปรแกรมควบคุมการทำงานของอุณหภูมิภายในตู้อบไฟฟ้า

2. ส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์: ทำหน้าที่รับคำสั่งจากคอมพิวเตอร์เพื่อไปควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ ที่เชื่อมต่ออยู่กับตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ในการส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์ที่เชื่อมต่ออยู่กับไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เป็นส่วนเก็บโปรแกรมและสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแบบไซเคิลคอนโทรล

3. ส่วนของวงจรซับและการควบคุมแรงดันไฟสลับ: ซึ่งภายในโซลิดสเตตรีเลย์นั้นจะประกอบไปด้วยวงจรการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ วงจรซับ และวงจรตรวจจับจุดตัดศูนย์ ดังนั้นโซลิดสเตตรีเลย์จึงทำหน้าที่รับคำสั่งจากไมโครคอนโทรลเลอร์แล้วนำคำสั่งที่ได้รับไปควบคุมการทำงานของไดรแอกให้ ON หรือ OFF ตามจังหวะที่ได้กำหนดไว้ และใช้วงจรตรวจจับจุดตัดศูนย์เป็นจุดอ้างอิงในการกำหนดตำแหน่งเริ่มต้น ON หรือ OFF คลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

4. ส่วนของหลอดอินฟราเรดในตู้อบไฟฟ้า: เป็นตัวกำเนิดความร้อนภายในตู้อบไฟฟ้า ซึ่งจะให้ความร้อนในระดับต่างๆ ตามค่าเปอร์เซ็นต์ ON ที่กำหนด โดยระดับของความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าของเปอร์เซ็นต์ ON ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้หลอดอินฟราเรดขนาด 600 วัตต์

5. ส่วนของเซ็นเซอร์ตรวจจับอุณหภูมิภายในตู้อบไฟฟ้า: ทำหน้าที่วัดอุณหภูมิภายในตู้อบไฟฟ้าโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ซึ่งเทอร์โมคัปเปิลจะสร้างแรงดันไฟฟ้าขึ้นทางด้านเอาต์พุตจากค่าของอุณหภูมิที่วัดได้ภายในตู้อบไฟฟ้า ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะอยู่ในย่านมิลลิโวลต์จึงต้องนำเข้าส่วนขยายแรงดันและนำค่าที่ได้เข้าไมโครคอนโทรลเลอร์

2.1 การคำนวณวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้า ประสิทธิภาพ และเพาเวอร์แฟคเตอร์

ในการออกแบบการควบคุมตู้อบไฟฟ้าควบคุมด้วยไซเคิลคอนโทรลนั้นต้องทราบค่าของกำลังทางไฟฟ้าด้านเอาต์พุตโดยจะมีสมการที่เกี่ยวข้องที่สามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุต RMS ได้จากสมการ [1, 3, 4]

$$V_{O,RMS} = \left[\frac{1}{T}\int_0^T v^2(t)\,dt\right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

โดยที่

$$v(t) = v_m \sin \omega t \quad (2)$$

$$V_{o,RMS} = \left[\frac{n}{2\pi(n+m)}\int_0^{2\pi} 2V_s{}^2 \sin^2\omega t\, d(\omega t)\right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

ดังนั้น

$$V_{O,RMS} = V_s\sqrt{\frac{n}{n+m}} = V_s\sqrt{K} \quad (4)$$

สามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตได้จากสมการ

$$P_o = \frac{V_{o,RMS}{}^2}{R} \quad (5)$$

และสามารถหาค่าประสิทธิภาพได้จากสมการ

$$\eta = \frac{P_O}{P_I} \times 100 \quad (6)$$

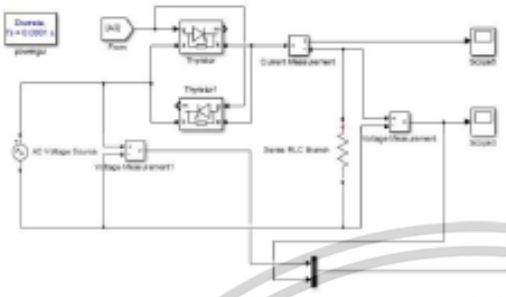
โดยที่ n คือ จำนวนไซเคิลที่ ON
m คือ จำนวนไซเคิลที่ OFF
n+m คือ จำนวนไซเคิลทั้งหมดใน 1 คาบเวลา
K คือ ค่าดิวตี้ไซเคิล

3. หลักการจำลองและการทดสอบของวงจร

ในการจำลองหรือการชิมูเลทคลื่นแรงดันแบบ Open Loop และ Close Loop แบบไซเคิลคอนโทรลจะใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการควบคุมการทำงานแบบดิจิตอลโดยการใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink สำหรับการจำลองและการออกแบบ

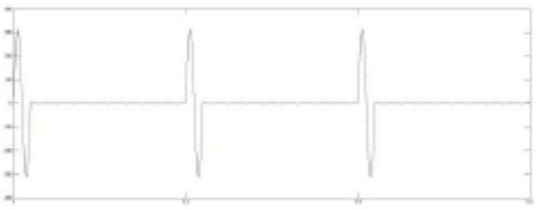


รูปที่ 2 การจำลองวงจรกำลัง

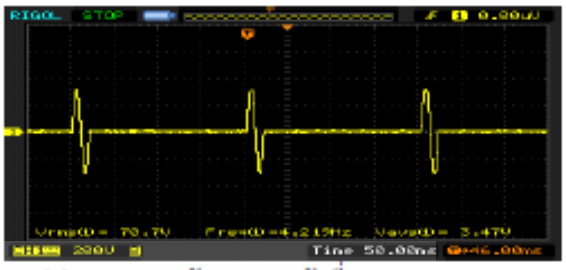
รูปที่ 3 การจำลองสัญญาณแรงดันแบบ Open Loop

รูปที่ 4 การจำลองสัญญาณแรงดันแบบ Close Loop

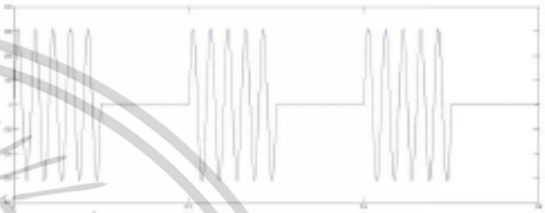
เมื่อทำการจำลองและการทดสอบสร้างรูปคลื่นสัญญาณแรงดันแบบ Open Loop ที่มีการปรับค่าดิวตี้ไซเคิลต่างๆ (Duty Cycle) ด้วยวิธีไซเคิลคอนโทรลจะได้รูปคลื่นสัญญาณแรงดันตามรูปที่ 5



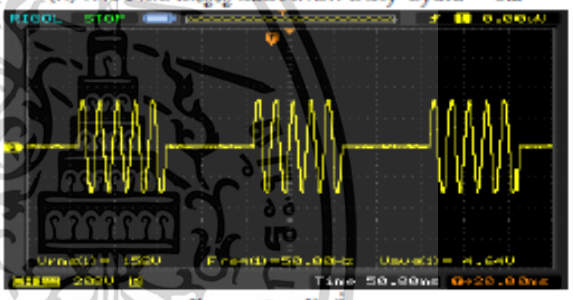
(ก) การจำลองสัญญาณแรงดันที่ Duty Cycle = 0.1



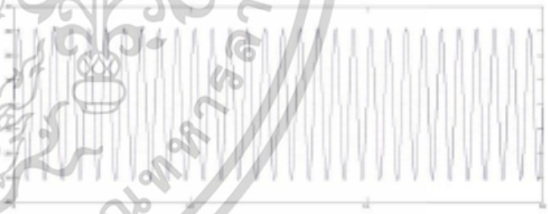
(ข) การทดสอบสัญญาณแรงดันที่ Duty Cycle = 0.1



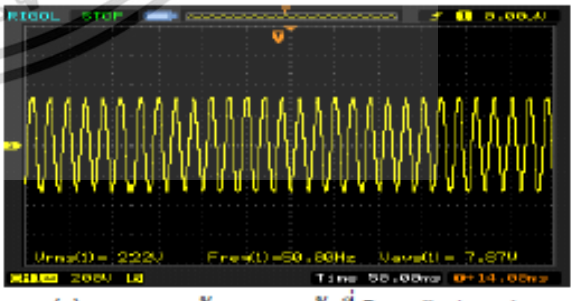
(ค) การจำลองสัญญาณแรงดันที่ Duty Cycle = 0.5



(ง) การทดสอบสัญญาณแรงดันที่ Duty Cycle = 0.5



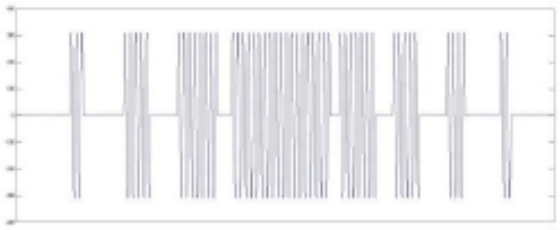
(จ) การจำลองสัญญาณแรงดันที่ Duty Cycle = 1



(ฉ) การทดสอบสัญญาณแรงดันที่ Duty Cycle = 1

รูปที่ 5 ผลจากการจำลองรูป (ก), (ค), (จ) และการทดสอบรูป (ข), (ง), (ฉ) สัญญาณแรงดันแบบ Open Loop ที่ค่าดิวตี้ไซเคิลต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6 ผลจากการจำลองสัญญาณแรงดันวิธีไซเคิลคอนโทรลแบบ Close Loop

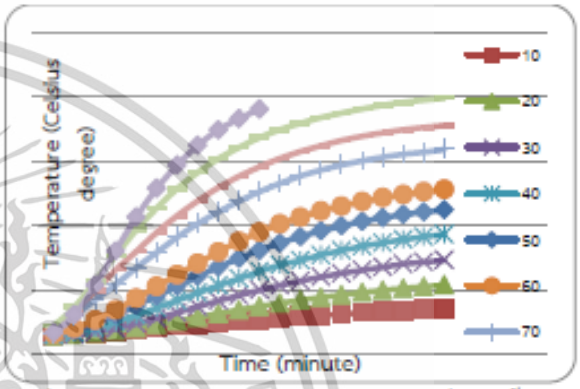
จากรูปที่ 6 จะสังเกตได้ว่าลักษณะรูปคลื่นแรงดันจะมีการเพิ่มจำนวนไซเคิลขึ้นและลดลง คือเมื่อทำการกำหนดอุณหภูมิเป้าหมาย จะมีการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์การ ON ของลูกคลื่นแรงดันจนเมื่อถึงอุณหภูมิเป้าหมายจะทำการลดเปอร์เซ็นต์การ ON ของลูกคลื่นแรงดันลงเพื่อรักษาระดับของอุณหภูมิไม่ให้เกินค่าอุณหภูมิเป้าหมาย

เราสามารถหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการทดลองเมื่อปรับค่าดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) ตั้งแต่ 0.1 - 1 ได้ดังตารางที่ 1 ด้านล่าง โดยการป้อนแรงดันอินพุตที่ 220 โวลต์ ให้กับหลอดอินฟราเรดขนาด 600 วัตต์ ซึ่งจะมีค่าความต้านทานที่ 80.67 โอห์ม และคำนวณหาค่าต่างๆ พบว่าค่าประสิทธิภาพสูงสุดจะเพิ่มขึ้นตามการปรับค่าดิวตี้ไซเคิลสูงสุดนั่นเอง

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการทดลองด้วยการปรับค่าดิวตี้ไซเคิล

Duty Cycle	$V_{i,RMS}$ (V)	$I_{o,RMS}$ (A)	$V_{o,RMS}$ (V)	P_i (W)	P_o (W)	Eff (%)
0.1	220	0.95	70.70	209.00	72.80	34.83
0.2	220	1.25	99.60	275.00	126.04	45.83
0.3	220	1.48	122	325.60	176.69	54.26
0.4	220	1.66	141	365.20	222.29	60.86
0.5	220	1.83	158	402.60	270.15	67.10
0.6	220	2.02	173	444.40	329.16	74.06
0.7	220	2.16	187	475.20	376.37	79.20
0.8	220	2.27	199	499.40	415.68	83.23
0.9	220	2.40	211	528.00	464.65	88.00
1.0	220	2.53	217	556.60	516.36	92.81

เมื่อป้อนแรงดันที่ค่าดิวตี้ไซเคิลต่างๆ สังเกตแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาจะได้ดังรูปที่ 7 ด้านล่าง

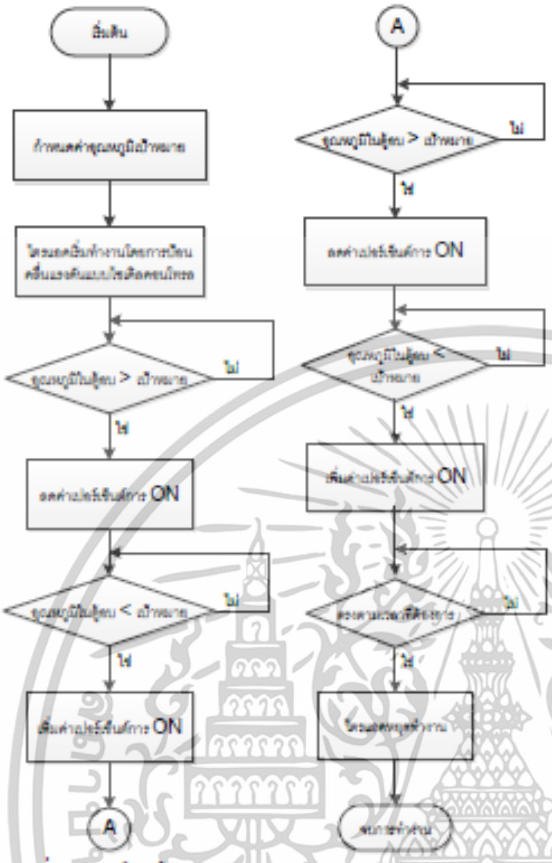


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาที่ค่าดิวตี้ไซเคิลต่างๆ

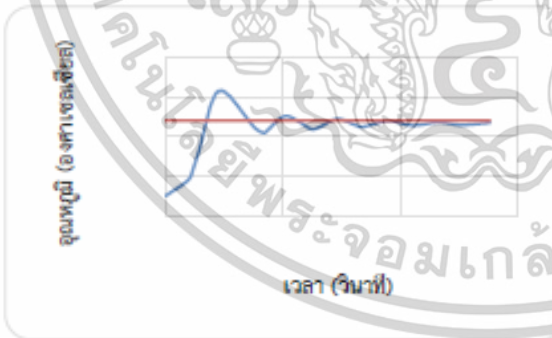
4. การควบคุมอุณหภูมิ

การควบคุมอุณหภูมิโดยวิธีการปรับค่าเปอร์เซ็นต์ ON ของคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ป้อนให้กับหลอดอินฟราเรดเป็นการควบคุมที่มีการอ่านค่าของอุณหภูมิภายในตู้อบไฟฟ้าเข้ามาเพื่อเปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิเป้าหมายเพื่อคำนวณค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิที่เกิดขึ้น แล้วนำค่าความผิดพลาดนี้มาตัดสินใจในการปรับเปลี่ยนค่าเปอร์เซ็นต์ ON โดยหากอุณหภูมิภายในตู้อบไฟฟ้ามากกว่าค่าอุณหภูมิเป้าหมายที่ได้กำหนดไว้จะต้องทำการลดค่าเปอร์เซ็นต์ ON ลงตามค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น และหากค่าของอุณหภูมิภายในตู้อบไฟฟ้าน้อยกว่าค่าอุณหภูมิเป้าหมายที่ได้กำหนดไว้จะต้องทำการเพิ่มค่าเปอร์เซ็นต์ ON ขึ้นตามค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นซึ่งเป็นไปตามโฟลว์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรมดังรูปที่ 8 ด้านล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

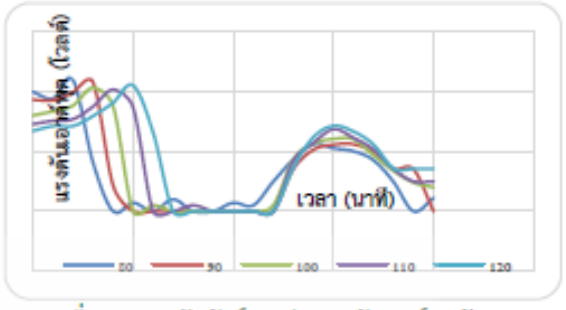


รูปที่ 8 โฟลว์ชาร์ตการทำงานของการควบคุมอุณหภูมิโดยการปรับเปอร์เซ็นต์ ON ของคลื่นแรงดัน

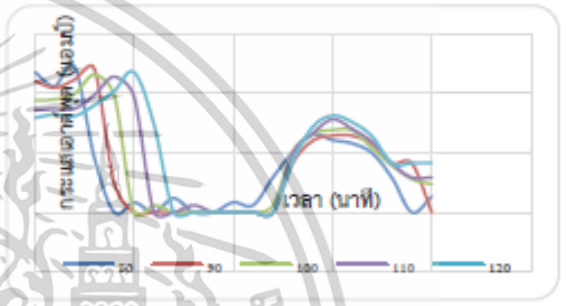


รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการควบคุมอุณหภูมิที่ 120 องศาเซลเซียส

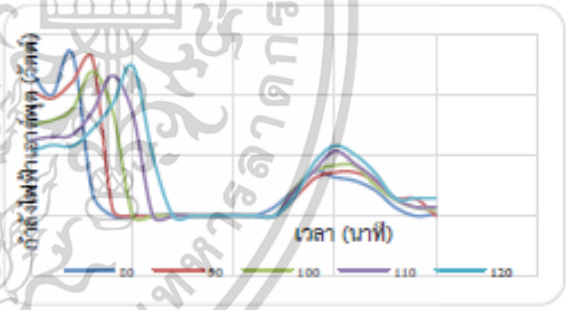
เมื่อกำหนดค่าอุณหภูมิเป้าหมายไว้ที่ 120 องศาเซลเซียส จากการทดลองค่าที่ได้จะมีการแกว่งและคลาดเคลื่อนจากอุณหภูมิเป้าหมายเล็กน้อยดังรูปที่ 9



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับเวลาเมื่อทำการควบคุมอุณหภูมิที่ค่าต่างๆ



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเอาต์พุตกับเวลาเมื่อทำการควบคุมอุณหภูมิที่ค่าต่างๆ



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตกับเวลาเมื่อทำการควบคุมอุณหภูมิที่ค่าต่างๆ

จากรูปด้านบนรูปที่ 10, รูปที่ 11 และรูปที่ 12 ในตอนแรกเปอร์เซ็นต์การ ON ของแรงดันเพิ่มขึ้น ค่าแรงดันเอาต์พุต ค่ากระแสเอาต์พุตและกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตจะเพิ่มขึ้น อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเมื่อถึงอุณหภูมิที่จุดเบรก ค่าดิวตี้ไซเคิลจะมีค่าเป็น 1 และจะลดลงจนมีค่าดิวตี้ไซเคิลเท่ากับ 0 ก่อนที่อุณหภูมิจะถึงค่าเป้าหมาย ค่าแรงดันเอาต์พุต ค่ากระแสเอาต์พุต และค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตจะมีค่าเป็น 0 เพื่อทำให้ค่าอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นช้าๆ และเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงสุดจะค่อยๆ ลดลงจนต่ำกว่าค่าเป้าหมาย เปอร์เซ็นต์ของการ ON จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเพื่อทำให้ค่าอุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นและจะเป็นแบบนี้ไปเรื่อยๆจนกระทั่งอุณหภูมิสู่เข้าใกล้ค่าอุณหภูมิที่เป้าหมาย จึงสรุปได้ว่าค่าแรงดันเอาต์พุต ค่ากระแสเอาต์พุตและค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตจะแปรผันตามเปอร์เซ็นต์การ ON นั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. สรุปผล

บทความวิจัยนี้ได้นำเสนอตู้อบไฟฟ้าควบคุมด้วยเทคนิคควบคุมไซเคิล ซึ่งจะใช้หลักการควบคุมด้วยเทคนิคไซเคิลแบบดิจิตอลที่สามารถปรับค่าดิวตี้ไซเคิลตามค่าที่ตั้งไว้เหมาะสมกับโหลดที่ใช้ประเภทความร้อนหรือเป็นโหลดต่อเนื่องที่ไม่ต้องการผลตอบสนองที่เร็ว จากผลการจำลองและผลการทดสอบพบว่าระบบสามารถควบคุมตามอุณหภูมิที่ต้องการได้ตามค่าอุณหภูมิที่กำหนดไว้ โดยใช้การปรับค่า ON และ OFF เพื่อรักษาระดับอุณหภูมิให้มีประสิทธิภาพได้ตามการปรับค่าดิวตี้ไซเคิลนั่นเอง ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้มีความสอดคล้องกันและเป็นที่น่าพอใจ

6. เอกสารอ้างอิง

[1] M.Syed Jamil Asghar, "Smooth Speed Control of Single-Phase Induction Motors by Integral-Cycle Switching," IEEE Trans. Energy Conversion, Vol.14, No.4, December 1999, PP.1094-1099.

[2] จรียา เตชกุญชร (2543). เอกสารประกอบการเรียนเรื่องเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำชนมอบ. วารสารยูไนเต็ด.ปีที่ 12, ฉบับที่ 19, พฤศจิกายน 2543.

[3] วีระเชษฐ์ ขันเงิน และ วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์, พิมพ์ครั้งที่ 14 ฉบับปรับปรุงแก้ไข (2557). อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronics), กรุงเทพมหานคร: ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ. พริ้นติ้ง.

[4] ชัยยงค์ แก้วมงคล และ นภัทร วิจันเทพินทร์ พิมพ์ครั้งที่ 2 (2540). อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 1 (วงจรคอนเวอร์เตอร์), กรุงเทพมหานคร: สกายบุ๊กส์.

[5] รักศักดิ์ ยี่ร่อสา, "ตู้อบไฟฟ้า 50 Hz ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์โดยอาศัยหลักการเฟสและไซเคิลคอนโทรล," วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2551.

[6] นวภัทรา หนูนาค และ ทวีพล ซื่อสัตย์, การวัดและเครื่องมือวัดการประยุกต์ในอุตสาหกรรมอาหาร (Measurement and Instrumentation, กรุงเทพมหานคร: สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2555.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ ศึธ ๐๕๓๔/ว.๐๔๔๖

สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
๘๓๓ ถนนพระรามที่ ๓
แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน
กรุงเทพมหานคร ๑๐๓๓๐

๑๕ มีนาคม ๒๕๖๓

เรื่อง ขอแจ้งผลการพิจารณาบทความการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๑๐

เรียน โกวิท ภูฉลาด พิสิทธิ์ บุญรอด ประหยัด กองสุข พูนศรี วรรณการ และ วิจิตร กิณเรศ

ตามที่ท่านได้ส่งบทความเพื่อเข้าร่วมงาน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๑๐ (The 10th Conference of Electrical Engineering Network : EENET 2018) ซึ่งจะจัดขึ้นระหว่างวันที่ ๑ ถึง ๓ พฤษภาคม ๒๕๖๑ ณ โรงแรม ราชศุภมิตร (อาร์ เอส โฮเต็ล) ตำบลหาดขาม อำเภอเมืองกาญจนบุรี จังหวัดกาญจนบุรี ในหัวข้อเรื่อง

" การขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านโดยปราศจากตัวตรวจจับ "

ในการนี้ คณะกรรมการดำเนินงานการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๑๐ มีความยินดีที่จะเรียนให้ท่านทราบว่า บทความเรื่องดังกล่าวได้ **ผ่านการพิจารณา** โดยผู้ทรงคุณวุฒิให้นำเสนอแบบปากเปล่า (Oral Presentation) ในการการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๑๐

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ และขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอแสดงความนับถือ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สันติ หวังนิพพานโต)
ประธานกรรมการดำเนินงานการประชุมวิชาการ
เครือข่ายวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
โทร. ๐-๒๑๐๔-๙๐๙๙ ต่อ ๘๐๐๓
โทรสาร ๐-๒๑๐๔-๙๐๙๘

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 10

Proceedings of the 10th Conference of Electrical Engineering Network 2018 (EENET 2018)

การขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านโดยปราศจากตัวตรวจจับ

SENSORLESS BRUSHLESS DC MOTOR DRIVE

โกวิท ภูจลาส[1] พิสิทธิ์ บุญรอด[2] ประหยัด กองสุข[3] พูนศรี วรรณการ[4] และ วิจิตร ทิฆเรศ[5]

[1,2,5]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เลขที่ 1 หมู่ 2 ซอยฉลองกรุง 1 ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 089-994-2005

E-mail: hilcowit@gmail.com

[3]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี เลขที่ 131 หมู่ 10 ถนนบ่ารากนราดูร ตำบลพลวง อำเภอเขาคิชฌกูฏ จังหวัดจันทบุรี 22210 โทรศัพท์ 084-976-6622

[4]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร เลขที่ 1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10800 โทรศัพท์ 086-004-9952

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยปราศจากตัวตรวจจับเนื่องจากมอเตอร์ชนิดนี้มีคุณสมบัติที่ดีหลายอย่างเมื่อเทียบกับมอเตอร์กระแสตรงทั่วไป เช่น การบำรุงรักษาน้อยกว่า ประสิทธิภาพสูงกว่า โมเมนต์ความเฉื่อยต่ำกว่า ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาและออกแบบระบบชุดขับมอเตอร์นี้ ที่ปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโดยอาศัยวิธีการค้นหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับในลักษณะสี่เหลี่ยมคางหมูและใช้วิธีการค้นหาตำแหน่งของโรเตอร์ในขณะเริ่มต้นแทนการใช้ฮอลล์เอฟเฟคต์เซ็นเซอร์ (Hall effect sensors) ในงานวิจัยนี้ได้ใช้มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านพิกัดกำลัง 350 วัตต์ 24 โวลต์ 46 ขั้วแม่เหล็ก

คำสำคัญ: มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน, ตัวตรวจจับ, ไมโครคอนโทรลเลอร์, อินเวอร์เตอร์สามเฟส

Abstract

This paper proposes a sensorless brushless DC motor drive because there are a lot of advantages compared with a conventional dc motor such as less maintenance, higher efficiency low moment of inertia and so on. Therefore, we are interested in study and design of this motor drive system with sensorless position by a trapezoidal back emf search method and an initial rotor position search method instead of Hall effect sensors. In this research, a 350 watt, 24 volt and 46 pole brushless DC motor is used.

Keywords: brushless dc motor, sensorless, microcontroller, three phase inverter

1. บทนำ

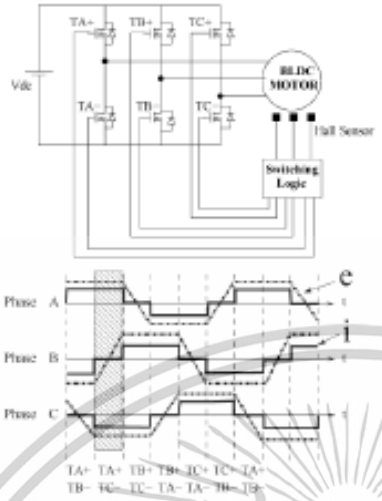
ในปัจจุบันมอเตอร์กระแสตรงมีบทบาทอย่างมากในวงการอุตสาหกรรมอันเนื่องมาจาก คุณสมบัติต่างๆของมอเตอร์ที่สามารถควบคุมความเร็วได้ตามที่ต้องการ และมีแรงบิดเริ่มต้นที่ดีมาก แต่มอเตอร์กระแสตรงก็ยังมีข้อเสีย เรื่องการมีแปรงถ่านที่ต้องเสียดสีกับคอมมิวเตเตอร์ ซึ่งทำให้เกิดประกายไฟและเกิดการสูญเสียพลังงานไป และข้อเสียอีกอย่างหนึ่งคือ เกิดเสียงดังขณะมอเตอร์ทำงาน ด้วยข้อเสียต่างๆที่เกิดขึ้นจึงทำให้มีการดัดแปลงมอเตอร์กระแสตรงใหม่ ด้วยวิธีการกำจัดแปรงถ่าน โดยมีการพัฒนาและปรับปรุงมอเตอร์กระแสตรงนี้มาตลอดจนเป็นมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยมอเตอร์ชนิดนี้จะมีชิ้นส่วนหลักๆ คือ สเตเตอร์โรเตอร์, ฮอลล์เซ็นเซอร์

วิธีการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์จะอยู่บนพื้นฐานของการตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับลักษณะสี่เหลี่ยมคางหมูหลังจากนั้นขับเคลื่อนมอเตอร์แบบวงรอบเปิดเพื่อให้ตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับได้ไปคำนวณสัญญาณเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ การประมวลผลทางดิจิตอลในการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านนี้จะใช้ (C2000) ไมโครคอนโทรลเลอร์ [1]

2. ทฤษฎีและวิธีการตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ

การตรวจจับสัญญาณผ่านศูนย์ของแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับจากผลต่างแรงดันระหว่างขั้ว เมื่อพิจารณามอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านซึ่งมีขดลวดสามเฟสต่อแบบสตาร์ และมีแม่เหล็กถาวรยึดอยู่กับโรเตอร์ มอเตอร์ชนิดนี้ถูกขับด้วยอินเวอร์เตอร์สามเฟสซึ่งถูกกำหนดลำดับในการทำงานจากตำแหน่งของโรเตอร์ซึ่งถูกแสดงในรูปที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1 การทำงานของวงจรควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านและกระแสเฟสและแรงดันไฟฟ้าด้านกลับ

โดยสมการของแรงดันเฟส A เมื่อเทียบกับจุดสตาร์ของขดลวดสเตเตอร์ถูกแสดงในสมการที่ 1

$$V_{an} = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_{an} \quad (1)$$

โดย R_a คือค่าความต้านทานสเตเตอร์, L_a คือค่าความเหนี่ยวนำเฟส, e_{an} คือแรงดันไฟฟ้าด้านกลับและ i_a คือกระแสที่ไหลในเฟส A ในทำนองเดียวกัน สมการของแรงดันเฟส B และเฟส C สามารถแสดงในสมการที่ (2), (3)

$$V_{bn} = R_b i_b + L_b \frac{di_b}{dt} + e_{bn} \quad (2)$$

$$V_{cn} = R_c i_c + L_c \frac{di_c}{dt} + e_{cn} \quad (3)$$

$$V_{ab} = V_{an} - V_{bn} = R(i_a - i_b) + L\frac{d(i_a - i_b)}{dt} + e_{an} - e_{bn} \quad (4)$$

ในทำนองเดียวกัน

$$V_{bc} = R(i_b - i_c) + L\frac{d(i_b - i_c)}{dt} + e_{bn} - e_{cn} \quad (5)$$

$$V_{ca} = R(i_c - i_a) + L\frac{d(i_c - i_a)}{dt} + e_{cn} - e_{an} \quad (6)$$

แรงดันระหว่างขั้วเหล่านี้สามารถหาค่าได้โดยไม่จำเป็นต้องวัดค่าแรงดันเทียบกับจุดสตาร์ของขดลวดด้วยการวัดผลต่างของแรงดันระหว่างขั้ว

เมื่อนำแรงดันระหว่างขั้วในสมการที่ (4) ลบออกจากสมการที่ (5) จะได้

$$V_{abbc} = R(i_a - 2i_b + i_c) + L\frac{d(i_a - 2i_b + i_c)}{dt} + e_{an} - 2e_{bn} + e_{cn} \quad (7)$$

เมื่อพิจารณาในช่วงที่เฟส A และเฟส C นำกระแส และเฟส B นั้นเปิดวงจรตามส่วนที่แรเงาในรูปที่ 1 ในช่วงเวลานี้ขดลวดเฟส A ถูกต่อกับบัสแรงดันด้านบวกของแหล่งจ่ายกระแสตรง เฟส C ถูกต่อกับบัสแรงดันด้านลบ และเฟส B ถูกเปิดวงจร ดังนั้น $i_a = -i_c$ และ $i_b = 0$ จากส่วนที่แรเงาในรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้าด้านกลับของเฟส A และเฟส C มีขนาดเท่ากัน แต่ทิศตรงข้ามกัน ดังนั้นสมการของผลต่างแรงดันระหว่างขั้วในช่วงเวลานี้สามารถแสดงได้ดังนี้

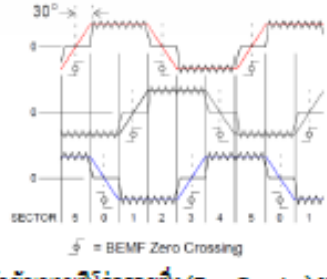
$$V_{abbc} = V_{ab} - V_{bc} = e_{an} - 2e_{bn} + e_{cn} = -2e_{bn} \quad (8)$$

รูปคลื่นผลต่างแรงดันระหว่างขั้วนั้นจะกลับด้านกับรูปคลื่นของแรงดับด้านกลับและมีขนาดเป็นสองเท่า จากรูปที่ 1 ในช่วงที่แรเงาแรงดันด้านกลับ e_{bn} เปลี่ยนจากด้านลบไปยังด้านบวกเกิดสัญญาณผ่านศูนย์ซีโร่ครอสซิ่ง (Zero Crossing) ดังนั้นจะได้ว่าผลต่างแรงดันระหว่างขั้ว $V_{ab} - V_{bc} = (V_{abbc})$ สามารถนำมาใช้ตรวจจับสัญญาณผ่านศูนย์ของแรงดันด้านกลับเฟส B ได้ และในทำนองเดียวกัน V_{bcca} และ V_{caab} ก็สามารถนำมาใช้ตรวจจับสัญญาณผ่านศูนย์ของแรงดันด้านกลับของเฟส C และเฟส A ได้ตามลำดับ [2]

3. วิธีการทำงานและวิเคราะห์แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ

พิจารณามอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน (BLDC) มีโครงสร้างหลักๆ สามส่วนคือ ส่วนที่หนึ่ง สเตเตอร์ (Stator) ประกอบด้วยขดลวดอาเมเจอร์ที่ต่ออยู่แบบสตาร์ ส่วนที่สองโรเตอร์ (Rotor) ประกอบด้วยแม่เหล็กถาวรและส่วนสุดท้ายคือ ตัวตรวจจับตำแหน่งขั้วแม่เหล็กฮอลล์เซ็นเซอร์ (Hall sensor) ซึ่งการขับเคลื่อนจะใช้อินเวอร์เตอร์สามเฟสร่วมกับอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งขั้วแม่เหล็ก โดยใช้เทคนิคแบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา เพื่อให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับแล้วนำสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับตรวจสอบตำแหน่งจุดซีโร่ครอสซิ่ง (Zero Crossing) สำหรับใช้คำนวณหาตำแหน่งโรเตอร์และความเร็วมอเตอร์

วิธีการเปรียบเทียบแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับและแรงดันครึ่งหนึ่งของแรงดันดีซีบัส (DC/2) ในหนึ่งลูกคลื่นทางไฟฟ้าบริเวณจุดตัดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับจะมีตำแหน่งเวลาที่เกิดก่อน 30 องศา ทางไฟฟ้าก่อนที่จะถึงการสับสวิตช์เรียงกระแสจากจุดตำแหน่งการตรวจจับโรเตอร์จริง ทำให้การควบคุมมอเตอร์ด้วยวิธีการปราศจากตัวตรวจจับจะต้องอาศัยการกำหนดความสัมพันธ์ของเวลาการเรียงกระแสให้ตรงกับสัญญาณตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์จริง ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 จุดตัดสัญญาณซีโร่ครอสซิ่ง (Zero Crossing) ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับของมอเตอร์

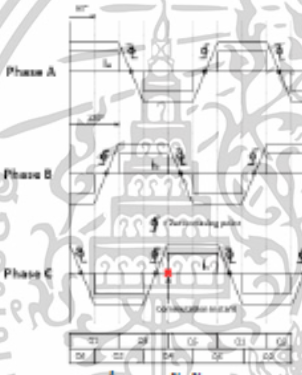
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 10

Proceedings of the 10th Conference of Electrical Engineering Network 2018 (EENET 2018)

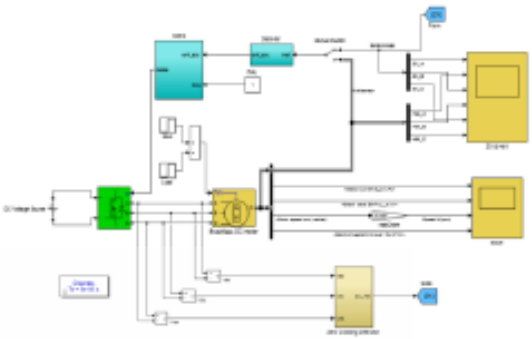
ในรูปที่ 2 การประมานค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับกับตำแหน่งการสวิตช์ของกระแสโดยทั่วไปจะใช้การตรวจสอบแรงดันตัดผ่านศูนย์ซีโร่ครอสซิ่ง (Zero Crossing) ของรูปคลื่น แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ ที่มีองค์ประกอบของฮาร์มอนิกส์ที่สาม แรงดันฮาร์มอนิกส์จะมีข้อจำกัดของแอมพลิจูดและเฟสที่เปลี่ยนไปตามความอิ่มตัวของแม่เหล็ก ซึ่งจะไม่เหมาะสมกับย่านความเร็วต่ำ เนื่องจากมีแอมพลิจูดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับมีค่าต่ำ การขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์หกระดับมุมนำกระแส 120 องศา แต่ละระดับการสวิตช์จะมีค่า 60 องศา ดังรูปที่ 3 แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่ตัดผ่านศูนย์จะมีความสัมพันธ์กับตำแหน่งการสวิตช์ซึ่งเรียงกระแส โดยจุดตัดผ่านศูนย์จะเปรียบเทียบได้กับแรงดันครึ่งหนึ่งของดีซีบัส (DC/2) มีค่าที่ตรงกับตำแหน่งของจุดซีโร่ครอสซิ่ง (Zero Crossing) โดยมีค่ามุมทางไฟฟ้านำอยู่ 30 องศา จากจุดสัญญาณตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์



รูปที่ 3 เปรียบเทียบแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับกับตำแหน่งการสวิตช์ของกระแส

4. การออกแบบและการจำลองผล

จากการจำลองการทำงานของวงจรควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งกำหนดค่าเงื่อนไขและพารามิเตอร์ของมอเตอร์ ให้ใกล้เคียงกับอุปกรณ์จริงมีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 24 โวลต์ จ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส โดยใช้อุปกรณ์สวิตชิ่งมอสเฟตกำลังความถี่สวิตชิ่ง 5 kHz ใช้สัญญาณ PWM ควบคุมโดยใช้ค่าดิวตี้ 80% - 100% ขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน 46 ขั้วแม่เหล็ก โดยใช้วิธีผลต่างแรงดันระหว่างขั้วในการตรวจหาจุดตัดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ และนำสัญญาณที่ได้มาใช้ในการขับเคลื่อนแทนสัญญาณที่ได้จากฮอลล์เซ็นเซอร์ (Hall sensor) โดยผลการจำลองได้แสดงในรูปที่ 4 ซึ่งจะนำไปใช้ในการสร้างชุดควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านต่อไป

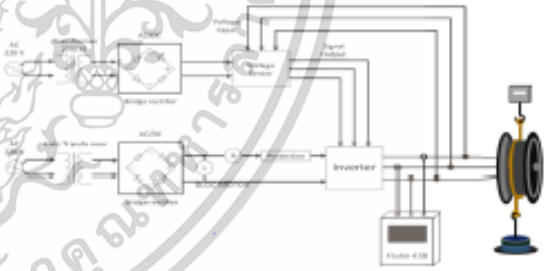


รูปที่ 4 ไดอะแกรมวงจรควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์และข้อมูลโครงสร้างของมอเตอร์

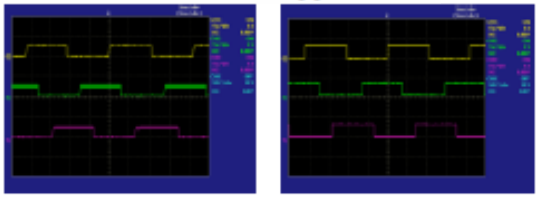
รายการ	ขนาด	หน่วย
1. แรงดัน	24	โวลต์
2. พิกัดกำลัง	350	วัตต์
3. ความเร็วรอบสูงสุด	310	รอบต่อนาที
4. จำนวนขั้วแม่เหล็ก	46	โพล
5. น้ำหนัก	5.8	กิโลกรัม
6. ความยาว	12.4	มิลลิเมตร
7. เส้นผ่านศูนย์กลาง	243	มิลลิเมตร

5. การทดลองและผลการทดลอง



รูปที่ 5 การต่อเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง

จากรูปที่ 6 (ก) สัญญาณตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ทั้ง 3 เฟส เป็นสัญญาณจริงที่ได้จากฮอลล์เซ็นเซอร์ (Hall sensor) และรูปที่ 6 (ข) จะเป็นสัญญาณตัดผ่านศูนย์ที่ได้จากการประมวลผลภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์(C2000) ซึ่งสัญญาณทั้งสองจะมีความใกล้เคียงกัน



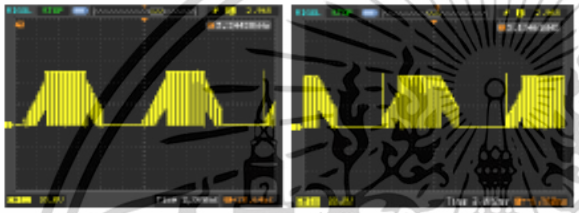
(ก) (ข)

รูปที่ 6 (ก) สัญญาณตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ทั้ง 3 เฟส และ (ข) สัญญาณตัดผ่านศูนย์ทั้ง 3 เฟส

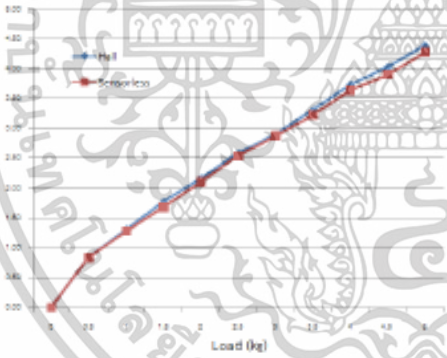
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 7 และ รูปที่ 8 แสดงแรงดันเฟสที่ขับเคลื่อนแบบมีตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์กับปราศจากตัวตรวจจับที่ดิวตี้ 1 และ 0.6 โดยสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเฟสมอเตอร์ที่ลำดับดิวตี้ต่างๆ มีความใกล้เคียงกัน

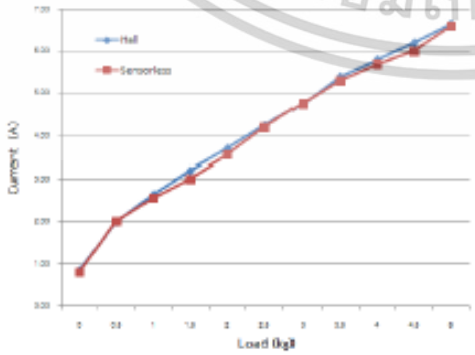
รูปที่ 7 (ก) มีตัวตรวจจับ และ (ข) ปราศจากตัวตรวจจับ แรงดันเฟสแบบมีตัวตรวจจับกับปราศจากตัวตรวจจับที่ดิวตี้ 1



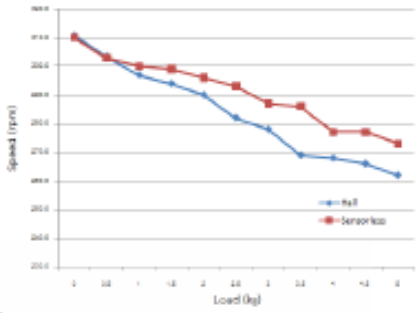
รูปที่ 8 (ก) มีตัวตรวจจับ และ (ข) ปราศจากตัวตรวจจับ แรงดันเฟสแบบมีตัวตรวจจับกับปราศจากตัวตรวจจับที่ดิวตี้ 0.6



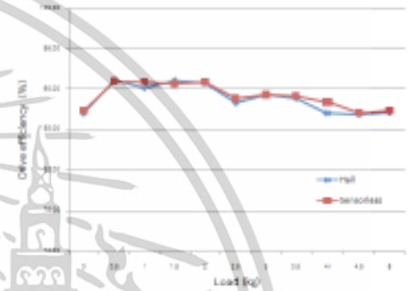
รูปที่ 9 กราฟเปรียบเทียบแรงบิดระหว่างมีตัวตรวจจับกับปราศจากตัวตรวจจับ



รูปที่ 10 กราฟเปรียบเทียบกระแสระหว่างมีตัวตรวจจับกับปราศจากตัวตรวจจับ



รูปที่ 11 กราฟเปรียบเทียบความเร็วรอบระหว่างมีตัวตรวจจับกับปราศจากตัวตรวจจับ



รูปที่ 12 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพไดร์ฟระหว่างมีตัวตรวจจับกับปราศจากตัวตรวจจับ

6. สรุป

จากผลการทดสอบการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ ให้ประสิทธิภาพของระบบสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการควบคุมมอเตอร์แบบมีตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์เนื่องจากมีกำลังทางกลมากกว่าเพราะเมื่อเพิ่มภาระทางกลความเร็วรอบจะตกน้อยกว่าในขณะที่แรงดันเฟส แรงบิดและกระแสของมอเตอร์สำหรับกรณีปราศจากตัวตรวจจับมีค่าใกล้เคียงกันกับกรณีมีตัวตรวจจับเมื่อเปลี่ยนค่าภาระทางกลค่าต่างๆ

เอกสารอ้างอิง

[1] พัชรวี วิระศิลป์ พิทยุตม์ ทรัพย์สมบูรณ์ พิสิทธิ์ บุญรอด และยุวรัตน์ สัมภวะคุปต์, "การขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านโดยปราศจากตัวตรวจจับ", ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2559

[2] P. Damodharan and Krishna Vasudevan, "Sensorless Brushless DC Motor Drive Based on the Zero-Crossing Detection of Back Electromotive Force (EMF) From the Line Voltage Difference", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.25 No.3, 2010, pp. 661 - 668

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ – นามสกุล : ว่าที่ร้อยเอกโกวิท ภูฉลาด

วัน/เดือน/ปีเกิด : วันอาทิตย์ที่ 17 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2528 ที่จังหวัดขอนแก่น

ที่อยู่ : บ้านเลขที่ 45 หมู่ 13 บ้านเหล่า ตำบลโคกพระ อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม รหัสไปรษณีย์ 44150

E – MAIL : Hikowit@gmail.com

ประวัติการศึกษา :

1. จบการศึกษาระดับประถมศึกษาชั้นปีที่ 6 (ป.6) โรงเรียนบ้านสมศรีมะแปบประชาบำรุง ตำบลโคกพระ อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม
2. จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น (ม.3) โรงเรียนเชียงแสนวิทยาคม ตำบลเวียง อำเภอเชียงแสน จังหวัดเชียงราย
3. จบการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) สาขาวิชาช่างไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัยเทคนิคมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม
4. จบการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) สาขาวิชาไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น
5. จบการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) สาขาวิชาไฟฟ้ากำลัง สาขางานเครื่องกลไฟฟ้า วิทยาลัยการอาชีพกาญจนาภิเษก หนองจอก จังหวัดกรุงเทพมหานคร
6. จบการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร จังหวัดกรุงเทพมหานคร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. จบการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) สาขาอาชีวอนามัยและความปลอดภัย มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช จังหวัดนนทบุรี

8. จบการศึกษาระดับปริญญาตรี รัฐศาสตรบัณฑิต (ร.บ.) สาขาการเมืองการปกครอง มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช จังหวัดนนทบุรี

9. ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร

ใบวิชาชีพ/ใบอนุญาต : 1. ได้รับใบอนุญาตประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุม ตามพระราชบัญญัติวิศวกร พ.ศ. 2542 จากสภาวิศวกร ระดับภาคีวิศวกร สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า งานไฟฟ้ากำลัง ตามใบอนุญาตเลขทะเบียน ภฟก.41195 เลขที่สมาชิกสามัญ 215509

2. ได้รับใบอนุญาตการขึ้นทะเบียนเป็นผู้ให้บริการการตรวจสอบและรับรองไฟฟ้าและบริภัณฑ์ไฟฟ้า ตามข้อ 12 ตามกฎกระทรวงการขึ้นทะเบียนและการอนุญาตให้บริการเพื่อส่งเสริมความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสภาพแวดล้อมในการทำงาน พ.ศ.2564 ตามมาตรา 9 เลขที่ใบสำคัญ 0302-01-2566-1943

3. ได้รับใบอนุญาตการขึ้นทะเบียนเป็นผู้ให้บริการการทดสอบเครื่องจักร (ลิฟต์ เครื่องจักรสำหรับยกคนขึ้นทำงานบนที่สูง และรอก) ปั้นจั่น และหม้อน้ำ หม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อนำความร้อน และภาชนะรับความดัน ตามกฎกระทรวงกำหนดมาตรฐานในการบริหาร จัดการ และดำเนินการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับเครื่องจักร ปั้นจั่น และหม้อน้ำ พ.ศ.2564 ข้อ 121 ตามมาตรา 9 เลขที่ใบสำคัญ 0604-01-2567-0073

4. ได้รับใบอนุญาตคณะกรรมการความปลอดภัยอาชีวอนามัยและสภาพแวดล้อมในการทำงานของสถานประกอบกิจการ (คปอ.) ได้รับการขึ้นทะเบียนจากกรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงานเลขทะเบียนที่ จป.65-101 สังกัดการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสาขาเมืองเพชรบุรี จังหวัดเพชรบุรี

ประวัติการทำงาน : ปี 2555 – 2559 บรรจุเข้าทำงานในตำแหน่งพนักงานช่างระดับ 4 การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคอำเภอบางสะพาน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

ปี 2559 – 2568 บรรจุเข้าทำงานในตำแหน่งวิศวกรระดับ 6 การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสาขาเมืองเพชรบุรี จังหวัดเพชรบุรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปี 2568 – ปัจจุบัน บรรจุเข้าทำงานในตำแหน่งวิศวกรระดับ 7 การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสาขาท่าเรือ อำเภอท่ามะกา จังหวัดกาญจนบุรี

ประวัติการเป็นวิทยากร :1. คณะกรรมการสอบโครงงานสำหรับนักศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า นักศึกษาชั้นปีที่ 2 สถาบันการอาชีวศึกษาภาคกลาง 5 วิทยาลัยเทคนิคเพชรบุรี อำเภอเมืองเพชรบุรี จังหวัดเพชรบุรี

2.วิทยากรบรรยายให้กับหน่วยงานภาครัฐและภาคเอกชนอื่นๆ ตลอดจนสถาบันการศึกษาต่างๆ

ประวัติผลงานวิจัย : 1. โกวิท ภูฉลาด และคณะ. 2555. “เทคนิคการปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้วยพัลส์วิดมอดูเลตชั่น เอซี ช็อปเปอร์ สำหรับการประหยัดพลังงานในมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส.” หน้า 88 EC34. ใน **การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8.** มหาสารคาม : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.

2. โกวิท ภูฉลาด และคณะ. 2558. “การควบคุมพัลส์วิดมอดูเลตชั่น เอซี ช็อปเปอร์ ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับการประหยัดพลังงานในมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส.” หน้า 774-777 PW32. ใน **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า กลุ่มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลและสถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ครั้งที่ 7.** กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.

3. โกวิท ภูฉลาด และคณะ. 2560. “การประเมินสมรรถนะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสถูกขับเคลื่อนด้วยพัลส์วิดมอดูเลตชั่น เอซี ช็อปเปอร์หนึ่งเฟส.” หน้า 44-47 PW13. ใน **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ากลุ่มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลและสถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ครั้งที่ 9.** จันทบุรี : คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี.

4. โกวิท ภูฉลาด และคณะ. 2560. “ตู้อบไฟฟ้าควบคุมด้วยเทคนิคควบคุมไซเคิล.” หน้า 474-479 ENETT13-CE-265. ใน **การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13.** เชียงใหม่ : วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

5. โกวิท ภูฉลาด และคณะ. 2561. “การขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านโดยปราศจากตัวตรวจจับ.” หน้า 174-177 PE09. ใน **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 10.** กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้