

ระบบควบคุมสำหรับชุดขับเคลื่อนด้วยภาระทางกลเดี่ยว

A CONTROL SYSTEM FOR A DUAL AC DRIVE WITH COMMON
MECHANICAL LOAD



ปริญญาโทนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

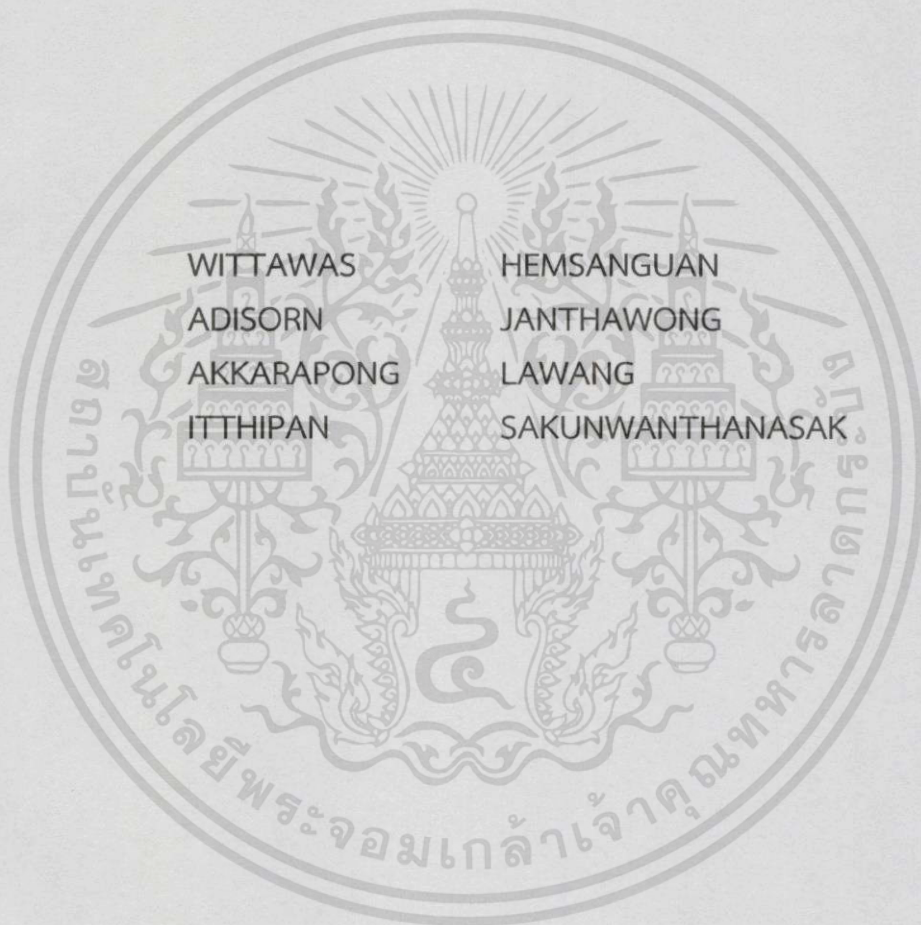
ระบบควบคุมสำหรับชุดขับเคลื่อนด้วยภาระทางกลเดี่ยว
A CONTROL SYSTEM FOR A DUAL AC DRIVE WITH COMMON
MECHANICAL LOAD



ปริญญานิพนธ์เล่มนี้เป็นส่วนหนึ่งของวิชาการศึกษิตตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A CONTROL SYSTEM FOR A DUAL AC DRIVE WITH COMMON
MECHANICAL LOAD



THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENT FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2556

ระบบควบคุมสำหรับชุดขับเคลื่อนด้วยภาระทางกลเดี่ยว

A control system for a dual AC drive with common mechanical load.



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.ศิริเดช

บุญแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2556

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ระบบควบคุมสำหรับชุดขับเคลื่อนด้วยภาระทางกลเดียว

ผู้จัดทำ

1. นายวิหวัส เหมสงวน
2. นายอดิศร จันทวงษ์
3. นายอัครพงศ์ ลาวัง
4. นายอิทธิพันธ์ สุกุลวันธนาศักดิ์



..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ.ดร.ศิริเดช บุญแสง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบควบคุมสำหรับชุดขับเคลื่อนด้วยภาระทางกลเดียว

| | |
|-----------------|-------------------------|
| นาย วิทวัส | เหมสงวน |
| นาย อติสร | จันทวงษ์ |
| นาย อัครพงศ์ | ลาวัง |
| นาย อิทธิพันธ์ | สกุลวันธนาศักดิ์ |
| ผศ.ดร. ศิริเดช | บุญแสง อาจารย์ที่ปรึกษา |
| ปีการศึกษา 2556 | |

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้กล่าวถึงการใช้งานของระบบควบคุมชุดขับเคลื่อนด้วยภาระทางกลเดียว ซึ่งเป็นระบบที่เหมาะสมแก่การใช้งานที่ต้องการกำลังขับเคลื่อนสูง เป้าหมายของการควบคุมชนิดนี้คือต้องการให้มีการกระจายภาระทางกลและกระจายกำลังระหว่างสองชุดขับให้เท่ากัน เพื่อทำให้ไม่เกิดภาระทางกลเกินขีดจำกัดในชุดขับใดชุดขับหนึ่ง ซึ่งอาจทำให้ชุดขับเกิดความเสียหาย อีกทั้งเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการหยุดกระบวนการทันทีทันใดซึ่งอาจสร้างความเสียหายต่ออุปกรณ์อื่นๆ อีกด้วย โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการวิเคราะห์ผลของการจำลองจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink และการจำลองจริงในแบบจำลองที่สร้างขึ้นเพื่อทดสอบระบบ โดยจะใช้การควบคุมด้วย V/F Control ในการควบคุมระบบดังกล่าว

A control system for a dual AC drive with common mechanical load.

| | | |
|-----------------------|------------------|------------|
| Mr. Wittawas | Hemsanguan | |
| Mr. Adisorn | Janthawong | |
| Mr. Akkarapong | Lawang | |
| Mr. Ittiphan | Sakunwanthanasak | |
| Asst.Prof.Dr.Siridech | Boonsang | Supervisor |
| Year 2013 | | |

ABSTRACT

This research discusses about the use of dual AC drive control system with common mechanical load. This is a system with high effective, especially in high power system. The purpose of this control system is to equalize mechanical load and power between two drivers to prevent mechanical overload in any driver, which can affect another driver. In addition, this could avoid sudden stop in process, since it would cause problems for the device. The analysis of this research is typically focus on creating mathematical model by Matlab/Simulink and a realistic simulation model using V/F Control to simulate dual AC drive control system with common mechanical load.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ถูกล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยเหลือจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ผศ.ดร.ศิริเดช บุญแสง อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงงานด้วยดีมาตลอด และได้ตรวจแก้ไข ปริญญาานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อย เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ และผศ.ดร.วรชาติ สุวรรณงาม ที่คอยให้คำแนะนำทางวิชาการในการทำปริญญาานิพนธ์ และให้ข้อคิดเห็นในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณพิจิตร คชชา วิศวกร และคุณปณิธาน บุญจนาวีโรจน์ นักวิชาการคอมพิวเตอร์ประจำวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล ที่คอยให้คำชี้แนะในการเขียนโปรแกรมต่างๆ และให้ยืมอุปกรณ์เครื่องมือในการวิจัย

ขอขอบคุณ คุณสมพงศ์ ทุ่งมีผล ที่คอยให้คำแนะนำในการใช้งานอินเวเตอร์ และการทำชุดควบคุม อีกทั้งยังสนับสนุนอุปกรณ์ในการวิจัย

ขอขอบคุณ คุณธนา นาคนาวา และเพื่อนสาขาวิชาวิศวกรรมอัตโนมัติ สำหรับคำแนะนำต่างๆในเรื่องอุปกรณ์ การเชื่อมต่ออุปกรณ์ และการเขียนโปรแกรมแลปวิว

ขอขอบคุณ คุณอดิสร สุขแสง คุณอังคาร ชูหวาน คุณปัยงูร กุฑุพันธ์ ที่คอยเอื้อเฟื้อเผื่อแผ่ คอยให้คำแนะนำ ช่วยเหลือ และคอยให้กำลังใจในห้องวิจัย

นอกจากนั้นผู้จัดทำต้องขอขอบคุณ คุณนครศักดิ์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้เบิกใช้เครื่องมือ ตลอดจนคุณกมลวรรณ เจ้าหน้าที่ห้องธุรการที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการเบิกใบเสร็จของโครงการ

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำขอขอบคุณ บิดา มารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจ อีกทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

| | หน้า |
|-----------------------------------------------------------------|------|
| บทคัดย่อ | I |
| ABSTRACT | II |
| กิตติกรรมประกาศ | III |
| สารบัญ | IV |
| สารบัญรูปภาพ | VI |
| สารบัญตาราง | X |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย | 1 |
| 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ | 1 |
| 1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ | 2 |
| 1.5 แผนการดำเนินโครงการ | 2 |
| 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย | 3 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง | 4 |
| 2.1 มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส | 4 |
| 2.2 อินเวอร์เตอร์ | 10 |
| 2.3 การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ | 16 |
| 2.4 ทฤษฎีการควบคุมแบบ V/f constant | 19 |
| 2.5 การประยุกต์ใช้การควบคุมสำหรับชุดขับเคลื่อนด้วยถ่านกึ่งตัวนำ | 23 |
| 2.6 การหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส | 27 |
| 2.7 ทฤษฎีการคำนวณ | 32 |
| บทที่ 3 การออกแบบและสร้างแบบจำลอง | 36 |
| 3.1 การสร้างวงจรควบคุมการทำงาน | 36 |
| 3.2 การควบคุมการทำงานและแสดงผลโดยใช้ LabVIEW | 39 |
| 3.3 การจำลองการทำงานโดยใช้ MATLAB/Simulink | 48 |
| 3.4 การติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าและเครื่องกลในการทำงานจริง | 60 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------|------|
| บทที่ 4 ผลการทดลอง | 66 |
| 4.1 ผลการทดลองจากโปรแกรม Matlab เมื่อไม่คิดผลของภาวะทางกล | 66 |
| 4.2 ผลการทดลองจากโปรแกรม Matlab เมื่อคิดผลของภาวะทางกล | 75 |
| 4.3 ผลการทดลองจริงจากวัดจากโปรแกรม Labview แบบไม่คิดผลของภาวะทางกล | 83 |
| 4.4 ผลการทดลองจริงจากวัดจากโปรแกรม Labview แบบคิดผลของภาวะทางกล | 89 |
| | |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา | 96 |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง | 96 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 97 |
| 5.3 แนวทางการพัฒนา | 97 |
| | |
| เอกสารอ้างอิง | 98 |
| | |
| ภาคผนวก | 100 |
| บทความวิชาการ | 101 |
| | |
| ประวัติผู้เขียน | 105 |

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.1 การวางขดลวดที่สเตเตอร์ | 6 |
| 2.2 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้า 3 เฟส | 6 |
| 2.3 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่พิจารณาจากด้าน stator | 7 |
| 2.4 Torque-Speed Characteristic ที่พิกัดแรงดันและความถี่ | 9 |
| 2.5 I_r และ S_f ที่พิกัดแรงดันและความถี่ | 9 |
| 2.6 อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันสามเฟสโดยใช้พาวเวอร์ทรานซิสเตอร์ | 10 |
| 2.7 แรงดันไลน์และเฟสจากอินเวอร์เตอร์ | 11 |
| 2.8 แนวคิดพื้นฐานของ พัลส์-วิต มอดดูเลชัน สัญญาณเฟสวงจร PWM โดยใช้ IGBT | 12 |
| 2.9 (ก) ตัวเปรียบเทียบที่ใช้ในการควบคุมการเปิดและปิดสถานะของทรานซิสเตอร์ (ข) แรงดันอ้างอิงที่ใช้ในตัวเปรียบเทียบ | 13 |
| 2.10 เาต์พุตของวงจร PWM กับแรงดันอินพุตที่ $0 V$, $V_u(t)=V_v(t)$; $V_{load}(t)=0$ | 14 |
| 2.11 เาต์พุตของวงจร PWM กับแรงดันอินพุตเท่ากับครึ่งหนึ่งของแรงดันเปรียบเทียบ สูงสุด | 15 |
| 2.12 แรงดันเอาต์พุตของวงจรมอเตอร์กับสัญญาณแรงดันควบคุม | 16 |
| 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด กับความเร็วรอบเมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่ | 16 |
| 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด กับความเร็วรอบ ที่อัตราส่วน V/F คงที่ | 17 |
| 2.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด กับความเร็วรอบของ Vector Control | 18 |
| 2.16 การทำงานแบบ open-loop volts/hertz | 20 |
| 2.17 acceleration and deceleration characteristics | 21 |
| 2.18 Closed-loop volts/hertz speed control | 22 |
| 2.19 Constant volts/hertz speed control with slip regulation | 22 |
| 2.20 ชุดขับเคลื่อนตัวแปรความถี่ | 24 |
| 2.21 การทำงานของชุดขับเคลื่อนเดี่ยวโดยการควบคุมแรงบิดและความเร็วด้วยการเปลี่ยนความถี่ | 25 |
| 2.22 การทำงานของชุดขับเคลื่อนด้วยแหล่งจ่ายแรงดันปกติ | 26 |
| 2.23 การทำงานของมอเตอร์คู่ ในแบบนำและตาม ด้วยการป้อนแรงดันแยกอินเวอร์เตอร์ (ก) ควบคุมความเร็วทั้งชุดขับนำและชุดขับตาม (ข) ควบคุมความเร็วในชุดขับนำและ ควบคุมแรงบิดในชุดขับตาม | 27 |
| 2.24 วงจรวัดค่าความต้านทานสเตเตอร์ | 28 |
| 2.25 การทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบไม่มีภาระทางกล | 28 |
| 2.26 วงจรการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในลักษณะยึดโรเตอร์ | 30 |
| 2.27 ความสัมพันธ์ของค่า X_1 และ X_2 | 31 |
| 3.1 วงจรของกระบวนการทำงานแบบขับเคลื่อน | 36 |
| 3.2 วงจร MC3PHAC | 37 |
| 3.3 อุปกรณ์ Intelligent Power Module (IPM) TM-52A | 38 |
| 3.4 อุปกรณ์ DAQ 6009 | 38 |
| 3.5 หน้าต่างการควบคุมและแสดงผลการทำงาน(Front Panel) | 39 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 3.6 บล็อกควบคุมความเร็วรอบ | 40 |
| 3.7 บล็อกแสดง Sampling Rate ข้อมูล | 40 |
| 3.8 บล็อกแสดงเวลาในการทำงาน | 40 |
| 3.9 บล็อกแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ | 41 |
| 3.10 บล็อกแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเทียบกับเวลา | 41 |
| 3.11 บล็อกแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเทียบกับเวลา | 41 |
| 3.12 บล็อกแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดไฟฟ้าเทียบกับเวลา | 42 |
| 3.13 บล็อกแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดไฟฟ้าเทียบกับความเร็วรอบ | 42 |
| 3.14 แผนภาพการเขียน Block Diagram | 43 |
| 3.15 DAQ Assistant | 43 |
| 3.16 Tone Measurements | 44 |
| 3.17 Filter | 44 |
| 3.18 Build XY Graph | 45 |
| 3.19 Integral | 45 |
| 3.20 Front panel ของโปรแกรมเก็บข้อมูล | 46 |
| 3.21 Block Diagram ของโปรแกรมเก็บข้อมูล | 47 |
| 3.22 การจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink | 48 |
| 3.23 การแปลงความเร็วรอบเป็นความเร็วเชิงมุม | 48 |
| 3.24 การแปลงความเร็วเชิงมุมเป็นความเร็วรอบ | 49 |
| 3.25 การแปลงความเร็วเชิงมุมโรเตอร์จากหน่วยทางกลเป็นหน่วยทางไฟฟ้า | 49 |
| 3.26 รายละเอียดภายในบล็อกการแปลงความเร็วเชิงมุมโรเตอร์จากหน่วยทางกลเป็นหน่วยทางไฟฟ้า | 49 |
| 3.27 บล็อก PI Controller | 50 |
| 3.28 รายละเอียดภายในบล็อก PI Controller | 50 |
| 3.29 บล็อกอัตราส่วนของแรงดันต่อความถี่ (V/f) | 50 |
| 3.30 รายละเอียดภายในบล็อกอัตราส่วนของแรงดันต่อความถี่(V/f) | 51 |
| 3.31 บล็อกการสร้างสัญญาณพีดับลิวิตี | 51 |
| 3.32 รายละเอียดภายในบล็อกการสร้างสัญญาณพีดับลิวิตี | 52 |
| 3.33 บล็อกเครื่องมือวัดสัญญาณมอเตอร์ตัวที่หนึ่ง | 52 |
| 3.34 ภายในบล็อกเครื่องมือวัดสัญญาณมอเตอร์ตัวที่หนึ่ง | 53 |
| 3.35 บล็อกเครื่องมือวัดสัญญาณมอเตอร์ตัวที่สอง | 53 |
| 3.36 ภายในบล็อกเครื่องมือวัดสัญญาณมอเตอร์ตัวที่สอง | 54 |
| 3.37 บล็อกกรองสัญญาณความถี่สูง(Filter) | 54 |
| 3.38 บล็อกการประมาณค่าฟลักซ์และแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า | 55 |
| 3.39 การแปลงสัญญาณแรงดันและกระแสเป็นกรอบอ้างอิง d-q | 55 |
| 3.40 การแปลงสัญญาณแรงดันเป็นกรอบอ้างอิง d-q | 56 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

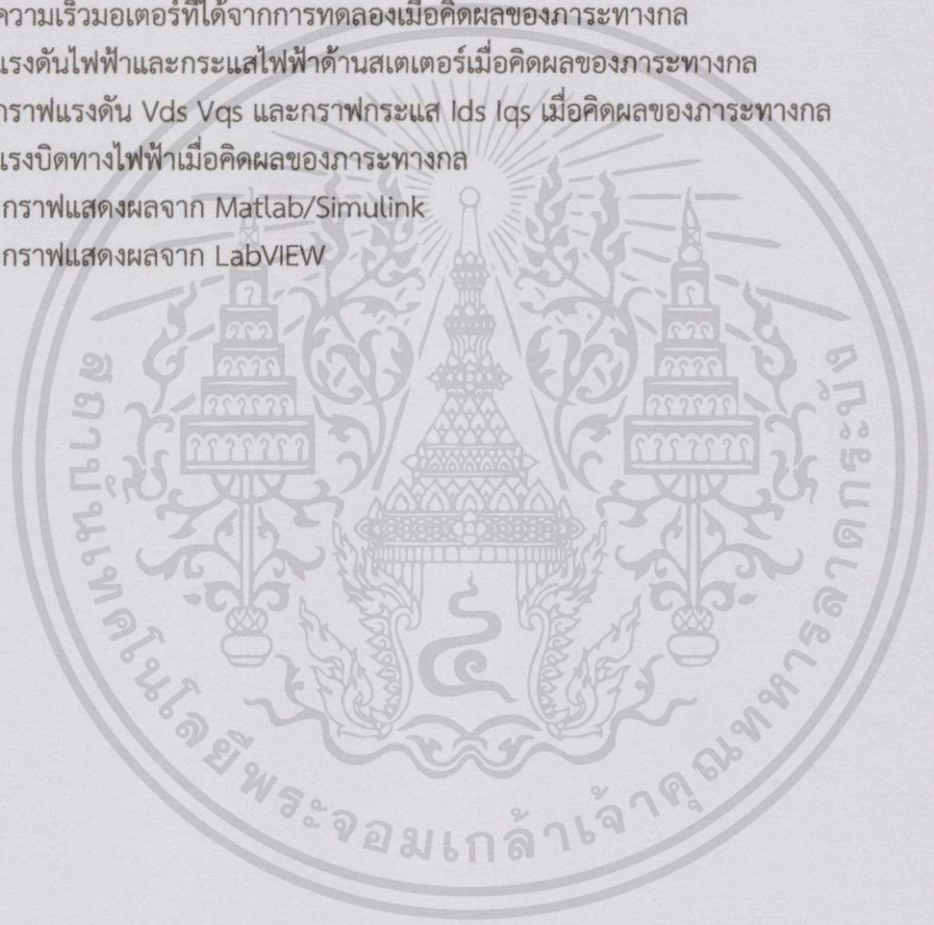
| รูปที่ | หน้า |
|----------------------------------------------------------------------------|------|
| 3.41 การแปลงสัญญาณกระแสเป็นกรอบอ้างอิง d-q | 57 |
| 3.42 ภายในบล็อกการประมาณค่าพิกซ์และแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า | 58 |
| 3.43 การเขียนคำสั่ง MATLAB พล็อตกราฟความเร็วรอบและแรงบิดทางไฟฟ้าของมอเตอร์ | 59 |
| 3.44 แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้า | 60 |
| 3.45 การติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้า | 60 |
| 3.46 วงจรเรียงกระแสสามเฟส | 61 |
| 3.47 อินเวอร์เตอร์ TM-52A | 61 |
| 3.48 IC MC3PHAC | 61 |
| 3.49 วงจรวัดกระแส | 62 |
| 3.50 วงจร Opto | 62 |
| 3.51 หม้อแปลง 220/3 | 62 |
| 3.52 วงจรกรองความถี่สูง | 63 |
| 3.53 วงจรลดทอนแรงดัน | 63 |
| 3.54 สวิตช์ | 63 |
| 3.55 จุดพักสาย(เทอร์มินอล) | 63 |
| 3.56 การติดตั้งเครื่องกล (ภาพด้านหน้า) | 64 |
| 3.57 การติดตั้งเครื่องกล (ภาพด้านขวา) | 64 |
| 3.58 การติดตั้งเครื่องกล (ภาพด้านซ้าย) | 65 |
| 3.59 การติดตั้งเครื่องกล(ภาพด้านบน) | 65 |
| 4.1 ความเร็วที่ควบคุม | 66 |
| 4.2 ความเร็วมอเตอร์ | 67 |
| 4.3 แรงดันเฟส ab (รูปบน) แรงดันเฟส bc (รูปล่าง) | 68 |
| 4.4 แรงดัน Vds และ แรงดัน Vqs | 69 |
| 4.5 กระแสสเตเตอร์เฟส a และ กระแสสเตเตอร์เฟส b | 70 |
| 4.6 กระแส Ids และ กระแส Iqs | 71 |
| 4.7 แรงบิดไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณ | 72 |
| 4.8 ผลตอบสนองของมอเตอร์เมื่อไม่มีการเปลี่ยนแปลงภาระทางกล | 73 |
| 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดไฟฟ้ากับความเร็วยรอบ | 74 |
| 4.10 ความเร็วมอเตอร์เมื่อมีภาระทางกล | 75 |
| 4.11 ผลของแรงดันไฟฟ้าที่สเตเตอร์เมื่อมีภาระทางกล | 76 |
| 4.12 แรงดันไฟฟ้าสเตเตอร์ Vds Vqs | 77 |
| 4.13 กระแสสเตเตอร์ Ia Ib เมื่อคิดผลของภาระทางกล | 78 |
| 4.14 กระแสสเตเตอร์ Ids Iqs เมื่อคิดผลของภาระทางกล | 79 |
| 4.15 แรงบิดไฟฟ้าเมื่อคิดผลของภาระทางกล | 80 |
| 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดไฟฟ้ากับความเร็วของมอเตอร์ | 81 |
| 4.17 ผลตอบสนองของมอเตอร์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระทางกล | 82 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และเที่ยงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------|------|
| 4.18 หน้าจอแสดงผลการทำงานของโปรแกรม Labview ซึ่งไม่คิดผลของภาวะทางกล | 83 |
| 4.19 ความเร็วของมอเตอร์จากอุปกรณ์จริงเมื่อไม่มีภาวะทางกล | 84 |
| 4.20 แรงดันไฟฟ้า Vab Vbc และกระแสไฟฟ้า Ia Ib เมื่อไม่คิดผลของภาวะทางกล | 85 |
| 4.21 กราฟแรงดัน Vds Vqs และกราฟกระแส Ids Iqs เมื่อไม่คิดผลของภาวะทางกล | 86 |
| 4.22 แรงบิดทางไฟฟ้าเมื่อไม่คิดผลของภาวะทางกล | 87 |
| 4.23 แรงบิดทางไฟฟ้าและความเร็วที่วัดได้จริง | 88 |
| 4.24 หน้าจอแสดงการทำงานของโปรแกรม Labview โดยคิดผลของภาวะทางกล | 89 |
| 4.25 ความเร็วมอเตอร์ที่ได้จากการทดลองเมื่อคิดผลของภาวะทางกล | 90 |
| 4.26 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าด้านสเตเตอร์เมื่อคิดผลของภาวะทางกล | 91 |
| 4.27 กราฟแรงดัน Vds Vqs และกราฟกระแส Ids Iqs เมื่อคิดผลของภาวะทางกล | 92 |
| 4.28 แรงบิดทางไฟฟ้าเมื่อคิดผลของภาวะทางกล | 93 |
| 4.29 กราฟแสดงผลจาก Matlab/Simulink | 94 |
| 4.30 กราฟแสดงผลจาก LabVIEW | 94 |





บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการใช้ชุดขับเคลื่อนด้วยภาระทางกลเดี่ยว มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย ยกตัวอย่างเช่นการประยุกต์ใช้ในเตาเผาซีเมนต์ ซึ่งมีประโยชน์อย่างยิ่งในด้านอุตสาหกรรม การควบคุมมอเตอร์ที่นิยมใช้ในปัจจุบันแบ่งได้เป็นหลายประเภท เช่น การควบคุมแบบ V/F Control การควบคุมแบบ Flux Vector Control การควบคุมแบบ Vector Control (Field-Oriented Control) การควบคุมแบบ Direct Torque Control เป็นต้น

V/F Control เป็นแนวคิดในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำในการควบคุมความเร็ว รอบ โดยใช้การปรับค่าให้อัตราส่วนของแรงดัน (Volts) ต่อความถี่ (Hertz) คงที่โดยการควบคุม ลักษณะนี้จะเป็นแบบเชิงเส้นสามารถใช้ได้กับมอเตอร์ทั่วไปโดยไม่ต้องทราบข้อมูลพารามิเตอร์ของ มอเตอร์ ซึ่งการควบคุมชนิดนี้สามารถเข้าใจได้ง่าย จึงเหมาะแก่การนำมาศึกษาวิจัย และประยุกต์ใช้ ในการจำลองทั้งใน Matlab/Simulink และการทดลองด้วยภาระทางกลจำลอง

ดังนั้น ปริญญาณิพนธ์เล่มนี้จึงได้นำเสนอระบบควบคุมสำหรับชุดขับเคลื่อนด้วยภาระทางกลเดี่ยว ด้วยเทคนิคการควบคุมแบบ V/F Control เพื่อวิเคราะห์ผลจากแบบจำลองและจะเป็น ประโยชน์ต่อการวิจัยต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาระบบการควบคุมแบบ V/F Control
2. เพื่อออกแบบระบบจำลองการควบคุมสำหรับชุดขับเคลื่อนด้วยภาระทางกลเดี่ยวด้วยเทคนิคการควบคุมแบบ V/F Control ในโปรแกรม Matlab/Simulink
3. เพื่อศึกษาผลที่ได้จากออกแบบระบบจำลองการควบคุมสำหรับชุดขับเคลื่อนด้วยภาระทางกลเดี่ยวด้วยเทคนิคการควบคุมแบบ V/F Control ในโปรแกรม Matlab/Simulink
4. เพื่อศึกษาการจำลองระบบจริงของการควบคุมสำหรับชุดขับเคลื่อนด้วยภาระทางกลเดี่ยวด้วยเทคนิคการควบคุมแบบ V/F Control
5. เพื่อศึกษาผลที่ได้จากการจำลองระบบจริงของการควบคุมสำหรับชุดขับเคลื่อนด้วยภาระทางกลเดี่ยวด้วยเทคนิคการควบคุมแบบ V/F Control

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

1. ศึกษาการควบคุมแบบ V/F Control
2. ออกแบบระบบจำลองการควบคุมสำหรับชุดขับเคลื่อนด้วยภาระทางกลเดี่ยวด้วยเทคนิคการควบคุมแบบ V/F Control ในโปรแกรม Matlab/Simulink
3. ศึกษาผลที่ได้จากออกแบบระบบจำลองการควบคุมสำหรับชุดขับเคลื่อนด้วยภาระทางกลเดี่ยวด้วยเทคนิคการควบคุมแบบ V/F Control ในโปรแกรม Matlab/Simulink
4. ศึกษาการจำลองระบบจริงของการควบคุมสำหรับชุดขับเคลื่อนด้วยภาระทางกลเดี่ยวด้วยเทคนิคการควบคุมแบบ V/F Control

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ศึกษาผลที่ได้จากการจำลองระบบจริงของการควบคุมสำหรับชุดขับเคลื่อนด้วยภาระทางกลเดี่ยวด้วยเทคนิคการควบคุมแบบ V/F Control

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ

1. ศึกษากระบวนการควบคุมแบบ V/F Control
2. ออกแบบระบบจำลองการควบคุมสำหรับชุดขับเคลื่อนด้วยภาระทางกลเดี่ยวด้วยเทคนิคการควบคุมแบบ V/F Control ในโปรแกรม Matlab/Simulink
3. ศึกษาผลที่ได้จากออกแบบระบบจำลองการควบคุมสำหรับชุดขับเคลื่อนด้วยภาระทางกลเดี่ยวด้วยเทคนิคการควบคุมแบบ V/F Control ในโปรแกรม Matlab/Simulink
4. ศึกษาการจำลองระบบจริงของการควบคุมสำหรับชุดขับเคลื่อนด้วยภาระทางกลเดี่ยวด้วยเทคนิคการควบคุมแบบ V/F Control
5. ศึกษาผลที่ได้จากการจำลองระบบจริงของการควบคุมสำหรับชุดขับเคลื่อนด้วยภาระทางกลเดี่ยวด้วยเทคนิคการควบคุมแบบ V/F Control

1.5 แผนการดำเนินโครงการ

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินโครงการ

| แผนดำเนินโครงการ / เดือน พ.ศ. 2556 | ก.ค. | ส.ค. | ก.ย. | ต.ค. | พ.ย. | ธ.ค. | ม.ค. | ก.พ. |
|----------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1) ศึกษาทำความเข้าใจการควบคุมแบบ V/F Control | | | | | | | | |
| 2) ออกแบบการจำลองระบบการควบคุมสำหรับชุดขับเคลื่อนด้วยภาระทางกลเดี่ยว | | | | | | | | |
| 3) สร้างแบบจำลองระบบใน Matlab/Simulink | | | | | | | | |
| 4) ศึกษาผลที่ได้จากแบบจำลองระบบใน Matlab/Simulink | | | | | | | | |
| 5) ออกแบบการจำลองระบบจริง | | | | | | | | |
| 6) สร้างแบบจำลองระบบจริง | | | | | | | | |
| 7) ศึกษาผลของการจำลองระบบจริง | | | | | | | | |
| 5) บันทึกและสรุปผลการทดลอง | | | | | | | | |
| 6) สำเร็จปริญญาโท | | | | | | | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ได้ศึกษาระบบการควบคุมแบบ V/F Control
2. ได้ออกแบบระบบจำลองการควบคุมสำหรับชุดขับเคลื่อนด้วย
เทคนิคการควบคุมแบบ V/F Control ในโปรแกรม Matlab/Simulink
3. ได้ศึกษาผลที่ได้จากออกแบบระบบจำลองการควบคุมสำหรับชุดขับเคลื่อนด้วย
ทางกลด้วยเทคนิคการควบคุมแบบ V/F Control ในโปรแกรม Matlab/Simulink
4. ได้ศึกษาการจำลองระบบจริงของการควบคุมสำหรับชุดขับเคลื่อนด้วย
เทคนิคการควบคุมแบบ V/F Control
5. ได้ศึกษาผลที่ได้จากการจำลองระบบจริงของการควบคุมสำหรับชุดขับเคลื่อนด้วย
ทางกลด้วยเทคนิคการควบคุมแบบ V/F Control



บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส อินเวอร์เตอร์หลักการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำทฤษฎีการควบคุมแบบ V/f constant และการประยุกต์ใช้งานสำหรับการควบคุมสำหรับชุดขับเคลื่อนด้วยภาระทางกลเดี่ยว ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความเข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ทั้งหมด

2.1 มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

ในปัจจุบันมอเตอร์เหนี่ยวนำกระแสสลับ (Induction motor) ทั้งแบบ 1 เฟส และ 3 เฟสเป็นมอเตอร์ที่นิยมใช้กันมากทั้งในโรงงานอุตสาหกรรมและที่อยู่อาศัยเช่น บิมน้ำพัดลม เครื่องปรับอากาศเครื่องซักผ้าตู้เย็นระบบสายพานลำเลียง เป็นต้นซึ่งมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้อาจเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเฟสเดียวหรือมอเตอร์เหนี่ยวนำหลายเฟส (Poly phase induction motor) ก็ได้ซึ่งมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหลายเฟสที่นิยมใช้เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสซึ่งมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีข้อดีและข้อเสียดังรายละเอียดต่อไปนี้

ข้อดี

- เป็นมอเตอร์ชนิดที่สร้างขึ้นได้ง่ายและทนทานโดยเฉพาะชนิดกรงกระรอก (Squirrel cage type)

- ราคาถูกเมื่อเทียบกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

- มีลักษณะโครงสร้างง่าย ไม่ซับซ้อน

- การบำรุงรักษาน้อยมาก เนื่องจากไม่มีแปรงถ่านจึงไม่มีส่วนที่สึกหรอ

- หาซื้อได้ง่าย เป็นที่นิยม

ข้อเสีย

- ความเร็วรอบของมอเตอร์ไม่สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงได้จะต้องใช้อุปกรณ์ทางเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์มาควบคุมคือ อินเวอร์เตอร์

- ความเร็วรอบจะลดลงหรือเพิ่มขึ้นจะขึ้นอยู่กับโหลด

- แรงบิดในขณะเริ่มหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำค่อนข้างต่ำกว่าแรงบิดขณะเริ่มหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน

ในที่นี่จะกล่าวถึงเฉพาะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยจะกล่าวถึงโครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสและหลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

2.1.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 2 ส่วนด้วยกันคือ สเตเตอร์หรือส่วนที่อยู่กับที่ (Stator) และโรเตอร์หรือส่วนที่หมุน (Rotor)

2.1.1.1 สเตเตอร์ (Stator) หรือส่วนที่อยู่กับที่

สเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสใช้หลักการเดียวกันกับของซิงโครนัสมอเตอร์ หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ โดยทำมาจากแผ่นเหล็กบางๆอัดซ้อนเข้าด้วยกัน และทำเป็นช่องslotไว้บรรจุขดลวด และจำนวนขั้วแม่เหล็กจะเป็นตัวกำหนดความเร็วรอบของมอเตอร์เมื่อเราจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับขดลวดที่สเตเตอร์ จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่คงที่ค่าหนึ่ง และสนามแม่เหล็กนี้จะหมุน (Rotate) ด้วยความเร็วที่เรียกว่าความเร็วซิงโครนัส และหาได้โดย

$$N_s = \frac{120f}{P} \quad (2.1)$$

N_s = ความเร็วซิงโครนัสหรือความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน

f = ความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับ

P = จำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์

2.1.1.2 โรเตอร์ (Rotor) หรือส่วนที่หมุน

โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

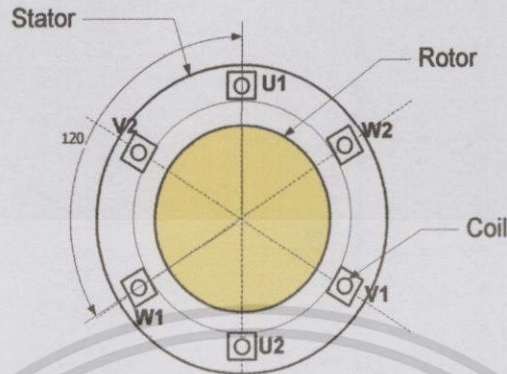
1. โรเตอร์แบบกรงกระรอกมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้โรเตอร์ชนิดนี้เราเรียกว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกส่วนใหญ่ในอุตสาหกรรมจะใช้มอเตอร์ชนิดนี้ ทั้งนี้เป็นเพราะว่าโรเตอร์ชนิดนี้เป็นชนิดที่ทำได้ง่ายราคาถูกและทนทานที่สุด โรเตอร์ชนิดนี้มีลักษณะแท่งตัวนำวางเรียงอยู่ในแนวตามความยาวของโรเตอร์ ประกอบด้วยแผ่นเหล็กบางๆอัดซ้อนกันเป็นรูปทรงกระบอก และถูกทำให้เป็นช่องslotให้ขนานกันเพื่อสำหรับฝังหรือบรรจุตัวนำโรเตอร์ (Rotor Conductor) ลงในช่องslotจะเป็นแท่งทองแดงหรืออลูมิเนียมหรืออัลลอย (Copper Bar or Aluminum Bar or Alloy) โดยในหนึ่งslotจะบรรจุแท่งทองแดงหรืออลูมิเนียมเพียง 1 แท่งเท่านั้น และที่ปลายสุดของแท่งตัวนำทั้งสองด้านนั้นในแต่ละด้านจะถูกต่อปลายลัดวงจรเข้าด้วยกัน

2. โรเตอร์แบบพันขดลวดหรือวาวด์โรเตอร์ (Wound Rotor) มอเตอร์ที่ใช้โรเตอร์ชนิดนี้เรียกว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำแบบโรเตอร์พันขดลวด หรือเฟสวาล์มมอเตอร์ หรือสลลิ่งมอเตอร์ (Wound Rotor or Slip-ring Motor) โรเตอร์ ชนิดนี้ ในโรเตอร์ชนิดนี้ภายในจะต่อแบบสตาร์ และมีปลายสายออกมา 3 ปลายต่อเข้ากับสลลิ่งที่ติดกับเพลลาของโรเตอร์นั้น ทำให้สามารถเข้าถึงตัวโรเตอร์ได้และโรเตอร์แบบพันขดลวดสามารถที่จะนำความต้านทานที่ต่อแบบสตาร์ต่อเข้ากับสลลิ่งของโรเตอร์ เพื่อช่วยในการเริ่มหมุนของมอเตอร์ เป็นการเพิ่มแรงบิดขณะเริ่มหมุนของมอเตอร์นั้น

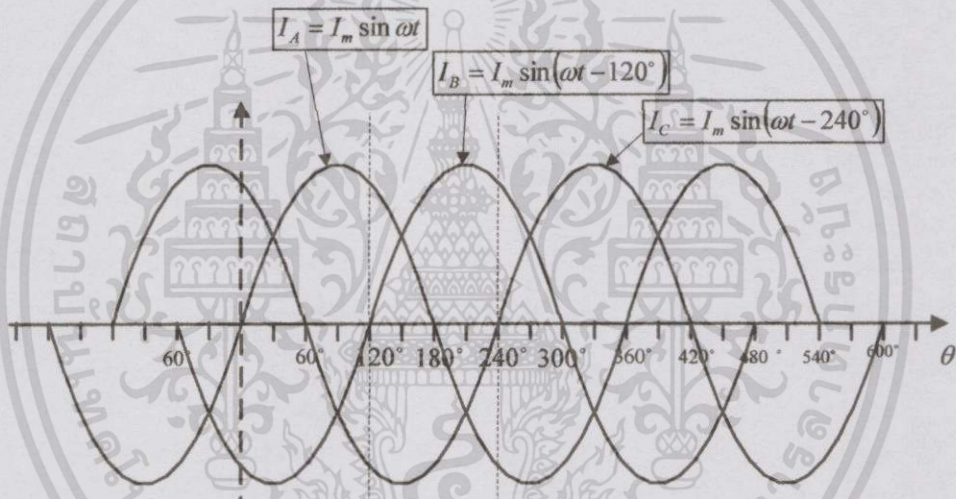
2.1.2 สนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟสเข้าสู่มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเกิดสนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์เมื่อสนามแม่เหล็กหมุนตัดผ่านแท่งตัวนำในโรเตอร์จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำตามกฎของฟาราเดย์เมื่อโรเตอร์เป็นขดลวดต่อลัดวงจรหรือแบบกรงกระรอกจะเกิดกระแสเหนี่ยวนำไหลในโรเตอร์เมื่อกระแสในโรเตอร์ตัดกับสนามแม่เหล็กหมุน จะเกิดแรงคู่ควบขึ้นทำให้มอเตอร์เกิด

การหมุนการวางขดลวดที่สเตเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า 3 เฟสจะวางห่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้าดังรูปที่ 2.1 และกระแสไฟฟ้าสามเฟสในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 การวางขดลวดที่สเตเตอร์



รูปที่ 2.2 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้า 3 เฟส

2.1.3 ค่าสลิป (Slip, S)

ในทางปฏิบัตินั้นโรเตอร์ไม่สามารถหมุนได้เท่ากับความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์ โดยปกติแล้วความเร็วของโรเตอร์จะมีความเร็วน้อยกว่าความเร็วของสนามแม่เหล็กที่หมุนที่สเตเตอร์ ความแตกต่างของความเร็วนั้นจะขึ้นอยู่กับโหลดที่ต่ออยู่กับมอเตอร์ ความแตกต่างระหว่างความเร็วของสนามแม่เหล็กที่หมุนอยู่ที่สเตเตอร์ หรือความเร็วซิงโครนัส (N_s) และความเร็วรอบของโรเตอร์ขณะใช้งาน (Actual Speed : N_r) ของโรเตอร์เรียกว่าสลิปของมอเตอร์โดยปกติเป็นเปอร์เซ็นต์ซึ่งเปอร์เซ็นต์สลิปสามารถหาได้จากสมการดังนี้คือ

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_r} = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\%Slip = \frac{N_s - N_r}{N_s} \times 100 \quad (2.3)$$

ความถี่ที่โรเตอร์ (Rotor frequency)

$$f_r = sf \quad (2.4)$$

สมการแรงบิด (Torque)

$$T_e = \frac{P_e}{\omega_r} \quad (2.5)$$

P_e = กำลังไฟฟ้าของโรเตอร์ที่ได้ออกมา

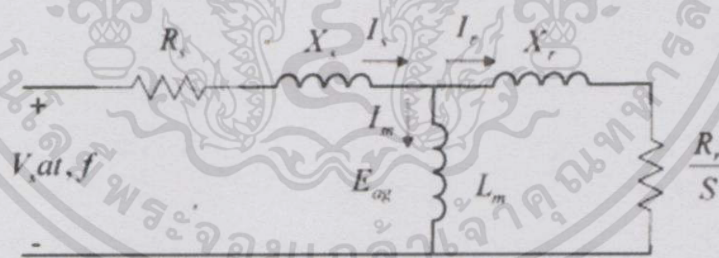
T_e = ค่าแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า

f_r = ความถี่โรเตอร์

f = ความถี่ไฟฟ้า

แต่ในบางครั้ง $N_s - N_r$ ก็เรียกว่า ความเร็วสลิป (Slip Speed) จะเห็นได้ว่าความเร็วของโรเตอร์ (มอเตอร์) คือ $N_r = N_s(1 - S)$

2.1.4 คุณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่พิจารณาจากด้าน stator

จากวงจรสมมูลย์ในรูปที่ 2.3 จะไม่นำค่า R_c (ค่าความต้านทานสมมูลย์แทนการสูญเสียในแกนเหล็กหรือ core loss) มาพิจารณาร่วมด้วยเพราะมีค่าสูงมาก ทำให้กระแสไหลผ่านได้น้อย เมื่อเทียบกับ stator resistance (R_s) และ rotor resistance (R_r) ในขณะที่กระแส I_m หรือ Magnetizing current ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของกระแสป้อนมอเตอร์ (I_s) จะมีค่ามาก โดยกระแส I_m นี้ถือว่าเป็นกระแสที่สร้าง Resultant air gap flux หรือ ϕ_{ag} จากวงจรสมมูลย์ที่ได้ จึงสามารถเขียนความสัมพันธ์ของแรงดันป้อนเข้าได้ดังนี้

$$V_s = I_s(R_s + jX_s) + E_{ag} \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า จะมีแรงบิดเกิดขึ้นที่มอเตอร์คือ

$$T_e = K_1 I_r \phi_{ag} \sin \delta \quad (2.7)$$

โดย δ คือมุมต่างเฟสระหว่าง แรงเคลื่อนแม่เหล็กจากโรเตอร์ (Rotor mmf) และ Resultant air gap flux สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่เกิดขึ้นที่ Stator เป็นดังนี้

$$E_{ag} = K_2 f \phi_{ag} \quad (2.8)$$

และในสภาวะที่มอเตอร์หมุนในช่วงความเร็วปกติ เมื่อพิจารณาจากด้าน Rotor จะพบว่า Rotor Leakage Reactance จะมีค่าน้อยกว่า Rotor Resistance มาก ณ ความถี่ slip frequency ดังกล่าว ทำให้มุมต่าง δ มีค่าใกล้เคียงศูนย์ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ของกระแส I_r เมื่อพิจารณาขณะมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วปกติ

$$I_r = K_3 \phi_{ag} S_f \quad (2.9)$$

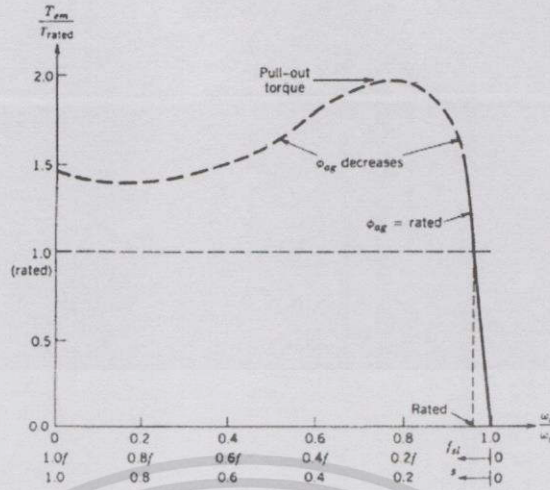
และแรงบิด

$$T_e = K_4 \phi_{ag}^2 S_f \quad (2.10)$$

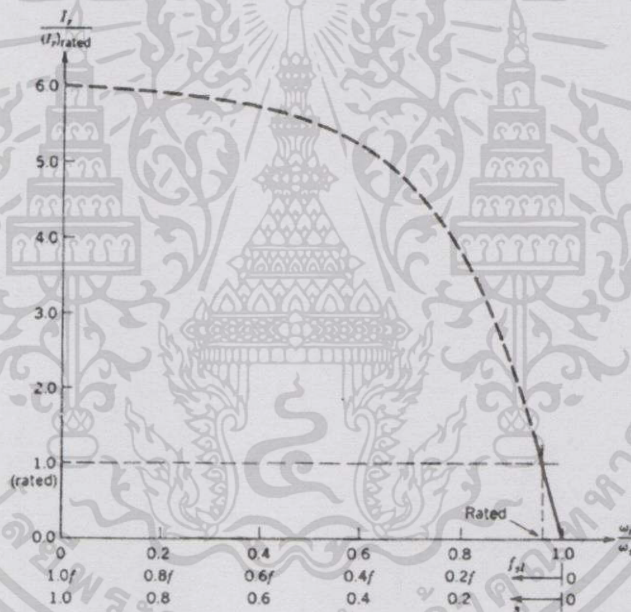
จากสมการต่างๆ ข้างต้นทำให้ได้ข้อสังเกตต่างๆดังนี้

1. ความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนสามารถเปลี่ยนแปลงตามความถี่ไฟฟ้าป้อนเข้า
2. ที่ค่า slip ต่ำๆ ความเร็วมอเตอร์จะแปรผันตามความถี่ของแรงดันป้อนเข้า ยกเว้นที่ความถี่ต่ำ
3. เพื่อให้ได้สมรรถนะทางแรงบิดเท่าที่พึงควรรักษา ϕ_{ag} ให้คงที่เท่าที่พึงควรซึ่งต้องทำให้ V_s แปรผันตรงตาม f
4. เนื่องจาก I_r แปรผันตาม Slip frequency (S_f) เพื่อจำกัดมิให้กระแส I_s สูงเกินกว่าพิกัดค่าของ S_f ไม่ควรเกินค่าที่พิกัด

จากข้อสังเกตทั้งหมดพอสรุปได้ว่าความเร็วมอเตอร์สามารถเปลี่ยนแปลงได้ด้วยการควบคุมความถี่ป้อนเข้า f และควรรักษาให้ air gap flux (ϕ_{ag}) มีค่าคงที่เท่าที่พิกัดโดยการควบคุมให้ขนาดของแรงดันป้อนเข้าแปรผันตามความถี่ f ถ้ามอเตอร์เหนี่ยวนำถูกควบคุมในลักษณะดังกล่าว มอเตอร์จึงจะสามารถให้แรงบิดได้ที่พิกัดโดยที่ slip frequency (S_f) กระแสโรเตอร์ (I_r) กระแสสเตเตอร์ (I_s) และค่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียในวงจรโรเตอร์จะอยู่ภายใต้ระดับพิกัด



รูปที่ 2.4 Torque-Speed Characteristic ที่พิกัดแรงดันและความถี่



รูปที่ 2.5 I_r และ S_f ที่พิกัดแรงดันและความถี่

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.4 และ 2.5 พบว่า เมื่อ S_f มีค่าต่ำ I_r และ T_e จะแปรผันตาม S_f อย่างเป็นเชิงเส้น แต่ถ้า S_f มีค่ามากขึ้น ทั้ง T_e และ I_r จะไม่แปรผันตาม S_f อย่างเป็นเชิงเส้นอีกต่อไป ด้วยเหตุที่ค่า reluctance ของ rotor ณ ความถี่ slip ดังกล่าว มีค่ามากขึ้นเมื่อเทียบกับ R_r (เมื่อพิจารณาทางวงจรรดานโรเตอร์) ทำให้มุม δ ห่างกันมากขึ้น มีผลให้แรงบิดมีค่าลดลง ในขณะที่ R_r จะมีค่าสูงขึ้น เป็นเหตุให้ I_s มีค่าสูงขึ้นตาม ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่ impedance ที่ Stator ทำให้ E_{ag} มีค่าลดลง ส่งผลให้ ϕ_{ag} มีค่าลดลง ดังนั้นสามารถพิจารณาได้จากสมการข้างต้นจะพบว่า เนื่องจาก ϕ_{ag} ลดลง จากที่กล่าวมาข้างต้น จึงทำให้ T_e และ I_r ไม่ได้แปรผันตาม S_f อีกต่อไป ผลที่เกิดขึ้นกับ I_s , I_r , T_e และ ϕ_{ag} จะเกิดขึ้นพร้อมๆกัน และจากรูปที่ 2.4 จะเรียกจุดที่แรงบิดมีค่าสูงสุดว่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

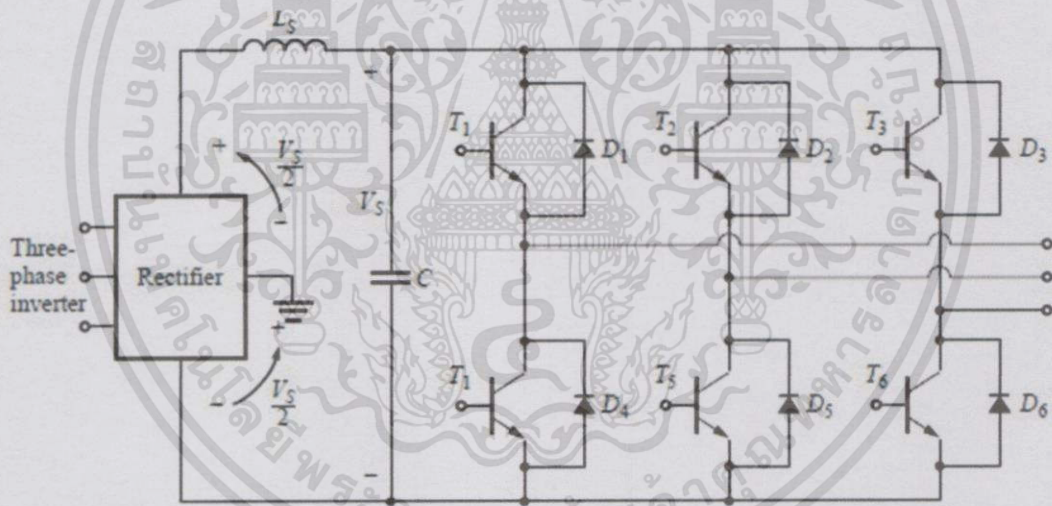
Pull Out Torque ในการใช้งานปกติทั่วไป การขับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่จะกล่าวถึงต่อไป จะรักษาให้ S_f มีค่าต่ำหรือไม่ให้สูงกว่าพิกัด ดังนั้นส่วนที่เป็นเส้นประในรูปที่ 2.4 และ 2.5 จะไม่ได้นำมาพิจารณา

2.2 อินเวอร์เตอร์

สำหรับอินเวอร์เตอร์มีด้วยกัน 2 แบบคืออินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage-source inverter: VSI) และอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส (Current-source inverter: CSI) สำหรับการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วย V/f constant จะใช้อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน

2.2.1 พัลส์-วิต มอดูเลชัน อินเวอร์เตอร์ (PWM)

พัลส์-วิต มอดูเลชัน เป็นกระบวนการในการปรับเปลี่ยนความกว้างของพัลส์ของสัญญาณขบวนพัลส์โดยเป็นการเปรียบเทียบระหว่างสองสัญญาณคือ สัญญาณควบคุมสามเหลี่ยมกับสัญญาณแรงดันไฟฟ้า จึงทำให้เกิดสัญญาณขบวนพัลส์ขึ้น โดยใช้ความถี่ของสัญญาณไซน์ขอยด์ที่ต้องการควบคุมแรงดันไฟฟ้า PWM ทำให้มีการผลิตรูปคลื่นพลังงานสูงที่มีแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยในลักษณะที่เหมาะสมสำหรับการขับมอเตอร์ AC วงจรของอินเวอร์เตอร์แสดงในรูปที่ 2.6

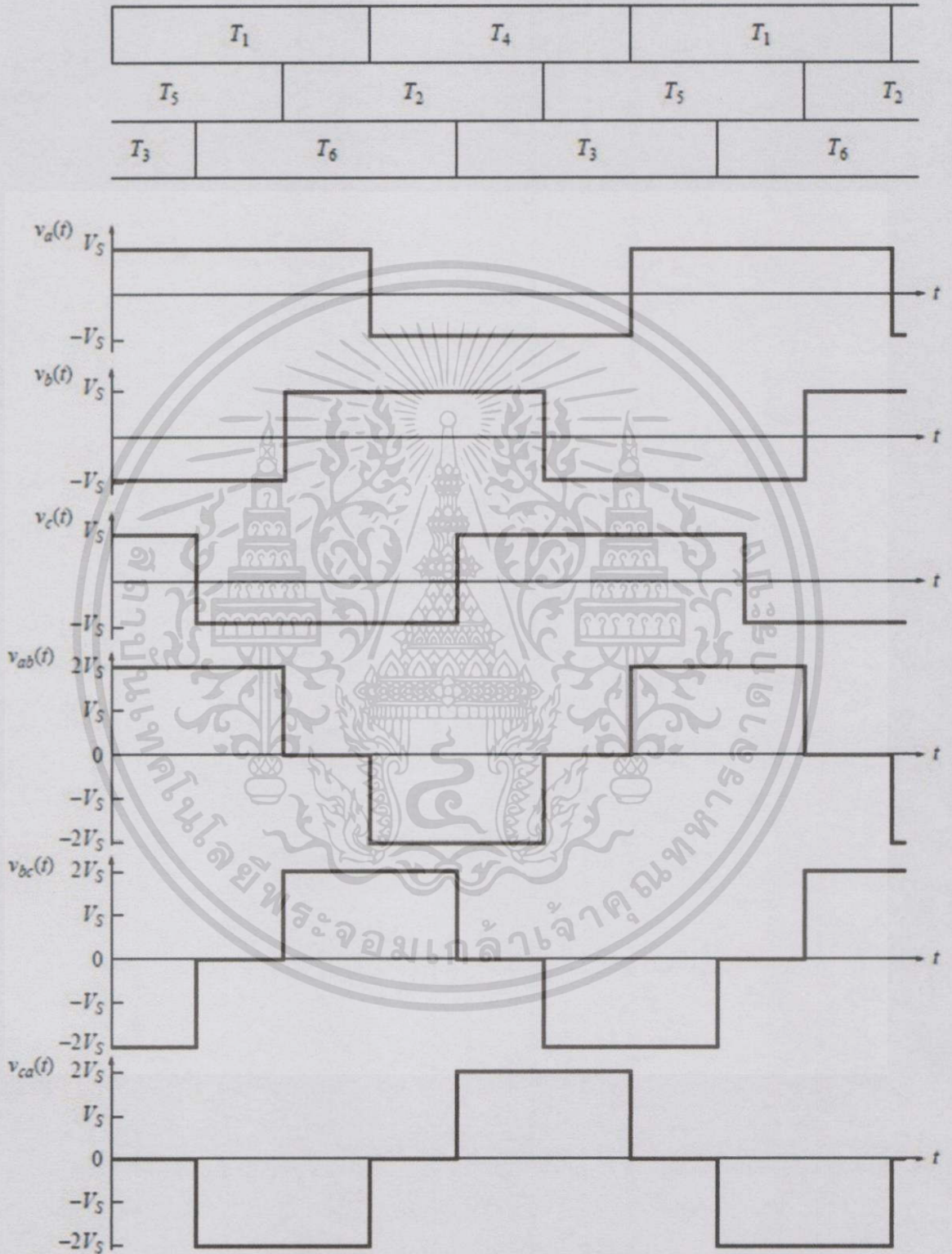


รูปที่ 2.6 อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันสามเฟสโดยใช้ทราานซิสเตอร์

รูปที่ 2.8 แสดงให้เห็นสัญญาณแต่ละเฟสของอินเวอร์เตอร์ PWM โดยใช้สวิตช์ IGBT สถานะของ IGBT ตัวที่หนึ่งจนถึง IGBT ตัวที่ 4 ในวงจรถูกควบคุมด้วยการเปรียบเทียบของสองสัญญาณ แสดงให้เห็นในรูปที่ 2.9 (ก)

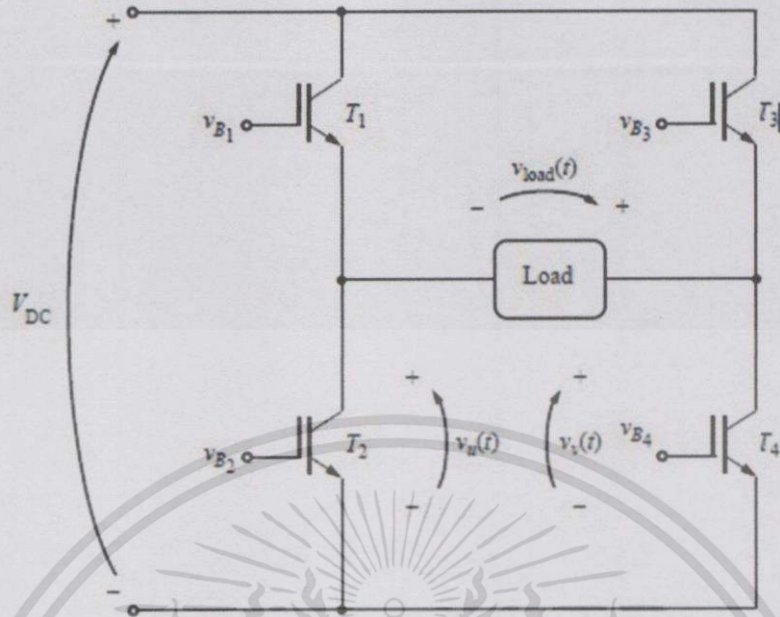
ตัวเปรียบเทียบเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เปรียบเทียบแรงดันอินพุตกับสัญญาณอ้างอิงและการเปิด-ปิดสวิตช์ของทรานซิสเตอร์ขึ้นอยู่กับผลลัพธ์ของการเปรียบเทียบ ตัวเปรียบเทียบ A เปรียบเทียบ $V_{in}(t)$ กับแรงดันอ้างอิง $V_x(t)$ และผลลัพธ์ของการเปรียบเทียบจะควบคุม IGBT T_1 และ T_2 ตัวเปรียบเทียบ B เปรียบเทียบ $V_{in}(t)$ กับแรงดันอ้างอิง $V_y(t)$ และผลลัพธ์ของการเปรียบเทียบจะควบคุม IGBT T_3 และ T_4 ถ้า $V_{in}(t)$ มีค่ามากกว่า $V_x(t)$ ในช่วงเวลาใดๆ ตัวเปรียบเทียบ A จะทำการปิดสวิตช์ T_1 และเปิดสวิตช์ T_2 หรืออาจจะทำการเปิดสวิตช์ T_1 และปิดสวิตช์ T_2 ในทำนองเดียวกัน ถ้า $V_{in}(t)$ มีค่ามากกว่า $V_y(t)$ ในช่วงเวลาใดๆ ตัวเปรียบเทียบ B จะทำการเปิดสวิตช์ T_3 และปิดสวิตช์ T_4 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T_4 หรืออาจจะทำการเปิดสวิตช์ T_3 และเปิดสวิตช์ T_4 โดยที่แรงดันอ้างอิง $V_x(t)$ และ $V_y(t)$ แสดงให้เห็นในรูปที่ 2.9 (ข)



รูปที่ 2.7 แรงดันไลน์และเฟสจากอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



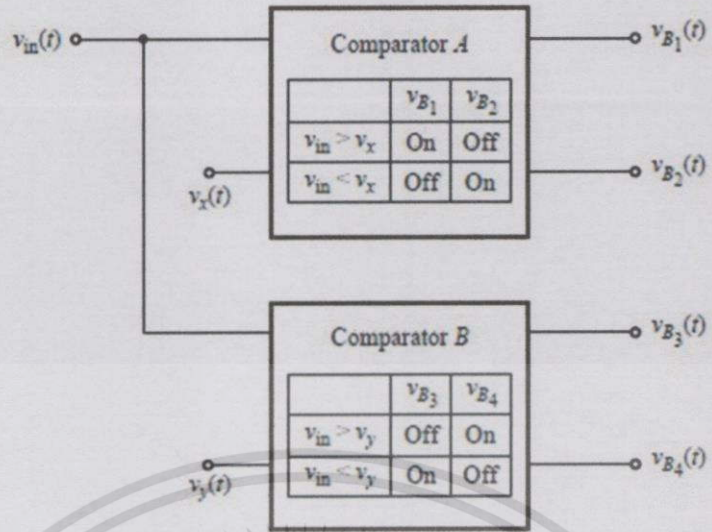
รูปที่ 2.8 แนวคิดพื้นฐานของ พัลส์-วิต มอดดูเลชัน สัญญาณเฟสวางจร PWM โดยใช้ IGBT

ภายใต้การทำงานทั้งหมดของวงจรอินเวอร์เตอร์นี้ดูสิ่งที่เกิดขึ้นเมื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันจะนำไปใช้กับอินเวอร์เตอร์ อันดับแรก สมมติว่าการควบคุมแรงดันเป็น 0 เมื่อแรงดัน $V_u(t)$ และ $V_v(t)$ เหมือนกันและแรงดันโหนดเอาต์พุตของวงจรเป็น $V_{load}(t)$ เป็น 0 (ดูในรูป 2.10)

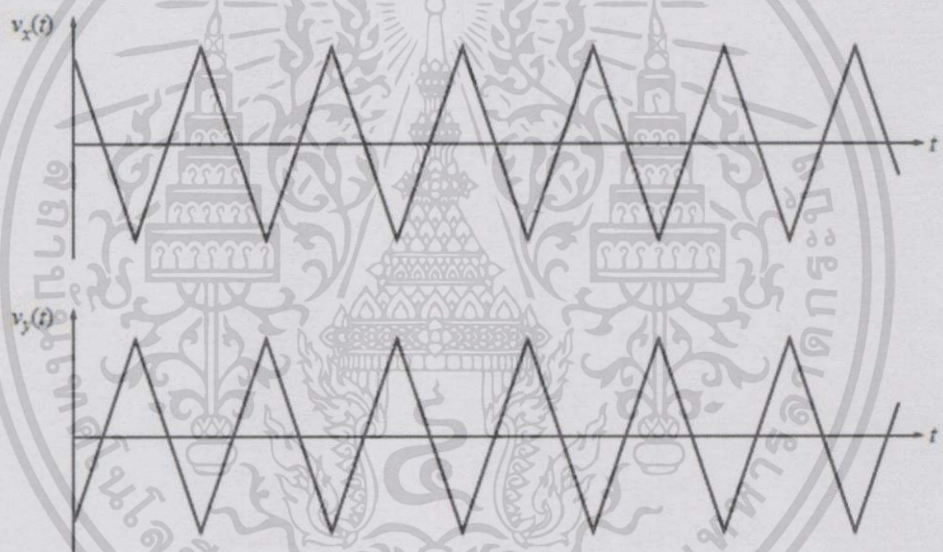
ต่อมา สมมติว่าแรงดันไฟฟ้าที่ควบคุมด้านบวกคงที่เท่ากับครึ่งหนึ่งของสัญญาณแรงดันอ้างอิงสูงสุดจะถูกนำไปใช้กับวงจรผลปรากฏว่าแรงดันเอาต์พุตเป็นสัญญาณขบวนพัลส์ที่ duty-cycle 50 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นในรูปที่ 2.11

สุดท้าย สมมติว่าแรงดันควบคุมไขว้ขอยด์ถูกนำมาใช้ในวงจรแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.12 ความกว้างของผลพัลส์เทรนแตกต่างกันไปไขว้ขอยด์กับแรงดันคงที่ ผลลัพธ์เป็นกำลังสูงเอาต์พุตที่มีแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่มีขนาดเล็กกว่าพื้นที่ ที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยของสัญญาณควบคุมในพื้นที่ ความถี่มูลฐานของรูปคลื่นเอาต์พุตเป็นเช่นเดียวกับความถี่ของแรงดันควบคุมอินพุต

อินเวอร์เตอร์สามเฟส PWM ที่สมบูรณ์จะประกอบด้วยสัญญาณสามเฟสอินเวอร์เตอร์ที่อธิบายไว้ข้างต้นกับแรงดันไฟฟ้าควบคุมของไขว้ขอยด์ระหว่างเฟสซิกกัน 120 องศา การควบคุมความถี่ในอินเวอร์เตอร์ PWM สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนความถี่ของการควบคุมแรงดันไฟฟ้าอินพุต



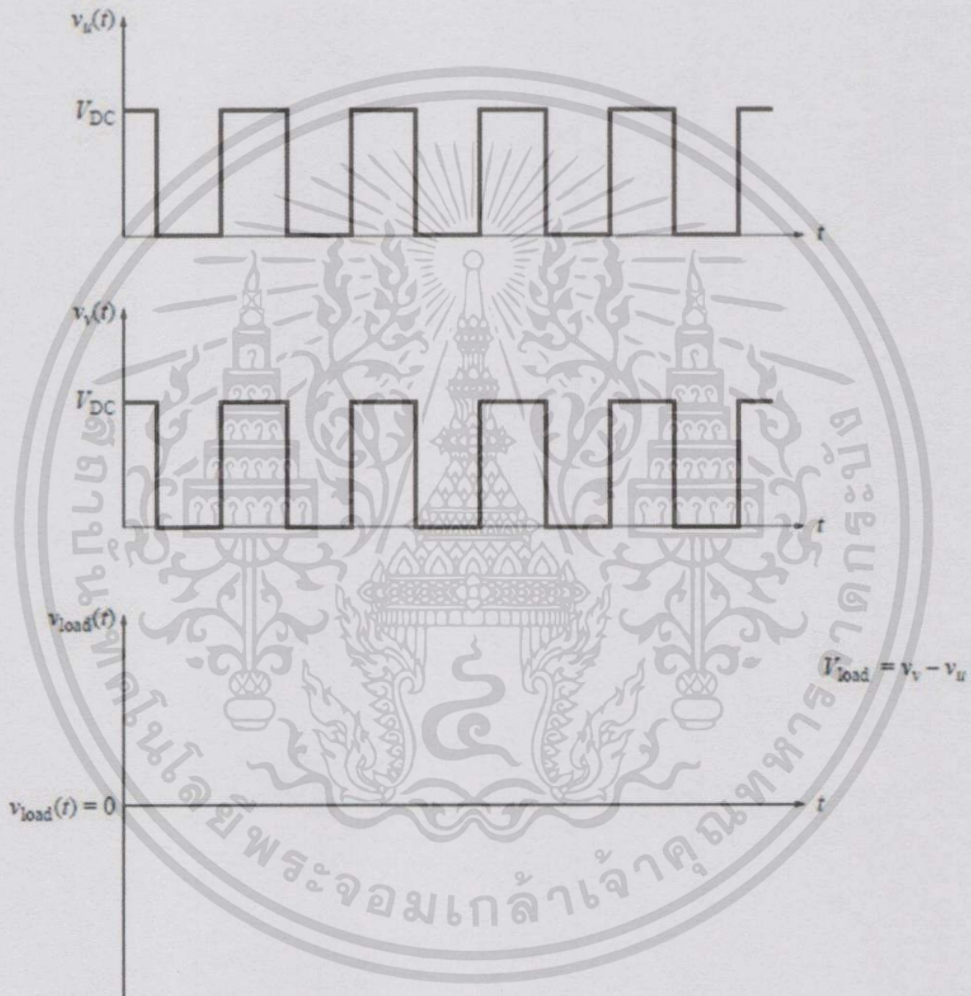
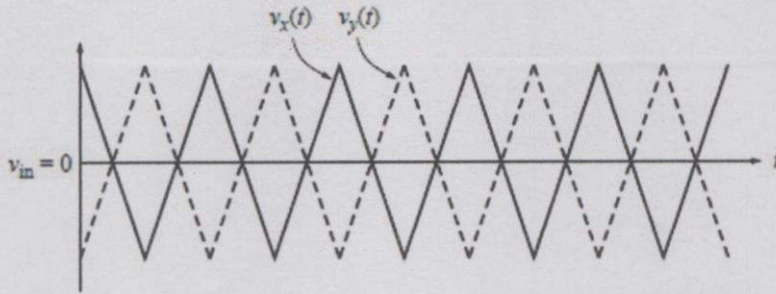
(ก)



(ข)

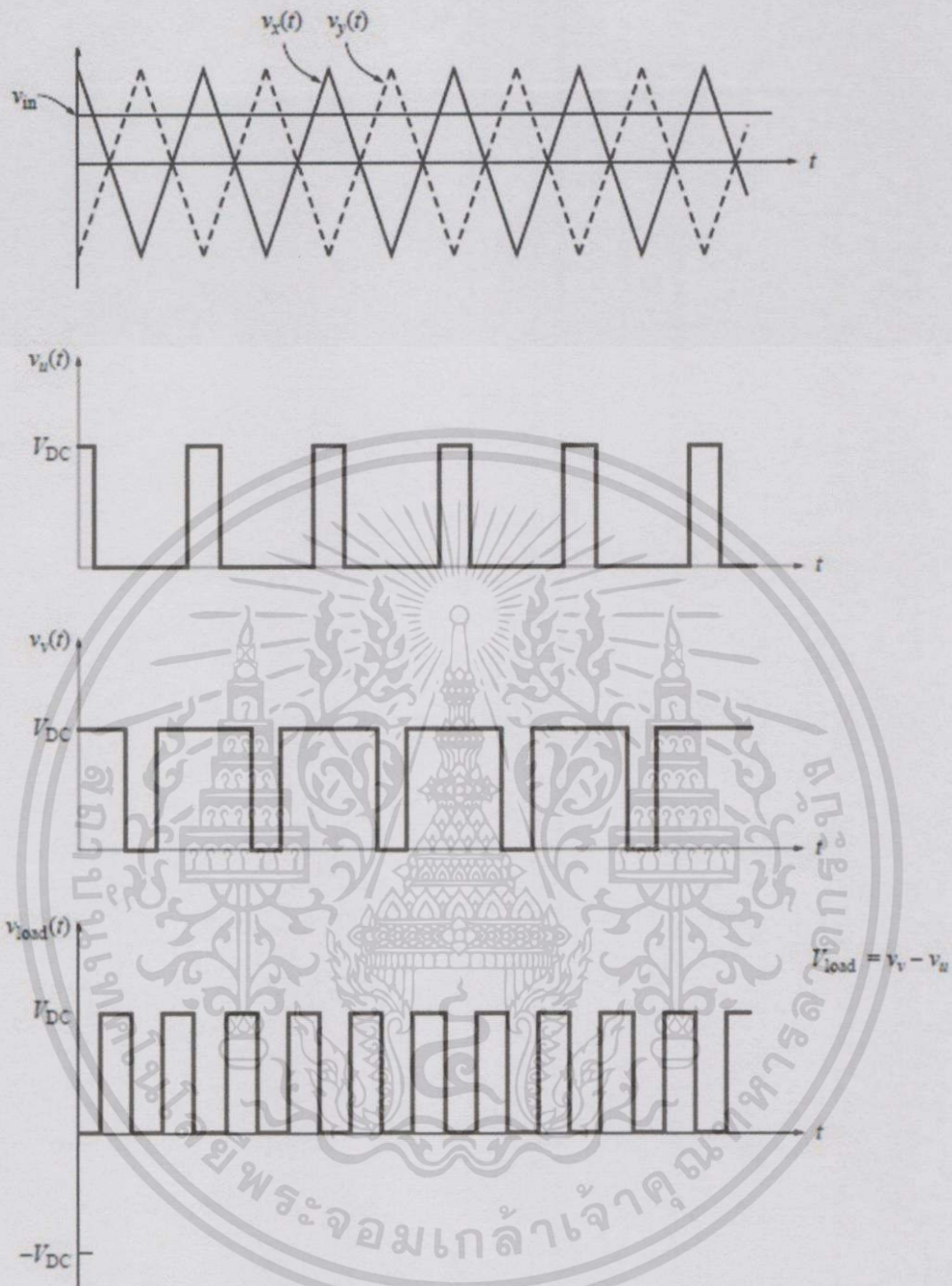
รูปที่ 2.9 (ก) ตัวเปรียบเทียบที่ใช้ในการควบคุมการเปิดและปิดสถานะของทรานซิสเตอร์
(ข) แรงดันอ้างอิงที่ใช้ในตัวเปรียบเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



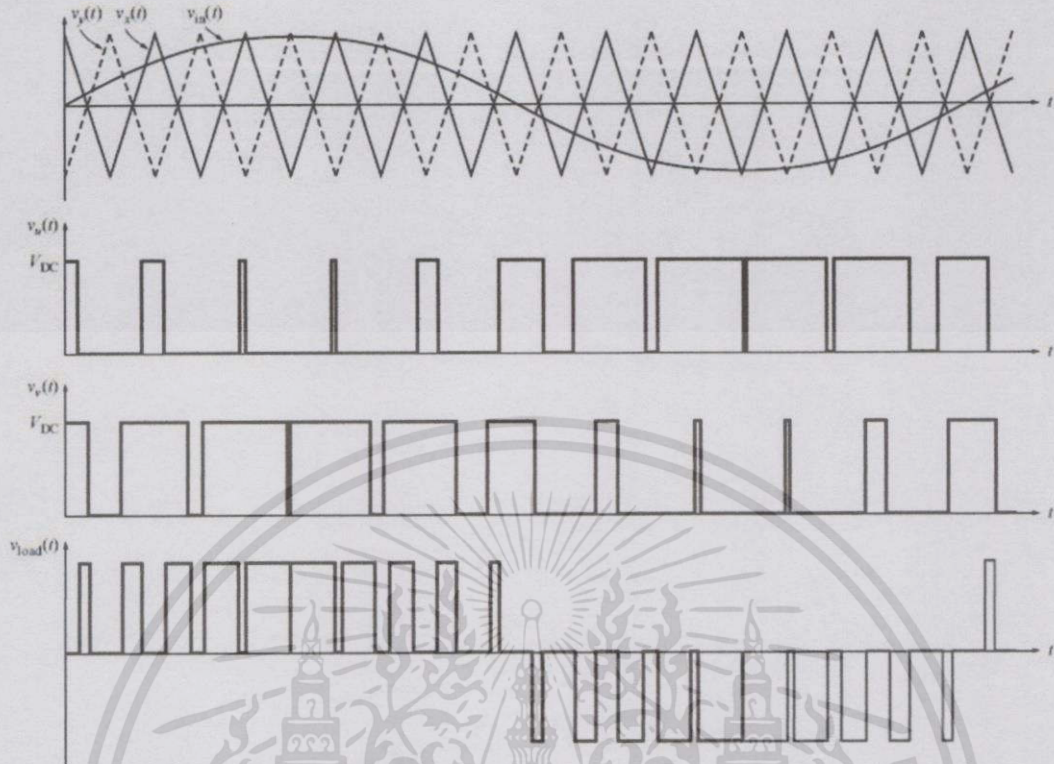
รูปที่ 2.10 เาต์พุตของวงจร PWM กับแรงดันอินพุตที่ 0 V , $V_u(t)=V_v(t)$; $V_{load}(t)=0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 เาต์พุตของวงจร PWM กับแรงดันอินพุตเท่ากับครึ่งหนึ่งของแรงดันเปรียบเทียบ
สูงสุด

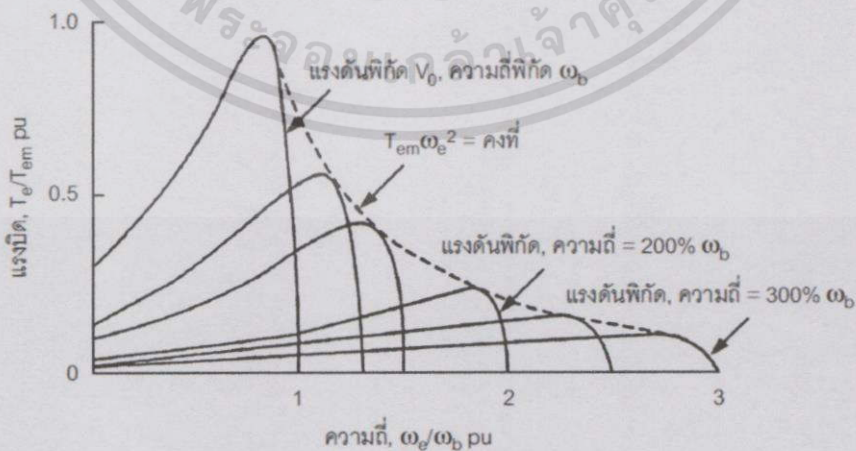
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 แรงดันเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์กับสัญญาณแรงดันควบคุม

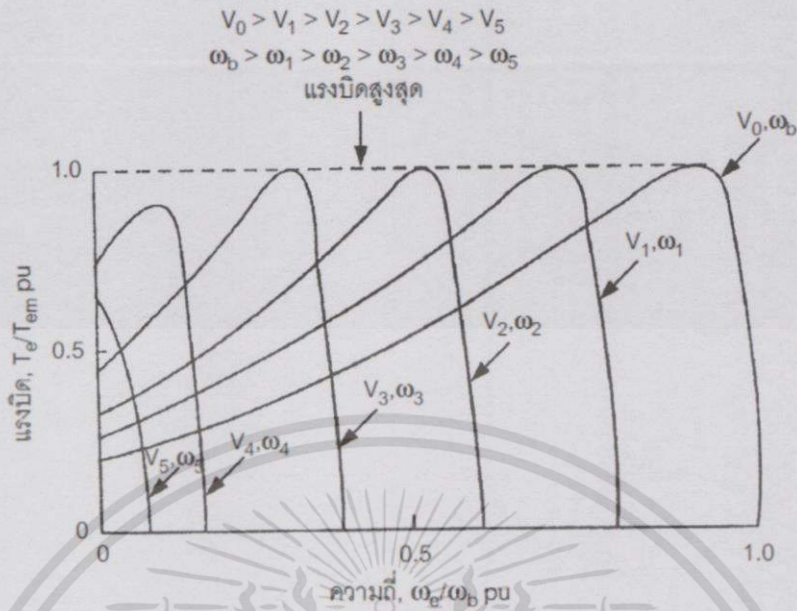
2.3 การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

1. การควบคุมแบบ V/F คือการควบคุมความเร็วโดยการปรับค่าให้อัตราส่วนของแรงดัน (Volts) ต่อความถี่ (Hertz) คงที่โดยการควบคุมลักษณะนี้จะเป็นแบบเชิงเส้นสามารถใช้ได้กับมอเตอร์ทั่วไปได้โดยไม่ต้องทราบข้อมูลพารามิเตอร์ของมอเตอร์ ข้อเสียคือความเร็วที่ได้เปลี่ยนแปลงตามโหลดไม่สามารถควบคุมแรงบิดได้ซึ่งทำให้ความเร็วที่ได้คลาดเคลื่อนจากค่าที่ต้องการดังแสดงในรูปที่ 2.13 และรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด กับความเร็วรอบเมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่

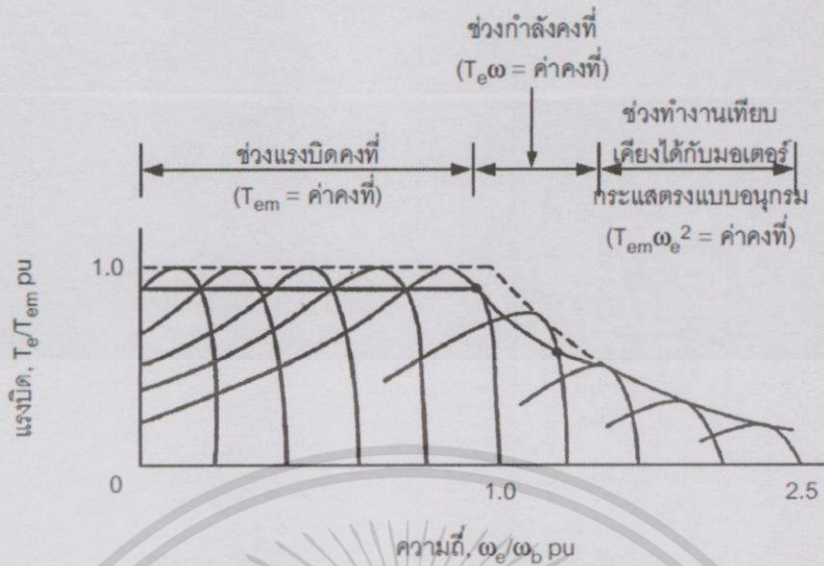
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด กับความเร็วรอบ ที่อัตราส่วน V/F คงที่

2. การควบคุมแบบ Flux Vector Control คือการควบคุมความเร็วโดยการควบคุมฟลักซ์แม่เหล็กภายในโดยอาศัยการป้อนกลับของกระแสและต้องทราบข้อมูลพารามิเตอร์ของมอเตอร์ซึ่งจะแก้ปัญหการควบคุมแรงบิดได้ดีกว่าการควบคุมแบบ V/F ซึ่งในช่วงความเร็วต่ำการควบคุมแบบ Flux Vector Control นี้ยังทำได้ไม่ด้นักเนื่องจากความไม่เป็นอุดมคติของสวิตช์กำลังและค่าผิดพลาดของพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่เปลี่ยนไป

3. การควบคุมแบบ Vector Control (Field-Oriented Control) คือการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำกระแสสลับ ใช้วิธีการควบคุมลักษณะเดียวกับมอเตอร์กระแสตรง โดยจะจ่ายกระแส 2 ส่วน แบ่งเป็น กระแสส่วนที่สร้างฟลักซ์แม่เหล็ก และกระแสส่วนที่สร้างแรงบิด โดยการควบคุมจะทำบนแกนอ้างอิงที่หมุนไปพร้อมกับ เวกเตอร์ฟลักซ์ของโรเตอร์ ซึ่งไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรงในทางปฏิบัติ ทำให้ต้องใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์คำนวณหาค่าแทน ซึ่งการควบคุมแบบ Vector Control (Field-Oriented Control) ต้องทราบข้อมูลพารามิเตอร์ของมอเตอร์ และต้องมีเซ็นเซอร์วัดความเร็ว หรือตำแหน่ง ระบบนี้จึงเหมาะกับงานที่ต้องการความแม่นยำ และความเร็วในการตอบสนองสูง



รูปที่ 2.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด กับความเร็วรอบของ Vector Control

4. การควบคุมแบบ Direct Torque Control (DTC) เป็นการควบคุมโดยตรงไม่ผ่านการทำ PWM อินเวอร์เตอร์จะทำการคำนวณค่าฟลักซ์ทางด้านสเตเตอร์และค่าแรงบิดโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์จากนั้นก็ให้นำค่าที่ได้ไปทำการเปรียบเทียบกับค่าตั้ง (Setting) ของทั้งฟลักซ์และแรงบิดผ่านตัวเปรียบเทียบแบบฮิสเตอร์รีซิสสถานะของสัญญาณขาออกของตัวเปรียบเทียบแบบฮิสเตอร์รีซิสจะทำให้เราทราบว่าจำเป็นต้องเพิ่มหรือลดฟลักซ์และแรงบิด ซึ่งข้อมูลนี้ก็จะถูกนำไปใช้ในการเลือกรูปแบบการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์จากตาราง Look-up เพื่อให้ได้แรงดันสเตเตอร์ที่เหมาะสมที่ทำให้ฟลักซ์และแรงบิดเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่ต้องการได้โดยที่การควบคุม DTC ทำการควบคุมแรงบิดโดยตรงโดยจำเป็นต้องใช้ข้อมูลพารามิเตอร์ของมอเตอร์ แต่การควบคุมแบบ DTC จะต้องระวังการทำงานในย่านความเร็วต่ำซึ่งเป็นย่านที่แรงดันตกคร่อมความต้านทานสเตเตอร์มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของทั้งฟลักซ์และแรงบิดค่อนข้างมาก

5. การควบคุมแบบ Sensorless Vector Control มีคุณสมบัติการควบคุมแรงบิดและความเร็วใกล้เคียงกับระบบควบคุมเวกเตอร์โดยไม่ต้องติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร็วโดยความเร็วของมอเตอร์จะถูกคำนวณโดยอาศัยแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำหากค่าความเร็วมอเตอร์ในตัวแบบจำลองมีค่าถูกต้องสัญญาณกระแสแรงดันและอื่นๆที่คำนวณได้ก็จะตรงกับค่าที่คำนวณได้ในทางกลับกันหากค่าความเร็วมอเตอร์ในตัวแบบจำลองผิดพลาดก็จะส่งผลทำให้ค่ากระแสแรงดันและอื่นๆที่คำนวณได้คลาดเคลื่อนไปจากค่าที่วัดได้จริงเราสามารถนำค่าความผิดพลาดเหล่านี้ในการปรับเปลี่ยนค่าความเร็วให้มีค่าถูกต้องได้ แต่ยังมีปัญหาในการใช้งานในขณะที่มอเตอร์ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ช่วงที่แรงบิดเป็นลบ) ในย่านความเร็วต่ำซึ่งเป็นภาวะการทำงานที่ความถี่แรงดันที่เราจ่ายให้มือน้อยมากผลกระทบจากความไม่เป็นอุดมคติของสวิตช์กำลังและความคลาดเคลื่อนของค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์จะทำให้ระบบไม่สามารถควบคุมแรงบิดได้ดีและอาจขาดเสถียรภาพได้ด้วยจากการที่ระบบควบคุม Flux Vector Control, Vector Control และ Direct Torque Control จำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องจึงมีการพัฒนาระบบการหาค่าพารามิเตอร์อัตโนมัติ (Parameter Auto Tuning) โดยก่อนใช้งานอินเวอร์เตอร์เราจะให้อินเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดที่เรียกว่า Auto Tuning ซึ่งอินเวอร์เตอร์จะทำการจ่ายกระแสและแรงดันไปทดสอบมอเตอร์ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะคล้ายๆกับการทดสอบไร้โหลด (No Load Test) และยึดโรเตอร์ (Lock Rotor Test) และนำค่าแรงดันและกระแสมาประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ด้วยตัวประมวลผล ภายในอินเวอร์เตอร์และเก็บข้อมูลไว้ในหน่วยความจำเพื่อใช้งานต่อไปโดยทั่วไปแล้วการทำ Auto Tuning นี้จะทำในสถานะที่มอเตอร์ไม่หมุนแต่ในบางกรณีก็มีการหาค่าพารามิเตอร์ทางกลเช่นค่าความเฉื่อยของระบบด้วยเพื่อใช้ในการกำหนดค่าตัวควบคุม PI ในวงรอบควบคุมความเร็ว (Speed Loop) การทำ Auto Tuning ก่อนใช้งานจริงเพียงครั้งเดียวในลักษณะที่กล่าวมาข้างต้นนี้เราอาจเรียกได้ว่าเป็นการทำ Auto Tuning แบบ Off line อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงแล้วค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์จะเปลี่ยนแปลงตามสภาวะการใช้งานเช่นความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิค่าความเหนียวนำเปลี่ยนแปลงตามระดับฟลักซ์แม่เหล็ก เป็นต้น ดังนั้นในขณะที่ใช้งานจริงหากอุณหภูมิของมอเตอร์เปลี่ยนไปก็อาจทำให้ค่าความต้านทานทั้งทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์มีค่าเปลี่ยนไปได้ถึง 20 % ซึ่งจะทำให้คุณสมบัติการควบคุมของอินเวอร์เตอร์ด้อยลงเช่นทำให้เกิดค่าผิดพลาดของความเร็วและแรงบิดเป็นต้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวก็มีการพัฒนาการทำ Auto Tuning แบบ On Line ซึ่งอินเวอร์เตอร์จะทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องตลอดเวลาที่อินเวอร์เตอร์ทำงาน

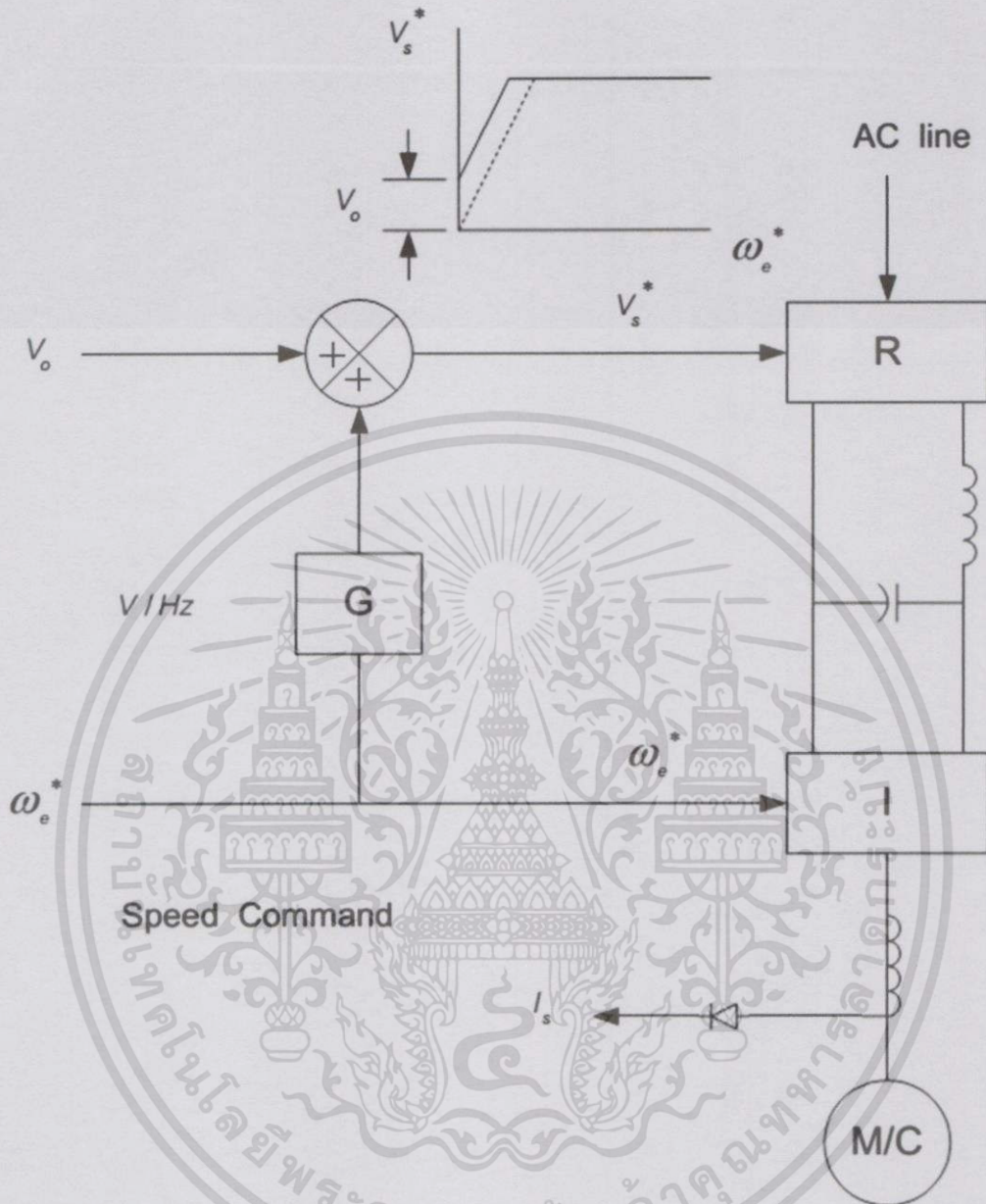
2.4 ทฤษฎีการควบคุมแบบ V/f constant

การควบคุมแบบ V/f constant เป็นที่นิยมใช้ในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนียวนำด้วยการทำงานแบบ open-loop volts/hertz ดังแสดงในรูปที่ 2.16 วงจรกำลังประกอบด้วย วงจรเรียงกระแสแบบควบคุมสามเฟส (Phase-Control Rectifier) โดยมีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสป้อนเข้า, วงจรกรองกระแสแบบ LC Filter และ Six step Inverter โดยความถี่ ω_e^* คือ ตัวแปรอ้างอิง และมีค่าเข้าใกล้ความเร็วมอเตอร์เมื่อทำงานที่ความถี่ slip ต่ำ

การควบคุมแบบ Volts/hertz จะใช้กระแสอ้างอิง (Rectifier Voltage Command) V_s^* ที่สร้างขึ้นแล้วผ่านอัตราขยาย Volts/hertz ของ G การทำงานแบบนี้จะทำให้ Air gap flux ของมอเตอร์ มีค่าประมาณเท่ากับอัตราส่วนของ $\frac{V_s}{\omega_e}$ ดังนั้นแรงบิดต่อกระแสทางด้านสเตเตอร์ มีค่าสูงสุด

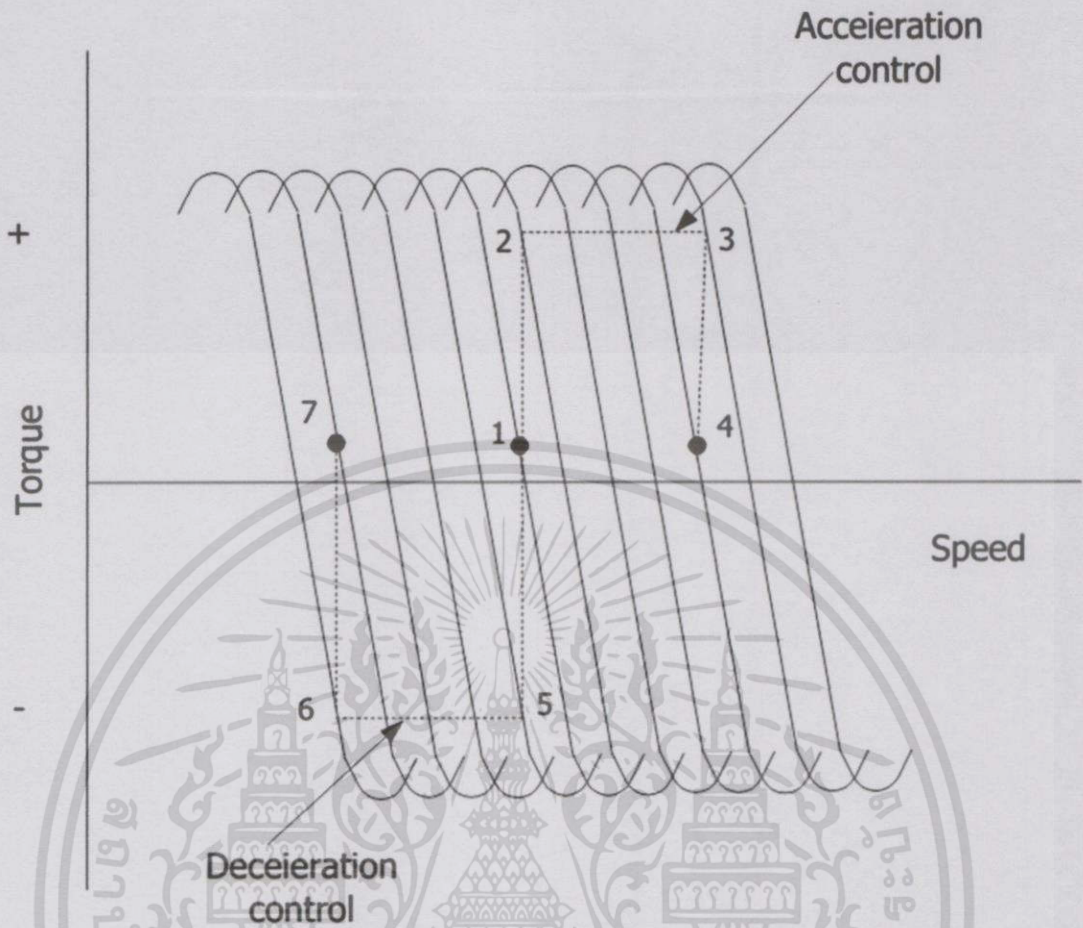
คล้ายกับเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อความถี่เข้าใกล้ศูนย์ความเร็วของมอเตอร์ก็ใกล้ศูนย์เช่นกัน แรงดันทางด้านขดลวดสเตเตอร์จะเข้าสู่ศูนย์ เพราะตกคร่อมความต้านทานของสเตเตอร์เกือบทั้งหมด เมื่อป้อน V_o เพิ่มเข้ามาเพื่อให้เกินความต้านทานของสเตเตอร์ทำให้สนามแม่เหล็กของช่องว่างอากาศ และแรงบิดเต็มพิกัด ถ้าภาระแรงบิดเพิ่มขึ้น ค่าสลิปจะเพิ่มขึ้นจนถึงสมดุล ทำให้แรงบิดมอเตอร์เท่ากับแรงบิดของภาระ

เมื่อเพิ่มความเร็วอ้างอิงเกินความถี่พื้นฐานของมอเตอร์ Rectifier Voltage จะเข้าสู่สถานะอิ่มตัวและมอเตอร์จะทำงานในช่วงการลดค่าสนามแม่เหล็ก ซึ่งแรงบิดที่สร้างจะลดลงในขณะที่กระแสทางสเตเตอร์เท่าเดิม การควบคุมแบบนี้ ทำให้เกิดการกระเพื่อมของแหล่งจ่ายกระแสสลับและความต้านทานตกคร่อม ทำให้ ฟลักซ์ในช่องว่างอากาศกระเพื่อมตามด้วย โดยสามารถป้องกันได้ด้วยการ Close-loop ในวงจร Rectifier



รูปที่ 2.16 การทำงานแบบ open-loop volts/hertz

ในรูปที่ 2.17 แสดงคุณสมบัติของการเร่งและการหน่วงความเร็วขณะทำงานที่สภาวะคงตัว (ตั้งจุดที่ 1) ถ้าเพิ่มความเร็วอ้างอิงขึ้นเป็นขั้นๆ จะทำให้สลิปเกินแรงบิดสูงสุด และมอเตอร์จะเสียเสถียรภาพ ในทางเดียวกันระบบจะไม่มีเสถียรภาพถ้าลดความเร็วอ้างอิงลงเป็นขั้นๆ ดังนั้นระหว่างที่มีการเร่ง และหน่วงความเร็ว ต้องปรับความถี่อ้างอิงให้สอดคล้องกับความเร็วเพื่อไม่ให้ค่าสลิปเกินแรงบิดสูงสุด การควบคุมแบบปรับขีดจำกัดกระแสทำให้การเร่งและการหน่วงเป็นไปได้ดังรูปที่ 2.17

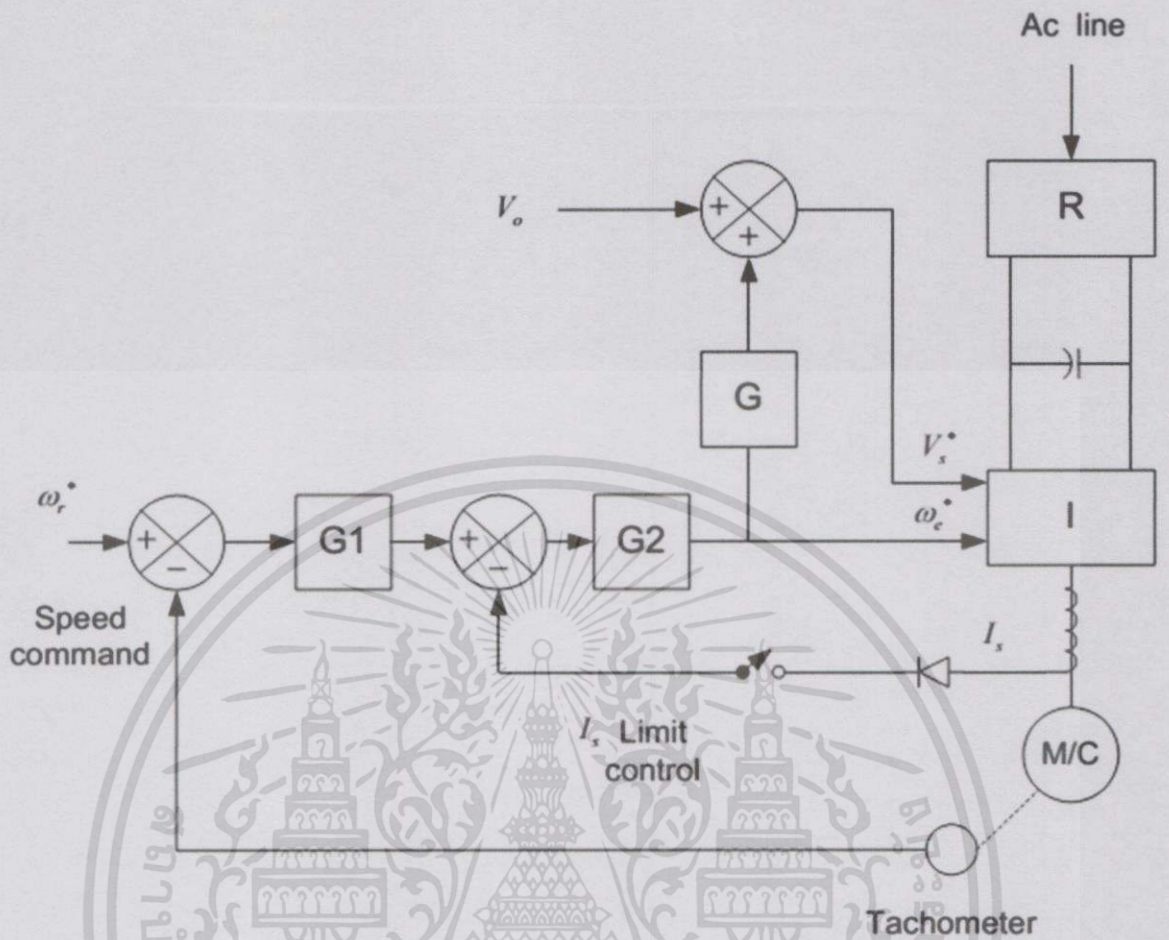


รูปที่ 2.17 acceleration and deceleration characteristics

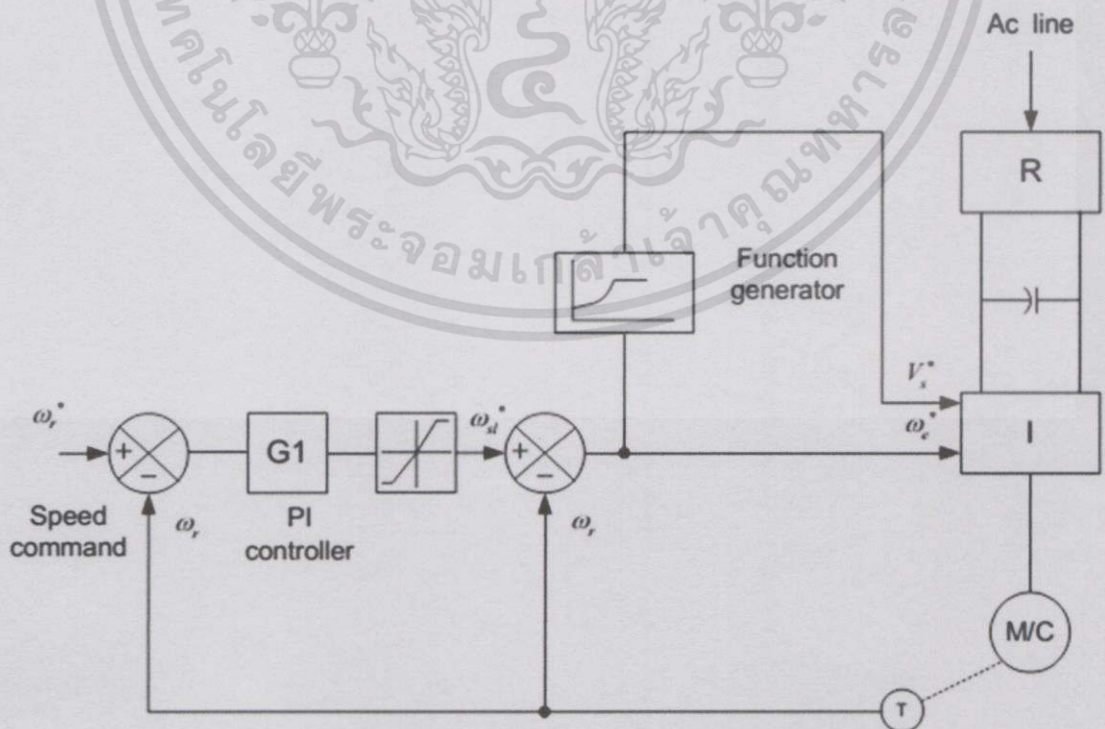
ในกรณีการเพิ่มความถี่อ้างอิงเป็นขั้นๆ สลิปจะมีค่าเพิ่มขึ้นและกระแสเดเตอร์จะเพิ่มขึ้นจนถึงขีดจำกัด ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงจากจุดที่ 1 ไปยังจุดที่ 2 ในกราฟคุณสมบัติความเร็ว-แรงบิด จากนั้นความถี่จะเพิ่มขึ้นในอัตราคงที่เพื่อให้แรงบิดคงที่ตลอดช่วงที่ 2 ถึง 3 ระหว่างจุดที่ 3 และจุดที่ 4 กระแสจะลดต่ำกว่าขีดจำกัดและถึงสภาวะสมดุลของแรงบิดในจุดที่ 4 ซึ่งสลิปมีค่าต่ำลง

ในกรณีการลดความถี่อ้างอิงเป็นขั้นๆ การเปลี่ยนจุดทำงานไปตามเส้นทางจากจุดที่ 1-5-6-7 ดังรูปที่ 2.17 ระหว่างที่การหน่วงความเร็วความถี่สเตรเตอร์จะลดลงต่ำกว่าความเร็วมอเตอร์และพลังงานไฟฟ้าจากมอเตอร์จะถูกป้อนเข้าสู่ส่วนเชื่อมต่อกระแสตรงทำให้แรงดันเพิ่มขึ้น ถ้าตัวเรียงกระแสไม่สามารถรับกระแสย้อนกลับได้ จำเป็นต้องมีตัวต้านทานต่อกับสวิทช์ที่ทำหน้าที่เป็นวงจรสับเพื่อรับพลังงานเบรกแบบไดนามิกและเป็นการควบคุมแรงดันส่วนเชื่อมต่อกระแสตรงไม่ให้สูงเกินไป

การควบคุมแบบ Open-loop นี้ทำให้ความเร็วมีการกระเพื่อมจนยอมรับไม่ได้ก็สามารถควบคุมแบบ Closed-loop Control ดังแสดงในรูปที่ 2.18 ได้ ค่าผิดพลาดของลู่อสัญญาณความเร็วจะเป็นสัญญาณควบคุมความถี่ PWM Inverter โดยผ่าน Current-Limit Controller ดังแสดงในรูป



รูปที่ 2.18 Closed-loop volts/hertz speed control



รูปที่ 2.19 Constant volts/hertz speed control with slip regulation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุม Volt/hertz อีกชนิดหนึ่งคือการควบคุมสลิป ดังแสดงในรูปที่ 2.19 ค่าผิดพลาดที่เกิดจากลูปที่ควบคุมความเร็วจะสร้างสลิปอ้างอิงโดยผ่าน PI Controller และ Limiter ค่าสลิปอ้างอิงจะรวมกับ สัญญาณความเร็วเพื่อสร้างความเร็วอ้างอิง ความถี่อ้างอิงที่ได้จะสร้างแรงดันอ้างอิงโดยผ่าน Volt/hertz Function Generator ซึ่งรวมเข้าด้วยกันกับการชดเชยแรงดันที่ความถี่ต่ำไว้ด้วยเนื่องจาก Slip แปรผันตามแรงบิดมอเตอร์ ดังนั้น เราสามารถควบคุมแรงบิดภายใต้การควบคุมของลูปความเร็วได้ ซึ่งต่างจากวิธีก่อนที่ Torque limit control สามารถทำได้โดยอ้อมจาก Stator Current Limit Control ข้อดีของวิธีนี้คือไม่ต้องใช้เซนเซอร์กระแสราคาแพง แต่ใช้สัญญาณความเร็วในการควบคุมทั้ง 2 ลูป

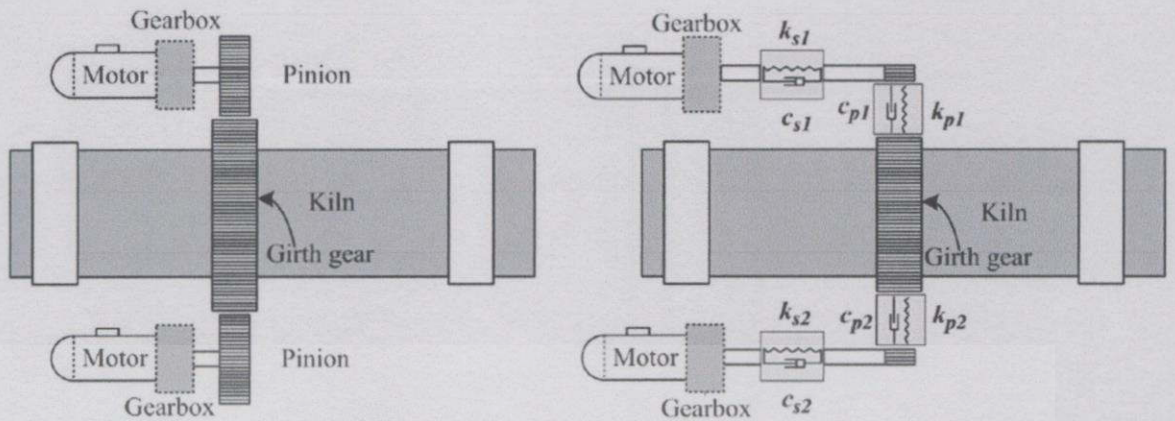
ในการเปลี่ยนแปลงความเร็วอ้างอิงแบบเพิ่มขึ้นเป็นขั้น มอเตอร์จะเร่งความเร็วอย่างอิสระโดยสลิปถูกจำกัดโดยแรงบิดสูงสุดและที่สภาวะคงตัว สลิปจะขึ้นอยู่กับแรงบิดของภาระ ถ้าความเร็วอ้างอิงลดลง ค่าสลิปติดลบ และมอเตอร์จะอยู่ในสภาวะ Braking mode

หากควบคุมสลิปให้คงที่ได้ ค่าผิดพลาดที่เกิดจากลูปความเร็วจะใช้เพียงแค่แรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์อย่างเดียว การเปลี่ยนแปลงในรูปอัตราส่วน Volt/hertz อาจทำให้ ฟลักซ์ในช่องว่างอากาศ และแรงบิดเปลี่ยนแปลงไปด้วยที่ light-load การลด ฟลักซ์ในช่องว่างอากาศ จะทำให้ประสิทธิภาพดีขึ้น เพราะเป็นการลดการสูญเสียในแกน กับการสูญเสียในเส้นลวดลง ข้อเสียคือ มีการตอบสนองของฟลักซ์ช้าลง ทำให้มอเตอร์ขาดเสถียรภาพ เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของแรงบิดของภาระ แบบทันทีทันใด

2.5 การประยุกต์ใช้การควบคุมสำหรับชุดขับเคลื่อนด้วยภาระทางกลเดี่ยว

2.5.1 ลักษณะการทำงานของเตาเผา

เตาเผาเป็นถังเหล็กทรงกระบอกยาวประมาณ 100 เมตรและเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เมตรหมุนด้วยความเร็วระหว่าง 1-4 รอบ/นาที เพื่อจะผลิตปูนเม็ดเนื่องจากมีขนาดใหญ่ การหมุนของเตาเผาใช้ระบบส่งกำลังเฉพาะโครงสร้างที่สำคัญสำหรับเตาเผาหมุนคือระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้าคู่แต่ในกรณีเตาเผาขนาดเล็กอาจเป็นระบบขับเคลื่อนเดี่ยวในระบบขับเคลื่อนคู่เตาเผาหมุนโดยใช้สองมอเตอร์ซึ่งปัจจุบันระบบส่วนใหญ่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเนื่องจากค่าบำรุงรักษาต่ำมากเทียบกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทำให้ระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับถูกใช้งานอย่างกว้างขวางอีกทั้งการควบคุมแรงบิดหรือความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับจะทำได้โดยการปรับความเร็วรอบอินเวอร์เตอร์ที่ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์กำลังซึ่งทำได้ง่ายมอเตอร์มีความเร็วเชิงโรตัสสูง (เช่น 1500 รอบ/นาที) แต่ความเร็วที่เตาเผาต้องการอยู่ระหว่าง 1-4 รอบ/นาที จึงต้องอัตราทดรอบสูงโดยขึ้นต้นความเร็วถูกลดลงโดยเกียร์ทดรอบที่ต่อกับเครื่องจักรไปยังเฟืองเกียร์ผ่านเพลาลูกปืนสองเฟืองส่งแรงบิดไปยังเตาเผาผ่านล้อเฟืองรอบนอกเตาเผาแผนผังโครงสร้างทางกลแสดงในรูปที่ 2.20



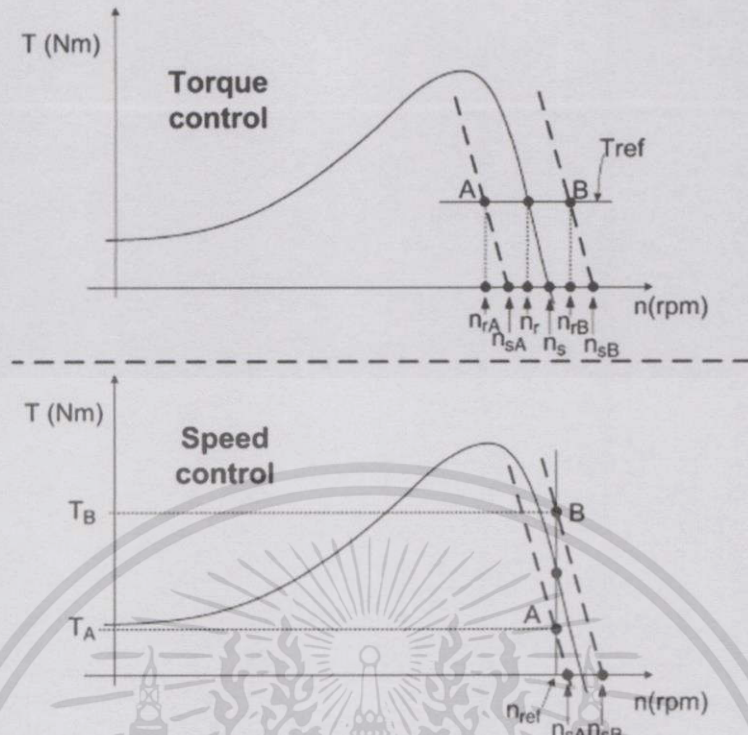
รูปที่ 2.20 ชุดขับเคลื่อนเตาเผาซีเมนต์

เหตุผลสำคัญของการใช้ระบบขับเคลื่อนคู่แทนระบบขับเคลื่อนเดี่ยวคือ ความสามารถของความพร้อมสูงกว่าการใช้สองตัวที่กีดก้างทางระบบขับเคลื่อนไฟฟ้าที่น้อยกว่าเพื่อลดปัญหาการเกิดโอเวอร์โหลดและเพื่อป้องกันการหยุดการทำงานของเตาเผาโดยไม่คาดคิดระบบขับเคลื่อนคู่ทำให้เมื่อเกิดมอเตอร์ตัวหนึ่งล้มเหลวมอเตอร์อีกตัวยังคงสามารถหมุนเตาเผาได้โดยไม่ต้องกำหนดให้ทั้งสองระบบขับเคลื่อนแตกต่างกันอย่างเหมาะสมเพื่อสามารถรองรับโหลดเมื่อเกิดกรณีมอเตอร์ตัวหนึ่งเกิดความผิดปกติทั้งนี้มอเตอร์ทั้งสองตัวจะถูกขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ที่แยกจากกันและต้องพิจารณาในระบบกำลังดังกล่าวต้องระวังการสั้นสะเทือนแรงบิดทางกลที่แม้ว่ามีแอมพลิจูดเพียงเล็กน้อยก็อาจส่งผลให้เกิดความเสียหายอย่างร้ายแรงเนื่องจากปรากฏการณ์เรโซแนนซ์และในขั้นตอนการหมุนซึ่งควรจะรักษาความปลอดภัยโดยวิธีการนำระบบควบคุมมาประยุกต์ใช้นอกเหนือจากการแบ่งภาระทางกลอย่างเท่ากันระหว่างสองระบบขับเคลื่อนยังต้องยับยั้งการเกิดปรากฏการณ์ทรานเซียนทางกลอีกด้วย

2.5.2 วิธีการควบคุมที่แพร่หลาย

2.5.2.1 การขับมอเตอร์เดี่ยว

การควบคุมแรงบิดและความเร็วเป็นที่นิยมตามรูปแบบที่จะจ่ายให้มอเตอร์กระแสสลับเดี่ยวซึ่งเป็นพื้นฐานในการควบคุมด้วยการเปลี่ยนความถี่ (Variable Frequency Drives, VFD) โดยผลของการควบคุมความเร็วและแรงบิดที่ใช้การเปลี่ยนแปลงความถี่ในการจ่ายให้ภาระทางกลแสดงในรูปที่ 2.21



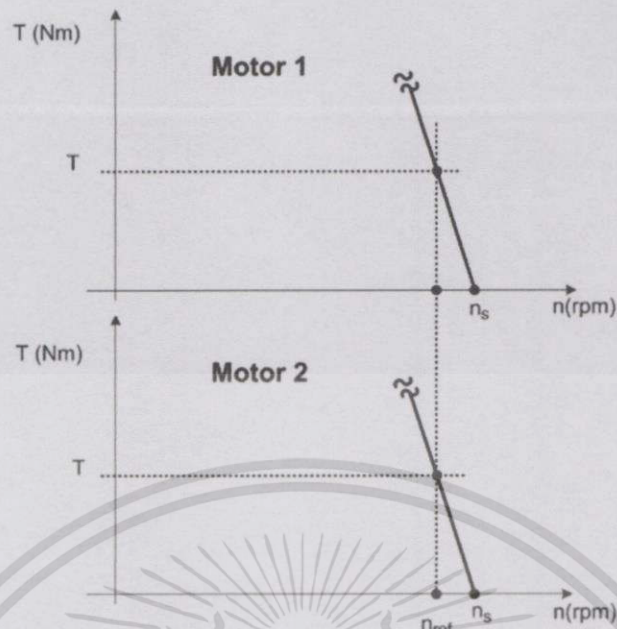
รูปที่ 2.21 การทำงานของชุดขับเดี่ยวโดยการควบคุมแรงบิดและความเร็วด้วยการเปลี่ยนความถี่

ในกรณีของการควบคุมแรงบิดทางไฟฟ้าของมอเตอร์สามารถปรับด้วยการเปลี่ยนแปลงความถี่ของแหล่งจ่ายแรงดันการทำงานของมอเตอร์ ถูกปรับจากจุด A ไปยังจุด B ซึ่งขึ้นอยู่กับภาระทางกล โดยต้องพยายามรักษาแรงบิดทางไฟฟ้าให้คงที่ในทางกลับกันการควบคุมความเร็วจริงนั้นจะเท่ากับความเร็วอ้างอิง โดยความเร็วจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระทางกล โดยเปลี่ยนจุดทำงานระหว่างจุด A และจุด B

โดยสรุปเราสามารถกำหนดจุดทำงานของมอเตอร์ในกรณีการขับมอเตอร์เดี่ยวโดยการเลือกการใส่ภาระทางกลที่เพลลาของมอเตอร์

2.5.2.2 การขับมอเตอร์คู่ (การขับมอเตอร์ทั่วไป)

การขับชุดขับกระแสสลับคู่ และอินเวอร์เตอร์สามขาด้วยการใช้อินเวอร์เตอร์ตัวเดียว ดังแสดงในรูปที่ 2.22 ด้วยใช้งานชุดขับคู่กับแหล่งจ่ายแรงดันปกติ จะแสดงว่ามอเตอร์ถูกจ่ายด้วยแรงดันขนาดและความถี่เดียวกัน โดยมอเตอร์ทั้งสองจะถูกให้พลังงานเท่ากัน และให้ประมาณค่าคุณลักษณะของมอเตอร์เท่ากัน การควบคุมความเร็วใช้กับสองมอเตอร์ และแรงบิดทางไฟฟ้าที่ถูกสร้างเท่ากัน ในกำลังไฟฟ้าที่แบ่งเท่ากันดังรูปที่ 2.22 โดยการพิจารณาจะเห็นว่าการกระจายกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์สองตัวเท่ากัน โดยคำนึงถึงเฉพาะความเร็วของมอเตอร์ แต่ข้อสรุปนี้ไม่สามารถใช้ได้ในกรณีที่มอเตอร์สองตัวขับด้วยสองอินเวอร์เตอร์



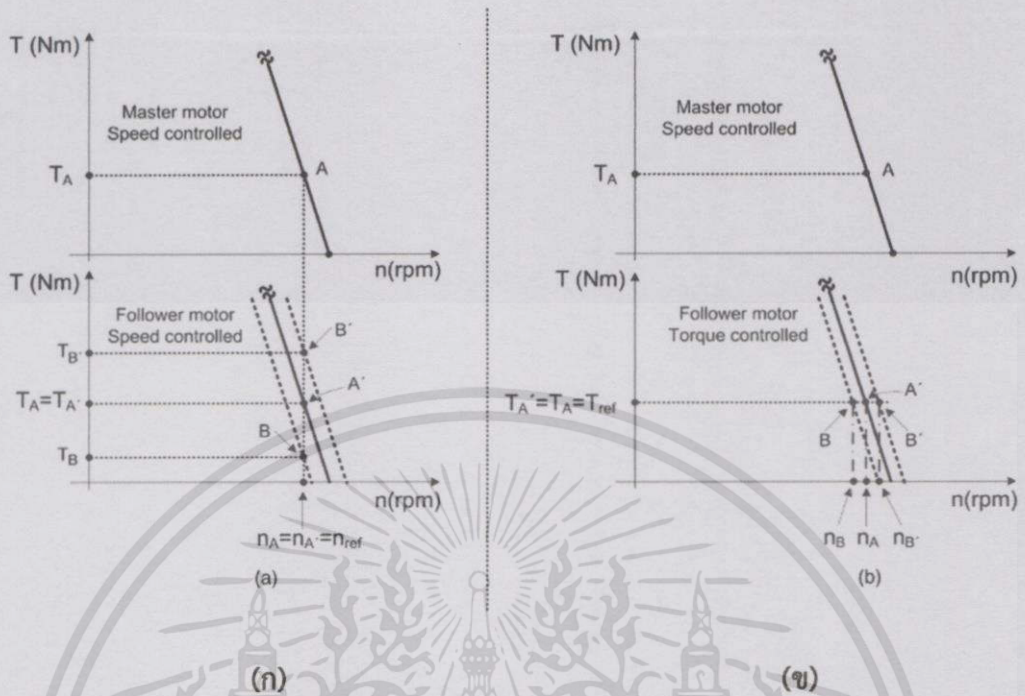
รูปที่ 2.22 การทำงานของชุดขับเคลื่อนด้วยแหล่งจ่ายแรงดันปกติ

2.5.2.3 การขับมอเตอร์คู่ (ประยุกต์ใช้กับเตาเผาปูนซีเมนต์)

จากคำอธิบายข้างต้น เตาเผาปูนซีเมนต์จะหมุนโดยใช้อินเวอร์เตอร์สองตัวแยกกัน เพื่อจ่ายให้สองมอเตอร์เพื่อใช้งาน และลดความเป็นไปได้ในการเกิดความผิดปกติโดยการหยุดของเตาเผา เนื่องจากความต้องการของความเร็วเตาเผาจะถูกกำหนดให้คงที่ตามชนิดและปริมาณของปูนที่ผลิต ชุดขับหนึ่งตัวต้องกำหนดความเร็ว ส่วนชุดขับอีกตัวจะเลือกควบคุมความเร็วหรือแรงบิด

เมื่อพิจารณาระบบส่งกำลังของสองชุดเฟือง สองเพลลา และชุดเฟืองรอบเตา ภาระทางกลที่แตกต่างกันจะส่งไปยังเพลลาของมอเตอร์ เนื่องจากความแตกต่างประสิทธิภาพของเฟือง ความแตกต่างของความแข็งเพลลา ซึ่งแปรผันกับเฟืองที่ทำงานร่วมกัน หรือเนื่องจากการตั้งศูนย์การทำงานคู่โดยควบคุมความเร็วและความเร็วอ้างอิงเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 2.23

ที่จุด A สอดคล้องกับการทำงานของชุดขับที่หนึ่ง (ชุดขับหลัก) และจุด A' ที่จุดทำงานที่ต้องการของชุดขับที่สอง (ชุดขับตาม) เพื่อให้ภาระของมอเตอร์เท่ากัน เนื่องจากการแยกจ่ายแรงดันจากสองอินเวอร์เตอร์ แรงบิดทางไฟฟ้าของชุดขับตาม จะผันผวนระหว่างจุด B และจุด B' ที่กรณีของความแตกต่างในทันทีของภาระทางกล ดังรูปที่ 2.23 (ก) ในทำนองเดียวกัน การควบคุมแรงบิดของชุดขับตามอาจส่งผลให้ความเร็วของมอเตอร์เกิดการผันผวนได้ ดังรูปที่ 2.23 (ข) จากข้อสังเกต ความแตกต่างเพียงเล็กน้อยของความเร็วของสองชุดขับ อาจทำให้เฟืองตัวเล็กด้านหน้าเกิดความเครียดและหลุดล่อน ปัญหานี้ทำให้การศึกษาเปรียบเทียบเกี่ยวกับการควบคุมดังกล่าวถูกตระหนัก การยืนยันรับประกันการกระจายภาระเท่ากัน ในเวลาเดียวกันกับช่วงทรานเซียน เกิดจากความแตกต่างของระบบส่งกำลังทางกลของระบบ



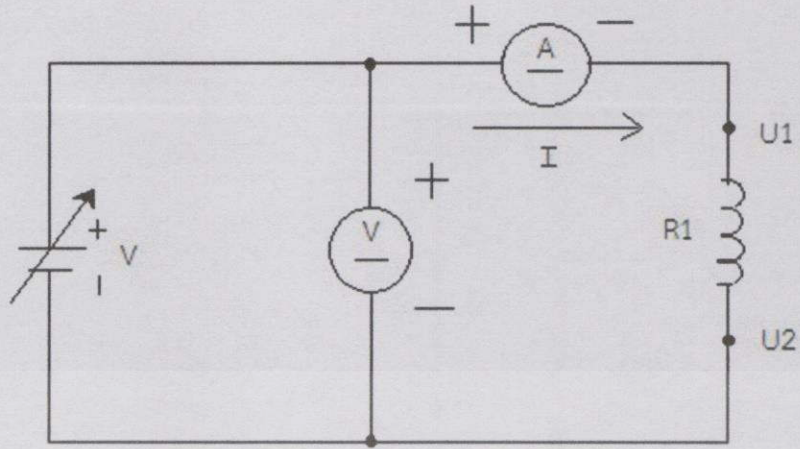
รูปที่ 2.23 การทำงานของมอเตอร์คู่ ในแบบนำและตาม ด้วยการป้อนแรงดันแยกอินเวอร์เตอร์
 (ก) ควบคุมความเร็วทั้งชุดขับนำและชุดขับตาม (ข) ควบคุมความเร็วในชุดขับนำและควบคุมแรงบิด
 ในชุดขับตาม

2.6 การหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจะหาได้จากผลการทดสอบมอเตอร์ในลักษณะต่างๆได้แก่ การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงของขดลวดสเตเตอร์ (R_1) การทดสอบแบบไม่มีภาระทางกล (No-Load) และการทดสอบแบบยัดโรเตอร์ (Blocked-rotor)

2.6.1 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงของขดลวดมอเตอร์ (R_1)

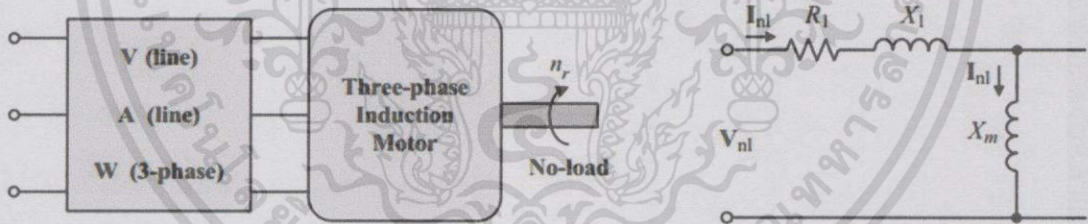
การทำ VI-Method เป็นเทคนิคในการหาค่าความต้านทานที่มีค่าต่ำของขดลวดของมอเตอร์ ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้หาค่าความต้านทานของ Stator resistance (R_1) ดังแสดงในรูปที่ 2.24 ทำการปรับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงป้อนเข้าเพื่อเก็บข้อมูล แรงดัน (V) และกระแส (I) นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ I ค่าของ Slope ระหว่าง V กับ I เป็นค่าความต้านทาน R_1 ในการทดสอบห้ามปรับค่ากระแสจนเกินค่าพิกัด



รูปที่ 2.24 วงจรวัดค่าความต้านทานสเตเตอร์

2.6.2 การทดสอบแบบไม่มีภาระทางกล (No-Load Test)

ในลักษณะเดียวกันกับการทดสอบแบบเปิดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า การทดสอบมอเตอร์แบบนี้จะได้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับค่ากระแสกระตุ้น และค่าสูญเสียขณะไม่มีภาระทางกล การทดสอบจะกระทำที่พิกัดความถี่และแรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่สมดุลโดยที่มอเตอร์ไม่มีภาระดังรูปที่ 2.25 (ก) และให้มอเตอร์หมุนไประยะเวลาหนึ่ง จากนั้นทำการบันทึกค่า V, A และ w ที่แรงดันไฟฟ้าพิกัด โดยกำหนดให้ P_{nl} เป็นกำลังไฟฟ้าสามเฟส V_{nl} เป็นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสและ I_{nl} เป็นกระแสไฟฟ้าต่อเฟส



(ก) วงจรการทดสอบ

(ข) วงจรสมมูลต่อเฟส

รูปที่ 2.25 การทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบไม่มีภาระทางกล

ขณะไม่มีภาระทางกล กระแสในโรเตอร์จะมีค่าเพียงเล็กน้อยเพื่อใช้สำหรับสร้างแรงบิดที่สามารถเอาชนะความเสียดทานและแรงต้านลม (Friction and windage) จะเห็นได้ว่าค่าสูญเสีย I^2R_2 ในโรเตอร์ ขณะไม่มีภาระจะมีค่าน้อย (ละทิ้งได้) แต่เนื่องจากวงจรแม่เหล็กของมอเตอร์จะมีช่องอากาศอยู่ทำให้ค่ากระแสกระตุ้นในสเตเตอร์มีค่าสูงกว่าปกติทำให้จะต้องคำนึงถึงค่าสูญเสีย I^2R_1 ในสเตเตอร์ด้วย ดังนั้นขณะไม่มีภาระทางกลความเร็วมอเตอร์จะมีค่าใกล้เคียงซิงโครนัส ค่า s มีค่าใกล้ศูนย์จะมีผลทำให้วงจรสมมูลด้านขวามือ (ส่วนโรเตอร์) ของมอเตอร์ มีสภาพเปิดวงจร ดังรูปที่ 2.25 (ข)

ในการทดสอบค่าสูญเสียจากการหมุนและค่าสูญเสียในแกนเหล็ก P_r หาได้จาก

$$P_r = P_{nl} - 3I_{nl}^2 R_1 \quad (2.11)$$

ถ้าในกรณีที่สามารรถทราบค่าสูญเสียจากความเสียดทานและแรงต้านลม P_{fw} ค่าสูญเสียในแกนเหล็กสามารถพิจารณาได้จาก

$$P_{core} = P_r - P_{fw} \quad (2.12)$$

และค่า Core-loss resistance จะประมาณค่าได้จาก $R_c \approx \frac{3V_{nl}^2}{P_{core}}$ ซึ่งในทางปฏิบัติไม่จำเป็นต้อง

พิจารณาหาค่า R_c ในวงจรสมมูล จากรูปที่ 2.25 (ข) จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานเสมือนที่ปรากฏในขณะที่ทดสอบไม่มีภาระทางกลจะมีค่าประมาณ

$$X_{nl} \approx X_1 + X_m \quad (2.13)$$

ค่า X_{nl} จะพิจารณาได้จากค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน (Q_{nl}) ซึ่งได้จากข้อมูลทดสอบดังนี้

$$Q_{nl} = \sqrt{S_{nl}^2 - P_{nl}^2} \quad (2.14)$$

โดยที่ $S_{nl} = 3V_{nl}I_{nl}$ และค่า X_{nl} จะคำนวณได้จาก

$$X_{nl} = \frac{Q_{nl}}{3I_{nl}^2} \approx \frac{V_{nl}}{I_{nl}} \quad (2.15)$$

หรือสามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ของวงจรสมมูลดังนี้

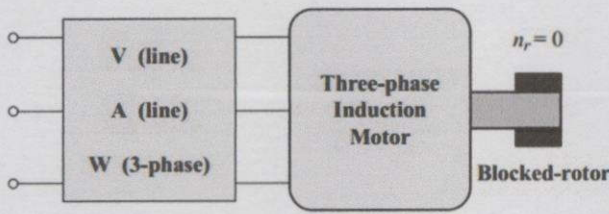
$$|Z_{nl}| = \frac{V_{nl}}{I_{nl}} \quad (2.16)$$

$$R_{nl} = \frac{P_{nl}}{3I_{nl}^2} \quad (2.17)$$

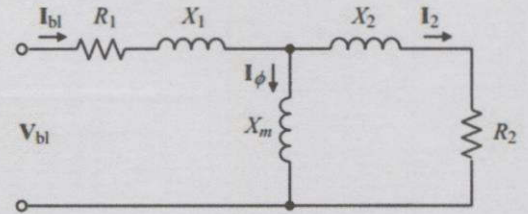
$$X_{nl} = \sqrt{Z_{nl}^2 - R_{nl}^2} \quad (2.18)$$

2.6.3 การทดสอบแบบยึดโรเตอร์ (Blocked-Rotor Test)

ในลักษณะเดียวกันกับการทดสอบแบบลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า การทดสอบนี้จะได้ข้อมูลค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์ โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่สมดุลให้กับมอเตอร์ในขณะที่โรเตอร์จะถูกล็อกไว้ไม่ให้หมุน ($S=1$) ดังรูปที่ 2.26



(ก) วงจรการทดสอบ



(ข) วงจรสมมูลต่อเฟส

รูปที่ 2.26 วงจรการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในลักษณะยึดโรเตอร์

ทำการบันทึกค่า V , A และ W โดยกำหนดให้ P_{b1} เป็นกำลังไฟฟ้าสามเฟส V_{b1} เป็นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟส I_{b1} เป็นกระแสไฟฟ้าต่อเฟสและ f_{b1} เป็นความถี่ที่ใช้ทดสอบ ในการทดสอบจะกระทำภายใต้เงื่อนไขที่เกิดค่ากระแสเสเตเตอร์และความถี่โรเตอร์ โดยประมาณเท่ากับค่าที่เกิดขึ้นในขณะทำงานในสภาพต่างๆ เช่น ถ้าสนใจคุณลักษณะในสภาพการทำงานที่ค่า $s \rightarrow 1$ นั่นคือ ตอนเริ่มต้นหมุนในการทดสอบจะใช้ความถี่ปกติ(พิกัด) f_{rated} และที่ค่ากระแสประมาณค่าที่เกิดขึ้นตอนเริ่มต้นหมุน(กระแสสูง) ถ้าต้องการพิจารณาคุณลักษณะในสภาพการทำงานปกติ(ที่พิกัด) ในการทดสอบจะปรับค่าแรงดันไฟฟ้าจนทำให้เกิดค่ากระแสในเสเตเตอร์เท่ากับพิกัด และความถี่ที่ใช้จะต้องลดลงด้วยเพื่อให้ใกล้เคียงกับความถี่ที่เกิดขึ้นจริงในโรเตอร์ ในการทดสอบตามมาตรฐานของ IEEE 112 จะแนะนำให้ทดสอบที่ความถี่ 25% ของความถี่พิกัด(มอเตอร์พิกัดต่ำกว่า 25 hp) ไม่จำเป็นต้องทดสอบในลักษณะนี้สามารถใช้ความถี่พิกัดได้) ความต้านทานเสมือนที่ได้จากการทดสอบยึดโรเตอร์ X_{b1} จะหาได้จากค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนขณะยึดโรเตอร์ดังนี้

$$Q_{b1} = \sqrt{S_{b1}^2 - P_{b1}^2} \quad (2.19)$$

โดยที่ $S_{b1} = 3V_{b1}I_{b1}$ และค่า X_{b1} ขณะยึดโรเตอร์ที่ความถี่พิกัดจะคำนวณได้จาก

$$X_{b1} = \left(\frac{f_{rated}}{f_{b1}} \right) \left(\frac{Q_{b1}}{3I_{b1}^2} \right) \quad (2.20)$$

ความต้านทานไฟฟ้าทำัดจากการทดสอบยึดโรเตอร์ R_{b1}

$$R_{b1} = \frac{P_{b1}}{3I_{b1}^2} \quad (2.21)$$

เมื่อ $S=1$

$$Z_{b1} = (R_1 + jX_1) + \frac{(R_2 + jX_2)jX_m}{R_2 + j(X_2 + X_m)} \quad (2.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $R_2 \ll X_m$

$$R_{b1} = R_1 + R_2 \left(\frac{X_m}{X_2 + X_m} \right)^2 \quad (2.23)$$

$$X_{b1} = X_1 + X_2 \left(\frac{X_m}{X_2 + X_m} \right) \quad (2.24)$$

$$R_2 = (R_{b1} - R_1) \left(\frac{X_2 + X_m}{X_m} \right)^2 \quad (2.25)$$

$$X_2 = (X_{b1} - X_1) \left(\frac{X_m}{X_m + X_1 + X_{b1}} \right) \quad (2.26)$$

แทนค่า $X_{n1} = X_1 + X_m$ จากสมการ 2.13 จะได้ว่า

$$X_2 = (X_{b1} - X_1) \left(\frac{X_{n1} - X_1}{X_{n1} - X_{b1}} \right) \quad (2.27)$$

จะเป็นได้ว่าค่า X_2 จะได้จากการวัดค่า X_{n1} และ X_{b1} ในการทดสอบและค่า X_1 ของสเตเตอร์ซึ่งยังไม่ทราบค่าและในทางปฏิบัติเป็นไปได้ยากที่จะวัดค่า X_1 อย่างไรก็ตามมาตรฐานของ IEEE 112 จะแนะนำให้ใช้ความสัมพันธ์ของค่า X_1 และ X_2 ดังรูปที่ 2.27 ซึ่งในกรณีที่ไมทราบระดับของ(Class) มอเตอร์ จะแนะนำให้กำหนดว่า X_1 และ X_2 มีค่าเท่ากัน ความสัมพันธ์ของค่า X_1 และ X_2 ในทางปฏิบัติอ้างอิงตามมาตรฐานของ IEEE Standard 112 แสดงดังรูปที่ 2.27

| Motor class | Description | Fraction of $X_1 + X_2$ | |
|-------------|-------------------------------------------------|-------------------------|-------|
| | | X_1 | X_2 |
| A | Normal starting torque, normal starting current | 0.5 | 0.5 |
| B | Normal starting torque, low starting current | 0.4 | 0.6 |
| C | High starting torque, low starting current | 0.3 | 0.7 |
| D | High starting torque, high slip | 0.5 | 0.5 |
| Wound rotor | Performance varies with rotor resistance | 0.5 | 0.5 |

รูปที่ 2.27 ความสัมพันธ์ของค่า X_1 และ X_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 ทฤษฎีการคำนวณ

2.7.1 วัดค่า \vec{V}_{ab} และ \vec{V}_{bc} เพื่อนำมาแปลงแกน \vec{V}_{ds} กับ \vec{V}_{qs}

สมการแปลงแกน

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_{ds} \\ \vec{V}_{qs} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{V}_{an} \\ \vec{V}_{bn} \\ \vec{V}_{cn} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

จากสมการ (2.28) จะได้

$$\vec{V}_{ds} = \frac{2}{3} \left(\vec{V}_{an} - \frac{1}{2} \vec{V}_{bn} - \frac{1}{2} \vec{V}_{cn} \right) \quad (2.29)$$

$$\vec{V}_{qs} = \frac{2}{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \vec{V}_{bn} - \frac{\sqrt{3}}{2} \vec{V}_{cn} \right) \quad (2.30)$$

กำหนดให้

$$\vec{V}_{ab} = \vec{V}_{bn} - \vec{V}_{an} \quad (2.31)$$

$$\vec{V}_{bc} = \vec{V}_{cn} - \vec{V}_{bn} \quad (2.32)$$

จากสมการที่ (2.29)

$$\vec{V}_{ds} = \frac{2}{3} \left(\vec{V}_{an} - \frac{1}{2} \vec{V}_{bn} - \frac{1}{2} \vec{V}_{cn} \right) \quad (2.33)$$

$$\vec{V}_{ds} = \frac{2}{3} \left(\vec{V}_{an} - \vec{V}_{bn} + \frac{1}{2} \vec{V}_{bn} - \frac{1}{2} \vec{V}_{cn} \right) \quad (2.34)$$

นำสมการที่ (2.31) และ (2.32) มาแทนใน (2.34) จะได้

$$\vec{V}_{ds} = \frac{2}{3} \left(\vec{V}_{ab} + \frac{1}{2} \vec{V}_{bc} \right) \quad (2.35)$$

$$\vec{V}_{ds} = \frac{2}{3} \vec{V}_{ab} + \frac{1}{3} \vec{V}_{bc} \quad (2.36)$$

จากสมการที่ (2.30)

$$\vec{V}_{qs} = \frac{2}{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \vec{V}_{bn} - \frac{\sqrt{3}}{2} \vec{V}_{cn} \right) \quad (2.37)$$

$$\vec{V}_{qs} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} (\vec{V}_{bn} - \vec{V}_{cn}) \quad (2.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\vec{V}_{qs} = \frac{1}{\sqrt{3}}(\vec{V}_{bn} - \vec{V}_{cn}) \quad (2.39)$$

นำสมการที่ (2.32) แทนใน (2.39) จะได้

$$\vec{V}_{qs} = \frac{1}{\sqrt{3}}\vec{V}_{bc} \quad (2.40)$$

2.7.2 วัดค่า \vec{I}_a และ \vec{I}_b เพื่อนำมาแปลงแกน \vec{I}_{ds} กับ \vec{I}_{qs}

$$\begin{bmatrix} \vec{I}_{ds} \\ \vec{I}_{qs} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{I}_a \\ \vec{I}_b \\ \vec{I}_c \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

จากสมการ (2.41) จะได้

$$\vec{I}_{ds} = \frac{2}{3} \left(\vec{I}_a - \frac{1}{2}\vec{I}_b - \frac{1}{2}\vec{I}_c \right) \quad (2.42)$$

$$\vec{I}_{qs} = \frac{2}{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\vec{I}_b - \frac{\sqrt{3}}{2}\vec{I}_c \right) \quad (2.43)$$

กำหนดให้

$$\vec{I}_a + \vec{I}_b + \vec{I}_c = 0 \quad (2.44)$$

$$\vec{I}_c = -(\vec{I}_a + \vec{I}_b) \quad (2.45)$$

จากสมการที่ (2.42)

$$\vec{I}_{ds} = \frac{2}{3} \left(\vec{I}_a - \frac{1}{2}\vec{I}_b - \frac{1}{2}\vec{I}_c \right) \quad (2.46)$$

นำสมการที่ (2.45) แทนใน (2.46) จะได้

$$\vec{I}_{ds} = \frac{2}{3} \left(\vec{I}_a - \frac{1}{2}\vec{I}_b - \frac{1}{2}(-(\vec{I}_a + \vec{I}_b)) \right) \quad (2.47)$$

$$\vec{I}_{ds} = \frac{2}{3} \left(\vec{I}_a - \frac{1}{2}\vec{I}_b + \frac{1}{2}\vec{I}_a + \frac{1}{2}\vec{I}_b \right) \quad (2.48)$$

$$\vec{I}_{ds} = \vec{I}_a \quad (2.49)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.43)
$$\bar{I}_{qs} = \frac{2}{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \bar{I}_b - \frac{\sqrt{3}}{2} \bar{I}_c \right) \quad (2.50)$$

นำสมการที่ (2.45) แทนใน (2.50) จะได้

$$\bar{I}_{qs} = \frac{2}{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \bar{I}_b - \frac{\sqrt{3}}{2} (-(\bar{I}_a + \bar{I}_b)) \right) \quad (2.51)$$

$$\bar{I}_{qs} = \frac{1}{\sqrt{3}} \bar{I}_b + \frac{1}{\sqrt{3}} \bar{I}_a + \frac{1}{\sqrt{3}} \bar{I}_b \quad (2.52)$$

$$\bar{I}_{qs} = \frac{1}{\sqrt{3}} \bar{I}_a + \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{I}_b \quad (2.53)$$

2.7.3 หาค่าแรงบิดไฟฟ้า (T_e) จาก \bar{V}_{ds} , \bar{V}_{qs} , \bar{I}_{ds} และ \bar{I}_{qs}

สมการแรงดันสเตเตอร์ในกรอบอ้างอิง d-q

$$\bar{V}_{ds} = R_s \bar{I}_{ds} + L_s \frac{d\bar{I}_{ds}}{dt} \quad (2.54)$$

$$\bar{V}_{qs} = R_s \bar{I}_{qs} + L_s \frac{d\bar{I}_{qs}}{dt} \quad (2.55)$$

ในเทอมของ $L_s \frac{d\bar{I}_{ds}}{dt}$ จะเท่ากับ $\frac{d\bar{\lambda}_{ds}}{dt}$ จากสมการ (2.54) และ (2.55) จะได้

$$\bar{V}_{ds} = R_s \bar{I}_{ds} + \frac{d\bar{\lambda}_{ds}}{dt} \quad (2.56)$$

$$\bar{V}_{qs} = R_s \bar{I}_{qs} + \frac{d\bar{\lambda}_{qs}}{dt} \quad (2.57)$$

เมื่อทำการแก้สมการที่ (2.56) และ (2.57) เพื่อหาค่าการประมาณฟลักซ์ที่เราต้องการจะได้

$$\bar{\lambda}_{ds} = \int (\bar{V}_{ds} - R_s \bar{I}_{ds}) dt \quad (2.58)$$

$$\bar{\lambda}_{qs} = \int (\bar{V}_{qs} - R_s \bar{I}_{qs}) dt \quad (2.59)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้สมการแรงบิด

$$T_e = \frac{3}{2} P (\bar{I}_{ds} \bar{\lambda}_{ds} - \bar{I}_{qs} \bar{\lambda}_{qs}) \quad (2.60)$$

- เมื่อ $\bar{V}_{ds}, \bar{V}_{qs}$ = แรงดันสเตเตอร์ในแกน $d-q$
 $\bar{I}_{ds}, \bar{I}_{qs}$ = กระแสสเตเตอร์ในแกน $d-q$
 $\bar{\lambda}_{ds}, \bar{\lambda}_{qs}$ = ฟลักซ์สเตเตอร์ในแกน $d-q$
 T_e = แรงบิดทางไฟฟ้า
 P = จำนวนคู่ของขั้วแม่เหล็ก
 R_s = ความต้านทานในขดลวดสเตเตอร์



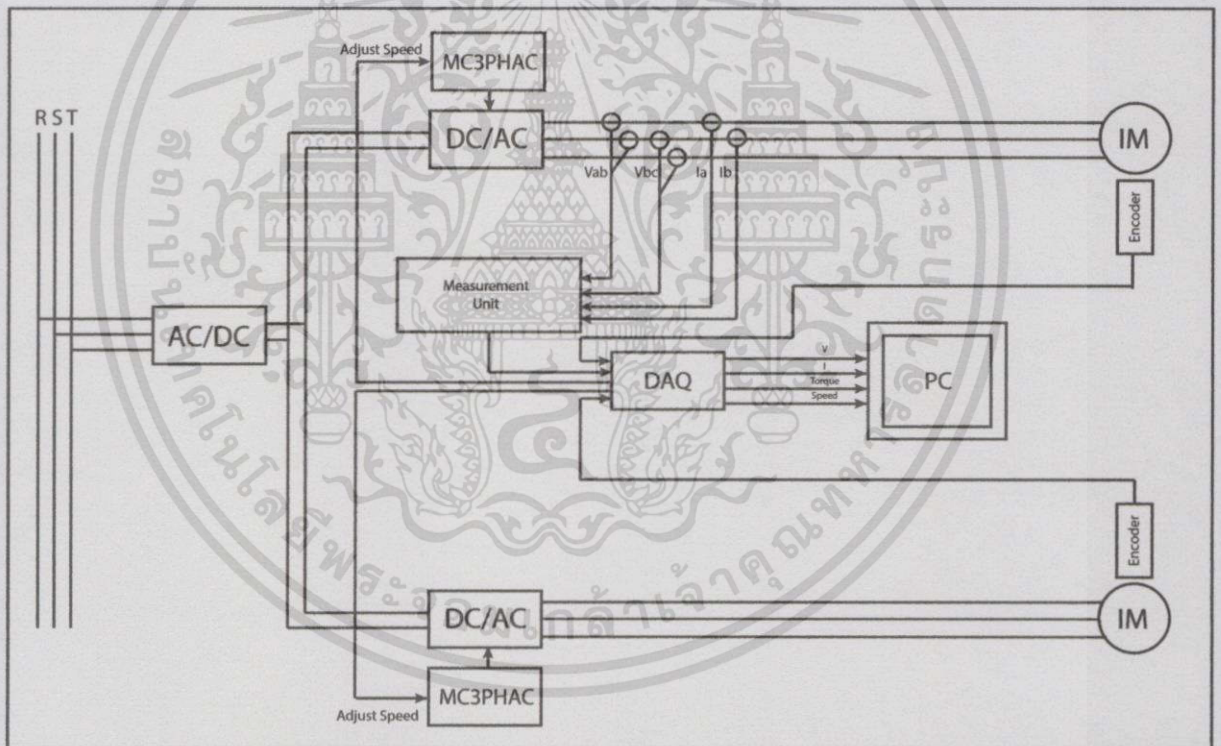
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและสร้างแบบจำลอง

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการสร้างวงจรควบคุมการทำงานโดยใช้โปรแกรม LabVIEW ควบคุมการทำงานและแสดงผลในการขับเคลื่อนภาระทางกลจำลองของเตาเผาปูนซีเมนต์ นอกจากนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink เพื่อนำผลตอบสนองที่ได้จากการสร้างแบบจำลองจริงมาเปรียบเทียบกับผลตอบสนองตามทฤษฎี

3.1 การสร้างวงจรควบคุมการทำงาน



รูปที่ 3.1 วงจรของกระบวนการทำงานแบบขับคู่

ในการควบคุมนี้ ความเร็วทั้งสองไดรฟ์จะมีความเร็วอ้างอิงเดียวกัน วงจรของกระบวนการควบคุมนี้จะนำเสนอในรูปที่ 3.1 ทั้งสองไดรฟ์จะเป็นการควบคุมแบบ V/f constant ซึ่งใช้ MC3PHAC สร้างสัญญาณ PWM จำนวน 6 สัญญาณที่จะปรับขนาดของแรงดันตามการปรับความเร็ว เพื่อสร้างสัญญาณ 3 เฟสสำหรับมอเตอร์ โดยการบวกเพิ่มฮาร์โมนิกส์ที่ 3 เข้าไปด้วยทำให้แรงดันขาออกของสัญญาณ 3 เฟสมีขนาดได้เท่ากับแรงดันสูงสุดของแรงดันขาเข้าสูงสุด ซึ่งทำให้ได้แรงดันขาออกของสัญญาณ 3 เฟสมีขนาดเพิ่มขึ้นอีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประมาณ 15% เมื่อเทียบกับการสร้างสัญญาณ PWM แบบ มอดดูเลทไซน์เวฟ (Sine Wave Modulation) สัญญาณ PWM จะอัปเดตด้วยความถี่ 5.3 kHz โดยความถี่ในการสวิตช์จะสามารถเลือกได้ 4 ความถี่คือ 5.291kHz, 10.582 kHz, 15.873 kHz และ 21.164kHz เมื่อใช้ความถี่ของคริสตอลที่ 4 MHz ตัวกรองสัญญาณควบคุมความเร็วรอบแบบดิจิตอลโปรเซสเซอร์ ขนาด 24 บิต ทำให้สัญญาณอินพุทปลอดจากสัญญาณรบกวนได้เป็นอย่างดีในการในงานที่มีสัญญาณรบกวนสูงโดยเฉพาะในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งจะมีคาบเวลาการสุ่มในการกรองสัญญาณที่ 3 ms ด้วยความละเอียดในการคำนวณในการสร้างสัญญาณ PWM ขนาด 32 บิต ทำให้สามารถปรับความละเอียดของการควบคุมมอเตอร์ได้ละเอียดถึง 4 mHz และทำให้การเปลี่ยนแปลงความถี่เป็นไปได้อย่างนุ่มนวล ไม่มีการกระตุกของเฟลตามอเตอร์

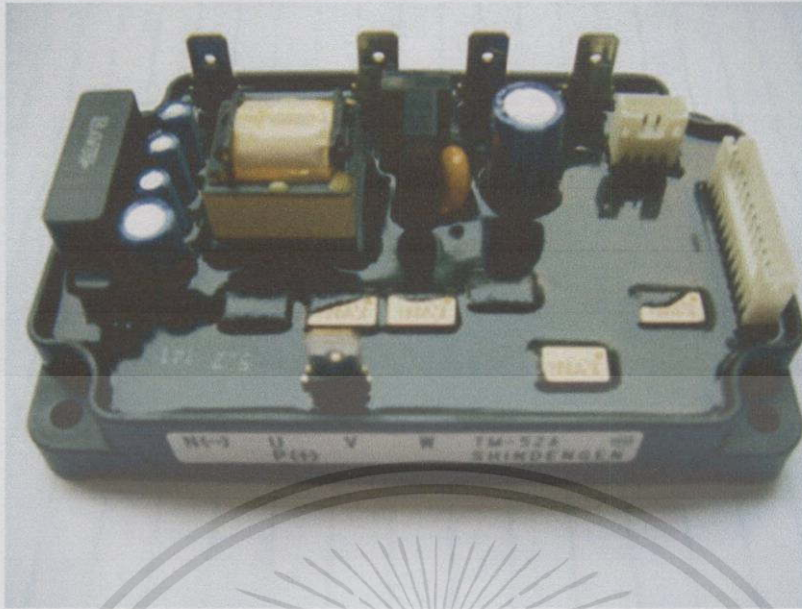
สัญญาณ PWM ทั้ง 6 สัญญาณจะถูกนำไปขับ IGBT จำนวน 6 ตัว และเพื่อป้องกันการ ทำงานพร้อมกันในเฟสเดียวกัน (Shoot Through) เราเรียกช่วงเวลาที่ IGBT ในเฟสเดียวกันหยุดทำงาน ทั้งสองตัวว่า Dead Time ที่สามารถโปรแกรมให้เหมาะสมกับ IGBT แต่ละขนาดได้โดยการปรับตั้งที่ ค่าตัวความต้านทานที่สามารถปรับได้ตั้งแต่ 0 ถึง 32 μ s ความถี่ที่จ่ายให้กับมอเตอร์สามารถปรับได้ตั้งแต่ 1 Hz ถึง 128 Hz โดยการปรับแรงดันที่ป้อนให้กับ MC3PHAC โดยมีอัตราส่วน 25.6 Hz ต่อ 1 โวลท์



รูปที่ 3.2 วงจร MC3PHAC

สำหรับตัวอินเวอร์เตอร์ที่นำมาใช้คือ Intelligent Power Module (IPM) Electric TM-52A ซึ่งมีพิกัด 30A 400V ที่สามารถใช้งานได้ถึง 3 แรงม้าสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 220V/380V เป็นอุปกรณ์วงจรรวมชนิด Hybrid ที่รวมเอา IGBT และชุดวงจรขับที่เชื่อมต่อกับวงจรควบคุมด้วย Opto-Couple และมีวงจร Switching Power Supply สำหรับจ่ายวงจรควบคุมภายนอกอีก 2 ชุด นอกจากนี้ยังมีวงจรป้องกันกระแสเกินและความร้อนเกินอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ Intelligent Power Module (IPM) TM-52A



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์ DAQ 6009

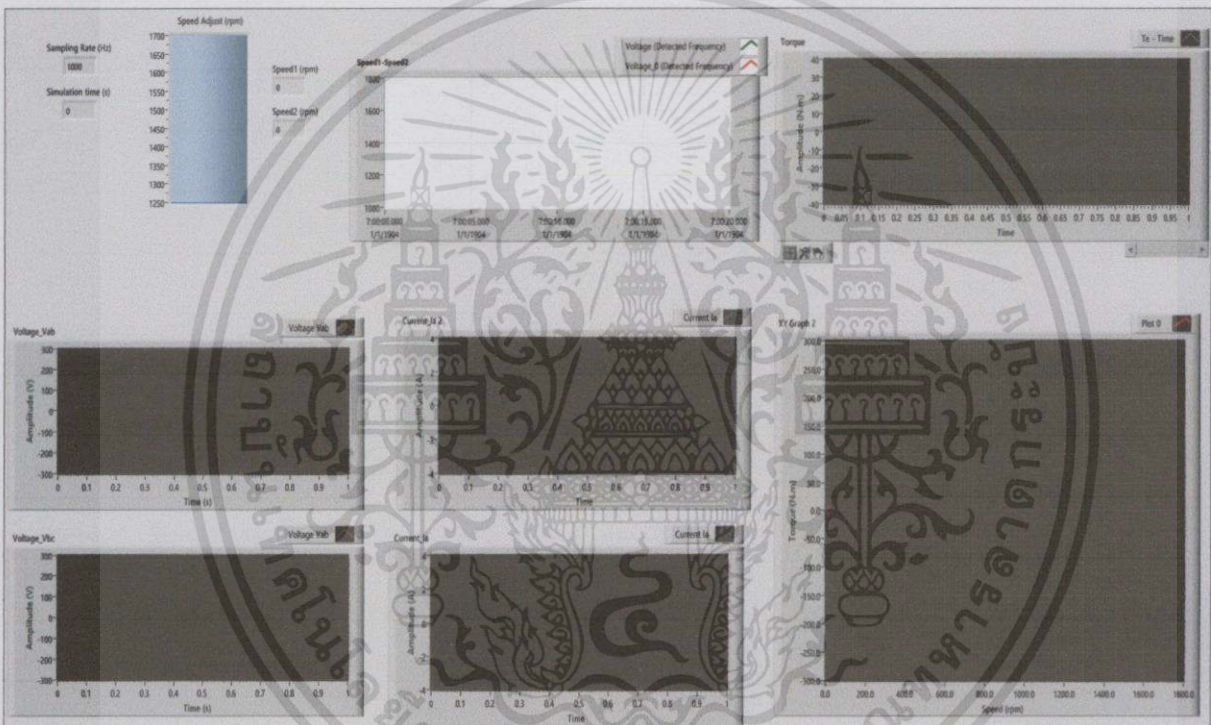
ในการนำสัญญาณแรงดันและกระแสมาประมวลผลเพื่อทำการหาคุณลักษณะของแรงบิดและความเร็วทั้งสองมอเตอร์ในการขับเคลื่อนทางกลเดียวกัน เราได้ใช้อุปกรณ์ DAQ 6009 ซึ่งเป็นอุปกรณ์เก็บรวบรวมข้อมูลวิเคราะห์ข้อมูลจริงเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรม LabVIEW ที่พัฒนาตามคุณลักษณะของงานวิจัยในลักษณะเวลาจริง (Real Time) มาประมวลผลคำนวณหาค่าแรงบิดและความเร็วและแสดงออกมาเป็นกราฟการทำงานที่หน้าจอคอมพิวเตอร์ให้เราเห็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การควบคุมการทำงานและแสดงผลโดยใช้ LabVIEW

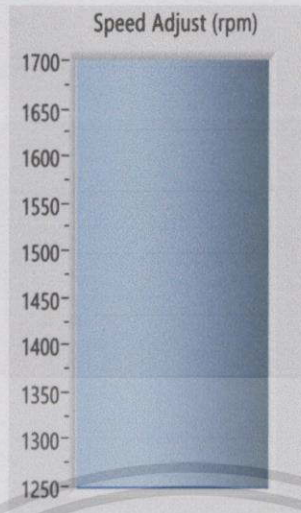
ในหัวข้อนี้เป็นการนำเสนอการควบคุมการทำงานและแสดงผลโดยใช้โปรแกรม LabVIEW ซึ่งเป็นเครื่องมือเสมือนจริงหรือ Virtual Instrumentation (VI) ใช้ในการสร้างระบบการวัด ทดสอบ และควบคุม โดยใช้การเขียนโปรแกรมด้วยภาษาโค้ดรูปภาพ (Graphical programming) และมีการต่อสายส่งค่าข้อมูลคล้ายกับการวาดโพล์ชาร์ต โดยในหนึ่งโปรแกรมจะประกอบไปด้วยสองหน้าต่างคือ Front Panel และ Block Diagram

3.2.1 หน้าต่างการควบคุมและแสดงผลการทำงาน(Front Panel)



รูปที่ 3.5 หน้าต่างการควบคุมและแสดงผลการทำงาน(Front Panel)

ในหน้าต่าง Fron Panel นี้จะมีบล็อกควบคุมการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์(รูปที่ 3.6) โดย DAQ จะส่งผ่านสัญญาณแรงดันไปให้ IC MC3PHAC ควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ TM-52A เพื่อไปขับมอเตอร์ให้หมุนตามความเร็วที่ต้องการ



รูปที่ 3.6 บล็อกควบคุมความเร็วรอบ

การพล็อตกราฟแสดงสัญญาณแรงดัน กระแส และแรงบิดจะใช้ความถี่ในการเก็บข้อมูล 1000 เฮิรซ์ (รูปที่ 3.7) และเวลาที่ใช้ในการทำงานของโปรแกรมแสดงให้เห็นในบล็อก Simulation Time (รูปที่ 3.8) หลังจากนั้นเมื่อทดลองเดินมอเตอร์ข้อมูลสัญญาณแรงดัน(รูปที่ 3.10) กระแส(รูปที่ 3.10) และแรงบิดไฟฟ้าของมอเตอร์(รูปที่ 3.12) จะปรากฏให้เห็นจากบล็อกแสดงผลในลักษณะของรูปภาพ

Sampling Rate (Hz)

1000

รูปที่ 3.7 บล็อกแสดง Sampling Rate ข้อมูล

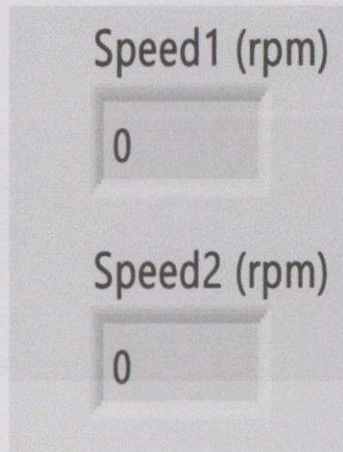
Simulation time (s)

0

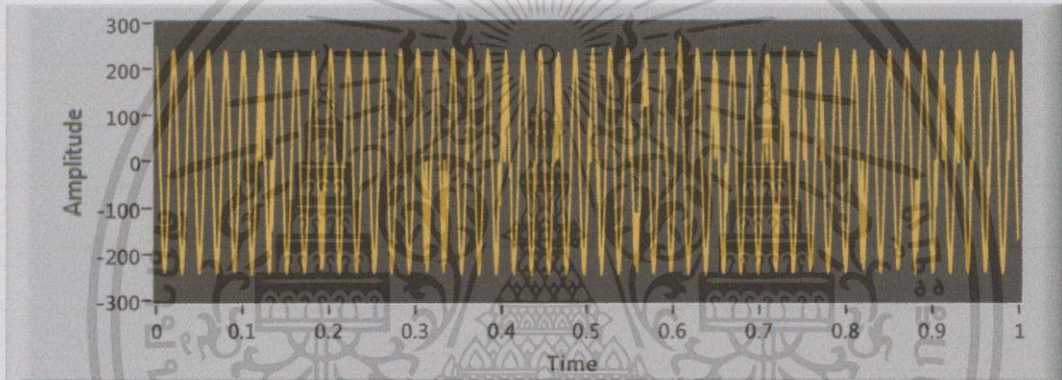
รูปที่ 3.8 บล็อกแสดงเวลาในการทำงาน

ส่วนข้อมูลความเร็วรอบของมอเตอร์ทั้งสองปรากฏให้เห็นในรูปแบบตัวเลขดังรูปที่ 3.9 (Speed1 คือความเร็วรอบมอเตอร์ตัวที่หนึ่งและ Speed2 คือความเร็วรอบมอเตอร์ตัวที่สอง) มีหน่วยเป็น rpm (round per minute)

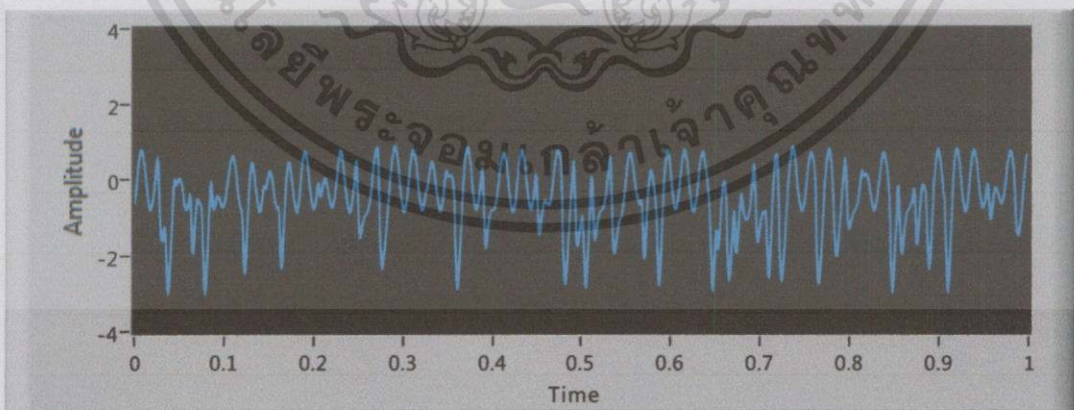
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 บล็อกแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์

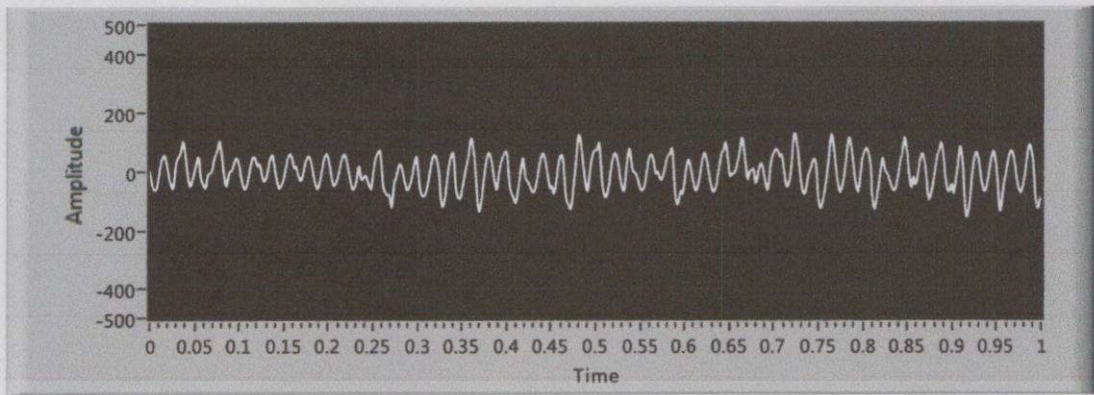


รูปที่ 3.10 บล็อกแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเทียบกับเวลา



รูปที่ 3.11 บล็อกแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเทียบกับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 บล็อกแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดไฟฟ้าเทียบกับเวลา

จากบล็อกแสดงผลของแรงบิดไฟฟ้า และความเร็วรอบของมอเตอร์ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว ในข้างต้น เราสามารถหาผลตอบสนองการทำงานแรงบิดไฟฟ้าเทียบกับความเร็วรอบของมอเตอร์ได้ ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.13 เป็นบล็อกแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดไฟฟ้ากับความเร็วรอบของมอเตอร์

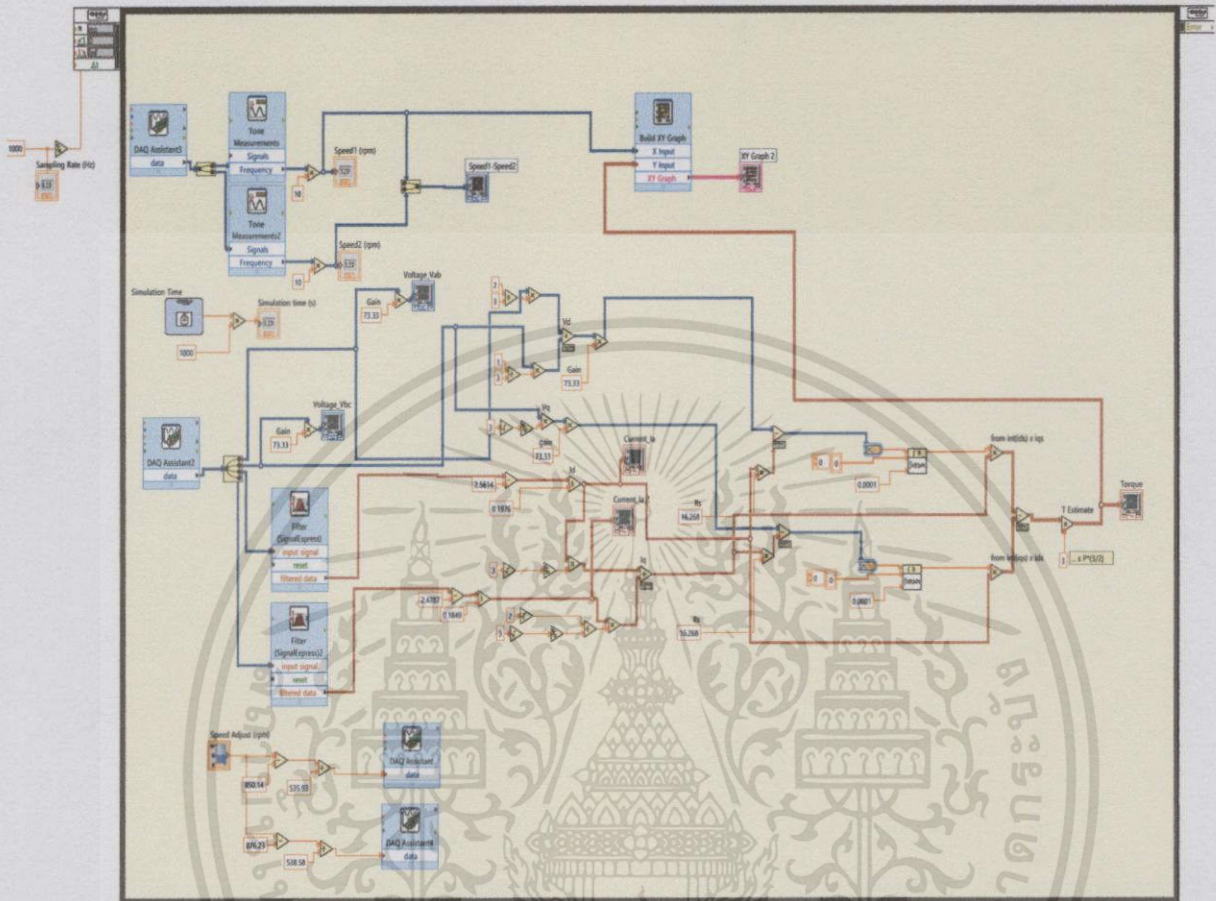


รูปที่ 3.13 บล็อกแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดไฟฟ้าเทียบกับความเร็วรอบ

จากรูปที่ 3.13 เครื่องหมายกากบาทแสดงให้เห็นถึงจุดสมดุลระหว่างแรงบิดไฟฟ้ากับความเร็วของมอเตอร์ เมื่อมอเตอร์ทำงานที่ความเร็วรอบเต็มพิกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การเขียน Block Diagram



รูปที่ 3.14 แผนภาพการเขียน Block Diagram

จากรูปที่ 3.14 สามารถแสดงรายละเอียดในแต่ละบล็อกการทำงานได้ดังนี้

3.2.2.1 บล็อก DAQ Assistant

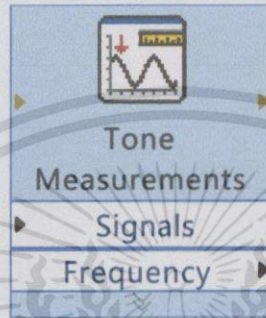


รูปที่ 3.15 DAQ Assistant

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DAQ Assistant ใช้ในการตั้งสัญญาณแรงดัน กระแส และสัญญาณพัลส์ (สัญญาณความเร็ว) เพื่อนำมาคำนวณหาแรงบิดไฟฟ้า และความเร็วของมอเตอร์โดยผ่านตัว Operator นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นตัวรับสัญญาณควบคุมความเร็วของมอเตอร์ทั้งสองจาก object control หรือ บล็อกควบคุมความเร็วรอบ (รูปที่ 3.6)

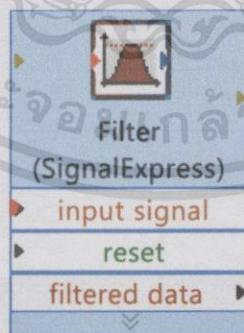
3.2.2.2 บล็อก Tone Measurements



รูปที่ 3.16 Tone Measurements

เมื่อให้มอเตอร์ทำงานจะมีสัญญาณพัลส์จาก proximity sensor เข้ามาใน DAQ เราสามารถใช้บล็อก Tone Measurement ในการหาค่าความถี่ของสัญญาณพัลส์ เพื่อนำมาคำนวณหาความเร็วรอบของมอเตอร์ได้

3.2.2.3 บล็อก Filter

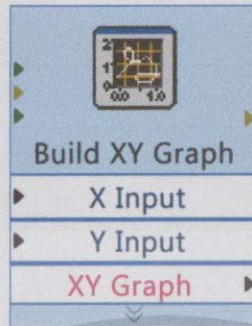


รูปที่ 3.17 Filter

ในการวัดสัญญาณจริงที่ได้จะพบว่าสัญญาณของกระแสมีรูปร่างผิดเพี้ยน ซึ่งเป็นผลมาจากที่มีฮาร์โมนิกปนอยู่ในสัญญาณ บล็อก Filter จึงถูกนำมาใช้ในการกรองสัญญาณความถี่สูงออก ให้เหลือแต่ความถี่ Fundamental เพื่อทำให้สัญญาณของกระแสมีความเรียบเป็นสัญญาณไซน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

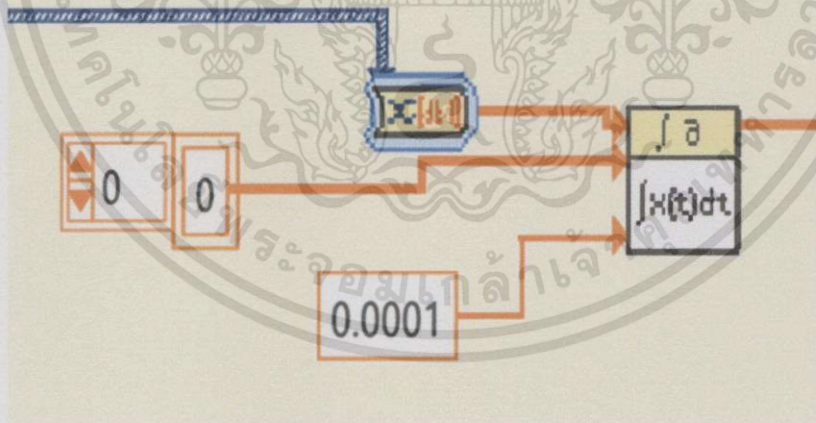
3.2.2.4 บล็อก Build XY Graph



รูปที่ 3.18 Build XY Graph

เพื่อที่จะสามารถหาผลตอบสนองของการทำงานแรงบิดไฟฟ้าเทียบกับความเร็วรอบของมอเตอร์ได้ เราจะใช้บล็อก Build XY Graph เพื่อนำสัญญาณทั้งสองมาพล็อตกราฟดังที่แสดงให้เห็นดังรูป 3.13 โดยที่แกน X คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์ แกน Y คือ แรงบิดทางไฟฟ้าของมอเตอร์

3.2.2.5 บล็อก Integral

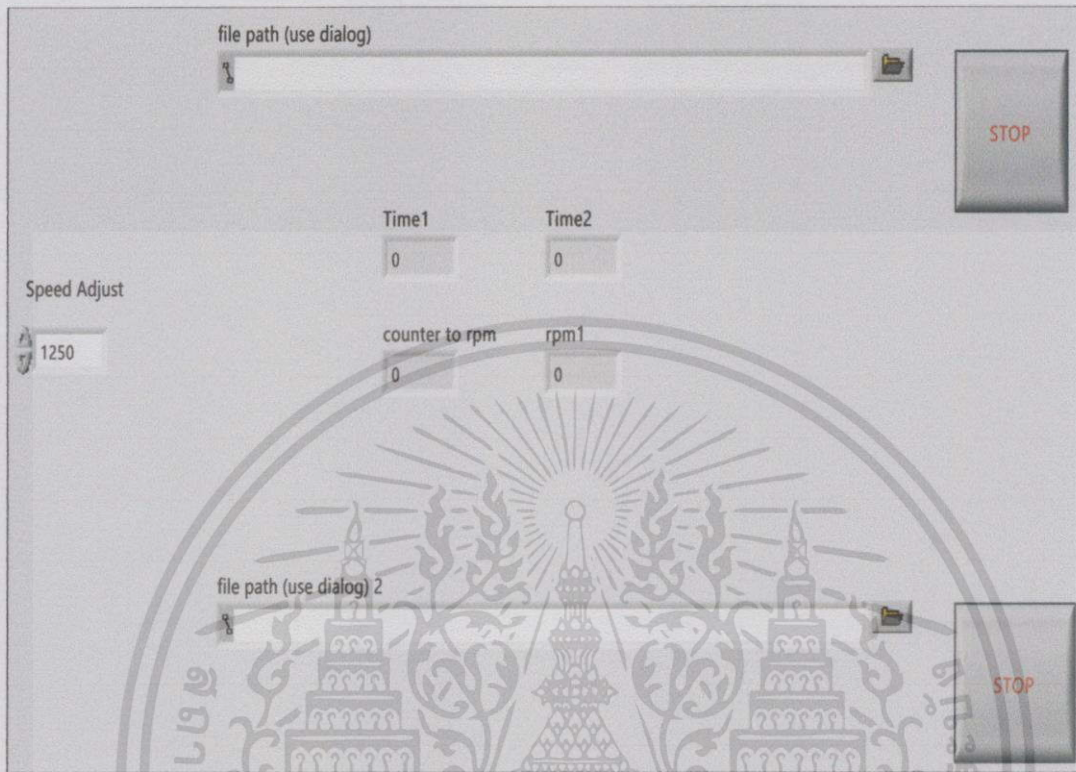


รูปที่ 3.19 Integral

Integral ใช้ในการคำนวณหาค่า Flux d-q เพื่อนำไปใช้ในการหาค่าแรงบิดทางไฟฟ้าของมอเตอร์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 การเก็บข้อมูล

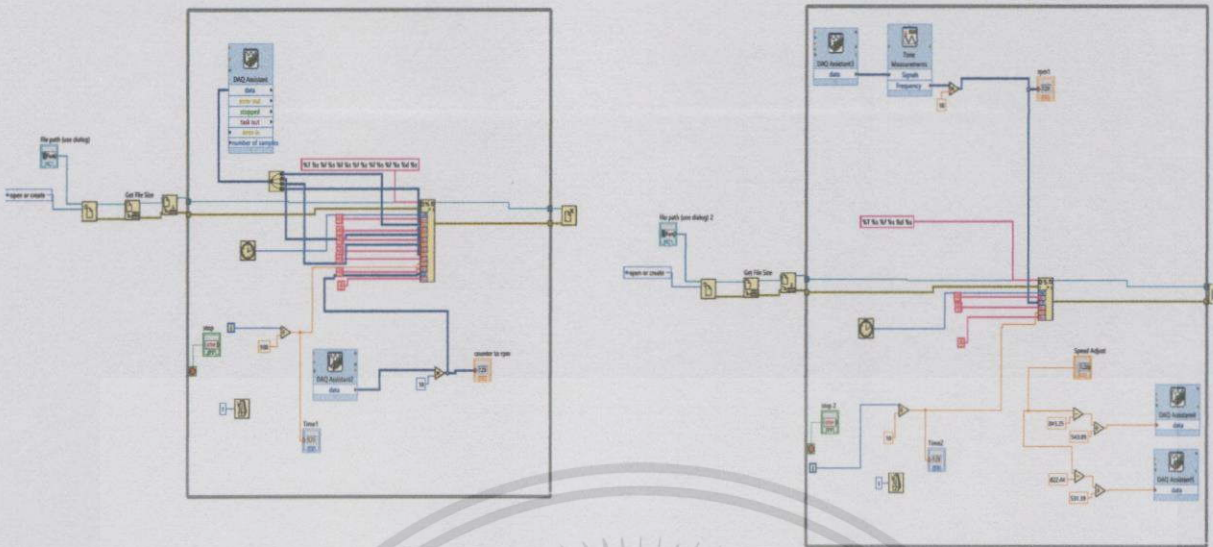


รูปที่ 3.20 Front panel ของโปรแกรมเก็บข้อมูล

จากรูปที่ 3.20 แสดงหน้า Front panel ของโปรแกรม LabVIEW ที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

1. File path เป็นที่อยู่ของเท็กซ์ไฟล์ที่เก็บข้อมูล (directory .txt)
2. Speed Adjust ปรับความเร็วของมอเตอร์ทั้งสองชุด
3. Time1 แสดงเวลาของ While loop ที่ 1
4. Time2 แสดงเวลาของ While loop ที่ 2
5. Counter to rpm แสดงจำนวนรอบที่วัดได้
6. Rpm1 แสดงความเร็วรอบของมอเตอร์
7. Stop ปุ่มหยุดการทำงานของการทำงานเก็บค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 Block Diagram ของโปรแกรมเก็บข้อมูล

จากรูปที่ 3.21 แสดงหน้า Block Diagram ของโปรแกรม LabVIEW ที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

While loop ที่ 1

1. DAQ Assistant เป็นอุปกรณ์วัดค่าแรงดัน (V_{ab} , V_{bc}) กับกระแส (I_a , I_b)
2. DAQ Assistant2 เป็นอุปกรณ์วัดค่าจำนวนรอบที่มอเตอร์หมุนไปได้
3. Wait Until Next ms Multiple เป็นตัวกำหนดเวลาในการทำงานแต่ละรอบของ While loop ที่ 1
4. Format Into File ใช้สำหรับรวมข้อมูลตามลำดับเพื่อบันทึกในเท็กซ์ไฟล์

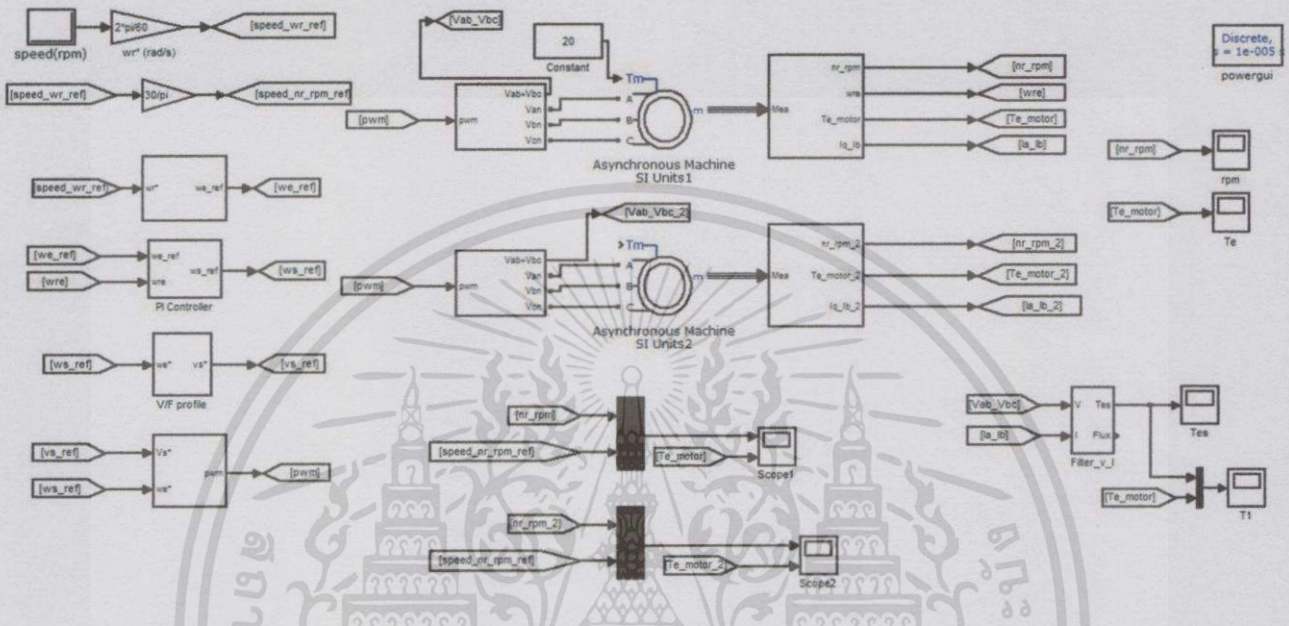
While loop ที่ 2

1. DAQ Assistant3 เป็นอุปกรณ์ที่วัดความเร็วรอบของมอเตอร์ขณะนั้น
2. DAQ Assistant4 เป็นอุปกรณ์จ่ายแรงดันเพื่อปรับความเร็วมอเตอร์ตัวที่ 1
3. DAQ Assistant5 เป็นอุปกรณ์จ่ายแรงดันเพื่อปรับความเร็วมอเตอร์ตัวที่ 2
4. Wait Until Next ms Multiple เป็นตัวกำหนดเวลาในการทำงานแต่ละรอบของ While loop ที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การจำลองการทำงานโดยใช้ MATLAB/Simulink

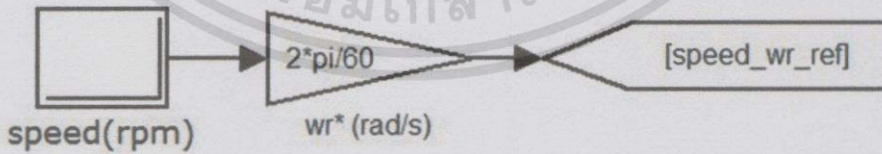
แผนภาพการทำงานโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink วิเคราะห์การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยการควบคุมแบบ V/f Control



รูปที่ 3.22 การจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink

จากรูปแผนภาพการทำงานด้านบนประกอบด้วยบล็อกต่างๆ ดังนี้

3.3.1 บล็อกแปลงความเร็วรอบเป็นความเร็วเชิงมุม

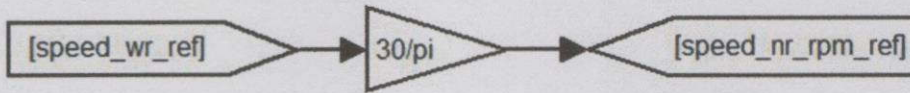


รูปที่ 3.23 การแปลงความเร็วรอบเป็นความเร็วเชิงมุม

จากรูปที่ 3.23 เป็นการแปลงความเร็วรอบ(หน่วยเป็น rpm)เป็นความเร็วเชิงมุมอ้างอิง (หน่วยเป็น rad/s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

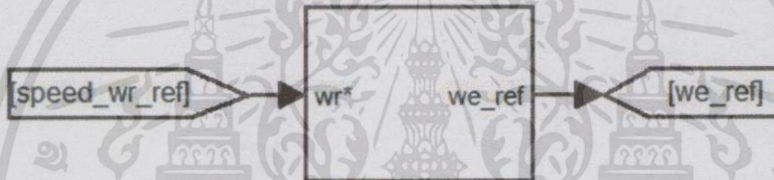
3.3.2 บล็อกแปลงความเร็วเชิงมุมเป็นความเร็วรอบ



รูปที่ 3.24 การแปลงความเร็วเชิงมุมเป็นความเร็วรอบ

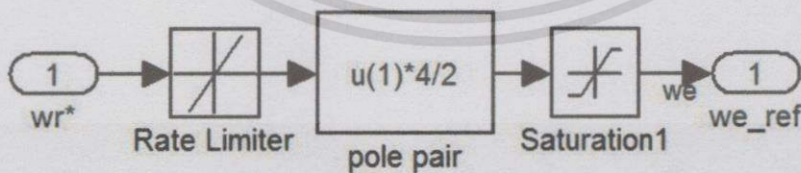
จากรูปที่ 3.24 เป็นการแปลงความเร็วเชิงมุม (หน่วยเป็น rad/s) เป็นความเร็วรอบ (หน่วยเป็น rpm)

3.3.3 บล็อกแปลงความเร็วเชิงมุมโรเตอร์จากหน่วยทางกลเป็นหน่วยทางไฟฟ้า



รูปที่ 3.25 การแปลงความเร็วเชิงมุมโรเตอร์จากหน่วยทางกลเป็นหน่วยทางไฟฟ้า

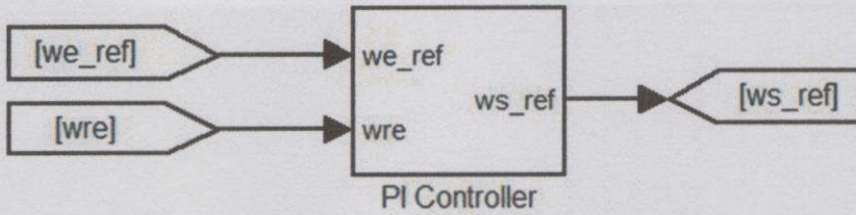
จากรูปที่ 3.25 เป็นการแปลงความเร็วเชิงมุมที่โรเตอร์จากหน่วยทางกลเป็นหน่วยทางไฟฟ้า เพื่อจะได้เป็นความเร็วเชิงมุมในรูปของสัญญาณไฟฟ้านำไปใช้ในการคำนวณได้ ซึ่งรายละเอียดการแปลงสามารถแสดงได้ในรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 รายละเอียดภายในบล็อกการแปลงความเร็วเชิงมุมโรเตอร์จากหน่วยทางกลเป็นหน่วยทางไฟฟ้า

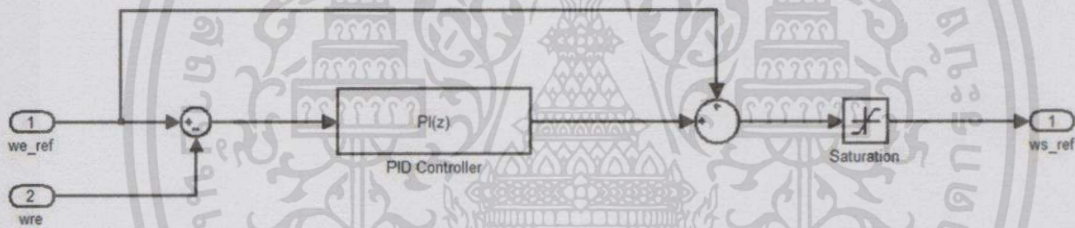
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 บล็อกการควบคุม PI



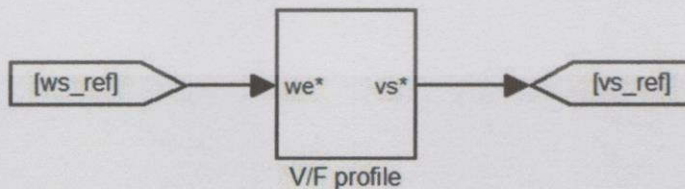
รูปที่ 3.27 บล็อก PI Controller

จากรูปที่ 3.27 เป็นการนำความเร็วเชิงมุมอ้างอิงกับความเร็วเชิงมุมที่วัดได้จริงมาเปรียบเทียบและค่าผิดพลาดที่ได้เป็นสัญญาณเข้าบล็อกอัตราส่วนของแรงดันต่อความถี่ (V/f) ซึ่งรายละเอียดภายในบล็อกแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 รายละเอียดภายในบล็อก PI Controller

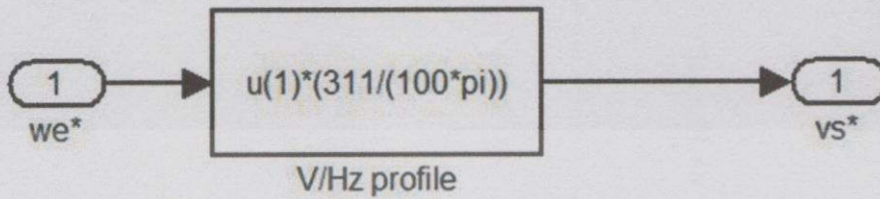
3.3.5 บล็อกอัตราส่วนของแรงดันต่อความถี่ (V/f)



รูปที่ 3.29 บล็อกอัตราส่วนของแรงดันต่อความถี่ (V/f)

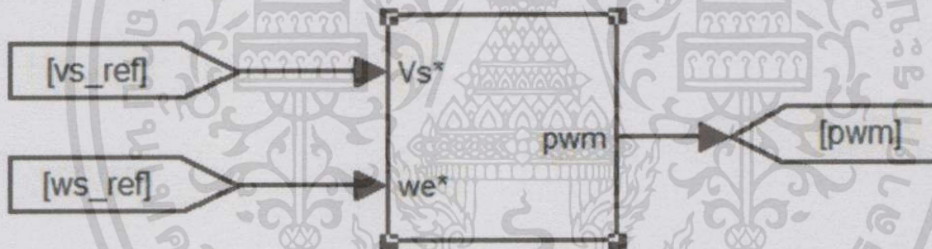
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.29 เป็นการปรับค่าให้อัตราส่วนของแรงดัน (Volts) ต่อความถี่ (Hertz) คงที่แบบ open-loop เพื่อควบคุมความเร็วของมอเตอร์ ซึ่งรายละเอียดภายในบล็อกแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.30



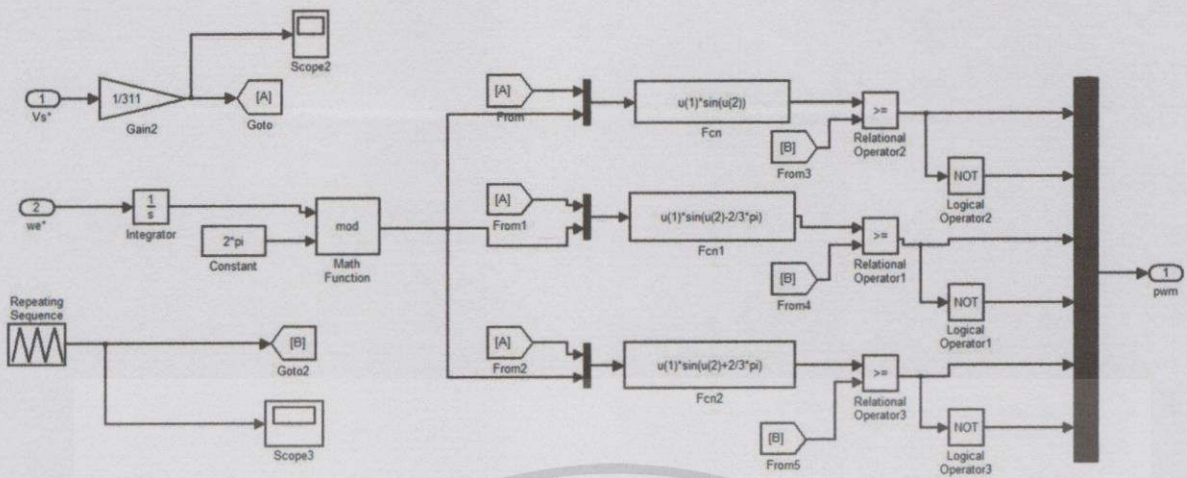
รูปที่ 3.30 รายละเอียดภายในบล็อกอัตราส่วนของแรงดันต่อความถี่(V/f)

3.3.6 บล็อกสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม(PWM)



รูปที่ 3.31 บล็อกการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม

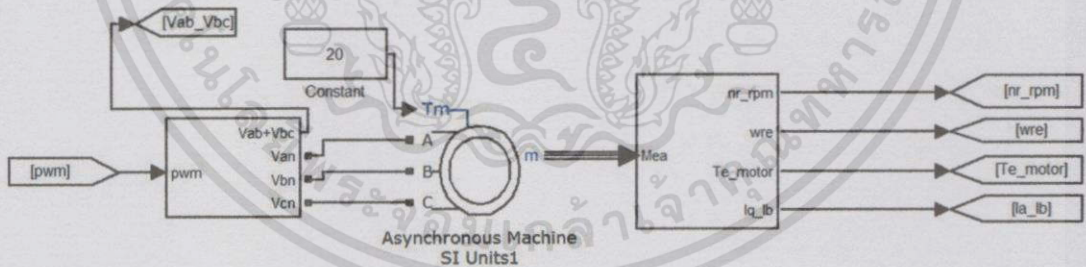
จากรูปที่ 3.31 เป็นบล็อกการนำสัญญาณ V/f และความเร็วเชิงโคโรนัสเพื่อจะสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม ซึ่งรายละเอียดภายในบล็อก แสดงให้เห็นในรูปที่ 3.32



รูปที่ 3.32 รายละเอียดภายในบล็อกการสร้างสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยม

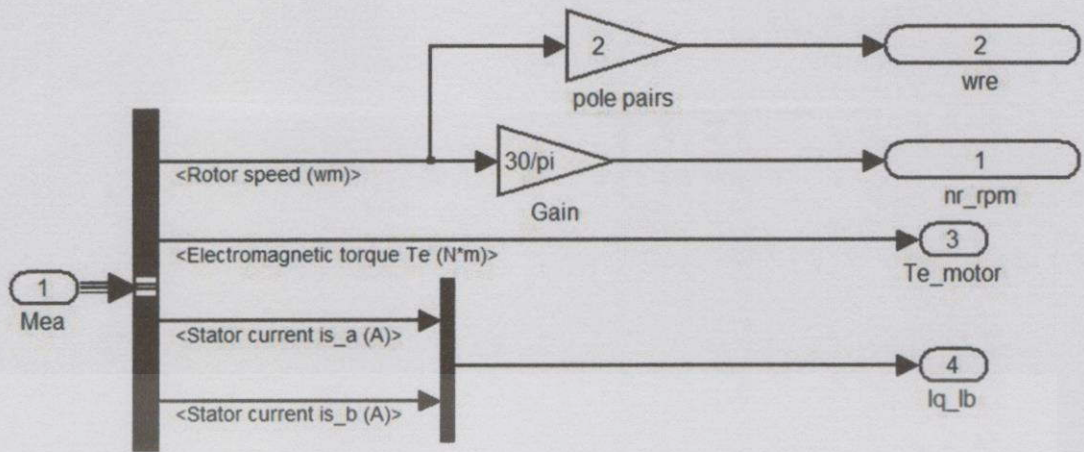
ภายในบล็อกพัลส์สี่เหลี่ยม (รูปที่ 3.31) แสดงรายละเอียดของการสร้างสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยม เป็นการปรับความกว้างของพัลส์โดยการนำเอาสัญญาณสามเหลี่ยมมาเปรียบเทียบกับสัญญาณแรงดันไซน์ ดังที่แสดงให้เห็นในรูปที่ 3.32

3.3.7 การวัดสัญญาณต่างๆของมอเตอร์



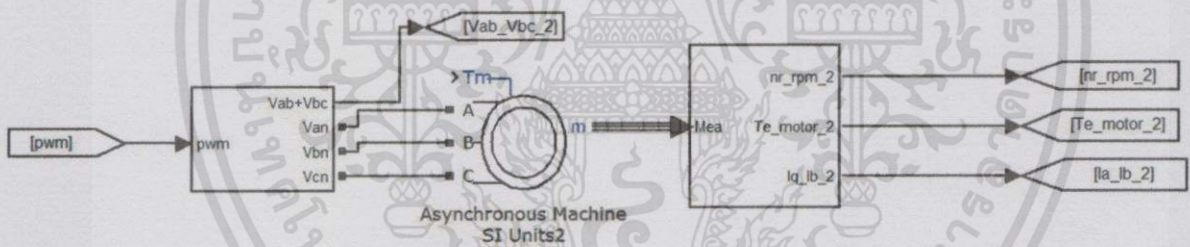
รูปที่ 3.33 บล็อกเครื่องมือวัดสัญญาณมอเตอร์ตัวที่หนึ่ง

จากรูปที่ 3.33 เป็นการวัดสัญญาณต่างๆของมอเตอร์ตัวที่หนึ่ง สามารถแสดงรายละเอียดภายในบล็อกเครื่องมือวัดได้ในรูปที่ 3.34



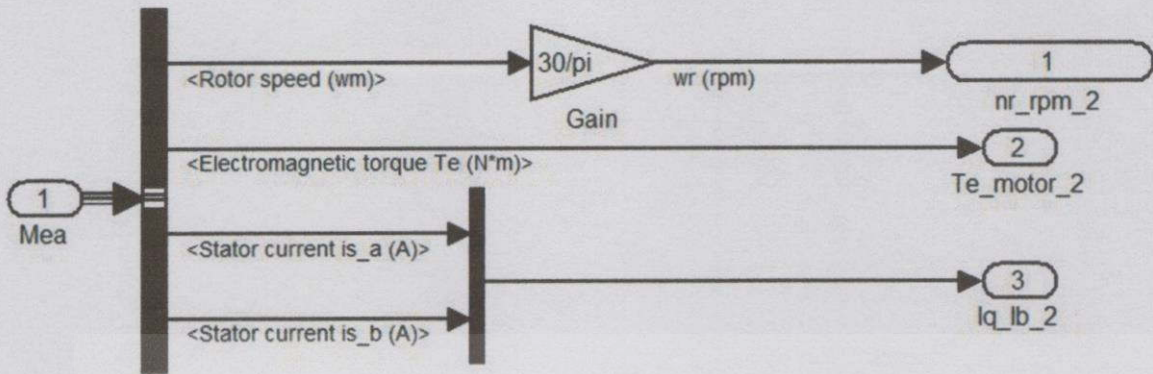
รูปที่ 3.34 ภายในบล็อกเครื่องมือวัดสัญญาณมอเตอร์ตัวที่หนึ่ง

จากรูปที่ 3.34 เป็นการวัดสัญญาณความเร็วเชิงมุม (ω_r) ความเร็วรอบที่โรเตอร์ (n_r) แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า (T_e) และวัดกระแสเฟสเอ เฟสบี ของมอเตอร์ตัวที่หนึ่ง



รูปที่ 3.35 บล็อกเครื่องมือวัดสัญญาณมอเตอร์ตัวที่สอง

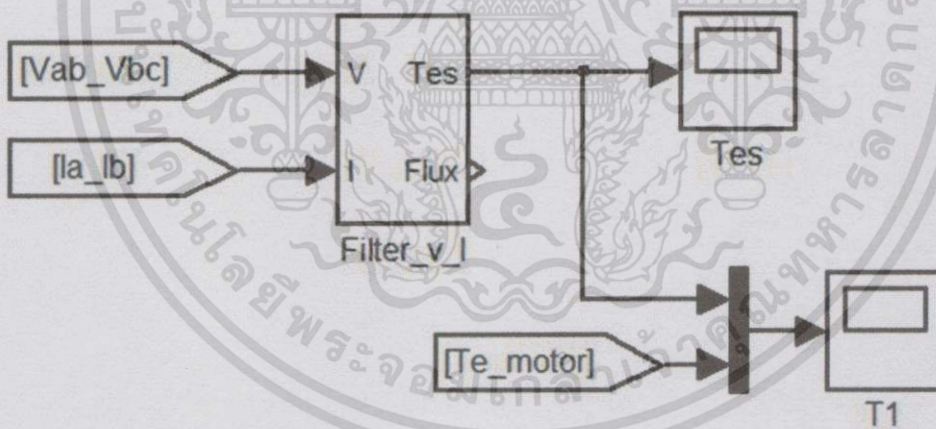
จากรูปที่ 3.35 เป็นการวัดสัญญาณต่างๆของมอเตอร์ตัวที่สอง สามารถแสดงรายละเอียดภายในบล็อกเครื่องมือวัดได้ในรูปที่ 3.36



รูปที่ 3.36 ภายในบล็อกเครื่องมือวัดสัญญาณมอเตอร์ตัวที่สอง

จากรูปที่ 3.36 เป็นการวัดสัญญาณความเร็วรอบที่โรเตอร์(ω_r) แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า(T_e) และวัดกระแสเฟสเอ เฟสบี ของมอเตอร์ตัวที่สอง

3.3.8 บล็อกฟิลเตอร์

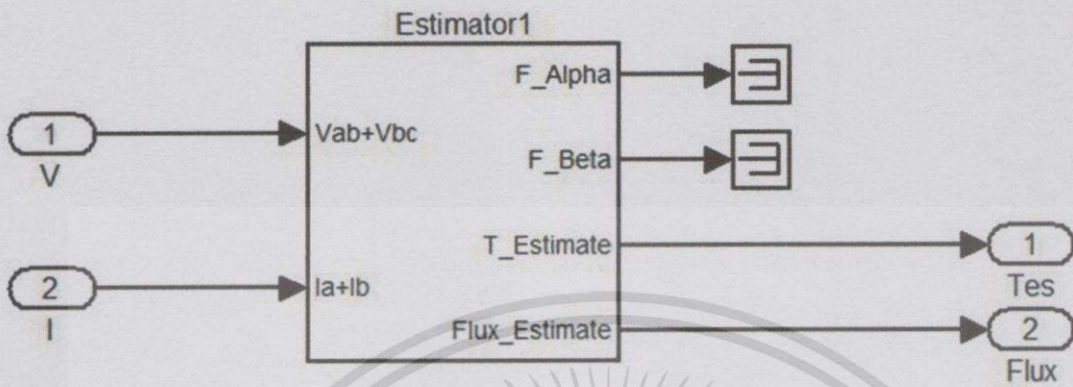


รูปที่ 3.37 บล็อกกรองสัญญาณความถี่สูง(Filter)

จากรูปที่ 3.37 เป็นการใช้วงจรกรองสัญญาณความถี่สูงหรือ Low pass filter กรองสัญญาณแรงดันและกระแส เพื่อให้รูปร่างของสัญญาณลูกคลื่นหรือสัญญาณไซน์ที่ได้มีความเรียบ

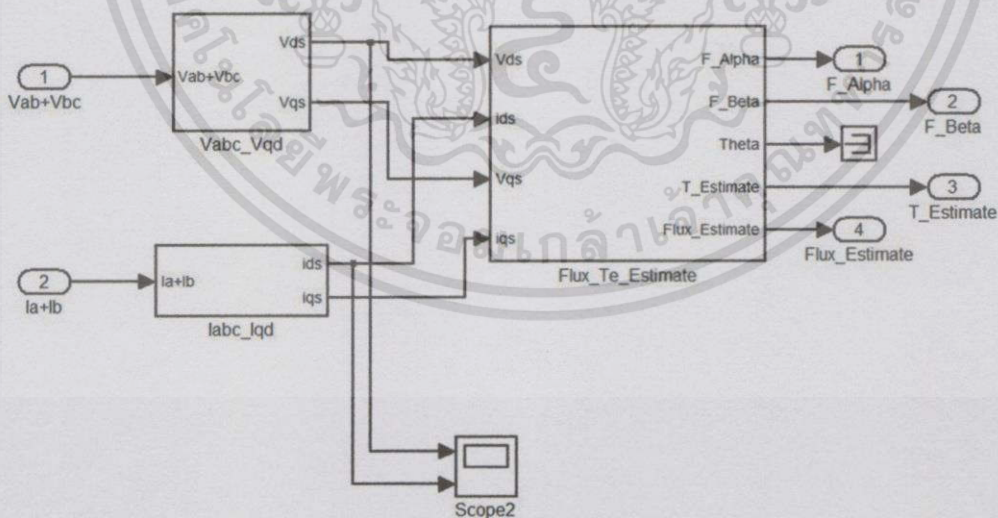
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.9 บล็อกการประมาณค่าฟลักซ์และแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 3.38 บล็อกการประมาณค่าฟลักซ์และแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.38 เป็นบล็อกการประมาณค่าฟลักซ์และแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ โดยการวัดสัญญาณแรงดันและกระแสของมอเตอร์ซึ่งรายละเอียดภายในบล็อกสามารถแสดงได้ในรูปที่ 3.39 ถึงรูปที่ 3.42

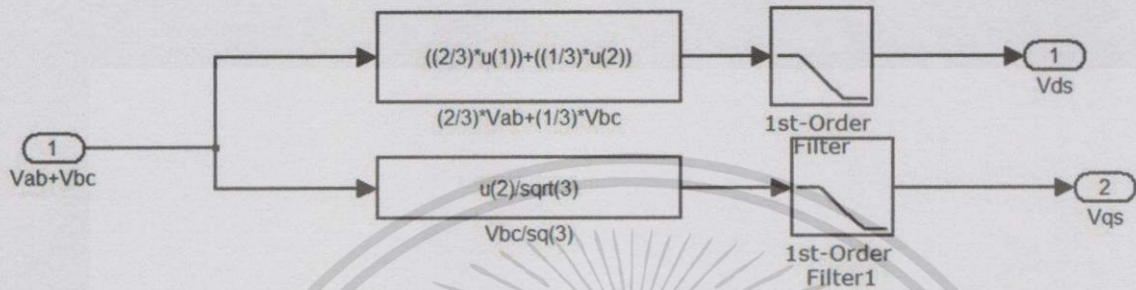


รูปที่ 3.39 การแปลงสัญญาณแรงดันและกระแสเป็นกรอบอ้างอิง d-q

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.39 เป็นการแปลงสัญญาณแรงดันและกระแสของมอเตอร์ที่สเตเตอร์ให้อยู่ในรูปกรอบอ้างอิง d-q ซึ่งจะได้สัญญาณแรงดันเป็น V_{ds} กับ V_{qs} ดังรูปที่ 3.40 และสัญญาณกระแสเป็น i_{ds} กับ i_{qs} ดังรูปที่ 3.41

3.3.10 บล็อกแปลงแกนแรงดันและกระแส



รูปที่ 3.40 การแปลงสัญญาณแรงดันเป็นกรอบอ้างอิง d-q

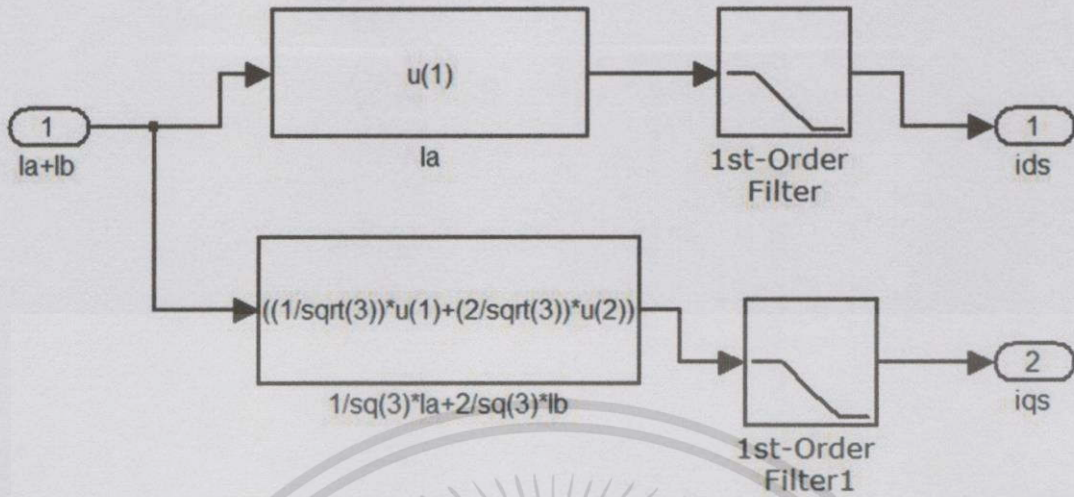
ภายในบล็อกจะแสดงรายละเอียดการนำแรงดันขาออกจากอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสมาแปลงแกนหยุดนิ่งเทียบกับสเตเตอร์เป็นแกน d-q แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_{ds} \\ \vec{V}_{qs} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{V}_{an} \\ \vec{V}_{bn} \\ \vec{V}_{cn} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$\vec{V}_{ds} = \frac{2}{3} \vec{V}_{ab} + \frac{1}{3} \vec{V}_{bc} \quad (3.2)$$

$$\vec{V}_{qs} = \frac{1}{\sqrt{3}} \vec{V}_{bc} \quad (3.3)$$

จากรูปที่ 3.39 ภายในบล็อกจะแสดงรายละเอียดการนำกระแสขาออกจากอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสมาแปลงแกนหยุดนิ่งเทียบกับสเตเตอร์เป็นแกน d-q แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้



รูปที่ 3.41 การแปลงสัญญาณกระแสเป็นกรอบอ้างอิง d-q

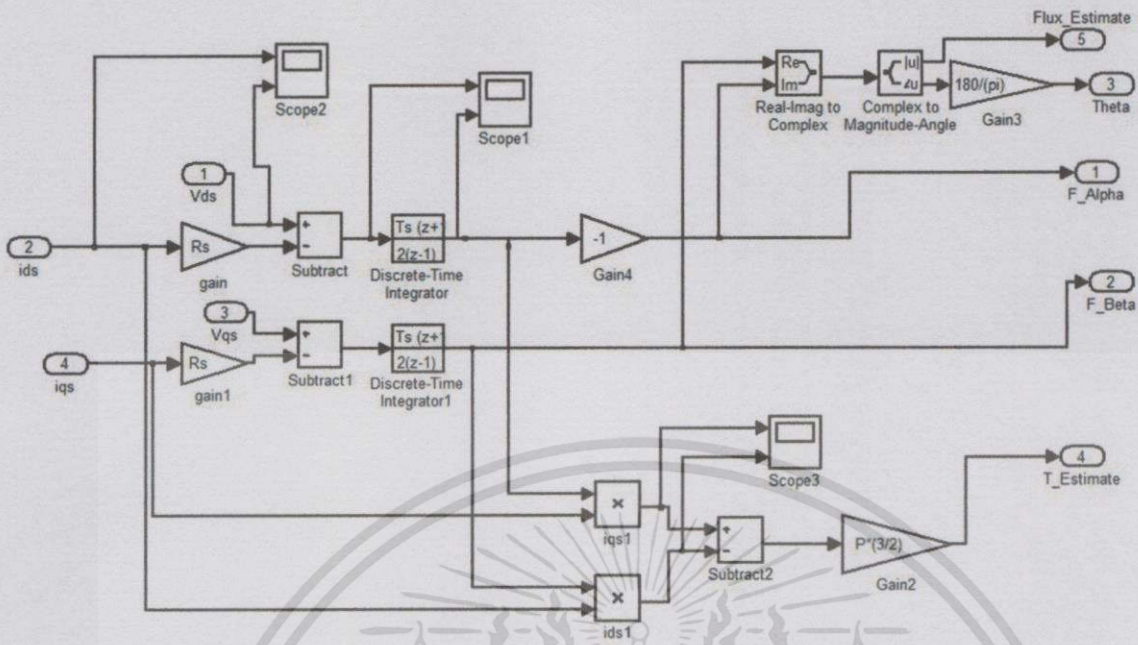
$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{ds} \\ \bar{I}_{qs} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\bar{I}_{ds} = \bar{I}_a \quad (3.5)$$

$$\bar{I}_{qs} = \frac{1}{\sqrt{3}} \bar{I}_a + \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{I}_b \quad (3.6)$$

3.3.11 วิธีการประมาณค่าฟลักซ์และแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า

จากรูปด้านล่าง 3.42 เป็นรายละเอียดการหาค่าฟลักซ์และแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการใช้สัญญาณแรงดันและกระแสในรูปของกรอบอ้างอิง d-q ที่ได้จากบล็อกแปลงแกน (แสดงให้เห็นในรูปที่ 3.40 และ 3.41) ซึ่งสามารถแสดงสมการได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.42 ภายในบล็อกการประมาณค่าฟลักซ์และแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า

สมการแรงบิด

$$T_e = \frac{3}{2} P (\bar{I}_{ds} \bar{\lambda}_{qs} - \bar{I}_{qs} \bar{\lambda}_{ds}) \quad (3.7)$$

จากสมการจะเห็นว่าเราสามารถประมาณฟลักซ์แม่เหล็กได้จากแรงดันด้านสเตเตอร์กับกระแสของสเตเตอร์ อนึ่งกระแสสเตเตอร์จะสามารถหาฟลักซ์ และแรงบิดที่สเตเตอร์ในกรอบอ้างอิง d-q ได้โดย

$$\bar{\lambda}_s = \bar{\lambda}_{ds} + j\bar{\lambda}_{qs} \quad (3.8)$$

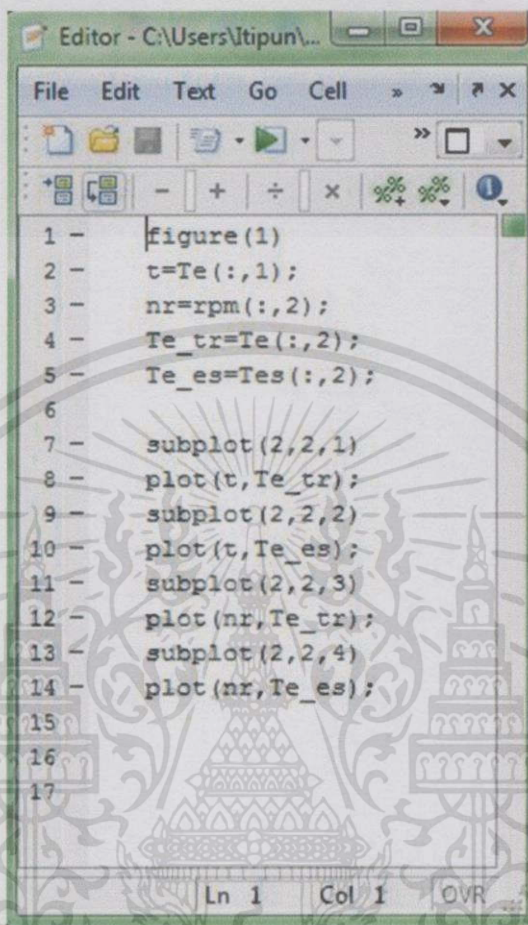
$$|\bar{\lambda}_s| = \sqrt{\bar{\lambda}_{ds}^2 + \bar{\lambda}_{qs}^2} \quad (3.9)$$

$$\theta_s = \tan^{-1} \left(\frac{\bar{\lambda}_{qs}}{\bar{\lambda}_{ds}} \right) \quad (3.10)$$

ซึ่งจากบล็อกเราจะได้เอาพุตของแรงดันและกระแสที่สเตเตอร์คือ $\bar{\lambda}_{ds}, \bar{\lambda}_{qs}, T_e, \theta_s, |\bar{\lambda}_s|$ สามารถนำมาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดไฟฟ้าต่อเวลาและความเร็วรอบต่อแรงบิดไฟฟ้าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.12 การเขียนคำสั่ง MATLAB พล็อตกราฟความเร็วรอบและแรงบิดทางไฟฟ้าของมอเตอร์



```

1 - figure(1)
2 - t=Te(:,1);
3 - nr=rpm(:,2);
4 - Te_tr=Te(:,2);
5 - Te_es=Tes(:,2);
6
7 - subplot(2,2,1)
8 - plot(t,Te_tr);
9 - subplot(2,2,2)
10 - plot(t,Te_es);
11 - subplot(2,2,3)
12 - plot(nr,Te_tr);
13 - subplot(2,2,4)
14 - plot(nr,Te_es);
15
16
17
Ln 1 Col 1 OVR ...

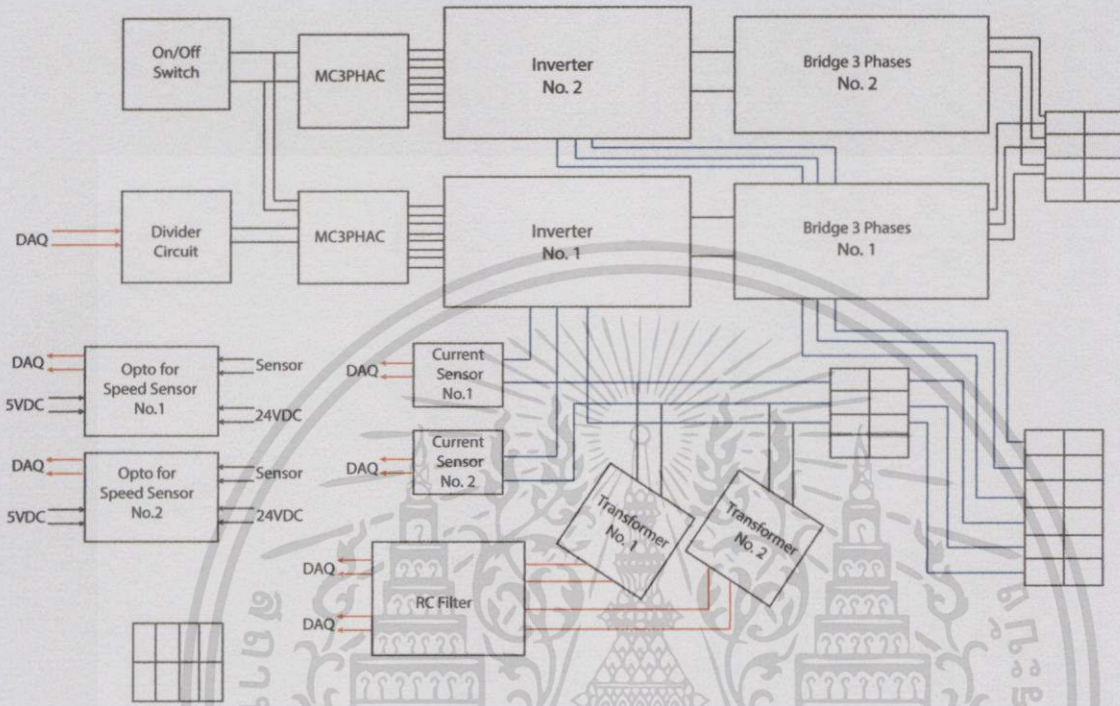
```

รูปที่ 3.43 การเขียนคำสั่ง MATLAB พล็อตกราฟความเร็วรอบและแรงบิดทางไฟฟ้าของมอเตอร์

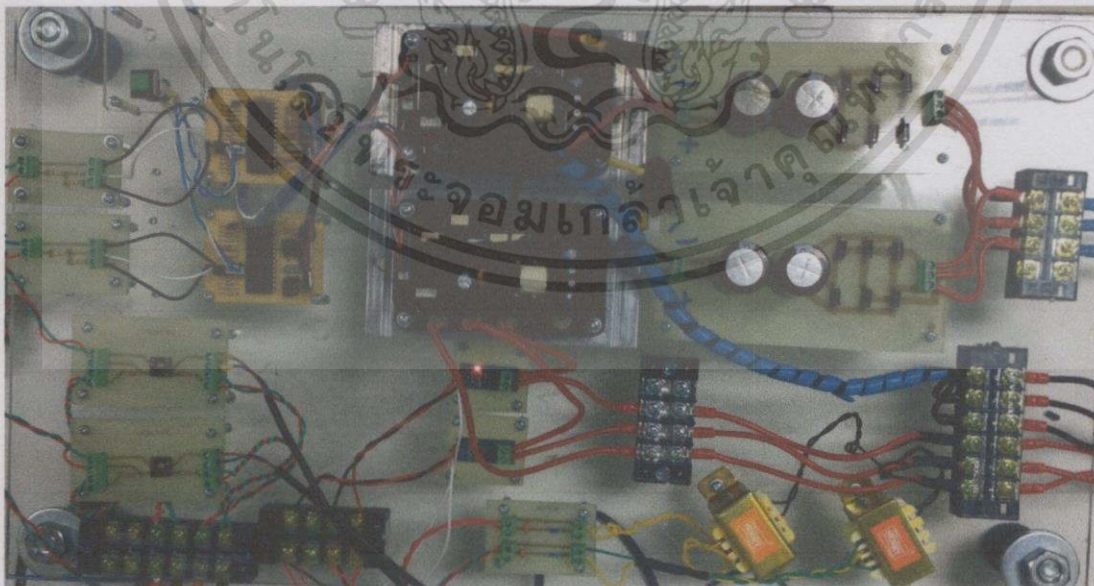
คำสั่งในการพล็อตกราฟแต่ละบรรทัด สามารถอธิบายได้ดังนี้ คำสั่ง figure(1) จะเป็นการกำหนดหน้าต่างที่แสดงกราฟที่จะพล็อต คำสั่ง t ดึงค่าเวลา คำสั่ง nr แสดงความเร็วรอบ (rpm) คำสั่ง Te_tr (N.m) แสดงค่าแรงบิดไฟฟ้าที่คำนวณได้จากสมการ $T_e = \frac{3}{2} P (\bar{I}_{ds} \bar{\lambda}_{qs} - \bar{I}_{qs} \bar{\lambda}_{ds})$ โดยผ่านการกรอง Low pass ที่ความถี่ 50 Hz จากมอเตอร์ จากนั้นจะสั่งพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดไฟฟ้าเทียบกับเวลา และกราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเร็วรอบเทียบกับเวลา

3.4 การติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าและเครื่องกลในการทำงานจริง

3.4.1 การติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้า

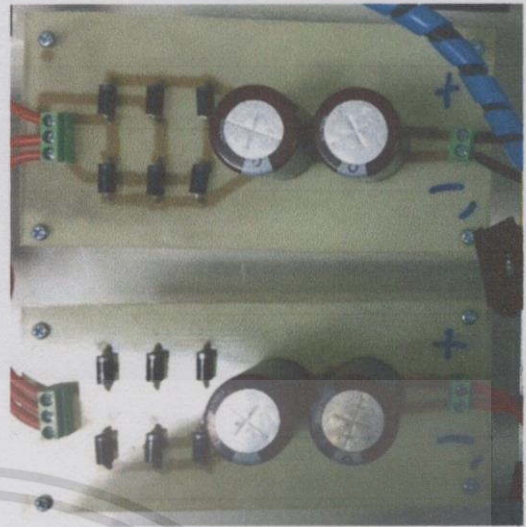
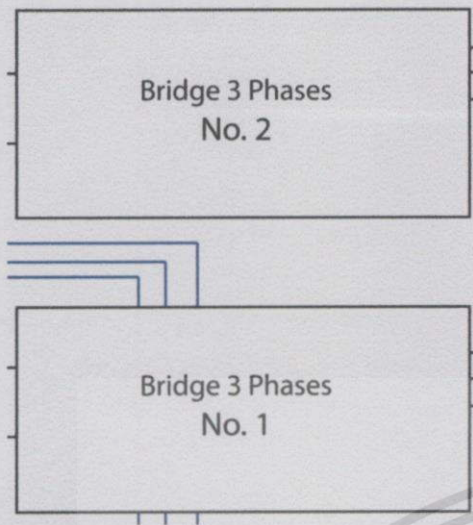


รูปที่ 3.44 แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้า

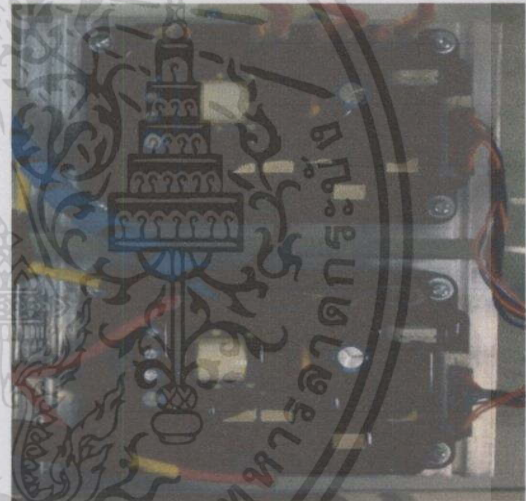
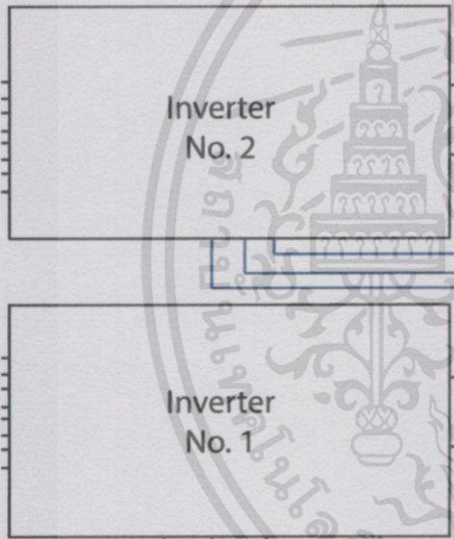


รูปที่ 3.45 การติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้า

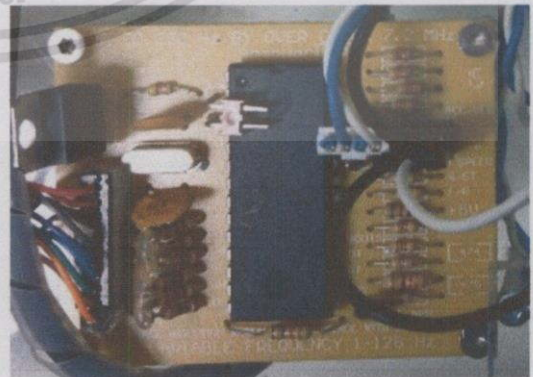
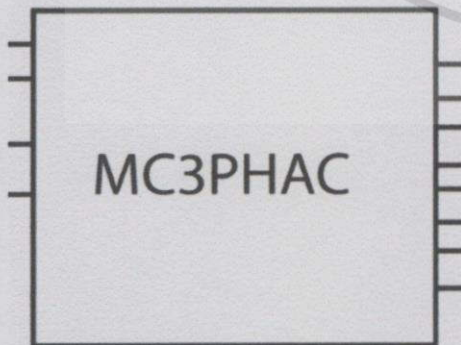
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.46 วงจรเรียงกระแสสามเฟส

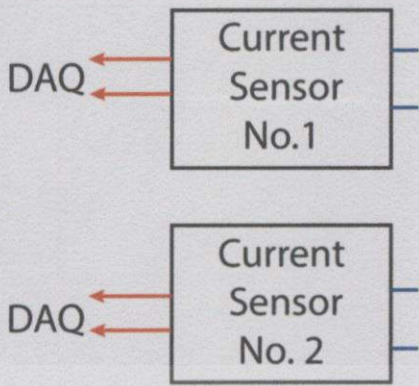


รูปที่ 3.47 อินเวอร์เตอร์ TM-52A

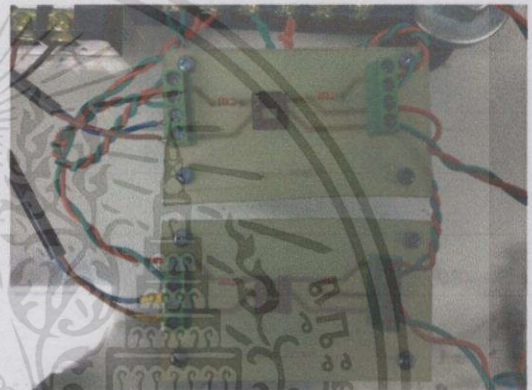
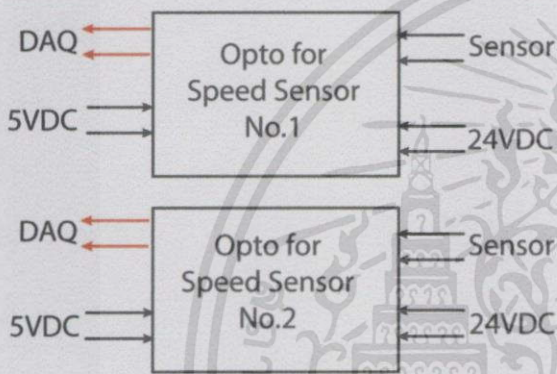


รูปที่ 3.48 IC MC3PHAC

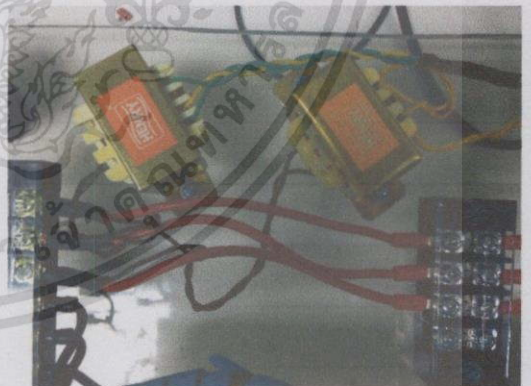
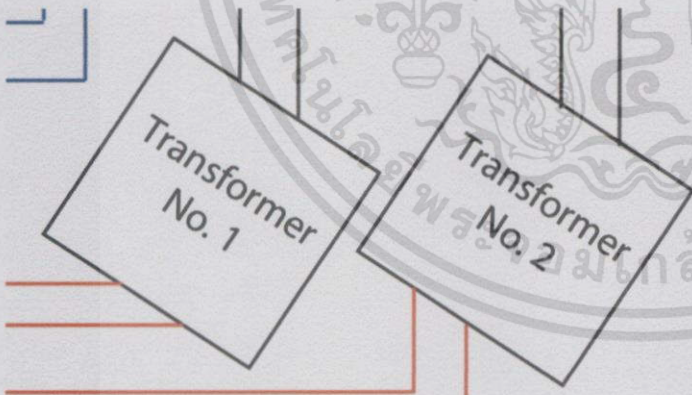
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.49 วงจรวัดกระแส

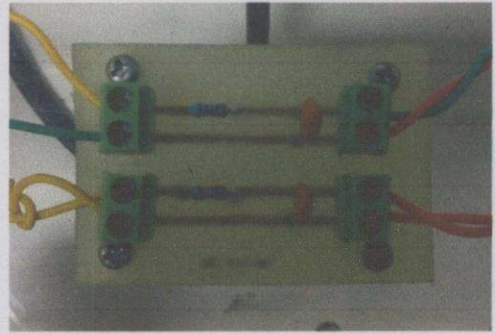
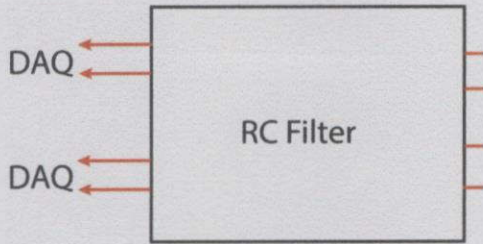


รูปที่ 3.50 วงจร Opto

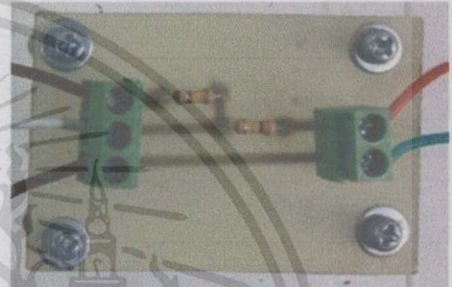
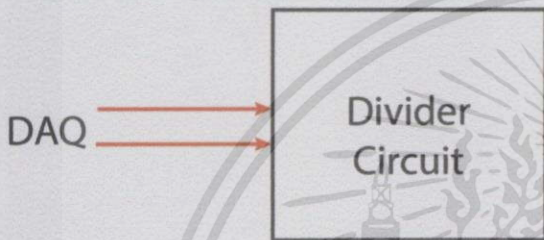


รูปที่ 3.51 หม้อแปลง 220/3

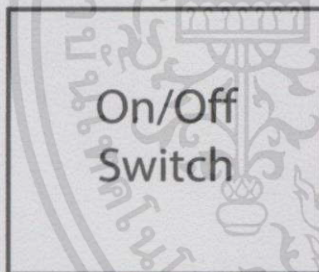
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



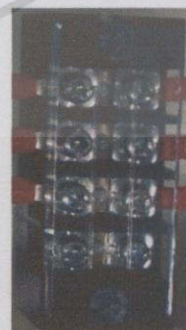
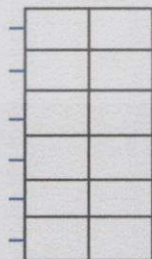
รูปที่ 3.52 วงจรกรองความถี่สูง



รูปที่ 3.53 วงจรลดทอนแรงดัน



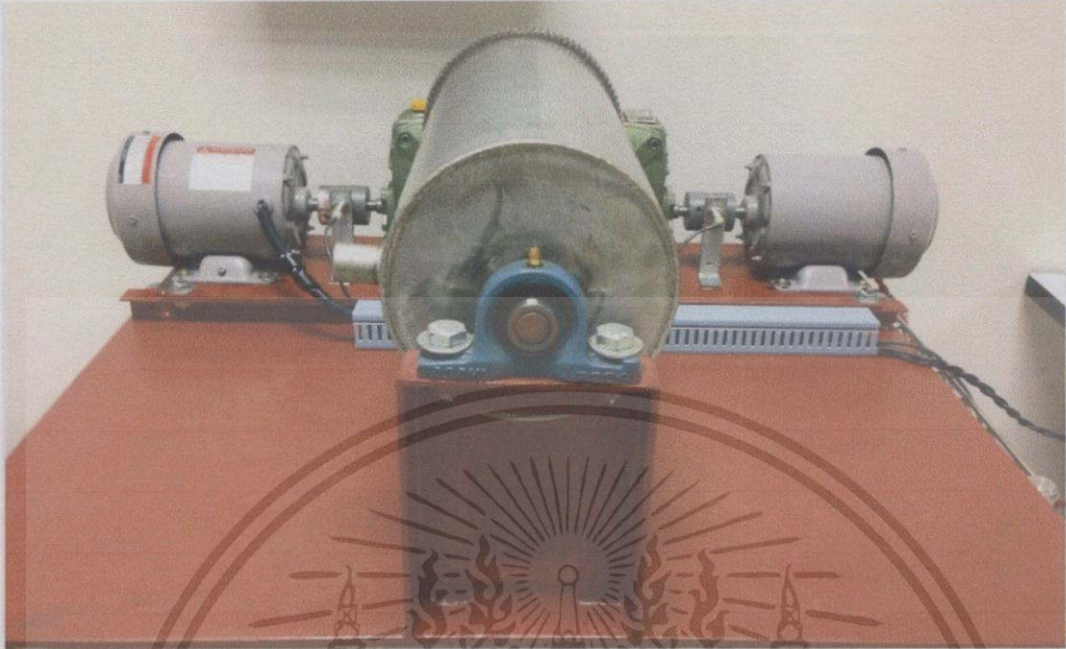
รูปที่ 3.54 สวิตช์



รูปที่ 3.55 จุดพักสาย(เทอร์มินอล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 การติดตั้งเครื่องกล

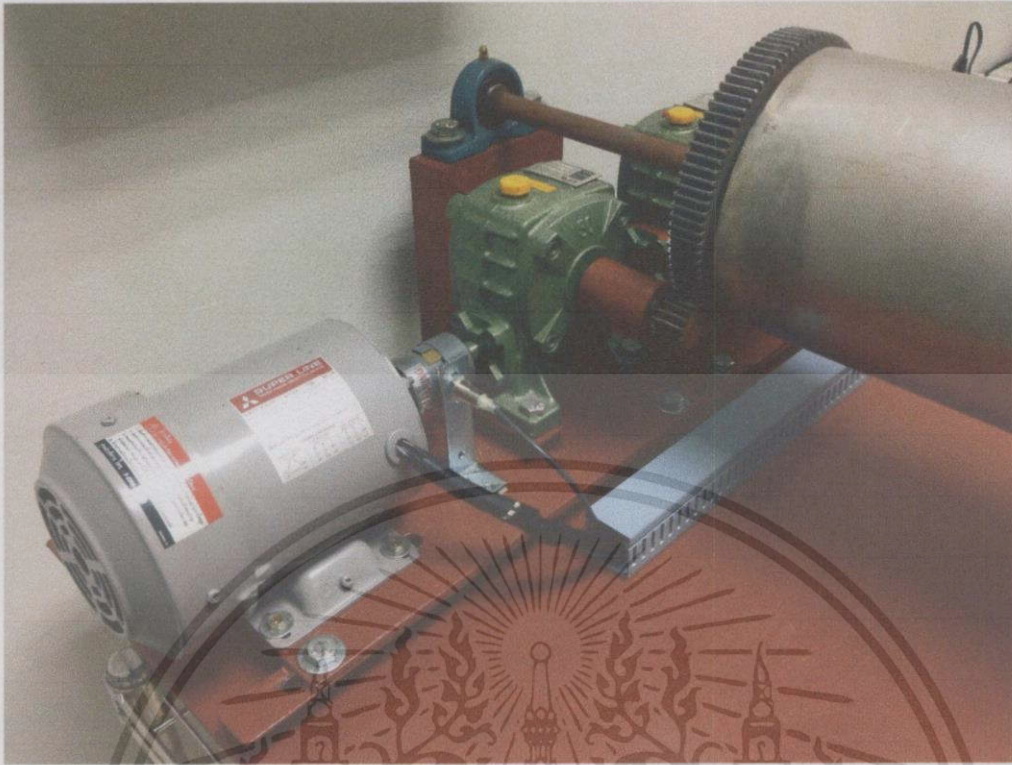


รูปที่ 3.56 การติดตั้งเครื่องกล (ภาพด้านหน้า)



รูปที่ 3.57 การติดตั้งเครื่องกล (ภาพด้านขวา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.58 การติดตั้งเครื่องกล (ภาพด้านซ้าย)



รูปที่ 3.59 การติดตั้งเครื่องกล (ภาพด้านบน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

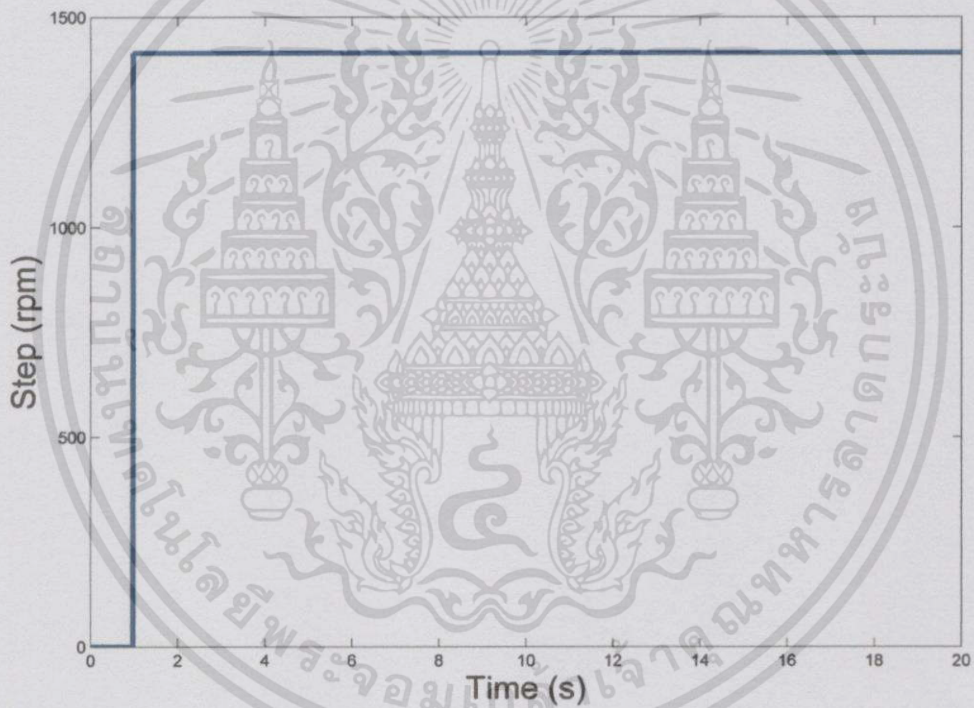
บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองจากโปรแกรม Matlab/Simulink เมื่อไม่คิดผลของภาระทางกล

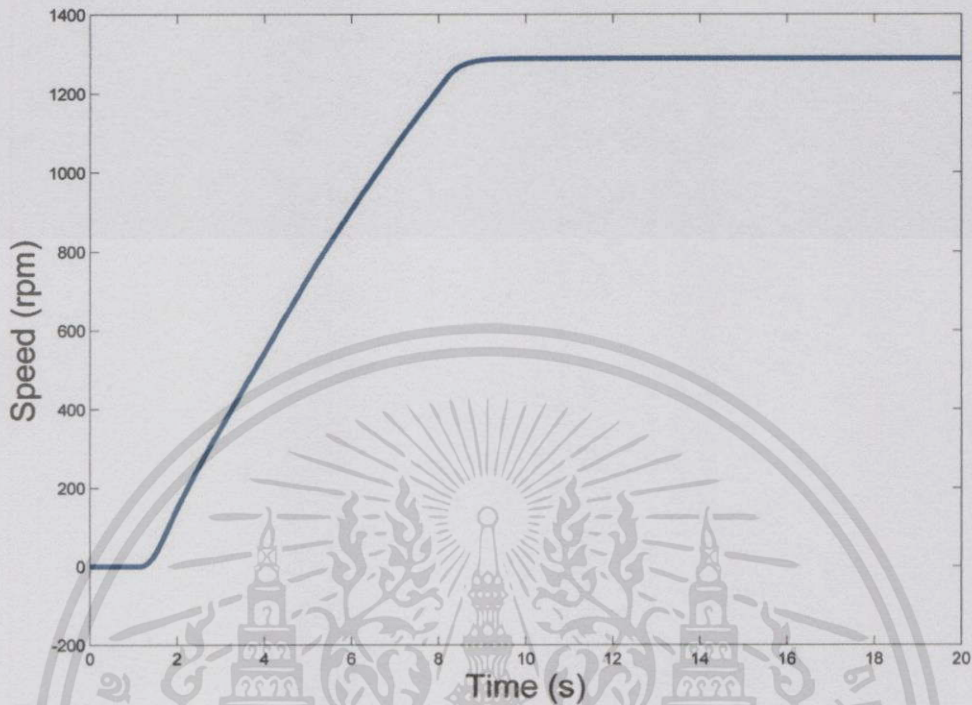
4.1.1 ความเร็วมอเตอร์

จากรูปที่ 4.1 เป็นความเร็วที่ควบคุมโดยกำหนดให้ที่ 0.5 วินาทีมีความเร็วเท่ากับ 1415 RPM เป็นการควบคุมการทำงานแบบขั้นบันได



รูปที่ 4.1 ความเร็วที่ควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

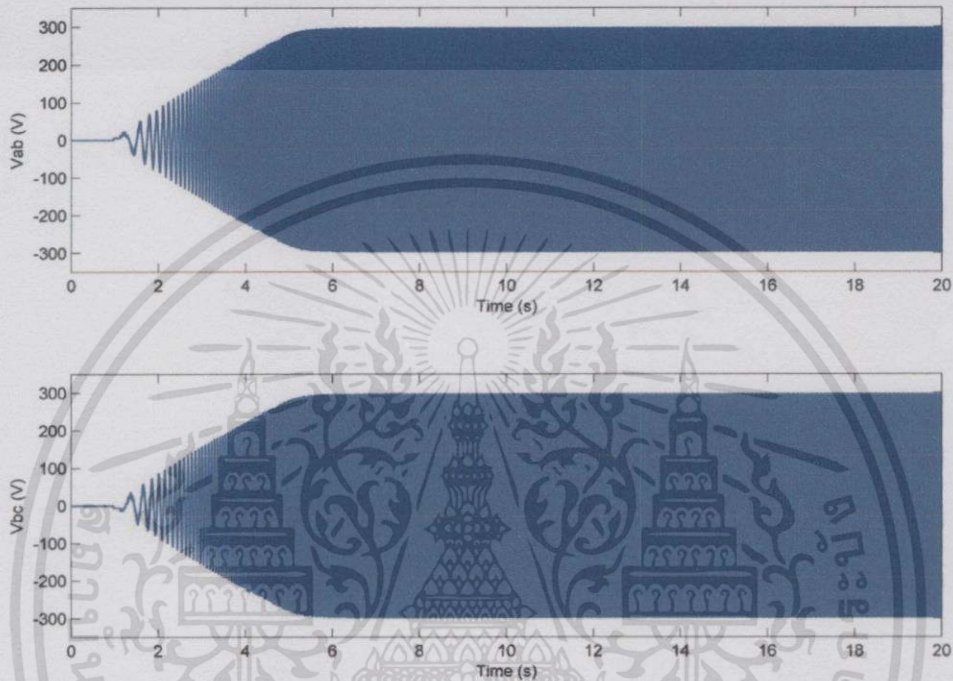


รูปที่ 4.2 ความเร็วมอเตอร์

เมื่อทำการจำลองการทำงานโดยโปรแกรม Matlab/Simulink ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยวิธี แรงดันไฟฟ้าต่อความถี่แบบเปิดนั้นให้ได้ความเร็วที่ต้องการคือ 1415 RPM แต่ผลที่ได้จากการโปรแกรมได้ความเร็ว 1300 RPM ที่เวลา 7.5 วินาที ที่เป็นแบบนี้เพราะการควบคุมแบบเปิดนั้นไม่มีการส่งค่าความเร็วย้อนกลับมาที่ตัวควบคุมจึงควบคุมให้มีความเร็วตามที่ต้องการไม่ได้

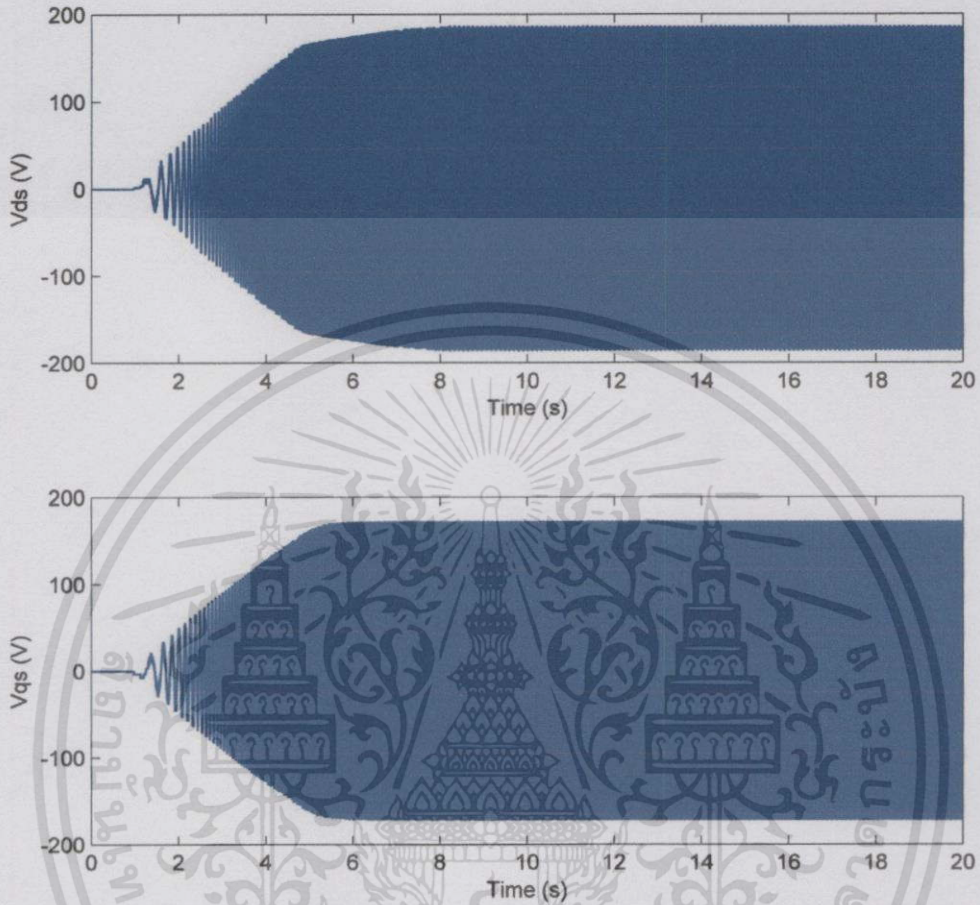
4.1.2 ผลของแรงดันไฟฟ้าที่สเตเตอร์

จากรูปที่ 4.3 เป็นกราฟแรงดันเฟส ab และกราฟแรงดันเฟส bc ที่ได้จากโปรแกรม



รูปที่ 4.3 แรงดันเฟส ab (รูปบน) แรงดันเฟส bc (รูปล่าง)

จากรูป 4.3 ช่วงเวลา 0-0.5 วินาที แรงดันเป็นศูนย์เพราะช่วงนี้ยังไม่มีควบคุมความเร็วช่วงเวลาที่ 0.5-7.5 วินาทีเป็นช่วงเวลาที่ควบคุมความเร็วมอเตอร์ให้มีความเร็วตั้งแต่ 0-1300 RPM จากรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าแรงดัน V_{ab} จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเพื่อเร่งความเร็วตามที่กำหนดและเท่ากับแรงดัน DC ที่ขั้วของอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 300 V คือวินาทีที่ 5 ซึ่งแรงดัน V_{ab} จะมากที่สุดเท่ากับแรงดัน DC และรูปด้านล่างเป็นแรงดัน V_{bc} มีการทำงานเหมือนแรงดัน V_{ab} แรงดันที่ได้นี้มาจากการกรองสัญญาณจาก PWM แล้ว และทำการจำลองแรงดัน V_{ds} และแรงดัน V_{qs} ที่แปลงมาจากแรงดัน V_{ab} และ V_{bc} จะได้ดังรูปที่ 4.4

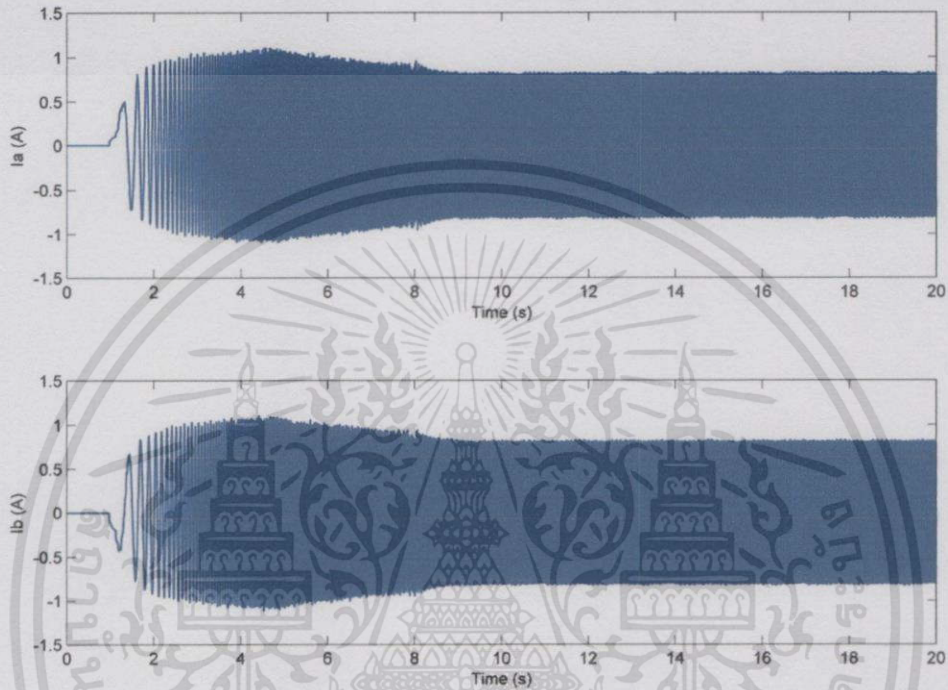


รูปที่ 4.4 แรงดัน V_{ds} และแรงดัน V_{qs}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

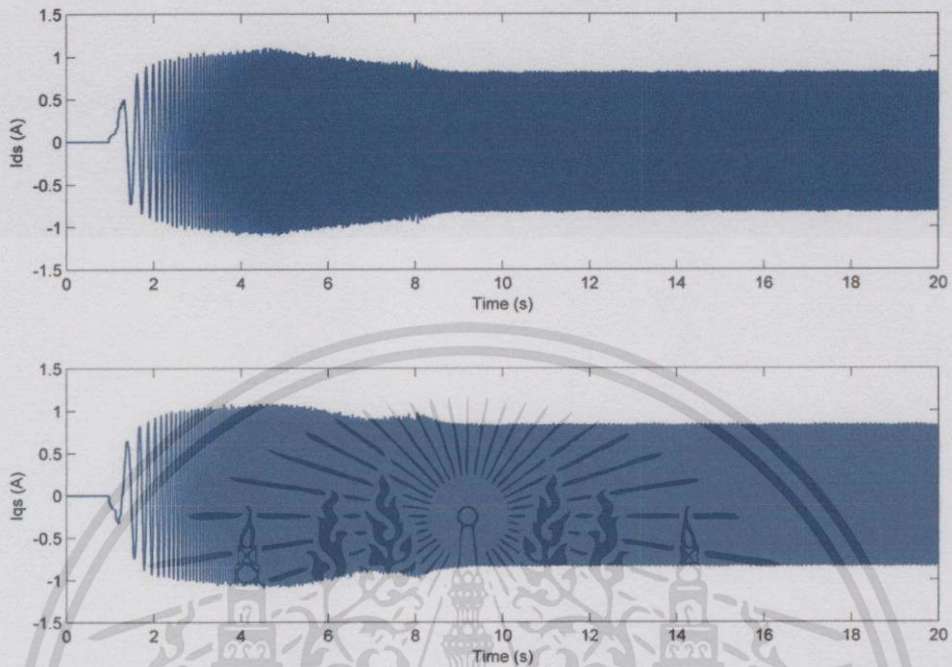
4.1.3 กระแสไฟฟ้าด้านสเตเตอร์

จากรูปที่ 4.5 เป็นกระแสไฟฟ้าด้านสเตเตอร์เฟส a และกระแสสเตเตอร์เฟส b



รูปที่ 4.5 กระแสสเตเตอร์เฟส a และกระแสสเตเตอร์เฟส b

จากรูปจะเห็นว่าช่วงเวลาที่ 0-0.5 วินาทีกระแสจะมีค่าเป็นศูนย์เพราะช่วงนี้ไม่ได้กำหนดให้มอเตอร์ทำงานเมื่อเวลา 0.5-7.5 วินาทีคือช่วงเวลาที่กำหนดให้มอเตอร์มีความเร็วตั้งแต่ 0-1300 RPM จากกราฟจะเห็นว่ากระแส I_a จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตั้งแต่วินาทีที่ 1 ถึงวินาทีที่ 5 และจะมากที่สุดที่วินาทีที่ 5 เพราะแรงดันมาก จากนั้นเมื่อความเร็วของมอเตอร์คงที่กระแสจะลดลงเพราะไม่มีการเร่งความเร็วเกิดขึ้นและกระแสจะคงที่เมื่อความเร็วคงที่ส่วนกระแส I_b จะทำงานเหมือนกับกระแส I_a ทุกอย่างเพียงเลื่อนเฟสไป 120 องศา เมื่อได้กระแส I_a และ I_b จากนั้นสามารถแปลงแกนเพื่อหากระแส I_{sd} และ I_{sq} เพื่อทำการคำนวณแรงบิดไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณต่อไป จากรูปที่ 4.6 เป็นกราฟกระแส I_{sd} และ I_{sq} ที่ได้จากการแปลง I_a กับ I_b

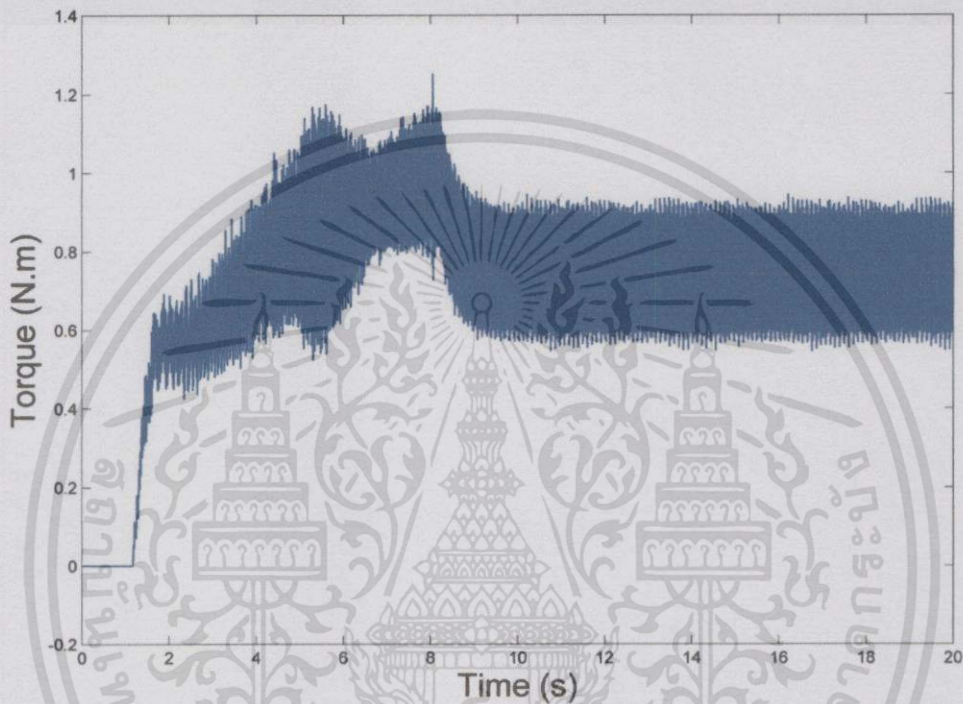


รูปที่ 4.6 กระแส I_{ds} และกระแส I_{qs}

ซึ่งถ้านำกระแส I_{ds} และ I_{qs} มารวมกันทางเวกเตอร์ และคำนวณย้อนกลับก็จะได้กระแส I_a และ I_b ดังเดิม

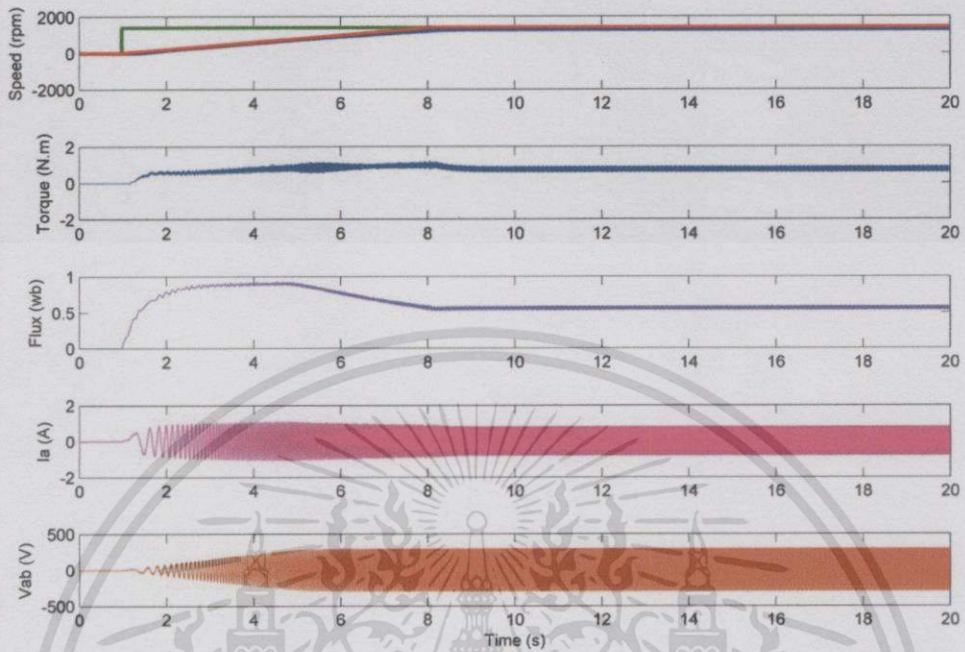
4.1.4 แรงบิด

จากรูปที่ 4.7 คือแรงบิดไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณจากการนำค่า V_{ds}, V_{qs} และ I_{ds}, I_{qs} มาคำนวณจะได้กราฟแรงบิดดังรูป



รูปที่ 4.7 แรงบิดไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณ

จากรูปจะเห็นว่าแรงบิดไฟฟ้าจะสูงที่เวลา 0.5-5 วินาทีเพราะช่วงนี้มอเตอร์เร่งความเร็วจะทำให้แรงบิดไฟฟ้าสูง และจะสูงที่สุดเมื่อที่วินาทีที่ 5 เพราะแรงดันมากที่สุดจากนั้นแรงบิดไฟฟ้าจะคงที่แล้วจะลดลงเมื่อความเร็วของมอเตอร์คงที่ จากรูปที่ 4.8 เป็นแรงบิดไฟฟ้าที่ของมอเตอร์จากโมเดลแบบจำลองจะเห็นว่ามึลักษณะใกล้เคียงกับแรงบิดไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณแต่มีค่ามากกว่าแรงบิดไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณ และมีความถี่เยอะสูงกว่า

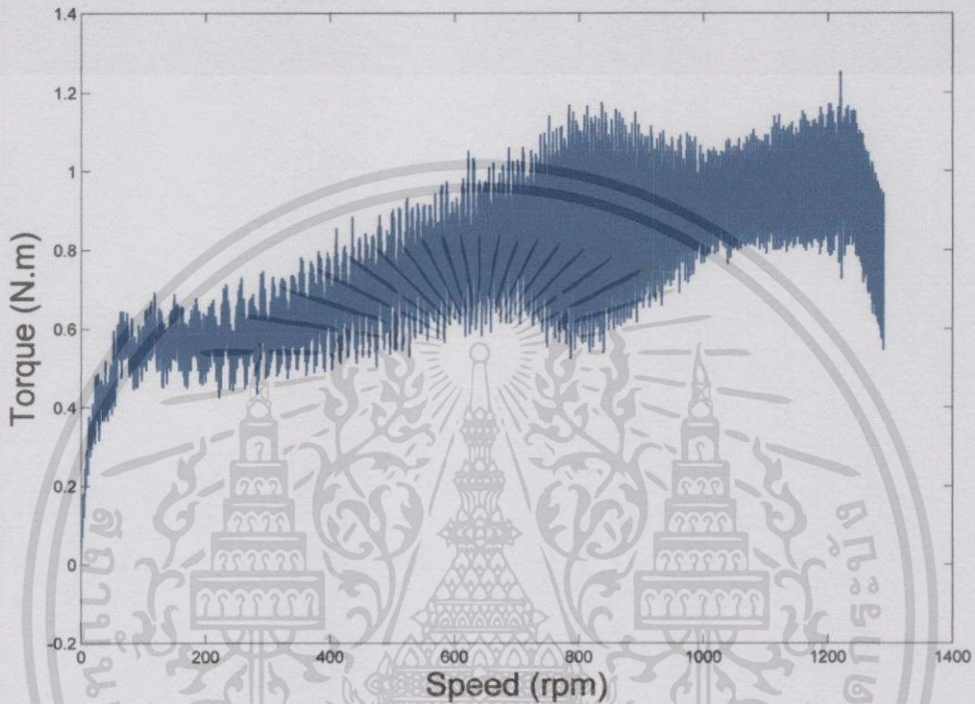


รูปที่ 4.8 ผลตอบสนองของมอเตอร์เมื่อไม่มีการเปลี่ยนแปลงภาระทางกล

จากรูปที่ 4.8 เป็นการเปรียบเทียบการทำงานของความเร็วมอเตอร์ แรงบิดไฟฟ้าของมอเตอร์ ฟลักซ์แม่เหล็ก กระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าไฟฟ้าว่ามีการเปลี่ยนแปลงที่เวลาต่างๆ และผลตอบสนองของมอเตอร์

4.1.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดไฟฟ้า และความเร็วของมอเตอร์เมื่อไม่คิดผลของภาระทางกล

จากรูป 4.9 เป็นกราฟระหว่างแรงบิดไฟฟ้ากับความเร็วรอบ



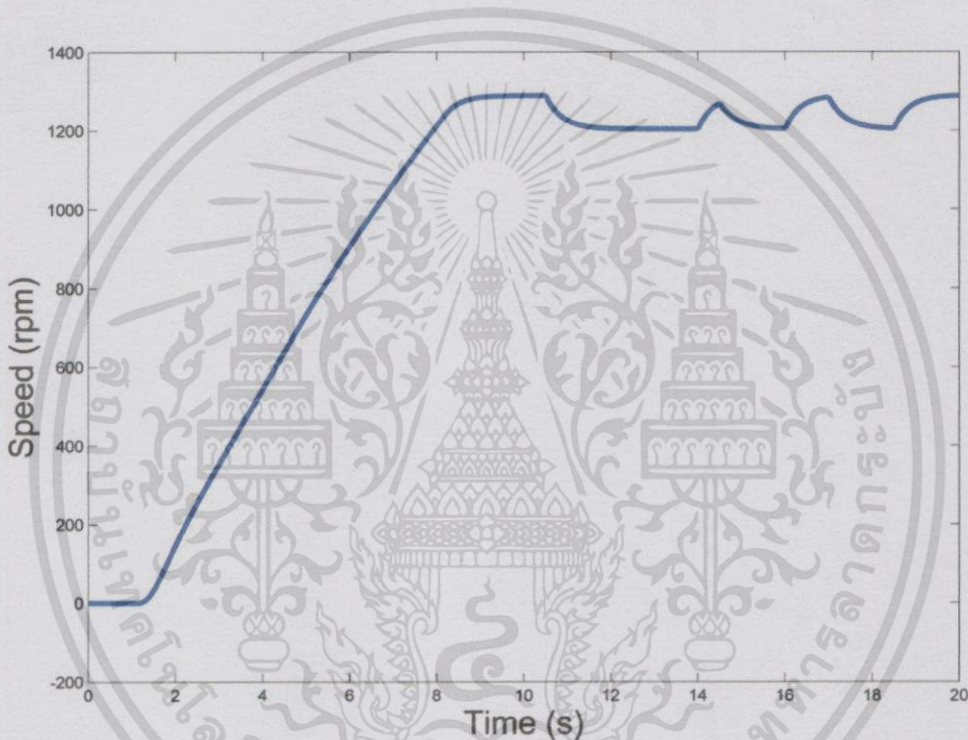
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดไฟฟ้ากับความเร็วรอบ

จากรูปช่วงความเร็วมอเตอร์ 0-700 RPM เป็นช่วงที่ถูกควบคุมในช่วงนี้แรงบิดไฟฟ้าจะเพิ่มสูงขึ้นแต่ในช่วง 700-1300 RPM เป็นช่วงที่ถูกเร่งความเร็วเหมือนกันแต่สังเกตว่าแรงบิดไฟฟ้าจะน้อยเพราะว่าช่วงนี้เป็นช่วงที่ความถี่ไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงอย่างเดียวซึ่งแรงดันไฟฟ้าจะคงที่ที่ 300 V ดังนั้นแรงบิดไฟฟ้าจึงลดน้อยลงซึ่งมีผลต่อฟลักซ์แม่เหล็กก็จะทำให้น้อยลงด้วยและช่วงนี้แรงบิดจะคงที่เมื่อความถี่ไฟฟ้าหรือความเร็วไม่เปลี่ยนแปลง

4.2 ผลการทดลองจากโปรแกรม Matlab/Simulink เมื่อคิดผลของภาระทางกล

4.2.1 ความเร็วมอเตอร์เมื่อมีภาระทางกล

เนื่องจากการทดลองจริงต้องคิดผลของภาระทางกลซึ่งในที่นี้ก็คือปูนซีเมนต์ซึ่งได้ทำการจำลองการทำงานโดยสร้างภาระทางกลขึ้นมาเพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้ว่าสามารถใช้งานเป็นไปตามสถานการณ์จริงหรือไม่ จากรูป 4.10 เป็นผลความเร็วของมอเตอร์เมื่อมีภาระทางกล

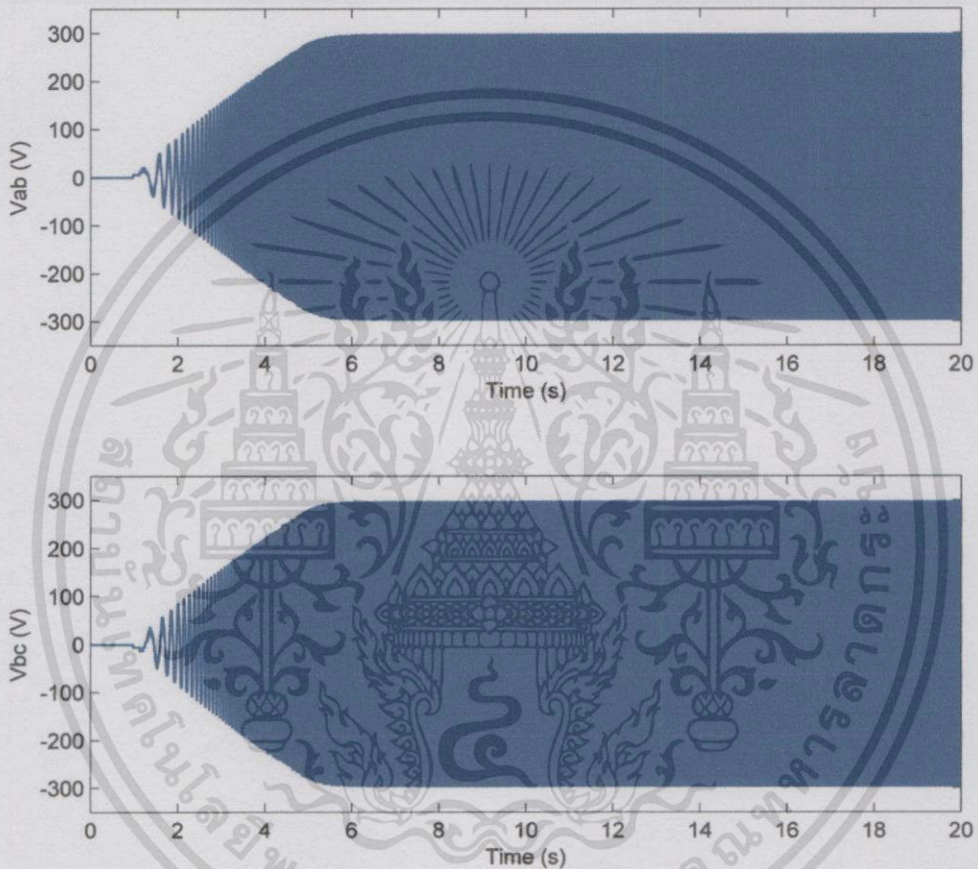


รูปที่ 4.10 ความเร็วมอเตอร์เมื่อมีภาระทางกล

จากรูปจะช่วงเวลาที่ 0-10 วินาทีเป็นช่วงที่ยังไม่มีผลของภาระ แต่เมื่อเกินช่วงวินาทีที่ 10 เป็นต้นไปจะเห็นว่าภาระทางกลมีการเปลี่ยนแปลงแบบต่อเนื่อง โดยช่วงวินาทีที่ 10-14, 14.5-16, 17-18 ดังรูปโดยภาระทางกลที่ทำการจำลองคือ 0.2 N.m จะเห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.10 ซึ่งไม่คิดผลภาระทางกลจะเห็นว่าความเร็วจะลดลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของภาระทางกล และจะกลับสู่สภาวะความเร็วที่ควบคุมอีกครั้งเมื่อไม่มีภาระทางกลโดยความเร็วจะไม่เปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด

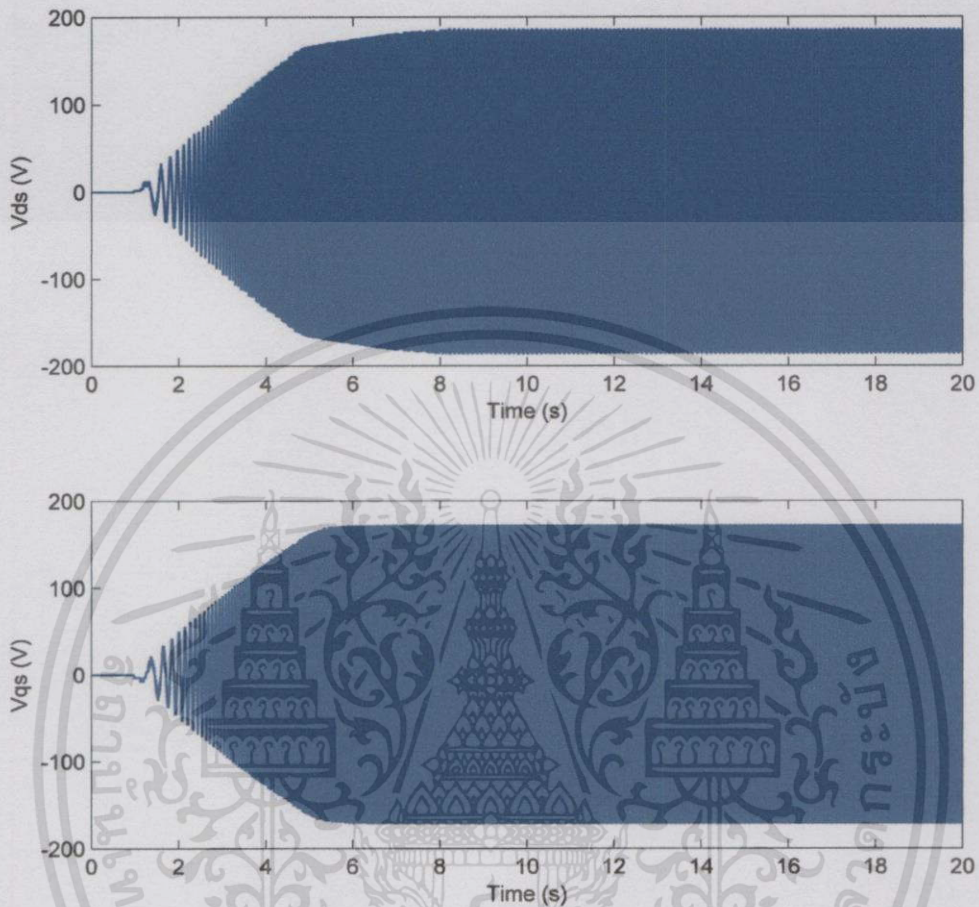
4.2.2 ผลของแรงดันไฟฟ้าที่สเตเตอร์เมื่อมีภาระทางกล

จากรูปที่ 4.11 แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากผลของการจำลองโดยแรงดันที่วัดคือ V_{ab} และ V_{bc} จะเห็นว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากกรณีที่ไม่มีผลของภาระทางกล



รูปที่ 4.11 ผลของแรงดันไฟฟ้าด้านสเตเตอร์เมื่อมีภาระทางกล

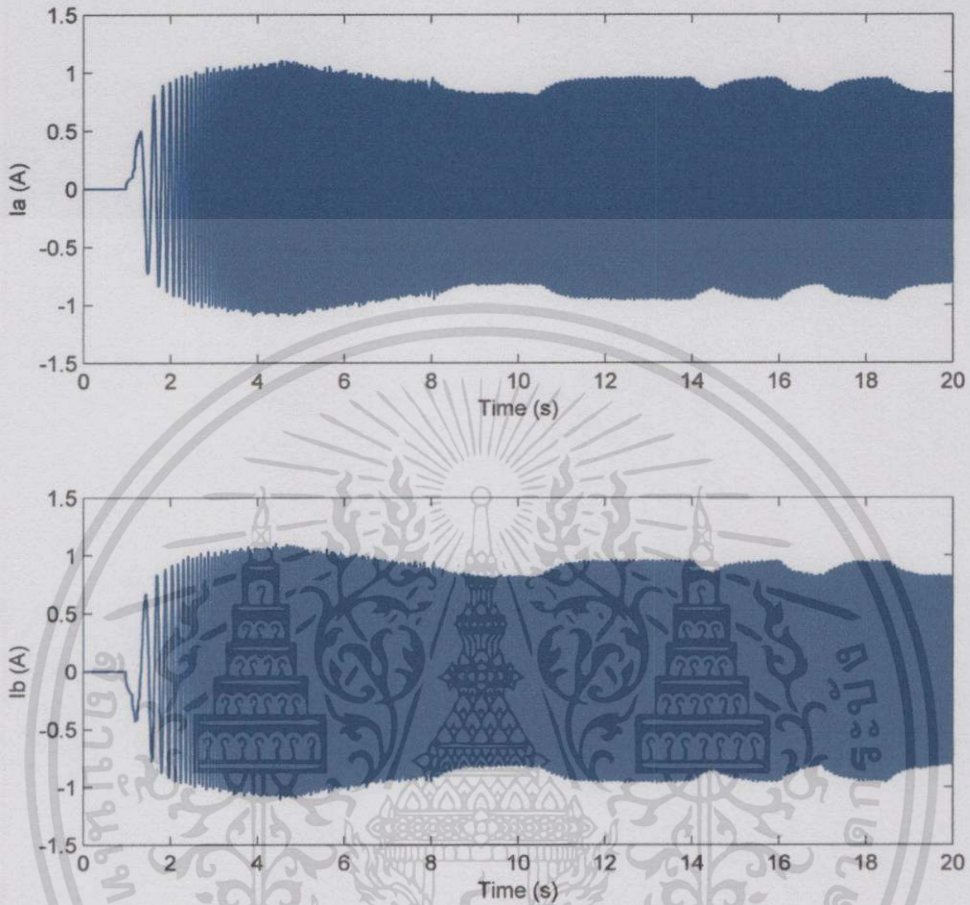
และจากรูปที่ 4.12 เป็นแรงดันไฟฟ้าด้านสเตเตอร์ที่ได้จากการแปลงแกนเพื่อใช้ในการหาแรงบิดไฟฟ้าของมอเตอร์



รูปที่ 4.12 แรงดันไฟฟ้าด้านสแตเตอร์ V_{ds}, V_{qs}

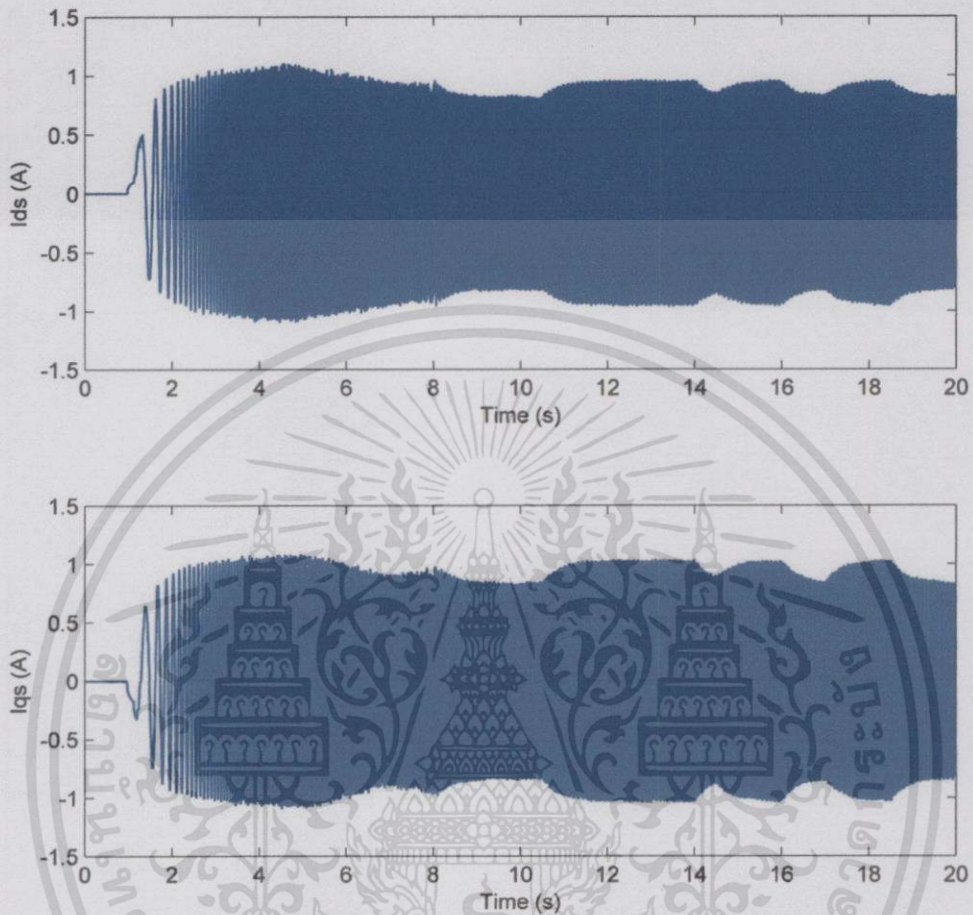
4.2.3 ผลของกระแสไฟฟ้าสแตเตอร์เมื่อมีภาระทางกล

จะเห็นว่าเมื่อมีผลของภาระทางกลเกิดขึ้นกระแสไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 4.13 จากการจำลองจะสังเกตเห็นว่ากระแสจะเปลี่ยนแปลงมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับภาระทางกลว่ามีค่ามากหรือน้อยจากรูปช่วงเวลาที่มีภาระทางกลที่ 10-14, 14.5-16, 17-18 คือช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลง และกระแสจะเพิ่มขึ้นจาก 0.75 A เป็น 1 A เพื่อให้สามารถตอบสนองต่อภาระได้



รูปที่ 4.13 กระแสด้านสเตเตอร์ I_a, I_b เมื่อคิดผลของภาวะทางกล

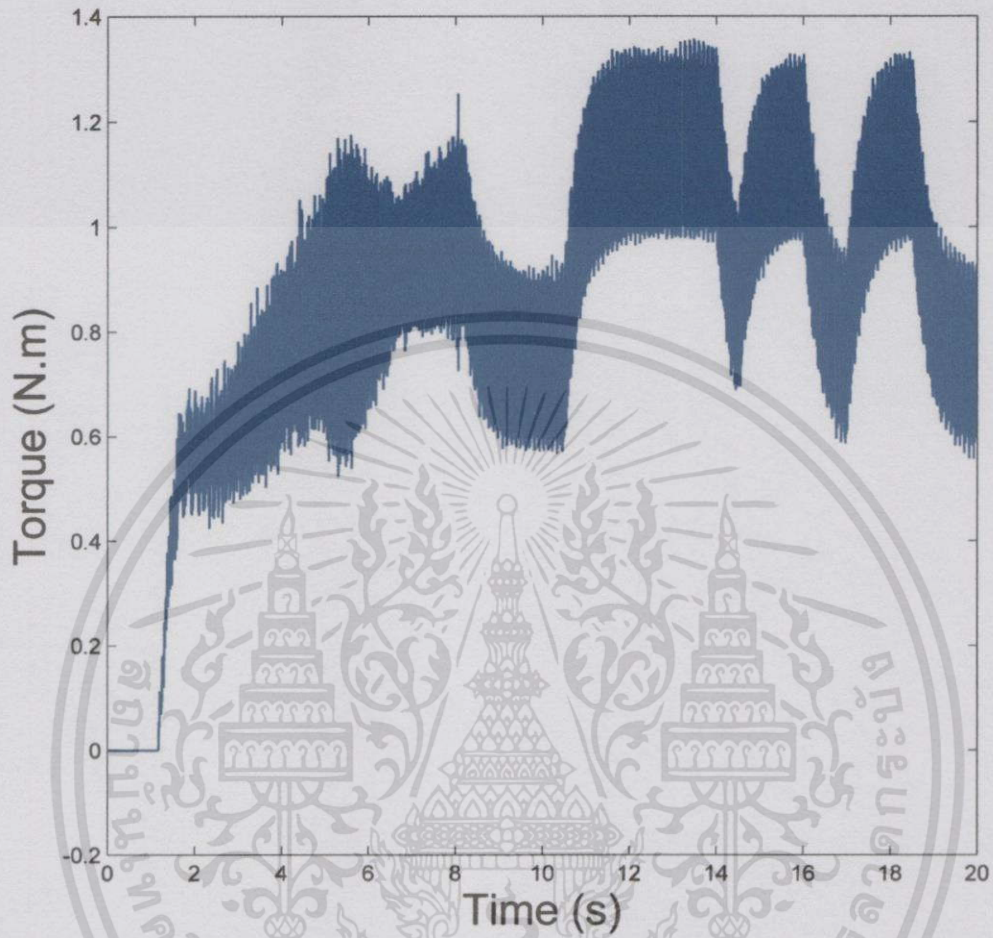
จากรูปที่ 4.14 เป็นกระแสจากการแปลงแกนเพื่อนำไปคำนวณหาค่าแรงบิดทางไฟฟ้า โดยในรูปที่ 4.14 จะมีลักษณะคล้ายกับกระแส I_a, I_b แต่ขนาดจะไม่เท่ากัน



รูปที่ 4.14 กระแสด้านสเตเตอร์ I_{ds}, I_{qs} เมื่อคิดผลของภาระทางกล

4.2.4 แรงบิดไฟฟ้าเมื่อคิดผลของภาระทางกล

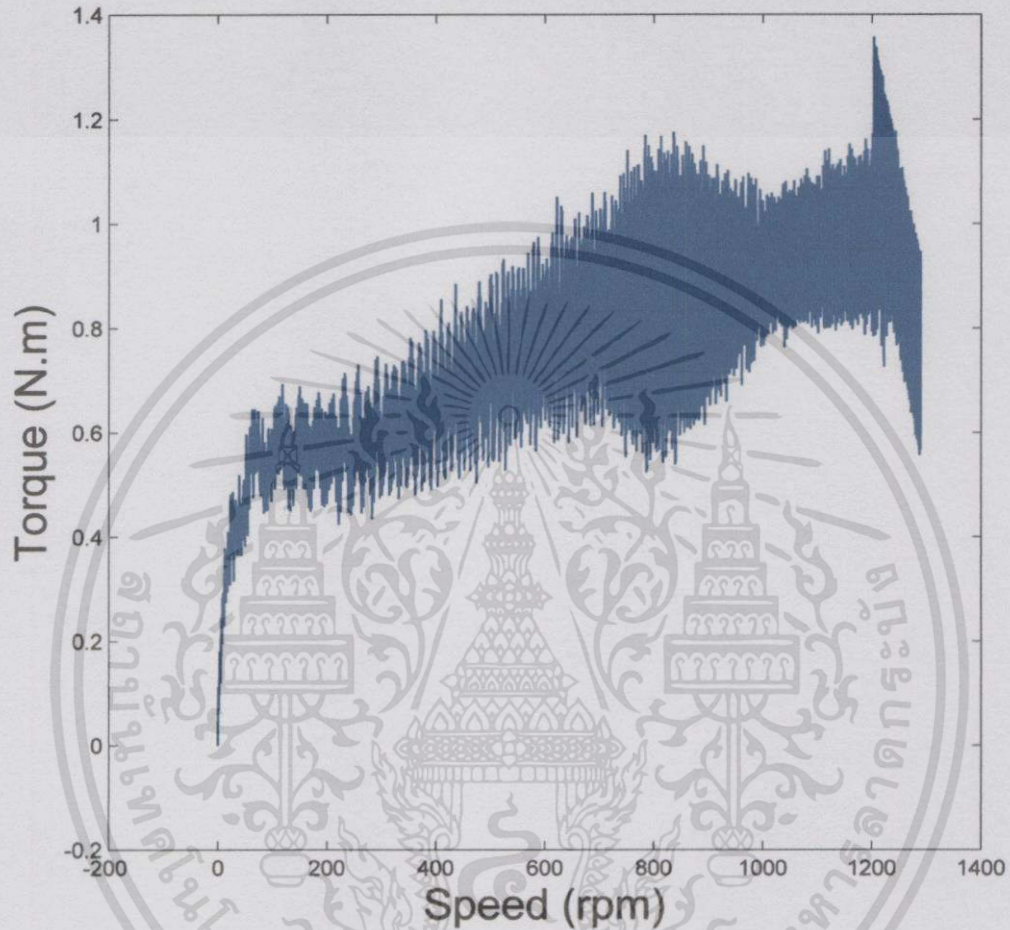
จากรูปที่ 4.15 เป็นกราฟของแรงบิดเมื่อคิดผลของภาระทางกลโดยจะสังเกตเห็นว่าแรงบิดจะเพิ่มขึ้นเพื่อตอบสนองต่อภาระทางกลโดยช่วงเวลาที่ 10-14, 14.5-16, 17-18 ซึ่งเป็นช่วงที่มอเตอร์ต้องการเพิ่มแรงบิดเพื่อให้สามารถที่จะขับภาระทางกลต่อไปได้



รูปที่ 4.15 แรงบิดไฟฟ้าเมื่อคิดผลของภาระทางกล

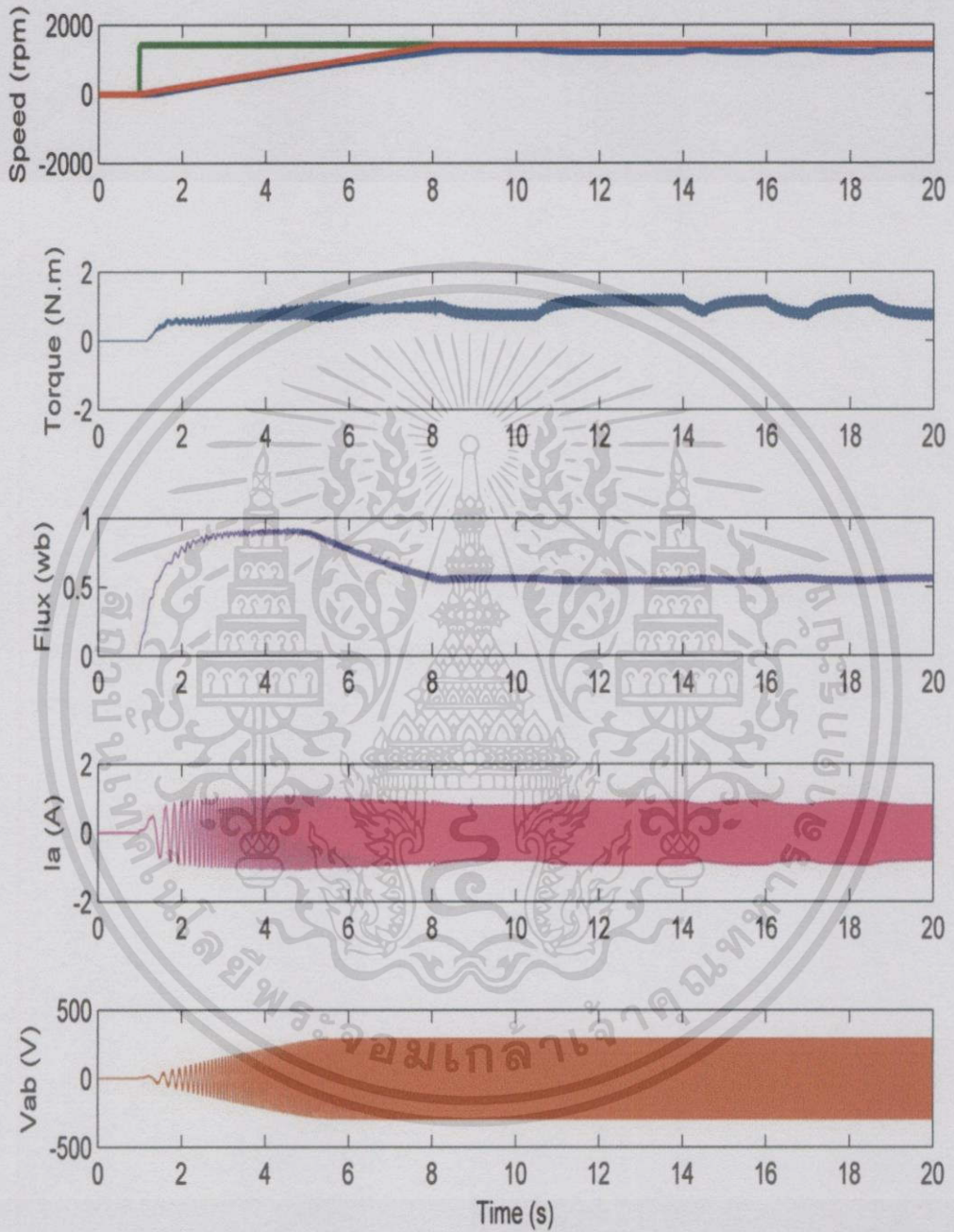
จะสังเกตเห็นว่ามอเตอร์สามารถที่จะตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงได้เป็นอย่างดีและจะรักษาความเร็วขณะนั้นไว้ด้วย

4.2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดไฟฟ้าและความเร็วของมอเตอร์เมื่อคิดผลของภาระทางกล



รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดไฟฟ้ากับความเร็วของมอเตอร์

จากรูปที่ 4.16 เมื่อนำแรงบิดไฟฟ้ามาเปรียบเทียบกับความเร็วของมอเตอร์จะเห็นว่า ช่วงความเร็วตั้งแต่ 0–1300 RPM เป็นช่วงที่มอเตอร์เริ่มทำงานทำให้แรงบิดเพิ่มและช่วงที่ความเร็วที่ความเร็วมากกว่า 1300 RPM เป็นต้นไปเป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงภาระทางกลจะสังเกตเห็นว่า แรงบิดของมอเตอร์จะสั้นมากกว่ากรณีที่ไม่มีภาระทางกลที่มอเตอร์สั้นเพื่อรักษาความเร็วให้ได้ที่ 1300 RPM ไว้ และจากรูปที่ 4.17 เป็นการเปรียบเทียบ ความเร็วมอเตอร์ แรงบิดไฟฟ้า ฟลักซ์แม่เหล็ก กระแสสเตเตอร์ แรงดันสเตเตอร์ เพื่อแสดงถึงผลของการเปลี่ยนแปลงภาระทางกลที่เวลาต่างๆ

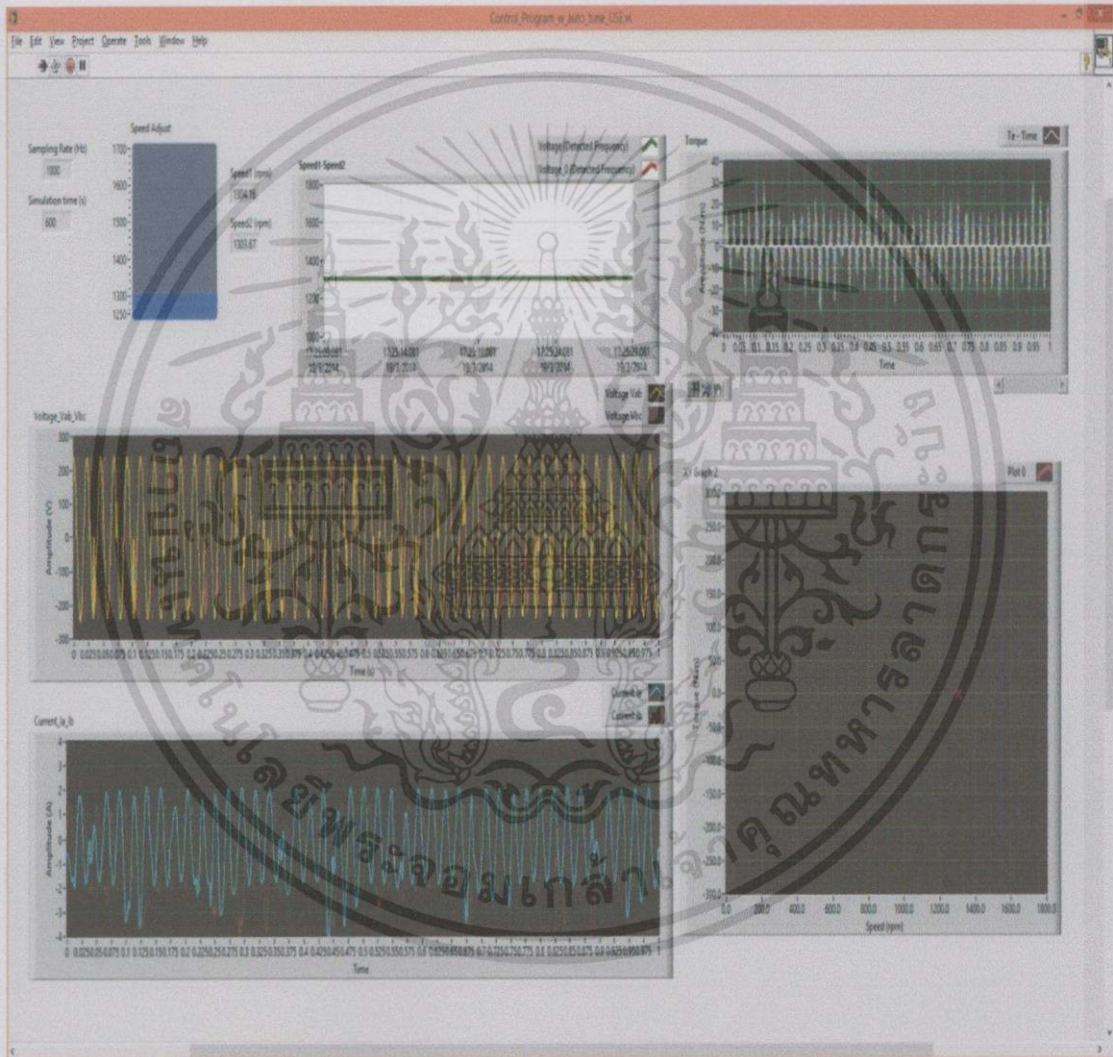


รูปที่ 4.17 ผลตอบสนองของมอเตอร์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการทดลองจริงจากวัดจากโปรแกรม Labview แบบไม่คิดผลของภาระทางกล

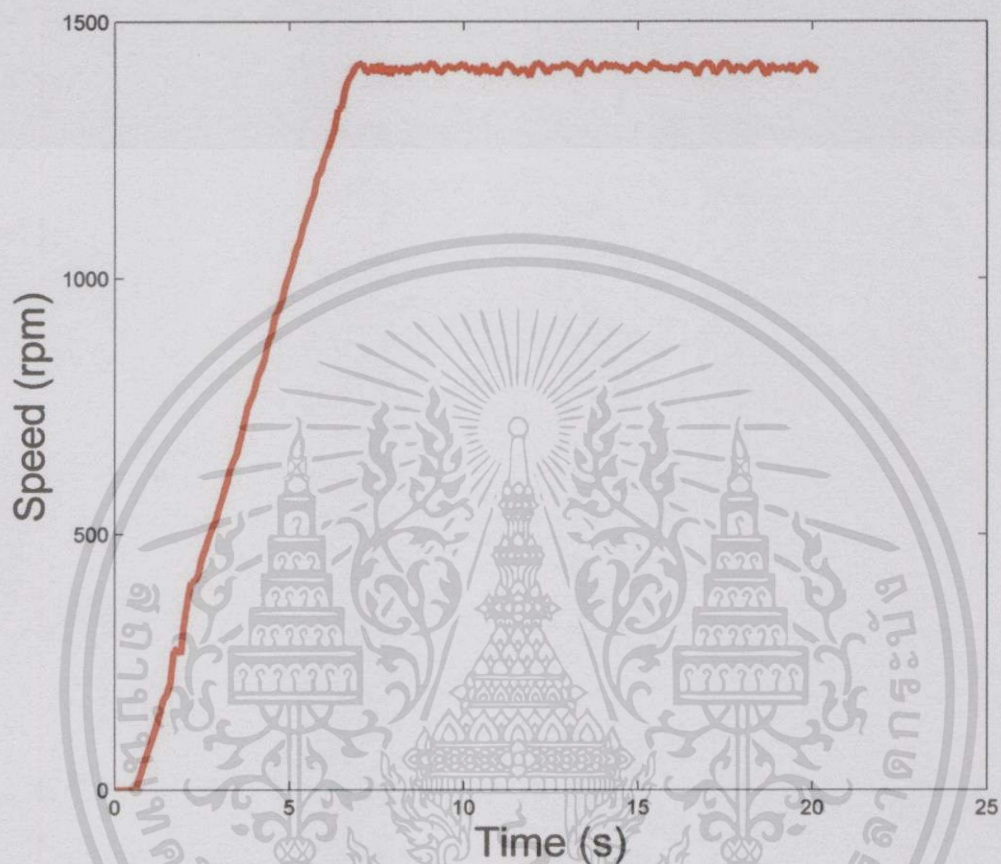
จากรูปที่ 4.18 เป็นหน้าจอแสดงผลการทำงานของโปรแกรม Labview ซึ่งไม่คิดผลของภาระทางกลจะเห็นว่ากำหนดให้ความเร็วของมอเตอร์ตัวที่ 1 และมอเตอร์ตัวที่ 2 มีความเร็วเท่ากันที่ 1300 RPM เพื่อศึกษาว่าการทำงานของมอเตอร์ 2 ตัวนี้สามารถขับถังปูนซีเมนต์ที่ยังไม่ได้ใส่ภาระทางกลได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 4.18 หน้าจอแสดงผลการทำงานของโปรแกรม Labview ซึ่งไม่คิดผลของภาระทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 ความเร็วมอเตอร์ที่ได้จากการทดลองเมื่อไม่คิดผลของภาระทางกล

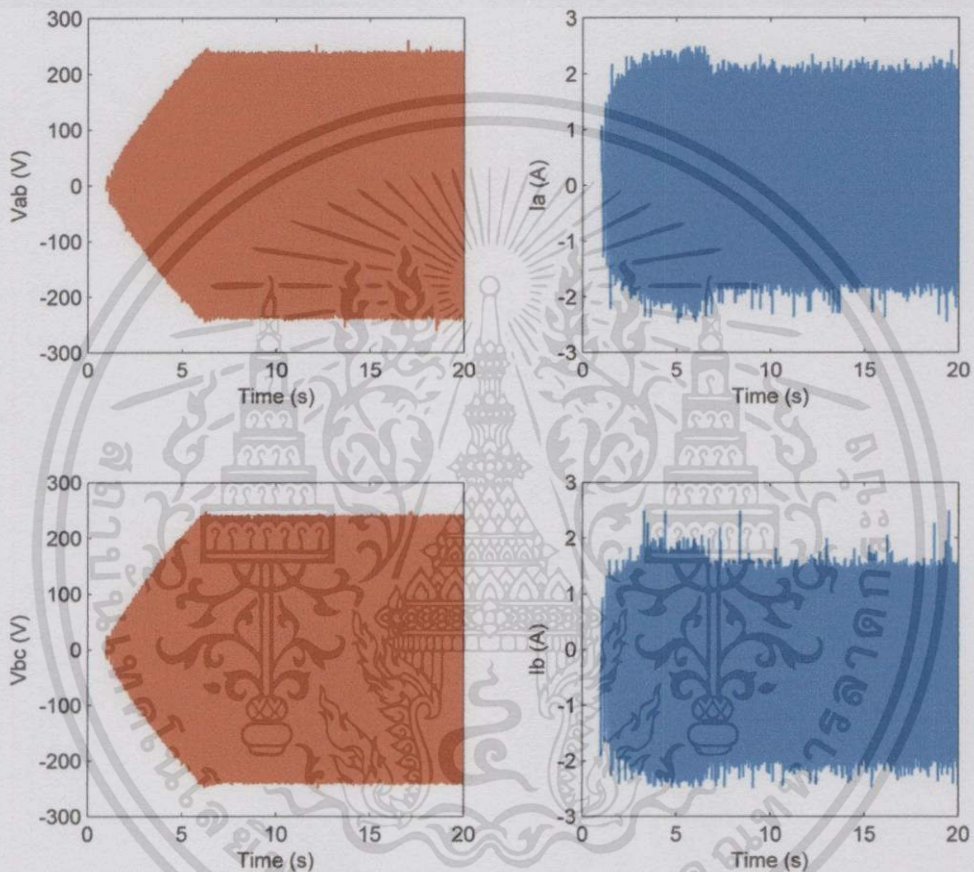


รูปที่ 4.19 ความเร็วของมอเตอร์จากอุปกรณ์จริงเมื่อไม่มีภาระทางกล

จากรูปวัดความเร็วจริงของมอเตอร์ด้วยโปรแกรม Labview โดยใช้ Proximity Sensor วัดแล้วส่งเข้า DAQ เพื่อรับค่าสัญญาณส่งทางหน้าจอคอมพิวเตอร์คำนวณจะได้ดังรูปที่ 4.19 จะเห็นว่าความเร็วที่ได้มีค่าสูงสุดที่ 1300 RPM

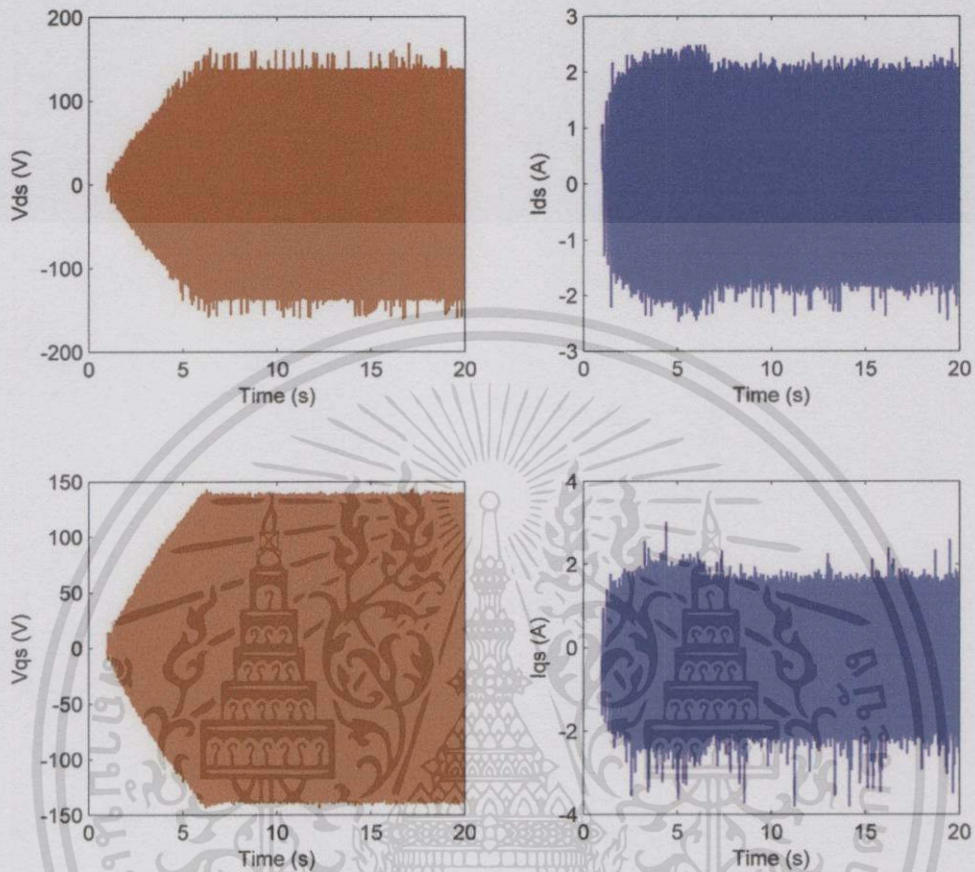
4.3.2 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าด้านสเตเตอร์เมื่อไม่คิดผลของภาวะทางกล

จากรูปที่ 4.11 วัดแรงดันไฟฟ้าจากมอเตอร์เฟส V_{ab}, V_{bc} และกระแสไฟฟ้า I_a, I_b จะได้ดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 แรงดันไฟฟ้า V_{ab}, V_{bc} และกระแสไฟฟ้า I_a, I_b เมื่อไม่คิดผลของภาวะทางกล

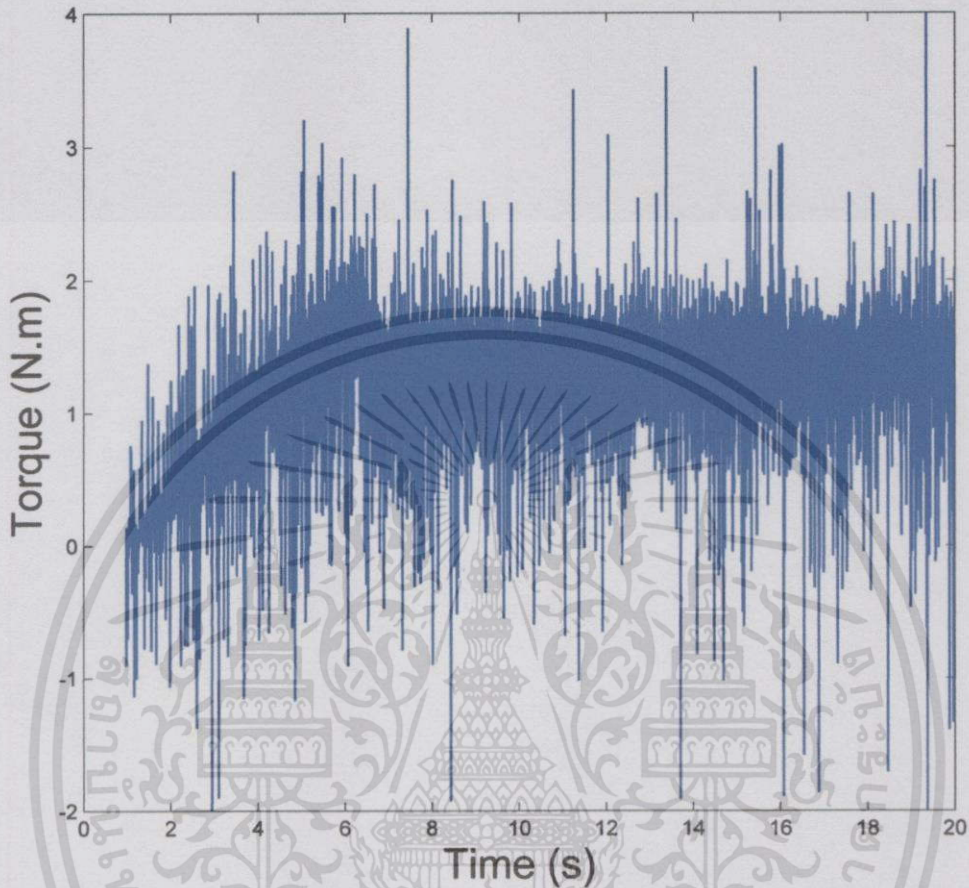
จากรูปที่ 4.20 เมื่อทำการควบคุมความเร็วของมอเตอร์แล้ววัดแรงดันไฟฟ้าจะเห็นว่าแรงดันมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วของมอเตอร์เพิ่มและจะมากที่สุดที่ 300 V ที่เวลาประมาณวินาทีที่ 6 จากนั้นแรงดันจะคงที่ไม่เพิ่มขึ้นอีก จากรูปด้านล่างเมื่อแรงดันมากขึ้นกระแสที่ใช้จะสูงตามและกระแสจะมากที่สุดเมื่อแรงดัน 300V จากนั้นกระแสจะลดลงและเข้าสู่สภาวะคงที่หลังจากที่ความเร็วของมอเตอร์คงที่ที่ 1300 RPM จะเห็นว่ามีความใกล้เคียงกับการจำลองทาง Matlab/Simulink และจากรูปที่ 4.21 เป็นกราฟ $V_{ds}, V_{qs}, I_{ds}, I_{qs}$ ที่แปลงแกนมาจาก V_{ab}, V_{bc}, I_a, I_b



รูปที่ 4.21 กราฟแรงดัน V_{ds} , V_{qs} และกราฟกระแส I_{ds} , I_{qs} เมื่อไม่คิดผลของภาระทางกล

4.3.3 แรงบิดไฟฟ้าจากการวัดเมื่อไม่คิดผลของภาระทางกล

แรงบิดทางไฟฟ้าที่ได้จากการวัดโดยนำแรงดัน V_{ds} , V_{qs} , I_{ds} , I_{qs} นำมาคำนวณหาค่าแรงบิดทางไฟฟ้าเพื่อเปรียบเทียบกับแรงบิดไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองโดยโปรแกรม Matlab/Simulink Model กับการรับค่าแรงดันไฟฟ้า V_{ab} , V_{bc} และกระแสไฟฟ้า I_a , I_b มาคำนวณหาค่าแรงบิดจะได้ดังรูปที่ 4.22

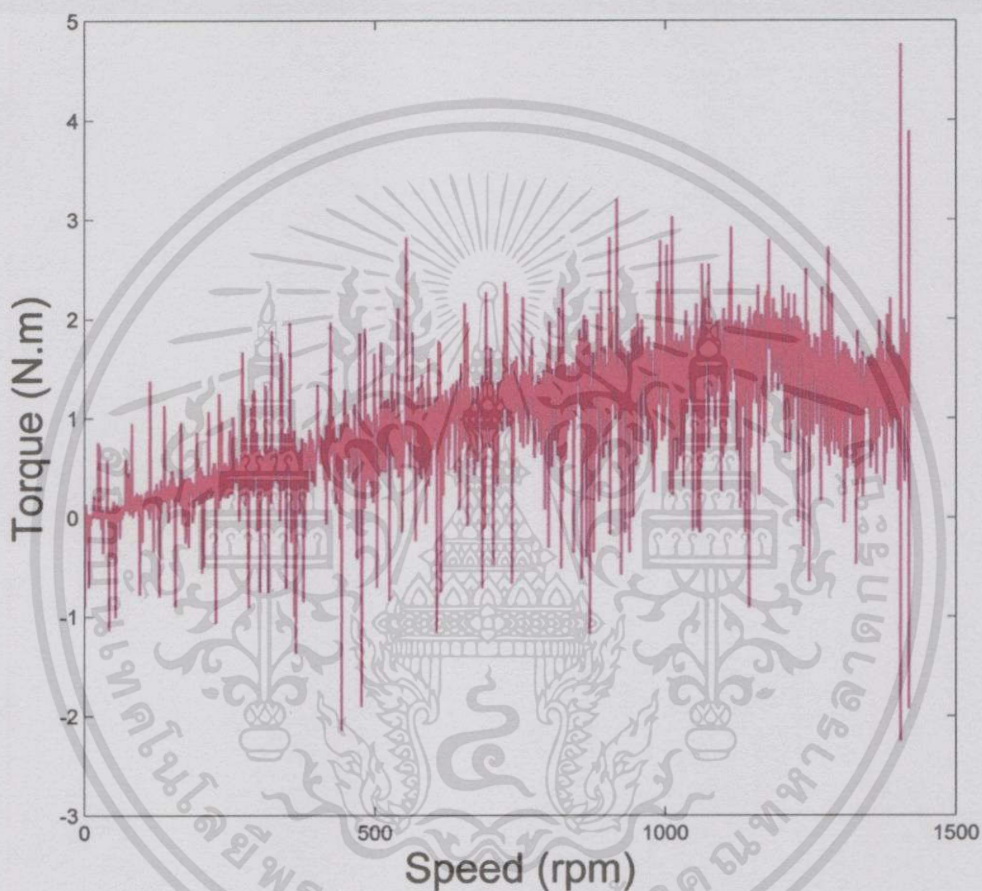


รูปที่ 4.22 แรงบิดทางไฟฟ้าเมื่อไม่คิดผลของภาระทางกล

จากรูปที่ 4.22 จะเห็นว่าแรงบิดทางไฟฟ้ามีค่ามากกว่าแรงบิดไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองใน Matlab/Simulink ทั้งนี้เนื่องมาจากการจำลองนั้นไม่ได้ถูกขับภาระทางกลแต่ในรูปที่ 4.22 คิดผลของเฟือง เกียร์ทดรอบซึ่งเป็นภาระทางกลอย่างหนึ่งแรงบิดไฟฟ้าของมอเตอร์มีค่า 1 N.m โดยในรูปนี้ช่วงเวลาตั้งแต่ 0.5-7 วินาทีแรงบิดไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วมากขึ้นแต่ที่วินาทีที่ 6 แรงดันจะมีค่ามากที่สุดทำให้หลังจากวินาทีที่ 6 เป็นต้นไป แรงบิดที่ได้มีค่าคงที่ซึ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงของภาระทางกล แต่เนื่องจากกระแสไฟฟ้ามียังคงกระทำทำให้แรงบิดที่วัดได้มีค่ากระชากขึ้นบางครั้ง

4.3.4 แรงบิดทางไฟฟ้าและความเร็วที่วัดได้จริงเมื่อไม่คิดผลของภาระทางกล

จากรูปที่ 4.23 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดไฟฟ้ากับความเร็วนอกของมอเตอร์

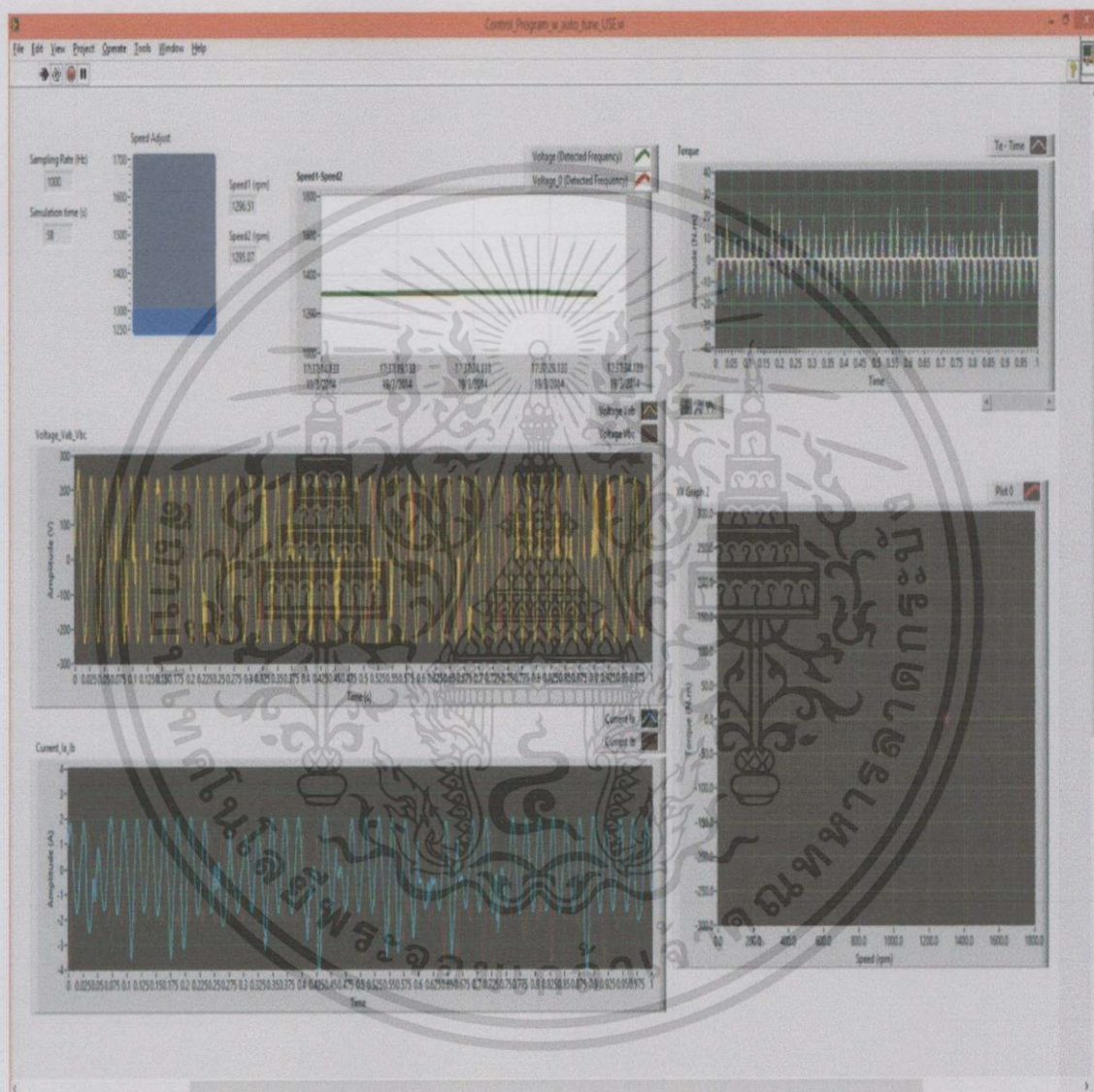


รูปที่ 4.23 แรงบิดทางไฟฟ้า และความเร็วจึงที่วัดได้จริง

จากรูปที่ 4.23 จะเห็นว่าลักษณะใกล้เคียงกับที่จำลองทาง Matlab/Simulink แต่ในรูปที่ 4.23 นั้นแรงบิดไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงความเร็วที่กำหนดจากนั้นแรงบิดไฟฟ้าจะเริ่มลดลงเมื่อความเร็วคงที่เพราะเป็นการรักษาความเร็วไว้ส่วนการจำลองทาง Matlab/Simulink นั้น จะใช้แรงบิดไฟฟ้าน้อยกว่าแรงบิดไฟฟ้าที่ได้จากทดลองจริงและผลตอบสนองจะเร็วกว่าเพราะไม่มีผลของเฟือง และเกียร์ตรอบ

4.4 ผลการทดลองจริงจากวัดจากโปรแกรม Labview แบบคิดผลของภาระทางกล

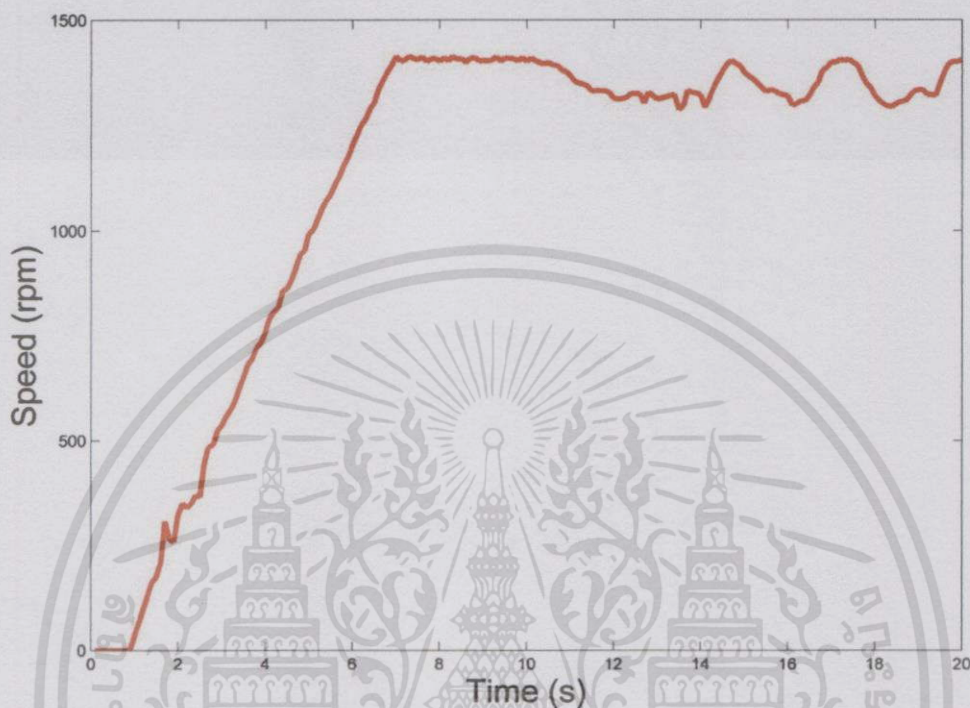
จากรูปที่ 4.24 เป็นหน้าจอแสดงผลของความเร็วมอเตอร์ 2 ตัวร่วมกันขับภาระทางกล



รูปที่ 4.24 หน้าจอแสดงการทำงานของโปรแกรม Labview โดยคิดผลของภาระทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

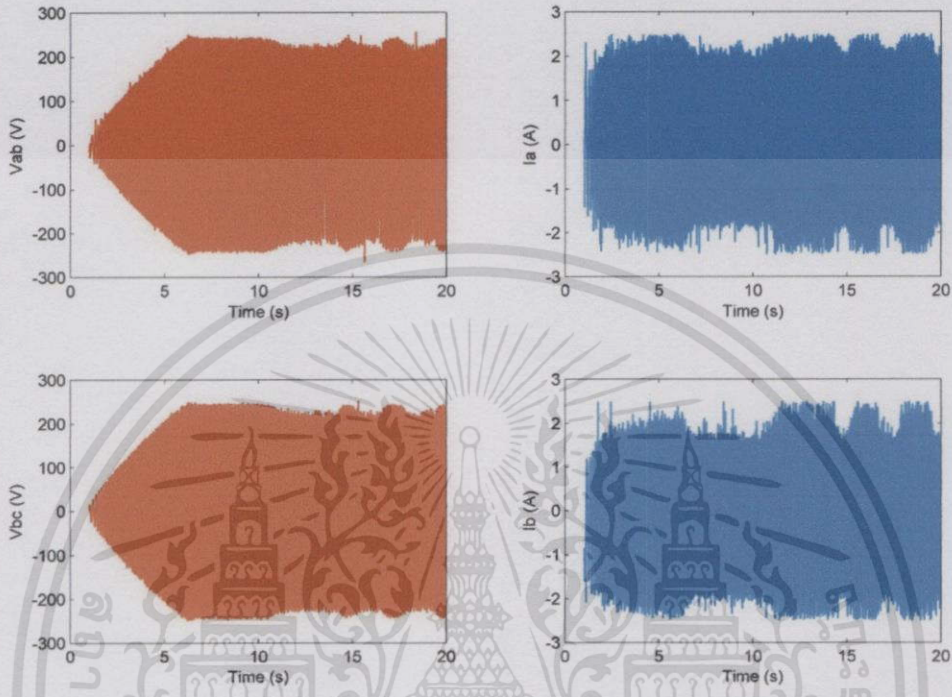
4.4.1 ความเร็วมอเตอร์ที่ได้จากการทดลองเมื่อคิดผลของภาระทางกล



รูปที่ 4.25 ความเร็วมอเตอร์ที่ได้จากการทดลองเมื่อคิดผลของภาระทางกล

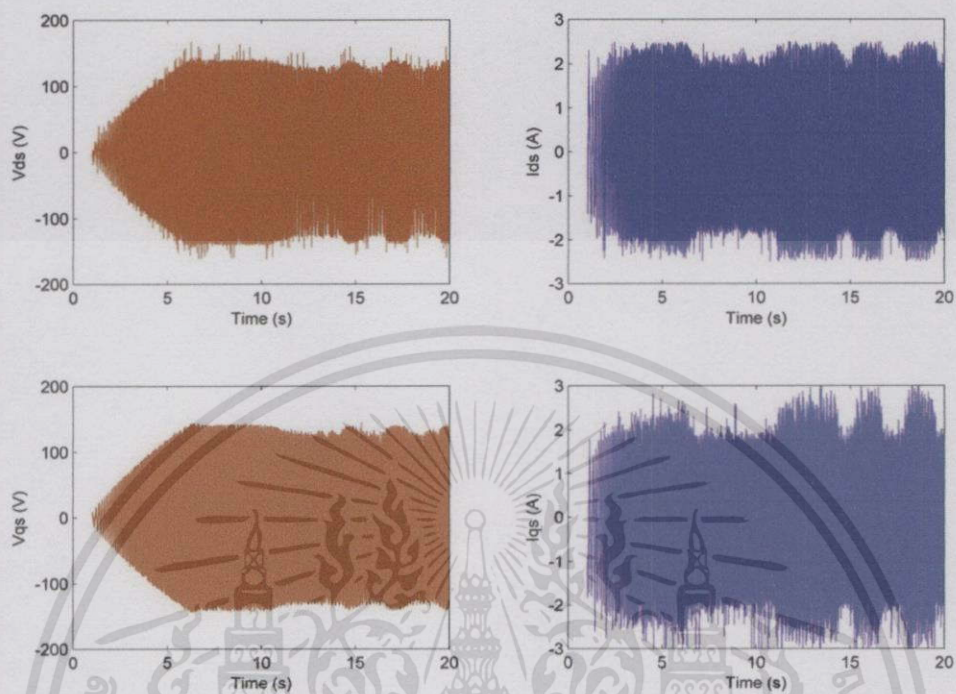
จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อมีภาระทางกลเกิดขึ้นนั้นจะอยู่ในช่วงที่วินาทีที่ 10-14, 14.5-16, 17-18 นั้นความเร็วจะลดลงในช่วงเวลาดังกล่าวจะเห็นว่าความเร็วตกลงจากปกติ 1300 RPM เหลือเพียง 1250 RPM ทั้งนี้เนื่องจากภาระทางกลช่วงเวลาดังกล่าวจะเห็นว่ามอเตอร์เปลี่ยนแปลงความเร็วตามภาระทางกลที่เปลี่ยนแปลงและจะกลับมาที่ความเร็วปกติเมื่อไม่มีภาระทางกล

4.4.2 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าด้านสเตเตอร์เมื่อคิดผลของภาระทางกล



รูปที่ 4.26 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าด้านสเตเตอร์เมื่อคิดผลของภาระทางกล

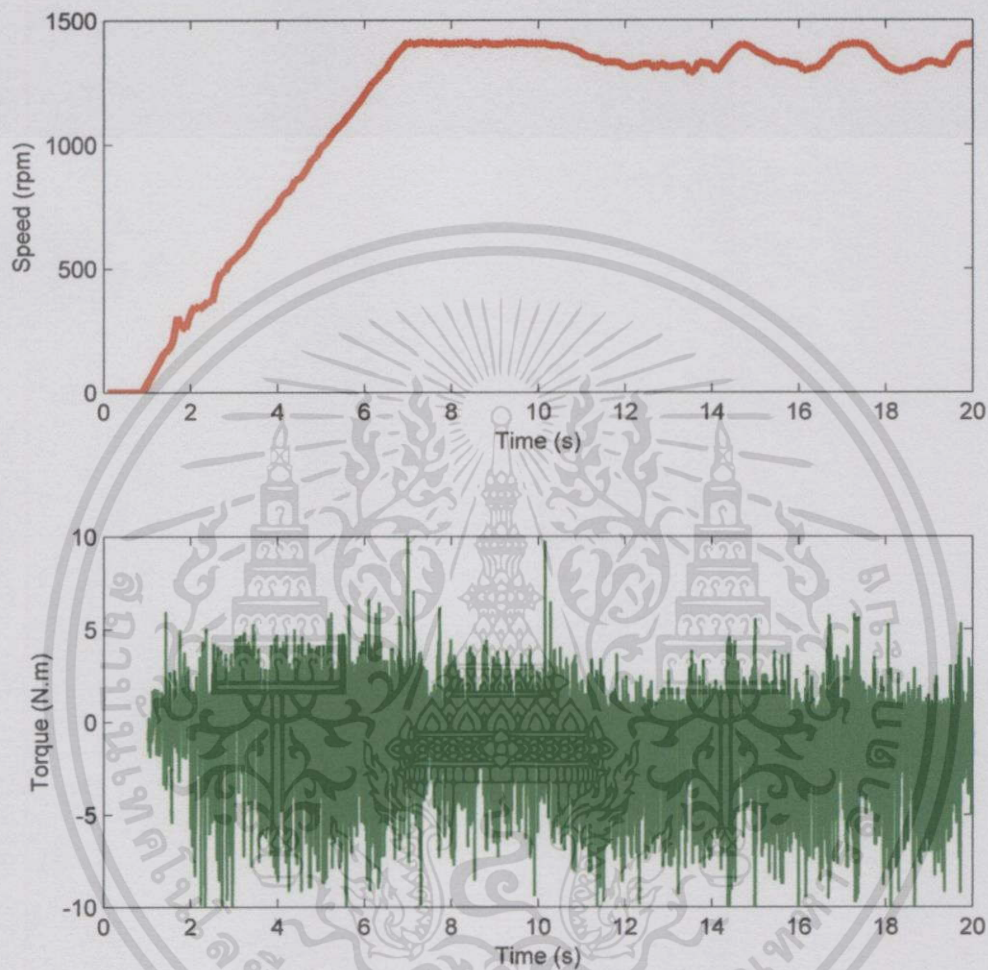
จากรูปที่ 4.26 จะเห็นได้ชัดเจนเลยว่าแรงดันไฟฟ้าด้านสเตเตอร์และกระแส มีการเปลี่ยนแปลงตามภาระทางกลอย่างเห็นได้ชัดกล่าวคือเมื่อแรงดันถึงพิกัดแล้วและขณะนั้นมี ภาระทางกลเพิ่มขึ้นจะทำให้มอเตอร์ดึงกระแสมากขึ้นทำให้แรงดันลดลงตามรูปทั้งนี้เพราะที่แรงดัน DC bus นั้นไม่มีการควบคุมให้คงที่แรงดันช่วงนี้จึงเปลี่ยนและรูปที่ 4.27 เป็นแรงดันไฟฟ้าและ กระแสไฟฟ้าด้านสเตเตอร์ที่มาจากแปลงแกนจะได้ V_{ds}, V_{qs}, I_{ds} และ I_{qs}



รูปที่ 4.27 กราฟแรงดัน V_{ds} , V_{qs} และกราฟกระแส I_{ds} , I_{qs} เมื่อคิดผลของภาระทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 แรงบิดไฟฟ้าจากการวัดเมื่อคิดผลของภาระทางกล

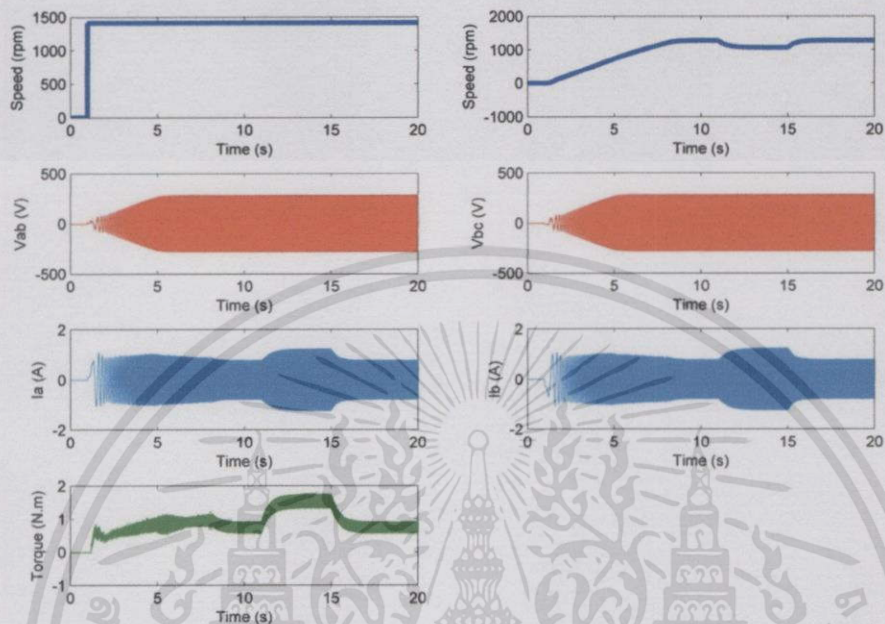


รูปที่ 4.28 แรงบิดทางไฟฟ้าเมื่อคิดผลของภาระทางกล

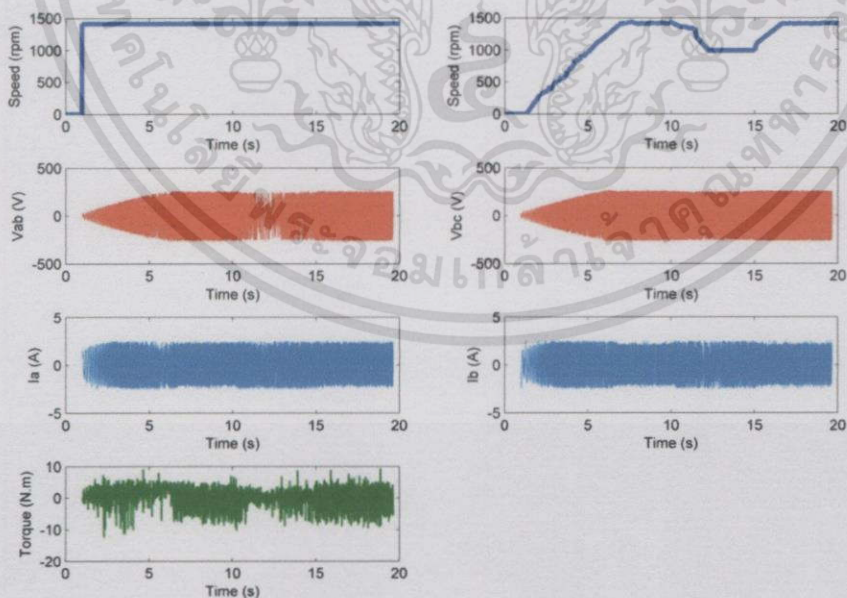
จากรูปที่ 4.28 เห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วมอเตอร์นั้นจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงแรงบิดทางไฟฟ้า ทั้งนี้ผลจากอุปกรณ์ที่วัดค่ามาคำนวณยังมีค่าไม่เที่ยงตรง และสามารถเก็บค่าได้เพียง 0.002 sample/sec กราฟที่ได้จึงมีการตกลงมาต่ำกว่าจุดศูนย์ แต่สามารถสังเกตจากแอมพลิจูดแบบพีคทูพีคของกราฟแรงบิดทางไฟฟ้าแทน เมื่อความเร็วตกแรงบิดควรจะเพิ่มขึ้น ช่องความกว้างของของแอมพลิจูดแบบพีคทูพีคก็จะกว้างขึ้น และช่วงที่ความเร็วเพิ่มขึ้นถึงจุดเต็ม แอมพลิจูดแบบพีคทูพีคของกราฟก็จะลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.4 ตัวอย่างการเปรียบเทียบระหว่าง Matlab/Simulink และ Labview



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงผลจาก Matlab/Simulink



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงผลจาก LabVIEW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.29 และรูปที่ 4.30 ป้อนภาระทางกลเพิ่มเข้ามาในช่วงวินาทีที่ 11 และปลดออกในช่วงวินาทีที่ 15 จะเห็นได้ว่าเมื่อความเร็วตกลงแรงดันช่วงที่มีภาระทางกลจะตกลงเพียงเล็กน้อย ส่วนกระแสจะมีการเพิ่มขึ้นในช่วงเดียวกัน ขณะเดียวกันแรงบิดในช่วงนี้จะมีค่าไม่ต่ำกว่าศูนย์ และเมื่อความเร็วเพิ่มเข้าสู่จุดเดิม แรงบิดทางไฟฟ้าจะมีค่าเฉลี่ยเกือบเท่ากับศูนย์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา

5.1 สรุปผลการทดลอง

เนื่องจากภาระทางกลหรือเตาเผาซีเมนต์ในที่นี้เป็นโหลดที่มีการขับเคลื่อนหมุนที่ความเร็วรอบต่ำ ประมาณ 3-4 รอบต่อนาที และจากการศึกษาการควบคุมความเร็วของมอเตอร์แบบ V/f open loop พบว่าสามารถควบคุมให้มอเตอร์ทำงานที่ความเร็วค่าหนึ่ง และตรอบให้ความเร็วต่ำได้ โดยที่ฟลักซ์ของมอเตอร์มีขนาดคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง ทำให้มอเตอร์ไม่เกิดการอิ่มตัวและมอเตอร์เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นได้ อีกทั้งการควบคุมแบบ V/f ไม่มีความยุ่งยากซับซ้อน ทำให้มีความสะดวก ง่ายต่อการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ ดังนั้นการควบคุมแบบ V/f จึงถูกนำมาใช้ในโครงการนี้

โครงการนี้ได้สร้างแบบจำลองระบบควบคุมสำหรับชุดขับคู่ด้วยภาระทางกลเดี่ยวบนโปรแกรม Matlab/Simulink และการทดลองจริงกับภาระทางกล(เตาเผาซีเมนต์จำลอง) เพื่อนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลการทดลอง ผลของการทดลองภาระทางกลถูกเก็บข้อมูลผ่านโปรแกรม LabVIEW โดยทำการเก็บข้อมูลแรงดันสเตเตอร์ 2 เฟส กระแสสเตเตอร์ 2 เฟส และความเร็วรอบของมอเตอร์ทั้งสองชุด จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ออกมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์เทียบกับเวลา และคำนวณค่าแรงบิดมอเตอร์ไฟฟ้าพล็อตเทียบกับเวลา เพื่อศึกษาผลตอบสนองการทำงานของชุดขับคู่ด้วยภาระทางกลเดี่ยวในแต่ละช่วงเวลา

เมื่อนำผลการทดลองกราฟจากการจำลองการทำงานโดยโปรแกรม Matlab/Simulink และผลการทดลองจากการพล็อตกราฟจากภาระทางกล แรงดันสเตเตอร์ กระแสสเตเตอร์ ความเร็วรอบ และแรงบิดไฟฟ้าของมอเตอร์ที่ได้มีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน โดยสามารถขับเคลื่อนภาระทางกลได้เป็นอย่างดี เช่นเดียวกับการจำลองโดยโปรแกรม Matlab/Simulink โดยผลการจำลองทำให้ทราบว่า การควบคุมแบบ V/f จะควบคุมแรงบิดได้ดีไม่เท่ากับการควบคุมแบบเวกเตอร์ แต่สามารถตอบสนองแรงบิดได้เร็วกว่าการควบคุมแบบเวกเตอร์และทำงานได้ดีกว่าหากภาระทางกลมีลักษณะเปลี่ยนแปลงแบบคงที่ หรือเป็นคาบเวลา เนื่องจากการควบคุมแบบเวกเตอร์จะต้องรอผลตอบสนองเพื่อสั่งให้แรงบิดตอบสนองต่อภาระทางกล ทำให้การควบคุมแบบ V/f ให้แรงบิดไฟฟ้าสูงและแรงบิดคงที่ และสามารถควบคุมความเร็วของเตาเผาซีเมนต์ได้

ความคลาดเคลื่อนของผลการทดลองไปจากการจำลองด้วย Matlab/Simulink และภาระทางกลจริง เนื่องจากภาระทางกลมีค่าไม่สูงมาก โมเมนต์ความเฉื่อยของภาระทางกล เพลา เฟือง เกียร์ตรอบ และมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนด้วยกัน

ผลการทำงานของชุดขับเคลื่อนนี้ได้ทำการควบคุมขั้วภาระทางกลให้มีความเร็วรอบใกล้เคียงกัน มอเตอร์ทั้งสองตัวต้องส่งกำลังผ่านเพลลา และเกียร์ทดไปยังภาระทางกล โดยแบ่งกันแบกรับภาระทางกล ทำให้ไม่เกิดภาระเกินพิกัด และพยายามรักษาความเร็วรอบให้เท่ากัน ทำให้การขับเคลื่อนชนิดนี้มีความน่าเชื่อถือสูง ประหยัดต่อการลงทุน และค่าบำรุงรักษา

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การขับเคลื่อนชุดขับเคลื่อน จำเป็นต้องระวังความเร็วของแต่ละชุดขับเคลื่อน เนื่องจากหากความเร็วต่างกันมากจะทำให้ชุดส่งกำลัง (เฟือง) เสียหายได้
2. การขับมอเตอร์ 2 ชุด จำเป็นต้องกลับทางหมุนซึ่งกันและกันเนื่องจากชุดภาระทางกลที่สร้างขึ้นจัดวางเกียร์ในทิศทางตรงข้ามกัน
3. การเก็บผลข้อมูลต่างๆ จำเป็นต้องแยกกราวด์ของอุปกรณ์วัดแต่ละชุด เพื่อป้องกันการรบกวนของสัญญาณที่วัดได้
4. การต่ออุปกรณ์วัด DAQ6009 ควรมีอุปกรณ์ป้องกันแยกกราวด์ เช่น การต่อ Proximity sensor ให้ทำการต่อ Opto-PC817 ชั้นกลาง เพื่อป้องกันกระแสจากเซนเซอร์

5.3 แนวทางการพัฒนา

1. สามารถนำการควบคุมนี้ ปรับใช้เป็นการควบคุมแบบ Close loop V/f ได้ โดยเขียนโปรแกรมบน Microprocessors ที่มีความเร็ว และละเอียดมากพอ
2. สามารถเปลี่ยนชุดวัดแรงดันและกระแสให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น เพื่อให้ผลตอบสนองดีขึ้น ส่งผลให้การควบคุมทำได้ง่ายขึ้น
3. สามารถเปลี่ยนอุปกรณ์วัด และเก็บข้อมูล (DAQ) ให้มีความรวดเร็วมากขึ้น
4. สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมชนิดอื่นๆ เช่น Vector Control, Direct Torque Control(DTC) ในการวิจัยต่อไปในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] Limei Zhao. Et al, "Design of An Optimal V/fControl for A Super High Speed Permanent Magnet Synchronous Motor," **The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**, November 2-6, 2004, pp. 2260-2263.
- [2] Mineo Tsuji, Shuo Chen, Shin-ichi Hamasaki, Xiaodan Zhao, and Eiji Yamada, "A Novel V/fControl of Induction Motors for Wide and Precise Speed Operation," **SPEEDAM 2008 International Symposium on Power Electronics,Electrical Drives, Automation and Motion**, 2008, pp 1130-1135.
- [3] ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย. (2555). มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ. (ม.ป.ท). (เอกสารอัดสำเนา).
- [4] AMITPAL SINGH I.S. BHATIA , VINIT KUMAR GUPTA , & SOURAV ANAND SETHI. "SIMULATION AND SPEED CONTROL OF INDUCTION MOTOR DRIVES," **Bachelor of Technology In Electrical Engineering**, National Institute of Technology Rourkela, 2012.
- [5] ดร. กฤษ เฉยไสย. (ม.ป.ป). **พื้นฐานการควบคุมมอเตอร์**. (ม.ป.ท).
- [6] Jian Sun. (ม.ป.ป). Chapter 2 Pulse-Width Modulation. (ม.ป.ท), 25-60.
- [7] C.U. Ogbuka, M.Eng. and M.U. Agu, Ph.D. "A Modified Closed Loop V/F Controlled Induction Motor Drive," **The Pacific Journal of Science and Technology**, Volume 10. Number 1. May 2009 (Spring), pp 52-58.
- [8] ศิวะ หงษ์นภา. (2546). **ข้อแตกต่างระหว่าง V/f กับ Vector Contro**. (ม.ป.ท), 57-63.
- [9] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, "IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators," **ANSI**, 2004.
- [10] Ioannis X. Bogiatzidis, Athanasios N. Safacas, Epaminondas D. Mitronikas, and George A. Christopoulos, "A Novel Control Strategy Applicable for a Dual AC Drive With Common Mechanical Load," **IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS**, VOL. 48, NO. 6, NOVEMBER/DECEMBER 2012, pp 2022-2034.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] ธวัช ชูชิต, "อัลกอริทึมการควบคุมแรงบิดโดยตรงไร้เซ็นเซอร์สำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบแยกเฟส", วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2552.
- [12] Ioannis X. Bogiatzidis, Athanasios N. Safacas , Epaminondas D. Mitronikas, George A. Christopoulos , "A Novel Control Strategy Applicable for a Dual AC Drive With Common Mechanical Load" , *IEEE trans. Industrial Electron.*, VOL. 48, NO. 6, 2012, pp 2022-2036.
- [13] Ioannis X. Bogiatzidis, Athanasios N. Safacas , Epaminondas D. Mitronikas, " Detection of Backlash Phenomena Appearing in a Single Cement Kiln Drive Using the Current and the Electromagnetic Torque Signature" , *IEEE trans. Industrial Electron.*, VOL. 60, NO. 8, 2013, pp. 3441-3453.
- [14] อองอาจ เกษภาษา, กำพล ศิริจันทร์พงศ์, วิจิตร ภิณเรศ, "การจำลองการควบคุมแรงบิดโดยตรงของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส," วิศวกรรมลาดกระบัง, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง, ปีที่ 19, ฉบับที่ 1, 2545, หน้า 77-83.
- [15] Bin Wu, **HIGH-POWER CONVERTERS AND AC DRIVES**, John Wiley & Sons, Inc., 2006.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบควบคุมสำหรับชุดขับเคลื่อนด้วยภาระทางกลเดียว

A control system for a dual AC drive with common mechanical load

นายวิวัฒน์ เหมสงวน นายอดิสร จันทวงษ์ นายอัครพงศ์ ลาวัณ นายอิทธิพันธ์ สกลวันธนาศักดิ์
 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอยฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3529 E-Mail: project.dr.siridech2013@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้กล่าวถึงการใช้งานของระบบควบคุมชุดขับเคลื่อนด้วยภาระทางกลเดียว ซึ่งเป็นระบบที่เหมาะสมแก่การใช้งานที่ต้องการกำลังขับเคลื่อนสูง เป้าหมายของการควบคุมชนิดนี้คือต้องการให้มีการกระจายภาระทางกลและกระจายกำลังระหว่างสองชุดขับให้เท่ากัน เพื่อทำให้ไม่เกิดภาระทางกลเกินขีดจำกัดในชุดขับใดชุดขับหนึ่ง ซึ่งอาจทำให้ชุดขับเกิดความเสียหาย อีกทั้งเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการหยุดกระบวนการทันทีทันใดซึ่งอาจสร้างความเสียหายต่ออุปกรณ์อื่นๆอีกด้วย โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการวิเคราะห์ผลของการจำลองจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink และการจำลองจริงในแบบจำลองที่สร้างขึ้นเพื่อทดสอบระบบ โดยจะใช้การควบคุมด้วย V/F Control ในการควบคุมระบบดังกล่าว

คำสำคัญ: ระบบควบคุมสำหรับชุดขับเคลื่อน, การควบคุมแบบ V/F, Matlab/Simulink

Abstract

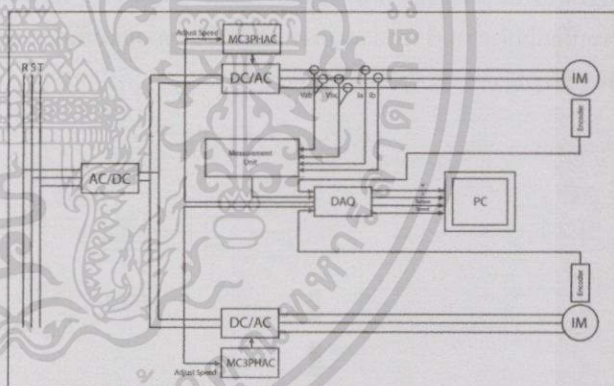
This paper discusses about the use of dual AC drive control system with common mechanical load. This is a system with high effective, especially in high power system. The purpose of this control system is to equalize mechanical load and power between two drivers to prevent mechanical overload in any driver, which can affect another driver. In addition, this could avoid sudden stop in process, since it would cause problems for the device. The analysis of this research is typically focus on creating mathematical model by Matlab/Simulink and a realistic simulation model using V/F Control to simulate dual AC drive control system with common mechanical load.

Keywords: A control system for a dual AC drive, V/f Control, Matlab/Simulink

1. บทนำ

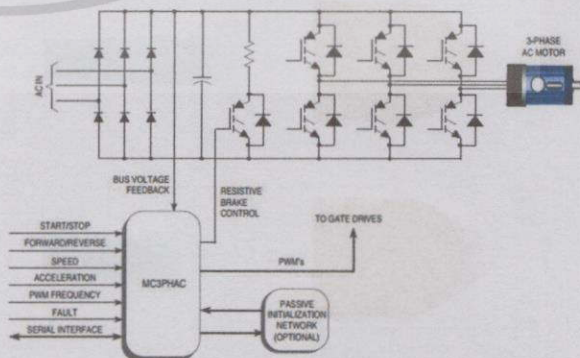
V/F Control เป็นแนวคิดในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำในการควบคุมความเร็วรอบ โดยใช้การปรับค่าให้อัตราส่วนของแรงดัน (Volts) ต่อความถี่ (Hertz) คงที่ โดยการควบคุมลักษณะนี้จะเป็นแบบเชิงเส้นสามารถใช้ได้กับมอเตอร์ทั่วไปได้โดยไม่ต้องทราบข้อมูลพารามิเตอร์ของมอเตอร์ ซึ่งการควบคุมชนิดนี้สามารถเข้าใจได้ง่าย จึงเหมาะแก่การนำมาศึกษาวิจัย และประยุกต์ใช้ในการจำลองทั้งใน Matlab/Simulink และการทดลองด้วยภาระทางกลจำลอง

บทความนี้จึงได้นำเสนอระบบควบคุมสำหรับชุดขับเคลื่อนด้วยภาระทางกลเดียว ด้วยเทคนิคการควบคุมแบบ V/F Control เพื่อวิเคราะห์ผลจากแบบจำลองและจะเป็นประโยชน์ต่อการวิจัยต่อไปในอนาคต



รูปที่ 1 แผนผังการทำงานของวงจรขับเคลื่อน

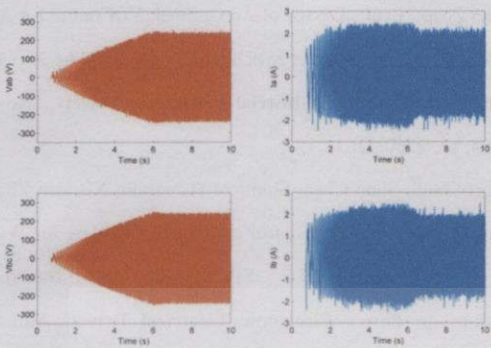
2. อินเวอร์เตอร์และชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ



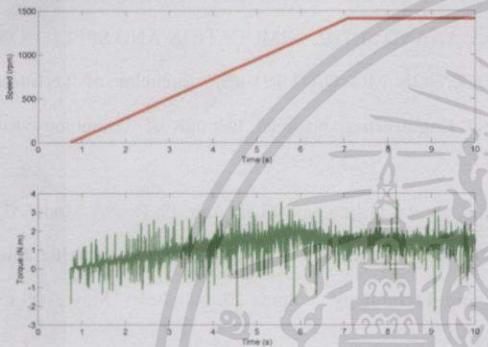
รูปที่ 2 วงจรควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสที่ใช้ MC3PHAC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

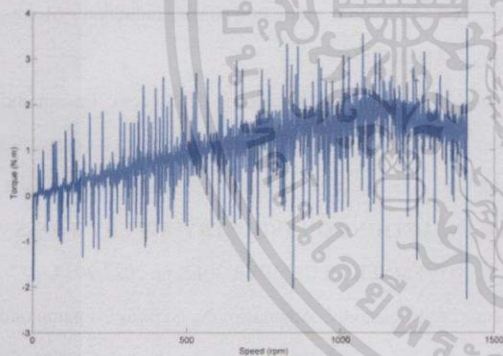
โดยแรงดัน กระแส ความเร็ว และแรงบิด ที่ได้แสดงดังนี้



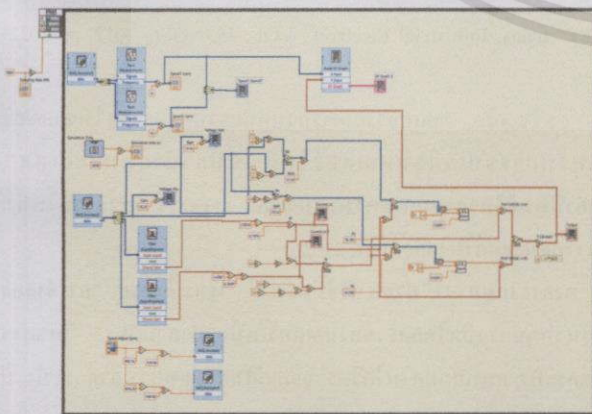
รูปที่ 8 แรงดัน (V) กับกระแสขาเข้า (A)



รูปที่ 9 เปรียบเทียบระหว่างความเร็ว (rpm) กับแรงบิด (N.m)



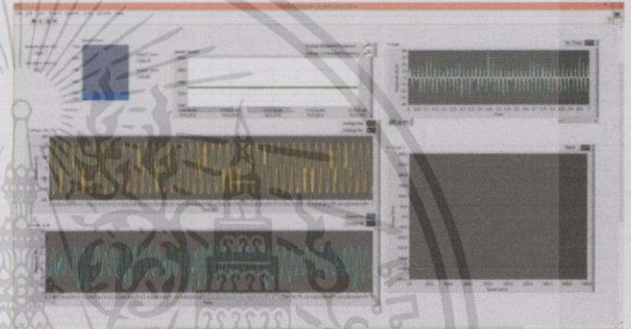
รูปที่ 10 เปรียบแรงบิด (N.m) กับความเร็วของมอเตอร์ (rpm)



รูปที่ 11 Block Diagram สำหรับการวัดค่าแบบเรียลไทม์

จากรูปที่ 9 จะเห็นว่าเมื่อความเร็วของมอเตอร์เพิ่มขึ้นแรงบิดจะมากขึ้นเมื่อความเร็วของมอเตอร์คงที่แรงบิดก็จะคงที่ด้วยแต่จะสั้นเพื่อรักษาความเร็วเอาไว้ และรูปที่ 8 เป็นกระแสและแรงดันที่วัดได้ในช่วงความเร็วเพิ่มขึ้น และจากรูปที่ 10 นำค่าแรงบิดที่คำนวณได้มาเปรียบเทียบกับความเร็วของมอเตอร์เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงแรงบิดช่วงเพิ่มความเร็ว

รูปที่ 11 เป็น Block Diagram ที่ใช้ในการวัดสัญญาณแรงดัน สเตเตอร์ กระแสสเตเตอร์ และความเร็วรอบ แล้วนำมาคำนวณแรงบิดไฟฟ้าของมอเตอร์แล้วนำสัญญาณมาแสดงผลในกราฟ และใช้ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ทั้งสองตัว แสดงในหน้า Front panel (รูปที่ 12)



รูปที่ 12 หน้าต่าง Front panel

5. ข้อเสนอแนะ

ก่อนเริ่มการทำงานมอเตอร์ทั้งสอง ควรตรวจสอบทิศทางการหมุนของมอเตอร์ให้เป็นไปในทิศทางเดียวกันเสียก่อน หากมอเตอร์มีการหมุนในทิศทางในตรงกันข้าม ให้ทำการสลับสายเฟสคู่หนึ่งของมอเตอร์ตัวใดตัวหนึ่ง ให้มอเตอร์หมุนไปในทิศทางเดียวกัน เพื่อป้องกันการเกิดความเสียหายที่ภาระทางกล

6. สรุป

เมื่อนำผลการทดลองกราฟจากการจำลองการทำงานโดยโปรแกรม Matlab/Simulink และผลการทดลองจากการพล็อตกราฟจากภาระทางกล แรงดันสเตเตอร์ กระแสสเตเตอร์ ความเร็วรอบ และแรงบิดไฟฟ้าของมอเตอร์ที่ได้มีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน โดยสามารถขับเคลื่อนภาระทางกลได้เป็นอย่างดี เช่นเดียวกับการจำลองโดยโปรแกรม Matlab/Simulink โดยผลการจำลองทำให้ทราบว่า การควบคุมแบบ V/f จะควบคุมแรงบิดได้ดีไม่เท่ากับการควบคุมแบบเวกเตอร์ แต่สามารถตอบสนองแรงบิดได้เร็วกว่าการควบคุมแบบเวกเตอร์และทำงานได้ดีกว่าหากภาระทางกลมีลักษณะเปลี่ยนแปลงแบบคงที่ หรือเป็นคาบเวลา เนื่องจากการควบคุมแบบเวกเตอร์จะต้องรอผลตอบสนองเพื่อสั่งให้แรงบิดตอบสนองต่อภาระทางกล ทำให้การควบคุมแบบ V/f ให้แรงบิดไฟฟ้าสูงและแรงบิดคงที่ และสามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์ได้

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล : นาย วิทวัส เหมสวงน
เกิดวันที่ : 10 มิถุนายน พ.ศ. 2534
ที่อยู่ : 64/17 ซอยเสรีไทย69 ถ.เสรีไทย
แขวง/เขตคันนายาว กรุงเทพฯ 10230
E-mail : iamwittawas@hotmail.co.th



ชื่อ-นามสกุล : นายอดิธร จันทวงษ์
เกิดวันที่ : 31 กรกฎาคม พ.ศ. 2534
ที่อยู่ : 125 หมู่ 6 ตำบล สาดยาว อำเภอลาดยาว
นครสวรรค์ 60150
E-mail : spyno@hotmail.com



ชื่อ-นามสกุล : นายอัครพงศ์ ตาวิง
เกิดวันที่ : 27 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2535
ที่อยู่ : 17 ซอยกรุงเทพกรีฑา 2 แขวงหัวหมาก
เขตบางกะปิ กรุงเทพฯ 10240
E-mail : coala.piglet@gmail.com



ชื่อ-นามสกุล : นายอิทธิพันธ์ สุกวันธนาศักดิ์
เกิดวันที่ : 2 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2535
ที่อยู่ : 112 ถนนมิตรภาพ ตำบลโพธิ์ชัย อำเภอเมือง
หนองคาย 43000
E-mail : Assassin2535@hotmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้