



การศึกษาฮาร์โมนิกในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

THE STUDY OF HARMONIC IN INDUCTION MOTOR 3 PHASE



นายนำโชค โภธิพิทักษ์ รหัส 47380241

นายอรรถพล ใหม่กันทะ รหัส 47380431

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ...../ 5 เม.ย. 2553
เลขทะเบียน...../ 14999903
เลขเรียกหนังสือ...../ร.
มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ น 516 ก
2562

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์


ปีการศึกษา 2552

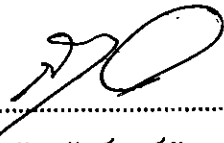


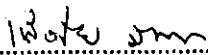
ใบรับรองโครงการวิศวกรรม

หัวข้อโครงการ การศึกษาร่วมอนิกในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส
ผู้ดำเนินโครงการ นายนำโชค โพธิพฤกษ์ รหัส 47380241
 นายอรรถพล ใหม่กันทะ รหัส 47380431
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.สมพร เรืองสินชัยวานิช
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา 2552

.....
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครพนม อนุมัติให้โครงการฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษิตตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะกรรมการสอบโครงการวิศวกรรม


.....ประธานกรรมการ
(ดร.สมพร เรืองสินชัยวานิช)


.....กรรมการ
(ดร.อัครพันธ์ วงศ์กั้งแห)


.....กรรมการ
(นายแสงชัย มังกรทอง)

| | |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| หัวข้อโครงการ | การศึกษาร่วมอนิกในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส |
| ผู้ดำเนินโครงการ | นายนำโชค โพธิพฤกษ์ รหัส 47380241 นายอรรถพล ใหม่กันทะ รหัส 47380431 |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | ดร.สมพร เรืองสินชัยวานิช |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมไฟฟ้า |
| ภาควิชา | วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ |
| ปีการศึกษา | 2552 |

.....

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการศึกษากระแสสแตเตอร์และฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งเป็นผลมาจากการขับโหลดในสภาวะต่างๆ การศึกษาและการทดสอบแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ การทดสอบแหล่งจ่ายไฟ การทดสอบมอเตอร์ขณะไม่มีโหลด และการทดสอบมอเตอร์ขณะขับโหลด โดยใช้มอเตอร์กระแสตรงมาเป็นโหลดเพื่อทดสอบผลตอบสนองของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ ในขั้นตอนการตรวจวัดใช้เครื่องมือวัด power & harmonic analyzer วัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งลำดับของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดในมอเตอร์เหนี่ยวนำ การศึกษาพบว่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณฮาร์มอนิกส์ของแรงดันและกระแสที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ จะมีเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนมากขึ้น ขณะมอเตอร์รับภาระโหลดเพิ่มขึ้น

Project Title The Study of Harmonic in Induction Motor 3 Phase
Name Mr. Numchoke Potipuek ID. 47380241
 Mr. Attapon Maikunta ID. 47380431
Project Advisor Mr. Somporn Ruangsinchaiwanich, Ph.D
Major Electrical Engineering
Department Electrical and Computer Engineering
Academic Year 2009

.....

ABSTRACT

This thesis presents the study of stator current and harmonics in induction motor which resulted from varying load in different conditions. The study is separated to three cases for example power supply test, no-load test and on load test. Moreover, the DC motor is selected as mechanical load for investigating the harmonic respond of the induction motor. For measurement process, the power & harmonic analyzer is tool for collecting parameters, especially the order of harmonics in the induction motor. In this study, the percentages of harmonic distortion from both motor current and voltage signal are higher when the load of motor were higher.

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำปริญญาานิพนธ์ในครั้งนี้ คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ ดร.สมพร เรืองสินชัยวานิช อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ ที่ได้ให้ความกรุณา ชี้แนะแนวความคิด ความรู้ แนวทางในการแก้ไข ปัญหา ตลอดจนให้โอกาสในการจัดทำปริญญาานิพนธ์ รวมไปถึงการเอื้อเพื่อเอกสารและแหล่งข้อมูลในการค้นคว้าเพิ่มเติมที่ช่วยให้ปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมทั้งคณะกรรมการสอบปริญญาานิพนธ์ทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำ ตรวจสอบเพื่อให้เกิดความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น และผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีได้กล่าวถึงในที่นี้ที่ได้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการทำปริญญาานิพนธ์

สุดท้ายนี้สิ่งที่คณะผู้จัดทำรำลึกและซาบซึ้งอยู่เสมออันคือพระคุณของบิดา มารดา ซึ่งเข้าใจ และให้ความสนับสนุนช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน ในการศึกษาและทำปริญญาานิพนธ์จนกระทั่งประสบความสำเร็จ คณะผู้จัดทำจึงขอกราบของพระคุณมา ณ โอกาสนี้



นายนำโชค โพธิพฤกษ์
นายอรรถพล ใหม่กันทะ

สารบัญ

| | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ก |
| Aบทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | ข |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ค |
| สารบัญ..... | ง |
| สารบัญตาราง..... | ช |
| สารบัญรูป..... | ซ |
| | |
| บทที่ 1 บทนำ | |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ..... | 1 |
| 1.3 ขอบเขตของโครงการ..... | 1 |
| 1.4 ขั้นตอนการดำเนินการ..... | 2 |
| 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ..... | 2 |
| | |
| บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี | |
| 2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส (Three Phase Induction Motor)..... | 3 |
| 2.1.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส (Induction Motor Construction)..... | 3 |
| 2.1.2 หลักการทำงาน (Principle of Operation)..... | 4 |
| 2.1.3 วงจรสมมูล..... | 6 |
| 2.1.4 การวิเคราะห์วงจรสมมูล..... | 7 |
| 2.1.5 หลักการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส..... | 8 |
| 2.2 ฮาร์โมนิกส์ (Harmonics)..... | 11 |
| 2.2.1 ความหมายของฮาร์โมนิกส์..... | 11 |
| 2.2.2 นิยามของฮาร์โมนิกส์แบบต่างๆ..... | 12 |
| 2.2.3 ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวม (Total Harmonic Distortion)..... | 12 |
| 2.2.4 แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์..... | 13 |
| 2.3 ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ..... | 13 |
| 2.3.1 ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดจากเส้นแรงแม่เหล็ก..... | 14 |

สารบัญ(ต่อ)

| | หน้า |
|----------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.3.2 ฮาร์มอนิกส์ที่เกิดจากเครื่องจักรกล..... | 14 |
| 2.3.3 ฮาร์มอนิกส์ที่เกิดจากอากาศพลศาสตร์..... | 14 |
| 2.3.4 ฮาร์มอนิกส์ที่เกิดจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์..... | 14 |
| 2.4 ข้อกำหนดและมาตรฐานของฮาร์มอนิก..... | 15 |
| บทที่ 3 ขั้นตอนการทดสอบ | |
| 3.1 การออกแบบการทดสอบฮาร์มอนิกส์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส | 16 |
| 3.1.2 วิธีการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์พิกัดกำลัง โหลดที่ใช้ในการทดสอบ | 17 |
| 3.1.3 ตัวอย่างการคำนวณพิกัด โหลด (คิดที่พิกัด โหลด 20%)..... | 17 |
| 3.1.4 เปอร์เซ็นต์พิกัดกำลัง โหลดที่ใช้ในการทดสอบ..... | 18 |
| 3.2 ขั้นตอนและวิธีการทดสอบ..... | 18 |
| 3.2.1 การทดสอบเพื่อหาค่าฮาร์มอนิกส์ของแหล่งจ่าย | 18 |
| 3.2.2 การทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะไร้ภาระทางกลและขับเคลื่อนทางกล..... | 19 |
| 3.3 รายการอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ | 22 |
| บทที่ 4 ผลการทดสอบ | |
| 4.1 ผลของแรงดันและกระแสจากการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะแตกต่างกัน..... | 23 |
| 4.1.1 สัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ..... | 23 |
| 4.1.2 ค่าปริมาณของแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าจากการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ..... | 29 |
| 4.2.2 ผลการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำตามลำดับฮาร์มอนิกส์ภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน..... | 30 |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบ | |
| 5.1 สรุปผลการทดสอบและการวิเคราะห์ข้อมูล | 33 |
| 5.2 ปัญหาที่พบขณะดำเนิน โครงการงาน..... | 33 |
| 5.3 ข้อเสนอแนะ | 34 |
| เอกสารอ้างอิง..... | 35 |
| ภาคผนวก | 36 |

สารบัญ(ต่อ)

| | |
|------------------------------|------|
| ประวัติผู้เขียนโครงการ | หน้า |
| | 46 |



สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------|------|
| 3.1 ข้อกำหนดของกระแสฮาร์โมนิกตามมาตรฐาน IEEE STD. 519-1992 | 15 |
| 4.1 ตารางแสดงผลการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะที่แตกต่างกัน..... | 29 |
| 4.2 ตารางแสดงผลการทดสอบตามลำดับฮาร์โมนิกส์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ..... | 30 |



สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส [1] | 3 |
| 2.2 สเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ [2] | 3 |
| 2.3 โรเตอร์แบบกรงกระรอกของมอเตอร์เหนี่ยวนำ [3] | 4 |
| 2.4 โรเตอร์แบบพันขลวดหรือเฟสยาวค้โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ [3]..... | 4 |
| 2.5 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำต่อเฟส | 6 |
| 2.6 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำต่อเฟสเมื่อ โอนย้ายมาด้านสเตเตอร์ | 7 |
| 2.7 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำอย่างง่าย..... | 8 |
| 2.8 การเปลี่ยนแปลงของแรงดัน, แรงบิด, กระแสมอเตอร์กับความถี่ [4] | 9 |
| 2.9 สัญญาณความถี่ฮาร์มอนิกที่ระดับต่างๆ [5] | 11 |
| 2.10 การเกิดฮาร์มอนิกจาก โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น [6] | 13 |
| 2.11 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส้ในเครื่องจักรกลไฟฟ้า..... | 3 |
| 2.12 ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น ในกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำจากรูปที่ 2.12 [8] | 15 |
| 3.1 การต่อวงจรชุดทดสอบฮาร์มอนิกส้ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ..... | 16 |
| 3.2 พิกัดกำลัง โหลดที่ 0% (ก) พิกัดกำลัง โหลดที่ 20% (ข)..... | 18 |
| 3.3 วงจรการทดสอบหาค่าฮาร์มอนิกของแหล่งจ่าย | 18 |
| 3.4 การทดสอบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 380 โวลต์..... | 19 |
| 3.5 วงจรทดสอบหาค่าฮาร์มอนิกส้ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะ ไม่มี โหลด | 20 |
| 3.6 การต่อวงจรทดสอบฮาร์มอนิกส้ในสภาวะไร้ทางกล..... | 20 |
| 3.7 วงจรทดสอบเพื่อหาค่าฮาร์มอนิกส้ของมอเตอร์ขณะที่มี โหลดค้อยู่ | 21 |
| 3.8 การต่อวงจรทดสอบฮาร์มอนิกส้ในสภาวะขับภาระทางกล | 21 |
| 4.1 สัญญาณแรงดันและกระแสของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส | 23 |
| 4.2 สัญญาณแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะไร้ภาระทางกล | 24 |
| 4.3 สัญญาณแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะขับภาระทางกล 0%..... | 25 |
| 4.4 สัญญาณแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะขับภาระทางกล 20%..... | 26 |
| 4.5 สัญญาณแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะขับภาระทางกล 40%..... | 26 |
| 4.6 สัญญาณแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะขับภาระทางกล 60%..... | 27 |
| 4.7 สัญญาณแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะขับภาระทางกล 80%..... | 27 |
| 4.8 สัญญาณแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะขับภาระทางกล 100%..... | 28 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบันเครื่องจักรกลไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ไป จะมีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เป็นส่วนประกอบหลัก โดยเฉพาะมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดที่มีโรเตอร์เป็นแบบกรงกระรอก เนื่องจากมีคุณสมบัติของโครงสร้างแข็งแรง ทนทาน ราคาถูก ประสิทธิภาพสูง ง่ายต่อการใช้งาน และไม่จำเป็นต้องบำรุงรักษามากนัก ด้วยเหตุผลนี้มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดนี้จึงได้รับความนิยมในโรงงานอุตสาหกรรม ในการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำในการขับโหลดมากๆ เป็นเหตุให้มอเตอร์ต้องการกระแสไฟฟ้าในการขับ โหลด อีกทั้งยังเกิดฮาร์มอนิกส์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ ส่งผลให้สัญญาณของกระแสไฟฟ้ามีรูปร่างที่ต่างไปจากรูปคลื่นไซน์ปกติ ดังนั้นกระแสเดเตอร์จึงเป็นส่วนสำคัญมากส่วนหนึ่งของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โครงการนี้จึงมุ่งเน้นในการศึกษากระแสเดเตอร์และฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะขับสภาวะโหลดทางกลในระดับต่างๆ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาคุณลักษณะกระแสที่มีผลมาจากฮาร์มอนิกส์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
2. เพื่อศึกษาสัญญาณฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
2. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของกราฟสัญญาณกระแส แรงดัน และค่าฮาร์มอนิกส์ลำดับต่างๆ ที่เกิดขึ้นขณะที่มอเตอร์ทำงานในสภาวะต่างๆ
3. การวิเคราะห์และการสรุปผลการทำงาน

1.4 ขั้นตอนการดำเนินการ

| หัวข้อ | ปี 2552 | | | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|------|------|------|------|
| | ม.ย. | ก.ค. | ส.ค. | ก.ย. | ต.ค. |
| 1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ | ↔ | | | | |
| 2. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับกระแสสแตเตอร์ และฮาร์มอนิกส์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ | | ↔ | | | |
| 3. ออกแบบและวางแผนการทดลองเพื่อทดสอบกระแสสแตเตอร์และบันทึกค่าสัญญาณฮาร์มอนิกส์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ | | | ↔ | | |
| 4. แสดงผลการทดลองและวิเคราะห์การทำงานของกราฟแสดงผลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ | | | | ↔ | |
| 5. การวิเคราะห์ผลของฮาร์มอนิกส์ที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ สรุปผลการทำงาน เพื่อทำการนำเสนอ | | | | | ↔ |

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจในหลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
2. มีความรู้ความเข้าใจลักษณะของกราฟสัญญาณกระแส, แรงดัน ขณะที่มีมอเตอร์ทำงาน
3. สามารถนำความรู้ที่ได้ไปวิเคราะห์กราฟสัญญาณของมอเตอร์ หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดอื่นๆ ได้ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาโครงการที่ดีขึ้นกว่าเดิม

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

การศึกษาและวิเคราะห์เรื่องฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ จำเป็นต้องมีความรู้ความเข้าใจในเรื่องหลักการทำงาน วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ความหมายของฮาร์มอนิกส์ รวมถึงแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ และฮาร์มอนิกส์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งในบทนี้จะนำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเบื้องต้นเกี่ยวกับมอเตอร์และฮาร์มอนิกส์

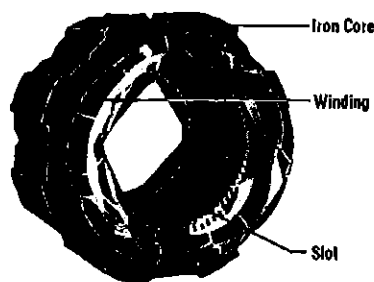
2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส (Three Phase Induction Motor)



รูปที่ 2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส [1]

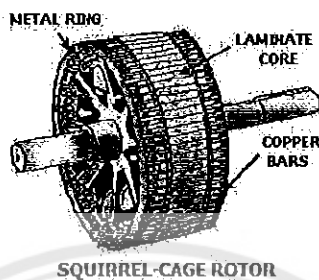
2.1.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส (Induction Motor Construction)

มอเตอร์เหนี่ยวนำมีส่วนประกอบที่สำคัญแบ่งออกเป็น 2 ส่วนตามลักษณะโครงสร้างคือ ส่วนอยู่กับที่หรือสเตเตอร์ (Stator) และส่วนที่หมุนหรือโรเตอร์ (Rotor) ซึ่งส่วนที่อยู่กับที่นั้นมีหน้าที่ยึดขดลวดอาร์มาเจอร์ (Armature Winding) ที่บรรจุอยู่ในร่องสลิต (Slot) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ในส่วนของโรเตอร์สามารถแบ่งออกตามลักษณะโครงสร้างได้ 2 ชนิดคือ



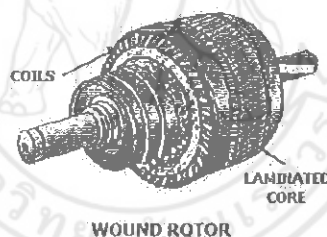
รูปที่ 2.2 สเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ [2]

- โรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel Cage Rotor) มีแท่งตัวนำ (Rotor Bar) คล้ายกรงกระรอก ฝังอยู่ในโรเตอร์ ที่ปลายทั้งสองด้านของแท่งตัวนำถูกฉนวนด้วยตัวนำรูปวงแหวน แท่งตัวนำของโรเตอร์มักมีลักษณะเอียง (Skewing) เพราะจะทำให้โรเตอร์หมุนได้ราบเรียบและลดปัญหาเสียงฮัมของแม่เหล็ก (Magnetic Hum) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โรเตอร์แบบกรงกระรอกของมอเตอร์เหนี่ยวนำ [3]

- โรเตอร์แบบพันขลวดรอบโรเตอร์ (Wound Rotor) โรเตอร์แบบนี้แตกต่างกับแบบกรงกระรอก คือ มีขลวดทองแดงพันรอบตัวโรเตอร์ ส่วนปลายของขลวดนี้จะต่อกับสลีบริงซึ่งมีแปรงถ่านติดตั้งอยู่คล้ายโรเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โรเตอร์แบบพันขลวดหรือเฟสवादโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ [3]

2.1.2 หลักการทำงาน (Principle of Operation)

ขณะทำการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสให้ขลวดอาร์เมเจอร์ที่สเตเตอร์ จะเกิดสนามแม่เหล็กหมุน มีผลทำให้เกิดฟลักแม่เหล็กของสนามแม่เหล็กหมุนเคลื่อนตัวตัดตัวนำที่ฝังอยู่ในโรเตอร์ ดังนั้นจะเกิดการเหนี่ยวนำ ขณะเดียวกันเนื่องจากตัวนำภายในโรเตอร์ถูกฉนวนทั้งสองด้านจึงทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ตัวนำในโรเตอร์ มีผลทำให้เกิดแรงบิดไปในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุน สามารถกล่าวได้ว่าสนามแม่เหล็กหมุนจะหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส (n_s) ตามสมการที่ (2-1)

$$n_s = \frac{120 f_e}{P} \quad (2-1)$$

เมื่อ f_e = ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์
 P = จำนวนขั้วของมอเตอร์

สนามแม่เหล็กหมุนจะไปเหนี่ยวนำกับตัวนำโรเตอร์ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำไฟฟ้าขึ้นในขดลวดด้าน โรเตอร์ ซึ่งขดลวดโรเตอร์นั้นได้มีการต่อให้ครบวงจรไว้แล้วจึงทำให้มีกระแสไหลในขดลวดโรเตอร์ กระแสในขดลวดโรเตอร์นี้จะสร้างให้เกิดสนามแม่เหล็กเช่นกัน อย่างไรก็ตามความเร็วของโรเตอร์จะแตกต่างจากความเร็วเชิงโคโรนัส และมักเรียกค่าส่วนต่างของความเร็วว่า “ค่าสลิป” สามารถเขียนได้ดังนี้

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} = \frac{\omega_{sl}}{\omega_s} \quad (2-2)$$

| | | | |
|-------|---------------|-----|------------------------------------|
| เมื่อ | s | คือ | ความเร็วสลิป |
| | N_r | คือ | ความเร็วโรเตอร์ |
| | ω_s | คือ | ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของสเตเตอร์ |
| | ω_r | คือ | ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์ |
| | ω_{sl} | คือ | ความเร็วเชิงมุมของสลิป |

แรงบิดที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เกิดจากการรวมกันทางเวกเตอร์ของสนามแม่เหล็กฝั่งสเตเตอร์กับสนามแม่เหล็กของโรเตอร์ และมีค่าตามสมการที่ (2-3)

$$T = \pi \left(\frac{P}{2} \right) l_r B_p F_p \sin \delta \quad (2-3)$$

| | | | |
|-------|----------|-----|-------------------------------------------------------|
| เมื่อ | T | คือ | แรงบิดของมอเตอร์ |
| | l_r | คือ | ความยาวตามของตัวนำที่อยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็ก |
| | B_p | คือ | ค่าความหนาแน่นสูงสุดของฟลักซ์แม่เหล็กในช่องอากาศ |
| | F_p | คือ | ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กสูงสุดที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์ |
| | δ | คือ | มุมระหว่างกระแสโรเตอร์กับกระแสแมกนีไตซิ่ง |

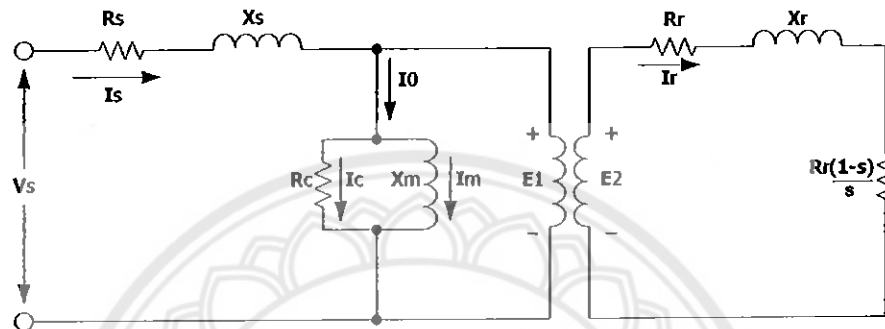
และสามารถเขียนใหม่ได้เป็นสมการแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้

$$T = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) |\bar{\psi}_m| |\bar{I}_r| \sin \delta \quad (2-4)$$

| | | | |
|-------|------------------|-----|-----------------------------------------|
| เมื่อ | $ \bar{\psi}_m $ | คือ | ค่าสูงสุดของสนามแม่เหล็กต่อขั้วแม่เหล็ก |
| | $ \bar{I}_r $ | คือ | กระแสสูงสุดบนโรเตอร์ |

2.1.3 วงจรสมมูล

โครงสร้างและหลักการการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำมีส่วนคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้า โดยมีความแตกต่างกันที่ขดลวดค้ำานทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากับความต้านทานที่โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ และสามารถเขียนวงจรสมมูลได้ในลักษณะคล้ายกับวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.5

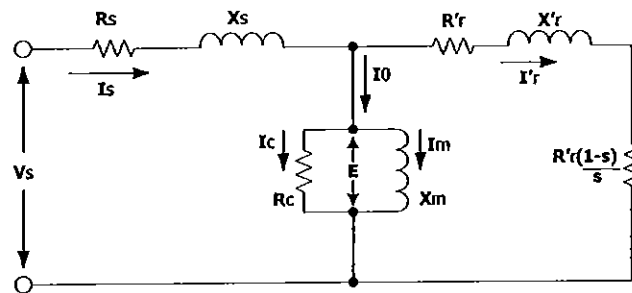


รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำต่อเฟส

เมื่อ

- V_s คือ แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้มอเตอร์ต่อเฟส
- X_s คือ ความเหนี่ยวนำรั่วไหลของสเตเตอร์ต่อเฟส
- R_s คือ ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ต่อเฟส
- R_r คือ ค่าความต้านทานของขดลวด โรเตอร์ต่อเฟส
- R_c คือ ค่าความต้านทานแทนการสูญเสียในแกนเหล็กต่อเฟส
- I_c คือ กระแสที่ทำให้เกิดค่าสูญเสียในแกนเหล็กต่อเฟส
- E_1 คือ แรงเคลื่อนแม่เหล็ก ไฟฟ้าด้านสเตเตอร์ต่อเฟส
- E_2 คือ แรงเคลื่อนแม่เหล็ก ไฟฟ้าด้าน โรเตอร์ต่อเฟส
- X_m คือ ความเหนี่ยวนำรั่วไหลในแกนเหล็กต่อเฟส
- I_s คือ กระแสไฟฟ้าด้านสเตเตอร์ต่อเฟส
- I_r คือ กระแสสร้างสนามแม่เหล็กต่อเฟส
- I_o คือ กระแสกระตุ้นต่อเฟส

สามารถโอนย้ายวงจรทางด้านโรเตอร์ให้มาอยู่ทางฝั่งสเตเตอร์ ดังแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำต่อเฟสเมื่อ โอนย้ายมาด้านสเตเตอร์

- เมื่อ R'_r คือ ค่าความต้านทานของขดลวด โรเตอร์ต่อเฟสที่โอนย้ายมาฝั่งสเตเตอร์
 X'_r คือ ความเหนี่ยวนำรั่วไหลของ โรเตอร์ต่อเฟสที่โอนย้ายมาฝั่งสเตเตอร์
 I'_r คือ กระแสไฟฟ้าด้าน โรเตอร์ต่อเฟสที่โอนย้ายมาฝั่งสเตเตอร์

2.1.4 การวิเคราะห์วงจรสมมูล

จากวงจรสมมูลของมอเตอร์สามารถคำนวณหาค่าต่างๆ ได้ดังนี้

$$\text{กำลังไฟฟ้าอินพุต} \quad P_{in} = 3V_s I_s \cos \theta \quad (2-5)$$

$$\text{กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่สเตเตอร์} \quad P_{ls} = 3I_s^2 R_s \quad (2-6)$$

$$\text{กำลังไฟฟ้าที่ผ่านช่องว่างอากาศ} \quad P_g = 3I_r^2 \frac{R_r}{s} \quad (2-7)$$

$$\text{กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่โรเตอร์} \quad P_{lr} = 3I_r^2 R_r \quad (2-8)$$

$$\text{กำลังไฟฟ้าทางกล} \quad P_{em} = P_g - P_{lr} = \frac{3I_r^2 R_r (1-s)}{s} \quad (2-9)$$

$$\text{กำลังไฟฟ้าที่เพลา} \quad P_{sh} = P_{em} - P_{fw} \quad (2-10)$$

เมื่อ P_{fw} คือ กำลังสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงลม

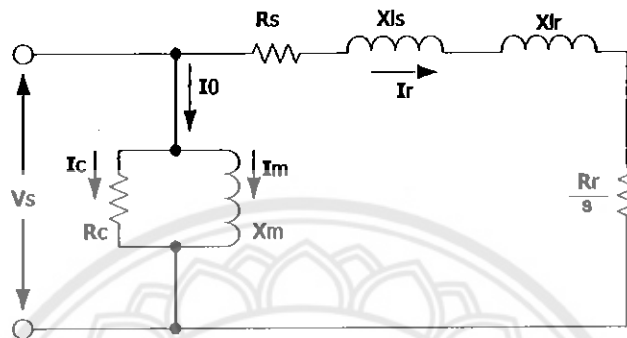
$$\text{แรงบิดมอเตอร์} \quad T_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_r} = \frac{3I_r^2 R_r}{S \omega_s} \quad (2-11)$$

$$\text{ซึ่ง} \quad \omega_s = \frac{2\pi N_s}{60} = \frac{4\pi f}{P} \quad (2-12)$$

แทนค่าสมการที่ 2-12 ลงในสมการที่ 2-11 จะได้

$$\text{แรงบิดมอเตอร์} \quad T_{em} = \frac{3I_r^2 R_r P}{4\pi f S} \quad (2-13)$$

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.6 สามารถเขียนเป็นวงจอย่างง่ายได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำอย่างง่าย

2.1.5 หลักการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

จากวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ในรูปที่ 2.5 ฟลักซ์ในช่องว่างอากาศ ที่เกิดจากการกระจายความหนาแน่นของฟลักซ์ (β) จะหมุนที่ความเร็วเชิงโคโรนัสรอบๆ ขดลวดสเตเตอร์ที่อยู่กับที่ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดแรงเหนี่ยวนำระหว่างช่องว่างอากาศ (Air-gap Voltage: E) ซึ่งแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะมีความถี่เท่ากับความถี่แหล่งจ่ายและเนื่องจากการกระจายความหนาแน่นของฟลักซ์เป็นไปตามลักษณะฟังก์ชันไซน์ จากกฎของฟาราเดย์ทำให้สามารถหาแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำจาก

$$e = N_s \frac{d\phi}{dt} \quad (2-14)$$

- เมื่อ e คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในช่องว่างอากาศ
 N_s คือ จำนวนรอบของขดลวด
 ϕ คือ ฟลักซ์ในช่องว่างอากาศ

เมื่อกำหนดให้

$$\phi = \phi_m \sin \omega t \quad (2-15)$$

แทนค่าสมการที่ 2-15 ลงในสมการที่ 2-14 จะได้สมการแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำดังสมการที่ 2-16

$$e = N_s \phi_m \omega \cos \omega t \quad (2-16)$$

โดยที่ $\omega = 2\pi f$ เมื่อแทนค่า $\cos\omega t$ เท่ากับหนึ่งและทำสมการที่ 2-16 ให้เป็นค่า RMS จะได้

$$E = 4.44N_s\phi f k_w \tag{2-17}$$

เมื่อ k_w คือ Winding Factor

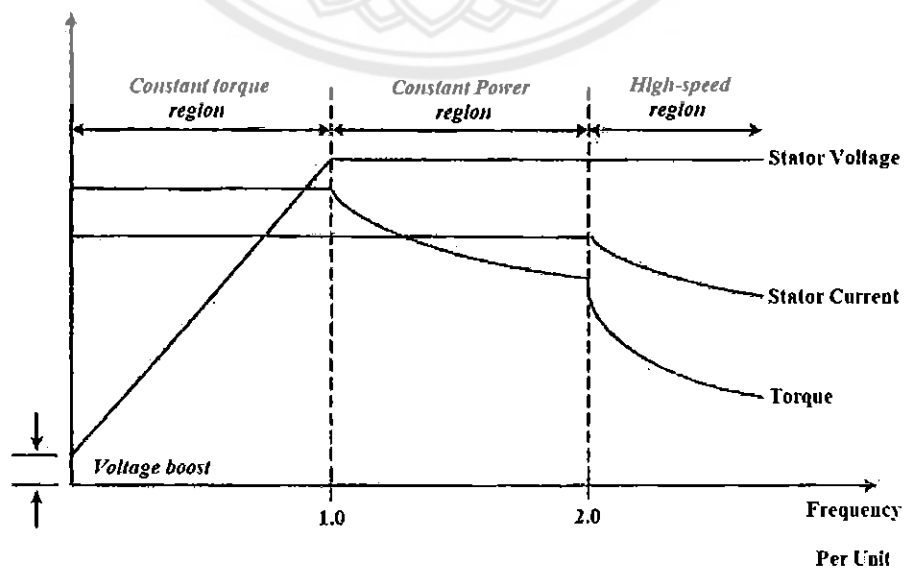
จากสมการที่ 2-1 พบว่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ก็คือ จำนวนขั้ว มอเตอร์และความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์นิยมใช้การปรับความถี่ของ แหล่งจ่ายไฟ อย่างไรก็ตามก็จะต้องคำนึงถึงแรงบิดและฟลักซ์ที่ช่องว่างอากาศของมอเตอร์ด้วย สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันขาเข้า (V_s), แรงบิด (T), แรงเหนี่ยวนำระหว่างช่องว่าง อากาศ (E), และฟลักซ์ในช่องว่างอากาศ (ϕ) และ ดังนี้

$$V_s \approx E \tag{2-18}$$

$$T \propto \left(\frac{V_s}{f}\right)^2, \left(\frac{E}{f}\right)^2 \tag{2-19}$$

$$\phi \propto \frac{E}{f} \tag{2-20}$$

ดังนั้นในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยมากมักควบคุมให้อัตราส่วน แรงดันต่อความถี่ $\left(\frac{V_s}{f}\right), \left(\frac{E}{f}\right)$ ให้มีค่าคงที่ เพื่อรักษาแรงบิดของมอเตอร์ให้มีค่าคงที่ หลักการ ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ สามารถแบ่งช่วงของได้เป็น 3 ช่วง ดังนี้



รูปที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงของแรงดัน, แรงบิด, กระแสมอเตอร์กับความถี่ [4]

- ช่วงการทำงานที่ความเร็วต่ำกว่าพิกัด (ค่าแรงบิดมีค่าคงที่)

ในช่วงที่ความเร็วของมอเตอร์ต่ำกว่าที่พิกัดจำเป็นต้องทำให้ฟลักซ์ของมอเตอร์มีค่าคงที่ โดยการควบคุมอัตราส่วนของแรงดันต่อความถี่ให้คงที่ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 พบว่า ช่วงดังกล่าวจะมีขนาดของแรงดันสเตเตอร์ลดลงในลักษณะเชิงเส้นตามความถี่ โดยเริ่มจากค่าที่พิกัดของมอเตอร์และลดลงมาจนถึงค่าต่ำสุดที่คั่งไว้ที่ค่าหนึ่ง เพราะที่ความถี่ต่ำๆ ค่าของกระแสที่สร้างสนามแม่เหล็ก ไม่ได้ขึ้นอยู่กับขดลวดสนามแม่เหล็กเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เนื่องจากค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์จะมีค่าใกล้เคียงกับขดลวดสนามแม่เหล็ก จึงต้องเพิ่มแรงดันที่จ่ายให้กับสเตเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อชดเชยแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานสเตเตอร์ และในช่วงนี้ค่ากระแสมอเตอร์ที่ใช้งานจะเป็นค่าที่พิกัด การทำงานในช่วงนี้จะเรียกว่าช่วงแรงบิดคงที่ (Constant Torque Region)

- ช่วงการทำงานที่ความเร็วสูงกว่าพิกัด (ค่ากำลังงานคงที่)

การเพิ่มความถี่ของสเตเตอร์ให้สูงกว่าที่พิกัดจะทำให้ความเร็วของมอเตอร์มีค่าสูงกว่าความเร็วที่พิกัด ได้แต่จะต้องรักษาค่าแรงดันให้มีค่าคงที่เท่ากับที่พิกัดของมอเตอร์ โดยเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นจะทำให้แรงดันต่อความถี่มีค่าลดลง เป็นผลทำให้ฟลักซ์ในช่องว่างอากาศลดลงด้วย ซึ่ถ้าจำกัดกระแส โรเตอร์จะเท่ากับที่พิกัดเหมือนกับในช่วงแรงบิดคงที่ แต่ช่วงนี้แรงบิดสูงสุดจะแปรผันกับความถี่ดังสมการที่ 2-21

$$T_{em,max} = \frac{f_{rated}}{f} \cdot T_{rated} \tag{2-21}$$

$$P_{em,max} = \omega_r \cdot T_{em,max} \tag{2-22}$$

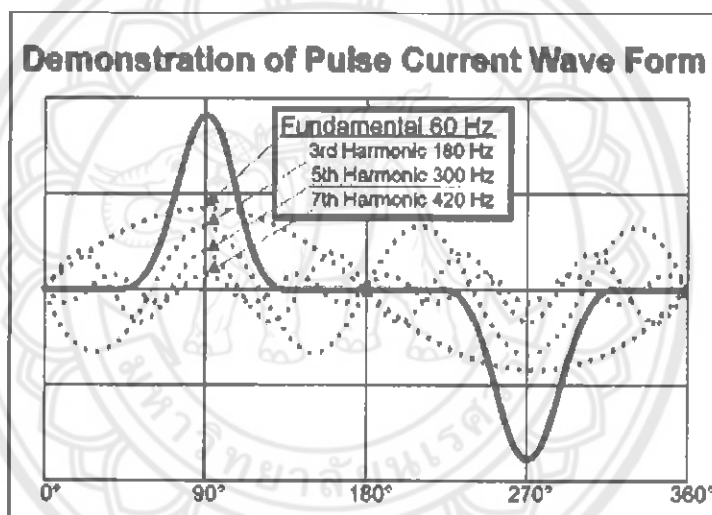
- เมื่อ
- $T_{em,max}$ คือ แรงบิดสูงสุด
 - T_{rated} คือ แรงบิดที่พิกัดของมอเตอร์
 - $P_{em,max}$ คือ กำลังไฟฟ้าทางกลสูงสุด
 - f_{rated} คือ ความถี่ที่พิกัดของมอเตอร์

สมการที่ 2-22 แสดงถึงค่ากำลังไฟฟ้าทางกลสูงสุด ซึ่งจะมีค่าลดลงเนื่องจากแรงบิดสูงสุดลดลงนั่นเอง เรียกช่วงการทำงานนี้ว่าช่วงกำลังไฟฟ้าคงที่ (Constant Power Region)

- ช่วงการทำงานที่ความเร็วสูงมาก (ค่าความถี่ที่โรเตอร์คงที่)

ในช่วงนี้จะเป็นช่วงที่ความเร็วรอบของมอเตอร์จะสูงมากถ้าให้แรงดันอินพุตมีค่าที่พิกัดจะทำให้ค่าฟลักซ์ในช่องว่างอากาศลดลงมากทำให้แรงบิดของมอเตอร์ไม่ถึงค่าที่พิกัดในขณะที่ความถี่โรเตอร์ของมอเตอร์จะมีค่าคงที่ ส่งผลให้สมรรถนะของแรงบิดลดลงเป็นอัตราส่วน $1/f^2$ ซึ่งทั้งแรงบิดและกระแสของมอเตอร์จะลดลงในขณะที่ความเร็วเพิ่มขึ้น การรักษาค่าของแรงดันทางด้านเอาต์พุตให้คงที่นั่นค่าแรงบิดของมอเตอร์ในช่วงนี้จะไม่ถูกจำกัด โดยกระแสที่มอเตอร์ได้รับ ดังนั้นกระแสที่ขีดจำกัดจะมีค่าน้อยกว่าค่ากระแสที่พิกัดและจะลดลงตามความเร็วที่เพิ่มขึ้น

2.2 ฮาร์โมนิกส์ (Harmonics)



รูปที่ 2.9 สัญลักษณ์ความถี่ฮาร์โมนิกที่ระดับต่างๆ [5]

2.2.1 ความหมายของฮาร์โมนิกส์

ความหมายของฮาร์โมนิกส์ คือ จำนวนเท่าของความถี่หลักมูลฐาน (Fundamental Frequency) เช่น ระบบไฟฟ้าในประเทศไทย ใช้ความถี่มูลฐานเท่ากับ 50 เฮิร์ตซ์ เพราะฉะนั้นความถี่ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 3 จะมีค่าเท่ากับ 150 เฮิร์ตซ์ ความถี่ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5 เท่ากับ 250 เฮิร์ตซ์ และการเกิดกระแสฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้า เกิดจากผลรวมของกระแสไฟฟ้าที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์อันดับต่าง ๆ มารวมกัน ซึ่งผลที่ได้ทำให้รูปสัญญาณกระแสเกิดการบิดเบี้ยว ไม่เป็นรูปสัญญาณไซน์

3 2.2.2 นิยามของฮาร์โมนิกส์แบบต่าง ๆ

อินเตอร์ฮาร์โมนิกส์ (Inter Harmonic) คือ ส่วนประกอบรูปคลื่นไซน์ของรูปคลื่นรายคาบใด ๆ ที่มีความถี่ไม่เป็นจำนวนเท่าลงตัวของความถี่มูลฐาน

ฮาร์โมนิกส์มีรูปแบบ (Characteristic Harmonic) คือ ฮาร์โมนิกส์ที่ถูกสร้างขึ้นด้วยคอนเวอร์เตอร์ ที่ใช้อุปกรณ์สวิตซ์สารกึ่งตัวนำ มีอันดับของฮาร์โมนิกส์เป็นไปตามสมการที่ (2-23)

$$h = kp \pm 1 \quad (2-23)$$

โดยที่ h = อันดับของฮาร์โมนิกส์

k = เลขจำนวนเต็มมีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3...

p = จำนวนพัลส์ของคอนเวอร์เตอร์

ฮาร์โมนิกส์ไม่มีรูปแบบ (Non-characteristic Harmonic) คือ ฮาร์โมนิกส์ที่ถูกสร้างขึ้นด้วยคอนเวอร์เตอร์ ที่ใช้อุปกรณ์สวิตซ์สารกึ่งตัวนำ มีอันดับของฮาร์โมนิกส์ไม่เป็นตามสมการที่ (2-23)

ทริเพิลฮาร์โมนิก (Tripler Harmonic) คือ ฮาร์โมนิกส์ที่อันดับถูกหารด้วย 3 ลงตัว เช่น ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 3, 6, 9... ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มที่มีลำดับศูนย์ (Zero Sequence) ในกรณีระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย ฮาร์โมนิกส์กลุ่มนี้จะไหลรวมในสายนิวทรัล

2.2.3 ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวม (Total Harmonic Distortion)

จากรูปคลื่นของสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ สามารถบอกได้ถึงค่าความเพี้ยนของสัญญาณมากหรือน้อย โดยพิจารณาจากค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวม ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (2-24) ดังนี้

$$THD = \frac{1}{I_1} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} = \sqrt{\left(\frac{I_{rms}}{I_{1,rms}}\right)^2 - 1} \quad (2-24)$$

จากสมการที่ (2-24)

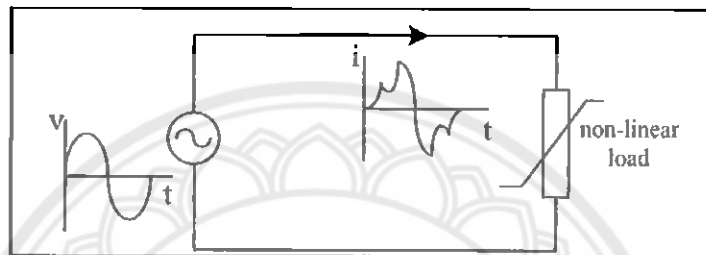
I_1 คือ กระแสสูงสุดขององค์ประกอบความถี่มูลฐาน

I_{rms} คือ กระแสอาร์เอ็มเอส

$I_{1,rms}$ คือ กระแสอาร์เอ็มเอสขององค์ประกอบมูลฐาน

2.2.4 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์

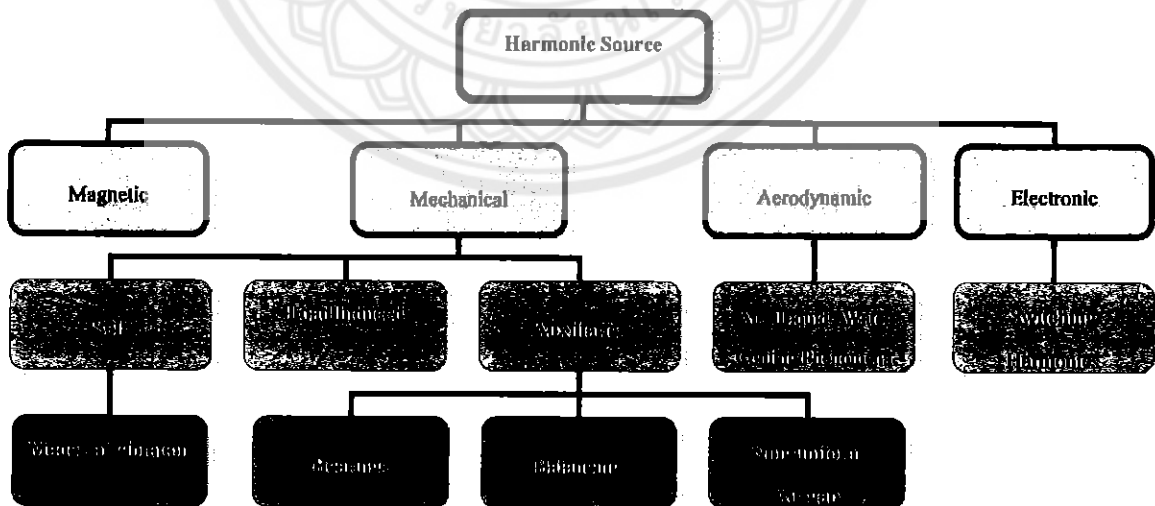
อุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นโหลดไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear Load) แหล่งกำเนิดไฟฟ้าเป็นแบบสวิตชิง (Switching Power Supply) เช่น เครื่องเชื่อมไฟฟ้า เต้าหอลอมไฟฟ้า หลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้อิเล็กทรอนิกส์บัลลาสต์ อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ อุปกรณ์เรกติไฟเออร์ ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้จะมีการแปลงไฟจากไฟฟ้ากระแสสลับไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้อุปกรณ์ประเภททาวเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์ไฟฟ้างดังกล่าวจะมีรูปคลื่นกระแสที่ผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์



รูปที่ 2.10 การเกิดฮาร์มอนิกจาก โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น [6]

2.3 ฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในเครื่องจักรกลไฟฟ้า สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ในเครื่องจักรกลไฟฟ้า

2.3.1 ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดจากเส้นแรงแม่เหล็ก

ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดจากเส้นแรงแม่เหล็กซึ่งข้ามผ่านช่องอากาศที่มีทิศทางของการกระจายสนามแม่เหล็กแตกต่างกันไปและก่อให้เกิดแรงในทิศทางนั้นๆ

2.3.2 ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดจากเครื่องจักรกล

สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทได้แก่

- ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นจากตัวของเครื่องจักรกลเอง ได้แก่ ความถี่ที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปในขดลวดสเตเตอร์ที่จะมีผลทำให้เกิดอีกหนึ่งความถี่ ซึ่งในความถี่เหล่านั้นอาจก่อให้เกิดสภาวะรีโซแนนซ์และทำให้มีอีกหนึ่งความถี่ปรากฏขึ้น

- ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำของโหลด (Load Induced) คือ ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดจากการเชื่อมต่อเพลาโรเตอร์ (Coupling) ของเครื่องจักรกลเพื่อนำมาทดสอบ เช่น เครื่องจักรกลไฟฟ้าคิซี

- ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากส่วนประกอบ (Compartment) ของเครื่องจักรกล เช่น ปัญหาของแบริ่ง (Bearings) ความไม่สมดุลของโรเตอร์ (Rotor Unbalance) ความสกรปรกของแปรงถ่านคอมมิวเตเตอร์

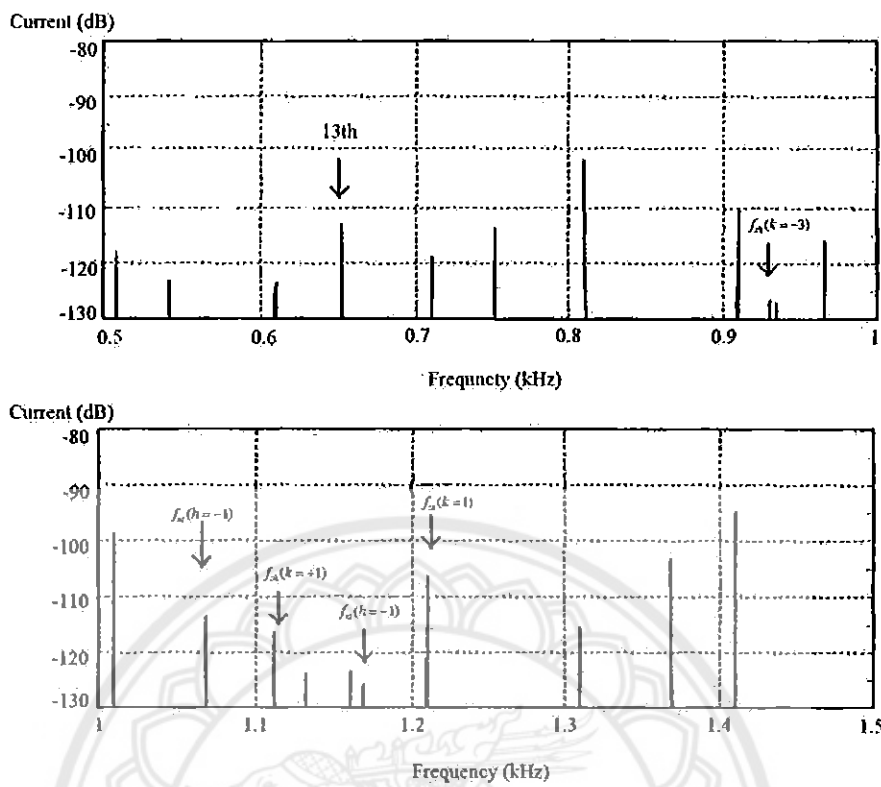
2.3.3 ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดจากอากาศพลศาสตร์

คือ ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นจากการระบายความร้อนของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ได้แก่ อากาศ น้ำ หรือน้ำมัน เช่น การระบายความร้อนด้วยอากาศที่ใช้พัดลม จะทำให้เกิดฮาร์โมนิกส์ที่มีความสัมพันธ์กับความเร็ว และจำนวนของใบพัด

2.3.4 ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดจากรังจรอิเล็กทรอนิกส์

โดยปกติแล้วในงานขับเคลื่อนมอเตอร์ แหล่งจ่ายที่นิยมนำมาใช้ คือ อินเวอร์เตอร์ที่มีข้อดีคือสามารถปรับความเร็วของมอเตอร์ได้ แต่แหล่งจ่ายจำพวกนี้จะใช้อุปกรณ์โซลิตสเตรทในการสวิตซ์ ซึ่งเมื่อแหล่งจ่ายเป็นแบบ PWM (Pulse Width Modulation) อินเวอร์เตอร์จะทำให้เกิดฮาร์โมนิกส์กลุ่มแรกที่มีความถี่เท่ากับความถี่ของการสวิตซ์ และฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับเทคนิคของการมอดูเลต

กระแสหาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้รูปคลื่นกระแสมูลฐานมีความผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ โดยเฉพาะเมื่อแหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์จะทำให้เกิดฮาร์โมนิกส์ที่เป็นผลมาจากแหล่งจ่ายอีกด้วย รูปที่ 2.12 ได้ใช้ FFT (Fast Fourier Transform) ทรานส์ฟอร์มไปยัง โดเมนความถี่เพื่อตรวจสอบฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่ 0.5-1.5 kHz ซึ่งสามารถบอกสาเหตุของการเกิดฮาร์โมนิกส์บางความถี่ ได้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำจากรูปที่ 2.12 [8]

2.4 ข้อกำหนดและมาตรฐานของฮาร์มอนิก

ตารางที่ 3.1 ข้อกำหนดของกระแสฮาร์มอนิกตามมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992

| I_{sc}/I_L | Ih, IL % - General distribution systems (120V – 69kV) | | | | | TDD (%) |
|--------------|-------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------|---------|
| | $h < 11$ | $11 \leq h \leq 17$ | $17 \leq h \leq 23$ | $23 \leq h \leq 35$ | $h \geq 35$ | |
| <20 | 4.0 | 2.0 | 1.5 | 0.6 | 0.3 | 5 |
| 20-50 | 7.0 | 3.5 | 2.5 | 1.0 | 0.5 | 8 |
| 50-100 | 10 | 4.5 | 4.0 | 1.5 | 0.7 | 12 |
| 100-1000 | 12 | 5.5 | 5.0 | 2.0 | 1.0 | 15 |
| >1000 | 15 | 7.0 | 6.0 | 2.5 | 1.4 | 20 |

Above current distortion limits are for odd harmonics.

Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonics limits.

For all power generation equipment, distortion limits are those with $I_{sc}/I_L < 20$.

I_{sc} is the maximum short circuit current at the point of common coupling "PCC".

I_L is the fundamental frequency 15- or 30- minute load current at PCC.

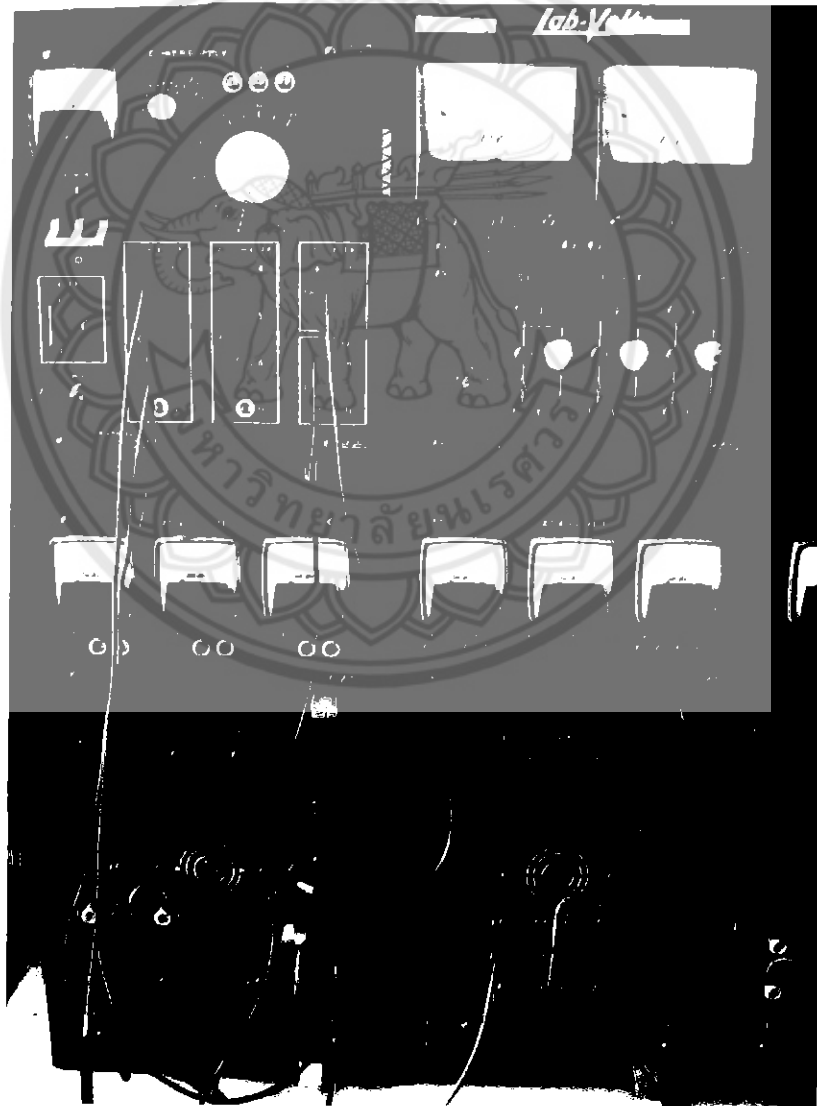
TDD is the total demand distortion (THD normalized by I_L).

บทที่ 3

ขั้นตอนการทดสอบ

3.1 การออกแบบการทดสอบฮาร์มอนิกส์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

การทดสอบนี้ศึกษาฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ทดสอบจากการขับโหลดทางกล โดยใช้มอเตอร์กระแสตรงมาเป็นโหลดและทำการหมุนในทิศทางตรงข้ามกับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ต้องการทดสอบ และคำนวณค่าปริมาณกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้พิคคิมอเตอร์ 175 วัตต์ เป็นการทำงานแบบเต็มพิกัด (Full Load) พร้อมบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่าง ๆ



รูปที่ 3.1 การต่อวงจรชุดทดสอบฮาร์มอนิกส์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ขั้นตอนการทดสอบ

- ต่อวงจรการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำและมอเตอร์กระแสตรง (ทิศทางตรงข้ามกัน)
- ติดตั้งเครื่องวัด Power & Harmonics Analyzer เพื่อใช้วัดค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ในสถานะต่างๆ

- ต่อวงจรมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาย (Y) แล้วจ่ายแรงดันไฟฟ้า 380 โวลต์ ทำการเดินเครื่องมอเตอร์แล้ววัดค่าพารามิเตอร์ และฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ เป็นการทดสอบในสถานะไม่มีโหลด

- ทำการปรับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงเพื่อเปลี่ยนแปลงสถานะโหลด
- ทำการวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ และคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของโหลด จากนั้นปรับแรงดันให้กับ โหลดตามเปอร์เซ็นต์ที่คำนวณไว้

3.1.2 วิธีการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์พิกัดกำลังโหลดที่ใช้ในการทดสอบ

- สถานะไร้ภาระทางกล คือ การเดินเครื่องมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยที่ยังไม่ได้ต่อมอเตอร์กระแสตรงที่ทำงานเป็นโหลด

- สถานะขับภาระทางกล คือ การเดินเครื่องมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ต่อเข้ากับมอเตอร์กระแสตรงซึ่งทำหน้าที่เป็น โหลด แล้วป้อนแรงดันให้กับมอเตอร์กระแสตรงตามเปอร์เซ็นต์โหลด โดยคิดจากค่าพิกัดกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำ สามารถคำนวณได้จากสมการนี้

$$P = \left(\frac{(P_{max} - P_{min}) \times N}{100} \right) + P_{min} \quad (3-1)$$

เมื่อ P = พิกัดกำลัง ไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

P_{max} = พิกัดกำลังสูงสุดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

P_{min} = พิกัดกำลังต่ำสุดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

N = เปอร์เซ็นพิกัด โหลดที่ต้องการใช้ในการทดสอบ

3.1.3 ตัวอย่างการคำนวณพิกัดโหลด (คิดที่พิกัดโหลด 20%)

| | | |
|---------------------------------------|--------------------------------------------------------|---|
| พิกัดกำลัง 100% ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ | 175 | W |
| พิกัดกำลัง 0% ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ | 60 | W |
| แทนค่าลงในสมการ | $\left(\frac{(175 - 60) \times 20}{100} \right) + 60$ | W |
| ∴ พิกัดกำลัง โหลดที่ 20% มีค่าเท่ากับ | 83 | W |

| | L1 | L2 | L3 | System | |
|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------|
| V | 217.5 v | 241.2 v | 242.7 v | | |
| I | 0.330 A | 0.324 A | 0.329 A | | |
| P | 0.018 kW | 0.023 kW | 0.019 kW | 0.060 kW | |
| S | 0.071 kVA | 0.078 kVA | 0.079 kVA | 0.226 kVA | |
| Q | -0.068 kVAR | -0.074 kVAR | -0.076 kVAR | -0.218 kVAR | |
| PF | 0.25 | 0.29 | 0.24 | | |
| Phase | -76.3° | -74.3° | -80.2° | | |
| v12 | 404.0 v | v23 | 405.6 v | v31 | 404.0 v |

(ก)

| | L1 | L2 | L3 | System | |
|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------|
| V | 316.2 v | 248.8 v | 244.6 v | | |
| I | 0.387 A | 0.385 A | 0.370 A | | |
| P | 0.032 kW | 0.013 kW | 0.038 kW | 0.083 kW | |
| S | 0.122 kVA | 0.095 kVA | 0.090 kVA | 0.304 kVA | |
| Q | -0.117 kVAR | -0.094 kVAR | -0.081 kVAR | -0.292 kVAR | |
| PF | 0.26 | 0.13 | 0.42 | | |
| Phase | -75.3° | -81.5° | -55.7° | | |
| v12 | 452.1 v | v23 | 471.3 v | v31 | 457.6 v |

(ข)

รูปที่ 3.2 พิกัดกำลังโหลดที่ 0% (ก) พิกัดกำลังโหลดที่ 20% (ข)

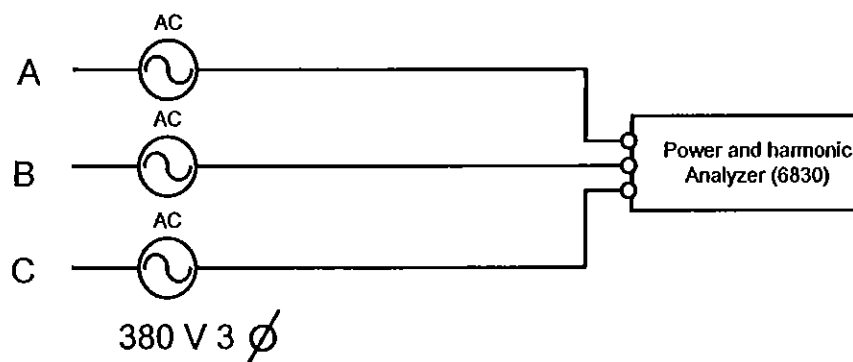
3.1.4 เปรอ์เซ็นต์พิกัดกำลังโหลดที่ใช้ในการทดสอบ

| | | |
|-------------------------------------|-----|---|
| พิกัดกำลัง 0% ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ | 60 | W |
| พิกัดกำลัง 20% ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ | 83 | W |
| พิกัดกำลัง 40% ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ | 106 | W |
| พิกัดกำลัง 60% ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ | 129 | W |
| พิกัดกำลัง 80% ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ | 152 | W |
| พิกัดกำลัง 100% ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ | 175 | W |

3.2 ขั้นตอนและวิธีการทดสอบ

3.2.1 การทดสอบเพื่อหาค่าฮาร์มอนิกของแหล่งจ่าย

จากวงจรการทดสอบแหล่งจ่ายที่จ่ายไฟให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส



รูปที่ 3.3 วงจรการทดสอบหาค่าฮาร์มอนิกของแหล่งจ่าย

ทำการต่อเครื่องวัด Power & Harmonics Analyzer เข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้า จากนั้นจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส แล้ววัดค่าแรงดันที่แหล่งจ่ายไฟฟ้า ที่จ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์และฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้า ว่าส่งผลต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำหรือไม่ บันทึกผลลงในเครื่องวัด



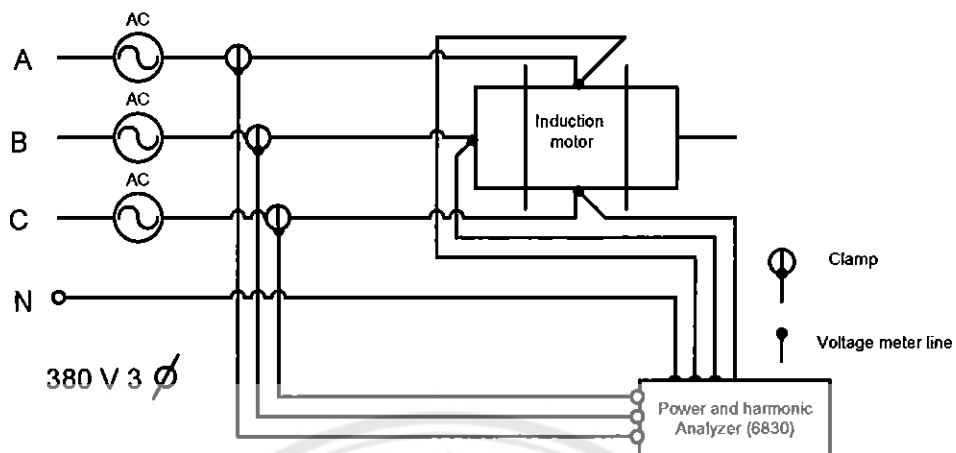
รูปที่ 3.4 การทดสอบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 380 โวลต์

3.2.2 การทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะไร้ภาระทางกลและยับภาระทางกล

รูปแบบของการทดสอบตามสภาวะที่มีการยับภาระทางกลในระดับที่ต่างกัน ซึ่งจะเป็นการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และค่าฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ สามารถแบ่งออกเป็น

- การทดสอบมอเตอร์ที่สภาวะไร้ภาระทางกล
- การทดสอบมอเตอร์ที่สภาวะยับภาระทางกลตามพิคัดกำลัง 0%
- การทดสอบมอเตอร์ที่สภาวะยับภาระทางกลตามพิคัดกำลัง 20%
- การทดสอบมอเตอร์ที่สภาวะยับภาระทางกลตามพิคัดกำลัง 40%
- การทดสอบมอเตอร์ที่สภาวะยับภาระทางกลตามพิคัดกำลัง 60%
- การทดสอบมอเตอร์ที่สภาวะยับภาระทางกลตามพิคัดกำลัง 80%
- การทดสอบมอเตอร์ที่สภาวะยับภาระทางกลตามพิคัดกำลัง 100%

กรณีการทดสอบที่สภาวะไร้ภาระทางกล



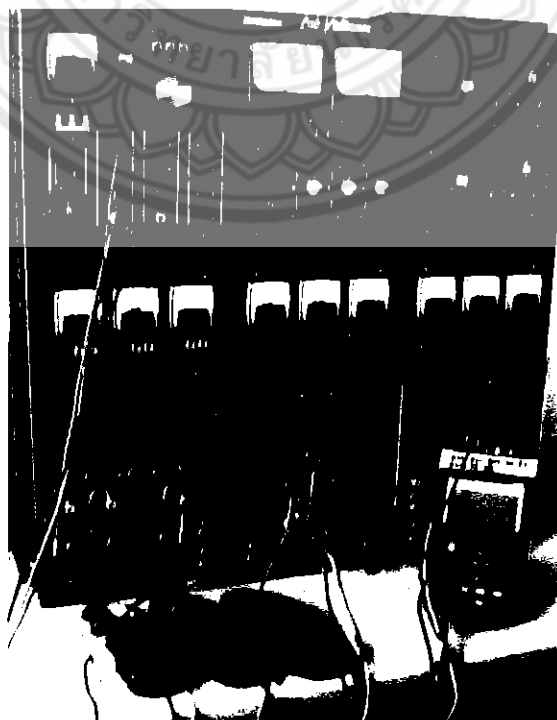
รูปที่ 3.5 วงจรทดสอบหาค่าฮาร์มอนิกของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะไม่มีโหลด

ขั้นตอนและวิธีการทดสอบ

- ต่อวงจรการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ ตามรูปที่ 3.3 แล้วจ่ายแรงดัน ไฟฟ้า 380 โวลต์
- ติดตั้งเครื่องวัด Power & Harmonics Analyzer เพื่อใช้วัดค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

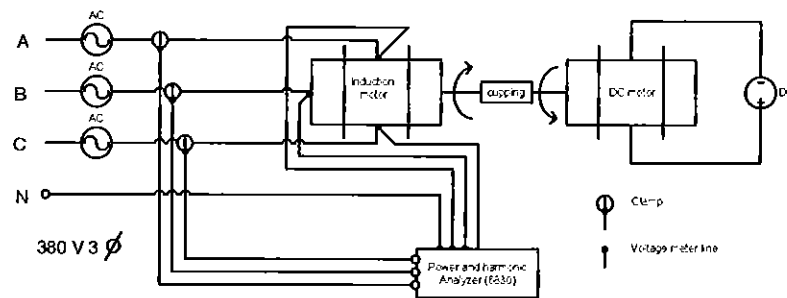
ในสถานะต่างๆ

- ทำการเดินเครื่องมอเตอร์แล้ววัดค่าพารามิเตอร์ และฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ เป็นการทดสอบในสภาวะไม่มีโหลด



รูปที่ 3.6 การต่อวงจรทดสอบฮาร์มอนิกในสภาวะไร้ทางกล

กรณีการทดสอบที่สถานะขั้วภาระทางกล โดยคิดที่เปอร์เซ็นต์กำลังโหลด 0 - 100%



รูปที่ 3.7 วงจรทดสอบเพื่อหาค่าฮาร์มอนิกซ์ของมอเตอร์ขณะที่มีโหลดต่ออยู่

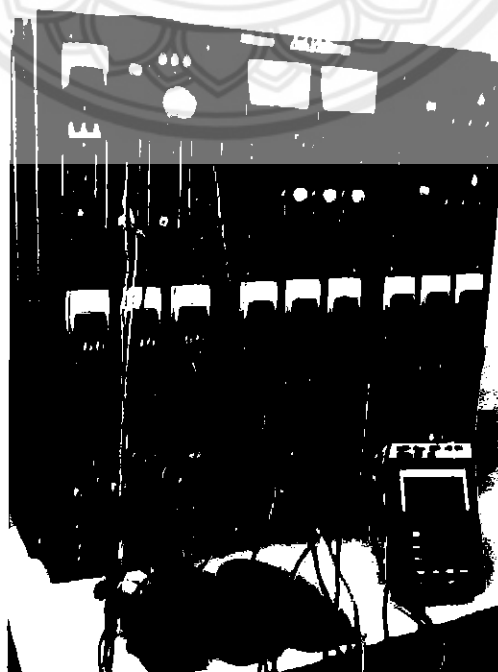
ขั้นตอนและวิธีการทดสอบ

- ต่อวงจรการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำและมอเตอร์กระแสตรง (ทิศทางตรงข้ามกัน)
- ติดตั้งเครื่องวัด Power & Harmonics Analyzer เพื่อใช้วัดค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ในสถานะต่างๆ

- ต่อวงจรมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาย (Y) แล้วจ่ายแรงดันไฟฟ้า 380 โวลต์ ทำการเดินเครื่องมอเตอร์แล้ววัดค่าพารามิเตอร์ และฮาร์มอนิกซ์ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ เป็นการทดสอบในสถานะที่มีโหลดต่ออยู่

- ทำการปรับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงเพื่อเปลี่ยนแปลงสถานะ โหลด
- ทำการวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ และคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของโหลด จากนั้นปรับแรงดันให้กับ โหลดตามเปอร์เซ็นต์ที่คำนวณไว้



รูปที่ 3.8 การต่อวงจรทดสอบฮาร์มอนิกซ์ในสภาวะขั้วภาระทางกล

3.3 รายการอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

| | | |
|-------------------------------------------------|----|------|
| 1. มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส | 1 | ตัว |
| 2. มอเตอร์กระแสตรง | 1 | ตัว |
| 3. สายไฟฟ้าต่อวงจร | 60 | เส้น |
| 4. เครื่องวัด Power & Harmonics Analyzer (6830) | 1 | ชุด |
| 5. ชุดทดลองมอเตอร์ Lab-Volt | 1 | ชุด |
| 6. หักลมตั้งพื้น | 1 | ตัว |



บทที่ 4

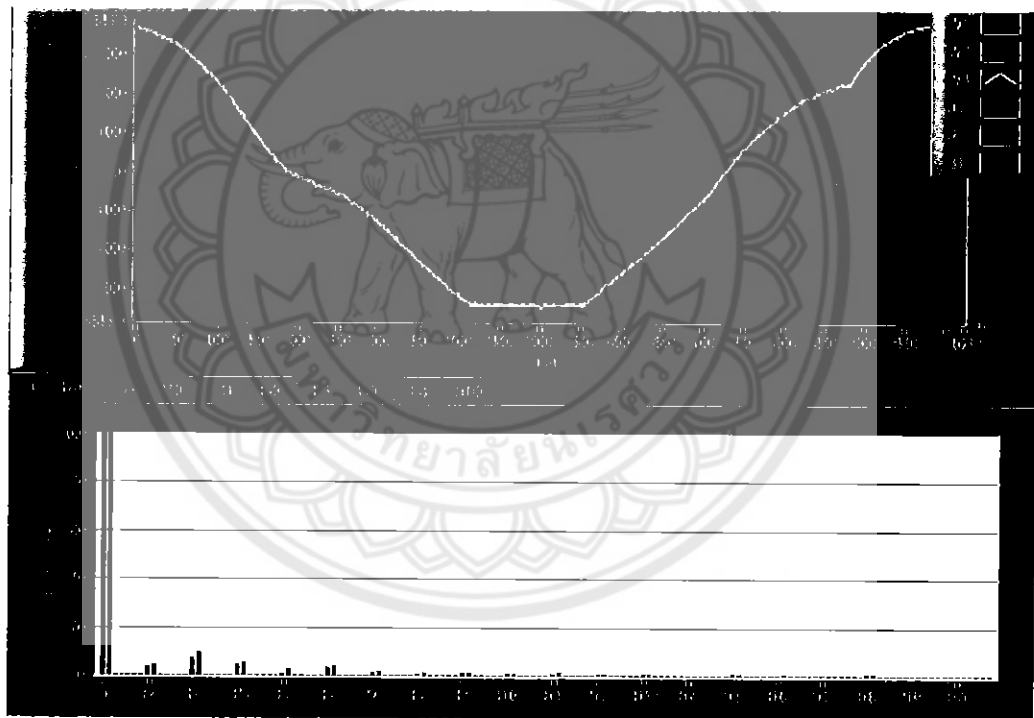
ผลการทดสอบ

4.1 ผลของแรงดันและกระแสจากการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะแตกต่างกัน

4.1.1 สัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ทำการบันทึกค่าสัญญาณทั้งแรงดันและกระแส ขณะทำการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะต่าง ๆ โดยใช้มอเตอร์กระแสตรงเป็นภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

กรณีการทดสอบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 380 โวลต์

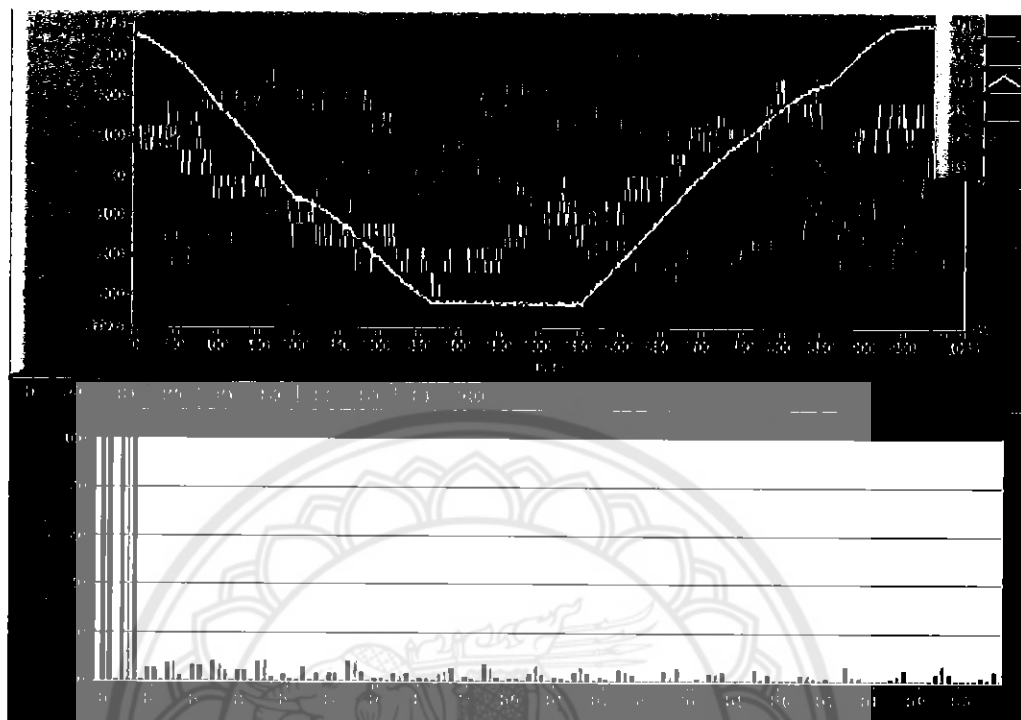


รูปที่ 4.1 สัญญาณแรงดันและกระแสของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส

จากรูปที่ 4.1 แสดงกราฟสัญญาณแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟส โดยเส้นสัญญาณสีแดง คือ แรงดันเฟส A (V_1), เส้นสัญญาณสีส้ม คือ แรงดันเฟส B (V_2), และเส้นสัญญาณสีเหลืองคือ แรงดันเฟส C (V_3) และสัญญาณฮาร์มอนิกของแหล่งจ่ายไฟฟ้า พบว่ามีขนาดของฮาร์มอนิกของแรงดันลำดับอื่น ๆ มีค่าเพียงเล็กน้อย เทียบกับขนาดแรงดันของฮาร์มอนิกหลัก (Fundamental)

ลักษณะของสัญญาณแรงดันที่ได้มีความผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ อาจเนื่องมาจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้รับจากระบบไฟของคณะวิศวกรรมศาสตร์

กรณีการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะไร้ภาระทางกล

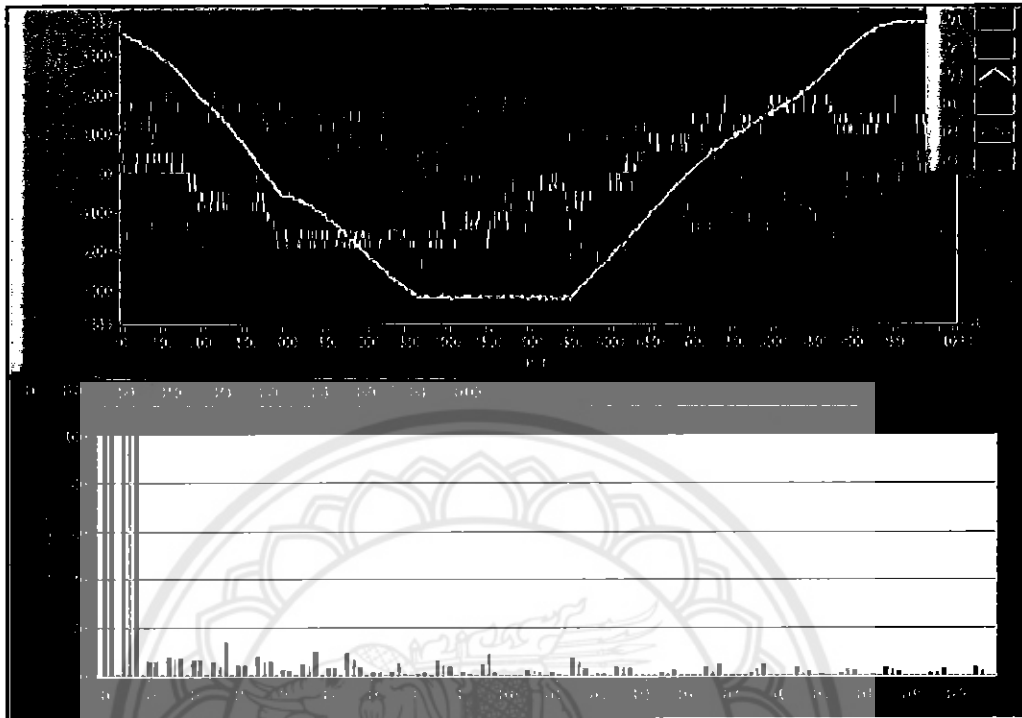


รูปที่ 4.2 สัญญาณแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะไร้ภาระทางกล

จากรูปที่ 4.2 แสดงกราฟสัญญาณแรงดันและกระแสที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะไร้ภาระทางกล โดยเส้นสัญญาณสีแดงคือ แรงดันเฟส A (V_1), เส้นสัญญาณสีส้มคือ แรงดันเฟส B (V_2), เส้นสัญญาณสีเหลืองคือ แรงดันเฟส C (V_3), เส้นสัญญาณสีเขียวคือ กระแสเฟส A (I_1), เส้นสัญญาณสีฟ้าคือ กระแสเฟส B (I_2), เส้นสัญญาณสีม่วงคือ กระแสเฟส C (I_3) และสัญญาณฮาร์มอนิกส์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำทำงานที่สถานะไร้ภาระทางกล สัญญาณแรงดันและกระแสที่ได้มีความผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ อาจเนื่องมาจากแหล่งจ่ายที่ใช้ทดสอบและตัวมอเตอร์เหนี่ยวนำเอง ส่วนขนาดของฮาร์มอนิกส์แรงดันและกระแสในลำดับอื่นที่ไม่ใช่ฮาร์มอนิกส์หลัก มีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับขนาดของฮาร์มอนิกส์ในการทดสอบแหล่งจ่าย

กรณีการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะขั้วภาระทางกล 0%

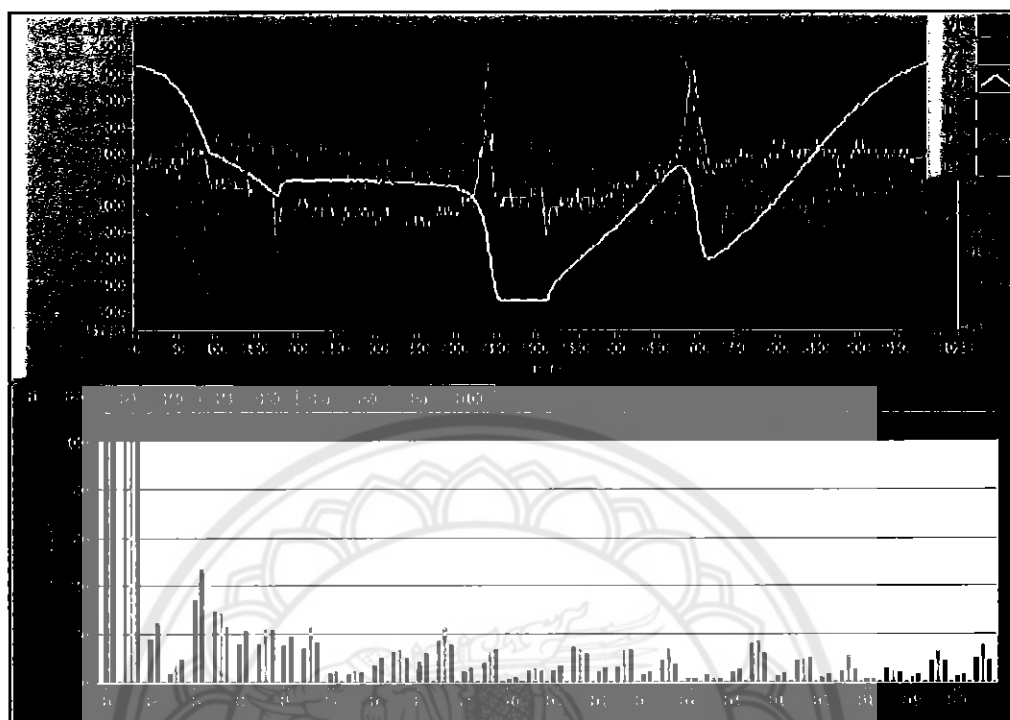


ร/ร.
๒๕ ๕๑๖ ๗
๒๕๕๒

รูปที่ 4.3 สัญญาณแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะขั้วภาระทางกล 0%

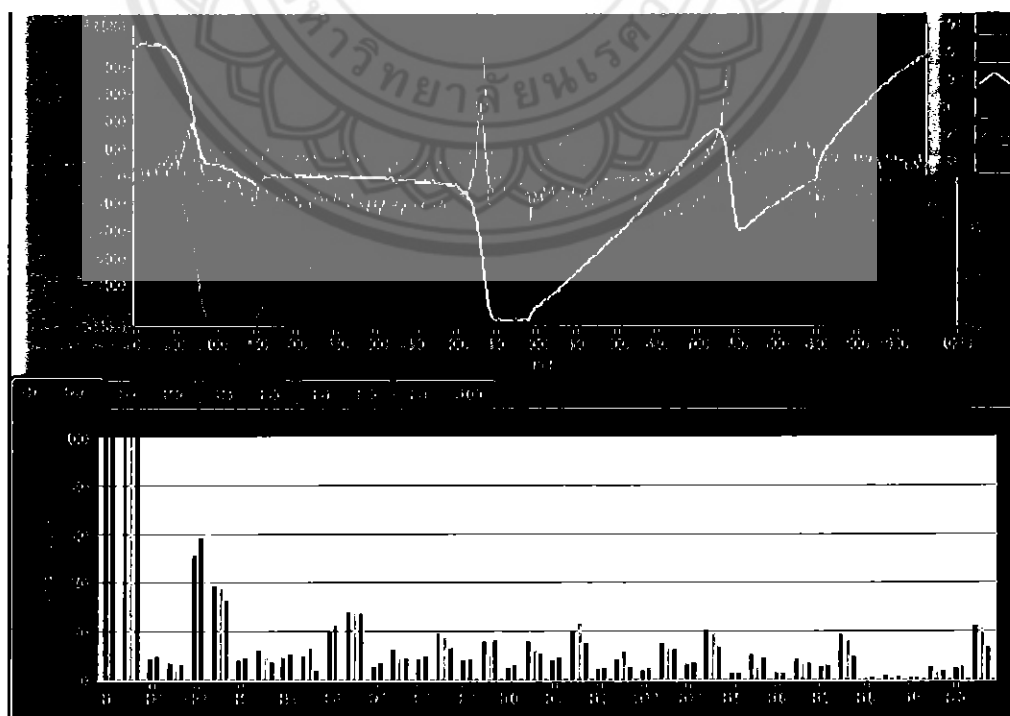
จากรูปที่ 4.3 แสดงกราฟสัญญาณและขนาดฮาร์มอนิกส์ของแรงดันกับกระแสที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในขณะขั้วภาระทางกลที่ 0% พบว่าสัญญาณที่ได้คล้ายกับสัญญาณของการทดสอบแหล่งจ่ายและการทดสอบขณะไร้ภาระทางกล แต่มีความผิดเพี้ยนของสัญญาณมากกว่า เป็นเพราะมอเตอร์เหนี่ยวนำ มีการขั้วภาระทางกลเพิ่มขึ้น ส่วนขนาดฮาร์มอนิกส์ของแรงดันและกระแสในลำดับอื่นๆ ที่ไม่ใช่ฮาร์มอนิกส์หลัก มีค่าสูงขึ้น

กรณีการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะขับภาระทางกล 20%



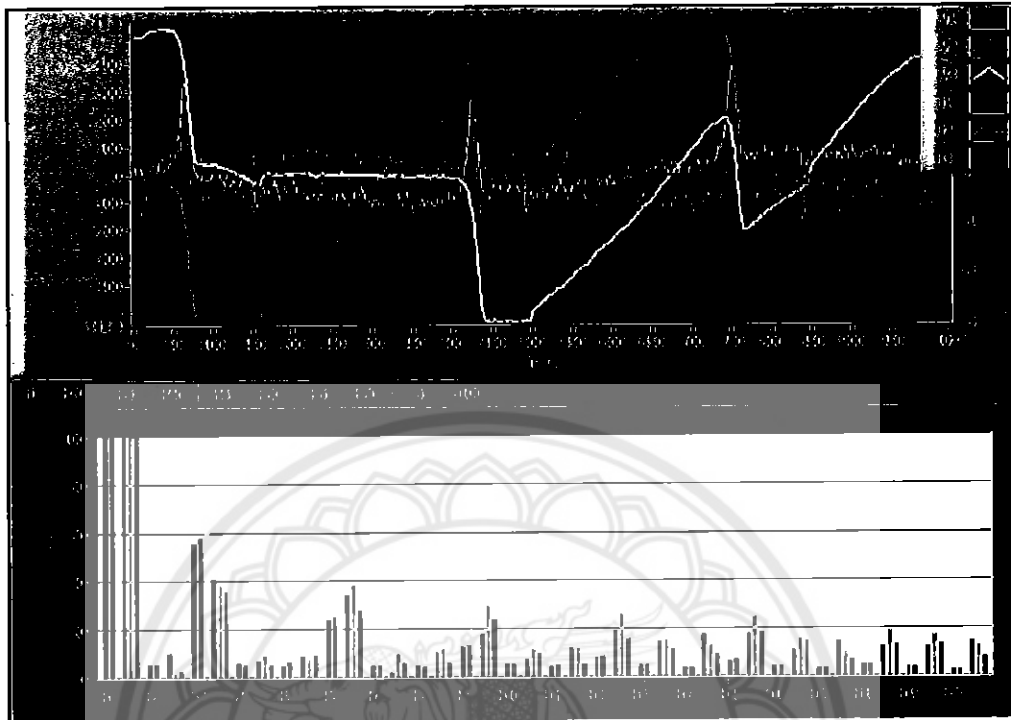
รูปที่ 4.4 สัญญาณแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะขับภาระทางกล 20%

กรณีการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะขับภาระทางกล 40%



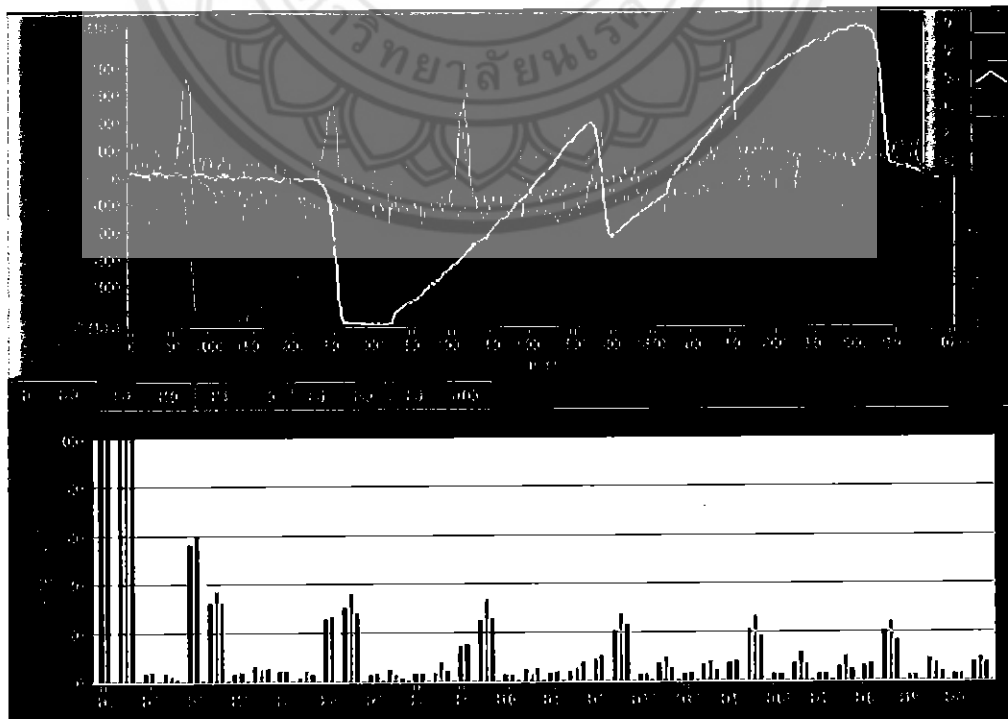
รูปที่ 4.5 สัญญาณแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะขับภาระทางกล 40%

กรณีการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะขับภาระทางกล 60%



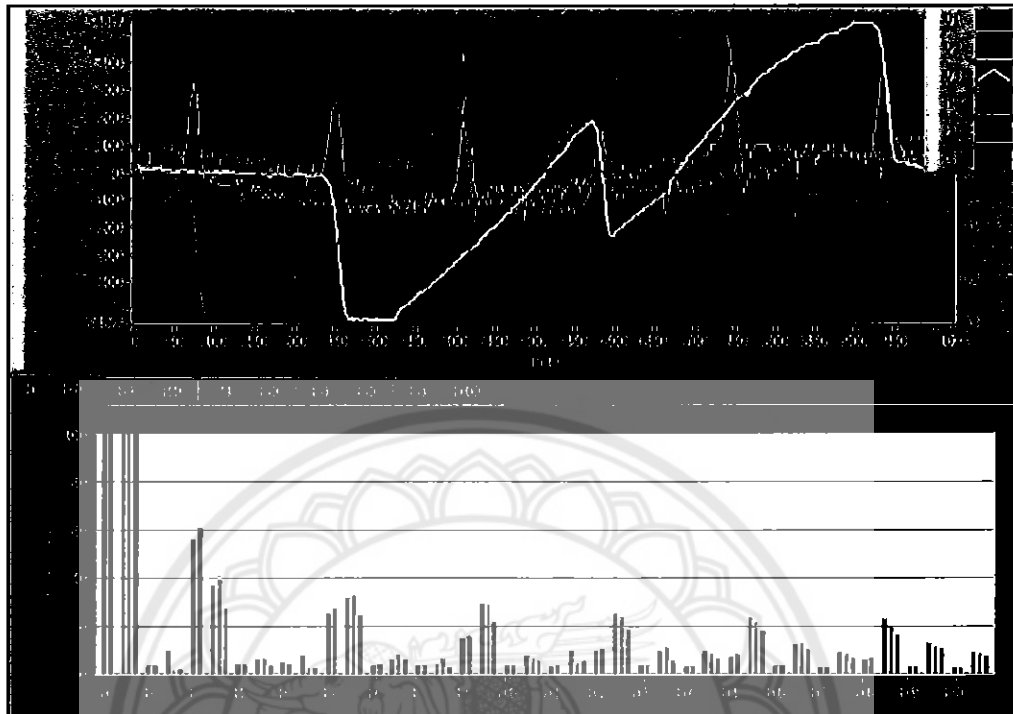
รูปที่ 4.6 สัญญาณแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะขับภาระทางกล 60%

กรณีการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะขับภาระทางกล 80%



รูปที่ 4.7 สัญญาณแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะขับภาระทางกล 80%

กรณีการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะขับภาระทางกล 100%



รูปที่ 4.8 สัญญาณแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะขับภาระทางกล 100%

จากรูปที่ 4.4 – 4.8 แสดงกราฟสัญญาณและขนาดฮาร์มอนิกส์ของแรงดันกับกระแสที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในขณะขับภาระทางกลที่ 20 – 100% พบว่าสัญญาณที่ได้มีความผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์มากอย่างเห็นได้ชัด อีกทั้งในสัญญาณของกระแสเกิดยอดคลื่น (Peak Value)

จากขนาดฮาร์มอนิกส์ของแรงดันกับกระแสไฟฟ้า จะสังเกตเห็นว่า

กรณีสถานะ โหลด 20% ขนาดของฮาร์มอนิกที่เห็นได้ชัดคือลำดับที่ 3 4 5 7 8 และ 9

กรณีสถานะ โหลด 40% ขนาดของฮาร์มอนิกที่เห็นได้ชัดคือลำดับที่ 3 – 17

กรณีสถานะ โหลด 60% ขนาดของฮาร์มอนิกที่เห็นได้ชัดคือลำดับที่ 3 6 9 และ 12 – 20

กรณีสถานะ โหลด 80% ขนาดของฮาร์มอนิกที่เห็นได้ชัดคือลำดับที่ 3 6 9 12 15 และ 18

กรณีสถานะ โหลด 100% ขนาดของฮาร์มอนิกที่เห็นได้ชัดคือลำดับที่ 3 6 9 12 15 16 และ 18

ดังนั้นผลที่ได้จากการทดสอบตามรูปที่ 4.4-4.8 เป็นผลมาจากการขับโหลดของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่เพิ่มมากขึ้นตามเปอร์เซ็นต์โหลด

4.1.2 ค่าปริมาณของแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าจากการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงผลการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะที่แตกต่างกัน

| กรณี | V (V) | | | I (A) | | | P (kW) | | |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | V ₁ | V ₂ | V ₃ | I ₁ | I ₂ | I ₃ | P ₁ | P ₂ | P ₃ |
| Supply | 254.03 | 196.71 | 248.87 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| No-Load | 221.3 | 218.75 | 247.62 | 0.3049 | 0.2956 | 0.3286 | 0.0099 | 0.0108 | 0.007 |
| Load 0% | 227.01 | 229.24 | 244.66 | 0.3296 | 0.3203 | 0.3311 | 0.0168 | 0.0215 | 0.0251 |
| Load 20% | 316.71 | 247.96 | 246.4 | 0.3779 | 0.3744 | 0.3627 | 0.0349 | 0.0134 | 0.038 |
| Load 40% | 296.67 | 270.94 | 264.33 | 0.4298 | 0.4278 | 0.4055 | 0.0419 | 0.029 | 0.039 |
| Load 60% | 286.93 | 281.4 | 267.75 | 0.4453 | 0.4589 | 0.4346 | 0.0441 | 0.0391 | 0.0406 |
| Load 80% | 286.67 | 276.44 | 279.01 | 0.4822 | 0.4875 | 0.4664 | 0.0528 | 0.0502 | 0.0533 |
| Load 100% | 287.61 | 272.81 | 281.23 | 0.5089 | 0.5001 | 0.4865 | 0.0599 | 0.0551 | 0.0621 |

หมายเหตุ ผลทดสอบที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการบันทึกทั้งหมด 10 ครั้ง

จากตารางที่ 4.1 เป็นค่าพารามิเตอร์เฉลี่ยของแต่ละกรณีจากการบันทึกผลทั้งหมด 10 ครั้ง (บันทึกผลทุกๆ 2 วินาที) ประกอบไปด้วยค่าแรงดัน ค่ากระแสและค่ากำลังไฟฟ้า ของแต่ละเฟสตามสถานะโหลดต่างๆ

จะเห็นได้ว่าค่าของแรงดันในแต่ละเฟสจะค่อนข้างคงที่หรือแกว่งอยู่ในช่วงที่ไม่กว้าง เนื่องจากในการทดสอบจะป้อนแรงดันไฟฟ้าคงที่ 380 โวลต์ให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ และจากการที่มอเตอร์เหนี่ยวนำมีการขับโหลดมากขึ้น ทำให้ต้องดึงกระแสไฟฟ้ามาใช้ในการสร้างแรงบิด เพื่อนำมาขับโหลดที่สูงขึ้น ดังนั้นค่ากระแสและค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในแต่ละเฟสมีค่าสูง ตามสถานะโหลดที่เพิ่มขึ้น

4.2.2 ผลการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำตามลำดับฮาร์โมนิกส์ภายใต้สถานะที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงผลการทดสอบตามลำดับฮาร์โมนิกส์ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

| กรณี | | RMS | %THD | C.F. | Harmonics Order | | | | |
|----------|----|-------|------|------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| | | | | | 3 rd | 5 th | 7 th | 9 th | 11 th |
| Supply | V1 | 254.4 | 9.8 | 1.51 | 18.3 | 1.3 | 2.4 | 2.4 | 0.6 |
| | V2 | 239.3 | 8.6 | 1.51 | 15.0 | 4.0 | 0.5 | 3.1 | 0.9 |
| | V3 | 248.3 | 8.3 | 1.53 | 13.5 | 5.5 | 0.0 | 2.9 | 0.7 |
| | I1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | I2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | I3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| No-Load | V1 | 224.1 | 9.8 | 1.44 | 13.9 | 5.7 | 0.5 | 2.2 | 2.2 |
| | V2 | 217.5 | 9.6 | 1.42 | 13.3 | 1.6 | 0.8 | 1.4 | 1.2 |
| | V3 | 251.5 | 8.8 | 1.54 | 13.2 | 6.8 | 0.0 | 1.7 | 2.1 |
| | I1 | 0.301 | 21.3 | 1.58 | 0.023 | 0.014 | 0.003 | 0.017 | 0.002 |
| | I2 | 0.326 | 18.3 | 1.77 | 0.013 | 0.008 | 0.006 | 0.000 | 0.007 |
| | I3 | 0.315 | 23.1 | 1.42 | 0.035 | 0.010 | 0.004 | 0.004 | 0.017 |
| Load 0% | V1 | 217.4 | 11.2 | 1.38 | 16.3 | 1.0 | 4.0 | 1.4 | 1.4 |
| | V2 | 241.6 | 11.0 | 1.52 | 15.4 | 6.9 | 4.4 | 0.4 | 0.8 |
| | V3 | 244.1 | 9.2 | 1.55 | 13.5 | 5.7 | 2.3 | 1.7 | 1.2 |
| | I1 | 0.329 | 25.3 | 1.64 | 0.049 | 0.018 | 0.004 | 0.009 | 0.004 |
| | I2 | 0.342 | 20.5 | 1.87 | 0.025 | 0.006 | 0.025 | 0.016 | 0.002 |
| | I3 | 0.337 | 20.4 | 1.71 | 0.024 | 0.001 | 0.011 | 0.011 | 0.005 |
| Load 20% | V1 | 318.5 | 45.4 | 1.70 | 95.0 | 43.5 | 16.4 | 11.7 | 12.5 |
| | V2 | 249.2 | 62.6 | 1.92 | 98.3 | 39.6 | 20.6 | 12.2 | 13.7 |
| | V3 | 239.5 | 69.1 | 1.80 | 119.2 | 8.7 | 19.3 | 13.4 | 8.7 |
| | I1 | 0.421 | 56.9 | 3.21 | 0.099 | 0.048 | 0.039 | 0.038 | 0.038 |
| | I2 | 0.370 | 68.7 | 3.91 | 0.097 | 0.050 | 0.036 | 0.038 | 0.048 |
| | I3 | 0.392 | 66.4 | 2.54 | 0.141 | 0.016 | 0.043 | 0.023 | 0.024 |

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ตารางแสดงผลการทดสอบตามลำดับฮาร์โมนิกส์ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

| กรณี | | RMS | %THD | C.F. | Harmonics Order | | | | |
|-----------|----|-------|------|------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| | | | | | 3 rd | 5 th | 7 th | 9 th | 11 th |
| Load 40% | V1 | 275.9 | 64.9 | 1.89 | 133.1 | 3.1 | 3.1 | 26.5 | 1.8 |
| | V2 | 280.5 | 61.4 | 1.86 | 130.6 | 8.6 | 5.9 | 23.8 | 5.6 |
| | V3 | 271.4 | 64.2 | 1.86 | 130.6 | 8.9 | 7.6 | 23.9 | 6.3 |
| | I1 | 0.385 | 65.1 | 3.17 | 0.115 | 0.02 | 0.008 | 0.044 | 0.031 |
| | I2 | 0.427 | 74.1 | 3.91 | 0.132 | 0.018 | 0.017 | 0.07 | 0.023 |
| | I3 | 0.4 | 74.7 | 2.89 | 0.11 | 0.02 | 0.036 | 0.062 | 0.027 |
| Load 60% | V1 | 285.4 | 64.9 | 1.9 | 133.9 | 10.3 | 10.7 | 28.6 | 8.4 |
| | V2 | 277.7 | 67.1 | 1.89 | 133 | 13.7 | 10.7 | 28.4 | 9.2 |
| | V3 | 268.7 | 71.2 | 1.94 | 134.4 | 7.3 | 9 | 30 | 6.7 |
| | I1 | 0.446 | 98 | 4.62 | 0.11 | 0.018 | 0.016 | 0.086 | 0.034 |
| | I2 | 0.486 | 94.4 | 4.70 | 0.148 | 0.05 | 0.028 | 0.09 | 0.03 |
| | I3 | 0.458 | 75.7 | 3.86 | 0.111 | 0.014 | 0.022 | 0.081 | 0.02 |
| Load 80% | V1 | 287.2 | 65.7 | 1.91 | 135 | 8.8 | 5 | 34.1 | 6.2 |
| | V2 | 276 | 69.3 | 1.95 | 134.5 | 7.2 | 5.1 | 34.3 | 5.6 |
| | V3 | 278.9 | 68.4 | 1.93 | 134.8 | 1.7 | 4.3 | 34.7 | 4.6 |
| | I1 | 0.48 | 92.4 | 4.76 | 0.109 | 0.019 | 0.015 | 0.112 | 0.021 |
| | I2 | 0.508 | 88.2 | 4.05 | 0.148 | 0.02 | 0.002 | 0.105 | 0.013 |
| | I3 | 0.472 | 70.8 | 3.88 | 0.124 | 0.024 | 0.016 | 0.072 | 0.017 |
| Load 100% | V1 | 284.8 | 65.3 | 1.91 | 133 | 10.6 | 7.4 | 33.4 | 6.9 |
| | V2 | 270.7 | 70.4 | 1.94 | 133 | 9.4 | 8.7 | 33.3 | 8.3 |
| | V3 | 279.3 | 67.2 | 1.91 | 133.4 | 4.9 | 7.5 | 33.2 | 7.7 |
| | I1 | 0.497 | 89.8 | 4.6 | 0.119 | 0.019 | 0.017 | 0.103 | 0.024 |
| | I2 | 0.515 | 87.8 | 4.18 | 0.158 | 0.017 | 0.004 | 0.101 | 0.027 |
| | I3 | 0.539 | 64.5 | 3.4 | 0.143 | 0.016 | 0.015 | 0.081 | 0.015 |

จากตารางที่ 4.2 แสดงค่าอาร์เอ็มเอส ความเพี้ยนฮาร์มอนิกสร่วม ขนาดของฮาร์มอนิกสักระแส และแรงดันที่ได้จากการทดสอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะต่างๆ จากค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันจะเห็นได้ว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก เนื่องจากป้อนแรงดันไฟฟ้าคงที่ 380 โวลต์ให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกสั (THD: Total Harmonic Distortion) สามารถบอกได้ถึงความคิดเพี้ยนมากหรือน้อยของสัญญาณแรงดันและกระแสที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ จากตารางจะเห็นได้ว่าค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกสร่วมของแรงดันและกระแสมีค่าสูงขึ้นตามเปอร์เซ็นต์โหลดทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ นั่นหมายถึงสัญญาณของแรงดันและกระแสมีความคิดเพี้ยนไปจากรูปไซน์มากขึ้นตามลำดับ

ในส่วนขนาดฮาร์มอนิกสัของกระแสและแรงดันแต่ละเฟสในลำดับที่ 3,5,7,9 และ 11 พบว่าเมื่อทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะที่มีโหลดสูงขึ้น ขนาดฮาร์มอนิกสัของกระแสก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นไปด้วย และในลำดับที่ 3 ขนาดฮาร์มอนิกสัของกระแสจะมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับฮาร์มอนิกสัในลำดับอื่นๆ



บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดสอบและการวิเคราะห์ข้อมูล

จากการทดสอบแหล่งจ่ายของมอเตอร์เหนี่ยวนำ พบว่าสัญญาณแรงดันที่ได้มีรูปร่างที่ผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ อาจเนื่องมาจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้รับจากระบบไฟฟ้าของคณะวิศวกรรมศาสตร์ ในส่วนของสัญญาณแรงดันที่บริเวณขดลวดนั้นหายไป เป็นผลมาจากแหล่งจ่ายที่ใช้ในการทดสอบเป็นแหล่งจ่ายที่มีวงจรเรกติไฟเออร์ใช้จ่ายไฟกระแสตรงแบบสวิทชิง (Switch Mode Power Supply) ซึ่งเป็น โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น และส่วนของขนาดฮาร์มอนิกส์แรงดันในลำดับอื่นๆ จะเห็นได้ว่าค่าเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับฮาร์มอนิกส์หลัก

การทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะไร้ภาระทางกล และขับภาระทางกลที่ 0% ผลการทดสอบที่ได้จะคล้ายกัน โดยสัญญาณของแรงดันและกระแสที่ได้จะมีรูปร่างที่ผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ อีกทั้งขนาดฮาร์มอนิกส์ของแรงดันและกระแสมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการทดสอบแหล่งจ่าย เป็นเพราะแหล่งจ่ายที่ใช้ทดสอบและเกิดจากตัวของมอเตอร์เอง

ในส่วนของ การทดสอบการขับภาระทางกลในสภาวะ โหลด 20 – 100% สัญญาณแรงดันและกระแสมีความผิดเพี้ยนมากขึ้น เกิดขดลวดคลื่นขึ้นในสัญญาณกระแส ขนาดฮาร์มอนิกส์ของแรงดันและกระแสในลำดับอื่นที่ไม่ใช่ฮาร์มอนิกส์หลักมีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะในลำดับฮาร์มอนิกส์ที่ 3 เนื่องมาจาก การขับ โหลดทางกลที่เพิ่มมากขึ้นของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จากผลการทดสอบทั้งหมด สามารถกล่าวได้ว่าสาเหตุที่ทำให้สัญญาณของแรงดันและกระแสมีความผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ โดยดูจากค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมที่มีค่ามากขึ้น อีกทั้งขนาดฮาร์มอนิกส์ที่วัดได้มีค่าสูงขึ้น เป็นเพราะแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ที่ป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้รับจากระบบไฟฟ้าของคณะวิศวกรรมศาสตร์มีความไม่สมดุล ตัวมอเตอร์เหนี่ยวนำเอง และการขับ โหลดทางกลที่เพิ่มมากขึ้นตามลำดับ

5.2 ปัญหาที่พบขณะดำเนินโครงการ

1. ในระหว่างการทดสอบในห้องทดลอง มีการเดินเครื่องมอเตอร์ตัวอื่นจึงทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ได้ไม่คงที่
2. การส่งถ่ายข้อมูลระหว่างเครื่องวัดกับคอมพิวเตอร์ ทำได้ช้า ทำให้เสียเวลา ซึ่งในระหว่างนั้นมอเตอร์ก็ยังทำงานอยู่ ทำให้อุณหภูมิของมอเตอร์สูงขึ้น
3. การจัดหาอุปกรณ์ในการเก็บค่าข้อมูลทำได้ยาก

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. จากการทดลอง การหาค่าของสารส้มสามารถนำไปหาค่ากระแสใน สายนิวทรอล ของระบบโรงงานหรือว่าระบบใหญ่ๆได้
2. ควรระมัดระวังในการทดลองอาจเกิดอันตรายได้
3. ควรจะศึกษาวิธีใช้อุปกรณ์และเช็ควัดก่อนทดลองทุกครั้ง
4. ควรมีการฝึกการใช้เครื่องมือวัด ในฟังก์ชันต่างๆให้คล่อง เพื่อลดเวลาในการ จับภาพหน้าจอ เครื่องวัด และการดาวน์โหลดข้อมูล
5. ระหว่างทำการทดลองควรจะมีค่าต่างๆควรจะทำในเวลาที่ได้ใกล้เคียงกัน



เอกสารอ้างอิง

- [1] Wikipedia. "Induction Motor." [Online]. Available URL:
http://en.wikipedia.org/wiki/Induction_motor. (Access date: May 2009).
- [2] Smart Energy User. (October 1996). "The Pros and Cons of Having a Motor Rewound."
 [Online]. Available URL: <http://www.wisdompage.com/SEUhtmDOCS/SEU18.htm>. (Access date: May 2009).
- [3] Integrated Publishing. "Types of AC Induction Motor Rotors." [Online]. Available URL:
http://www.tpub.com/content/neets/14177/css/14177_94.htm. (Access date: May 2009).
- [4] จักรชัย เอมสะอาด "การวิเคราะห์การสูญเสียที่เพิ่มขึ้นของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่เกิดจากแรงดันฮาร์โมนิกที่ป้อนด้วยพีดับบลิวเอ็มโดยอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ชนิดเอชบริดจ์" วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง 2549.
- [5] ศักดิ์ชัย นรสิงห์. "ฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้า (Harmonic in Power System)." [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: http://www.9engineer.com/ee_main/Article/Harmonic.htm. (วันที่ค้นข้อมูล: 15 พฤษภาคม 2552).
- [6] กองพล อารีรักษ์ "การระบุเอกลักษณ์ฮาร์โมนิกสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ" วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 2549.
- [7] Greg Hunter. "PWM Inverter Research." [Online]. Available URL:
<http://services.eng.uts.edu.au/~greg/pwm.html>. (Access date: May 2009).
- [8] ชาญวิทย์ คังสิริวรกุล, อุดม จีนประดับ, ชาญชัย กุศลจิตกรณ, ศิริพร เสงเกียรติศักดิ์, และเฉลิมชาติ มานพ. "การศึกษาพฤติกรรมของฮาร์โมนิกที่เกิดจากความเป็นสลดสำหรับประยุกต์ใช้ในการวัดความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ" สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2546.
- [9] เฉลิมชาติ มานพ และชาญชัย กุศลจิตกรณ. (2549.ตุลาคม – ธันวาคม). "สำรวจการเฝ้าสถานะและการวินิจฉัยมอเตอร์เหนี่ยวนำ." วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 16(4), หน้า 30-39.
- [10] เฉลิมชัย คงมั่นประกายกิจ. "การศึกษาผลกระทบของฮาร์โมนิกที่มีต่อแรงบิดของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545.
- [11] Xiaodong Liang and Yilmaz Luy "Harmonic Analysis for Induction Motors" IEEE Trans. On Computer. May. 2006 pp. 172-177.





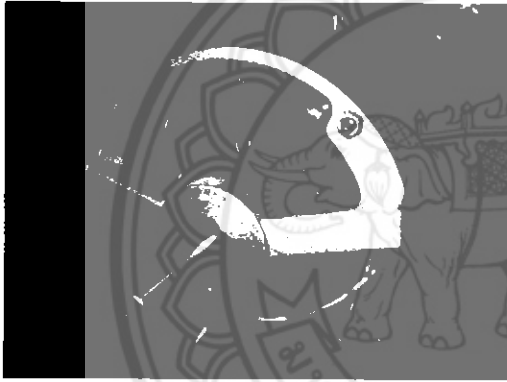
อุปกรณ์การทดสอบ



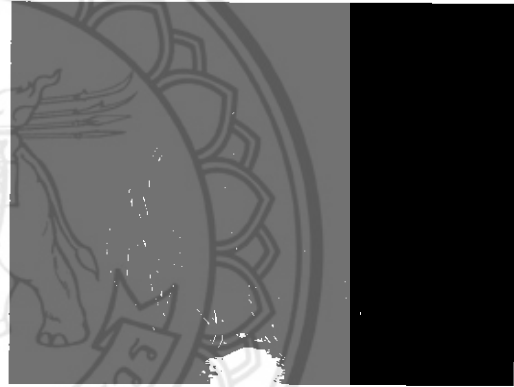
มอเตอร์เหนี่ยวนำ



แคลป์วัดกระแส



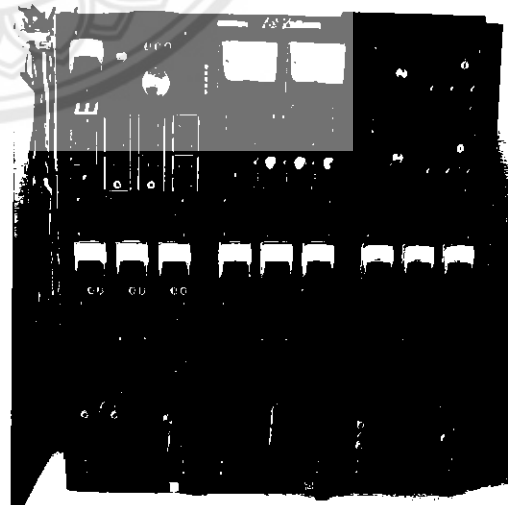
มอเตอร์กระแสตรง



สายวัดแรงดัน



เครื่องวัด Power and harmonic Analyzer

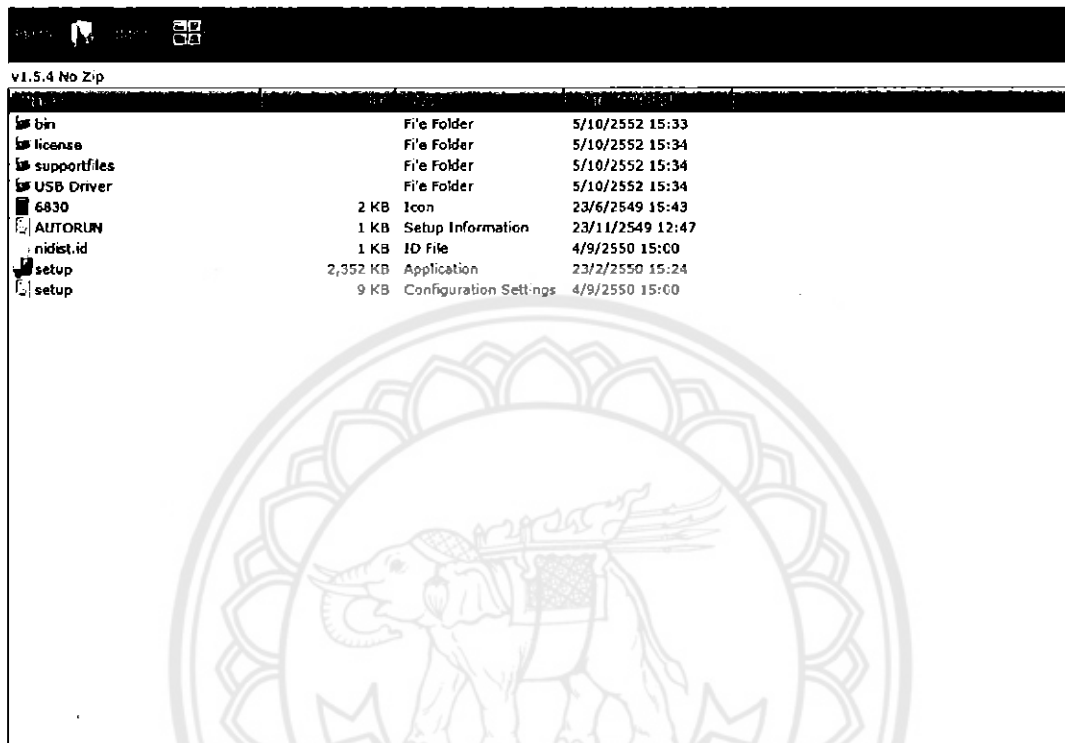


ชุดทดลอง

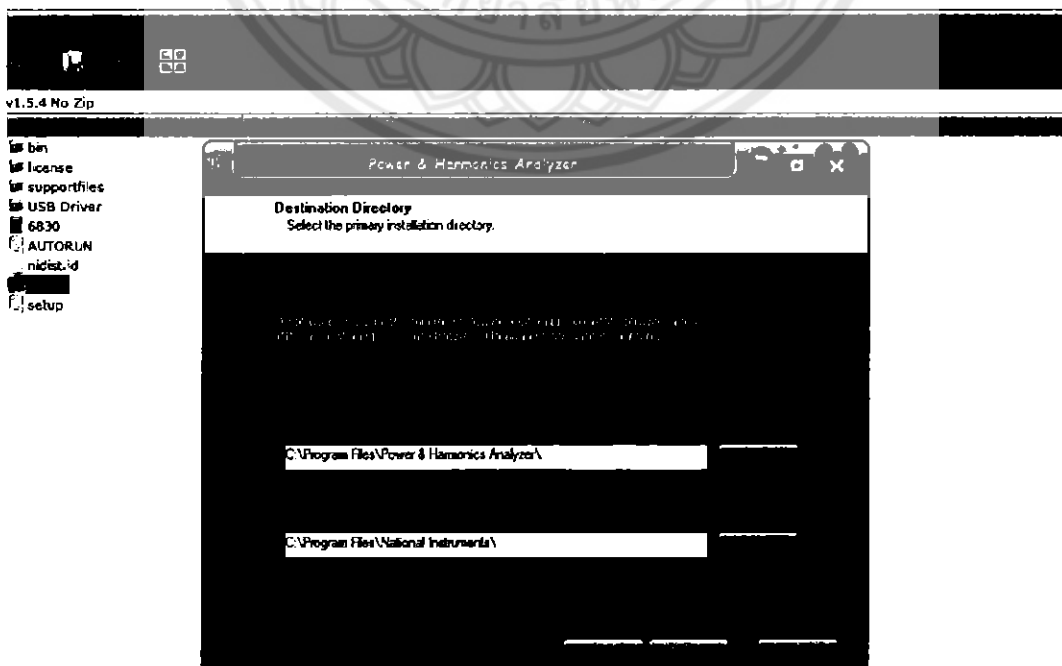


ขั้นตอนการติดตั้งโปรแกรม Power & Harmonics Analyzer

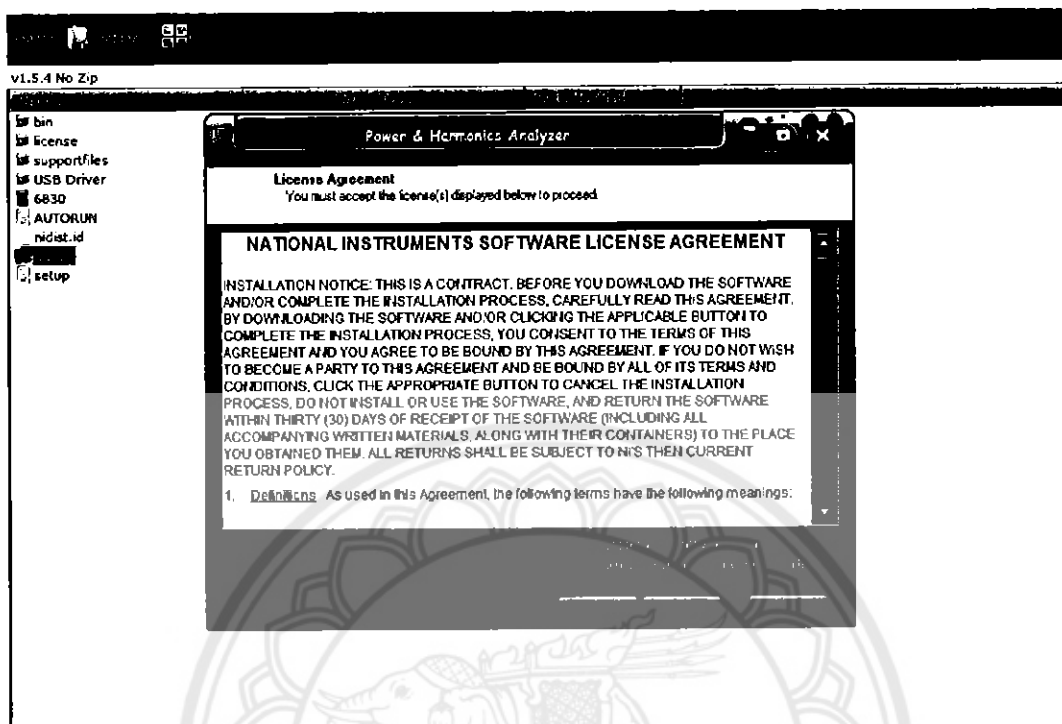
1. ใส่แผ่นซีดีรอมลงในเครื่องคอมพิวเตอร์
2. เปิดข้อมูลเลือก setup.exe



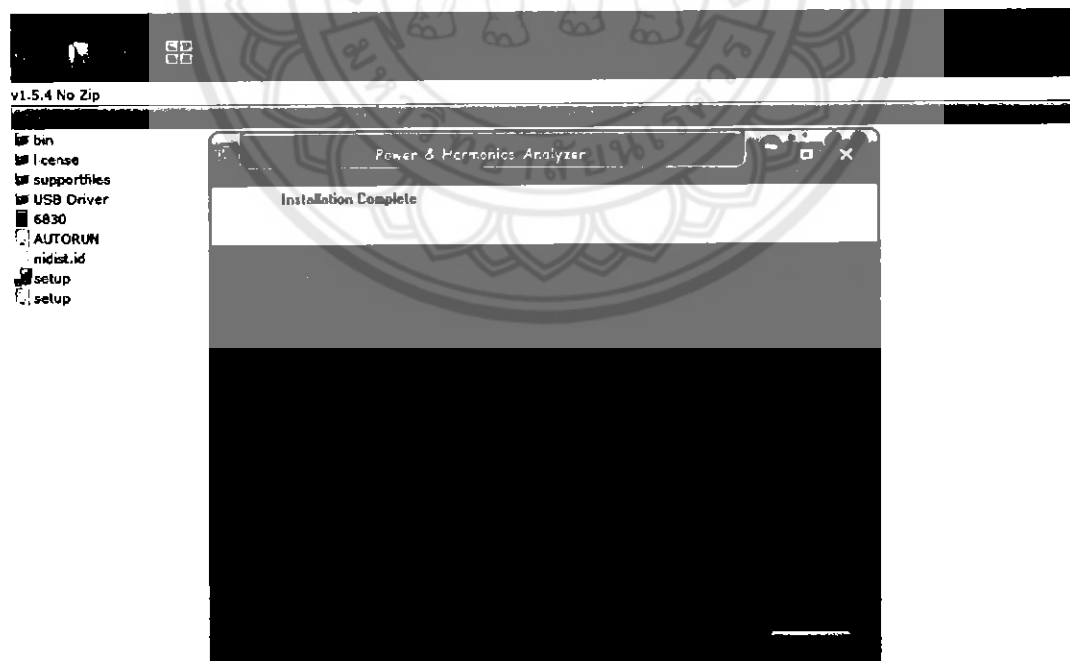
3. คลิกที่ next



4. คลิกที่ I accept the License Agreement(s), แล้วคลิก Next



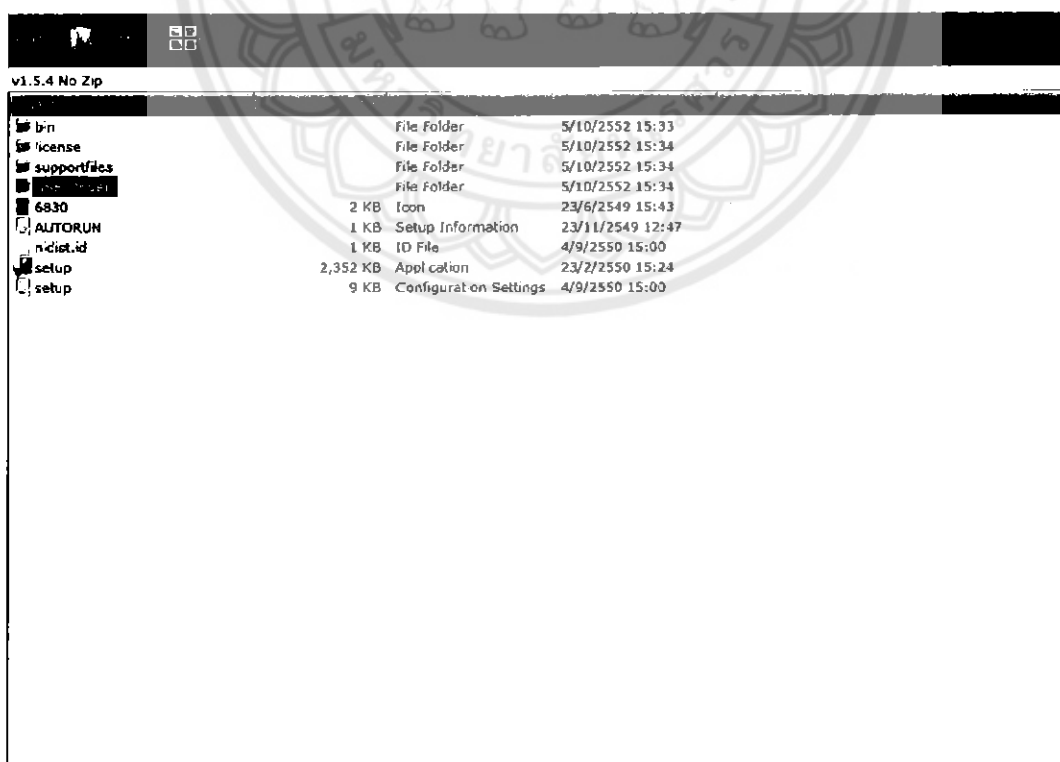
5. คลิกที่ Finish



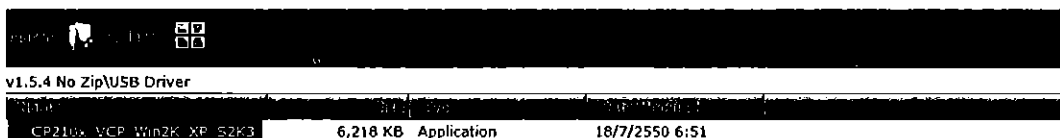
6. คลิกที่ Restart



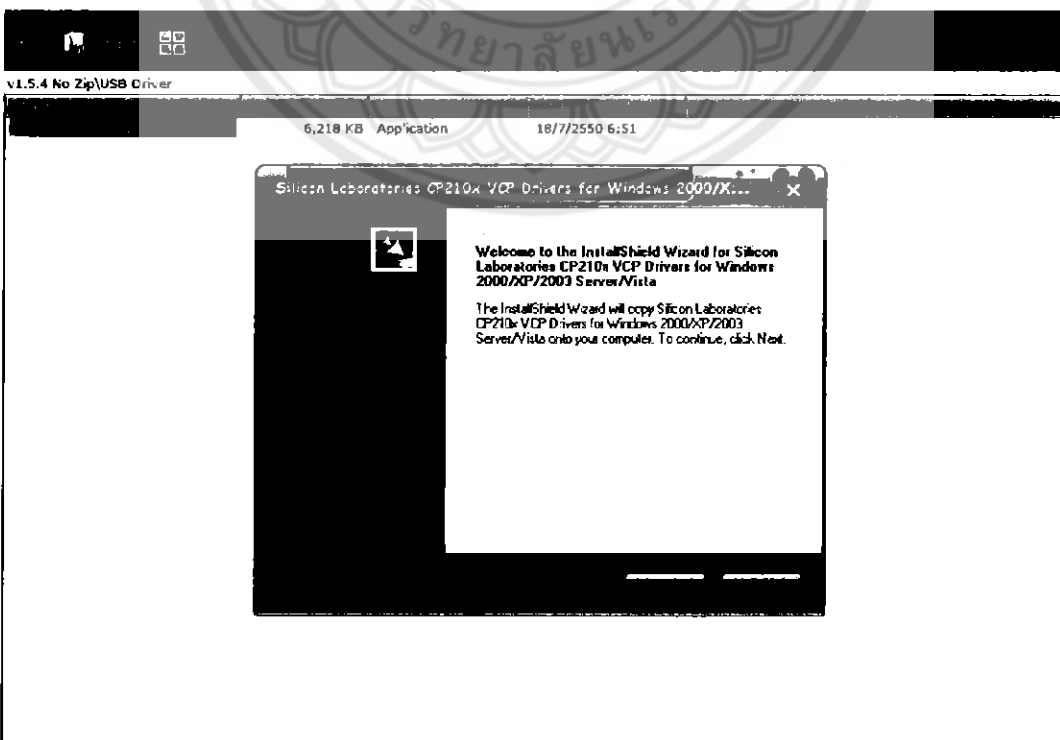
7. หลังจากทีคอมพิวเตอร์ Restart เลือก USB Driver



8. ดับเบิลคลิกที่ CP210x_VCP_Win2K_XP_S2K3.exe



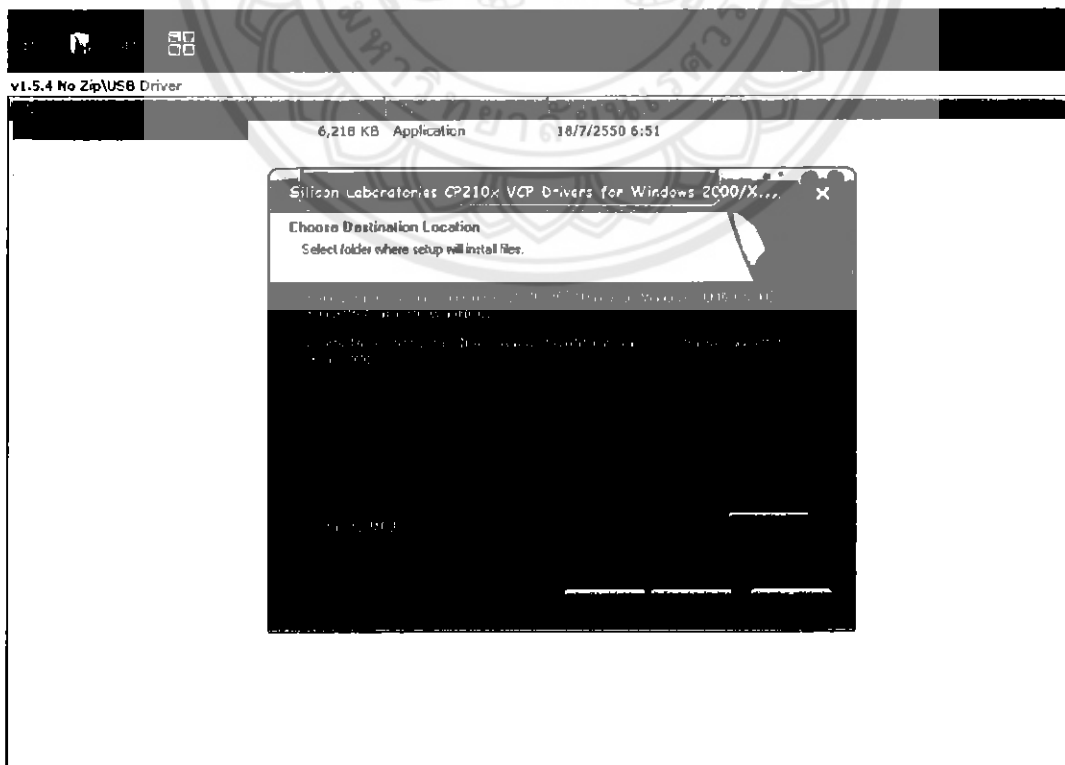
9. คลิกที่ Next



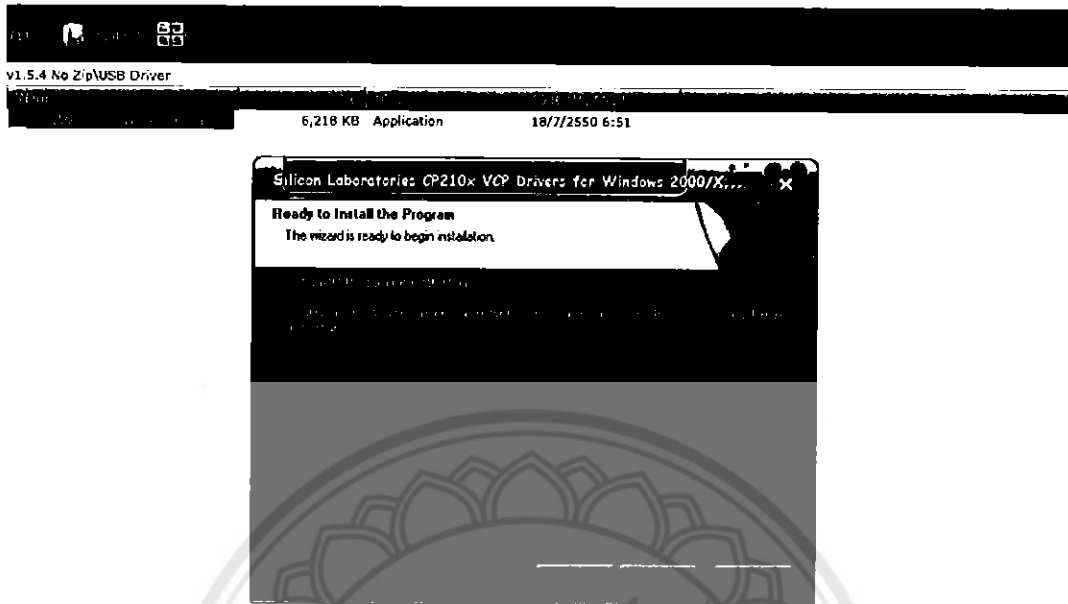
10. คลิกที่ I accept the terms of the License Agreement แล้วคลิกที่ Next



11. คลิกที่ Next



12. คลิกที่ Install



13. คลิกที่ Finish

