



แบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า 3 เฟสด้วยโปรแกรมเมทแล็บ
MODEL OF INDUCTION MOTOR 3 PHASE BY MATLAB PROGRAM

นายอักรพล แก้วมงคล รหัส 50380737

นายเกรียงศักดิ์ สุขศรี รหัส 50381871

| |
|-----------------------------------|
| ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| วันที่รับ..... 19, ส.ค. 2555 |
| เลขทะเบียน..... 15736304 |
| เลขเรียกหนังสือ..... ๔๖. |
| มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ ๒๔๗ ๖ ๒ ๒๕๕๓ |

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

ปีการศึกษา 2553

| | |
|-------------------|---|
| ชื่อหัวข้อโครงการ | แบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า 3 เฟสด้วยโปรแกรมเมทแล็บ |
| ผู้ดำเนินโครงการ | นายอัครพล แก้วมงคล รหัส 50380737 |
| | นายเกรียงศักดิ์ สุขศรี รหัส 50381871 |
| ที่ปรึกษาโครงการ | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพร เรืองสินชัยวานิช |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมไฟฟ้า |
| ภาควิชา | วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ |
| ปีการศึกษา | 2553 |

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้ได้ศึกษาทฤษฎีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เกี่ยวกับเรื่องของแรงบิด กำลังไฟฟ้าสูญเสีย และได้ศึกษาวิธีการใช้โปรแกรมเมทแล็บ เพื่อทำการสร้างแบบจำลองในโปรแกรมเมทแล็บเพื่อตรวจสอบสนองของแรงบิด และกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ได้มีการทดสอบจริงในการหาค่าพารามิเตอร์จากวงจรสมมูล เพื่อนำข้อมูลมาทำการสร้างแบบจำลอง ผลของการจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จะ ได้กราฟคุณลักษณะที่มีความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบ กราฟเส้น โคง์ของกำลังไฟฟ้าที่มีความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความเร็วรอบ โดยที่กราฟมีความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณจริงน้อยมาก

Project title Model of Induction Motor 3 Phase by MATLAB Program
Name Mr. Akarapol Kaewmongkol ID. 50380737
Mr. Kriangsak Sooksri ID. 50381871
Project advisor Assistant Professor Somporn Ruangsinchaiwanich, Ph.D.
Major Electrical Engineering
Department Electrical and Computer Engineering
Academic year 2010

Abstract

This dissertation has studied the theory of three-phase induction motor on the subject of torque. Power loss and learn how to use a MATLAB program. To perform modeling in a MATLAB program to see the response of torque and power of the induction motor. The real test for finding the parameters of equivalent circuit. The data for modeling. Simulation results on a 3-phase induction motor with the relationship between torque and speed. Graph, the curve of the power relationship between power and speed. The graph has very few deviations from the calculations actually.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาเป็นอย่างยิ่งจาก ดร.สมพร เรืองสินชัยวานิช ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ และให้ความกรุณาในการตรวจทานปริญญานิพนธ์ คณะผู้ดำเนินโครงการขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงและขอระลึกถึงความกรุณาของท่านไว้ตลอดไป

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ ดร.อัศวพันธ์ วงศ์กังแห และ ดร.มุกิตา สงฆ์จันทร์ ที่ได้สละเวลารับเป็นกรรมการสอบปริญญานิพนธ์ และให้คำชี้แนะเพิ่มเติมอันเป็นประโยชน์ในการแก้ไขปรับปรุงปริญญานิพนธ์นี้จนเสร็จสมบูรณ์

นอกจากนี้ยังต้องขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ที่ให้อุปกรณ์และเครื่องมือวัดมาใช้งาน จนทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้

เหนือสิ่งอื่นใด คณะผู้ดำเนินโครงการขอขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ ผู้มอบความรัก ความเมตตา สติปัญญา รวมทั้งเป็นผู้ให้ทุกสิ่งทุกอย่างตั้งแต่วัยเยาว์จนถึงปัจจุบัน คอยเป็นกำลังใจทำให้ได้รับความสำเร็จอย่างทุกวันนี้ และขอขอบคุณทุก ๆ คนในครอบครัวของคณะผู้ดำเนินโครงการที่ไม่ได้กล่าวไว้ ณ ที่นี้ด้วย

หากปริญญานิพนธ์เล่มนี้จะก่อให้เกิดคุณประโยชน์อยู่บ้าง คุณงามความดีทั้งหมด คณะผู้จัดทำขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่านที่กล่าวมาข้างต้น แต่หากมีข้อบกพร่องประการใด คณะผู้จัดทำขออภัยไว้แต่เพียงผู้เดียว

นายอัศวพล แก้วมงคล

นายเกรียงศักดิ์ สุขศรี

สารบัญ

หน้า

| | |
|--|----|
| ใบรับรองปริญญาโท..... | ก |
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ข |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | ค |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ง |
| สารบัญ..... | จ |
| สารบัญตาราง..... | ช |
| สารบัญรูป..... | ฉ |
| | |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญของ โครงการงาน..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของ โครงการงาน..... | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของ โครงการงาน..... | 2 |
| 1.4 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน..... | 3 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการงาน..... | 4 |
| 1.6 งบประมาณ..... | 4 |
| | |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง..... | 5 |
| 2.1 ความนำ..... | 5 |
| 2.2 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ..... | 5 |
| 2.2.1 สเตเตอร์ (Stator)..... | 5 |
| 2.2.2 โรเตอร์ (Rotor)..... | 6 |
| 2.3 การเกิดสนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์เหนี่ยวนำ..... | 7 |
| 2.4 สลิป..... | 9 |
| 2.5 ความถี่ของสนามไฟฟ้าที่ตัวหมุน..... | 10 |
| 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและตัวประกอบกำลังตัวหมุน..... | 10 |
| 2.7 แรงบิดเริ่มหมุน..... | 13 |

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

| | |
|--|----|
| 2.8 ผลของการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายเข้าให้กับมอเตอร์..... | 14 |
| 2.9 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในโรเตอร์และค่ารีแอกแตนซ์ภายใต้สภาวะกำลังหมุน..... | 15 |
| 2.10 แรงบิดสูงสุดภายใต้สภาวะที่มอเตอร์กำลังหมุน..... | 16 |
| 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างสลิปและแรงบิด..... | 18 |
| 2.12 เอาท์พุทของตัวหมุน..... | 20 |
| 2.13 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ..... | 21 |
| 2.14 แบบจำลองวงจรของเครื่องจักรกล 3 เฟส..... | 23 |
| 2.15 สมการจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำ..... | 25 |
| 2.16 แบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าใน QD0..... | 27 |
| 2.17 แบบจำลอง QD0 ในแกนอ้างอิงคงที่..... | 30 |
| 2.18 แบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะคงตัว..... | 32 |
| 2.19 แบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำสภาวะคงตัวที่แหล่งจ่ายแรงดันคงที่..... | 36 |
| | |
| บทที่ 3 การออกแบบการทดลอง..... | 38 |
| 3.1 การใช้เมทเด็ป..... | 38 |
| 3.2 วิธีการสร้างแบบจำลองโดยเมทเด็ป..... | 39 |
| 3.2.1 แผนภาพทั้งหมดของแบบจำลอง S1..... | 39 |
| 3.2.2 การสร้างแผนภาพกล่องโรเตอร์..... | 43 |
| 3.2.3 การสร้างแผนภาพ abc2qds และ qds2abc..... | 43 |
| 3.3 วิธีการทดลอง..... | 46 |
| 3.4 ผลการทดลอง..... | 47 |
| | |
| บทที่ 4 ผลการทดลอง..... | 53 |
| 4.1 การหาพารามิเตอร์วงจรสมมูลภายใน..... | 53 |
| 4.1.1 การทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานของชุดขดลวดสเตเตอร์..... | 53 |
| 4.1.2 การทดสอบโดยการยึดโรเตอร์..... | 54 |

สารบัญ(ต่อ)

| | หน้า |
|---|-----------|
| 4.1.3 การทดสอบในสภาวะไม่มีโหลด..... | 55 |
| 4.2 อุปกรณ์ในการทดสอบ..... | 59 |
| 4.3 วิธีการทดสอบ..... | 62 |
| 4.4 ผลการทดสอบ..... | 63 |
| บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ..... | 67 |
| 5.1 สรุปผลการดำเนินโครงการ..... | 67 |
| 5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข..... | 68 |
| 5.3 แนวทางการพัฒนาต่อไป..... | 68 |
| เอกสารอ้างอิง..... | 69 |
| ภาคผนวก ก การคำนวณโหลดข้อมูลจากเครื่องวัดและวิเคราะห์สารรมอนิก..... | 70 |
| ภาคผนวก ข คำสั่ง โปรแกรมเมทเล็ป..... | 74 |
| ประวัติผู้ดำเนิน โครงการ..... | 83 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.1 แสดงการแจกแจงสะสมของ X_{eq} | 56 |
| 4.2 ค่าแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์เทียบกับ โหลด..... | 63 |
| 4.3 ค่ากระแสไฟฟ้าของมอเตอร์เทียบกับ โหลด..... | 64 |
| 4.4 ค่ากำลังไฟฟ้าของมอเตอร์เทียบ โหลด..... | 65 |
| 4.5 แสดงค่าแรงบิดและความเร็วรอบ..... | 66 |



สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|--------|---|
| 2.1 | โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ชนิดควอดโรเตอร์.....6 |
| 2.2 | โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด โรเตอร์ แบบกรงกระรอก.....7 |
| 2.3 | สัญญาณรูปคลื่น ไซน์ของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....8 |
| 2.4 | การเกิดสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ 3 เฟส 2 ขั้ว.....8 |
| 2.5 | คลื่นแรงบิดเมื่อ โรเตอร์ไม่เป็นการเหนี่ยวนำ..... 11 |
| 2.6 | คลื่นแรงบิดเมื่อ โรเตอร์เป็นตัวเหนี่ยวนำ.....12 |
| 2.7 | ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและสลิป.....19 |
| 2.8 | วงจรมุมลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....21 |
| 2.9 | วงจรมุมลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....21 |
| 2.10 | วงจรมุมล โดยประมาณของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....22 |
| 2.11 | แบบจำลองของมอเตอร์ 3 เฟส.....23 |
| 2.12 | แกนอ้างอิง $qd0$ ของมอเตอร์ 3 เฟส.....25 |
| 2.13 | วงจรมุมล โดยพิจารณาตามแกนอ้างอิงของมอเตอร์ 3 เฟส.....31 |
| 2.14 | วงจรถ่ายเท่าวจรมุมลของมอเตอร์ 3 เฟส.....35 |
| 2.15 | วงจรถ่ายเท่าวจรมุมลของมอเตอร์ 3 เฟสสถานะสมดุล.....35 |
| 2.16 | วงจรมุมลเทวินิน.....36 |
| 3.1 | หน้าต่างเริ่มต้น โปรแกรมเมทแล็บ.....38 |
| 3.2 | หน้าต่าง Simulink library browser.....38 |
| 3.3 | หน้าต่างสำหรับออกแบบ.....39 |
| 3.4 | แผนภาพทั้งหมดของแบบจำลอง S1.....40 |
| 3.5 | แผนภาพในกล่อง Q-axis.....42 |
| 3.6 | แผนภาพในกล่อง D-axis.....42 |
| 3.7 | แผนภาพในกล่อง Zero_seq.....43 |
| 3.8 | แผนภาพในกล่อง Rotor.....43 |
| 3.9 | แผนภาพในกล่อง abc2qds.....44 |
| 3.10 | แผนภาพในกล่อง qds2abc.....45 |
| 3.11 | หน้าต่างการเริ่มจำลอง โปรแกรม.....46 |

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 3.12 สัญลักษณ์ Scope เพื่อคู่มือตอบสนองของการจำลองโปรแกรม..... | 47 |
| 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบที่โรเตอร์..... | 48 |
| 3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบที่โรเตอร์ขณะ โหลดเต็มพิกัด..... | 48 |
| 3.15 ผลการจำลองความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับเวลาจากโปรแกรมเมทแเล็ป..... | 49 |
| 3.16 ผลตอบสนองกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ..... | 51 |
| 3.17 กราฟผลตอบสนองกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำจากแบบจำลอง..... | 51 |
| 3.18 กราฟผลตอบสนองกำลังไฟฟ้าด้านออกของมอเตอร์เหนี่ยวนำ..... | 52 |
| 3.19 กราฟผลตอบสนองกำลังไฟฟ้าเหนี่ยวนำของมอเตอร์เหนี่ยวนำ..... | 52 |
| 4.1 วงจรทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานของชุดขดลวดสเตเตอร์..... | 53 |
| 4.2 วงจรทดสอบโดยการยึด โรเตอร์..... | 54 |
| 4.3 วงจรทดสอบในสถานะ ไม่มีโหลด..... | 55 |
| 4.4 วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ทดสอบ..... | 58 |
| 4.5 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส..... | 59 |
| 4.6 เครื่องอิเล็กทรอนิกส์ โทร โคนา โมมิเตอร์..... | 59 |
| 4.7 สายพาน..... | 59 |
| 4.8 แหล่งจ่ายไฟฟ้า..... | 60 |
| 4.9 เครื่องวัดและวิเคราะห์ฮาร์โมนิก..... | 60 |
| 4.10 แคลมป์วัดกระแสไฟฟ้า..... | 61 |
| 4.11 สายวัดแรงดัน..... | 61 |
| 4.12 สายต่อมอเตอร์และเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ โทร โคนา โมมิเตอร์..... | 61 |
| 4.13 การต่อมอเตอร์และเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ โทร โคนา โมมิเตอร์..... | 62 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบันพบว่าทั่วโลกมีโรงงานอุตสาหกรรมเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ประเทศไทยก็เริ่มก้าวเข้าสู่ประเทศอุตสาหกรรมด้วย เป็นที่แน่นอนว่า โรงงานอุตสาหกรรมนั้นต้องมีกระบวนการผลิตที่รวดเร็ว จึงจำเป็นต้องมีเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ใช้ในการเปลี่ยนรูปแบบพลังงานเพื่อใช้ในกระบวนการการผลิตต่างๆ และเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในโรงงานอุตสาหกรรม ในยุคปัจจุบันมีความก้าวหน้าและรวดเร็วในการศึกษาต่างๆ ได้มีโปรแกรมช่วยเหลือในการเรียน และการทดลองมากมายเกี่ยวกับมอเตอร์ เพื่อสร้างความเข้าใจและความรวดเร็วในการศึกษา ในการจะศึกษาและทำการทดลองนั้นต้องมีความรวดเร็วและถูกต้อง เพื่อนำข้อมูลจากการทดลองนั้นทำการวิเคราะห์อย่างแม่นยำ โปรแกรม ในการศึกษานั้นมีโปรแกรมมากมายที่เป็นตัวช่วยให้นิสิตนักศึกษา มีความเข้าใจที่ถูกต้อง และทำการเปรียบเทียบได้อย่างชัดเจน โปรแกรมแมทแล็บเป็นอีกโปรแกรมหนึ่งที่สามารถใช้สร้างแบบจำลอง และทำการคำนวณสมการในการเรียนในรายวิชาต่าง ๆ ได้ ในโครงการนี้ผู้จัดทำได้ใช้โปรแกรมแมทแล็บในการสร้างแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เพื่อหาผลตอบสนองต่างๆ จากมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องด้วยมีข้อดีหลายประการ อาทิ ความเร็วเกือบคงที่ ขั้นตอนในการใช้งานไม่ยุ่งยาก เพียงจ่ายกระแสไฟฟ้า 3 เฟส ก็สามารถใช้ได้แล้ว และยังมีโครงสร้างที่แข็งแรง ราคาถูก ดังนั้นการเลือกศึกษามอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสนั้น จึงเป็นเรื่องจำเป็นที่ต้องทำการทดลองและหาข้อมูลเกี่ยวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสให้มากที่สุด เพื่อให้มีความเข้าใจมากยิ่งขึ้น

ปัจจุบันการใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำยังเป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย ดังกล่าวมาข้างต้น ดังนั้นในการวิจัย ออกแบบและพัฒนามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้ใช้งานให้ดีและมีประสิทธิภาพสูงในการทำงาน รวมไปถึงการประหยัดพลังงาน เป็นที่สนใจอย่างมากในวงการอุตสาหกรรม ซึ่งในการวิจัยการพัฒนานั้นจำเป็นต้องศึกษาองค์ประกอบหลายอย่างของมอเตอร์ เช่น แรงบิดสูงสุด แรงบิดสูญเสีย ระบบกำลังไฟฟ้า ระบบฉนวนที่นำมาใช้และค่าความสูญเสียในระบบต่างของมอเตอร์ เป็นต้น

สำหรับโครงการนี้เป็นการสร้างแบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ด้วยโปรแกรมเมทแล็บเพื่อคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น แรงบิด กระแสไฟฟ้า หรือ กำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะทำงานทั้งแบบไร้ภาระทางกล และขับภาระทางกล พร้อมทั้งทำการเปรียบเทียบค่าแรงบิดและกำลังไฟฟ้า ที่ได้จากการทดสอบจริง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อนำความรู้จากการศึกษาข้อมูล สร้างแบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในโปรแกรมเมทแล็บ ที่สามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ และทดสอบจริง เกี่ยวกับแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เพื่อนำข้อมูลจากการทดสอบมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองในโปรแกรมเมทแล็บ

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. เปรียบเทียบค่าแรงบิดและค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้ระหว่างการทดสอบจริงกับค่าที่ได้จากแบบจำลองในโปรแกรมเมทแล็บ
2. สรุปข้อมูลในส่วนต่าง เพื่อประยุกต์ใช้งานต่อไป

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

สร้างแบบจำลองในการหาค่าแรงบิดและค่ากำลังไฟฟ้าจากโปรแกรมแมทแล็บ ที่มีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบจริง เพื่อนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบหาค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างการทดสอบจริงกับทดสอบในแบบจำลอง

1.6 งบประมาณ

| | |
|-------------------------------------|------------------|
| 1) ค่าเอกสารประกอบการทำโครงการ | 400 บาท |
| 2) ค่าเอกสาร | 400 บาท |
| 3) ค่าอุปกรณ์และค่าใช้จ่ายอื่นๆ | 400 บาท |
| 4) ค่าเช่าเล่มปริญญานิพนธ์ | 800 บาท |
| รวมเป็นเงินทั้งสิ้น (สองพันบาทถ้วน) | <u>2,000 บาท</u> |

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความนำ

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เป็นมอเตอร์ที่นิยมใช้กันทั่วไป โดยมีข้อดี หลายประการ เช่น ทนทาน ราคาถูก มีประสิทธิภาพสูง การควบคุมขณะเริ่มหมุนได้ง่าย อย่างไรก็ตามมอเตอร์ดังกล่าวมีข้อเสียอยู่บ้าง เช่น การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ทำได้ยากเนื่องจากความเร็วรอบจะแปรผันตรงกับภาระทางกล แรงบิดเริ่มหมุนค่อนข้างต่ำ ในปัจจุบัน ได้มีการพัฒนามอเตอร์เหนี่ยวนำให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และพัฒนาอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (อาทิ เช่น อินเวอร์เตอร์) จนเป็นที่ยอมรับ และถูกนำมาใช้ในกระบวนการต่างๆ ในโรงงานอุตสาหกรรมมากยิ่งขึ้น

2.2 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนสำคัญ ดังต่อไปนี้

2.2.1 สเตเตอร์ (Stator)

สเตเตอร์ ถือได้ว่าเป็นส่วนที่อยู่กับที่ โดยมากทำจากแผ่นเหล็กบางๆ อัดซ้อนกันพร้อมกัน ทำช่องสล็อตไว้บรรจุขดลวดตัวนำ ทั้งนี้สามารถแสดงความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของมอเตอร์ จะแปรผันตรงกับความถี่ไฟฟ้าของแหล่งจ่ายและแปรผกผันกับจำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์ ขณะทำการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับขดลวดตัวนำ (ส่วนที่อยู่กับที่) ส่งผลทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุน ที่มีความเร็วค่าหนึ่ง โดยถูกเรียกว่าความเร็วซิงโครนัส สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ ดังนี้

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

N_s คือ ความเร็วซิงโครนัส

f คือ ความถี่หลักมูลของไฟฟ้ากระแสสลับ

P คือ จำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์

2.2.2 โรเตอร์ (Rotor)

โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ แบ่งออกได้ 2 ชนิด คือ

(1) วาวด์โรเตอร์ (Wound rotor or phase wound rotor) มอเตอร์ที่ใช้โรเตอร์ ชนิดนี้เรียกว่า มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ โรเตอร์พันขดลวด (Wound rotor) โรเตอร์ชนิดนี้จะพบมากในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส และมีการพันแบบขดลวดสองชั้นเหมือนกับขดลวดที่ใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ในโรเตอร์ชนิดนี้ภายในจะต่อแบบสตาร์ และมีปลายสายออกมา 3 ปลายต่อเข้ากับสลิปริงที่ติดกับเพลลาของ โรเตอร์นั้น และโรเตอร์แบบโรเตอร์พันขดลวดสามารถที่จะนำความต้านทานที่ต่อแบบสตาร์ต่อเข้ากับสลิปริงของ โรเตอร์ เพื่อช่วยในการเริ่มหมุนของมอเตอร์ เป็นการเพิ่มแรงบิดขณะเริ่มหมุนของมอเตอร์นั้น ความต้านทานที่นำมาต่อเข้าไปนี้มีลักษณะการต่อดังแสดงในรูปที่ 2.1 แต่เมื่อมอเตอร์เริ่มหมุนไปแล้ว และหมุนด้วยความเร็วปกติ แล้วสลิปริงจะถูกตัดวงจร กลายสภาพเป็น โรเตอร์แบบกรงกระรอก

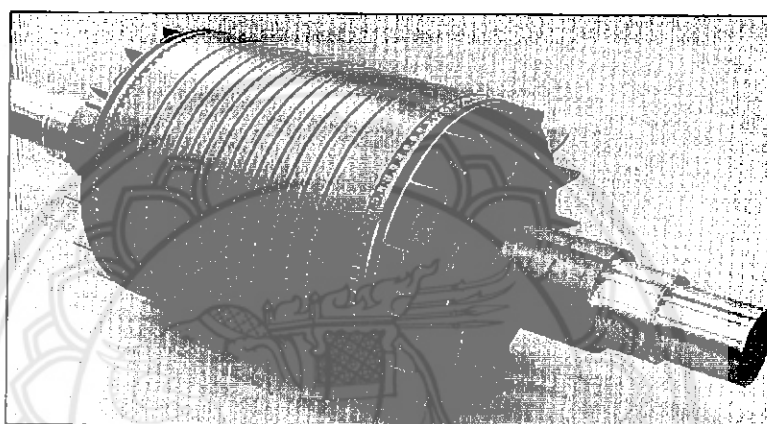


รูปที่ 2.1 โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ชนิดวาวด์โรเตอร์

(2) โรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel cage rotor) มอเตอร์ที่ใช้โรเตอร์ชนิดนี้เรียกว่า มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก โดยประมาณ 90% ของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะใช้โรเตอร์เป็นแบบกรงกระรอก ทั้งนี้เป็นเพราะว่าโรเตอร์ชนิดนี้เป็นชนิดที่ทำได้ง่ายและทนทานที่สุด โรเตอร์ชนิดนี้ประกอบด้วยแผ่นเหล็กบางๆ อัดซ้อนกันเป็นรูปทรงกระบอก และถูกทำให้เป็นช่องสล็อตให้ขนานกัน สำหรับใส่ตัวนำของ โรเตอร์ (Rotor conductor) ลงในช่องสล็อตนั้น โดยมากใช้การฉีดยางแดง

หรืออลูมิเนียม หรืออัลลอย (Copper bar or Aluminum bar or Alloy) เข้าไปในสลีต และที่ปลายสุดของแท่งตัวนำทั้งสองด้านนั้นในแต่ละด้านจะถูกต่อลวดวงจรเข้าด้วยกันอย่างถาวร ดังนั้นจึงไม่สามารถที่จะนำความต้านทานภายนอกมาต่ออนุกรมเข้ากับวงจรโรเตอร์เพื่อช่วยในการเริ่มหมุนได้

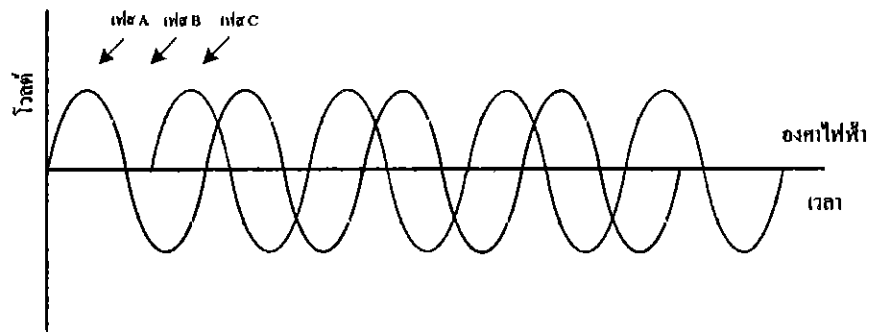
ส่วนแบบอื่นๆของโรเตอร์ที่มีลักษณะคล้ายกันกับโรเตอร์แบบกรงกระรอกนั้นประกอบด้วยไซลินดรีนเซอร์ (Solid cylinder) ของแท่งเหล็ก (Steel) ซึ่งปราศจากสลีตสำหรับบรรจุตัวนำทั้งหมด มอเตอร์จะหมุนได้ขึ้นอยู่กับผลของการเกิดกระแสไหลวนในเหล็กของโรเตอร์



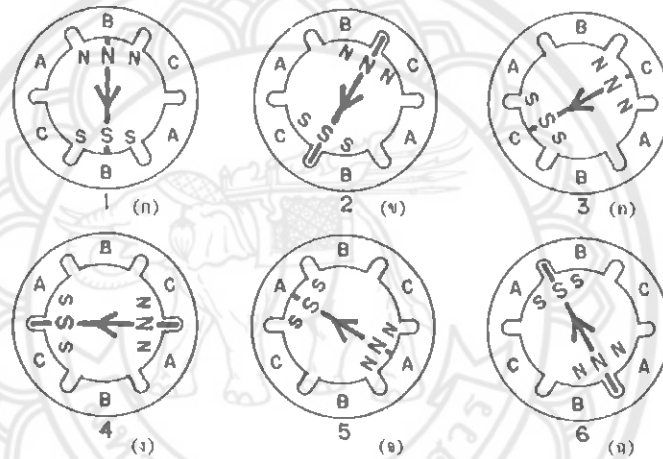
รูปที่ 2.2 โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดโรเตอร์ แบบกรงกระรอก

2.3 การเกิดสนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าระบบ 3 เฟส ให้กับขดลวดตัวนำของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์ โดยจะหมุนตัดกับตัวนำโรเตอร์ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำฝังอยู่ในโรเตอร์และเกิดสนามแม่เหล็กในโรเตอร์ เมื่อขดลวดตัวนำได้รับแรงดันจากรูปคลื่นสูงสุดทั้งบวกและลบ สนามแม่เหล็กจะตั้งฉากกับขั้วแม่เหล็กนั้นๆ และทางตรงกันข้ามถ้าหากไม่ได้รับแรงดันสนามแม่เหล็กจะชี้ขนานไปกับขั้วแม่เหล็กนั้นๆ เมื่อสนามแม่เหล็กหมุนเกิดจากความสัมพันธ์ของกระแสไหลเข้าและไหลออกของขดลวดแต่ละขดสัมพันธ์ ก่อให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กที่ขั้วล่อระหว่างขั้วและเกิดการหมุนของสนามแม่เหล็กต่อเนื่องกันไป ในขณะเดียวกันสนามแม่เหล็กก็จะเหนี่ยวนำให้โรเตอร์หมุนตามไปด้วย พิจารณารูปที่ 2.3 และรูปที่ 2.4 เป็นการแสดงถึงการเกิดสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์



รูปที่ 2.3 สัญญาณรูปคลื่นไซน์ของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส



รูปที่ 2.4 การเกิดสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ 3 เฟส 2 ขั้ว

จากรูปที่ 2.3 และรูปที่ 2.4 แสดงถึงการเกิดสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ 3 เฟส 2 ขั้ว ที่สามารถพิจารณาที่ละขั้นได้คือ

ที่จุดที่ 1 บนรูปไซน์คลื่น จะเห็นได้ว่าเฟส B อยู่ที่ตำแหน่งความเข้มสูงสุดของขั้วเหนือ เฟส A ก็เป็นขั้วเหนือ แต่ลดลงจากจุดสูงสุดและเฟส C เป็นขั้วเหนือและกำลังเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ก) ของสเตเตอร์คือเฟส B เป็นขั้วเหนือมาก เฟส A และเฟส C เป็นขั้วเหนือน้อย

ที่จุดที่ 2 บนรูปคลื่นไซน์ เฟส A เป็น 0 (Zero) เฟส B เป็นขั้วเหนือแต่กำลังลดลง ส่วนเฟส C เป็นขั้วเหนือแต่กำลังเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ข) ของสเตเตอร์ เฟส A เป็น 0 เฟส B และเฟส C เป็นขั้วเหนือและมีความเข้มเท่ากัน ซึ่งจะเกิดขึ้นระหว่าง 2 เฟส คือ เฟส B กับเฟส C ดังนั้นจาก

จุดที่ 1 ไปจุดที่ 2 ขั้วเหนือจะเคลื่อนที่ไป 30 องศาไฟฟ้า ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา (30 Electrical degree clockwise)

ที่จุดที่ 3 บนรูปคลื่นไซน์ เฟส C จะมีความเข้มสูงสุดของขั้วเหนือ เฟส B ลดลงจากสูงสุด และเฟส A เพิ่มขึ้น แต่เฟส A เป็นขั้วได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ค) ของสเตเตอร์เฟส C จะเป็นขั้วเหนือและมีความเข้มมาก ส่วนเฟส B มีความเข้มของขั้วเหนือ น้อย และเฟส A เป็นขั้วได้น้อย ดังนั้นจากจุดที่ 2 ไปจุดที่ 3 ขั้วเหนือจะเคลื่อนที่ไป 30 องศาไฟฟ้า ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

บนรูปคลื่นไซน์ที่จุดต่างๆในไซเคิลก็จะเกิดหมุนเวียนกันไปเช่นเดียวกับที่กล่าวมาแล้ว ตัวอย่างเช่น ที่จุดที่ 6 ในรูปที่ 2.3 บนรูปคลื่นไซน์ เฟส A และ เฟส B จะเป็นขั้วได้ ส่วนเฟส C จะเป็น 0 ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ง) ของสเตเตอร์ขั้วเหนือจะเคลื่อนที่ไป 150 องศาไฟฟ้าในทิศทางตามเข็มนาฬิกาจากจุดที่ 1 เป็นอันว่าครบไซเคิลของขั้วเหนือ หรือหมุนครบ 1 รอบ 360 องศา

2.4 สลิป (Slip, S)

สลิป (Slip) คือ ความแตกต่างระหว่างความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนที่ความเร็วซิงโครนัส (N_s) และความเร็วรอบของตัวหมุนขณะใช้งาน (Actual speed, N_r) โดยปกติความเร็วของตัวหมุนจะช้ากว่าความเร็วของสนามแม่เหล็กที่หมุนที่สเตเตอร์ ความแตกต่างของความเร็วนี้จะขึ้นอยู่กับภาระที่ต่ออยู่กับมอเตอร์ ค่าสลิปนี้คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ สามารถหาได้จากสมการดังนี้

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

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

แต่ในบางครั้ง $N_s - N_r$ เรียกว่า ความเร็วสลิป (Slip speed)

จะเห็นได้ว่าความเร็วของโรเตอร์ (มอเตอร์) คือ $N = N_s(1-S)$

2.5 ความถี่ของสนามไฟฟ้าที่ตัวหมุน

ความถี่ของสนามไฟฟ้าที่ตัวหมุนจะมีค่าเท่ากับความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่จ่ายให้กับตัวที่อยู่กับที่ ในขณะที่ตัวหมุนยังไม่หมุน แต่เมื่อตัวหมุนเริ่มหมุนความถี่ของตัวหมุนจะขึ้นอยู่กับความเร็วสัมพัทธ์ (Relative speed) หรือ ความเร็วสลลิป ถ้ากำหนดความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ตัวหมุนที่ความเร็วสลลิปใด ๆ สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$N_s - N_r = \frac{120f'}{P} \quad (2.4)$$

เมื่อ $N_s = \frac{120f}{P}$ (2.5)

เมื่อนำสองสมการมาหารกันจะได้

$$(N_s - N_r) / N_s = S \quad (2.6)$$

$$= \left(\frac{120f'}{P} \times \left(\frac{P}{120f} \right) \right) \quad (2.7)$$

ดังนั้น

$$S = \frac{f'}{f}$$

ความถี่กระแสของตัวหมุนมี $f' = Sf$ (2.8)

2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและตัวประกอบกำลังตัวหมุน

แรงบิดที่โรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (T_r) เกิดขึ้นจากกระแสไหลในขดลวดสเตเตอร์และเส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้ว $T_r \approx \Phi I_a$ ส่วนแรงบิดในมอเตอร์เหนี่ยวนำจะเกิดจากผลคูณของเส้นแรงแม่เหล็กที่สเตเตอร์ที่ต่อขั้ว กระแสไฟฟ้าที่โรเตอร์และตัวประกอบกำลังของโรเตอร์ ดังนั้นจะได้

$$T \approx I_2 \Phi \cos \Phi_2$$

หรือ
$$T \approx K\Phi I_2 \cos\Phi_2 \quad (2.9)$$

โดยที่ I_2 = กระแสไฟฟ้าที่โรเตอร์ในตำแหน่งพร้อมหมุน

Φ_2 = มุมระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์กับกระแสไฟฟ้าที่ โรเตอร์

K = ค่าคงที่

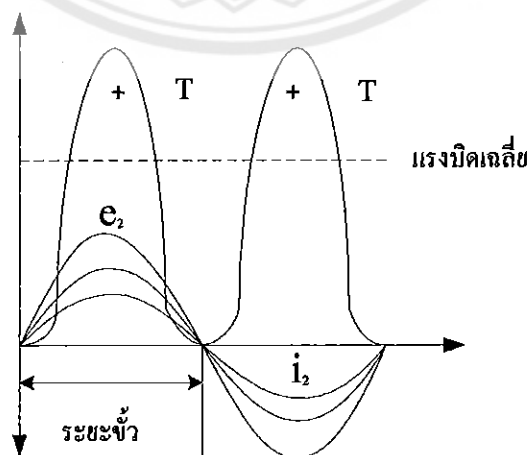
แทนค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์ที่ตำแหน่งพร้อมหมุนด้วย E_2 จะได้

$$E_2 \approx \Phi$$

$$T \approx E_2 I_2 \cos\Phi_2$$

หรือ
$$T = KE_2 I_2 \cos\Phi_2 \quad (2.10)$$

ผลของตัวประกอบกำลังที่โรเตอร์และแรงบิดที่โรเตอร์ แสดงดังรูปที่ 2.5 จากสมการที่ (2.10) พบว่าแรงบิดขึ้นอยู่กับ $\cos\Phi_2$ เมื่อ Φ_2 เพิ่มขึ้น $\cos\Phi_2$ จะมีค่าลดลง แรงบิดก็จะมีค่าลดลง เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กที่หมุนที่สเตเตอร์เป็นคลื่นไซน์เกิดการเหนี่ยวนำกับตัวนำของตัวหมุนค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ตัดกับตัวนำ ($e = Blv$ โวลต์) ดังนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น โรเตอร์จึงเป็นคลื่นไซน์ ด้วยการพิจารณาตัวหมุนในภาวะต่างๆ พิจารณาดังนี้



รูปที่ 2.5 คลื่นแรงบิดเมื่อ โรเตอร์ไม่เป็นการเหนี่ยวนำ

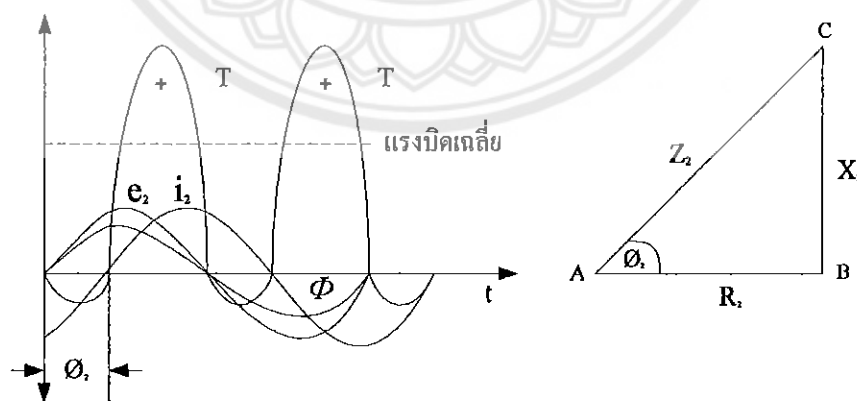
(1) ถ้าโรเตอร์เป็นภาระแบบความต้านทาน (Resistive load) ($\phi_2 = 0$) กรณีนี้กระแสไฟฟ้าที่โรเตอร์ (I_2) จะเกิดพร้อมกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นใน โรเตอร์ (E_2) แสดงดังรูปที่ 2.3 ค่าแรงบิดชั่วขณะ ที่ตัวนำเพียงตัวเดียวใน โรเตอร์ กำหนดโดยค่าชั่วขณะใดขณะหนึ่งของเส้นแรงและกระแสไฟฟ้าที่โรเตอร์ (เพราะว่า $F \approx BI_2$) ดังนั้นเส้น โค้งของแรงบิดจึงเขียนได้จากผลของเส้นแรงแม่เหล็ก Φ (หรือความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก B) และ I_2 ดังนั้นแรงบิดจะมีค่าเป็นบวก

(2) สมมติให้โรเตอร์เป็นภาระแบบเหนี่ยวนำ (Inductive load) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 เมื่อ I_2 ล้าหลัง E_2 อยู่เป็นมุม ϕ_2

$$\text{มุม} \quad \phi_2 = \tan^{-1} \frac{X_2}{R_2} \quad (2.11)$$

โดยที่ R_2 คือ ตัวต้านทานของตัวหมุนต่อเฟสในตำแหน่งพร้อมหมุน

จากรูปคลื่นในรูปที่ 2.6 พบว่าตำแหน่ง ab นั้นเป็นระยะพิตซ์ของขั้ว ซึ่งเป็นระยะที่แรงบิดมีค่าเป็นลบ ดังนั้นแรงบิดรวมมีค่าเท่ากับผลต่างของแรงบิดข้างหน้า กลับแรงบิดย้อนกลับ โดยมีค่าลดลง ถ้า $\phi_2 = 90^\circ$ แรงบิดรวมจะเป็นศูนย์ เพราะแรงบิดย้อนกลับกับแรงบิดข้างหน้ามีค่าเท่ากัน แต่มีทิศตรงกันข้าม



รูปที่ 2.6 คลื่นแรงบิดเมื่อโรเตอร์เป็นตัวเหนี่ยวนำ

2.7 แรงบิดเริ่มหมุน (Starting torque)

ขณะที่มอเตอร์เริ่มหมุนจะเกิดแรงบิดขึ้น เรียกว่า แรงบิดเริ่มหมุน บางครั้งมีค่ามากกว่าแรงบิดของมอเตอร์เมื่อหมุนปกติ และบางครั้งอาจต่ำกว่า เมื่อมอเตอร์หมุนปกติกำหนดให้

E_2 = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในโรเตอร์ต่อเฟส ตำแหน่งพร้อมหมุน

R_2 = ความต้านทานของตัวหมุนต่อเฟส

X_2 = รีแอกแตนซ์ของตัวหมุนต่อเฟส ในตำแหน่งพร้อมหมุน

Z_2 = อิมพีแดนซ์ของตัวหมุนต่อเฟส ในตำแหน่งพร้อมหมุน

$$Z_2^2 = R_2^2 + X_2^2 \quad (2.12)$$

ดังนั้น

$$I_2 = E_2 Z_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} \quad (2.13)$$

$$\cos \Phi_2 = R_2 / Z_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} \quad (2.14)$$

แรงบิดในตำแหน่งพร้อมหมุน หรือแรงบิดเริ่มหมุน

$$T_s = K_1 E_2 I_2 \cos \Phi_2 \quad (2.15)$$

ดังนั้น

$$T_s = \frac{K_1 E_2^2 R_2}{R_2^2 + X_2^2} \quad (2.16)$$

ถ้าจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้า V คงที่ ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็ก (Φ) และ E_2 จะมีค่าคงที่ด้วย

$$T_s = \frac{K_2 R_2}{R_2^2 + X_2^2} = \frac{K_1 R_2}{Z_2^2} \quad (2.17)$$

โดยที่ $K_2 =$ ค่าคงตัว

2.8 ผลของการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายเข้าให้กับมอเตอร์

การเปลี่ยนแปลงของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายเข้าให้กับมอเตอร์ จะทำให้แรงบิดเปลี่ยนแปลงไป พิจารณาจากสมการของแรงบิดคือ

$$T = \frac{K_1 E_2^2 R_2}{R_2^2 + X_2^2} \quad (2.18)$$

จากหัวข้อที่ 2.7 ทราบว่า $E_2 \approx$ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ (V)

ได้
$$T_s = \frac{K_3 V^2 R_2}{Z_2^2} \quad (2.19)$$

โดยที่ $K_3 =$ ค่าคงที่
$$T_s = V^2 \quad (2.20)$$

ดังนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้ามีผลต่อแรงบิดเริ่มหมุนและแรงบิดในสถานะที่โรเตอร์กำลังหมุน ถ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าลดลงแล้วแรงบิดก็จะลดลงด้วย เมื่อต้องการให้แรงบิดมีค่าคงที่ สลิปจะเพิ่มมากขึ้น ความเร็วจะลดลง โดยกำหนดให้

V เปลี่ยนแปลงเป็น V'

S เปลี่ยนแปลงเป็น S'

T เปลี่ยนแปลงเป็น T'

ดังนั้น
$$\frac{T}{T'} = \frac{SV^2}{S'V'^2} \quad (2.21)$$

2.9 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในโรเตอร์และค่ารีแอกแตนซ์ภายใต้สภาวะกำลังหมุน

ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่โรเตอร์จะมีค่าเท่ากับความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่จ่ายให้กับสเตเตอร์ ถ้าตัวหมุนหยุดนิ่งสลิปจะมีค่าเป็นหนึ่ง ค่าของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในโรเตอร์ในตำแหน่งพร้อมหมุนจะมีค่าสูงสุด เพราะว่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างตัวหมุนกับสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์ที่มีค่าสูงสุด วงจรสมมูลของมอเตอร์มีลักษณะเดียวกับหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส โรเตอร์ของมอเตอร์เปรียบได้กับขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงลัดวงจร เมื่อมอเตอร์หมุน ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างโรเตอร์กับสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์จะลดลง แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความเร็วสัมพัทธ์ ดังนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์จึงมีค่าลดลง (ถ้าความเร็วของโรเตอร์มีค่าเท่ากับความเร็วของสนามแม่เหล็กที่หมุนที่ สเตเตอร์จะมีค่าเท่ากับศูนย์) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะที่มีมอเตอร์อยู่ในตำแหน่งกำลังหมุน จึงมีค่าเป็น สลิปเท่าของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ในขณะที่มอเตอร์อยู่ในตำแหน่งพร้อมหมุน โดยกำหนดให้

E_2 = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ต่อเฟส ในตำแหน่งพร้อมหมุน

E_r = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ต่อเฟส ในขณะที่มอเตอร์หมุน

X_2 = รีแอกแตนซ์ของโรเตอร์ต่อเฟส ในตำแหน่งพร้อมหมุน

X_r = รีแอกแตนซ์ของโรเตอร์ต่อเฟส ภายใต้สภาวะที่มีมอเตอร์กำลังหมุน

I_2 = กระแสไฟฟ้าที่โรเตอร์ต่อเฟส ในตำแหน่งพร้อมหมุน

I_r = กระแสไฟฟ้าที่โรเตอร์ต่อเฟส ภายใต้สภาวะที่มีมอเตอร์กำลังหมุน

f_2 = ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่โรเตอร์ในตำแหน่งพร้อมหมุน

f_r = ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่โรเตอร์ภายใต้สภาวะที่มีมอเตอร์กำลังหมุน

Z_r = อิมพีแดนซ์ของโรเตอร์ต่อเฟส ขณะมอเตอร์กำลังหมุน

สภาวะที่มีมอเตอร์หมุน :

$$E_r = SE_2 \quad (2.22)$$

$$I_r = \frac{E_r}{Z_r} \quad (2.23)$$

$$X_r = SX_2 \quad (2.24)$$

$$Z_r = \sqrt{R_2^2 + (SX_2)^2} \quad (2.25)$$

$$f_r = Sf_2 \quad (2.26)$$

เมื่อความถี่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ลดลง จะทำให้รีแอกแตนซ์ของโรเตอร์ลดลง

2.10 แรงบิดสูงสุดภายใต้สภาวะที่มอเตอร์กำลังหมุน

การหาแรงบิดสูงสุดภายใต้สภาวะที่มอเตอร์กำลังหมุนพิจารณาได้จากแรงบิดมอเตอร์ในสภาวะที่มอเตอร์หมุนดังนี้

จาก
$$T = \frac{K_1 S \Phi E_2 R_2}{(R_2)^2 + (SX_2)^2} \quad (2.27)$$

ดังนั้น
$$T = \frac{K_1 S E_2^2 R_2}{(R_2)^2 + (SX_2)^2} \quad (2.28)$$

สภาวะที่เกิดแรงบิดสูงสุดอาจทำได้ โดยการอนุพันธ์สมการข้างบนนี้เทียบกับ สลิปให้มีค่าเท่ากับศูนย์ (0) โดยให้ $Y = \frac{1}{T}$ แล้วทำการอนุพันธ์

$$\begin{aligned} Y &= \frac{(R_2)^2 + (SX_2)^2}{K \Phi S E_2 R_2} \\ &= \frac{(R_2)^2}{K \Phi S E_2 R_2} + \frac{(SX_2)^2}{K \Phi S E_2 R_2} \end{aligned} \quad (2.29)$$

$$\frac{dY}{dS} = - \left[\frac{(R_2)^2}{K \Phi S E_2 R_2} \right] + \frac{(X_2)^2}{K \Phi S E_2 R_2} = 0 \quad (2.30)$$

ดังนั้น

$$\left[\frac{(R_2)^2}{K\Phi S E_2 R_2} \right] = \frac{(X_2)^2}{K\Phi S E_2 R_2} \quad (2.31)$$

$$S = S X_2 \quad (2.32)$$

แรงบิดในสภาวะตัวหมุนกำลังหมุนจะมีค่าสูงสุด เมื่อค่าของสลลิปคูณกับสลลิปที่ทำให้เกิด

แรงบิดสูงสุด คือ

$$S = \frac{R_2}{X_2} \quad (2.33)$$

แทนค่า R_2 ลงในสมการที่ (2.22) จะได้

$$\begin{aligned} T_{max} &= \frac{K\Phi S^2 E_2 X_2}{2S^2 X_2^2} \\ &= \frac{K\Phi S E_2 X_2}{2R_2^2} \end{aligned} \quad (2.34)$$

$$= \frac{K\Phi E_2}{2X_2} \quad (2.35)$$

$$T_{max} = \frac{K\Phi S E_2}{2R_2} \quad (2.36)$$

จากสมการ (2.27) จะได้

1. แรงบิดสูงสุดจะขึ้นอยู่กับความต้านทานของโรเตอร์
2. แรงบิดสูงสุดจะแปรผกผันกับแรงบิดในตำแหน่งพร้อมหมุน
3. แรงบิดสูงสุดจะแปรผันตรงกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์
4. ความเร็วหรือสลลิปที่ตำแหน่งแรงบิดสูงสุด คำนวณได้โดยค่าความต้านทานของ โรเตอร์

จากสมการพบว่าแรงบิดสูงสุดเมื่อความต้านทานของ โรเตอร์มีค่าเท่ากับรีแอกแตนซ์ของ โรเตอร์ สามารถทำได้โดยการปรับค่าความต้านทานของ โรเตอร์ (ทำได้ในกรณีที่เป็นสลลิปริงมอเตอร์ เท่านั้น)

5. แรงบิดสูงสุดขณะเริ่มหมุน ($S = 1$) เกิดเมื่อความต้านทานของโรเตอร์จะต้องเท่ากับรีแอคแตนซ์ของโรเตอร์

2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างสลลิปและแรงบิด

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและสลลิปแสดงดังรูปที่ 2.5 โดยเริ่มจาก $S = 0$ จนถึง $S = 1$ เมื่อ R_2 คือค่าคงตัวของความต้านทาน

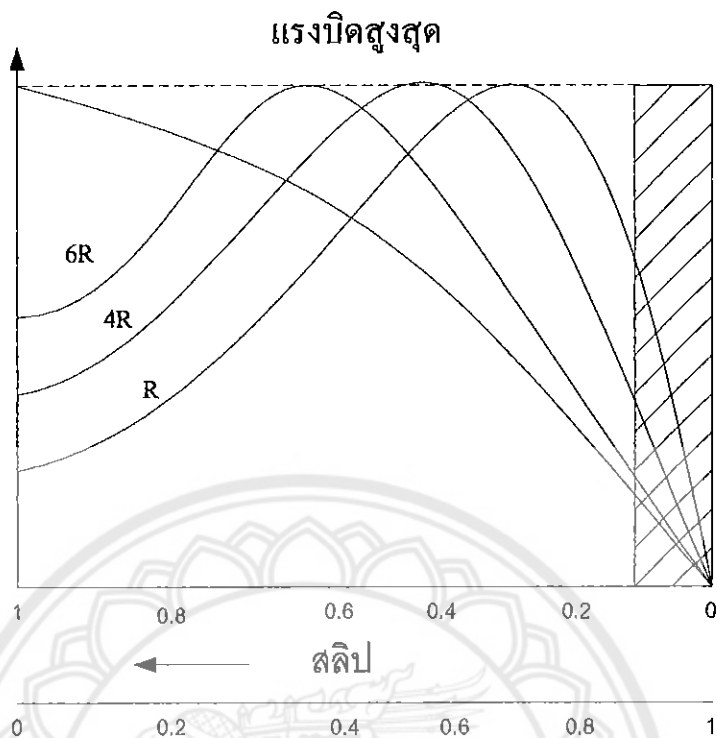
จากสมการ
$$T = \frac{K_1 S \Phi E_2 R_2}{(R_2)^2 + (S X_2)^2} \quad (2.37)$$

เมื่อ $S = 0$ และ $T = 0$ เส้นโค้งจะเริ่มที่จุด 0 ที่ความเร็วปกติ ค่าของ $S X_2$ จะมีค่าน้อยจึงไม่นำมาพิจารณา จะได้ว่า

$$T \approx \frac{S}{R_2}$$

$T \approx S$ ถ้า R_2 มีค่าคงตัว

(2.38)



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและสลิป

เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับสลิปที่ค่าต่ำ ๆ จะประมาณได้เป็นเส้นตรง ถ้าสลิปเพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มภาระให้กับมอเตอร์ แรงบิดจะเพิ่มขึ้น และจะมีค่าสูงสุด เมื่อ $s = \frac{R_2}{X_2}$ แรงบิดนี้เรียกว่า แรงบิดดึงออก หรือ แรงบิดสุดกำลัง ถ้าสลิปเพิ่มมากขึ้น ความเร็วมอเตอร์จะลดลง ด้วยการเพิ่มภาระให้กับมอเตอร์ ดังนั้น R_2 จึงไม่น่าพิจารณาเมื่อเทียบกับ sX_2 จะมีค่าบวก

$$T \approx \frac{S}{(sX_2)^2} \approx \frac{1}{S} \quad (2.39)$$

เส้นโค้งระหว่างแรงบิดกับสลิป เป็นเส้นโค้งไฮเพอร์โบลาคัดฉาก พบว่าการเพิ่มภาระให้กับมอเตอร์มากจนเลยจุดแรงบิดสูงสุด จะทำให้แรงบิดลดลง มอเตอร์หมุนช้าและจะหยุดลงในที่สุด สวิตช์ตัดตอนก็จะตัดวงจรทันที เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับมอเตอร์

2.12 เอาท์พุทของตัวหมุน

กระแสไฟฟ้าที่ขดปฐมภูมิ I_1 ประกอบด้วยกระแสไฟฟ้า 2 ส่วน คือ I_0 และ $I\cos\Phi$, โดยที่ $I\cos\Phi$ โอนย้ายมายังตัวหมุนและ E , เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ย้ายไปตัวหมุน ถ้ามุมระหว่าง E และ $I\cos\Phi$ เป็น Φ จะได้

$$\text{อินพุทของตัวหมุน/เฟส} = E_1 I_2 \cos\Phi$$

$$\text{อินพุทของตัวหมุนรวม} = 3E_1 I_2 \cos\Phi$$

$$\text{กำลังไฟฟ้าอินพุทของตัวหมุน} = 3I_2 E_r \cos\Phi \text{ หรือ } 3I_2^2 R_2 \quad (2.40)$$

$$I_2 = KI_1 \quad (2.41)$$

$$I_2 = \frac{I_1}{K} \quad (2.42)$$

$$E_r = SE_2 \quad (2.43)$$

$$E_2 = KE_1 \quad (2.44)$$

$$E_r = SKE_1 \quad (2.45)$$

$$\text{กำลังอินพุตรูปของความร้อน} = 3 \times \frac{I_1}{K} \times SKE_1 \times \cos\Phi$$

$$3E_1 I_2 \cos\Phi \times S = \text{อินพุทของโรเตอร์} \times S \quad (2.46)$$

$$\text{เอาท์พุทของโรเตอร์} = \text{อินพุทของโรเตอร์} - \text{การสูญเสีย}$$

$$= (3E_1 I_2 \cos\Phi) - (3E_1 I_2 \cos\Phi \times S)$$

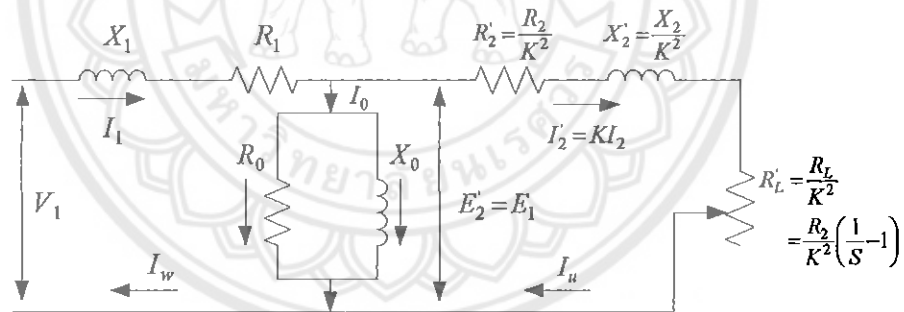
$$= 3E_1 I_2 \cos\Phi (S-1)$$

$$\begin{aligned} \text{เอาต์พุตของโรเตอร์} &= (S-1) \times \text{อินพุตของโรเตอร์} \\ \text{เอาต์พุตของโรเตอร์} / \text{อินพุตของโรเตอร์} &= 1-S \\ \text{การสูญเสียกลวัตที่โรเตอร์} &= S \times \text{อินพุตของโรเตอร์} \\ \text{ประสิทธิภาพที่โรเตอร์} &= \text{เอาต์พุตของโรเตอร์} / \text{อินพุตของโรเตอร์} \\ &= 1-S = \frac{N}{N_s} \end{aligned} \tag{2.47}$$

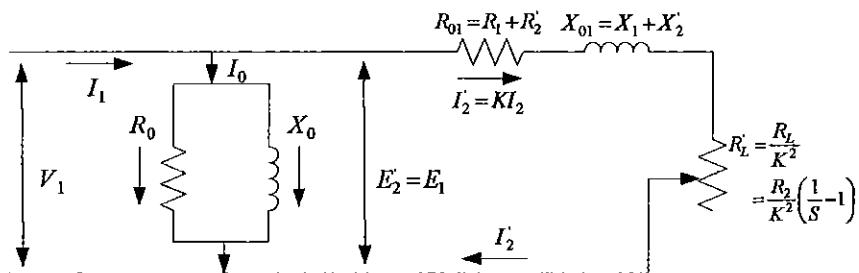
$$\text{ประสิทธิภาพที่โรเตอร์} = \text{ความเร็วรอบที่ใช้งาน} / \text{ความเร็วซิงโครนัส} \tag{2.48}$$

2.13 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ย้ายไปทางด้านปฐมภูมิ ส่วนที่อยู่กับที่ แสดงในรูปที่ 2.8 และรูปที่ 2.9



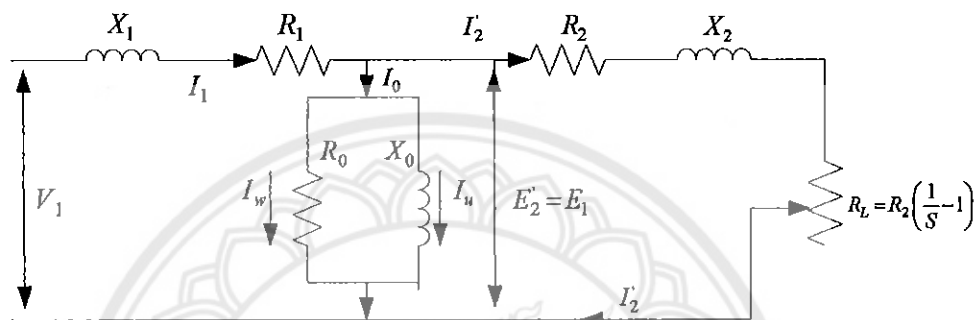
รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

พิจารณาวงจรสมมูลรูปที่ 2.8 วงจรกระตุ้นอาจย้ายไปทางซ้ายได้ บางครั้งอาจไม่นำมาพิจารณา เพื่อง่ายต่อการคำนวณ ดังนั้นจึงเขียนแผนภาพวงจรสมมูลโดยประมาณของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ ดังรูปที่ 2.11

ถ้าอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของแรงเคลื่อนไฟฟ้ามีค่าเป็น 1 นั่นคือ $\frac{E_1}{E_2} = 1$ วงจรสมมูลจึงเขียนได้ดังรูปที่ 2.11

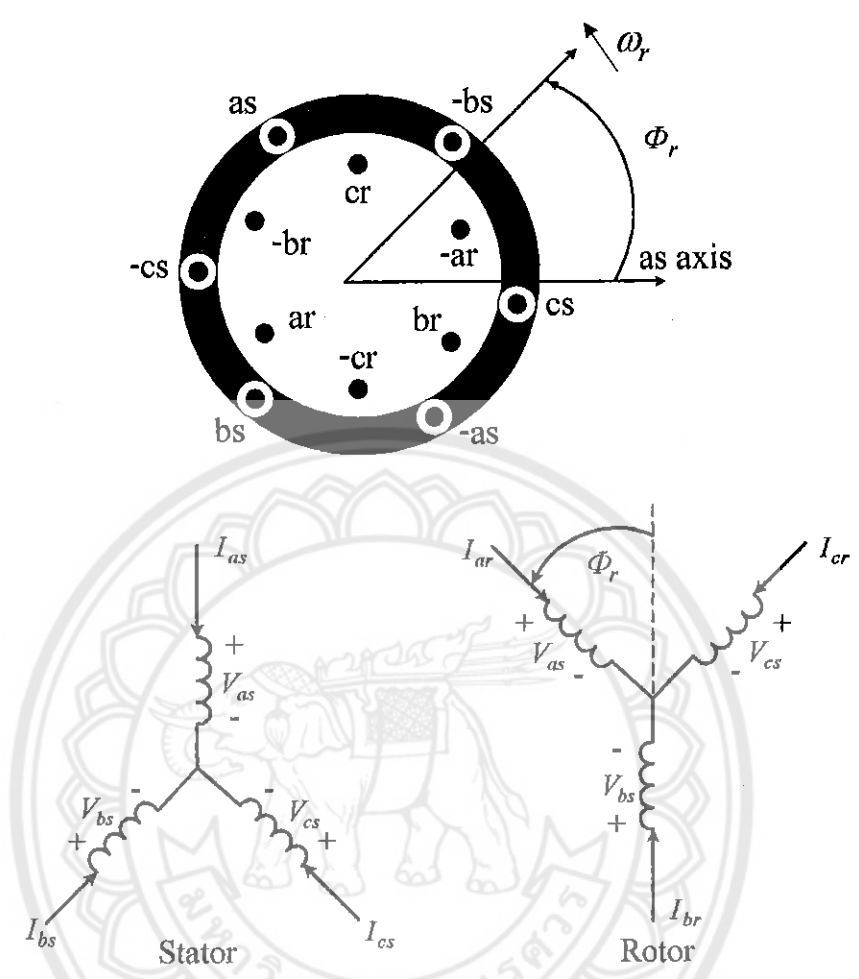


รูปที่ 2.10 วงจรสมมูล โดยประมาณของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

รูปวงจรสมมูลโดยประมาณของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อน

เป็น 1

2.14 แบบจำลองวงจรของเครื่องจักรกล 3 เฟส



รูปที่ 2.11 แบบจำลองของมอเตอร์ 3 เฟส

สมการแรงดัน (Voltage Equations)

สมการแรงดันที่สเตเตอร์ (Stator voltage equations)

$$V_{as} = i_{as}r_s + \frac{d\lambda_{as}}{dt} \tag{2.49}$$

$$V_{bs} = i_{bs}r_s + \frac{d\lambda_{bs}}{dt} \tag{2.50}$$

$$V_{cs} = i_{cs}r_s + \frac{d\lambda_{cs}}{dt} \tag{2.51}$$

สมการแรงดันที่โรเตอร์ (Rotor voltage equations)

$$V_{ar} = i_{ar}r_r + \frac{d\lambda_{ar}}{dt} \quad (2.52)$$

$$V_{br} = i_{br}r_r + \frac{d\lambda_{br}}{dt} \quad (2.53)$$

$$V_{cr} = i_{cr}r_r + \frac{d\lambda_{cr}}{dt} \quad (2.54)$$

สมการฟลักซ์เชื่อมต้อ (Flux linkage equation)

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{ds} \\ \lambda_{0s} \\ \lambda_{qr} \\ \lambda_{dr} \\ \lambda_{0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{ls} + x_m & 0 & 0 & x_m & 0 & 0 \\ 0 & x_{ls} + x_m & 0 & 0 & 0 & x_m \\ 0 & 0 & x_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ x_m & 0 & 0 & x_{lr} + x_m & 0 & 0 \\ 0 & x_m & 0 & 0 & x_{lr} + x_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \\ i_{0r} \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

สมการแรงบิด (Torque equation)

$$T_{em} = \frac{3P}{2} (\lambda_{qr}i_{dr} - \lambda_{dr}i_{qr}) \quad (2.56)$$

$$= \frac{3P}{2} (\lambda_{ds}i_{qs} - \lambda_{qs}i_{ds}) \quad (2.57)$$

$$= \frac{3P}{2} x_m (\lambda_{dr}i_{qs} - \lambda_{qr}i_{ds}) \quad (2.58)$$

2.15 สมการจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ในการสร้างสมการจำลองสามารถแยกแต่ละพจน์ของ λ เช่น

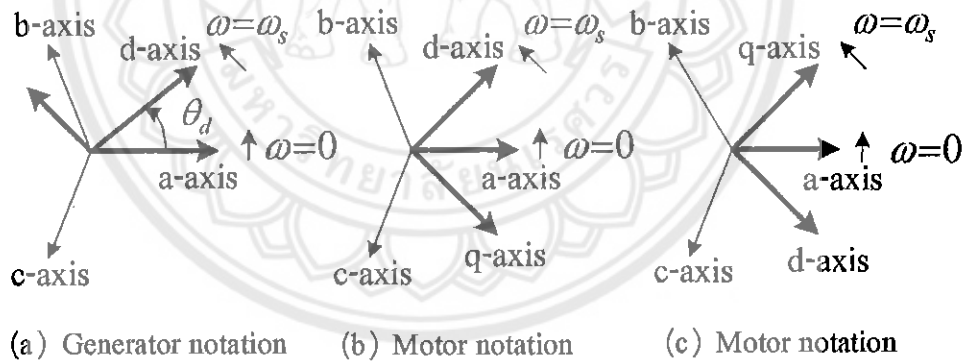
$$V_{as} = \frac{d\lambda_{as}}{dt} = \frac{d}{dt} \quad (\text{แถวที่หนึ่งของเมทริกซ์})$$

แต่ค่า L_m ขึ้นอยู่กับตำแหน่ง โดยทั่วไปจะเป็นฟังก์ชันของเวลา ซึ่งจะทำให้เกิดความยุ่งยาก จึงใช้การแปลงของปาร์กช่วยในการวิเคราะห์

การแปลงของปาร์ก (Park's Transformation)

การแปลงของปาร์ก เป็นการแปลงระบบ 3 เฟส (ABC) ให้พิจารณาเป็น 2 เฟส (qd) สำหรับการวิเคราะห์เครื่องกลไฟฟ้าเชิงโครนัส ใช้ในการแปลงแรงดันที่ขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องกลไฟฟ้าแบบเชิงโครนัสสู่แกนอ้างอิงแนวตรง (Direct axis) และแกนอ้างอิงแนวขวาง (Quadrature axis) ซึ่งถูกกำหนดไว้โดยโรเตอร์

$+V_q$ ที่แกน q จะสอดคล้องกับแกนสนามแม่เหล็กของสนามขดลวดและ $+V_d$ ที่แกน d กำหนดให้ $+V_q$ ที่แกน q อยู่ $\frac{\pi}{2}$



รูปที่ 2.12 แกนอ้างอิง qd0 ของมอเตอร์ 3 เฟส

ผลของการเปลี่ยนแปลงคือการเปลี่ยนนำทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามเวลาใน สมการแรงดันของเครื่องกลไฟฟ้าเนื่องจากวงจรไฟฟ้าในการหมุนแบบเกี่ยวข้องกันสามารถกำจัดได้

รูปแบบสมการการแปลงของปาร์ก มีดังต่อไปนี้

157 36304

ร.ร.

๗๔๗๖๒

๒๕๕๓

$$\begin{bmatrix} f_q \\ f_d \\ f_0 \end{bmatrix} = [T_{qd0}] \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad \text{ซึ่ง } f \text{ คือ } i \text{ หรือ } \lambda \quad (2.59)$$

$$[T_{qd0}(\theta_q)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta_q & \cos\left(\theta_q - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_q + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\theta_q & \sin\left(\theta_q - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_q + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

ถ้าแปลงกลับ จะได้ว่า

$$[T_{qd0}(\theta_q)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_q & \sin\theta_q & 1 \\ \cos\left(\theta_q - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_q - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta_q + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_q + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (2.61)$$

ซึ่ง $[T][T]^{-1} = [I]$

เพราะฉะนั้นค่าแรงดันที่ได้จะอยู่ในรูป

$$\begin{bmatrix} V_q \\ V_d \\ V_0 \end{bmatrix} = [T_{qd0}] \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.62)$$

และค่ากระแสที่ได้จะอยู่ในรูป

$$\begin{bmatrix} i_q \\ i_d \\ i_0 \end{bmatrix} = [T_{qd0}] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.63)$$

2.16 แบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าใน qd0

เป็นที่ทราบกันแล้วว่าการสร้างแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าใน qd0 นั้นเนื้อหาส่วนมากเป็นของดอกเตอร์สตีเฟน ลีบ (Dr. Steven Leeb)

การเปลี่ยนรูปนี้จะช่วยให้กำหนดตัวแปร qd0 ใหม่ มอเตอร์มีสองระบบย่อยคือ สเตเตอร์และโรเตอร์ ดังนั้นการแปลงพิกัดฉากคือ

$$\lambda_{qd0} = [T_s] \lambda_{abc} \quad \text{ที่สเตเตอร์}$$

ซึ่ง $[T_s] = [T(\theta)]$ θ คือ ค่าที่กำหนดไว้

และ $\lambda_{qd0r} = [T_r] \lambda_{abc}$ ที่โรเตอร์

ซึ่ง $[T_r] = [T(\beta)]$ β คือ ค่าที่กำหนดไว้

$$\text{Stator: "abc": } \lambda_{abcs} = L_s i_{abcs} + L_{sr} i_{abcr} \quad (2.64)$$

$$\text{"qd0": } \lambda_{qd0s} = T_s \lambda_{abcs} = T_s L_s T_s^{-1} i_{qd0s} + T_s L_{sr} T_s^{-1} i_{qd0r} \quad (2.65)$$

$$\text{Rotor: } \lambda_{qd0r} = T_r \lambda_{abcr} = T_r L_{sr} T_r^{-1} i_{qd0s} + T_r L_r T_r^{-1} i_{qd0r} \quad (2.66)$$

เมื่อใช้หลักพีชคณิต จะหาได้ว่า

$$\underline{T_r L_r T_r^{-1}} = \begin{bmatrix} L_{ar} & 0 & 0 \\ 0 & L_{ar} & 0 \\ 0 & 0 & L_{ar} \end{bmatrix} \quad (2.67)$$

ซึ่ง $L_{ar} = L_r - L_{ab}$

ในทำนองเดียวกัน $T_s L_s T_s^{-1}$

ให้ $\beta = \theta - \theta_r$ ซึ่ง θ_r คือ ตำแหน่งของโรเตอร์

ขณะนี้ก็มีเพียงค่าคงที่

$$\underline{T_r L_{sr}^T T_s^{-1}} = \underline{T_s L_{sr} T_r^{-1}} = \begin{bmatrix} 3/2 L_{ar} & 0 & 0 \\ 0 & 3/2 L_{ar} & 0 \\ 0 & 0 & 3/2 L_{ar} \end{bmatrix} \quad (2.68)$$

การแปลง แกนอ้างอิง สองครั้งเพื่อกำจัด Trig จะทำให้ได้สมการเดิมที่ได้ทราบแล้วว่า β และ θ_r เพื่อใช้ในการแปลงสมการ แต่ยังไม่ได้กำหนดค่า θ จะกลับมาจุดนี้ แต่ให้มองไปที่ ส่วนประกอบของ q_d0 ใหม่และจะทำให้ได้สมการออกมา

$$\begin{aligned} \underline{v_{qd0s}} &= \underline{T_s v_{abcs}} = \underline{T_s R i_{abcs}} + \underline{T_s \frac{d}{dt} (\lambda_{qd0s})} \\ &= \underline{T_s R T_s^{-1} i_{qd0s}} + \underline{T_s \frac{d}{dt} T_s^{-1} \lambda_{qd0s}} \\ &= \underline{R i_{qd0s}} + \underline{T_s \frac{d}{dt} T_s^{-1} \lambda_{qd0s}} \end{aligned} \quad (2.69)$$

การใช้กฎค่าความแตกต่าง

$$\begin{aligned} \underline{v_{qd0s}} &= \underline{R i_{qd0s}} + \underline{\frac{d}{dt} (\lambda_{qd0s})} + \left[\underline{T_s \frac{d}{dt} T_s^{-1}} \right] \underline{\lambda_{qd0s}} \\ &= \underline{R i_{qd0s}} + \underline{\frac{d}{dt} (\lambda_{qd0s})} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{d}{dt} & 0 \\ \frac{d}{dt} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \underline{\lambda_{qd0s}} \end{aligned} \quad (2.70)$$

สมการเมตริกซ์ของสเตเตอร์คือ

$$\begin{bmatrix} 0 & -\omega & 0 \\ -\omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.71)$$

สมการเมตริกซ์ของ โรเตอร์ เป็นสมการเชิงขั้ว มีลักษณะเดียวกัน แต่จะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} 0 & -(\omega - \omega_r) & 0 \\ \omega - \omega_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.72)$$

แบบจำลอง สมการสเตเตอร์

$$V_{ds} = i_{as}r_s - \omega\lambda_{qs} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} \quad (2.73)$$

$$V_{0s} = i_{0s}r_s + \frac{d\lambda_{0s}}{dt} \quad (2.74)$$

แบบจำลองสมการ โรเตอร์

$$V_{dr} = i_{dr}r_r - (\omega - \omega_r)\lambda_{qr} + \frac{d\lambda_{dr}}{dt} \quad (2.75)$$

$$V_{0r} = i_{0r}r_r + \frac{d\lambda_{0r}}{dt} \quad (2.76)$$

สมการ Zero-sequence (V_{0r} และ V_{0s}) อาจไม่มีผลต่อการทำงานที่สมดุล สำหรับเครื่องกลไฟฟ้าแบบกรงกระรอกจะได้ว่า $V_{dr} = V_{qr} = 0$

นอกจากนี้ยังเขียนสมการเมตริกซ์เชื่อมโยงฟลักซ์ได้ว่า

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{ds} \\ \lambda_{0s} \\ \lambda_{qr} \\ \lambda_{dr} \\ \lambda_{0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{as} & 0 & 0 & 3/2L_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & L_{as} & 0 & 0 & 3/2L_{sr} & 0 \\ 0 & 0 & L_{as0} & 0 & 0 & 0 \\ 3/2L_{sr} & 0 & 0 & L_{ar} & 0 & 0 \\ 0 & 3/2L_{sr} & 0 & 0 & L_{ar} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{ar0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \\ i_{0r} \end{bmatrix} \quad (2.77)$$

วิธีหาค่า θ หาได้จาก $\frac{d\theta}{dt} = \omega_e$ ซึ่ง ω_e คือ ความถี่เชิงโคโรนัส ข้อควรจำคือวิธีนี้ทำให้แรงดัน 3 เฟสที่ใช้กับสเตเตอร์เปรียบเสมือนค่าคงที่

สมการสถานะ (State equations)

$$-\frac{d}{dx} \lambda_{qs} = r_s i_{qs} + \omega \lambda_{ds} - v_{qs} \quad (2.78)$$

$$-\frac{d}{dx} \lambda_{ds} = r_s i_{ds} + \omega \lambda_{qs} - v_{ds} \quad (2.79)$$

$$-\frac{d}{dx} \lambda_{qr} = r_r i_{qr} + (\omega - \omega_r) \lambda_{dr} \quad (2.80)$$

$$-\frac{d}{dx} \lambda_{dr} = r_r i_{dr} + (\omega - \omega_r) \lambda_{qr} \quad (2.81)$$

$$\frac{d\omega_r}{dx} = \frac{(\tau_m - \tau_l)}{J} \quad (2.82)$$

โดยที่ ω_r = ความเร็วโรเตอร์

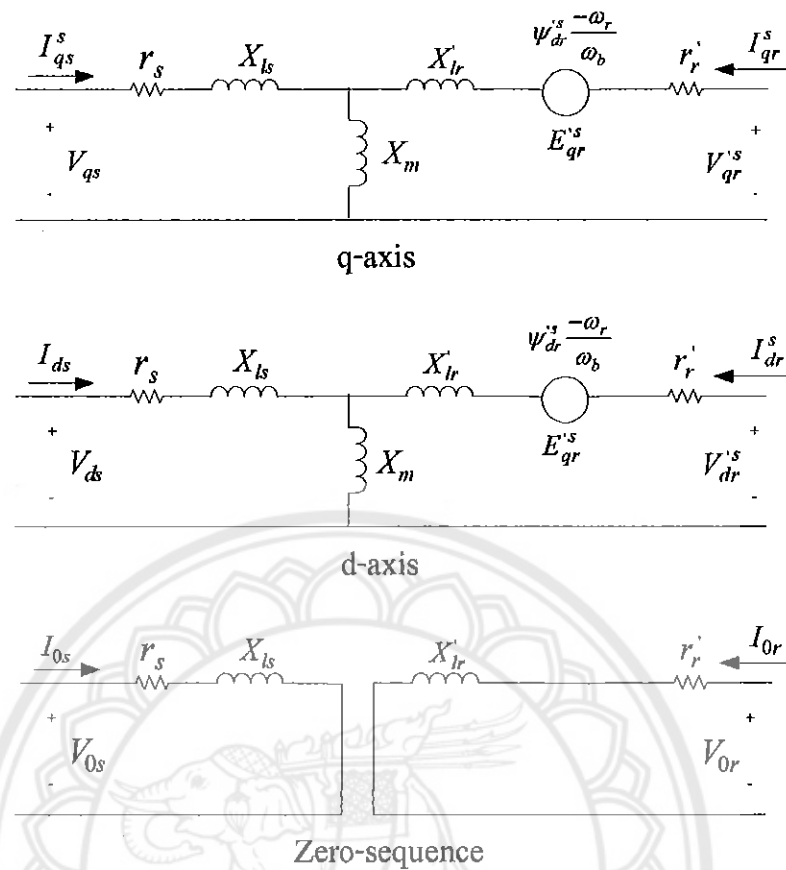
ω = ความเร็วอ้างอิง

J = ความเฉื่อยเพลา

τ_l = แรงบิดโหลด

2.17 แบบจำลอง qd0 ในแกนอ้างอิงคงที่

แบบจำลอง qd0 สามารถหาได้โดยการกำหนดให้ $\omega = 0$ โดยแบบจำลองนี้จะเรียกว่าแบบจำลองสแตนเลย์ (Stanley model) ซึ่งวงจรมวลจะได้ว่า



รูปที่ 2.13 วงจรสมมูล โดยพิจารณาตามแกนอ้างอิงของมอเตอร์ 3 เฟส

สมการแรงดันของ โรเตอร์และสเตเตอร์

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{d}{dx} \lambda_{qs} \quad (2.83)$$

$$v_{ds} = r_s i_{ds} + \frac{d}{dx} \lambda_{ds} \quad (2.84)$$

$$v_{qr} = r_r i_{qr} + \frac{d}{dx} \lambda_{qr} - \omega_r \lambda_{dr} \quad (2.85)$$

$$v_{dr} = r_r i_{dr} + \frac{d}{dx} \lambda_{dr} - \omega_r \lambda_{qr} \quad (2.86)$$

$$v_{0s} = r_s i_{0s} + \frac{d}{dx} \lambda_{d0s} \quad (2.87)$$

$$v_{0r} = r_r i_{0r} + \frac{d}{dx} \lambda_{0r} \quad (2.88)$$

สมการเชื่อม โยงฟลักซ์

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{ds} \\ \lambda_{0s} \\ \lambda_{qr} \\ \lambda_{dr} \\ \lambda_{0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{ls} + x_m & 0 & 0 & x_m & 0 & 0 \\ 0 & x_{ls} + x_m & 0 & 0 & x_m & 0 \\ 0 & 0 & x_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ x_m & 0 & 0 & x_{lr} + x_m & 0 & 0 \\ 0 & x_m & 0 & 0 & x_{lr} + x_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \\ i_{0r} \end{bmatrix} \quad (2.89)$$

สมการแรงบิด

$$T_{em} = \frac{3P}{22} (\lambda_{qr} i_{dr} - \lambda_{dr} i_{qr}) \quad (2.90)$$

$$= \frac{3P}{22} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (2.91)$$

$$= \frac{3P}{22} x_m (i_{rs} i_{qs} - i_{rs} i_{ds}) \quad (2.92)$$

2.18 แบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะคงตัว

แรงดันและกระแสที่สเตเตอร์ของเครื่องกลเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่สภาวะคงที่ โดยที่ 3 เฟส

สมมติจะได้ว่า

$$v_{as} = V_{ms} \cos(\omega_e t) \quad i_{as} = I_{ms} \cos(\omega_e t - \Phi_s) \quad (2.93)$$

$$v_{bs} = V_{ms} \cos(\omega_e t - \frac{2\pi}{3}) \quad i_{bs} = I_{ms} \cos(\omega_e t - \frac{2\pi}{3} - \Phi_s) \quad (2.94)$$

$$v_{cs} = V_{ms} \cos(\omega_e t - \frac{4\pi}{3}) \quad i_{cs} = I_{ms} \cos(\omega_e t - \frac{4\pi}{3} - \Phi_s) \quad (2.95)$$

การแปลงตัวแปร abc ของสเตเตอร์และ โรเตอร์เป็นแกนอ้างอิง qd0 โดยกำหนดให้แกน q เป็นแนวเดียวกับแกน a ของสเตเตอร์ โดยให้

$$\vec{v}_s = v_{qs}^s - jv_{ds}^s = V_{ms} e^{j\omega_e t} \quad (2.96)$$

$$\vec{i}_s = i_{qs}^s - ji_{ds}^s = I_{ms} e^{-j\Phi} e^{j\omega_e t} \quad (2.97)$$

$$\vec{v}_r = (v_{qr}^r - jv_{dr}^r) e^{j\theta_r(t)} = (V_{mr} e^{j(s\omega_e t - \theta_r(0) - \delta)}) e^{j\theta_r(t)} \quad (2.98)$$

$$\vec{i}_r = (i_{qr}^r - ji_{dr}^r) e^{j\theta_r(t)} = (I_{mr} e^{j(s\omega_e t - \theta_r(0) - \delta)}) e^{j\theta_r(t)} \quad (2.99)$$

ซึ่ง s และ r = qd0 ส่วนประกอบของ แกนอ้างอิงคงที่ และ แกนอ้างอิงที่หมุน ตามลำดับ ที่สภาวะคงที่การหมุนของโรเตอร์ที่ค่าคงที่ของ $\omega_e(1-S)$

$$\theta_r(t) = \omega_e(1-S)t + \theta_r(0) \quad (2.100)$$

สมการนี้ทำให้ง่ายต่อการหา Space vectors แรงดันและกระแสของโรเตอร์ จะได้ว่า

$$\vec{v}_r = v_{qr}^s - jv_{dr}^s = V_{mr} e^{-j\delta} e^{j\omega_e t} \quad (2.101)$$

$$\vec{i}_r = i_{qr}^s - ji_{dr}^s = I_{mr} e^{-j(\delta + \Phi_r)} e^{j\omega_e t} \quad (2.102)$$

ใช้เฟสเซอร์วิเคราะห์ที่สภาวะคงที่ จะได้ว่า

A – ค่าเฉลี่ยกำลังสองของปริภูมิเวกเตอร์

B – ค่าเฉลี่ยกำลังสองของเฟสเซอร์เวลา

ดังนั้น

$$\bar{V}_{ar} = \frac{V_{mr}}{\sqrt{2}} e^{j\delta} \quad \bar{I}_{ar} = \frac{I_{mr}}{\sqrt{2}} e^{-j(\delta + \Phi_r)} \quad (2.103)$$

และ

$$\vec{V}_{qs}^s - j\vec{V}_{ds}^s = \frac{v_{qs}^s - jv_{ds}^s}{\sqrt{2}} = \bar{V}_{as} e^{j\omega_e t} \quad (2.104)$$

$$\bar{I}_{qs}^s - j\bar{I}_{ds}^s = \frac{i_{qs}^s - j i_{ds}^s}{\sqrt{2}} = \tilde{I}_{as} e^{j\omega_e t} \quad (2.105)$$

$$\bar{V}_{qr}^s - j\bar{V}_{dr}^s = \frac{v_{qr}^s - j v_{dr}^s}{\sqrt{2}} = \bar{V}_{ar} e^{j\omega_e t} \quad (2.106)$$

$$\bar{I}_{qr}^s - j\bar{I}_{dr}^s = \frac{i_{qr}^s - j i_{dr}^s}{\sqrt{2}} = \tilde{I}_{ar} e^{j\omega_e t} \quad (2.107)$$

การอ้างอิงแรงดันและกระแสของโรเตอร์ที่ด้านข้าง จะได้ว่า

$$\bar{I}_{qr}^s - j\bar{I}_{dr}^s = \left(\frac{N_r}{N_s} \right) \tilde{I}_{ar} e^{j\omega_e t} = \tilde{I}_{ar} e^{j\omega_e t} \quad (2.108)$$

ในกรอบอ้างอิงที่หุดหนึ่งสมการแรงดัน qd0 และสมการการเชื่อมโยงฟลักซ์สามารถเขียนใหม่โดยอยู่ในรูปของเวกเตอร์แรงดันจำนวนจินตภาพ จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \bar{V}_{qs}^s - j\bar{V}_{ds}^s = & [r_s + j\omega_e(L_{ls} + L_m)](\bar{I}_{qs}^s - j\bar{I}_{ds}^s) + j\omega_e L_m(\bar{I}_{qr}^s - j\bar{I}_{dr}^s) \\ & + [r_r' + j(\omega_e + \omega_r)(L_{lr} + L_m)](\bar{I}_{qr}^s - j\bar{I}_{dr}^s) \end{aligned} \quad (2.109)$$

$$\bar{V}_{qr}^s - j\bar{V}_{dr}^s = j(\omega_e + \omega_r)L_m(\bar{I}_{qs}^s - j\bar{I}_{ds}^s) \quad (2.110)$$

การใช้ความสัมพันธ์ระหว่างเวกเตอร์สเปกตรอบต่อหน้าที่และเฟสเซอร์ระบุเวลาก่อนหน้านี้ และเขียนใหม่ $(\omega_e - \omega)$ โดยที่ $s\omega_e$ และลคพจน์ของ $e^{j\omega_e t}$ จะได้ว่า

$$\frac{\bar{V}_{ar}}{s} = \left(\frac{r_r'}{s} + j\omega_e L_{lr} \right) \bar{I}_{ar} + j\omega_e L_m(\bar{I}_{as} + \bar{I}_{ar}) \quad (2.111)$$

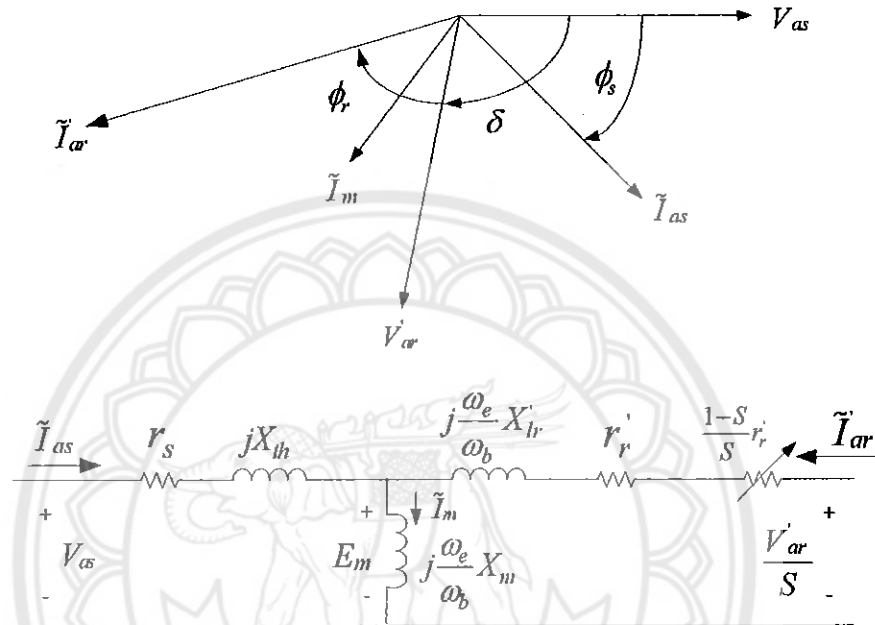
$$\bar{V}_{as} = \left(r_s + j \frac{\omega_e}{\omega_b} x_{ls} \right) \bar{I}_{as} + j \frac{\omega_e}{\omega_b} x_m (\bar{I}_{as} + \bar{I}_{ar}) \quad (2.112)$$

$$\frac{\bar{V}_{ar}}{s} = \left(\frac{r_r'}{s} + j \frac{\omega_e}{\omega_b} x_{lr}' \right) \bar{I}_{ar} + j \frac{\omega_e}{\omega_b} x_m (\bar{I}_{as} + \bar{I}_{ar}) \quad (2.113)$$

ซึ่ง ω_b คือ ความถี่เชิงมุม โดยให้ $\omega_b = 2\pi f_{rated}$

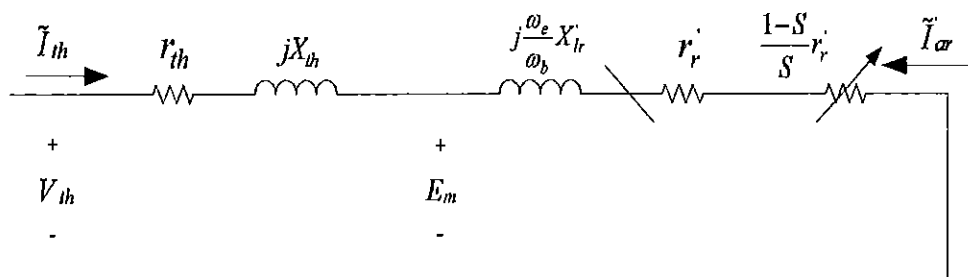
f_{rated} คือ ความถี่พิกัดในหน่วย Hz ของเครื่องกลไฟฟ้า

แผนภาพเฟสเซอร์ของตัวแปรสเตเตอร์และโรเตอร์ที่มี $\vec{I}_m = \vec{I}_{as} + \vec{I}_{ar}$ สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.14 วงจรเทียบเท่าวงจรสมมูลของมอเตอร์ 3 เฟส

โดยการเพิ่มและลด r_r' และจัดรูปใหม่ ทำให้ได้วงจรเทียบเท่าที่แทนกันได้ จะได้ว่า $r_r'(1-s)/s$ เป็นพจน์ค่าความต้านทานที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนากำลังของเครื่องกลไฟฟ้า r_r'/s เป็นพจน์ค่าความต้านทานที่เกี่ยวข้องกับกำลังไฟฟ้าไหลผ่านช่องว่างอากาศ หากสนใจเรื่องแรงบิด ด้านสเตเตอร์จะถูกแทนที่ด้วยวงจรสมมูลเทวินินดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.15 วงจรเทียบเท่าวงจรสมมูลของมอเตอร์ 3 เฟสสถานะสมดุล

ณ สภาวะสมดุล

แรงบิดเฉลี่ยจะได้ว่า

$$T_{em} = \frac{P_{mech}}{\omega_m} = 3I_{ar}^2 r_r' \frac{(1-s)}{S\omega_{sm}(1-s)} = \frac{3I_{ar}^2 r_r'}{S\omega_{sm}} \quad (2.114)$$

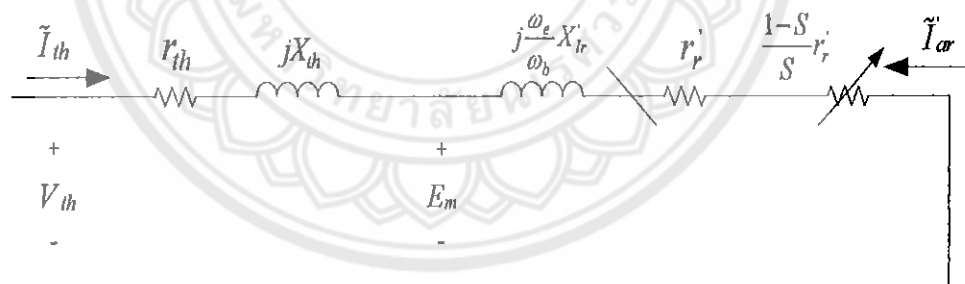
ลักษณะการปฏิบัติงานจะค่อนข้างแตกต่างกันออกไปถ้ามอเตอร์ทำงานที่แรงดันคงที่และกระแสคงที่

Constant voltage -> ค่าความต้านทานแบบอนุกรมของสเตเตอร์มีขนาดเล็กแรงดันระหว่างอากาศปิดแหล่งจ่ายในช่วงของโหลดมากๆ

Constant current -> แรงดันที่ขั้วและแรงดันที่ช่องว่างอากาศจะแตกต่างกันมาก

2.19 แบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำสถานะคงตัวที่แหล่งจ่ายแรงดันคงที่

การลัดวงจรที่โรเตอร์และการทำงานของสเตเตอร์กับแหล่งจ่ายแรงดันคงที่สามารถเขียนวงจรสมมูลเทวินินได้ว่า



รูปที่ 2.16 วงจรสมมูลเทวินิน

ค่าพารามิเตอร์ของวงจร จะได้ว่า

$$\vec{V}_{th} = \frac{jX_m}{r_s + j(x_{ls} + x_m)} \vec{V}_{as}$$

$$Z_{th} = r_{th} + jx_{th} = \frac{jx_m(r_s + jx_{ls})}{r_s + j(x_{ls} + x_m)} \quad (2.115)$$

ค่าแรงบิดเฉลี่ยที่ P-pole และแหล่งจ่ายแรงดันคงที่ จะได้ว่า

$$T_{em} = \frac{3P}{2\omega_e} \frac{V_{th}^2 (r_r' / s)}{(r_{th} + r_r' / s)^2 + (x_{th} + x_{lr}')^2} \quad (2.116)$$

สามารถใช้สมการนี้เพื่อสร้างลักษณะแรงบิดลิ้นสำหรับการขับของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยที่แหล่งจ่ายแรงดันคงที่

ค่าความต้านทานขาเข้าของสเตเตอร์

$$Z_{in} = r_s + jx_{ls} + \frac{jx_m [(r_r' / s) + jx_{lr}']}{(r_r' / s) + j(x_{lr}' + x_m)} \quad (2.117)$$

กระแสขาเข้าของสเตเตอร์ และ กำลังไฟฟ้าจินตภาพ

$$\vec{I}_{as} = \frac{\vec{V}_{as}}{Z_{in}} \quad S_{in} = P_{in} + jQ_{in} = 3\vec{V}_{as} \vec{I}_{as} \quad (2.118)$$

ที่แหล่งจ่ายกระแสคงที่ กระแสสเตเตอร์จะถูกกำหนดไว้ ส่วนแรงดันสเตเตอร์จะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานขาเข้าที่กล่าวมาแล้วก่อนหน้านี้


กระแสโรเตอร์สามารถใช้กำหนดแรงบิด สมการจะได้ว่า

$$I_{ar}^2 = \frac{x_m^2 I_{as}^2}{(r_r' / s)^2 + (x_{lr}' + x_m)^2} \quad (2.119)$$

บทที่ 3

การออกแบบการทดลอง

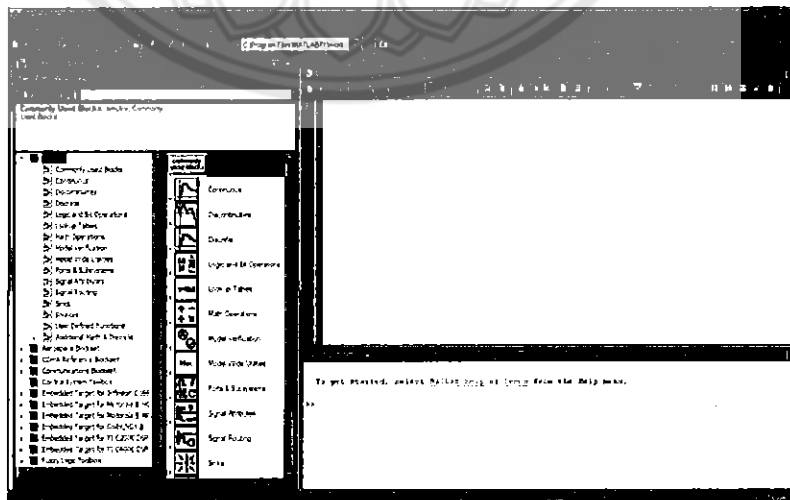
3.1 การใช้แมทแล็บ

- 1) กดดับเบิลคลิกที่ไอคอน  ที่หน้าจอจะได้หน้าต่างดังรูปที่ 3.1




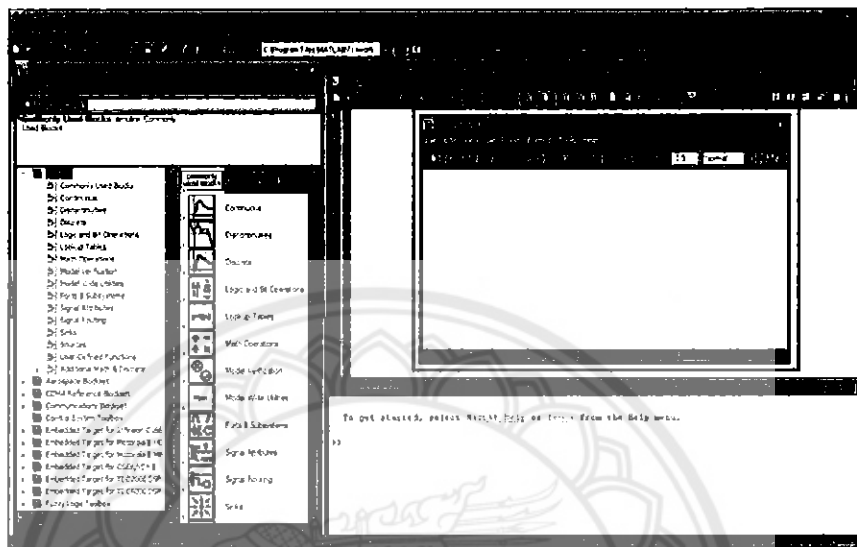
รูปที่ 3.1 หน้าต่างเริ่มต้น โปรแกรมแมทแล็บ

- 2) คลิกที่รูป  ทางด้านบนของหน้าต่างจะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ 3.2 เพื่อแสดงหน้าต่างเครื่องมือการออกแบบแบบจำลอง



รูปที่ 3.2 หน้าต่าง Simulink library browser

- 3) คลิกที่รูป  ของหน้าต่าง Simulink library browser จะปรากฏหน้าต่างเพิ่มขึ้นดังรูป 3.3 เพื่อที่จะเริ่มต้นออกแบบการสร้างแบบจำลองตั้งชื่อ ไฟล์ S1



รูปที่ 3.3 หน้าต่างสำหรับออกแบบ

- 4) ใช้เมาส์ลากไอคอนจากหน้าต่างของ Simulink library browser มาวางที่หน้าต่างสำหรับออกแบบที่สร้างขึ้นใหม่ตามหัวข้อที่ 3.2

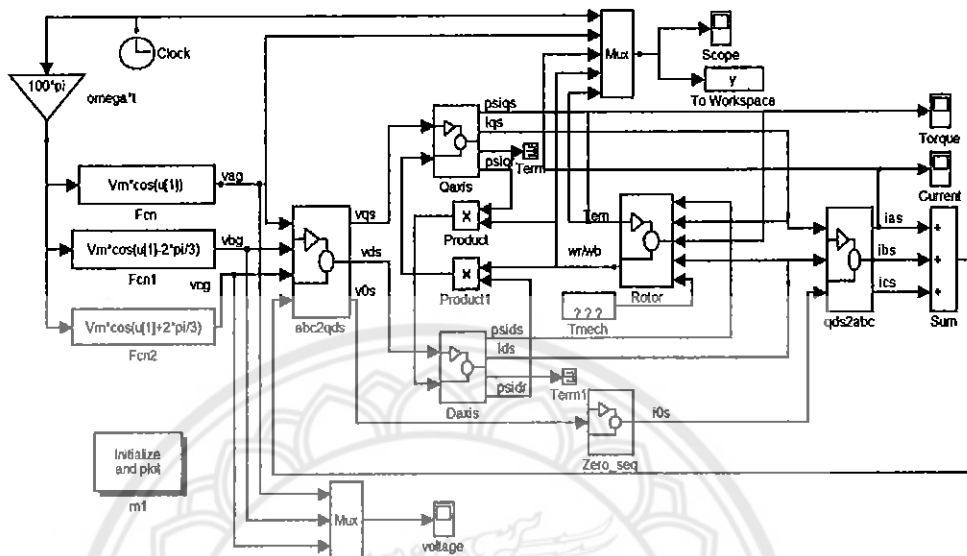
3.2 วิธีการสร้างแบบจำลองโดยแมทเทิล

ในโครงการนี้จะดำเนินการสร้างแบบจำลองของแกนอ้างอิงคงที่ในรูปแบบ qd0 โดยจะสร้างที่ละส่วนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อปฏิบัติตามก็จะสามารถใช้การจำลองนี้เพื่อตรวจสอบมอเตอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และคุณสมบัติย้อนกลับของการทดสอบแหล่งจ่ายมอเตอร์กับแหล่งจ่ายคลื่นไซน์

3.2.1 แผนภาพทั้งหมดของแบบจำลอง S1

ในรูปที่ 3.4 ได้แสดงแผนภาพทั้งหมดของแบบจำลอง S1 ของเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำในรูปแบบแกนอ้างอิงคงที่ โดยในแผนภาพรวมจะประกอบแผนภาพย่อย อีกหลายแผนภาพเพื่อนำมา

ประกอบกันเป็นระบบที่สมบูรณ์ ในรูปที่ 3.5 รูปที่ 3.6 รูปที่ 3.7 ได้แสดงแผนภาพของกล่อง Q-axis แผนภาพของกล่อง D-axis และแผนภาพของกล่อง Zero seq ตามลำดับ



รูปที่ 3.4 แผนภาพทั้งหมดของแบบจำลอง S1

ในการสร้างแผนภาพ Q-axis นั้นภายในแผนภาพจะประกอบด้วยสมการอ้างอิงดังนี้ บล็อก Fcn ประกอบด้วยสมการ

$$\varphi_{qs}^s = \omega_b \int \left\{ v_{qs}^s + \frac{r_s}{x_{ls}} (\varphi_{mq}^s - \varphi_{qs}^s) \right\} dt \tag{3.1}$$

$$\varphi_{ds}^s = \omega_b \int \left\{ v_{ds}^s + \frac{r_s}{x_{ls}} (\varphi_{md}^s - \varphi_{ds}^s) \right\} dt \tag{3.2}$$

$$i_{0r} = \frac{\omega_b}{x_{lr}} \int \{ v_{0r} - i_{0s} r_r' \} dt \tag{3.3}$$

บล็อก Fcn2 ประกอบด้วยสมการ

$$\varphi_{qr}^s = \omega_b \int \left\{ v_{qr}^s + \frac{\omega_r}{\omega_b} \varphi_{dr}^s + \frac{r_r'}{x_{lr}} (\varphi_{mq}^s - \varphi_{qr}^s) \right\} dt \tag{3.4}$$

$$\varphi_{dr}^s = \omega_b \int \left\{ v_{dr}^s - \frac{\omega_r}{\omega_b} \varphi_{qr}^s + \frac{r_r'}{x_{lr}'} (\varphi_{md}^s - \varphi_{dr}^s) \right\} dt \quad (3.5)$$

$$i_{0r} = \frac{\omega_b}{x_{lr}'} \int \{ v_{0r} - i_{0r} r_r' \} dt \quad (3.6)$$

บล็อก Fcn4 และ Fcn5 ประกอบด้วยสมการ

$$\varphi_{qs}^s = x_{ls} i_{qs}^s + \varphi_{mq}^s \quad (3.7)$$

$$i_{qs}^s = \frac{\varphi_{qs}^s - \varphi_{mq}^s}{x_{ls}} \quad (3.8)$$

$$\varphi_{ds}^s = x_{ls} i_{ds}^s + \varphi_{md}^s \quad (3.9)$$

$$i_{ds}^s = \frac{\varphi_{ds}^s - \varphi_{md}^s}{x_{ls}} \quad (3.10)$$

$$\varphi_{qr}^s = x_{lr}' i_{qr}^s + \varphi_m^s \quad (3.11)$$

$$i_{qr}^s = \frac{\varphi_{qr}^s - \varphi_m^s}{x_{lr}'} \quad (3.12)$$

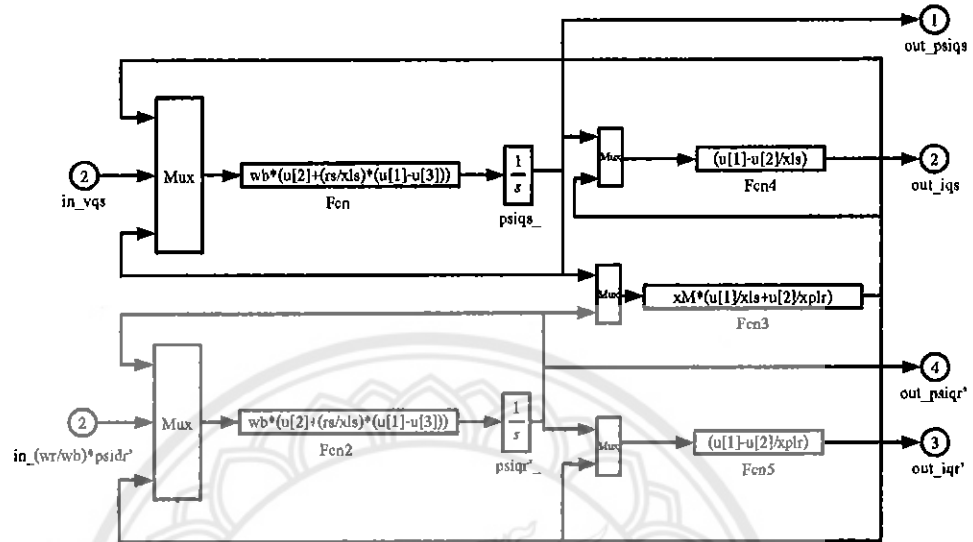
$$\varphi_{dr}^s = x_{lr}' i_{dr}^s + \varphi_{md}^s \quad (3.13)$$

$$i_{dr}^s = \frac{\varphi_{dr}^s - \varphi_{md}^s}{x_{lr}'} \quad (3.14)$$

บล็อก Fcn3 ประกอบด้วยสมการ

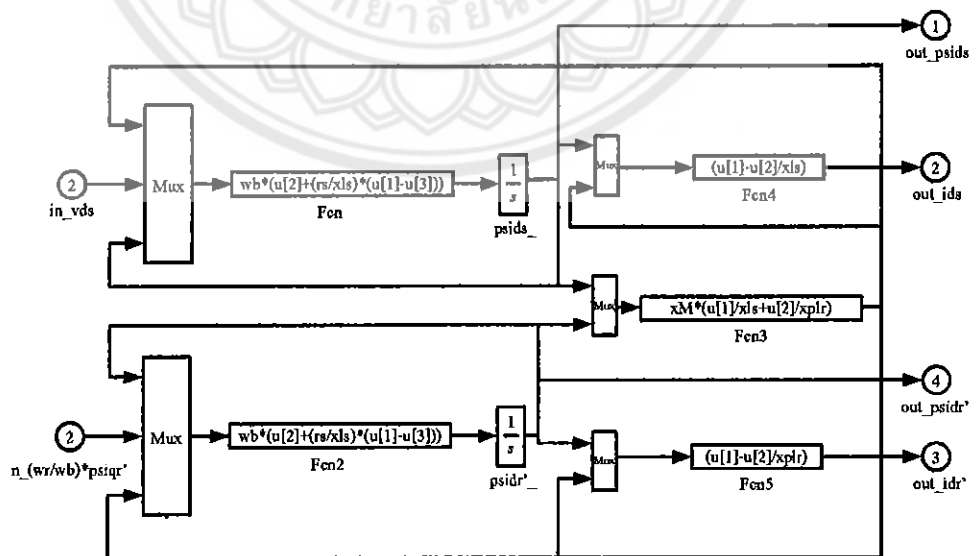
$$\varphi_{mq}^s = x_M \left(\frac{\varphi_{qs}^s}{x_{ls}} + \frac{\varphi_{qr}^s}{x_{lr}'} \right) \quad (3.15)$$

$$\varphi_{md}^s = x_M \left(\frac{\varphi_{ds}^s}{x_{ls}} + \frac{\varphi_{dr}^s}{x_{lr}} \right) \quad (3.16)$$

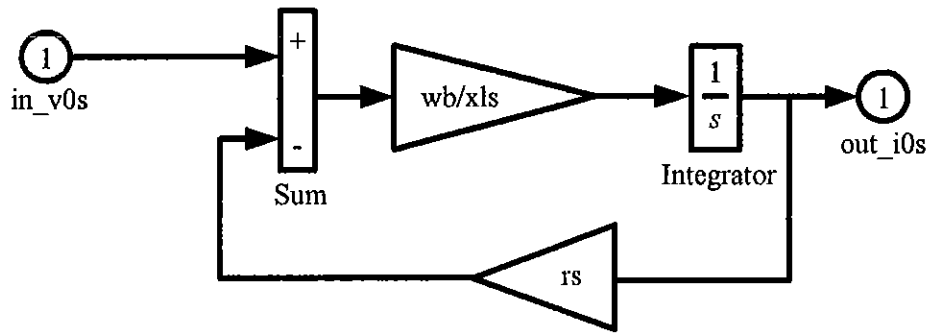


รูปที่ 3.5 แผนภาพในกล่อง Q-axis

ภายในแผนภาพ D-axis ในแต่ละบล็อกของแผนภาพจะประกอบด้วยสมการที่เหมือนกับแผนภาพ Q-axis



รูปที่ 3.6 แผนภาพในกล่อง D-axis

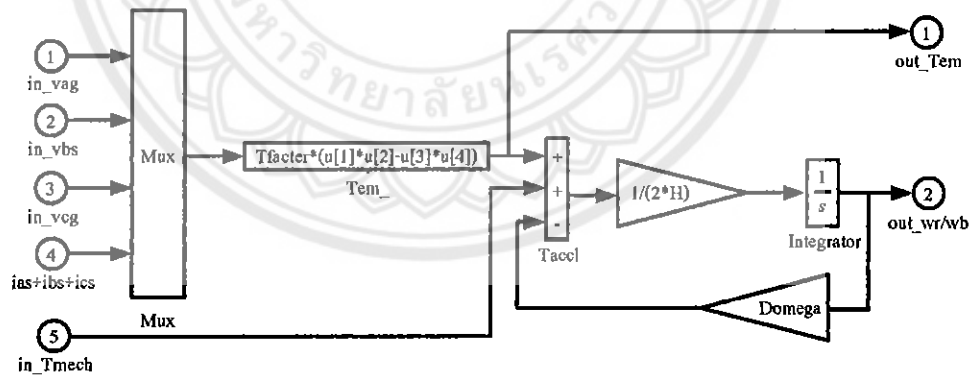


รูปที่ 3.7 แผนภาพในกล่อง Zero_seq

3.2.2 การสร้างแผนภาพกล่องโรเตอร์

การสร้างแผนภาพแบบจำลองของ โรเตอร์ แสดงในรูปที่ 3.8 เครื่องจักรกลจะเป็นมอเตอร์ก็ต่อเมื่อ T_{mech} มีค่าเป็นลบ และเครื่องจักรกลจะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก็ต่อเมื่อ T_{mech} มีค่าเป็นบวก ภายในบล็อก Tem_ ประกอบด้วยสมการ

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_b} (\varphi_{ds}^s i_{qs}^s - \varphi_{qs}^s i_{ds}^s) \tag{3.17}$$



รูปที่ 3.8 แผนภาพในกล่อง Rotor

3.2.3 การสร้างแผนภาพ abc2qds และ qds2abc

ในการจำลองนั้นต้องมีการแปลงแรงดันจากแหล่งจ่ายให้เป็นแรงดันของแกนอ้างอิงก่อน เพื่อจะได้นำค่าที่แปลงแล้วเข้าสู่ระบบจำลองของทั้งหมดการแปลงแรงดันจากแหล่งจ่ายเป็นแรงดัน

แกนอ้างอิงแสดงได้ดังรูปที่ 3.9 เมื่อมีการแปลงเข้าย่อมมีการแปลงออกโดยการแปลงออกจะแสดงแผนภาพดังรูปที่ 3.10 ภายในแผนภาพนั้นจะประกอบด้วยสมการ

$$v_{qs}^s = \frac{2}{3}v_{as} - \frac{1}{3}v_{bs} - \frac{1}{3}v_{cs} = \frac{2}{3}v_{ag} - \frac{1}{3}v_{bg} - \frac{1}{3}v_{cg} - v_{sg} \quad (3.18)$$

$$v_{ds}^s = \frac{1}{\sqrt{3}}(v_{cs} - v_{bs}) = \frac{1}{\sqrt{3}}(v_{cg} - v_{bg}) \quad (3.19)$$

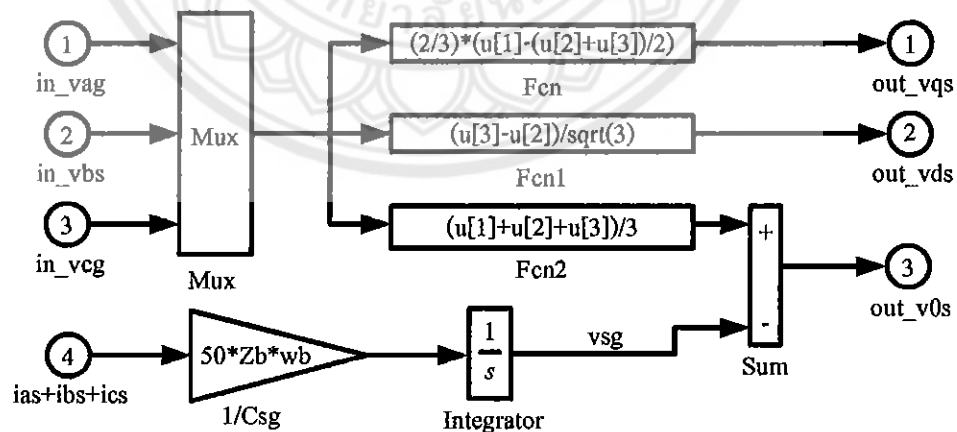
$$v_{0s} = \frac{1}{3}(v_{as} + v_{bs} + v_{cs}) = \frac{1}{3}(v_{ag} + v_{bg} + v_{cg}) - v_{sg} \quad (3.20)$$

และสมการ

$$v_{qr}^s = v_{qr}^r \cos\theta_r(t) v_{dr}^r \sin\theta_r(t) \quad (3.21)$$

$$v_{dr}^s = -v_{qr}^r \sin\theta_r(t) v_{dr}^r \cos\theta_r(t) \quad (3.22)$$

$$\theta_r(t) = \int_0^t \omega_r(t) dt + \theta_r(0) \quad (3.23)$$



รูปที่ 3.9 แผนภาพในกล่อง abc2qds

เมื่อมีการแปลงแรงดันจากแหล่งจ่ายเข้าสู่แกนอ้างอิงแล้วมีการแปลงกระแสจากแกนอ้างอิงเป็นกระแสของแหล่งจ่ายอีกครั้งในการแปลงกลับจะประกอบด้วยสมการดังนี้

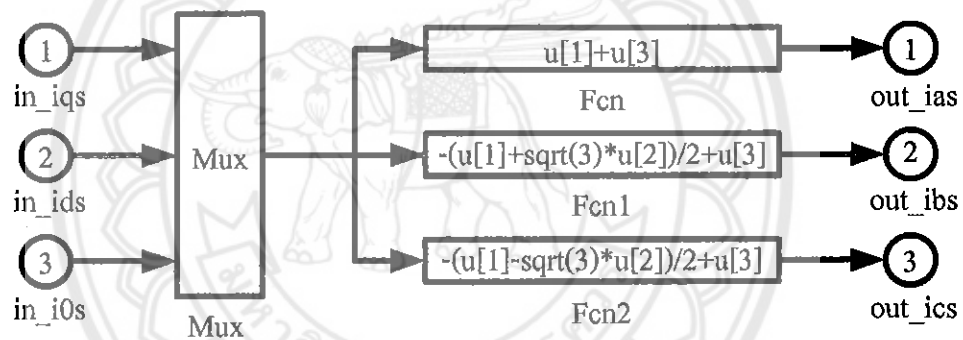
$$i_{qr}^s = i_{qr}^s \cos \theta_r(t) i_{dr}^s \sin \theta_r(t) \quad (3.24)$$

$$i_{dr}^s = i_{qr}^s \sin \theta_r(t) i_{dr}^s \cos \theta_r(t) \quad (3.25)$$

$$i_{ar} = i_{qr}^r + i_{0r} \quad (3.26)$$

$$i_{br} = -\frac{1}{2} i_{qr}^r - \frac{\sqrt{3}}{2} i_{dr}^r + i_{0r} \quad (3.27)$$

$$i_{cr} = -\frac{1}{2} i_{qr}^r + \frac{\sqrt{3}}{2} i_{dr}^r + i_{0r} \quad (3.27)$$



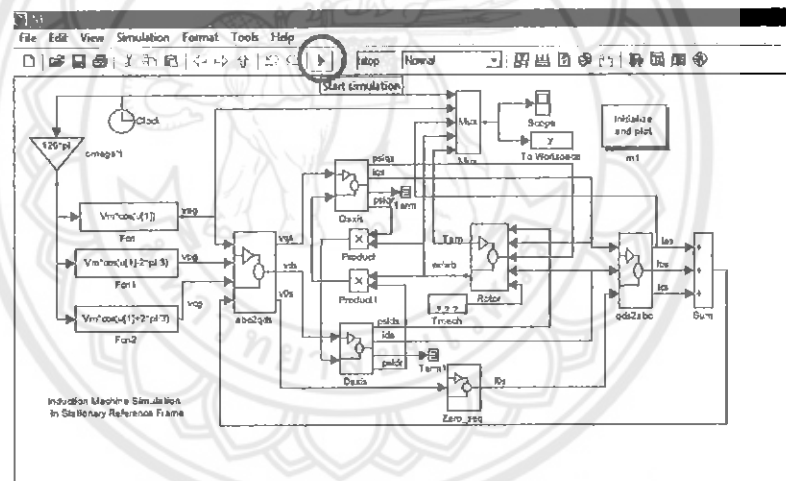
รูปที่ 3.10 แผนภาพไนกรอง qds2abc

เมื่อสร้างแผนภาพและทำการเชื่อมโยงลูกศรทั้งหมดตามหัวข้อที่ 3.2.1 แล้ว ต่อไปจะเป็น การดูผลของการสร้างแบบจำลองเพื่อจะ ได้นำไปวิเคราะห์เปรียบเทียบกับ การทดสอบจริง

3.3 วิธีการทดลอง

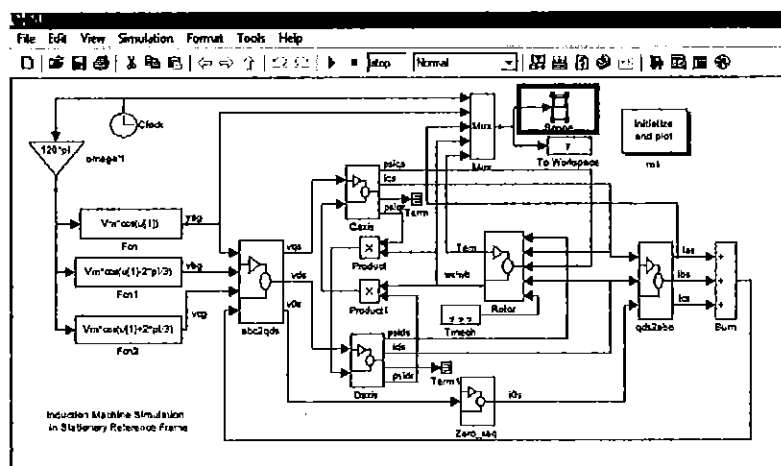
เมื่อทำการสร้างแบบจำลองเสร็จต้องมีการทำการทดสอบเพื่อหาผลตอบสนองจากการจำลอง โดยใช้โปรแกรมเมทแเล็บ ในการทดสอบนี้จะเป็นการทดสอบหา ค่าแรงบิด กระแส และค่ากำลังไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยการทดสอบมีขั้นตอนดังนี้

1. สร้างไฟล์ ตามภาคผนวก ข
2. เปิดไฟล์ S1 ที่สร้างขึ้นในหัวข้อ 3.2 เพื่อรอทำการจำลอง
3. เปิดสร้างไฟล์ ในภาคผนวก ข เพื่อใส่ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำตามที่ต้องการทำการจำลอง
4. เมื่อใส่ค่าพารามอเตอร์เรียบร้อยแล้วทำการกด F9 เพื่อทำการรันไฟล์ข้อมูล
5. กดปุ่ม Start Simulation เพื่อทำการเริ่มการ Simulation โปรแกรมตามรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 หน้าต่างการเริ่มจำลอง โปรแกรม

6. กดที่สัญลักษณ์สโคป จะแสดงหน้าต่าง ขึ้นมาเป็นรูปภาพภายในจะแสดงกราฟของแรงบิดแรงดัน กระแส ซึ่งสามารถแยกได้โดยการเพิ่มสโคปแล้วทำตามขั้นตอนที่ 5 อีกครั้ง



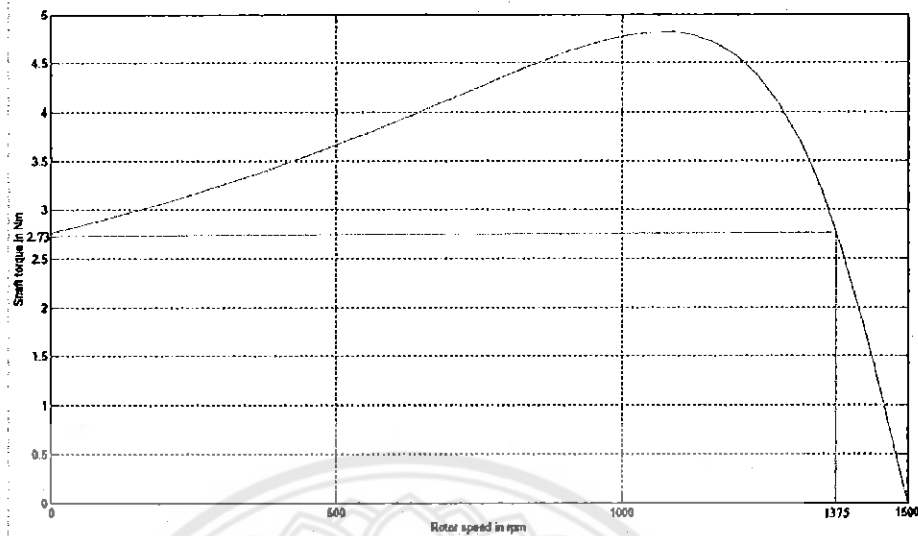
รูปที่ 3.12 สัญลักษณ์ Scope เพื่อดูผลตอบสนองของการจำลองโปรแกรม

7.ทำการบันทึกรูปภาพที่ได้ซึ่งรูปภาพที่ได้นั้นจะแสดงในหัวข้อที่ 3.4

3.4 ผลการทดลอง

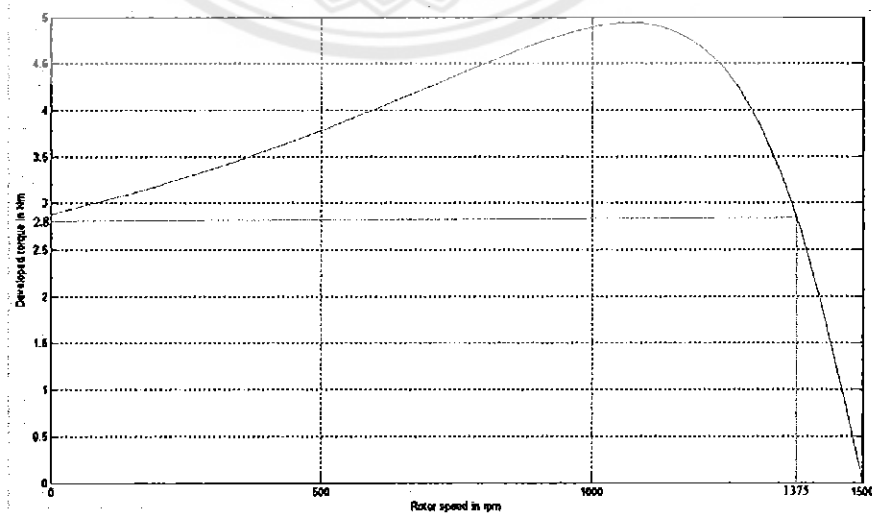
จากการขึ้นตอนการทดลองในหัวข้อ 3.3 ทำให้ได้ผลการทดลองเป็นรูปภาพการตอบสนองของแบบจำลอง ในโปรแกรมเมทเด็ป ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยจะแยกออกเป็นรูปผลตอบสนองของ แรงบิด กระแส และกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ที่ต้องการจำลองดังนี้

ผลตอบสนองแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำจากรูปคุณลักษณะของแรงบิดที่ได้จากการนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆจะสามารถพิจารณาของแรงบิดได้อยู่ 2 ประเภท นั่นคือแรงบิดที่โรเตอร์ (T_{shop}) และแรงบิดเหนี่ยวนำ (T_{conv}) ทำการจำลองจะได้ดังรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 จะเห็นว่าที่ภาระเต็มพิกัด แกนนอนความเร็วรอบจะอยู่ที่ 1375 รอบต่อนาที เมื่อลากเส้นตัดแกนตั้ง จะได้ค่าแรงบิดจากการจำลองมอเตอร์ของโปรแกรมที่ 2.73 นิวตันเมตร เมื่อพิจารณาค่าจากการคำนวณจากการทดลองจริงที่คำนวณได้ 2.36 นิวตันเมตร เมื่อพิจารณาความคลาดเคลื่อนระหว่าง โปรแกรมกับการทดลองเห็นว่าการคลาดเคลื่อน 13%



รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบที่โรเตอร์

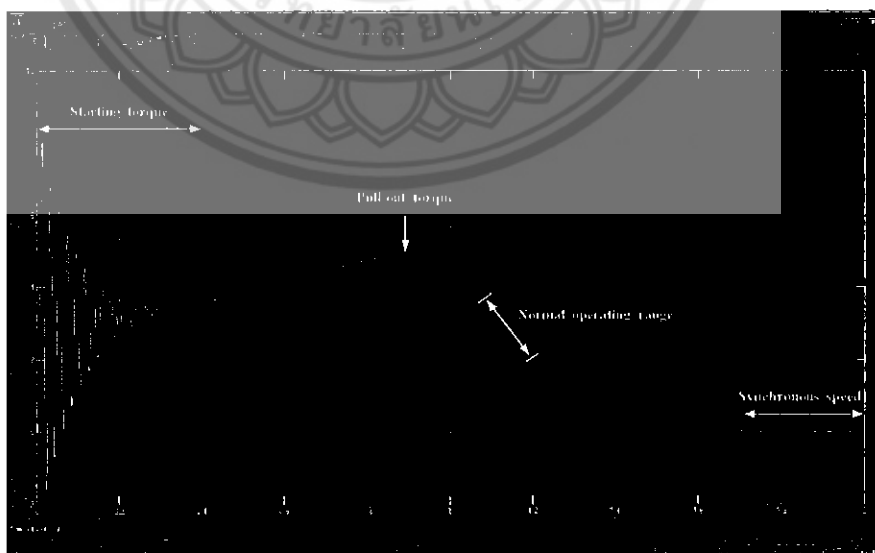
เมื่อพิจารณารูปคุณลักษณะของแรงบิดเหนี่ยวนำของมอเตอร์เหนี่ยวนำพิจารณาที่ภาระเต็มพิกัดที่รูปที่ 3.14 แกนอนความเร็วรอบจะอยู่ที่ 1375 รอบต่อนาที เมื่อลากเส้นตัดแกนตั้ง จะได้ค่าแรงบิดจากการจำลองมอเตอร์ของโปรแกรมที่ 2.8 นิวตันเมตร เมื่อพิจารณาค่าจากการคำนวณจากการทดสอบจริงที่คำนวณได้ 2.846 นิวตันเมตร เมื่อพิจารณาความคลาดเคลื่อนระหว่างโปรแกรมกับการทดสอบจริงมีความคลาดเคลื่อน 1.61 %



รูปที่ 3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบที่โรเตอร์ ขณะโหลดเต็มพิกัด

กราฟที่ได้จากแบบจำลองจะเลือกช่วงพิจารณาได้ดังรูปที่ 3.15 เป็น เส้นโค้ง แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วในมอเตอร์อินดักชัน 3 เฟสทำให้ทราบข้อมูลในการทำงานของมอเตอร์อินดักชันดังนี้

1. แรงบิดที่เกิดขึ้น (Developed torque) เป็นศูนย์ที่ความเร็วซิงโครนัส
2. เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็ว เกือบเป็นเชิงเส้นในช่วงระหว่างแรงบิดขณะไม่มีโหลด (No load torque) กับแรงบิดขณะจ่ายโหลดเต็มที่ (Full load torque) เรียกช่วงนี้ว่า ย่านทำงานปกติ (Normal operating range) ของมอเตอร์
3. มีแรงบิดสูงสุด (Maximum torque) ซึ่งบางครั้งเรียกว่า Pull-out torque เป็น 2-3 เท่าของแรงบิดที่พิกัดขณะจ่ายโหลดเต็มที่ T_{max}
4. มีแรงบิดเริ่มต้นหมุน (Starting torque) มากกว่าแรงบิดที่พิกัดเล็กน้อย ดังนั้นมอเตอร์จึงเริ่มต้นขับโหลดหรือต่อกับโหลดขณะเริ่มต้นหมุนได้ทันที โดยแรงบิดที่โหลดนั้นจะต้องไม่มากกว่าแรงบิดที่พิกัด
5. การสลับสายคู่ใดคู่หนึ่งจะทำให้สนามแม่เหล็กเปลี่ยนทิศทาง มอเตอร์จึงหมุนกลับทิศทางได้ แต่ก่อนที่จะกลับทิศทางนั้นจะมีอยู่จุดหนึ่งที่มอเตอร์หยุดอยู่กับที่อย่างรวดเร็วซึ่งเรียกว่า Plugging ซึ่งนำไปสู่หลักการควบคุมมอเตอร์แบบหนึ่ง
6. ถ้าโรเตอร์ของมอเตอร์อินดักชันขับด้วยความเร็วที่สูงกว่าความเร็วซิงโครนัส แรงบิดที่เกิดขึ้นในมอเตอร์จะกับทิศทางและมอเตอร์ดังกล่าวจะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งเปลี่ยนกำลังกลเป็นกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 3.15 ผลการจำลองความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับเวลา จากโปรแกรมเมทแล็บ

ค่าแรงบิดทั้ง 2 ประเภทจากการคำนวณสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$P_{in} = \sqrt{3}I_L V_L \cos\Phi = \sqrt{3} \times (1.12) \times (380) \times (0.7) = 516.01W$$

$$P_{SCu} = 3I_L^2 R_1 = 3 \times (1.12)^2 \times (18.30) = 68.86W$$

$$P_{AG} = P_{in} - P_{SCu} = 516.01 - 68.86 = 447.14W$$

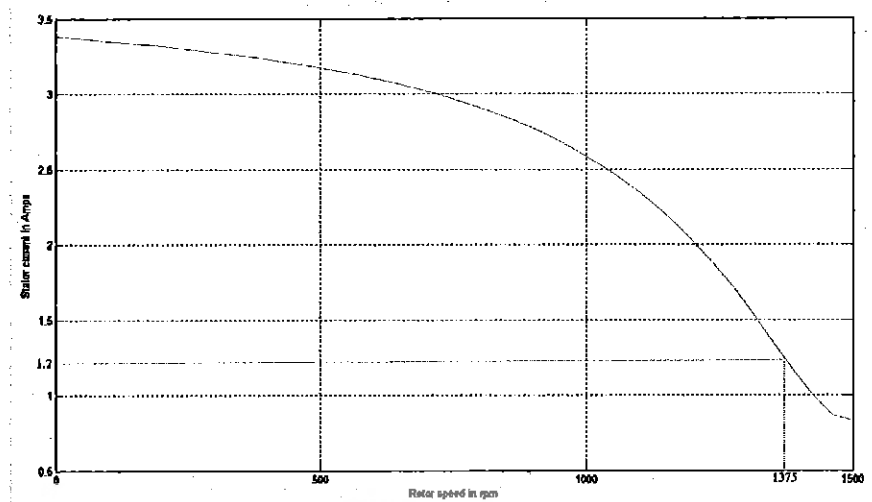
$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} = 0.0833 \quad \omega_r = 143.98$$

$$P_{conv} = (1 - S)P_{AG} = (1 - 0.0833)447.14 = 409.87W$$

$$T_{conv} = \frac{P_{conv}}{\omega_r} = \frac{409.87}{143.98} = 2.84$$

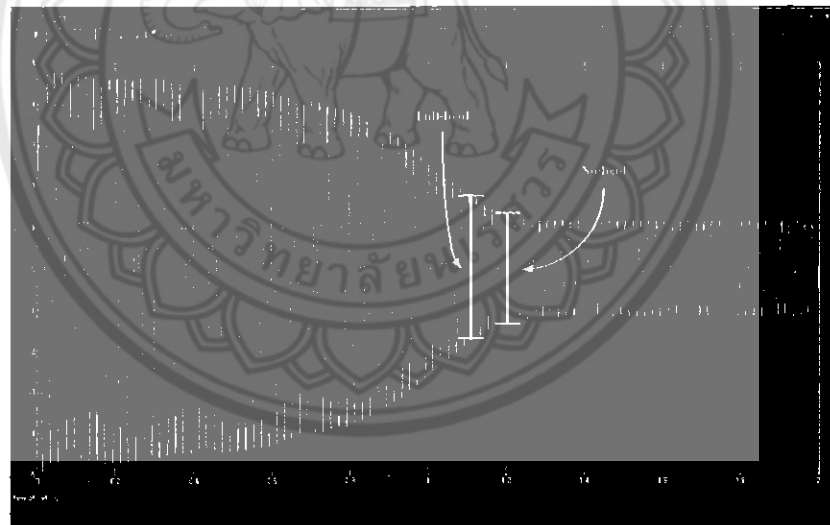
$$P_{out} = T_{shaft} \omega_r = 2.84 \times 143.98 = 408.90$$

ผลตอบสนองของกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เมื่อพิจารณามอเตอร์ที่ภาระเต็มพิกัด แกนนอนความเร็วรอบที่ 1375 รอบต่อนาที เมื่อลากเส้นตัดแกนตั้ง จะได้ค่ากระแสไฟฟ้าจากการจำลองมอเตอร์ของโปรแกรมที่ 1.2 A ดังนั้นสามารถเทียบความเร็วรอบที่ภาระต่างๆ กับค่ากระแสของไฟฟ้าของมอเตอร์ได้โดยจากกราฟกระแสดังรูปที่ 3.16



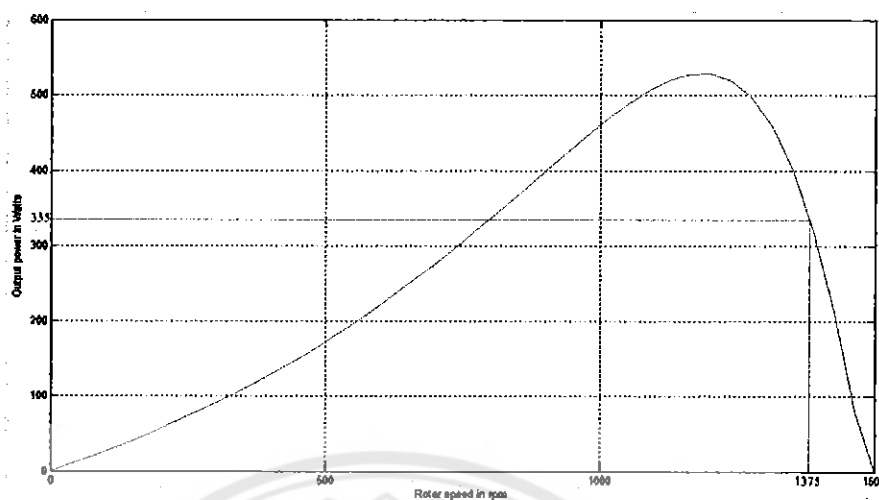
รูปที่ 3.16 ผลตอบสนองกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

กราฟที่ได้จากแบบจำลองจะเลือกพิจารณาที่ ภาวะเต็มพิกัดและที่ไม่มีภาวะเพื่อพิจารณาค่าของกระแสจากการจำลองแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำดังรูปที่ 3.17



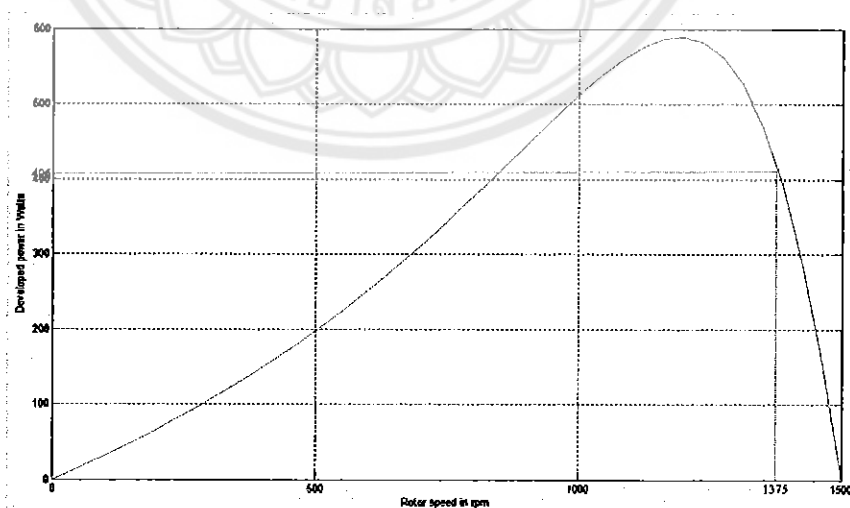
รูปที่ 3.17 กราฟผลตอบสนองกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำจากแบบจำลอง

ผลการตอบสนองของกำลังไฟฟ้าด้านออกของมอเตอร์เหนี่ยวนำ พิจารณาที่ภาวะเต็มพิกัดที่ รูปที่ 3.18 แกนนอนความเร็วรอบจะอยู่ที่ 1375 รอบต่อนาที เมื่อลากเส้นตัดแกนตั้ง จะได้ค่ากำลังไฟฟ้าจากการจำลองมอเตอร์ของโปรแกรมที่ 335 วัตต์ เมื่อพิจารณาค่าจากการคำนวณจากการทดสอบจริงที่คำนวณ ได้ 339.81 วัตต์ เมื่อพิจารณาความคลาดเคลื่อนระหว่าง โปรแกรมกับการทดสอบจริงมีความคลาดเคลื่อน 1.41 %



รูปที่ 3.18 กราฟผลตอบสนองกำลังไฟฟ้าด้านออกของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ผลการตอบสนองของกำลังไฟฟ้าเหนี่ยวนำของมอเตอร์เหนี่ยวนำ พิจารณาที่ภาระเต็มพิกัด ที่รูปที่ 3.19 แกนนอนความเร็วรอบจะอยู่ที่ 1375 รอบต่อนาที เมื่อลากเส้นตัดแกนตั้ง จะได้ค่ากำลังไฟฟ้าจากการจำลองมอเตอร์ของโปรแกรมที่ 406 วัตต์เมื่อพิจารณาค่าจากการคำนวณจากการทดสอบจริงที่คำนวณได้ 409.88 วัตต์เมื่อพิจารณาความคลาดเคลื่อนระหว่าง โปรแกรมกับการทดสอบจริงมีความคลาดเคลื่อน 0.94 %



รูปที่ 3.19 กราฟผลตอบสนองกำลังไฟฟ้าเหนี่ยวนำของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

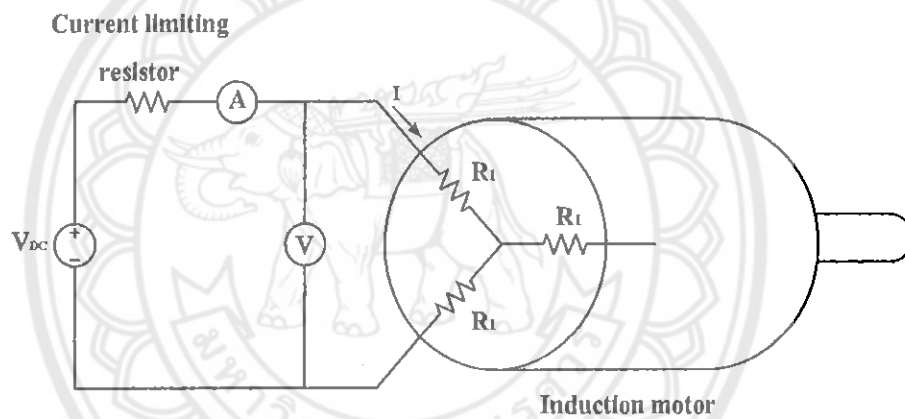
บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 การหาพารามิเตอร์วงจรสมมูลภายใน

4.1.1 การทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานของชุดขดลวดสเตเตอร์ (The DC test for stator resistance)

เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานของชุดขดลวดสเตเตอร์ (R_s) ทำได้ด้วยการใช้วิธีโวลต์-แอมป์ ทดสอบเฉพาะปลายสายคู่ใดคู่หนึ่งเท่านั้น



รูปที่ 4.1 วงจรทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานของชุดขดลวดสเตเตอร์

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ชุดมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ โรเตอร์กระรอก (Squirrel cage induction motor)
2. ชุดแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง (DC power supply)
3. ชุดมิเตอร์วัดกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC multimeter)
4. สายต่อวงจร (Connection leads)

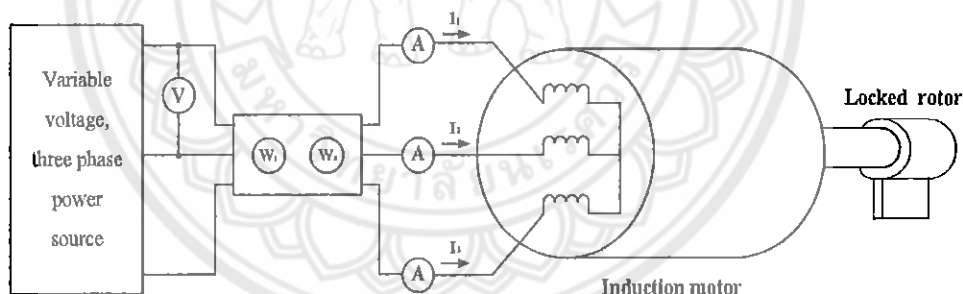
ขั้นตอนการทดสอบ

1. ต่อวงจรการทดสอบ โดยต่อชุดมอเตอร์เข้ากับชุดแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง ชุดมิเตอร์วัดกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ตามรูปที่ 4.1

2. จ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ โดยจ่ายไปที่ปลายสายคู่ใดคู่หนึ่งของชุดขดลวดสเตเตอร์เท่านั้น
3. ปรับค่าแรงดัน ให้ได้ค่ากระแสไม่มากจนเกินไป หรือจะจ่ายให้อยู่ในช่วงค่าประมาณกระแสพิกัด
4. บันทึกค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ได้ ตามช่วงค่าแรงดันต่างๆ ตามที่กำหนดไว้
5. คำนวณหาค่าความต้านทานในชุดขดลวดสเตเตอร์ (R_1)

4.1.2 การทดสอบโดยการยึดโรเตอร์ (The lock-rotor test)

เมื่อมอเตอร์ถูกยึดไม่ให้มีการหมุน และมอเตอร์ได้รับแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายตามพิกัดค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์จะสูงมาก ประมาณ 5-6 เท่าของกระแสไฟฟ้าพิกัด ในสภาวะนี้ค่า $S=1$ เป็นผลให้ $\frac{R_2}{S} = R_2$ เมื่อ R_2 คือค่าความต้านทานของโรเตอร์ที่อ้างอิงจากสเตเตอร์ และในสภาวะนี้ค่า $I_1 \gg I_0$ ดังนั้น ส่วนของ R_c และ X_M ไม่นำมาพิจารณาในการคำนวณ



รูปที่ 4.2 วงจรทดสอบ โดยการยึดโรเตอร์

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ชุดมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบโรเตอร์กรงกระรอก (Squirrel cage induction motor)
2. ชุดแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ 3 เฟส (AC Power Supply)
3. ชุดมิเตอร์วัดกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC multimeter)
4. ชุดวัดกำลังไฟฟ้า 3 เฟส (Three-phase wattmeter)
5. อุปกรณ์สำหรับใช้ยึดโรเตอร์ไม่ให้มีการหมุน

6. สายต่อวงจร (Connection leads)

ขั้นตอนการทดสอบ

1. ต่อวงจรการทดสอบ โดยต่อชุดมอเตอร์เข้ากับชุดแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ 3 เฟส ชุดมิเตอร์วัดกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ และชุดวัดกำลังไฟฟ้า 3 เฟส ตามรูปที่ 4.2

2. ทำการชดโรเตอร์ให้มีการหมุน แล้วจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ โดยค่อยๆ ปรับค่าแรงดันเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนกระทั่งถึงค่าประมาณกระแสพิกัด

3. บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่ได้

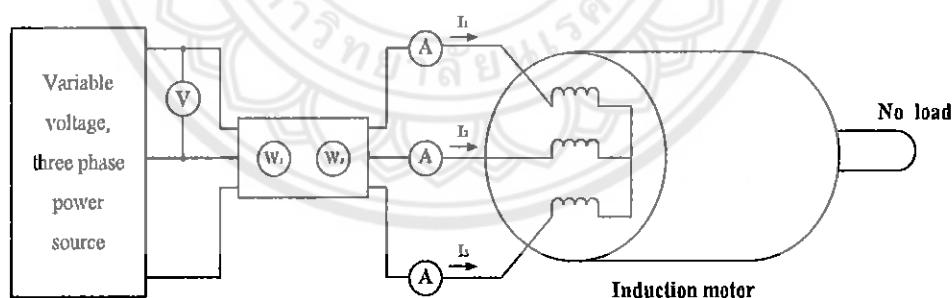
$$V_{br} = 79 \text{ V}$$

$$I_{br} = 1.12 \text{ A}$$

$$P_{br} = 45 \text{ W (1 Phase)}$$

4.1.3 การทดสอบในสถานะไม่มีโหลด (The no-load test)

การทดสอบนี้เป็นกรควบคุมให้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหมุนที่ความเร็วพิกัดตามขนาดของแรงดันพิกัด โดยไม่มีโหลดต่ออยู่ที่เพลาของมอเตอร์ ดังนั้น N , จึงสูง ส่งผลให้ค่าสลิปต่ำ นอกจากนี้กระแสไฟฟ้าที่โรเตอร์มีค่าต่ำมาก ทำให้ค่าความสูญเสียที่ขดลวดทองแดงที่โรเตอร์มีค่าต่ำมากเช่นกัน จึงไม่คิดค่าความสูญเสียในช่วงนี้



รูปที่ 4.3 วงจรทดสอบในสถานะไม่มีโหลด

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ชุดมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ โรเตอร์กรงกระรอก (Squirrel cage induction motor)
2. ชุดแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ 3 เฟส (AC Power Supply)
3. ชุดมิเตอร์วัดกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC multimeter)
4. ชุดวัดกำลังไฟฟ้า 3 เฟส (Three-phase wattmeter)

5. เครื่องวัดความเร็วรอบแบบมือถือ (Hand tachometer)

6. สายต่อวงจร (Connection leads)

ขั้นตอนการทดสอบ

1. ต่อวงจรการทดสอบ โดยต่อชุดมอเตอร์เข้ากับชุดแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ 3 เฟส ชุดมิเตอร์วัดกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ และชุดวัดกำลังไฟฟ้า 3 เฟส ตามรูปที่ 4.3

2. จ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ โดยค่อยๆ ปรับค่าแรงดันเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนกระทั่งถึงค่าแรงดันพิกัด

3. บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ได้

$$V_{nl} = 220 \text{ V}$$

$$I_{nl} = 0.83 \text{ A}$$

$$P_{nl} = 27 \text{ W (1 Phase)}$$

$$n_r = 1495 \text{ rpm}$$

สมการที่เกี่ยวข้องในการคำนวณหาจรรยาสมมูลภายในมอเตอร์ที่ใช้ทดสอบ

$$R_{eq} = \frac{P_{br}}{I_{br}^2}$$

$$Z_{br} = \frac{V_{br}}{I_{br}}$$

$$X_{br} = (Z_{br}^2 - R_{eq}^2)^{1/2}$$

$$R_2 = R_{eq} - R_1$$

$$X_{eq} = \frac{f}{f_{br}} X_{br}$$

ตารางที่ 4.1 แสดงการแจกแจงระสมของ X_{eq}

| NEMA Design | X_1 | X_2 |
|-------------|-------------|-------------|
| A | $0.5X_{eq}$ | $0.5X_{eq}$ |
| B | $0.4X_{eq}$ | $0.6X_{eq}$ |
| C | $0.3X_{eq}$ | $0.7X_{eq}$ |
| D | $0.5X_{eq}$ | $0.5X_{eq}$ |
| Wound rotor | $0.5X_{eq}$ | $0.5X_{eq}$ |

มอเตอร์ที่นำมาทดสอบเป็นแบบ Class B

$$X_1 = 0.4X_{eq}$$

$$X_2 = 0.6X_{eq}$$

$$\theta_{nl} = \cos^{-1} \left[\frac{P_{nl}}{V_{nl} I_{nl}} \right]$$

$$\bar{E} = \frac{V_{nl}}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ - I_{nl} \theta_{nl} (R_1 + jX_1)$$

$$S_{nl} = \frac{n_s - n_{nl}}{n_s}$$

$$\bar{I}_2 = \frac{\bar{E}_1}{\frac{R_2}{s} + jX_2}$$

$$P_c = P_{nl} - I_1^2 R_1 - I_2^2 \frac{R_2}{s}$$

$$R_c = \frac{E_1^2}{P_c}$$

$$Q_m = V_{nl} I_{nl} \sin(\theta_{nl}) - I_1^2 X_1 - I_2^2 X_2$$

$$X_m = \frac{E_1^2}{Q_m}$$

นำสมการข้างต้นหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในโปรแกรมแมทเด็ปจะได้ว่า

$$R_1 = 18.30 \, \Omega$$

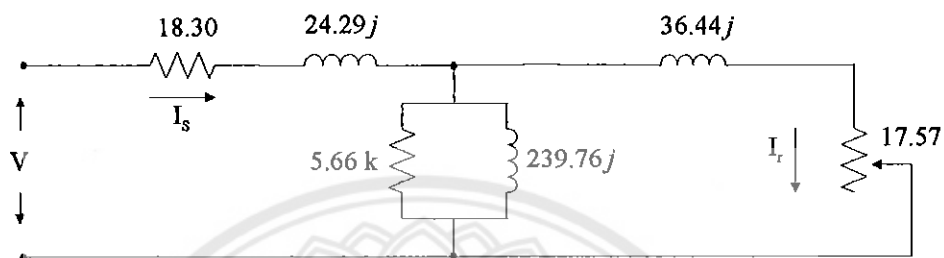
$$R_2 = 17.57 \, \Omega$$

$$X_1 = 24.29 \, \Omega$$

$$X_2 = 36.44 \, \Omega$$

$$R_c = 5.66 \, \text{k}\Omega$$

$$X_m = 239.76 \, \Omega$$



รูปที่ 4.4 วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ทดสอบ



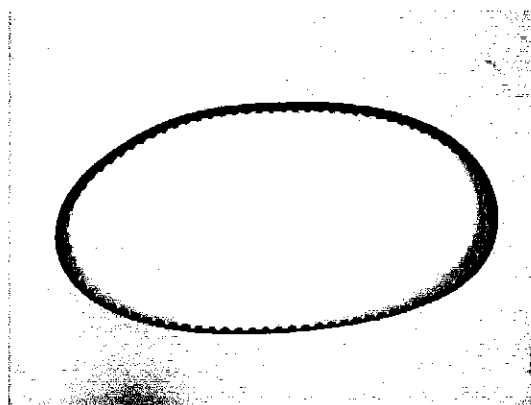
4.2 อุปกรณ์ในการทดสอบ



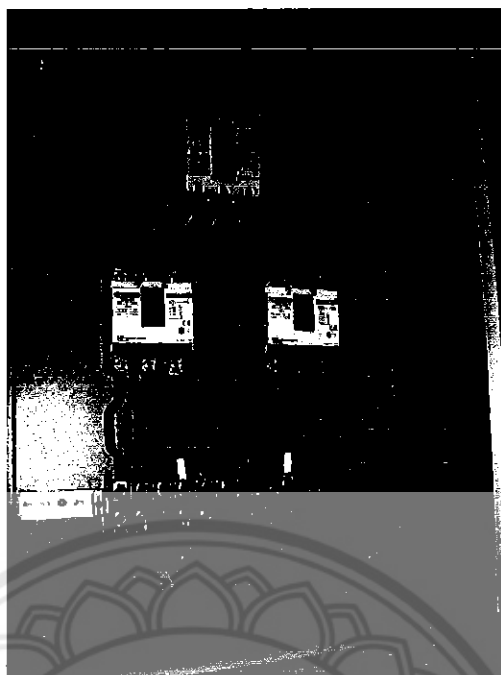
รูปที่ 4.5 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส



รูปที่ 4.6 เครื่องอิเล็กทรอนิกส์ โทร ไดนาโมมิเตอร์



รูปที่ 4.7 สายพาน



รูปที่ 4.8 แหล่งจ่ายไฟฟ้า



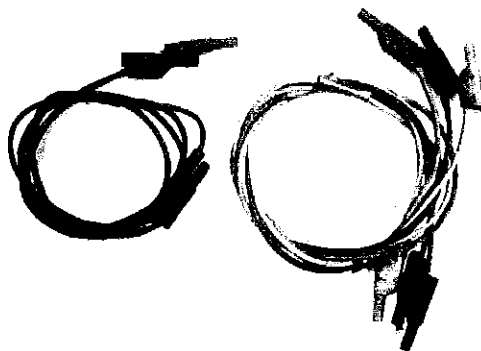
รูปที่ 4.9 เครื่องวัดและวิเคราะห์ฮาร์มอนิก



รูปที่ 4.10 แคลมป์วัดกระแสไฟฟ้า



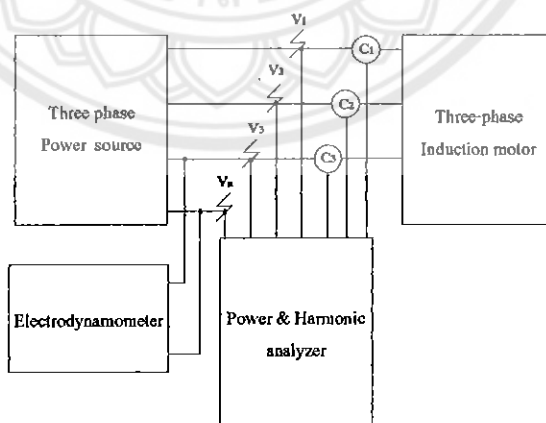
รูปที่ 4.11 สายวัดแรงดัน



รูปที่ 4.12 สายต่อมอเตอร์และเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ โทรโดนาโมมิเตอร์

4.3 วิธีการทดสอบ

- 1 นำมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เครื่องอิเล็กทรอนิกส์ โทรโดนา โมมิเตอร์ แหล่งจ่ายไฟฟ้า ต่อตามรูปที่ 4.9
- 2 ต่อสายพานระหว่างชุดวัดค่าแรงบิดด้วยแม่เหล็ก ไฟฟ้ากับมอเตอร์เหนี่ยวนำ
- 3 เปิดแหล่งจ่ายไฟฟ้า แล้วค่อยๆ หมุนชุดวัดค่าแรงบิด ไปเรื่อยๆ จนกว่าวัดค่ากระแสของมอเตอร์ได้ถึงพิกัดสูงสุด แล้วเก็บค่าแรงบิดไว้
- 4 ต่อแคลมป์วัดกระแส สายวัดแรงดัน และเครื่องวัดและวิเคราะห์ฮาร์มอนิก เข้าด้วยกัน
- 5 นำแคลมป์วัดกระแสเฟส A เฟส B และเฟส C
- 6 นำสายวัดแรงดันที่ขั้วสายไฟของมอเตอร์ โดยสีแดง เฟส A สีเหลืองเฟส B สีน้ำเงินเฟส C และสีดำต่อเข้ากับสายนิวทรัล
- 7 แบ่งค่าแรงบิดสูงสุดที่วัดได้ในข้อที่ 3 แบ่งเป็น 100 % แล้วใช้เครื่องวัดและวิเคราะห์ฮาร์มอนิกเก็บค่าทุก 5% ของแรงบิด โดยเริ่มจับเวลาขณะเริ่มกดปุ่ม REC ของเครื่องวัดและวิเคราะห์ฮาร์มอนิกเมื่อครบตามเวลาที่กำหนด ให้กดปุ่ม REC อีกครั้ง แล้วเครื่องจะทำการบันทึกข้อมูลทำซ้ำไปเรื่อยๆ จนกว่าจะครบ 100% ของโหลด
8. เมื่อบันทึกค่าครบตามที่ต้องการแล้ว นำเครื่องวัดและวิเคราะห์ฮาร์มอนิกไปทำการดาวน์โหลดข้อมูลลงในคอมพิวเตอร์ โดยต่อสาย USB การดาวน์โหลดข้อมูลจะต้องมีการลงไดรฟ์เวอร์ก่อน ซึ่งการลงไดรฟ์เวอร์จะอธิบายไว้ในภาคผนวก



รูปที่ 4.13 การต่อมอเตอร์และเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ โทรโดนา โมมิเตอร์

4.4 ผลการทดสอบ

จากการทดสอบดังกล่าวได้ทำการบันทึกค่า แรงดันสาย แรงดันเฟส ค่ากระแสของแต่ละเฟส และค่ากำลังไฟฟ้าของมอเตอร์เอาไว้ เพื่อนำค่าดังกล่าวมาทำการทดสอบในแบบจำลองของโปรแกรมในบทที่ 3 ดังนั้นผลการทดสอบที่ได้ตามตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.2 ค่าแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์เทียบกับโหลด

| โหลด% | แรงดันเฟสA(V) | แรงดันเฟสB(V) | แรงดันเฟสC(V) |
|-------|---------------|---------------|---------------|
| 0 | 223.32 | 225.49 | 222.99 |
| 5 | 220.75 | 225.43 | 222.91 |
| 10 | 225.05 | 225.30 | 222.80 |
| 15 | 225.09 | 225.31 | 222.77 |
| 20 | 224.97 | 225.38 | 222.75 |
| 25 | 220.29 | 224.97 | 222.39 |
| 30 | 226.82 | 227.05 | 224.51 |
| 35 | 220.00 | 220.34 | 217.71 |
| 40 | 226.74 | 227.12 | 234.42 |
| 45 | 220.98 | 221.27 | 222.46 |
| 50 | 221.60 | 221.85 | 219.34 |
| 55 | 227.24 | 228.88 | 226.20 |
| 60 | 221.68 | 225.50 | 226.10 |
| 65 | 222.00 | 226.38 | 226.09 |
| 70 | 228.67 | 229.00 | 226.23 |
| 75 | 221.58 | 226.58 | 226.02 |
| 80 | 228.60 | 228.86 | 226.09 |
| 85 | 228.44 | 228.52 | 225.72 |
| 90 | 228.54 | 228.74 | 225.69 |
| 95 | 228.61 | 228.84 | 225.68 |
| 100 | 228.50 | 228.66 | 225.61 |

ตารางที่ 4.3 ค่ากระแสไฟฟ้าของมอเตอร์เทียบกับโหลด

| โหลด% | $I_1(A)$ | $I_2(A)$ | $I_3(A)$ |
|-------|----------|----------|----------|
| 0 | 1.05 | 0.90 | 0.90 |
| 5 | 1.01 | 0.90 | 0.90 |
| 10 | 1.00 | 0.90 | 0.90 |
| 15 | 1.00 | 0.90 | 0.90 |
| 20 | 1.00 | 0.90 | 0.90 |
| 25 | 1.01 | 0.90 | 0.90 |
| 30 | 1.00 | 0.90 | 0.90 |
| 35 | 0.96 | 0.87 | 0.87 |
| 40 | 1.00 | 0.90 | 0.90 |
| 45 | 0.96 | 0.89 | 0.92 |
| 50 | 0.96 | 0.91 | 0.87 |
| 55 | 1.03 | 0.93 | 0.90 |
| 60 | 0.96 | 0.99 | 0.90 |
| 65 | 0.94 | 1.01 | 0.90 |
| 70 | 1.00 | 0.99 | 0.90 |
| 75 | 0.96 | 1.03 | 0.97 |
| 80 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 85 | 1.10 | 1.00 | 1.00 |
| 90 | 1.10 | 1.00 | 1.00 |
| 95 | 1.10 | 1.01 | 1.00 |
| 100 | 1.10 | 1.09 | 1.03 |

ตารางที่ 4.4 ค่ากำลังไฟฟ้าของมอเตอร์เทียบโหลด

| โหลด% | $P_1(W)$ | $P_2(W)$ | $P_3(W)$ |
|-------|----------|----------|----------|
| 0 | 434.70 | 391.43 | 393.21 |
| 5 | 384.26 | 210.05 | 343.41 |
| 10 | 384.02 | 346.25 | 343.43 |
| 15 | 383.41 | 345.83 | 343.25 |
| 20 | 384.09 | 346.45 | 343.41 |
| 25 | 382.18 | 344.27 | 342.25 |
| 30 | 384.03 | 309.06 | 340.41 |
| 35 | 383.69 | 345.78 | 343.13 |
| 40 | 382.31 | 344.845 | 342.27 |
| 45 | 379.55 | 342.96 | 339.77 |
| 50 | 379.41 | 342.92 | 360.58 |
| 55 | 377.40 | 339.81 | 337.15 |
| 60 | 374.58 | 374.74 | 334.41 |
| 65 | 370.56 | 371.05 | 330.94 |
| 70 | 364.85 | 365.48 | 326.27 |
| 75 | 361.37 | 362.16 | 355.80 |
| 80 | 386.32 | 351.66 | 352.62 |
| 85 | 379.78 | 345.40 | 335.44 |
| 90 | 368.53 | 335.32 | 337.14 |
| 95 | 364.47 | 331.62 | 327.13 |
| 100 | 359.46 | 359.46 | 320.41 |

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าแรงบิดและความเร็วรอบ

| โหลด % | แรงบิด (N-m) | ความเร็วรอบ (rpm) |
|--------|--------------|-------------------|
| 0 | 0 | 1495 |
| 5 | 0 | 1495 |
| 10 | 0 | 1495 |
| 15 | 0.01 | 1482 |
| 20 | 0.04 | 1482 |
| 25 | 0.08 | 1480 |
| 30 | 0.13 | 1478 |
| 35 | 0.2 | 1475 |
| 40 | 0.3 | 1470 |
| 45 | 0.43 | 1466 |
| 50 | 0.56 | 1461 |
| 55 | 0.69 | 1456 |
| 60 | 0.82 | 1451 |
| 65 | 0.98 | 1444 |
| 70 | 1.16 | 1435 |
| 75 | 1.34 | 1427 |
| 80 | 1.52 | 1418 |
| 85 | 1.74 | 1408 |
| 90 | 1.91 | 1398 |
| 95 | 2.11 | 1388 |
| 100 | 2.36 | 1375 |

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินโครงการ

ในโครงการนี้เริ่มจากการศึกษาหลักการการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับแรงบิด กำลังไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ จากนั้นศึกษาการทำงานของโปรแกรมและออกแบบให้สอดคล้องกับการทดสอบจริง ซึ่งได้มีการเก็บค่าโดยใช้เครื่องวัดและวิเคราะห์ฮาร์โมนิก เมื่อนำค่าต่างๆจาก โปรแกรมเปรียบเทียบกับค่าทดสอบจริงจะพบว่า ค่าจากแบบจำลองและค่าจากการทดสอบนั้นมีค่าแตกต่างกันต่างกัน โดยค่าที่แตกต่างกันนั้นอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

จากแบบจำลองใน โปรแกรมเมทเล็บสามารถวิเคราะห์กราฟคุณลักษณะต่างๆของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสตั้งแต่สภาวะมอเตอร์เริ่มหมุนจนถึงสภาวะความเร็วเชิง โครนัสการทดสอบจริง โดยใช้เครื่องวัดและวิเคราะห์ฮาร์โมนิกจะแสดงค่าต่างๆในรูปแบบข้อมูลตัวเลข โดยที่เครื่องจะทำการบันทึกข้อมูลทุกๆสองวินาทีจึงทำให้ข้อมูลที่ได้อาจจะไม่มีความละเอียดแต่ผลจากการจำลองพบว่าค่าที่ได้นั้นมีความละเอียดซึ่งสามารถนำมาแสดงเป็นกราฟคุณลักษณะที่มีความละเอียด เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาผลตอบสนองของแรงบิด กำลังไฟฟ้า ที่สภาวะ โหลดระดับต่างๆ โดยที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ได้ ผลที่ได้จากแบบจำลองนั้นสามารถใช้อ้างอิงกับมอเตอร์จริงได้ เนื่องจากนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆของมอเตอร์จากการทดสอบวงจรสมมูลมาใช้ในแบบจำลองและสามารถเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์เพื่อดูผลตอบสนอง ได้ทันทีเพื่อนำ ไปประยุกต์ใช้ต่อไป

ค่าที่ได้จากการทดสอบยังมีความคลาดเคลื่อนจาก โปรแกรมเนื่องจากมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบเกิดความร้อนระหว่างการทดสอบและเครื่องวัดทาง ไฟฟ้าที่มีความเสื่อมสภาพส่งผลให้วัดค่าพารามิเตอร์ที่ได้มีความคลาดเคลื่อนทำให้ผลการทดสอบจริงกับผลการทดสอบจาก โปรแกรมเกิดความแตกต่างกัน

5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข

ขณะทำการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้เครื่องวัดและวิเคราะห์ฮาร์มอนิก ค่าที่ได้ไม่มีความต่อเนื่องเมื่อปรับ โหลดที่ระดับต่างๆ เนื่องจากมอเตอร์มีความร้อน ส่งผลให้ค่าต่างๆ ผิดพลาด ระหว่างการทดสอบจึงต้องมีการพักมอเตอร์เพื่อให้เย็นลงจากนั้นจึงทำการทดสอบและเก็บค่าต่อไป

5.3 แนวทางการพัฒนาต่อไป

โปรแกรมที่ใช้สร้างแบบจำลองสามารถหาค่าพารามิเตอร์และกราฟคุณลักษณะต่างๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสขนาดเล็ก โดยที่ค่าผิดพลาดที่ยอมรับได้ ดังนั้นแนวทางพัฒนาคือ การพัฒนาโปรแกรมให้สามารถประยุกต์ใช้กับมอเตอร์ที่มีขนาดใหญ่ต่อไป



เอกสารอ้างอิง

- [1] Chr-Mun Ong, "Dynamic Simulation of Electric Machinery", Prentice-Hall PTR ,1998
- [2] STEPHEN J.CHAPMAN, "Electric Machinery Fundamentals", McGraw-Hill Education, 2005.
- [3] ดร.ปัญญา ยอดโอวาท "เครื่องกลไฟฟ้ากระแสสลับ" ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ, กรุงเทพฯ, 2535
- [4] ผศ.สุภชัย สุรินทร์วงศ์ "อินตักซ์นมอเตอร์ระบบ 3 เฟส " สำนักพิมพ์ ศ.ศ.ท, กรุงเทพฯ, 2542
- [5] ทรงฤทธิ์ ศิริวัฒนา "เครื่องกลไฟฟ้ากระแสสลับ1 " สำนักพิมพ์ หจก.เอช-เอน การพิมพ์ , กรุงเทพฯ, 2534
- [6] ผศ.กัมปนาท รตเวสสนันท์ "เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1" ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2547

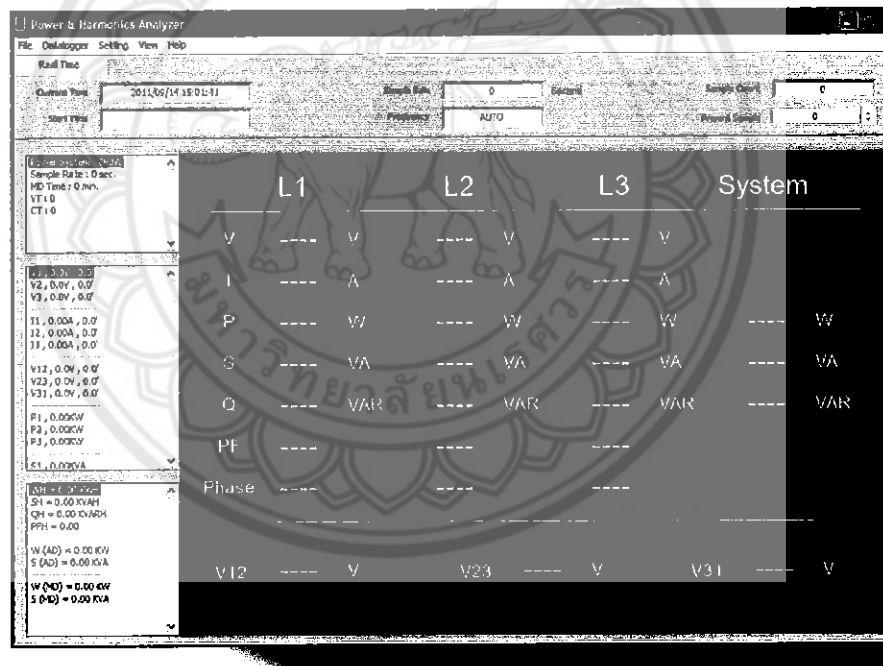




การดาวน์โหลดข้อมูล

1. ไล่แผ่น ไดรฟ์เวอร์และทำการติดตั้งโปรแกรมของเครื่องวัดและวิเคราะห์ฮาร์มอนิก
2. เชื่อมต่อตัวเครื่องวัดและวิเคราะห์ฮาร์มอนิกกับคอมพิวเตอร์
3. ทำการเลือกไฟล์ที่ต้องการโหลดจากตัวเครื่อง
 - 3.1 กดปุ่ม SETUP ที่ตัวเครื่อง เลือกตรงฟังก์ชันดาวน์โหลดไฟล์
 - 3.2 กดปุ่มลูกศรซ้าย ขวา เพื่อเลือก ไฟล์ที่ต้องการดาวน์โหลด
 - 3.3 เปิดโปรแกรมจากคอมพิวเตอร์
- 4 ทำการดาวน์โหลดจากโปรแกรม

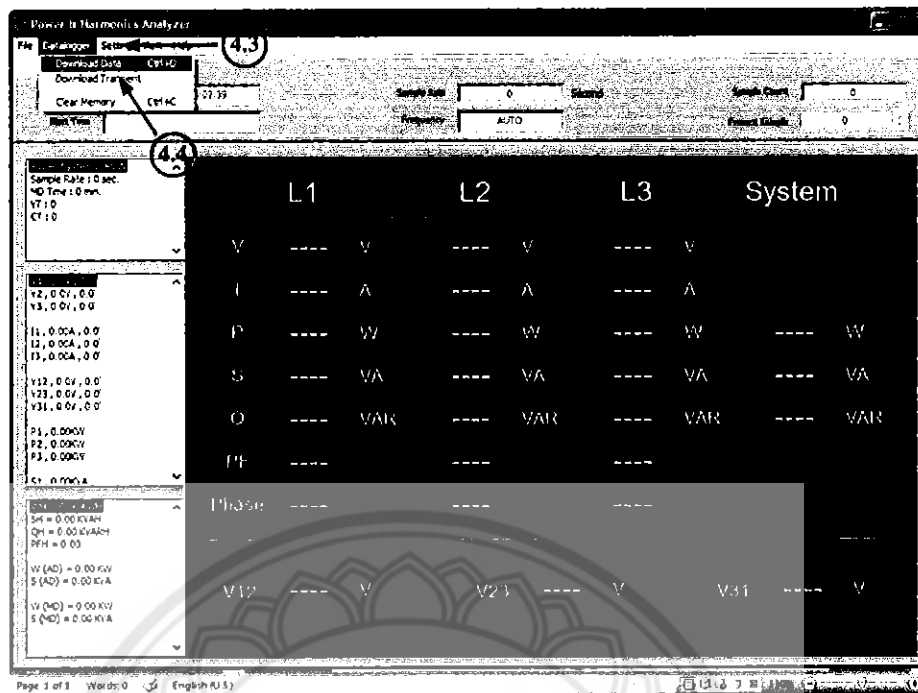
4.1 เลือกเปิดโปรแกรม



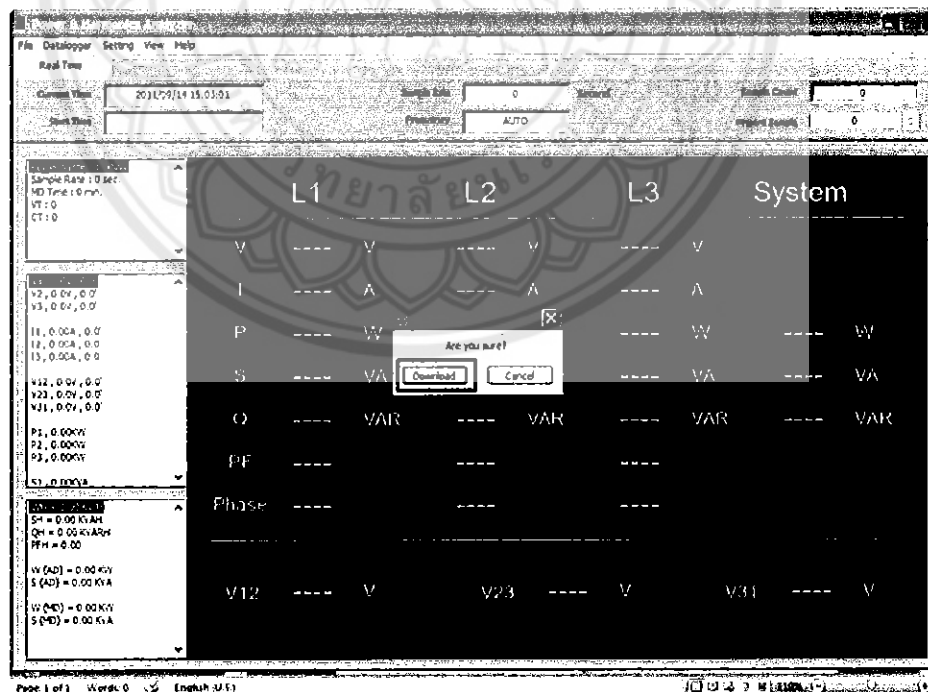
4.2 กดปุ่ม ENTER ตรงหน้าต่าง Serial Port Number

4.3 เลือก Data logger

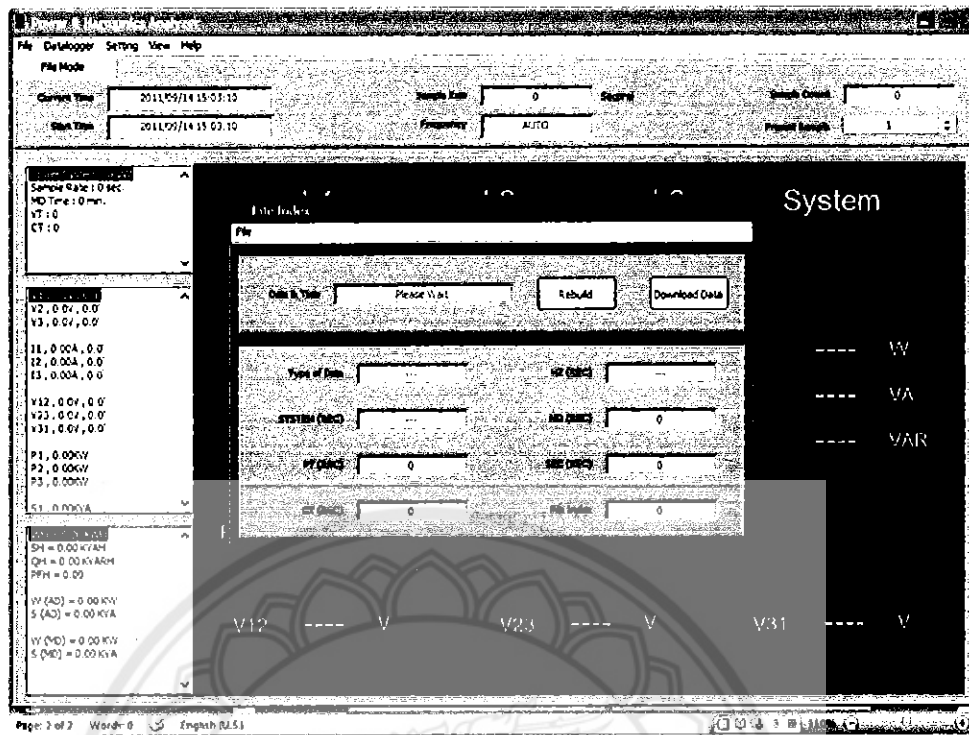
4.4 เลือก Download Data



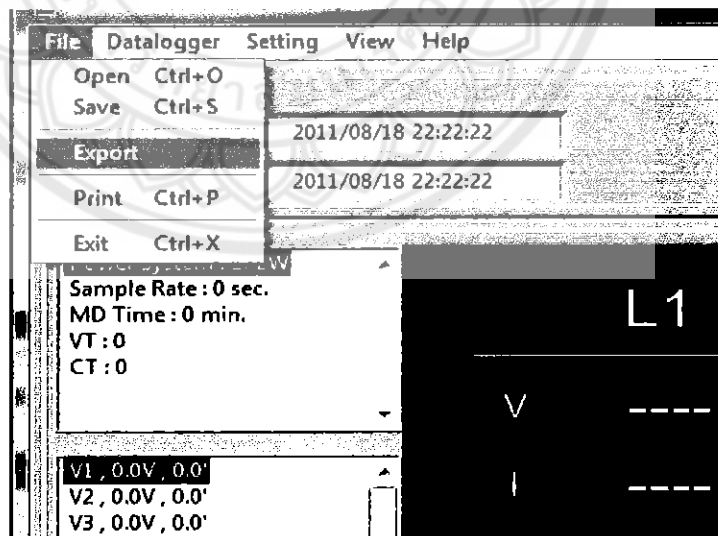
4.5 เลือก Download บริเวณหน้าต่างของ โปรแกรม



4.6 ตรวจสอบตัวเลขช่อง File Index ตรงตามไฟล์ที่เลือกในตัวเครื่องที่เลือกหรือไม่ ถ้าตรงกด Download



4.7 เมื่อทำการดาวน์โหลดเสร็จ โปรแกรมจะทำการโหลดข้อมูลจากตัวเครื่องเพื่อเก็บในโปรแกรม ต้องทำการ Export ไฟล์ก่อน เพื่อบันทึกข้อมูลเป็นไฟล์ Microsoft Excel



4.8 ตั้งชื่อ ไฟล์ แล้วเลือกแฟ้มที่ต้องการบันทึก



การหาค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ไฟล์ E1.M

```

p=4; f=50; design='B';

%Locked rotor
Vbr=79; Ibr=1.12; Pbr=45; fbr=50;

%No_load
Vnl=220; Inl=0.83; Pnl=27; nnl=1495;

Req=Pbr/Ibr^2; Zbr=Vbr/Ibr; Xeq=f/fbr*sqrt(Zbr^2-Req^2);
R1=18.3; R2pr=Req-R1;
if design=='B'; X1=0.4*Xeq; X2pr=0.6*Xeq;
elseif design=='C'; X1=0.3*Xeq; X2pr=0.7*Xeq;
else; X1=0.5*Xeq; X2pr=0.5*Xeq;
end
thetanl=acos(Pnl/Vnl/Inl); ns=120*50/p; s=(ns-nnl)/ns;
E1=Vnl-Inl*exp(-j*thetanl)*(R1+j*X1); I2pr=E1/(R2pr/s+j*X2pr);
E1=abs(E1); I2pr=abs(I2pr);
Pc=Pnl-Inl^2*R1-I2pr^2*R2pr/s; Rc=E1^2/Pc;
if Pc<0; disp('CHECK FOR DATA ERROR - ESPECIALLY NO-LOAD SPEED'); end
Qm=Vnl*Inl*sin(thetanl)-Inl^2*X1-I2pr^2*X2pr; Xm=E1^2/Qm;
Parameters=[' R1 ' ' R2pr ' ' X1 ' ' X2pr ' ' Rc ' ' Xm ' ]
format short e
[R1 R2pr X1 X2pr Rc Xm]

```

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้หาผลตอบสนองต่างๆ

ไฟล์ Parameter . M

| | |
|-----------------------------------|---|
| $S_b = 528;$ | |
| $Prated = 370;$ | |
| $Vrated = 380;$ | % rated line to line voltage in V |
| $pf = 0.7;$ | |
| $Irated = Sb/(sqrt(3)*Vrated);$ | % rated rms current |
| $P = 4;$ | % number of poles |
| $frated = 50;$ | % rated frequency in Hz |
| $wb = 2*pi*frated;$ | % base electrical frequency |
| $we = wb;$ | |
| $wbm = 2*wb/P;$ | % base mechanical frequency |
| $Tb = Sb/wbm;$ | % base torque |
| $Zb = Vrated*Vrated/Sb;$ | %base impedance in ohms |
| $Vm = Vrated*sqrt(2/3);$ | % magnitude of phase voltage |
| $Vb = Vm;$ | % base voltage |
| $Tfactor = (3*P)/(4*wb);$ | % factor for torque expression |
| $rs = 18.3;$ | % stator wdg resistance in ohms |
| $xls = 24.293;$ | % stator leakage reactance in ohms |
| $xplr = 36.44;$ | % rotor leakage reactance |
| $xm = 239.76;$ | %stator magnetizing reactance |
| $rpr = 17.58;$ | % referred rotor wdg resistance in ohms |
| $xM = 1/(1/xm + 1/xls + 1/xplr);$ | |
| $J = 0.1;$ | % rotor inertia in kg m ² |
| $H = J*wbm*wbm/(2*Sb);$ | % rotor inertia constant in secs. |
| $Domega = 0;$ | % rotor damping coefficient |

การหาค่าผลตอบสนองที่โรเตอร์ที่เกิดจากการเปลี่ยนพลังงานฟ้าเป็นพลังงานกล

ไฟล์ M1.M

```
Psiqso = 0;
```

```
Psipqro = 0;
```

```
Psidso = 0;
```

```
Psipdro = 0;
```

```
wrbywbo = 0;
```

```
tstop = 2;
```

```
tmech_time = [0 0.8 0.8 1.2 1.2 1.6 1.6 tstop];
```

```
tmech_value = [0 0 0 0 0 0 0];
```



โปรแกรม M2.M

```

vas = Vrated/sqrt(3); % Vrated line-to_line voltage

vth = abs((j*xm/(rs + j*(xls + xm)))*vas);

zth = (j*xm*(rs + j*xls)/(rs + j*(xls + xm)));

rth = real(zth); xth = imag(zth);

rpr1 = 0.8*sqrt(rth^2 + (xth + xplr)^2);

rprm = 0.4*sqrt(rth^2 + (xth + xplr)^2);

rprv = [rpr rprm rpr1];

s = (1:-0.025:0.025);

N=length(s);

for n=1:N

sn = s(n);

wr(n)=2*we*(1-sn)/P;

for nrpr = 1:3

rprm = rprv(nrpr);

zin=(rs +j*xls) + j*xm*(rprm/sn + j*xplr)/(rprm/sn + j*(xm + xplr));

ias = vas/zin;

Sin =3*vas*conj(ias);

pin = real(Sin);

pfin(nrpr,n)=cos(-angle(ias));

iin(nrpr,n)=abs(ias);

te(nrpr,n)=(3*P/(2*we))*(vth^2*rprm/sn)/((rth + rprm/sn)^2 + (xth + xplr)^2);

pe(nrpr,n)=te(nrpr,n)*wr(n);

eff(nrpr,n)=100*pe(nrpr,n)/pin;

end

end

```

```

size(te);

z=[0 0 0];

inl=vas/(rs +j*(xls+xm));

inlm = abs(inl);

inla = cos(-angle(inl));

iin=[iin [inlm inlm inlm]'];

pfin=[pfin [inla inla inla]'];

eff=[eff z'];

te=[te z'];

pe=[pe z'];

s=[s 0];

wr=[wr 2*we/P]*60/2/pi;

N=size(wr);

M=size(te);

Subplot(3,1,1)

plot(wr,iin(1,:),'-')

xlabel('Rotor speed in rpm')

ylabel('Stator current in Amps')

Subplot(3,1,2)

plot(wr,te(1,:),'-')

xlabel('Rotor speed in rpm')

ylabel('Developed torque in Nm')

Subplot(3,1,3)

plot(wr,pe(1,:),'-')

xlabel('Rotor speed in rpm')

ylabel('Developed power in Watts')

```

การหาค่าผลตอบสนองที่แกนเพลลาของโรเตอร์

ไฟล์ M1.M

```
Psiqso = 0;
```

```
Psipqro = 0;
```

```
Psidso = 0;
```

```
Psipdro = 0;
```

```
wrbywbo = 0;
```

```
tstop = 2;
```

```
tmech_time = [0 0.8 0.8 1.2 1.2 1.6 1.6 tstop];
```

```
tmech_value = [-0.117 -0.117 -0.117 -0.117 -0.117 -0.117 -0.117 -0.117];
```



ไฟล์ M2.M

```
vas = Vrated/sqrt(3); % Vrated line-to_line voltage

vth = abs((j*xm/(rs + j*(xls + xm)))*vas);

zth = (j*xm*(rs + j*xls)/(rs + j*(xls + xm)));

rth = real(zth);

xth = imag(zth);

rpr1 = 0.8*sqrt(rth^2 + (xth + xplr)^2);

rprm = 0.4*sqrt(rth^2 + (xth + xplr)^2);

rprv = [rpr rprm rpr1];

s = (1:-0.025:0.025);

N=length(s);

for n=1:N

sn = s(n);

wr(n)=2*we*(1-sn)/P;

for nrpr = 1:3

rprm = rprv(nrpr);

zin=(rs + j*xls) + j*xm*(rprm/sn + j*xplr)/(rprm/sn + j*(xm + xplr));

ias = vas/zin;

Sin =3*vas*conj(ias);

pin = real(Sin);

pfin(nrpr,n)=cos(-angle(ias));

iin(nrpr,n)=abs(ias);

te(nrpr,n)=(3*P/(2*we))*(vth^2*rprm/sn)/((rth + rprm/sn)^2 + (xth + xplr)^2)-0.117;

pe(nrpr,n)=te(nrpr,n)*wr(n);

eff(nrpr,n)=100*pe(nrpr,n)/pin;

end

end

size(te);
```

```

z=[0 0 0];
inl=vas/(rs +j*(xls+xm));
inlm = abs(inl);
inla = cos(-angle(inl));
iin=[iin [inlm inlm inlm]'];
pfin=[pfin [inla inla inla]'];
eff=[eff z'];
te=[te z'];
pe=[pe z'];
s=[s 0];
wr=[wr 2*we/P]*60/2/pi;
N=size(wr);
M=size(te);
Subplot(3,1,1)
plot(wr,iin(1,:),'-')
xlabel('Rotor speed in rpm')
ylabel('Stator current in Amps')
Subplot(3,1,2)
plot(wr,te(1,:),'-')
xlabel('Rotor speed in rpm')
ylabel('Developed torque in Nm')
Subplot(3,1,3)
plot(wr,pe(1,:),'-')
xlabel('Rotor speed in rpm')
ylabel('Developed power in Watts')

```

ประวัติผู้ดำเนินโครงการ



ชื่อ นายอัชรพล แก้วมงคล
 ภูมิลำเนา 41 หมู่ 1 ต. โยนก อ. เชียงแสน จ. เชียงราย
 ประวัติการศึกษา
 — จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนเชียงแสนวิทยาคม
 จ. เชียงราย
 — ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4
 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยนเรศวร

Email: num_auc@hotmail.com



ชื่อ นายเกรียงศักดิ์ สุขศรี
 ภูมิลำเนา 27 หมู่ 9 ต. ห้วยซ้อ อ. เชียงของ จ. เชียงราย
 ประวัติการศึกษา
 — จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนห้วยซ้อวิทยาคม
 รัชมังคลาภิเษก จ. เชียงราย
 — ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4
 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยนเรศวร

Email: Brion_Nissan_Skyline@hotmail.com