

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การทำนายสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในสถานะแรงดันไม่สมดุล

โดยใช้มุมของตัวประกอบแรงดันไม่สมดุล

โดยใช้มุมของตัวประกอบแรงดันไม่สมดุลแบบเชิงซ้อน

**PERFORMANCE PREDICTION OF THREE-PHASE INDUCTION MOTORS
UNDER UNBALANCED VOLTAGE CONDITION USING THE ANGLE OF
COMPLEX VOLTAGE UNBALANCE FACTOR**



ธีรยุทธ เสงี่ยมศักดิ์

TEERAYUT SA-NGIAMSAK

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน...65453.....

วัน,เดือน,ปี...11 ต.ค. 2549.....

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2737-3

**PERFORMANCE PREDICTION OF THREE-PHASE INDUCTION MOTORS
UNDER UNBALANCED VOLTAGE CONDITION USING THE ANGLE OF
COMPLEX VOLTAGE UNBALANCE FACTOR**

TEERAYUT SA-NGIAMSAK

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2006

ISBN 974-15-2737-3

COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

Thesis Title	Performance Prediction of Three-Phase Induction motors Under Unbalanced Voltage Condition Using The Angle of Complex Voltage Unbalance Factor
Student	Mr. Teerayut Sa-ngiamsak
Student ID	45061012
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2006
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Prapas Prisuwana

ABSTRACT

The Performance Prediction of Three-Phase Induction motors Under Unbalanced Voltage Condition Using The Angle of Complex Voltage Unbalance Factor is presented. The index of voltage unbalance used in this paper is the complex voltage unbalance factor (CVUF) that consists of the magnitude and the angle. In addition to formulation and discussion of the motor operating characteristics under voltage unbalance, special emphasis is placed on the effect of the angle of CVUF on the motor. It is found that the angle of the CVUF is also an important factor that merits particular attention in analyzing voltage unbalance issues.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ทั้งนี้เนื่องด้วยการให้คำแนะนำและชี้แนะเป็นอย่างดีจาก รศ. ประภาส ไพรสุวรรณ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ และผู้วิจัยขอขอบพระคุณบริษัท MITSUBISHI ELEVATOR ASIA CO.,LTD โดยเฉพาะอย่างยิ่งแผนก QA คุณบุญเลิศ เต็กสงวน, คุณชัยพร มาลาจำปี, คุณจาตุรนต์ วิภาดา และเพื่อนพนักงานทุกคนที่ห้อง Calibration ที่ช่วยเหลือและเอื้อเพื่อเครื่องมือและสถานที่ในการทดลองครั้งนี้ และขอขอบพระคุณ ดร. สิริทิพย์ ธีรวิสิน ที่ช่วยให้คำแนะนำในเรื่องการทดลอง และที่จะลืมไปเสียมิได้คือขอขอบพระคุณ พระคุณของแม่ ประพิศ เสี่ยมศักดิ์ และญาติพี่น้องทุกคนที่คอยเป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนตลอดมา

ธีรยุทธ เสี่ยมศักดิ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 ทฤษฎีของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	5
2.1 ระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟส.....	5
2.2 มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส.....	9
2.2.1 โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส.....	9
2.2.2 สนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส.....	13
2.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส.....	19
2.4 การทดสอบวงจรสมมูลย์.....	21
2.4.1 No load test.....	22
2.4.2 Block rotor test.....	23
2.5 กำลังงานและแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส.....	26
บทที่ 3 การวิเคราะห์หม้อเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล.....	33
3.1 การวิเคราะห์ระบบไม่สมดุลด้วย Symmetrical component.....	33
3.2 ค่าตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล (CVUF).....	45
3.3 มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล.....	49
3.4 กระแส Line และค่าตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล (CVUF).....	52
3.5 ค่ากระแสเตเตอร์เปลี่ยนแปลงสูงสุดในช่วง k_v คงที่ (ΔI_{max}).....	54

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การทดสอบ.....	57
4.1 การทดสอบในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล k_v คงที่ โดย θ_v เปลี่ยนแปลง $0^\circ - 360^\circ$	57
4.1.1 ผลการทดสอบ.....	61
4.2 การทดสอบค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสเตเตอร์สูงสุด (ΔI_{max}).....	64
4.2.1 ผลการทดสอบ.....	64
4.3 การทดสอบอุณหภูมิของขดลวดสเตเตอร์.....	79
4.3.1 ผลการทดสอบ.....	79
4.4 การทดสอบกำลังไฟฟ้าป้อนเข้าภายใต้สภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล.....	81
4.4.1 ผลการทดสอบ.....	81
4.5 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	83
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและเสนอแนะ.....	84
เอกสารอ้างอิง.....	88
ภาคผนวก ก.....	89
ภาคผนวก ข.....	105
ประวัติผู้เขียน.....	111

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงข้อแม้หลักที่เกิดขึ้นของขดลวดสเตเตอร์.....	15
2.2 แสดง Reactance ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ class ต่างๆ.....	25
2.3 แสดงขีดจำกัดของอุณหภูมิเพิ่มตามมาตรฐาน NEMA สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ..... ที่มี Ambient temperature 40°	31
2.4 แสดงอุณหภูมิสูงสุดเต็มพิกัดตามมาตรฐาน NEMA สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ..... ที่มี Ambient temperature 40°	31
4.1 แสดงตำแหน่งบนแกน X-Y และแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสของค่า k_v คงที่ขนาด 6% โดย θ_v เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0° - 360° และมีค่าเพิ่มขึ้นทุกๆ 15°	60
4.2 แสดงกำลังไฟฟ้าป้อนเข้าที่ระดับความไม่สมดุล $k_v \angle \bar{\theta}_v$ % ของมอเตอร์ขนาด 1Hp.....	82
4.3 แสดงกำลังไฟฟ้าป้อนเข้าที่ระดับความไม่สมดุล $k_v \angle \hat{\theta}_v$ % ของมอเตอร์ขนาด 1Hp.....	82
4.4 แสดงกำลังไฟฟ้าป้อนเข้าที่ระดับความไม่สมดุล $k_v \angle \bar{\theta}_v$ % ของมอเตอร์ขนาด 3Hp.....	83
4.5 แสดงกำลังไฟฟ้าป้อนเข้าที่ระดับความไม่สมดุล $k_v \angle \hat{\theta}_v$ % ของมอเตอร์ขนาด 3Hp.....	83

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.27 กระแสเสตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลิป 0.025 ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า..... เมื่อพล็อตด้วยโปรแกรม MATLAB	74
4.28 กระแสเสตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลิป 0.03 ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า..... เมื่อพล็อตด้วยโปรแกรม MATLAB	74
4.29 กระแสเสตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลิป 0.001 ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า..... เมื่อพล็อตด้วยโปรแกรม MATLAB	75
4.30 กระแสเสตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลิป 0.005 ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า..... เมื่อพล็อตด้วยโปรแกรม MATLAB	75
4.31 กระแสเสตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลิป 0.01 ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า..... เมื่อพล็อตด้วยโปรแกรม MATLAB	76
4.32 กระแสเสตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลิป 0.015 ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า..... เมื่อพล็อตด้วยโปรแกรม MATLAB	76
4.33 กระแสเสตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลิป 0.02 ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า..... เมื่อพล็อตด้วยโปรแกรม MATLAB	77
4.34 กระแสเสตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลิป 0.025 ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า..... เมื่อพล็อตด้วยโปรแกรม MATLAB	77
4.35 กระแสเสตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลิป 0.03 ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า..... เมื่อพล็อตด้วยโปรแกรม MATLAB	78
4.36 อุณหภูมิของขดลวดสเตเตอร์เฟส A ของมอเตอร์ 1 แรงม้า.....	79
4.37 อุณหภูมิของขดลวดสเตเตอร์เฟส A ของมอเตอร์ 3 แรงม้า.....	80
5.1 กระแสเสตเตอร์ I_a , I_b , I_c ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้าเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล..... คงที่ขนาด $k_v = 6\%$ และ θ_v เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0° ถึง 360° โดยมอเตอร์ทำงานที่ค่า Slip 0.015	85
5.2 กระแสเสตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลิป 0.015 ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า.....	86

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดง Sequence ของแรงดันไฟฟ้าสามเฟส.....	5
2.2 แสดงระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟสต่อแบบสตาร์ (Star connection).....	6
2.3 แสดงระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟสต่อแบบเดลต้า (Delta connection).....	7
2.4 แสดงการต่อขดลวดแบบสตาร์สามเฟส (Star isolated neutral).....	7
2.5 แสดงส่วนประกอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	9
2.6 แสดงส่วนประกอบของสเตเตอร์.....	10
2.7 แสดงส่วนประกอบของโรเตอร์แบบกรงกระรอก.....	11
2.8 แสดงโครงสร้างการต่อของโรเตอร์แบบพันขดลวดหรือเฟสวางโรเตอร์.....	12
2.9 ทฤษฎีกฎมือขวาของการเหนี่ยวนำ.....	13
2.10 ขั้วแม่เหล็กและความเข้มสนามแม่เหล็กของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ.....	14
2.11 แสดงขดลวดสเตเตอร์และขั้วแม่เหล็กที่มีจำนวนขั้วแม่เหล็ก 2 ขั้ว.....	14
2.12 แสดงสนามแม่เหล็กหมุนที่มุมเฟส 0° ที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง Start.....	16
2.13 แสดงสนามแม่เหล็กหมุนที่มุมเฟส 60° ที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่ 1.....	16
2.14 แสดงสนามแม่เหล็กหมุนที่มุมเฟส 120° ที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่ 2.....	17
2.15 แสดงสนามแม่เหล็กหมุนที่มุมเฟส 360° ที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่ 6.....	17
2.16 แสดงการหมุนของโรเตอร์ตามสนามแม่เหล็กหมุน.....	18
2.17 แสดงวงจรสมมูลย์ต่อเฟสของโรเตอร์เมื่อทำการย้าย (Transfer).....	19
พารามิเตอร์ต่างๆมาอยู่ทางด้านสเตเตอร์	
2.18 แสดงวงจรสมมูลย์ต่อเฟสของสเตเตอร์.....	20
2.19 แสดงวงจรสมมูลย์ต่อเฟสของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส.....	20
2.20 แสดงวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้ในการอธิบาย.....	21
การทดสอบ No load test และ Block rotor test	
2.21 แสดงวงจรการทดสอบ No load test และ Block rotor test ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	22
2.22 แสดงวงจรสมมูลย์ที่ได้จากการทดสอบแบบ No load test.....	23
2.23 แสดงวงจรสมมูลย์ที่ได้จากการทดสอบแบบ Block rotor test.....	24
2.24 แสดงวงจรการทดสอบด้วยวิธี VI-method.....	25
2.25 แผนผังการส่งผ่านกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	26
2.26 แสดงวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้ในการพิจารณากำลังไฟฟ้า.....	27

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 แสดง Sequence ของเฟสเซอร์เดิม (Original phaser) ที่เป็น Sequence ABC.....	33
3.2 แสดง Sequence ของ Positive sequence component.....	34
3.3 แสดง Sequence ของ Negative sequence component.....	34
3.4 แสดง Sequence ของ Zero sequence component.....	35
3.5 แสดงความสัมพันธ์ของ Symmetrical component ของแรงดันไฟฟ้าของทั้งสามเฟส.....	36
3.6 ความสัมพันธ์ของ Positive sequence component เมื่อเขียนให้อยู่ในรูปของ V_a	37
3.7 ความสัมพันธ์ของ Negative sequence component เมื่อเขียนให้อยู่ในรูปของ V_a	37
3.8 ความสัมพันธ์ของ Zero sequence component เมื่อเขียนให้อยู่ในรูปของ V_a	37
3.9 แสดงภาวะไฟฟ้าของการต่อแบบ Star isolated neutral.....	41
3.10 วิธีของจุดของค่าคงที่ k_v และ θ_v ในกราฟแกน x และแกน y	48
3.11 วงจรสมมูลย์ต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อได้รับ Positive sequence voltage.....	49
3.12 วงจรสมมูลย์ต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อได้รับ Negative sequence voltage.....	51
3.13 วงจรสมมูลย์ต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อได้รับ Zero sequence voltage.....	51
3.14 กระแสสเตเตอร์ I_a, I_b, I_c ของมอเตอร์เมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลคงที่..... ขนาด $k_v = 6\%$ และ θ_v เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ $0^\circ - 360^\circ$ โดยมอเตอร์ทำงานที่ค่า slip 0.015	55
3.15 ช่วงของ ΔI_{max} ที่เปลี่ยนแปลงตาม k_v เมื่อมอเตอร์ทำงานที่ค่า slip 0.015.....	56
4.1 ไคอะแกรมที่ใช้ในการทดสอบ.....	57
4.2 แสดงวงจรที่ใช้ในการทดสอบ.....	58
4.3 วิธีและตำแหน่งของ k_v คงที่ขนาด 6% โดย θ_v เปลี่ยนแปลง..... ตั้งแต่ $0^\circ - 360^\circ$ และมีค่าเพิ่มขึ้นทุกๆ 15°	59
4.4 กระแสสเตเตอร์ของเฟส A, B, C ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้าที่เป็นฟังก์ชันกับ θ_v โดยที่ θ_v เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0° ถึง 360° สำหรับค่า $k_v = 6\%$ และค่าสลิปเท่ากับ 0.015	61
4.5 กระแสสเตเตอร์ของเฟส A, B, C ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้าที่เป็นฟังก์ชันกับ θ_v โดยที่ θ_v เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0° ถึง 360° สำหรับค่า $k_v = 6\%$ และค่าสลิปเท่ากับ 0.015	62
4.6 กระแส Stator ของเฟส A, B, C ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้าที่เป็นฟังก์ชันกับ θ_v โดยที่..... θ_v เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0° ถึง 360° สำหรับค่า $k_v = 6\%$ และค่าสลิปเท่ากับ 0.015 โดย ใช้โปรแกรม MATLAB	63

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 กระแส Stator ของเฟส A, B, C ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้าที่เป็นฟังก์ชันกับ θ_r โดยที่ θ_r เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0° ถึง 360° สำหรับค่า $k_r = 6\%$ และค่าสลลิปเท่ากับ 0.015 โดยใช้โปรแกรม MATLAB	63
4.8 กระแสสเตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลลิป 0.001 ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า	64
4.9 กระแสสเตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลลิป 0.005 ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า	65
4.10 กระแสสเตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลลิป 0.01 ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า	65
4.11 กระแสสเตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลลิป 0.015 ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า	66
4.12 กระแสสเตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลลิป 0.02 ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า	66
4.13 กระแสสเตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลลิป 0.025 ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า	67
4.14 กระแสสเตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลลิป 0.03 ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า	67
4.15 กระแสสเตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลลิป 0.001 ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า	68
4.16 กระแสสเตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลลิป 0.005 ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า	68
4.17 กระแสสเตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลลิป 0.01 ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า	69
4.18 กระแสสเตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลลิป 0.015 ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า	69
4.19 กระแสสเตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลลิป 0.02 ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า	70
4.20 กระแสสเตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลลิป 0.025 ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า	70
4.21 กระแสสเตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลลิป 0.03 ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า	71
4.22 กระแสสเตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลลิป 0.001 ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า เมื่อพล็อตด้วยโปรแกรม MATLAB	71
4.23 กระแสสเตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลลิป 0.005 ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า เมื่อพล็อตด้วยโปรแกรม MATLAB	72
4.24 กระแสสเตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลลิป 0.01 ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า เมื่อพล็อตด้วยโปรแกรม MATLAB	72
4.25 กระแสสเตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลลิป 0.015 ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า เมื่อพล็อตด้วยโปรแกรม MATLAB	73
4.26 กระแสสเตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลลิป 0.02 ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า เมื่อพล็อตด้วยโปรแกรม MATLAB	73

บทที่ 1

บทนำ

ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของประเทศไทยที่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโรงงานอุตสาหกรรมและบ้านพักอาศัยจะเกิดความไม่สมดุลอยู่ตลอดเวลา ทั้งนี้เนื่องมาจากการต่อเข้าและปลดออกของภาระทางไฟฟ้าหนึ่งเฟส ซึ่งส่วนใหญ่แล้วเป็นภาระทางไฟฟ้าในส่วนของบ้านพักอาศัย ทำให้ภาระทางไฟฟ้าในระบบอุตสาหกรรม ซึ่งส่วนใหญ่เป็นระบบสามเฟส ได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล ภาระทางไฟฟ้าส่วนใหญ่ที่ใช้ในระบบอุตสาหกรรมก็คือมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ผลของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลจะทำให้มอเตอร์มีอุณหภูมิสูงขึ้น ความเร็วรอบลดลง กระแสเสตเตอร์ไม่สมดุล ประสิทธิภาพต่ำ อายุการใช้งานสั้นลง ในการวัดระดับความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้านั้น โดยทั่วไปแล้วจะวัดด้วยวิธี PVU หรือ Percent Voltage Unbalance ซึ่งถูกนิยามโดย NEMA (National Electrical Manufacturers Association) โดยจะมีค่าเท่ากับ

$$\%PVU = \frac{\text{Max} \left\{ \left| V_a - V_{avg} \right|, \left| V_b - V_{avg} \right|, \left| V_c - V_{avg} \right| \right\}}{V_{avg}} \times 100 \quad (1.1)$$

ค่า %PVU นี้จะมีเฉพาะขนาด ซึ่งที่ค่าระดับความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าคงที่ค่าหนึ่ง สามารถมีค่าแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสเปลี่ยนแปลงได้หลายค่า ซึ่งเป็นผลทำให้เมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ซึ่งเป็นภาระทางไฟฟ้าส่วนใหญ่ที่ใช้ในระบบอุตสาหกรรมได้รับแรงดันไฟฟ้าที่ไม่สมดุลนี้ ส่งผลให้มีกระแสเสตเตอร์เปลี่ยนแปลงได้หลายค่าขึ้นอยู่กับระดับของแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสที่ป้อนเข้า ถึงแม้ว่าจะได้รับแรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดของความไม่สมดุลที่เท่ากันก็ตาม ซึ่งเป็นผลทำให้การบอกระดับความไม่สมดุลด้วยวิธีนี้ไม่สามารถบ่งบอกถึงระดับความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าได้ครบถ้วนสมบูรณ์ ซึ่งจะส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ไม่เหมือนกัน

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอวิธีการวิเคราะห์และประเมินค่าผลกระทบที่เกิดกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล โดยเน้นพิจารณาที่มุมของตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลแบบเชิงซ้อน Complex Voltage Unbalance Factor (CVUF) ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์สองตัวคือ k_v และ θ_v ซึ่งถูกใช้ในการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล ซึ่งไม่ค่อยมีการพูดถึงมากนักในการศึกษาเกี่ยวกับระบบแรงดันไฟฟ้าที่ไม่สมดุล การวิเคราะห์ปรากฏการณ์ของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลด้วยวิธี CVUF นี้สามารถบ่งบอกถึงระดับความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าได้ครบถ้วนสมบูรณ์กว่าวิธี PVU ซึ่งจะส่งผลต่อการทำนายคุณสมบัติทางกายภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลได้ครบถ้วนสมบูรณ์มากกว่า

ครบถ้วนสมบูรณ์กว่าวิธี PVU ซึ่งจะส่งผลต่อการทำนายคุณสมบัติทางกายภาพของมอเตอร์ไฟฟ้า เหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลได้ครบถ้วนสมบูรณ์มากกว่า

นับตั้งแต่มีการผลิตและส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบ 3 เฟสเป็นต้นมานั้น ความไม่สมดุลของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 3 เฟส น่าจะเกิดขึ้นพร้อมๆ กันมาตลอด ทั้งนี้มีสาเหตุเนื่องมาจากการต่อเข้าและปลดออกของภาระทางไฟฟ้า 1 เฟส ที่ต่ออยู่กับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า หรืออาจเกิดจากสาเหตุอื่นๆ อีกมากมาย การบอกระดับของความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าด้วยวิธี CVUF นี้ ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์สองตัวคือ k_v และ θ_v โดย k_v เป็นขนาดของค่าตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล ส่วน θ_v คือมุมเฟสของค่าตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลซึ่งจะมีค่าตั้งแต่ $0^\circ - 360^\circ$ สามารถวิเคราะห์ผลกระทบของกระแสที่เกิดกับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลได้ โดยเมื่อมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล k_v คงที่ค่าหนึ่ง จะทำให้กระแสเดเตอร์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามมุม θ_v เมื่อพิจารณาที่ค่าสลิปเท่ากัน ซึ่งทำให้ทราบว่าค่ากระแสเดเตอร์จะมีค่าสูงที่สุดที่มุม θ_v ค่าหนึ่ง และจะมีค่าต่ำที่สุดที่มุม θ_v อีกค่าหนึ่ง โดยค่ากระแสเดเตอร์ที่มีค่าสูงที่สุดนี้จะถูกพิจารณาให้เป็นกรณีที่เลวร้ายที่สุด (worst case) เพื่อป้องกันมอเตอร์ไม่ให้มีความร้อนสูงเกินไป ซึ่งจะพบว่าค่า k_v และ θ_v จำเป็นที่จะต้องถูกนำมาพิจารณาในการวิเคราะห์ผลกระทบเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลที่เกิดกับมอเตอร์

การบอกระดับความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าในรูปของค่าตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล Complex Voltage Unbalance Factor (CVUF) สามารถนิยามได้จาก อัตราส่วนระหว่าง Negative-sequence voltage phasor (V_n) กับ Positive-sequence voltage phasor (V_p) ค่า CVUF นี้เป็นปริมาณเชิงซ้อนที่ประกอบด้วยขนาดและมุมทางไฟฟ้า

$CVUF = k_v = V_n / V_p = k_v \angle \theta_v$ เมื่อ k_v คือค่าตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล Complex Voltage Unbalance Factor (CVUF) ของแรงดันไฟฟ้าต่อเฟส ซึ่งเป็นปริมาณเชิงซ้อนที่ประกอบด้วยขนาดและมุมทางไฟฟ้า โดยที่ k_v เป็นขนาดของค่าตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล ส่วน θ_v คือมุมเฟสของค่าตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล การวิเคราะห์มอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าใช้วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าและสมการในสภาวะแรงดันไฟฟ้าสมดุล และใช้วิธี symmetrical component คำนวณเมื่อมอเตอร์ได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล โดยสามารถแบ่งวงจรสมมูลของมอเตอร์ได้เป็น 3 วงจรคือ positive sequence circuit, negative sequence circuit และ zero sequence circuit แต่เนื่องจากว่ามอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบต่อแบบ star isolate neutral ดังนั้นจึงไม่นำ zero sequence circuit มาพิจารณา

เนื่องจากว่าการบอกระดับความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าด้วยวิธี CVUF ที่ทำการศึกษานี้จะต้องบอกทั้งขนาด k_v และมุม θ_v ดังนั้นการจ่ายแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลให้กับมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบจึงจำเป็นต้องอ้างอิงถึงทั้งขนาดและมุมด้วย โดยจะจ่ายแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลที่มีขนาดของความไม่สมดุลตั้งแต่ 0%, 3%, 6%, 9% และ 12% ตามลำดับ และมีมุมเฟสของค่าตัวประกอบแรง

ดันไฟฟ้าไม่สมดุลตั้งแต่ $0^\circ - 360^\circ$ โดยให้มีค่าเพิ่มขึ้นทุกๆ 15° เพื่อศึกษาถึงกระแสเดเตอร์ที่เกิดขึ้นในแต่ละเฟสเมื่อมอเตอร์ทำงานที่ค่าสลิปคงที่ค่าหนึ่ง และศึกษาถึงมุม θ_v ที่ทำให้มีค่ากระแสเดเตอร์สูงที่สุดเพื่อที่จะนำไปวิเคราะห์ผลกระทบต่ออุณหภูมิของขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ต่อไป นอกจากนี้แล้วยังทำการศึกษาถึงผลกระทบของกำลังไฟฟ้าป้อนเข้าสามเฟสของมอเตอร์ภายใต้แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลค่าต่างๆ ที่การทำงานของมอเตอร์ที่ค่าสลิปคงที่ค่าหนึ่ง และเพื่อความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของการทดสอบมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบมี 2 พิกัดกำลังได้แก่มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้า 4 ขั้วแม่เหล็กไฟฟ้า Frame No. 80M, IP 44, Insulation class F พิกัดแรงดันไฟฟ้า 380V ความถี่ 50 Hz กระแส 1.9A ความเร็วรอบ 1400 รอบต่อนาที โรเตอร์เป็นแบบ Squirrel Cage และมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้า 4 ขั้วแม่เหล็กไฟฟ้า Frame No. 100L, IP 55, Insulation class F พิกัดแรงดันไฟฟ้า 380V ความถี่ 50 Hz กระแส 5A ความเร็วรอบ 1420 รอบต่อนาที โรเตอร์เป็นแบบ Squirrel Cage ในการทดสอบ ต่อมอเตอร์แบบ Star isolated neutral ห้องที่ใช้ในการทดสอบไม่ได้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น ในแต่ละครั้งของการทดสอบมีอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิห้องเท่ากัน

ขั้นตอนการศึกษาเริ่มจากการศึกษาถึงผลกระทบของกระแสเดเตอร์ในแต่ละเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล k_v คงที่ขนาด 6% โดยให้ θ_v เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0° ถึง 360° โดยมีค่าเพิ่มขึ้นทุกๆ 15° ที่ค่าสลิปคงที่ค่าหนึ่งเท่ากับ 0.015 โดยทำการคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสที่จะต้องนำไปปรับ variable transformer เพื่อให้ได้ขนาดและมุมของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลที่ต้องการจากโปรแกรม MATLAB แล้วจึงทำการทดสอบ แล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการจำลองการทดสอบจากคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB จากนั้นทำการศึกษาค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสเดเตอร์สูงสุด (ΔI_{max}) โดยการใช้โปรแกรม MATLAB คำนวณหาค่ามุม $\hat{\theta}_v$ และ $\bar{\theta}_v$ ที่ค่าระดับความไม่สมดุล k_v คงที่ค่าหนึ่งของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบที่ค่าสลิปต่างๆ แล้วนำมาคำนวณหาว่าที่ระดับความไม่สมดุล k_v คงที่ค่าหนึ่งนี้ที่มุม $\hat{\theta}_v$ และ $\bar{\theta}_v$ จะมีแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสเท่ากับเท่าไร เพื่อนำมาใช้ในการปรับ variable transformer โดยในการทดสอบค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสเดเตอร์สูงสุด (ΔI_{max}) นี้จะเน้นทำการทดสอบเฉพาะเฟส A เท่านั้น การทดสอบในขั้นตอนนี้ จะทำการทดสอบมอเตอร์ที่ค่าระดับความไม่สมดุล $k_v = 0, 3, 6, 9, 12\%$ และที่มุม $\theta_v = \hat{\theta}_v$ และ $\bar{\theta}_v$ ตามลำดับ แล้วทำการวัดค่าสูงสุดของกระแสเดเตอร์สูงสุด $I_{max}(max)$ และค่าต่ำสุดของกระแสเดเตอร์สูงสุด $I_{max}(min)$ ที่เกิดขึ้นที่เฟส A โดยจะทำการทดสอบที่ค่า Slip = 0.001, 0.005, 0.01, 0.015, 0.02, 0.025, 0.03 ตามลำดับ แล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการจำลองการทดสอบจากคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB จากนั้นทำการศึกษาถึงผลกระทบของค่าสูงสุดของกระแสเดเตอร์สูงสุด $I_{max}(max)$ ที่มีต่ออุณหภูมิของขดลวดสเตเตอร์ของเฟส A ของมอเตอร์ ค่ากระแส $I_{max}(max)$ นี้มีความสำคัญมากในการพิจารณาสำหรับกรณีที่เลวร้ายที่สุด (worst cases) เพื่อป้องกันมอเตอร์มีความร้อนสูงเกิน

ไป อุณหภูมิที่เครื่องจักรไฟฟ้าทำงานมีความสัมพันธ์โดยตรงกับอายุการใช้งานของเครื่องจักรไฟฟ้า เพราะการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและเวลา การเสื่อมสภาพนี้เป็นปรากฏการณ์ทางเคมีของ ขบวนการออกซิเดชัน (oxidation process) ซึ่งเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ทำให้ ฉนวนไฟฟ้ากรอบและสูญเสีย ความคงทนไดอิเล็กทริก (dielectric strength)

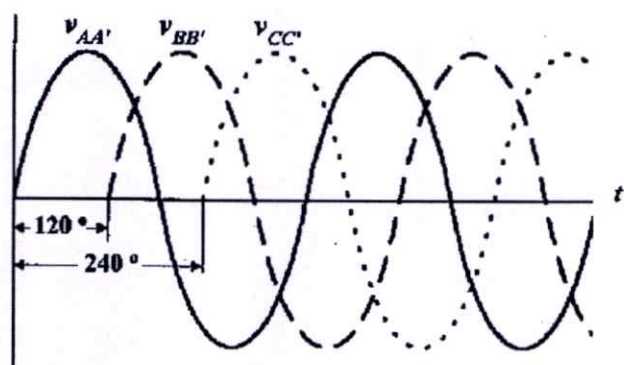
นอกจากนี้แล้วยังทำการศึกษาถึงผลกระทบของกำลังไฟฟ้าป้อนเข้าสามเฟสของมอเตอร์ภายใต้แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลค่าต่างๆคือที่ระดับความไม่สมดุล $k_v = 0, 3, 6, 9, 12\%$ และที่มุม $\theta_v = \hat{\theta}_v$ และ $\bar{\theta}_v$ ตามลำดับ โดยมอเตอร์ทำงานที่ค่าสลิปคงที่ค่าหนึ่งเท่ากับ 0.001, 0.015, 0.03 ตามลำดับ ซึ่งจะทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์ของผลกระทบต่างๆที่มีต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลได้ดียิ่งขึ้น

บทที่ 2

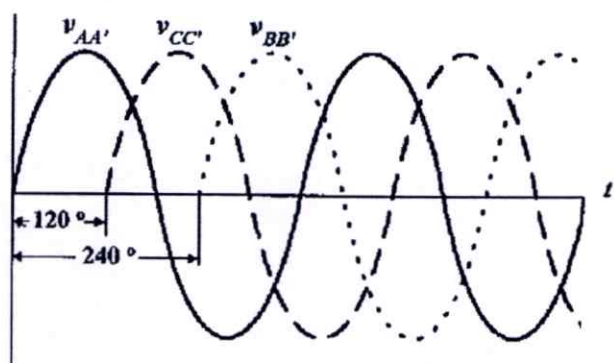
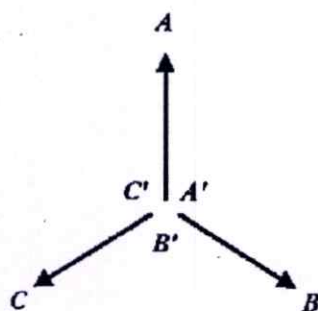
ทฤษฎีของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

2.1 ระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟส

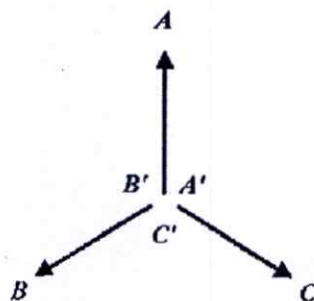
ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในประเทศไทยนั้นเป็นระบบไฟฟ้าสามเฟส ที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายไฟฟ้ายกกับสายไฟฟ้าเท่ากับ 380V ความถี่เท่ากับ 50 Hz และมีระดับแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายไฟฟ้ายกกับนิวทรัล (neutral) เท่ากับ 220V ซึ่งในระบบไฟฟ้าที่สมดุล จะมีแรงดันไฟฟ้าเท่ากันทั้ง 3 เฟส โดยที่จะมีมุมเฟสต่างกันไปเฟสละ 120° ทางไฟฟ้า ในระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟสสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทตามลำดับการเรียงกันของแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสคือ Sequence ABC และ Sequence ACB ดังรูปที่ 2.1



(a) Sequence ABC

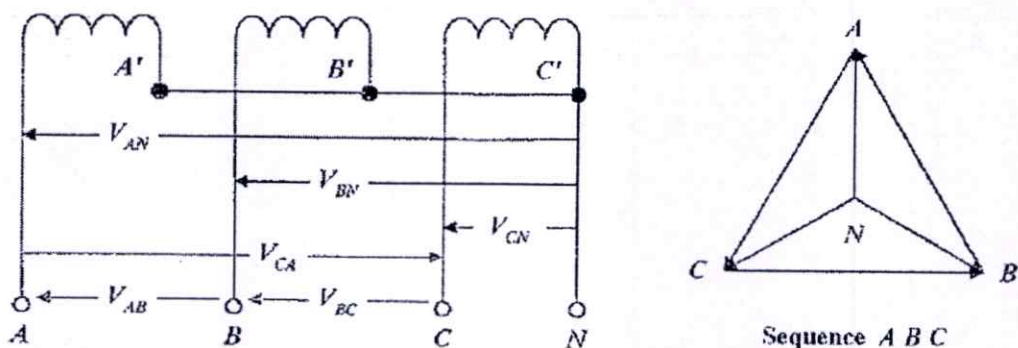


(b) Sequence ACB



รูปที่ 2.1 แสดง Sequence ของแรงดันไฟฟ้าสามเฟส

โดยทั่วไปแล้วเครื่องจักรไฟฟ้าสามเฟสจะทำการต่อขดลวดใน 2 ลักษณะคือ การต่อแบบสตาร์ (Star connection) และการต่อแบบเดลต้า (Delta connection) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพิกัดของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้า



รูปที่ 2.2 แสดงระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟสต่อแบบสตาร์ (Star connection)

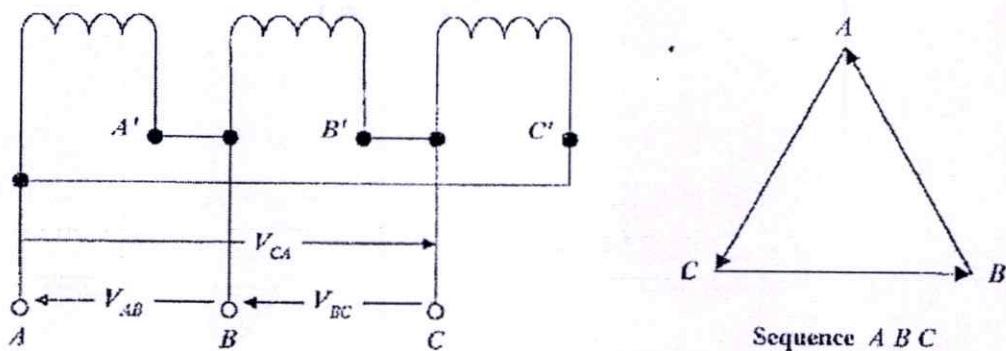
จากรูปที่ 2.2 แสดงการต่อขดลวดแบบสตาร์ (Sequence ABC)

$$V_{AA'} = V_{BB'} = V_{CC'} = \text{Phase voltage (coil voltage)} \quad (2.1)$$

$$V_{AN} = V_{AA'} \angle 90^\circ, \quad V_{BN} = V_{BB'} \angle -30^\circ, \quad V_{CN} = V_{CC'} \angle -150^\circ \quad (2.2)$$

$$V_{AB} = V_{BC} = V_{CA} = \text{line voltage (line to line voltage)} \quad (2.3)$$

$$V_{AB} = \sqrt{3} V_{AN} \angle 120^\circ, \quad V_{BC} = \sqrt{3} V_{BN} \angle 0^\circ, \quad V_{CA} = \sqrt{3} V_{CN} \angle 240^\circ \quad (2.4)$$

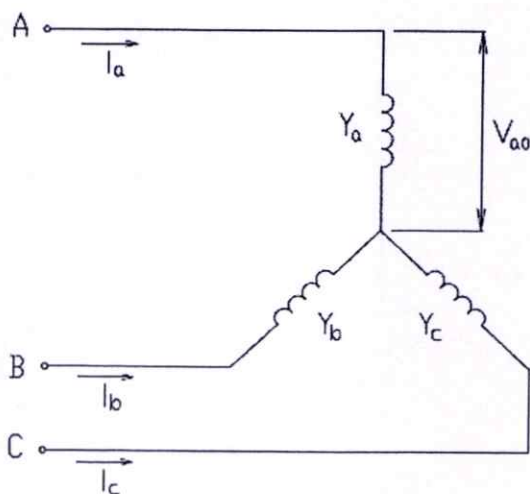


รูปที่ 2.3 แสดงระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟสต่อเคลด้า (Delta connection)

จากรูปที่ 2.3 แสดงการต่อขดลวดแบบเคลด้า (Sequence ABC)

$$V_{AB} = V_{AA'} \angle 120^\circ, \quad V_{BC} = V_{BB'} \angle 0^\circ, \quad V_{CA} = V_{CC'} \angle 240^\circ \quad (2.5)$$

ในการทดสอบจะต่อมอเตอร์แบบสตาร์สามสาย (Star isolated neutral) ซึ่งเมื่อเกิดสถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลขึ้นในระบบ จะทำให้กระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสไม่เท่ากัน และแรงดันไฟฟ้าคร่อมโหลดในแต่ละเฟสไม่เท่ากันด้วย ดังนั้นจะทำให้จุดร่วมในการต่อแบบสตาร์เกิดความต่างศักย์กับจุดนิวตรอน (Neutral) ของระบบเนื่องจากไม่ได้ต่อยู่ด้วยกัน ทำให้แรงดันไฟฟ้าต่อเฟสของระบบไม่เท่ากับ แรงดันไฟฟ้าคร่อมโหลดต่อเฟส ซึ่งความต่างศักย์ระหว่างจุดร่วมในการต่อแบบสตาร์กับจุดนิวตรอน (Neutral) ของระบบนี้เรียกว่า Displacement Neutral Voltage



รูปที่ 2.4 แสดงการต่อขดลวดแบบสตาร์สามเฟส (Star isolated neutral)

จากรูปที่ 2.4 สามารถหาแรงดันตกคร่อมโหลดได้ดังนี้

$$V_{ao} = V_{an} + V_{no} \quad (2.6)$$

$$V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \quad (2.7)$$

$$V_{co} = V_{cn} + V_{no} \quad (2.8)$$

เมื่อ V_{an} , V_{bn} และ V_{cn} คือแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสระหว่างสายไฟกับนิวตรอน (Neutral) ของระบบ และ V_{ao} , V_{bo} และ V_{co} เป็นแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลด วัดเทียบกับจุดต่อร่วมของโหลด เมื่อ V_{no} คือ Displacement Neutral Voltage

$$V_{no} = \frac{V_{an}Y_a + V_{bn}Y_b + V_{cn}Y_c}{Y_a + Y_b + Y_c} \quad (2.9)$$

เนื่องจากค่า Admittance ของมอเตอร์เท่ากันทั้งสามเฟส นั่นคือ $Y_a = Y_b = Y_c$ ดังนั้นจากสมการที่ (2.9) สามารถเขียนเป็นสมการใหม่ได้ดังนี้

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{an} + V_{bn} + V_{cn}) \quad (2.10)$$

ดังนั้นสามารถหาแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดได้โดยการนำค่า V_{no} จากสมการที่ (2.10) ไปแทนในสมการที่ (2.6) – (2.8)

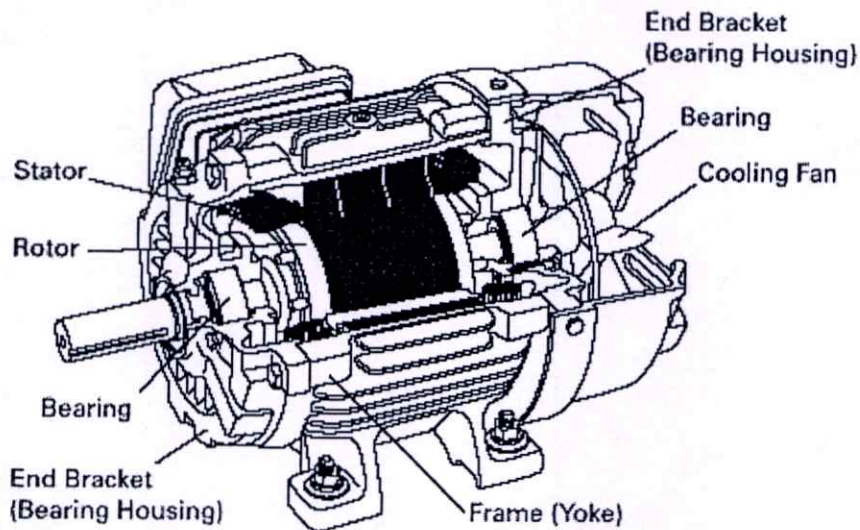
2.2 มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นมอเตอร์ที่นิยมใช้กันมากที่สุด ซึ่งมอเตอร์ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำนี้อาจเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว หรือมอเตอร์เหนี่ยวนำหลายเฟส (Poly Phase Induction Motor) ก็ได้ มอเตอร์เหนี่ยวนำหลายเฟสส่วนใหญ่แล้วจะเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ซึ่งมีข้อดีดังนี้คือ

1. เป็นมอเตอร์ชนิดที่สร้างขึ้นได้ง่าย และทนทาน
2. ราคาไม่แพง
3. มีประสิทธิภาพสูง และไม่มีแปลงถ่านทำให้มีความสูญเสียเนื่องจากความฝืดน้อย
4. ต้องการการดูแลรักษาต่ำ
5. สามารถที่จะเริ่มหมุน (Start) ได้ง่าย โดยเฉพาะชนิดกรงกระรอก

2.2.1 โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญสองส่วนคือ สเตเตอร์ (Stator) หรือส่วนที่อยู่กับที่ และโรเตอร์ (Rotor) หรือส่วนที่หมุน นอกจากนี้แล้วยังประกอบด้วยส่วนประกอบอื่นๆ อีกเช่น bearing, bearing housing, frame, cooling fan โดยมีรายละเอียดดังนี้



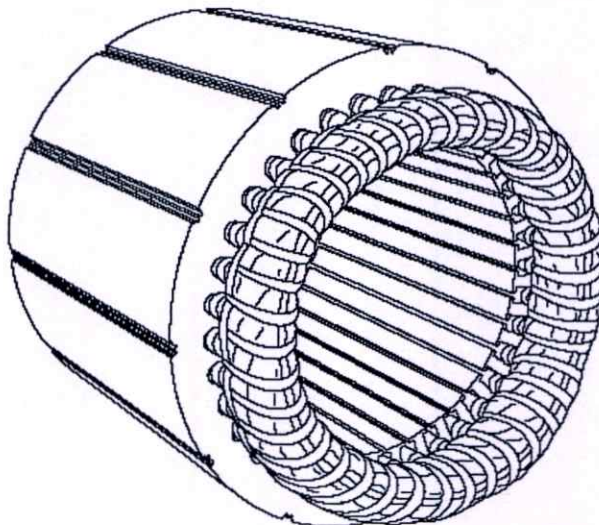
รูปที่ 2.5 แสดงส่วนประกอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

1. สเตเตอร์ (Stator)

สเตเตอร์ (Stator) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ใช้หลักการเดียวกันกับซิงโครนัสมอเตอร์ หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ โดยทำจากแผ่นเหล็กบางๆ อัดซ้อนกันและทำเป็นช่องสลอตไว้บรรจุขดลวด และจำนวนขั้วแม่เหล็กจะเป็นตัวกำหนดความเร็วรอบของมอเตอร์ เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้กับขลวดสเตเตอร์ จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้น ซึ่งจะหมุนด้วยความเร็วเท่ากับ ความเร็วซิงโครนัส โดยที่ความเร็วซิงโครนัสนี้จะมีค่าขึ้นอยู่กับจำนวนขั้วแม่เหล็กในสเตเตอร์และความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้า ดังสมการด้านล่าง

$$N_s = \frac{120f}{p} \quad (2.11)$$

เมื่อเปรียบเทียบหลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแล้ว ก็เปรียบเสมือนกับหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขดลวดทุติยภูมิถูกตัดวงจรด้านหัวและด้านท้ายเอาไว้ เมื่อได้รับสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้นจากขดลวดสเตเตอร์ จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวดโรเตอร์ ซึ่งประกอบด้วยแท่งตัวนำฝังอยู่ในเนื้อเหล็กของโรเตอร์และถูกตัดวงจรด้านหัวและด้านท้ายเอาไว้ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลตัดผ่านสนามแม่เหล็กก็จะทำให้เกิดแรงขึ้นที่ตัวนำของขดลวดโรเตอร์ที่ฝังอยู่ในเนื้อเหล็กของโรเตอร์ ทำให้โรเตอร์หมุนได้



รูปที่ 2.6 แสดงส่วนประกอบของสเตเตอร์

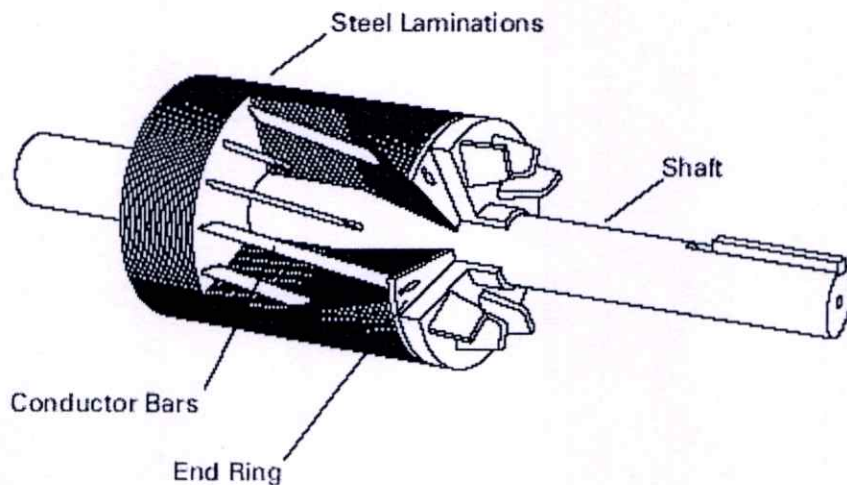
2. โรเตอร์ (Rotor)

โรเตอร์ (rotor) สามารถแบ่งออกได้ 2 ชนิดคือ

2.1 โรเตอร์แบบกรงกระรอก

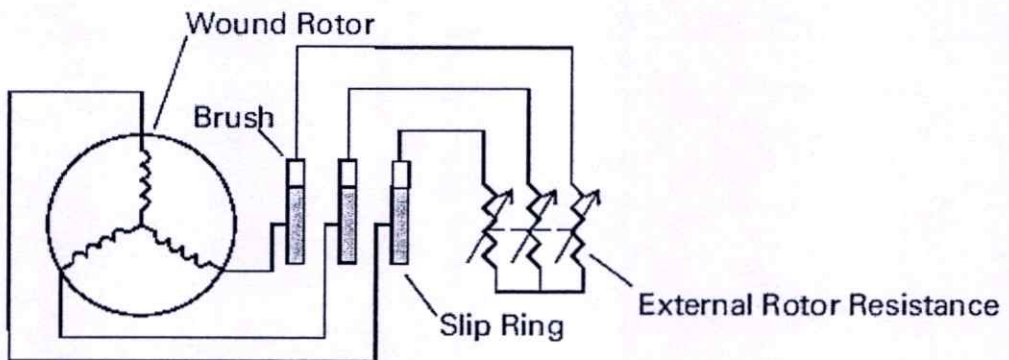
มอเตอร์ที่ใช้โรเตอร์ชนิดนี้เรียกว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก ซึ่งประมาณ 90% ของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะใช้โรเตอร์แบบกรงกระรอก ทั้งนี้เนื่องจากโรเตอร์ชนิดนี้เป็นชนิดที่ทำได้ง่ายและทนทานต่อการใช้งาน โรเตอร์ชนิดนี้ประกอบด้วยแผ่นเหล็กบางๆ (steel lamination) อัดซ้อนกันเป็นรูปทรงกระบอก และถูกทำให้เป็นช่องสล็อตเรียงกันไปตามเส้นรอบวงของโรเตอร์ เพื่อใช้สำหรับฝังหรือบรรจุตัวนำโรเตอร์ (conductor bars) ลงในช่องสล็อตนั้น ตัวนำนี้จะไม่มีลักษณะเป็นเส้นหรือเป็นสาย (wire) แต่จะมีลักษณะเป็นแท่งทองแดงหรืออลูมิเนียมหรืออัลลอย (copper bar or aluminum bar or alloy) โดยในหนึ่งช่องสล็อตจะบรรจุแท่งตัวนำโรเตอร์เพียงหนึ่งแท่งเท่านั้น และที่ปลายทั้งสองของแท่งตัวนำโรเตอร์จะถูกเชื่อมต่อเข้าด้วยกันโดยวงแหวนท้าย (end ring) ซึ่งช่องสล็อตและแท่งตัวนำโรเตอร์นี้จะถูกออกแบบให้มีตำแหน่งไม่อยู่ในลักษณะที่ขนานกับเฟลา แต่จะถูกออกแบบให้วางตัวในลักษณะเฉียงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากการวางตัวในลักษณะเฉียงเล็กน้อยจะทำให้เกิดประโยชน์ดังนี้

1. ช่วยให้มอเตอร์หมุนอย่างรวดเร็ว โดยจะลดการเกิดเส้นแรงแม่เหล็กฮัม (magnetic hum)
2. ช่วยลดอาการสั่นของโรเตอร์อันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กที่ตกค้างอยู่ที่ฟัน (teeth) ของสเตเตอร์กับโรเตอร์ทั้งสอง



รูปที่ 2.7 แสดงส่วนประกอบของโรเตอร์แบบกรงกระรอก

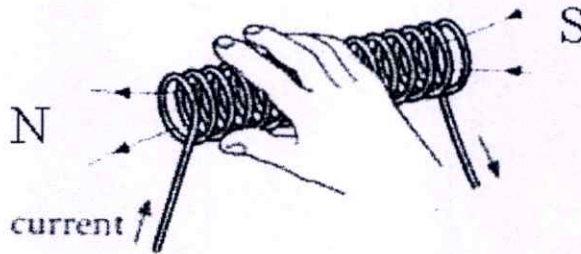
2.2 โรเตอร์แบบพันขดลวด หรือ เฟสวาวโรเตอร์ (Wound Rotor or Phase Wound Rotor) มอเตอร์ที่ใช้โรเตอร์ชนิดนี้เรียกว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำแบบโรเตอร์พันขดลวด หรือ เฟสวาวโรเตอร์ หรือสลลิ่งมอเตอร์ (Wound Rotor or Phase Wound Rotor or Slip-ring Motor) โรเตอร์ชนิดนี้จะมีการพันแบบขดลวดสองชั้นเหมือนกับขดลวดที่ใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ในโรเตอร์ชนิดนี้ภายในจะต่อแบบสตาร์ และมีปลายสายออกมาสามปลายต่อเข้ากับสลลิ่งที่ติดกับเพลลาของโรเตอร์นั้น ผ่านแปรงถ่านไปยังความต้านทานปรับค่าได้ที่อยู่ภายนอกซึ่งต่อแบบสตาร์อยู่ ดังรูปที่ 2.8 คือเมื่อเพิ่มค่าความต้านทานของขดลวดโรเตอร์จะทำให้กระแสไหลผ่านได้น้อยลงซึ่งจะทำให้ความเร็วลดลง และเมื่อลดค่าความต้านทานของขดลวดโรเตอร์จะทำให้กระแสไหลผ่านได้มากขึ้นซึ่งจะทำให้ความเร็วเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างการต่อของโรเตอร์แบบพันขดลวดหรือเฟสวาวโรเตอร์

2.2.2 สนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟสให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้น ซึ่งสนามแม่เหล็กหมุนนี้มีหลักการพื้นฐานมาจากการเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดตัวนำ ตามทฤษฎีกฎมือขวา ซึ่งนิ้วทั้งสี่แทนทิศทางการไหลของกระแสผ่านขดลวด ส่วนนิ้วหัวแม่มือแทนทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ซึ่งจะมีคุณสมบัติเป็นขั้วแม่เหล็กขั้วเหนือ (N) และด้านตรงกันข้ามก็จะมีคุณสมบัติเป็นขั้วแม่เหล็กขั้วใต้ (S)

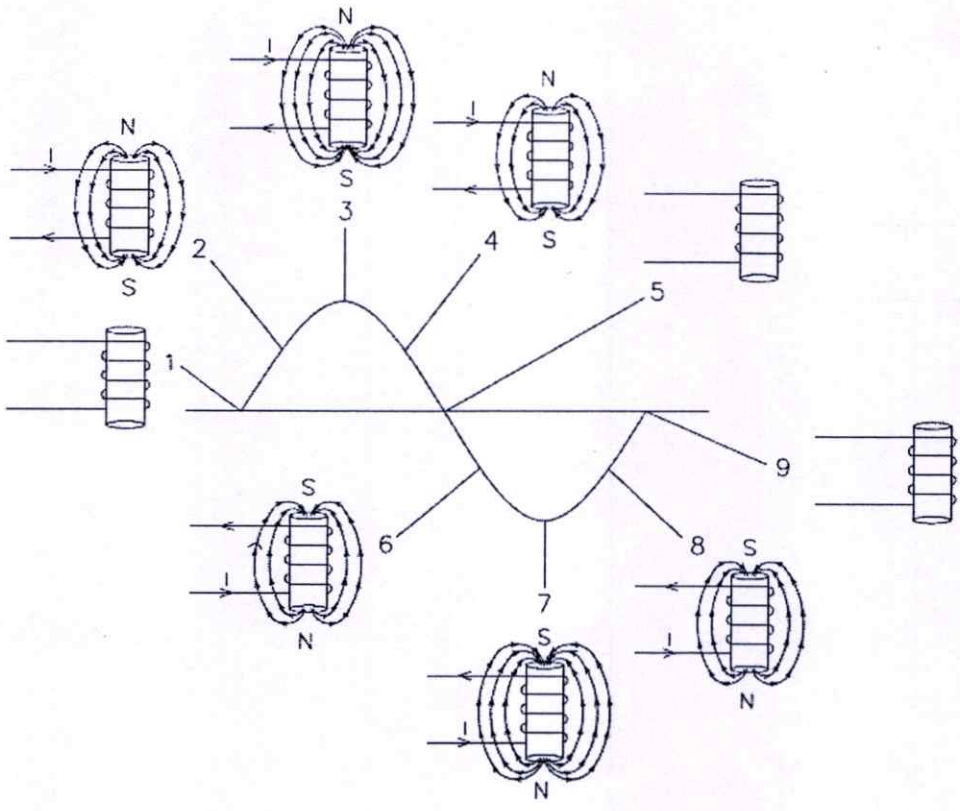


รูปที่ 2.9 ทฤษฎีกฎมือขวาของการเหนี่ยวนำ

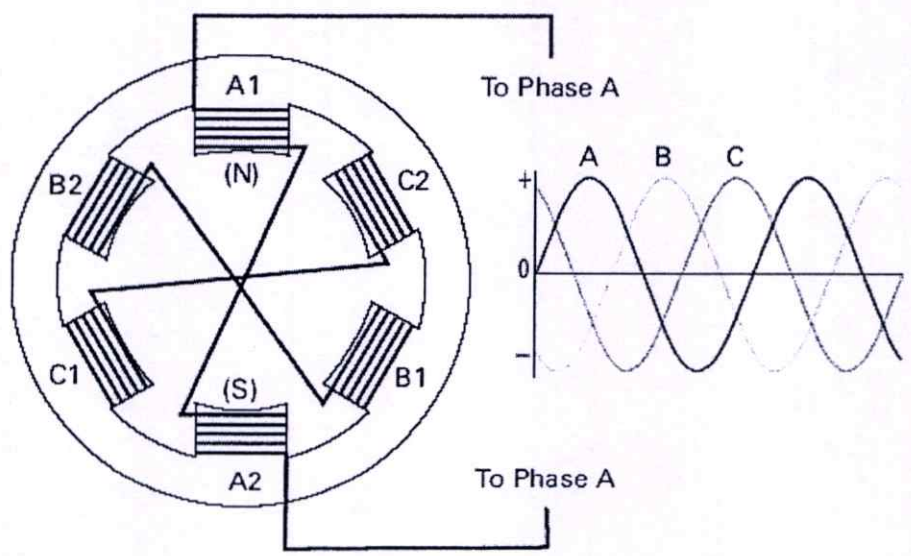
จากรูปที่ 2.9 เป็นขดลวดแกนอากาศซึ่งจะทำให้เกิดความเข้มสนามแม่เหล็กค่าหนึ่ง ซึ่งถ้าเปลี่ยนแกนในของขดลวดเป็นเหล็ก จะทำให้มีความเข้มของสนามแม่เหล็กที่หนาแน่นขึ้น และจำนวนรอบของขดลวดที่มากขึ้นก็จะทำให้มีความเข้มของสนามแม่เหล็กหนาแน่นขึ้นเช่นกัน ซึ่งสามารถอนุมานได้เป็นขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และเนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขดลวดเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นขั้วแม่เหล็กและความเข้มสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจึงมีการเปลี่ยนแปลงตามแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 2.10

ดังที่ได้อธิบายมาแล้วว่าสเตเตอร์ทำจากแผ่นเหล็กบางๆ อัดซ้อนกันและทำเป็นช่องสล็อตไว้บรรจุขดลวด ซึ่งเปรียบเสมือนกับขดลวดที่มีแกนกลางเป็นเหล็ก โดยขดลวดในแต่ละขดจะแสดงอำนาจแม่เหล็กของตัวเองและจะถูกเชื่อมต่อกันเป็นคู่ๆ เมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวด ที่ขดลวดขั้วหนึ่งแสดงอำนาจแม่เหล็กเป็นขั้วเหนือ ส่วนอีกขั้วหนึ่งก็จะแสดงอำนาจแม่เหล็กเป็นขั้วใต้ ดังเช่นตัวอย่างรูปที่ 2.11 เมื่อขั้ว A1 แสดงอำนาจแม่เหล็กเป็นขั้วเหนือ ดังนั้นขั้ว A2 จะแสดงอำนาจแม่เหล็กเป็นขั้วใต้ และเมื่อกระแสไหลกลับทิศทางขั้วแม่เหล็กทั้งสองก็จะสลับกัน

ขดลวดสเตเตอร์จะถูกต่อเข้ากับแรงดันไฟฟ้าสามเฟส โดยจากตัวอย่างรูปที่ 2.11 ขั้ว A จะถูกต่อเข้ากับเฟส A ของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ส่วนขั้ว B, C ก็จะถูกต่อเข้ากับเฟส B และ เฟส C ของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าตามลำดับ



รูปที่ 2.10 ขั้วแม่เหล็กและความเข้มสนามแม่เหล็กของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ



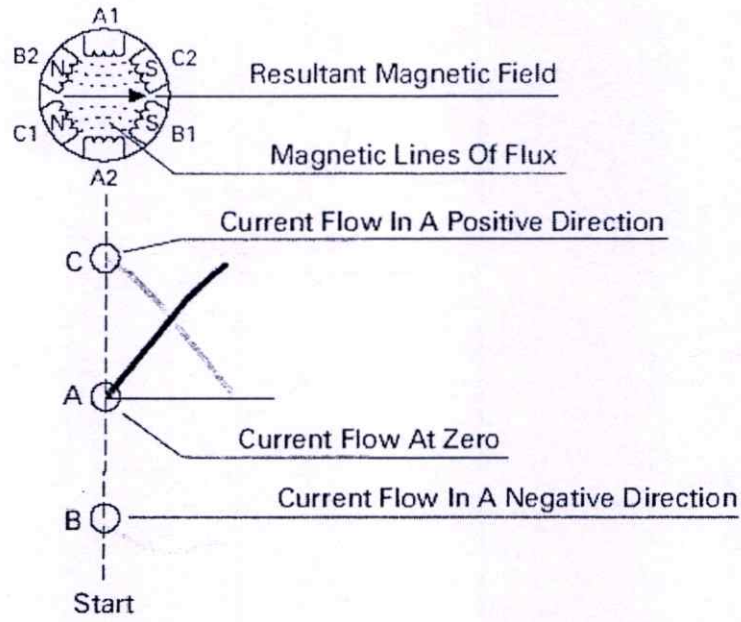
รูปที่ 2.11 แสดงขดลวดสเตเตอร์และขั้วแม่เหล็กที่มีจำนวนขั้วแม่เหล็ก 2 ขั้ว

เมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวดก็จะทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กขึ้น ซึ่งขั้วแม่เหล็กนี้ก็จะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามทิศทางการไหลของกระแส ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 ซึ่งสมมุติให้กระแสด้านบวก (Positive) ไหลผ่านขั้ว A1, B1 และ C1 มีขั้วแม่เหล็กเป็นขั้วเหนือ

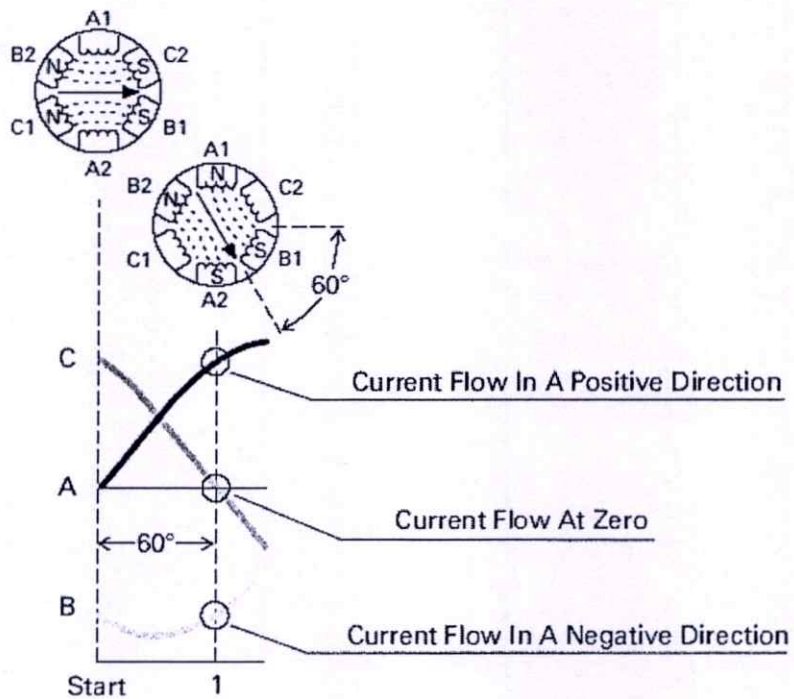
ตารางที่ 2.1 แสดงขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นของขดลวดสเตเตอร์

Winding	Current Flow Direction	
	Positive	Negative
A1	North	South
A2	South	North
B1	North	South
B2	South	North
C1	North	South
C2	South	North

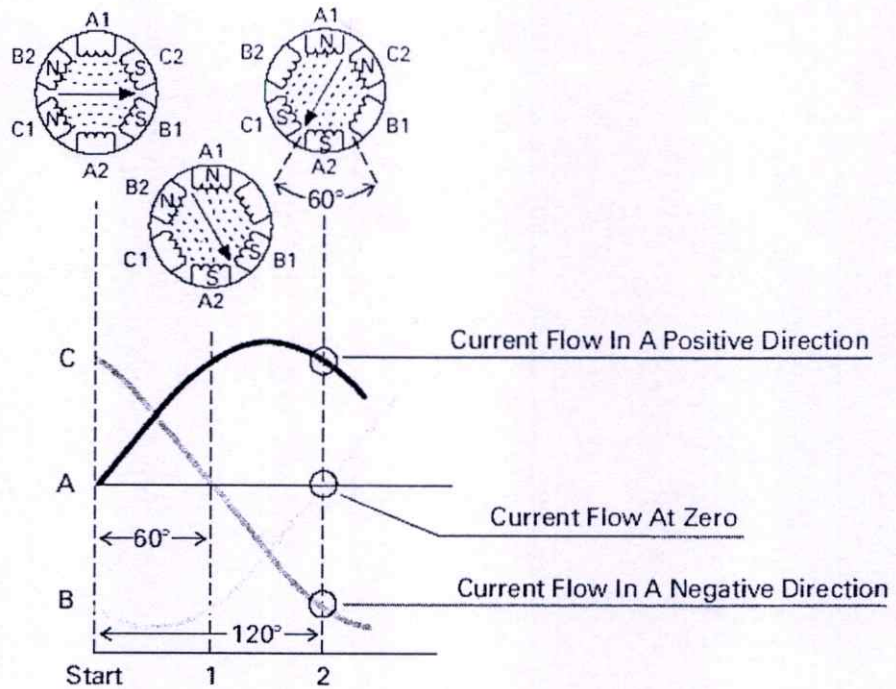
เพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจปรากฏการณ์สนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้น จึงสมมุติให้ ณ เวลาขณะสตาร์ท มีกระแสไหลผ่านเฟส A เป็นศูนย์ ส่วนกระแสที่ไหลผ่านเฟส C เป็นด้านบวก (Positive) และกระแสที่ไหลผ่านเฟส B เป็นด้านลบ (Negative) ดังแสดงในรูป 2.12 และเมื่ออ้างอิงจากตารางที่ 2.1 ดังนั้นจะได้ว่า ขดลวด C1 และ B2 จะมีอำนาจแม่เหล็กเป็นขั้วเหนือ ส่วนขดลวด B1 และ C2 จะมีอำนาจแม่เหล็กเป็นขั้วใต้ เมื่อสนามแม่เหล็กหมุนเคลื่อนที่จากจุดสตาร์ทมาเป็นมุม 60° ก็จะมาอยู่ที่เวลาดำแหน่งที่ 1. คือเฟส C ไม่มีกระแสไหลผ่าน ส่วนเฟส A มีกระแสไหลผ่านในด้านบวก (Positive) และเฟส B มีกระแสไหลผ่านในด้านลบ (Negative) ดังแสดงในรูปที่ 2.13 และเมื่ออ้างอิงจากตารางที่ 2.1 ก็จะได้ว่า ขดลวด A1 และ B2 จะมีอำนาจแม่เหล็กเป็นขั้วเหนือ ส่วนขดลวด B1 และ A2 จะมีอำนาจแม่เหล็กเป็นขั้วใต้ และเมื่อสนามแม่เหล็กหมุนเคลื่อนที่จากจุดเวลาดำแหน่งที่ 1. มาเป็นมุม 60° ก็จะมาอยู่ที่เวลาดำแหน่งที่ 2. คือเฟส B ไม่มีกระแสไหลผ่าน ส่วนเฟส A มีกระแสไหลผ่านในด้านบวก (Positive) และเฟส C มีกระแสไหลผ่านในด้านลบ (Negative) ดังแสดงในรูปที่ 2.14 และเมื่ออ้างอิงจากตารางที่ 2.1 ก็จะได้ว่า ขดลวด A1 และ C2 จะมีอำนาจแม่เหล็กเป็นขั้วเหนือ ส่วนขดลวด C1 และ A2 จะมีอำนาจแม่เหล็กเป็นขั้วใต้ และเมื่อสนามแม่เหล็กหมุนเคลื่อนที่จากจุดเวลาดำแหน่งที่ 2. เรื่อยมาทุกๆ 60° ก็จะมาอยู่ที่เวลาดำแหน่งที่ 3, 4, 5 และ 6 ตามลำดับ ก็จะครบ 360° ซึ่งจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนครบ 1 รอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 กระบวนการนี้จะเกิดขึ้น 50 ครั้งใน 1 วินาทีเมื่อแหล่งจ่ายมีความถี่ 50 Hz



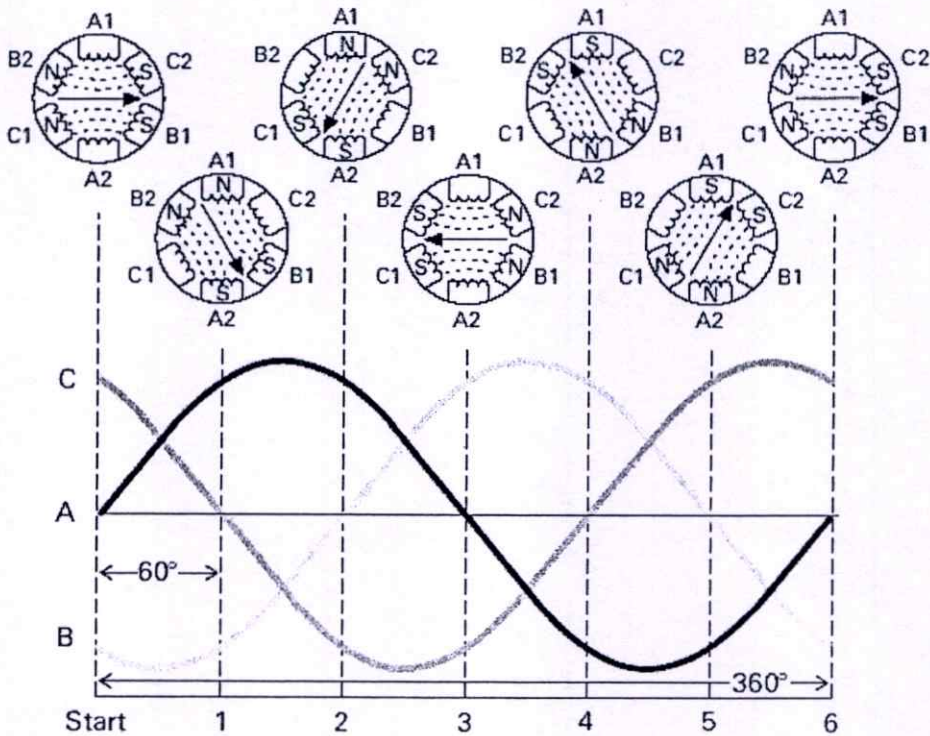
รูปที่ 2.12 แสดงสนามแม่เหล็กหมุนที่มุมเฟส 0° ที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง Start



รูปที่ 2.13 แสดงสนามแม่เหล็กหมุนที่มุมเฟส 60° ที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่ 1.

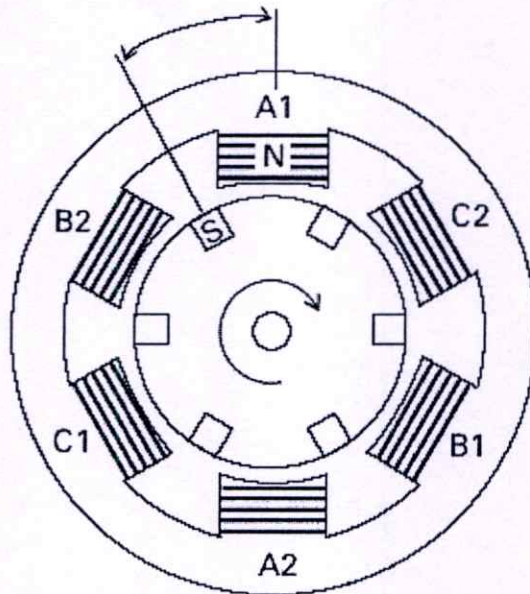


รูปที่ 2.14 แสดงสนามแม่เหล็กหมุนที่มุมเฟส 120° ที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่ 2.



รูปที่ 2.15 แสดงสนามแม่เหล็กหมุนที่มุมเฟส 360° ที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่ 6.

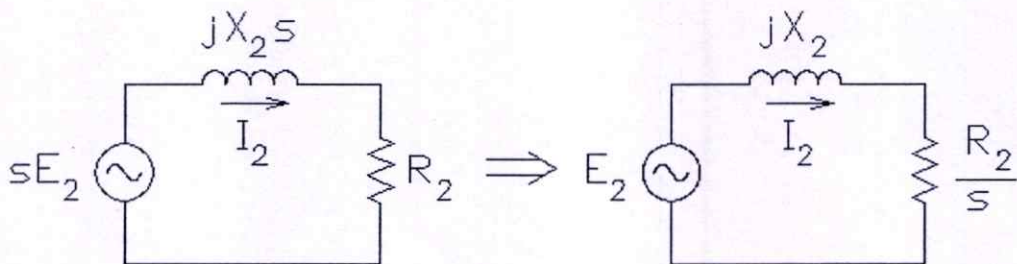
เมื่อขดลวดสเตเตอร์ได้รับแรงดันไฟฟ้าและมีกระแสไหลผ่านก็จะเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น ซึ่งสนามแม่เหล็กนี้จะแผ่เส้นแรงแม่เหล็ก ไปตัดผ่านแท่งตัวนำของโรเตอร์ (Conductor bar) ซึ่งจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (emf voltage) ขึ้น ทำให้มีกระแสไหลผ่านแท่งตัวนำโรเตอร์ (Conductor bar) ตลอดทั้งวงแหวนท้าย (End ring) ซึ่งทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบๆ แท่งตัวนำโรเตอร์ ตัวอย่างในรูปที่ 2.16 แสดงให้เห็นว่า ณ ที่เวลาหนึ่งมีกระแสไหลผ่านขดลวดสเตเตอร์ A1 ทำให้เกิดขั้วเหนือขึ้นสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะตัดผ่านแท่งตัวนำโรเตอร์ (Conductor bar) ที่อยู่ใกล้ๆ ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วแม่เหล็กที่มีคุณสมบัติเป็นขั้วได้ขึ้น ดังนั้นจึงเกิดการดึงดูดกันระหว่างขั้วเหนือของสเตเตอร์และขั้วใต้ของแท่งตัวนำโรเตอร์ (Conductor bar) และเมื่อสนามแม่เหล็กของสเตเตอร์หมุน โรเตอร์ก็จะหมุนตาม แต่ความเร็วในการหมุนของโรเตอร์จะไม่เท่ากับความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุน ทั้งนี้ค่าความแตกต่างกันระหว่างความเร็วทั้งสองเรียกว่า Slip



รูปที่ 2.16 แสดงการหมุนของโรเตอร์ตามสนามแม่เหล็กหมุน

2.3 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

การศึกษาคุณสมบัติต่างๆของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ วงจรสมมูลย์มีความสำคัญมากในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงไปอันได้แก่ กระแส ความเร็วรอบ กำลังสูญเสีย และแรงบิดของมอเตอร์ วงจรสมมูลย์นี้ต้องได้มาจากขดลวดที่มีความสมมาตรกันทั้งสามเฟส แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสมมูล กำหนดให้ขดลวดต่อแบบสตาร์และแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าเป็นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟส พารามิเตอร์ต่างๆถูกย้าย (Transfer) มาอยู่ทางด้านสเตเตอร์ทั้งหมด จะได้วงจรสมมูลย์ทางไฟฟ้าต่อเฟสของโรเตอร์ดังรูป



รูปที่ 2.17 แสดงวงจรสมมูลย์ต่อเฟสของโรเตอร์เมื่อทำการย้าย (Transfer) พารามิเตอร์ต่างๆมาอยู่ทางด้านสเตเตอร์

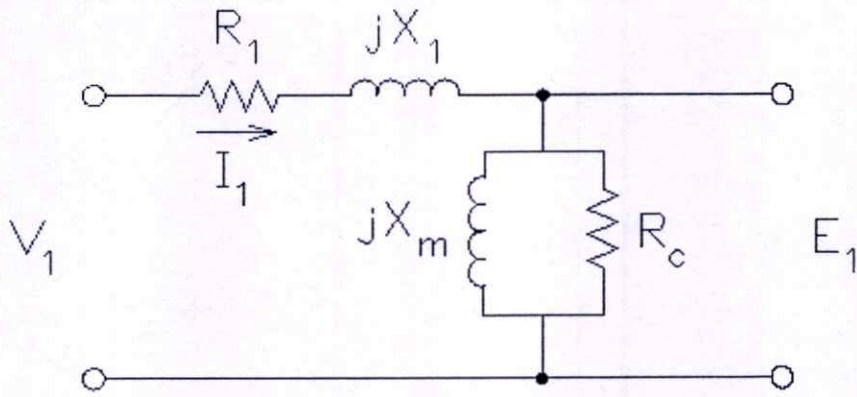
เนื่องจากค่าความถี่ของโรเตอร์จะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามค่าสลิป (Slip) ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าต่างๆ ของโรเตอร์จะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าสลิปด้วย จากรูปที่ 2.17 ด้านซ้ายมือเป็นวงจรสมมูลย์ทางไฟฟ้าของโรเตอร์ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

sE_2 = ค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induced voltage) ของโรเตอร์ที่ค่าสลิปใดๆ

jX_2s = ค่า Leakage reactance ของโรเตอร์ที่ค่าสลิปใดๆ

R_2 = ค่าความต้านทานของโรเตอร์ (Rotor resistance)

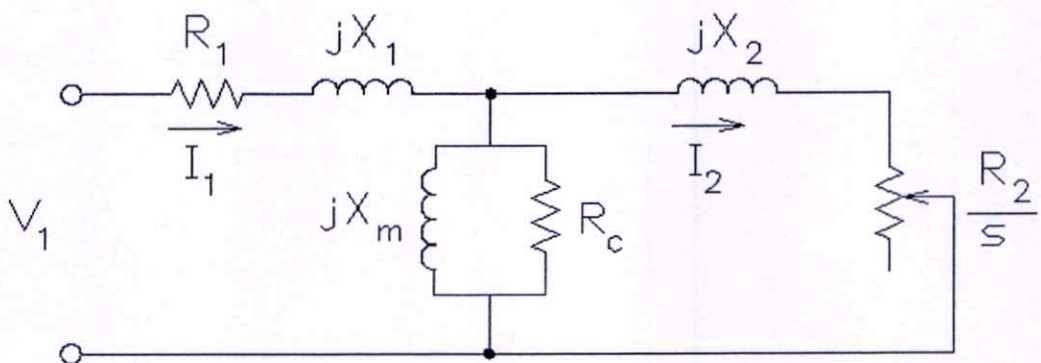
เพื่อให้ง่ายในการวิเคราะห์จึงทำการแปลงรูปที่ 2.17 ด้านซ้ายมือให้เป็นรูปที่ 2.17 ด้านขวามือ สำหรับวงจรสมมูลย์ทางไฟฟ้าต่อเฟสของสเตเตอร์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แสดงวงจรสมมูลต่อเฟสของสเตเตอร์

- เมื่อ V_1 = Input voltage
 I_1 = Input current หรือ Stator current
 R_1 = Stator resistance
 jX_1 = Stator leakage reactance
 jX_m = Magnetizing reactance
 R_c = Core loss resistance

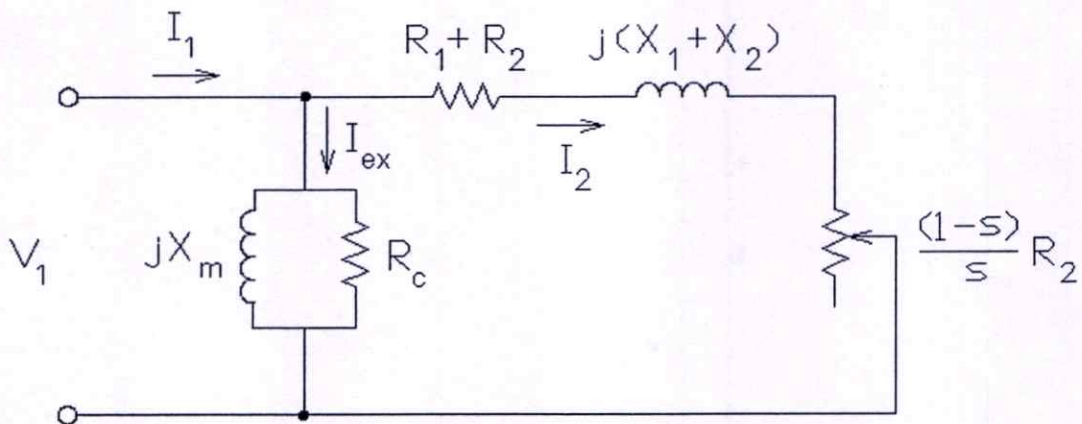
เมื่อพิจารณารวมวงจรสมมูลในรูปที่ 2.17 และรูปที่ 2.18 จะได้วงจรสมมูลทางไฟฟ้าต่อเฟสของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induction motor) ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แสดงวงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

2.4 การทดสอบวงจรมุมลัด

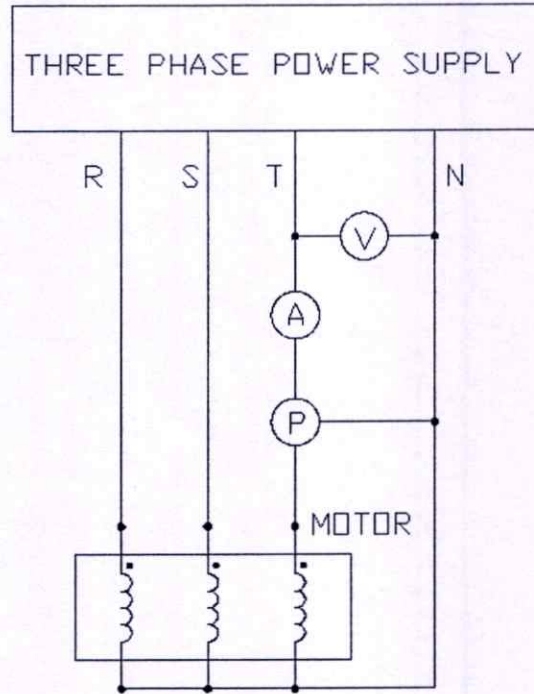
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบวงจรมุมลัดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับวงจรมุมลัดของหม้อแปลงไฟฟ้า จะเห็นได้ว่ามีความคล้ายคลึงกัน โดยที่ขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเปรียบเสมือนกับขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าและขดลวดโรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำก็เปรียบเสมือนกับขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า ดังนั้นมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำก็เปรียบเสมือนกับหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีช่องว่างเป็นอากาศ โดยมีด้านทุติยภูมิเป็นความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงได้ ดังนั้นในการหาจรมุมลัดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจึงมีลักษณะคล้ายกับการหาจรมุมลัดของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยมีวิธีการทดสอบอยู่ 2 ขั้นตอนคือการทดสอบแบบ No Load Test ซึ่งก็เปรียบได้กับการทดสอบแบบ Open Circuit test ของหม้อแปลงไฟฟ้า การทดสอบนี้สามารถหา Core loss resistance และ Magnetizing reactance ส่วนการทดสอบอีกขั้นตอนหนึ่งคือการทดสอบแบบ Blocked Rotor Test ซึ่งก็เปรียบได้กับการทดสอบแบบ Short Circuit test ของหม้อแปลงไฟฟ้า การทดสอบนี้สามารถหา Stator resistance, Rotor resistance, Stator leakage reactance และ Rotor leakage reactance ในการทดสอบวงจรมุมลัด เพื่อให้ง่ายในการทำความเข้าใจสามารถเขียนวงจรมุมลัดในรูปที่ 2.19 ให้อยู่ในรูปที่ 2.20 ได้ดังนี้



รูปที่ 2.20 แสดงวงจรมุมลัดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้ในการอธิบายการทดสอบ No load test และ Block rotor test

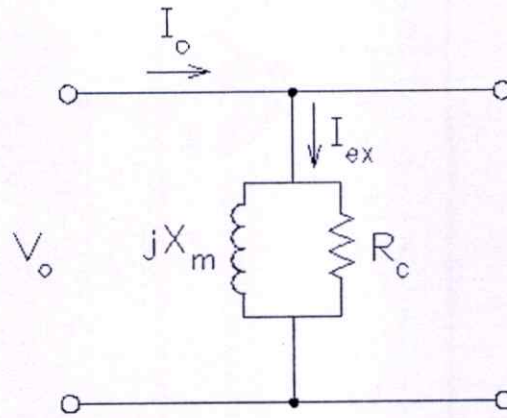
2.4.1 No load test

ทำการต่อวงจรดังรูปที่ 2.21 แล้วจ่ายแรงดันไฟฟ้าเท่ากับแรงดันพิกัดให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยไม่มีภาระทางกล แล้วทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และ เพาเวอร์แฟกเตอร์ ซึ่งค่าเหล่านี้ถ้าเป็นค่า LINE TO LINE จะต้องเปลี่ยนเป็นค่าต่อเฟสทั้งหมด



รูปที่ 2.21 แสดงวงจรการทดสอบ No load test และ Block rotor test ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

การทดสอบนี้มอเตอร์เหนี่ยวนำจะหมุนด้วยความเร็วรอบ N_r ซึ่งจะมีความเร็วใกล้เคียงกับ N_s ค่าสลลิป (s) จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ดังนั้นวงจรไฟฟ้าทางด้านขวามือของรูปที่ 2.20 มีสภาพเหมือนเปิดวงจร ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.22 การทดสอบนี้สามารถหา Core loss resistance และ Magnetizing reactance



รูปที่ 2.22 แสดงวงจรสมมูลที่ได้จากการทดสอบแบบ No load test

$$I_{ex} = I_o \quad (2.12)$$

$$R_c = \frac{V_o}{I_o \cos \phi_o} \quad (2.13)$$

$$X_m = \frac{V_o}{I_o \sin \phi_o} \quad (2.14)$$

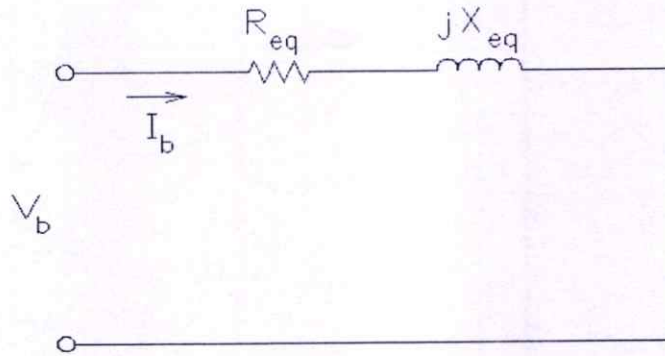
เมื่อ V_o คือ Rated stator terminal voltage

I_o คือ No-load test current

ϕ_o คือ มุมระหว่าง V_o กับ I_o

2.4.2 Block rotor test

ทำการต่อวงจรดังรูปที่ 2.21 และทำการยึดโรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้อยู่กับที่ แล้วจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจนกระทั่งกระแสเดเตอร์มีค่าเท่ากับกระแสพิกัด แล้วทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และ เพาเวอร์แฟกเตอร์ ซึ่งค่าเหล่านี้ถ้าเป็นค่า LINE TO LINE จะต้องเปลี่ยนเป็นค่าต่อเฟสทั้งหมด การทดสอบนี้เนื่องจากการยึดโรเตอร์ให้อยู่กับที่ ทำให้มีค่าสลิปเท่ากับ 1 และมีค่า Core loss น้อยมาก การทดสอบนี้สามารถหาค่า R_{cq} และ X_{cq} ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 แสดงวงจรสมมูลที่ได้จากการทดสอบแบบ Block rotor test

$$Z_{eq} = \frac{V_b}{I_b} \quad (2.15)$$

$$R_{eq} = Z_{eq} \cos \phi_b \quad (2.16)$$

$$R_{eq} = R_1 + R_2 \quad (2.17)$$

$$X_{eq} = Z_{eq} \sin \phi_b \quad (2.18)$$

$$X_{eq} = X_1 + X_2 \quad (2.19)$$

เมื่อ V_b คือ Block rotor test terminal voltage

I_b คือ Rated stator current

ϕ_b คือ มุมระหว่าง V_b กับ I_b

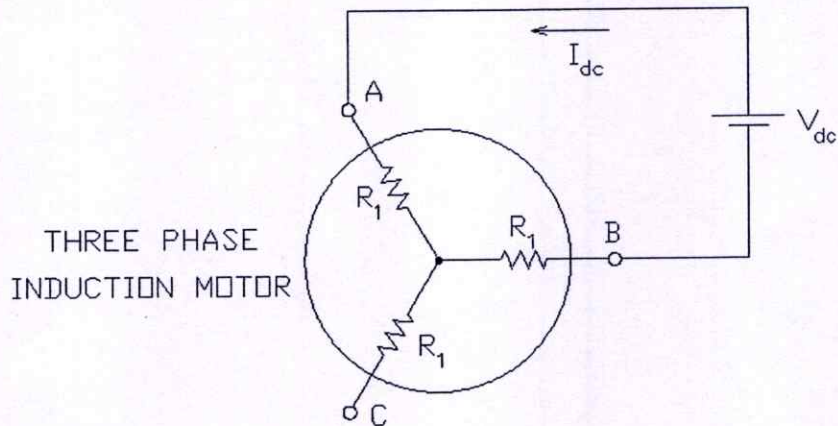
โดยค่า R_1 และ R_2 สามารถหาค่าได้จากการทดสอบด้วยวิธี VI-method

ส่วน X_1 และ X_2 สามารถหาค่าได้จากผลการทดสอบตามมาตรฐาน IEEE Std 112 ตามตารางที่

ตารางที่ 2.2 แสดง Reactance ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ Class ต่างๆ

Motor class	Description	X_1	X_2
A	Normal starting torque, normal starting current	0.5	0.5
B	Normal starting torque, normal low starting current	0.4	0.6
C	High starting torque, low starting current	0.3	0.7
D	High starting torque, high slip	0.5	0.5
Would rotor		0.5	0.5

การทดสอบด้วยวิธี VI – method



รูปที่ 2.24 แสดงวงจรการทดสอบด้วยวิธี VI-method

จากรูปที่ 2.24 เมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมีขดลวดสเตเตอร์ ต่อกันแบบสตาร์ เราสามารถหาความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ได้โดยใช้วิธี VI-method คือ จ่ายแรงดันไฟฟ้า dc เข้าไปที่ขั้วของเฟส A และเฟส B แล้ววัดค่ากระแส dc ที่เกิดขึ้นเพื่อนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ดังนี้

$$2R_1 = \frac{V_{dc}}{I_{dc}} \quad (2.20)$$

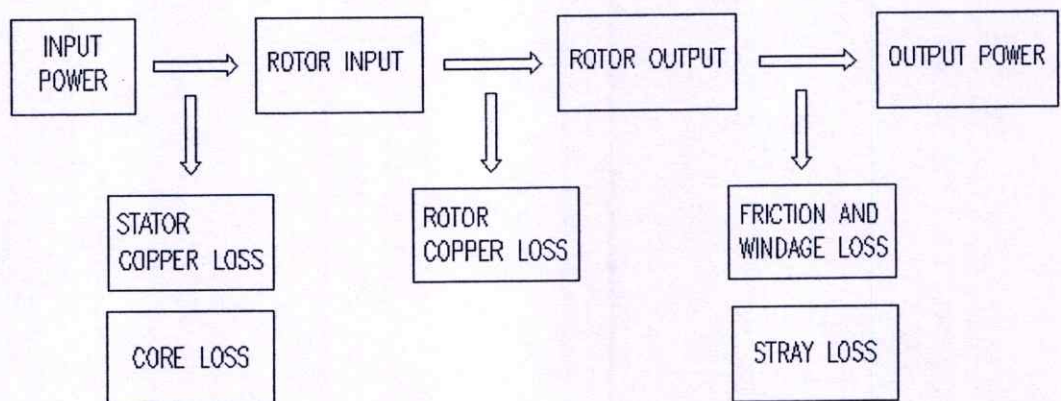
$$R_1 = \frac{V_{dc}}{2I_{dc}} \quad (2.21)$$

จากสมการที่ 2.17 สามารถหาค่า R_2 ได้จาก

$$R_2 = R_{eq} - R_1 \quad (2.22)$$

2.5 กำลังงานและแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

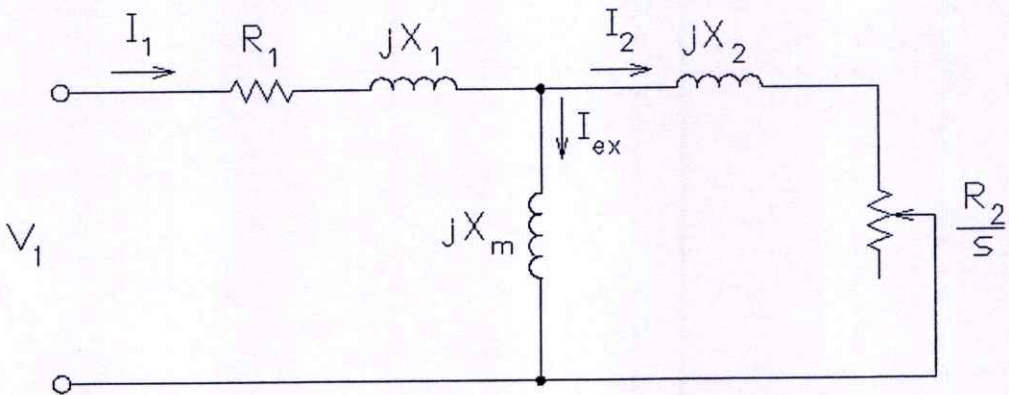
มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส เป็นเครื่องจักรไฟฟ้าที่ทำหน้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล ซึ่งขบวนการเปลี่ยนแปลงพลังงานนี้จะมีการสูญเสียในรูปพลังงานความร้อนเสมอ การสูญเสียนี้มาจากความต้านทานของวงจรไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กในวงจรแม่เหล็กและความเสียดทานทางกล ความสัมพันธ์ของพลังงานไฟฟ้าด้านเข้าและพลังงานกลด้านออกของมอเตอร์ แสดงได้ดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 แผนผังการส่งผ่านกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

กำลังไฟฟ้าด้านเข้าของมอเตอร์ได้มาจากระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟส input power (P_{in}) เมื่อจ่ายเข้าที่สเตเตอร์จะสูญเสียให้กับกำลังสูญเสียที่ขดลวดของสเตเตอร์ stator copper loss (P_{sc}) ก่อน ส่วนที่เหลือจะสูญเสียให้กับ Hysterresis loss และ Eddy current loss ซึ่งรวมเรียกว่า Core loss (P_{core}) กำลังไฟฟ้าที่เหลือจะถูกส่งผ่านช่องว่างอากาศไปยังโรเตอร์ กำลังไฟฟ้าส่วนนี้เรียกว่า Rotor input (Power across air gap; P_{ag}) เป็นกำลังด้านเข้าของโรเตอร์ เมื่อส่งเข้ามาที่โรเตอร์ก็จะพบกับกำลังสูญเสียที่ขดลวดของโรเตอร์ rotor copper loss (P_{rc}) และกำลังไฟฟ้าที่ได้จะเปลี่ยนจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล ณ จุดนี้เรียกว่า rotor output (P_{conv}) สุดท้ายก่อนที่จะเป็นกำลังด้านออก จะต้องสูญเสียกำลังกลให้กับแรงเสียดทานอันเนื่องมาจากความฝืดของแบร์ริงและแรงต้านทานลมของโรเตอร์

friction and windage losses ($P_{f\&w}$) และการสูญเสียเนื่องจากความเพี้ยนของสนามแม่เหล็กเนื่องจากกระแสไหล Stray loss (P_{misc}) สุดท้ายจึงกลายเป็นกำลังด้านออก out put power (P_o) จากแผนผังการส่งผ่านกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำในรูปที่ 2.25 จะเห็นว่า core loss ของขดลวดโรเตอร์จะไม่ถูกนำมาแสดงไว้ ทั้งนี้เนื่องจาก Core loss จากส่วนหนึ่งของวงจรถัดด้านสเตเตอร์ และวงจรถัดด้านโรเตอร์ ซึ่งในขณะที่มอเตอร์ทำงาน โรเตอร์จะมีความเร็วใกล้เคียง synchronous speed ทำให้ core loss ที่เกิดที่บนขดลวดโรเตอร์มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับด้านขดลวดสเตเตอร์ ดังนั้น core loss ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่วงจรถัดด้านสเตเตอร์ และค่า core loss ทั้งหมดจะถูกนำมารวมกันและแสดงไว้ในตำแหน่งตามแผนผังการส่งผ่านกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำในรูปที่ 2.25 core loss จะถูกแสดงไว้ในวงจรสมมูลของมอเตอร์ด้วยการแทนค่าด้วยตัวแปร R_c หรือถ้ามีการกำหนดค่า core loss เป็นค่าคงที่ (X watt) แสดงว่าเป็นการรวมเอากำลังสูญเสียทางกลเข้าไว้ด้วย โดยปกติแล้วถ้ามอเตอร์ทำงานที่ความเร็วสูง จะมี friction, windage และ stray losses มาก ซึ่งค่าความสูญเสียทั้งสามนี้จะถูกเรียกรวมกันว่า rotational loss (P_{rot}) แต่ในทางกลับกันที่ความเร็วสูงจะมี core loss ต่ำ ดังนั้นในวงจรสมมูลที่ใช้ในการพิจารณากำลังไฟฟ้าของมอเตอร์จึงไม่มีการใส่ค่า core loss (R_c) เข้าไป ดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 แสดงวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้ในการพิจารณากำลังไฟฟ้า

เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าสามเฟสเข้าที่ สเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าจะเกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นที่ช่องว่างอากาศ เนื่องจากมีกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวดสเตเตอร์ สามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าด้านเข้า (P_{in}) ได้จากสมการด้านล่าง

$$P_{in} = 3V_1 I_1 \cos \theta \quad (2.23)$$

เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำที่เป็นขดลวดสเตเตอร์จะเกิดกำลังสูญเสีย (P_{scl}) ขึ้นที่ขดลวดดังสมการด้านล่าง

$$P_{scl} = 3I_1^2 R_1 \quad (2.24)$$

จากแผนผังการส่งผ่านกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำในรูปที่ 2.25 กำลังสูญเสียต่างๆ ที่มีค่าคงที่ รวมเรียกว่า rotational losses (P_{rot}) ดังนั้นจึงสามารถตัด R_c ออกจากวงจรได้

$$P_{rot} = P_{core} + P_{f\&w} + P_{misc} \quad (2.25)$$

สามารถหาลำดับไฟฟ้าป้อนเข้าโรเตอร์ rotor input หรือ power across air gap (P_{ag}) ได้จาก

$$P_{ag} = P_{in} - P_{scl} \quad (2.26)$$

หรือสามารถหา P_{ag} ได้จาก

$$P_{ag} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (2.27)$$

กำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านช่องว่างอากาศของมอเตอร์ หรือกำลังไฟฟ้านอกของสเตเตอร์เมื่อข้ามช่องว่างอากาศจะส่งไปที่โรเตอร์ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่ากำลังไฟฟ้าป้อนเข้าของโรเตอร์ เมื่อกำลังไฟฟ้านี้ผ่านขดลวดโรเตอร์ ก็จะเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียขึ้นที่ขดลวดโรเตอร์ ดังสมการด้านล่าง

$$P_{rcl} = 3I_2^2 R_2 \quad (2.28)$$

ส่วนกำลังสูญเสียที่แกนเหล็กของโรเตอร์จะถูกรวมอยู่ใน rotational losses แล้ว

กำลังไฟฟ้าที่ได้ หลังจากผ่านกำลังไฟฟ้าสูญเสียขึ้นที่ขดลวดโรเตอร์แล้วจะเป็นกำลังกล (P_{conv}) ที่ได้จากระบวนการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลของมอเตอร์

$$P_{conv} = P_{ag} - P_{rcl} \quad (2.29)$$

แต่เนื่องจาก ก่อนที่พลังงานกลที่ได้ จะออกมาสู่เพลาของมอเตอร์ได้นั้นจะต้องผ่านกำลังสูญเสียอันเนื่องมาจากความฝืดของแบร์ริงและแรงต้านทานลมของโรเตอร์ friction and windage losses ($P_{f\&w}$) และการสูญเสียเนื่องจากความเพี้ยนของสนามแม่เหล็กเนื่องจากกระแสไหลด Stray loss รวมทั้งกำลังสูญเสียอันเนื่องมาจากแกนเหล็ก core loss ซึ่งรวมเรียกว่า rotational losses ดังนั้นจึงสามารถหาลำดับงานกลด้านออกที่เพลาของมอเตอร์ (P_o) ได้ดังนี้

$$P_o = P_{conv} - P_{rot} \quad (2.30)$$

และสามารถหาแรงบิดที่เพลาของมอเตอร์ได้จาก

$$T_{sh} = \frac{P_o}{\omega_r} \quad (2.31)$$

เมื่อ

$$\omega_r = \frac{2\pi N_r}{60} \quad (2.32)$$

คำถามที่พบเป็นประจำและมีความสำคัญในงานที่ใช้เครื่องจักรไฟฟ้าคือ กำลังไฟฟ้าสูงสุดของเครื่องจักรไฟฟ้ามีค่าเท่าไร คำตอบของคำถามนี้ขึ้นกับองค์ประกอบหลายอย่างด้วยกัน เพราะเครื่องจักรไฟฟ้านอกจากจะให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดได้แล้ว ยังต้องทำงานภายใต้เงื่อนไขบางอย่างด้วย โดยทั่วไปเงื่อนไขนี้คือ การกำหนดความร้อนหรืออุณหภูมิเพิ่มสูงสุดของเครื่องจักรไฟฟ้า เพื่อให้ไม่ให้อายุการใช้งานของเครื่องจักรไฟฟ้าสั้นเกินไป ความร้อนหรืออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนี้เนื่องมาจากการสูญเสียในเครื่องจักรไฟฟ้า อุณหภูมิเพิ่มสูงสุดนี้เองเป็นตัวกำหนดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเครื่องจักรไฟฟ้า

อุณหภูมิที่เครื่องจักรไฟฟ้าทำงานมีความสัมพันธ์โดยตรงกับอายุการใช้งานของเครื่องจักรไฟฟ้าเพราะการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและเวลา การเสื่อมสภาพนี้เป็นปรากฏการณ์ทางเคมีของ ขบวนการออกซิเดชัน (oxidation process) ซึ่งเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ทำให้ฉนวนไฟฟ้ากรอบและสูญเสีย ความคงทนไดอิเล็กทริก (dielectric strength) อายุการใช้งานและลักษณะการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าในแต่ละชั้น (class) จะแตกต่างกันมากเช่น อายุการใช้งานของอุปกรณ์ทางทหาร โดยอาวุธจรวดโจมตีบางชนิดมีเวลาการใช้งานเพียงแค่เป็นนาที่เท่านั้น ขณะที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บางชนิดมีอายุการใช้งาน 500 - 1000 ชั่วโมง และอุปกรณ์ขนาดใหญ่ในโรงงานอุตสาหกรรมจะมีอายุการใช้งาน 10 - 30 ปี โดยอายุการใช้งานของ

อุปกรณ์ไฟฟ้าสามารถหาได้โดยการจำลองการใช้งานจริงด้วยเครื่องเร่งเวลาการใช้งานที่เรียกว่า มอเตอร์เรตต์ (motorettes)

ขีดจำกัดอุณหภูมิสูงสุดสำหรับฉนวนแต่ละชั้น ถูกกำหนดโดยมาตรฐานต่างๆ เช่น IEEE (Institution of Electrical and Electronic Engineers) และมาตรฐาน NEMA (National Electrical Manufacturers Association) ชั้น (class) ของฉนวนตามมาตรฐาน NEMA ที่ใช้กับเครื่องจักรไฟฟ้าทั่วไปมี 3 ชั้น (class) คือ

1. ฉนวนชั้น (class) B ได้แก่ ไมก้า ไยแก้ว และใยหิน
2. ฉนวนชั้น (class) F ได้แก่ สารในชั้น B แต่ได้รับการออกแบบให้ทนอุณหภูมิได้สูงกว่า
3. ฉนวนชั้น (class) H ได้แก่ ฉนวนซึ่งสามารถทนอุณหภูมิได้สูงกว่าชั้น F ได้แก่ สารซิลิโคน สารผสมระหว่างไมก้า ไยแก้ว และใยหิน

การแบ่งชั้นของฉนวน ทำให้สามารถกำหนดขีดจำกัดอุณหภูมิเพิ่ม (allowable temperature rise) ในแต่ละส่วนของเครื่องจักรไฟฟ้า เครื่องจักรไฟฟ้าแต่ละชนิดแต่ละแบบจะมีขีดจำกัดอุณหภูมิเพิ่มต่างกัน ในที่นี้จะกล่าวถึงมอเตอร์ 2 ประเภทคือ มอเตอร์อเนกประสงค์ (general purpose motor) และมอเตอร์ประสงค์พิเศษ (special purpose motor)

มอเตอร์อเนกประสงค์ได้แก่ มอเตอร์ที่มีขนาดไม่เกิน 200 แรงม้า มีลักษณะการทำงานและโครงสร้างสำหรับใช้งานทั่วไปโดยไม่เจาะจงประเภท ส่วนมอเตอร์ประสงค์พิเศษคือมอเตอร์ที่ได้รับการออกแบบให้มีลักษณะการทำงานพิเศษหรือมีโครงสร้างพิเศษหรือทั้งคู่ เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้เฉพาะงานเท่านั้น มอเตอร์ประสงค์พิเศษที่มีฉนวนชั้นเดียวกันกับมอเตอร์อเนกประสงค์จะมีขีดจำกัดอุณหภูมิเพิ่มสูงกว่า มอเตอร์อเนกประสงค์แม้จะมีขีดจำกัดอุณหภูมิเพิ่มต่ำกว่าแต่จะมีแฟกเตอร์บริการ (service factor) สูงกว่า คือประมาณ 1.15 แฟกเตอร์บริการคือ ตัวคูณของพิกัดกำลังด้านออกเพื่อให้ทราบกำลังด้านออกสูงสุดที่เครื่องจักรไฟฟ้าทำงานอย่างต่อเนื่องได้โดยไม่เกิดความเสียหาย โดยอยู่ภายใต้ข้อกำหนดซึ่งกำกับแฟกเตอร์บริการนั้น ตัวอย่างเช่นมอเตอร์ขนาด 10 แรงม้า ที่มีแฟกเตอร์บริการ 1.15 สามารถทำงานอย่างต่อเนื่องที่กำลังด้านออก 11.5 แรงม้าได้โดยไม่เกิดความเสียหาย

ตารางที่ 2.3 แสดงขีดจำกัดของอุณหภูมิเพิ่มตามมาตรฐาน NEMA สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ
ที่มี Ambient temperature 40°

ชนิดของมอเตอร์	ขีดจำกัดอุณหภูมิเพิ่ม °C (Allowable temperature rise)		
	class B	Class F	Class H
มอเตอร์ที่มีแฟกเตอร์บริการ 1.15	90	115	-
มอเตอร์ที่มีแฟกเตอร์บริการ 1.00 และมีขดลวดหุ้ม	85	110	-
มอเตอร์ชนิดหุ้มรอบหมคระบายความร้อนด้วยพัดลม	80	105	125
มอเตอร์ชนิดหุ้มรอบหมคระบายความร้อน	85	110	135

เมื่อเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์ มอเตอร์จะมีความร้อนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ชั้นของฉนวนจะเป็นตัวกำหนดขีดความสามารถในการทนอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนี้ อุณหภูมิสูงสุดเต็มพิกัดที่ฉนวนสามารถทนได้สามารถหาได้จากผลรวมระหว่าง ambient temperature (40°) กับค่าขีดจำกัดอุณหภูมิเพิ่มของฉนวนชนิดนั้นๆ

ตารางที่ 2.4 แสดงอุณหภูมิสูงสุดเต็มพิกัดตามมาตรฐาน NEMA สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ
ที่มี Ambient temperature 40°

ชนิดของมอเตอร์	อุณหภูมิสูงสุดเต็มพิกัด °C (Hottest spot maximum limiting temperature)		
	class B	Class F	Class H
มอเตอร์ที่มีแฟกเตอร์บริการ 1.15	130	155	-
มอเตอร์ที่มีแฟกเตอร์บริการ 1.00 และมีขดลวดหุ้ม	125	150	-
มอเตอร์ชนิดหุ้มรอบหมคระบายความร้อนด้วยพัดลม	120	145	165
มอเตอร์ชนิดหุ้มรอบหมคระบายความร้อน	125	150	175

การวัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของขดลวดมีด้วยกันอยู่ 2 วิธีคือ

1. วิธีเทอร์โมมิเตอร์

วิธีนี้วัดอุณหภูมิโดยวางเทอร์โมมิเตอร์ให้ติดกับผิวของมอเตอร์ เทอร์โมมิเตอร์ในที่นี้ให้รวมถึงเทอร์โมคัปเปิลซึ่งไม่ได้ฝังไว้ และเทอร์โมมิเตอร์แบบความต้านทานซึ่งสามารถใช้วัดอุณหภูมิ บริเวณที่ใช้เทอร์โมมิเตอร์แบบกระเปาะได้ เมื่อใช้เทอร์โมมิเตอร์แบบกระเปาะในที่ซึ่งมี

ความเข้มข้นแม่เหล็กสูง และมีการเปลี่ยนแปลงหรือเคลื่อนที่อย่างรุนแรง ควรใช้เทอร์โมมิเตอร์ แอลกอฮอล์แทนเทอร์โมมิเตอร์ปรอท

2. วิธีความต้านทาน

วิธีนี้ใช้วัดอุณหภูมิของขดลวดที่เพิ่มขึ้นจากความต้านทานของขดลวดที่เพิ่มขึ้น โดยทั่วไป นิยมใช้วัดอุณหภูมิของขดลวดของมอเตอร์ที่มีกำลังออกไม่เกิน 600 วัตต์ สำหรับขดลวดที่เป็นทองแดงสามารถหาอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นได้จากสูตร

$$\frac{t_2 + 235}{t_1 + 235} = \frac{R_2}{R_1} \quad (2.33)$$

เมื่อ t_2 คือ อุณหภูมิของขดลวดขณะสิ้นสุดการทดสอบ เป็นองศาเซลเซียส

t_1 คือ อุณหภูมิของขดลวด (เย็น)ขณะเริ่มวัดความต้านทาน เป็นองศาเซลเซียส

R_2 คือ ความต้านทานของขดลวดขณะสิ้นสุดการทดสอบ เป็นองศาเซลเซียส

R_1 คือ ความต้านทานของขดลวดที่อุณหภูมิ t_1 (เย็น) เป็นองศาเซลเซียส

สำหรับวัสดุที่ใช้ทำขดลวดอื่นที่ไม่ใช่ทองแดง ให้แทนค่า 235 ในสูตรที่ 2.33 ด้วยสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานที่ 0 องศาเซลเซียสของวัสดุนั้น สำหรับอะลูมิเนียมให้ใช้ตัวเลข 225 แทน

บทที่ 3

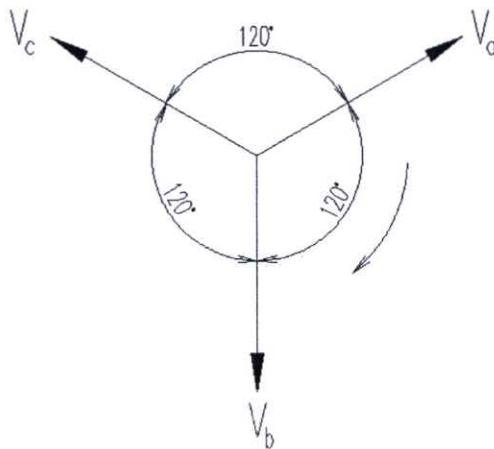
การวิเคราะห์มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อได้รับ แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

3.1 การวิเคราะห์ระบบไม่สมดุลด้วย Symmetrical component

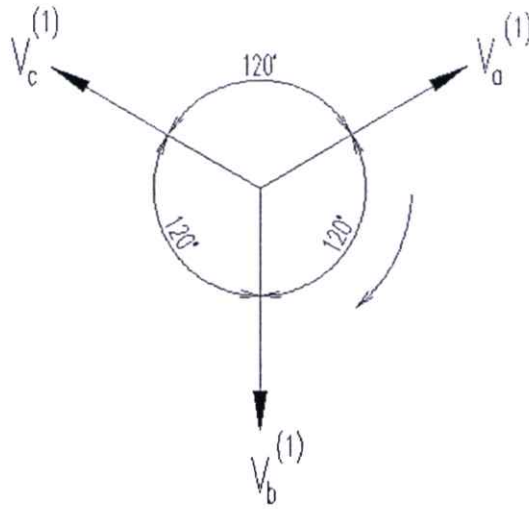
ในปี 1918 การวิเคราะห์ระบบไม่สมดุลด้วย Symmetrical component ได้ถูกนำเสนอโดย C.L. Fortescue ในการประชุมวิชาการของ American Institute of Electrical Engineering ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้มีประโยชน์อย่างมากในการวิเคราะห์ระบบหลายเฟสที่ไม่สมดุล โดย Fortescue ได้พิสูจน์ให้เห็นว่าในระบบ n เฟสที่ไม่สมดุลสามารถที่จะแก้ปัญหากับระบบ n เฟสที่สมดุลได้ด้วยวิธี Symmetrical component

จาก Fortescue's theorem ระบบไฟฟ้าสามเฟสไม่สมดุล สามารถที่จะวิเคราะห์ในแบบสมดุลได้ โดยแบ่งเฟสเซอร์ที่ต้องการพิจารณาออกเป็น 3 ชุดคือ

1. Positive sequence component ประกอบด้วยเฟสเซอร์ 3 เฟสเซอร์ที่มีขนาดเท่ากันวางห่างกัน 120° องศา โดยมี phase sequence เหมือนกันกับเฟสเซอร์เดิม (original phaser)

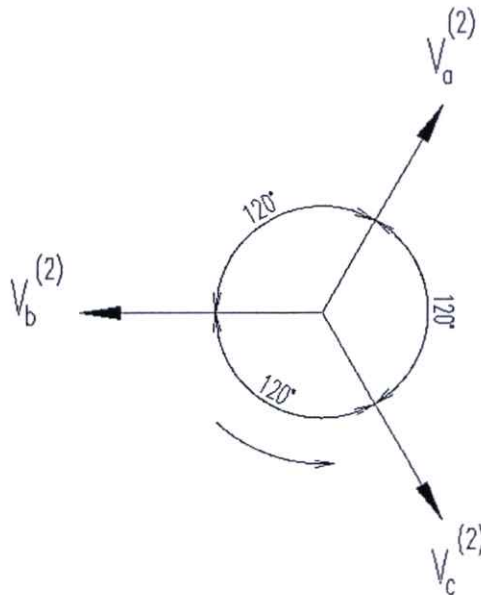


รูปที่ 3.1 แสดง Sequence ของเฟสเซอร์เดิม (original phaser) ที่เป็น Sequence ABC



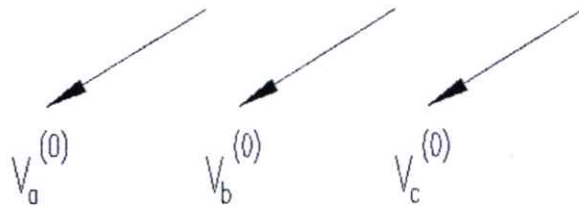
รูปที่ 3.2 แสดง Sequence ของ Positive sequence component

2. Negative sequence component ประกอบด้วยเฟสเซอร์ 3 เฟสเซอร์ที่มีขนาดเท่ากันวางห่างกัน 120 องศา โดยมี phase sequence ตรงกันข้ามกับเฟสเซอร์เดิม (original phasor)



รูปที่ 3.3 แสดง Sequence ของ Negative sequence component

3. Zero sequence component ประกอบด้วยเฟสเซอร์ 3 เฟสเซอร์ที่มีขนาดเท่ากันวางห่างกัน ศูนย์องศา



รูปที่ 3.4 แสดง Sequence ของ Zero sequence component

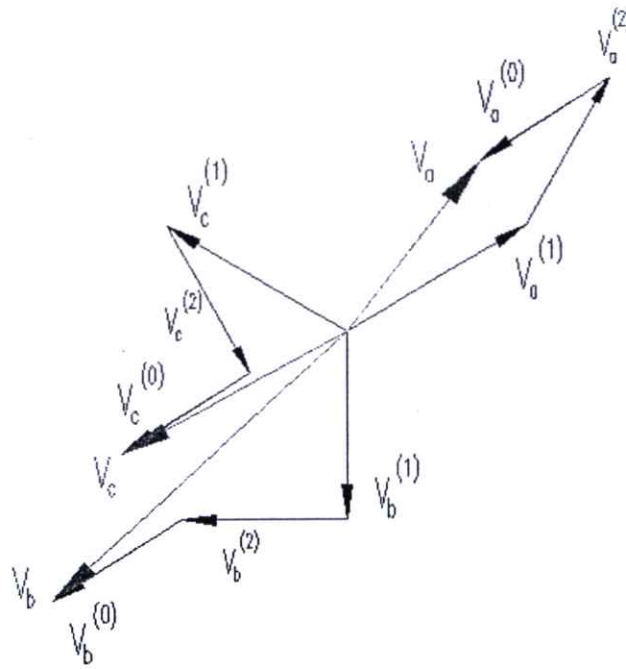
สมมติให้ระบบ original phasor มี sequence เป็น sequence ABC ตามรูปที่ 3.1 พบว่า positive sequence component จะมี sequence เป็น sequence ABC ตาม original phaser และจะใช้สัญลักษณ์แทนด้วยเลข (1) เช่น $V_a^{(1)}$ ส่วน negative sequence component จะมี sequence เป็น sequence ACB ซึ่งตรงกันข้ามกับ original phaser และจะใช้สัญลักษณ์แทนด้วยเลข (2) เช่น $V_a^{(2)}$ และ zero sequence component จะใช้สัญลักษณ์แทนด้วยเลข (0) เช่น $V_a^{(0)}$ ซึ่งสามารถเขียนแรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่ไม่สมดุลให้อยู่ในรูปของ sequence component ได้ดังนี้

$$V_a = V_a^{(0)} + V_a^{(1)} + V_a^{(2)} \quad (3.1)$$

$$V_b = V_b^{(0)} + V_b^{(1)} + V_b^{(2)} \quad (3.2)$$

$$V_c = V_c^{(0)} + V_c^{(1)} + V_c^{(2)} \quad (3.3)$$

จากสมการที่ 3.1 – 3.3 และจากรูปที่ 3.2 - 3.4 สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง เฟสเซอร์ของแรงดันไฟฟ้าของระบบ 3 เฟสที่ไม่สมดุล กับ symmetrical component ของแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสได้ดังรูปที่ 3.5



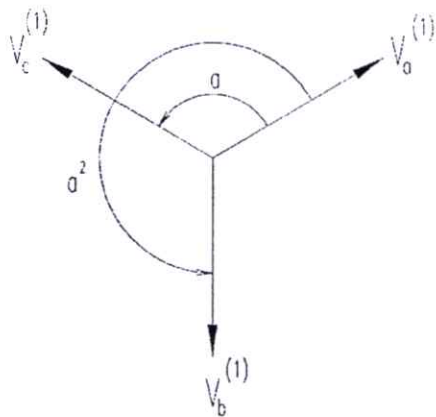
รูปที่ 3.5 แสดงความสัมพันธ์ของ Symmetrical component ของแรงดันไฟฟ้าของทั้งสามเฟส

เนื่องจากความต่างเฟสของ symmetrical component ของแรงดันและกระแสไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า 3 เฟส ดังนั้นเพื่อให้่ายในการบอกมุมของเฟสเซอร์ ซึ่งจะมีมุมต่างกันไปเฟสละ 120° จึงมีการกำหนดตัว operator ขึ้นมาโดย operator ที่เกี่ยวข้องมี 2 ค่าคือ operator j และ operator a โดยที่ $j = 1\angle 90^\circ = \sqrt{-1}$ และ

$$a = 1\angle 120^\circ = 1e^{j2\pi/3} = -0.5 + j0.866 \quad (3.4)$$

$$a^2 = 1\angle 240^\circ = -0.5 - j0.866 \quad (3.5)$$

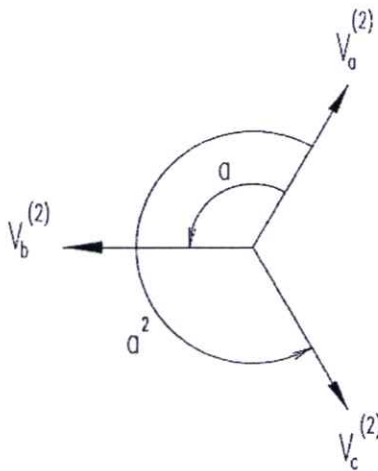
การวิเคราะห์เฟสเซอร์ที่ไม่สมมาตรทั้งสามเฟสโดยใช้วิธี symmetrical component นั้นเราสามารถลดตัวแปรลงได้ โดยใช้ operator a มาช่วย ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ของสมการใหม่ดังนี้
ทำการลดตัวแปร V_b และ V_c ลงให้อยู่ในรูปของ V_a เพียงตัวเดียว



$$V_c^{(1)} = aV_a^{(1)}$$

$$V_b^{(1)} = a^2V_a^{(1)}$$

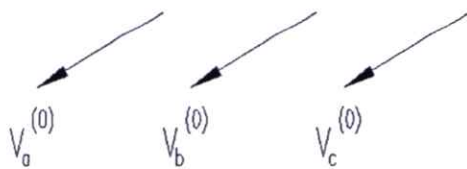
รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ของ Positive sequence component เมื่อเขียนให้อยู่ในรูปของ V_a



$$V_b^{(2)} = aV_a^{(2)}$$

$$V_c^{(2)} = a^2V_a^{(2)}$$

รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ของ Negative sequence component เมื่อเขียนให้อยู่ในรูปของ V_a



$$V_b^{(0)} = V_a^{(0)}$$

$$V_c^{(0)} = V_a^{(0)}$$

รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ของ Zero sequence component เมื่อเขียนให้อยู่ในรูปของ V_a

จากรูปที่ 3.6 – 3.8 สามารถจัดรูปแบบของสมการที่ 3.1 – 3.3 ใหม่ได้ดังนี้

$$V_a = V_a^{(0)} + V_a^{(1)} + V_a^{(2)} \quad (3.6)$$

$$V_b = V_a^{(0)} + a^2 V_a^{(1)} + a V_a^{(2)} \quad (3.7)$$

$$V_c = V_a^{(0)} + a V_a^{(1)} + a^2 V_a^{(2)} \quad (3.8)$$

หรือสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมตริกได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a^{(0)} \\ V_a^{(1)} \\ V_a^{(2)} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

เมื่อ

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

ทำการ Invert เมตริก A

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

สามารถหา $V_a^{(0)}$, $V_a^{(1)}$, $V_a^{(2)}$ ได้โดยนำ Invert เมตริก A จากสมการที่ (3.11) คูณเข้าไปทั้งสองข้างของสมการที่ (3.9)

$$\begin{bmatrix} V_a^{(0)} \\ V_a^{(1)} \\ V_a^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

จากสมการที่ (3.12) สามารถเขียนแยกสมการได้เป็น

$$V_a^{(0)} = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) \quad (3.13)$$

$$V_a^{(1)} = \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c) \quad (3.14)$$

$$V_a^{(2)} = \frac{1}{3}(V_a + a^2V_b + aV_c) \quad (3.15)$$

จากสมการที่กล่าวมานี้สามารถใช้ได้ในกรณีของแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย โดยการเปลี่ยน V_a, V_b, V_c เป็น V_{ab}, V_{bc}, V_{ca} ดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{ab}^{(0)} \\ V_{ab}^{(1)} \\ V_{ab}^{(2)} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

ดังนั้น

$$V_{ab} = V_{ab}^{(0)} + V_{ab}^{(1)} + V_{ab}^{(2)} \quad (3.17)$$

$$V_{bc} = V_{ab}^{(0)} + a^2V_{ab}^{(1)} + aV_{ab}^{(2)} \quad (3.18)$$

$$V_{ca} = V_{ab}^{(0)} + aV_{ab}^{(1)} + a^2V_{ab}^{(2)} \quad (3.19)$$

สามารถหา $V_{ab}^{(0)}, V_{ab}^{(1)}, V_{ab}^{(2)}$ ได้โดยนำ Invert เมตริก A จากสมการที่ (3.11) คูณเข้าไปทั้งสองข้างของสมการที่ (3.16)

$$\begin{bmatrix} V_{ab}^{(0)} \\ V_{ab}^{(1)} \\ V_{ab}^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

จากสมการที่ 3.20 สามารถเขียนแยกได้เป็น

$$V_{ab}^{(0)} = \frac{1}{3}(V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}) \quad (3.21)$$

$$V_{ab}^{(1)} = \frac{1}{3}(V_{ab} + aV_{bc} + a^2V_{ca}) \quad (3.22)$$

$$V_{ab}^{(2)} = \frac{1}{3}(V_{ab} + a^2V_{bc} + aV_{ca}) \quad (3.23)$$

และสำหรับกรณีของกระแสไฟฟ้าสามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a^{(0)} \\ I_a^{(1)} \\ I_a^{(2)} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

ดังนั้น

$$I_a = I_a^{(0)} + I_a^{(1)} + I_a^{(2)} \quad (3.25)$$

$$I_b = I_a^{(0)} + a^2I_a^{(1)} + aI_a^{(2)} \quad (3.26)$$

$$I_c = I_a^{(0)} + aI_a^{(1)} + a^2I_a^{(2)} \quad (3.27)$$

จากสมการที่ (3.24) สามารถหา $I_a^{(0)}$, $I_a^{(1)}$ และ $I_a^{(2)}$ ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} I_a^{(0)} \\ I_a^{(1)} \\ I_a^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

จากสมการที่ 3.28 สามารถเขียนแยกได้เป็น

$$I_a^{(0)} = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \quad (3.29)$$

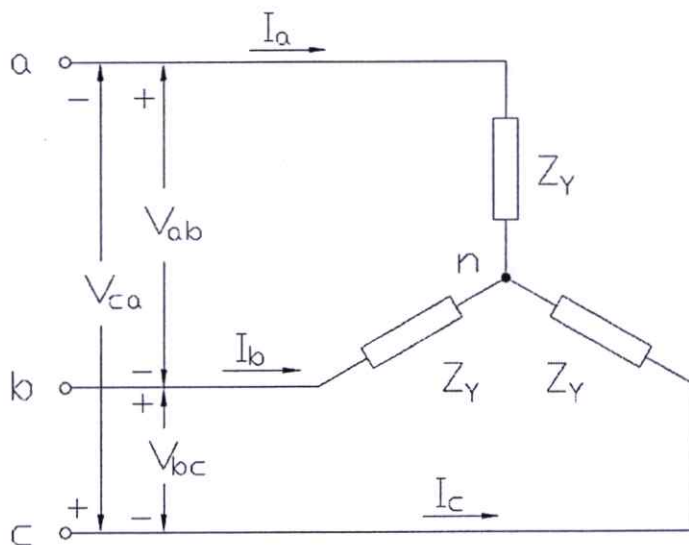
$$I_a^{(1)} = \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2I_c) \quad (3.30)$$

$$I_a^{(2)} = \frac{1}{3}(I_a + a^2I_b + aI_c) \quad (3.31)$$

สำหรับภาระไฟฟ้าที่มีการต่อแบบสตาร์ จากที่เราทราบกันแล้วว่าผลบวกของแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายของระบบไฟฟ้าสามเฟสจะมีค่าเท่ากับศูนย์เสมอ ดังนั้นจากสมการที่ (3.21)

$$V_{ab}^{(0)} = \frac{1}{3}(V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}) = 0 \quad (3.32)$$

นั่นคือ ไม่มี zero sequence component ของแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย สำหรับภาระไฟฟ้าที่มีการต่อแบบสตาร์



รูปที่ 3.9 แสดงการต่อภาระไฟฟ้าแบบสตาร์ isolated neutral

ดังนั้นจากสมการที่ (3.16) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ a^2 & a \\ a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{ab}^{(1)} \\ V_{ab}^{(2)} \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

จากสมการที่ (3.33) สามารถเขียนแยกสมการได้เป็น

$$V_{ab} = V_{ab}^{(1)} + V_{ab}^{(2)} \quad (3.34)$$

$$V_{bc} = a^2 V_{ab}^{(1)} + a V_{ab}^{(2)} \quad (3.35)$$

$$V_{ca} = a V_{ab}^{(1)} + a^2 V_{ab}^{(2)} \quad (3.36)$$

จากสมการที่ (3.33) สามารถหา $V_{ab}^{(1)}$ และ $V_{ab}^{(2)}$ ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_{ab}^{(1)} \\ V_{ab}^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

และสำหรับกระแสไฟฟ้าของภาระไฟฟ้าที่มีการต่อแบบสตาร์ isolated neutral นั้น เราพบว่าเนื่องจากไม่มีสาย Neutral เช่นเดียวกับการต่อภาระไฟฟ้าแบบเดลต้า ทำให้มีผลรวมของ I_a , I_b และ I_c เป็นศูนย์ ดังนั้นจากสมการที่ (3.29) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$I_a^{(0)} = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) = 0 \quad (3.38)$$

นั่นคือ ไม่มี zero sequence component ของกระแส สำหรับภาระไฟฟ้าที่มีการต่อแบบสตาร์ isolate neutral และภาระไฟฟ้าที่มีการต่อแบบเดลต้า

จากสมการต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วนี้ สามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าด้วยวิธี Symmetrical Component ได้ดังนี้

$$S_{3\phi} = P + jQ = V_a I_a^* + V_b I_b^* + V_c I_c^* \quad (3.39)$$

หรือสามารถเขียนเป็น matrix ได้ดังนี้

$$S_{3\phi} = [V_a \quad V_b \quad V_c] \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}^* = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}^* \quad (3.40)$$

โดยใช้สมการที่ (3.9) และ (3.10) จะได้ว่า

$$S_{3\phi} = [AV_{012}]^T \cdot [AI_{012}]^* \quad (3.41)$$

เมื่อ

$$V_{012} = \begin{bmatrix} V_a^{(0)} \\ V_b^{(1)} \\ V_c^{(2)} \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad I_{012} = \begin{bmatrix} I_a^{(0)} \\ I_b^{(1)} \\ I_c^{(2)} \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

จากกฎการ inverse matrix จะได้

$$[AV_{012}]^T = V_{012}^T A^T \quad (3.43)$$

ดังนั้น

$$S_{3\phi} = V_{012}^T A^T \cdot [AI_{012}]^* = V_{012}^* A^T A^* I_{012}^* \quad (3.44)$$

เนื่องจาก $A^T = A$ และ a กับ a^2 เป็น conjugates ซึ่งกันและกัน เราจะได้

$$S_{3\phi} = [V_a^{(0)} \quad V_a^{(1)} \quad V_a^{(2)}] \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a^{(0)} \\ I_a^{(1)} \\ I_a^{(2)} \end{bmatrix}^* \quad (3.45)$$

เนื่องจาก

$$A^T A^* = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} = 3 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

ดังนั้น

$$S_{3\phi} = 3 \begin{bmatrix} V_a^{(0)} & V_b^{(1)} & V_c^{(2)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a^{(0)} \\ I_a^{(1)} \\ I_a^{(2)} \end{bmatrix}^* \quad (3.47)$$

ดังนั้น

$$S_{3\phi} = P + jQ = V_a I_a^* + V_b I_b^* + V_c I_c^* = 3V_a^{(0)} I_a^{(0)*} + 3V_a^{(1)} I_a^{(1)*} + 3V_a^{(2)} I_a^{(2)*} \quad (3.48)$$

3.2 ค่าตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล (CVUF)

ระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของการไฟฟ้าจะเกิดความไม่สมดุลอยู่ตลอดเวลา ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากภาระทางไฟฟ้าที่ใช้ในบ้านพักอาศัยเป็นระบบ 1 เฟส ส่วนภาระทางไฟฟ้าในระบบอุตสาหกรรมส่วนใหญ่เป็นระบบ 3 เฟส การต่อเข้าและปลดออกของภาระทางไฟฟ้า 1 เฟส ทำให้เกิดการใช้ไฟฟ้าในแต่ละเฟสไม่เท่ากัน ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสไม่เท่ากันด้วย จึงเป็นสาเหตุของความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าสามเฟสขึ้น

วิธีการที่จะหาค่าระดับของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลมีอยู่ 2 วิธีด้วยกันคือ

1. The Percent Voltage Unbalance (PVU) ซึ่งถูกนิยามโดย NEMA (National Electrical Manufacturers Association) ค่า PVU นี้คำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างค่าความแตกต่างสูงสุดระหว่างแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสเมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย ต่อแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยของทั้งสามเฟส

$$\%PVU = \frac{\text{MAX} \{ |V_a - V_{avg}|, |V_b - V_{avg}|, |V_c - V_{avg}| \}}{V_{avg}} \times 100 \quad (3.39)$$

2. The Voltage Unbalance Factor (VUF) ซึ่งถูกนิยามโดย IEC (International Electrotechnical Commission) ค่า VUF นี้คำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่าง Negative-sequence voltage (V_n) กับ Positive-sequence voltage (V_p) ดังนี้

$$\%VUF = |V_n / V_p| \times 100 \quad (3.40)$$

ซึ่งทั้งสองวิธีนี้ก็ต่างมุ่งเน้นและแสดงให้เห็นถึงระดับของแรงดันไฟฟ้าที่ไม่สมดุล ต่างกันก็ตรงที่ PVU จะแสดงระดับของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลเพียงแค่มagnitude เท่านั้นซึ่งเป็นการสะดวกในการวัดในภาคสนาม ส่วน VUF จะแสดงระดับของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลทั้งขนาดและมุมทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นการยากในการวัดในภาคสนาม แต่อย่างไรก็ตามค่า VUF จะบ่งบอกคุณลักษณะของระดับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลได้ครบถ้วนและดีกว่าค่า PVU

ส่วนขยายของ VUF คือ ค่าตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล Complex Voltage Unbalance Factor (CVUF) ซึ่งสามารถนิยามได้จาก อัตราส่วนระหว่าง Negative-sequence voltage phasor (V_n) กับ Positive-sequence voltage phasor (V_p) ค่า CVUF นี้เป็นปริมาณเชิงซ้อนที่ประกอบด้วยขนาดและมุมทางไฟฟ้า ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างมากในการวิเคราะห์และทำนายผลกระทบที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

$$CVUF = k_v = V_n/V_p = k_v \angle \theta_v \quad (3.41)$$

เมื่อ k_v คือค่าตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล Complex Voltage Unbalance Factor (CVUF) ของแรงดันไฟฟ้าต่อเฟส ซึ่งเป็นปริมาณเชิงซ้อนที่ประกอบด้วยขนาดและมุมทางไฟฟ้า โดยที่ k_v เป็นขนาดของค่าตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล ส่วน θ_v คือมุมเฟสของค่าตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

ในทำนองเดียวกัน สำหรับแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายเราสามารถหาค่าตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล Complex Voltage Unbalance Factor (CVUF) ได้เช่นกัน

$$CVUF = k_u = U_n/U_p = k_u \angle \theta_u \quad (3.42)$$

เมื่อ k_u คือค่าตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล Complex Voltage Unbalance Factor (CVUF) ของแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย และ U_n คือ Negative-sequence voltage phasor ของแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย และ U_p คือ Positive-sequence voltage phasor ของแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย โดยที่ k_u เป็นขนาดของค่าตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย ส่วน θ_u คือมุมเฟสของค่าตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย เราสามารถหา U_n และ U_p ได้จากสมการ

$$\begin{bmatrix} U_p \\ U_n \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \\ U_{ca} \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

โดยที่ U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} คือแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย

$$\begin{bmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \\ U_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ a^2 & a \\ a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_p \\ U_n \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง k_v และ k_u ได้ดังนี้

$$k_u = k_v \cdot \angle -60 \quad (3.45)$$

$$k_u \angle \theta_u = k_v \angle \theta_v - 60$$

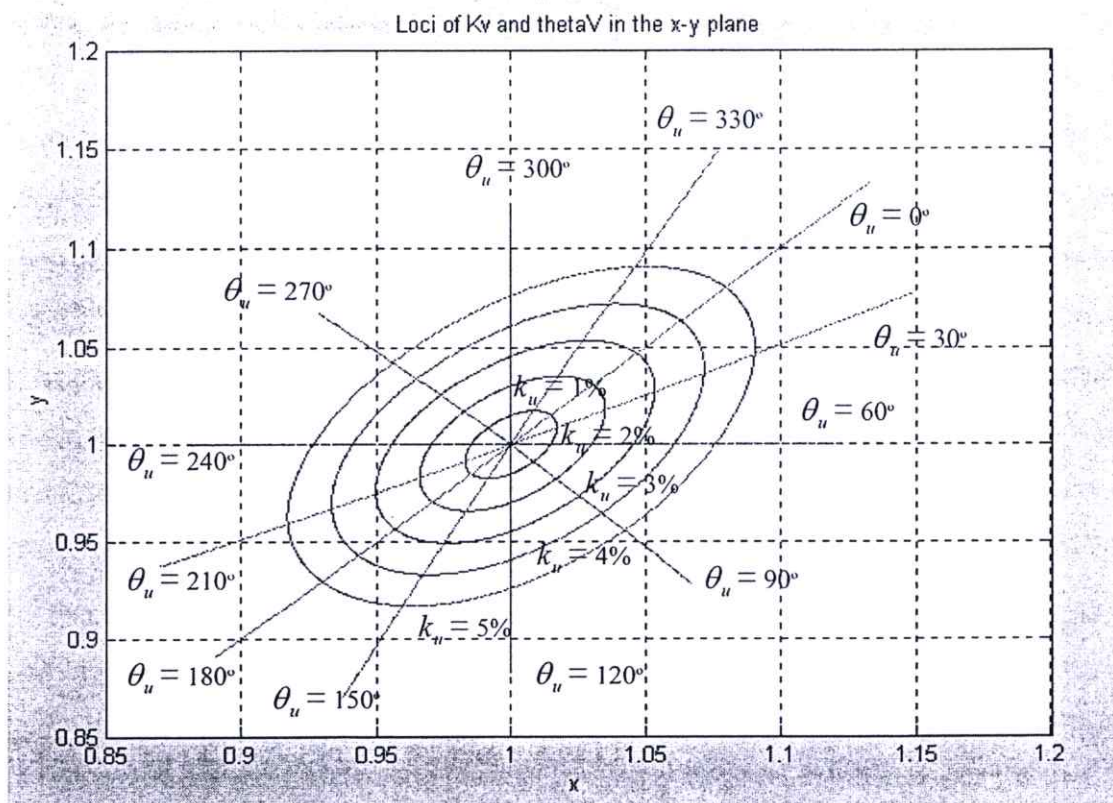
โดยที่ขนาดของค่าตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล k_u จะมีขนาดเท่ากับขนาดของค่าตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล k_v และมุมเฟสของค่าตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล θ_u จะมีค่าล้าหลัง มุมเฟสของค่าตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล θ_v อยู่เป็นมุม 60° ทั้งนี้สืบเนื่องมาจากเมื่อพิจารณา positive-sequence component แล้ว U_p จะมีมุมนำหน้า V_p อยู่เป็นมุม 30° และเมื่อพิจารณา negative-sequence component แล้ว U_n จะมีมุมตามหลัง V_n อยู่เป็นมุม 30° ดังนั้นอัตราส่วนระหว่าง U_n/U_p จึงมีมุมเฟสล้าหลังอัตราส่วนระหว่าง V_n/V_p อยู่ 60°

เนื่องจากว่าเฟสเซอร์ของแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย ในระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟส เมื่อนำมาเรียงต่อกันจะเป็นรูปสามเหลี่ยมเสมอ ดังนั้นเมื่อให้ขนาดของด้านใดด้านหนึ่งเป็นค่าอ้างอิง ในที่นี้ให้ U_{bc} จะได้อัตราส่วนของแรงดันแต่ละด้านต่อค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงดังต่อไปนี้

$$U_{bc} : U_{ab} : U_{ca} = 1 : x : y \quad (3.46)$$

เมื่อ $x = U_{ab}/U_{bc}$ และ $y = U_{ca}/U_{bc}$

ค่า (k_u, θ_u) และค่า (x, y) จะมีความสัมพันธ์กันแบบหนึ่งต่อหนึ่ง นั่นคือถ้าทราบค่า (k_u, θ_u) ก็จะสามารถหาค่า (x, y) ได้จากสมการที่ (3.42), (3.44) และ (3.46) และในทำนองเดียวกันถ้าทราบค่า (x, y) ก็จะสามารถใช้กฎของ Cosine หามุมแต่ละด้านของรูปสามเหลี่ยมได้ ซึ่งก็หมายความว่าสามารถหาค่า U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} ได้ และเมื่อนำไปแทนในสมการที่ (3.43) และ (3.42) ก็จะสามารถหาค่า (k_u, θ_u) ได้ วิธีของจุดของค่าคงที่ k_u และ θ_u ในกราฟแกน x และแกน y สามารถแสดงได้ดังรูป



รูปที่ 3.10 วิธีของจุดของค่าคงที่ k_u และ θ_u ในกราฟแกน x และแกน y

จากรูปที่ 3.10 พบว่าวิธีของจุดของค่าคงที่ k_u จะมีลักษณะคล้ายวงรี ในขณะที่ค่าคงที่ θ_u มีวิธีของจุดใกล้เคียงกับเส้นตรง ที่ตำแหน่ง $(x, y) = (1, 1)$ คือตำแหน่งที่มีแรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟส สมดุล ซึ่งจะมีค่า $k_u = 0$ และสำหรับค่า k_u ที่มีค่ามากขึ้นจะมีระยะทางออกจากตำแหน่ง $(1, 1)$ ตามลำดับ ถ้าพิจารณาค่า k_u ค่าหนึ่งจะพบว่าสามารถประกอบด้วยค่า x และ y ที่มีค่าหลายค่าไม่สิ้นสุด ซึ่งจะพบว่าค่า θ_u มีความสำคัญมากในการแสดงให้เห็นถึงอัตราส่วนระหว่าง $U_{bc} : U_{ab} : U_{ca} = 1 : x : y$ โดยมีค่าอ้างอิงคือค่า U_{bc}

จากรูปที่ 3.10 พบว่าสามารถใช้เป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์มากในการวัดในภาคสนาม ที่สามารถบอกค่าของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลได้ทั้งขนาดและมุม ซึ่งสามารถยกตัวอย่างง่ายๆ ได้ดังนี้ ถ้าวัดแรงดันไฟฟ้า $U_{bc} = 380\text{V}$, $U_{ab} = 351.5\text{V}$, $U_{ca} = 380\text{V}$ สามารถหาค่า x และ y ได้ดังนี้ $x = U_{ab} / U_{bc} = 351.5 / 380 = 0.925$ และ $y = U_{ca} / U_{bc} = 380 / 380 = 1.0$ เราสามารถหาค่า VUF จากรูปที่ 3.10 ได้เท่ากับ 5% และมุม $\theta_u = 240^\circ$

เมื่อ k_u มีค่าคงที่จะพบว่าค่า θ_u จะมีค่าเปลี่ยนแปลงได้ตั้งแต่ 0° ถึง 360° ซึ่งจะพบว่าค่า x และค่า y จะมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงที่กว้างมาก ยกตัวอย่างเช่น สำหรับค่าคงที่ $k_u = 3\%$ ค่า x และค่า y จะมีการเปลี่ยนแปลงได้ในช่วงตั้งแต่ 0.95 ถึง 1.053 ซึ่งสิ่งเหล่านี้สามารถบอกเป็นนัยได้

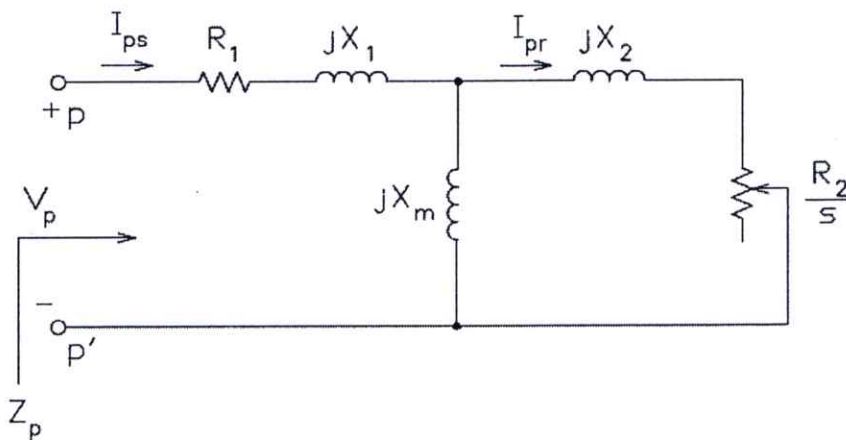
ถึงความสำคัญของ $\theta_{\prime\prime}$ ในการบอกค่าความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

3.3 มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

ระบบที่ไม่สมดุลสามารถถูกวิเคราะห์ได้ด้วยวิธีการของ symmetrical component ดังที่เราทราบมาแล้วว่าในระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของการไฟฟ้าจะเกิดความไม่สมดุลอยู่ตลอดเวลา ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากภาระทางไฟฟ้าที่ใช้ในบ้านพักอาศัยเป็นระบบ 1 เฟส ส่วนภาระทางไฟฟ้าในระบบอุตสาหกรรมส่วนใหญ่เป็นระบบ 3 เฟส การต่อเข้าและปลดออกของภาระทางไฟฟ้า 1 เฟส ทำให้เกิดการใช้ไฟฟ้าในแต่ละเฟสไม่เท่ากัน ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสไม่เท่ากันด้วย ซึ่งภาระทางไฟฟ้าในระบบอุตสาหกรรมส่วนใหญ่คือ มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ฉะนั้นจึงหลีกเลี่ยงไม่ได้เลยที่มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสจะถูกป้อนด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่ไม่สมดุล ผลของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลจะทำให้มอเตอร์มีอุณหภูมิสูงขึ้น ความเร็วรอบลดลง กระแสไม่สมดุล ทอร์คกระเพื่อม ประสิทธิภาพต่ำ อายุการใช้งานสั้นลง ฯลฯ

เมื่อมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล จาก symmetrical component สามารถแยกแรงดันไฟฟ้าได้ 3 sequence เป็นแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ ทำให้เกิดวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 วงจรแตกต่างกันตามแรงดันป้อนเข้าดังนี้

เมื่อ positive sequence voltage ป้อนเข้ามอเตอร์เหนี่ยวนำ วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ยังคงเหมือนเดิม เพราะ positive sequence voltage มี sequence เดียวกันกับแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าเดิม ดังนั้นสามารถเขียนวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อได้รับ positive sequence voltage ได้ดังนี้



รูปที่ 3.11 วงจรสมมูลย์ต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อได้รับ Positive sequence voltage

โดยที่

V_p คือ Positive sequence voltage

Z_p คือ Positive sequence impedance

I_{ps} คือ Stator positive-sequence current

I_{pr} คือ Rotor positive-sequence current

เมื่อ negative sequence voltage ป้อนเข้ามอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งมี sequence ตรงกันข้ามกับแรงดันไฟฟ้าเดิมที่ป้อนเข้า ทำให้มีการสร้างสนามแม่เหล็กหมุนในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางการหมุนของโรเตอร์ สามารถหาค่าสลิปในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางการหมุนของโรเตอร์ได้ดังนี้

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad (3.47)$$

$$N_r = N_s(1-s) \quad (3.48)$$

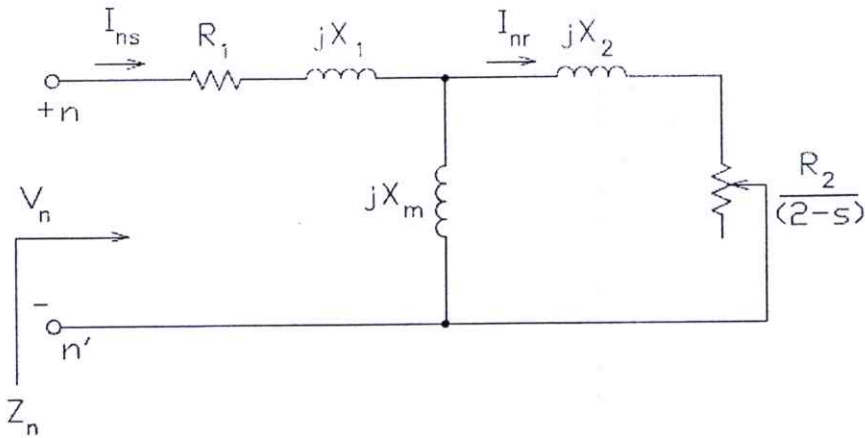
จากสมการที่ (3.48) ทิศทางของสนามแม่เหล็กหมุนกับทิศทางการหมุนของโรเตอร์จะมีทิศทางไปในทางเดียวกัน แต่สำหรับกรณีของ negative sequence voltage จะมีการสร้างสนามแม่เหล็กหมุนในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางการหมุนของโรเตอร์ ดังนั้นสามารถหา slip negative ได้ดังนี้

$$s_{n} = \frac{N_s + N_r}{N_s} \quad (3.49)$$

นำค่า N_r ในสมการที่ (3.48) แทนลงในสมการที่ (3.49)

$$s_{n} = (2-s) \quad (3.50)$$

สามารถเขียนวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อได้รับ negative sequence voltage ได้ดังนี้



รูปที่ 3.12 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อได้รับ Negative sequence voltage

โดยที่

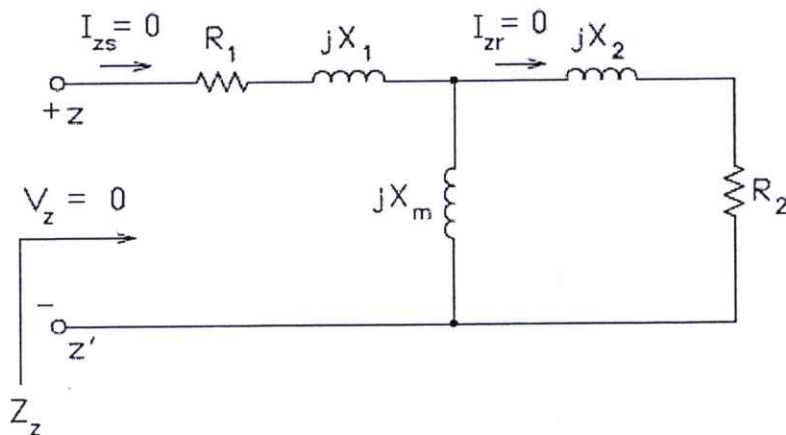
V_n คือ Negative sequence voltage

Z_n คือ Negative sequence impedance

I_{ns} คือ Stator negative-sequence current

I_{nr} คือ Rotor negative-sequence current

สำหรับ zero sequence voltage เปรียบเสมือนกับแรงดันไฟฟ้า 1 เฟส จำนวน 3 เส้น ดังนั้นจึงไม่สร้างสนามแม่เหล็กหมุนขึ้น ทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำไม่หมุน นั่นคือจะมีค่าสลิปเท่ากับ 1 และเนื่องจากว่าในกรณีของแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายจะมีผลรวมของ phaser เป็นศูนย์เสมอ ดังนั้นจึงไม่มี zero sequence voltage ดังสมการที่ (3.32) นั่นคือ zero sequence component จะไม่ถูกนำมาพิจารณา



รูปที่ 3.13 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อได้รับ Zero sequence voltage

3.4 กระแส Line และค่าตัวประกอบกระแสไฟฟ้าไม่สมดุล (CCUF)

เนื่องจากเมื่อเกิดปรากฏการณ์แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลเกิดขึ้นกับมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟส จะทำให้กระแส Line ที่จ่ายให้กับมอเตอร์เกิดความไม่สมดุลขึ้น ซึ่งสามารถบอกระดับของความไม่สมดุลได้เช่นเดียวกับระดับความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า (CVUF) โดยจะบอกเป็นค่าตัวประกอบกระแสไฟฟ้าไม่สมดุล (CCUF) ตามการพิสูจน์สมการดังนี้
เมื่อแรงดันไฟฟ้า Positive-sequence voltage (V_p) ถูกเขียนให้อยู่ในรูป Polar form.

$$V_p = V_p \angle \beta \quad (3.51)$$

และเมื่อพิจารณานิยามของ CVUF จากสมการที่ (3.41) เราสามารถหา Negative-sequence voltage (V_n) ได้ดังนี้

$$V_n = k_v V_p \angle (\beta + \theta_v) \quad (3.52)$$

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 3.11 และ 3.12 สามารถหา Symmetrical component ของกระแสของขดลวดสเตเตอร์ได้ดังนี้

$$I_{ps} = V_p / Z_p = (V_p / Z_p) \angle (\beta - \phi_p) \quad (3.53)$$

$$I_{ns} = V_n / Z_n = (k_v V_p / Z_n) \angle (\beta + \theta_v - \phi_n) \quad (3.54)$$

เมื่อ ϕ_p และ ϕ_n คือ มุมของ Z_p และ Z_n ตามลำดับ และจากสมการ (3.24) - (3.27) สามารถหากระแสของขดลวดสเตเตอร์ได้ดังนี้

$$I_a = I_{ps} + I_{ns} \quad (3.55)$$

$$I_b = a^2 I_{ps} + a I_{ns} \quad (3.56)$$

$$I_c = a I_{ps} + a^2 I_{ns} \quad (3.57)$$

สำหรับระดับของความไม่สมดุลของกระแส Stator สามารถหาค่าได้โดยใช้ Current Unbalance Factor (CUF) ซึ่งก็มีนิยามที่คล้ายคลึงกับ VUF ดังนี้

$$CUF = k_c = |I_{ns} / I_{ps}| = \frac{V_n / Z_n}{V_p / Z_p} = (Z_p / Z_n) \cdot k_v \quad (3.58)$$

จากสมการที่ (3.58) แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่าง k_c และ k_v และสำหรับค่าตัวประกอบกระแสไฟฟ้าไม่สมดุล หรือ Complex Current Unbalance Factor (CCUF) สามารถหาได้จากสมการที่ (3.51) – (3.54) ดังนี้

$$CCUF = k_c = k_c \angle \theta_c = \frac{I_{ns}}{I_{ps}} = \frac{Z_p}{Z_n} \cdot k_v \angle (\theta_v + \varphi_p - \varphi_n) \quad (3.59)$$

เมื่อ

$$\theta_c = \theta_v + \varphi_p - \varphi_n \quad (3.60)$$

สามารถเขียนขนาดของกระแสของมอเตอร์ในสมการที่ (3.55) – (3.57) ให้อยู่ในเทอมของ k_c และ θ_c ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} I_a &= |I_{ps} + I_{ns}| = |I_{ps} + k_c I_{ps}| \\ &= I_{ps} \sqrt{1 + k_c^2 + 2k_c \cos \theta_c} \end{aligned} \quad (3.61)$$

$$\begin{aligned} I_b &= |a^2 I_{ps} + a I_{ns}| \\ &= I_{ps} \sqrt{1 + k_c^2 + 2k_c \cos(\theta_c - 2\pi/3)} \end{aligned} \quad (3.62)$$

$$\begin{aligned} I_c &= |a I_{ps} + a^2 I_{ns}| \\ &= I_{ps} \sqrt{1 + k_c^2 + 2k_c \cos(\theta_c + 2\pi/3)} \end{aligned} \quad (3.63)$$

3.5 ค่ากระแสเดเตอร์เปลี่ยนแปลงสูงสุดในช่วง k_v คงที่ (ΔI_{max})

นิยามให้ I_{max} คือ กระแสเดเตอร์สูงสุด

$$I_{max} = \max(I_a, I_b, I_c) \quad (3.64)$$

จากสมการที่ (3.61) – (3.63) สามารถหาค่าสูงสุดของ I_{max} หรือ $I_{max}(max)$ ได้ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ $I_{ps}(1+k_c)$ เมื่อ θ_c มีค่าเท่ากับ $0, 2\pi/3$ และ $4\pi/3$ จากสมการที่ (3.60) สามารถหาค่า θ_v ในที่นี้ให้มีค่าเท่ากับ $\hat{\theta}_v$ ซึ่งก็คือค่า θ_v ที่กระแส $I_{max}(max)$ ได้ดังนี้

$$\hat{\theta}_v = \varphi_n - \varphi_p + 2n\pi/3 \quad (3.65)$$

เมื่อ $n = 0, 1$ และ 2 ซึ่งจะทำให้ได้ค่า $I_{max}(max)$ ที่เกิดขึ้นที่เฟส a, b และ c ตามลำดับ ในทำนองเดียวกันสามารถหาค่าต่ำสุดของ I_{max} หรือ $I_{max}(min)$ ได้ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ $I_{ps}\sqrt{1+k_c+k_c^2}$ เมื่อ $\theta_c = \pi, -\pi/3$ และ $\pi/3$ ในที่นี้สามารถหาค่า $\bar{\theta}_v$ ซึ่งก็คือค่า θ_v ที่กระแส $I_{max}(min)$ ได้ดังนี้

$$\bar{\theta}_v = \varphi_n - \varphi_p + 2n\pi/3 \pm \pi/3 \quad (3.66)$$

เมื่อ $n = 0, 1$ และ 2 ซึ่งจะทำให้ได้ค่า $I_{max}(min)$ ที่เกิดขึ้นที่เฟส a, b และ c ตามลำดับ ซึ่งขอบเขตของ I_{max} สามารถหาได้ดังต่อไปนี้

$$I_{ps}\sqrt{1+k_c+k_c^2} \leq I_{max} \leq I_{ps}(1+k_c) \quad (3.67)$$

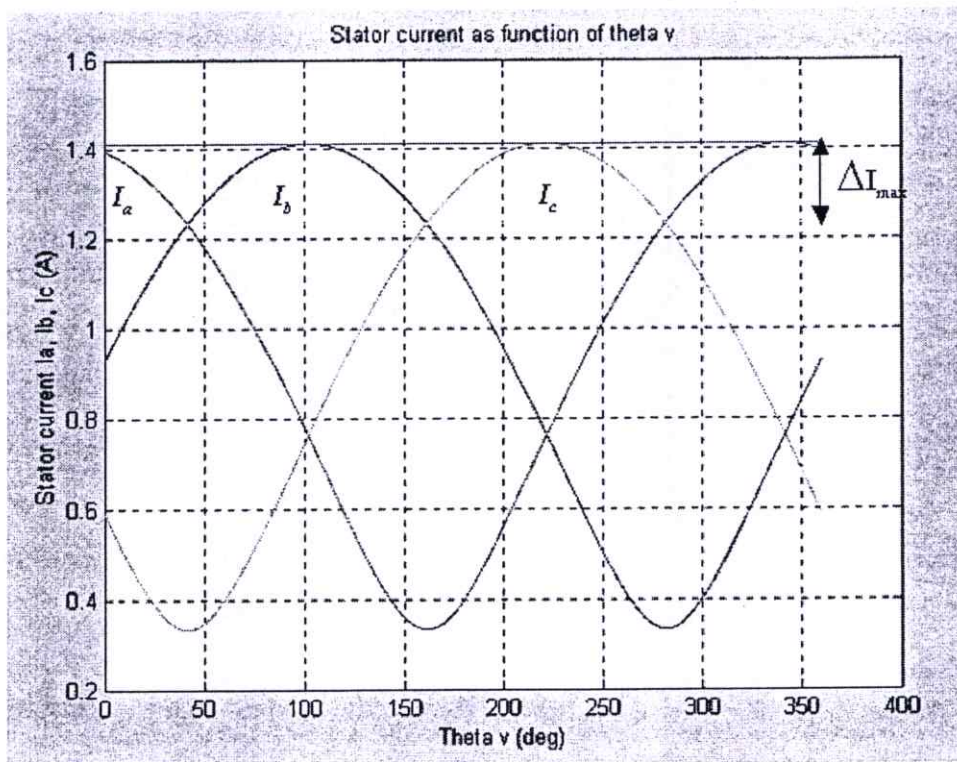
และช่วงของการเปลี่ยนแปลงของ I_{max} สามารถหาได้จาก

$$\begin{aligned} \Delta I_{max} &= I_{ps} \left(1 + k_c - \sqrt{1 + k_c + k_c^2} \right) \\ &= \frac{V_p}{Z_p} \left[1 + k_v \frac{Z_p}{Z_n} - \sqrt{1 + k_v \frac{Z_p}{Z_n} + \left(k_v \frac{Z_p}{Z_n} \right)^2} \right] \end{aligned} \quad (3.68)$$

จากสมการต่างๆ ที่ยกมานี้ เพื่อให้เข้าใจได้ง่ายขึ้นจึงขอยกตัวอย่างการจำลองผลการทดลองจากคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้า 4 ขั้วแม่เหล็กไฟฟ้า พิกัดแรงดันไฟฟ้า 380V ความถี่ 50 Hz มีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ หน่วยเป็น โอห์ม ดังนี้

$R_1 = 8.87$, $R_2 = 12.26$, $X_1 = 9.89$, $X_2 = 9.89$, $X_m = 251$ ได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลคงที่ขนาด $k_v = 6\%$ แต่มีมุม θ_v เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0° ถึง 360° ทำงานที่ค่า Slip เท่ากับ 0.015 จะมีค่ากระแส I_a , I_b , I_c ดังรูปที่ 3.14

โดยเพื่อความสะดวกในการคำนวณ และเน้นพิจารณาอิทธิพลที่เกิดจาก Negative sequence voltage จึงสมมติให้ positive sequence voltage มีค่าเท่ากับ $(380/\sqrt{3})\angle 0^\circ$ V ดังนั้นจากนิยามของ CVUF สมการที่ (3.41) สามารถหา negative sequence voltage ได้คือ $V_n = k_v \angle \theta_v \cdot (380/\sqrt{3})\angle 0^\circ$

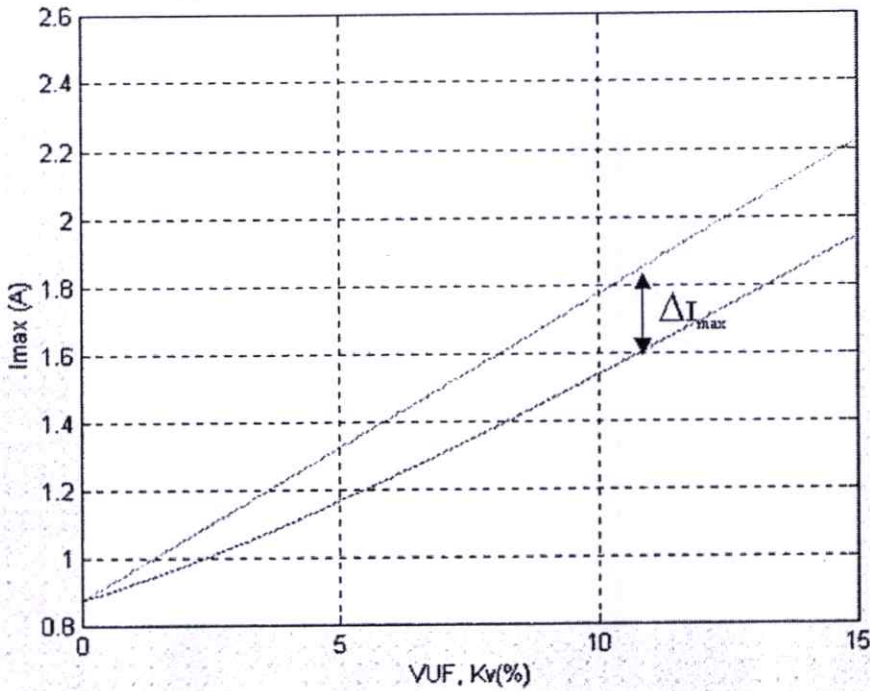


รูปที่ 3.14 กระแสสเตเตอร์ I_a , I_b , I_c ของมอเตอร์เมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลคงที่ขนาด $k_v = 6\%$ และ θ_v เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0° ถึง 360° โดยที่มอเตอร์ทำงานที่ค่า Slip 0.015

จากรูปที่ 3.14 ซึ่งถูก Plot มาจากสมการที่ (3.61) - (3.63) จะพบว่ามุม θ_v จะมีอิทธิพลต่อกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์เป็นอย่างมาก โดยเมื่อพิจารณาที่ค่า k_v คงที่ค่าหนึ่งกระแส Stator จะมีการ

เปลี่ยนแปลงตาม θ_v และค่า I_{max} จะมีค่าการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง ΔI_{max} ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (3.68) โดยค่า I_{max} นี้จะมีค่าต่ำสุดที่มุม $\theta_v = \bar{\theta}_v$ ในที่นี้เรียกว่า $I_{max}(min)$ และค่า I_{max} นี้จะมีค่าสูงสุดที่มุม $\theta_v = \hat{\theta}_v$ ในที่นี้เรียกว่า $I_{max}(max)$

จากสมการที่ (3.68) สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่วง ΔI_{max} กับ k_v เมื่อมอเตอร์ทำงานที่ค่า Slip = 0.015 โดยใช้โปรแกรม MATLAB พล็อตกราฟความสัมพันธ์ออกมาได้ดังนี้



รูปที่ 3.15 ช่วงของ ΔI_{max} ที่เปลี่ยนแปลงตาม k_v เมื่อมอเตอร์ทำงานที่ค่า slip 0.015

จากรูปที่ 3.15 พบว่าค่า ΔI_{max} จะมีค่าเป็นศูนย์เมื่อ $k_v = 0\%$ นั่นคือแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟส สมดุลกัน แต่ ΔI_{max} จะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อ k_v มีค่าเพิ่มขึ้น

บทที่ 4

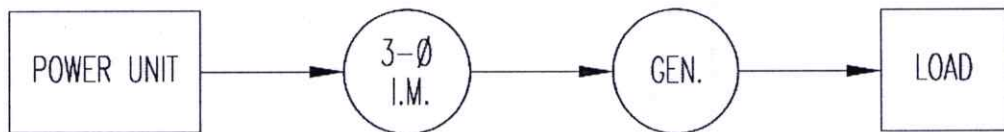
การทดสอบ

4.1 การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล k_v คงที่ค่าหนึ่งโดย θ_v เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ $0^\circ - 360^\circ$

จากที่ทราบกันมาแล้วจากบทที่ผ่านมาว่าในระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของการไฟฟ้าจะเกิดความไม่สมดุลอยู่ตลอดเวลา และสามารถบอกระดับความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าได้โดยบอกเป็นค่าตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล $CVUF = k_v = V_n/V_p = k_v \angle \theta_v$ ซึ่งเป็นปริมาณเชิงซ้อนที่มีทั้งขนาดและมุม โดยที่ขนาดของความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า k_v ค่าหนึ่งสามารถมีมุมเฟสของค่าตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล θ_v ได้ตั้งแต่ $0^\circ - 360^\circ$

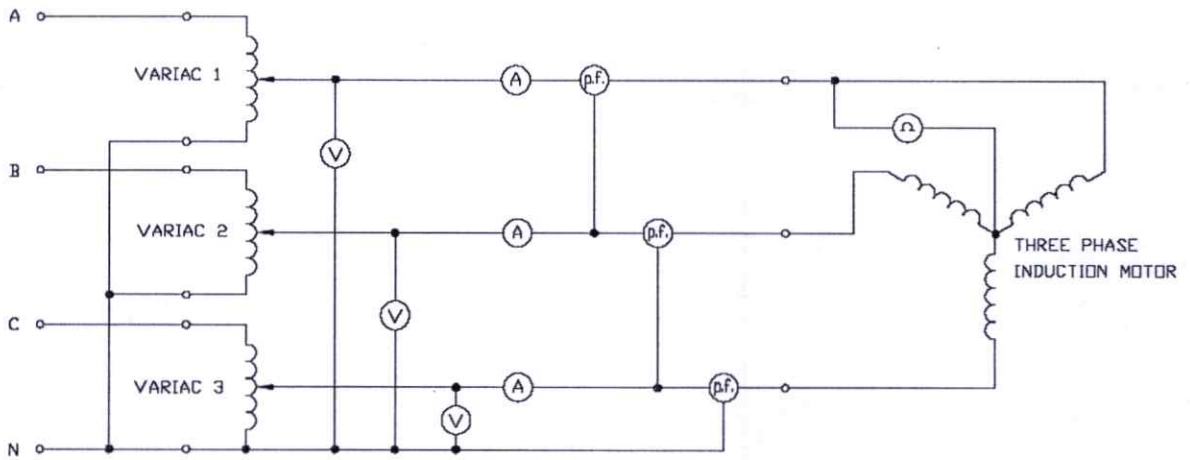
การทดสอบนี้เป็นการศึกษาถึงผลกระทบของกระแสเดเตอร์ในแต่ละเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล k_v คงที่ขนาด 6% โดยให้ θ_v เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0° ถึง 360° โดยมีค่าเพิ่มขึ้นทุกๆ 15° ที่ค่าสลิปคงที่ค่าหนึ่งเท่ากับ 0.015

มอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบมี 2 พิกัดกำลังได้แก่มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้า 4 ขั้วแม่เหล็กไฟฟ้า Frame No. 80M, IP 44, Insulation class F พิกัดแรงดันไฟฟ้า 380V ความถี่ 50 Hz กระแส 1.9A ความเร็วรอบ 1400 รอบต่อนาที โรเตอร์เป็นแบบ Squirrel Cage และมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้า 4 ขั้วแม่เหล็กไฟฟ้า Frame No. 100L, IP 55, Insulation class F พิกัดแรงดันไฟฟ้า 380V ความถี่ 50 Hz กระแส 5A ความเร็วรอบ 1420 รอบต่อนาที โรเตอร์เป็นแบบ Squirrel Cage ในการทดสอบ ต่อมอเตอร์แบบ Star isolated neutral ห้องที่ใช้ในการทดสอบไม่ได้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น ในแต่ละครั้งของการทดสอบมีอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิห้องเท่ากัน

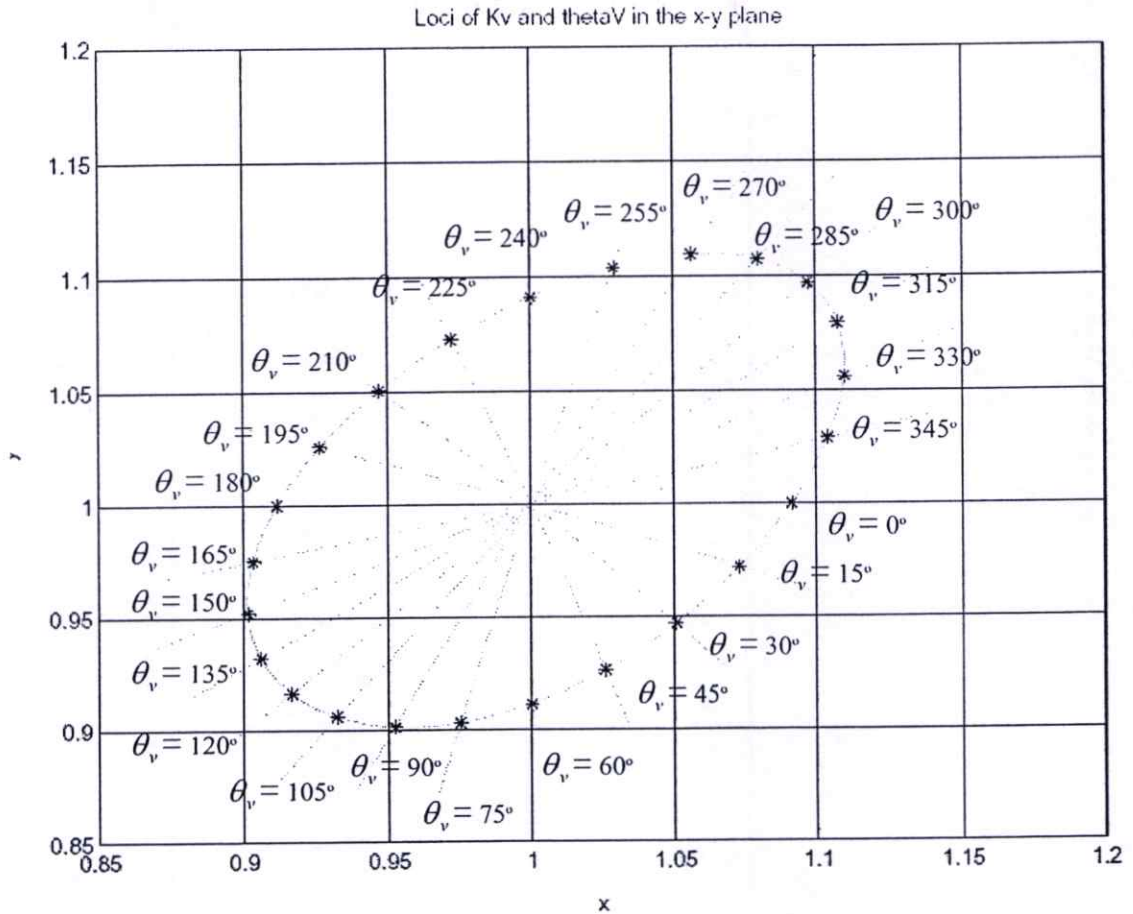


รูปที่ 4.1 ไลอะแกรมที่ใช้ในการทดสอบมอเตอร์

เมื่อ Power unit ประกอบด้วย single phase variable transformer ขนาด 5 kVA จ่ายกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 15 A สามารถปรับแรงดันไฟฟ้าได้ 0 – 260 V จำนวน 3 ตัว นำมาต่อกันตามรูปที่ 4.2 เพื่อทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลให้กับมอเตอร์ และมี Generator ขนาด 4 kW ทำหน้าที่จำลองภาระทางกลให้กับมอเตอร์ โดยมี Tachometer ทำหน้าที่วัดความเร็วรอบของมอเตอร์ Digital multi meter ทำหน้าที่วัดแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น Digital clamp meter ทำหน้าที่วัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น Hioki 3166 clamp on power hitester ทำหน้าที่วัดเพาเวอร์แฟกเตอร์และกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้น และเครื่องมือวัดความต้านทานอย่างละเอียดเพื่อวัดความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ของเฟส A เพื่อนำไปคำนวณหาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับขดลวดสเตเตอร์จากสมการ (2.33) และเครื่องมือวัดอุณหภูมิชนิด Infrared ทำหน้าที่วัดอุณหภูมิที่ผิว frame ของมอเตอร์



รูปที่ 4.2 แสดงวงจรที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 4.3 วิถีและตำแหน่งของ k_v คงที่ขนาด 6% โดย θ_v เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0° ถึง 360° และมีค่าเพิ่มขึ้นทุกๆ 15°

จากรูปที่ 4.3 เป็นวิถีและตำแหน่งของ k_v คงที่ขนาด 6% โดยที่ θ_v เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0° ถึง 360° โดยมีค่าเพิ่มขึ้นทุกๆ 15° ซึ่งได้จากการพล็อตด้วยโปรแกรม MATLAB จากกราฟนี้สามารถหาแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสที่ทำให้เกิดระดับความไม่สมดุลขนาด 6% ที่มุม θ_v ค่าต่างๆ ได้ดังนี้

ตารางที่ 4.1 แสดงตำแหน่งบนแกน X-Y และแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสของค่า k_p คงที่ขนาด 6% โดย θ_p เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0° ถึง 360° และมีค่าเพิ่มขึ้นทุกๆ 15°

θ_p (deg)	Position in X-Y plane		Phase voltage (V)		
	X	Y	V_{an}	V_{bn}	V_{cn}
0	1.0912	1	233	214	214
15	1.0729	0.9719	233	217	211
30	1.0505	0.9468	232	220	209
45	1.0257	0.9263	230	224	207
60	1	0.9115	227	227	207
75	0.975	0.9031	224	230	207
90	0.9519	0.9013	220	232	209
105	0.9321	0.9059	217	233	211
120	0.9164	0.9164	214	233	214
135	0.9059	0.9321	211	233	217
150	0.9013	0.9519	209	232	220
165	0.9031	0.975	207	230	224
180	0.9115	1	207	227	227
195	0.9263	1.0257	207	224	230
210	0.9468	1.0505	209	220	232
225	0.972	1.0729	211	217	233
240	1	1.0912	214	214	233
255	1.0289	1.1039	217	211	233
270	1.0562	1.1095	220	209	232
285	1.0796	1.1073	224	207	230
300	1.0972	1.0971	227	207	227
315	1.1073	1.0796	230	207	224
330	1.1095	1.0562	232	209	220
345	1.1039	1.0289	233	211	217
360	1.0912	1	233	214	214

สำหรับค่า parameter ต่างๆของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบสามารถหาได้โดยการทดสอบ No load test, Block rotor test และ VI method ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้

มอเตอร์ 1 แรงม้า

$$R_1 = 8.87 \, \Omega, R_2 = 12.26 \, \Omega$$

$$X_1 = 9.89 \, \Omega, X_2 = 9.89 \, \Omega$$

$$X_m = 251 \, \Omega$$

มอเตอร์ 3 แรงม้า

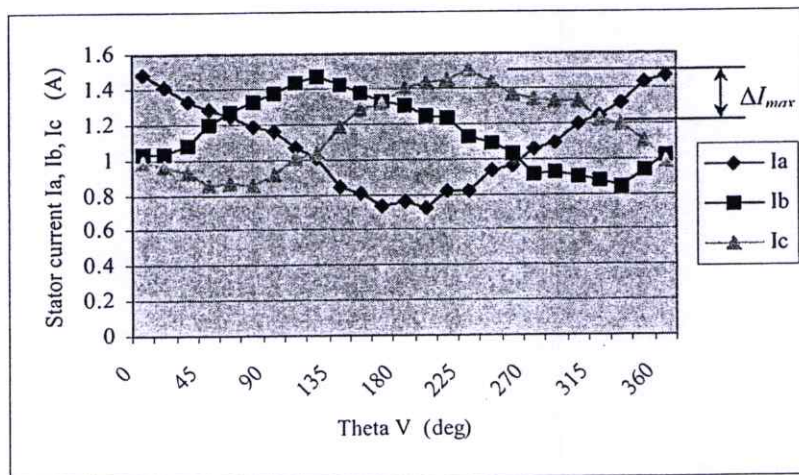
$$R_1 = 2.4 \, \Omega, R_2 = 2.55 \, \Omega$$

$$X_1 = 3.914 \, \Omega, X_2 = 3.914 \, \Omega$$

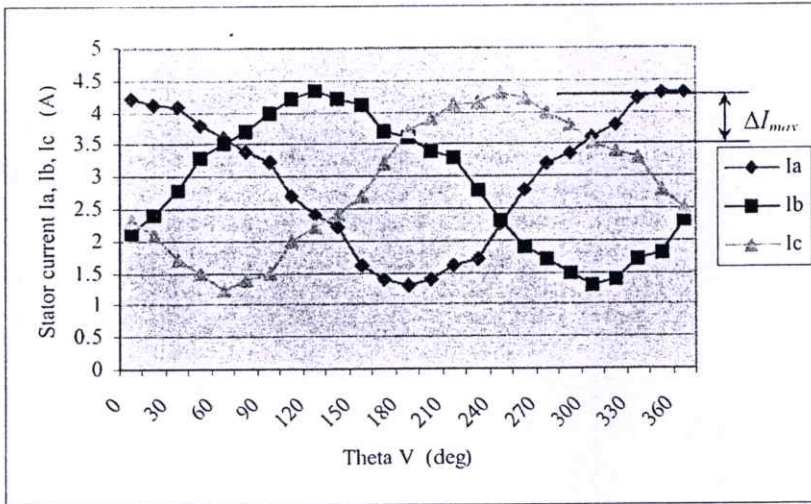
$$X_m = 87.38 \, \Omega$$

4.1.1 ผลการทดสอบ

นำมอเตอร์ที่จะทำการทดสอบมาต่อวงจรตามรูปที่ 4.1 และ 4.2 แล้วทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล k_v คงที่ขนาด 6% โดยที่ θ_v เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0° ถึง 360° และมีค่าเพิ่มขึ้นทุกๆ 15° โดยการปรับ variable transformer ให้มีแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสตามตารางที่ 4.1 แล้วทำการวัดกระแส line ในแต่ละเฟสของมอเตอร์ โดยให้มอเตอร์ทำงานที่ค่าสลิปเท่ากับ 0.015 แล้วนำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟ ซึ่งจะได้กราฟดังรูป



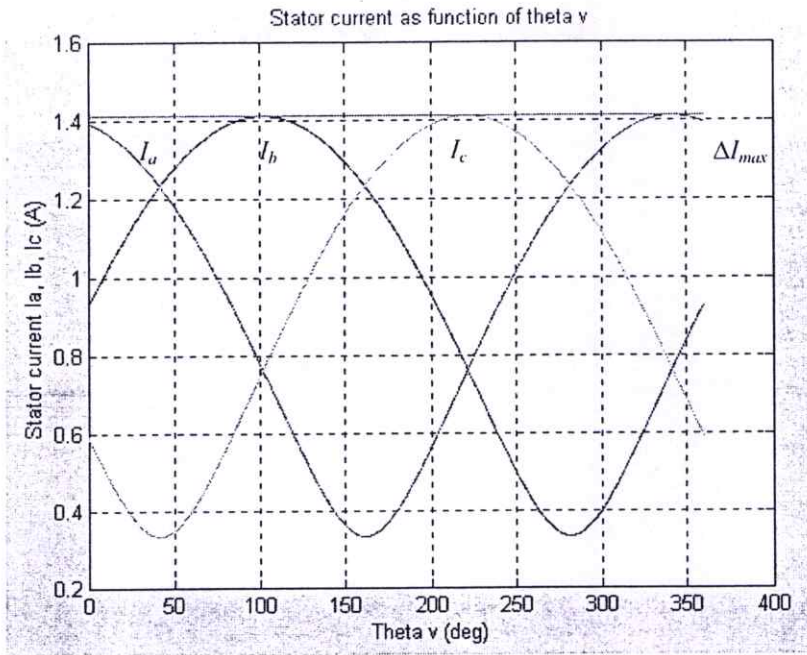
รูปที่ 4.4 กระแสสเตเตอร์ของเฟส A, B, C ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้าที่เป็นฟังก์ชันกับ θ_v โดยที่ θ_v เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0° ถึง 360° สำหรับค่า $k_v = 6\%$ และค่าสลิปเท่ากับ 0.015



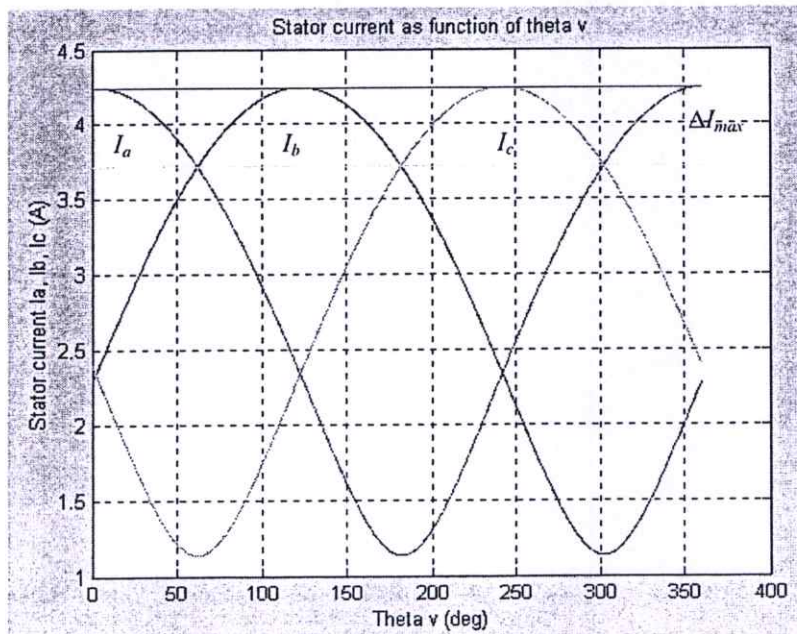
รูปที่ 4.5 กระแสเตเตอร์ของเฟส A, B, C ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้าที่เป็นฟังก์ชันกับ θ_v โดยที่ θ_v เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0° ถึง 360° สำหรับค่า $k_v = 6\%$ และค่าสลิปเท่ากับ 0.015

จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 เป็นค่าที่ได้จากการทดสอบจริง ของกระแส Stator ที่เฟส A, B และ C ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้าและ 3 แรงม้าตามลำดับ ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับ θ_v โดยที่ θ_v เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0° ถึง 360° สำหรับค่า $k_v = 6\%$ และค่าสลิปเท่ากับ 0.015

เมื่อทำการจำลองการทดสอบโดยใช้คอมพิวเตอร์ ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยใช้สมการที่ (3.61) – (3.63) สามารถหาค่ากระแส Stator ของเฟส A, B, C ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้าที่เป็นฟังก์ชันกับ θ_v โดยที่ θ_v เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0° ถึง 360° สำหรับค่า $k_v = 6\%$ และค่าสลิปเท่ากับ 0.015 ได้ดังรูปที่ 4.6 และสามารถหาค่ากระแส Stator ของเฟส A, B, C ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้าที่เป็นฟังก์ชันกับ θ_v โดยที่ θ_v เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0° ถึง 360° สำหรับค่า $k_v = 6\%$ และค่าสลิปเท่ากับ 0.015 ได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.6 กระแส Stator ของเฟส A, B, C ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้าที่เป็นฟังก์ชันกับ θ_v โดยที่ θ_v เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0° ถึง 360° สำหรับค่า $k_v = 6\%$ และค่าสลิปเท่ากับ 0.015 โดยใช้โปรแกรม MATLAB



รูปที่ 4.7 กระแส Stator ของเฟส A, B, C ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้าที่เป็นฟังก์ชันกับ θ_v โดยที่ θ_v เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0° ถึง 360° สำหรับค่า $k_v = 6\%$ และค่าสลิปเท่ากับ 0.015 โดยใช้โปรแกรม MATLAB

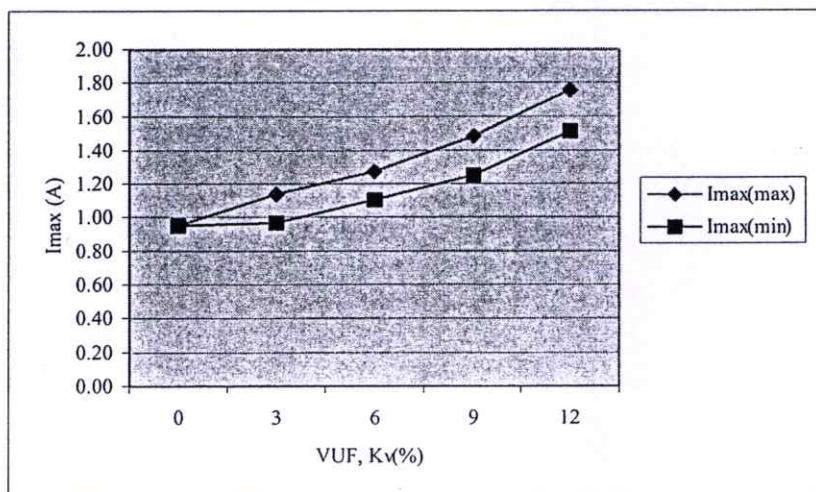
4.2 การทดสอบหาค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสเตเตอร์สูงสุด (ΔI_{max})

จากการทดลองในหัวข้อ 4.1 ที่ผ่านมาจะพบว่าที่ระดับความไม่สมดุล k_v คงที่ค่าหนึ่ง ค่ากระแสเตเตอร์ของแต่ละเฟสจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามมุม θ_v โดยจะมี $I_{max}(max)$ เกิดขึ้นที่มุม $\hat{\theta}_v$ และมี $I_{max}(min)$ เกิดขึ้นที่มุม $\bar{\theta}_v$ ซึ่งค่าความแตกต่างระหว่าง $I_{max}(max)$ และ $I_{max}(min)$ นี้จะเรียกว่าค่า ΔI_{max}

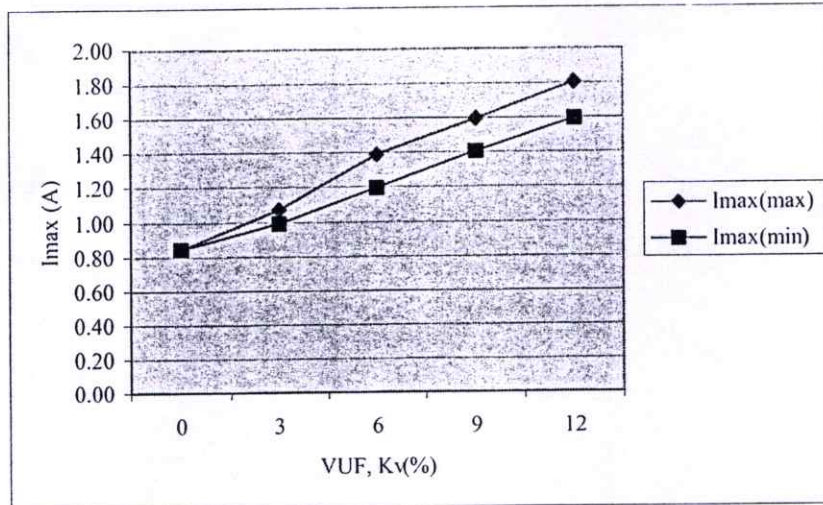
ทำการทดสอบหาค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสเตเตอร์สูงสุด (ΔI_{max}) โดยการใช้โปรแกรม MATLAB กำหนดหาค่ามุม $\hat{\theta}_v$ และ $\bar{\theta}_v$ ที่ระดับความไม่สมดุล k_v คงที่ค่าหนึ่งของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบที่ค่าสลลิปต่างๆ แล้วนำมาคำนวณหาว่าที่ระดับความไม่สมดุล k_v คงที่ค่าหนึ่งนี้ที่มุม $\hat{\theta}_v$ และ $\bar{\theta}_v$ จะมีแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสเท่ากับเท่าไร เพื่อนำมาใช้ในการปรับ variable transformer โดยในการทดสอบค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสเตเตอร์สูงสุด (ΔI_{max}) นี้ จะเน้นทำการทดสอบเฉพาะเฟส A เท่านั้น

4.2.1 ผลการทดสอบ

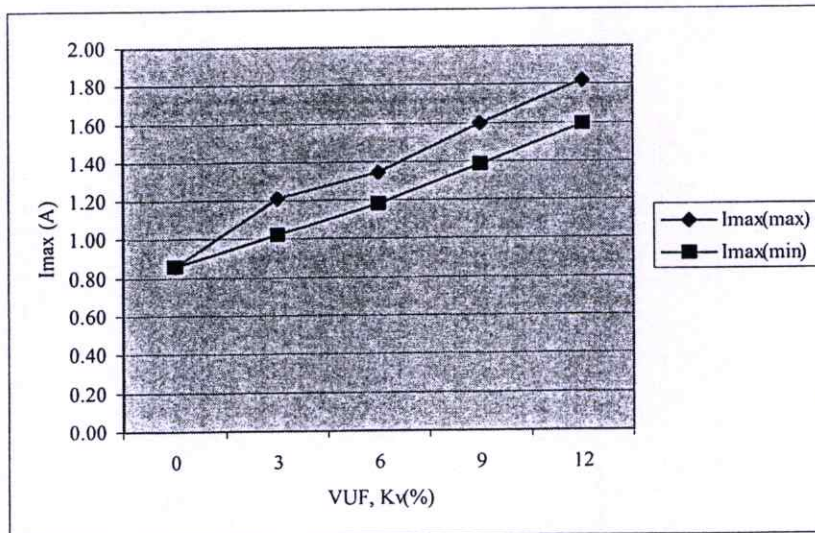
การทดสอบในขั้นตอนนี้ จะทำการทดสอบมอเตอร์ที่ระดับความไม่สมดุล $k_v = 0, 3, 6, 9, 12\%$ และที่มุม $\theta_v = \hat{\theta}_v$ และ $\bar{\theta}_v$ ตามลำดับ แล้วทำการวัดค่ากระแสเตเตอร์ $I_{max}(max)$ และ $I_{max}(min)$ ที่เกิดขึ้นที่เฟส A โดยจะทำการทดสอบที่ค่า Slip = 0.001, 0.005, 0.01, 0.015, 0.02, 0.025, 0.03 ตามลำดับ ผลการทดสอบสามารถนำมาพล็อตเป็นกราฟได้ดังนี้



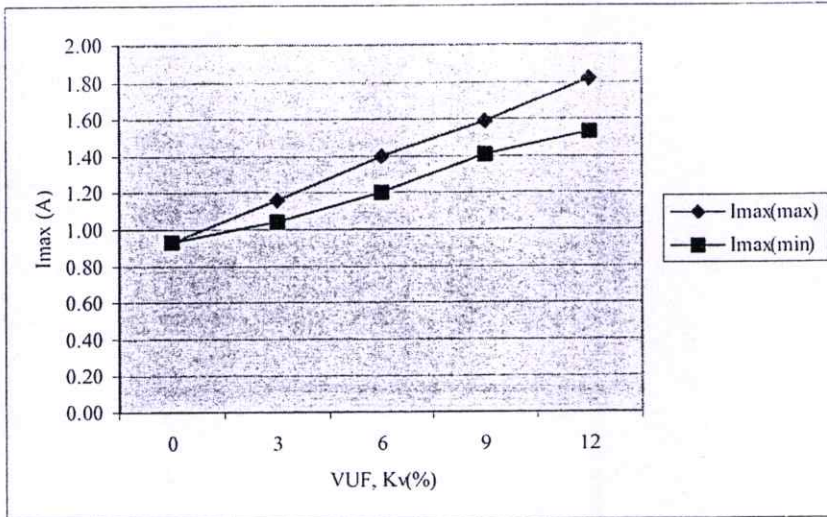
รูปที่ 4.8 กระแสเตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลลิป 0.001 ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า



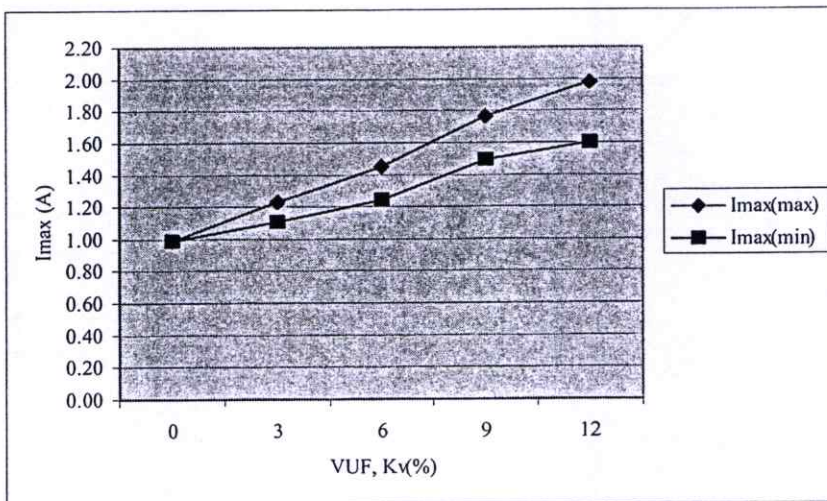
รูปที่ 4.9 กระแสเตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลิป 0.005 ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า



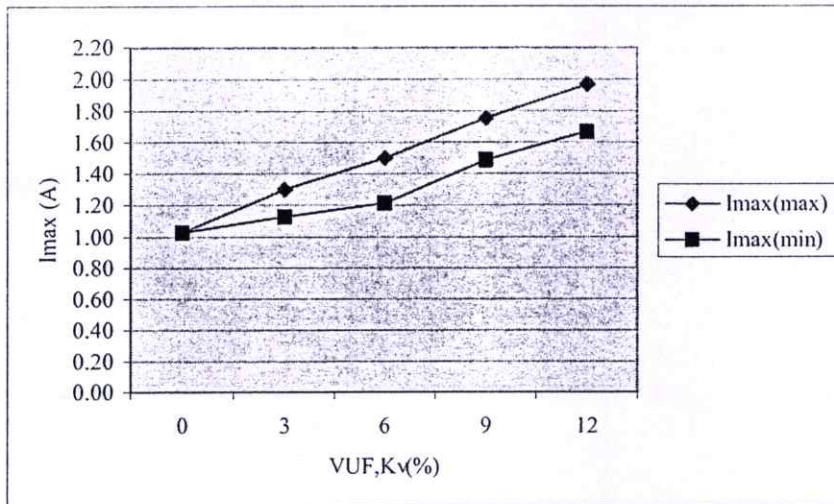
รูปที่ 4.10 กระแสเตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลิป 0.01 ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า



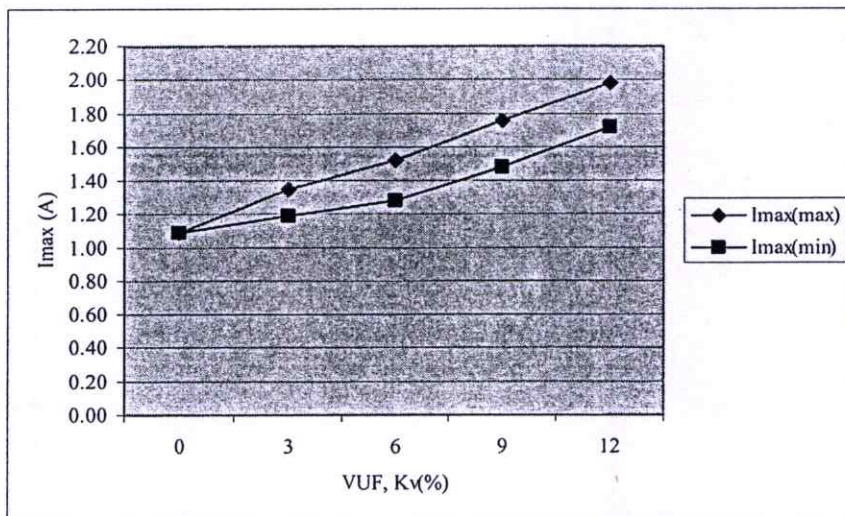
รูปที่ 4.11 กระแสเตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลิป 0.015 ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า



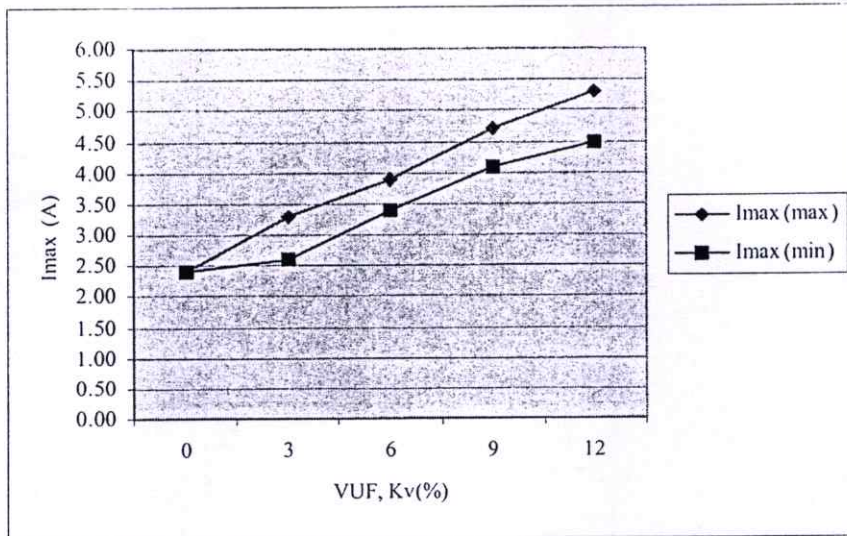
รูปที่ 4.12 กระแสเตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลิป 0.02 ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า



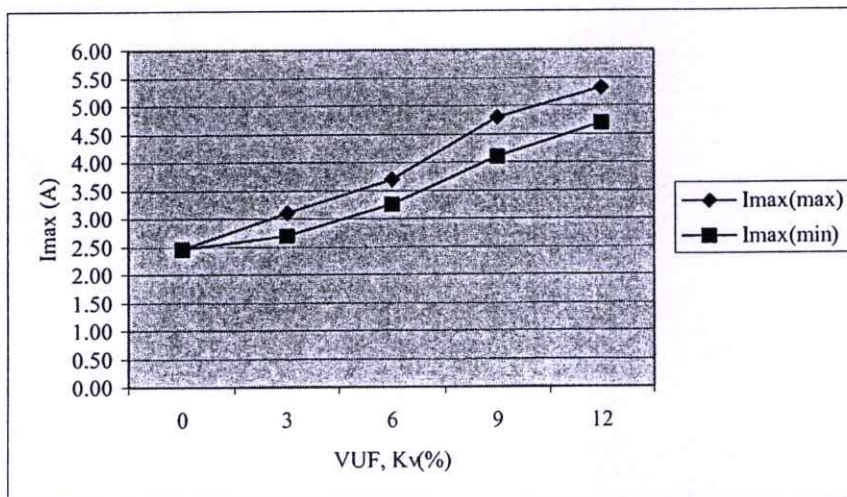
รูปที่ 4.13 กระแสเสเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลลิป 0.025 ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า



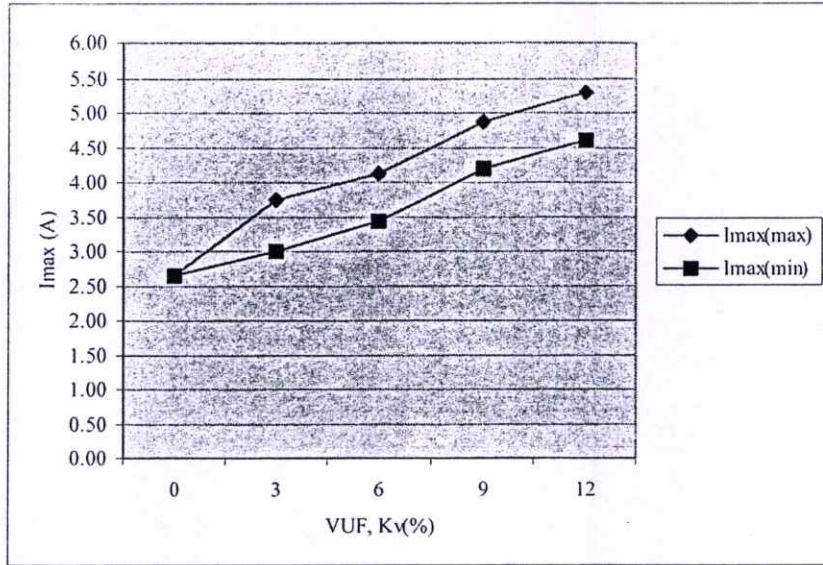
รูปที่ 4.14 กระแสเสเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลลิป 0.03 ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า



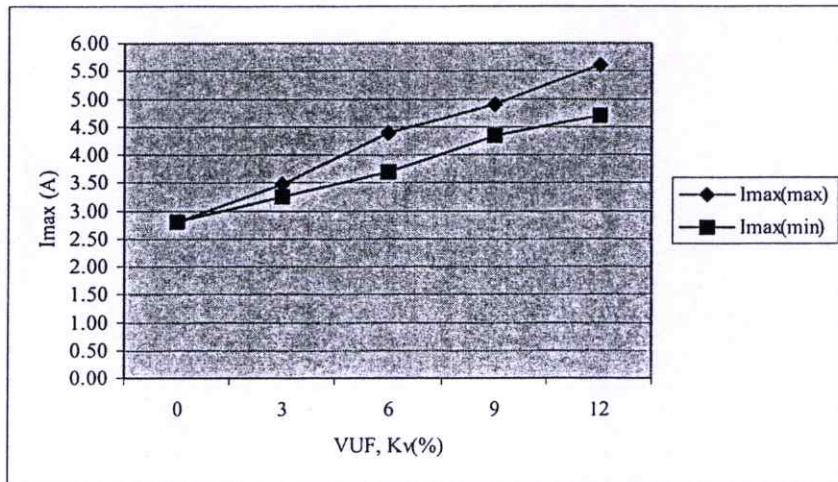
รูปที่ 4.15 กระแสเสเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลลิป 0.001 ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า



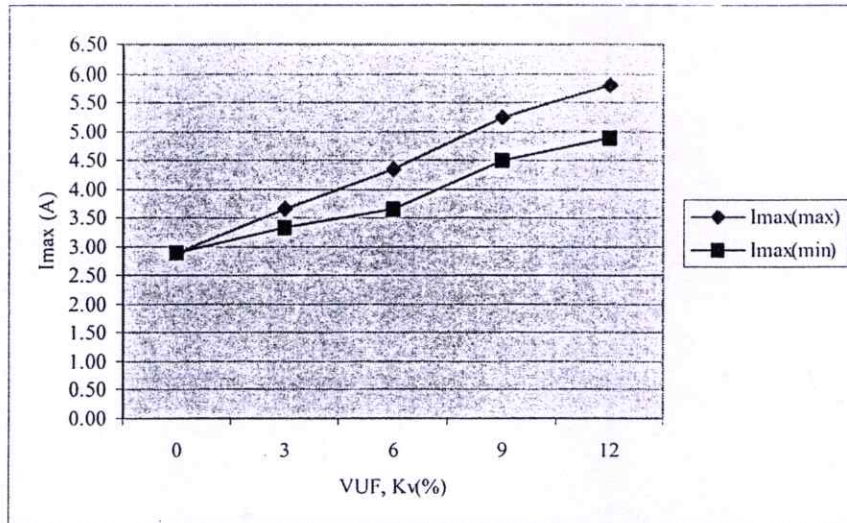
รูปที่ 4.16 กระแสเสเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลลิป 0.005 ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า



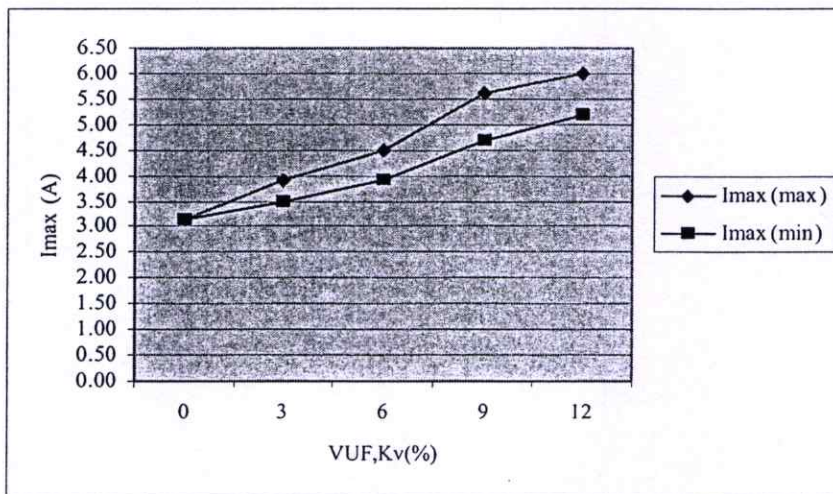
รูปที่ 4.17 กระแสเตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลลิป 0.01 ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า



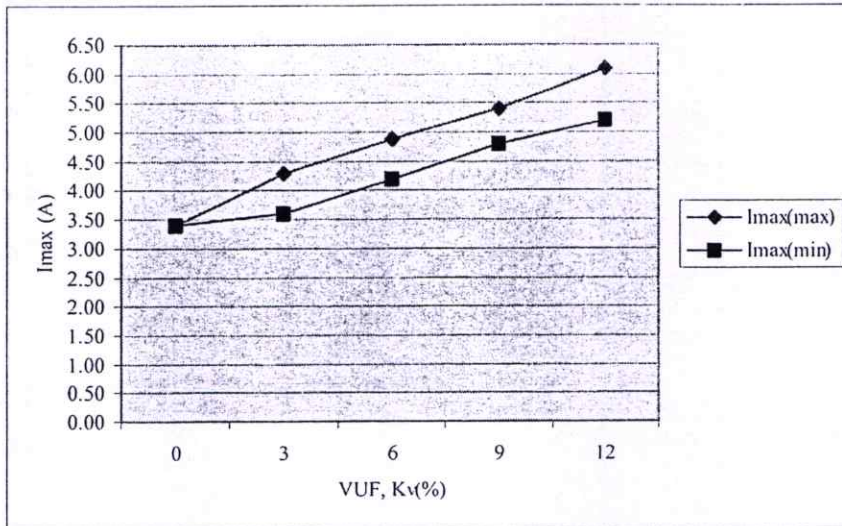
รูปที่ 4.18 กระแสเตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลลิป 0.015 ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า



รูปที่ 4.19 กระแสเสตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลลิป 0.02 ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า

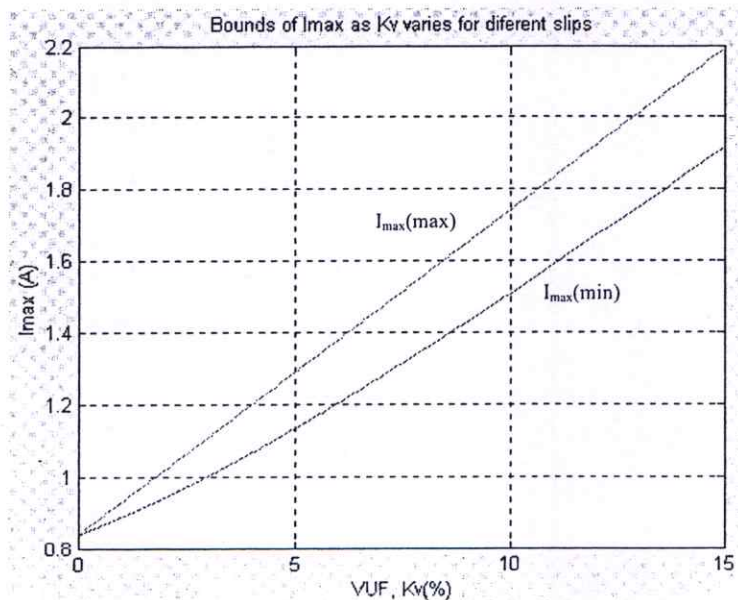


รูปที่ 4.20 กระแสเสตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลลิป 0.025 ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า

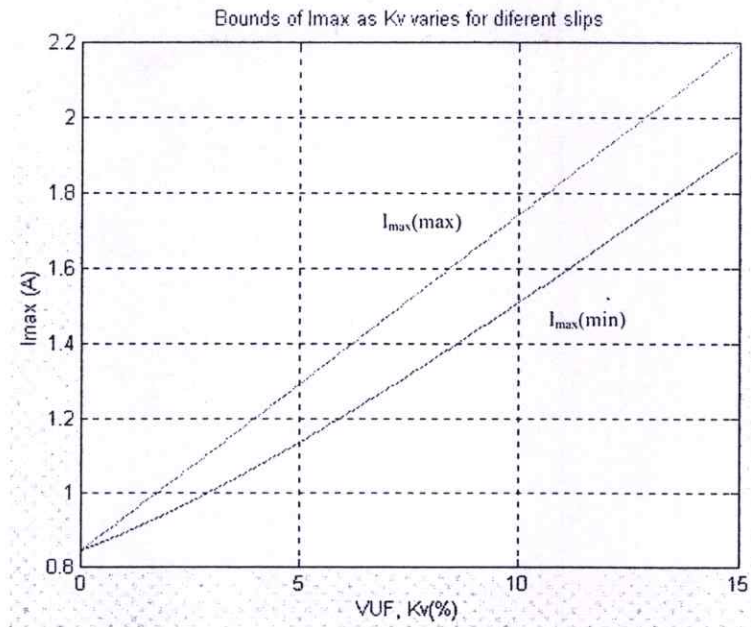


รูปที่ 4.21 กระแสเตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลิป 0.03 ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า

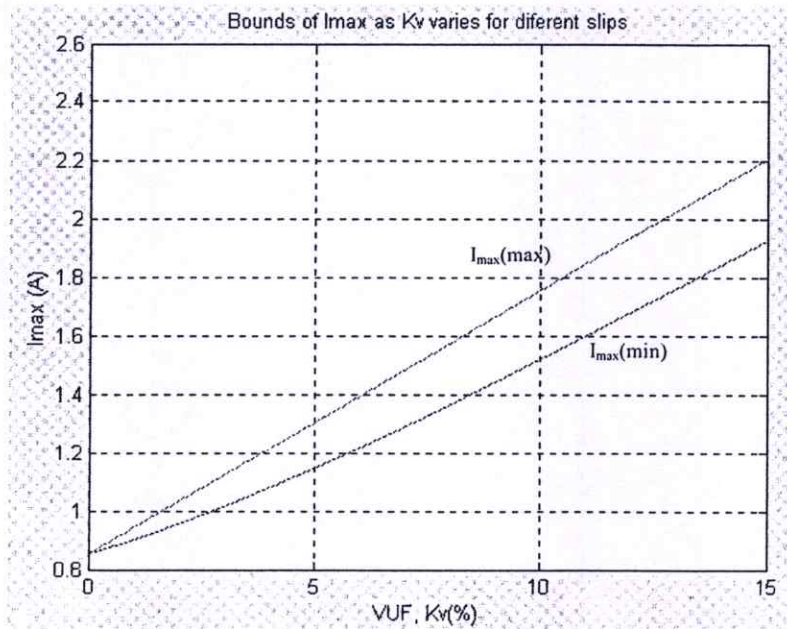
เมื่อทำการจำลองการทดสอบโดยใช้คอมพิวเตอร์ ด้วยโปรแกรม MATLAB สามารถพล็อตค่ากระแสเตเตอร์ $I_{max}(max)$ และ $I_{max}(min)$ ที่เกิดขึ้นที่เฟส A ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้าและ 3 แรงม้าที่ค่าระดับความไม่สมดุล $k_v = 0, 3, 6, 9, 12\%$ และที่ค่า Slip = 0.001, 0.005, 0.01, 0.015, 0.02, 0.025, 0.03 ตามลำดับ ได้ดังนี้



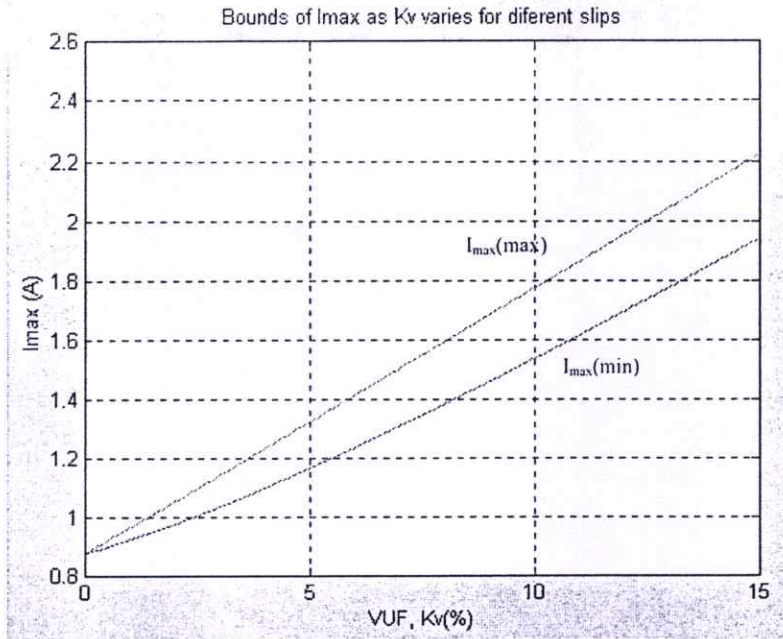
รูปที่ 4.22 กระแสเตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลิป 0.001 ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้าเมื่อพล็อตด้วยโปรแกรม MATLAB



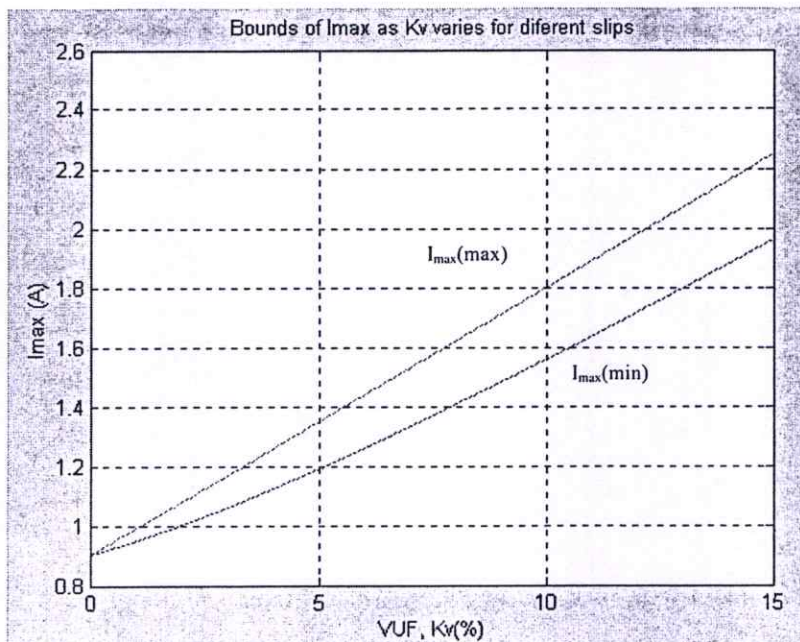
รูปที่ 4.23 กระแสเตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลิป 0.005 ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้าเมื่อพล็อตด้วยโปรแกรม MATLAB



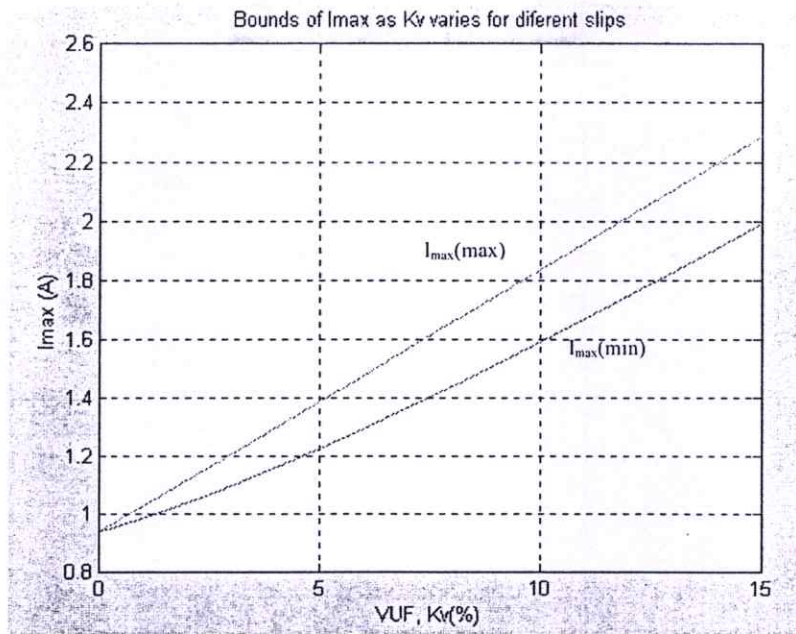
รูปที่ 4.24 กระแสเตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลิป 0.01 ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้าเมื่อพล็อตด้วยโปรแกรม MATLAB



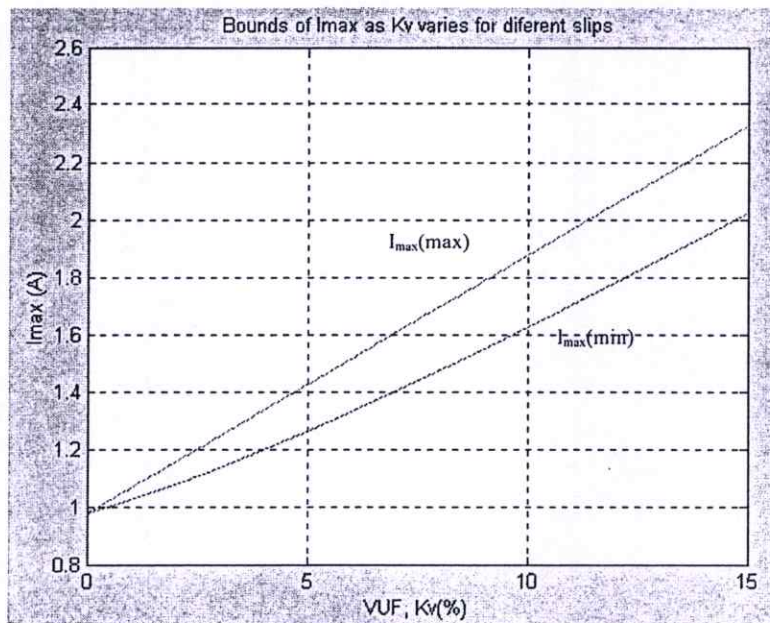
รูปที่ 4.25 กระแสเตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลิป 0.015 ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้าเมื่อพล็อตด้วยโปรแกรม MATLAB



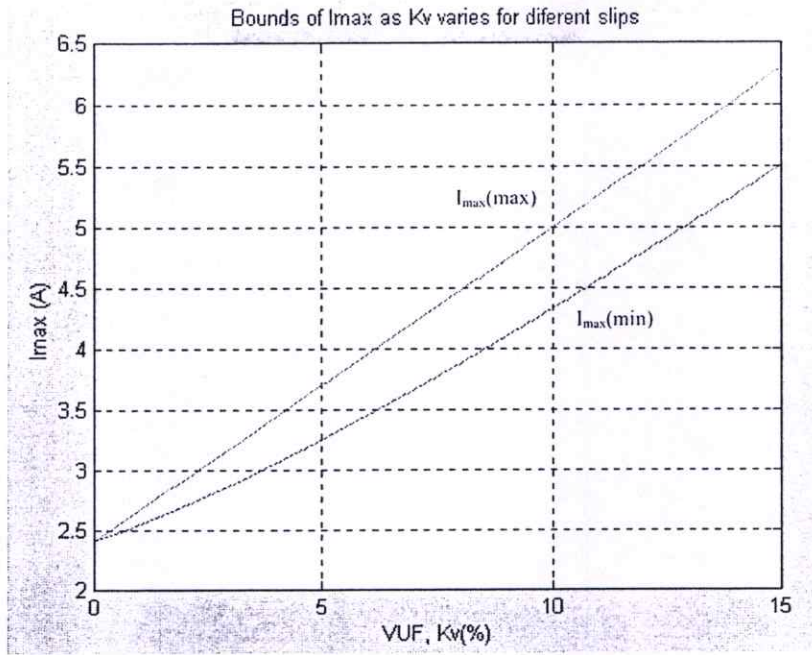
รูปที่ 4.26 กระแสเตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลิป 0.02 ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้าเมื่อพล็อตด้วยโปรแกรม MATLAB



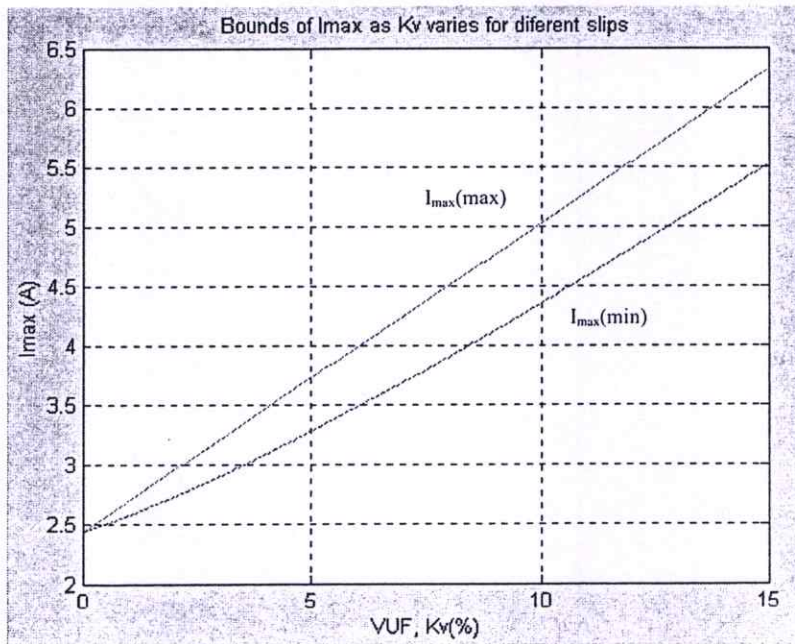
รูปที่ 4.27 กระแสเดเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลิป 0.025 ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้าเมื่อพล็อตด้วยโปรแกรม MATLAB



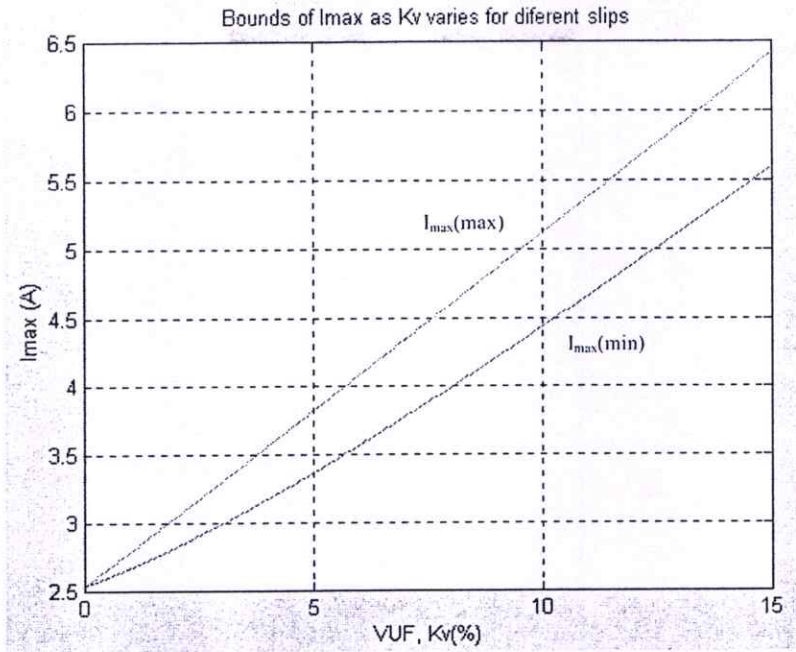
รูปที่ 4.28 กระแสเดเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลิป 0.03 ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้าเมื่อพล็อตด้วยโปรแกรม MATLAB



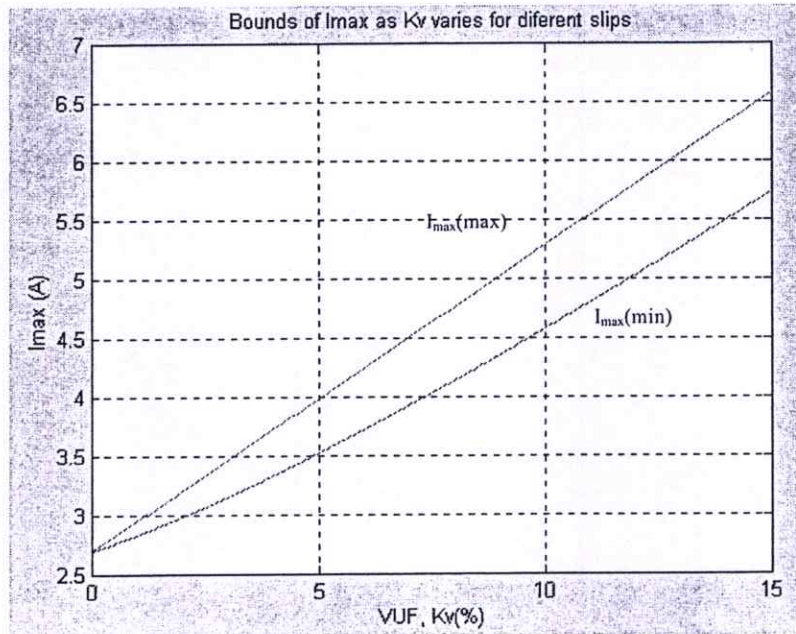
รูปที่ 4.29 กระแสเตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลลิป 0.001 ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้าเมื่อพล็อตด้วยโปรแกรม MATLAB



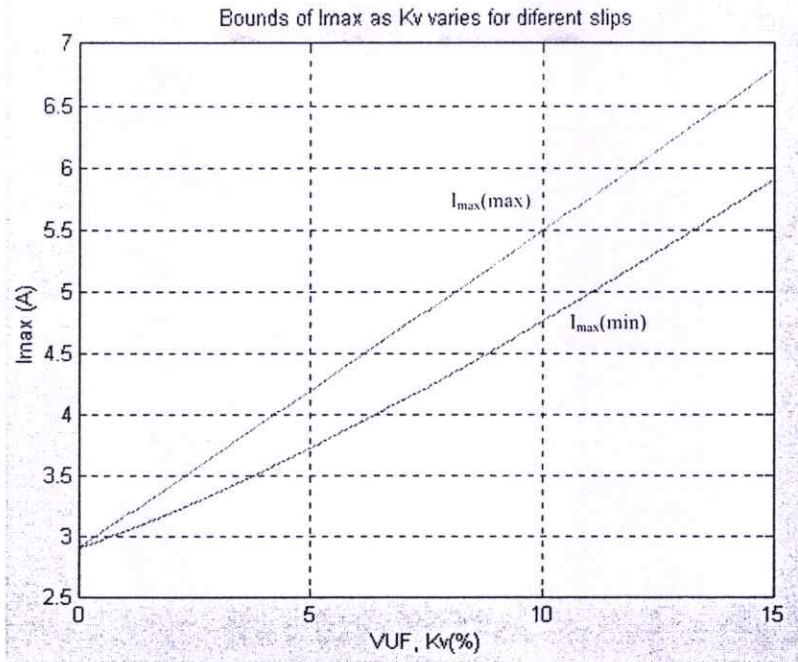
รูปที่ 4.30 กระแสเตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลลิป 0.005 ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้าเมื่อพล็อตด้วยโปรแกรม MATLAB



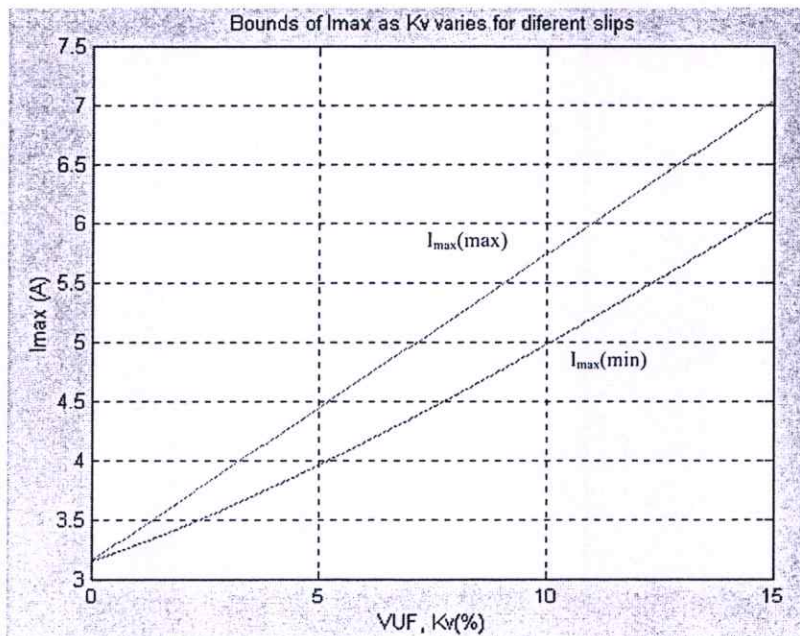
รูปที่ 4.31 กระแสเดเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลิป 0.01 ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้าเมื่อพล็อตด้วยโปรแกรม MATLAB



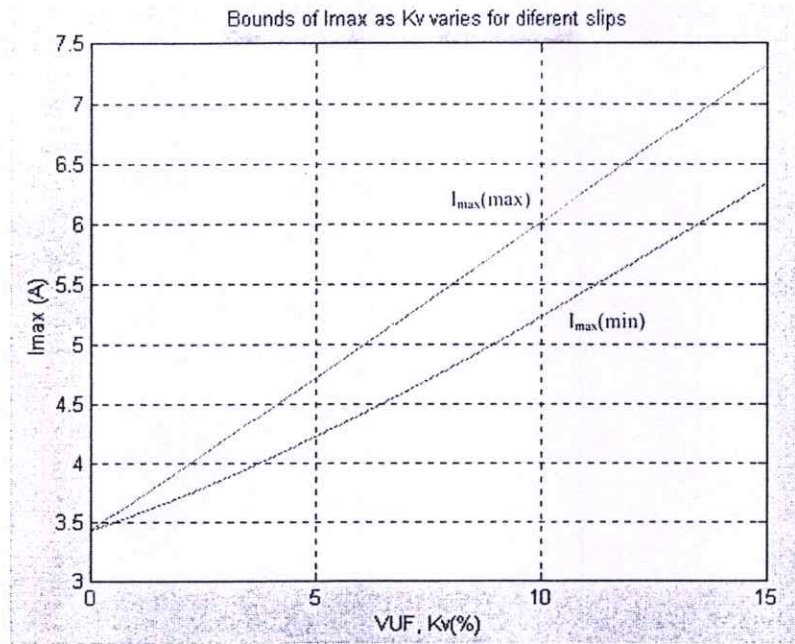
รูปที่ 4.32 กระแสเดเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลิป 0.015 ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้าเมื่อพล็อตด้วยโปรแกรม MATLAB



รูปที่ 4.33 กระแสเดเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลิป 0.02 ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้าเมื่อพล็อตด้วยโปรแกรม MATLAB



รูปที่ 4.34 กระแสเดเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลิป 0.025 ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้าเมื่อพล็อตด้วยโปรแกรม MATLAB



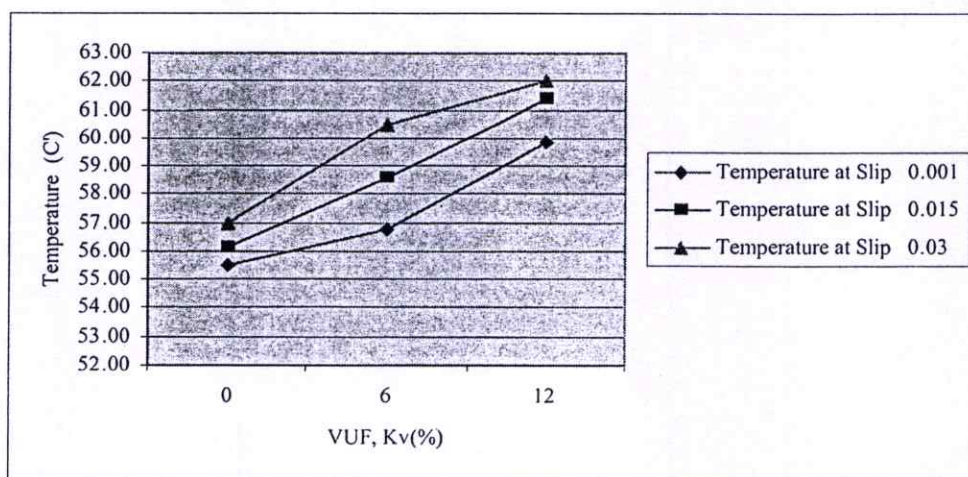
รูปที่ 4.35 กระแสเตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลิป 0.03 ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้าเมื่อพล็อตด้วยโปรแกรม MATLAB

4.3 การทดสอบอุณหภูมิของขดลวดสเตเตอร์

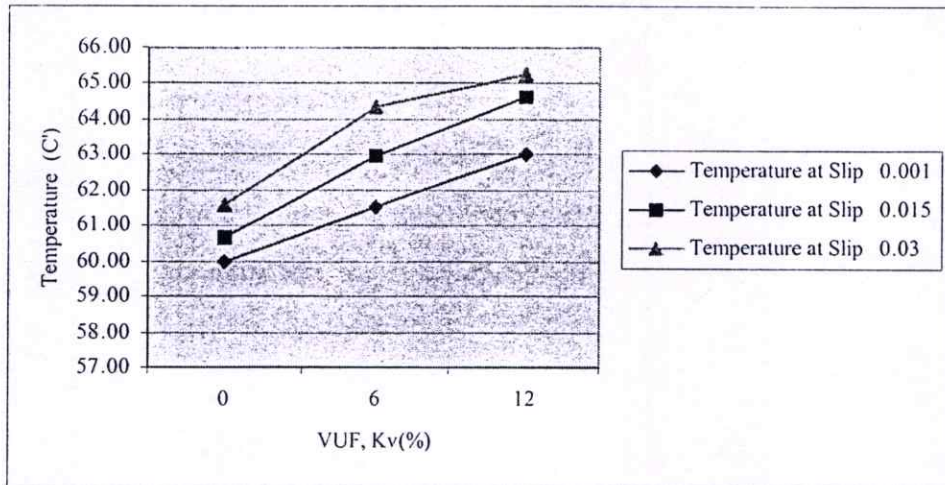
เมื่อเริ่มเปิดใช้งานมอเตอร์ มอเตอร์ก็จะมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ทั้งนี้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งต่ออายุการใช้งานของมอเตอร์ หัวข้อต่อไปนี้เป็นการทำงานทดสอบอุณหภูมิของขดลวดสเตเตอร์เฟส A ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้าและ 3 แรงม้า โดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่มีระดับของความไม่สมดุลที่ทำให้เกิด $I_{max}(max)$ ขึ้นที่เฟส A ทำการทดสอบมอเตอร์จนกระทั่งอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมีค่าก่อนข้างคงที่แล้วจึงทำการบันทึกอุณหภูมิของขดลวดสเตเตอร์ด้วยวิธีความต้านทาน

4.1.1 ผลการทดสอบ

การทดสอบในขั้นตอนนี้จะทำการทดสอบอุณหภูมิของขดลวดสเตเตอร์เฟส A ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้าและ 3 แรงม้า โดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่มีระดับของความไม่สมดุลสามระดับคือ $k_v = 0\%$, $k_v = 6\angle\theta_v\%$ และ $k_v = 12\angle\theta_v\%$ ให้กับมอเตอร์ โดยมอเตอร์ทำงานที่ค่าสลิปคงที่ค่าหนึ่งซึ่งจะทำการทดสอบที่ค่าสลิปสามค่าคือ 0.001, 0.015 และ 0.03 ตามลำดับ แล้วทำการวัดอุณหภูมิที่ผิวของมอเตอร์ด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิชนิด Infrared ทำการทดสอบมอเตอร์จนกระทั่งอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมีค่าก่อนข้างคงที่แล้วจึงทำการบันทึกอุณหภูมิของขดลวดสเตเตอร์ด้วยวิธีความต้านทาน แล้วจึงนำมาพล็อตเป็นกราฟ แต่ก่อนที่จะทำการทดสอบต้องคำนวณหา $k_v = 6\angle\theta_v\%$ และ $k_v = 12\angle\theta_v\%$ ที่ค่าสลิปแต่ละค่าที่ทำการทดสอบก่อนว่าจะมีแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสเท่ากับเท่าไร โดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อนำมาใช้ในการปรับ variable transformer เพื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลให้กับมอเตอร์ โดยค่า θ_v นี้จะเป็น θ_v ที่ทำให้มี $I_{max}(max)$ เกิดขึ้นที่เฟส A



รูปที่ 4.36 อุณหภูมิของขดลวดสเตเตอร์เฟส A ของมอเตอร์ 1 แรงม้า



รูปที่ 4.37 อุณหภูมิของขดลวดสเตเตอร์เฟส A ของมอเตอร์ 3 แรงม้า

4.4 การทดสอบกำลังไฟฟ้าป้อนเข้าภายใต้สภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

เมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำถูกใช้งานในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลจะมีผลกระทบต่อมอเตอร์ในหลายๆด้านด้วยกันดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น นอกจากนี้แล้วยังส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าป้อนเข้าของมอเตอร์เมื่อทำงานที่ค่าสลิปคงที่ค่าหนึ่งด้วย หัวข้อต่อไปนี้เป็นการทำงานทดสอบกำลังไฟฟ้าป้อนเข้าสามเฟสของมอเตอร์ในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลค่าต่างๆ ที่ค่าสลิปคงที่ค่าหนึ่ง ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้าและ 3 แรงม้า

4.4.1 ผลการทดสอบ

การทดสอบในขั้นตอนนี้จะทำการทดสอบกำลังไฟฟ้าป้อนเข้าสามเฟสของมอเตอร์ในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลค่าต่างๆ ที่ค่าสลิปคงที่ค่าหนึ่ง ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้าและ 3 แรงม้า โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่มีระดับความไม่สมดุลดังต่อไปนี้คือที่ระดับความไม่สมดุล $k_v = 0, 3, 6, 9, 12\%$ และที่มุม $\theta_v = \hat{\theta}_v$ และ $\bar{\theta}_v$ ตามลำดับ โดยมอเตอร์ทำงานที่ค่าสลิปคงที่ค่าหนึ่งเท่ากับ 0.001, 0.015, 0.03 ตามลำดับ แล้วทำการวัดแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าในแต่ละเฟสเทียบกับนิวทรอน วัดกระแสสเตเตอร์ในแต่ละเฟสและค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ในแต่ละเฟส เพื่อที่จะนำมาคำนวณหา กำลังไฟฟ้าป้อนเข้าในแต่ละเฟสแล้วหากำลังไฟฟ้าป้อนเข้าทั้งสามเฟสโดยการนำกำลังไฟฟ้าป้อนเข้าในแต่ละเฟสมาบวกกัน ทั้งนี้ไม่สามารถหากำลังไฟฟ้าป้อนเข้าสามเฟสได้เหมือนกับกรณีของแรงดันไฟฟ้าสมดุลที่จะมีค่าเท่ากับสามเท่าของกำลังไฟฟ้าในแต่ละเฟส แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากวิธี Symmetrical component แต่ก่อนที่จะทำการทดสอบต้องคำนวณหา $k_v = 0, 3, 6, 9, 12\%$ และที่มุม $\theta_v = \hat{\theta}_v$ และ $\bar{\theta}_v$ ตามลำดับ ที่ค่าสลิปแต่ละค่าที่ทำการทดสอบก่อนว่าจะมีแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสเท่ากับเท่าไร โดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อนำมาใช้ในการปรับ Variable transformer เพื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลให้กับมอเตอร์

ตารางที่ 4.2 แสดงกำลังไฟฟ้าป้อนเข้าที่ระดับความไม่สมดุล $k_v \angle \theta_v$ % ของมอเตอร์ขนาด 1Hp

%Kv	Power input (W)					
	Slip = 0.001		Slip = 0.015		Slip = 0.03	
	ทดสอบ	คำนวณ	ทดสอบ	คำนวณ	ทดสอบ	คำนวณ
0%	38.63	29.65	207.2	180.31	356.44	338.62
3%	46.36	32.84	213.33	183.5	363.78	341.8
6%	58.37	42.4	233.29	193.07	382.9	351.39
9%	76.17	58.33	242.3	209	406.63	367.34
12%	96.4	80.64	263.52	231.33	436.8	389.68

ตารางที่ 4.3 แสดงกำลังไฟฟ้าป้อนเข้าที่ระดับความไม่สมดุล $k_v \angle \theta_v$ % ของมอเตอร์ขนาด 1Hp

%Kv	Power input (W)					
	Slip = 0.001		Slip = 0.015		Slip = 0.03	
	ทดสอบ	คำนวณ	ทดสอบ	คำนวณ	ทดสอบ	คำนวณ
0%	38.63	29.65	207.2	180.31	356.44	338.62
3%	45.77	32.84	214	183.5	366.82	341.8
6%	59.48	42.4	231.95	193.07	385.5	351.39
9%	74.75	58.33	245.63	209	407.03	367.34
12%	98.59	80.64	266.42	231.33	437.7	389.68

ตารางที่ 4.4 แสดงกำลังไฟฟ้าป้อนเข้าที่ระดับความไม่สมดุล $k_v \angle \bar{\theta}_v$ % ของมอเตอร์ขนาด 3Hp

%Kv	Power input (W)					
	Slip = 0.001		Slip = 0.015		Slip = 0.03	
	ทดสอบ	คำนวณ	ทดสอบ	คำนวณ	ทดสอบ	คำนวณ
0%	110.3	93.3	835.69	808.4	1584	1550.7
3%	123.29	99.76	841.55	815	1604.2	1557.2
6%	142.85	119.19	860.7	834.4	1621.59	1576.6
9%	166.54	151.56	891.95	866.78	1648.58	1609.1
12%	221.46	196.87	939.05	912.16	1704.72	1654.6

ตารางที่ 4.5 แสดงกำลังไฟฟ้าป้อนเข้าที่ระดับความไม่สมดุล $k_v \angle \hat{\theta}_v$ % ของมอเตอร์ขนาด 3Hp

%Kv	Power input (W)					
	Slip = 0.001		Slip = 0.015		Slip = 0.03	
	ทดสอบ	คำนวณ	ทดสอบ	คำนวณ	ทดสอบ	คำนวณ
0%	110.3	93.3	835.69	808.4	1584	1550.7
3%	122.36	99.76	842.6	815	1603.37	1557.2
6%	143.27	119.19	861.16	834.4	1625.46	1576.6
9%	167.85	151.56	889.4	866.78	1645.76	1609.1
12%	221.12	196.87	940.2	912.16	1705.2	1654.6

4.5 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

เมื่อมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล k_v คงที่ค่าหนึ่งจะทำให้กระแสเตเตอร์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามมุม θ_v ซึ่งจะมีค่าได้ตั้งแต่ 0° ถึง 360° จากผลการทดสอบจริงในกราฟรูปที่ 4.4 สำหรับมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า และกราฟรูปที่ 4.5 สำหรับมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า และการจำลองการทดสอบด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในกราฟรูปที่ 4.6 สำหรับมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า และกราฟรูปที่ 4.7 สำหรับมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า พบว่าค่ากระแสเตเตอร์ในแต่ละเฟสจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามมุม θ_v และมีมุมเฟสต่างกันอยู่เฟสละ 120° คล้ายกับสัญญาณไซน์ โดยเรียงลำดับจากเฟส A, B และ C เมื่อแรงดันไฟฟ้ามีลำดับการเรียงกันเป็น Sequence ABC และจะมีค่ากระแสเตเตอร์สูงสุด I_{max} เปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง ΔI_{max} โดยค่า I_{max} นี้จะมีค่าต่ำสุดที่มุม $\theta_v = \bar{\theta}_v$ ในที่นี้เรียกว่า $I_{max}(min)$ และค่า I_{max} นี้จะมีค่าสูงสุดที่มุม $\theta_v = \hat{\theta}_v$ ในที่นี้เรียกว่า $I_{max}(max)$ โดยค่า ΔI_{max} ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้าจะมีขนาดมากกว่า ΔI_{max} ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า โดยค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการทดสอบจริงนั้นน่าจะมีส่วนมาจากความคลาดเคลื่อนในการปรับ variable transformer ที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลที่ใช้ในการทดสอบ และการหาจรรยาบรรณของมอเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ

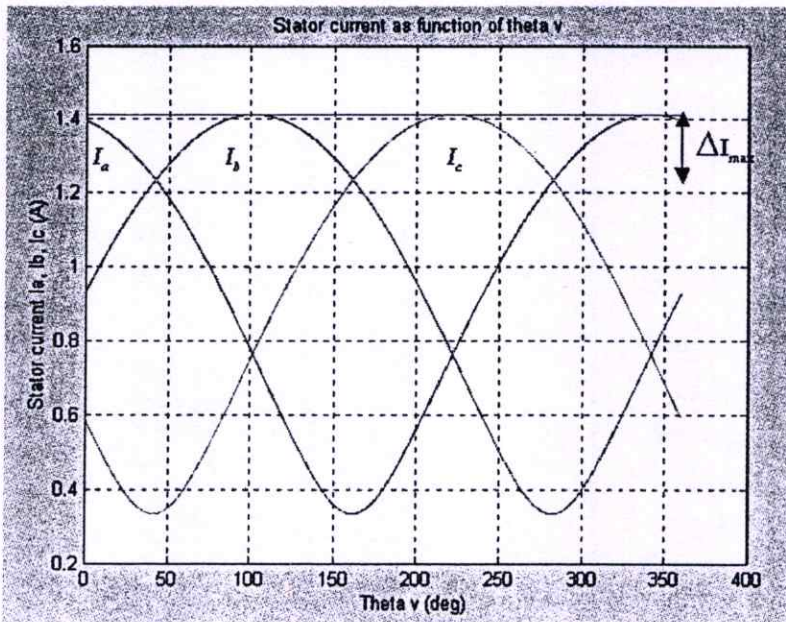
สำหรับการทดสอบหาค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสเตเตอร์สูงสุด (ΔI_{max}) นั้นพบว่าค่า ΔI_{max} จะมีค่าค่อยๆเพิ่มมากขึ้นเมื่อค่าระดับความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า k_v ค่อยๆสูงขึ้นเมื่อพิจารณาที่ค่าสลิปเดียวกัน และเมื่อค่าสลิปเพิ่มขึ้นก็จะทำให้มีค่า $I_{max}(max)$ และ $I_{max}(min)$ สูงขึ้น และเมื่อมอเตอร์มีขนาดเพิ่มขึ้น $I_{max}(max)$ และ $I_{max}(min)$ นี้ก็จะมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งค่า $I_{max}(max)$ นี้เองที่จะต้องถูกนำมาพิจารณาในการออกแบบมอเตอร์และอุปกรณ์ป้องกัน โดยอุณหภูมิของขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์จะมีค่าสูงขึ้นตาม $I_{max}(max)$ ที่เพิ่มขึ้น โดยอุณหภูมิของขดลวดสเตเตอร์จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อระดับของความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น และจะมีค่าสูงขึ้นตามค่าสลิปที่เพิ่มขึ้นด้วย ดังผลการทดลองในรูปที่ 4.36 และ 4.37 ตามลำดับ

สำหรับการทดสอบกำลังไฟฟ้าป้อนเข้าในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลนั้น พบว่าที่ระดับความไม่สมดุลที่เพิ่มขึ้น เมื่อต้องการให้ output มีค่าสลิปเท่ากันจะต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสป้อนเข้าที่มีปริมาณมากขึ้น ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากที่ระดับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลที่มากขึ้นจะทำให้เกิดกำลังสูญเสียในขดลวดที่เป็นความร้อนเพิ่มมากขึ้นดังผลการทดลองในรูปที่ 4.36 และ 4.37 ตามลำดับ ซึ่งกำลังไฟฟ้าป้อนเข้าสามเฟส กรณี $k_v < \bar{\theta}_v$ % และกรณี $k_v < \hat{\theta}_v$ % จากการทดสอบจะมีค่าใกล้เคียงกัน

บทที่ 5

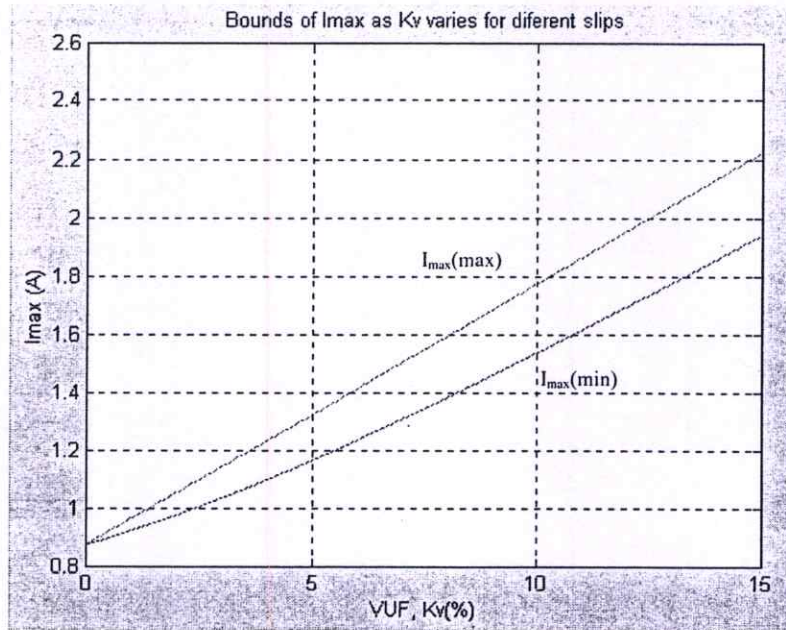
สรุปผลการวิจัยและเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์และประเมินค่าผลกระทบที่เกิดกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล โดยเน้นพิจารณาที่มุมของตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลแบบเชิงซ้อน Complex Voltage Unbalance Factor (CVUF) ซึ่งสามารถนิยามได้จาก อัตราส่วนระหว่าง Negative-sequence voltage phasor (V_n) กับ Positive-sequence voltage phasor (V_p) ค่า CVUF นี้เป็นปริมาณเชิงซ้อนที่ประกอบด้วยขนาดและมุมทางไฟฟ้า สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้ $CVUF = k_v = V_n / V_p = k_v \angle \theta_v$ เมื่อ k_v คือค่าตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล Complex Voltage Unbalance Factor (CVUF) ของแรงดันไฟฟ้าต่อเฟส ซึ่งเป็นปริมาณเชิงซ้อน โดยที่ k_v เป็นขนาดของค่าตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล ส่วน θ_v คือมุมเฟสของค่าตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลซึ่งจะมีค่าตั้งแต่ $0^\circ - 360^\circ$ ซึ่งเมื่อมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล k_v คงที่ค่าหนึ่งจะทำให้กระแสเตเตอร์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามมุม θ_v ตามรูป



รูปที่ 5.1 กระแสเตเตอร์ I_a , I_b , I_c ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้าเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล คงที่ขนาด $k_v = 6\%$ และ θ_v เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0° ถึง 360° โดยมอเตอร์ทำงานที่ค่า Slip 0.015

ซึ่งพบว่ามุม θ_v มีความสำคัญมากในการบอกระดับความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า โดยค่ากระแสเตเตอร์สูงสุด I_{max} จะเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง ΔI_{max} โดยค่า I_{max} นี้จะมีค่าต่ำสุดที่มุม $\theta_v = \bar{\theta}_v$ ในที่นี้เรียกว่า $I_{max}(min)$ และค่า I_{max} นี้จะมีค่าสูงสุดที่มุม $\theta_v = \hat{\theta}_v$ ในที่นี้เรียกว่า $I_{max}(max)$ เมื่อพิจารณาที่ค่าสลิปเดียวกัน ค่า ΔI_{max} นี้จะมีค่าเป็นศูนย์เมื่อระดับความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า k_v มีค่าเป็นศูนย์ และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อระดับความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า k_v มีค่าเพิ่มขึ้น ดังรูป



รูปที่ 5.2 กระแสเตเตอร์ของ Phase A ที่ค่าสลิป 0.015 ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า

ค่ากระแส $I_{max}(max)$ นี้มีความสำคัญมากในการพิจารณาสำหรับกรณีที่เลวร้ายที่สุด (worst cases) เพื่อป้องกันมอเตอร์มีความร้อนสูงเกินไป ซึ่งจากการทดลองพบว่าเมื่อ $I_{max}(max)$ มีค่าสูงขึ้น ค่าอุณหภูมิของขดลวดสเตเตอร์ก็จะยิ่งมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย พบว่าที่ระดับความไม่สมดุลที่เพิ่มขึ้นเมื่อต้องการให้ output มีค่าสลิปเท่ากันจะต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสป้อนเข้าที่มีปริมาณมากขึ้น ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากที่ระดับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลที่มากขึ้นจะทำให้เกิดกำลังสูญเสียในขดลวดในรูปของความร้อนเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้กำลังไฟฟ้าป้อนเข้าสามเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะมีค่าเท่ากันที่ระดับความไม่สมดุล k_v เท่ากันไม่ว่ามุม θ_v จะมีค่าเป็นเท่าไรก็ตาม อุณหภูมิที่เครื่องจักรไฟฟ้าทำงานมีความสัมพันธ์โดยตรงกับอายุการใช้งานของเครื่องจักรไฟฟ้าเพราะการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและเวลา การเสื่อมสภาพนี้เป็นปรากฏการณ์ทางเคมีของขบวนการออกซิเดชัน (oxidation process) ซึ่งเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ทำให้ฉนวนไฟฟ้ากรอบและสูญเสียความคงทนไดอิเล็กทริก (dielectric strength) ซึ่งการพิจารณาสำหรับกรณีที่เลวร้ายที่สุด

(worst cases) นี้จึงมีความสัมพันธ์กัน โดยตรงต่อการเลือกใช้จำนวนในแต่ละชั้น (class) ต่างๆของชุดลวด เพื่ออายุการใช้งานที่ยืนยาวของมอเตอร์

ดังนั้นจะพบว่าค่า k_v และ θ_v มีความจำเป็นที่จะต้องถูกนำมาพิจารณาในการวิเคราะห์ผลกระทบเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลที่เกิดกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ผลการทดสอบมอเตอร์เป็นการทำการทดสอบ 1 ครั้ง ระหว่างทำการทดสอบสามารถเกิดความผิดพลาดได้จาก ความคลาดเคลื่อนในการปรับ variable transformer ที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลที่ใช้ในการทดสอบ การปรับแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ ซึ่งได้จากการต่อ variable transformer จำนวน 3 ตัวเป็นแบบสตาร์ ซึ่งอาจจะมีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยทั้งนี้มิสาเหตุเนื่องมาจากเกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม variable transformer แต่ได้พยายามปรับให้คงที่ตลอดเวลา และการหาวงจรสมมูลของมอเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ ส่วนการทำข้อมูลและการทำรูปภาพต่างๆ ได้ใช้โปรแกรม EXCEL

การคำนวณและการจำลองการทดสอบด้วยคอมพิวเตอร์ได้ใช้โปรแกรม MATLAB ในการพัฒนาต่อควรที่จะเขียนเป็น โปรแกรมสำเร็จรูปขึ้นมาเพื่อสะดวกในการคำนวณและแสดงผล

เอกสารอ้างอิง

- [1] William D. Stevenson, Jr. **Element of Power System Analysis**. 4th Edition. : McGraw- Hill. 1982.
- [2] Fitzgerald A.E., Kingsley, Jr. Charles, Umans D. Stephen. **ELECTRIC MACHINERY**. 5th Ed. London : McGraw-Hill. 1990.
- [3] Yaw-Juen Wang. "Analysis of Effects of Three-Phase Voltage Unbalance on Induction Motors with Emphasis on the Angle of the Complex Voltage Unbalance Factor" **IEEE Transactions on Energy Conversion**. Vol. 16, no. 3, September 2001 pp. 270-275
- [4] Kerting W.H., Phillips W.H.. "Phase Frame Analysis of the Effects of Voltage Unbalance on Induction Machines" **IEEE**. 1997. pp. D2-1 – D2-7
- [5] Chapman J, Stephen. **Electric Machinery Fundamentals**. 2nd Ed. Singapore : Mcgraw-Hill. 1991
- [6] Theodore Wildi. **Electrical Machines Drive and Power System**. 4th Ed. United States of America : Prentice Hall International, Inc. 2000
- [7] S.A. Nasar, L.E. Unnewehr. **Electromechanics and Electric Machines**. 2nd Ed. United States of America : John Wiley & Sons. 1973
- [8] B.M. Weedy. **Electric Power System**. 2nd Ed. Great Britain : John Wiley & Sons. 1972
- [9] Vincent del toro. **Electric Power System**. 1st Ed. United States of America : Prentice-Hall International, Inc. 1992
- [10] Arthur R. Bergen, Vijay Vittal. **Power system Analysis**. 2nd Ed. United States of America : Prentice Hall International, Inc. 2000
- [11] มอก. 867-2532. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. พ.ศ.2543.
- [12] รัชต มั่งมีชัย. "การวิเคราะห์กำลังของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อใช้งานในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2543
- [13] ชีรยุทธ เสงี่ยมศักดิ์. "การวิเคราะห์ผลกระทบของแรงดันไฟฟ้าสามเฟสไม่สมดุลต่อกระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยพิจารณาจากมุมเฟสของค่าตัวประกอบความไม่สมดุลของแรงดันเป็นตัวบ่งชี้" วิศวกรรมสาร มช. ปีที่ 33, ฉบับที่ 2, มีนาคม-เมษายน 2549. หน้า 141-154

ภาคผนวก ก

บทความตีพิมพ์



วิศวกรรมสาร มช.

KKU ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 33 ฉบับที่ 2

ISSN 0125-8273

วิศวกรรมสาร มข. ปีที่ 33 ฉบับที่ 2 (131-144) มีนาคม - เมษายน 2549
 KKU Engineering Journal Vol. 33 No. 2 (131-144) March - April 2006

การวิเคราะห์ผลกระทบของแรงดันไฟฟ้าสามเฟสไม่ สมดุลต่อกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดย พิจารณาจากมุมเฟสของค่าตัวประกอบความไม่ สมดุลของแรงดันเป็นตัวบ่งชี้

ธีรยุทธ เสี่ยมศักดิ์¹⁾ และ ประภาษ ไพรสวรรณา²⁾

¹⁾ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
 ลาดกระบัง

²⁾ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
 ลาดกระบัง

Email : teerayus@amec.ina.melco.co.jp

บทคัดย่อ

การวิเคราะห์ผลกระทบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อใช้งานในสภาวะแรงดันไฟฟ้าสามเฟส
 ไม่สมดุลโดยพิจารณาจากมุมเฟสของตัวประกอบเชิงซ้อนของความไม่สมดุลแรงดัน ที่นำเสนอนี้มีหัวใจ
 สำคัญอยู่ที่ค่าตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล Complex voltage unbalance factor (CVUF) ซึ่งเป็นค่า
 เชิงซ้อนประกอบด้วยขนาดและมุมเฟส ซึ่งในการวิเคราะห์ผลที่มีต่อกระแสเตเตอร์ที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์
 ไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายใต้แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลโดยพิจารณาจากมุมของตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล
 จากการศึกษาและทดลองพบว่ามุมของตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์
 ผลของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล รวมไปถึงสามารถนิยามเป็นสูตรต่าง ๆ อีกด้วย ซึ่งจะเป็นผลดีต่อการ
 วิเคราะห์ผลของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลที่มีต่อมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

Analysis of Unbalanced Voltage and its Effects on the Stator Currents of an Induction Motor using the Phase Angle of Complex Voltage Unbalance Factor (CVUF) as an Indicator

Teerayut Sa-ngiamsak¹⁾ and Prapas Prisuwan²⁾

¹⁾ Student of master degree, Department of electrical engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

²⁾ Assoc. Professor, Department of electrical engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Email : teerayus@amec.ina.melco.co.jp

ABSTRACT

An analysis of the steady-state currents of an induction motor supplied by unbalanced three-phase voltages is presented. The index of voltage unbalance used in this paper is the complex voltage unbalance factor (CVUF) that consists of the magnitude and phase angle. In addition to formulation and discussion of the motor operating characteristics under voltage unbalance, special emphasis is placed on the effect of the phase angle of CVUF on the motor currents. It is found that the phase angle of the CVUF is an important factor that determines the variation of currents and the level of current unbalance.

การวิเคราะห์ผลกระทบของแรงดันไฟฟ้าสามเฟสไม่สมดุลต่อกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 133
โดยพิจารณาจากมุมเฟสของค่าตัวประกอบความไม่สมดุลของแรงดันเป็นตัวบ่งชี้

บทนำ

ระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของการไฟฟ้าจะเกิดความไม่สมดุลอยู่ตลอดเวลา ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากภาระทางไฟฟ้าที่ใช้ในบ้านพักอาศัยเป็นระบบ 1 เฟส ส่วนภาระทางไฟฟ้าในระบบอุตสาหกรรมส่วนใหญ่เป็นระบบ 3 เฟส การต่อเข้าและปลดออกของภาระทางไฟฟ้า 1 เฟส ทำให้เกิดการใช้ไฟฟ้าในแต่ละเฟสไม่เท่ากัน ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสไม่เท่ากันด้วย จึงเป็นสาเหตุของความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าสามเฟสขึ้น ซึ่งภาระทางไฟฟ้าในระบบอุตสาหกรรมส่วนใหญ่คือ มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ฉะนั้นจึงหลีกเลี่ยงไม่ได้เลยที่มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสจะถูกบ่อนด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่ไม่สมดุล ผลของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลจะทำให้มอเตอร์มีอุณหภูมิสูงขึ้น ความเร็วรอบลดลง กระแสไม่สมดุล ทอร์คกระเพื่อม ประสิทธิภาพต่ำ อายุการใช้งานสั้นลง ฯลฯ

วิธีการที่จะหาค่าระดับของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลมีอยู่ 2 วิธีด้วยกันคือ

1. The Percent Voltage Unbalance (PVU) ซึ่งถูกนิยามโดย NEMA (National Electrical Manufacturers Association) ค่า PVU นี้คำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างค่าความแตกต่างสูงสุดระหว่างแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสเมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย ต่อแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยของทั้งสามเฟส
2. The Voltage Unbalance Factor (VUF) ซึ่งถูกนิยามโดย IEC (International Electrotechnical Commission) ค่า VUF นี้คำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่าง Negative-sequence voltage กับ Positive-sequence voltage ตามลำดับ

ซึ่งทั้งสองวิธีนี้ก็ต่างมุ่งเน้นและแสดงให้เห็นถึงระดับของแรงดันไฟฟ้าที่ไม่สมดุล ต่างกันก็ตรงที่ PVU จะแสดงระดับของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลเพียงแคขนาดเท่านั้นซึ่งเป็นการสะดวกในการวัดในภาคสนาม ส่วน VUF จะแสดงระดับของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลทั้งขนาดและมุมทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นการยากในการวัดในภาคสนาม แต่อย่างไรก็ตามค่า VUF จะบ่งบอกคุณลักษณะของระดับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลได้ครบถ้วนและดีกว่าค่า PVU

ส่วนขยายของ VUF คือ ค่าตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล Complex Voltage Unbalance Factor (CVUF) ซึ่งสามารถนิยามได้จาก อัตราส่วนระหว่าง Negative-sequence voltage phasor กับ Positive-sequence voltage phasor. ค่า CVUF นี้เป็นปริมาณเชิงซ้อนที่ประกอบด้วยขนาดและมุมทางไฟฟ้า ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างมากในการวิเคราะห์และทำนายผลกระทบที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

บทความฉบับนี้จะเป็นการศึกษาถึงผลกระทบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลโดยเน้นพิจารณาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากมุมของตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นว่าถึงแม้ว่าแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลจะมีขนาดของ CVUF ที่เท่ากัน แต่ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์มีความแตกต่างกัน ทั้งนี้สืบเนื่องมาจากมุมของตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลไม่เท่ากันนั่นเอง

ค่าตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล Complex Voltage Unbalance Factor (CVUF)

เมื่อ V_a, V_b, V_c คือแรงดันไฟฟ้า Line-to-Neutral ค่า Zero-sequence voltage (V_0), Positive-sequence voltage (V_p) และ Negative-sequence voltage (V_n) สามารถหาได้จาก Symmetrical component [1] ดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_p \\ V_n \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

เมื่อ $a = \exp(j2\pi/3) = 1\angle 120^\circ$ ซึ่งคือค่าของ Fortescue [2] ค่า VUF นี้ นิยามโดย IEC สามารถหาได้จาก

$$\text{VUF} = |V_n / V_p| \times 100\% \quad (2)$$

ในขณะที่ CVUF สามารถหาค่าได้จาก [3]

$$k_v = V_n / V_p = k_v \cdot \exp(j\theta_v) = k_v \angle \theta_v \quad (3)$$

เมื่อ k_v คือขนาด และ θ_v คือ มุม ของ CVUF

สำหรับ Symmetrical component ของแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย ก็สามารถหาได้ในลักษณะที่คล้ายคลึงกัน คือ เมื่อให้ U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} คือแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย จะสามารถหาค่า (U_0, U_p, U_n) ได้ดังนี้ [1]

$$\begin{bmatrix} U_0 \\ U_p \\ U_n \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \\ U_{ca} \end{bmatrix} \quad (4)$$

สำหรับแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย จะมีผลรวมของเฟสเซอร์ในระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟสเป็นศูนย์เสมอ ดังนั้น Zero-sequence จะไม่มีผลต่อแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย ($U_0 = 0$) นั่นคือ Positive และ Negative-sequence เท่านั้นที่มีผลต่อ Symmetrical component ของแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายโดยสามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้ [1]

$$\begin{bmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \\ U_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ a^2 & a \\ a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_p \\ U_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

การวิเคราะห์ผลกระทบของแรงดันไฟฟ้าสามเฟสไม่สมดุลต่อกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 135
 โดยพิจารณาจากมุมเฟสของค่าตัวประกอบความไม่สมดุลของแรงดันเป็นต้นฉบับ

จากนิยามสามารถหาค่า CVUF ได้จาก

$$k_u = U_n / U_p = k_u \cdot \exp(j\theta_u) = k_u \angle \theta_u \tag{6}$$

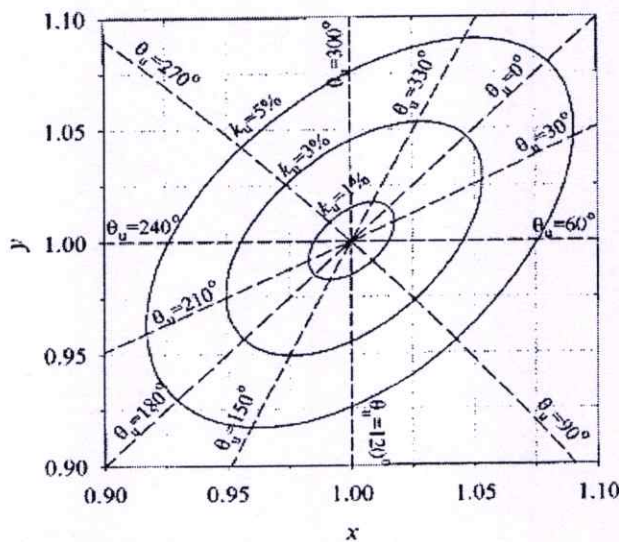
และสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง k_v และ k_u ได้ดังนี้

$$k_u = k_v \cdot \exp(-j60^\circ) \tag{7}$$

เราพบว่าเฟสเซอร์ของแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย ในระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟส เมื่อนำมาเรียงต่อกันจะเป็นรูปสามเหลี่ยม ดังนั้นเมื่อให้ขนาดของด้านใดด้านหนึ่งเป็นค่าอ้างอิง ในที่นี้ให้ U_{bc} จะได้อัตราส่วนของแรงดันแต่ละด้านต่อค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงดังต่อไปนี้

$$U_{bc} : U_{ab} : U_{ca} = 1 : x : y \tag{8}$$

เมื่อ $x = U_{ab} / U_{bc}$ และ $y = U_{ca} / U_{bc}$ ค่า (k_u, θ_u) และค่า (x, y) จะมีความสัมพันธ์กันแบบหนึ่งต่อหนึ่ง นั่นคือถ้าทราบค่า (k_u, θ_u) ก็จะสามารถหาค่า (x, y) ได้จากสมการที่ (5), (6) และ (8) และในทำนองเดียวกันถ้าทราบค่า (x, y) ก็จะสามารถใช้กฎของ Cosine หามุมแต่ละด้านของรูปสามเหลี่ยมได้ ซึ่งก็หมายความว่าสามารถหาค่า U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} ได้ และเมื่อนำไปแทนในสมการที่ (4) และ (6) ก็จะสามารถหาค่า (k_u, θ_u) ได้ วิธีของจุดของค่าคงที่ k_u และ θ_u ในกราฟแกน x และแกน y สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.

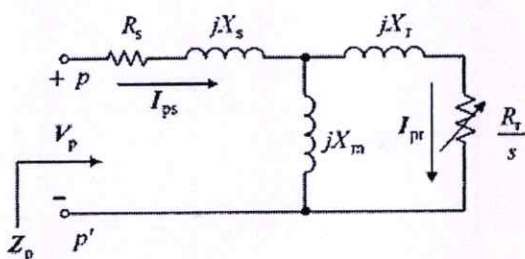


รูปที่ 1 วิธีของจุดของค่าคงที่ k_u และ θ_u ในกราฟแกน x และแกน y

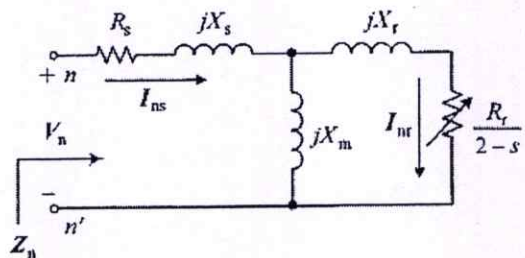
จากรูปที่ 1 พบว่าวิถีของจุดของค่าคงที่ k_u จะมีลักษณะคล้ายวงรี ในขณะที่ค่าคงที่ θ_u มีวิถีของจุดใกล้เคียงกับเส้นตรง ที่ตำแหน่ง $(x, y) = (1, 1)$ คือตำแหน่งที่มีแรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟสสมดุลซึ่งจะมีค่า $k_u = 0$ และสำหรับค่า k_u ที่มีค่ามากขึ้นจะมีระยะทางออกห่างจากตำแหน่ง $(1, 1)$ ตามลำดับ ถ้าพิจารณาค่า k_u ค่าหนึ่งจะพบว่าสามารถประกอบด้วยค่า x และ y ที่มีค่าหลายค่าไม่สิ้นสุด ซึ่งจะพบว่าค่า θ_u มีความสำคัญมากในการแสดงให้เห็นถึงอัตราส่วนระหว่าง $U_{bc} : U_{ab} : U_{ca} = 1 : x : y$ โดยมีค่าอ้างอิงคือค่า U_{bc}

จากรูปที่ 1 พบว่าสามารถใช้เป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์มากในการวัดในภาคสนาม ที่สามารถบอกค่าของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลได้ทั้งขนาดและมุม ซึ่งสามารถยกตัวอย่างง่ายๆ ได้ดังนี้ ถ้าวัดแรงดันไฟฟ้า $U_{bc} = 380V$, $U_{ab} = 351.5V$, $U_{ca} = 380V$ สามารถหาค่า x และ y ได้ดังนี้ $x = U_{ab} / U_{bc} = 351.5 / 380 = 0.925$ และ $y = U_{ca} / U_{bc} = 380 / 380 = 1.0$ เราสามารถหาค่า VUF จากรูปที่ 1 ได้เท่ากับ 5% และมุม $\theta_u = 240^\circ$ เมื่อ k_u มีค่าคงที่จะพบว่าค่า θ_u จะมีค่าเปลี่ยนแปลงได้ตั้งแต่ 0° ถึง 360° ซึ่งจะพบว่าค่า x และค่า y จะมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงที่กว้างมาก ยกตัวอย่างเช่น สำหรับค่าคงที่ $k_u = 3\%$ ค่า x และค่า y จะมีการเปลี่ยนแปลงได้ในช่วงตั้งแต่ 0.95 ถึง 1.053 ซึ่งสิ่งเหล่านี้สามารถบอกเป็นนัยได้ถึงความสำคัญของ θ_u ในการบอกค่าความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

แบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



(a)



(b)

รูปที่ 2 วงจรสมมูลหนึ่งเฟสของมอเตอร์ (a) วงจร Positive-sequence, (b) วงจร Negative-sequence

การวิเคราะห์ผลกระทบของแรงดันไฟฟ้าสามเฟสไม่สมดุลต่อกระแสเดเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 137
โดยพิจารณาจากมุมเฟสของค่าตัวประกอบความไม่สมดุลของแรงดันเป็นตัวบ่งชี้

จากรูปที่ 2 แสดงวงจร Positive-sequence และ Negative-sequence ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส เมื่อพิจารณาเพียงเฟสเดียว เพื่อความง่ายในการวิเคราะห์ จึงสมมุติให้ค่าตัวแปรต่างๆที่อยู่ในวงจรรูปที่ 2(a) และ 2(b) มีค่าคงที่ และค่าความสูญเสียทางกลซึ่งประกอบด้วยแรงเสียดทานและค่าความสูญเสียจาก ลมไม่ถูกนำมาพิจารณาด้วย

การวิเคราะห์ในสภาวะ STEADY-STATE

กระแส และ Current Unbalance Factor

เมื่อแรงดันไฟฟ้า Positive-sequence V_p ถูกเขียนให้อยู่ในรูป Polar form.

$$V_p = V_p \angle \beta \quad (9)$$

และเมื่อพิจารณานิยามของ CVUF เราสามารถหา Negative-sequence voltage V_n ได้ดังนี้

$$V_n = k_v V_p \angle (\beta + \theta_v) \quad (10)$$

Symmetrical component ของ กระแสของขดลวด Stator สามารถหาได้ดังต่อไปนี้

$$I_{ps} = V_p / Z_p = (V_p / Z_p) \angle (\beta - \phi_p) \quad (11)$$

$$I_{ns} = V_n / Z_n = (k_v V_p / Z_n) \angle (\beta + \theta_v - \phi_n) \quad (12)$$

เมื่อ ϕ_p และ ϕ_n คือ มุมของ Z_p และ Z_n ตามลำดับ และกระแสของขดลวด stator สามารถหาได้ดังนี้

$$I_a = I_{ps} + I_{ns} \quad (13)$$

$$I_b = a^2 I_{ps} + a I_{ns} \quad (14)$$

$$I_c = a I_{ps} + a^2 I_{ns} \quad (15)$$

ระดับของความไม่สมดุลของกระแส Stator สามารถหาค่าได้โดยใช้ Current Unbalance Factor (CUF) ซึ่งก็มีนิยามที่คล้ายคลึงกับ VUF ดังนี้

$$CUF = k_c = |I_{ns} / I_{ps}| = \frac{V_n / Z_n}{V_p / Z_p} = (Z_p / Z_n) \cdot k_v \quad (16)$$

จากสมการที่ (16) แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่าง k_c และ k_v ค่าตัวประกอบกระแสไฟฟ้าไม่สมดุล Complex Current Unbalance Factor (CCUF) สามารถหาได้จากสมการที่ (9) – (12)

$$CCUF = k_c = k_c \angle \theta_c = \frac{I_{ns}}{I_{ps}} = \frac{Z_p}{Z_n} \cdot k_v \angle (\theta_v + \varphi_p - \varphi_n) \quad (17)$$

เมื่อ

$$\theta_c = \theta_v + \varphi_p - \varphi_n \quad (18)$$

สามารถเขียนขนาดของกระแสของมอเตอร์ในสมการที่ (13) – (15) ให้อยู่ในเทอมของ k_c และ θ_c ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} I_a &= |I_{ps} + I_{ns}| = |I_{ps} + k_c I_{ps}| \\ &= I_{ps} \sqrt{1 + k_c^2 + 2k_c \cos \theta_c} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} I_b &= |a^2 I_{ps} + a I_{ns}| \\ &= I_{ps} \sqrt{1 + k_c^2 + 2k_c \cos(\theta_c - 2\pi/3)} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} I_c &= |a I_{ps} + a^2 I_{ns}| \\ &= I_{ps} \sqrt{1 + k_c^2 + 2k_c \cos(\theta_c + 2\pi/3)} \end{aligned} \quad (21)$$

ค่ากระแส Stator เปลี่ยนแปลงสูงสุดในช่วง k_v คงที่ (ΔI_{max})

เรานิยามให้ I_{max} คือ กระแส Stator สูงสุด

$$I_{max} = \max(I_a, I_b, I_c) \quad (22)$$

จากสมการที่ (19) – (21) สามารถหาค่าสูงสุดของ I_{max} ได้ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ $I_{ps}(1+k_c)$ เมื่อ θ_c มีค่าเท่ากับ 0, $2\pi/3$ และ $4\pi/3$ จากสมการที่ (18) สามารถหาค่า θ_v ในที่นี้ให้มีค่าเท่ากับ $\hat{\theta}_v$ ซึ่งก็คือค่า θ_v ที่กระแส I_{max} สูงที่สุดได้ดังนี้

$$\hat{\theta}_v = \varphi_n - \varphi_p + 2n\pi/3 \quad (23)$$

เมื่อ $n = 0, 1$ และ 2 ซึ่งจะทำให้ได้ค่า I_{max} ที่เกิดขึ้นที่เฟส a, b และ c ตามลำดับ ในทำนองเดียวกันเรา

การวิเคราะห์ผลกระทบของแรงดันไฟฟ้าสามเฟสไม่สมดุลต่อกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 139
โดยพิจารณาจากมุมเฟสของค่าตัวประกอบความไม่สมดุลของแรงดันเป็นตัวบ่งชี้

สามารถหาค่าต่ำสุดของ I_{max} ได้ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ $I_{ps} \sqrt{1+k_c+k_c^2}$ เมื่อ $\theta_c = \pi, -\pi/3$ และ $\pi/3$ ในที่นี้สามารถหาค่า $\bar{\theta}_v$ ซึ่งก็คือค่า θ_v ในสภาวะ I_{max} ต่ำสุดดังนี้

$$\bar{\theta}_v = \varphi_n - \varphi_p + 2n\pi/3 \pm \pi/3 \quad (24)$$

เมื่อ $n = 0, 1$ และ 2 ซึ่งจะทำให้ได้ค่า I_{max} ที่ต่ำที่สุดที่เกิดขึ้นที่เฟส a, b และ c ตามลำดับ ซึ่งขอบเขตของ I_{max} สามารถหาได้ดังต่อไปนี้

$$I_{ps} \sqrt{1+k_c+k_c^2} \leq I_{max} \leq I_{ps} (1+k_c) \quad (25)$$

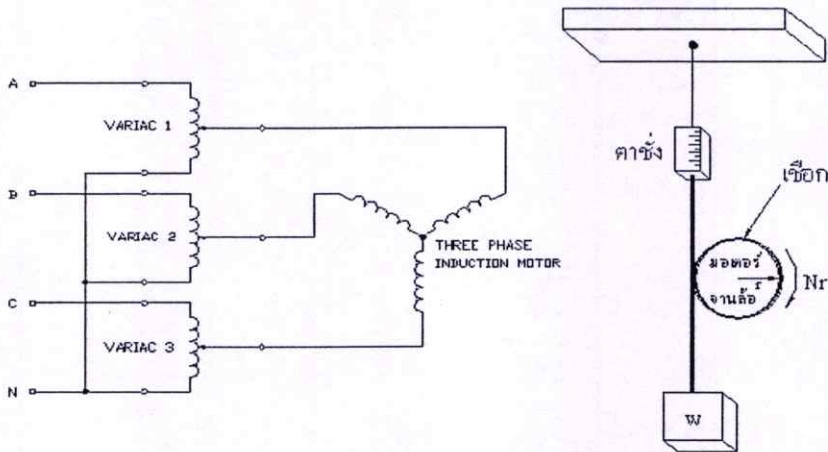
และช่วงของการเปลี่ยนแปลงของ I_{max} สามารถหาได้จาก

$$\begin{aligned} \Delta I_{max} &= I_{ps} \left(1+k_c - \sqrt{1+k_c+k_c^2} \right) \\ &= \frac{V_p}{Z_p} \left[1+k_v \frac{Z_p}{Z_n} - \sqrt{1+k_v \frac{Z_p}{Z_n} + \left(k_v \frac{Z_p}{Z_n} \right)^2} \right] \end{aligned} \quad (26)$$

การทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

การทดสอบนี้มีจุดประสงค์ในการวิเคราะห์ผลกระทบของกระแสที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล โดยพิจารณาจากมุมของตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล CVUF โดยที่มอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบเป็น มอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสขนาด 1 แรงม้า 4 ขั้วแม่เหล็กไฟฟ้า Frame No. 80M, IP 22, Insulation class B พิกัดแรงดันไฟฟ้า 380V ความถี่ 50 Hz กระแส 1.9A ความเร็วรอบ 1400 รอบต่อนาที โรเตอร์เป็นแบบ Squirrel Cage ในการทดสอบ ต่อมอเตอร์แบบ Star isolated neutral โดยมี Single phase variac ขนาด 1 kVA จ่ายกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 4A สามารถปรับแรงดันไฟฟ้าได้ 0 - 250V จำนวน 3 ตัว ต่อกันแบบ Star ทำหน้าที่ปรับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลค่าต่างๆ จ่ายให้กับมอเตอร์ โดยที่ภาระทางกลของมอเตอร์คือตุ้มน้ำหนักที่ผูกติดกับเชือกที่นำมาคล้อง Pulley ของมอเตอร์โดยมีทิศทางของน้ำหนักที่ถ่วงตรงกันข้ามกับทิศทางหมุนของมอเตอร์ เพื่อถ่วงมอเตอร์ ทำให้เกิดค่า Slip ขึ้นโดยมี Tachometer ทำหน้าที่วัดความเร็วรอบของมอเตอร์ และมีตาซึ่งสปริงตั้งเชือกอยู่ด้านบน ดังรูปที่ 3 ในแต่ละครั้งของการทดสอบมอเตอร์มีอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิห้องเท่ากัน

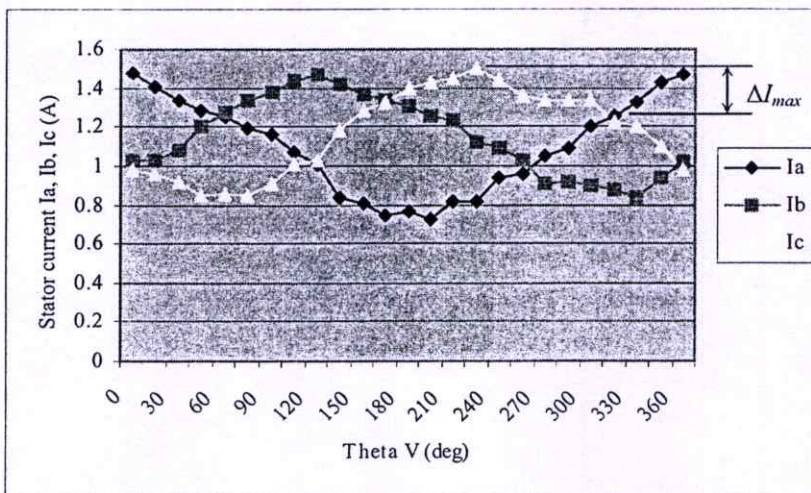
จากการทดสอบ No load test, Block rotor test และ VI method สามารถหา Impedance ของมอเตอร์หน่วยเป็นโอห์มได้ดังนี้ คือ $R_s = 8.87$, $R_r = 12.26$, $X_s = 9.89$, $X_r = 9.89$, $X_m = 251$



รูปที่ 3 แสดงรูปแบบการทดสอบมอเตอร์

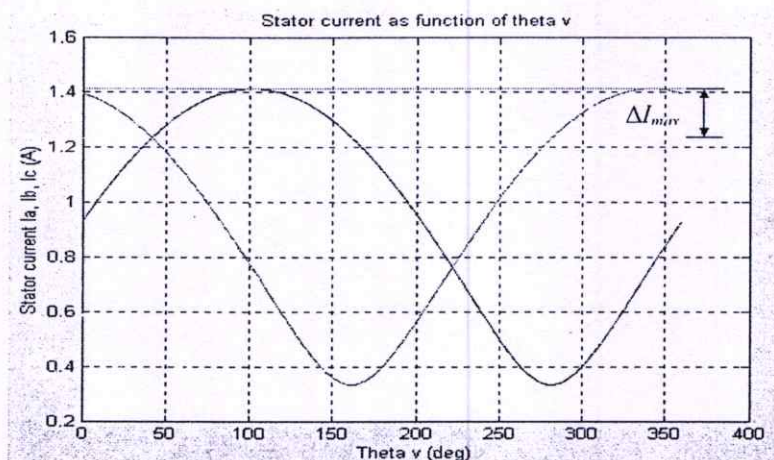
อิทธิพลของ θ , ที่มีต่อกระแสของมอเตอร์

วิธีการทดสอบคือปรับแรงดันไฟฟ้าให้มีค่า $k_v = 6\%$ โดยให้ θ , เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0° ถึง 360° แล้ววัดค่ากระแสของเฟส A, B, C ในขณะที่มอเตอร์มีค่า Slip 0.015



รูปที่ 4 กระแส Stator ของเฟส A, B, C ที่เป็นฟังก์ชันกับ θ , โดยที่ θ , เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0° ถึง 360° สำหรับค่า $k_v = 6\%$ และ ค่า Slip = 0.015

การวิเคราะห์ผลกระทบของแรงดันไฟฟ้าสามเฟสไม่สมดุลต่อกระแสเดเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 141
โดยพิจารณาจากมุมเฟสของค่าตัวประกอบความไม่สมดุลของแรงดันเป็นตัวบังคับ



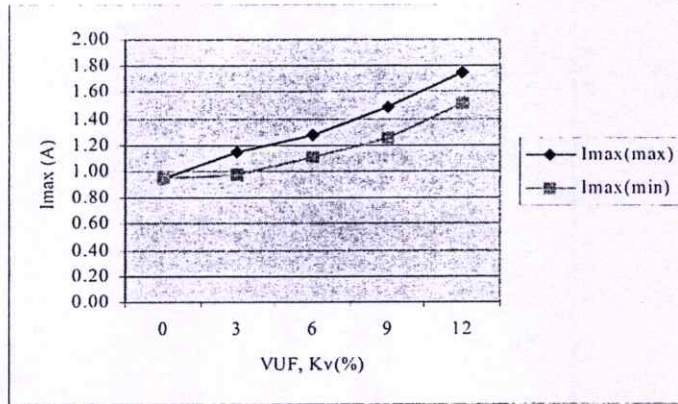
รูปที่ 5 กระแส Stator ของเฟส A, B, C ที่เป็นฟังก์ชันกับ θ_v โดยที่ θ_v เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0° ถึง 360° สำหรับค่า $k_v = 6\%$ และ ค่า Slip = 0.015 เมื่อทำการพล็อตด้วยโปรแกรม MATLAB โดยใช้สมการที่(19)-(21)

จากผลการทดลองพบว่ากระแสเดเตอร์ที่เกิดขึ้นจะมีค่าสอดคล้องกับสมการที่ (19) - (21) และจะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับ θ_v โดยจะมีค่าสูงที่สุดและต่ำที่สุดของ I_{max} ที่มุมของ θ_v ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ (23) และ (24) ตามลำดับ ดังเช่นผลการทดสอบจากคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในรูปที่5.

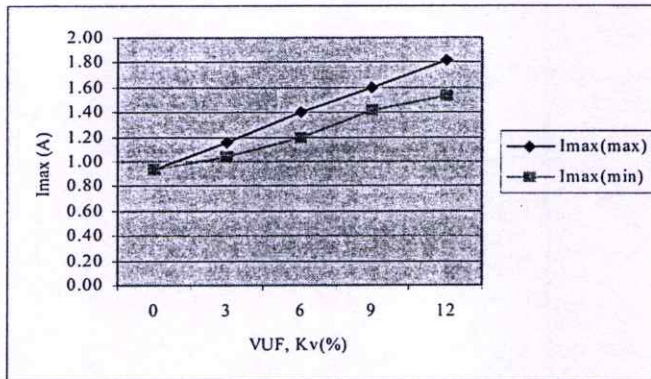
ช่วงของกระแส Stator เปลี่ยนแปลงสูงสุด ΔI_{max}

การทดสอบในขั้นตอนนี้ จะทำการทดสอบมอเตอร์ที่ค่า $k_v = 0, 3, 6, 9, 12\%$ และที่ $\theta_v = \hat{\theta}_v$ และ $\bar{\theta}_v$ ตามลำดับ แล้วทำการวัดค่ากระแส Stator ที่เกิดขึ้นที่เฟส A โดยในที่นี้จะขอเรียกระแส Stator ที่เกิดขึ้นที่มุม $\theta_v = \hat{\theta}_v$ ว่า $I_{max}(max)$ และเรียกระแส Stator ที่เกิดขึ้นที่มุม $\theta_v = \bar{\theta}_v$ ว่า $I_{max}(min)$ โดยจะทำการทดสอบที่ค่า Slip = 0.001, 0.015, 0.03 ตามลำดับ ผลการทดสอบสามารถนำมาพล็อตเป็นกราฟได้ดังนี้

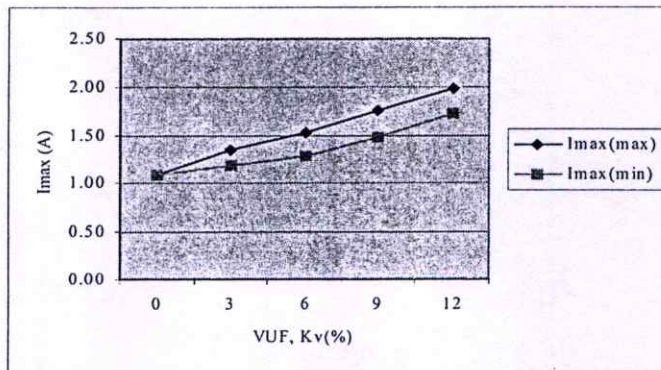
ขีรยทุธ เสงี่ยมค้กัฒ์ และ ประภาษ ไพรสูวรรณา



รูปที่ 6 กระแส Stator ของ Phase A ที่ Slip 0.001

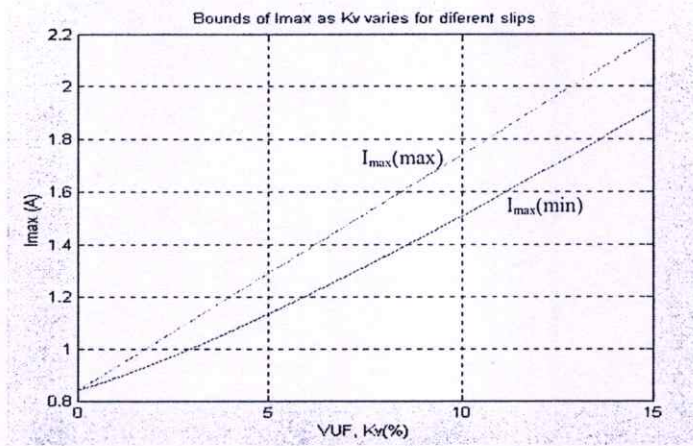


รูปที่ 7 กระแส Stator ของ Phase A ที่ Slip 0.015

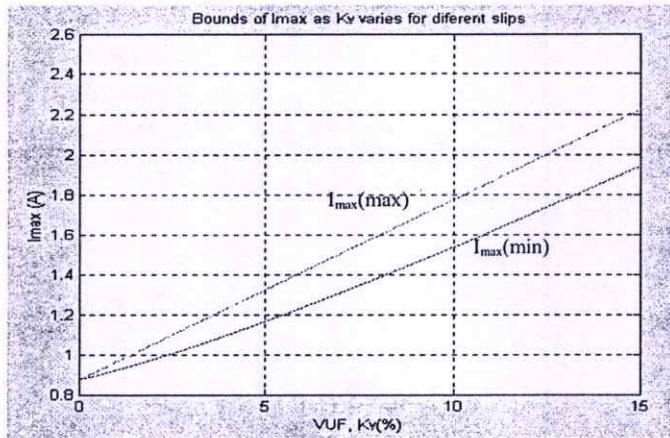


รูปที่ 8 กระแส Stator ของ Phase A ที่ Slip 0.03

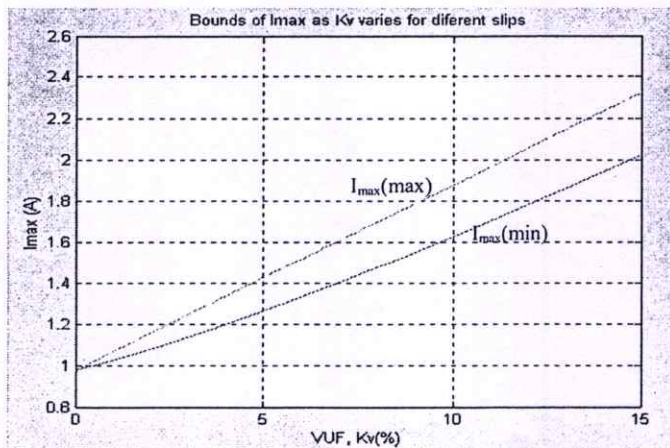
การวิเคราะห์ผลกระทบของแรงดันไฟฟ้าสามเฟสไม่สมดุลต่อกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 143
 โดยพิจารณาจากมุมเฟสของค่าตัวประกอบความไม่สมดุลของแรงดันเป็นตัวบ่งชี้



รูปที่ 9 กระแส Stator ของ Phase A ที่ Slip 0.001เมื่อทำการพล็อตด้วยโปรแกรม MATLAB



รูปที่ 10 กระแส Stator ของ Phase A ที่ Slip 0.015เมื่อทำการพล็อตด้วยโปรแกรม MATLAB



รูปที่ 11 กระแส Stator ของ Phase A ที่ Slip 0.03เมื่อทำการพล็อตด้วยโปรแกรม MATLAB

จากผลการทดลองพบว่าที่ค่าคงที่ k_v ค่าหนึ่งจะมีค่า I_{max} ได้หลายค่าระหว่างขอบเขตสูงสุดและขอบเขตต่ำสุด ΔI_{max} ทั้งนี้สืบเนื่องมาจากอิทธิพลของ θ ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ (25) และ (26) ดังเช่นผลการทดสอบจากคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในรูปที่ 9 - 11 ซึ่งค่า θ นี้จะมีค่าไม่ค่อยแน่นอนขึ้นอยู่กับแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า สำหรับการออกแบบพิกัดของมอเตอร์ หรือออกแบบระบบป้องกัน จะต้องพิจารณากรณีที่กระแส Stator มีค่าเท่ากับ $I_{max(max)}$ ซึ่งในที่นี้จะขอเรียกว่า กรณีที่เลวร้ายที่สุด

บทสรุป

บทความฉบับนี้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์และประเมินค่าผลกระทบของกระแสที่เกิดกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล CVUF ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์สองตัวคือ k_v และ θ ที่ถูกใช้ในการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล บทความฉบับนี้จะเน้นพิจารณาเฉพาะอิทธิพลของ θ ซึ่งไม่ค่อยมีการพูดถึงมากนักในการนำเสนอบทความ ค่าสูงสุดของกระแสเตเตอร์ (I_{max}) จะมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงที่ไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับค่าของ k_v และ θ สำหรับกรณีที่เลวร้ายที่สุดจะถูกพิจารณาเพื่อป้องกันมอเตอร์มีความร้อนสูงเกินไป ซึ่งจะพบว่าค่า k_v และ θ จำเป็นที่จะต้องถูกนำมาพิจารณาในการวิเคราะห์ผลกระทบเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลที่เกิดกับมอเตอร์

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบริษัท MITSUBISHI ELEVATOR ASIA CO.,LTD โดยเฉพาะอย่างยิ่งแผนก QA คุณบุญเลิศ เด็กสงวน, คุณชัยพร มาลาจำปี และเพื่อนพนักงานทุกคนที่ห้อง Calibration ที่ช่วยเหลือและเอื้อเฟื้อเครื่องมือและสถานที่ในการทดลองครั้งนี้ และขอขอบพระคุณ ดร. สิทธิพิชญ์ สินธุสุนธิชาติ ที่ให้คำแนะนำในเรื่องการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

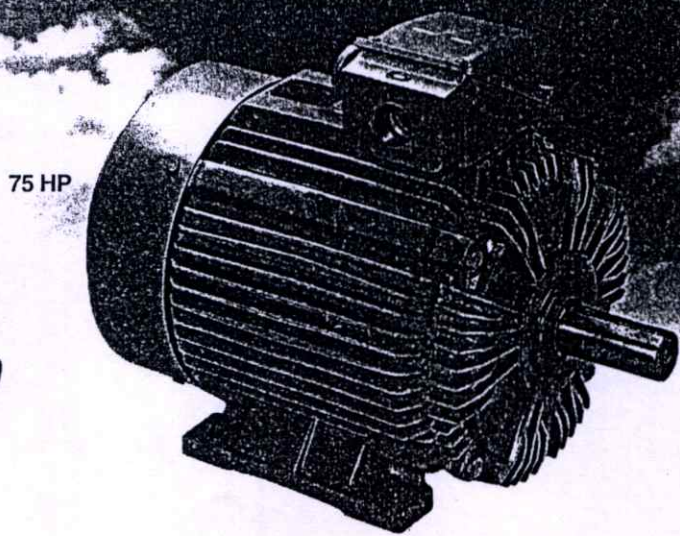
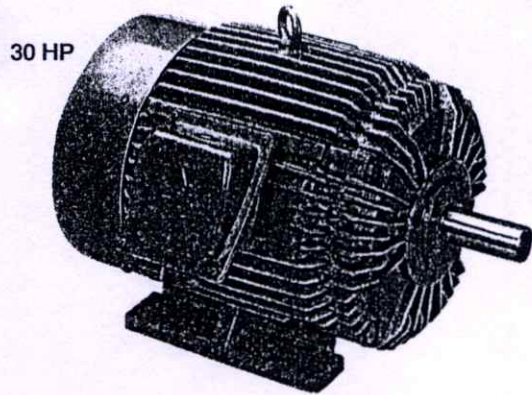
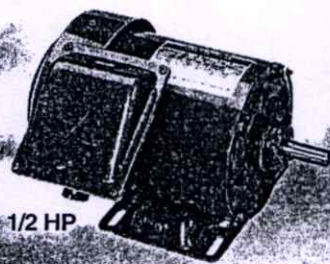
- William D. Stevenson, Jr. 1982. "Element of Power System Analysis". 4th Edition. McGraw- Hill. pp.278-279
- IEEE Guide for AC Motor Protection. 1988. IEEE Standards Board. ANSI/IEEE C37.96-1988
- Y. J. Wang. 2000. "An analytical study on steady-state performance of an induction motor connected to unbalanced three-phase voltage". IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Singapore.
- รัชต มั่งมีชัย 2543 "การวิเคราะห์กำลังของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อใช้งานในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่ สมดุล" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ภาคผนวก ข

รายละเอียดข้อมูลของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ



SUPER LINE J SERIES THREE PHASE INDUCTION MOTOR



The quality move!



FEATURES AND BENEFITS

Compact Size and Light Weight

Size and weight reductions have been achieved by the use of steel-plate frame and aluminium brackets in the small-capacity motors.

Highly Reliable Insulation Systems

Class B and F insulation systems are characterized by superior resistance to heat, humidity and chemicals for top-notch reliability.

Full Lineup

We have produced variety types of motors, thus providing a full lineup of motors ideal for any application.

Superlative Characteristics and High Reliability

Based on experience and technology accumulated over many years, along with an exacting quality-control system, each motor is ensured to exhibit only the finest characteristics.

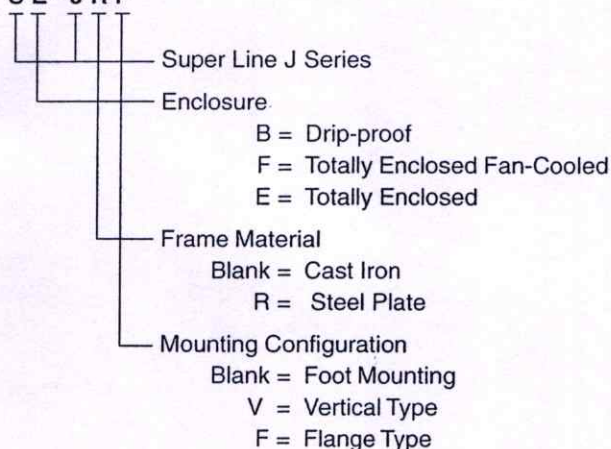
Safety : All the rotating parts and the "live" areas are made sure that it cannot be accidentally touched directly.

Smooth Acceleration : The low moment of inertia of the rotor combined with the motor's high acceleration torque, contributes to smooth starting and stopping.

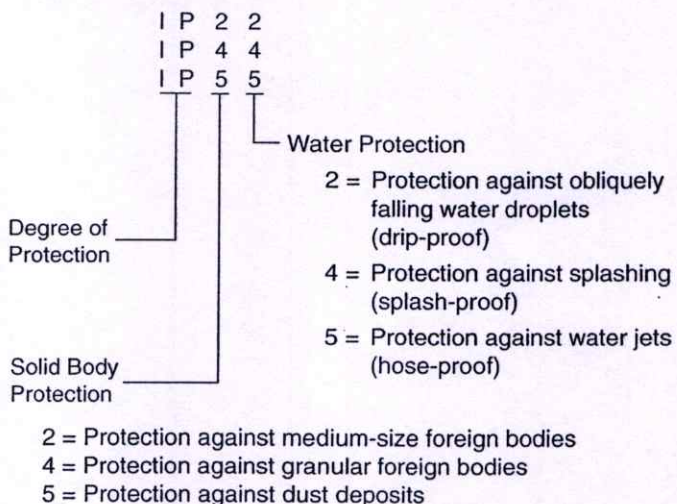
Low Noise and Vibration Levels : This feature has been achieved due to our highly individualized electrical design, the ample rigidity and the precise machining of the motor frames and brackets, and the exact balancing of the rotor.

SIGNIFICANCE OF TYPE DESIGNATIONS AND PROTECTION DEGREE FOR THREE PHASE MOTOR

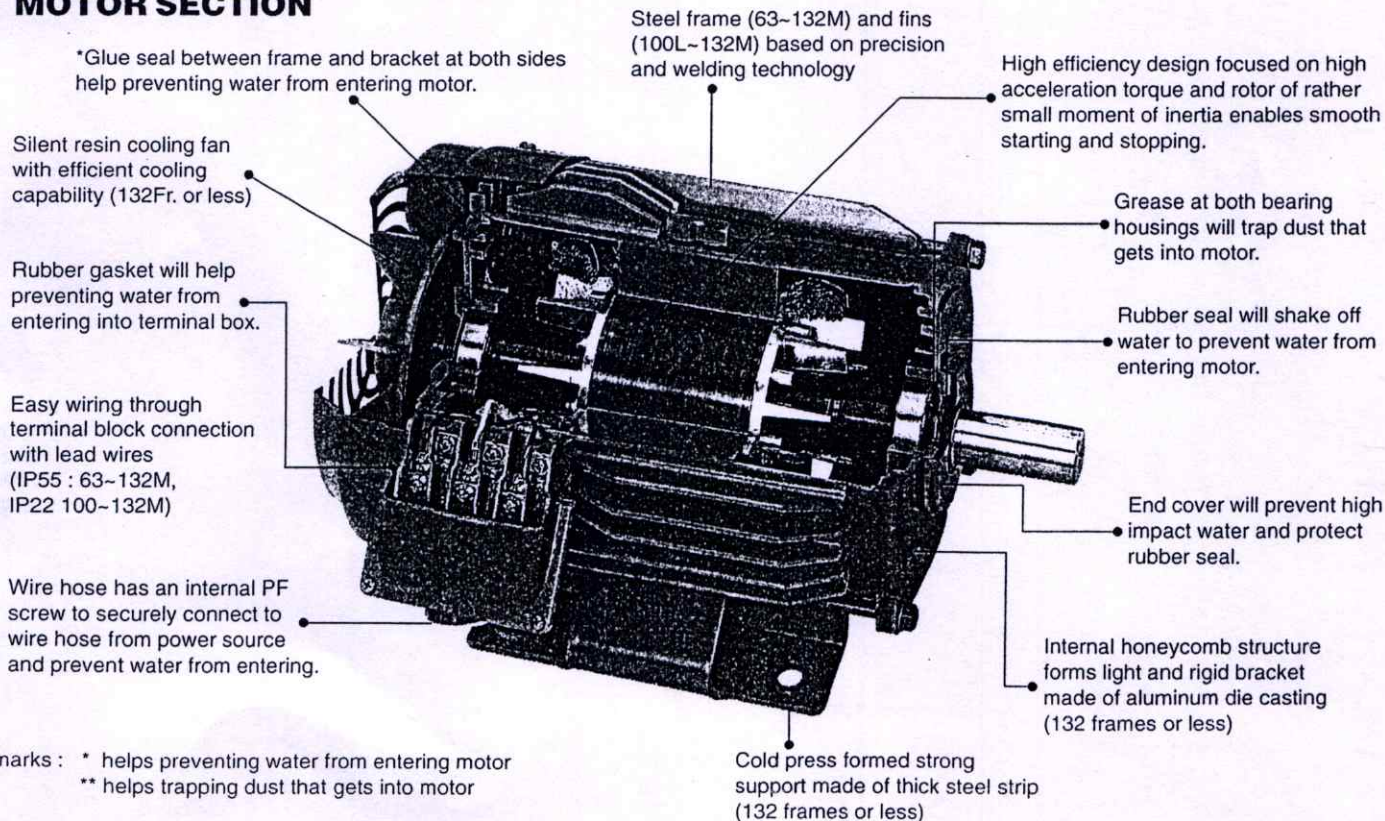
S E - J R F



Degree of Protection



MOTOR SECTION

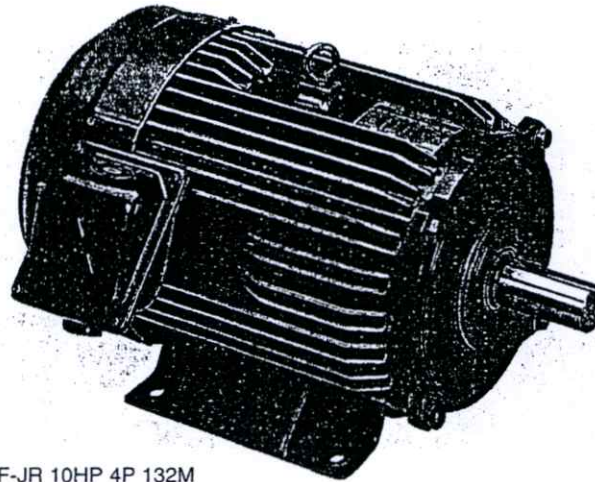


STANDARD SPECIFICATIONS

Item		Specifications										
Voltage and Frequency		LT : 10HP and below = 220/380~415V 50Hz, 220/440V 60Hz HT : 5HP and above = 380~415V 50Hz, 380~440V 60Hz (Suitable for λ - Δ starting)										
Enclosure Construction and Protection System	Enclosure Construction	Totally Enclosed Fan Cooled Type	Degree of Protection	IP55	Frame No.	63M ~ 132M 160M ~ 225S	Horizontal	SF-JR SF-J	Model Name	SF-JRV SF-JV	Flange *	SF-JRF SF-JF
	Enclosure Construction	Totally Enclosed Fan Cooled Type	Degree of Protection	IP44	Frame No.	63M ~ 90L	Horizontal	SF-JR	Model Name	-	Flange *	-
	Enclosure Construction	Drip-proof	Degree of Protection	IP22	Frame No.	80M ~ 132M	Horizontal	SB-JR	Model Name	SB-JRV	Flange *	-
	* Standard vertical-type motor can be used for indoor flange type.											
Frame Material		63M ~ 132M 160M ~ 225S	Steel Plate Cast Iron									
Shaft End Key and Groove Dimensions		The tolerances for the shaft end key and key groove for shaft end diameters of 14mm and above are based on JIS B 1301, which conforms with ISO standards.										
Power Transmission System		Direct-coupled, special purpose system for 2-pole machines with an output of 15HP or above. Direct-coupled and belt-driven, dual-purpose system for machines with 4 or more poles.										
Direction of Rotation		Counter-Clockwise (CCW) viewed from shaft-end side										
Insulation Class		IP22 and IP44 : 90L and below 100L and above IP55 :	Class B Class F Class F for all models									
Circumstance Condition	Ambient Temperature	-20 ~ +40°C										
	Ambient Humidity	For Drip-proof Structure	85% RH or less									
	Ambient Humidity	For Totally Enclosed Structure	95% RH or less									
	Above Sea Level	1000m. or less										
Environment		No bursting / erosive gas or vapor										
Connection Type	Degree of Protection		Frame No.	No. of Leads	Connection Type							
	IP55		63 ~ 132M 160M ~ 225S	6	Terminal Block Lead Wire (Also suitable for λ - Δ starting)							
	IP44		63 ~ 90L	6	Lead Wire							
	IP22		63 ~ 90L 100L ~ 132M	6	Lead Wire Terminal Block							
	Construction of Lead Wires											
Connection Diagram	Terminal Block											
	Lead Wire											
	CONNECTION DIAGRAM [端子接続図]		DUAL VOLTAGE (二機電圧)			LOW VOLTAGE (低電圧) Δ 220V			HIGH VOLTAGE (高電圧) λ 380, 440V			
	CONNECTION DIAGRAM [端子接続図]		λ - Δ STARTING (スターデルタ始動)			STARTING (始動)			RUNNING (運転)			
* HT can be used only with motors 5HP and above.												
Coating Colour		Munsell N5.5 (Gray)										
Conformed Standard		IEC 34-1, JIS C 4004										

SF-JR 63M~132M HORIZONTAL TYPE

Totally Enclosed Fan Cooled Type IP 55 Degree of Protection



SF-JR 10HP 4P 132M

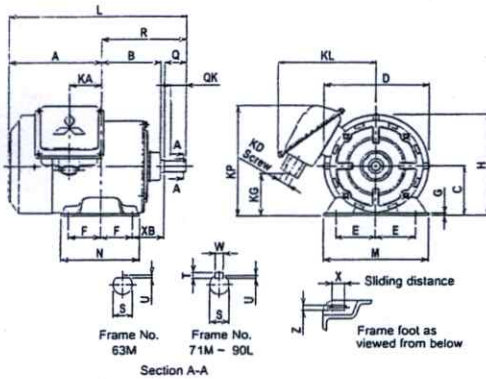


Fig. 1

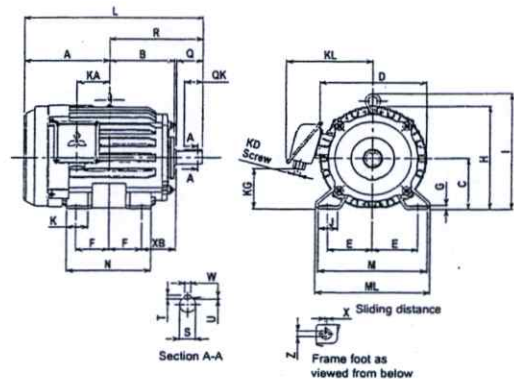


Fig. 2

Model	Frame No.	Output HP (kW)			Fig.	Motor															Terminal Box							
		2-pole	4-pole	6-pole		A	B	C*	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	ML	N	X	XB	Z	KA	KG	KD	KL	KP**
																	KL	KD	KL	KP**								
SF-JR	63M	1/4(0.2)	1/4(0.2)	-	1	121.5	73.6	63	127	50	40	2.3	127	-	-	224.5	135	-	100	12	40	7	38.4	75	PF1/2	130	162	
	71M	1/2(0.4)	1/2(0.4)	1/4(0.2)		128.5	83	71	148	56	45	3.2	145	-	-	248.5	148	-	110	18	45	7	44.5	67	PF1/2	140	161	
	80M	1(0.75)	1(0.75)	1/2(0.4)		122	98	80	166	62.5	50	3.2	166	-	-	262	160	-	125	15	50	9	39.5	38	PF3/4	145	-	
	90L	2(1.5), 3(2.2)	2(1.5)	1(0.75)		143	117	90	188	70	62.5	4	187	-	-	311.5	175	-	150	15	56	9	53	59	PF3/4	158	-	
	100L	-	3(2.2)	2(1.5)	2	173	131	100	211	80	70	6.5	204	230	40	45	366	200	212	180	4	63	12	65	64	PF3/4	170	-
	112M	5(3.7)	5(3.7)	3(2.2)		181	138	112	230	95	70	6.5	226	254	40	45	381	230	242	180	4	70	12	69	87	PF3/4	182	-
	132S	7.5(5.5), 10(7.5)	7.5(5.5)	5(3.7)		211.5	155	132	270	108	70	6.5	265	289	40	45	450.5	256	268	180	4	89	12	75	96	PF1	210	-
	132M	-	10(7.5)	7.5(5.5)		230.5	174	132	270	108	89	6.5	265	289	40	45	488.5	256	268	218	4	89	12	94	96	PF1	210	-

The perpendicular variation of tolerance for the shaft center is -0.5
 This dimension is for model which KP > H only.

Model	Frame No.	Shaft End							Bearing No.		Approx. Weight (kg)			Approx. Packing	Packing Weight (kg)		
		Q	QK	R	S	T	U	W	Drive End	Opposite	2-pole	4-pole	6-pole	Dimension (LxWxH)	2-pole	4-pole	6-pole
F-JR	63M	23	-	103	11 h6	-	1	-	6201ZZ	6201ZZ	6.5	6.6	-	280 x 234 x 230	6.8	6.9	-
	71M	30	25	120	14 j6	5	3	5	6202ZZ	6201ZZ	8.0	9.2	9.0	283 x 264 x 188	8.4	9.6	9.4
	80M	40	32	140	19 j6	6	3.5	6	6204ZZ	6203ZZ	11	11	11	327 x 282 x 218	12	12	12
	90L	50	40	168.5	24 j6	7	4	8	6205ZZ	6204ZZ	17, 21	20	19	380 x 292 x 238	18, 22	21	20
	100L	60	45	193	28 j6	7	4	8	6206ZZ	6205ZZ	-	24	26	440 x 350 x 295	-	28	30
	112M	60	45	200	28 j6	7	4	8	6207ZZ	6206ZZ	33	35	37	467 x 366 x 348	40	42	44
	132S	80	63	239	38 k6	8	5	10	6308ZZ	6207ZZ	47, 55	48	50	571 x 416 x 377	55, 63	56	58
	132M	80	63	258	38 k6	8	5	10	6308ZZ	6207ZZ	-	58	61	611 x 416 x 377	-	66	69

THREE PHASE MOTOR CHARACTERISTICS

SB-JR(V) IP 22 80M~90L (Ins. Class B), 100L~132M (Ins. Class F)

SF-JR IP 44 63M~90L 4 P (Ins. Class F)

SF-JR(V) IP 55 63M~132M (Ins. Class F) ,SF-J(V) 160M~225S (Ins. Class F)

LT (220 / 380 / 415 / 440V)

Pole	Output		Frame No.	Full Load Current(A) / Full Load Revolution(r/min)				
	HP	kW		220V 50Hz	380V 50Hz	415V 50Hz	220V 60Hz	440V 60Hz
2	1/4	0.2	63	0.97 / 2810	0.56 / 2810	0.58 / 2840	0.94 / 3360	0.53 / 3380
	1/2	0.4	71	1.73 / 2830	1.0 / 2830	1.0 / 2860	1.65 / 3420	0.9 / 3440
	1	0.75	80	3.1 / 2830	1.8 / 2830	1.8 / 2860	2.9 / 3400	1.6 / 3430
	2	1.5	90L	5.6 / 2860	3.2 / 2860	3.1 / 2870	5.2 / 3440	2.8 / 3450
	3	2.2	90L	7.8 / 2850	4.5 / 2850	4.3 / 2870	7.6 / 3430	4.0 / 3460
	5	3.7	112M	12.8 / 2890	7.4 / 2890	7.2 / 2910	12.6 / 3470	6.5 / 3490
	7.5	5.5	132S	20.1 / 2900	11.6 / 2900	11.6 / 2910	18.9 / 3480	10 / 3500
	10	7.5	132S	25 / 2910	14.5 / 2910	14.1 / 2920	24.5 / 3490	12.4 / 3510
4	1/4	0.2	63	1.11 / 1430	0.64 / 1430	0.69 / 1440	0.97 / 1730	0.61 / 1750
	1/2	0.4	71	2.0 / 1410	1.15 / 1410	1.2 / 1430	1.8 / 1700	1.0 / 1730
	1	0.75	80	3.3 / 1400	1.9 / 1400	1.95 / 1410	3.0 / 1700	1.7 / 1720
	2	1.5	90L	5.9 / 1430	3.4 / 1430	3.4 / 1440	5.5 / 1710	3.1 / 1730
	3	2.2	100L	8.7 / 1420	5.0 / 1420	4.9 / 1430	8.5 / 1710	4.6 / 1730
	5	3.7	112M	13.7 / 1420	7.9 / 1420	7.7 / 1430	13.5 / 1710	7.2 / 1730
	7.5	5.5	132S	20.4 / 1430 (19.9 / 1430)	11.8 / 1430 (11.5 / 1430)	11.1 / 1440 (11.6 / 1440)	19.9 / 1720 (18.8 / 1720)	10.3 / 1740 (9.89 / 1730)
	10	7.5	132M	27 / 1430 (26.1 / 1440)	15.4 / 1430 (15.1 / 1440)	14.6 / 1440 (15.1 / 1450)	26 / 1720 (24.9 / 1730)	13.5 / 1740 (13.4 / 1740)
6	1/4	0.2	71	1.21 / 920	0.7 / 920	0.7 / 930	1.12 / 1100	0.65 / 1120
	1/2	0.4	80	2.25 / 920	1.3 / 920	1.3 / 930	2.1 / 1100	1.2 / 1110
	1	0.75	90L	3.6 / 940	2.1 / 940	2.2 / 950	3.5 / 1130	2.0 / 1150
	2	1.5	100L	6.6 / 930	3.8 / 930	3.7 / 940	6.2 / 1110	3.4 / 1120
	3	2.2	112M	9.5 / 940	5.5 / 940	5.4 / 950	9.0 / 1120	5.1 / 1140
	5	3.7	132S	15.2 / 940	8.8 / 940	8.4 / 950	14.2 / 1130	7.8 / 1150
	7.5	5.5	132M	22 / 950	12.8 / 950	13 / 960	21 / 1140	11.5 / 1150

HT (380~440V Δ - Δ starting)

Pole	Output		Frame No.	Full Load Current(A) / Full Load Revolution(r/min)			
	HP	kW		380V 50Hz	415V 50Hz	380V 60Hz	440V 60Hz
2	5	3.7	112M	7.5 / 2890	7.3 / 2910	7.3 / 3470	6.6 / 3490
	7.5	5.5	132S	11.6 / 2900	11.6 / 2910	10.9 / 3480	10 / 3500
	10	7.5	132S	14.4 / 2900	14.0 / 2920	14.2 / 3480	12.4 / 3510
	15	11	160M	21.5 / 2910	20.5 / 2920	21 / 3490	18.5 / 3510
	20	15	160M	28 / 2910	27 / 2920	27 / 3490	24 / 3510
	25	18.5	160L	34 / 2910	33 / 2930	33 / 3490	29 / 3510
	30	22	180M	42 / 2910	39 / 2930	41 / 3490	36 / 3510
	40	30	180L	55 / 2920	52 / 2940	54 / 3490	47 / 3520
	50	37	200L	69 / 2920	67 / 2940	67 / 3510	60 / 3530
	60	45	200L	83 / 2920	80.5 / 2940	81 / 3510	72 / 3530
4	5	3.7	112M	7.9 / 1420	7.7 / 1430	7.8 / 1710	7.2 / 1730
	7.5	5.5	132S	11.8 / 1430 (11.5 / 1430)	11.1 / 1440 (11.6 / 1440)	11.5 / 1720 (10.9 / 1720)	10.3 / 1740 (9.89 / 1730)
	10	7.5	132M	15.5 / 1430 (15.1 / 1440)	14.5 / 1440 (15.1 / 1450)	15.0 / 1720 (14.4 / 1730)	13.4 / 1740 (13.4 / 1740)
	15	11	160M	22.5 / 1430	21.5 / 1440	21.5 / 1720	19 / 1740
	20	15	160L	30 / 1450	31 / 1460	28.5 / 1740	26 / 1760
	25	18.5	180M	36 / 1460	35 / 1470	35 / 1750	32 / 1760
	30	22	180M	43 / 1460	42 / 1470	42 / 1750	38 / 1760
	40	30	180L	58 / 1460	56 / 1470	56 / 1750	49 / 1760
	50	37	200L	69 / 1450	65 / 1460	69 / 1750	60 / 1770
	60	45	200L	83.5 / 1450	82 / 1460	82 / 1750	72 / 1770
6	5	3.7	132S	8.9 / 940	8.5 / 950	8.3 / 1130	7.9 / 1150
	7.5	5.5	132M	12.8 / 950	13 / 960	12.1 / 1140	11.5 / 1150
	10	7.5	160M	16.5 / 950	16.5 / 960	16 / 1130	14.5 / 1150
	15	11	160L	24 / 960	24 / 970	23 / 1140	21 / 1160
	20	15	180M	32 / 960	32 / 970	31 / 1150	28 / 1170
	25	18.5	180L	39 / 960	37 / 970	38 / 1150	33 / 1170
	30	22	180L	45 / 960	43 / 970	44 / 1150	39 / 1170
	40	30	200L	60 / 960	59 / 970	58 / 1150	51 / 1170
	50	37	200L	74 / 960	74 / 970	72 / 1150	64 / 1170
	60	45	225S	89 / 960	89 / 970	88 / 1150	76 / 1170

ประวัติผู้เขียน

นายธีรยุทธ เสงี่ยมศักดิ์ เกิดเมื่อวันที่ 22 มกราคม พ.ศ. 2521 ที่ อำเภอนางรอง จังหวัดบุรีรัมย์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับ2) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ในปี พ.ศ. 2543

ปี พ.ศ. 2543 – ปัจจุบัน (พ.ศ. 2549) ทำงานเป็นวิศวกร ออกแบบระบบไฟฟ้าของบันไดเลื่อน MITSUBISHI บริษัท MITSUBISHI ELEVATOR ASIA CO.,LTD