

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เทคนิคการตรวจจับขดลวดสเตเตอร์ลัดวงจร สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ
ไฟฟ้า 3 เฟส โดยใช้องค์ประกอบลำดับอิมพีแดนซ์เมตริกซ์

STATOR WINDING SHORT TURNS DETECTION TECHNIQUE
FOR 3 ϕ INDUCTION MOTORS USING THE SEQUENCE
COMPONENT IMPEDANCE MATRIX



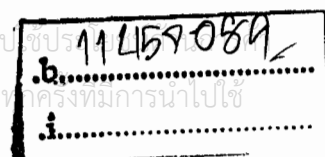
จิรวทย์ เตรียมมานะวงศ์
JIRAWIT TRAIMMANAWONG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย

อพ.
จ 5/2 ท สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
Q547 พ.ศ. 2547

เลขหมู่..... ISBN 974-15-1244-9

เลขทะเบียน..... 58579
วัน,เดือน,ปี 26 ส.ค. 2549



**STATOR WINDING SHORT TURNS DETECTION TECHNIQUE
FOR 3 ϕ INDUCTION MOTORS USING THE SEQUENCE
COMPONENT IMPEDANCE MATRIX**



**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
2004**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในหอสมุดเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPPYRIGHT 2004

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

เทคนิคการตรวจจับขดลวดสเตเตอร์ลัดวงจร
สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า 3 เฟส โดยใช้
องค์ประกอบลำดับอิมพีแดนซ์เมตริกซ์

นักศึกษา

นายจิรวิทย์ เติร์ยมมานะวงศ์

รหัสประจำตัว

44061002

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

พ.ศ.

2547

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเทคนิคการตรวจจับขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสลัดรอบ โดยใช้องค์ประกอบลำดับอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ ข้อดีของวิธีการดังกล่าวจะมีความเหมาะสมสำหรับการตรวจจับในระยะเริ่มแรกของการลัดวงจร และที่สภาวะการทำงานเมื่อมอเตอร์มีโหลด โดยในสภาวะดังกล่าวจะทำให้ค่าของอิมพีแดนซ์ที่ลำดับบวก ลบ และศูนย์มีค่าที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งจะทำให้มีความถูกต้องในการตรวจจับขดลวดสเตเตอร์ลัดรอบสูงกว่าเทคนิคอื่นๆ ที่จำนวนของการลัดวงจรน้อยๆ ทั้งนี้จะสามารถลดผลของค่าสลิป ของความไม่สมมาตรภายในตัวมอเตอร์ แหล่งจ่ายไฟไม่สมดุล และรวมถึงความผิดพลาดในการวัดเป็นต้นได้ จากผลการจำลอง และการทดลองแสดงให้เห็นว่าวิธีการดังกล่าวสามารถนำมาใช้ตรวจจับขดลวดสเตเตอร์ลัดรอบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Thesis Title	Stator Winding Short Turns Detection Technique in 3 ϕ Induction Motors Using the Sequence Component Impedance Matrix
Student	Mr. Jirawit Traimmanawong
Student ID.	44061002
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2004
Thesis Advisor	Assoc.Prof. Dr.Vijit Kinnares

ABTRACT

This paper presents a detection technique for stator winding turn faults of 3 phase induction motor based on the sequence component impedance matrix. Advantages of this method are appropriate for detecting turn faults in an early stage and operating load condition. In such condition, the value of positive, negative and zero sequence impedance are different from each other. Consequently, this technique is accurately capable of detecting small levels of turn faults, as compared with other techniques. Moreover, the effect of slip-dependent influence of inherent motor asymmetry, supply voltage unbalance and measurement errors are reduced. The simulation and experimental results show the validity of the proposed turn fault detection technique.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ รศ.ดร. วิจิตร กิณเรศ อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูง ที่ได้ให้คำปรึกษาและแนะนำสิ่งต่างๆที่ผู้วิจัยติดปัญหา ซึ่งสามารถเข้าใจและทำการแก้ไขได้จนกระทั่งวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ และพี่ๆ ของภาควิศวกรรมไฟฟ้าห้องปฏิบัติการวิจัย ห้อง 405 และ 406 ตึก ECC ทุกคน ที่มีส่วนช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

คุณค่า และประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้เขียนขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 ทฤษฎีและแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	2
1.6 ประโยชน์ที่ได้จากวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 โครงสร้าง.....	4
2.2.1 ส่วนที่อยู่กับที่.....	5
2.2.2 ส่วนเคลื่อนที่ หรือส่วนหมุน.....	6
2.2.3 ข้อได้เปรียบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	7
2.3 หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	8
2.3.1 ความเร็วโรเตอร์ และสลิป.....	9
2.3.2 วิธีสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	9
2.4 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	10
2.5 การหาค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	14
2.5.1 การทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะไม่มีโหลด (No load test).....	14
2.5.2 การทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะยึดโรเตอร์หยุดนิ่ง (Blocked rotor test).....	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารร่างการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะยึดโรเตอร์หยุดนิ่ง (Blocked rotor test) โดยใช้โปรแกรมจำลองค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.3 การทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ DC-test (VI-method).....	17
บทที่ 3 ระบบองค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical Component System).....	18
3.1 ระบบองค์ประกอบสมมาตร.....	18
3.1.1 องค์ประกอบลำดับอิมพีแดนซ์เมตริกซ์.....	22
3.1.2 ทฤษฎีในการจำลอง.....	24
3.1.3 ทฤษฎีในการทดลอง.....	29
3.2 ระบบแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส.....	32
3.2.1 กำลังไฟฟ้า 3 เฟส เมื่อโหลดต่อแบบสตาร์ และเดลต้า.....	34
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	37
4.1 การทดลองและการจำลอง.....	37
4.1.1 ขั้นตอนในการจำลอง และทดลอง.....	37
4.2 ผลการจำลองของมอเตอร์ 1 แรงม้า และ 2 แรงม้า.....	39
4.3 ผลการทดลองของมอเตอร์ 1 แรงม้า และ 2 แรงม้า.....	54
บทที่ 5 สรุป และข้อเสนอแนะ.....	65
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	65
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	66
เอกสารอ้างอิง.....	67
ภาคผนวก ก.....	69
ภาคผนวก ข.....	84
ภาคผนวก ค.....	97
ภาคผนวก ง.....	105

เอกสารประวัติผู้เขียน: ส่วนนี้ไว้สำหรับเก็บไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้แก้ไขประโยชน์ด้าน 109

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 แรงดันไฟฟ้าที่สภาวะต่างๆกัน.....	37
ก.1 ข้อมูลของการทดสอบมอเตอร์ 1 แรงม้าเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าสมดุล (S_b)	68
ก.2 ข้อมูลของการทดสอบมอเตอร์ 1 แรงม้าเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 5% 1-U (S_u204)	69
ก.3 ข้อมูลของการทดสอบมอเตอร์ 1 แรงม้าเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 5% 1-O (S_u237)	70
ก.4 ข้อมูลของการทดสอบมอเตอร์ 1 แรงม้าเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าสมดุลพร้อมทำการลัดรอบ 1 รอบ ($S_b(n)1$)	71
ก.5 ข้อมูลของการทดสอบมอเตอร์ 1 แรงม้าเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าสมดุลพร้อมทำการลัดรอบ 2 รอบ ($S_b(n)2$)	72
ก.6 ข้อมูลของการทดสอบมอเตอร์ 1 แรงม้าเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าสมดุลพร้อมทำการลัดรอบ 3 รอบ ($S_b(n)3$)	73
ก.7 ข้อมูลของการทดสอบมอเตอร์ 1 แรงม้าเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าสมดุลพร้อมทำการลัดรอบ 4 รอบ ($S_b(n)4$)	74
ก.8 ข้อมูลของการทดสอบมอเตอร์ 2 แรงม้าเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าสมดุล (S_b)	75
ก.9 ข้อมูลของการทดสอบมอเตอร์ 2 แรงม้าเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 5% 1-U (S_u204)	76
ก.10 ข้อมูลของการทดสอบมอเตอร์ 2 แรงม้าเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 5% 1-O (S_u237)	77
ก.11 ข้อมูลของการทดสอบมอเตอร์ 2 แรงม้าเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าสมดุลพร้อมทำการลัดรอบ 1 รอบ ($S_b(n)1$)	78
ก.12 ข้อมูลของการทดสอบมอเตอร์ 2 แรงม้าเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าสมดุลพร้อมทำการลัดรอบ 2 รอบ ($S_b(n)2$)	79
ก.13 ข้อมูลของการทดสอบมอเตอร์ 2 แรงม้าเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าสมดุลพร้อมทำการลัดรอบ 3 รอบ ($S_b(n)3$)	80
ก.14 ข้อมูลของการทดสอบมอเตอร์ 2 แรงม้าเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าสมดุลพร้อมทำการลัดรอบ 4 รอบ ($S_b(n)4$)	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ภาพตัดขวางของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า.....	5
2.2 โครงสร้างของสเตเตอร์.....	6
2.3 ลักษณะของแผ่นสเตเตอร์.....	6
2.4 โรเตอร์แบบกรงกระรอก.....	8
2.5 โรเตอร์แบบพันขดลวด.....	8
2.6 วงจรสมมูลขององค์ประกอบลำดับ.....	11
2.7 วงจรสมมูลขององค์ประกอบลำดับบวก.....	12
2.8 วงจรสมมูลขององค์ประกอบลำดับลบ.....	12
2.9 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	14
2.10 วงจรการทดสอบแบบ No Load Test	15
2.11 วงจรการทดสอบแบบ Blocked Rotor Test	16
2.12 วงจรการทดสอบแบบ VI-method.....	17
3.1 องค์ประกอบสมมาตรลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์ของระบบที่ไม่สมดุล.....	18
3.2 (ก) ขดลวดต่อแบบสตาร์ และ (ข) ขดลวดต่อแบบเดลต้า.....	23
3.3 โมเดลของการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์เพียงเฟสเดียว.....	24
3.4 วงจรสมมูลขององค์ประกอบลำดับบวกในสถานะคงที่.....	25
3.5 วงจรสมมูลขององค์ประกอบลำดับลบในสถานะคงที่.....	26
3.6 วงจรสมมูลของกระแสฟลัดตีในสถานะคงที่.....	26
3.7 (ก) Learning stage (ข) Protection stage.....	30
3.8 โครงสร้างสำหรับทำแหล่งจ่ายไม่สมดุล.....	31
3.9 วงจรทดลองสำหรับวิธีในการตรวจจับขดลวดลัดรอบในหลักการของ Z_{np} - based	31
3.10 แสดงลำดับเฟสของระบบไฟฟ้า 3 เฟส.....	32
3.11 แสดงการต่อภาระแบบสตาร์ 3 สาย.....	33
3.12 ลักษณะการต่อโหลด (a) โหลดต่อแบบสตาร์ (b) โหลดต่อแบบเดลต้า.....	35
4.1 การเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์รวม (Z_T) ของมอเตอร์ 1 แรงม้า.....	40
4.2 การเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์รวม (Z_T) ของมอเตอร์ 2 แรงม้า.....	40
4.3 การเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของ Z_T, R_T, X_T ของมอเตอร์ 1 แรงม้า.....	41
4.4 การเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของ Z_T, R_T, X_T ของมอเตอร์ 2 แรงม้า.....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามนำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 ขนาดและมุมในอุดมคติของ Z_T ของมอเตอร์ 1 แรงม้า.....	42
4.6 ขนาดและมุมในอุดมคติของ Z_T ของมอเตอร์ 2 แรงม้า.....	42
4.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่า Z_p ของมอเตอร์ 1 แรงม้า.....	43
4.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่า Z_p ของมอเตอร์ 2 แรงม้า.....	43
4.9 ค่า Z_p, R_p และ X_p ในอุดมคติของมอเตอร์ 1 แรงม้า.....	44
4.10 ค่า Z_p, R_p และ X_p ในอุดมคติของมอเตอร์ 2 แรงม้า.....	44
4.11 ขนาดของ V_n, I_p และ I_n ฟังก์ชันของ $ Z_p $ ที่แรงดันไม่สมดุลลดลง 5%มอเตอร์ 1 แรงม้า.....	45
4.12 ขนาดของ V_n, I_p และ I_n ฟังก์ชันของ $ Z_p $ ที่แรงดันไม่สมดุลลดลง 5%มอเตอร์ 2 แรงม้า.....	45
4.13 มุมของ V_n, I_p และ I_n ฟังก์ชันของ $ Z_p $ ที่แรงดันลดลง 5% ของมอเตอร์ 1 แรงม้า.....	46
4.14 มุมของ V_n, I_p และ I_n ฟังก์ชันของ $ Z_p $ ที่แรงดันลดลง 5% ของมอเตอร์ 2 แรงม้า.....	46
4.15 ค่าของ Z_{np} ในอุดมคติที่ไม่มีค่าผิดพลาดจากการวัดของมอเตอร์ 1 แรงม้า.....	47
4.16 ค่าของ Z_{np} ในอุดมคติที่ไม่มีค่าผิดพลาดจากการวัดของมอเตอร์ 2 แรงม้า.....	47
4.17 ค่าของ Z_{np} ที่มีค่าผิดพลาดจากการวัด ของมอเตอร์ 1 แรงม้า.....	48
4.18 ค่าของ Z_{np} ที่มีค่าผิดพลาดจากการวัดของมอเตอร์ 2 แรงม้า.....	48
4.19 ค่าของ ΔZ_{np} ในอุดมคติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า.....	49
4.20 ค่าของ ΔZ_{np} ในอุดมคติของมอเตอร์เหนี่ยวนำของมอเตอร์ 2 แรงม้า.....	49
4.21 แสดงค่า ΔZ_{np} ที่ใกล้ค่าสลิปเป็นศูนย์ของมอเตอร์ 1 แรงม้า.....	50
4.22 แสดงค่า ΔZ_{np} ที่ใกล้ค่าสลิปเป็นศูนย์ของมอเตอร์ 2 แรงม้า.....	50
4.23 แสดงค่า $ \Delta Z_{np} $ ที่ใกล้ค่าสลิปเป็นศูนย์ของมอเตอร์ 1 แรงม้า.....	51
4.24 แสดงค่า $ \Delta Z_{np} $ ที่ใกล้ค่าสลิปเป็นศูนย์ของมอเตอร์ 2 แรงม้า.....	51
4.25 แสดงค่า ΔZ_{np} ที่ใกล้ค่าสลิปพิกัดของมอเตอร์ 1 แรงม้า.....	52
4.26 แสดงค่า ΔZ_{np} ที่ใกล้ค่าสลิปพิกัดของมอเตอร์ 2 แรงม้า.....	52
4.27 แสดงค่า $ \Delta Z_{np} $ ที่ใกล้ค่าสลิปพิกัดของมอเตอร์ 1 แรงม้า.....	53
4.28 แสดงค่า $ \Delta Z_{np} $ ที่ใกล้ค่าสลิปพิกัดของมอเตอร์ 2 แรงม้า.....	53
4.29 แสดงค่า Z_p ที่แรงดันไม่สมดุลลดลง 5% ของมอเตอร์ 1 แรงม้า.....	54
4.30 แสดงค่า Z_p ที่แรงดันไม่สมดุลลดลง 5 % ของมอเตอร์ 2 แรงม้า.....	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.31 ค่าของ Z_p ที่แรงดันสมดุล, ไม่สมดุลลดลง 5%, เพิ่มขึ้น 5% และแรงดันในขณะ ลัดรอบ (1 รอบ ถึง 4 รอบ) ของมอเตอร์ 1 แรงม้า.....	55
4.32 แสดงค่า Z_p ที่แรงดันสมดุล, ไม่สมดุลลดลง 5%, เพิ่มขึ้น 5% ของมอเตอร์ 2 แรงม้า.....	56
4.33 แสดงขนาด $ Z_p $ ที่สภาวะของแรงดันระดับต่างๆ ของมอเตอร์ 2 แรงม้า.....	57
4.34 ค่าของ Z_p, R_p, X_p ที่แรงดันสมดุล, ไม่สมดุลลดลง 5%, เพิ่มขึ้น 5% และแรงดัน ในขณะลัดรอบ (1 รอบ ถึง 4 รอบ) ของมอเตอร์ 1 แรงม้า.....	57
4.35 แสดงค่า Z_p, R_p, X_p ที่แรงดันสมดุล, ไม่สมดุลลดลง 5%, เพิ่มขึ้น 5% ของมอเตอร์ 2 แรงม้า.....	58
4.36 ค่าของ Z_n, R_n, X_n ที่สภาวะของแรงดันสมดุล, ไม่สมดุลลดลง 5%และเพิ่มขึ้น 5% ของมอเตอร์ 1 แรงม้า.....	58
4.37 ขนาด V_n, I_p และ I_n ฟังก์ชันของ $ Z_p $ ที่แรงดันไม่สมดุลลดลง 5%ของมอเตอร์ 1 แรงม้า...	59
4.38 ขนาด V_n, I_p และ I_n ฟังก์ชันของ $ Z_p $ ที่แรงดันไม่สมดุลลดลง 5 %ของมอเตอร์ 2 แรงม้า...	59
4.39 มุม V_n, I_p และ I_n ฟังก์ชันของ $ Z_p $ ที่แรงดันไม่สมดุลลดลง 5 %ของมอเตอร์ 1 แรงม้า....	60
4.40 มุม V_n, I_p และ I_n ฟังก์ชันของ $ Z_p $ ที่แรงดันไม่สมดุลลดลง 5 %ของมอเตอร์ 2 แรงม้า....	60
4.41 ค่า Z_{np} ของมอเตอร์ 1 แรงม้า.....	61
4.42 ค่าของ Z_{np} ของมอเตอร์ 2 แรงม้า.....	61
4.43 ค่าของ ΔZ_{np} ของมอเตอร์ 1 แรงม้า.....	62
4.44 ค่าของ ΔZ_{np} ของมอเตอร์ 2 แรงม้า.....	62
4.45 แสดงค่า ΔZ_{np} ที่ใกล้ค่าสลิปเป็นศูนย์ ของมอเตอร์ 1 แรงม้า.....	63
4.46 แสดงค่า ΔZ_{np} ที่ใกล้ค่าสลิปเป็นศูนย์ ของมอเตอร์ 2 แรงม้า.....	63
4.47 แสดงค่า $ \Delta Z_{np} $ ที่ใกล้ค่าสลิปเป็นศูนย์ ของมอเตอร์ 1 แรงม้า.....	64
4.48 แสดงค่า $ \Delta Z_{np} $ ที่ใกล้ค่าสลิปเป็นศูนย์ ของมอเตอร์ 2 แรงม้า.....	64
ง.1 แสดงการพันมอเตอร์ที่ดึงแท็บสายออกมาจากขดลวดสเตเตอร์.....	108
ง.2 ชุดทดลองการตรวจจับสนดลวดสเตเตอร์ลัดรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า 3 เฟส.....	109

คำอธิบายสัญลักษณ์

N_s	ความเร็วเชิงโคโรนัส
f	ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าด้านสเตเตอร์
N_r	ความเร็วโรเตอร์
s	สลลิป
s_p	สลลิปลำดับบวก
s_n	สลลิปลำดับลบ
P	จำนวนขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์
R_s, R_l	ความต้านทานของสเตเตอร์
jX_s, jX_{l1}	รีแอกแตนซ์ของสเตเตอร์
jX_r, jX_{l2}	รีแอกแตนซ์ของโรเตอร์
jX_m	รีแอกแตนซ์ของแกนเหล็ก
I_s, I_1	กระแสสเตเตอร์
I_r, I_2	กระแสโรเตอร์
I_m	กระแสสร้างแม่เหล็ก
V_s	แรงดันไฟฟ้าอินพุท
RI	ความต้านทานโหลด
RI_p	ความต้านทานโหลดลำดับบวก
RI_n	ความต้านทานโหลดลำดับลบ
R_{fx}	ความต้านทานของแกนเหล็ก
$\bar{V}_p$	แรงดันลำดับบวก
$\bar{V}_n$	แรงดันลำดับลบ
$\bar{V}_z$	แรงดันลำดับศูนย์
$\bar{I}_p$	กระแสลำดับบวก
$\bar{I}_n$	กระแสลำดับลบ
$\bar{I}_z$	กระแสลำดับศูนย์
a	Operator (e^{j120})
p	องค์ประกอบลำดับบวก
n	องค์ประกอบลำดับลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Z_p	อิมพีแดนซ์ลำดับบวก
Z_n	อิมพีแดนซ์ลำดับลบ
Z_z	อิมพีแดนซ์ลำดับลบ
$\bar{I}_{sp}$	กระแสเตเตอร์ลำดับบวก
$\bar{I}_{sn}$	กระแสเตเตอร์ลำดับลบ
$\bar{I}_{rp}$	กระแสโรเตอร์ลำดับบวก
$\bar{I}_{rn}$	กระแสโรเตอร์ลำดับลบ
u	Fraction ของการลัดรอบ
$\bar{I}_f$	กระแสฟอลต์เนื่องจากการลัดรอบ
ω_e	ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า
Y_{ij}	แอดมิตแตนซ์ของลำดับ i เนื่องจากลำดับ j
Z_{ij}	อิมพีแดนซ์ของลำดับ i เนื่องจากลำดับ j
hp	แรงม้า
Z_T	อิมพีแดนซ์ของวงจรสมมูล
X_T	อินดักแตนซ์ของวงจรสมมูล
R_T	รีซิสแตนซ์ของวงจรสมมูล
Z_p	อิมพีแดนซ์ลำดับบวก
X_p	อินดักแตนซ์ลำดับบวก
R_p	รีซิสแตนซ์ลำดับบวก

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า 3 เฟส มีความสำคัญอย่างมากในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ดังนั้นจึงมีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งในการดูแลรักษาและตรวจเช็คสภาพเพื่อให้สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพ ดังนั้นการตรวจสอบและวิเคราะห์ความผิดปกติต่างๆที่เกิดขึ้นภายในมอเตอร์จึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องทำอย่างต่อเนื่องเพื่อเป็นที่ยืนยันว่ามอเตอร์อยู่ในสภาพที่ดีพร้อมที่จะใช้งาน ซึ่งปัญหาหรือความผิดปกติที่เกิดขึ้นก็มีหลายสาเหตุ และหนึ่งในจำนวนนั้นก็คือปัญหาของฉนวนของขดลวดเสื่อมคุณภาพซึ่งเป็นผลให้เกิดขดลวดลัดรอบระหว่างรอบถึงรอบในระยะแรกเริ่ม และต่อไปอาจจะลุกลามไปยังขดลวดถึงขดลวด, เฟสถึงเฟส หรือ ขดลวดถึงกราวด์ เป็นต้น [1] ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระยะแรกเริ่มของความผิดปกตินั้นเพื่อที่ทำการตรวจเช็คและทำการซ่อมบำรุงก่อนที่จะมีการลุกลามและขยายความรุนแรงต่อไป ปัญหาของขดลวดสเตเตอร์ลัดรอบระยะแรกเริ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่จะได้นำเสนอในการวิจัยนี้เป็นปัญหาที่มีความสำคัญยิ่งอีกปัญหาหนึ่ง และการที่จะสามารถตรวจจับความผิดปกตินี้ได้นั้นความรุนแรงจะต้องมีมากพอ ซึ่งอาจจะรู้ได้ด้วยประสบการณ์หรือสถานการณ์ที่เกิดขึ้นในขณะนั้น แต่ถ้าในกรณีที่ความผิดปกตินี้เพิ่งเริ่มก่อตัวก็จะเป็นการยากที่จะตรวจจับได้เนื่องจากสัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กมาก ดังนั้นจึงต้องมีวิธีการเพื่อตรวจจับความผิดปกตินี้และวิธีที่ใช้นั้นต้องเป็นวิธีที่มีความถูกต้อง และมีความน่าเชื่อถือ และเป็นวิธีที่ไม่มีผลต่อมอเตอร์ที่ไม่ใช่ชุดมคติ เช่น ผลกระทบจากแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล, โหลดที่เปลี่ยนแปลง หรือแม้กระทั่งความผิดพลาดเนื่องจากการวัดสัญญาณ

1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ในงานวิจัยนี้ต้องการนำเสนอการตรวจจับฟอลต์ในระยะเพิ่งเริ่มก่อตัว ซึ่งจะเป็นกรณีของการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์โดยมีสาเหตุมาจากความเสื่อมของฉนวนของขดลวดเป็นสำคัญ ซึ่งในการศึกษานั้นได้ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสมาทำการทดสอบ และในการทำการทดสอบจะทำภายใต้เงื่อนไขของโหลดที่แตกต่างกัน เพื่อต้องการให้รู้ถึงผลการเปลี่ยนแปลงของฟอลต์ที่เกิดขึ้นว่าจะสามารถตรวจจับได้เมื่อภาระโหลดเปลี่ยนไป รวมไปถึงความไม่สมมาตรในลักษณะต่างๆ ทั้งที่เกิดจากความไม่สมมาตรภายในตัวมอเตอร์เอง หรือว่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันของแหล่งจ่ายที่เปลี่ยนแปลงไป และผลของการวัดสัญญาณนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ทฤษฎีและแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในหลักการใหม่ที่จะได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ก็คือ การคำนึงถึงความไม่เป็นอุดมคติของมอเตอร์ในแต่ละตัวเพื่อนำมาวิเคราะห์หาความผิดปกติที่เกิดขึ้น เช่นความไม่สมดุลในแหล่งจ่ายแรงดัน การเปลี่ยนแปลงของโหลด ความไม่สมมาตรในโครงสร้างของมอเตอร์แต่ละตัว และผลของความผิดพลาดจากการวัดไม่ว่าจะเป็นแรงดันหรือกระแสเป็นต้น รวมถึงเป็นวิธีที่ง่าย มีความถูกต้อง และมีความน่าเชื่อถือสูง รวมถึงเทคนิคนี้ไม่จำเป็นต้องใช้ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์มาใช้ในการคำนวณ

ในหลักการเดิมที่ได้มีการวิจัยของการตรวจจับความผิดปกติในด้านขดลวดสเตเตอร์ลัดรอบ อาจจะต้องใช้วิธีในการวิเคราะห์ที่ยุ่งยาก และไม่คำนึงถึงกรณีที่มอเตอร์ไม่ใช่อุดมคติ ซึ่งอาจจะทำให้เกิดความผิดพลาดในการตรวจจับฟอลต์ได้ เพราะผลกระทบอันนี้อาจจะปิดบังสัญญาณฟอลต์ที่มีขนาดเล็กๆ ที่ต้องการตรวจจับดังเช่นการตรวจจับโดยใช้เทคนิคแรงดันไลน์-นิวตรอน [2] และหลักการเดิมนั้นจะสามารถบอกเหตุความผิดปกติได้เพียงว่าเกิดฟอลต์ขึ้นแต่ไม่สามารถบอกถึงความรุนแรงของฟอลต์ที่เกิดขึ้นในระดับต่างๆได้ และค่าผิดพลาดจากการวัดก็อาจมีผลกระทบต่อการตรวจจับได้และรวมถึงการนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆของมอเตอร์มาทำการวิเคราะห์หาสาเหตุความผิดปกตินั้น ดังนั้นการวิจัยในครั้งนี้จะได้คำนึงถึงความไม่เป็นอุดมคติในด้านต่างๆ รวมถึงไม่จำเป็นต้องนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆมาใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์

1.4 ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์ในการตรวจจับฟอลต์ที่เกิดขึ้นในกรณีของการลัดรอบในขดลวดสเตเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำในระยะเริ่มแรก ดังนั้นจึงต้องมีการทดลองจริงด้วยการออกแบบมอเตอร์ที่สามารถจำลองการลัดรอบเมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นได้รวมไปถึงการจำลองค่าเพื่อเปรียบเทียบค่าในการทดลอง โดยการทดสอบนั้นจะใช้ทฤษฎีของระบบองค์ประกอบสมมาตรบนหลักการขององค์ประกอบลำดับอิมพีแดนซ์มาใช้ในการแก้ปัญหา และเป็นอุปกรณ์ในการตรวจจับ และสำหรับการจำลองจะต้องทำการทดสอบหาค่าของวงจรสมมูลของมอเตอร์เพื่อใช้ในการจำลอง และสำหรับการทดลองจะวัดสัญญาณจากมอเตอร์เพื่อมาประมวลผลแบบ Off-line โดยใช้โปรแกรม Matlab

1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ ประกอบด้วยเนื้อหา 5 บทดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึง ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา จุดมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษาทฤษฎีและแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย โครงสร้างของวิทยานิพนธ์ ประโยชน์ที่ได้จากวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึง ทฤษฎีมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โครงสร้าง และหลักการทำงาน วงจรสมมูล และการหาวงจรสมมูล

บทที่ 3 กล่าวถึง ระบบองค์ประกอบสมมาตร การวิเคราะห์องค์ประกอบสมมาตร และระบบแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส

บทที่ 4 กล่าวถึง ทฤษฎีในการทดลอง ผลของการจำลอง และผลของการทดลอง

บทที่ 5 กล่าวถึง ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ ผลการทดลอง และข้อเสนอแนะในงานวิจัยต่อไป

1.6 ประโยชน์ที่ได้จากวิทยานิพนธ์

1. เป็นแนวทางในการศึกษาพฤติกรรมของมอเตอร์เมื่อเกิดฟอลต์ในกรณีของการเกิดความผิดปกติเนื่องจากการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์
2. ได้ศึกษาวิธีการในการตรวจจับหาฟอลต์ในกรณีที่เกิดจากการลัดรอบในระยะแรกเริ่ม ที่สามารถตรวจจับได้เมื่ออยู่ในสภาวะโหลดต่างๆ
3. ได้ศึกษาค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์เมื่ออยู่ในสภาวะการเกิดฟอลต์และสภาวะปกติ
4. ได้ศึกษาผลกระทบต่างๆของความไม่สมมาตรที่มีผลต่อมอเตอร์
5. เป็นพื้นฐานในการตรวจจับหาสาเหตุของฟอลต์ต่างๆได้ โดยอาศัยพื้นฐานของทฤษฎีและเทคนิคนี้ เพื่อเป็นประโยชน์ในการนำไปใช้งานจริง และการศึกษาค้นคว้าต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า 3 เฟส

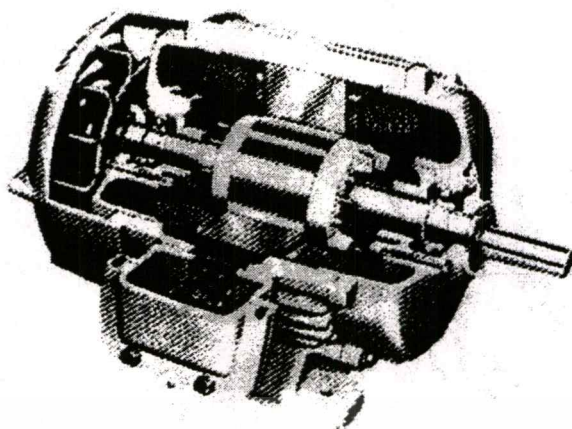
2.1 บทนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นมอเตอร์ที่หมุนได้ด้วยการเหนี่ยวนำ ที่ใช้งานแพร่หลายที่สุดในโรงงานอุตสาหกรรมใหญ่จนถึงโรงงานขนาดเล็ก แม้แต่ในบ้านพักอาศัยก็มีใช้เช่นกันซึ่งจะอยู่ในลักษณะของเครื่องอำนวยความสะดวกต่างๆ ซึ่งเครื่องกลไฟฟ้าทั่วไปจะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล ในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกลนี้ พลังงานไฟฟ้าไม่ได้นำเข้าสู่อะตอร์ของมอเตอร์โดยตรง แต่ได้จากการเหนี่ยวนำ ดังนั้นจึงเรียกว่ามอเตอร์แบบนี้ว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งมอเตอร์ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำนี้อาจจะเป็นแบบเฟสเดียว หรือหลายเฟสก็ได้และโดยปกติแล้วมอเตอร์ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำที่เป็นแบบชนิดหลายเฟสมักจะหมายถึงเป็นแบบมอเตอร์ที่เป็นแบบ 3 เฟสแสดงไว้ในรูปที่ 2.1 และมีส่วนสำคัญที่แยกกันอยู่อย่างอิสระ และไม่มีวงจรไฟฟ้าต่อกันเลยซึ่งจะมีส่วนสำคัญอยู่สองส่วนด้วยกัน คือ ส่วนที่อยู่กับที่เรียกว่าสเตเตอร์ กับส่วนที่หมุนได้หรือส่วนที่เคลื่อนที่เรียกว่าโรเตอร์ และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับหม้อแปลงแล้ว สเตเตอร์เปรียบเสมือนขดลวดปฐมภูมิที่จะทำการรองรับพลังงานไฟฟ้าเข้ามาจากสายเมนของระบบไฟฟ้ากระแสสลับ แล้วถ่ายทอดไปยังโรเตอร์ที่เปรียบเสมือนขดลวดทุติยภูมิด้วยการเหนี่ยวนำ จะต่างกันที่หม้อแปลงเป็นเครื่องกลไฟฟ้าที่อยู่กับที่ไม่มีส่วนใดที่สามารถหมุนได้ส่วนมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นเครื่องกลไฟฟ้าที่หมุนได้ สามารถแบ่งออกตามลักษณะของโครงสร้างที่ต่างกันของโรเตอร์ได้เป็นสองแบบด้วยกัน คือแบบที่โรเตอร์เป็นกรงกระรอก และแบบที่โรเตอร์พันด้วยเส้นลวดเล็กๆ ที่เรียกว่า วาวด์โรเตอร์ [3]

2.2 โครงสร้าง

ลักษณะโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ

1. ส่วนที่อยู่กับที่ (Stator)
2. ส่วนที่เคลื่อนที่ หรือส่วนหมุน (Rotor)

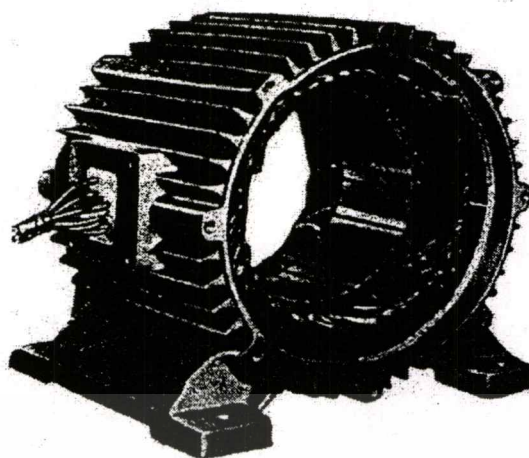


รูปที่ 2.1 ภาพตัดขวางขอมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า

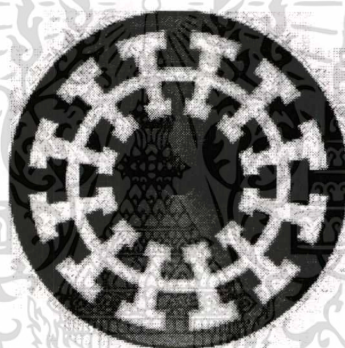
2.2.1 ส่วนที่อยู่กับที่

ส่วนที่อยู่กับที่นี้จะเรียกว่า สเตเตอร์ ซึ่งในส่วนนี้ยังประกอบไปด้วยโครงมอเตอร์ แกนขดลวดและขดลวดแสดงดังรูปที่ 2.2 ซึ่งจะมีขดลวดพันอยู่ในช่องสลิต ภายในของตัวอยู่กับที่ โดยรอบการพันแบบนี้อาจจะเป็นแบบเฟสเดียวหรือหลายเฟสก็ได้ ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะ 3 เฟส

โครงมอเตอร์ (Frame) ทำด้วยเหล็กหล่อรูปทรงกระบอกกลวง ส่วนล่างมีลักษณะเป็นขาตั้ง มีกล่องสำหรับต่อสายไฟอยู่ด้านบนหรือด้านข้าง และหน้าที่ของโครงของมอเตอร์ก็คือจะยึดแกนขดลวดให้แน่นอยู่กับที่ และผิวด้านนอกโดยรอบของโครงมอเตอร์บางตัวจะออกแบบให้มีลักษณะเป็นครีป เพื่อจะช่วยในการระบายความร้อน และในกรณีที่เป็นมอเตอร์ขนาดเล็กๆ โครงเหล็กจะทำด้วยเหล็กหล่อ (Cast iron) แต่ถ้าเป็นมอเตอร์ขนาดใหญ่โครงเหล็กจะทำด้วยเหล็กหล่อเหนียว (Cast steel) นอกจากนี้แล้วโครงเหล็กอาจจะทำด้วยเหล็กหล่อเหนียวแผ่นม้วนเป็นรูปทรงกระบอก ให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตามที่ออกแบบไว้แล้วเชื่อมติดกันโครงสร้างของ สเตเตอร์ แกนขดลวด ทำด้วยเหล็กแผ่นบางๆ มีลักษณะกลม จะเจาะรูตรงกลางและเจาะร่องภายในโดยรอบแสดงได้ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งจะเรียกแผ่นเหล็กนี้ว่าแผ่นเหล็กลามิเนต แต่ละแผ่นหนา 0.025 นิ้ว แล้วจึงนำแผ่นเหล็กบางมาอาบซิลิกอนแล้ว นำมาอัดเข้าด้วยกันเรียกว่าแกนขดลวดหรือสเตเตอร์คอร์ และร่องที่ถูกเจาะภายในโดยรอบเรียกว่า สลิตซึ่งเป็นที่สำหรับพันขดลวด และแกนขดลวดนี้จะทำหน้าที่เป็นทางเดินเส้นแรงแม่เหล็ก หรือเป็นวงจรแม่เหล็กด้วย



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของสเตเตอร์



รูปที่ 2.3 ลักษณะของแผ่นสเตเตอร์

ขดลวดสเตเตอร์จะเป็นขดลวดทองแดงที่ใส่ไว้ในร่องสลิตภายในรอบๆสเตเตอร์ซึ่งเคลือบด้วยฉนวนไฟฟ้าอย่างดี เช่น น้ำมันวานิชที่เป็นแบบขดลวดชั้นเดียว (1 layer winding) และ 2 ชั้น (2 layer winding) แล้วจึงนำปลายสายมาต่อกันที่เป็นแบบสตาร์ หรือแบบเดลต้า ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันของระบบไฟฟ้า ขนาดกำลังของมอเตอร์ และลักษณะของโหลดที่มอเตอร์หมุนขับ เป็นต้น

2.2.2 ส่วนเคลื่อนที่ หรือ ส่วนหมุน

ส่วนนี้มักจะเรียกกันว่าโรเตอร์ มีสองแบบด้วยกัน คือ แบบกรงกระรอก และแบบวาวด์โรเตอร์ ซึ่งแบบกรงกระรอก เป็นมอเตอร์ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายทั่วไปเพราะว่าโรเตอร์ชนิดนี้สร้างได้ง่าย และมีความทนทาน อีกทั้งไม่สามารถที่จะทำลายได้ง่าย โรเตอร์ชนิดนี้ประกอบด้วยแผ่น

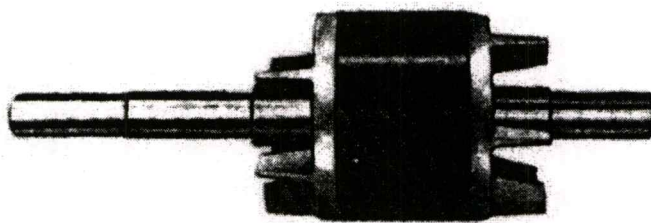
ลามิเนทเซาะผิวด้านนอกให้เป็นร่องโดยรอบ เรียกว่าสล๊อต ตรงกลางแผ่นจะเจาะรูสำหรับสอดเพลลา เมื่อนำแผ่นลามิเนทเหล่านี้มาอัดเข้าด้วยกันจะได้แกนโรเตอร์ เมื่อนำแกนโรเตอร์เข้าไปวางในแบบพิมพ์ แล้วฉีดอะลูมิเนียมเหลวเข้าไปจะได้อะลูมิเนียมอัดแน่นอยู่ในร่องสล๊อต และมีครีบก้นออกไปทั้งสองข้างเพื่อใช้เป็นใบพัดสำหรับระบายความร้อน และเมื่ออัดเพลลาเข้าไปที่รูกลางของแกนโรเตอร์ จะได้โรเตอร์แบบกรงกระรอก แสดงได้ดังรูปที่ 2.4 และแท่งตัวนำในแต่ละด้านจะถูกต่อปลายลัดวงจรเข้าด้วยกัน ดังนั้นจึงไม่สามารถนำตัวต้านทานจากภายนอกมาต่ออนุกรมเข้ากับวงจรโรเตอร์เพื่อช่วยในการเริ่มหมุนได้ และสล๊อตของโรเตอร์จะอยู่ในลักษณะที่ขนานกับเพลลา และจะวางเฉียงเล็กน้อยเพื่อให้เกิดประโยชน์ คือ ช่วยให้อะลูมิเนียมได้อย่างรวดเร็วโดยการลดขนาดการเกิดเส้นแรงแม่เหล็กฮัม (Magnetic Hum) และช่วยในการลดการยึดหรือล็อกของโรเตอร์อันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กที่ตกค้างอยู่ที่สล๊อตของสเตเตอร์กับโรเตอร์ทั้งสอง

และแบบพันขดลวดหรือเฟสวาวโรเตอร์ ซึ่งมอเตอร์ชนิดนี้ เรียกว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำแบบโรเตอร์พันขดลวด โรเตอร์ชนิดนี้พบมากในมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ที่มีการพันแบบขดลวดสองชั้นเหมือนกับขดลวดที่ใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ โดยแกนโรเตอร์ทำด้วยเหล็กแผ่นลามิเนทปัดเป็นร่องสล๊อตแล้วนำมาอัดติดกันเป็นรูปทรงกระบอก มีขดลวดทองแดงอาบนํ้ายาฉนวนไฟฟ้าจำนวนสามชุดหรือสามเฟสพันอยู่ในร่องสล๊อต โดยขดลวดแต่ละเฟสจะพันเรียงห่างกัน 120 องศาไฟฟ้า และต้องพันให้เกิดจำนวนขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าเท่ากับจำนวนขั้วแม่เหล็กบนสเตเตอร์ ปลายสายของขดลวดทั้งสามเฟสจะต่อรวมกันเป็นแบบสตาร์ ปลายสายที่เหลือจะต่อเข้ากับสลีปริง 3 อัน ซึ่งมีแปรงถ่านสัมผัสอยู่ และมีสายต่อจากแปรงถ่านออกไปภายนอกเพื่อต่อเข้ากับความต้านทานที่ปรับค่าได้เพื่อใช้ในการเริ่มเดิน และปรับแต่งความเร็ว ลักษณะของโรเตอร์แบบวาวโรเตอร์แสดงไว้ดังรูปที่ 2.5

2.2.3 ข้อได้เปรียบต่างๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส คือ

มีโครงสร้างง่าย ไม่มีส่วนประกอบที่ยุ่งยากมีความสะดวกในการใช้งานมีความแข็งแรง และทนทาน ไม่ค่อยมีปัญหา รวมถึงการซ่อมแซม และบำรุงรักษาง่ายมอเตอร์เหนี่ยวนำมาตรฐานธรรมดาให้ความเร็วรอบค่อนข้างคงที่ แต่ก็มีมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบอื่นที่สามารถปรับหรือเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบได้ รวมถึงมีราคาถูกกว่ามอเตอร์เฟสเดียวและสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวมีข้อได้เปรียบ คือ ใช้ได้กับระบบไฟฟ้าภายในบ้าน แต่มีข้อเสียเมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส คือ ต้องการวงจรสำหรับการเริ่มเดิน เช่น เริ่มเดินแบบแยกเฟสหรือเริ่มเดินแบบใช้คาปาซิเตอร์ รวมทั้งประสิทธิภาพและค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ด้อยกว่าเมื่อขนาดพิกัดกำลังเอาต์พุตเท่ากันและมีราคาสูงกว่าเป็นมอเตอร์ที่กินกระแสไฟขณะสตาร์ทสูง ดังนั้นจึงไม่มีมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวขนาดใหญ่จำหน่ายในท้องตลาดมากนักซึ่งขนาดประมาณ 1 KW ถือว่าสูงที่สุดแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 โรเตอร์แบบกรงกระรอก



รูปที่ 2.5 โรเตอร์แบบพันขดลวด

2.3 หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า 3 เฟส

มอเตอร์แบบเหนี่ยวนำไฟฟ้านี้จะไม่มีวงจรไฟฟ้าต่อเชื่อมกันระหว่างตัวอยู่กับที่กับตัวหมุน กระแสเกิดที่ขึ้นในตัวหมุนที่ไหลอยู่ภายในแท่งตัวนำ ที่ฝังอยู่รอบๆ ตัวหมุนนั้น จะเกิดจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในตัวหมุนนั้น แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนจากตัวอยู่กับที่ ซึ่งได้รับกำลังไฟฟ้าสลับมาจากภายนอก และขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าก็ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนตัวนำของตัวหมุน และการเกิดสนามแม่เหล็กหมุนจะเกิดจากกระแบบไฟฟ้า 3 เฟสไหลผ่านขดลวด 3 เฟสที่พันอยู่ในร่องของสเตเตอร์ โดยที่กระแสแต่ละเฟสจะเปลี่ยนแปลงคล้ายกับเกิดการหมุนของสนามแม่เหล็ก สนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้นนี้จะมีความเร็วคงที่ เรียกว่า “ความเร็วซิงโครนัส” (Synchronous speed) ความเร็วของมันจะขึ้นอยู่กับจำนวนขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์ [4] และความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า เขียนสมการได้ ดังนี้

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

เมื่อ

N_s = ความเร็วซิงโครนัส (rpm)

f = ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าด้านสเตเตอร์

P = จำนวนขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์

2.3.1 ความเร็วโรเตอร์ และสลิป

ความแตกต่างระหว่างความเร็วซิงโครนัสกับความเร็วโรเตอร์ เรียกว่าความเร็วสลิป
คำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$s = N_s - N_r \quad (2.2)$$

เมื่อ

N_s = ความเร็วซิงโครนัส (rpm)

N_r = ความเร็วโรเตอร์ (rpm)

เมื่อจะแสดงค่าสลิปในรูปของ Per-unit หรือเปอร์เซ็นต์ของความเร็วซิงโครนัสก็หาได้ดังนี้

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

การคำนวณความเร็วของโรเตอร์เมื่อค่าสลิปต่างๆ

$$N_r = (1 - s) N_s \quad (2.4)$$

2.3.2 วิธีสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า 3 เฟส

การสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดไม่เกิน 3.5 kW ถึง 5 kW เรามักจะต่อมอเตอร์เข้ากับแรงดันไลน์โดยตรงทั้งๆที่กระแสขณะสตาร์ทมากกว่ากระแสเต็มพิกัดหลายเท่า แต่กระแสดังกล่าวไม่สูงมากจนมีผลกระทบต่อแรงดันตกของระบบ การสตาร์ทนี้จะช่วยให้มอเตอร์เร่งความเร็วถึงพิกัดได้ไวกว่า และสามารถขับโหลดหนักๆ ขณะเริ่มหมุนได้ ดังนั้นการสตาร์ทมอเตอร์ขนาดใหญ่ก็อาจต่อตรงกับไลน์ด้วยแรงดันเต็มพิกัด ถ้าออกแบบสายเมนไว้อย่างเหมาะสม และตำแหน่งที่ติดตั้งอยู่ใกล้กับแหล่งจ่ายไฟขนาดใหญ่ เช่น อยู่ในบริเวณสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย ถ้าแหล่งจ่ายไฟมีความสามารถค่อนข้างจำกัด จะต้องคำนึงถึงแรงดันตกที่เกิดจากกระแสสตาร์ทไหลผ่านทั้งตัวแหล่งจ่ายไฟ และสายเมน ถ้ามอเตอร์ต่ออยู่กับโหลดหนักๆ ก่อนหมุน จะทำให้มีแรงดันตกในไม่ช้ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายมาก และทำให้มอเตอร์ไม่สามารถสร้างแรงบิดได้สูงพอที่ขับโหลดให้มีความเร็วถึงพิกัดได้อย่างรวดเร็ว กระแสสตาร์ทค่าสูงๆเมื่อโหลดเป็นเวลานานๆ อาจทำให้อุปกรณ์ป้องกันตัดมอเตอร์ออกจากวงจรก่อนที่ความเร็วจะสูงถึงพิกัด หากต้องสตาร์ทใหม่ก็เป็นการรบกวนแรงดันในสายให้มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะมีผลเสียต่ออุปกรณ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์ และรวมทั้งยังรบกวนระบบไฟฟ้าแสงสว่างอีกด้วย

จากสาเหตุดังกล่าวการสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำจึงจำเป็นต้องลดกระแสขณะสตาร์ทให้ต่ำลงและต่อกับโหลดที่มีขนาดเหมาะสม ตามปกติการสตาร์ทมอเตอร์แบบโรเตอร์กรงกระบอก class A (มาตรฐานของ NEC และ NEMA) กับแรงดันเต็มพิกัดจะใช้กระแสสตาร์ทสูงถึงประมาณ 5-8 เท่าของกระแสเต็มพิกัด ค่ากระแสนี้ได้จากผลหารของแรงดันต่อค่าอิมพีแดนซ์รวมของมอเตอร์ขณะหยุดนิ่ง ดังนั้นถ้าลดแรงดันลงไป 50%จะทำให้แรงบิดเริ่มหมุนของมอเตอร์ลดลงเหลือเพียง 25%ของแรงบิดเต็มพิกัด ดังนั้นการเริ่มหมุนโดยวิธีลดขนาดแรงดัน จึงไม่ควรต่อมอเตอร์ไว้กับโหลดหนักๆก่อนสตาร์ท เพราะถ้าแรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้นมีค่าน้อยกว่าแรงบิดของโหลด มอเตอร์จะไม่สามารถสตาร์ทได้ ดังนั้นการสตาร์ทด้วยวิธีลดแรงดันไฟฟ้านี้ จึงเหมาะสมกับมอเตอร์ที่ขับโหลดเบาๆ หรือไม่มีโหลดเลย เช่น พัดลม บิลเวอร์ ปั๊มแรงเหวี่ยง เป็นต้น

ปัญหาการสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดใหญ่กับแรงดันเต็มพิกัดแบ่งออกได้ 3 ประการ คือ

1. เกิดแรงดันตกในระบบ เป็นผลทำให้โหลดอื่นๆ ที่ต่ออยู่ในวงจรเดียวกัน เช่น มอเตอร์ไฟฟ้าแสงสว่าง อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และอื่นๆ มีผลเสียหายได้
2. ค่ากระแสขณะสตาร์ทสูง ทำให้เกิดค่าแรงบิดกระชากสูง อาจทำให้เกิดผลเสียแก่โหลดและมอเตอร์ได้
3. มอเตอร์ขนาดใหญ่ มีโมเมนต์ของความเฉื่อยสูง ถ้าทำการสตาร์ทบ่อยครั้งใช้ช่วงเวลาในการสตาร์ทนาน จะทำให้เกิดความร้อนสูงในขดลวดอาจทำให้อายุการใช้งานของมอเตอร์สั้นลง

2.4 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

วงจรสมมูลต่อเฟส (Line-to-neutral) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำอธิบายในรูปขององค์ประกอบลำดับอธิบายดังรูปที่ 2.6 ซึ่งสามารถใช้ได้ทั้งเป็นแบบลำดับบวก (p) และลำดับลบ (n) ซึ่งจะมีความแตกต่างเพียงค่าของความต้านทานโหลด (Load resistance) RI โดยมีสมการดังนี้

$$RI_i = \frac{1-s_i}{s_i} \cdot Rr_i \quad (2.5)$$

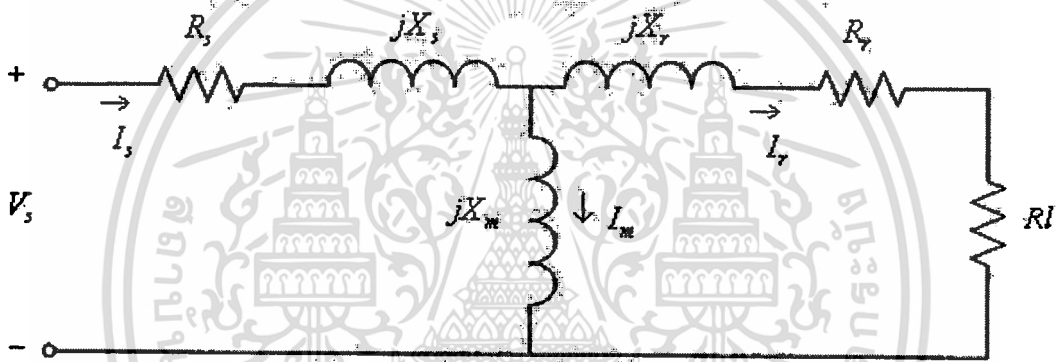
โดยที่สลิปลำดับบวกมีค่าดังนี้

$$s_p = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad (2.6)$$

และสลิปลำดับลบมีค่าดังนี้

$$s_n = 2 - s_p \quad (2.7)$$

และวงจรสมมูลขององค์ประกอบลำดับแสดงได้ดังรูปที่ 2.6



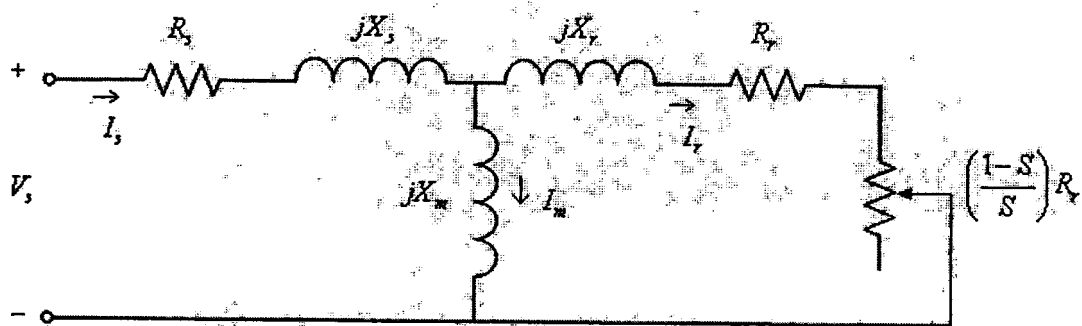
รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลขององค์ประกอบลำดับ

จะสังเกตจากสมการที่ (2.5) ถึง (2.7) ได้ว่าค่าความต้านทานโหลดลำดับลบ (RL_n) จะมีค่าเป็นลบ และถ้าสามารถคำนวณค่าสลิปลำดับบวกได้ก็จะสามารถคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ลำดับของวงจรได้ ดังนี้ [5]

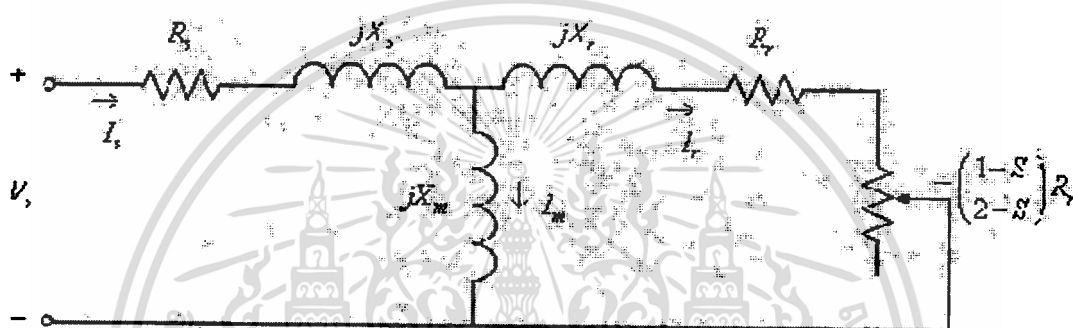
$$ZM_i = R_{s_i} + jX_{s_i} + \left(\frac{(jX_{m_i})(R_{l_i} + R_{r_i} + jX_{r_i})}{R_{r_i} + R_{l_i} + j(X_{m_i} + X_{r_i})} \right) \quad (2.8)$$

สมมติให้ $i = p$ สำหรับองค์ประกอบลำดับบวกและ $i = n$ สำหรับองค์ประกอบลำดับลบ โดยส่วนใหญ่แล้วพฤติกรรมของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่สมบูรณ์ (Healthy induction motor) และแหล่งจ่ายแรงดันไม่สมดุล สามารถวิเคราะห์ได้โดยการตรวจสอบจากวงจรสมมูลขององค์ประกอบลำดับบวกและองค์ประกอบลำดับลบ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.7 วงจรสมมูลขององค์ประกอบลำดับบวก



รูป 2.8 วงจรสมมูลขององค์ประกอบลำดับลบ

โดยที่

- R_s = ความต้านทานของสเตเตอร์
- R_r = ความต้านทานของโรเตอร์
- jX_s = ลีดเกจ รีแอคแตนซ์ของสเตเตอร์
- jX_r = ลีดเกจ รีแอคแตนซ์ของโรเตอร์
- jX_m = รีแอคแตนซ์ของแกนเหล็ก
- I_s = กระแสสเตเตอร์
- I_r = กระแสโรเตอร์
- I_m = กระแสสร้างแม่เหล็ก
- V_s = แรงดันไฟฟ้าอินพุท
- s = สลิป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.6) และ (2.7) แล้วไปแทนในสมการที่ (2.5) จะได้ความต้านทานไหลขององค์ประกอบลำดับลบในสมการที่ (2.9) และองค์ประกอบลำดับบวกในสมการที่ (2.10)

$$RI_p = \left(\frac{1-s}{s} \right) \quad (2.9)$$

$$RI_n = -\left(\frac{1-s}{2-s} \right) \quad (2.10)$$

จะสังเกตว่าจากสมการที่ (2.10) ค่าอิมพีแดนซ์ขององค์ประกอบลำดับลบของมอเตอร์จะน้อยกว่าค่าอิมพีแดนซ์ขององค์ประกอบลำดับบวก ดังนั้นค่าของกระแสลำดับลบจะเกิดขึ้นที่ระดับต่ำๆของแรงดัน

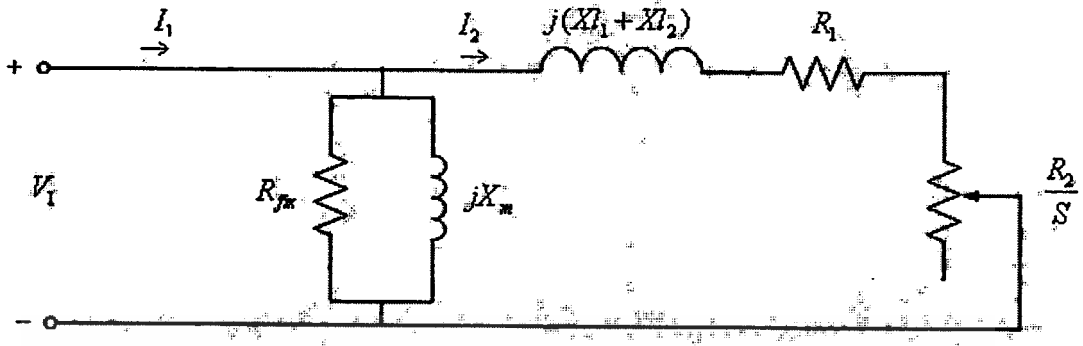
และนั่นก็คือปัญหาของระบบตรวจจับสัญญาณของกระแส เพราะวาระดับแรงดันที่ไม่สมดุลที่เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยจะเปลี่ยนแปลงกระแสไลน์ นั่นก็เป็นสาเหตุของการปิดบังสัญญาณของฟอลต์ที่ค่าเล็กๆ และค่าของอิมพีแดนซ์ลำดับลบของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะเปลี่ยนไปตามสลิปที่ค่าน้อยมากๆเกือบจะคงที่ โดยจะแสดงตัวอย่างของการคำนวณจากสมการที่ (2.10) โดยใช้มอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า 4 ขั้วแม่เหล็ก โดยสมมติให้ใช้ความเร็วที่ไหลดพิกต์ 1390 rpm และที่ไหลดเป็นศูนย์ 1495 rpm ซึ่งจะได้

$$RI_n \text{ ที่ไหลดพิกต์} = -\left(\frac{1-0.0033}{2-0.0033} \right) = \frac{0.9967}{1.9967} = -0.499R_r$$

$$RI_n \text{ ที่ไหลดเป็นศูนย์} = -\left(\frac{1-0.0733}{2-0.0733} \right) = \frac{0.9267}{1.9267} = -0.481R_r$$

จากการคำนวณจะพบว่าค่าอิมพีแดนซ์จะมีการเปลี่ยนแปลงเพียง 1.7% จากไหลดเป็นศูนย์ถึงไหลดพิกต์ โดยจะมีค่าน้อยมากๆเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ลำดับบวก

2.5 การหาค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

เมื่อ

X_{l1} = ลีคเกจ รีแอคแตนซ์ของสเตเตอร์

X_{l2} = ลีคเกจ รีแอคแตนซ์ของโรเตอร์

R_1 = ความต้านทานของสเตเตอร์

R_2 = ความต้านทานของโรเตอร์

R_{fx} = ความต้านทานของแกนเหล็ก

X_m = รีแอคแตนซ์ของแกนเหล็ก

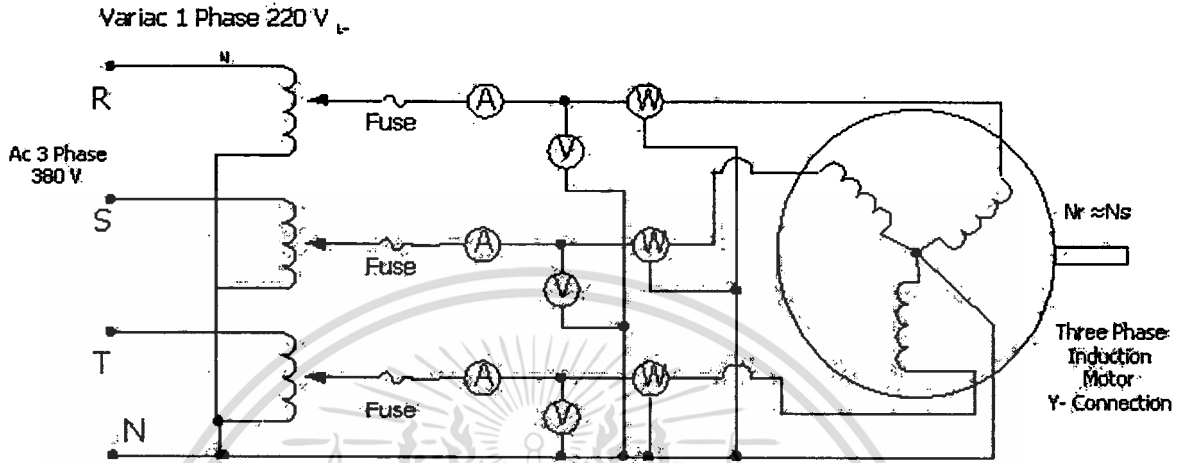
จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.9 เป็นวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งถูกใช้อย่างมากในการหาผลตอบสนองของมอเตอร์มีลักษณะเช่นเดียวกับการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบลัดวงจรและเปิดวงจร ที่ต้องมีการควบคุมเงื่อนไขในขณะที่ทำการทดสอบเมื่อมีการเปลี่ยนภาระทางกล วงจรสมมูลนี้จะนำไปใช้กับมอเตอร์จริงๆ วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในวงจรสมมูลมีความสำคัญมาก ดังนั้นการหาวงจรสมมูลจึงใช้วิธีการหาเช่นเดียวกับหม้อแปลงเป็นพื้นฐานสามารถหาได้จากการทำการทดสอบแบบ No load test และ Blocked rotor test [6] โดยในการทดสอบจำเป็นต้องมีการควบคุมสภาวะแวดล้อม เพราะความต้านทานด้านสเตเตอร์แปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ และความต้านทานโรเตอร์จะแปรเปลี่ยนตามความถี่ของแรงดันไฟฟ้าของโรเตอร์

2.5.1 การทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะไม่มีโหลด (No load test)

เปรียบเทียบกับ การทดสอบแบบเปิดวงจรในขณะไม่มีโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยทำการทดสอบโดยการป้อนแรงดันไฟฟ้าสมดุลและความถี่ที่พิกัดให้กับขดลวดสเตเตอร์ โดยขณะที่ไม่มีภาระทางกลและจะมีความเร็วรอบ N , ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ N , ซึ่งค่าของสลิปจะมีค่าใกล้ศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารหลวงวิสาขการสงเคราะห์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทำการวัดค่าพิกัดแรงดันไฟฟ้า พิกัดกระแสไฟฟ้า และพิกัดกำลังไฟฟ้าซึ่งแทนด้วย V_o, I_o และ P_o ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจะต้องเปลี่ยนค่าเป็นต่อเฟสและสามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าของ R_{fix} และ X_m



รูปที่ 2.10 วงจรการทดสอบแบบ No load test

จากรูปที่ 2.10 กำลังไฟฟ้านำเข้ามอเตอร์ขณะทำการทดสอบแบบไม่มีภาระทางกล เพื่อต้องการหาค่าของ X_m และ R_{fix} จากทดสอบแบบไม่มีภาระทางกลโดยการปรับค่าแรงดันให้ได้ตามพิกัดมอเตอร์ แล้วบันทึกค่าแล้วคำนวณตามสมการต่อไปนี้

$$\theta_o = \cos^{-1} \left(\frac{P_o}{V_o I_o} \right) \quad (2.11)$$

$$I_m = I_o \sin \theta_o \quad (2.12)$$

$$I_{fix} = I_o \cos \theta_o \quad (2.13)$$

$$R_{fix} = \frac{V_o}{I_o \cos \theta_o} \quad (2.14)$$

$$X_m = \frac{V_o}{I_o \sin \theta_o} \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

P_o = กำลังไฟฟ้าต่อเฟสด้านเข้าขณะไม่มีภาระทางกล

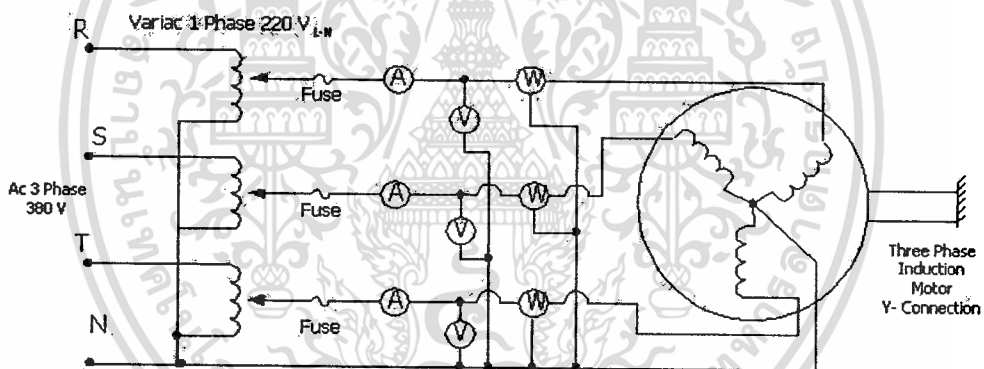
V_o = แรงดันไฟฟ้าพิกัดของมอเตอร์

I_o = กระแสไฟฟ้าในขณะที่ไม่มีภาระทางกล

θ_o = มุมเฟสระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า

2.5.2 การทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะยึดโรเตอร์หยุดนิ่ง (Blocked rotor test)

เปรียบเทียบกับ การทดสอบลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าของอิมพีแดนซ์โดยทำการยึดโรเตอร์ของมอเตอร์ให้หยุดอยู่กับที่ ในขณะที่ค่าของสลิปมีค่าเท่ากับหนึ่ง จากนั้นป้อนแรงดันไฟฟ้าสมดุลให้กับขดลวดที่สเตเตอร์จนกระทั่งถึงกระแสพิกัดเหมือนอยู่ในสภาพเหมือนถูกลัดวงจร โดยการทดสอบจะวัดพิกัดกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และพิกัดกำลังไฟฟ้า ซึ่งแทนได้ด้วย I_b, V_b และ P_b ซึ่งรูปการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งต้องทำการค่อยๆปรับแรงดันจนกระทั่งกระแสถึง I_{rated} ของมอเตอร์แล้วบันทึกค่าต่างๆ



รูปที่ 2.11 วงจรการทดสอบแบบ Blocked rotor test

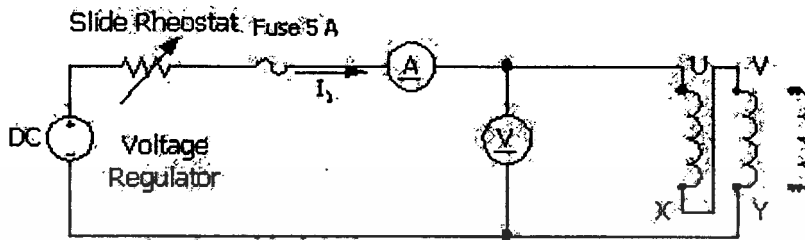
จากรูปที่ 2.11 ที่กระแสพิกัดจะทำให้กระแสกระตุ้นมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับกระแสพิกัด ซึ่งสามารถที่ตัดทิ้งได้ ดังนั้นค่าของรีเอกแตนซ์จะเท่ากับทางด้านสเตเตอร์ และโรเตอร์รวมกัน ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบต้องเปลี่ยนเป็นค่าต่อเฟสและสามารถนำมาไปใช้ในการคำนวณหาค่าของ R_b และ X_b การหามุมระหว่างกระแสกับแรงดันดังสมการต่อไปนี้

$$Z_b = \frac{V_b \angle 0}{I_b \angle \theta_b} = R_b + jX_b \quad (2.16)$$

$X_b = X_{l1} + X_{l2}$ (2.17)
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_b = R_1 + R_2 \quad (2.18)$$

2.5.3 การทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ DC-test (VI-method)



รูปที่ 2.12 วงจรการทดสอบแบบ VI-method

จากรูปที่ 2.12 เป็นการใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในการทดสอบ เพื่อไม่ให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำ และกระแสขึ้นในวงจรของโรเตอร์ ซึ่งค่ารีแอคเต็นซ์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะเข้าใกล้ศูนย์ ในการทดสอบนี้ต้องปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อให้ค่าของกระแสไฟฟ้า I_1 ให้มีค่าใกล้เคียงกับกระแสพิกัดแล้วบันทึกค่า V_{dc} และ I_{dc} เพื่อคำนวณหาค่า R_1

$$R_1 = \frac{1}{2} \frac{V_{dc}}{I_{dc}} \quad (2.19)$$

และจะได้ R_2 จาก

$$R_2 = R_b - R_1 \quad (2.20)$$

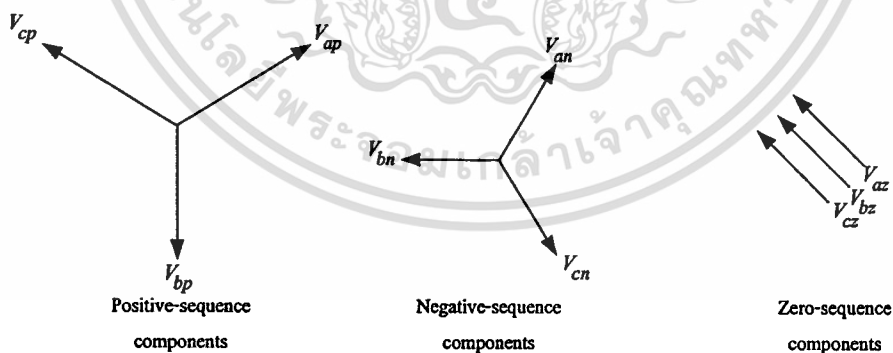
บทที่ 3

ระบบองค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical Component System)

3.1 ระบบองค์ประกอบสมมาตร

ทฤษฎีขององค์ประกอบสมมาตร ซึ่งเป็นทฤษฎีของ C.L. Fortescue's theorem [7] ได้ถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาระบบ n เฟสที่ไม่สมดุลด้วยการวิเคราะห์จากระบบ n เฟสที่สมดุล ซึ่งระบบของ n เฟสที่สมดุลนี้เราจะเรียกว่า องค์ประกอบสมมาตร ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงระบบไฟฟ้า 3 เฟสเท่านั้นและการใช้ทฤษฎีขององค์ประกอบสมมาตรมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาระบบไฟฟ้า 3 เฟสที่ไม่สมดุลด้วยระบบ 3 เฟสที่สมดุลซึ่งจะประกอบด้วยองค์ประกอบของเฟสเซอร์ที่สมดุลดังรูปที่ 3.1 [8]

1. องค์ประกอบสมมาตรลำดับบวก ที่ประกอบด้วย 3 เฟสเซอร์ที่มีขนาดเท่ากัน และมีมุมต่างเฟสของแต่ละเฟสห่างกัน 120 องศา โดยจะมีลำดับเฟสของเฟสเซอร์เหมือนกับระบบเดิม
2. องค์ประกอบสมมาตรลำดับลบ ที่ประกอบด้วย 3 เฟสเซอร์ที่มีขนาดเท่ากัน และมีมุมต่างเฟสของแต่ละเฟสห่างกัน 120 องศา โดยจะมีลำดับเฟสของเฟสเซอร์ตรงกันข้ามกับระบบเดิม
3. องค์ประกอบสมมาตรลำดับศูนย์ ที่ประกอบด้วย 3 เฟสเซอร์ที่มีขนาดเท่ากัน และมีมุมต่างเฟสของแต่ละเฟสห่างกัน 0 องศาหรือมีมุมต่างเฟสที่ตรงกัน



รูปที่ 3.1 องค์ประกอบสมมาตรลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์ของระบบที่ไม่สมดุล

ในการวิเคราะห์และแก้ปัญหาระบบที่ไม่สมดุล โดยใช้องค์ประกอบสมมาตรจะกำหนดให้อักษรย่อของระบบ 3 เฟสเป็นอักษร a, b และ c โดยให้ลำดับเฟสของเฟสเซอร์แรงดันและกระแส

ในระบบ 3 เฟสเป็นระบบ abc ดังนั้นลำดับเฟสขององค์ประกอบลำดับบวก ของเฟสเซอร์ 3 เฟสที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่สมดุลจะเป็นระบบ abc ด้วย และลำดับเฟส ขององค์ประกอบลำดับลบจะเป็น acb และถ้า กำหนดให้อักขรย่อของเฟสเซอร์ในระบบ 3 เฟสเดิมของแรงดันเป็น $\vec{V}_a, \vec{V}_b$ และ $\vec{V}_c$ ซึ่งลำดับของ องค์ประกอบสมมาตรทั้ง 3 ลำดับจะถูกแทนด้วยอักขรที่กำหนดขึ้นดังนี้อักขร p จะแทน องค์ประกอบสมมาตรลำดับบวก อักขร n จะแทนองค์ประกอบสมมาตรลำดับลบ และอักขร z แทนองค์ประกอบสมมาตรลำดับศูนย์ ดังนั้นองค์ประกอบสมมาตรลำดับบวกของ $\vec{V}_a, \vec{V}_b$ และ $\vec{V}_c$ คือ $\vec{V}_{ap}, \vec{V}_{bp}$ และ $\vec{V}_{cp}$ ตามลำดับ และในทำนองเดียวกันองค์ประกอบสมมาตรลำดับลบ ก็คือ $\vec{V}_{an}, \vec{V}_{bn}$ และ $\vec{V}_{cn}$ และองค์ประกอบสมมาตรลำดับศูนย์ ก็คือ $\vec{V}_{az}, \vec{V}_{bz}$ และ $\vec{V}_{cz}$ และเนื่องจากว่า เฟสเซอร์ที่ไม่สมดุลของระบบเดิมจะได้จากผลรวมขององค์ประกอบลำดับบวก องค์ประกอบลำดับลบ และองค์ประกอบลำดับศูนย์ ซึ่งจะแสดงได้จากสมการดังนี้

$$\vec{V}_a = \vec{V}_{az} + \vec{V}_{ap} + \vec{V}_{an} \quad (3.1)$$

$$\vec{V}_b = \vec{V}_{bz} + \vec{V}_{bp} + \vec{V}_{bn} \quad (3.2)$$

$$\vec{V}_c = \vec{V}_{cz} + \vec{V}_{cp} + \vec{V}_{cn} \quad (3.3)$$

ทำการลดตัวแปร $\vec{V}_b$ และ $\vec{V}_c$ โดยทำการแปลงค่าตัวแปรผ่าน a (Operator) ให้มาอยู่ที่ในตัวแปร $\vec{V}_a$ เพียงตัวเดียว โดยที่ค่า $a = 1 \angle 120^\circ = 1e^{j2\pi/3} = -0.5 + j0.866$ ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \vec{V}_{bz} &= \vec{V}_{az} & \vec{V}_{cz} &= \vec{V}_{az} \\ \vec{V}_{bp} &= a^2 \vec{V}_{ap} & \vec{V}_{cp} &= a \vec{V}_{ap} \\ \vec{V}_{bn} &= a \vec{V}_{an} & \vec{V}_{cn} &= a^2 \vec{V}_{an} \end{aligned} \quad (3.4)$$

นำสมการที่ (3.4) ไปแทนในสมการที่ (3.1), (3.2) และ (3.3) จะได้

$$\vec{V}_a = \vec{V}_{az} + \vec{V}_{ap} + \vec{V}_{an} \quad (3.5)$$

$$\vec{V}_b = \vec{V}_{bz} + a^2 \vec{V}_{bp} + a \vec{V}_{bn} \quad (3.6)$$

$$\vec{V}_c = \vec{V}_{cz} + a \vec{V}_{cp} + a^2 \vec{V}_{cn} \quad (3.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปเมตริกซ์ คือ

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_a \\ \bar{V}_b \\ \bar{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_{az} \\ \bar{V}_{ap} \\ \bar{V}_{an} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \bar{V}_{az} \\ \bar{V}_{ap} \\ \bar{V}_{an} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

เมื่อ

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

แล้วทำการ Inverse A จะได้

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

นำมาหาค่าในรูปขององค์ประกอบลำดับ โดยการนำ A^{-1} คูณทั้งสองข้างในสมการที่ (3.8)

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_{az} \\ \bar{V}_{ap} \\ \bar{V}_{an} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_a \\ \bar{V}_b \\ \bar{V}_c \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} \bar{V}_a \\ \bar{V}_b \\ \bar{V}_c \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

ในระบบไฟฟ้า 3 เฟสโดยทั่วไปจะมีความแตกต่างของอิมพีแดนซ์ในแต่ละเฟสขององค์ประกอบลำดับเมื่อแทนค่าขององค์ประกอบลำดับของกระแสและความต้านทานจะได้สมการแรงดันดังสมการที่ (3.12) ซึ่งมีค่าเท่ากับสมการใน (3.8) แต่อยู่ในรูปองค์ประกอบของแรงดัน [9]

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_a \\ \bar{V}_b \\ \bar{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{az} & Z_{ap} & Z_{an} \\ Z_{bz} & a^2 Z_{bp} & a Z_{bn} \\ Z_{cz} & a Z_{cp} & a^2 Z_{cn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_{az} \\ \bar{I}_{ap} \\ \bar{I}_{an} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

เมื่อแทนสมการที่ (3.12) แทนลงในสมการที่ (3.11) เพื่อให้ให้อยู่ในรูปขององค์ประกอบลำดับแล้วทำการแก้สมการแล้วจะได้ค่าขององค์ประกอบลำดับอิมพีแดนซ์ที่อยู่ในระบบ 3 เฟส

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_{az} \\ \bar{V}_{ap} \\ \bar{V}_{an} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \zeta_{00} & \zeta_{21} & \zeta_{12} \\ \zeta_{10} & \zeta_{01} & \zeta_{22} \\ \zeta_{20} & \zeta_{11} & \zeta_{02} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_{az} \\ \bar{I}_{ap} \\ \bar{I}_{an} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \zeta_{00} &= Z_{az} + Z_{bz} + Z_{cz} \\ \zeta_{10} &= Z_{az} + aZ_{bz} + a^2Z_{cz} \\ \zeta_{20} &= Z_{az} + a^2Z_{bz} + aZ_{cz} \\ \zeta_{21} &= Z_{ap} + a^2Z_{bp} + aZ_{cp} \\ \zeta_{01} &= Z_{ap} + Z_{bp} + Z_{cp} \\ \zeta_{11} &= Z_{ap} + aZ_{bp} + a^2Z_{cp} \\ \zeta_{12} &= Z_{an} + aZ_{bn} + a^2Z_{cn} \\ \zeta_{22} &= Z_{an} + a^2Z_{bn} + aZ_{cn} \\ \zeta_{02} &= Z_{an} + Z_{bn} + Z_{cn} \end{aligned} \quad (3.14)$$

จากสมการที่ (3.13) ส่วนมากแล้วเป็นกรณีโดยทั่วไปของความไม่สมมาตรที่เกิดขึ้นในระบบและถ้าระบบ $Z_{az} = Z_{ap} = Z_{an} = Z_a$ ในเฟส a และในเฟส b และเฟส c ก็ทำเหมือนกันกับเฟส a แล้วจะได้ $\zeta_{00} = \zeta_{01} = \zeta_{02}$, $\zeta_{10} = \zeta_{11} = \zeta_{12}$ และ $\zeta_{20} = \zeta_{21} = \zeta_{22}$ และในเครื่องจักรที่มีความสมมาตรแล้วอิมพีแดนซ์ในแต่ละองค์ประกอบของกระแสจะมีค่าเท่ากันในแต่ละเฟส และเมื่อออกแบบให้อยู่ในรูปของอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ (Z_z) อิมพีแดนซ์ลำดับบวก (Z_p) และอิมพีแดนซ์ลำดับลบ (Z_n)

$$\begin{aligned} Z_z &= Z_{az} = Z_{bz} = Z_{cz} \\ Z_p &= Z_{ap} = Z_{bp} = Z_{cp} \\ Z_n &= Z_{an} = Z_{bn} = Z_{cn} \end{aligned} \quad (3.15)$$

ซึ่งในกรณีนี้เฟส a จะได้แรงดันลำดับลบ $\bar{V}_{an}$ มีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์ลำดับลบคูณด้วยกระแสลำดับลบ และในเฟส b และเฟส c ก็เหมือนกันซึ่งจะได้สมการที่มีความสมมาตรเป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

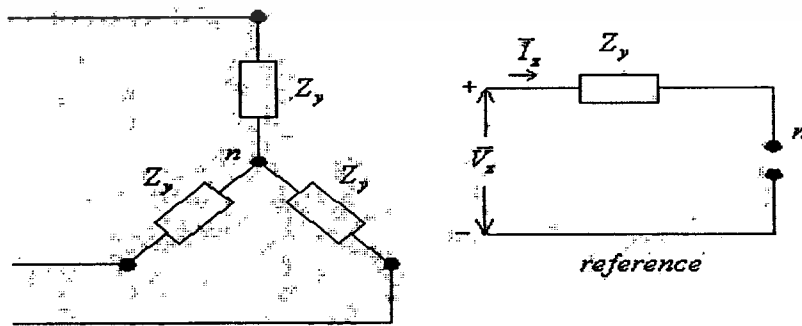
$$\begin{aligned}
 V_{az} &= Z_z \cdot I_{az} \\
 V_{ap} &= Z_p \cdot I_{ap} \\
 V_{an} &= Z_n \cdot I_{an}
 \end{aligned}
 \tag{3.16}$$

3.1.1 องค์ประกอบลำดับอิมพีแดนซ์เมตริกซ์

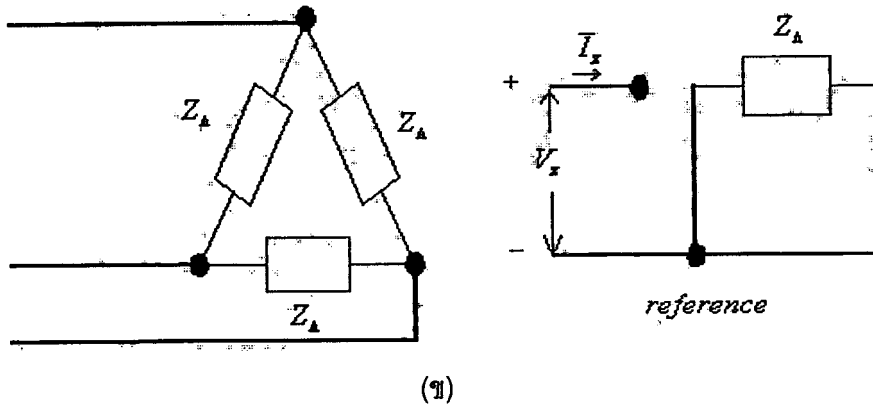
ถ้าให้ V, I และ Z คือค่าของแรงดันเฟส กระแสเฟส และอิมพีแดนซ์เฟสตามลำดับ และจะกำหนดอักษร p, n และ z แทนองค์ประกอบลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์ตามลำดับ แรงดันองค์ประกอบลำดับในรูปของเมตริกซ์ สามารถเขียนได้เป็น [10]

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_p \\ \bar{V}_n \\ \bar{V}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{pp} & Z_{pn} & Z_{pz} \\ Z_{np} & Z_{nn} & Z_{nz} \\ Z_{zp} & Z_{zn} & Z_{zz} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_p \\ \bar{I}_n \\ \bar{I}_z \end{bmatrix}
 \tag{3.17}$$

โดยที่ Z_y จะหมายถึงค่าอิมพีแดนซ์ของลำดับ i เนื่องจากลำดับ j และสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่อยู่ในอุดมคติที่สมมุติขึ้นแล้วจำนวนเทอมของ Off-diagonal ของเมตริกซ์อิมพีแดนซ์ใน (3.17) $Z_{pn}, Z_{pz}, Z_{np}, Z_{nz}, Z_{zp}$ และ Z_{zn} จะมีค่าเป็นศูนย์ [11] แต่ความเป็นจริงแล้วความไม่สมมาตรภายในตัวของมอเตอร์เองจะทำให้เทอมของ Off-diagonal มีค่าไม่เป็นศูนย์ดังนั้นค่าองค์ประกอบลำดับจะมีอิทธิพลต่อกัน ซึ่งนั่นจะเป็นการแสดงให้เห็นระดับของความไม่สมมาตรภายในตัวมอเตอร์ และจากสมการที่ (3.17) ค่าขององค์ประกอบสมมาตรลำดับศูนย์ จะมีค่าเป็นศูนย์ เพราะว่าองค์ประกอบลำดับศูนย์ของกระแสไลน์นั้น จะเป็นศูนย์ในกรณีของการต่อขดลวดมอเตอร์เป็นแบบเดลต้า และถ้าเป็นการต่อแบบสตาร์มอเตอร์ต้องไม่มีการต่อกราวด์ หรือสมมุติว่าไม่มีกราวด์ฟอลต์ในระบบเกิดขึ้น [12] และในงานวิจัยนี้มอเตอร์ที่ใช้จำลองถูกต่อเป็นแบบสตาร์ ซึ่งจะได้ค่า $I_z = 0$ ดังอธิบายได้ดังรูปที่ 3.2(a) [7] ทั้งนี้สมการสำหรับการตรวจจับฟอลต์ เนื่องจากขดลวดสเตเตอร์ลัดรอบนั้น จะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นดังสมการที่ (3.2)



(ก)



รูปที่ 3.2 (ก) ขดลวดต่อแบบสตาร์ และ (ข) ขดลวดต่อแบบเดลต้า

$$\bar{V}_n = Z_{np} \cdot \bar{I}_p + Z_{nn} \cdot \bar{I}_n \quad (3.18)$$

และเมื่อเกิดสภาวะการลัดรอบขึ้นในขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์จะทำให้ค่าของ Z_{np} เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากจะเกิดความไม่สมมาตรขึ้นเนื่องจากขดลวด ดังนั้นสามารถที่จะตรวจจับ โดยการตรวจสอบค่า Z_{np} เปรียบเทียบกับค่าในสภาวะที่มอเตอร์มีความสมบูรณ์ภายใต้ค่าสลิปเดียวกันได้ ทั้งนี้ค่าความเบี่ยงเบนไปจะถูกนำมาเป็นตัวชี้วัดค่าฟอลต์ซึ่งจะนิยามได้โดยสมการคือ

$$\Delta Z_{np} \equiv Z_{np} - Z_{np0} \quad (3.19)$$

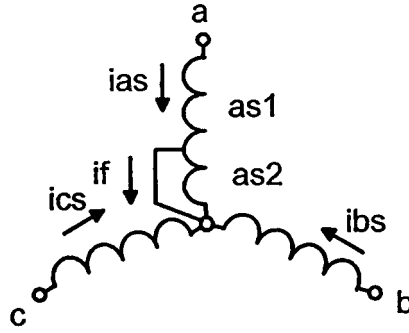
และสามารถหาค่าของ Z_{np} ได้จากสมการ

$$\begin{bmatrix} Z_{np} \\ Z_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{I}_{p1} & \bar{I}_{n1} \\ \bar{I}_{p2} & \bar{I}_{n2} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \bar{V}_{n1} \\ \bar{V}_{n2} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$Z_{np} = \frac{\bar{I}_{n2} \cdot \bar{V}_{n1} - \bar{I}_{n1} \cdot \bar{V}_{n2}}{\bar{I}_{p1} \cdot \bar{I}_{n2} - \bar{I}_{p2} \cdot \bar{I}_{n1}} \quad (3.21)$$

โดยที่กำหนดให้ 1 และ 2 จะแสดงถึงการวัดค่าครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ตามลำดับ

3.1.2 ทฤษฎีในการจำลอง



รูปที่ 3.3 โมเดลของการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์เฟสเดียว

จากรูปที่ 3.3 เป็นโมเดลของมอเตอร์ของขดลวดสเตเตอร์ลัดรอบในกรณีเฟสเดียวเฟสหนึ่ง [13], [14] เท่านั้นโดยที่ $as2$ หมายถึงขดที่ลัดรอบ และ u หมายถึง fraction ของการลัดรอบ และสมมติให้ uL_s เป็นค่าลัดเกจ อินดักแตนซ์ของการลัดรอบ และค่าอิมพีแดนซ์ของการลัดรอบ คือ r_f ซึ่งจะได้สมการแรงดันด้านสเตเตอร์และโรเตอร์เป็นดังนี้

$$\begin{aligned} v_s &= R_s i_s + d\lambda_s / dt \\ 0 &= R_r i_r + d\lambda_r / dt \end{aligned} \quad (3.22)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} v_s &= [v_{as1} \quad v_{as2} \quad v_{bs} \quad v_{cs}]^T \\ i_s &= [i_{as} \quad (i_{as} - i_f) \quad i_{bs} \quad i_{cs}]^T \\ i_r &= [i_{ar} \quad i_{br} \quad i_{cr}]^T \\ \lambda_s &= [\lambda_{as1} \quad \lambda_{as2} \quad \lambda_{bs} \quad \lambda_{cs}]^T = L_{ss} i_s + L_{sr} i_r \\ \lambda_r &= [\lambda_{ar} \quad \lambda_{br} \quad \lambda_{cr}]^T = L_{rs} i_s + L_{rr} i_r \end{aligned} \quad (3.23)$$

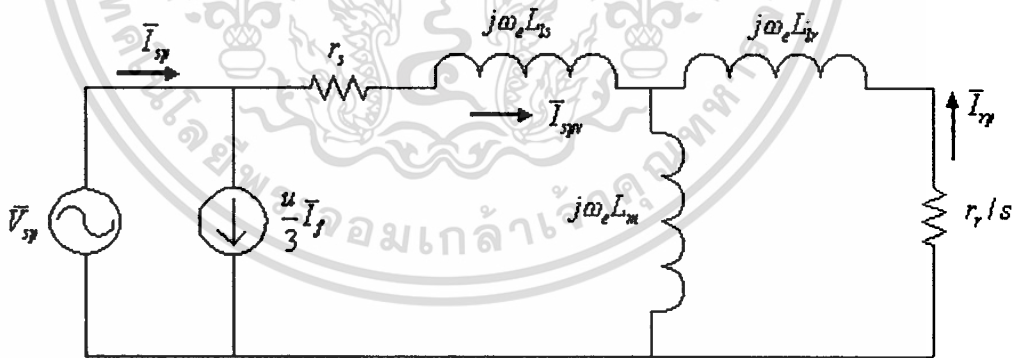
สมการในสถานะคงที่ (Steady-state) ของสเตเตอร์และโรเตอร์ ในมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีฟลักซ์ที่เกิดจากการลัดรอบสามารถแสดงได้โดยสมการ

$$\begin{aligned}
\bar{V}_{sp} &= (r_s + j\omega_e L_s)(I_{sp} - \frac{u}{3}\bar{I}_f) + j\omega_e L_m \bar{I}_{rp} \\
\bar{V}_{sn} &= (r_s + j\omega_e L_s)(\bar{I}_{sn} - \frac{u}{3}\bar{I}_f) + j\omega_e L_m \bar{I}_{rn} \\
0 &= (\frac{r_r}{s} + j\omega_e L_r)\bar{I}_{rp} + j\omega_e L_m (\bar{I}_{sp} - \frac{u}{3}\bar{I}_f) \\
0 &= (\frac{r_r}{2-s} + j\omega_e L_r)\bar{I}_{rn} + j\omega_e L_m (\bar{I}_{sn} - \frac{u}{3}\bar{I}_f)
\end{aligned} \tag{3.24}$$

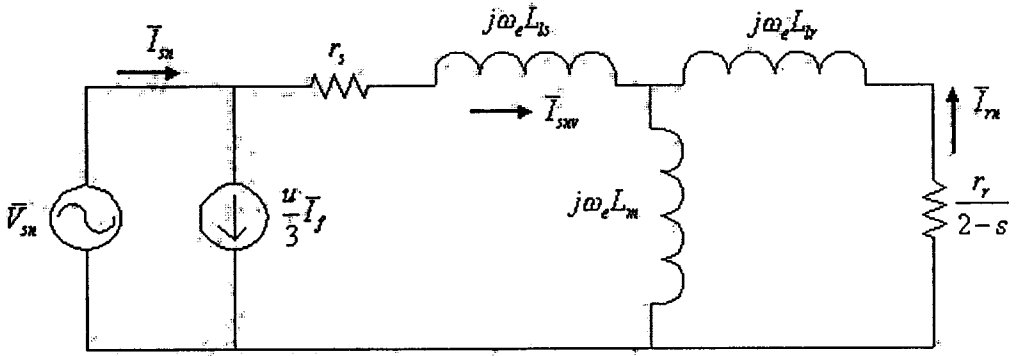
โดยที่ $\bar{I}_{sp}, \bar{I}_{sn}, \bar{I}_{rp}$ และ $\bar{I}_{rn}$ ก็คือองค์ประกอบเฟสเซอร์ลำดับบวกและลำดับลบของกระแสสเตเตอร์ และกระแสโรเตอร์ และ $\bar{I}_f$ คือกระแสฟลด์เฟสเซอร์เนื่องจากการลัดรอบ และ s คือสลิป โดยที่ $\bar{I}_f$ สามารถแสดงได้ในเทอมของแรงดันสเตเตอร์ดังสมการข้างล่าง

$$\left(u(1 - \frac{2u}{3})(r_s + j\omega_e L_s) + r_f \right) \bar{I}_f = u(\bar{V}_{sp} + \bar{V}_{sn}) \tag{3.25}$$

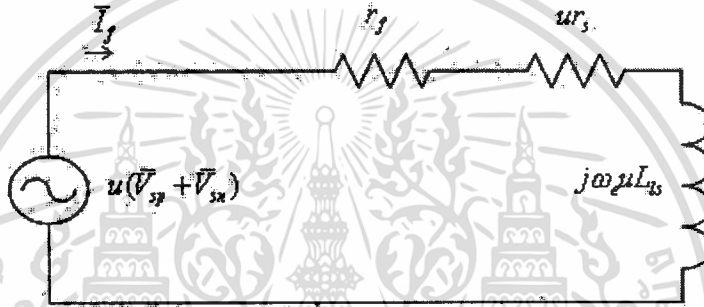
วงจรสมมูลในสถานะคงที่ [9] จากสมการที่ (3.24) และ (3.25) สามารถได้มาจากวงจรสมมูลขององค์ประกอบลำดับ แสดงได้ในรูปที่ 3.4, 3.5 และ 3.6



รูปที่ 3.4 วงจรสมมูลขององค์ประกอบลำดับบวกในสถานะคงที่



รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลขององค์ประกอบลำดับลบในสถานะคงที่



รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลของกระแสฟลัดในสถานะคงที่

ในการจำลองค่านั้นได้ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 2 ขนาด คือขนาด 1 แรงม้า และ 2 แรงม้า มาใช้ในการทดลองและจำลอง โดยใช้โปรแกรม Malab การประมวลผลเป็นแบบเมตริกซ์ด้วยการ สมมุติค่าของการลัดรอบจาก 1 รอบ ถึง 5 รอบ โดยที่ค่า $u = 1/440$ ถึง $u = 5/440$ สำหรับ มอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า และ $u = 1/282$ ถึง $u = 5/282$ สำหรับมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้า ลงใน สมการต่อไป นี้ โดยที่จำนวน 440 และ 282 คือ จำนวนรอบของขดลวดใน 1 เฟสของมอเตอร์ 1 แรงม้า และ 2 แรงม้า ตามลำดับ [13]

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_p \\ \bar{V}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{pp} & Z_{pn} \\ Z_{np} & Z_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_p \\ \bar{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{pp} & Y_{pn} \\ Y_{np} & Y_{nn} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_p \\ \bar{I}_n \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$\begin{aligned} Y_{np} = Y_{pn} &= \frac{u^2}{3\{R_f + u(R_s + j\omega_e L_{ls})\}} \\ &= \frac{u^2}{3(R_f + uZ_s)} \end{aligned} \quad (3.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในองค์กรเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Y_{pp} = Y_p + Y_{pn} \quad (3.28)$$

$$Y_{nn} = Y_n + Y_{np} \quad (3.29)$$

โดยค่า Y_{ij} ก็คือค่าแอดมิตแตนซ์ของลำดับ i เนื่องจากลำดับ j ส่วน Y_p, Y_n คือค่าแอดมิตแตนซ์ในอุดมคติลำดับบวก และลำดับลบ ส่วนค่า ω_e คือความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ ขณะที่ R_f และ L_s คือ ค่าความต้านทาน และค่าอินดักแตนซ์ของสเตเตอร์ ส่วน R_f คือ ค่าความต้านทานภายในรูปของการลัดรอบ และ u คือ ค่าอัตราส่วนของจำนวนรอบที่ลัดวงจรต่อจำนวนรอบทั้งหมดใน 1 เฟสและค่า Z_{np} จากสมการที่ (3.26) ถึง สมการที่ (3.29) จะได้สมการใหม่เป็น

$$Z_{np} = \frac{-Y_{np} Z_p Z_n}{1 + Y_{np} (Z_p + Z_n)} \quad (3.30)$$

โดยที่ค่า Z_p และ Z_n ก็คือค่าอิมพีแดนซ์ลำดับบวกและลบตามลำดับ ทั้งนี้สมการที่ (3.30) สามารถที่จะยุบให้ เหลืออยู่ในรูปอย่างง่ายโดยกำหนดให้ค่า $R_f = 0$ และ $u(Z_p + Z_n)/3Z_s \ll 1$ สำหรับจำนวนของการลัดรอบที่จำนวนน้อยๆซึ่งจะทำให้ค่า u นั้นมีค่าน้อยมากๆ ซึ่งก็คือ

$$Z_{np} \approx -u \cdot \frac{Z_p Z_n}{3 Z_s} \quad (3.31)$$

จากสมการที่ (3.31) จะพบว่าค่าของ Z_{np} จะเพิ่มขึ้นตามความรุนแรงของฟอลต์ที่เกิดขึ้นซึ่งจะทำให้ u มีค่าเพิ่มขึ้น และเปลี่ยนแปลงในฟังก์ชันของสลิปเนื่องจากค่า Z_p และสำหรับกรณีของมอเตอร์ที่มีความสมบูรณ์ ($u = 0$) ค่าของ Z_{np} จะเป็นศูนย์โดยจะไม่ขึ้นกับค่าสลิป $\Delta Z_{np} \equiv Z_{np}$ ในส่วนของโมเดลสำหรับความผิดปกติในการวัดจะถูกนำมาพิจารณาเพื่อนำมาแก้ไขและเปลี่ยนแปลงค่าใน i_{as}, i_{bs}, v_{ab} และ v_{bc} เพื่อความถูกต้องยิ่งขึ้นทั้งนี้สามารถถูกนำเสนอได้โดย

$$\bar{I}_{as,m} = \alpha_i \bar{I}_{as} \quad , \quad \bar{I}_{bs,m} = \alpha_i \beta_i \bar{I}_{bs} \quad (3.32)$$

$$\bar{V}_{ab,m} = \alpha_v \bar{V}_{ab} \quad , \quad \bar{V}_{bc,m} = \alpha_v \beta_v \bar{V}_{bc} \quad (3.33)$$

โดยที่ $\alpha_i, \beta_i, \alpha_v$ และ β_v ก็คือค่าสเกลแฟคเตอร์ที่ไม่เป็นอุดมคติ (Nonideal scaling factor) ที่เป็นค่าผิดพลาดสำหรับการวัดใน i_{as}, i_{bs}, v_{ab} และ v_{bc} ดังนั้นค่า Z_{np} ที่ได้จากสมการ (3.32) และ (3.33) จะได้เป็น Z'_{np} ใหม่ที่มีสมการเป็น

$$Z'_{np} = \left(\frac{\alpha_v}{3\alpha_i\beta_i} \right) \{ (1-\beta_v)(1-a\beta_i)Z_n - (1-a\beta_v)(1-\beta_i)Z_p - (1-a^2)(\beta_v-a)Y_{np}Z_pZ_n \} / (1+Y_{np}(Z_p+Z_n)) \quad (3.34)$$

โดยที่ $a = \exp(j2\pi/3)$ และถ้าค่าของ $\alpha_i, \beta_i, \alpha_v$ และ β_v มีค่าเท่ากับ 1 และแทนค่าลงในสมการที่ (3.34) จะกลายเป็นสมการที่ (3.30) ทั้งนี้ค่าของ Z_{np} สำหรับกรณีที่มอเตอร์มีความสมบูรณ์จะหาได้โดยทำการแทนค่า $u = 0 (Y_{np} = 0)$ ลงในสมการที่ (3.34) จะได้ดังสมการที่ (3.35)

$$Z'_{np0} = \left(\frac{\alpha_v}{3\alpha_i\beta_i} \right) \{ (1-\beta_v)(1-a\beta_i)Z_n - (1-a\beta_v)(1-\beta_i)Z_p \} \quad (3.35)$$

เนื่องจากสาเหตุจากการวัดค่าผิดพลาดหรือคลาดเคลื่อนจะทำให้ค่าของ Z'_{np0} มีค่าเกิดขึ้นและเปลี่ยนแปลงตามค่าสลิป $\Delta Z'_{np}$ จะสามารถหาได้จาก

$$\begin{aligned} \Delta Z'_{np} &\approx -(\alpha_v / 3\alpha_i\beta_i)(1-a^2)(\beta_v-a)Y_{np}Z_pZ_n \\ &\approx -(\alpha_v / 3\alpha_i\beta_i)(1-a^2)(\beta_v-a)u(Z_pZ_n / 3Z_z) \end{aligned} \quad (3.36)$$

จะสังเกตเห็นได้ว่าสมการที่ (3.36) จะมีค่าสเกลแฟคเตอร์ซึ่งจะหมายถึงค่าที่ผิดพลาดในการวัดรวมอยู่ด้วยนั่นเอง จากสมการ $\Delta Z'_{np}$ จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างอิสระตามความรุนแรงของฟอลต์ โดยในการนำเสนอนี้จะประมาณค่าแฟคเตอร์สเกลอยู่ที่ประมาณ $1 + j0$ (ผิดพลาดน้อย) โดยจะทำการกำหนดค่าผิดพลาดในการวัด i_{as}, i_{bs}, v_{ab} และ v_{bc} เป็น $+0.5\%, -0.5\%, +0.5\%$ และ 0% ตามลำดับ โดยจะเห็นได้ว่าค่าผิดพลาดในการวัดเพียงเล็กน้อยจะมีผลและไวต่อค่า Z_{np} เป็นอย่างมาก ในทำนองเดียวกันอิทธิพลของความไม่สมมาตรภายในมอเตอร์เองจะไม่มีผลกระทบต่อวิธีนี้ เนื่องจากว่าจะถูกกำหนดโดยเงื่อนไขของสลิปแต่ละค่า

3.1.3 ทฤษฎีในการทดลอง

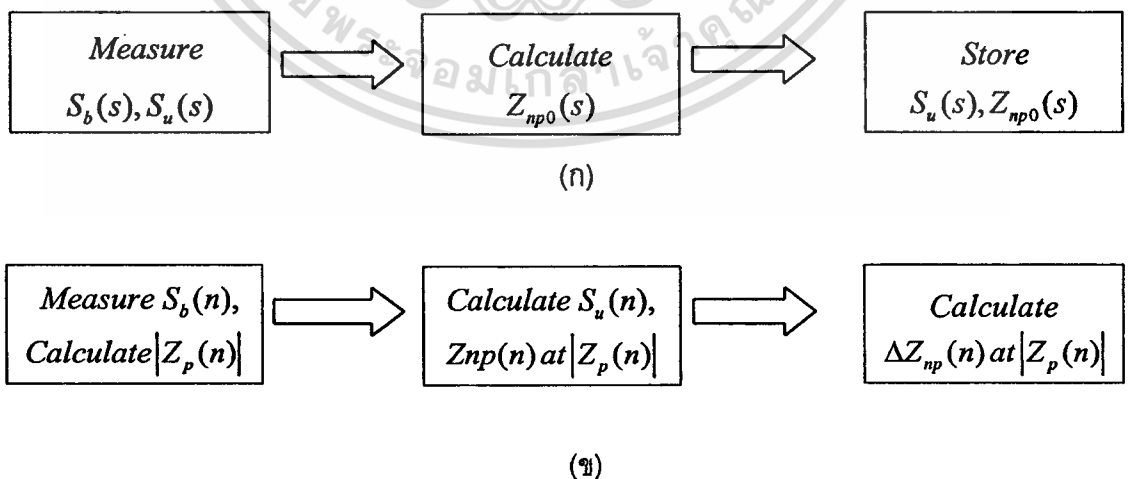
จากสมการในการคำนวณค่า Z_{np} ในสมการที่ (3.21) จำเป็นต้องหาชุดข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ 2 ชุดข้อมูล ของค่า $\bar{I}_p, \bar{V}_n$, และ $\bar{I}_n$ ที่ได้จากฟังก์ชันของสลิปที่แหล่งจ่ายแรงดันสมดุล และไม่สมดุล [10] และในขั้นแรกของการตรวจจับพอลต์นั้นจำเป็นจะต้องมีการคำนึงมอเตอร์ที่ไม่ใช่อุดมคติ นั้นหมายถึงว่ามอเตอร์นั้น จะขึ้นอยู่กับค่าสลิปที่เกิดจากความไม่สมมาตรภายในตัวมอเตอร์ ดังนั้นจำเป็นต้องมีขั้นตอน (Stage) ของการเรียนรู้หรือตรวจสอบความไม่สมมาตรภายในของมอเตอร์เสียก่อนโดยแสดงไว้ในรูปที่ 3.7 ซึ่งจะเป็นขั้นตอนหรือเป็นวิธีการในการตรวจจับพอลต์ภายใต้พื้นฐานของ Z_{np} ที่จะทำให้การตรวจจับขดลวดสเตเตอร์ลัดรอบที่เกิดขึ้น จากรูปที่ 3.7(ก) เป็นขั้นตอนของการตรวจสอบความไม่สมมาตรภายในตัวมอเตอร์ เรียกว่าขั้นตอนของ Learning stage และในรูปที่ 3.7(ข) เป็นขั้นตอนของการป้องกันหรือตรวจจับพอลต์ที่เกิดขึ้น เรียกว่าขั้นตอนของ Protection stage

$$S_b = \{\bar{I}_{p,b}, \bar{V}_{n,b}, \bar{I}_{n,b}\}, \quad S_u = \{\bar{I}_{p,u}, \bar{V}_{n,u}, \bar{I}_{n,u}\} \quad (3.37)$$

จากสมการที่ (3.37) เป็นชุดข้อมูลที่จำเป็นในการตรวจจับพอลต์ที่เกิดขึ้นภายใต้ฟังก์ชันของสลิปโดยที่ b และ u แทนอักษรจะหมายถึงสมดุล และไม่สมดุลของแหล่งจ่ายแรงดันของมอเตอร์ตามลำดับ และสองชุดข้อมูลในสมการที่ (3.37) สามารถที่จะคำนวณค่าของ Z_{np} ภายใต้ค่าสลิปต่างๆ ดังนั้นชุดข้อมูลของ S_u และค่าที่คำนวณ Z_{np} จะถูกเก็บไว้ภายใต้ฟังก์ชันของสลิปต่างๆ ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 3.7(ก) และสำหรับการจ่ายแรงดันให้มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นแบบการต่อโดยตรง ซึ่งจะทำให้ค่าของอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์จะเป็นฟังก์ชันของสลิปเท่านั้น โดยที่สลิปจะมีการเปลี่ยนแปลงก็จะขึ้นกับโหลดและขนาดของ $\bar{V}_p$ ดังนั้น การวัดค่าความเร็วของมอเตอร์ หรือว่าขนาดของอิมพีแดนซ์ลำดับบวก (Z_p) สามารถจะนำมาแสดงถึงความแตกต่างของค่าสลิป โดยที่ Z_p จะเป็นฟังก์ชันของสลิปเท่านั้น และขนาดของ Z_p สามารถที่จะคำนวณด้วย $|V_p|/|I_p|$ แต่ก็มีคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยในการคำนวณอาจจะเนื่องจากอิทธิพลของความไม่สมมาตรภายในของมอเตอร์แต่ละตัว แต่ก็สามารถที่จะไม่ใส่ใจในค่าผิดพลาดเพียงเล็กน้อยเมื่อคำนวณค่าในลำดับบวกเมื่อเทียบแล้วจะมีค่าน้อยมากๆ และในขั้นตอนของ Learning stage สามารถจะปฏิบัติกับมอเตอร์แต่ละตัวก่อนที่จะมีการทดสอบ และในขั้นต่อไปที่เป็นขั้นในการทดสอบของการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ที่ได้ออกแบบมา

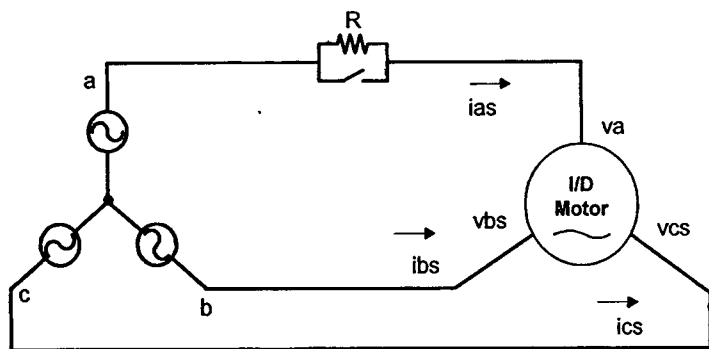
การปฏิบัติในขั้นตอนของ Learning stage ก่อนที่จะมีการทดสอบในขั้นตอนต่อไปมอเตอร์นั้น แหล่งจ่ายแรงดันจะต้องทำให้ไม่สมดุลเสียก่อนโดยการนำค่าภายใต้ฟังก์ชันของสลิป โดยใช้หม้อแปลงอัตรา 1 เฟส หรือไม่ก็ใช้การต่อค่าความต้านทานเข้าไปเพียงเฟสเดียว เพื่อที่จะทำการ

คำนวณหาชุดข้อมูลของ S_u และสำหรับชุดข้อมูลของ S_b สามารถที่จะวัดค่าได้ด้วยแหล่งจ่ายแรงดันสมดุล และเมื่อได้ข้อมูลทั้งสองชุดแล้ว Z_{np0} ก็สามารถที่จะคำนวณได้ ดังนั้นค่า Z_{np0} และ S_u จะถูกจัดเก็บไว้เพื่อใช้ในการคำนวณในขั้นตอนของ Protection stage ดังในรูปที่ 3.7(ข) และสำหรับการต่อมอเตอร์เข้ากับแหล่งจ่ายแรงดันของมอเตอร์โดยตรง สามารถที่จะทำการ ไม่สมดุล เมื่อใดก็ได้ภายใต้เงื่อนไขของค่าสลิปใหม่ โดยโครงสร้างของวงจรของแหล่งจ่ายแรงดันไม่สมดุล แสดงไว้ในรูปที่ 3.8 และเมื่อทำการวัดค่าเมื่อมอเตอร์อยู่ในสถานะคงที่ที่ค่าของ $|Z_p|$ หรือค่าความเร็วรอบที่วัดได้นั้น ค่าของ S_b สามารถที่จะวัดได้โดยการเปิดสวิตช์ และ S_b สามารถจะวัดได้ด้วยการปิดสวิตช์ เมื่อเป็นการต่อความต้านทาน แต่สำหรับการทดลองที่ทำนั้นได้ใช้หม้อแปลงออโต้ 1 เฟสที่สามารถปรับค่าแรงดันได้ ในการทำแรงดันไม่สมดุลซึ่งก็สามารถใช้ได้ ในชุดข้อมูลที่ได้กล่าวมานั้นจะต้องทำในสลิปเดียวกัน และในขั้นตอนของการตรวจจับฟอลต์ที่เกิดขึ้นโดยการทดสอบการลัดรอบนั้น ΔZ_{np} สามารถที่จะถูกคำนวณได้ตามขั้นตอนจากรูปที่ 3.7(ข) ซึ่งในขั้นตอนนี้ไม่จำเป็นต้องทำแรงดันไม่สมดุล สามารถที่จะปลดสวิตช์ หรือความต้านทานออกได้ เมื่อมีการต่อค่าความต้านทานเพื่อทำแหล่งจ่ายแรงดันไม่สมดุล และในขั้นตอนนี้จะต้องทำการวัดชุดข้อมูลของ $S_b(n)$ ภายใต้ค่าสลิปที่เหมือนกันกับข้อมูลที่ทำการจัดเก็บไว้ คือข้อมูลของ S_u ซึ่งก็คือ ค่าของ $\bar{V}_n, \bar{I}_p$ และ $\bar{I}_n$ นั่นเองโดยในขั้นตอนนี้จะใช้การประมาณค่าระหว่างเชิงเส้นจะถูกนำมาหาค่าของ $S_u(n)$ ภายใต้ค่าสลิปเดียวกัน และเมื่อได้ชุดข้อมูลของ $S_b(n)$ และ $S_u(n)$ แล้วก็จะสามารถหาค่าของ $Z_{np}(n)$ ได้ด้วยการคำนวณจากสมการที่ (3.21) และค่าการเบี่ยงเบนของ Z_{np} สามารถที่จะคำนวณโดยใช้ค่า $Z_{np}(n)$ และค่า Z_{np0} ที่ได้ไปคำนวณจากสมการที่ (3.19) ภายใต้เงื่อนไขของค่าสลิปเดียวกัน และวงจรการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 3.9

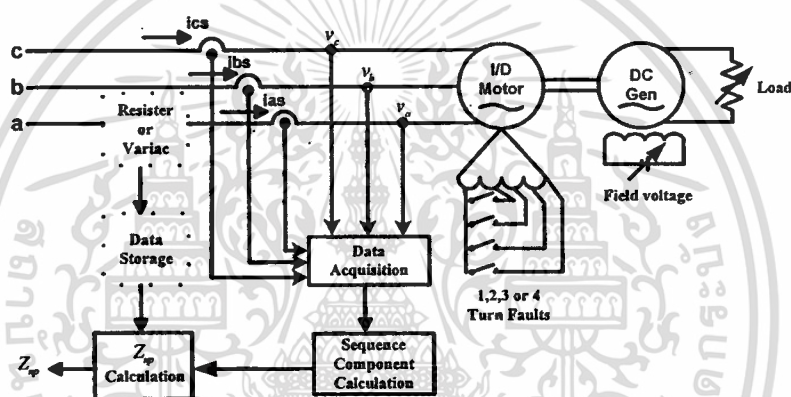


รูปที่ 3.7 (น) Learning stage (ข) Protection stage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 โครงสร้างสำหรับทำแหล่งจ่ายแรงดันไม่สมดุล

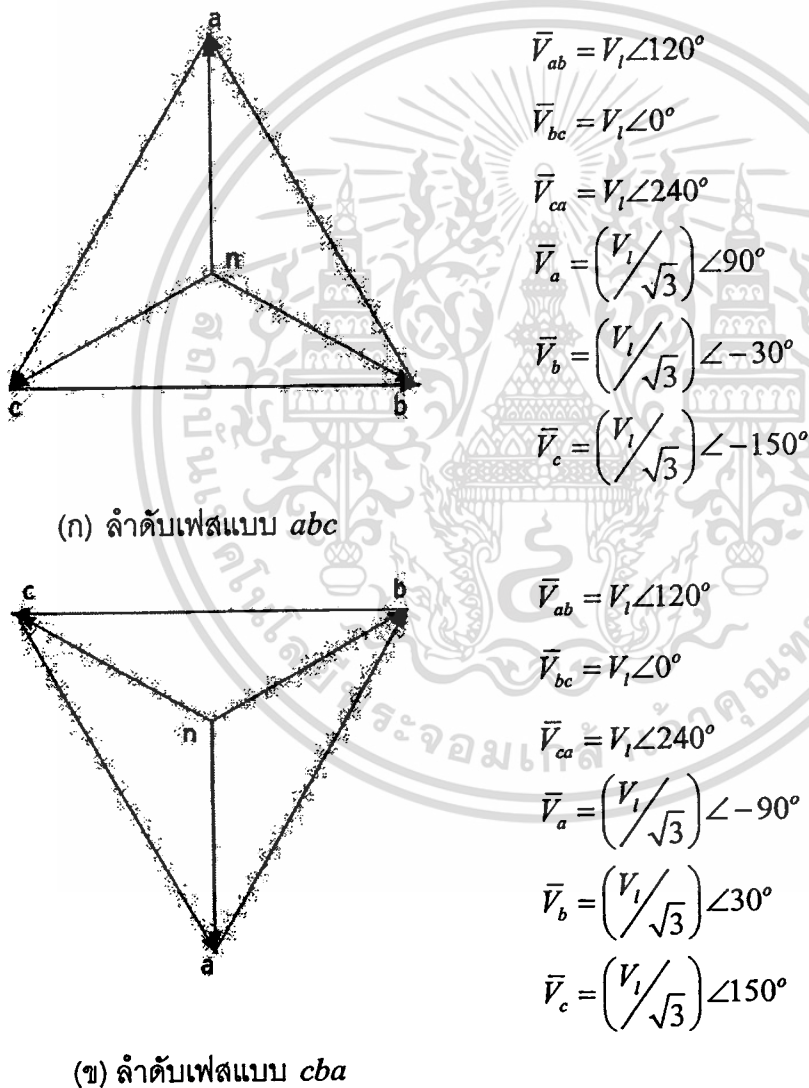


รูปที่ 3.9 วงจรทดลองสำหรับวิธีในการตรวจจับขดลวดลัดรอบในหลักการของ Z_{np} - based

จากรูปที่ 3.9 เป็นวงจรสำหรับทดลองในการตรวจจับฟอลต์ที่เกิดจากการลัดรอบ โดยจะทดลองกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 2 ตัวที่มีขนาด 1 แรงม้า และ 2 แรงม้าโดยมอเตอร์ทั้งสองจะถูกออกแบบให้พันขดลวดสเตเตอร์ใหม่แล้วทำการดึงแท็บสายต่อออกมานอกตัวมอเตอร์ที่มีการระบุจำนวนรอบไว้เพื่อทำการทดสอบฟอลต์ที่เกิดจากการลัดรอบโดยใช้สวิตช์เป็นตัวลัดวงจรและสำหรับโหลดของมอเตอร์จะเป็นโหลดทางไฟฟ้าโดยใช้เครื่องจักรกลไฟฟ้าดีซีทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายให้กับโหลดไฟและใช้ Photo tachometer ในการวัดหาความเร็วรอบภายใต้สลิปต่างๆ และข้อมูลของชุด S_b และ S_u ได้มาจากค่าที่ทำการวัดข้อมูลของกระแสเฟส $\bar{I}_{as}$, $\bar{I}_{bs}$ และ $\bar{I}_{cs}$ และแรงดันเฟส $\bar{V}_a$, $\bar{V}_b$ และ $\bar{V}_c$ เมื่อมอเตอร์ต่อแบบสตาร์ แล้วนำมาคำนวณหาองค์ประกอบลำดับต่างๆ แล้วเริ่มขั้นตอนของวิธีการตรวจจับฟอลต์จากข้างต้นที่ได้กล่าวมา

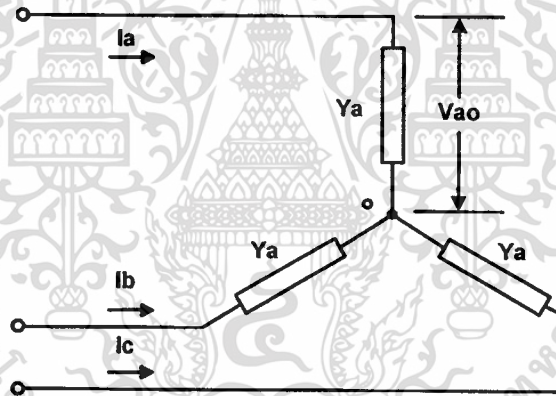
3.2 ระบบแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส

การพิจารณาแรงดันในระบบสามเฟสนั้น จะเลือกเลือกแรงดันที่มุมเฟสของมันเป็นศูนย์กลาง เป็นแกนอ้างอิง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้แรงดัน V_{bc} เป็นแกนอ้างอิงหรือแกนศูนย์กลาง ระบบส่งกำลังไฟฟ้าเป็นระบบแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส มีระดับแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายไฟฟ้ากับสายไฟฟ้า 380 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ในระบบไฟฟ้าที่สมดุล จะมีแรงดันไฟฟ้าเท่ากันทั้ง 3 เฟส และมีมุมต่างกัน $120^\circ, 240^\circ$ องศาทางไฟฟ้าตามลำดับมี 2 ลำดับ [15] ขึ้นอยู่กับลักษณะของการต่อแรงดันไฟฟ้าทั้ง 2 ลำดับ และจากส่วนประกอบของเฟสเซอร์ของแรงดันต่างๆที่เกิดขึ้นในลักษณะตามลำดับต่างๆดังแสดงได้ในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แสดงลำดับเฟสของระบบไฟฟ้า 3 เฟส

อย่างไรก็ตามการพิจารณาแรงดันระหว่างสายแต่ละคู่ในระบบสามเฟสนั้น ถ้าหากว่าเป็นระบบสามเฟสสี่สายแล้ว ก็จะได้แรงดันสายกับนิวตรอนมีค่าเท่ากับ $1/\sqrt{3}$ เท่าของแรงดันระหว่างสายโดยปกติการใช้งานมอเตอร์ สามารถทำการต่อได้ 2 ลักษณะ คือแบบสตาร์ และเดลต้า ตามลักษณะแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์โดยในการทดสอบ จะทำการต่อมอเตอร์แบบ Star isolated neutral หรือเรียกกันว่าสตาร์ 3 สายดังรูปที่ 3.11 เมื่อเกิดสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลเกิดขึ้นในระบบ จะทำให้กระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสไม่เท่ากัน และแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมโหลดในแต่ละเฟสไม่เท่ากันด้วย ดังนั้นจะทำให้จุดร่วมของการต่อแบบสตาร์เกิดความต่างศักย์กับจุดนิวตรอนของระบบ เนื่องจากไม่ได้ต่ออยู่ด้วยกัน ทำให้แรงดันไฟฟ้าต่อเฟสของระบบไม่เท่ากัน ในแต่ละเฟส ทำให้มีแรงดันระหว่างนิวตรอนกับจุดสตาร์ของโหลด เรียกว่า Displacement neutral voltage ในการทดสอบมอเตอร์แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าวัดเทียบกับจุดนิวตรอนของระบบ แต่ในการคำนวณจะใช้แรงดันตกคร่อมโหลด ดังนั้นจึงต้องหาแรงดันคร่อมโหลดจากแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสของระบบ



รูปที่ 3.11 แสดงการต่อภาระแบบสตาร์ 3 สาย

จากรูปที่ 3.11 สามารถหาแรงดันคร่อมโหลดได้ดังสมการที่ (3.38)

$$\begin{aligned}\vec{V}_{ao} &= \vec{V}_a + \vec{V}_{no} \\ \vec{V}_{bo} &= \vec{V}_b + \vec{V}_{no} \\ \vec{V}_{co} &= \vec{V}_c + \vec{V}_{no}\end{aligned}\quad (3.38)$$

เมื่อ $\bar{V}_a, \bar{V}_b$ และ $\bar{V}_c$ เป็นแรงดันไฟฟ้าของระบบ โดยวัดระหว่างสายไฟกับ Neutral ของระบบ และ $\bar{V}_{ao}, \bar{V}_{bo}$ และ $\bar{V}_{co}$ เป็นแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมโหลด วัดเทียบกับจุดต่อร่วมของโหลด เมื่อ $\bar{V}_{on}$ คือ Displacement Neutral Voltage

$$\bar{V}_{on} = \frac{\bar{V}_a Y_a + \bar{V}_b Y_b + \bar{V}_c Y_c}{Y_a + Y_b + Y_c} \quad (3.39)$$

เนื่องจากแอดมิตแตนซ์ภายในของมอเตอร์ เท่ากันทั้ง 3 เฟส ดังนั้นสามารถกำหนดได้ว่า เมื่อ $Y_a + Y_b + Y_c$ สามารถเขียนสมการที่ (3.40) ได้

$$\bar{V}_{on} = \frac{1}{3} (\bar{V}_a + \bar{V}_b + \bar{V}_c) \quad (3.40)$$

สามารถหาแรงดันไฟฟ้าคร่อมโหลดได้จากการนำสมการที่ (3.40) แทนในสมการที่ (3.38)

3.2.1 กำลังไฟฟ้า 3 เฟสเมื่อโหลดต่อแบบสตาร์ และเดลต้า

โหลดสามเฟสเมื่ออยู่ในสภาวะสมดุล เมื่อต่อแบบสตาร์หรือต่อแบบเดลต้าก็ตามกระแสที่ไหลในแต่ละเฟสย่อมมีค่าเท่ากัน ส่วนกำลังที่เกิดขึ้นในแต่ละเฟสจะมีค่าเท่ากับ $1/3$ ของกำลังงานไฟฟ้าทั้งหมดในรูปที่ 3.12 (a) จะเห็นว่าโหลดต่อกันแบบสตาร์ ดังนั้นกำลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแต่ละเฟสจะมีค่าเท่ากับดังสมการ

โดยกำหนดให้ P_p คือ กำลังไฟฟ้าเฟส Z_p คือ อิมพีแดนซ์เฟส, P_T คือ กำลังไฟฟ้ารวม, V_p คือ แรงดันเฟส, I_p คือ กระแสเฟส, V_L คือ แรงดันไลน์ และ I_L คือ กระแสไลน์

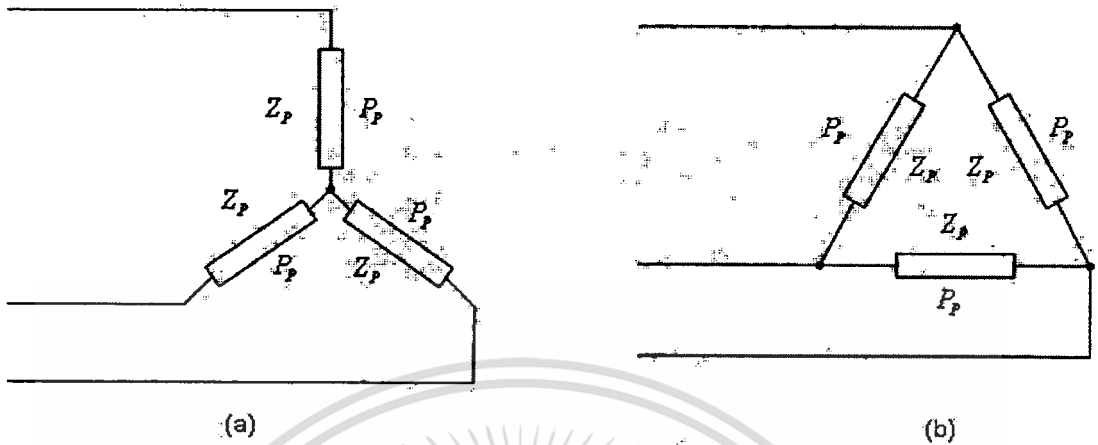
$$P_p = V_p I_p \cos \phi \quad (3.41)$$

และกำลังไฟฟ้าทั้งหมดเท่ากับหรือกำลังไฟฟ้าสามเฟสคือ

$$P_T = 3 V_p I_p \cos \phi \quad (3.42)$$

และการต่อแบบสตาร์จะได้ $I_p = I_L$ และ $V_p = V_L / \sqrt{3}$ ดังนั้นเมื่อแทนค่า $I_p = I_L$ และ $V_p = V_L / \sqrt{3}$ ลงในสมการที่ (3.42) จะได้

$$P_T = 3 \times \frac{V_L}{\sqrt{3}} \times I_L \times \cos\phi = \sqrt{3} V_L I_L \cos\phi \quad (3.43)$$



รูปที่ 3.12 ลักษณะการต่อโหลด (a) โหลดต่อแบบสตาร์ และ (b) โหลดต่อแบบเดลต้า

ในรูปที่ 3.12 (b) จะเห็นว่าอิมพีแดนซ์ของโหลดต่อกันแบบเดลต้า ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแต่ละเฟสจะมีค่าดังนี้

$$P_p = V_p I_p \cos\phi \quad (3.44)$$

$$P_T = 3 V_p I_p \cos\phi \quad (3.45)$$

แต่การต่อแบบเดลต้าจะได้ $V_p = V_L$ และ $I_p = I_L / \sqrt{3}$ ดังนั้นเมื่อแทนค่า $V_p = V_L$ และ $I_p = I_L / \sqrt{3}$ ลงในสมการที่ (3.45) จะได้

$$P_T = 3 \times V_L \times \frac{I_L}{\sqrt{3}} \times \cos\phi = \sqrt{3} V_L I_L \cos\phi \quad (3.46)$$

ซึ่งจะพิจารณาได้ว่า โหลดสามเฟสที่อยู่ในสถานะสมดุล ไม่ว่าจะต่อเป็นแบบสตาร์หรือว่าต่อแบบเดลต้าก็ตาม กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะมีสูตรในการคำนวณหาเหมือนกันทุกประการ จะได้ดังสมการและ ϕ ในที่นี้หมายถึง มุมเฟสที่เกิดจากกระแสกับแรงดันในแต่ละเฟสนั่นเอง

$$P_T = \sqrt{3} V_L I_L \cos\phi \quad (3.47)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟทั้งหมด Q_T และกำลังไฟฟ้าที่ปรากฏทั้งหมดหรือโวลท์-แอมแปร์ที่จ่ายให้กับวงจรทั้งหมด S_T จะมีความสัมพันธ์กับกำลังงานไฟฟ้าทั้งหมด P_T เป็นดังนี้

$$P_T = \sqrt{3} V_L I_L \cos\phi, S_T = \sqrt{3} V_L I_L \text{ และ } Q_T = \sqrt{3} V_L I_L \sin\phi \quad (3.48)$$



บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 การทดลองและการจำลอง

ในการทดลองและจำลองในงานวิจัยนี้ได้ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า 3 เฟส 2 ตัวที่มีพิกัดกำลัง 1 แรงม้า และ 2 แรงม้ามาใช้ในการทดลอง เพื่อที่จะได้เปรียบเทียบคุณสมบัติเฉพาะของค่าต่างๆในรูปขององค์ประกอบลำดับไม่ว่าจะเป็นองค์ประกอบลำดับของอิมพีแดนซ์ ของแรงดัน หรือของกระแส ที่ได้จากการจำลองและการทดลองของมอเตอร์แต่ละตัว ที่มีลักษณะของโครงสร้างและพิกัดกำลังที่แตกต่างกัน ขั้นตอนของการทดสอบนั้นจะต้องทำการทดสอบหาวงจรสมมูลของมอเตอร์ก่อนและวิธีการทดสอบนั้นก็อยู่ในบทที่ 2 เพื่อนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆนั้นมาใช้ในการจำลอง และสำหรับการทดลองโดยทฤษฎีและสูตรคำนวณทั้งหมดได้อธิบายไว้ในบทที่ 4 และสำหรับโปรแกรมในการประมวลผลได้ใช้โปรแกรม Matlab นำมาประมวลผลในเชิงเมตริกซ์ทั้งในการทดลองและจำลอง

4.1.1 ขั้นตอนในการจำลองและทดลอง

นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้จากการทดสอบ แล้วนำมาหาค่าอิมพีแดนซ์รวมของวงจรทางด้านอินพุต (Z_r) ซึ่งในการหาค่าของอิมพีแดนซ์รวมนั้นได้ใช้ระบบในลำดับของวงจรสมมูลเป็นแบบลำดับบวก ซึ่งก็เป็นระบบดั้งเดิมที่ใช้กันโดยทั่วไป และอีกระบบหนึ่งก็จะเป็นแบบลำดับลบซึ่งความแตกต่างของทั้งสองระบบก็เพียงค่าของความต้านทานไหลดซึ่งรายละเอียดได้อธิบายไว้ในบทที่ 2 และเมื่อได้ค่าของ Z_r แล้วก็ต้องนำมาหาค่าของกระแสไลน์ หรือกระแสเตเตอร์ โดยการกำหนดค่าของแหล่งจ่ายแรงดันต่อเฟสเป็นแบบสถานะต่างๆกันทั้งเป็นแบบแรงดันสมดุลและแรงดันไม่สมดุลโดยแบ่งการทดสอบเป็น 3 ระดับด้วยกันดังแสดงไว้ใน ตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แรงดันไฟฟ้าที่สถานะต่างๆกัน

V_a	V_b	V_c	สัญลักษณ์	สถานะของแหล่งจ่ายแรงดัน
220	220	220	$S_b(s)$ (220)	แรงดันไฟฟ้าสมดุลทั้ง 3 เฟส
204	220	220	$S_u(s)$ (204)	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 5 % ในเฟส A ต่ำกว่าปกติ
237	220	220	$S_u(s)$ (237)	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 5 % ในเฟส A สูงกว่าปกติ

จากตารางที่ 4.1 เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าที่สภาวะต่างๆกัน ซึ่งในการจำลอง และทดลองนั้นค่าแรงดันต่อเฟสที่ใช้จะเป็นค่าเฟสเซอร์ คือ มีทั้งขนาดและมุม โดยแต่ละเฟสจะมีมุมต่างเฟสกัน 120 องศา และกำหนดให้มุมต่างเฟส (Phase sequence) แต่ละเฟสของแรงดัน V_a, V_b และ V_c มีค่าเท่ากับ 90, -30 และ -150 ตามลำดับซึ่งจากการจำลองนั้นพบว่าค่าที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่สภาวะต่าง ๆ กันนั้นไม่มีความแตกต่างกันโดยเฉพาะค่าองค์ประกอบลำดับของอิมพีแดนซ์ และเมื่อจำลองค่าแล้วจะพบว่าค่าที่ต้องการตรวจจับก็คือ Z_{np} นั้นจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปในทางเดียวกัน โดยมีการเพิ่มขึ้นตามความรุนแรงของฟอลต์ที่เพิ่มขึ้น (การลัดรอบเพิ่มขึ้น 1~5 รอบ)

ดังนั้นค่าแรงดันที่ใช้ในการจำลองนั้นจะได้กำหนดไว้ที่สภาวะของแรงดันลดลงในเฟส A 5% $S_{u(s)}(204)$ เพื่อที่จะได้เปรียบเทียบจากการทดลอง เพราะว่าแรงดันที่ใช้ในการทดลองใช้ระดับของแรงดันลดลงในเฟส A 5% ที่จะได้อธิบายในขั้นตอนของการทดลอง และค่าที่ได้จากการจำลองนั้น จะต้องคำนวณหากระแสในแต่ละเฟส โดยใช้แรงดันที่กำหนดขึ้นนี้มาหาค่ากระแสโดยใช้ค่าอิมพีแดนซ์รวม Z_T ก็จะได้ค่ากระแสทั้ง 3 เฟส จากนั้นนำค่าแรงดันและกระแสที่ได้จากการคำนวณ ในระบบ 3 เฟส โดยใช้สูตรของการหาองค์ประกอบลำดับเพื่อทำการหาค่าขององค์ประกอบลำดับบวก, องค์ประกอบลำดับลบ และองค์ประกอบลำดับศูนย์ของค่าแรงดันและกระแส จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาองค์ประกอบลำดับของอิมพีแดนซ์ ทั้งอิมพีแดนซ์ลำดับลบ อิมพีแดนซ์ลำดับบวก และอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ ไปแทนค่าในสมการที่ (3.30) เพื่อตรวจจับฟอลต์เนื่องจากการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์บนหลักการของ Z_{np} -based และสำหรับการทดลองนั้นได้ใช้สมการในการตรวจจับในสมการที่ (3.21) โดยสำหรับการทดลองนั้น จะไม่นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวงจรสมมูลมาทดสอบ แต่จะทำการวัดค่ากระแสเฟส และแรงดันเฟสของมอเตอร์มาทำการตรวจจับฟอลต์ที่เกิดขึ้น

ค่าพิกัดและพารามิเตอร์ต่างๆในวงจรสมมูลของมอเตอร์ทั้ง 2 ขนาดมีค่าดังต่อไปนี้

มอเตอร์ 1 แรงม้า (hp)

Type $Y_2 - 802 - 4$

Insulation Class F

P_o = 1 hp

Poles = 4 p

V_{rated} = 380/220 V Y / Δ

I_{rated} = 2.03/3.51 A Y / Δ

frequency (f) = 50 Hz

$N_{m,rated}$ = 1390 rpm

R_s = 12 Ω

$$\begin{aligned} R_r &= 8.63 \, \Omega \\ X_m &= 136.67 \, \Omega \\ X_s + X_r &= 21.46 \, \Omega \end{aligned}$$

number of series turns per phase = 440 Turns

มอเตอร์ 2 แรงม้า (hp)

Type SF – TR

Insulation Class B

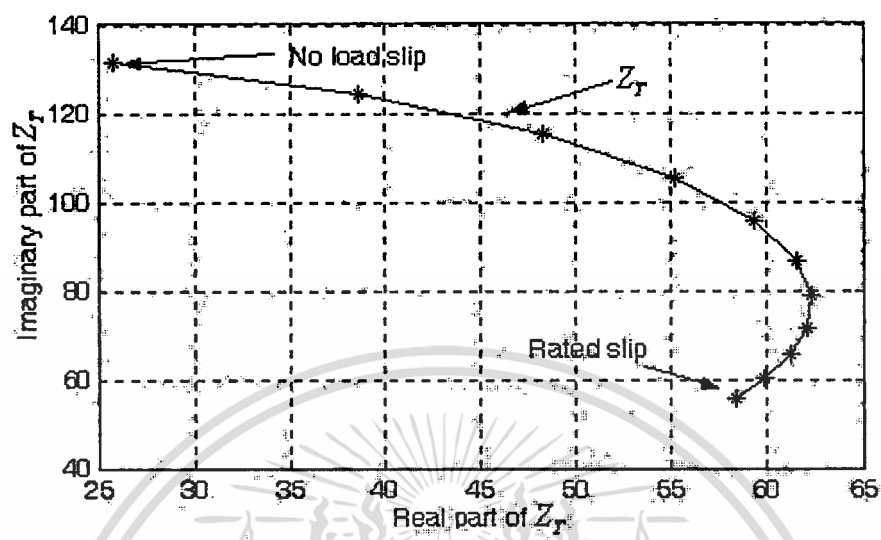
$$\begin{aligned} P_o &= 2 \, \text{hp} \\ \text{Poles} &= 4 \, p \\ V_{\text{rated}} &= 380/220 \, V \quad Y / \Delta \\ I_{\text{rated}} &= 3.5/6.0 \, A \quad Y / \Delta \\ \text{frequency} (f) &= 50 \, \text{Hz} \\ N_{m,\text{rated}} &= 1450 \, \text{rpm} \\ R_s &= 3.85 \, \Omega \\ R_r &= 3.46 \, \Omega \\ X_m &= 134.39 \, \Omega \\ X_s + X_r &= 9.94 \, \Omega \\ \text{number of series turns per phase} &= 282 \, \text{Turns} \end{aligned}$$

4.2 ผลการจำลองของมอเตอร์ 1 แรงม้า และ 2 แรงม้า

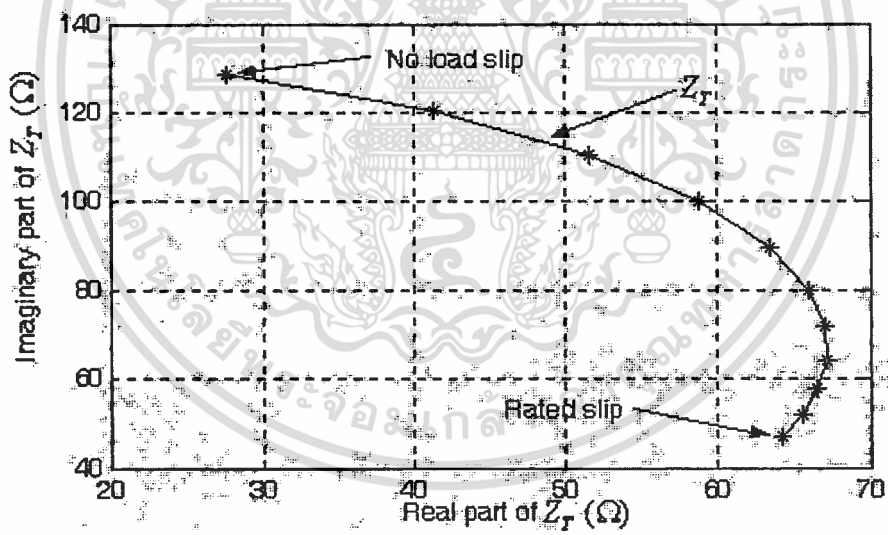
การจำลองในขั้นต้นได้ทำการหาค่าของอิมพีแดนซ์ Z_r ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งจะเห็นการเปลี่ยนแปลงซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของมอเตอร์แต่ละตัวว่ามีลักษณะอย่างไร สำหรับกรณีที่มอเตอร์มีความสมบูรณ์ตลอดการทำงานที่พิกัดสลิปค่าต่างๆ ผลการจำลองของรูปที่ 4.1 สำหรับมอเตอร์ 1 แรงม้า และรูปที่ 4.2 สำหรับมอเตอร์ 2 แรงม้า ซึ่งจะเห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์รวม Z_r จะอยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อน โดยค่าจริง (Real part) จะเป็นการแสดงค่าความต้านทาน (R_r) และค่าเชิงซ้อน (Imaginary part) จะเป็นค่ารีแอคแตนซ์ (X_r) ทั้งนี้ได้ทำการจำลองโดยการเปลี่ยนแปลงค่าสลิป ในช่วงที่มีค่าเป็นศูนย์ถึงค่าพิกัด ซึ่งจากรูปที่ 4.1 และ 4.2 จะเห็นการเปลี่ยนแปลงไปของค่าอิมพีแดนซ์รวม Z_r ที่อยู่ในแกนของ X_r และ R_r จะมีค่าลดลงเรื่อยๆ ในลักษณะเป็นเส้นโค้งตามการเปลี่ยนแปลงของสลิป จากค่าศูนย์จนถึงค่าพิกัด ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนั้นจะมีค่ามากหรือน้อยก็น่าจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างและการออกแบบของมอเตอร์ในแต่ละตัว [16]

โดยจะพบว่ามอเตอร์ทั้งสองขนาดนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ในฟังก์ชันของสลิปในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

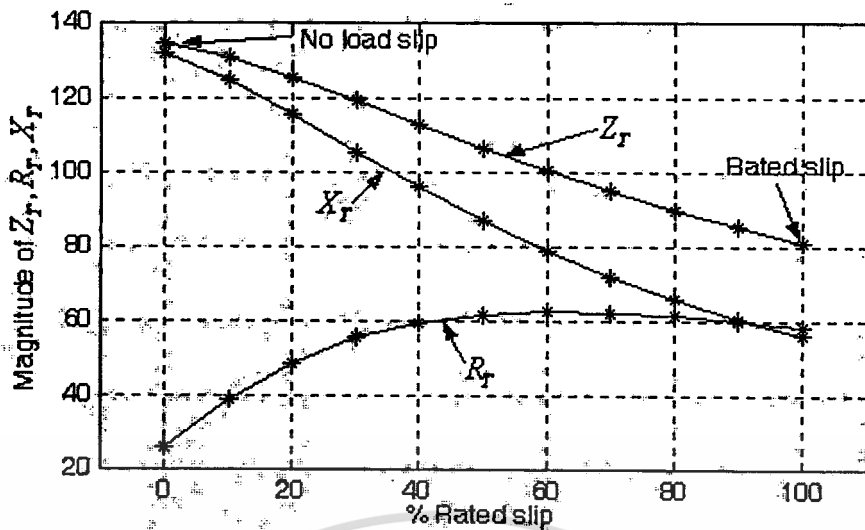
ลักษณะเดียวกัน แต่จะมีความแตกต่างก็ตรงขนาดของของอิมพีแดนซ์รวม Z_T ซึ่งจะได้เห็นองค์ประกอบที่จะแสดงได้ดังรูป 4.3 และ 4.4 ต่อไป



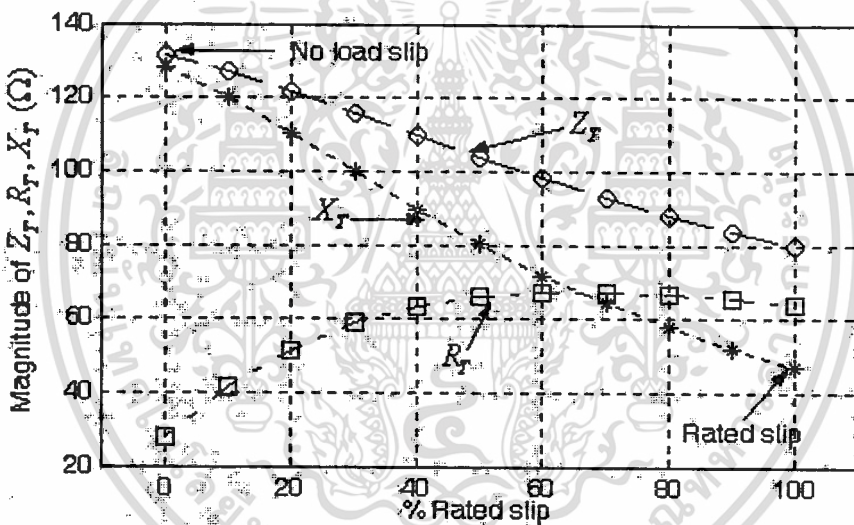
รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์รวม (Z_T) ของมอเตอร์ 1 แรงม้า



รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์รวม (Z_T) ของมอเตอร์ 2 แรงม้า

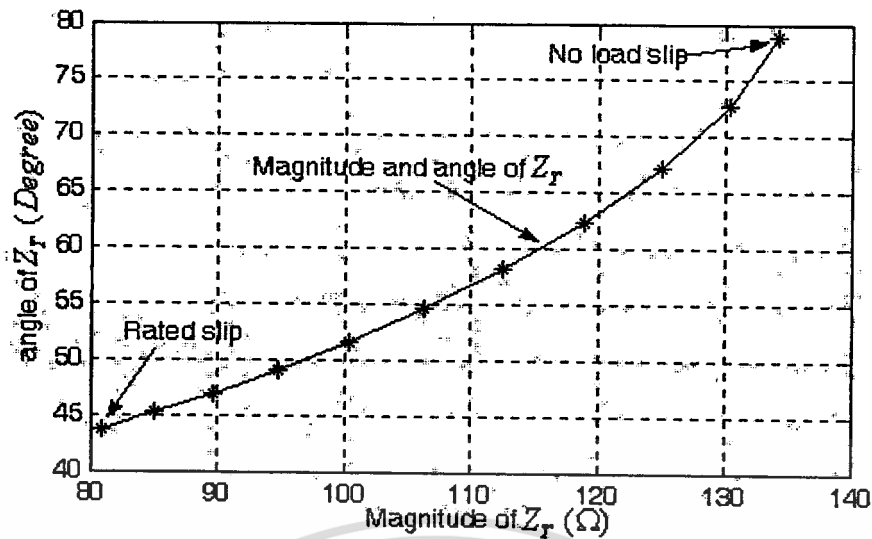


รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของ Z_r , R_r , X_r ของมอเตอร์ 1 แรงม้า

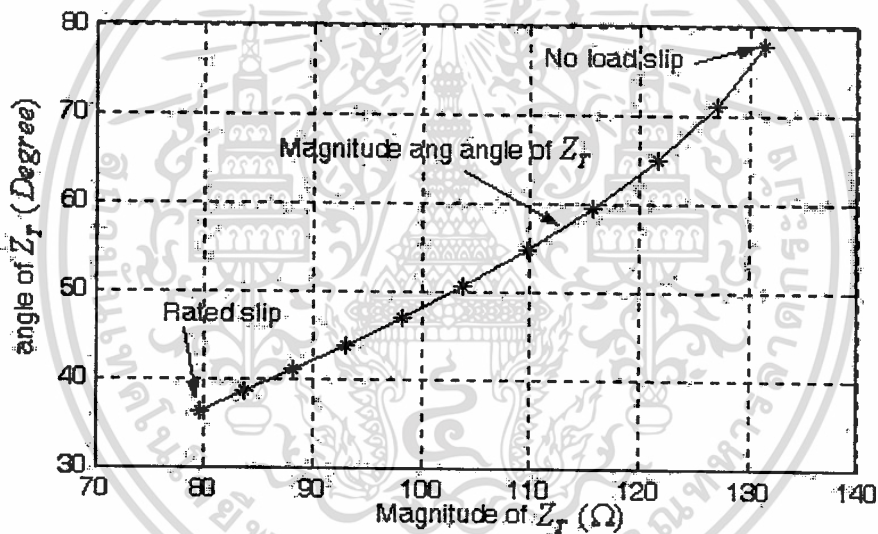


รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของ Z_r , R_r , X_r ของมอเตอร์ 2 แรงม้า

สำหรับการจำลองเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่า Z_r , X_r และค่า R_r ในฟังก์ชันของสลิป ในรูปที่ 4.3 ของมอเตอร์ 1 แรงม้า และรูปที่ 4.4 ของมอเตอร์ 2 แรงม้า จะพบว่าค่าต่างๆ ของมอเตอร์ทั้งสองขนาด ทั้งค่า X_r จะมีค่าลดลงจากสลิปเป็นศูนย์ถึงค่าสลิปพิกัด ส่วนค่า R_r จะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงหนึ่งจากสลิปเป็นศูนย์จนถึงประมาณ 50% ของสลิปพิกัดแล้วก็จะลดลงเพียงเล็กน้อยหรือเกือบจะคงที่ และค่า Z_r ก็จะมีค่าที่ลดลงจากสลิปเป็นศูนย์จนถึงค่าสลิปพิกัดด้วยเช่นเดียวกัน

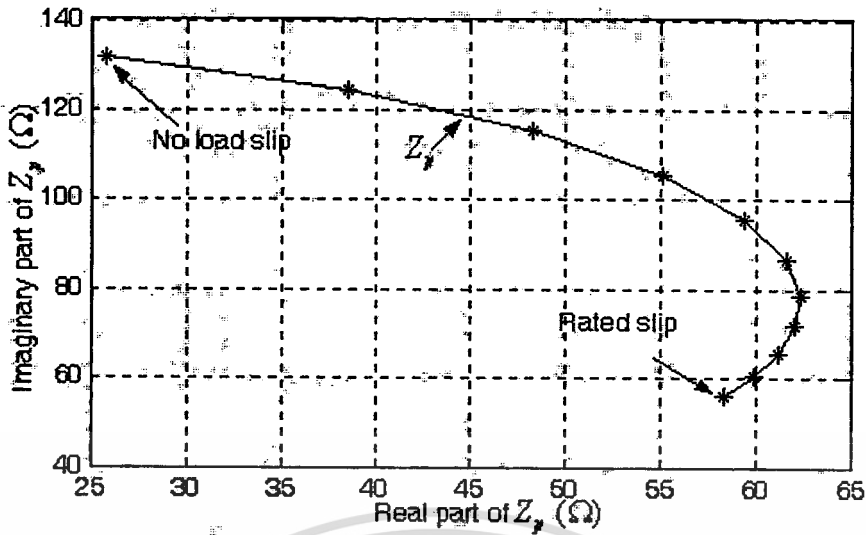


รูปที่ 4.5 ขนาดและมุมในอุดมคติของ Z_T ของมอเตอร์ 1 แรงม้า

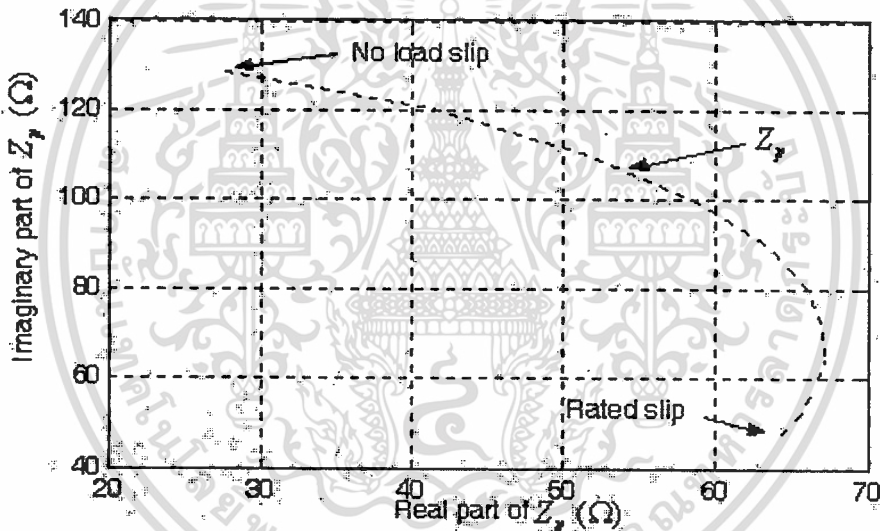


รูปที่ 4.6 ขนาดและมุมในอุดมคติของ Z_T ของมอเตอร์ 2 แรงม้า

จากรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 เป็นการแสดงค่าของขนาดและมุมในอุดมคติของอิมพีแดนซ์รวม Z_T ซึ่งมุมจะแสดงหน่วยเป็นองศา ซึ่งจะพบว่าขนาดและมุมของมันจะมีค่าลดลงจากสลิปเป็นศูนย์ จนถึงสลิปปกติ ซึ่งจากการจำลองจะพบว่ามอเตอร์ทั้งสองขนาดจะมีความแตกต่างกันทั้งขนาด และมุมเพียงเล็กน้อยเท่านั้นและมีแนวโน้มของเส้นกราฟในลักษณะเดียวกัน

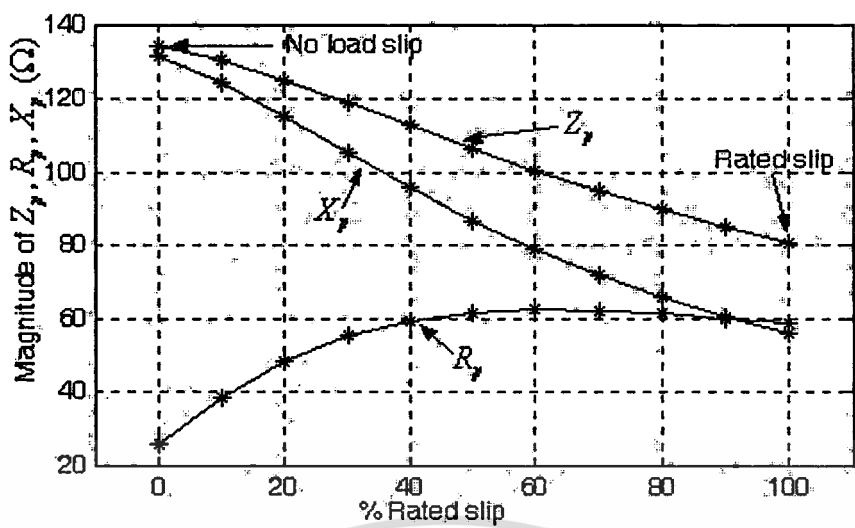


รูปที่ 4.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่า Z_p ของมอเตอร์ 1 แรงม้า

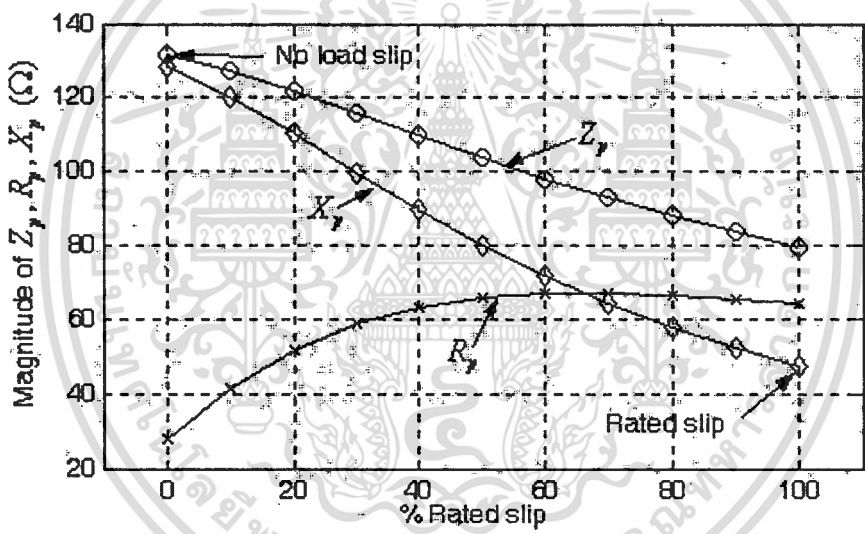


รูปที่ 4.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่า Z_p ของมอเตอร์ 2 แรงม้า

จากรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 เป็นการแสดงค่าของอิมพีแดนซ์ลำดับบวก (Z_p) ในอุดมคติของมอเตอร์ 1 แรงม้า และ 2 แรงม้าตามลำดับ ซึ่งแสดงในรูปของจำนวนเชิงซ้อน (Complex number) โดยค่าจริงเป็นค่าของ R_r และค่าเชิงซ้อนจะเป็นค่าของ X_r ซึ่งผลในการจำลองนั้นจะพบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่า Z_p จะมีค่าเท่ากับ Z_r ซึ่งจะหมายถึงค่าที่เรานำไปใช้งานโดยทั่วไป และในรูปที่ 4.9 และในรูปที่ 4.10 เป็นการแสดงค่าของการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบของอิมพีแดนซ์ลำดับบวก Z_p ซึ่งก็จะเหมือนกันกับการเปลี่ยนแปลงของค่าอิมพีแดนซ์ของ Z_r ซึ่งการเปลี่ยนแปลงไปของค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์ทั้งสองขนาดจะขึ้นอยู่กับค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าสลิป



รูปที่ 4.9 ค่า Z_p , R_p และ X_p ในอุดมคติของมอเตอร์ 1 แรงม้า

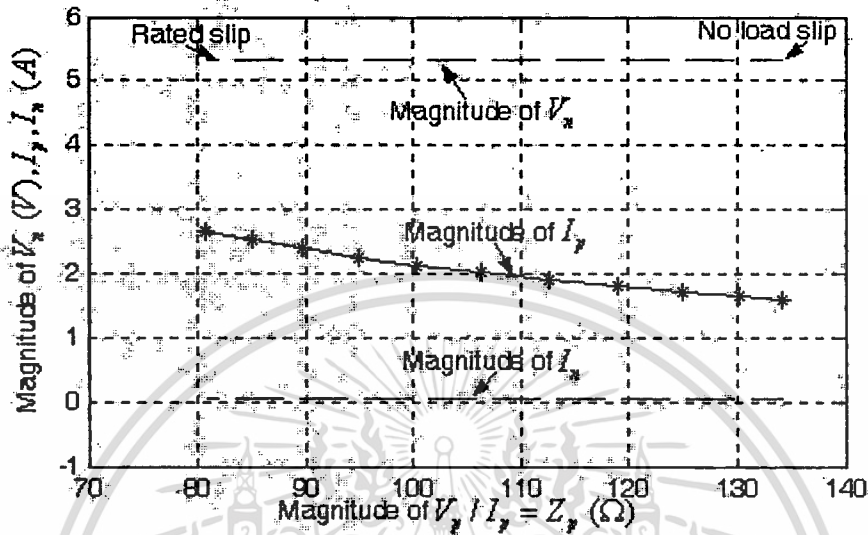


รูปที่ 4.10 ค่า Z_p , R_p และ X_p ในอุดมคติของมอเตอร์ 2 แรงม้า

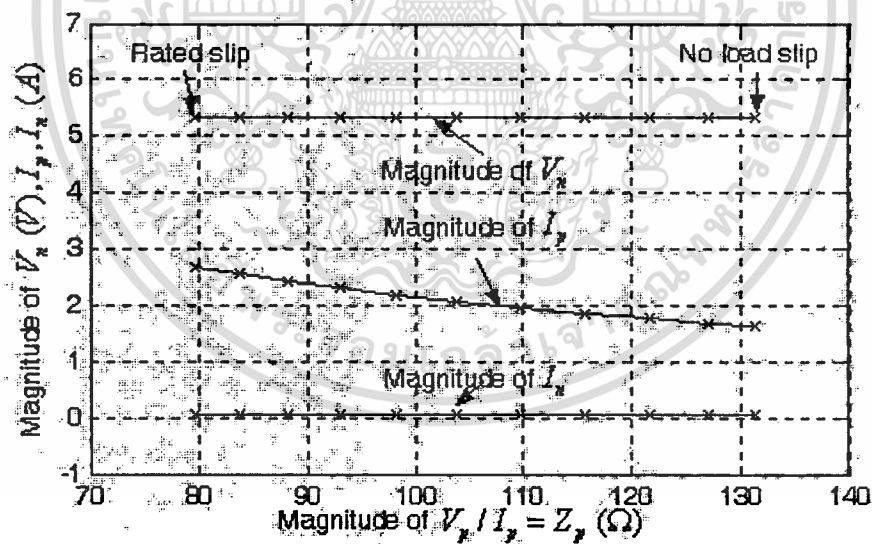
จากรูปที่ 4.11 ถึง 4.14 เป็นการแสดงค่าขนาดและมุมของ V_n , I_p และ I_n ของมอเตอร์ 1 แรงม้า และ มอเตอร์ 2 แรงม้าตามลำดับ ซึ่งในการจำลองนี้ไม่ได้นำค่านี้ไปใช้ในการคำนวณแต่เป็นการแสดงค่าไว้เพื่อทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองซึ่งจำเป็นต้องนำค่านี้ไปใช้ในการคำนวณหา Z_{np} ซึ่งจากรูปที่ 4.11 และ 4.12 จะพบว่าค่า V_n และ I_n ของการจำลองของมอเตอร์ทั้งสองขนาด จะมีค่าคงที่ตลอดค่าของการเปลี่ยนแปลงสลิป แต่สำหรับในการทดลองแล้วค่านี้จะมีการเปลี่ยนแปลงไม่เหมือนมอเตอร์ในอุดมคติ ส่วนค่า I_p จะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามสลิปและมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อพิจารณาจากค่าสลิปเป็นศูนย์จนถึงค่าสลิปพิคกที่อยู่ในฟังก์ชันของ $|Z_p|$ สำหรับในการทดลองต้องนำค่านี้เพื่อไปทำการประมาณค่าระหว่างเชิงเส้นที่อยู่ภายใต้ค่าสลิปเดียวกัน ส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

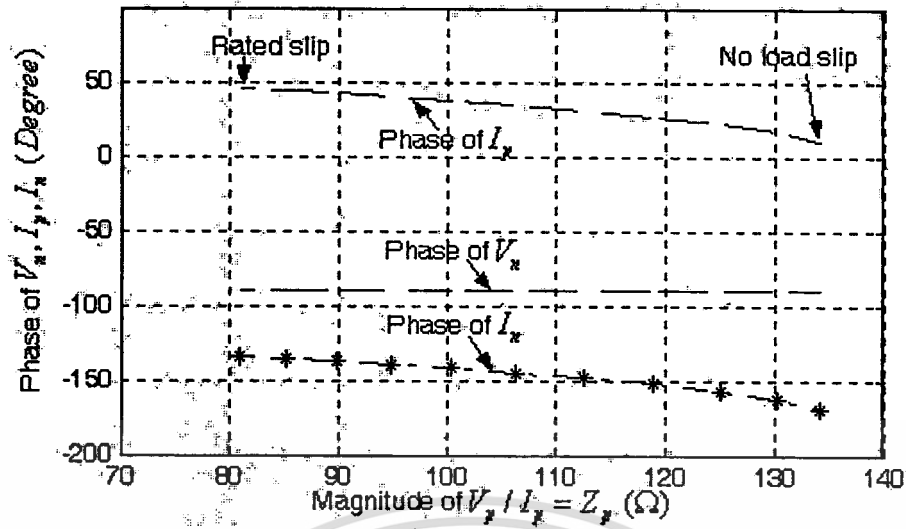
ในรูปที่ 4.13 และ 4.14 เป็นการแสดงค่าของมุมเฟสซึ่งดูจากรูปทั้งสองแล้วจะพบว่าค่ามุมของ V_n จะคงที่ของมอเตอร์ทั้งสองขนาด ส่วนค่าของ I_p และ I_n จะมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อค่าสลิปเปลี่ยนแปลงไป จากค่าสลิปเป็นศูนย์จนถึงค่าสลิปพิกัด



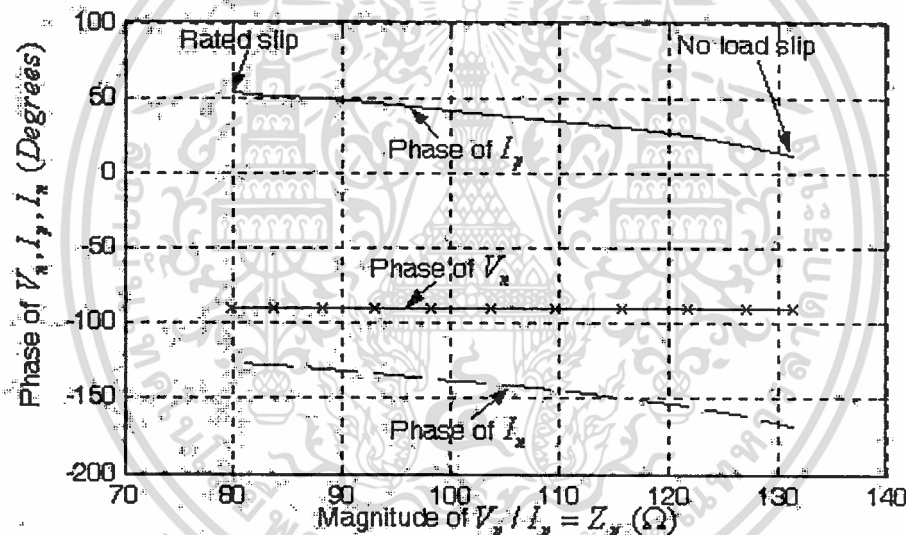
รูปที่ 4.11 ขนาดของ V_n , I_p และ I_n ฟังก์ชันของ $|Z_p|$ ที่แรงดันไม่สมดุลลดลง 5% มอเตอร์ 1 แรงม้า



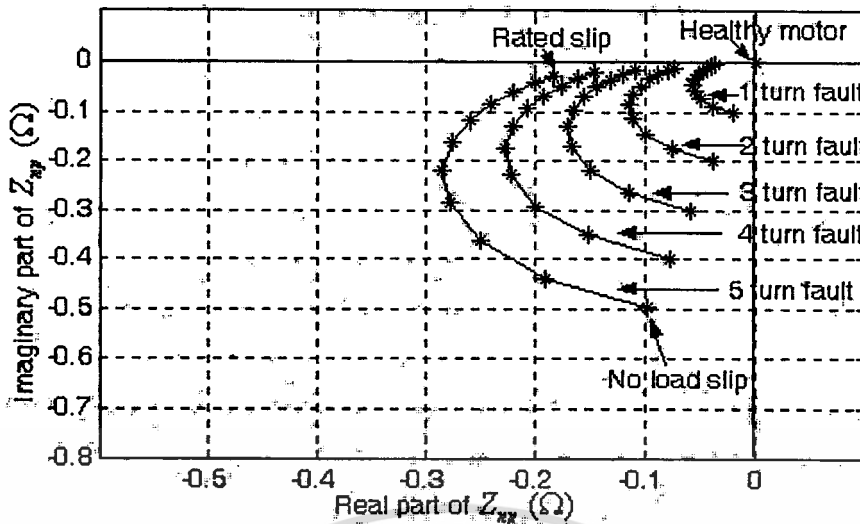
รูปที่ 4.12 ขนาดของ V_n , I_p และ I_n ฟังก์ชันของ $|Z_p|$ ที่แรงดันไม่สมดุลลดลง 5% มอเตอร์ 2 แรงม้า



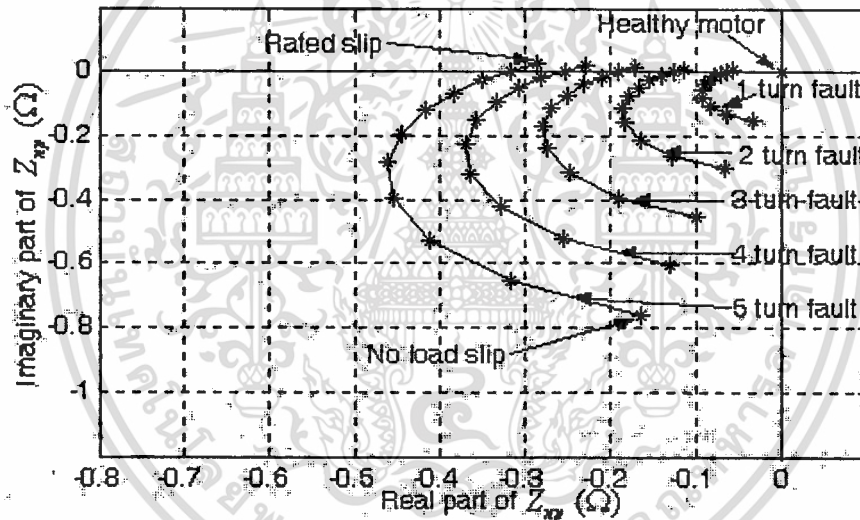
รูปที่ 4.13 มุมของ V_n, I_p และ I_n ฟังก์ชันของ $|Z_p|$ ที่แรงดันลดลง 5% ของมอเตอร์ 1 แรงม้า



รูปที่ 4.14 มุมของ V_n, I_p และ I_n ฟังก์ชันของ $|Z_p|$ ที่แรงดันลดลง 5% ของมอเตอร์ 2 แรงม้า



รูปที่ 4.15 ค่าของ Z_{np} ในอุดมคติที่ไม่มีค่าผิดพลาดจากการวัดของมอเตอร์ 1 แรงม้า

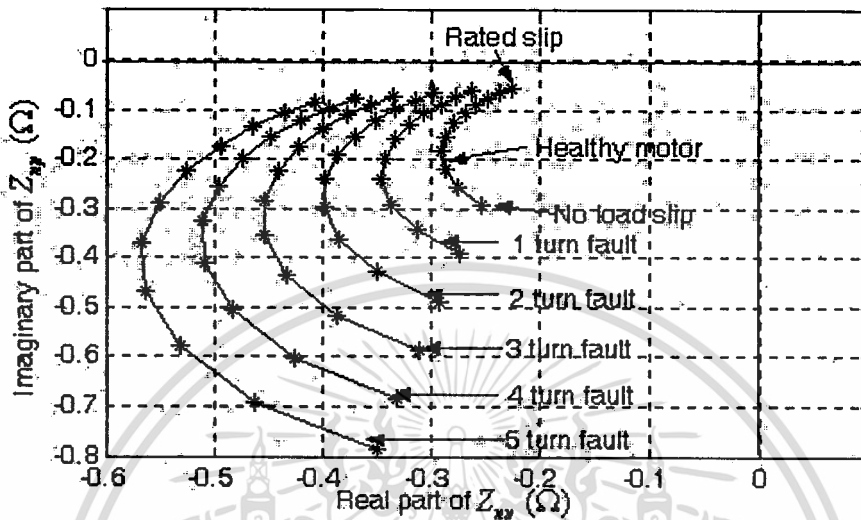


รูปที่ 4.16 ค่าของ Z_{np} ในอุดมคติที่ไม่มีค่าผิดพลาดจากการวัดของมอเตอร์ 2 แรงม้า

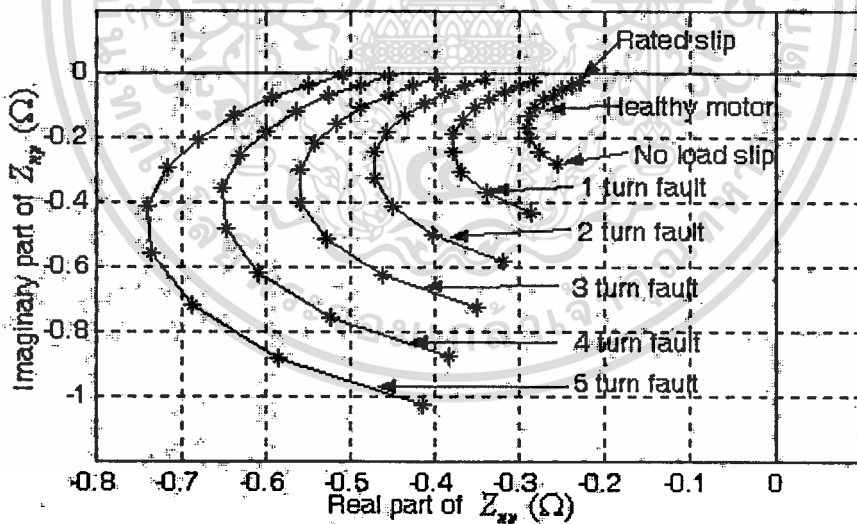
จากรูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16 เป็นการคำนวณค่า Z_{np} ที่เป็นค่าในการบ่งชี้ฟอลต์ที่เกิดจากการลัดรอบในอุดมคติของมอเตอร์ 1 แรงม้า และ 2 แรงม้าตามลำดับ ทั้งนี้ในการจำลองของมอเตอร์ 1 แรงม้าได้กำหนดให้ $n=1/440$ ถึง $5/440$ และมอเตอร์ 2 แรงม้า $n=1/282$ ถึง $5/282$ โดยใช้สมการที่ (3.10) เมื่อพิกัดสลิปมีค่าตั้งแต่ 0% ถึง 100% จากผลการจำลองจะพบว่าค่า Z_{np} ของมอเตอร์ทั้งสองขนาดจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามสลิป และมีค่าการเบี่ยงเบนเพิ่มขึ้นไปตามขนาดของฟอลต์ที่มีค่ามากขึ้นตามจำนวนของการลัดรอบ โดยที่ Z_{np} จะมีขนาดที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อจำนวนของการลัดรอบสูงขึ้นซึ่งจะสามารถนำมาทำการตรวจจับฟอลต์ที่เกิดจากการลัดรอบนี้ได้ และจะสังเกตจากการจำลองว่าค่าของ Z_{np} ของมอเตอร์ที่สมบูรณ์ (ไม่มีการลัดรอบ) จะมีค่าเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศูนย์และเป็นอิสระต่อค่าสลิป เนื่องจากเป็นมอเตอร์ในอุดมคติที่ถูกสมมุติขึ้น แต่ในความเป็นจริงแล้วค่านี้จะไม่เป็นศูนย์เมื่อทำการทดสอบจริง ซึ่งอาจมีหลายสาเหตุด้วยกัน ทั้งนี้ยังรวมถึงความแตกต่างในการออกแบบมอเตอร์แต่ละตัวอีกด้วย



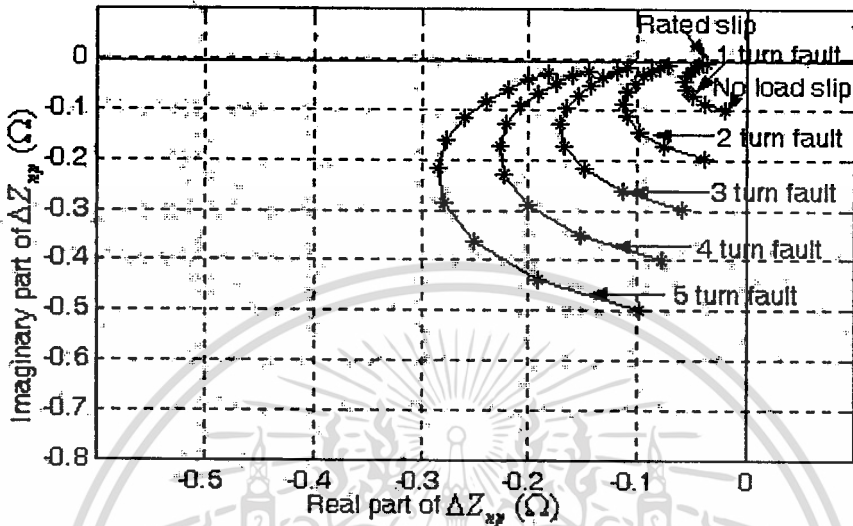
รูปที่ 4.17 ค่าของ Z_{np} ที่มีค่าผิดพลาดจากการวัดของมอเตอร์ 1 แรงม้า



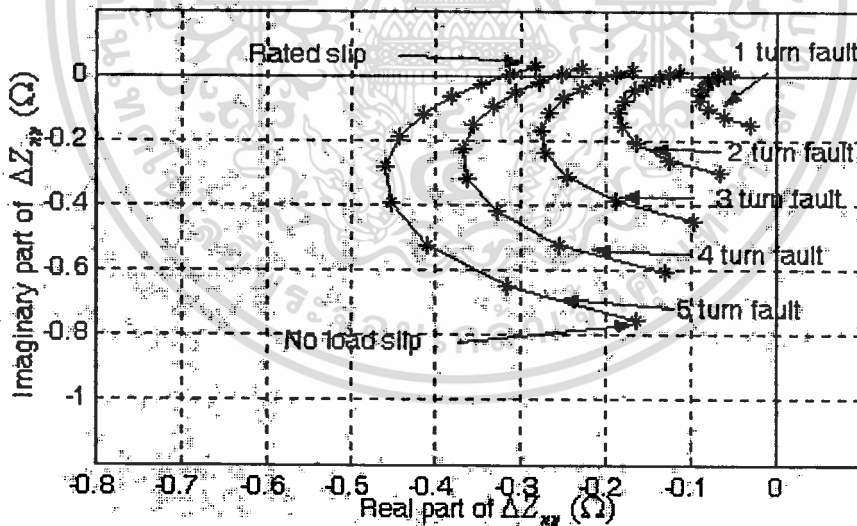
รูปที่ 4.18 ค่าของ Z_{np} ที่มีค่าผิดพลาดจากการวัดของมอเตอร์ 2 แรงม้า

จากข้อสังเกตดังกล่าวได้นำมาสู่การจำลองถึงข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้ โดยการกำหนดให้มีค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นตามที่กำหนดไว้แล้วใน i_{as} , i_{bs} , v_{ab} และ v_{bc} ในสมการที่ (3.12), (3.13) ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.17 และ 4.18 ของมอเตอร์ 1 แรงม้า และ 2 แรงม้าตามลำดับ ซึ่งจากผลการจำลองพบว่าค่าของ Z_{np} ที่ได้คำนวณในสมการที่ (3.14), (3.15) และ (3.16) ก็ะยังคงมีการเพิ่มขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามความรุนแรงของฟอลต์หรือจำนวนการลัดรอบ แม้ว่าจะเบี่ยงเบนไปจากเดิม เนื่องจากความผิดพลาดจากการวัดก็ตาม รวมถึงในกรณีของความไม่สมมาตรภายในไม่ว่าจะเกี่ยวกับโครงสร้างของตัวมอเตอร์เองก็เป็นสาเหตุของการเกิดค่าการเบี่ยงเบนนี้ได้เช่นเดียวกัน



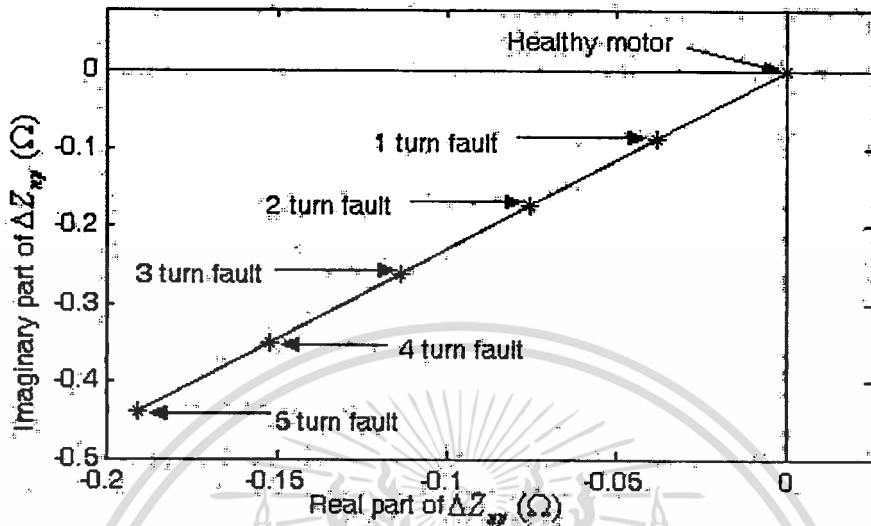
รูปที่ 4.19 ค่าของ ΔZ_{np} ในอุดมคติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า



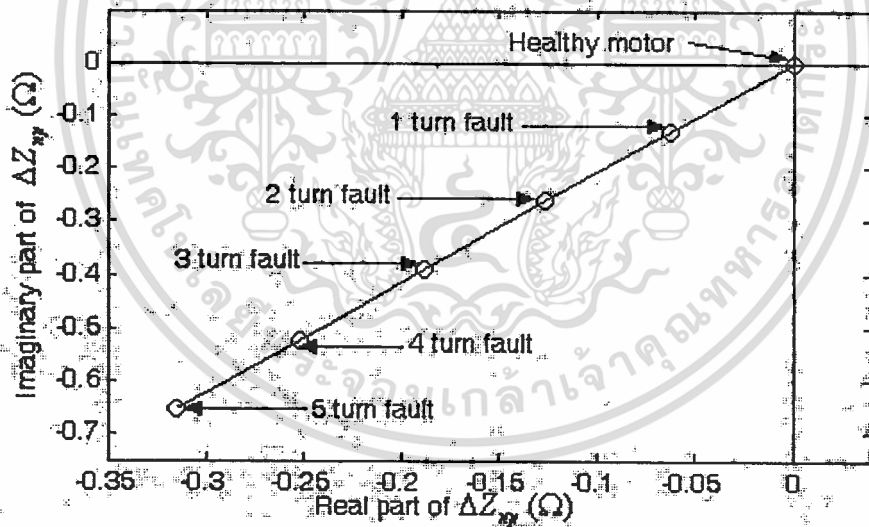
รูปที่ 4.20 ค่าของ ΔZ_{np} ในอุดมคติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 แรงม้า

สำหรับรูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.20 เป็นค่า ΔZ_{np} ของมอเตอร์ 1 แรงม้าและ 2 แรงม้าตามลำดับที่เกิดจากการนำค่า Z_{np0} ซึ่งเป็นค่าในกรณีที่มอเตอร์มีความสมบูรณ์ไม่มีการลัดรอบเกิดขึ้น แต่จะมีค่าขนาดเล็ก ๆ ค่าหนึ่งเป็นเพราะว่าเกิดจากความไม่สมมาตรภายในของตัวมอเตอร์ หรือว่าค่า

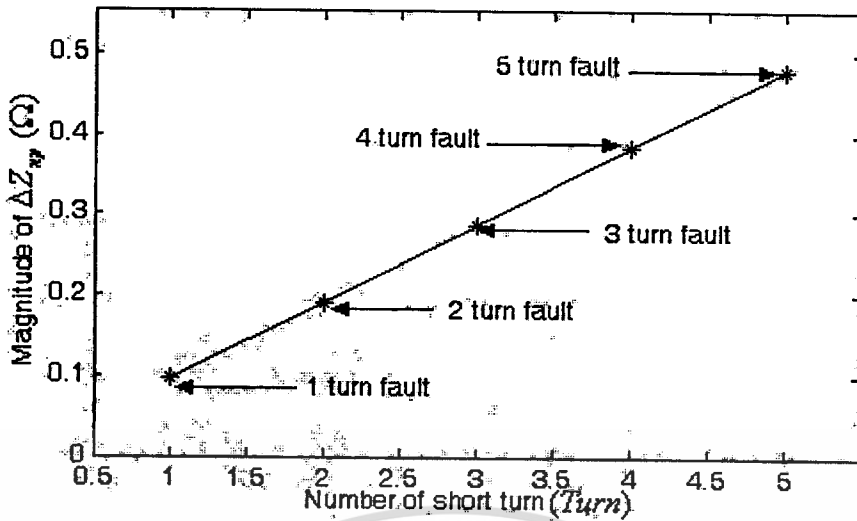
ผิดพลาดจากการวัด และแรงดันไม่สมดุล และค่าของ Z_{np} โดยใช้สมการที่ (3.3) ก็จะได้ฟอลต์ที่เกิดขึ้นภายใต้มอเตอร์ไม่สมมาตร



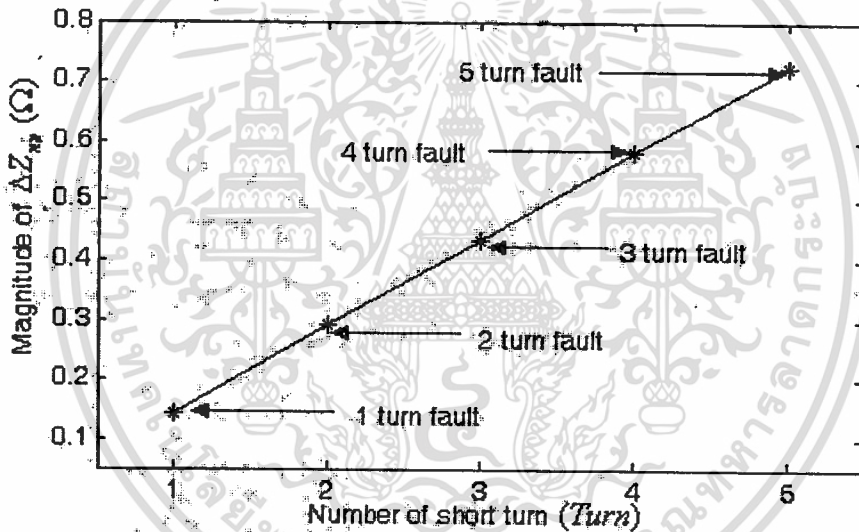
รูปที่ 4.21 แสดงค่า ΔZ_{np} ที่ใกล้ค่าสลิปเป็นศูนย์ของมอเตอร์ 1 แรงม้า



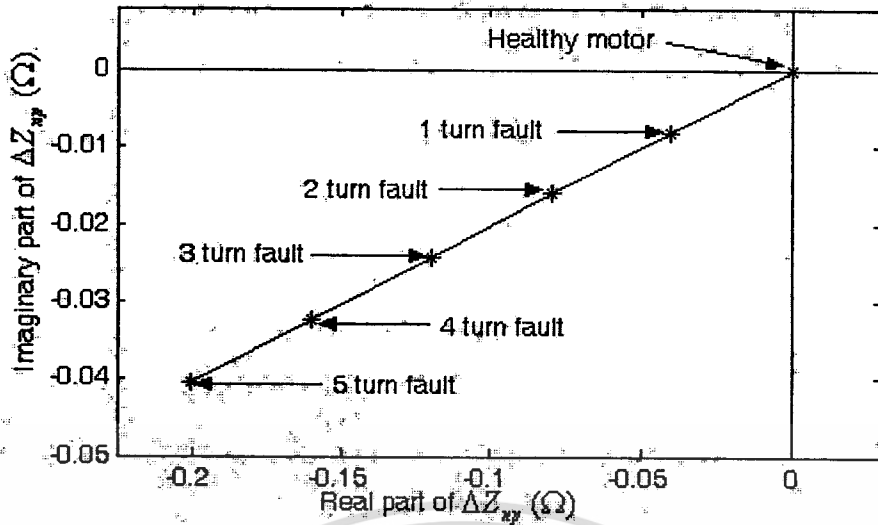
รูปที่ 4.22 แสดงค่า ΔZ_{np} ที่ใกล้ค่าสลิปเป็นศูนย์ของมอเตอร์ 2 แรงม้า



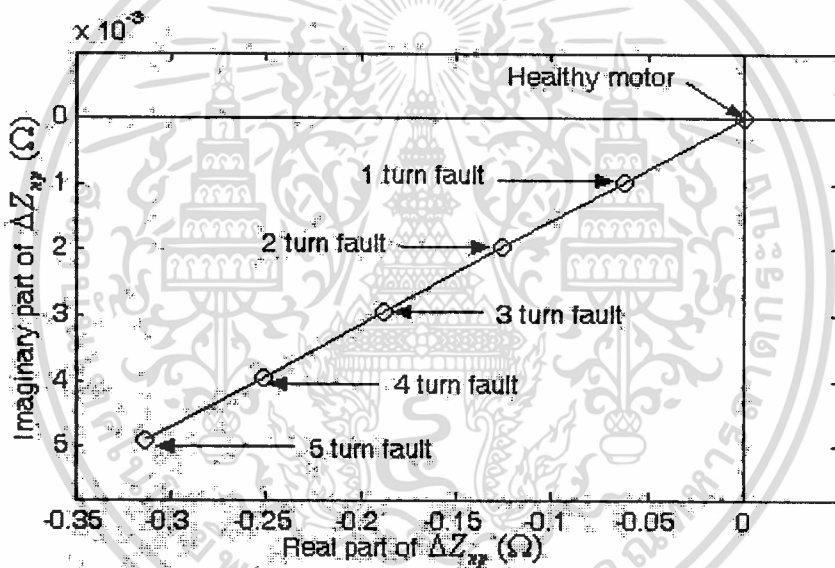
รูปที่ 4.23 แสดงค่า $|\Delta Z_{np}|$ ที่ใกล้ค่าสลิปเป็นศูนย์ของมอเตอร์ 1 แรงม้า



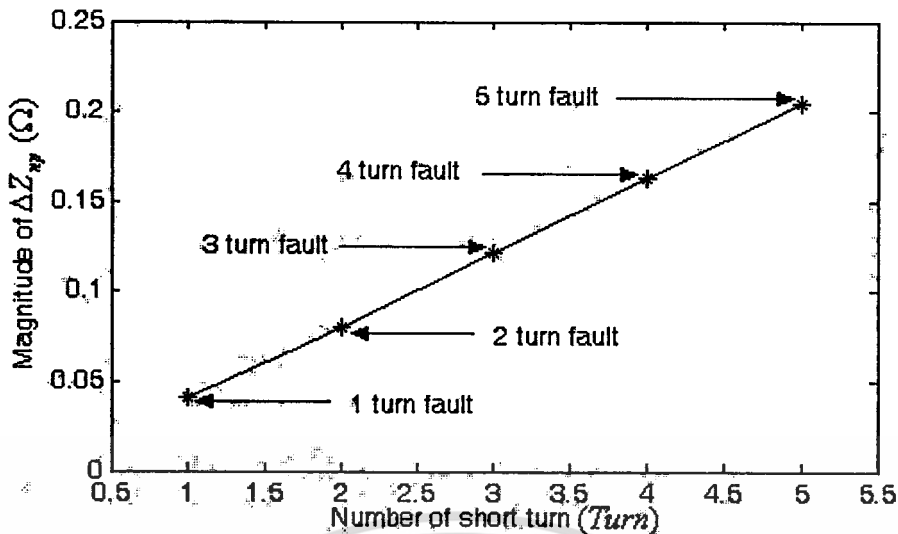
รูปที่ 4.24 แสดงค่า $|\Delta Z_{np}|$ ที่ใกล้ค่าสลิปเป็นศูนย์ของมอเตอร์ 2 แรงม้า



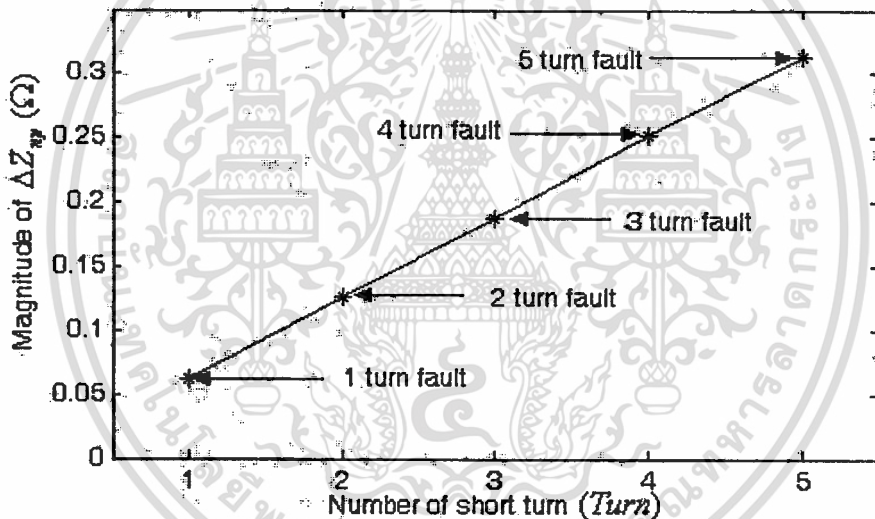
รูปที่ 4.25 แสดงค่า ΔZ_{np} ที่ใกล้ค่าสลิปพิกัดของมอเตอร์ 1 แรงม้า



รูปที่ 4.26 แสดงค่า ΔZ_{np} ที่ใกล้ค่าสลิปพิกัดของมอเตอร์ 2 แรงม้า



รูปที่ 4.27 แสดงค่า $|\Delta Z_{np}|$ ที่ใกล้ค่าสลิปพิกัดของมอเตอร์ 1 แรงม้า



รูปที่ 4.28 แสดงค่า $|\Delta Z_{np}|$ ที่ใกล้ค่าสลิปพิกัดของมอเตอร์ 2 แรงม้า

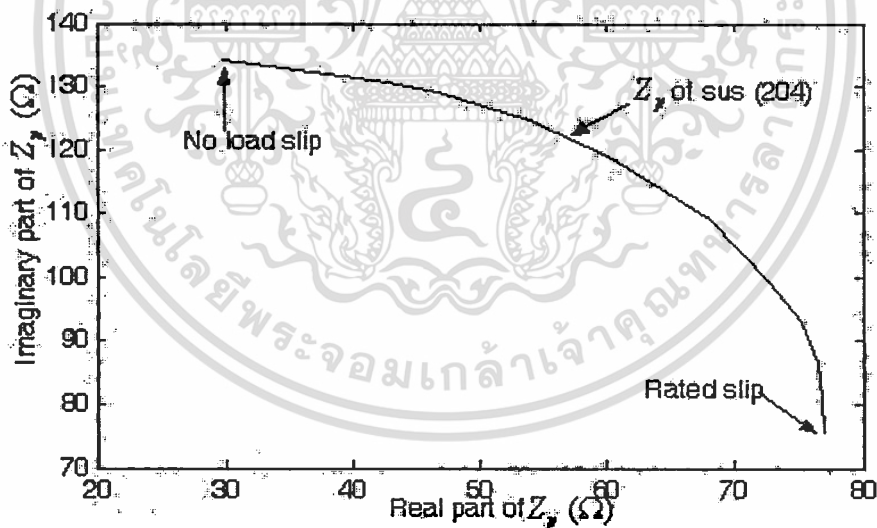
และจากรูปที่ 4.21 ถึง 4.28 เป็นการแสดงค่าของ ΔZ_{np} ที่ค่าใดๆของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า และมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้า โดยจากรูปที่กล่าวมานั้น ได้กำหนดไว้ในกรณีที่มีค่าใกล้สลิปเป็นศูนย์ และที่ใกล้ค่าสลิปพิกัด และการคำนวณของค่า ΔZ_{np} จะแสดงไว้ในระนาบคอมเพล็กซ์ ในรูปที่ 4.21 และ 4.22 ในกรณีที่มีค่าใกล้สลิปเป็นศูนย์ และในรูปที่ 4.25 และ 4.26 ในกรณีที่มีค่าใกล้สลิปพิกัด ซึ่งจากรูปสามารถแสดงให้เห็นว่าค่าของทั้งสองกรณีจะมีการเบี่ยงเบนออกจากค่ามอเตอร์ที่สมบูรณ์จะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับจำนวนการลัดรอบที่เพิ่มขึ้น และขนาดของ $|\Delta Z_{np}|$ จะแสดงไว้ในรูปที่ 4.23 และ 4.24 ในกรณีที่มีค่าใกล้สลิปเป็นศูนย์ และรูปที่ 4.27 และ 4.28 แสดงไว้ในกรณีที่มีค่าใกล้สลิปพิกัด ซึ่งจะสามารถสังเกตได้โดยรวมได้ทั้งสองกรณีของมอเตอร์ทั้งสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

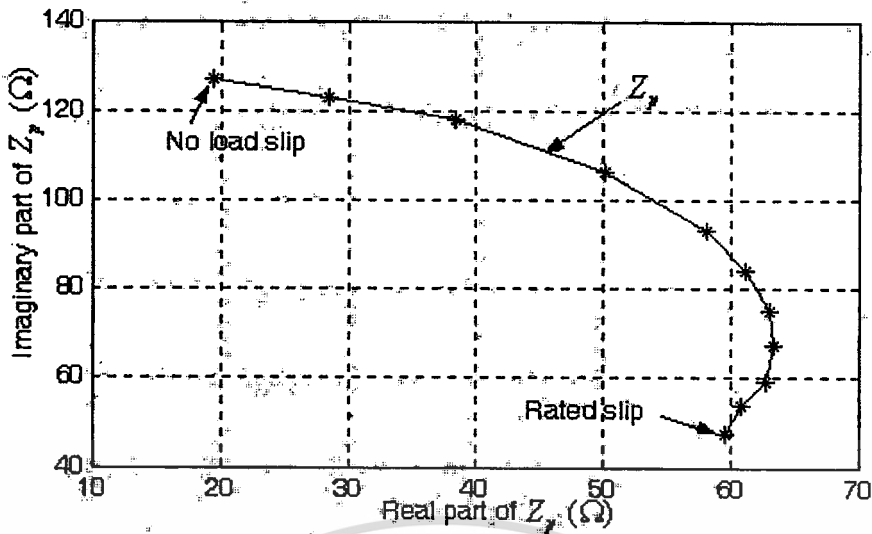
ขนาดว่า ค่านั้นจะมีการเพิ่มขึ้นตามจำนวนการลัดรอบที่เพิ่มขึ้นและสามารถที่จะแสดงให้เห็นว่าค่าของมันสามารถที่จะเป็นตัวชี้การเกิดฟอลต์ และระดับของสัญญาณเล็กๆของสัญญาณฟอลต์จากการลัดรอบ และสามารถที่จะถูกตรวจจับได้และอีกทั้งยังสามารถแสดงให้เห็นว่าขนาดของฟอลต์ที่เกิดขึ้นจากการลัดรอบนี้ จะมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในค่าสลิปที่แตกต่างกัน และถ้าสังเกตดูก็จะพบว่าความแตกต่างขนาดของ $|\Delta Z_{np}|$ ที่สลิปมีค่าใกล้สลิปเป็นศูนย์จะมีค่ามากกว่าขนาดของใกล้ค่าสลิปพิกัดและสามารถตรวจจับได้ง่ายกว่าเพราะมีค่าแตกต่างกันอย่างชัดเจน

4.3 ผลการทดลองของมอเตอร์ 1 แรงม้า และ 2 แรงม้า

ในกรณีของการทดลองนั้นจำเป็นต้องใช้แรงดันสมดุล และ แรงดันไม่สมดุลลดลง 5% สำหรับใช้เป็นแหล่งจ่ายแรงดันให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสซึ่งได้อธิบายในบทที่ 3 ซึ่งในการทดลองนั้นได้ใช้มอเตอร์ขนาด 2 พิกัด เพื่อจะเปรียบเทียบแนวโน้มของค่าที่ได้จากการทดลอง ซึ่งจะไม่เน้นในการเปรียบเทียบค่าใดๆ แต่จะเน้นถึงแนวโน้มของรูปกราฟมากกว่าเพราะการตรวจจับฟอลต์ที่เกิดขึ้นนั้น ได้ทำในมอเตอร์แต่ละตัวที่มีความแตกต่างกัน ทั้งขนาดและโครงสร้าง รวมถึงความไม่สมมาตรภายใน และสภาพความสมบูรณ์ของมอเตอร์ในแต่ละตัวอีกด้วย

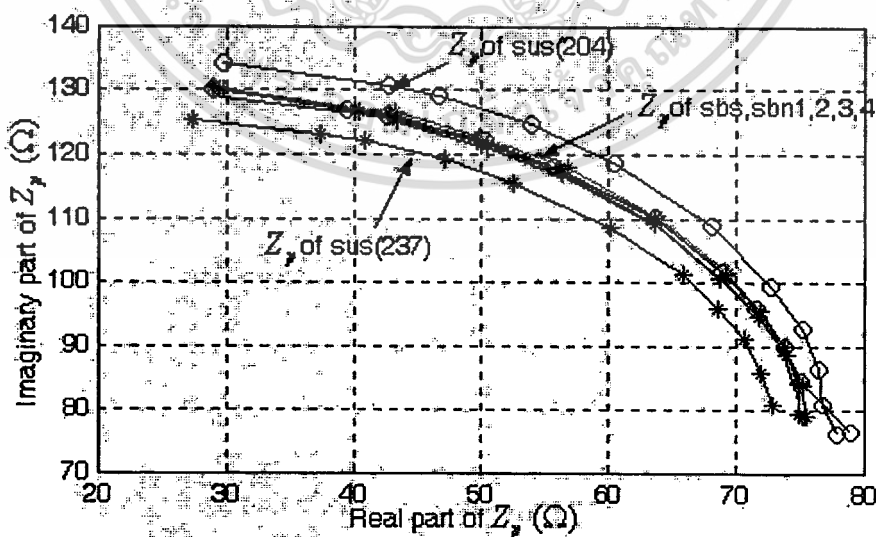


รูปที่ 4.29 แสดงค่า Z_p ที่แรงดันไม่สมดุลลดลง 5% ของมอเตอร์ 1 แรงม้า



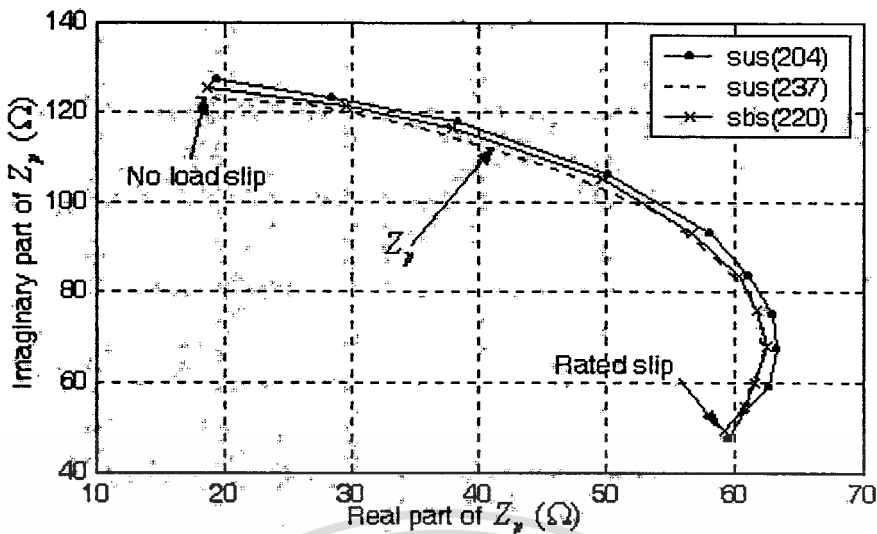
รูปที่ 4.30 แสดงค่า Z_p ที่แรงดันไม่สมดุลลดลง 5 % ของมอเตอร์ 2 แรงม้า

จากรูปที่ 4.29 และ 4.30 เป็นการแสดงค่าของ Z_p ในการทดลองของมอเตอร์ 1 แรงม้า และ 2 แรงม้า ของแรงดันไม่สมดุลลดลง 5% โดยใช้สัญลักษณ์แทนด้วย $S_u(s)$ (204) ที่ได้อธิบายไว้ในตารางที่ 4.1 ซึ่งจากรูปทั้งสองของมอเตอร์ทั้งสองขนาดจะพบว่าค่าของ Z_p จะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามค่าสลิปที่เปลี่ยนแปลงไปจากค่าสลิปที่เป็นศูนย์จนถึงค่าสลิปพิกัด และมีค่าลดลงในลักษณะเป็นเส้นโค้งตามการเปลี่ยนแปลงของสลิปจากค่าศูนย์จนถึงค่าพิกัดสลิป ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนั้นก็น่าจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างและการออกแบบของมอเตอร์ในแต่ละตัวรวมถึงค่าที่ผิดพลาดจากการวัดด้วย



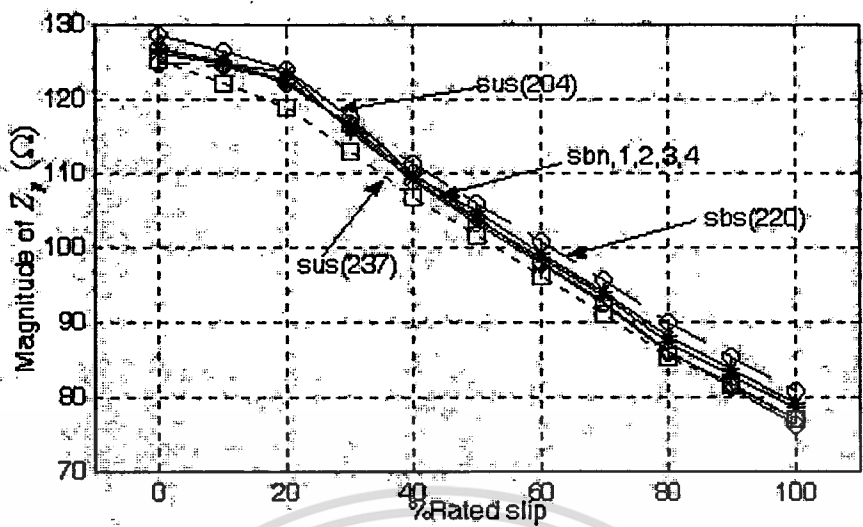
รูปที่ 4.31 ค่าของ Z_p ที่แรงดันสมดุล, ไม่สมดุลลดลง 5%, เพิ่มขึ้น 5% และแรงดันในขณะลัดรอบ (1 รอบ ถึง 4 รอบ) ของมอเตอร์ 1 แรงม้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

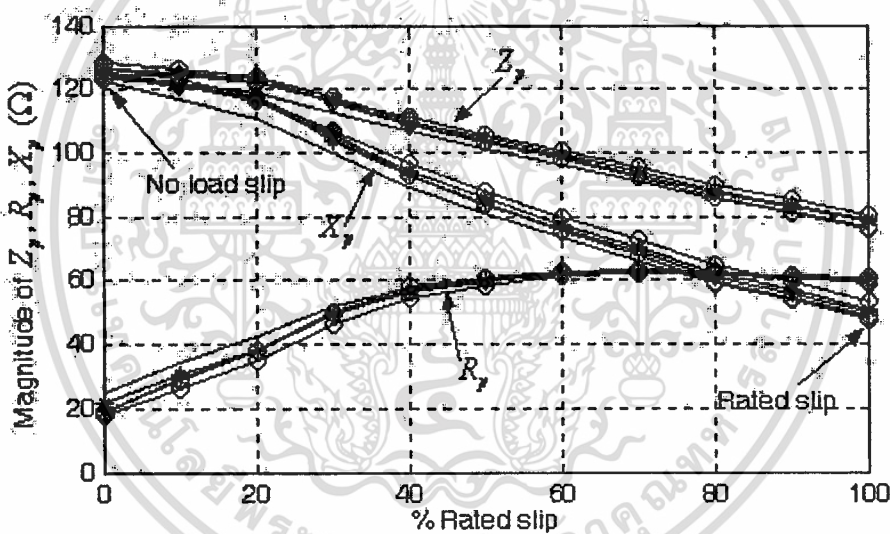


รูปที่ 4.32 แสดงค่า Z_p ที่แรงดันสมดุล, ไม่สมดุลลดลง 5%, เพิ่มขึ้น 5% ของมอเตอร์ 2 แรงม้า

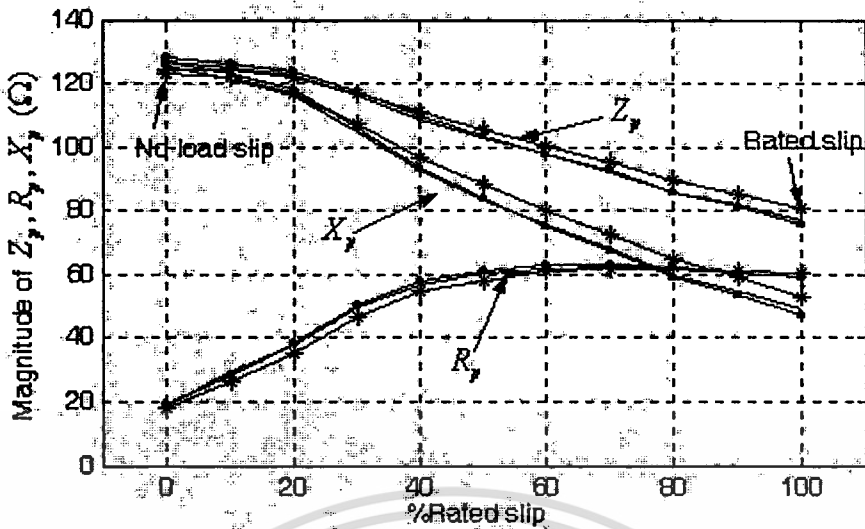
จากรูปที่ 4.31 ของมอเตอร์ 1 แรงม้าเป็นการแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า Z_p ในระนาบคอมเพล็กซ์ ที่สภาวะแรงดันต่างๆกันซึ่งจากรูปจะพบค่าของ Z_p ของแรงดันที่สภาวะต่างๆจะมีความแตกต่างกันแต่จะมีค่าของ Z_p ในกรณีที่มีการลัดรอบเกิดขึ้นจะมีค่าที่ใกล้เคียงกับแรงดันสมดุลเมื่อดูจากกราฟแต่ความจริงจะมีค่าน้อยกว่า โดยที่จะมีค่าน้อยลงไปเรื่อยๆเมื่อการลัดรอบมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจะนำค่าที่ได้ไปทำการประมาณค่าระหว่างเชิงเส้น กับแรงดันไม่สมดุลลดลง 5% $S_d(s)$ (204) เพื่อทำการหาค่าเพื่อนำไปตรวจจับหาฟอลต์ที่เกิดจากการลัดรอบตามที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 และในรูปที่ 4.32 ของมอเตอร์ 2 แรงม้า เป็นการแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า Z_p ในระนาบคอมเพล็กซ์ ที่สภาวะแรงดันต่างๆกันเช่นเดียวกันซึ่งจากรูปจะพบค่าของ Z_p ของแรงดันที่สภาวะต่างๆ จะมีการเปลี่ยนแปลงมีลักษณะเป็นเส้นโค้งลดลงจากค่าสลิปเป็นศูนย์จนถึงค่าสลิปพิกัดซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าค่า Z_p จะมีค่าที่แตกต่างกันในระดับแรงดันต่างๆทั้งมอเตอร์ทั้งสองขนาด และในรูปที่ 4.33 เป็นการแสดงขนาดของ $|Z_p|$ ที่แรงดันในสภาวะต่างๆกันของมอเตอร์ 2 แรงม้า รวมถึงค่า $|Z_p|$ ที่เกิดจากแรงดันของการลัดรอบด้วยซึ่งจะนำไปหาค่าของ Z_{np} เพื่อตรวจจับฟอลต์ที่เกิดจากการลัดรอบ



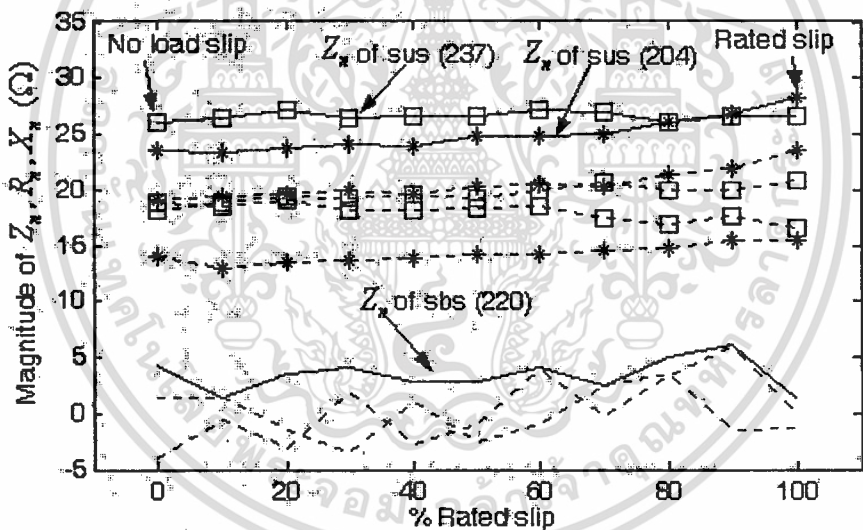
รูปที่ 4.33 แสดงขนาด $|Z_p|$ ที่สภาวะของระดับระดับต่าง ๆ ของมอเตอร์ 2 แรงม้า



รูปที่ 4.34 ค่าของ Z_p , R_p และ X_p ที่แรงดันสมดุล, ไม่สมดุลลดลง 5%, เพิ่มขึ้น 5% และแรงดันในขณะลัดรอบ (1 รอบ ถึง 4 รอบ) ของมอเตอร์ 1 แรงม้า



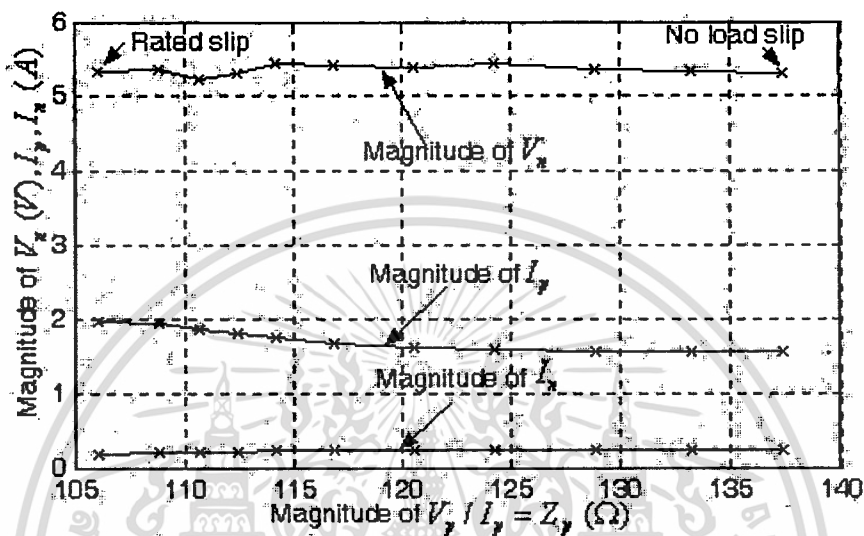
รูปที่ 4.35 แสดงค่า Z_p , R_p และ X_p ที่แรงดันสมมูล, ไม่สมมูลลดลง 5%, เพิ่มขึ้น 5% ของมอเตอร์ 2 แรงม้า



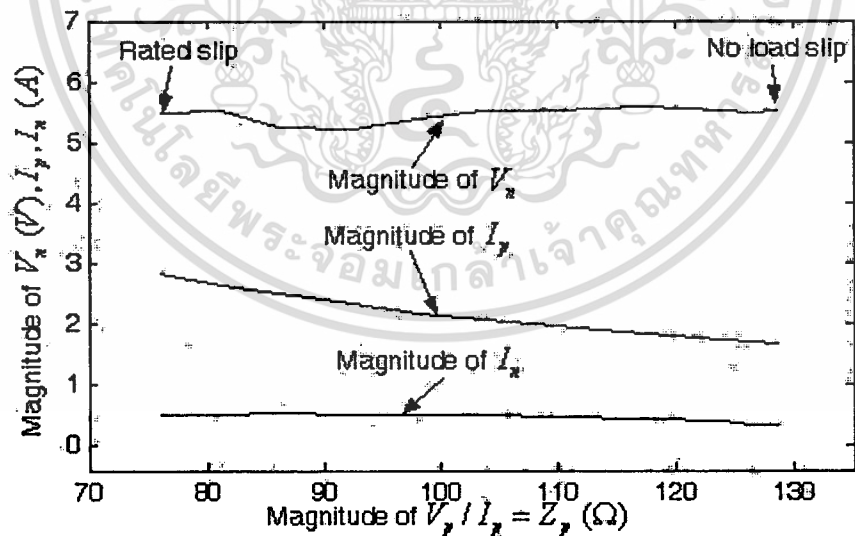
รูปที่ 4.36 ค่าของ Z_s , R_s และ X_s ที่สภาวะของแรงดันสมมูล, ไม่สมมูลลดลง 5% และเพิ่มขึ้น 5% ของมอเตอร์ 1 แรงม้า

จากรูปที่ 4.34 และ 4.35 เป็นการแสดงค่าของอิมพีแดนซ์ลำดับบวก Z_p , R_p และ X_p ของมอเตอร์ทั้งสองขนาด โดยจะพบว่าค่าของ Z_p , X_p จะมีค่าเปลี่ยนแปลงเหมือนกับค่าที่ได้จากการจำลองโดยจะมีค่าลดลงจากค่าสลิปเป็นศูนย์จนถึงค่าสลิปวิกฤต และ R_p จะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงค่าสลิปค่าหนึ่งเกือบคงที่แล้วก็จะมีการลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อถึงสลิปวิกฤต และรูปที่ 4.34 จะมีค่าของแรงดันในขณะลัดรอบ (1 รอบ ถึง 4 รอบ) รวมอยู่ด้วย ซึ่งจะเห็นเพียงว่าค่าของอิมพีแดนซ์จะมีลักษณะของการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกันกับกรณีของแรงดันที่มอเตอร์มีความเอกสาร์เป็นเอกสาร์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

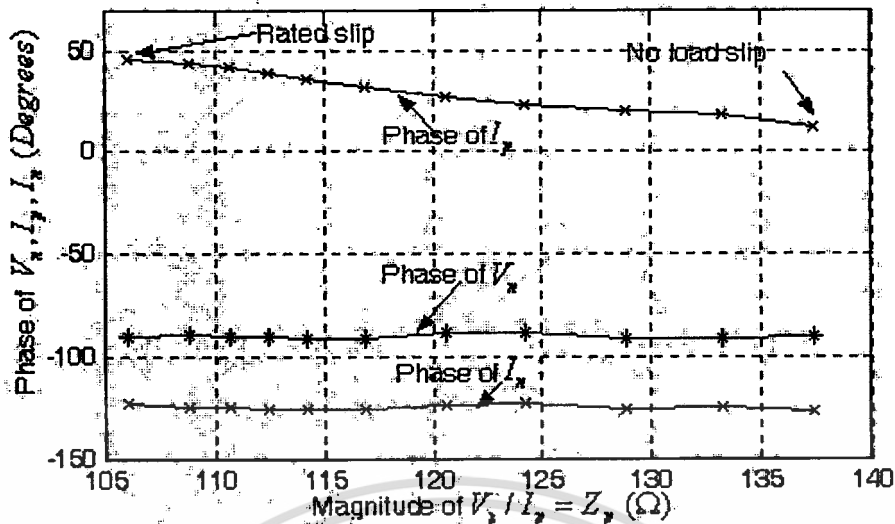
สมบูรณ์ และในรูปที่ 4.36 เป็นค่าของอิมพีแดนซ์ลำดับลบ Z_n, R_n และ X_n ของมอเตอร์ 1 แรงม้า เพื่อแสดงให้เห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์ของมันจะมีค่าเกือบคงที่ หรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากจากสลิปเป็นศูนย์จนถึงค่าสลิปพิกัดเมื่อเปรียบเทียบกับอิมพีแดนซ์ลำดับบวก และเมื่อสังเกตจะพบว่าค่าของอิมพีแดนซ์ลำดับลบนั้นจะมีค่าแตกต่างกันในระดับแรงดันที่แตกต่างกัน



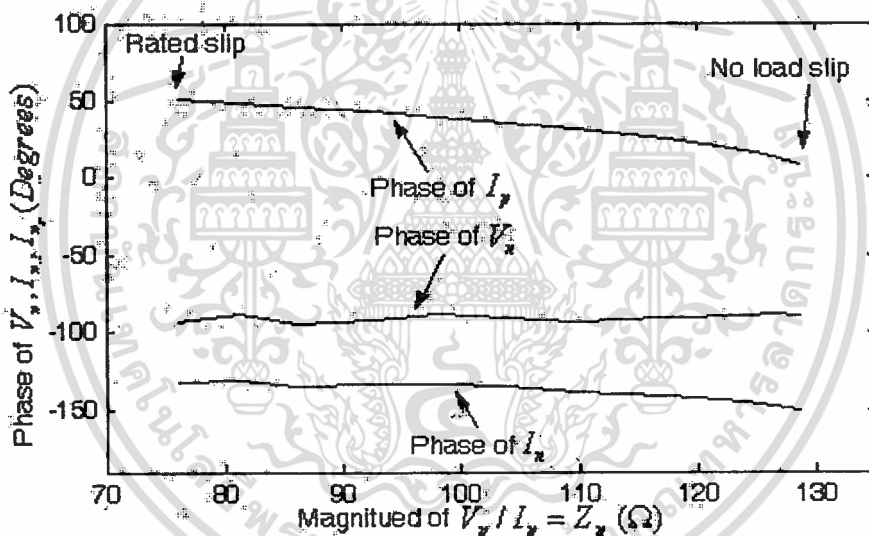
รูปที่ 4.37 ขนาด V_n, I_p และ I_n ฟังก์ชันของ $|Z_p|$ ที่แรงดันไม่สมดุลลดลง 5% ของมอเตอร์ 1 แรงม้า



รูปที่ 4.38 ขนาด V_n, I_p และ I_n ฟังก์ชันของ $|Z_p|$ ที่แรงดันไม่สมดุลลดลง 5 % ของมอเตอร์ 2 แรงม้า



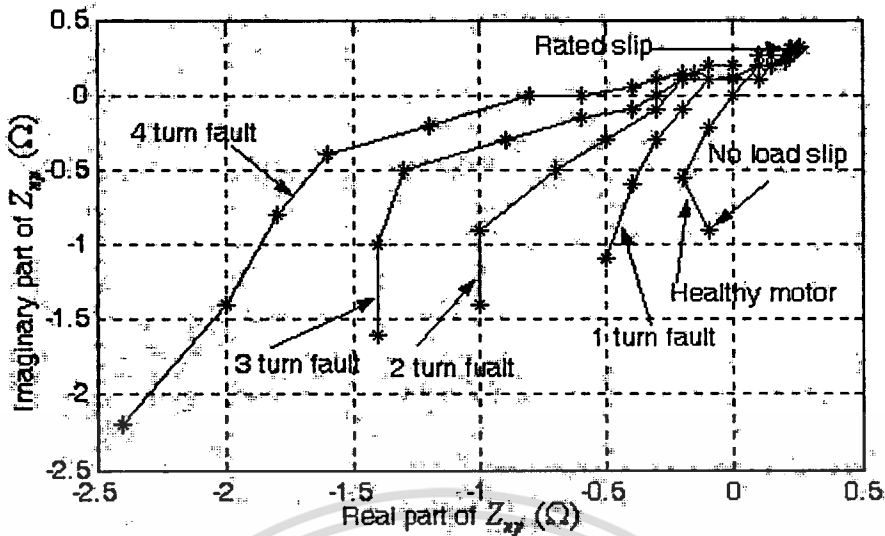
รูปที่ 4.39 มุม V_n, I_p และ I_n ฟังก์ชันของ $|Z_p|$ ที่แรงดันไม่สมดุลลดลง 5 % ของมอเตอร์ 1 แรงม้า



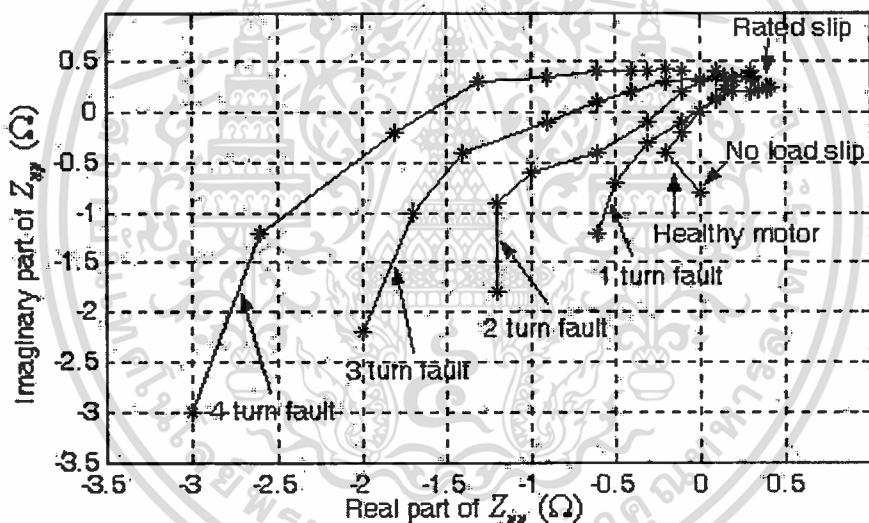
รูปที่ 4.40 มุม V_n, I_p และ I_n ฟังก์ชันของ $|Z_p|$ ที่แรงดันไม่สมดุลลดลง 5 % ของมอเตอร์ 2 แรงม้า

จากรูปที่ 4.37 ถึง 4.40 เป็นการแสดงขนาดและมุมเฟสของแรงดันลำดับลบ กระแสลำดับลบ และกระแสลำดับบวก ในฟังก์ชันของ $|Z_p|$ ที่ระดับแรงดันไม่สมดุลลดลง 5% ของมอเตอร์ทั้งสอง ขนาด โดยที่ค่าเหล่านี้จะทำการจัดเก็บไว้เพื่อนำมาใช้ในการทำการประมาณค่าระหว่างเชิงเส้น เพื่อหาค่าของ $S_u(n)$ จากค่า $S_b(n)$ ในฟังก์ชันของ $|Z_p|$ ภายใต้ค่าสลิปเดียวกัน เพื่อทำการนำมาหาค่าของ Z_{mp} ซึ่งจะพบว่าค่าที่ได้จากการทดลองจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการจำลอง แต่จะมีค่าผิดพลาดจากการวัดเกิดขึ้นก็จะเห็นว่าเส้นจะมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น คือมีลักษณะที่ขึ้นๆลงๆ ตามค่าผิดพลาดที่วัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.41 ค่า Z_{np} ของมอเตอร์ 1 แรงม้า

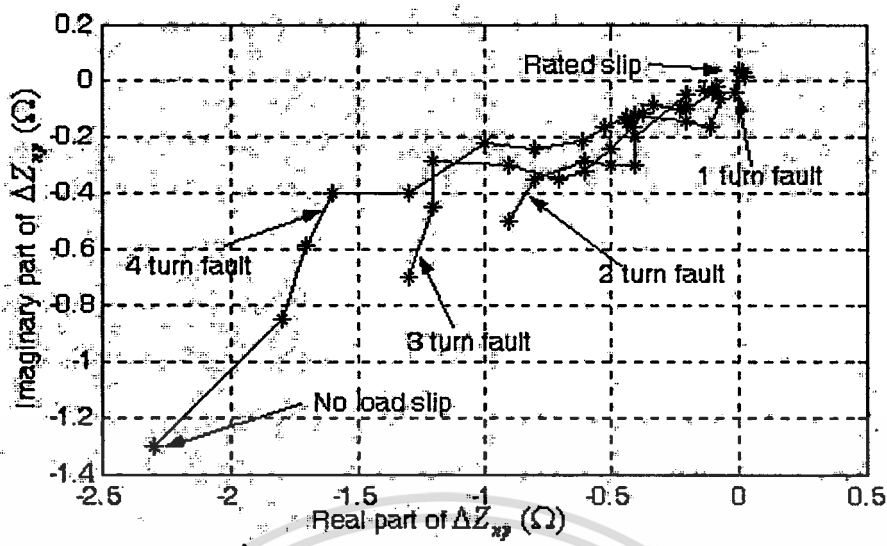


รูปที่ 4.42 ค่าของ Z_{np} ของมอเตอร์ 2 แรงม้า

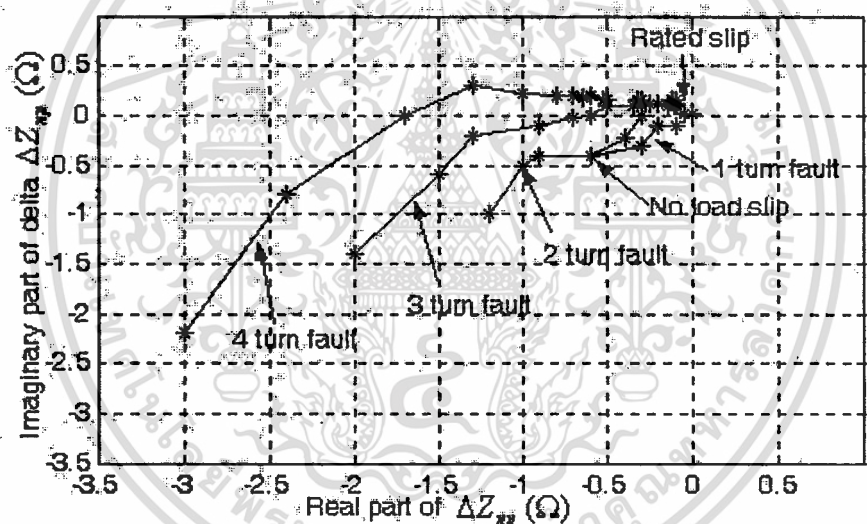
จากรูปที่ 4.41 และ 4.42 เป็นการแสดงค่าของ Z_{np} ของมอเตอร์ 1 แรงม้า และมอเตอร์ 2 แรงม้าที่ได้จากการทดลองในกรณีที่เกิดฟอลต์จากการลัดรอบ ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าค่าของ Z_{np} ของมอเตอร์ทั้งสองจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามค่าสลิปเป็นศูนย์จนถึงค่าสลิปปกติ และขนาดของฟอลต์ที่มีค่ามากขึ้นตามจำนวนของการลัดรอบ โดย Z_{np} จะมีวงรีที่มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนของการลัดรอบเพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟจำลองแล้วจะพบว่าค่าของ Z_{np} ที่ทดลองได้นั้นจะมีค่าผิดพลาดมาก สังเกตได้จากค่าของ Z_{np0} ของมอเตอร์ที่ได้ทำการทดสอบในสภาวะสมบูรณ์จะมีค่าเกิดขึ้นก็เนื่องจากค่าผิดพลาดจากการวัดรวมถึงความไม่สมมาตรภายในตัวมอเตอร์เองแต่ในการจำลองของมอเตอร์ในอุดมคติค่า Z_{np0} จะมีค่าเป็นศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

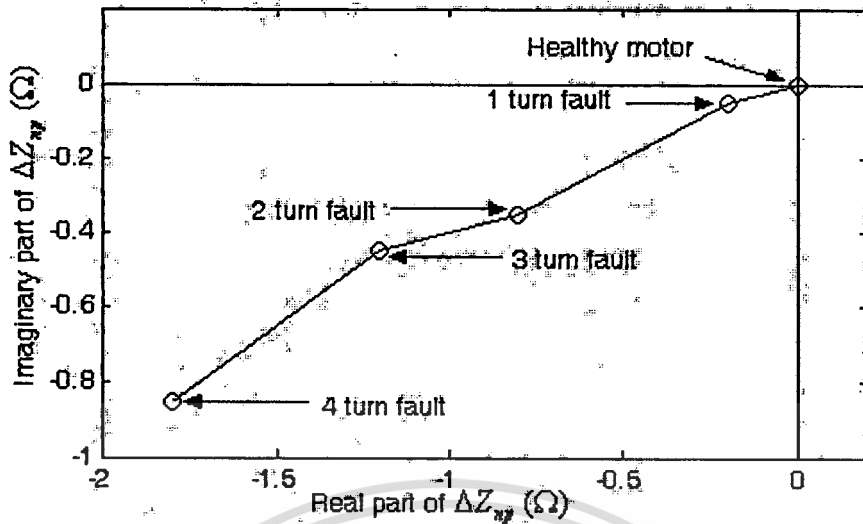


รูปที่ 4.43 ค่าของ ΔZ_{np} ของมอเตอร์ 1 แรงม้า

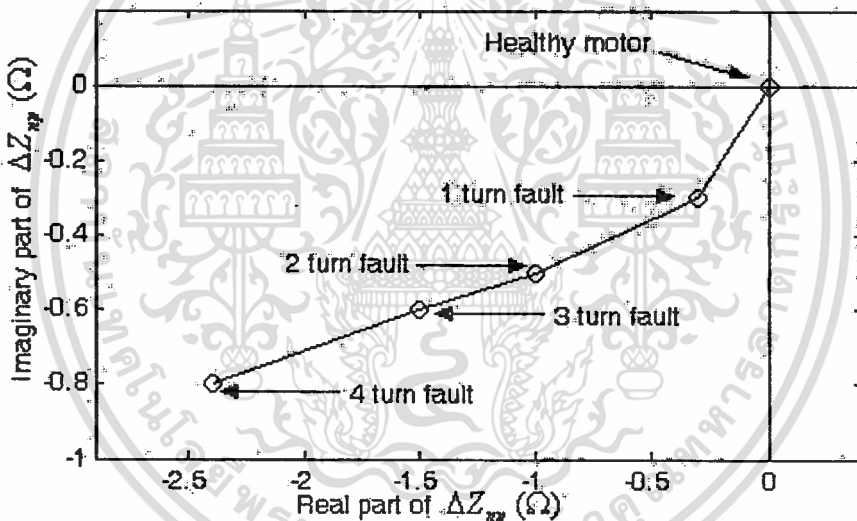


รูปที่ 4.44 ค่าของ ΔZ_{np} ของมอเตอร์ 2 แรงม้า

และจากรูปที่ 4.43 และ 4.44 เป็นค่าของ ΔZ_{np} ของมอเตอร์ 1 แรงม้าและ 2 แรงม้าตามลำดับ ที่เกิดจากการนำค่า Z_{np0} ซึ่งเป็นค่าในขณะมอเตอร์มีความสมบูรณ์ไม่มีการลัดรอบเกิดขึ้นในขณะการทดลอง แต่จะมีค่าเกิดขึ้นค่าหนึ่ง เป็นเพราะว่าเกิดจากความไม่สมมาตรภายในของตัวมอเตอร์ หรือว่าค่าผิดพลาดจากการวัด และค่าของ Z_{np} ที่คำนวณได้เนื่องจากการเกิดฟอลต์ที่เกิดจากการลัดรอบ โดยใช้สมการที่ (3.3) ก็จะได้ฟอลต์ที่เกิดขึ้นภายในมอเตอร์ไม่สมมาตรเนื่องจากการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์นั่นเอง



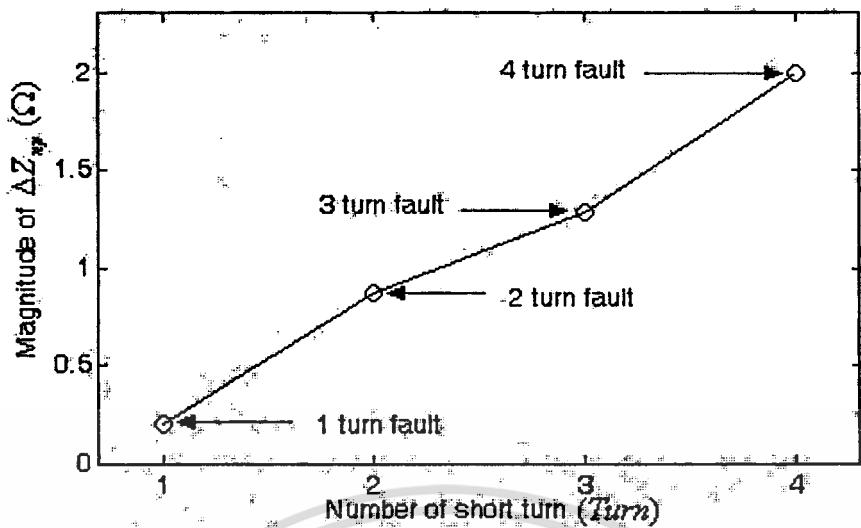
รูปที่ 4.45 แสดงค่า ΔZ_{np} ที่ใกล้ค่าสลิปเป็นศูนย์ของมอเตอร์ 1 แรงม้า



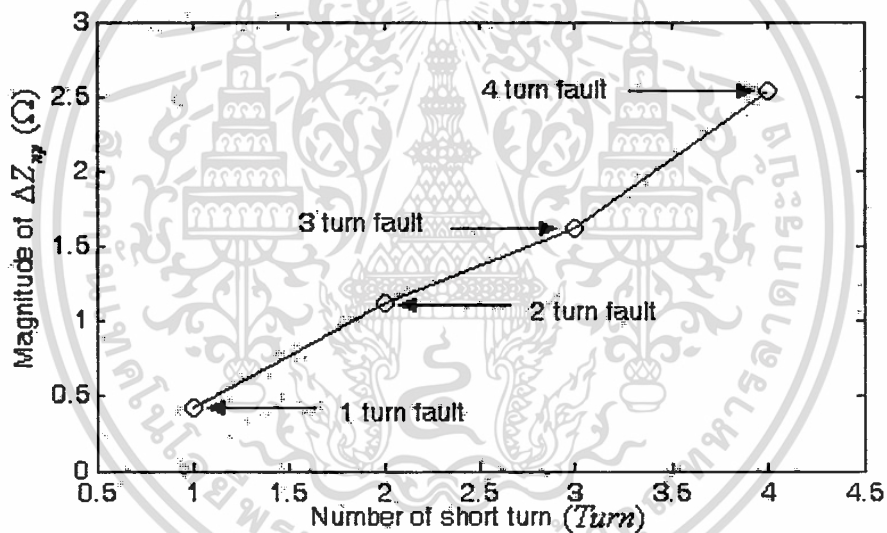
รูปที่ 4.46 แสดงค่า ΔZ_{np} ที่ใกล้ค่าสลิปเป็นศูนย์ของมอเตอร์ 2 แรงม้า

จากรูปที่ 4.45 ถึง 4.48 เป็นการแสดงค่าของ ΔZ_{np} ที่ได้จากการทดลองที่ค่าใดๆของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า และมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้า โดย ได้ใช้ค่าในกรณีที่มีค่าใกล้สลิปเป็นศูนย์ที่ 10% ของสลิปที่เกิดในการเปรียบเทียบค่า และการคำนวณของค่า ΔZ_{np} จะแสดงไว้ในระนาบคอมเพลกซ์ ในรูปที่ 4.45 และ 4.46 ซึ่งค่าจะมีการเบี่ยงเบนออกจากค่ามอเตอร์ที่สมบูรณ์จะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับจำนวนการลัดรอบที่เพิ่มขึ้น และในรูปที่ 4.47 และ 4.48 เป็นการแสดงขนาด $|\Delta Z_{np}|$ ในกรณีที่มีค่าใกล้สลิปเป็นศูนย์ ของมอเตอร์ทั้งสองขนาด ค่านั้นจะมีการเพิ่มขึ้นตามจำนวนการลัดรอบที่เพิ่มขึ้นและสามารถที่จะแสดงให้เห็นว่าค่าของมันสามารถที่จะเป็นตัวชี้การเกิดฟอลต์ของระดับสัญญาณฟอลต์ที่เกิดจากการลัดรอบ และสามารถที่จะถูกตรวจจับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.47 แสดงค่า $|\Delta Z_{np}|$ ที่ใกล้ค่าสลิปเป็นศูนย์ของมอเตอร์ 1 แรงม้า



รูปที่ 4.48 แสดงค่า $|\Delta Z_{np}|$ ที่ใกล้ค่าสลิปเป็นศูนย์ของมอเตอร์ 2 แรงม้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

จากผลการจำลองและผลการทดลองของเทคนิคในการตรวจจับฟอลต์ที่เกิดขึ้นจากการลัดรอบในวิธีนี้นั้นให้ผลเป็นที่น่าพอใจ เพราะสามารถที่จะทำการเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดลองของตัวตรวจจับบนพื้นฐานของ Z_{np} ได้และเพื่อศึกษาค่าองค์ประกอบต่างๆขององค์ประกอบลำดับ และสำหรับการทดลองและจำลองค่านั้นได้ใช้มอเตอร์ 2 ขนาด คือ ขนาด 1 แรงม้า และขนาด 2 แรงม้า เพื่อทำการศึกษาและตรวจจับฟอลต์ที่เกิดขึ้นที่มีความแตกต่างกันทั้งด้านพิกัดกำลังและโครงสร้าง ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบนี้จะพบว่าค่าต่างๆที่ได้คำนวณของมอเตอร์ทั้งสองขนาดนั้นไม่มีความแตกต่างกันมากนักซึ่งเห็นได้จากข้อมูลในบทที่ 4 แต่ก็ไม่ใช่ประเด็นหลักเพื่อที่จะทำการเปรียบเทียบค่าของมอเตอร์ทั้งสอง แต่สิ่งที่สำคัญก็คือการตรวจจับฟอลต์ที่เกิดขึ้นในกรณีของการลัดรอบของมอเตอร์ใดๆที่สามารถตรวจจับฟอลต์ได้ไม่ว่าจะมีความแตกต่างกันของลักษณะโครงสร้างหรือแม้แต่ขนาดพิกัดกำลังซึ่งผลการทดลองและการจำลองก็สามารถยืนยันผลได้เป็นอย่างดี

5.1 สรุปผลการทดลอง

เทคนิคในการตรวจจับฟอลต์ที่เกิดจากการลัดรอบโดยอาศัยทฤษฎีขององค์ประกอบสมมาตรในหลักการขององค์ประกอบลำดับอิมพีแดนซ์ ซึ่งได้ใช้ค่าของ Z_{np} เป็นค่าในการตรวจจับฟอลต์ที่เกิดขึ้น ซึ่งจะพบว่าค่า Z_{np} จะสามารถระบุฟอลต์ที่เกิดจากการลัดรอบได้ ซึ่งวิธีในการทดลองจะทำการออกแบบมอเตอร์สำหรับการลัดรอบ 1 รอบ ถึง 4 รอบในขดลวดสเตเตอร์เพื่อทำการจำลองและทดลองโดยจะพบว่าในการออกแบบนั้นได้ทำการออกแบบไว้ที่จำนวนรอบน้อยๆเนื่องจากต้องการที่จะตรวจจับฟอลต์ในขณะที่ฟังก์ชันขึ้น โดยจะพบว่าในมอเตอร์ 1 แรงม้าจำนวนรอบของการลัดรอบไม่ถึง 1% ของจำนวนรอบของขดลวดใน 1 เฟส และมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้าไม่เกิน 1.5% ของจำนวนรอบของขดลวดใน 1 เฟสซึ่งเป็นค่าที่น้อยมากๆแต่เมื่อเกิดการลัดรอบขึ้นค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์จะมีค่าลดลงเนื่องจากค่าอินดักแตนซ์มีค่าลดลง แต่ค่าของ Z_{np} จะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นการตรวจจับการลัดรอบในขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้หลักการขององค์ประกอบลำดับอิมพีแดนซ์เมตริกซ์นี้ จะมีประโยชน์อย่างมากในการตรวจจับฟอลต์เนื่องจากขดลวดสเตเตอร์ลัดรอบที่เกิดขึ้น เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถหาค่าองค์ประกอบลำดับอิมพีแดนซ์ในลำดับต่างๆได้ และมีความถูกต้อง มีความน่าเชื่อถือสูงเพราะสามารถทำให้อิทธิพลของความไม่

สมมาตรต่างๆ เช่น ความไม่สมดุลของแหล่งจ่ายแรงดัน ค่าสลิปที่เปลี่ยนแปลง และความผิดพลาดเนื่องจากการวัดลดลงได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการพัฒนาวิธีตรวจจับฟอลต์ที่เกิดจากการลัดรอบในขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์นี้ด้วยวิธีการทำแบบ Off-line นั้นได้ผลน่าเชื่อถือพอสมควรเพราะสามารถตรวจจับฟอลต์ได้ในขณะทำการปรับเปลี่ยนความเร็วในแต่ละค่าสลิปต่างๆ แล้วก็บันทึกค่าข้อมูลเพื่อนำไปประมวลผลโดยใช้โปรแกรม Matlab แต่ทั้งนี้เนื่องจากว่าฟอลต์ที่เกิดขึ้นนั้นเกิดขึ้นในขณะที่ฟังก์ชันตัวและมีสัญญาณขนาดเล็กอาจจะมีผลคลาดเคลื่อนเนื่องจากอุปกรณ์ในการวัดสัญญาณ เช่น มิเตอร์ดิจิตอลที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา และรวมถึงเรื่องของอุณหภูมิก็มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ ดังนั้นค่าขององค์ประกอบในระนาบคอมเพล็กซ์อาจจะมีค่าคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง แต่ก็ไม่มีผลกระทบในการตรวจจับด้วยเทคนิคนี้ และในขณะที่เกิดการลัดรอบขึ้นแล้วนั้นฟอลต์จะมีการขยายความรุนแรงไปได้เร็วมาก [1] ดังนั้นน่าจะได้นำหลักการที่กล่าวมาไปใช้เพื่อตรวจสอบดูพฤติกรรมของฟอลต์ที่เวลาต่อเนื่องเพื่อจะให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของฟอลต์ที่เกิดขึ้น เพื่อจะสามารถสังเกตขนาดของฟอลต์นั้นมีความรุนแรงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และเกิดขึ้นในช่วงเวลาใดๆ แต่วิธีนี้นั้นการรันมอเตอร์ก็จำเป็นต้องรันแบบต่อเนื่องขึ้นอยู่กับเวลาที่เหมาะสมและวิธีที่จะทำ และในการจำลองและทดลองเบื้องต้นนี้ได้มุ่งไปสู่การวัดที่สูงขึ้น และเพื่อจะได้นำหลักการดังกล่าวร่วมกับเทคนิคแบบออนไลน์ (On-line) ตรวจจับขดลวดสเตเตอร์ลัดรอบในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] A.H. Bonnett and G.C. Soukup, "Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors," IEEE Trans. Industry Application, vol.28, no. 4, pp. 921-937, July/August 1992.
- [2] M.A. Cash, T.G. Habetler, and G.B. Kliman, "Insulation failure prediction in AC machines using line-neutral voltages," IEEE Trans. Industry Applications, vol. 34, no. 6, pp. 1234-1239, November/December 1998.
- [3] ผศ.ศุภชัย สรินทร์วงศ์, "เครื่องกลไฟฟ้า 4 เล่ม 1 อินดัคชันมอเตอร์ระบบไฟ 3 เฟส" กรุงเทพฯ, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย - ญี่ปุ่น), 2544
- [4] ธวัชชัย อัดถวิบูลย์กุล "เครื่องกลไฟฟ้า 2 ทรานส์มิตเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสและเฟสเดียว" สำนักพิมพ์ศูนย์ส่งเสริมอาชีพ (ศ.ส.อ) กรุงเทพฯ, 2527
- [5] W.H. Kersting, and W.H Phillips, "Phase Frame Analysis of the Effects of Voltage Unbalance on Induction Machines" IEEE Trans. Industry Applications, vol. 33, No. 2, March/April 1997
- [6] พิชิต ลำยอง "เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1 ,Electrical Machine1" พิมพ์ครั้งที่ 2 ,ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ, 2539
- [7] C.L Fortescue, "Method of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks," Trans. of AIEE, Vol.37 pt.2, 1918, pp. 1027-1140
- [8] รัชต์ มั่งมีชัย "การวิเคราะห์กำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อใช้งานในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล" วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543
- [9] J. Sottile and J.L. Kohler "An On-Line Method to Detect Incipient Failure of Turn Insulation in Random-Wound Motors" IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 8, No. 4, pp. 762-768, December 1993.
- [10] S.B.Lee, R.M.Tallam and T.G. Habetler, "A robust, on-lines turn-fault detection technique for induction machines based on monitoring the sequence component impedance matrix," IEEE Trans. Power electronics, vol. 18, no. 3, pp. 865-872, May 2003.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] Joseph Sottile, Frederick C. Trutt, Jeffery L.Kohler "Experimental Investigation of On-Line Methods for Incipient Fault Detection", Industry, Applications Conference,2000. Conference Record of the 2000 IEEE, Vol.4, 8 -12 Oct. 2000, Page 2682-2687
- [12] Frederick C. Trutt, Joseph Sottile, and Jeffery L.Kohler, "Online condition Monitoring of Induction Motors" IEEE Trans. On Industry Applications, vol. 38, No. 6, November/December 2002
- R.M. Tallam, T.G. Habetler, and R.G. Harley, "Transient Model for Induction Machines with Stator Winding Turn Faults," Proc. Conf. IEEE-IAS Ann. Meeting, vol. 1, pp. 304-309, Oct. 2000.
- [13] Gojko M. Joksimovic, Jim penman, "The Detection of Inter-Turn Short Circuit in the Stator Windings of Operating Motors",IEEE Trans. Industrial Electronics,Vol. 47,No.5, October 2000
- [14] Gojko M. Joksimovic, Jim penman, "The Detection of Inter-Turn Short Circuit in the Stator Windings of Operating Motors",IEEE Trans. Industrial Electronics,Vol. 47,No.5, October 2000
- [15] ศาญณ์ต์ ศรีโหมด " เครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า" วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2544.
- [16] จิรวิทย์ เจริญมานะวงศ์, เฉลิมชาติ มานพ และวิจิตร ภินเรศ "เทคนิคการตรวจจับขดลวดสเตเตอร์ลัดรอบในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้องค์ประกอบลำดับอิมพีแดนซ์เมตริกซ์" วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 21 ฉบับที่ 2 เดือนมิถุนายน 2547



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลของการทดสอบมอเตอร์ 1 แรงม้าเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าสมดุล (S_6)

Phase = 3 Condition = balance Size = 1 HP Sequence = ABC

Test									
%Rated slip	Voltage (Volts)			Current (Amps)			Power Factor (Cos ϕ)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C	$Cos(\phi_A)$	$Cos(\phi_B)$	$Cos(\phi_C)$
0	220.1	220.4	220.1	1.641	1.642	1.675	0.2	0.22	0.23
10	220.3	220.4	220.4	1.65	1.645	1.676	0.28	0.3	0.31
20	220.5	220.6	220.3	1.654	1.647	1.674	0.3	0.33	0.33
30	220.5	220.3	220.3	1.66	1.657	1.682	0.37	0.38	0.39
40	220.3	220.4	220.3	1.68	1.682	1.699	0.42	0.43	0.43
50	220.5	220.5	220.4	1.726	1.733	1.74	0.49	0.5	0.51
60	220.3	220.3	220.4	1.777	1.798	1.804	0.56	0.56	0.56
70	220.6	220.7	220.7	1.827	1.841	1.854	0.59	0.6	0.6
80	220.4	220.3	220.4	1.888	1.895	1.899	0.63	0.63	0.64
90	220.5	220.4	220.3	1.952	1.949	1.948	0.66	0.66	0.67
100	220.5	220.6	220.8	2.01	2.01	2.01	0.69	0.69	0.7

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลของการทดสอบมอเตอร์ 1 แรงม้าเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 5% 1-U ($S_u 204$)

Phase = 1 Condition = unbalance Size = 1 HP Sequence = ABC

Test									
%Rated slip	Voltage (Volts)			Current (Amps)			Power Factor (Cos ϕ)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C	Cos(ϕ_A)	Cos(ϕ_B)	Cos(ϕ_C)
0	204.3	220.3	220.2	1.394	1.545	1.78	0.11	0.35	0.18
10	204.6	220.8	220.4	1.38	1.567	1.779	0.21	0.44	0.27
20	204.4	220.7	220.3	1.383	1.571	1.773	0.25	0.47	0.29
30	204.1	220.2	220.6	1.391	1.594	1.784	0.31	0.52	0.35
40	204.3	220.2	220.7	1.416	1.639	1.809	0.38	0.57	0.4
50	204	220.4	220.1	1.464	1.721	1.85	0.48	0.63	0.47
60	204.1	220.6	220.3	1.534	1.811	1.915	0.55	0.68	0.53
70	204.2	220.1	220.1	1.592	1.866	1.956	0.6	0.71	0.57
80	204.6	220.3	220.2	1.658	1.934	2.01	0.64	0.73	0.61
90	204.4	220.4	220.5	1.718	2.01	2.07	0.67	0.75	0.64
100	204.3	220.3	220.3	1.778	2.05	2.11	0.7	0.77	0.67

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลของการทดสอบมอเตอร์ 1 แรงม้าเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 5% 1-O (S_u237)

Phase = 1 Condition = unbalance Size = 1 HP Sequence = ABC

Test									
%Rated slip	Voltage (Volts)			Current (Amps)			Power Factor (Cos ϕ)		
	V _A	V _B	V _C	I _A	I _B	I _C	Cos(ϕ _A)	Cos(ϕ _B)	Cos(ϕ _C)
0	237.3	220.6	220.3	1.938	1.793	1.579	0.27	0.09	0.28
10	237	220.2	220.2	1.936	1.766	1.58	0.34	0.17	0.36
20	237.3	220.2	220.4	1.935	1.762	1.584	0.36	0.2	0.39
30	237.3	220.5	220.6	1.949	1.761	1.599	0.41	0.25	0.44
40	237.4	220.3	220.5	1.973	1.773	1.623	0.45	0.3	0.49
50	237.3	220.5	220.4	2.02	1.795	1.67	0.51	0.38	0.56
60	237.6	220.5	220.7	2.07	1.836	1.732	0.56	0.45	0.62
70	237.4	220.3	220.5	2.12	1.871	1.778	0.6	0.49	0.65
80	237.1	220.6	220.2	2.16	1.915	1.828	0.63	0.52	0.68
90	237.5	220.7	220.5	2.22	1.964	1.889	0.65	0.56	0.71
100	237.4	220.6	220.5	2.28	2.02	1.953	0.68	0.59	0.73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลของการทดสอบมอเตอร์ 1 แรงม้าเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าสมดุลพร้อมทำการลัดรอบ 1 รอบ ($S_6(n)I$)

Phase = 3 Condition = balance Size = 1 HP Sequence = ABC

Test									
%Rated slip	Voltage (Volts)			Current (Amps)			Power Factor (Cos ϕ)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C	$Cos(\phi_A)$	$Cos(\phi_B)$	$Cos(\phi_C)$
0	220.6	220.5	220.1	1.647	1.651	1.659	0.2	0.22	0.23
10	220.8	220.7	220.6	1.649	1.656	1.661	0.29	0.3	0.31
20	220.3	220.2	220.3	1.642	1.648	1.655	0.31	0.32	0.33
30	220.5	220.1	220.2	1.658	1.667	1.665	0.36	0.38	0.39
40	220.3	220.1	219.9	1.675	1.685	1.682	0.42	0.43	0.44
50	220.4	220.5	220.1	1.724	1.734	1.733	0.49	0.5	0.51
60	220.7	220.6	220.3	1.786	1.8	1.792	0.56	0.56	0.57
70	220.4	220.5	219.9	1.835	1.851	1.836	0.59	0.6	0.61
80	220.7	220.6	220.1	1.892	1.899	1.888	0.63	0.63	0.64
90	220.5	220.2	220	1.95	1.957	1.943	0.66	0.66	0.67
100	220.7	220.2	220.3	2.02	2.02	2.01	0.68	0.69	0.69

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลของการทดสอบมอเตอร์ 1 แรงม้าเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าสมดุลพร้อมทำการลัดรอบ 2 รอบ ($S_u(n)2$)

Phase = 3 Condition = balance Size = 1 HP Sequence = ABC

Test									
%Rated slip	Voltage (Volts)			Current (Amps)			Power Factor (Cos ϕ)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C	$Cos(\phi_A)$	$Cos(\phi_B)$	$Cos(\phi_C)$
0	220.3	220.5	220.4	1.642	1.636	1.671	0.21	0.22	0.23
10	220.3	220.4	220.6	1.656	1.641	1.67	0.29	0.3	0.31
20	220.5	220.5	220.4	1.646	1.644	1.668	0.32	0.32	0.33
30	220.5	220.3	220.3	1.665	1.659	1.682	0.37	0.37	0.39
40	220.5	220.5	220.2	1.683	1.682	1.7	0.43	0.43	0.44
50	220.4	220.5	220.1	1.725	1.727	1.741	0.5	0.5	0.51
60	220.6	220.4	220.4	1.791	1.791	1.803	0.56	0.56	0.57
70	220.1	220	220.1	1.837	1.832	1.847	0.6	0.59	0.6
80	220.4	220.3	220.6	1.892	1.885	1.906	0.63	0.63	0.64
90	220.1	220.1	219.9	1.948	1.945	1.958	0.66	0.66	0.67
100	220.4	220.7	220.8	2.01	2.02	2.04	0.69	0.68	0.7

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลของการทดสอบมอเตอร์ 1 แรงม้าเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าสมดุลพร้อมทำการทดสอบ 3 รอบ ($S_b(n)3$)

Phase = 3 Condition = balance Size = 1 HP Sequence = ABC

Test									
%Rated slip	Voltage (Volts)			Current (Amps)			Power Factor (Cos ϕ)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C	Cos(ϕ_A)	Cos(ϕ_B)	Cos(ϕ_C)
0	220.4	220.5	220.5	1.657	1.64	1.663	0.22	0.22	0.23
10	220.1	220.4	220.6	1.655	1.66	1.657	0.3	0.3	0.31
20	220.6	220.8	220.9	1.664	1.667	1.663	0.32	0.32	0.34
30	220.3	220.5	220.6	1.675	1.68	1.675	0.38	0.38	0.39
40	220.4	220.5	220.8	1.7	1.7	1.695	0.43	0.43	0.44
50	220.5	220.5	220.4	1.749	1.746	1.739	0.5	0.5	0.51
60	220.6	220.6	220.8	1.814	1.814	1.803	0.56	0.56	0.57
70	220.7	220.9	220.7	1.861	1.859	1.85	0.6	0.6	0.61
80	220.6	220.3	220.5	1.919	1.911	1.895	0.64	0.63	0.65
90	220.2	220.5	220	1.958	1.962	1.943	0.67	0.66	0.67
100	221	220.4	220.6	2.04	2.02	2.01	0.69	0.68	0.7

ตารางที่ ก.7 ข้อมูลของการทดสอบมอเตอร์ 1 แรงม้าเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าสมดุลพร้อมทำการลัดรอบ 4 รอบ ($S_6(n)$)

Phase = 3 Condition = balance Size = 1 HP Sequence = ABC

Test									
%Rated slip	Voltage (Volts)			Current (Amps)			Power Factor (Cosφ)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C	$Cos(\phi_A)$	$Cos(\phi_B)$	$Cos(\phi_C)$
0	220.3	220	220.3	1.672	1.669	1.653	0.22	0.21	0.24
10	220.4	220.1	220.3	1.673	1.662	1.65	0.31	0.3	0.33
20	220.7	220.4	220.6	1.68	1.674	1.658	0.34	0.32	0.35
30	220.4	220.2	220.5	1.69	1.685	1.669	0.39	0.38	0.4
40	220.6	220.3	220.7	1.711	1.707	1.692	0.44	0.43	0.45
50	220.1	220.2	220.5	1.753	1.754	1.738	0.51	0.5	0.52
60	219.9	220.3	220.3	1.814	1.819	1.8	0.57	0.56	0.58
70	220.2	220.4	220.6	1.867	1.865	1.843	0.61	0.6	0.62
80	220	220.4	220.4	1.92	1.918	1.899	0.64	0.63	0.65
90	220.2	220.5	220.1	1.985	1.98	1.959	0.67	0.66	0.68
100	220	220.3	220.4	2.05	2.04	2.03	0.7	0.69	0.7

ตารางที่ ก.8 ข้อมูลของการทดสอบมอเตอร์ 2 แรงม้าเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าสมดุล (S_0)

Phase = 3 Condition = balance Size = 2 HP Sequence = ABC

Test									
%Rated slip	Voltage (Volts)			Current (Amps)			Power Factor ($\cos \phi$)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C	$\cos(\phi_A)$	$\cos(\phi_B)$	$\cos(\phi_C)$
0	220.1	220	220.3	1.668	1.729	1.806	0.12	0.19	0.13
10	220.3	220.2	219.9	1.689	1.757	1.847	0.21	0.28	0.22
20	220.2	220.3	220	1.723	1.785	1.891	0.28	0.37	0.28
30	220	219.5	220.3	1.82	1.872	1.99	0.4	0.47	0.41
40	221.3	220.3	219.6	1.967	2.02	2.09	0.5	0.55	0.51
50	221.4	220.1	219	2.08	2.13	2.21	0.57	0.61	0.57
60	221.2	220.6	221	2.18	2.25	2.35	0.61	0.66	0.62
70	220.6	220	220.7	2.31	2.38	2.48	0.66	0.71	0.66
80	220.4	220.1	220.1	2.48	2.57	2.65	0.71	0.74	0.7
90	220.6	220	220.5	2.63	2.7	2.76	0.74	0.76	0.73
100	220.4	219.9	220	2.78	2.89	2.92	0.76	0.79	0.76

ตารางที่ ก.9 ข้อมูลของการทดสอบมอเตอร์ 2 แรงม้าเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 5% 1-U (S_u204)

Phase = 1 Condition = unbalance Size = 2 HP Sequence = ABC

Test									
%Rated slip	Voltage (Volts)			Current (Amps)			Power Factor ($\cos\phi$)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C	$\cos(\phi_A)$	$\cos(\phi_B)$	$\cos(\phi_C)$
0	204	220.5	220.6	1.364	1.754	1.95	0.06	0.34	0.04
10	204.1	220.3	220.9	1.361	1.81	1.99	0.14	0.41	0.11
20	203.7	220.2	220.3	1.356	1.854	2.05	0.23	0.5	0.18
30	203.8	220.7	220.5	1.398	2.01	2.17	0.35	0.62	0.28
40	203.7	220.7	219.8	1.466	2.18	2.3	0.48	0.69	0.39
50	204.3	220.9	220.9	1.576	2.3	2.43	0.55	0.74	0.45
60	203.6	219.4	220.1	1.668	2.44	2.53	0.61	0.78	0.51
70	204.8	220.7	220.3	1.813	2.59	2.65	0.67	0.8	0.56
80	204.8	221.1	219.9	1.98	2.81	2.79	0.73	0.83	0.6
90	203.9	220.2	220.8	2.12	2.94	2.95	0.75	0.84	0.64
100	204	220.9	219.9	2.29	3.15	3.11	0.79	0.86	0.68

ตารางที่ ก.10 ข้อมูลของการทดสอบมอเตอร์ 2 แรงม้าเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 5% 1-O ($\sqrt{3}$ 237)

Phase = 1 Condition = unbalance Size = 2 HP Sequence = ABC

Test									
%Rated slip	Voltage (Volts)			Current (Amps)			Power Factor (Cos ϕ)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C	Cos(ϕ_A)	Cos(ϕ_B)	Cos(ϕ_C)
0	237.3	220.5	220.7	2.06	1.742	1.667	0.16	0.01	237.3
10	237.4	220.2	221.1	2.09	1.714	1.679	0.23	0.06	237.4
20	237.2	220.4	220.9	2.14	1.763	1.699	0.3	0.14	237.2
30	237.7	220.7	220.5	2.28	1.818	1.773	0.41	0.23	237.7
40	237.5	221.1	220.7	2.4	1.891	1.866	0.5	0.34	237.5
50	236.8	220.4	220.7	2.49	1.99	1.987	0.55	0.41	236.8
60	238.3	220.8	219.7	2.65	2.08	2.07	0.61	0.47	238.3
70	238.1	221.8	220.5	2.77	2.2	2.2	0.65	0.52	238.1
80	237.8	220.4	219.8	2.92	2.32	2.36	0.68	0.58	237.8
90	237.5	220.6	219.9	3.06	2.44	2.5	0.71	0.62	237.5
100	237.8	220.4	219.8	3.23	2.57	2.66	0.74	0.66	237.8

ตารางที่ ก.11 ข้อมูลของการทดสอบมอเตอร์ 2 แรงม้าเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าสมดุลพร้อมทำการลัดรอบ 1 รอบ ($S_6(n)$)

Phase = 3 Condition = balance Size = 2 HP Sequence = ABC

Test									
%Rated slip	Voltage (Volts)			Current (Amps)			Power Factor (Cos ϕ)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C	Cos(ϕ_A)	Cos(ϕ_B)	Cos(ϕ_C)
0	220.3	220.7	220.7	1.653	1.776	1.805	0.14	0.2	0.12
10	220.1	220.6	220	1.678	1.786	1.825	0.21	0.28	0.21
20	220.7	220.8	220.9	1.72	1.832	1.875	0.3	0.35	0.28
30	220.6	220.4	220.6	1.811	1.92	1.958	0.41	0.46	0.4
40	220.5	220.6	220.5	1.915	2.05	2.07	0.5	0.55	0.49
50	220.4	220.2	220.8	2.01	2.13	2.18	0.56	0.6	0.55
60	219.9	220.4	220.1	2.12	2.27	2.28	0.62	0.66	0.6
70	220.4	220.8	220.2	2.26	2.4	2.38	0.66	0.69	0.64
80	220.6	220.4	220.5	2.42	2.55	2.55	0.7	0.73	0.69
90	220.5	220.1	220.7	2.55	2.67	2.69	0.73	0.75	0.72
100	220.2	219.8	220.3	2.7	2.81	2.84	0.76	0.78	0.75

ตารางที่ ก.12 ข้อมูลของการทดสอบมอเตอร์ 2 แรงม้าเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าสมดุลพร้อมทำการจัดรอบ 2 รอบ ($S_b(n)2$)

Phase = 3 Condition = balance Size = 2 HP Sequence = ABC

Test									
%Rated slip	Voltage (Volts)			Current (Amps)			Power Factor (Cos ϕ)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C	$Cos(\phi_A)$	$Cos(\phi_B)$	$Cos(\phi_C)$
0	220.8	220.2	220.4	1.69	1.785	1.768	0.17	0.19	0.15
10	220.3	220.4	220.4	1.692	1.802	1.81	0.23	0.28	0.22
20	220.6	220.2	220.5	1.721	1.817	1.813	0.31	0.33	0.28
30	220.3	220.4	220.3	1.834	1.957	1.936	0.44	0.46	0.41
40	220.5	220.2	220	1.955	2.07	2.04	0.53	0.54	0.5
50	220.6	220.5	220.1	2.06	2.18	2.14	0.59	0.6	0.56
60	220.3	220.7	220.3	2.16	2.3	2.26	0.64	0.65	0.61
70	220.8	220.6	220.6	2.3	2.42	2.38	0.68	0.68	0.66
80	220.4	220.2	220.2	2.47	2.57	2.54	0.72	0.72	0.7
90	220.4	220.2	220.5	2.6	2.7	2.68	0.74	0.75	0.73
100	220.2	219.8	220.1	2.75	2.84	2.83	0.77	0.78	0.76

ตารางที่ ก.13 ข้อมูลของการทดสอบมอเตอร์ 2 แรงม้าเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าสมดุลพร้อมทำการลัดรอบ 3 รอบ ($S_b(n)3$)

Phase = 3 Condition = balance Size = 2 HP Sequence = ABC

Test									
%Rated slip	Voltage (Volts)			Current (Amps)			Power Factor (Cos ϕ)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C	$Cos(\phi_A)$	$Cos(\phi_B)$	$Cos(\phi_C)$
0	220.1	220.3	220.5	1.699	1.816	1.762	0.19	0.2	0.16
10	220.6	220.7	220.7	1.739	1.867	1.779	0.29	0.28	0.24
20	220.4	220	220.6	1.754	1.851	1.789	0.34	0.33	0.3
30	220.3	220.4	220.4	1.879	2	1.913	0.47	0.45	0.42
40	220.5	220.2	220	2.01	2.1	2.02	0.55	0.54	0.52
50	220.6	220.3	220.1	2.11	2.13	2.12	0.61	0.6	0.57
60	220.4	220.7	220.3	2.22	2.34	2.24	0.65	0.64	0.62
70	220.7	220.4	220.5	2.36	2.45	2.37	0.69	0.68	0.67
80	220.8	220.6	220.6	2.53	2.61	2.54	0.73	0.72	0.71
90	220	220.5	220.5	2.63	2.74	2.66	0.75	0.75	0.74
100	220.2	219.9	220.4	2.81	2.87	2.83	0.78	0.77	0.77

ตารางที่ ก.14 ข้อมูลของการทดสอบมอเตอร์ 2 แรงม้าเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าสมดุลพร้อมทำการลัดรอบ 4 รอบ ($S_v(n)4$)

Phase = 3 Condition = balance Size = 2 HP Sequence = ABC

Test									
%Rated slip	Voltage (Volts)			Current (Amps)			Power Factor (Cos ϕ)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C	$Cos(\phi_A)$	$Cos(\phi_B)$	$Cos(\phi_C)$
0	220.3	220.6	220.6	1.715	1.828	1.738	0.21	0.21	0.18
10	220.6	220.9	220.8	1.78	1.894	1.759	0.32	0.28	0.25
20	220.4	220.3	220.6	1.832	1.939	1.801	0.39	0.35	0.33
30	220.2	220.3	220.2	1.929	2.04	1.891	0.5	0.45	0.44
40	220.3	220.5	220.1	2.05	2.16	1.99	0.58	0.53	0.52
50	220.6	220.8	220.3	2.17	2.26	2.1	0.63	0.59	0.58
60	220.5	220.9	220.6	2.28	2.38	2.23	0.67	0.63	0.63
70	220.8	220.6	220.5	2.42	2.49	2.36	0.71	0.67	0.68
80	220.4	220.6	220.1	2.59	2.65	2.52	0.74	0.71	0.72
90	220.6	220.1	220	2.73	2.75	2.64	0.76	0.74	0.75
100	220.2	219.8	220.2	2.87	2.91	2.82	0.79	0.77	0.78



```

%% Program of Stator Winding
Short
Turns Detection in
%% 3-Phase Induction Motors
r1=input('r1');
r2=input('r2');
rc=input('rc');
xb=input('xb');
xm=input('xm');
ns=input('ns');
nr=input('nr');
slip=0:10:100;
s=(ns-nr)/ns;
sr=[0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8
0.9 1.0].*s;
r=r2./sr;
zz=(rc*xm)/(rc+xm);
zz1=xb+r1+r;
zt=(zz.*zz1)/(zz+zz1);
z0=(rc*xm)/(rc+xm),abs(z0),angle(z
0*180/pi);
zzz=[z0 zt];
zzzz=real(zzz);
zzzzz=imag(zzz);
zz2=abs(zzz);
zz3=angle(zzz)*180/pi;
figure(1)
plot(real(zzz),imag(zzz),'r*-')
title('Zt')
xlabel('Real part of Zt')
ylabel('Imaginary part of Zt')

hold on
grid
figure(2)
plot(slip,zz2,'-*.slip,zzzzz,'-*.slip,zzzzzz,'*-')
title('Zt,Rt,Xt')
xlabel('% Rated slip')
ylabel('Magnitude of Zt,Rt,Xt')
grid
hold on
figure(3)
plot(zz2,zz3,'r*-')
title('magnitude and angle of Zt')
xlabel('Magnitude of Zt')
ylabel('angle of Zt')
hold on
grid
% Calculation Ia,Ib,Ic of Su(h)204
volt,Su(h)237 volt,Sb(h)220 volt
va=[204*exp(i*1.5708)]
vb=[220*exp(i*-0.5236)]
vc=[220*exp(i*-2.6180)]
ia=va./zzz;
ib=vb./zzz;
ic=vc./zzz;
ia1=abs(ia)
ia2=angle(ia)
ib1=abs(ib)
ib2=angle(ib)
ic1=abs(ic)
ic2=angle(ic)

```

```

% Calculation the sequence
component of Su(h)204,237 volt and
Sb(h)220 volt
a=1*exp(i*120*pi/180);
a2=1*exp(i*240*pi/180);
vp=1/3*(va+(a*vb)+(a2*vc));
vn=1/3*(va+(a2*vb)+(a*vc));
vz=1/3*(va+vb+vc);
ip=1/3*(ia+(a.*ib)+(a2.*ic));
in=1/3*(ia+(a2.*ib)+(a.*ic));
iz=1/3*(ia+ib+ic);
zp=vp./ip;
zn=vn./in;
vp1=abs(vp);
vp2=angle(vp)*180/pi;
vn1=abs(vn);
vn2=angle(vn)*180/pi;
vz1=abs(vz);
vz2=angle(vz)*180/pi;
ip1=abs(ip);
ip2=angle(ip)*180/pi;
in1=abs(in);
in2=angle(in)*180/pi;
iz1=abs(iz);
iz2=angle(iz)*180/pi;
zp1=abs(zp);
zp2=angle(zp)*180/pi;
zp3=real(zp);
zp4=imag(zp);
zn1=abs(zn);
zn2=angle(zn)*180/pi;
zn3=real(zn);
zn4=imag(zn);
zpp=vp1./ip1
figure(4)
plot(slip,zp1,'-*',slip,zp3,'-*',slip,zp4,'-*')
title('Zp,Rp,Xp')
xlabel('% Rated slip')
ylabel('Magnitude of Zp,Rp,xp')
hold on
grid
figure(5)
plot(zp3,zp4,'-*')
title('realZp,imagZp')
xlabel('Real part of Zp')
ylabel('Imaginary part of Zp')
hold on
grid
% Znp
znp1=(-1/440)*zp.*zn./(3*zz)
znp2=(-2/440)*zp.*zn./(3*zz)
znp3=(-3/440)*zp.*zn./(3*zz)
znp4=(-4/440)*zp.*zn./(3*zz)
znp5=(-5/440)*zp.*zn./(3*zz)
znp11=real(znp1);
znp12=imag(znp1);
znp21=real(znp2);
znp22=imag(znp2);
znp31=real(znp3);
znp32=imag(znp3);
znp41=real(znp4);
znp42=imag(znp4);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

znp51=real(znp5);
znp52=imag(znp5);
figure(6)
plot(0,0,'b*',znp11,znp12,'-
*',znp21,znp22,'-*',znp31,znp32,'-
*',znp41,znp42,'-*',znp51,znp52,'-')
title('Znp no error')
hold on
grid
% error Znp = Zpn
ai=1.005;
av=1.005;
Bi=0.990;
Bv=0.995;
u1=0.0023;
u2=0.0045;
u3=0.0068;
u4=0.0091;
u5=0.0114;
f1=(u1*zp.*zn)./(3*zz);
f2=(u2*zp.*zn)./(3*zz);
f3=(u3*zp.*zn)./(3*zz);
f4=(u4*zp.*zn)./(3*zz);
f5=(u5*zp.*zn)./(3*zz);
g1=(1+(u1*(zp+zn)./(3*zz)));
g2=(1+(u2*(zp+zn)./(3*zz)));
g3=(1+(u3*(zp+zn)./(3*zz)));
g4=(1+(u4*(zp+zn)./(3*zz)));
g5=(1+(u5*(zp+zn)./(3*zz)));
mm1=((1-Bv)*(1-a*Bi).*zn-(1-a*Bv)*(1-
a*Bv)*(1-Bi).*zp-(1-a2)*(Bv-a).*f1);

```

```

mm2=((1-Bv)*(1-a*Bi).*zn-(1-a*Bv)*(1-
Bi).*zp-(1-a2)*(Bv-a).*f2);
mm3=((1-Bv)*(1-a*Bi).*zn-(1-a*Bv)*(1-
Bi).*zp-(1-a2)*(Bv-a).*f3);
mm4=((1-Bv)*(1-a*Bi).*zn-(1-a*Bv)*(1-
Bi).*zp-(1-a2)*(Bv-a).*f4);
mm5=((1-Bv)*(1-a*Bi).*zn-(1-a*Bv)*(1-
Bi).*zp-(1-a2)*(Bv-a).*f5);
nn=(av/3*ai*Bi);
znp_1=nn*(mm1)./g1;
znp_2=nn*(mm2)./g2;
znp_3=nn*(mm3)./g3;
znp_4=nn*(mm4)./g4;
znp_5=nn*(mm5)./g5;
znp_11=real(znp_1);
znp_12=imag(znp_1);
znp_21=real(znp_2);
znp_22=imag(znp_2);
znp_31=real(znp_3);
znp_32=imag(znp_3);
znp_41=real(znp_4);
znp_42=imag(znp_4);
znp_51=real(znp_5);
znp_52=imag(znp_5);
% Znp0 error
hh=(1-Bv)*(1-a*Bi).*zn-(1-a*Bv)*(1-Bi).*zp;
znp0=nn*hh
znp01=real(znp0);
znp02=imag(znp0);
figure(7)

```

```

plot(znp01,znp02,'-
*',znp_11,znp_12,'-
*',znp_21,znp_22,'-',...
    znp_31,znp_32,'-
*',znp_41,znp_42,'-
*',znp_51,znp_52,'-')
title('Znp error')
hold on
grid
% Deata Znp
delznp1=-nn*(1-a2)*(Bv-a).*f1;
delznp2=-nn*(1-a2)*(Bv-a).*f2;
delznp3=-nn*(1-a2)*(Bv-a).*f3;
delznp4=-nn*(1-a2)*(Bv-a).*f4;
delznp5=-nn*(1-a2)*(Bv-a).*f5;
delznp11=real(delznp1);
delznp12=imag(delznp1);
delznp21=real(delznp2);
delznp22=imag(delznp2);
delznp31=real(delznp3);
delznp32=imag(delznp3);
delznp41=real(delznp4);
delznp42=imag(delznp4);
delznp51=real(delznp5);
delznp52=imag(delznp5);
figure(8)
plot(delznp11,delznp12,'-
*',delznp21,delznp22,'-',...
    delznp31,delznp32,'-
*',delznp41,delznp42,'-
*',delznp51,delznp52,'-')

title('delta Znp')
hold on
grid
% zpp
zpp1=(-1/440)*zp.*zn./(3*zz))+zp;
zpp2=(-2/440)*zp.*zn./(3*zz))+zp;
zpp3=(-3/440)*zp.*zn./(3*zz))+zp;
zpp4=(-4/440)*zp.*zn./(3*zz))+zp;
zpp5=(-5/440)*zp.*zn./(3*zz))+zp;
zpp11=real(zpp1);
zpp12=imag(zpp1);
zpp21=real(zpp2);
zpp22=imag(zpp2);
zpp31=real(zpp3);
zpp32=imag(zpp3);
zpp41=real(zpp4);
zpp42=imag(zpp4);
zpp51=real(zpp5);
zpp52=imag(zpp5);
figure(9)
plot(zpp11,zpp12,'-',zpp21,zpp22,'-
*',zpp31,zpp32,'-',...
    zpp41,zpp42,'-',zpp51,zpp52,'-')
hold on
grid
% znn
znn1=(-1/440)*zp.*zn./(3*zz))+zn;
znn2=(-2/440)*zp.*zn./(3*zz))+zn;
znn3=(-3/440)*zp.*zn./(3*zz))+zn;
znn4=(-4/440)*zp.*zn./(3*zz))+zn;
znn5=(-5/440)*zp.*zn./(3*zz))+zn;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารท่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

znn11=real(znn1);
znn12=imag(znn1);
znn21=real(znn2);
znn22=imag(znn2);
znn31=real(znn3);
znn32=imag(znn3);
znn41=real(znn4);
znn42=imag(znn4);
znn51=real(znn5);
znn52=imag(znn5);
figure(10)
plot(znn11,znn12,'-*',znn21,znn22,'-
*',znn31,znn32,'-*',...
      znn41,znn42,'-*',znn51,znn52,'-*)
hold on
grid
figure(11)
plot(zpp,vn1,'r*-',zpp,in1,'b*-'
',zpp,ip1,'g*-' )
xlabel('Magnitude of Vp/lp = Zp
(Ohm)')
ylabel('Magnitude of Vn (V),lp,ln
(A)')
hold on
grid
figure(12)
plot(zpp,vn2,'r*-',zpp,in2,'b*-'
',zpp,ip2,'g*-' )
xlabel('Magnitude of Vp/lp = Zp
(Ohm)')
ylabel('Phase of Vn,lp,ln (Degree)')

hold on
grid
figure(13)
plot(slip,zpp,'r*-' )
xlabel('%Rated slip')
ylabel('Magnitude of Zp (Ohm)')
hold on
grid
%% real,imag low 10 %
x44=delznp11(1,2);
x33=delznp21(1,2);
x22=delznp31(1,2);
x11=delznp41(1,2);
x00=delznp51(1,2);
y44=delznp12(1,2);
y33=delznp22(1,2);
y22=delznp32(1,2);
y11=delznp42(1,2);
y00=delznp52(1,2);
figure(14)
gggg=[x00,x11,x22,x33,x44];
ggggg=[y00,y11,y22,y33,y44];
plot(gggg,ggggg,'k*-' )
title('real_imag 10')
xlabel('Real part of delta Znp (Ohm)')
ylabel('Imaginary part of delta Znp (Ohm)')
grid
hold on
%%%%% magnitude 10 %
x444=abs(delznp11+delznp12*i);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

x333=abs(delznp21+delznp22*i);
x222=abs(delznp31+delznp32*i);
x111=abs(delznp41+delznp42*i);
x000=abs(delznp51+delznp52*i);
x4444=x444(1,2);
x3333=x333(1,2);
x2222=x222(1,2);
x1111=x111(1,2);
x0000=x000(1,2);

```

```

gg=[x4444 x3333 x2222 x1111
x0000];

```

```

figure(15)
plot(gg,'k*-')
title('mag10')
xlabel('Number of short turn (Turn)')
ylabel('Magnitude of delta Znp
(Ohm)')

```

```
grid
```

```
hold on
```

```
%%%%90%%
```

```
%% real,imag near 90 %
```

```
o44=delznp11(1,10);
```

```
o33=delznp21(1,10);
```

```
o22=delznp31(1,10);
```

```
o11=delznp41(1,10);
```

```
o00=delznp51(1,10);
```

```
p44=delznp12(1,10);
```

```
p33=delznp22(1,10);
```

```
p22=delznp32(1,10);
```

```
p11=delznp42(1,10);
```

```
p00=delznp52(1,10);
```

```
figure(16)
```

```
gggg=[o00,o11,o22,o33,o44];
```

```
ggggg=[p00,p11,p22,p33,p44];
```

```
plot(gggg,ggggg,'k*-')
```

```
title('real_imag 90')
```

```
xlabel('Real part of delta Znp (Ohm)')
```

```
ylabel('Imaginary part of delta Znp (Ohm)')
```

```
grid
```

```
hold on
```

```
%%%%% magnitude 90 %
```

```
o444=abs(delznp11+delznp12*i);
```

```
o333=abs(delznp21+delznp22*i);
```

```
o222=abs(delznp31+delznp32*i);
```

```
o111=abs(delznp41+delznp42*i);
```

```
o000=abs(delznp51+delznp52*i);
```

```
p4444=o444(1,10);
```

```
p3333=o333(1,10);
```

```
p2222=o222(1,10);
```

```
p1111=o111(1,10);
```

```
p0000=o000(1,10);
```

```
gg=[p4444 p3333 p2222 p1111,p0000];
```

```
figure(17)
```

```
plot(gg,'k*-')
```

```
title('mag 90')
```

```
xlabel('Number of short turn (Turn)')
```

```
ylabel('Magnitude of delta Znp (Ohm)')
```

```
grid
```

```
hold on
```

```
.....
```

Calculation the Znp and [Zp] of

Sb(s),Su(s),204 v

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

% Calculation the Znp and [Zp] of

Su(n), Sb(n) 1~4 turns

%Calculation Sb(s)

va=input('va=');

vb=input('vb=');

vc=input('vc=');

anva=input('anva=');

anvb=input('anvb=');

anvc=input('anvc=');

ia=input('ia=');

ib=input('ib=');

ic=input('ic=');

ania=input('ania=');

anib=input('anib=');

anic=input('anic=');

cia=ia.*exp(ania*i);

cib=ib.*exp(anib*i);

cic=ic.*exp(anic*i);

cva=va.*exp(anva*i);

cvb=vb.*exp(anvb*i);

cvc=vc.*exp(anvc*i);

a=1*exp(i*120*pi/180);

a2=1*exp(i*240*pi/180);

vp1=1/3.*(cva+(a.*cvb)+(a2.*cvc));

vn1=1/3.*(cva+(a2.*cvb)+(a.*cvc));

vz1=1/3.*(cva+cvb+cvc);

ip1=1/3.*(cia+(a.*cib)+(a2.*cic));

in1=1/3.*(cia+(a2.*cib)+(a.*cic));

iz1=1/3.*(cia+cib+cic);

zp1=abs(vp1)./abs(ip1)

% Calculation Su(s)_204

va_204=input('va_204=');

vb_204=input('vb_204=');

vc_204=input('vc_204=');

anva_204=input('anva_204=');

anvb_204=input('anvb_204=');

anvc_204=input('anvc_204=');

ia_204=input('ia_204=');

ib_204=input('ib_204=');

ic_204=input('ic_204=');

ania_204=input('ania_204=');

anib_204=input('anib_204=');

anic_204=input('anic_204=');

cia_204=ia_204.*exp(ania_204*i);

cib_204=ib_204.*exp(anib_204*i);

cic_204=ic_204.*exp(anic_204*i);

cva_204=va_204.*exp(anva_204*i);

cvb_204=vb_204.*exp(anvb_204*i);

cvc_204=vc_204.*exp(anvc_204*i);

a=1*exp(i*120*pi/180);

a2=1*exp(i*240*pi/180);

vp2=1/3.*(cva_204+(a.*cvb_204)+(a2.*cvc_204));

vn2=1/3.*(cva_204+(a2.*cvb_204)+(a.*cvc_204));

vz2=1/3.*(cva_204+cvb_204+cvc_204);

ip2=1/3.*(cia_204+(a.*cib_204)+(a2.*cic_204));

in2=1/3.*(cia_204+(a2.*cib_204)+(a.*cic_204));

iz2=1/3.*(cia_204+cib_204+cic_204);

% Calculation Znp01 of Sb(s) & Su(s)_204

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

znp01=((in2.*vn1)-
(in1.*vn2))./((ip1.*in2)-(ip2.*in1));
x1=real(znp01);
y1=imag(znp01);
% Sb(n)1turn & Su(n)1turn
data2=[zp2 vp2 vn2 vz2 ip2 in2 iz2];
va1=input('va1=');
vb1=input('vb1=');
vc1=input('vc1=');
anva1=input('anva1=');
anvb1=input('anvb1=');
anvc1=input('anvc1=');
ia1=input('ia1=');
ib1=input('ib1=');
ic1=input('ic1=');
ania1=input('ania1=');
anib1=input('anib1=');
anic1=input('anic1=');
cia1=ia1.*exp(ania1*i);
cib1=ib1.*exp(anib1*i);
cic1=ic1.*exp(anic1*i);
cva1=va1.*exp(anva1*i);
cvb1=vb1.*exp(anvb1*i);
cvc1=vc1.*exp(anvc1*i);
a=1*exp(i*120*pi/180);
a2=1*exp(i*240*pi/180);
vp11=1/3.*(cva1+(a.*cvb1)+(a2.*cvc1));
vn11=1/3.*(cva1+(a2.*cvb1)+(a.*cvc1));
vz11=1/3.*(cva1+cvb1+cvc1);
ip11=1/3.*(cia1+(a.*cib1)+(a2.*cic1));
in11=1/3.*(cia1+(a2.*cib1)+(a.*cic1));
iz11=1/3.*(cia1+cib1+cic1);
su_1n=table1(data2,zp11);
vp1n=su_1n(:,1);
vn1n=su_1n(:,2);
vz1n=su_1n(:,3);
ip1n=su_1n(:,4);
in1n=su_1n(:,5);
iz1n=su_1n(:,6);
% Calculation Znp1 of Sb(n)1 turn & Su(n) 1
turn
znp11=((in1n.*vn1n)-
(in11.*vn1n))./((ip11.*in1n)-(ip1n.*in11));
x11=real(znp11);
y11=imag(znp11);
%Sb(n)2turns & Su(n)2turns
va2=input('va2=');
vb2=input('vb2=');
vc2=input('vc2=');
anva2=input('anva2=');
anvb2=input('anvb2=');
anvc2=input('anvc2=');
ia2=input('ia2=');
ib2=input('ib2=');
ic2=input('ic2=');
ania2=input('ania2');
anib2=input('anib2');
anic2=input('anic2');
cia2=ia2.*exp(ania2*i);
cib2=ib2.*exp(anib2*i);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

cic2=ic2.*exp(anic2*i);
cva2=va2.*exp(anva2*i);
cvb2=vb2.*exp(anvb2*i);
cvc2=vc2.*exp(anvc2*i);
a=1*exp(i*120*pi/180);
a2=1*exp(i*240*pi/180);
vp22=1/3.*(cva2+(a.*cvb2)+(a2.*cv
c2));
vn22=1/3.*(cva2+(a2.*cvb2)+(a.*cv
c2));
vz22=1/3.*(cva2+cvb2+cvc2);
ip22=1/3.*(cia2+(a.*cib2)+(a2.*cic2)
);
in22=1/3.*(cia2+(a2.*cib2)+(a.*cic2)
);
iz22=1/3.*(cia2+cib2+cic2);
su_2n=table1(data2,zp22);
vp2n=su_2n(:,1);
vn2n=su_2n(:,2);
vz2n=su_2n(:,3);
ip2n=su_2n(:,4);
in2n=su_2n(:,5);
iz2n=su_2n(:,6);
% Calculation Znp1 of Sb(n)2 turns
& Su(n) 2 turns
znp22=((in2n.*vn22)-
(in22.*vn2n))./((ip22.*in2n)-
(ip2n.*in22));
x22=real(znp22);
y22=imag(znp22);
% Sb(n)3turns & Su(n)3turns
va3=input('va3=');
vb3=input('vb3=');
vc3=input('vc3=');
anva3=input('anva3');
anvb3=input('anvb3');
anvc3=input('anvc3');
ia3=input('ia3=');
ib3=input('ib3=');
ic3=input('ic3=');
ania3=input('ania3');
anib3=input('anib3');
anic3=input('anic3');
cia3=ia3.*exp(ania3*i);
cib3=ib3.*exp(anib3*i);
cic3=ic3.*exp(anic3*i);
cva3=va3.*exp(anva3*i);
cvb3=vb3.*exp(anvb3*i);
cvc3=vc3.*exp(anvc3*i);
a=1*exp(i*120*pi/180);
a2=1*exp(i*240*pi/180);
vp33=1/3.*(cva3+(a.*cvb3)+(a2.*cvc3));
vn33=1/3.*(cva3+(a2.*cvb3)+(a.*cvc3));
vz33=1/3.*(cva3+cvb3+cvc3);
ip33=1/3.*(cia3+(a.*cib3)+(a2.*cic3));
in33=1/3.*(cia3+(a2.*cib3)+(a.*cic3));
iz33=1/3.*(cia3+cib3+cic3);
su_3n=table1(data2,zp33);
vp3n=su_3n(:,1);
vn3n=su_3n(:,2);
vz3n=su_3n(:,3);
ip3n=su_3n(:,4);

```

```

ib2=input('ib2=');
ic2=input('ic2=');
ania2=input('ania2=');
anib2=input('anib2=');
anic2=input('anic2=');
eva2=exp(anva2*i);
evb2=exp(anvb2*i);
evc2=exp(anvc2*i);
eia2=exp(ania2*i);
eib2=exp(anib2*i);
eic2=exp(anic2*i);
va12=va2.*eva2;
vb12=vb2.*evb2;
vc12=vc2.*evc2;
ia12=ia2.*eia2;
ib12=ib2.*eib2;
ic12=ic2.*eic2;
a=1*exp(i*120*pi/180);
a2=1*exp(i*240*pi/180);
vp2=1/3*(va12+(a*vb12)+(a2*vc12));
vn2=1/3*(va12+(a2*vb12)+(a*vc12));
vz2=1/3*(va12+vb12+vc12);
in2=1/3.*(ia12+(a2.*ib12)+(a.*ic12));
ip2=1/3.*(ia12+(a.*ib12)+(a2.*ic12));
iz2=1/3.*(ia12+ib12+ic12);
vp22=abs(vp2);
ip22=abs(ip2);
zp22=vp22./ip22;
vn22=abs(vn2);
in22=abs(in2);
zn22=vn22./in22;
vz22=abs(vz2);
iz22=abs(iz2);
zz22=vz22./iz22;
zp222=vp22./ip22;
rp22=real(zp222);
xp22=imag(zp222);
zn222=vn22./in22;
rn22=real(zn222);
xn22=imag(zn222);
zz222=vz22./iz22;
rz22=real(zz222);
xz22=imag(zz222);
vn222=angle(vn2)*180/pi;
in222=angle(in2)*180/pi;
ip222=angle(ip2)*180/pi;
figure(1)
plot(zp22,vn22,'r-',zp22,in22,'b-','zp22,ip22','g-')
xlabel('Magnitude of Vp/Ip = Zp (Ohm)')
ylabel('Magnitude of Vn (V),Ip,In (A)')
hold on
grid
figure(2)
plot(zp22,vn222,'r-',zp22,in222,'b-','zp22,ip222','g-')
xlabel('Magnitude of Vp/Ip = Zp (Ohm)')
ylabel('Phase of Vn,Ip,In (Degree)')
hold on

```

```

grid
%%
figure(3)
xx=0:10:100;
plot(xx,zp22,'r-')
xlabel('%Rated slip')
ylabel('Magnitude of Zp (Ohm)')
hold on
grid
figure(4)
plot(xx,zp22,'r-',xx,rp22,'b-
',xx,xp22,'g-')
xlabel('%Rated slip')
ylabel('Magnitude of Zp,Rp,Xp
(Ohm)')
hold on
grid
figure(5)
plot(rp22,xp22,'r-')
xlabel('Real part of Zp')
ylabel('Imaginary part of Zp')
hold on
grid
%%%%%%
figure(6)
plot(xx,zp22,'r*-')
.....

a=1*exp(i*120*pi/180);
a2=1*exp(i*240*pi/180);
vp=1/3*(va1+(a*vb1)+(a2*vc1));
vn=1/3*(va1+(a2*vb1)+(a*vc1));
vz=1/3*(va1+vb1+vc1);
ip=1/3*(ia1+(a.*ib1)+(a2.*ic1));
in=1/3*(ia1+(a2.*ib1)+(a.*ic1));
iz=1/3*(ia1+ib1+ic1);
zp=vp./ip;
zn=vn./in;
zz=vz./iz;
vp1=abs(vp);
vp2=angle(vp)*180/pi;
vn1=abs(vn);
vn2=angle(vn)*180/pi;
vz1=abs(vz);
vz2=angle(vz)*180/pi;
ip1=abs(ip);
ip2=angle(ip)*180/pi;
in1=abs(in);
in2=angle(in)*180/pi;
iz1=abs(iz);
iz2=angle(iz)*180/pi;
zp1=abs(zp)
zp2=angle(zp)*180/pi
zp3=real(zp)
zp4=imag(zp)
zn1=abs(zn)
zn2=angle(zn)*180/pi
.....

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

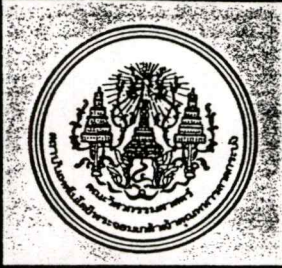
```

in3n=su_3n(:,5);
iz3n=su_3n(:,6);
% Calculation Znp3 of Sb(n)3 turns
& Su(n)3 turns
znp33=((in3n.*vn33)-
(in33.*vn3n))./((ip33.*in3n)-
(ip3n.*in33));
x33=real(znp33);
y33=imag(znp33);
% Sb(n)4turns & Su(n)4turns
va4=input('va4=');
vb4=input('vb4=');
vc4=input('vc4=');
anva4=input('anva4');
anvb4=input('anvb4');
anvc4=input('anvc4');
ia4=input('ia4=');
ib4=input('ib4=');
ic4=input('ic4=');
ania4=input('ania4');
anib4=input('anib4');
anic4=input('anic4');
cia4=ia4.*exp(ania4*i);
cib4=ib4.*exp(anib4*i);
cic4=ic4.*exp(anic4*i);
cva4=va4.*exp(anva4*i);
cvb4=vb4.*exp(anvb4*i);
cvc4=vc4.*exp(anvc4*i);
a=1*exp(i*120*pi/180);
a2=1*exp(i*240*pi/180);

vp44=1/3.*(cva4+(a.*cvb4)+(a2.*cvc4));
vn44=1/3.*(cva4+(a2.*cvb4)+(a.*cvc4));
vz44=1/3.*(cva4+cvb4+cvc4);
ip44=1/3.*(cia4+(a.*cib4)+(a2.*cic4));
in44=1/3.*(cia4+(a2.*cib4)+(a.*cic4));
iz44=1/3.*(cia4+cib4+cic4);
su_4n=table1(data2,zp44);
vp4n=su_4n(:,1);
vn4n=su_4n(:,2);
vz4n=su_4n(:,3);
ip4n=su_4n(:,4);
in4n=su_4n(:,5);
iz4n=su_4n(:,6);
% Calculation Znp4 of Sb(n)4 turns &
Su(n)4 turns
znp44=((in4n.*vn44)-
(in44.*vn4n))./((ip44.*in4n)-(ip4n.*in44));
x44=real(znp44);
y44=imag(znp44);
plot(x1,y1,'r*',x11,y11,'b*',x22,y22,'g*',x33,y
33,'y*',x44,y44,'k*');
grid
hold on
%cal
va2=input('va2=');
vb2=input('vb2=');
vc2=input('vc2=');
anva2=input('anva2=');
anvb2=input('anvb2=');
anvc2=input('anvc2=');
ia2=input('ia2=');

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ISSN 0125-1724

วิศวกรรม

ลาดกระบัง

คณาจารย์และนักศึกษา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 21 ฉบับที่ 2

มิถุนายน 2547

1. การออกแบบและการจัดทำระบบแลกเปลี่ยนข้อมูลในสายการผลิตโรงงานประกอบฮาร์ดดิสก์
สิทธิพร พิมพ์กุล พงษ์สวัสดิ์ เอี่ยมสำอางค์ ภาคภูมิ รุ่งवालันท์ ภูวรา นาคพันธ์ 1
2. การสังเคราะห์โพลิเมอร์จากปฏิกิริยาและพลังงานเพื่อประยุกต์ใช้เป็นฉนวนดูดกลืนเสียง
จุไรรัตน์ ระเบียบศัพท์ ไพศาล นาคพิพัฒน์ 7
3. เทคนิคการตรวจวัดสภาวะเครื่องจักรในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้องค์ประกอบลำดับฮาร์มอนิกเพื่อบันทึก
จิรวิทย์ เจริญมนะวงศ์ เฉลิมชาติ มานพ วิจิตร กิณเรศ 13
4. การวิเคราะห์ความเหมาะสมในการออกแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าแรงดัน 115 กิโลโวลต์แบบลูปปิด
วรารุณ จิตตพันธ์ มณฑล สีสัจจินดาไกรฤกษ์ 19
5. การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีการควบคุมแรงดันและความถี่จากการประเมินค่าขนาดเส้นแรงแม่เหล็กที่สเตเตอร์
จิรภัทร อุปถัมภ์ วิจิตร กิณเรศ 25
6. การพยากรณ์ความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดระยะยาวของระบบ กฟผ. โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม
ไอลรา ธรรมานนท์ มณฑล สีสัจจินดาไกรฤกษ์ สมชาติ จิรวิภากร 31
7. การรู้จำเสียงสระเดี่ยวและสระผสมในภาษาไทยโดยการแยกแยะทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของอวัยวะกำทอนเสียงบนสเกลบาร์ด้วย
เทคนิค KNN
นงนุช สุขตั้งมั่น ไกรสิน ส่องวัฒนา 37
8. การแยกสระเสียงสั้น และสระเสียงยาวในภาษาไทยโดยใช้การฝึกโครงข่ายประสาทเทียมแบบพหุนามอันดับสอง บนฟังก์ชันพลังงานเสียง
กัญญ์ สิทธิประเสริฐ ไกรสิน ส่องวัฒนา 43
9. กระบวนการโลหะของรอยสัมผัสไฮโดรเมคสำหรับเทคโนโลยีวงจรรวมระดับ 5 ไมโครเมตรในประเทศไทย
ทรงพล รอดทอง รุ่งสรรค์ เมืองเหลือ โสภณ พรหมชัย เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล 49
10. การจำลองแบบเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อการศึกษาประสิทธิภาพของตัวเซลล์
ภา ชาติรัตน์ สมศักดิ์ เขียวศิริกุล 55
11. การออกแบบวงจรบวกเลขฐานสองโดยวิธีแคสเคดด้วยเกทส่งผ่าน
ธนสาร นาคเนียม กอบชัย เดชหาญ 61
12. วงจรคูณสัญญาณกระแสทำงานในคลาส AB ใช้เทคโนโลยีซีมอส
รอสาสิ ตือระ สุชาติ คุณทวีเทพ 67
13. วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นและวงจรบวกทางเวกเตอร์ใช้แรงดันต่ำโดยใช้เทคโนโลยีซีมอส
สิริชัย สุเมธวรกุล กอบชัย เดชหาญ กฤษณ์ อ่างแก้ว 72
14. อัตราผิดพลาดบิตและการชิงโครโนซ์ของสโรว์ฟรีควีนซีฮอปปีงมัลติแคเรีย ดีเอส ซีดีเอ็มเอ
อนันต์ ทองเดช กอบชัย เดชหาญ 77
15. การออกแบบระบบเครือข่ายภายในความเร็วสูงโดยใช้เทคโนโลยีกิกะบิตอีเทอร์เน็ตร่วมกับสวิตช์เลเยอร์ 3
อวิชชัย มะพะสาธุโร กอบชัย เดชหาญ 83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคการตรวจจับขดลวดสเตเตอร์ลัดรอบในมอเตอร์ เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้องค์ประกอบลำดับอิมพีแดนซ์เมตริกซ์

Stator Winding Short Turns Detection Technique in 3-Phase Induction Motors Using Sequence Component Impedance Matrix

จิรวิทย์ เจริญมานะวงศ์ เจริญชาติ มานพ และวิจิตร กิณเรศ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเทคนิคการตรวจจับขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสลัดรอบ โดยใช้องค์ประกอบลำดับอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ (Sequence Component Impedance Matrix) ข้อดีของวิธีการดังกล่าวจะมีความเหมาะสมสำหรับการตรวจจับในระยะเริ่มแรกของการลัดวงจรและที่สภาวะการทำงานเมื่อมอเตอร์มีโหลด โดยในสภาวะดังกล่าวจะทำให้ค่าของอิมพีแดนซ์ที่ลำดับบวก ลบ และศูนย์มีค่าที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งจะทำให้มีความถูกต้องในการตรวจจับขดลวดสเตเตอร์ลัดรอบสูงกว่าเทคนิคอื่นๆ ที่จำนวนรอบของการลัดวงจรน้อยๆ ทั้งนี้จะสามารถลดผลค่าสถิติของความไม่สมมาตรภายในตัวมอเตอร์ แหล่งจ่ายไฟไม่สมดุล และรวมถึงความผิดพลาดในการวัดเป็นต้นได้ จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าวิธีการดังกล่าวสามารถนำมาใช้ตรวจจับขดลวดสเตเตอร์ลัดรอบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Abstract

This paper presents a detection technique for stator winding turn faults of 3 phase induction motor based on the sequence component impedance matrix. The advantages of this method are appropriate for detecting turn faults in an early stage and operating load condition. In such condition, the value of positive, negative and zero sequence impedance are different from each other. Consequently, this technique is accurately capable of detecting small levels of turn faults, as compared with other techniques. Moreover, the effect of slip-dependent influence of inherent motor asymmetry, supply voltage unbalance and measurement errors are reduced. The simulation results show the validity of the proposed turn fault detection technique.

1. บทนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสมีความสำคัญอย่างมากในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากมีการนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการดูแลรักษาและตรวจเช็ค

สภาพเพื่อให้สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพ ดังนั้นการตรวจสอบและวิเคราะห์ความผิดปกติต่างๆที่เกิดขึ้นภายในมอเตอร์จึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องทำอย่างต่อเนื่องได้ เพื่อเป็นสัญญาณเตือนว่ามอเตอร์อยู่ในสภาพที่ดี พร้อมทั้งจะใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานปัญหาหรือความผิดปกติที่เกิดขึ้นก็มีหลายสาเหตุ และหนึ่งในจำนวนนั้นก็คือปัญหาล้วนของขดลวดเสื่อม สภาพโดยจะมีผล ทำให้เกิดขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบถึงรอบ (Turn-to-turn) ซึ่งจะเกิดขึ้นในระยะแรกเริ่มและต่อไปอาจจะลุกลามไปยัง ขดลวดถึงขดลวด (Coil-to-coil) ค่อยด้วยเฟสถึงเฟส (Phase-to-phase) และขดลวดลงกราวด์ (Coil-to-ground) ตามลำดับ [1] ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการตรวจสอบความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระยะแรกเริ่ม เพื่อที่จะสามารถทำการวางแผนที่จะทำการซ่อมบำรุงก่อนที่จะมีการลุกลามและขยายความรุนแรงต่อไป

ปกติแล้วปัญหาการลัดรอบระหว่างรอบถึงรอบ ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ จะสามารถตรวจจับได้ยาก เนื่องจากความรุนแรงดังกล่าวยังไม่มากพอที่จะสามารถตรวจจับได้ เนื่องจากสัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กมาก ดังเช่นการตรวจจับโดยใช้เทคนิคผลรวมแรงดันโกล์-นิวทรอล [2] ที่มีปัญหาอันเนื่องมาจากผลของแหล่งจ่ายไฟไม่สมดุล ในบทความนี้ได้นำเสนอการตรวจจับโดยใช้องค์ประกอบลำดับฮาร์มอนิกที่แฉกซ์เมตริกซ์ ซึ่งจะมียอดดีกว่าเทคนิคอื่น ๆ คือจะอาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าองค์ประกอบลำดับฮาร์มอนิกที่แฉกซ์เมตริกซ์ ซึ่งจะมีควมน่าเชื่อถือมากกว่า ทั้งนี้ยังสามารถลดผลกระทบเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล โหลดเปลี่ยนแปลง รวมถึงความผิดพลาดจากการวัดสัญญาณได้

2. องค์ประกอบลำดับฮาร์มอนิกที่แฉกซ์เมตริกซ์

ถ้าให้ V, I และ Z คือค่าของแรงดันเฟส กระแสเฟส และฮาร์มอนิกที่แฉกซ์ตามลำดับ และมีซัพสคริป (Subscribe) p, n และ z แทนองค์ประกอบลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์ตามลำดับ แรงดันองค์ประกอบลำดับในรูปของเมตริกซ์สามารถเขียนได้เป็น [3]

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_p \\ \bar{V}_n \\ \bar{V}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{pp} & Z_{pn} & Z_{pz} \\ Z_{np} & Z_{nn} & Z_{nz} \\ Z_{zp} & Z_{zn} & Z_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_p \\ \bar{I}_n \\ \bar{I}_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

โดยที่ Z_{ij} จะหมายถึงค่าฮาร์มอนิกที่แฉกซ์ของลำดับ i เนื่องจากลำดับ j และสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าในอุดมคติ

จำนวนเทอมของ Off-diagonal ของเมตริกซ์ฮาร์มอนิกที่แฉกซ์ใน (1) $Z_{pn}, Z_{pz}, Z_{np}, Z_{nz}, Z_{zp}$ และ Z_{zn} จะมีค่าเป็นศูนย์ แต่ความเป็นจริงแล้ว ความไม่สมมาตรภายในตัวของมอเตอร์เอง จะทำให้เทอมของ Off-diagonal มีค่าไม่เป็นศูนย์ ดังนั้นค่าองค์ประกอบลำดับจะมีอิทธิพลต่อกัน ซึ่งนั่นจะเป็นการแสดงให้เห็นระดับของความไม่สมมาตรภายในตัวมอเตอร์ จาก (1) ค่าขององค์ประกอบลำดับศูนย์ของกระแสไลน์จะเป็นศูนย์ถ้าไม่มีการต่อกราวด์หรือว่าไม่มีกราวด์ฟอลต์ในระบบเกิดขึ้น และในงานวิจัยนี้มอเตอร์ที่ใช้จำลองถูกต่อเป็นแบบวาย ซึ่งจะได้อำนาจ $I_z = 0$ ทั้งนี้สมการสำหรับการตรวจจับฟอลต์เนื่องจากขดลวดสเตเตอร์ลัดรอบจะมีการเปลี่ยนแปลงเป็น

$$\bar{V}_n = Z_{np} \bar{I}_p + Z_{nn} \bar{I}_n \quad (2)$$

และเมื่อเกิดสภาวะการลัดรอบขึ้นในขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์จะทำให้ค่าของ Z_{np} เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากจะเกิดความไม่สมมาตรขึ้นเนื่องจากขดลวด ดังนั้นสามารถที่จะตรวจจับโดยการตรวจสอบค่า Z_{np} เปรียบเทียบกับค่าในสภาวะที่มอเตอร์มีความสมมาตรภายใต้ค่าสลับเดียวกันได้ ทั้งนี้ค่าความเบี่ยงเบนไปจะถูกนำมาเป็นตัวชี้วัดค่าฟอลต์ซึ่งจะนิยามได้โดยสมการคือ

$$\Delta Z_{np} \equiv Z_{np} - Z_{np0} \quad (3)$$

และสามารถหาค่าของ Z_{np} ได้จากสมการ

$$\begin{bmatrix} Z_{np} \\ Z_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{I}_{p1} & \bar{I}_{n1} \\ \bar{I}_{p2} & \bar{I}_{n2} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \bar{V}_{n1} \\ \bar{V}_{n2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$Z_{np} = \frac{\bar{I}_{n2} \cdot \bar{V}_{n1} - \bar{I}_{n1} \cdot \bar{V}_{n2}}{\bar{I}_{p1} \cdot \bar{I}_{n2} - \bar{I}_{p2} \cdot \bar{I}_{n1}} \quad (5)$$

โดยที่ซัพสคริป 1 และ 2 จะแสดงถึงการวัดค่าครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ตามลำดับ

3. วิธีการจำลอง

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ใช้ในการจำลองได้จากการทดสอบโดยมีพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้ 2 แรงม้า 4 ขั้วแม่เหล็ก ใช้กับระดับของแรงดัน 380/220 โวลต์ กระแสเท่ากับ 3.5/6 แอมแปร์ ที่ความเร็ว 1,450 รอบต่อนาที มีจำนวนรอบของขดลวดสเตเตอร์ ที่พันในหนึ่งเฟสเท่ากับ 282 รอบ และมี R_s เท่ากับ 3.85 โอห์ม R_r เท่ากับ 3.46 โอห์ม R_m เท่ากับ 623.29 โอห์ม X_s เท่ากับ 3.98 โอห์ม X_r เท่ากับ 5.96 โอห์มและ X_m เท่ากับ 134.39 โอห์ม การจำลองได้ใช้โปรแกรม MATLAB ที่การประมวลผลเป็นแบบเมตริกซ์ด้วยการสมมติค่าของการลัดรอบจาก 1 รอบ ถึง 5 รอบ ($u = 1/282$ ถึง $u = 5/282$) ลงในสมการต่อไปนี้ [4]

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_p \\ \bar{V}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{pp} & Z_{pn} \\ Z_{np} & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_p \\ \bar{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{pp} & Y_{pn} \\ Y_{np} & Y_{nn} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{I}_p \\ \bar{I}_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$Y_{np} = Y_{pn} = \frac{u^2}{3\{R_f + u(R_s + j\omega L_u)\}} \quad (7)$$

$$= \frac{u^2}{3(R_f + uZ_s)}$$

$$Y_{pp} = Y_p + Y_{pn} \quad (8)$$

$$Y_{nn} = Y_n + Y_{np} \quad (9)$$

โดยค่า Y_j ก็คือค่าแอดมิตแตนซ์ (Admittance) ของลำดับ i เนื่องจากลำดับ j ส่วน Y_p, Y_n และ Z_s คือค่าแอดมิตแตนซ์ในอุดมคติลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์ตามลำดับ ω คือความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ ขณะที่ R_s และ L_u ก็คือค่าความต้านทานและค่าอินดักแตนซ์ของสเตเตอร์ ส่วน R_f คือค่าความต้านทานภายในรูปของการลัดรอบ และ u คือค่าอัตราส่วนของจำนวนรอบที่ลัดวงจรต่อจำนวนรอบทั้งหมดใน 1 เฟสและค่า Z_{np} จากสมการที่ (6) ~ (9) จะได้สมการใหม่เป็น

$$Z_{nr} = \frac{-Y_{nr} Z_p Z_n}{1 + Y_{nr} (Z_p + Z_n)} \quad (10)$$

โดยที่ค่า Z_p และ Z_n ก็คือค่าอิมพีแดนซ์ลำดับบวกและลบตามลำดับ ทั้งนี้สมการที่ (10) สามารถที่จะขจัดให้เหลืออยู่ในรูปอย่างง่ายโดยกำหนดให้ค่า $R_f = 0$ และ

$u(Z_p + Z_n)/3Z_s \ll 1$ สำหรับจำนวนของการลัดรอบที่จำนวนน้อยๆ ($u \ll 1$) ซึ่งก็คือ

$$Z_{nr} \approx -u \frac{Z_p Z_n}{3Z_s} \quad (11)$$

จากสมการที่ (11) จะพบว่าค่าของ Z_{nr} จะเพิ่มขึ้นตามความรุนแรงของฟอลต์ที่เกิดขึ้น (u เพิ่มขึ้น) และเปลี่ยนแปลงในฟังก์ชันของสลิปเนื่องจากค่า Z_p และสำหรับกรณีของมอเตอร์ที่มีความสมบูรณ์ ($u = 0$) ค่าของ Z_{nr} จะเป็นศูนย์โดยจะไม่ขึ้นกับค่าสลิป $\Delta Z_{nr} \equiv Z_{nr}$ ในส่วนของโมเดลสำหรับความผิดพลาดในการวัดจะถูกนำมาพิจารณาเพื่อนำมาแก้ไขและเปลี่ยนแปลงค่าใน i_{as}, i_{bs}, v_{ab} และ v_{bc} เพื่อความถูกต้องยิ่งขึ้นทั้งนี้สามารถถูกนำเสนอได้โดย

$$\bar{I}_{as,m} = \alpha_i \bar{I}_{as}, \quad \bar{I}_{bs,m} = \alpha_i \beta_i \bar{I}_{bs}, \quad (12)$$

$$\bar{V}_{as,m} = \alpha_i \bar{V}_{as}, \quad \bar{V}_{bc,m} = \alpha_i \beta_i \bar{V}_{bc} \quad (13)$$

โดยที่ $\alpha_i, \beta_i, \alpha_v$ และ β_v ก็คือค่าสเกลแฟกเตอร์ที่ไม่เป็นอุดมคติ (Nonideal scaling factor) ที่เป็ค่าผิดพลาดสำหรับการวัดใน i_{as}, i_{bs}, v_{ab} และ v_{bc} ดังนั้นค่า Z_{nr} ที่ได้จากสมการ (12) และ (13) จะได้เป็น Z'_{nr} ใหม่ที่มีสมการเป็น

$$Z'_{nr} = \left(\frac{\alpha_i}{3\alpha_i \beta_i} \right) \{ (1-\beta_i)(1-\alpha\beta_i)Z_n - (1-\alpha\beta_i)(1-\beta_i)Z_p - (1-a^2)(\beta_v - a)Y_{nr} \} / (1 + Y_{nr} (Z_p + Z_n)) \quad (14)$$

โดยที่ $a = \exp(j2\pi/3)$ และถ้าค่าของ $\alpha_i, \beta_i, \alpha_v$ และ β_v มีค่าเท่ากับ 1 และแทนค่าลงในสมการที่ (14) จะกลายเป็นสมการที่ (15) ทั้งนี้ค่าของ Z_{nr} สำหรับกรณีที่มีมอเตอร์มีความสมบูรณ์จะหาได้โดยทำการแทนค่า $u = 0$ ($Y_{nr} = 0$) ลงในสมการที่ (14) จะได้

$$Z'_{np} = \left(\frac{\alpha}{3\alpha_n} \right) \{ (1-\beta)(1-a\beta)Z_n - (1-a\beta)(1-\beta)Z_r \} \quad (15)$$

เนื่องจากสาเหตุจากการวัดค่าผิดพลาดหรือคลาดเคลื่อนจะทำให้ค่าของ Z'_{np} มีค่าเกิดขึ้นและเปลี่ยนแปลงตามค่าสลิป $\Delta Z'_{np}$ จะสามารถหาได้จาก

$$\begin{aligned} \Delta Z'_{np} &\approx -(\alpha_v / 3\alpha_n \beta_1)(1-a^2)(\beta_v - a)Y_{np}Z_pZ_n \\ &\approx -(\alpha_v / 3\alpha_n \beta_1)(1-a^2)(\beta_v - a)u(Z_pZ_n / 3Z_r) \end{aligned} \quad (16)$$

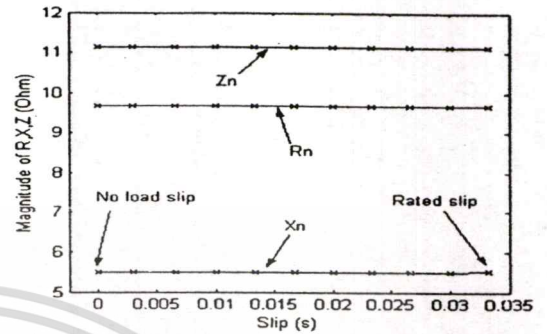
จะสังเกตเห็นได้ว่าสมการที่ (16) จะมีค่าสเกลแฟกเตอร์ซึ่งจะหมายถึงค่าที่ผิดพลาดในการวัดรวมอยู่ด้วยนั่นเอง จากสมการ $\Delta Z'_{np}$ จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างอิสระตามความรุนแรงของฟอลต์ โดยในการนำเสนอจะประมาณค่าแฟกเตอร์สเกลอยู่ที่ประมาณ $1 + j0$ (ผิดพลาดน้อย) โดยจะทำการกำหนดค่าผิดพลาดในการวัด i_{a1}, i_{b1}, v_{ab} และ v_{bc} เป็น $+0.5\%, -0.5\%, +0.5\%$ และ 0% ตามลำดับ โดยจะเห็นได้ว่าค่าผิดพลาดในการวัดเพียงเล็กน้อยจะมีผลและไวต่อค่า Z_{np} เป็นอย่างมาก ในทำนองเดียวกันอิทธิพลของความไม่สมมาตรภายในมอเตอร์เองจะไม่มีผลกระทบต่อวิธีนี้เนื่องจากจะถูกกำหนดโดยเงื่อนไขของสลิปแต่ละค่า

4. ผลการจำลอง

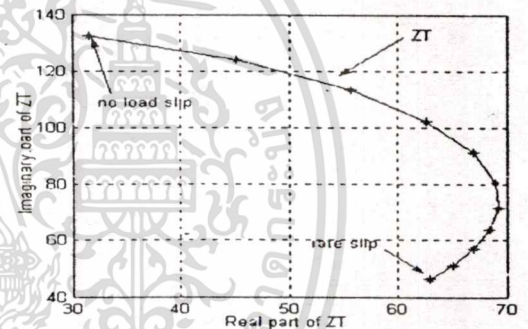
การจำลองในขั้นต้นได้ทำการหาค่าของ R_n, X_n และ Z_n สำหรับกรณีที่มีมอเตอร์มีความสมบูรณ์ตลอดการทำงานที่พิกัดสลิปค่าต่างๆ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าลำดับบที่ใด จะมีค่าคงที่ตลอดการทำงานภายใต้การมีโหลดของมอเตอร์ แต่ในกรณีของการทดลองจริงแล้วค่านี้ อาจมีการเปลี่ยนแปลงในระดับการเปลี่ยนแปลงที่ค่อนข้างมากได้

ผลการจำลองรูปที่ 2 จะเป็นการแสดงค่าอิมพีแดนซ์ (Z_T) ในรูปของจำนวนเชิงซ้อนโดยค่าจริง (Real part) จะเป็นการแสดงค่าความต้านทาน (R_T) และค่าเชิงซ้อน (Imaginary part) จะเป็นค่าอินดักแตนซ์ (X_T) ทั้งนี้ได้ทำการจำลองโดยการเปลี่ยนแปลงค่าของสลิป ในช่วงที่มีค่าเป็นศูนย์ถึงค่าพิกัด

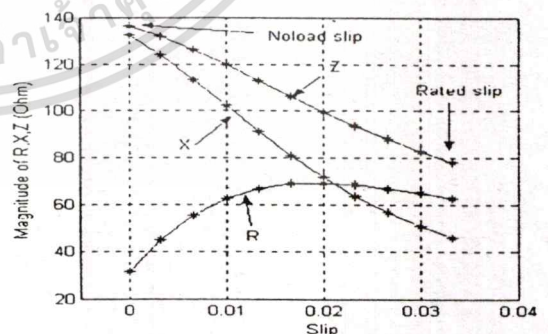
จากรูปจะเห็นการเปลี่ยนแปลงไปของค่า R_T และ X_T ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส



รูปที่ 1 การเปลี่ยนแปลงของค่า R_n, X_n และ Z_n ในอุดมคติของอิมพีแดนซ์ลำดับบ

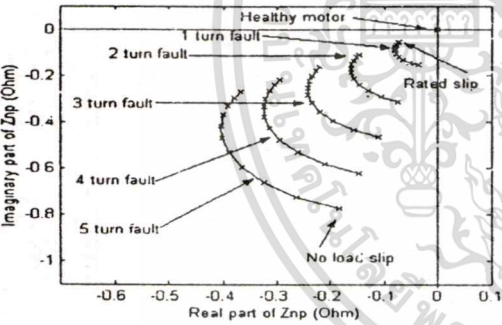


รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงของค่าอิมพีแดนซ์รวม (Z_T) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้จากการจำลอง

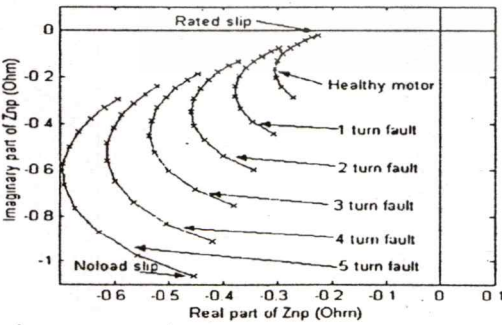


รูปที่ 3 ค่า R, X และ Z ในอุดมคติของอิมพีแดนซ์ลำดับบ

สำหรับการจำลอง เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าอิมพีแดนซ์ลำดับบวกได้แสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงไปของค่าดังกล่าว จะขึ้นอยู่กับค่าสลิปของวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำลำดับบวกด้วยเช่นกัน รูปที่ 4 เป็นการคำนวณค่า Z_{np} สำหรับกรณีที่มีการเกิดฟอลต์ ทั้งนี้ในการจำลองได้กำหนดให้ $n - 1/282$ ถึง $n - 5/282$ โดยใช้สมการที่ (10) เมื่อทีกัดสลิปมีค่าตั้งแต่ 0% ถึง 100% จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าค่า Z_{np} จะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามค่าสลิป และขนาดของฟอลต์ที่มีค่ามากขึ้นตามจำนวนของการลัดรอบ โดยที่ Z_{np} จะมีวงรัศมีที่เพิ่มสูงขึ้น เมื่อจำนวนของการลัดรอบสูงขึ้นซึ่งจะสามารถนำมาทำการวินิจฉัย ความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้ และจะสังเกตเห็นได้ว่าค่าของ Z_{np} ของมอเตอร์ที่สมบูรณ์ (ไม่มีการลัดรอบ) จะมีค่าเป็นศูนย์และเป็นอิสระต่อค่าสลิป เนื่องจากเป็นมอเตอร์ในอุดมคติที่ถูกสมมุติขึ้น แต่ในความเป็นจริงแล้วค่านี้อาจจะไม่เป็นศูนย์ ซึ่งอาจจะมีหลายสาเหตุด้วยกัน ทั้งนี้ยังรวมถึงความแตกต่างในการออกแบบมอเตอร์แต่ละตัวอีกด้วย

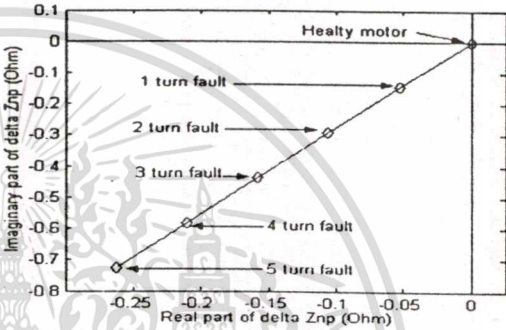


รูปที่ 4 ค่าของ Z_{np} ในอุดมคติที่ไม่มีค่าผิดพลาดจากการวัด

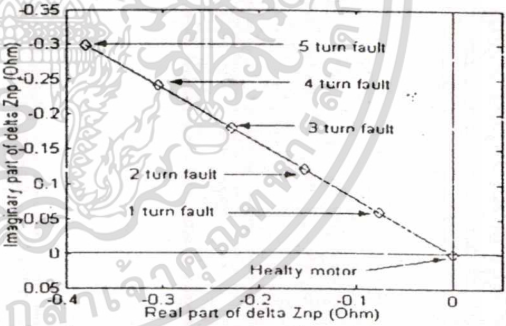


รูปที่ 5 ค่าของ Z_{np} ที่มีค่าผิดพลาดจากการวัด

จากข้อสังเกตดังกล่าว นำมาสู่การจำลองถึงข้อผิดพลาดที่อาจจะเกิดขึ้นได้ โดยการกำหนดให้มีค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นตามที่ได้กำหนดไว้แล้วใน i_a, i_b, v_a และ v_b ตามลำดับ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5 จากผลการจำลองพบว่าค่าของ Z_{np} ก็ยังคงมีการเพิ่มขึ้นตามความรุนแรงของฟอลต์ (จำนวนการลัดรอบ) แม้ว่าจะมีการเบี่ยงเบนไปจากเดิม เนื่องจากความผิดพลาดจากการวัดก็ตาม รวมถึงในกรณีที่มอเตอร์สมบูรณ์ก็จะมีผลทำให้ Z_{np} มีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่าของสลิปด้วยเช่นกัน



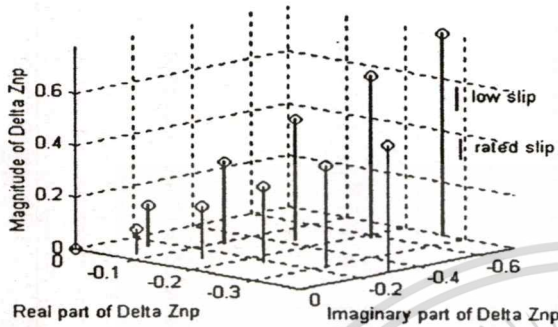
รูปที่ 6 เมื่อค่า ΔZ_{np} ของมอเตอร์ที่สภาวะไร้โหลด



รูปที่ 7 เมื่อค่า ΔZ_{np} ของมอเตอร์ที่สภาวะพิกัดโหลด

และจากรูปที่ 6 และ 7 เป็นการแสดงค่า ΔZ_{np} ที่ค่าใดๆ ที่มีค่าใกล้ค่าสลิปเป็นศูนย์ และที่ใกล้ค่าสลิปพิกัดและการคำนวณของค่า ΔZ_{np} จะแสดงในระนาบคอมเพล็กซ์ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่า ค่ามันจะเบี่ยงเบนออกจากค่ามอเตอร์ที่สมบูรณ์จะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับจำนวนการลัดรอบที่เพิ่มขึ้น และจากรูปที่ 8 แสดงให้เห็นว่าขนาดของ ΔZ_{np} สามารถที่จะเป็นตัวชี้การเกิดฟอลต์ และระดับของสัญญาณเล็กๆของสัญญาณฟอลต์

จากการลัดรอบ สามารถที่ถูกตรวจจับได้และอีกทั้งยังสามารถแสดงให้เห็นว่าขนาดของฟอลต์ที่เกิดจากการลัดรอบนี้ จะมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในค่าสลิปที่แตกต่างกัน



รูปที่ 8 เปรียบเทียบค่า $|\Delta Z_{np}|$ ที่ค่าสลิปต่ำกว่าค่าที่พิกัด

5. สรุป

การตรวจจับการลัดรอบในขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้หลักการขององค์ประกอบลำดับฮิมิทแดนซ์เมตริกซ์นี้ จะมีประโยชน์อย่างมากในการตรวจจับฟอลต์เนื่องจากขดลวดสเตเตอร์ลัดรอบที่เกิดขึ้น เนื่องจากเป็นวิธีที่มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือสูงเพราะสามารถทำให้อิทธิพลของความไม่สมดุลของแหล่งจ่ายไฟ ค่าสลิปและผลผลิตจากการวัดลดลงได้ ในการจำลองเบื้องต้นนี้ได้มุ่งไปสู่การวัดที่สูงขึ้น เพื่อจะได้นำหลักการดังกล่าวร่วมกับเทคนิคแบบออนไลน์ (On-line) ตรวจจับขดลวดสเตเตอร์ลัดรอบในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสต่อไป

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A.H. Bonnett and G.C. Soukup, "Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors," IEEE Trans. Industry Application, vol. 28, no. 4, pp. 921-937, July/August 1992.
- [2] M.A. Cash, T.G. Habetler, and G.B. Kliman, "Insulation failure prediction in AC machines using line-neutral voltages," IEEE Trans. Industry Applications, vol. 34, no. 6, pp. 1234-1239, November/December 1998.
- [3] S.B. Lee, R.M. Tallam and T.G. Habetler, "A robust, on-lines turn-fault detection technique for induction machines based on monitoring the sequence component impedance matrix," IEEE Trans. Power electronics, vol. 18, no. 3, pp. 865-872, May 2003.
- [4] R.M. Tallam, T.G. Habetler, and R.G. Harley, "Transient Model for Induction Machines with Stator Winding Turn Faults," Proc. Conf. IEEE-IAS Ann. Meeting, vol. 1, pp. 304-309, Oct. 2000.
- [5] J. Sottile and J.L. Kohler "An On-Line Method to Detect Incipient Failure of Turn Insulation in Random-Wound Motors" IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 8, No. 4, pp. 762-768, December 1993.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Induction Motor 3 Phase

Power rating : 1 Hp

Rated voltage : Δ / Y ,220 / 380 V

Rated current : 3.51 / 2.03 A

Rated speed : 1390 rpm

No. Poles : 4

Frequency : 50 Hz

Induction Motor 3 Phase

Power rating : 2 Hp

Rated voltage : Δ / Y ,220 / 380 V

Rated current : 6.0 / 3.5 A

Rated speed : 1450 rpm

No. Poles : 4

Frequency : 50 Hz

Power Meter , Metrix PX-120

Model : PX 120

AC voltage from 500 mV to 600 V rms,

AC current from 10 mA to 10 A

AC active power levels up to 6 kW

AC reactive power levels up to 6 kVAR

AC apparent power levels up to 6 kVA

Measurement rang concerning the fundamental frequency is 40 to 70 Hz

Power factor

Voltage regulator 1 Phase

Model : SD – 16

Input : 220 / 50 – 60 Hz

Output : 0 – 250 V

Capacity : 4 kVA, Max 16 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Lamp (Load)

Lamp Phillips 100 Watt : 40 Lamps

Pocket Tachometer

Model : 3631 Yokokawa

Range : 60 – 2000 rpm

: 60 – 20000 rpm

Hewlett Packard Multimeter

Model : 973 A, 20 KHz

Max current : 10 A

Max voltage : 1000 V

Ω : 400 Ω – 40 M Ω

Digital clamp on tester

Model : 2343₀₂ Yokokawa

Rang of Current : 40 A / 400 A / 1000 A

Rang of Voltage : 40 V / 400 V / 600 V

Ω : 400 Ω – 4 K Ω

DC MOTOR

Out put : 1.5 kW

Volts : 130 V

Amps : 15 A

R.P.M : 1800

FLD.Volts : 180

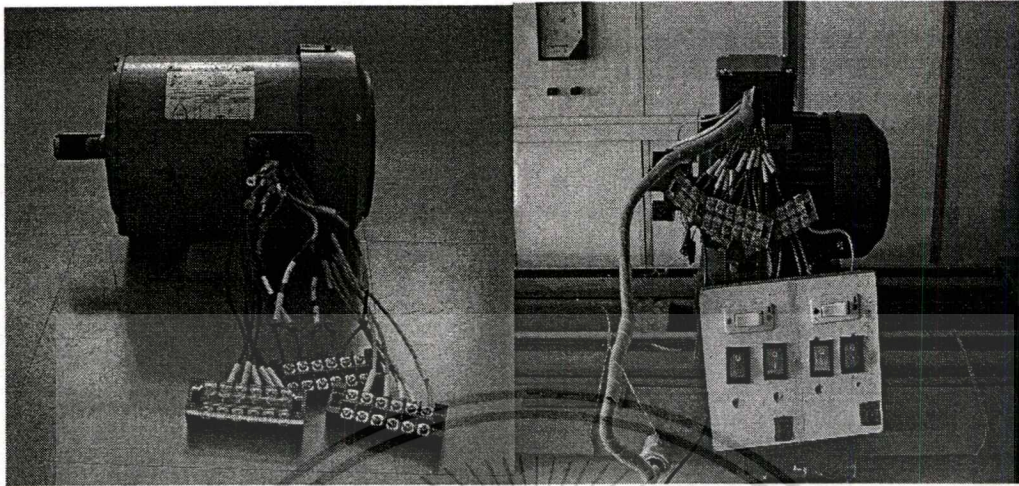
Wound : Shunt

Type : KC – 150T

DC Rectifier

Capacity : 1000 V, 2002 μF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

(ข)

รูปที่ ง.1 การพันมอเตอร์ที่ดึงแท็บสายออกมาจากขดลวดสเตเตอร์

(ก) มอเตอร์ 2 HP (ข) มอเตอร์ 1 HP



รูปที่ ง.2 ชุดทดลองการตรวจจับสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า 3 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายจิรวิทย์ เตรียมมานะวงศ์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2542 และใน ปี พ.ศ. 2542 - 2546 เข้าทำงานในตำแหน่งวิศวกรไฟฟ้า บริษัทเอกชนแห่งหนึ่งใน กรุงเทพมหานคร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้