

การประมาณอายุการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์
ข้อมูลสัญญาณไฟฟ้าของมอเตอร์

**Aging Estimation of 3-Phase Induction Motors by Using Electric Signal
Data Analysis Techniques**

ธนาภรณ์ ลิขิตเจริญกุล

Thanaporn Likitjarernkul

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Electrical Engineering
Prince of Songkla University**

2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การประมาณอายุการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์
ข้อมูลสัญญาณไฟฟ้าของมอเตอร์

**Aging Estimation of 3-Phase Induction Motors by Using Electric Signal
Data Analysis Techniques**

ธนาภรณ์ ลิขิตเจริญกุล

Thanaporn Likitjarernkul

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Electrical Engineering
Prince of Songkla University**

2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์	การประมาณอายุการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลสัญญาณไฟฟ้าของมอเตอร์
ผู้เขียน	นางสาวธนาภรณ์ ลิขิตเจริญกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	คณะกรรมการสอบ
..... (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษมาลย์ เฉลิมยานนท์)ประธานกรรมการ (ดร.กิตติคุณ ทองพูล)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมกรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษมาลย์ เฉลิมยานนท์)
..... (ดร.รักษกฤตว์ ดวงสร้อยทอง)กรรมการ (ดร.รักษกฤตว์ ดวงสร้อยทอง)
กรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร.พรชัย พฤษชัยภัทรานนท์)
กรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มงคล กงศ์หิรัญ)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.ดำรงศักดิ์ ฟ้ารุ่งแสง)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กุสุมาลย์ เจริญยานนท์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นางสาวธนาภรณ์ ลิขิตเจริญกุล)

นักศึกษา

(4)

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการขอขึ้นอนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นางสาวชนาภรณ์ ลิขิตเจริญกุล)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การประมาณอายุการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลสัญญาณไฟฟ้าของมอเตอร์
ผู้เขียน	นางสาวธนาภรณ์ ลิขิตเจริญกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา	2560

บทคัดย่อ

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบโรเตอร์กรงกระรอก ถือเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรม ความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำประมาณ 37 % เป็นความผิดปกติที่เกิดขึ้นบริเวณขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งเกิดจากการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้า วิธีการตรวจสอบสภาพการทำงานของมอเตอร์ สามารถแบ่งเป็น 2 วิธี คือ 1) การตรวจวัดความผิดปกติของมอเตอร์ (Fault detection) และ 2) การทำนายความผิดปกติของมอเตอร์ (Fault prediction) ซึ่งวิธีที่ 2 กระทำก่อนมอเตอร์เกิดความผิดปกติเพื่อประมาณเวลาในการเกิดความผิดปกติ หรือประมาณอายุการทำงานที่เหลืออยู่ของมอเตอร์ และเป็นวิธีที่ต้องการในภาคอุตสาหกรรม เพื่อสร้างแบบจำลองในการประมาณอายุการทำงานของมอเตอร์ ผู้วิจัยจะทำการเร่งอายุฉนวนไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 275-1992 เพื่อให้ได้ข้อมูลการเร่งอายุการทำงานของมอเตอร์ โดยการกระตุ้นมอเตอร์ด้วยความเค้นทางความร้อนและความชื้น เป็นจำนวนอย่างน้อย 10 รอบ 10 ข้อมูลสัญญาณกระแส แรงดัน กระแสรั่วไหล ทั้ง 3 เฟส และกระแสรั่วไหลลงดินของมอเตอร์ขนาด 370 วัตต์ จะถูกบันทึกในแต่ละรอบของการเร่งอายุมอเตอร์ สัญญาณทางไฟฟ้าเหล่านี้จะถูกใช้เพื่อคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้าต่างๆ จำนวน 60 ตัว เพื่อใช้สร้างแบบจำลองการประมาณอายุการทำงานของมอเตอร์ที่เหลืออยู่ ด้วย 4 ตัวจำแนกประเภทข้อมูลที่นิยมใช้ได้แก่ การประมาณแบบนาอิวเบย์ (Naïve-Bayes) การค้นหาเพื่อนบ้านใกล้สุด k อันดับ (k-Nearest Neighbor) การสร้างต้นไม้ตัดสินใจ (Decision tree) และโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural networks: ANNs) กำหนด 5 คลาสของข้อมูลเป็น เปอร์เซ็นต์อายุการทำงานที่เหลืออยู่ของมอเตอร์ และใช้การลดขนาดตัวแปรเพื่อลดความซ้ำซ้อนและซับซ้อนของข้อมูล กำจัดตัวแปรที่ไม่เกี่ยวข้อง ทำให้แบบจำลองมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ผลการทดลองพบว่า การคัดเลือกตัวแปร (Feature selection) สามารถลดขนาดตัวแปรและเพิ่มประสิทธิภาพของแบบจำลองได้ดีกว่าการใช้ชุดตัวแปรดั้งเดิม และการใช้การสกัดตัวแปร (Feature extraction) โดยให้ค่าความถูกต้องเฉลี่ย 98.56%, 97.52% และ 93.04% ตามลำดับ 16 ตัวแปรที่เหมาะสม 28 ตัวแปรซึ่งเป็นค่าปริมาณทางไฟฟ้า $I_{(pu)}$, pf , $\%THD(I)$, $\%THD(V)$, $P_{(pu)}$,

$Q_{(pu)}, Z_{(pu)}, Z_{p(pu)}, I_{100Hz(pu)}, DF(\%), C_{eq,a(pu)}, SigPow_{120-180Hz}(u)$ ของ 3 เฟส และ 11 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับจำนวนไฟฟ้า คือ $I_{leak,g(pu)}, I_{leak,a(pu)}, I_{leak,b(pu)}, I_{leak,c(pu)}, DF(\%), C_{eq,c(pu)}, C_{eq,a(pu)}, C_{eq,b(pu)}, R_{eq,a(pu)}, R_{eq,b(pu)}, R_{eq,c(pu)}$ จัดเป็นกลุ่มตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับการสร้างแบบจำลองการจำแนกอายุการทำงานของมอเตอร์ โดยตัวแปร 2 กลุ่มแรกสามารถนำไปใช้เป็นตัวแปรตั้งต้นในการสร้างแบบจำลองการประมาณอายุจำนวนไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ขนาดต่างๆ ที่ภายในระบบมีการเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์และโหลดได้

คำสำคัญ: มอเตอร์เหนี่ยวนำ, ความผิดปกติบริเวณขดลวดสเตเตอร์, การเร่งอายุจำนวนไฟฟ้า, การประมาณอายุมอเตอร์, การลดขนาดตัวแปร, ระบบปัญญาประดิษฐ์,

Thesis Title	Aging Estimation of 3-Phase Induction Motors by Using Electric Signal Data Analysis Techniques
Author	Miss Thanaporn Likitjarernkul
Major Program	Electrical Engineering
Academic Year	2017

ABSTRACT

Electrical motors are critical component in industry processes. A three-phase, squirrel-cage induction motor is a popular used drive and is widely accepted in an industrial sector. About 37% of induction motor faults are stator faults due to the deterioration of the winding insulation. Motor monitoring system divided into 2 methods; 1) a fault detection and 2) a fault prediction, this method will do before the motor fault because we want to estimate time to fault or remaining lifetime of motor. This method is required to use in the industrial sector. Researcher is accelerating age of the electrical insulator, this method is follow by *IEEE* std. 275-1992 to get data for creat a model. The induction motor is activated by a thermal stress and a moisture 10 periods at least. Ten electrical signals of 370 W induction motors are collected viz current, voltage, leakage current signal for three-phase and a ground leakage current. These electrical signals are used to calculate the 60 original features. The estimated remaining lifetime models are builded by using four well-known classifiers: Naïve Bayes, k-Nearest Neighbor, Decision Tree and Artificial neural networks. Five Classes for the classification are a remaining lifetime percent of motor. Feature reduction methods are used to remove irrelevant and redundant features. It improve performance of a model. According to experimental results, the average accuracy using a feature selection, original features and a feature extraction are 98.56%, 97.52% and 93.04%, respectively. Significantly, it can be concluded that using the feature selection to select optimal features can reduce a number of features and increase the efficacy of the classifican system. The feature selection provides better performance than using original features and the feature extraction. The first data set is the 16 common selected features. The second data set, 28 features include $I_{(pu)}$, pf , $\%THD(I)$, $\%THD(V)$, $P_{(pu)}$, $Q_{(pu)}$, $Z_{(pu)}$, $Z_{p(pu)}$, $I_{100Hz(pu)}$, $DF(\%)$, $C_{eq,a(pu)}$, $SigPow_{120-180Hz}(u)$ of 3-phase. The third data set, 11 features consist $I_{leak,g(pu)}$, $I_{leak,a(pu)}$, $I_{leak,b(pu)}$, $I_{leak,c(pu)}$, $DF(\%)$, $C_{eq,a(pu)}$, $C_{eq,b(pu)}$, $C_{eq,c(pu)}$, $R_{eq,a(pu)}$, $R_{eq,b(pu)}$, $R_{eq,c(pu)}$.

The first two groups of the data sets can be used as default features for estimating remaining lifetime of any 3-phase induction motor which connects an inverter and load.

Keywords: Induction motor, Stator winding fault, Aging acceleration of electrical insulator, Lifetime estimation of the induction motor, Feature reduction, Artificial Intelligence

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กุสุมาลย์ เฉลิมยานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาอุทิศเวลาให้คำปรึกษาแนะนำความรู้ที่เป็นประโยชน์ สนับสนุนอุปกรณ์ในการทำวิจัย จัดเวลากระบวนการคิดวิเคราะห์ รวมทั้งให้กำลังใจในการแก้ปัญหาและอุปสรรคต่างๆ ตลอดจนตรวจสอบและแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์ให้เป็นไปในแนวทางที่ถูกต้องสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ดร.รังกฤตว์ ดวงสร้อยทอง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาอุทิศเวลาให้คำปรึกษาแนะนำความรู้ที่เป็นประโยชน์ จัดเวลากระบวนการคิดวิเคราะห์ ตลอดจนตรวจสอบและแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์ให้เป็นไปในแนวทางที่ถูกต้องสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ดร. กิตติคุณ ทองพูล ประธานกรรมการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาอุทิศเวลาให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการทำงานวิจัย และตรวจทานวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พรชัย พฤกษ์ภัทรานนท์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มงคล กงศ์หิรัญ ที่ได้กรุณาอุทิศเวลาเป็นกรรมการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนางานวิจัย และตรวจทานวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐชา จินดาเพ็ชร และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อนุวัตร ประเสริฐสิทธิ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่กรุณาอุทิศเวลาให้คำปรึกษาแนะนำความรู้ที่เป็นประโยชน์ รวมทั้งให้กำลังใจในการแก้ปัญหาและอุปสรรคต่างๆ

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนในการทำงานวิจัยและให้ความช่วยเหลือด้านการประสานงานต่างๆ

ขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษา อุปกรณ์ และสถานที่ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ บุคลากร รวมถึงเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ และให้กำลังใจมาโดยตลอด จนกระทั่งงานสำเร็จลุล่วง

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าน้อมรำลึกถึงพระคุณของบิดามารดาและครอบครัว ที่ส่งเสริมสนับสนุน ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา ให้กำลังใจที่ดีเยี่ยม และทุนทรัพย์แก่ข้าพเจ้าตลอดมา จนกระทั่งทำให้ข้าพเจ้าประสบความสำเร็จ

ธนาภรณ์ ลิขิตเจริญกุล

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

1.2.2.6 Correlation feature selection analysis for fault diagnosis of induction motors [12].....	12
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	14
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	14
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	15
1.6 วิธีการวิจัย	15
1.7 แผนการดำเนินงาน.....	23
1.8 อุปกรณ์และสถานที่ทำงานวิจัย	26
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	27
2.1 การวิเคราะห์เพื่อตรวจวัดความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	27
2.2 สาเหตุการเบรกคาว์นของฉนวนไฟฟ้าบริเวณขดลวดสเตเตอร์.....	28
2.3 ระบบฉนวนไฟฟ้าของขดลวดสเตเตอร์	30
2.4 การทดสอบวัดค่าความต้านทานของฉนวนไฟฟ้า (Insulation resistance test) [26]	36
บทที่ 3 การเร่งอายุฉนวนไฟฟ้าและการประมาณอายุการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	41
3.1 การเร่งอายุฉนวนไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	41
3.2 การประมาณอายุการทำงานที่เหลืออยู่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	45
3.3 การออกแบบการเร่งอายุฉนวนไฟฟ้า.....	47
3.4 ผลการเร่งอายุฉนวนไฟ	51
บทที่ 4 ผลการบันทึกสัญญาณทางไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำและการวิเคราะห์.....	53
บทที่ 5 การลดขนาดตัวแปร และการจำแนกประเภทข้อมูล	85
5.1 การลดขนาดตัวแปร	85
5.1.1 การคัดเลือกตัวแปร (Feature selection).....	85
5.1.2 การสกัดตัวแปร (Feature extraction).....	86
5.2 การจำแนกประเภทข้อมูล.....	87
5.2.1 การประมาณแบบนาอิวเบย์ (Naïve-Bayes) [37].....	87
5.2.2 การค้นหาเพื่อนบ้านใกล้สุด k อันดับ (k-Nearest Neighbor).....	88

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2.3 การสร้างต้นไม้ตัดสินใจ (Decision tree).....	88
5.2.4 โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network: ANNs) [37].....	89
5.2.5 การเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับ.....	90
5.3 การออกแบบการสร้างแบบจำลองประมาณอายุการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	92
บทที่ 6 ผลการสร้างแบบจำลองการประมาณอายุการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำและการวิเคราะห์.....	95
บทที่ 7 บทสรุป.....	113
7.1 บทสรุป.....	113
7.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข.....	114
7.3 แนวทางการพัฒนาต่อไป.....	114
บรรณานุกรม.....	115
ภาคผนวก ก มาตรฐาน IEEE Std. 275-1992.....	118
ภาคผนวก ข การคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้า.....	133
ภาคผนวก ค ผลการบันทึกสัญญาณทางไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	141
ภาคผนวก ง ผลการสร้างแบบจำลองการประมาณอายุการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	180
ภาคผนวก จ การตีพิมพ์เผยแพร่.....	187
ประวัติผู้เขียน.....	212

รายการตาราง

หน้า

ตาราง 1-1 การเปลี่ยนแปลงของค่าบ่งชี้เมื่อมีการจำลองการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้าระหว่างเฟสและระหว่างเฟสลงดิน.....	8
ตาราง 1-2 การเปลี่ยนแปลงของกระแสลำดับศูนย์และลำดับลบต่อการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์.....	10
ตาราง 1-3 การเปลี่ยนแปลงของกระแสลำดับศูนย์และลำดับลบต่อการลัดวงจรระหว่างเฟสของขดลวดสเตเตอร์.....	11
ตาราง 1-4 การเปลี่ยนแปลงของกระแสลำดับศูนย์และลำดับลบต่อการลัดวงจรระหว่างเฟสลงดินของขดลวดสเตเตอร์.....	11
ตาราง 1-5 สรุปตัวบ่งชี้สภาพฉนวนไฟฟ้าที่สามารถคำนวณได้จากสัญญาณกระแสและแรงดัน....	13
ตาราง 1-6 พารามิเตอร์และพิกัดของมอเตอร์ทดสอบ.....	16
ตาราง 1-7 คำอธิบายสัญญาณไฟฟ้าที่ถูกเก็บบันทึกข้อมูล.....	17
ตาราง 1-8 ค่าปริมาณทางไฟฟ้าต่างๆ ที่ถูกคำนวณในกระบวนการประมวลผลเบื้องต้น.....	20
ตาราง 1-9 แผนการดำเนินงาน.....	26
ตาราง 2-1 รายละเอียดเกี่ยวกับระดับฉนวนไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้า.....	33
ตาราง 2-2 มาตรฐานแรงดันทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสตรง [27].....	36
ตาราง 2-3 ค่าความต้านต่ำสุดที่ยอมรับได้ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (ตามมาตรฐาน IEEE 43-2013 [27]).....	38
ตาราง 2-4 สภาพของฉนวนไฟฟ้ากำหนดจากค่า DAR และค่า PI	40
ตาราง 2-5 ค่า PI ต่ำสุดของมอเตอร์ไฟฟ้า AC และ DC (มาตรฐาน IEEE 43-2013 และ IEEE 1-2000) [27, 29].....	40
ตาราง 3-1 อุณหภูมิและเวลาสำหรับการกระตุ้นฉนวนไฟฟ้าเพื่อเร่งอายุ [13].....	42
ตาราง 3-2 ระดับแรงดันทดสอบสภาพฉนวนไฟฟ้า [13].....	43
ตาราง 3-3 ผลการทดลองเร่งอายุฉนวนไฟฟ้า.....	52

รายการตาราง (ต่อ)

หน้า

ตาราง 4-1 รูปแบบการเร่งอายุฉนวนไฟฟ้าและการเชื่อมต่อมอเตอร์ตัวที่ 1	57
ตาราง 4-2 รูปแบบการเร่งอายุฉนวนไฟฟ้าและการเชื่อมต่อมอเตอร์ตัวที่ 2	60
ตาราง 4-3 สรุปแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าปริมาณทางไฟฟ้าเมื่อมีความผิดปกติเกิดขึ้น	60
ตาราง 4-4 พารามิเตอร์และพิกัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ขนาด 2.2 กิโลวัตต์	76
ตาราง 5-1 คำอธิบายคลาสของชุดข้อมูล	93
ตาราง 6-1 ค่าความถูกต้องการจำแนกประเภทข้อมูล	104
ตาราง 6-2 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรและคลาส (Merit)	112

รายการภาพประกอบ

หน้า

ภาพประกอบ 1-1 ความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	1
ภาพประกอบ 1-2 การสูญเสียเงินจากการหยุดกระบวนการผลิตในธุรกิจต่างๆ [2].....	2
ภาพประกอบ 1-3 วงจรสมมูลต่อเฟสสำหรับการวัดกระแสรั่วไหลแบบออฟไลน์และออนไลน์ของ เฟส A [7].....	5
ภาพประกอบ 1-4 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสำหรับบันทึกสัญญาณไฟฟ้า	17
ภาพประกอบ 1-5 การติดตั้งมอเตอร์สำหรับบันทึกสัญญาณไฟฟ้าขณะมอเตอร์ทำงาน	17
ภาพประกอบ 1-6 ผังงานระเบียบวิธีการวิจัย	22
ภาพประกอบ 2-1 ความผิดปกติบริเวณขดลวดสเตเตอร์.....	28
ภาพประกอบ 2-2 ภาพตัดขวางสล็อตสเตเตอร์แสดงส่วนประกอบพื้นฐานระบบจนวนไฟฟ้า [23]	32
ภาพประกอบ 2-3 แบบจำลองของระบบจนวนไฟฟ้า [7].....	32
ภาพประกอบ 2-4 ไดโพลในจนวนไฟฟ้าปกติเมื่อไม่มีกระแสไหลภายในขดลวด	35
ภาพประกอบ 2-5 ไดโพลในจนวนไฟฟ้าปกติเมื่อมีกระแสไหลภายในขดลวด.....	35
ภาพประกอบ 2-6 ไดโพลในจนวนไฟฟ้าผิดปกติเมื่อมีกระแสไหลภายในขดลวด	36
ภาพประกอบ 2-7 วงจรสมมูลที่แสดงกระแสไฟฟ้าเมื่อมีการทดสอบจนวนไฟฟ้าด้วยไฟฟ้า กระแสตรง [27].....	39
ภาพประกอบ 2-8 องค์ประกอบของกระแสไฟฟ้าเมื่อทดสอบจนวนไฟฟ้าด้วยไฟฟ้ากระแสตรง [28].....	39
ภาพประกอบ 3-1 ผังงานกระบวนการเร่งอายุจนวนไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	44
ภาพประกอบ 3-2 อายุจนวนไฟฟ้าที่เหลืออยู่โดยเฉลี่ยตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ [32]	45
ภาพประกอบ 3-3 การวัดค่าความต้านทานจนวนไฟฟ้าด้วยเมกเกอร์.....	47
ภาพประกอบ 3-4 การอบมอเตอร์ที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เพื่อกระตุ้นมอเตอร์ ด้วยความร้อน	48
ภาพประกอบ 3-5 การกระตุ้นมอเตอร์ด้วยความชื้น	48
ภาพประกอบ 3-6 การเก็บบันทึกสัญญาณทางไฟฟ้าของมอเตอร์ที่กำลังทำงาน	49
ภาพประกอบ 3-7 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่บันทึก (สภาวะปกติ)	49

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

หน้า

ภาพประกอบ 3-8 สัญญาณกระแสไฟฟ้าที่บันทึก (สภาวะปกติ)	50
ภาพประกอบ 3-9 สัญญาณกระแสรั่วไหลไฟฟ้าที่บันทึก (สภาวะปกติ)	50
ภาพประกอบ 3-10 สัญญาณกระแสไฟฟ้าที่บันทึก (สภาวะผิดปกติ)	51
ภาพประกอบ 4-1 กราฟแสดงค่ากระแส Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 6 – 9.61	
ภาพประกอบ 4-2 กราฟแสดงค่ากระแส Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 9 (<i>R9 NormalToFault380VLL</i>)	62
ภาพประกอบ 4-3 กราฟแสดงค่ากระแสรั่วไหล Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 6 – 9.....	63
ภาพประกอบ 4-4 กราฟแสดงค่ากระแสรั่วไหล Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 9 (<i>R9 NormalToFault380VLL</i>)	64
ภาพประกอบ 4-5 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 6 - 9.....	65
ภาพประกอบ 4-6 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 9 (<i>R9 NormalToFault380VLL</i>)	66
ภาพประกอบ 4-7 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ตัวประกอบการแผ่กระจาย ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 6 – 9.....	67
ภาพประกอบ 4-8 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ตัวประกอบการแผ่กระจาย ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 9 (<i>R9 NormalToFault380VLL</i>).....	68
ภาพประกอบ 4-9 กราฟแสดงค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้า Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 6 – 9.....	69
ภาพประกอบ 4-10 กราฟแสดงค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้า Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 9 (<i>R9 NormalToFault380VLL</i>)	70
ภาพประกอบ 4-11 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนไฟฟ้า Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 6 – 9.....	71

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

หน้า

ภาพประกอบ 4-12 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนไฟฟ้า Per unit เฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 9 (<i>R9 NormalToFault380VLL</i>).....	72
ภาพประกอบ 4-13 กราฟ <i>FFT</i> กระแสเฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในช่วงที่ 7 (ข้อมูลที่แสดงการเปลี่ยนแปลงในสถานะปกติไปยังสถานะผิดปกติ).....	73
ภาพประกอบ 4-14 กราฟ <i>FFT</i> กระแสเฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในช่วงที่ 8 (ข้อมูลที่แสดงการเปลี่ยนแปลงในสถานะปกติไปยังสถานะผิดปกติ).....	73
ภาพประกอบ 4-15 กราฟ <i>FFT</i> กระแสเฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในช่วงที่ 9 (ข้อมูลที่แสดงการเปลี่ยนแปลงในสถานะปกติไปยังสถานะผิดปกติ).....	74
ภาพประกอบ 4-16 กราฟ <i>FFT</i> กระแสเฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในช่วงที่ 10 (ข้อมูลที่แสดงการเปลี่ยนแปลงในสถานะปกติไปยังสถานะผิดปกติ).....	74
ภาพประกอบ 4-17 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของกระแสกับอุณหภูมิ	75
ภาพประกอบ 4-18 กราฟแสดงค่ากระแส Per unit เฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ที่เกิดความผิดปกติต่างๆ	78
ภาพประกอบ 4-19 กราฟแสดงค่ากระแสรั่วไหลลงดิน Per unit ของมอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ที่เกิดความผิดปกติต่างๆ	79
ภาพประกอบ 4-20 กราฟแสดงค่ากระแสรั่วไหล Per unit เฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ที่เกิดความผิดปกติต่างๆ	80
ภาพประกอบ 4-21 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ Per unit เฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ที่เกิดความผิดปกติต่างๆ	81
ภาพประกอบ 4-22 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ตัวประกอบการแผ่กระจาย ของมอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ที่เกิดความผิดปกติต่างๆ	82
ภาพประกอบ 4-23 กราฟแสดงค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้า เฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ที่เกิดความผิดปกติต่างๆ	83
ภาพประกอบ 4-24 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนไฟฟ้า เฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ที่เกิดความผิดปกติต่างๆ	84

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
ภาพประกอบ 5-1 ขั้นตอนการเลือกตัวแปร [35]	86
ภาพประกอบ 5-2 โครงข่ายประสาทเทียมแบบเปอร์เซ็ปตรอน.....	89
ภาพประกอบ 5-3 กระบวนการสร้างแบบจำลอง.....	92
ภาพประกอบ 5-4 การกำหนดคลาสข้อมูล	93
ภาพประกอบ 5-5 วิธีการทดลองเพื่อสร้างแบบจำลอง	94
ภาพประกอบ 6-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประเมินชุดตัวแปรและอัลกอริทึมการค้นหา ชุดตัวแปรกับค่าความถูกต้องเฉลี่ย เรียงตามลำดับค่าความถูกต้องเฉลี่ย.....	105
ภาพประกอบ 6-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประเมินชุดตัวแปรกับค่าความถูกต้องรวม เฉลี่ยของอัลกอริทึมการค้นหาชุดตัวแปรเรียงตามค่าความถูกต้องเฉลี่ย.....	106
ภาพประกอบ 6-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัลกอริทึมการค้นหาชุดตัวแปรกับค่าความ ถูกต้องรวมเฉลี่ยของตัวประเมินชุดตัวแปรเรียงตามค่าความถูกต้องเฉลี่ย.....	106
ภาพประกอบ 6-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวจำแนกประเภทข้อมูล กับค่าความถูกต้อง เฉลี่ย	107
ภาพประกอบ 6-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ชุดตัวแปรกับค่าความถูกต้องเฉลี่ย	107
ภาพประกอบ 6-6 กราฟการกระจายระหว่าง $\%THD(I_c)$ และ $\%THD(V_b)$	108
ภาพประกอบ 6-7 กราฟการกระจายระหว่าง $P_{c(pu)}$ และ $\%THD(V_b)$	108
ภาพประกอบ 6-8 กราฟการกระจายระหว่าง $\%THD(I_c)$ และ $SigPow120180Hz_a(u)$	109
ภาพประกอบ 6-9 กราฟการกระจายระหว่าง $C_{eq,b(pu)}$ และ $C_{eq,c(pu)}$	109
ภาพประกอบ 6-10 กราฟการกระจายระหว่าง $Q_{c(pu)}$ และ $P_{c(pu)}$	110
ภาพประกอบ ข-1 การหาส่วนประกอบความถี่ของสัญญาณกระแสและแรงดัน.....	136
ภาพประกอบ ข-2 บล็อกไดอะแกรมการคำนวณปริมาณทางไฟฟ้า	136
ภาพประกอบ ข-3 บล็อกไดอะแกรมการคำนวณค่าขนาดของโมดูลเวกเตอร์ปาร์ก.....	138
ภาพประกอบ ข-4 บล็อกไดอะแกรมคำนวณค่าส่วนประกอบสมมาตร.....	139
ภาพประกอบ ข-5 สเปกตรัมกระแสเชิงซ้อน.....	139

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

หน้า

ภาพประกอบ ค-1 กราฟแสดงค่ากระแส Per unit เฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ตัวที่ 1 ในรอบที่ 9 – 13	142
ภาพประกอบ ค-2 กราฟแสดงค่ากระแส Per unit เฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ตัวที่ 1 ในรอบที่ 9 ...	143
ภาพประกอบ ค-3 กราฟแสดงค่ากระแส Per unit เฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ตัวที่ 1 ในรอบที่ 10 .	143
ภาพประกอบ ค-4 กราฟแสดงค่ากระแส Per unit เฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ตัวที่ 1 ในรอบที่ 11 .	144
ภาพประกอบ ค-5 กราฟแสดงค่ากระแส Per unit เฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ตัวที่ 1 ในรอบที่ 12 .	144
ภาพประกอบ ค-6 กราฟแสดงค่ากระแส Per unit เฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ตัวที่ 1 ในรอบที่ 13 (<i>R13 Fault</i>).....	145
ภาพประกอบ ค-7 กราฟแสดงค่ากระแส Per unit เฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ตัวที่ 1 ในรอบที่ 13 (<i>R13 220Normal</i>)	145
ภาพประกอบ ค-8 กราฟแสดงค่ากระแส Per unit เฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ตัวที่ 1 ในรอบที่ 13 (<i>R13 380Normal</i>)	146
ภาพประกอบ ค-9 กราฟแสดงค่ากระแส Per unit เฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ตัวที่ 1 ในรอบที่ 13 (<i>R13 220Normal2</i>)	146
ภาพประกอบ ค-10 กราฟแสดงค่ากระแส Per unit เฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ตัวที่ 1 ในรอบที่ 13 (<i>R13 380Normal2</i>)	147
ภาพประกอบ ค-11 กราฟแสดงค่ากระแสรั่วไหลลงดิน Per unit ของมอเตอร์ตัวที่ 1 ในรอบที่ 9 – 13	148
ภาพประกอบ ค-12 กราฟแสดงค่ากระแสรั่วไหล Per unit เฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ตัวที่ 1 ในรอบที่ 9 – 13.....	149
ภาพประกอบ ค-13 กราฟแสดงค่ากระแสรั่วไหล Per unit เฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ตัวที่ 1 ในรอบที่ 13 (<i>R13 Fault</i>).....	150
ภาพประกอบ ค-14 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ Per unit เฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ตัวที่ 1 ในรอบที่ 9 – 13.....	151
ภาพประกอบ ค-15 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ Per unit เฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ตัวที่ 1 ในรอบที่ 13 (<i>R13 Fault</i>).....	152

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

หน้า

ภาพประกอบ ค-16 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ตัวประกอบการแผ่กระจาย ของมอเตอร์ตัวที่ 1 ในรอบ ที่ 9 – 13.....	153
ภาพประกอบ ค-17 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ตัวประกอบการแผ่กระจาย ของมอเตอร์ตัวที่ 1 ในรอบ ที่ 13 (<i>R13 Fault</i>).....	154
ภาพประกอบ ค-18 กราฟแสดงค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้า Per unit เฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ตัว ที่ 1 ในรอบที่ 9 – 13	155
ภาพประกอบ ค-19 กราฟแสดงค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้า Per unit เฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ตัว ที่ 1 ในรอบที่ 12 (<i>R12</i>).....	156
ภาพประกอบ ค-20 กราฟแสดงค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้า Per unit เฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ตัว ที่ 1 ในรอบที่ 13 (<i>R13 Fault</i>)	156
ภาพประกอบ ค-21 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนไฟฟ้า Per unit เฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ ตัวที่ 1 ในรอบที่ 9 – 13.....	157
ภาพประกอบ ค-22 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนไฟฟ้า Per unit เฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ ตัวที่ 1 ในรอบที่ 12 (<i>R12</i>).....	158
ภาพประกอบ ค-23 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนไฟฟ้า Per unit เฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ ตัวที่ 1 ในรอบที่ 13 (<i>R13 Fault</i>).....	158
ภาพประกอบ ค-24 กราฟแสดงค่ากระแส Per unit เฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 6 .	159
ภาพประกอบ ค-25 กราฟแสดงค่ากระแส Per unit เฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 7 .	159
ภาพประกอบ ค-26 กราฟแสดงค่ากระแส Per unit เฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 8 .	160
ภาพประกอบ ค-27 กราฟแสดงค่ากระแส Per unit เฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 9 (<i>R9</i> <i>127VLL Fault</i>).....	160
ภาพประกอบ ค-28 กราฟแสดงค่ากระแส Per unit เฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 9 (<i>R9</i> <i>220VLL Normal</i>)	161
ภาพประกอบ ค-29 กราฟแสดงค่ากระแส Per unit เฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 9 (<i>R9</i> <i>120127VLL Fault</i>).....	161

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

หน้า

ภาพประกอบ ค-30 กราฟแสดงค่ากระแสรั่วไหลลงดิน Per unit ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 6 – 9	162
ภาพประกอบ ค-31 กราฟแสดงค่ากระแสรั่วไหล Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 9 (R9 127VLL Fault).....	163
ภาพประกอบ ค-32 กราฟแสดงค่ากระแสรั่วไหล Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 9 (R9 120127VLLFault).....	163
ภาพประกอบ ค-33 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 9 (R9 127VLL Fault).....	164
ภาพประกอบ ค-34 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 9 (R9 220VLL Normal)	164
ภาพประกอบ ค-35 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 9 (R9 120127VLLFault).....	165
ภาพประกอบ ค-36 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ตัวประกอบการแผ่กระจาย ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบ ที่ 9 (R9 127VLL Fault)	165
ภาพประกอบ ค-37 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ตัวประกอบการแผ่กระจาย ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบ ที่ 9 (R9 120127VLLFault)	166
ภาพประกอบ ค-38 กราฟแสดงค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้า Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัว ที่ 2 ในรอบที่ 9 (R9 127VLL Fault).....	166
ภาพประกอบ ค-39 กราฟแสดงค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้า Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัว ที่ 2 ในรอบที่ 9 (R9 120127VLLFault).....	167
ภาพประกอบ ค-40 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนไฟฟ้า Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ ตัวที่ 2 ในรอบที่ 9 (R9 127VLL Fault).....	167
ภาพประกอบ ค-41 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนไฟฟ้า Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ ตัวที่ 2 ในรอบที่ 9 (R9 120127VLLFault).....	168
ภาพประกอบ ค-42 กราฟ FFT กระแสเฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในช่วงที่ 1 (ข้อมูลที่แสดง การเปลี่ยนแปลงในสภาวะปกติไปยังสภาวะผิดปกติ).....	169

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

หน้า

ภาพประกอบ ค-43 กราฟ <i>FFT</i> กระแสเฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในช่วงที่ 2 (ข้อมูลที่แสดง การเปลี่ยนแปลงในสภาวะปกติไปยังสภาวะผิดปกติ).....	169
ภาพประกอบ ค-44 กราฟ <i>FFT</i> กระแสเฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในช่วงที่ 3 (ข้อมูลที่แสดง การเปลี่ยนแปลงในสภาวะปกติไปยังสภาวะผิดปกติ).....	170
ภาพประกอบ ค-45 กราฟ <i>FFT</i> กระแสเฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในช่วงที่ 4 (ข้อมูลที่แสดง การเปลี่ยนแปลงในสภาวะปกติไปยังสภาวะผิดปกติ).....	170
ภาพประกอบ ค-46 กราฟ <i>FFT</i> กระแสเฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในช่วงที่ 5 (ข้อมูลที่แสดง การเปลี่ยนแปลงในสภาวะปกติไปยังสภาวะผิดปกติ).....	171
ภาพประกอบ ค-47 กราฟ <i>FFT</i> กระแสเฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในช่วงที่ 6 (ข้อมูลที่แสดง การเปลี่ยนแปลงในสภาวะปกติไปยังสภาวะผิดปกติ).....	171
ภาพประกอบ ค-48 กราฟ <i>FFT</i> กระแสเฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในช่วงที่ 7 (ข้อมูลที่แสดง การเปลี่ยนแปลงในสภาวะปกติไปยังสภาวะผิดปกติ).....	172
ภาพประกอบ ค-49 กราฟ <i>FFT</i> กระแสเฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในช่วงที่ 8 (ข้อมูลที่แสดง การเปลี่ยนแปลงในสภาวะปกติไปยังสภาวะผิดปกติ).....	172
ภาพประกอบ ค-50 กราฟ <i>FFT</i> กระแสเฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในช่วงที่ 9 (ข้อมูลที่แสดง การเปลี่ยนแปลงในสภาวะปกติไปยังสภาวะผิดปกติ).....	173
ภาพประกอบ ค-51 กราฟ <i>FFT</i> กระแสเฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในช่วงที่ 10 (ข้อมูลที่แสดง การเปลี่ยนแปลงในสภาวะปกติไปยังสภาวะผิดปกติ).....	173
ภาพประกอบ ค-52 กราฟแสดงค่ากระแสรั่วไหล Per unit เฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ที่เกิดการลัดวงจรระหว่างเฟส <i>C</i> และ <i>B</i>	174
ภาพประกอบ ค-53 กราฟแสดงค่ากระแสรั่วไหล Per unit เฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ที่เกิดการลัดวงจรระหว่างเฟส <i>B</i> และ <i>A</i>	174
ภาพประกอบ ค-54 กราฟแสดงค่ากระแสรั่วไหล Per unit เฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ที่เกิดการลัดวงจรระหว่างเฟส <i>A</i> และ <i>C</i>	175
ภาพประกอบ ค-55 กราฟแสดงค่ากระแสรั่วไหล Per unit เฟส <i>A, B, C</i> ของมอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ที่เกิดการลัดรอบเฟส <i>C</i> จำนวน 7 รอบ	175

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

หน้า

ภาพประกอบ ค-56 กราฟแสดงค่ากระแสรั่วไหล Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ที่เกิดการลัดรอบเฟส C จำนวน 15 รอบ	176
ภาพประกอบ ค-57 กราฟแสดงค่ากระแสรั่วไหล Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ที่เกิดการลัดรอบเฟส C จำนวน 31 รอบ	176
ภาพประกอบ ค-58 กราฟแสดงค่ากระแสรั่วไหล Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ที่เกิดการลัดรอบเฟส B จำนวน 7 รอบ	177
ภาพประกอบ ค-59 กราฟแสดงค่ากระแสรั่วไหล Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ที่เกิดการลัดรอบเฟส B จำนวน 15 รอบ	177
ภาพประกอบ ค-60 กราฟแสดงค่ากระแสรั่วไหล Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ที่เกิดการลัดรอบเฟส B จำนวน 31 รอบ	178
ภาพประกอบ ค-61 กราฟแสดงค่ากระแสรั่วไหล Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ที่เกิดการลัดรอบเฟส A จำนวน 7 รอบ	178
ภาพประกอบ ค-62 กราฟแสดงค่ากระแสรั่วไหล Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ที่เกิดการลัดรอบเฟส A จำนวน 15 รอบ	179
ภาพประกอบ ค-63 กราฟแสดงค่ากระแสรั่วไหล Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ที่เกิดการลัดรอบเฟส A จำนวน 31 รอบ	179
ภาพประกอบ ง-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประเมินชุดตัวแปรและอัลกอริทึมการค้นหาชุดตัวแปรกับค่าความถูกต้อง เปรียบเทียบแต่ละตัวจำแนกประเภทเรียงตามลำดับค่าความถูกต้องเฉลี่ย	181
ภาพประกอบ ง-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประเมินชุดตัวแปรและอัลกอริทึมการค้นหาชุดตัวแปรกับค่าความถูกต้อง เปรียบเทียบแต่ละตัวจำแนกประเภทเรียงตามลำดับจำนวนตัวแปรที่ถูกเลือก	182
ภาพประกอบ ง-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประเมินชุดตัวแปรกับค่าความถูกต้องรวมเฉลี่ยของอัลกอริทึมการค้นหาชุดตัวแปรเปรียบเทียบแต่ละตัวจำแนกประเภท เรียงตามค่าความถูกต้องเฉลี่ย	183

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

หน้า

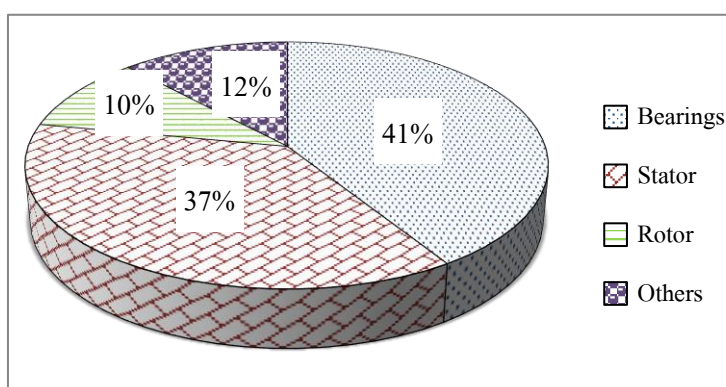
ภาพประกอบ ง-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัลกอริทึมการค้นหาชุดตัวแปรกับ ค่าความถูกต้องรวมเฉลี่ยของตัวประเมินชุดตัวแปรเปรียบเทียบแต่ละตัวจำแนกประเภท เรียงตามค่าความถูกต้องเฉลี่ย	183
ภาพประกอบ ง-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวจำแนกประเภทข้อมูลกับค่าความถูกต้องเปรียบเทียบแต่ละตัวประเมินชุดตัวแปร และอัลกอริทึมการค้นหาชุดตัวแปร	184
ภาพประกอบ ง-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องกับตัวประเมินชุดตัวแปร และอัลกอริทึมการค้นหาชุดตัวแปรของตัวจำแนกประเภท NN	185
ภาพประกอบ ง-7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องกับตัวประเมินชุดตัวแปร และอัลกอริทึมการค้นหาชุดตัวแปรของตัวจำแนกประเภท Naïve Bayes	185
ภาพประกอบ ง-8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องกับตัวประเมินชุดตัวแปร และอัลกอริทึมการค้นหาชุดตัวแปรของตัวจำแนกประเภท kNN ($k=3$)	186
ภาพประกอบ ง-9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องกับตัวประเมินชุดตัวแปร และอัลกอริทึมการค้นหาชุดตัวแปรของตัวจำแนกประเภท Decision Tree	186

บทที่ 1

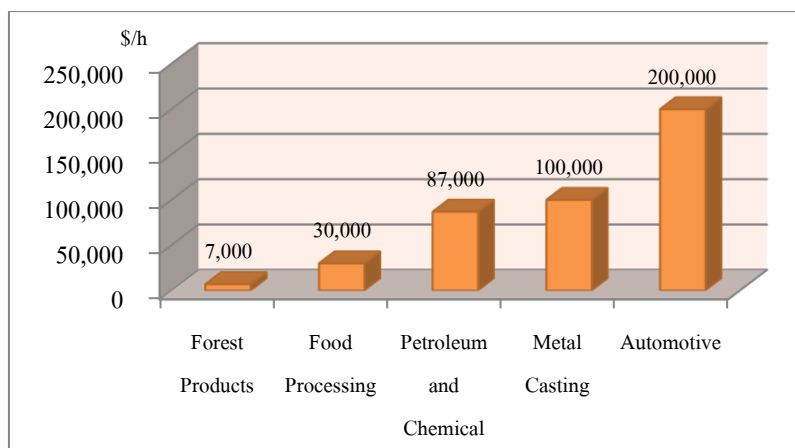
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์สำคัญสำหรับเครื่องจักรกลต่างๆ เนื่องจากทำหน้าที่เป็นตัวต้นกำลัง โดยแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลเพื่อขับโหลดต่างๆ มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบโรเตอร์กรงกระรอก ถือเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากมีความแข็งแรงทนทาน โครงสร้างเรียบง่าย และการทำงานน่าเชื่อถือ ถึงแม้ว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำจะมีความน่าเชื่อถือในการทำงานแต่อาจเกิดความล้มเหลวในการทำงานได้ เนื่องจากการเสื่อมสภาพจากการใช้งาน หรือความผิดปกติต่างๆ ที่เกิดขึ้น ซึ่งสาเหตุความล้มเหลวเหล่านี้มักเกิดขึ้นเนื่องจาก โรเตอร์และสเตเตอร์ต้องรับแรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็กอยู่ตลอดเวลา ความผิดปกติที่เกิดขึ้นต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส สามารถแบ่งเป็น 4 ประเภท แสดงดังภาพประกอบ 1-1 [1] ได้แก่ ความผิดปกติทางกล (ความผิดปกติเนื่องจากการบิดเบี้ยวและความผิดปกติบนแบร์ริง) และความผิดปกติทางไฟฟ้า (ความผิดปกติบนสเตเตอร์และความผิดปกติบนโรเตอร์) ความผิดปกติเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการทำงานและอายุการทำงานของมอเตอร์ เมื่อมอเตอร์เกิดความผิดปกติขึ้นจะส่งผลให้ต้องหยุดการทำงานกะทันหัน จนก่อให้เกิดการสูญเสียเงินจำนวนมหาศาลจากการหยุดกระบวนการผลิต และค่าใช้จ่ายสำหรับการซ่อมบำรุงหรือทดแทนมอเตอร์เหนี่ยวนำที่เสียหาย สามารถสรุปการสูญเสียเงินจากการหยุดกระบวนการผลิตในธุรกิจต่างๆ ดังแสดงในภาพประกอบ 1-2 [2]



ภาพประกอบ 1-1 ความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส



ภาพประกอบ 1-2 การสูญเสียเงินจากการหยุดกระบวนการผลิตในธุรกิจต่างๆ [2]

ความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำประมาณ 37 เปอร์เซ็นต์ เป็นความผิดปกติที่เกิดขึ้นบริเวณขดลวดสเตเตอร์ [1, 3] ซึ่งเกิดจากการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้า เนื่องจากได้รับความร้อนเป็นเวลานาน การปนเปื้อนของน้ำมัน ความชื้น หรือสิ่งสกปรก มีผลกระทบทำให้เกิดการเปิดวงจรในขดลวดสเตเตอร์หรือการลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์ จากสาเหตุและผลกระทบข้างต้น ทำให้ภาคอุตสาหกรรมต้องการระบบการตรวจสอบสภาพการทำงานของมอเตอร์ โดยวิธีการตรวจสอบ สามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ 1) การตรวจวัดความผิดปกติของมอเตอร์ (Fault detection) ซึ่งกระทำหลังจากมอเตอร์เกิดความผิดปกติเพื่อจำแนกความผิดปกติของมอเตอร์ และ 2) การทำนายความผิดปกติของมอเตอร์ (Fault prediction) ซึ่งกระทำก่อนมอเตอร์เกิดความผิดปกติเพื่อประมาณเวลาในการเกิดความผิดปกติของมอเตอร์ หรือประมาณอายุการทำงานที่เหลืออยู่ของมอเตอร์

การตรวจสอบสภาพหรือวิเคราะห์ความผิดปกติของมอเตอร์แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ การตรวจวิเคราะห์ขณะมอเตอร์หยุดทำงาน (Off-line Motor Analysis) และการตรวจวิเคราะห์ขณะมอเตอร์ทำงาน (On-line Motor Analysis) การวิเคราะห์ขณะมอเตอร์ทำงานเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมและเป็นที่ต้องการของภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากไม่ต้องหยุดการทำงานของมอเตอร์เพื่อทำการตรวจสอบ ซึ่งเป็นเหตุให้สูญเสียเวลาและจำนวนเงินจากกระบวนการผลิต ทั้งยังสามารถวิเคราะห์ความผิดปกติของมอเตอร์ได้จากข้อมูลขณะมอเตอร์ทำงานจริง เช่นกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่โหลดจริงในช่วงเวลานั้นๆ ทำให้สามารถประเมินสภาพปัจจุบันของมอเตอร์ได้ตรงความเป็นจริงมากที่สุด โดยจะนิยมใช้ข้อมูลกระแสและแรงดันของมอเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ความผิดปกติของมอเตอร์ เนื่องจากสามารถติดตั้งเซ็นเซอร์การตรวจสอบได้ง่ายและไม่ต้องทำการตัดแปลงหรือแก้ไขโครงสร้างภายในของมอเตอร์

ผลกระทบเนื่องจากการหยุดทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ สร้างความท้าทายให้แก่ นักวิจัยในการคิดค้นและปรับปรุงวิธีสังเกตการณ์สภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ และวิธีวินิจฉัย ความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำบริเวณขดลวดสเตเตอร์ เพื่อใช้สำหรับวางแผนบำรุงรักษา มอเตอร์เหนี่ยวนำ และสามารถประมาณอายุการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสได้

1.2 การตรวจสอบเอกสาร บทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การตรวจสอบเอกสาร บทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง แบ่งออกเป็น 2 หัวข้อ คือ 1. การประมาณอายุการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ และ 2. การคำนวณตัวบ่งชี้สภาพ ฉนวนไฟฟ้า เพื่อค้นหาวิธีการประมาณอายุการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ และค้นหาตัวบ่งชี้ สภาพฉนวนไฟฟ้าที่สามารถนำมาใช้สำหรับการประมาณอายุการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ ซึ่งแต่ละบทความมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

1.2.1 การประมาณอายุการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

1.2.1.1 Loss of life in induction machines operating with unbalanced supplies [4]

บทความนี้นำเสนอการคำนวณอายุการทำงานที่สูญเสียไปของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยคำนึงถึงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในมอเตอร์ อุณหภูมิดังกล่าวคืออุณหภูมิของขดลวด สเตเตอร์ที่ถูกประมาณ โดยใช้ค่าพลังงานสูญเสียที่คำนวณจากแบบจำลองความร้อนของ เครื่องจักรกล อุณหภูมิของขดลวดสเตเตอร์จะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพการทำงานของมอเตอร์ เช่น สภาพแหล่งจ่ายแรงดันของมอเตอร์ ภาวะโหลดที่มอเตอร์ได้รับ เป็นต้น ดังนั้นในบทความนี้ จึงได้ทดสอบมอเตอร์เชื่อมต่อแบบเดลต้า (Delta) ทั้งสภาวะแรงดันแหล่งจ่ายเกินพิกัด แรงดัน แหล่งจ่ายต่ำกว่าพิกัด และที่สภาวะเปอร์เซ็นต์โหลดต่างๆ เพื่อให้อุณหภูมิของขดลวดเปลี่ยนแปลง แล้วนำอุณหภูมินี้มาคำนวณเป็นอายุการทำงานของมอเตอร์ที่สูญเสียไป โดยมีขั้นตอนในการ คำนวณอายุการทำงานของมอเตอร์ตามหัวข้อ 3.2

1.2.1.2 Using the design of experiments (DoE) method to elaborate an electrical ageing model for the insulation of low voltage rotating machines fed by inverters [5] และ

1.2.1.3 Electrical aging of the insulation of low-voltage machines: model definition and test with the design of experiments [6]

บทความทั้งสองนำเสนอการสร้างสมการ ประมาณอายุฉนวนไฟฟ้า ที่เหลืออยู่ โดยใช้ความรู้ด้านการออกแบบการทดลอง (Design of experiments: DoE) ซึ่งเป็นเทคนิค ทางสถิติขั้นสูงที่ใช้ในการปรับค่าสภาวะของกระบวนการ เพื่อให้ได้ผลตอบสนองเป็นไปตามที่

เราต้องการ ในบทความได้นำเสนอการกระตุ้นฉนวนไฟฟ้าประเภทพอลิเอสเตอร์อิมิด (Polyesterimide: PEI) ซึ่งเป็นฉนวนคลาส H ด้วย 3 ปัจจัย คือ อุณหภูมิ (-55 องศาเซลเซียส ถึง 180 องศาเซลเซียส) ความถี่ (5 กิโลเฮิร์ต ถึง 15 กิโลเฮิร์ต) และแรงดันไฟฟ้า (1 กิโลโวลต์ ถึง 3 กิโลโวลต์) แล้วเก็บบันทึกเวลาการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้าโดยใช้กระแสรั่วไหลที่ไหลผ่านฉนวน เก็บพิกัดที่ออกแบบ เป็นเกณฑ์ในการบันทึกเวลาการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้า ข้อมูลจากการทดลองพบว่าการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้าเป็นสำคัญ และสมการการคำนวณอายุฉนวนไฟฟ้าที่สร้างขึ้น มีความแม่นยำในการคำนวณ โดยมีความผิดพลาดสูงสุดเพียง 10 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น แสดงสมการประมาณอายุฉนวนไฟฟ้าที่เหลืออยู่ ดังสมการ (1-1)

$$\log(L) \sim 1.45 - 0.53 \cdot \log(V) - 0.19 \cdot \log(F) - 0.54 \cdot e^{(-bT)} + 0.12 \cdot \log(V) \cdot e^{(-bT)} \quad (1-1)$$

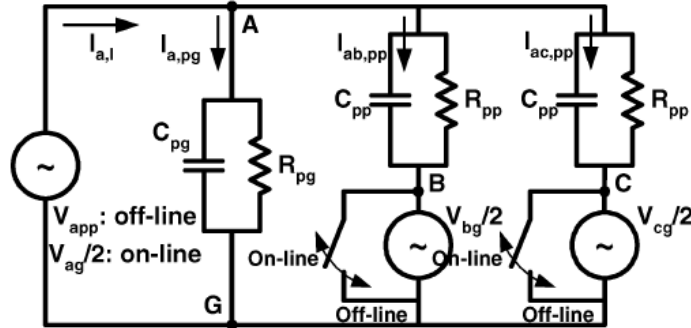
เมื่อ L คือ อายุการทำงานที่เหลืออยู่ของฉนวนไฟฟ้า (นาท)
 V คือ ค่าสูงสุดของแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ (กิโลโวลต์)
 F คือ ความถี่ของการสร้างสัญญาณพัลส์ (เฮิร์ต)
 T คือ อุณหภูมิของฉนวนไฟฟ้า (องศาเซลเซียส)

1.2.2 การคำนวณตัวบ่งชี้สภาพฉนวนไฟฟ้า

1.2.2.1 An online technique for monitoring the insulation condition of AC machine stator windings [7]

บทความนี้เสนอการตรวจสอบสภาพฉนวนไฟฟ้าโดยรวมของขดลวดสเตเตอร์ระหว่างเฟสลงดิน (ฉนวนไฟฟ้าระหว่างร่องขดลวดภายนอก) โดยการพิจารณาค่าตัวประกอบการแผ่กระจาย (Dissipation factor: DF) และค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนไฟฟ้าแบบออนไลน์ ซึ่งคำนวณจากค่ากระแสรั่วไหลที่วัดได้ด้วยการคล้องหม้อแปลงกระแส (CT) ที่ขั้วสายไลน์และขั้วสายนิวทรัลของแต่ละเฟสเพื่อให้เกิดการหักล้างของกระแสเหลือเพียงกระแสรั่วไหลจากค่ากระแสรั่วไหลที่วัดได้จะถูกนำมาคำนวณค่าตัวประกอบการแผ่กระจายและค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนไฟฟ้า ด้วยสมการที่วิเคราะห์จากวงจรสมมูลการวัดกระแสรั่วไหลในกรณีออฟไลน์และออนไลน์ ดังภาพประกอบ 1-3 ซึ่งการวัดกระแสรั่วไหลในกรณีออฟไลน์จะพิจารณาว่ามีแรงดันตกคร่อมระหว่างเฟส A และเฟสอื่นๆ เท่ากับแรงดันตกคร่อมระหว่างเฟส A ลงดิน เมื่อฉนวนไฟฟ้าเฟส A ถูกทดสอบ ส่วนเฟส B และ C ไม่ถูกทดสอบและต่อลงดิน และในกรณีออนไลน์จะพิจารณาว่ามีแรงดันตกคร่อมเฉลี่ยระหว่างเฟสลงดินหรือระหว่างเฟสเป็นครึ่งหนึ่งจากเดิม เนื่องจากได้รับ

อิทธิพลของแรงดันไฟฟ้าจากเฟสข้างเคียงและมีการกระจายแรงดันจากขั้วไลน์ไปยังขั้วนิวทรัล (0 โวลต์) อย่างเชิงเส้น แสดงสมการแรงดันไฟฟ้างดสมการ (1-2) - (1-4) ตามลำดับ



ภาพประกอบ 1-3 วงจรสมมูลต่อเฟสสำหรับการวิเคราะห์ส่วไหลแบบออฟไลน์และออนไลน์ของเฟส A [7]

กรณีออฟไลน์
$$\tilde{V}_{ab} = \tilde{V}_{ac} = \tilde{V}_{ag} = \tilde{V}_{app} \quad (1-2)$$

กรณีออนไลน์
$$\tilde{V}_{ag,eq} = \frac{\tilde{V}_{ag}}{2}, \tilde{V}_{bg,eq} = \frac{\tilde{V}_{bg}}{2}, \tilde{V}_{cg,eq} = \frac{\tilde{V}_{cg}}{2} \quad (1-3)$$

$$\tilde{V}_{ab,eq} = \frac{\tilde{V}_{ab}}{2}, \tilde{V}_{bc,eq} = \frac{\tilde{V}_{bc}}{2}, \tilde{V}_{ca,eq} = \frac{\tilde{V}_{ca}}{2} \quad (1-4)$$

เมื่อ $\tilde{V}_{ab}, \tilde{V}_{bc}, \tilde{V}_{ca}$ คือ แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส

$\tilde{V}_{ag}, \tilde{V}_{bg}, \tilde{V}_{cg}$ คือ แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสลงดิน

จากการวิเคราะห์วงจรสมมูลการวิเคราะห์ส่วไหลทำให้สามารถคำนวณค่าตัวประกอบการแผ่กระจายและค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนไฟฟ้าได้ดังสมการ (1-5) และ (1-6) ตามลำดับ

$$DF = \tan \delta \times 100 = \frac{|\tilde{I}_R|}{|\tilde{I}_C|} \times 100 = \tan \left[90 - \angle \frac{\tilde{V}_{ln}}{\tilde{I}_l} \right] \times 100 = \tan \left[\frac{\pi}{2} - \cos^{-1}(pf) \right] \times 100 \quad (1-5)$$

$$C_{eq} = \frac{(2|\tilde{I}_l| \cos \delta)}{(\omega |\tilde{V}_{ln}|)} \quad (1-6)$$

เมื่อ DF คือ ตัวประกอบการแผ่กระจาย

C_{eq} คือ ค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนไฟฟ้า

\tilde{V}_{ln}	คือ แรงดันไฟฟ้าระหว่างไลน์กับนิวทรัล
\tilde{I}_l	คือ กระแสรั่วไหล
\tilde{I}_R	คือ ส่วนประกอบกระแสรั่วไหลของค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้า
\tilde{I}_C	คือ ส่วนประกอบกระแสรั่วไหลของค่าความจุไฟฟ้าฉนวนไฟฟ้า
pf	คือ ค่าตัวประกอบกำลัง

โดยในการทดลอง ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสต่อแบบสตาร์ (Y) กับแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลัก มีการต่อตัวต้านทานภายนอกปรับค่าได้ระหว่างเฟสหรือระหว่างเฟสลงดิน เพื่อจำลองการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้า ซึ่งตามมาตรฐาน IEEE 43 แนะนำค่าความต้านทานน้อยที่สุดของฉนวนไฟฟ้าไม่ควรต่ำกว่า 5 เมกกะโอห์ม ผลการทดลองพบว่าเมื่อมีการปรับค่าความต้านทานภายนอกให้น้อยลงเปรียบเหมือนฉนวนไฟฟ้ามีการเสื่อมสภาพมากขึ้น ทำให้กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกหรือตัวประกอบการแผ่กระจายเพิ่มขึ้น เนื่องจากกระแสรั่วไหลที่ไหลผ่านตัวต้านทานของฉนวนไฟฟ้าซึ่งบ่งบอกถึงสภาพไดอิเล็กตริกของฉนวนเพิ่มขึ้น ในขณะที่กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุและค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

1.2.2.2 An online groundwall and phase-to-phase insulation quality assessment technique for AC-machine stator windings [8]

บทความนี้เสนอการตรวจสอบสภาพฉนวนไฟฟ้าโดยรวมของขดลวดสเตเตอร์ และสามารถจำแนกได้ว่าเป็นการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้าที่ตำแหน่งระหว่างเฟสหรือระหว่างเฟสลงดิน โดยการพิจารณาค่าตัวประกอบการแผ่กระจาย ค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนไฟฟ้า และค่าความต้านทานของฉนวนไฟฟ้าที่คำนวณได้แบบออนไลน์ ซึ่งถูกคำนวณจากค่ากระแสรั่วไหลที่วัดด้วยการคล่องมือแปลงกระแส (CT) การคำนวณค่าตัวประกอบการแผ่กระจาย ค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนไฟฟ้า และค่าความต้านทานของฉนวนไฟฟ้า จะใช้สมการที่วิเคราะห์จากวงจรสมมูลการวัดกระแสรั่วไหลในกรณีออฟไลน์และออนไลน์เหมือนบทความ [7] สมการคำนวณค่าบ่งชี้ดังกล่าวแสดงดังสมการ (1-5) - (1-7) ตามลำดับ

$$R_{eq} = \frac{|\tilde{V}_{ln}|}{(2|\tilde{I}_l| \sin \delta)} \quad (1-7)$$

เมื่อ	R_{eq}	คือ ค่าความต้านทานของฉนวนไฟฟ้า (ac)
	\tilde{V}_{ln}	คือ แรงดันไฟฟ้าระหว่างไลน์กับนิวทรัล
	\tilde{I}_l	คือ กระแสรั่วไหล

ในบทความนี้จะกำหนดตัวแปรแฟกเตอร์ k ขึ้น เพื่อแสดงเปอร์เซ็นต์การเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้า ในช่วง 1 ถึง 0 โดยที่ค่า k เท่ากับ 1 แสดงว่าฉนวนไฟฟ้าปกติ และที่ค่า k เท่ากับ 0 แสดงว่าฉนวนไฟฟ้าเกิดการเสื่อมสภาพทั้งหมด จากการวิเคราะห์ห้วงจรสมมูล ฉนวนไฟฟ้าและวงจรสมมูลการวัดกระแสรั่วไหลแบบออนไลน์ เมื่อมีการเสื่อมสภาพของฉนวน บริเวณระหว่างเฟส A ลงดินเกิดขึ้น พบว่าความต้านทานฉนวนของเฟส A ลดลงแต่ค่าความจุไฟฟ้า ฉนวนของเฟส A ไม่เปลี่ยนแปลง ทำให้กระแสรั่วไหลในเฟส A เพิ่มขึ้น ในขณะที่การเสื่อมสภาพ ที่บริเวณดังกล่าวนี้ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความต้านทานฉนวนและค่าความจุไฟฟ้าฉนวนของเฟส B และเฟส C แต่เมื่อมีการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้าระหว่างเฟส A และเฟส B เกิดขึ้น จะทำให้กระแสรั่วไหลของตัวต้านทานฉนวนและความจุไฟฟ้าฉนวนในเฟส A และเฟส B เปลี่ยนแปลง จากกระแสรั่วไหลเดิมดังสมการ (1-8) - (1-11) ตามลำดับ

$$\Delta \tilde{I}_{a,l,R} = \frac{3\tilde{V}_{ag}(1-k_{pp})}{4k_{pp}R_{pp}} > 0 \quad (1-8)$$

$$\Delta \tilde{I}_{a,l,C} = \frac{\sqrt{3}\tilde{V}_{ag}(1-k_{pp})}{4k_{pp}R_{pp}} > 0 \quad (1-9)$$

$$\Delta \tilde{I}_{b,l,R} = \frac{3\tilde{V}_{bg}(1-k_{pp})}{4k_{pp}R_{pp}} > 0 \quad (1-10)$$

$$\Delta \tilde{I}_{b,l,C} = \frac{\sqrt{3}\tilde{V}_{bg}(k_{pp}-1)}{4k_{pp}R_{pp}} < 0 \quad (1-11)$$

เมื่อ $\Delta \tilde{I}_{a,l,R}$ คือ การเปลี่ยนแปลงของส่วนประกอบกระแสรั่วไหลของค่าความต้านทานที่ฉนวนไฟฟ้าเฟส A

$\Delta \tilde{I}_{a,l,C}$ คือ การเปลี่ยนแปลงของส่วนประกอบกระแสรั่วไหลของค่าความจุไฟฟ้าที่ฉนวนไฟฟ้าเฟส A

$\Delta \tilde{I}_{b,l,R}$ คือ การเปลี่ยนแปลงของส่วนประกอบกระแสรั่วไหลของค่าความต้านทานที่ฉนวนไฟฟ้าเฟส B

$\Delta \tilde{I}_{b,l,C}$ คือ การเปลี่ยนแปลงของส่วนประกอบกระแสรั่วไหลของค่าความจุไฟฟ้าที่ฉนวนไฟฟ้าเฟส B

$\tilde{V}_{ag}, \tilde{V}_{bg}$ คือ แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสลงดิน

k_{pp} คือ แฟกเตอร์จำลองเปอร์เซ็นต์การเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้าระหว่างเฟส

R_{pp} คือ ค่าความต้านทานภายนอกที่จำลองเป็นความต้านทานฉนวนไฟฟ้าระหว่างเฟส

จากการเปลี่ยนแปลงของสมการ (1-8) - (1-11) นี้เอง ทำให้ส่งผลกระทบต่อค่าบังชี้ดังตาราง 1-1 ซึ่งจะสื่อการเปลี่ยนแปลงของฉนวนไฟฟ้าด้วยตัวต้านทานภายนอกที่ปรับค่าได้ ด้วยการปรับค่าความต้านทานให้ลดลงเพื่อแสดงว่าฉนวนเกิดการเสื่อมสภาพมากขึ้น การเปลี่ยนแปลงของค่าบังชี้นี้จะสามารถใช้ตรวจวัดการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้าเบื้องต้นและแยกแยะการเสื่อมสภาพของฉนวนที่ตำแหน่งระหว่างเฟสและระหว่างเฟสลงดินได้

การเปลี่ยนแปลง ของฉนวนไฟฟ้า	เฟส A			เฟส B			เฟส C		
	R_{eq}	C_{eq}	DF	R_{eq}	C_{eq}	DF	R_{eq}	C_{eq}	DF
เสื่อมสภาพ สม่ำเสมอ	↓	-	↑	↓	-	↑	↓	-	↑
$R_{pg,a}$ ลดลง	↓	-	↑	-	-	-	-	-	-
$R_{pg,b}$ ลดลง	-	-	-	↓	-	↑	-	-	-
$R_{pg,c}$ ลดลง	-	-	-	-	-	-	↓	-	↑
$R_{pp,ab}$ ลดลง	↓	↑	↑	↓	↓	↑	-	-	-
$R_{pp,bc}$ ลดลง	-	-	-	↓	↑	↑	↓	↓	↑
$R_{pp,ca}$ ลดลง	↓	↓	↑	-	-	-	↓	↑	↑
R_{pg} เปรียบเสมือนความต้านทานของฉนวนไฟฟ้าระหว่างเฟสลงดิน, R_{pp} เปรียบเสมือนความต้านทานของฉนวนไฟฟ้าระหว่างเฟส									

ตาราง 1-1 การเปลี่ยนแปลงของค่าบังชี้เมื่อมีการจำลองการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้าระหว่างเฟสและระหว่างเฟสลงดิน

1.2.2.3 Stator winding fault diagnosis in three-phase synchronous and asynchronous motors, by the extended Park's vector approach [9]

บทความนี้นำเสนอการตรวจวัดการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดสเตเตอร์โดยใช้สัญญาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ เนื่องจากเมื่อมีความผิดปกติภายในมอเตอร์เกิดขึ้นจะทำให้กระแสทั้ง 3 เฟสของมอเตอร์ไม่สมดุล ดังนั้นเมื่อแปลงสัญญาณกระแส 3 เฟสซึ่งเปรียบเสมือนระบบ 3 แกนให้อยู่ในระบบ 2 แกน คือการแปลงเป็นเวกเตอร์ปาร์ก กราฟของเวกเตอร์ปาร์กจะมีลักษณะเป็นวงจรี จากเดิมที่มีลักษณะเป็นวงกลมสมมาตรเมื่อมอเตอร์ทำงานเป็นปกติ แต่การวิเคราะห์กราฟของเวกเตอร์ปาร์กกระทำวิเคราะห์ได้ยาก ดังนั้นในบทความนี้จึงได้นำเสนอการวิเคราะห์เวกเตอร์ปาร์กแบบใหม่เรียกว่า เวกเตอร์ปาร์กแบบขยาย (Extended park's vector approach: EPVA) ซึ่งเป็นการพิจารณาสเปกตรัมขนาดของโมดูลเวกเตอร์ปาร์ก

ที่ความถี่ศูนย์เฮิรตหรือส่วนประกอบกระแสตรง และที่ความถี่สองเท่าของความถี่มูลฐาน ค่าขนาดสเปกตรัมทั้ง 2 ความถี่จะถูกนำมาใช้เพื่อคำนวณระดับความรุนแรงของการลัดรอบขดลวดสเตเตอร์ (*Severity Factor*) โดยใช้สมการ (1-12)

$$SeverityFactor = Amplitude(2f_1)/DCLevel \quad (1-12)$$

เมื่อ $Amplitude(2f_1)$ คือ ขนาดสเปกตรัมโมดูลเวกเตอร์ปาร์กที่ความถี่สองเท่าของความถี่มูลฐาน

$DCLevel$ คือ ขนาดสเปกตรัมโมดูลเวกเตอร์ปาร์กที่ความถี่ศูนย์เฮิรต

จากการทดลอง ลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ต่อแบบเดลต้า (*Delta*) โดยการจำลองมอเตอร์ให้มีการลัดรอบหลายๆ รอบแตกต่างกัน พบว่าเมื่อมอเตอร์มีการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์มากขึ้นจะทำให้ค่าระดับความรุนแรง (*Severity Factor*) มากขึ้นที่ระดับภาระโหลดเดียวกัน ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงของโหลดที่สูงขึ้นจะทำให้ค่าระดับความรุนแรงลดลงที่จำนวนการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์เท่ากัน

1.2.2.4 New expressions of symmetrical components of the induction motor under stator faults [10]

บทความนี้นำเสนอการตรวจจับความผิดปกติของขดลวดสเตเตอร์ ได้แก่ การลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ การลัดวงจรระหว่างเฟส และการลัดวงจรระหว่างเฟสลงดิน โดยใช้การวิเคราะห์ส่วนประกอบสมมาตรของกระแสสเตเตอร์ ขนาดและมุมของส่วนประกอบสมมาตรของกระแสสเตเตอร์ถูกคำนวณจากการใช้การแปลงอนุกรมฟูเรียร์ (*Fast Fourier transform: FFT*) กับสัญญาณกระแสสเตเตอร์ทั้ง 3 เฟส เพื่อหาค่าเฉลี่ยกำลังสองของกระแสทั้ง 3 เฟส แล้วนำค่าเหล่านั้นมาคำนวณส่วนประกอบสมมาตรเพื่อวิเคราะห์ความผิดปกติของขดลวดสเตเตอร์ต่อไป ความผิดปกติของขดลวดสเตเตอร์ ทั้งการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ การลัดวงจรระหว่างเฟส และการลัดวงจรระหว่างเฟสลงดินจะส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและมุมของกระแสสเตเตอร์ลำดับศูนย์และลำดับลบดังตาราง 1-2 - ตาราง 1-4 ตามลำดับ จากตารางทั้ง 3 จะพบว่าการคำนวณขนาดของกระแสลำดับศูนย์และลำดับลบจะต้องรู้จำนวนรอบการลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์และกระแสลัดวงจรซึ่งเป็นไปได้ยากที่จะมีข้อมูลส่วนนี้จากการตรวจวัดเพียงสัญญาณกระแสและแรงดันมอเตอร์ขณะทำงาน ในขณะที่มุมเฟสของกระแสลำดับศูนย์และลำดับลบสามารถคำนวณได้จากสัญญาณกระแสที่ตรวจวัดขณะมอเตอร์กำลังทำงาน ดังนั้นจึงสามารถใช้

ค่ามุมเฟสเป็นข้อมูลเบื้องต้นพิจารณาการเปลี่ยนแปลงหาคอมเพอเนนต์เกิดความผิดปกติที่ขดลวดสเตเตอร์ได้

	การลัดรอบขดลวดสเตเตอร์ เฟส A	การลัดรอบขดลวดสเตเตอร์ เฟส B	การลัดรอบขดลวดสเตเตอร์ เฟส C
I_2	$I_2 = \frac{1}{3} \cdot \frac{x_a^2}{R_f} V$ $= \frac{1}{3} \cdot x_a I_f$	$I_2 = \frac{1}{3} \cdot \frac{x_b^2}{R_f} V$ $= \frac{1}{3} \cdot x_b I_f$	$I_2 = \frac{1}{3} \cdot \frac{x_c^2}{R_f} V$ $= \frac{1}{3} \cdot x_c I_f$
ϕ_2	$\phi_2 = 0^\circ$	$\phi_2 = 120^\circ$	$\phi_2 = -120^\circ$
I_0	0	0	0
ϕ_0	0	0	0

ตาราง 1-2 การเปลี่ยนแปลงของกระแสลำดับศูนย์และลำดับลบต่อการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์

การลัดวงจรระหว่างเฟส A และ เฟส B			
I_2	$\frac{V}{3 \cdot R_f} \sqrt{(x_a^2 - 0.5 \cdot x_b^2 + x_a \cdot x_b)^2 + (0.866 \cdot (x_b^2 + 2 \cdot x_a \cdot x_b))^2}$		
	-	$x_a = x_b = x$ $I_2 = \frac{V \cdot x^2}{R_f}$	-
ϕ_2	Argument of $(x_a^2 - 0.5 \cdot x_b^2 + x_a \cdot x_b)^2 + j(0.866 \cdot (x_b^2 + 2 \cdot x_a \cdot x_b))^2$		
	$x_a > x_b$ $0^\circ < \phi_2 < 60^\circ$	$x_a = x_b$ $\phi_2 = 60^\circ$	$x_a < x_b$ $60^\circ < \phi_2 < 120^\circ$
การลัดวงจรระหว่างเฟส B และ เฟส C			
I_2	$\frac{V}{3 \cdot R_f} \sqrt{(-0.5 \cdot x_b^2 - 0.5 \cdot x_c^2 - 2x_b \cdot x_c)^2 + (0.866 \cdot (x_b^2 - x_c^2))^2}$		
	-	$x_b = x_c = x$ $I_2 = \frac{V \cdot x^2}{R_f}$	-
ϕ_2	Argument of $(-0.5 \cdot x_b^2 - 0.5 \cdot x_c^2 - 2x_b \cdot x_c)^2 + j(0.866 \cdot (x_b^2 - x_c^2))^2$		
	$x_b > x_c$ $120^\circ < \phi_2 < 180^\circ$	$x_b = x_c$ $\phi_2 = 180^\circ$	$x_b < x_c$ $180^\circ < \phi_2 < 240^\circ$

การลัดวงจรระหว่างเฟส A และ เฟส C			
I_2	$\frac{V}{3 \cdot R_f} \sqrt{(x_a^2 - 0.5 \cdot x_c^2 + x_a \cdot x_c)^2 + (-0.866 \cdot (x_c^2 + 2 \cdot x_a \cdot x_c))^2}$		
	-	$x_a = x_c = x$ $I_2 = \frac{V \cdot x^2}{R_f}$	-
ϕ_2	Argument of $(x_a^2 - 0.5 \cdot x_c^2 + x_a \cdot x_c)^2 + j(-0.866 \cdot (x_c^2 + 2 \cdot x_a \cdot x_c))^2$		
	$x_a > x_c$ $-60^\circ < \phi_2 < 0^\circ$	$x_a = x_c$ $\phi_2 = -60^\circ$	$x_a < x_c$ $-120^\circ < \phi_2 < -60^\circ$
สำหรับการลัดวงจรระหว่างเฟสทั้ง 3 กรณี			
I_0	0	0	0
ϕ_0	0	0	0

ตาราง 1-3 การเปลี่ยนแปลงของกระแสลำดับศูนย์และลำดับลบต่อการลัดวงจรระหว่างเฟสของ
ขดลวดสเตเตอร์

	การลัดวงจรระหว่างเฟส A ลงดิน	การลัดวงจรระหว่างเฟส B ลงดิน	การลัดวงจรระหว่างเฟส C ลงดิน
I_2	$I_2 = \frac{1}{3} \cdot \frac{x_a^2}{R_f} V$ $= \frac{1}{3} \cdot x_a I_f$	$I_2 = \frac{1}{3} \cdot \frac{x_b^2}{R_f} V$ $= \frac{1}{3} \cdot x_b I_f$	$I_2 = \frac{1}{3} \cdot \frac{x_c^2}{R_f} V$ $= \frac{1}{3} \cdot x_c I_f$
ϕ_2	$\phi_2 = 0^\circ$	$\phi_2 = 120^\circ$	$\phi_2 = -120^\circ$
I_0	$I_0 = \frac{1}{3} \cdot \frac{x_a}{R_f} V$ $= \frac{1}{3} \cdot I_f$	$I_0 = \frac{1}{3} \cdot \frac{x_b}{R_f} V$ $= \frac{1}{3} \cdot I_f$	$I_0 = \frac{1}{3} \cdot \frac{x_c}{R_f} V$ $= \frac{1}{3} \cdot I_f$
ϕ_0	$\phi_2 = 0^\circ$	$\phi_2 = 120^\circ$	$\phi_2 = -120^\circ$

ตาราง 1-4 การเปลี่ยนแปลงของกระแสลำดับศูนย์และลำดับลบต่อการลัดวงจรระหว่างเฟสลงดิน
ของขดลวดสเตเตอร์

เมื่อ I_2, ϕ_2 คือ ขนาดและมุมของกระแสสเตเตอร์ลำดับลบตามลำดับ
 I_0, ϕ_0 คือ ขนาดและมุมของกระแสสเตเตอร์ลำดับศูนย์ตามลำดับ

X_a, X_b, X_c คือ สัดส่วนระหว่างจำนวนรอบของขดลวดสเตเตอร์ที่ถูกลัดวงจรต่อจำนวนรอบขดลวดสเตเตอร์ทั้งหมดของเฟส A, B และ C ตามลำดับ

I_f คือ กระแสลัดวงจร

R_f คือ ค่าความต้านทานที่ถูกลัดวงจร

1.2.2.5 The negative sequence impedance as fault indicator in induction motors

[11]

บทความนี้นำเสนอการตรวจวัดการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดสเตเตอร์โดยการวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ลำดับลบ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสัดส่วนระหว่างแรงดันสเตเตอร์ลำดับลบและกระแสสเตเตอร์ลำดับลบ การวิเคราะห์ความผิดปกติของขดลวดสเตเตอร์โดยใช้อิมพีแดนซ์ลำดับลบนี้มีข้อดีกว่าการวิเคราะห์โดยใช้กระแสลำดับลบ เพราะ อิมพีแดนซ์ลำดับลบเป็นอิสระจากความเร็วของมอเตอร์และไวต่อการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยของการลัดรอบของขดลวด จากผลการทดลองโดยการลัดรอบขดลวดจำนวน 5, 7 และ 14 รอบ พบว่าค่าอิมพีแดนซ์ลำดับลบจะมีค่าลดลงเมื่อมีการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์รุนแรงขึ้น หรือหมายความว่า มีการเปลี่ยนแปลงของค่าอิมพีแดนซ์ลำดับลบจากสภาวะปกติมากขึ้น เมื่อมีความผิดปกติรุนแรงขึ้นอยู่ในระดับ 9.52%-76.28% ตามลำดับการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์

1.2.2.6 Correlation feature selection analysis for fault diagnosis of induction

motors [12]

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เพื่อจำแนกความผิดปกติบริเวณขดลวดสเตเตอร์แต่ละเฟสและใช้การลดขนาดตัวแปรเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจำแนกความผิดปกติ กำจัดตัวแปรที่ไม่เกี่ยวข้องและมีความซ้ำซ้อนออก ผลลัพธ์ที่ได้พบว่า 4 ตัวแปรจาก 14 ตัวแปรดั้งเดิม ได้แก่ เปอร์เซ็นต์โหลด ตัวประกอบกำลัง แรงดันลำดับลบ และอิมพีแดนซ์ลำดับลบ เป็นตัวแปรสำคัญและเหมาะสมต่อการวิเคราะห์ความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำบริเวณขดลวดสเตเตอร์เพื่อจำแนกเฟสที่เกิดการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดสเตเตอร์ และกล่าวได้ว่าตัวแปรเหล่านี้ได้รับผลกระทบเมื่อเกิดความผิดปกติของขดลวดสเตเตอร์ รวมทั้งในบทความยังแสดงให้เห็นว่าการเลือกใช้ตัวแปรที่เหมาะสมจะยิ่งเพิ่มประสิทธิภาพในการจำแนกความผิดปกติมากกว่าการใช้ตัวแปรดั้งเดิมทั้งหมด

จากการทบทวนวรรณกรรม สามารถสรุปภาพรวมของงานวิจัยที่ทำการทบทวนได้
 ดังแสดงในตาราง 1-5

บทความ	สัญญาณตั้งต้น				ตัวบ่งชี้ที่คำนวณได้
	สัญญาณกระแสเตเตอร์	สัญญาณกระแสรีโวลต์ ระหว่างเฟสลงดิน	สัญญาณกระแสรีโวลต์ ภายในเฟส	สัญญาณแรงดันสเตเตอร์	
[7]			✓	✓	DF, C_{eq}
[8]			✓	✓	DF, C_{eq}, R_{eq}
[9]	✓				$DCLevel, Amplitude(2f_1),$ $SeverityFactor$
[10]	✓			✓	I_2, ϕ_2, I_0, ϕ_2
[11]	✓			✓	Z_2
[12]	✓			✓	$\%Load, pf, V_2, Z_2$

ตาราง 1-5 สรุปตัวบ่งชี้สภาพฉนวนไฟฟ้าที่สามารถคำนวณได้จากสัญญาณกระแสและแรงดัน

พบว่าการประมาณอายุการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะนิยมใช้อุณหภูมิของมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นตัวแปรสำคัญในการคำนวณ ซึ่งการตรวจวัดอุณหภูมิของมอเตอร์ต้องใช้เซ็นเซอร์ที่ติดตั้งภายในโครงมอเตอร์หรือติดตั้งมาตั้งแต่กระบวนการผลิตมอเตอร์ หรือสามารถประมาณอุณหภูมิได้โดยใช้สัญญาณกระแสและแรงดันผ่านแบบจำลองทางความร้อนของเครื่องจักรกล วิธีการตรวจวัดอุณหภูมิด้วยวิธีการดังกล่าวเหล่านี้อาจทำได้ยากและไม่สะดวก

จากการทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับการคำนวณตัวบ่งชี้สภาพฉนวนไฟฟ้าซึ่งสามารถคำนวณได้จากการใช้สัญญาณกระแสสเตเตอร์ สัญญาณกระแสรีโวลต์ และสัญญาณแรงดันสเตเตอร์ ดังสรุปในตาราง 1-5 พบว่าตัวบ่งชี้ 14 ตัว ได้แก่ 1) ค่าตัวประกอบการแผ่กระจาย (Dissipation factor: DF) 2) ค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนไฟฟ้า 3) ค่าความต้านทานของฉนวนไฟฟ้า 4) ขนาดของโมดูลเวกเตอร์ปาร์กที่ความถี่ศูนย์เฮิร์ต 5) ขนาดของโมดูลเวกเตอร์ปาร์กที่ความถี่สองเท่าของความถี่มูลฐาน 6) ระดับความรุนแรงของการลัดรอบขดลวดสเตเตอร์ ($Severity Factor$) 7) ขนาดกระแสลำดับลบ 8) มุมเฟสกระแสลำดับลบ 9) ขนาดกระแสลำดับศูนย์ 10) มุมเฟสกระแสลำดับศูนย์ 11) ขนาดอิมพีแดนซ์ลำดับลบ 12) เปอร์เซนต์โหลด 13) ตัวประกอบกำลัง 14) แรงดัน

ลำดับลบ เป็นตัวบ่งชี้ที่สามารถใช้ตรวจวัดความผิดปกติของขดลวดสเตเตอร์และการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้าบริเวณขดลวดสเตเตอร์ได้ ดังนั้นในงานวิจัยชิ้นนี้จึงจะสกัดตัวแปรเหล่านี้เป็นส่วนหนึ่งในค่าปริมาณทางไฟฟ้า เพื่อใช้สร้างแบบจำลองการประมาณอายุการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- (1) เพื่อศึกษาสาเหตุ ตัวบ่งชี้ และวิธีการตรวจวัดการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้า ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเสื่อมสภาพการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
- (2) เพื่อศึกษาวิธีการเร่งอายุฉนวนไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
- (3) เพื่อศึกษาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าทางไฟฟ้าที่สามารถสกัดจากสัญญาณกระแสและแรงดันตามการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้า
- (4) เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้ระบบปัญญาประดิษฐ์สำหรับการบ่งชี้อายุฉนวนไฟฟ้าที่เหลืออยู่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
- (5) เพื่อออกแบบและพัฒนาแบบจำลองการประมาณอายุฉนวนไฟฟ้าหรือความแข็งแรงของฉนวนไฟฟ้า ซึ่งบ่งบอกถึงอายุการทำงานที่เหลืออยู่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยนำระบบปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้งาน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- (1) รู้สาเหตุ ตัวบ่งชี้ และวิธีการตรวจวัดการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้า ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเสื่อมสภาพการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
- (2) รู้วิธีการประมาณอายุฉนวนไฟฟ้าที่เหลืออยู่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
- (3) รู้แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าทางไฟฟ้าที่สามารถสกัดจากสัญญาณกระแสและแรงดันตามการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้า
- (4) ได้แบบจำลองการประมาณอายุฉนวนไฟฟ้าหรือความแข็งแรงของฉนวนไฟฟ้าซึ่งบ่งบอกถึงอายุการทำงานที่เหลืออยู่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยนำระบบปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้งาน

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

ออกแบบและพัฒนาแบบจำลองการประมาณอายุฉนวนไฟฟ้าหรือความแข็งแรงของฉนวนไฟฟ้า ซึ่งบ่งบอกถึงอายุการทำงานที่เหลืออยู่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยพิจารณาฉนวนไฟฟ้าบริเวณขดลวดสเตเตอร์ ประเภทคลาส F ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งเสื่อมสภาพด้วยความเค้นทางความร้อน และใช้ค่าปริมาณทางไฟฟ้าที่สามารถสกัดจากสัญญาณกระแสและแรงดันเป็นตัวบ่งชี้การเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้า

1.6 วิธีการวิจัย

จากการทบทวนวรรณกรรมจนเกิดเป็นประเด็นวิจัยและแนวคิดของงานวิจัย ทำให้สามารถสรุปวิธีการวิจัยได้ดังนี้ 1) การศึกษาการเร่งอายุฉนวนไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2) การเก็บข้อมูลทางไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3) การสร้างแบบจำลองการประมาณอายุฉนวนไฟฟ้าหรือความแข็งแรงของฉนวนไฟฟ้า

(1) การเร่งอายุฉนวนไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

การเร่งอายุฉนวนไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำกระทำเพื่อจัดเตรียมมอเตอร์เหนี่ยวนำ สำหรับเก็บข้อมูลทางไฟฟ้าเพื่อนำไปวิเคราะห์ผลในการสร้างสมการหรือแบบจำลองทำนายอายุฉนวนไฟฟ้าหรือความแข็งแรงของฉนวนไฟฟ้าต่อไป โดยจะอ้างอิงตามมาตรฐาน *IEEE 275-1992* [13]

งานวิจัยชิ้นนี้ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีฉนวนไฟฟ้าเป็นคลาส F แสดงค่าพารามิเตอร์และพิกัดต่างๆของมอเตอร์ทดสอบดังตาราง 1-6 และเพื่อทำให้มอเตอร์พังเร็วที่สุดจึงกระตุ้นมอเตอร์ด้วยอุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน หลังจากนั้นจึงนำมอเตอร์ไปกระตุ้นด้วยความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ 95-100%RH ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งคาดว่าจะต้องดำเนินการเร่งอายุฉนวนไฟฟ้าอย่างน้อย 10 รอบของมอเตอร์ใหม่ที่ยังไม่ผ่านการทำงานจึงจะทำให้มอเตอร์พัง

MODEL 71 2-4 B3			POLE 4 PHASE 3			N° 5902001	
V	Hz	HP	kW	pm	A	S1 INS.CL. F	
Δ	220	50	0.5	0.37	1370	2.02	COSØ 0.7
Y	380	50	0.5	0.37	1370	1.17	BRG.DE 6202C
Δ	240	60	0.53	0.39	1640	2.02	BRG.NDE 6202C
Y	415	60	0.53	0.39	1640	1.17	IP 55 6.3 kg

ตาราง 1-6 พารามิเตอร์และพิกัดของมอเตอร์ทดสอบ

(2) การเก็บข้อมูลทางไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

การเก็บข้อมูลทางไฟฟ้าของมอเตอร์ ผู้วิจัยได้เก็บข้อมูลดังนี้

1. ค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้า ด้วยอุปกรณ์เมกเกอร์โดยใช้เวลาวัด 1 นาที ซึ่งจะทำการวัดค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้าทุกๆ ครั้งที่มีการกระตุ้นเพื่อเร่งอายุฉนวนไฟฟ้า

2. สัญญาณไฟฟ้าขณะมอเตอร์กำลังทำงาน 10 สัญญาณ แสดงค่าอธิบายในตาราง 1-7 และแสดงตำแหน่งสำหรับติดตั้งอุปกรณ์วัดเพื่อตรวจวัดสัญญาณไฟฟ้าในภาพประกอบ 1-4

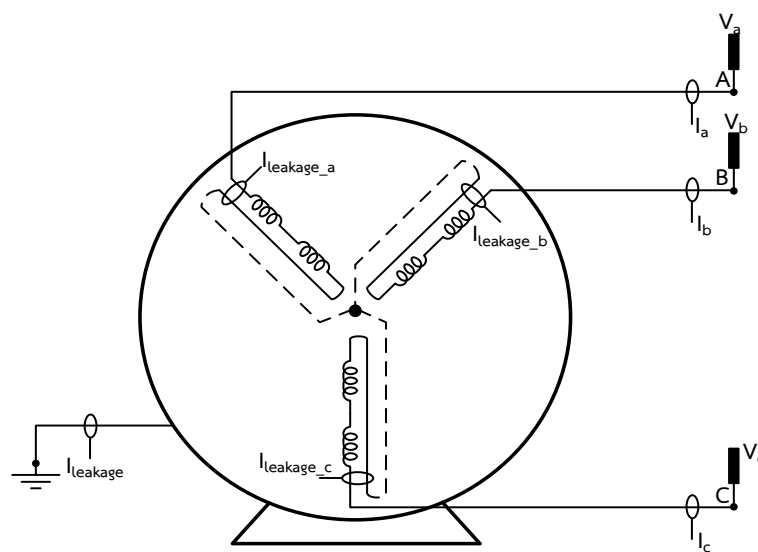
การติดตั้งมอเตอร์สำหรับบันทึกสัญญาณไฟฟ้าขณะทำงาน จะเชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟผ่านอินเวอร์เตอร์ (Inverter) เพื่อรักษาแรงดันทั้ง 3 เฟสให้สมดุล ตรวจวัดสัญญาณไฟฟ้าโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดกระแสและแรงดัน บันทึกข้อมูลด้วยอุปกรณ์ NI-DAQ ผ่านโปรแกรม LabVIEW ที่ความถี่ซิกตัวอย่าง (Sampling rate) 5,000 เฮิร์ต ซึ่งจะวัดสัญญาณไฟฟ้าขณะมอเตอร์ทำงานที่แรงดันพิกัด (ต่อแบบสตาร์) และถูกกระตุ้นด้วยความร้อนภายนอก เป็นเวลา 6 - 12 ชั่วโมง หลังจากมอเตอร์ถูกเร่งอายุด้วยความเค้นทางความร้อนและความชื้นในแต่ละรอบแสดงดังภาพประกอบ 1-5

3. อุณหภูมิที่โครงของมอเตอร์ ซึ่งวัดขณะมอเตอร์ทำงานทุกๆ 1 ชั่วโมง

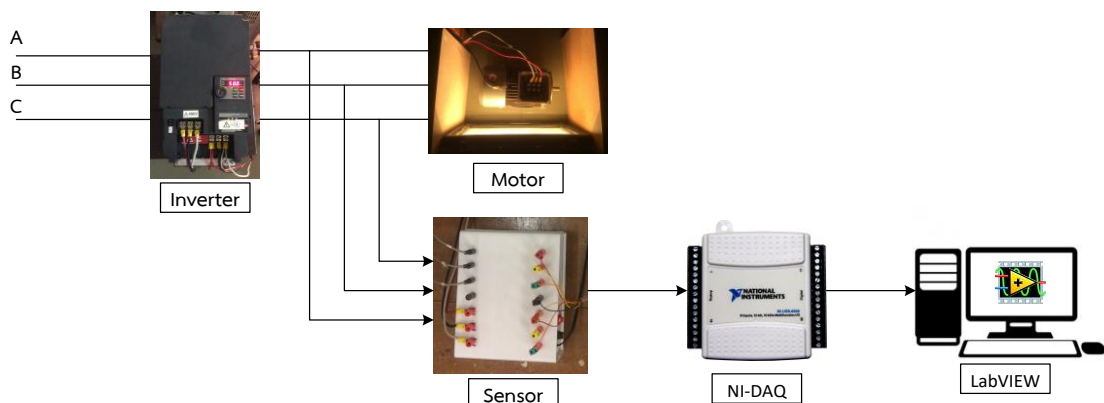
ตัวแปร	คำอธิบาย
V_a	แรงดันไลน์เฟส A
V_b	แรงดันไลน์เฟส B
V_c	แรงดันไลน์เฟส C
I_a	กระแสไลน์เฟส A
I_b	กระแสไลน์เฟส B
I_c	กระแสไลน์เฟส C

ตัวแปร	คำอธิบาย
$I_{leakage}$	กระแสรั่วไหลลงดิน
$I_{leakage_a}$	กระแสรั่วไหลเฟส A
$I_{leakage_b}$	กระแสรั่วไหลเฟส B
$I_{leakage_c}$	กระแสรั่วไหลเฟส C

ตาราง 1-7 คำอธิบายสัญญาณไฟฟ้าที่ถูกเก็บบันทึกข้อมูล



ภาพประกอบ 1-4 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสำหรับบันทึกสัญญาณไฟฟ้า



ภาพประกอบ 1-5 การติดตั้งมอเตอร์สำหรับบันทึกสัญญาณไฟฟ้าขณะมอเตอร์ทำงาน

(3) การสร้างแบบจำลองการประมาณอายุฉนวนไฟฟ้าหรือความแข็งแรงของฉนวนไฟฟ้า

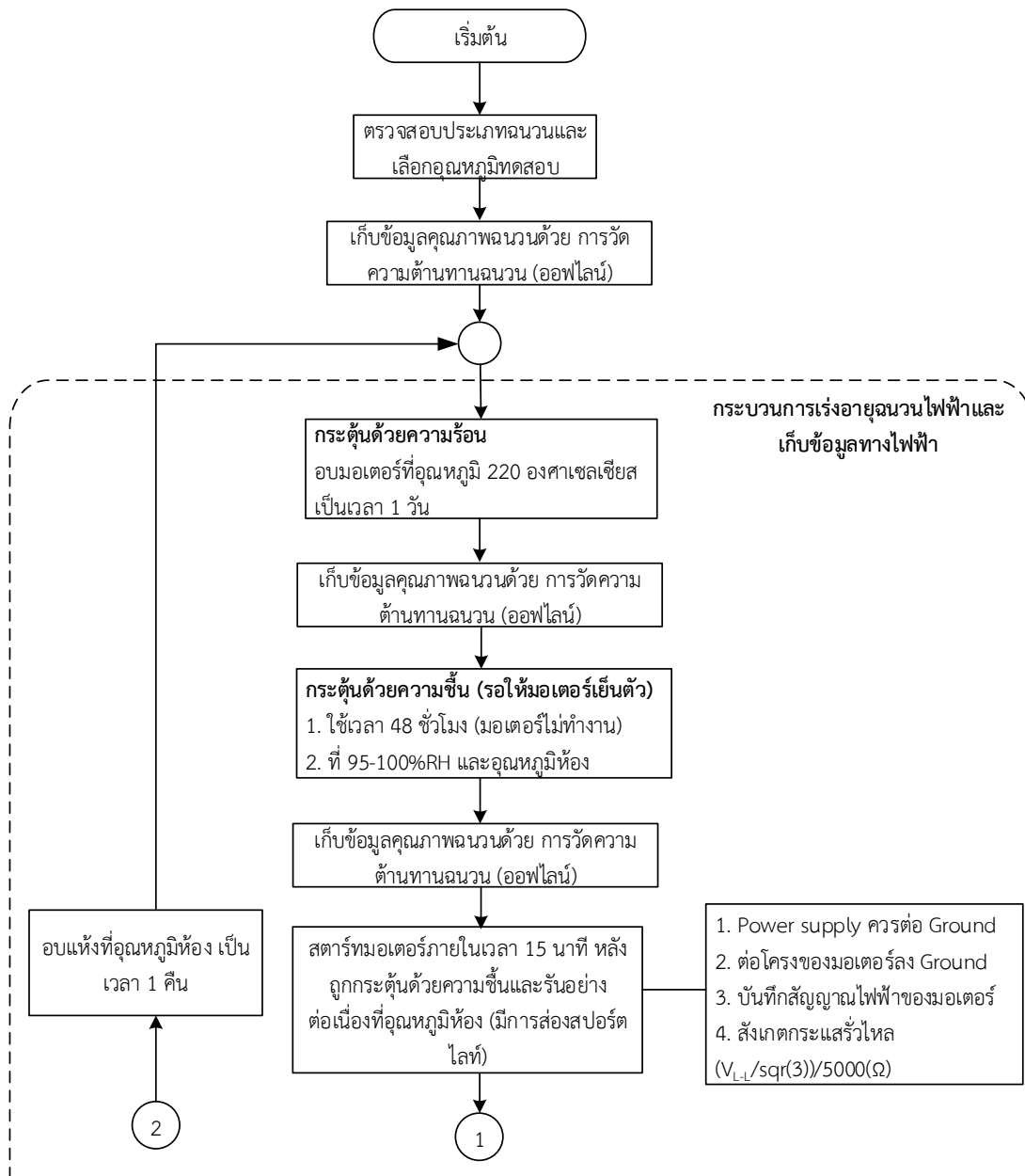
ข้อมูลสัญญาณทางไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ถูกเร่งอายุฉนวนไฟฟ้าได้รับการบันทึกข้อมูล จะถูกนำไปคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้าต่างๆ ในกระบวนการประมวลผลเบื้องต้นสรุปค่าปริมาณทางไฟฟ้าดังตาราง 1-8 จากนั้นค่าปริมาณทางไฟฟ้าเหล่านี้จะถูกนำไปคัดเลือกหรือสกัดตัวแปรที่เหมาะสมด้วยวิธีการลดขนาดตัวแปรตามหัวข้อ 5.1 ตัวแปรที่ถูกคัดเลือกหรือสกัดจะถูกนำไปใช้เพื่อให้ระบบเกิดการเรียนรู้ด้วยตัวจำแนกประเภท 1) การประมาณแบบนาอิวเบย์ (Naïve Bayes) 2) การค้นหาเพื่อนบ้านใกล้สุด k อันดับ (k -Nearest Neighbor) 3) การสร้างต้นไม้ตัดสินใจ (Decision tree) 4) โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network) และสร้างแบบจำลองการประมาณอายุฉนวนไฟฟ้าหรือความแข็งแรงของฉนวนไฟฟ้าต่อไป แสดงผังงานวิธีการวิจัยทั้งหมดดังภาพประกอบ 1-6 จากผังงานดังกล่าวจะประเมินคุณภาพของฉนวนไฟฟ้าด้วยค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้า ซึ่งวัดขณะมอเตอร์หยุดการทำงาน สำหรับช่วงการเก็บข้อมูลทางไฟฟ้าของมอเตอร์ ขณะที่มอเตอร์ทำงานจะใช้สัญญาณกระแสรั่วไหลเป็นเกณฑ์สำหรับการประเมินคุณภาพของฉนวนไฟฟ้าที่บริเวณขดลวดสเตเตอร์ลงดิน

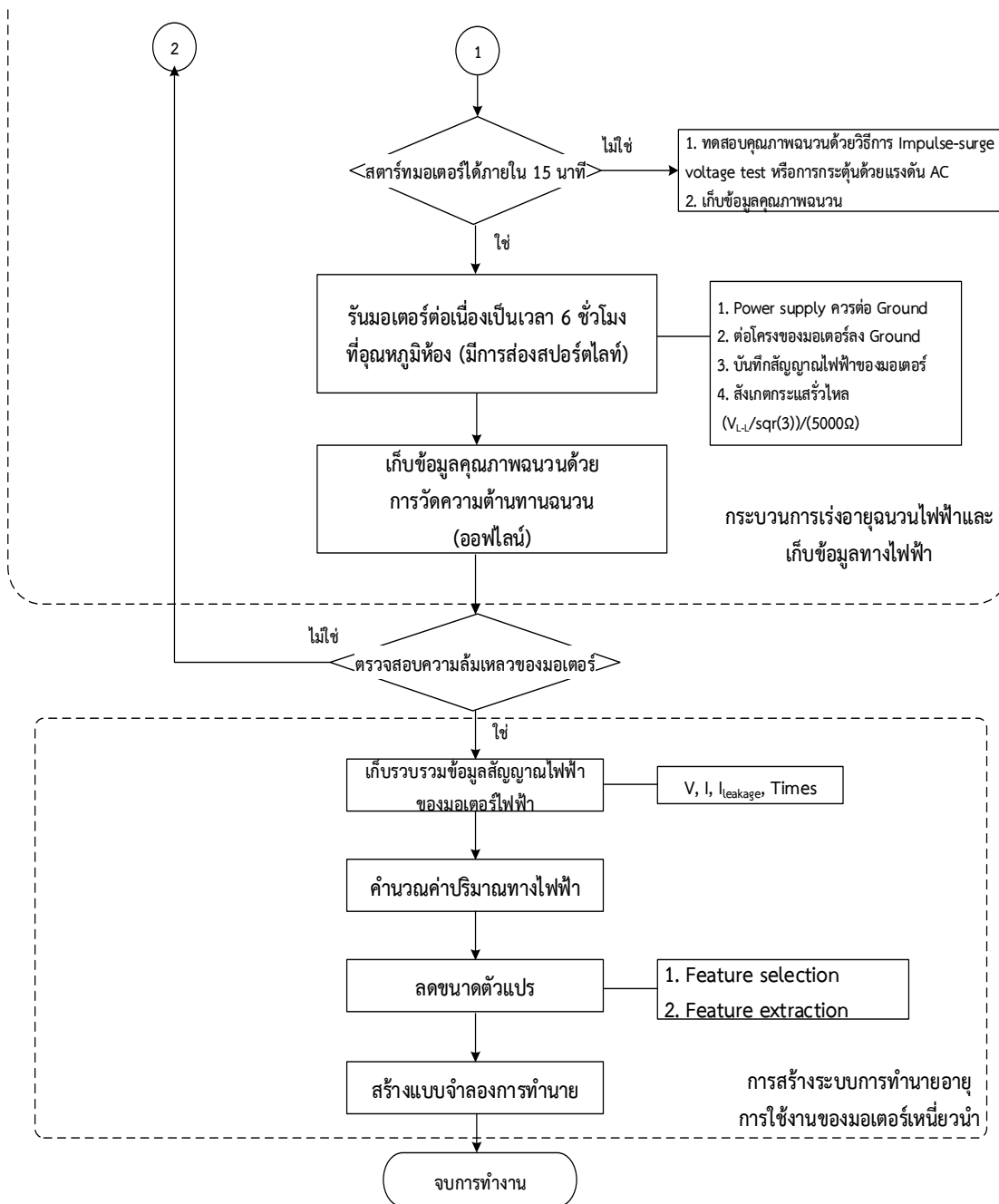
ลำดับ	ตัวแปร	คำอธิบาย
1	$I_{a(pu)}$	ค่ากระแส rms เฟส A (Per unit)
2	$I_{b(pu)}$	ค่ากระแส rms เฟส B (Per unit)
3	$I_{c(pu)}$	ค่ากระแส rms เฟส C (Per unit)
4	$\%THD(I_a)$	ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนกระแสสามอนิกรวมเฟส A
5	$\%THD(I_b)$	ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนกระแสสามอนิกรวมเฟส B
6	$\%THD(I_c)$	ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนกระแสสามอนิกรวมเฟส C
7	$V_{a(pu)}$	ค่าแรงดัน rms เฟส A (Per unit)
8	$V_{b(pu)}$	ค่าแรงดัน rms เฟส B (Per unit)
9	$V_{c(pu)}$	ค่าแรงดัน rms เฟส C (Per unit)
10	$\%THD(V_a)$	ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนแรงดันสามอนิกรวมเฟส A
11	$\%THD(V_b)$	ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนแรงดันสามอนิกรวมเฟส B
12	$\%THD(V_c)$	ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนแรงดันสามอนิกรวมเฟส C
13	$Z_{a(pu)}$	ค่าอิมพีแดนซ์เฟส A (Per unit)
14	$Z_{b(pu)}$	ค่าอิมพีแดนซ์เฟส B (Per unit)

ลำดับ	ตัวแปร	คำอธิบาย
15	$Z_{c(pu)}$	ค่าอิมพีแดนซ์เฟส C (Per unit)
16	$P_{a(pu)}$	กำลังไฟฟ้าจริงเฟส A (Per unit)
17	$P_{b(pu)}$	กำลังไฟฟ้าจริงเฟส B (Per unit)
18	$P_{c(pu)}$	กำลังไฟฟ้าจริงเฟส C (Per unit)
19	$P_{Total(pu)}$	กำลังไฟฟ้าจริงรวม (Per unit)
20	$Q_{a(pu)}$	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเฟส A (Per unit)
21	$Q_{b(pu)}$	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเฟส B (Per unit)
22	$Q_{c(pu)}$	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเฟส C (Per unit)
23	$Q_{Total(pu)}$	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟรวม (Per unit)
24	$S_{a(pu)}$	กำลังไฟฟ้าปรากฏเฟส A (Per unit)
25	$S_{b(pu)}$	กำลังไฟฟ้าปรากฏเฟส B (Per unit)
26	$S_{c(pu)}$	กำลังไฟฟ้าปรากฏเฟส C (Per unit)
27	$S_{Total(pu)}$	กำลังไฟฟ้าปรากฏรวม (Per unit)
28	<i>Energy</i>	พลังงานไฟฟ้า (Unit)
29	f_1	ความถี่มูลฐาน (Hz)
30	pf	ตัวประกอบกำลัง
31	$I_{leak,g(pu)}$	กระแสรั่วไหลลงดิน (Per unit)
32	$I_{leak,a(pu)}$	กระแสรั่วไหลเฟส A (Per unit)
33	$I_{leak,b(pu)}$	กระแสรั่วไหลเฟส B (Per unit)
34	$I_{leak,c(pu)}$	กระแสรั่วไหลเฟส C (Per unit)
35	$I_{p(pu)}$	กระแสลำดับบวก (Per unit)
36	$Angle(I_p)$	มุมของกระแสลำดับบวก
37	$I_{n(pu)}$	กระแสลำดับลบ (Per unit)
38	$Angle(I_n)$	มุมของกระแสลำดับลบ
39	$V_{p(pu)}$	แรงดันลำดับบวก (Per unit)
40	$Angle(V_p)$	มุมของแรงดันลำดับบวก
41	$V_{n(pu)}$	แรงดันลำดับลบ (Per unit)
42	$Angle(V_n)$	มุมของแรงดันลำดับลบ

ลำดับ	ตัวแปร	คำอธิบาย
43	$Z_{p(pu)}$	อิมพีแดนซ์ลำดับบวก (Per unit)
44	$Z_{n(pu)}$	อิมพีแดนซ์ลำดับลบ (Per unit)
45	$I_{dc(pu)}$	ขนาดของ โมดูลเวกเตอร์ปาร์กที่ความถี่ศูนย์เฮิร์ต หรือส่วนประกอบกระแสตรง (Per unit)
46	$I_{100Hz(pu)}$	ขนาดของ โมดูลเวกเตอร์ปาร์กที่ความถี่สองเท่าของ ความถี่มูลฐาน (Per unit)
47	<i>SeverityFactor</i>	ระดับความรุนแรงการลัดรอบขดลวดสเตเตอร์
48	$SigPow_{120-180Hz,a}(u)$	กำลังสัญญาณสเปกตรัมกระแสไฟฟ้าเฟส A ที่ช่วง ความถี่ 120-180 เฮิร์ต (ไมโครแอมป์กำลังสอง)
49	$SigPow_{120-180Hz,b}(u)$	กำลังสัญญาณสเปกตรัมกระแสไฟฟ้าเฟส B ที่ช่วง ความถี่ 120-180 เฮิร์ต (ไมโครแอมป์กำลังสอง)
50	$SigPow_{120-180Hz,c}(u)$	กำลังสัญญาณสเปกตรัมกระแสไฟฟ้าเฟส C ที่ช่วง ความถี่ 120-180 เฮิร์ต (ไมโครแอมป์กำลังสอง)
51	$SigPow_{120-180Hz,a}(dB)$	กำลังสัญญาณสเปกตรัมกระแสไฟฟ้าเฟส A ที่ช่วง ความถี่ 120-180 เฮิร์ต (เดซิเบล)
52	$SigPow_{120-180Hz,b}(dB)$	กำลังสัญญาณสเปกตรัมกระแสไฟฟ้าเฟส B ที่ช่วง ความถี่ 120-180 เฮิร์ต (เดซิเบล)
53	$SigPow_{120-180Hz,c}(dB)$	กำลังสัญญาณสเปกตรัมกระแสไฟฟ้าเฟส C ที่ช่วง ความถี่ 120-180 เฮิร์ต (เดซิเบล)
54	$DF(\%)$	เปอร์เซ็นต์ตัวประกอบการแผ่กระจาย (รวม 3 เฟส)
55	$C_{eq,a(pu)}$	ค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนไฟฟ้าเฟส A (Per unit)
56	$C_{eq,b(pu)}$	ค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนไฟฟ้าเฟส B (Per unit)
57	$C_{eq,c(pu)}$	ค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนไฟฟ้าเฟส C (Per unit)
58	$R_{eq,a(pu)}$	ค่าความต้านทานของฉนวนไฟฟ้าเฟส A (Per unit)
59	$R_{eq,b(pu)}$	ค่าความต้านทานของฉนวนไฟฟ้าเฟส B (Per unit)
60	$R_{eq,c(pu)}$	ค่าความต้านทานของฉนวนไฟฟ้าเฟส C (Per unit)

ตาราง 1-8 ค่าปริมาณทางไฟฟ้าต่างๆ ที่ถูกคำนวณในกระบวนการประมวลผลเบื้องต้น





ภาพประกอบ 1-6 ฟังงานระเบียบวิธีการวิจัย

1.7 แผนการดำเนินงาน

แผนการดำเนินงานสามารถสรุปเป็นขั้นตอนการดำเนินงานได้ดังตาราง 1-9 และอธิบายรายละเอียดในการดำเนินงานได้ดังนี้

1. ศึกษาและทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับการตรวจวัดการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้า การใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อตรวจวัดความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ และการประมาณอายุฉนวนไฟฟ้าที่เหลืออยู่ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

2. ศึกษาวิธีการและทดลองเร่งการเสื่อมสภาพฉนวนไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำตามมาตรฐาน *IEEE 275-1992* [13]

3. เก็บบันทึกสัญญาณทางไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ถูกเร่งการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้า ซึ่งเป็นการเร่งอายุการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยข้อมูลทางไฟฟ้าจะถูกบันทึกผ่านโปรแกรม LabVIEW

4. วิเคราะห์ข้อมูลทางไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ถูกเร่งอายุการทำงาน และออกแบบแบบจำลองการประมาณอายุการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยใช้วิธีการปัญญาประดิษฐ์

5. ทดสอบและปรับปรุงข้อผิดพลาดของแบบจำลองการประมาณอายุการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้ออกแบบ

6. จัดทำรายงานวิทยานิพนธ์ และทำผลงานวิชาการเพื่อการเผยแพร่

แผนการดำเนินงาน วิทยานิพนธ์	ปีการศึกษา 2556				ปีการศึกษา 2557				ปีการศึกษา 2558				ปีการศึกษา 2559				ปี การศึกษา 2560	ปีการศึกษา 2561										
	ภาคเรียนที่ 2				ภาคเรียนที่ 1				ภาคเรียนที่ 2				ภาคเรียนที่ 1					ภาคเรียนที่ 2										
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3
1. ศึกษาและทบทวน วรรณกรรมเกี่ยวกับการ ตรวจวัดการเสื่อมสภาพ ของฉนวนไฟฟ้า การใช้ ปัญญาประดิษฐ์เพื่อ ตรวจวัดความผิดปกติของ มอเตอร์เหนี่ยวนำ และ การประมาณอายุ ฉนวนไฟฟ้าที่เหลืออยู่ใน มอเตอร์เหนี่ยวนำ																												
2. ศึกษาวิธีการและ ทดลองเร่งการเสื่อมสภาพ ฉนวนไฟฟ้าของมอเตอร์ เหนี่ยวนำ																												

แผนการดำเนินงาน วิทยานิพนธ์	ปีการศึกษา 2556				ปีการศึกษา 2557				ปีการศึกษา 2558				ปีการศึกษา 2559				ปี การศึกษา 2560	ปีการศึกษา 2561										
	ภาคเรียนที่ 2				ภาคเรียนที่ 1				ภาคเรียนที่ 2				ภาคเรียนที่ 1					ภาคเรียนที่ 2										
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3
3. เก็บบันทึกสัญญาณทางไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ถูกเร่งการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้า																												
4. วิเคราะห์ข้อมูลทางไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ถูกเร่งอายุการทำงาน และออกแบบแบบจำลองการประมาณอายุการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยใช้วิธีการปัญญาประดิษฐ์																												

แผนการดำเนินงาน วิทยานิพนธ์	ปีการศึกษา 2556				ปีการศึกษา 2557				ปีการศึกษา 2558				ปีการศึกษา 2559				ปี การศึกษา 2560	ปีการศึกษา 2561																		
	ภาคเรียนที่ 2				ภาคเรียนที่ 1				ภาคเรียนที่ 2				ภาคเรียนที่ 1					ภาคเรียนที่ 2				ภาคเรียนที่ 1				ภาคเรียนที่ 2										
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4			
5. ทดสอบและปรับปรุง ข้อผิดพลาดของ แบบจำลองการประมาณ อายุการทำงานของ มอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้ ออกแบบ																																				
6. จัดทำรายงาน วิทยานิพนธ์ และทำ ผลงานวิชาการเพื่อการ เผยแพร่																																				

ตาราง 1-9 แผนการดำเนินงาน

1.8 อุปกรณ์และสถานที่ทำงานวิจัย

ห้อง EE108 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 การวิเคราะห์เพื่อตรวจวัดความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ในช่วงเวลาหลายสิบปีที่ผ่านมา มีหลายวิธีการที่ถูกนำมาใช้เพื่อการตรวจวัดความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยส่วนใหญ่จะนิยมใช้สัญญาณกระแสและแรงดันของมอเตอร์ที่ได้จากการตรวจวัดเป็นข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ เนื่องจากสัญญาณเหล่านี้มีข้อมูลที่สามารถระบุความผิดปกติที่เกิดขึ้นบริเวณขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ได้

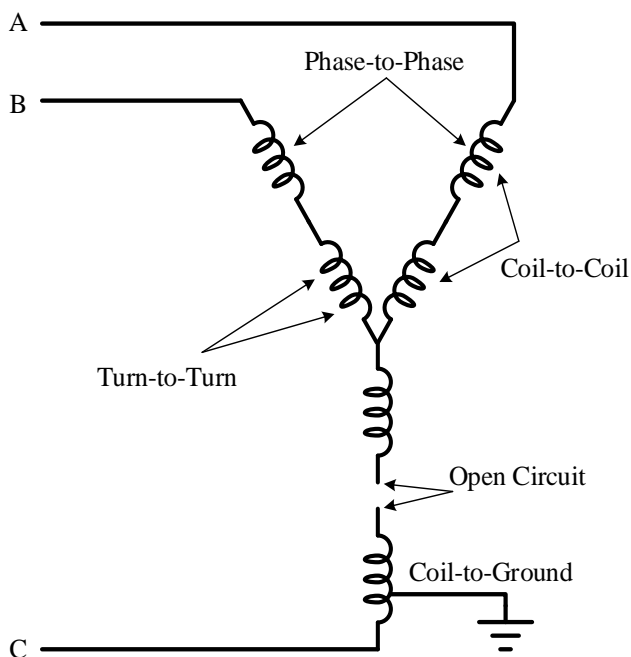
สัญญาณกระแสและแรงดันของมอเตอร์สามารถใช้ระบุความผิดปกติที่เกิดขึ้นบริเวณขดลวดสเตเตอร์ผ่านวิธีการต่างๆ เช่น 1) การวิเคราะห์สเปกตรัมของสัญญาณกระแสมอเตอร์ (Motor current signature analysis: MCSA) [14, 15] เป็นวิธีการพิจารณาความถี่ที่ปรากฏขึ้นบนสเปกตรัมกระแสเพื่อระบุความผิดปกติของมอเตอร์ ซึ่งวิธีการนี้สามารถตรวจวัดความผิดปกติของมอเตอร์ได้ทั้งทางกลและทางไฟฟ้าโดยขึ้นอยู่กับความถี่ที่ใช้พิจารณาเพื่อระบุความผิดปกติของมอเตอร์ 2) การวิเคราะห์เวกเตอร์ปาร์กแบบขยาย (Extended park's vector approach: EPVA) [9] เป็นการพิจารณาสเปกตรัมขนาดของโมดูลเวกเตอร์ปาร์ก (Park's vector module) ที่ความถี่ศูนย์เฮิร์ตหรือส่วนประกอบกระแสตรง (DC level) และที่ความถี่สองเท่าของความถี่มูลฐาน ซึ่งสามารถนำมาใช้คำนวณระดับความรุนแรงการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ได้ 3) การวิเคราะห์โดยใช้ส่วนประกอบลำดับของมอเตอร์ (Sequence components) เป็นการนำสัญญาณกระแสและแรงดันมาคำนวณส่วนประกอบลำดับแล้วพิจารณากระแสลำดับลบและกระแสลำดับศูนย์ [10] หรือใช้กระแสลำดับลบอธิบายพฤติกรรมของมอเตอร์เหนี่ยวนำ [16] หรืออาจใช้ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับ [17, 18] เพื่อวิเคราะห์ความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 4) การวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลอง โดยการใส่สัญญาณกระแสและแรงดันสร้างวงจรสมมูลเพื่อจำลองพฤติกรรมของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งจะมีการกำหนดตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับความผิดปกติบริเวณขดลวดสเตเตอร์ [19, 20] 5) การวิเคราะห์ความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยสัญญาณอื่นๆ [3] เช่น ความเร็วเชิงมุมทันทีทันใด อุณหภูมิ แรงบิดช่องอากาศ ฟลักซ์แม่เหล็ก สัญญาณรบกวน แรงดันเหนี่ยวนำ การทดสอบแรงดันเสิร์ช การวิเคราะห์แก๊ส และการคายประจุบางส่วน ซึ่งการวิเคราะห์โดยใช้สัญญาณต่างๆ เหล่านี้ต้องใช้เซ็นเซอร์เฉพาะที่มีราคาแพง

วิธีการตรวจวัดความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำเหล่านี้ จะใช้เมื่อมีความผิดปกติขึ้นในมอเตอร์แล้ว และใช้สำหรับจำแนกความผิดปกติที่เกิดขึ้นต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งไม่เป็นที่ต้องการสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาวิธีการทำนาย

ความผิดปกติที่จะเกิดขึ้นกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งกระทำก่อนที่จะเกิดความผิดปกติและเป็นงานวิจัยที่ต้องการสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม โดยวิธีการทำนายความผิดปกติที่จะเกิดขึ้นกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ จะศึกษาเกี่ยวกับการเสื่อมสภาพจนวนไฟฟ้าของขดลวด เพื่อให้สามารถประมาณสภาพจนวนไฟฟ้าของขดลวดและประมาณเวลาที่จะเกิดความผิดปกติกับมอเตอร์เหนี่ยวนำต่อไป

2.2 สาเหตุการเบรคความถี่ของจนวนไฟฟ้าบริเวณขดลวดสเตเตอร์

ประมาณ 37 เปอร์เซ็นต์ของความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นความผิดปกติบริเวณขดลวดสเตเตอร์ [1, 3] ซึ่งเกิดจากการเสื่อมสภาพจนวนลุ่มเหลวของจนวนไฟฟ้า จนก่อให้เกิดการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดสเตเตอร์ (ภายในขดลวดเดียวกัน) ซึ่งถือเป็นความผิดปกติเริ่มต้นในขดลวดสเตเตอร์ จากความผิดปกติเริ่มต้นนี้นำไปสู่การลัดวงจรระหว่างขดลวดต่อขดลวด เฟสต่อเฟส ขดลวดลงดิน และการเปิดวงจร [15, 21] ภาพประกอบ 2-1 แสดงความผิดปกติบริเวณขดลวดสเตเตอร์ โดยสาเหตุของความผิดปกติเหล่านี้สามารถแบ่งได้เป็น 4 กลุ่ม [2, 21, 22] คือ ความเค้นทางความร้อน ความเค้นทางไฟฟ้า ความเค้นทางกล และความเค้นทางสภาพแวดล้อม



ภาพประกอบ 2-1 ความผิดปกติบริเวณขดลวดสเตเตอร์

(1) ความเค้นทางความร้อน (Thermal stress)

การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิก่อให้เกิดความร้อนในมอเตอร์ ซึ่งเร่งกระบวนการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้า และทำให้อายุการทำงานของฉนวนไฟฟ้าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ตามกฎบัญญัติกล่าวว่า “เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทุก 10 องศาเซลเซียส จะทำให้อายุฉนวนไฟฟ้าลดลง 50 เปอร์เซ็นต์” [2] ความเค้นทางความร้อนที่ทำให้อุณหภูมิของมอเตอร์สูงขึ้น เช่น 1) การทำงานที่ภาระโหลดเกิน 2) กระแสมีความถี่ฮาร์มอนิกสูงเนื่องจากการเชื่อมต่อกับอินเวอร์เตอร์ 3) กระแสลำดับลบที่เกิดจากความไม่สมดุลของแรงดัน โดยแรงดันที่ไม่สมดุล 3.5 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้อุณหภูมิของขดลวดเพิ่มขึ้น 25 เปอร์เซ็นต์ 4) การระบายอากาศหรืออุณหภูมิไม่ดี เป็นต้น หากต้องการให้อายุการทำงานของฉนวนไฟฟ้ายาวนานขึ้นควรนำมอเตอร์ไปใช้งานบริเวณที่มีการถ่ายเทอากาศดีหรือใช้ฉนวนไฟฟ้าที่มีคุณภาพสูงขึ้น เช่น การใช้ฉนวนไฟฟ้าที่สามารถทนทานต่อความร้อนได้สูงขึ้น

(2) ความเค้นทางไฟฟ้า (Electrical stress)

ฉนวนไฟฟ้าของขดลวดสเตเตอร์มักจะถูกทำลาย เมื่อเกิดปัญหาเกี่ยวกับวัสดุไดอิเล็กทริก เกิดปรากฏการณ์การเกิดรอยไหม้ (Tracking) ปรากฏการณ์โคโรนา (Corona) และเกิดแรงดันไฟฟ้าชั่วครู่ที่เครื่องจักรกลในระหว่างการสตาร์ทและหยุดกระบวนการผลิต

ประเภทของวัสดุไดอิเล็กทริกที่นำมาใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าของขดลวดระหว่างเฟสต่อดิน เฟสต่อเฟส และระหว่างรอบของขดลวด มีหลายประเภทแตกต่างกัน ซึ่งแต่ละประเภทสามารถทนทานต่อแรงดันที่มอเตอร์ใช้งานแตกต่างกัน อันมีผลต่ออายุการทำงานของฉนวนไฟฟ้า เมื่อใช้แรงดันเกินพิกัดของฉนวนไฟฟ้า ดังนั้นการเลือกใช้ฉนวนไฟฟ้าแต่ละประเภทมาห่อหุ้มขดลวดควรคำนึงถึงแรงดันไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้งาน

ปรากฏการณ์การเกิดรอยไหม้และปรากฏการณ์โคโรนา เป็นปรากฏการณ์การสร้างทางเดินบนผิวฉนวนไฟฟ้าหรืออากาศโดยรอบฉนวนไฟฟ้าทำให้ประจุไฟฟ้าไหลผ่านได้ จนเกิดเป็นกระแสรั่วไหล ซึ่งปรากฏการณ์เหล่านี้จะเกิดจากการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้าเมื่อทำงานที่แรงดันสูงกว่า 600 โวลต์ และ 5 กิโลโวลต์ ตามลำดับ

ปรากฏการณ์แรงดันไฟฟ้าชั่วครู่ซึ่งเกิดจากความผิดปกติ การลัดวงจรระหว่างเฟสต่อเฟส เฟสลงดิน หรือหลายเฟสลงดินทางฝั่งแหล่งจ่ายไฟฟ้า การถ่ายโอนพลังงานบริเวณบัส (Bus) อย่างรวดเร็ว การเปิด-ปิดเบรกเกอร์ การสวิตช์ตัวเก็บประจุสำหรับการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง ความล้มเหลวของฉนวนไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง การเกิดฟ้าผ่า ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์ รวมไปถึงการสตาร์ทและหยุดกระบวนการผลิต

สถานการณ์เหล่านี้ข้างต้นจะทำให้เกิดปรากฏการณ์แรงดันไฟฟ้าชั่วครู่ขึ้นได้ ซึ่งอาจเป็นสาเหตุทำให้ฉนวนไฟฟ้าของมอเตอร์เกิดการเสื่อมสภาพ

(3) ความเค้นทางกล (Mechanical stress)

ความเค้นทางกลเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ฉนวนไฟฟ้าเกิดความล้มเหลว เนื่องจากความเค้นทางกลทำให้เกิดการเคลื่อนไหวยของขดลวดและเกิดการกระทบของโรเตอร์กับสเตเตอร์ ซึ่งแรงที่กระทำบนขดลวดจะเป็นสัดส่วนระหว่างกระแสไฟฟ้ากำลังสองต่อกระแสไฟฟ้าสูงสุด เนื่องจากการสตาร์ทมอเตอร์ โดยแรงกระทำเหล่านี้จะทำให้ขดลวดเกิดการเคลื่อนไหวและต้นสะเก็ดหิน จากการเคลื่อนไหวยของขดลวดซ้ำๆ นี้ ทำให้เกิดความเสียหายอย่างรุนแรงต่อฉนวนไฟฟ้าหรือตัวนำไฟฟ้าของขดลวด

การกระทบกันระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์เกิดจากหลายสาเหตุ ที่พบมากที่สุดคือ เมื่อมีความเสียหายเกิดขึ้นที่เบร้ง มีการโก่งตัวของเพลลา มีการเยื้องศูนย์ระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์ โดยบางครั้งการกระทบกันระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์จะเกิดขึ้นเฉพาะช่วงสตาร์ท แต่บางครั้งสามารถเกิดขึ้นในช่วงมอเตอร์ทำงานที่ความเร็วเต็มพิกัด ซึ่งการกระทบกันระหว่างสองส่วนนี้จะส่งผลต่อขดลวดลงดิน (Grounded coil) ความเค้นทางกลอื่นๆ เช่น น้ำหนักโรเตอร์ไม่สมดุล ไขพัดโรเตอร์หลวม น็อตมอเตอร์หลวม สิ่งแปลกปลอมเข้าสู่มอเตอร์ เป็นต้น

(4) ความเค้นทางสภาพแวดล้อม (Environmental stress)

ความเค้นทางสภาพแวดล้อมเป็นความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากการปนเปื้อนจนทำให้การระบายความร้อนของขดลวดลดลง การมีความชื้นสูง การได้รับสารเคมีรุนแรง การแผ่รังสีในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ (เกิดขึ้นเฉพาะภายในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์หรือเรือพลังงานนิวเคลียร์) หรือการมีระดับความเค็มของเกลือเมื่อใช้งานมอเตอร์บริเวณชายฝั่งทะเล จากสาเหตุดังกล่าวสามารถแบ่งความเค้นเป็นด้านสิ่งแวดล้อมหรือความเค้นโดยรอบ (Environmental or ambient stress) [2] ซึ่งความเค้นเหล่านี้จะทำให้ฉนวนไฟฟ้าของขดลวดเกิดการเสื่อมสภาพ ดังนั้นหากต้องการลดความเค้นต่างๆ จากสภาพแวดล้อมจึงควรเก็บรักษามอเตอร์ไว้ในที่สะอาดและแห้ง หากมีการใช้งานมอเตอร์ภายนอกอาคารควรหลีกเลี่ยงสถานที่ที่ได้รับอิทธิพลของความชื้น สารเคมี และอนุภาคต่างๆ เป็นต้น

2.3 ระบบฉนวนไฟฟ้าของขดลวดสเตเตอร์

ระบบฉนวนไฟฟ้าของขดลวดสเตเตอร์ประกอบด้วยหลายส่วนประกอบและหลายคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ทั้งนี้เพื่อให้สามารถถ่ายโอนความร้อนเนื่องจากกำลังสูญเสียในขดลวดตัวนำไปยังแผงระบายความร้อน (Heat sink) ได้ดี ป้องกันการลัดวงจรระหว่างตัวนำ

ป้องกันการสั้นสะท้อนเนื่องจากการได้รับแรงแม่เหล็ก รวมทั้งต้องสามารถป้องกันตัวนำไฟฟ้า จากความร้อนหรือของเหลวที่สามารถกัดกร่อนตัวนำไฟฟ้าได้ โดยส่วนประกอบพื้นฐานของระบบ ฉนวนไฟฟ้าแสดงดังภาพประกอบ 2-2 ได้แก่

1. ฉนวนไฟฟ้าระหว่างลวดตัวนำ (Strand insulation) ทำหน้าที่ห่อหุ้มลวดตัวนำจากลวดตัวนำเส้นอื่น โดยแรงดันตกคร่อมเส้นลวดตัวนำจะมีค่าน้อยกว่าหลาย 10 โวลต์ ดังนั้นฉนวนไฟฟ้าส่วนนี้สามารถมีความบางมากได้ ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายในระหว่างกระบวนการผลิต ทำให้ต้องเลือกฉนวนไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติทางกลที่ดี นอกจากนี้ฉนวนส่วนนี้ยังเป็นส่วนที่อยู่ติดกับตัวนำไฟฟ้าที่มีกระแสไหลผ่านและเกิดกำลังสูญเสีย ทำให้ฉนวนไฟฟ้าเกิดความร้อน ดังนั้นฉนวนไฟฟ้าส่วนนี้จึงต้องมีคุณสมบัติทางความร้อนที่ดี

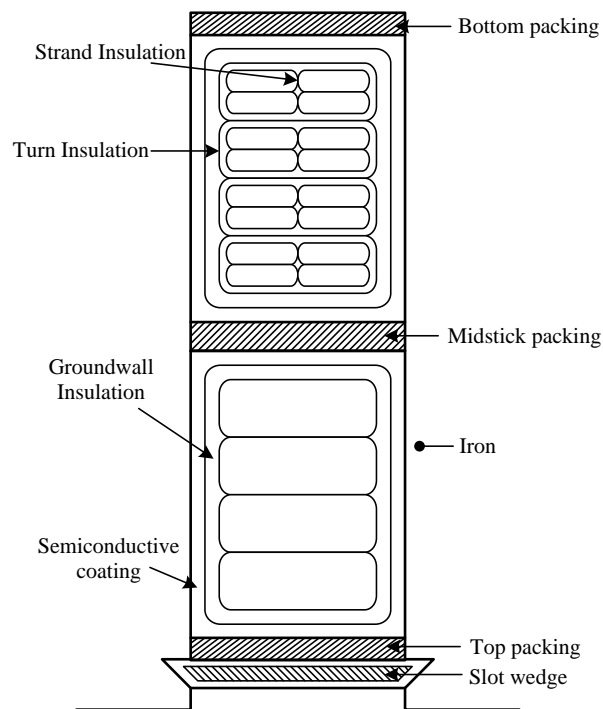
2. ฉนวนไฟฟ้าพันรอบมัดชุดขดลวด (Turn insulation) ทำหน้าที่ป้องกันการลัดรอบหรือการลัดวงจรระหว่างรอบภายในขดลวดเดียวกัน โดยเมื่อมีการลัดรอบเกิดขึ้น ขดลวดส่วนนี้จะกลายเป็นขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบอัด โนมตี นั่นคือ ถ้าขดลวดถูกพัน 100 รอบระหว่างปลายขั้วเฟสและนิวทรัล (ขดลวดปฐมภูมิ) และเกิดการลัดรอบหนึ่งรอบ (ขดลวดทุติยภูมิ) จะทำให้กระแสไหลผ่านขดลวดที่ลัดวงจรเป็น 100 เท่าของกระแสปกติ ตามกฎของหม้อแปลง (2-1) นำไปสู่การลัดวงจรลงดินในอนาคต ดังนั้นฉนวนไฟฟ้าส่วนนี้ต้องมีคุณสมบัติทางไฟฟ้า ทางกล และทางความร้อนที่ดี เพื่อรองรับกระแสไฟฟ้าสูง แรงสั้นสะท้อนทางกล และการระบายความร้อนที่ดีเนื่องจากกำลังสูญเสีย

$$n_p I_p = n_s I_s \quad (2-1)$$

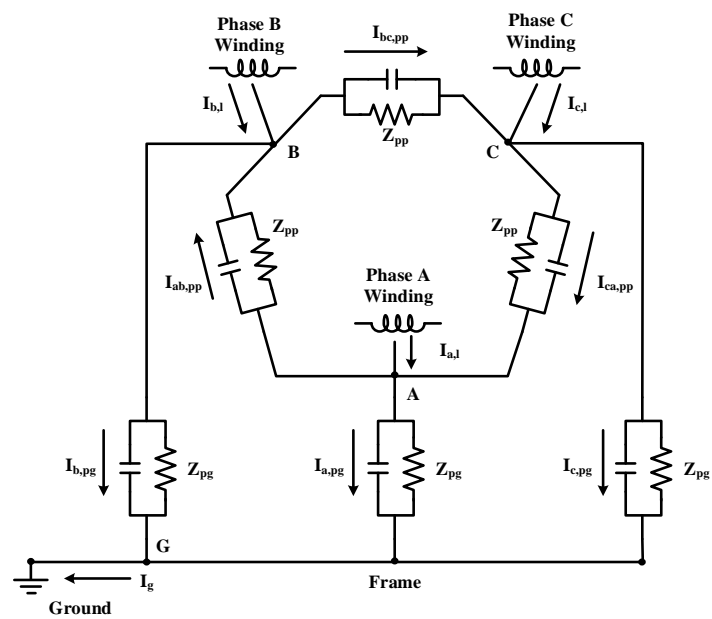
เมื่อ n คือจำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ และ I คือกระแสที่ไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ

3. ฉนวนไฟฟ้าระหว่างร่องขดลวดภายนอก (Groundwall insulation) เป็นส่วนประกอบที่แยกตัวนำไฟฟ้าออกจากแกนสเตเตอร์ต่อลงดิน มักจะตรวจวัดความล้มเหลวประเภทนี้โดยใช้รีเลย์ป้องกันการลัดวงจรลงดิน (Ground fault relay)

ฉนวนไฟฟ้าที่ใช้หุ้มตัวนำไฟฟ้าควรมีค่าความต้านทานสูงไม่มีการนำกระแสและมีเพียงกระแสการชาร์จประจุระหว่างตัวนำไฟฟ้า ดังนั้นฉนวนไฟฟ้าจึงสามารถเขียนวงจรสมมูลอย่างง่ายเป็นการขนานกันระหว่างตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ [21] ดังภาพประกอบ 2-3



ภาพประกอบ 2-2 ภาพตัดขวางสล๊อตสเตเตอร์แสดงส่วนประกอบพื้นฐานระบบฉนวนไฟฟ้า [23]



ภาพประกอบ 2-3 แบบจำลองของระบบฉนวนไฟฟ้า [7]

(1) ระดับของฉนวนไฟฟ้า [24]

วัสดุที่ถูกนำมาใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าห่อหุ้มตัวนำมีหลายประเภทซึ่งมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ดังตาราง 2-1

ระดับ ฉนวนไฟฟ้า	อุณหภูมิที่ทนได้ (องศาเซลเซียส)	รายละเอียด
<i>Y</i>	90	เป็นฉนวนที่ทนอุณหภูมิได้สูงสุด 90 องศาเซลเซียส
<i>A</i>	105	เป็นฉนวนประเภทเทปผ้าใยไหม ไฟเบอร์ กระจก ฯลฯ อาบวานิช หรือ จุ่มในน้ำมัน เช่น ผ้าอาบวานิช ท่ออาบวานิช เบคาไลท์ ฯลฯ ฉนวน ประเภทนี้จะทนอุณหภูมิได้สูงสุด (ที่จุ่มร้อนจัดของมอเตอร์) 105 องศา เซลเซียส
<i>E</i>	120	เป็นฉนวนประเภทโพลีเอสเตอร์ (ไมลาร์) ยูรีเทน อีพอกซี เมรามิน และ ฟีนอลเรซิน สามารถทนอุณหภูมิได้สูงสุด 120 องศาเซลเซียส
<i>B</i>	130	เป็นฉนวนประเภท ไมก้า ใยแก้ว ใยหิน ฯลฯ ใช้ร่วมกับวัสดุเกาะยึด เช่น อีพ็อกซี เป็นต้น สามารถทนอุณหภูมิได้สูงสุด 130 องศาเซลเซียส
<i>F</i>	155	เป็นฉนวนประเภท ไมก้า ใยแก้ว ใยหิน ฯลฯ ใช้ร่วมกับวัสดุเกาะยึด เช่น ซิลิโคนแอลดีดีเรซิน ใยแก้วอาบวานิช วานิชใยหิน ฟิล์ม โพลีเอไมด์ แผ่นไมก้า ฯลฯ สามารถทนอุณหภูมิได้สูงสุด 155 องศาเซลเซียส
<i>H</i>	180	เป็นฉนวนประเภท ซิลิโคนอีลาสโตเมอร์ไมก้า ใยแก้ว ใยหิน ใช้ร่วมกับ วัสดุเกาะยึด เช่น ซิลิโคนเรซิน และโพลีเทตระฟลูออโรเอทีลิน สามารถ ทนอุณหภูมิได้สูงสุด 180 องศาเซลเซียส
<i>C</i>	>180	เป็นฉนวนประเภทไมก้า เครื่องเคลือบ แก้ว ผลึกควอทซ์ ใยแก้วใยหิน หนึ่ง นิยมใช้ทำลูกถ้วย เพราะมีความแข็งแรงทางกลดีกว่าฉนวนประเภท อื่นๆ

ตาราง 2-1 รายละเอียดเกี่ยวกับระดับฉนวนไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้า

(2) ขั้นตอนความล้มเหลวของขดลวดเนื่องจากความเค้นทางความร้อน [25]

ฉนวนไฟฟ้าที่ห่อหุ้มขดลวดตัวนำเปรียบเสมือนตัวเก็บประจุที่มีขดลวดตัวนำหรือ
ตัวนำต่อลงดินเป็นโลหะตัวนำวางห่างกันโดยมีสารที่เป็นฉนวน เรียกว่า “ไดอิเล็กทริก” กั้นอยู่
ระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง เมื่อมีกระแสไหลผ่านตัวนำใกล้ๆ ฉนวนไฟฟ้า จะส่งผลให้อะตอมภายใน
ฉนวนไฟฟ้ามีขั้วเรียกว่า “ไดโพล” ไดโพลนี้จะเกิดการจัดเรียงตัว ทำให้เกิดอิเล็กตรอนรั่วไหล
(Leakage current) น้อย (เกิดค่าความจุไฟฟ้า) ระหว่างตัวนำขดลวดกับตัวนำต่อลงดินหรือระหว่าง
ตัวนำขดลวด (เมื่อมีความต่างศักย์เกิดขึ้น) ซึ่งในระบบฉนวนไฟฟ้าที่ดีการจัดเรียงตัวของ

ไดโพลจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อไม่มีความต่างศักย์เกิดขึ้น ไดโพลจะกลับมาเรียงตัวแบบสุ่ม การจ่ายกระแสเป็นรูปคลื่นไซน์ให้กับขดลวดจะทำให้ไดโพลหมุน (Dipole spin) และเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าตลอดเวลา แสดงการจัดเรียงตัวของไดโพลในฉนวนไฟฟ้าปกติเมื่อไม่มีกระแสไหลและเมื่อมีกระแสไหลภายในขดลวดดังภาพประกอบ 2-4 และภาพประกอบ 2-5 ตามลำดับ เมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้นที่ส่วนใดของขดลวดจะทำให้ไดโพลถูกกระตุ้นหมุนอย่างผิดปกติดังภาพประกอบ 2-6 การหมุนอย่างผิดปกติของไดโพลนี้จะส่งผลต่อค่าความจุไฟฟ้า ผลลัพธ์ที่ตามมาคือทำให้เกิดความแปรปรวนของรีแอกแตนซ์รั่วไหล (Leakage reactances) และเกิดความร้อนเนื่องจากอิทธิพลของฉนวนไฟฟ้าต่อสถานะแม่เหล็กที่ความต่างศักย์สูง สำหรับกรณีที่เกิดการปนเปื้อนของขดลวดจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุที่พื้นผิวฉนวนไฟฟ้า

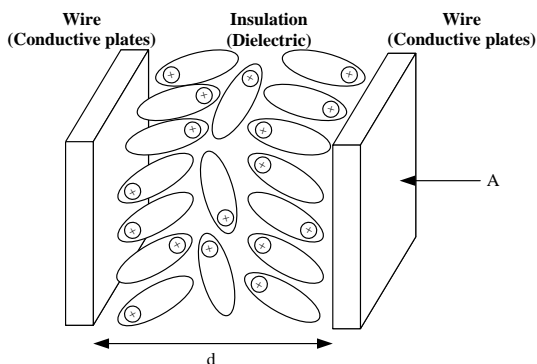
การเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้าโดยส่วนใหญ่มักจะเกิดจากขดลวดถูกใช้งานที่อุณหภูมิสูงและเกิดการสะสมความร้อน ซึ่งจะทำให้ฉนวนไฟฟ้าเกิดการเสื่อมสภาพอย่างค่อยเป็นค่อยไปและเกิดความล้มเหลวในที่สุด โดยสาเหตุที่ทำให้อุณหภูมิของขดลวดสูงขึ้นอธิบายไว้ในหัวข้อ 2.2 สาเหตุการเบรกดาวน์ของฉนวนไฟฟ้าบริเวณขดลวดสเตเตอร์ เรื่อง (1) ความเค้นทางความร้อน (Thermal stress) สามารถอธิบายขั้นตอนการเกิดความล้มเหลวของขดลวดเนื่องจากความเค้นทางความร้อน จนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าทางไฟฟ้าของฉนวนได้ดังนี้ [25]

ขั้นตอนที่ 1 : ฉนวนไฟฟ้าระหว่างตัวนำไฟฟ้าได้รับความเค้น ซึ่งก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานและค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนไฟฟ้าที่จุดเกิดความผิดปกติ พลังงานที่เกิดขึ้นจะทำให้อุณหภูมิ ณ จุดนี้สูงขึ้น และเริ่มมีกระบวนการคาร์บอนในเซชันปรากฏขึ้น

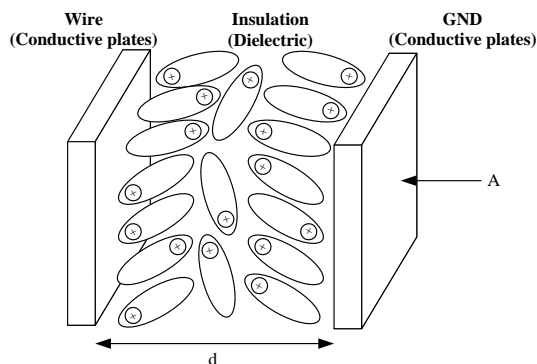
ขั้นตอนที่ 2 : ณ จุดที่เกิดความผิดปกติจะมีความร้อนมากขึ้น ทำให้ค่าความต้านทานของขดลวดตัวนำสูงขึ้นในขณะที่กำลังสูญเสียของขดลวดเพิ่มขึ้น เนื่องจากความต้านทานของฉนวนลดลงทำให้มีกระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้น สำหรับค่าความเหนี่ยวนำจะเริ่มเกิดการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างส่วนที่ดีและส่วนที่ไม่ดีของขดลวด ซึ่งก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด จากความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานของฉนวนไฟฟ้ามีค่าน้อยมาก แต่หากมอเตอร์เย็นตัวลงค่าความต้านทานของฉนวนไฟฟ้าจะสูงขึ้นทำให้สามารถตรวจวัดความผิดปกติได้ยาก

ขั้นตอนที่ 3 : ฉนวนไฟฟ้าเกิดการเบรกดาวน์ พลังงาน ณ จุดเกิดความผิดปกติสามารถทำให้ขดลวดแตกหักและเกิดการระเหยได้ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด

อัตราการเกิดความล้มเหลวของขดลวดจะขึ้นกับปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ ได้แก่ ระดับความรุนแรงของความผิดปกติ พลังงานศักย์ระหว่างตัวนำไฟฟ้าที่เกี่ยวข้อง ประเภทและปริมาณฉนวนไฟฟ้า สาเหตุการเกิดความผิดปกติ วัฏจักรโหลดและจำนวนการสตาร์ทมอเตอร์ สภาพแวดล้อม และการเลือกมอเตอร์ที่ไม่เหมาะสมกับสภาพการใช้งาน

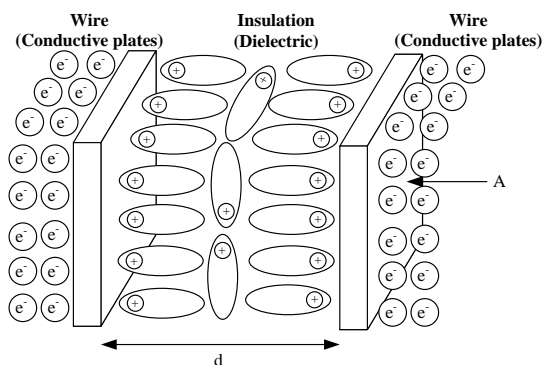


(ก) ฉนวนไฟฟ้าระหว่างขดลวดตัวนำ

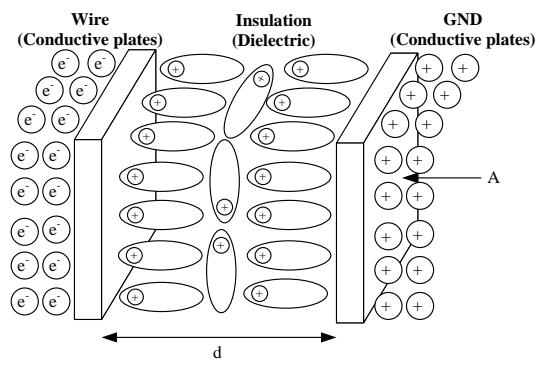


(ข) ฉนวนไฟฟ้าระหว่างขดลวดตัวนำและตัวนำต่อลงดิน

ภาพประกอบ 2-4 ไดโพลในฉนวนไฟฟ้าปกติเมื่อไม่มีกระแสไหลภายในขดลวด

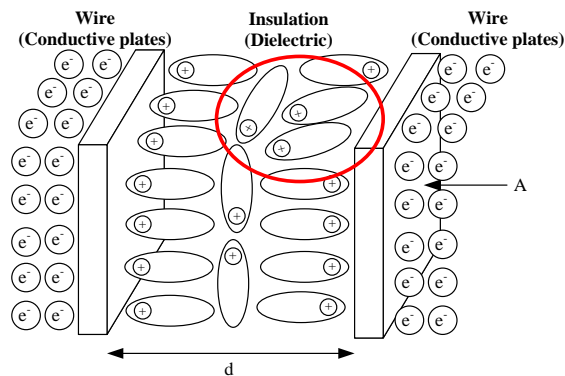


(ก) ฉนวนไฟฟ้าระหว่างขดลวดตัวนำ



(ข) ฉนวนไฟฟ้าระหว่างขดลวดตัวนำและตัวนำต่อลงดิน

ภาพประกอบ 2-5 ไดโพลในฉนวนไฟฟ้าปกติเมื่อมีกระแสไหลภายในขดลวด



ภาพประกอบ 2-6 โดโพลินฉนวนไฟฟ้าผิดปกติเมื่อมีกระแสไหลภายในขดลวด

2.4 การทดสอบวัดค่าความต้านทานของฉนวนไฟฟ้า (Insulation resistance test) [26]

การทดสอบวัดค่าความต้านทานของฉนวนไฟฟ้า เป็นหนึ่งในหลายวิธีการที่นิยมใช้สำหรับประเมินสภาพฉนวนไฟฟ้าขณะมอเตอร์ไม่ทำงาน โดยจะใช้เครื่องวัดค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้าที่เรียกว่า “เมกเกอร์” (Megger insulation tester) ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้าที่มีค่าสูงมาก ภายในจะมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถปรับเลือกแรงดันที่เหมาะสม สำหรับป้อนให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าขนาดต่างๆ เพื่อการวัดค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้า แสดงมาตรฐานแรงดันทดสอบดังตาราง 2-2 และสามารถใช้เครื่องวัดฉนวนไฟฟ้าอ่านค่าความต้านทานได้ 3 วิธีการ ได้แก่ 1) การทดสอบอ่านค่าลงเป็นจุดๆ (Spot reading test) หรือการทดสอบอ่านค่าเวลาสั้น (Short time reading) 2) การทดสอบเวลา-ความต้านทาน (Time-resistance testing method) 3) การทดสอบแรงดันเป็นขั้น (Step voltage test method) สำหรับในงานวิจัยเลือกจะอธิบายวิธีการที่ 1 และ 2 สำหรับการประเมินสภาพฉนวนไฟฟ้า

แรงดันทดสอบทั่วไป		มาตรฐาน <i>IEEE 43-2013</i> แรงดันทดสอบสำหรับมอเตอร์	
พิกัดแรงดันอุปกรณ์ไฟฟ้า V_{AC}	แรงดันทดสอบ V_{DC}	พิกัดแรงดันขดลวด*	แรงดันทดสอบ V_{DC}
อุปกรณ์ไฟฟ้าไม่เกิน $1,000 V_{AC}$	$500 V_{DC}$	$< 1,000 V_{AC}$	$500 V_{DC}$
อุปกรณ์ไฟฟ้า $1,000 - 3,300 V_{AC}$	$500 - 1,000 V_{DC}$	$1,000 - 2,500 V_{AC}$	$500 - 1,000 V_{DC}$
อุปกรณ์ไฟฟ้า $3,300 - 6,600 V_{AC}$	$2,500 - 5,000 V_{DC}$	$2,501 - 5,000 V_{AC}$	$1,000 - 2,500 V_{DC}$
อุปกรณ์ไฟฟ้ามากกว่า $6,600 V_{AC}$	$5,000 V_{DC}$	$5,001 - 12,000 V_{AC}$	$2,500 - 5,000 V_{DC}$
		$> 12,000 V_{AC}$	$5,000 - 10,000 V_{DC}$

* พิกัดแรงดันไลน์ - ไลน์ สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้า 3 เฟส, พิกัดแรงดันไลน์ - ดิน สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้า 1 เฟส, และพิกัดแรงดันกระแสตรงสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงหรือขดลวดสนาม

ตาราง 2-2 มาตรฐานแรงดันทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสตรง [27]

1) การวัดค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้าด้วยวิธีการทดสอบอ่านค่าลงเป็นจุดๆ (Spot reading test) หรือ การทดสอบอ่านค่าเวลาสั้น (Short time reading) จะวัดค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้าโดยการต่อเครื่องวัดฉนวนไฟฟ้าเมกเกอร์พร้อมขนานกับฉนวนไฟฟ้าของขดลวดเครื่องจักรกลไฟฟ้าและทำการจ่ายแรงดันทดสอบคงที่ในระยะเวลาหนึ่ง หลังจากนั้นจึงจดค่าความต้านทานของฉนวนไฟฟ้า ซึ่งโดยปกติแล้วจะใช้เวลา 60 วินาทีเพื่อการทดสอบ ค่าความต้านทานของฉนวนไฟฟ้าที่ได้จะถูกนำมาพล็อตกราฟเป็นประวัติจากอดีตจนถึงปัจจุบัน ใช้สำหรับสังเกตการเปลี่ยนแปลงของสภาพฉนวนไฟฟ้า ซึ่งโดยปกติแล้วฉนวนไฟฟ้าจะมีค่าความต้านทานเป็นเมกกะโอห์ม แต่หากเริ่มอ่านค่าความต้านทานลดลงแสดงว่าฉนวนไฟฟ้าเริ่มมีความเสียหายควรนำมาตรวจเช็คสภาพต่อไป การทดสอบที่กล่าวมาควรจะทดสอบที่อุณหภูมิมาตรฐานที่ 40 องศาเซลเซียส และบริเวณที่ไม่มี ความชื้น มีค่าความต้านทานต่ำสุดที่ยอมรับได้แสดงดังตาราง 2-3 บางครั้งค่าความต้านทานที่วัดได้ อยู่ที่อุณหภูมิอื่นที่ไม่ใช่อุณหภูมิมาตรฐาน (40 องศาเซลเซียส) ดังนั้นจึงต้องแปลงค่าความต้านทานดังกล่าวด้วยค่าคงที่หนึ่งตัวเรียกว่า ค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิมาตรฐาน (K_T) ซึ่งเกิดขึ้นจากสมมติฐานที่ว่า ทุกๆ อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ที่เพิ่มขึ้นค่าความต้านทานจะลดลงเป็นครึ่งหนึ่งจากค่าความต้านทานที่วัดได้ หรือ ทุกๆ อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ที่ลดลงค่าความต้านทานจะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าจากค่าความต้านทานที่วัดได้ สามารถคำนวณค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิมาตรฐานและคำนวณค่าความต้านทานของฉนวนไฟฟ้าที่อุณหภูมิมาตรฐาน (40 องศาเซลเซียส) โดยใช้สมการ (2-2) และ (2-3) ตามลำดับ

$$K_T = (0.5)^{(40-T)/10} \quad (2-2)$$

$$R_C = K_T R_T \quad (2-3)$$

เมื่อ	K_T	คือ ค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิมาตรฐาน (40 องศาเซลเซียส)
	T	คือ อุณหภูมิ T ใดๆ ที่วัดค่าความต้านทาน (องศาเซลเซียส)
	R_C	คือ ค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้าที่อุณหภูมิมาตรฐาน (40 องศาเซลเซียส) (เมกกะโอห์ม)
	R_T	คือ ค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้าที่อุณหภูมิ T ใดๆ (เมกกะโอห์ม)

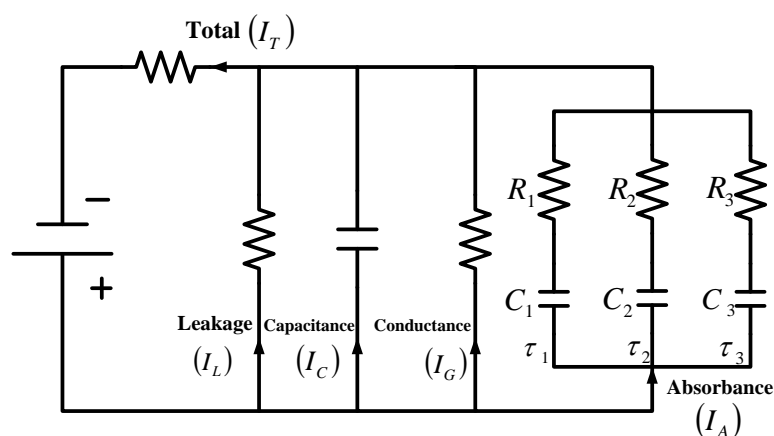
ค่าความต้านทานต่ำสุด (เมกกะโอห์ม)	อุปกรณ์ที่ถูกต้องทดสอบ
$IR_{\min} = kV + 1$	สำหรับขดลวดทั้งหมดที่ผลิตก่อนปี 1970, ขดลวดสนามทั้งหมด, และอุปกรณ์อื่นๆ ที่ไม่ได้ระบุอยู่ในหัวข้ออื่น
$IR_{\min} = 100$	สำหรับขดลวดไฟฟ้ากระแสสลับที่ผลิตหลังปี 1970 (ขดลวดพันแบบมีรูปแบบ)
$IR_{\min} = 5$	สำหรับเครื่องจักรกลที่พันขดลวดสเตเตอร์แบบมีรูปแบบและแบบส้อมมีพิคต์ต่ำกว่า 1 กิโลโวลต์, และขดลวดอาร์เมเจอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
kV คือค่าพิคต์แรงดันไลน์ – ไลน์ สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้า 3 เฟส, พิคต์แรงดันไลน์ – ดิน สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้า 1 เฟส, และพิคต์แรงดันกระแสตรงสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงหรือขดลวดสนาม	

ตาราง 2-3 ค่าความต้านทานต่ำสุดที่ยอมรับได้ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส
(ตามมาตรฐาน IEEE 43-2013 [27])

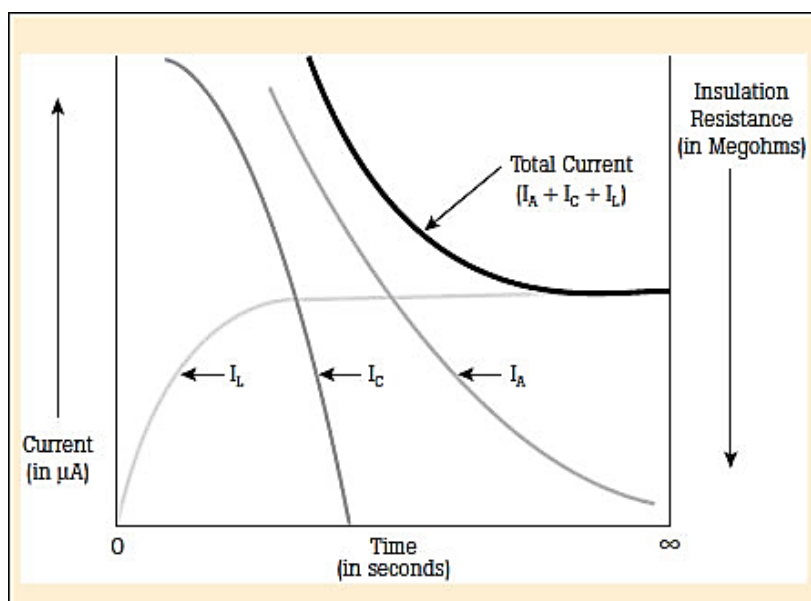
2) การทดสอบเวลา-ความต้านทาน (Time-resistance testing method) จะไม่คำนึงถึงอุณหภูมิ เป็นการวัดค่าการซึมซับของฉนวนไฟฟ้า (Absorption) ที่ดี เมื่อเปรียบเทียบกับฉนวนไฟฟ้าที่ชื้นหรือมีสิ่งสกปรกปนเปื้อนในเวลาเดียวกัน โดยฉนวนไฟฟ้าที่ดีจะมีค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง (อ่านค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้าตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น 30 วินาที - 10 นาที) สามารถอธิบายการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานได้ดังนี้ เมื่อเริ่มจ่ายแรงดันฉนวนไฟฟ้าจะเริ่มชาร์จประจุด้วยกระแสประจุคาปาซิแตนซ์ (I_C) เมื่อประจุไฟฟ้าจนเต็มค่ากระแสประจุคาปาซิแตนซ์จะลดลงอย่างรวดเร็ว โดยที่ความต้านทานจะสูงขึ้นเรื่อยๆ จึงเรียกว่าฉนวนไฟฟ้าที่ดี ในขณะที่กระแสซึมซับ (I_A) ซึ่งเป็นกระแสสำหรับจัดเรียงโมเลกุลของวัสดุจะเริ่มต้นในเวลาช้ากว่ากระแสประจุคาปาซิแตนซ์ และเมื่อจัดเรียงโมเลกุลเรียบร้อยกระแสซึมซับจะลดลงอย่างช้าๆ ใช้เวลานานกว่ากระแสประจุคาปาซิแตนซ์ แต่ถ้าฉนวนไฟฟ้ามีความชื้นหรือสกปรก ค่ากระแสรั่วไหล (I_L) จะสูงขึ้น ทำให้ความต้านทานฉนวนไฟฟ้าน้อยกว่าที่ค่าก่อนข้างคงที่ ภาพประกอบ 2-7 และภาพประกอบ 2-8 แสดงวงจรสมมูลและกราฟองค์ประกอบของกระแสไฟฟ้าเมื่อมีการทดสอบฉนวนไฟฟ้าด้วยไฟฟ้ากระแสตรงตามลำดับ การทดสอบด้วยวิธีการนี้ จะไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของอุปกรณ์ไฟฟ้า ความต้านทานฉนวนไฟฟ้าจะสูงขึ้นก็ต่อเมื่อฉนวนไฟฟ้าสะอาดและแห้ง การวัดค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้าด้วยวิธีการนี้ทำได้ 2 รูปแบบ ดังนี้

1) อัตราส่วนการซึมซับไดอิเล็กทริก (Dielectric absorption ratio) หรือ *DAR* เป็นอัตราส่วนค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้าที่ 60 วินาทีต่อ 30 วินาที แสดงค่า *DAR* ตามสภาพฉนวนไฟฟ้างดตาราง 2-4

2) ดัชนีการจัดเรียงขั้ว (Polarization index) หรือ *PI* เป็นอัตราส่วนค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้าที่ 10 นาทีต่อ 1 นาที แสดงค่า *PI* ตามสภาพฉนวนไฟฟ้างดตาราง 2-4 และตาราง 2-5



ภาพประกอบ 2-7 วงจรสมมูลที่แสดงกระแสไฟฟ้าเมื่อมีการทดสอบฉนวนไฟฟ้าด้วยไฟฟ้ากระแสตรง [27]



ภาพประกอบ 2-8 องค์ประกอบของกระแสไฟฟ้าเมื่อทดสอบฉนวนไฟฟ้าด้วยไฟฟ้ากระแสตรง

สภาพนวนไฟฟ้า	DAR (60/30-วินาที)	PI (10/1-นาที)
อันตราย	0 - 1.0	< 1.0
นวนไฟฟ้าอาจจะมีปัญหา	1.1 - 1.25	1.0 - 2.0
นวนไฟฟ้าดี	1.25 - 1.6	2.0 - 4.0
นวนไฟฟ้าดีเยี่ยม	> 1.6	> 4.0

ตาราง 2-4 สภาพของนวนไฟฟ้ากำหนดจากค่า *DAR* และค่า *PI*

กลาสนนวนไฟฟ้า	อุณหภูมินวนไฟฟ้า (องศาเซลเซียส)	ค่า PI (ต่ำสุด)
<i>A</i>	105	1.5
<i>B</i>	130	2.0
<i>C</i>	> 250	2.0
<i>F</i>	155	2.0
<i>H</i>	180	2.0

ตาราง 2-5 ค่า *PI* ต่ำสุดของมอเตอร์ไฟฟ้า *AC* และ *DC*
(มาตรฐาน *IEEE* 43-2013 และ *IEEE* 1-2000) [27, 29]

บทที่ 3

การเร่งอายุฉนวนไฟฟ้าและการประมาณอายุการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

3.1 การเร่งอายุฉนวนไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

การเร่งอายุฉนวนไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นกระบวนการเบื้องต้น เพื่อเตรียมมอเตอร์เหนี่ยวนำ ก่อนนำไปใช้เก็บข้อมูลทางไฟฟ้าสำหรับวิเคราะห์ผลในการสร้างสมการหรือแบบจำลองทำนายอายุฉนวนไฟฟ้าหรือความแข็งแรงของฉนวนไฟฟ้าต่อไป จากการศึกษามาตรฐาน *IEEE 275-1992* [13] ซึ่งภายในมาตรฐาน แนะนำขั้นตอนการเร่งอายุฉนวนไฟฟ้าและมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยปัจจัยสำคัญที่ลดทอนอายุฉนวนไฟฟ้าได้แก่ ความเค้นทางความร้อน ความชื้น และความเค้นทางกล กระบวนการเร่งอายุฉนวนไฟฟ้าจะต้องกระตุ้นด้วยความเค้นทางความร้อน ความเค้นทางกล (อาจไม่จำเป็นต้องเร่งอายุฉนวนไฟฟ้าด้วยความเค้นทางกล เพราะ อายุการทำงานของฉนวนไฟฟ้าลดลงเนื่องจากความร้อนและความชื้นเป็นสำคัญ) และความชื้นตามลำดับ

การกระตุ้นฉนวนไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยความร้อน ค่าอุณหภูมิและเวลา จะถูกกำหนดตามคลาสของฉนวนไฟฟ้าดังตาราง 3-1 ซึ่งการกระตุ้นฉนวนไฟฟ้าด้วยความร้อนตามเวลาที่ระบุในตารางนี้จะสามารถเร่งอายุฉนวนไฟฟ้าให้ลดลงได้ 0.1 เท่าของอายุฉนวนไฟฟ้า ปัจจุบัน หลังจากกระตุ้นฉนวนไฟฟ้าด้วยความร้อนแล้วจึงนำไปกระตุ้นด้วยความชื้น โดยกำหนดให้มีความชื้นสัมพัทธ์ 95-100%RH ที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นหากต้องการทำให้ฉนวนไฟฟ้าพึงจะต้องทำการเร่งอายุฉนวนไฟฟ้าด้วยกระบวนการนี้อย่างน้อย 10 รอบของมอเตอร์ใหม่ที่ยังไม่ผ่านการทำงาน และก่อนจะเริ่มต้นการเร่งอายุฉนวนไฟฟ้าในรอบใหม่ควรอบแห้งมอเตอร์อย่างน้อย 1 วัน

หลังจากมอเตอร์ถูกเร่งอายุฉนวนไฟฟ้าแล้ว จะถูกนำมาทดสอบทางไฟฟ้าเพื่อประเมินสภาพของฉนวนไฟฟ้า ใช้ระดับแรงดันทดสอบแตกต่างกันแสดงดังตาราง 3-2 โดยมีเกณฑ์กระแสสำหรับกำหนดว่าฉนวนไฟฟ้าเกิดความล้มเหลว ดังนี้ 200 มิลลิแอมป์ สำหรับการทดสอบฉนวนไฟฟ้าลงดินหรือระหว่างขดลวด และ 90 มิลลิแอมป์ สำหรับการทดสอบฉนวนไฟฟ้าระหว่างตัวนำ

การเก็บบันทึกสัญญาณไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะมอเตอร์ทำงานในช่วงที่ฉนวนไฟฟ้าอาจเกิดความล้มเหลวขึ้น ซึ่งมาตรฐาน *IEEE 275-1992* [13] แนะนำให้นำมอเตอร์มาทำงานภายในเวลา 15 นาทีหลังจากถูกกระตุ้นด้วยความชื้น กำหนดเกณฑ์กระแสรั่วไหลของฉนวนไฟฟ้าลงดิน โดยการคำนวณค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้าลงดินเมื่อมีการทดสอบ

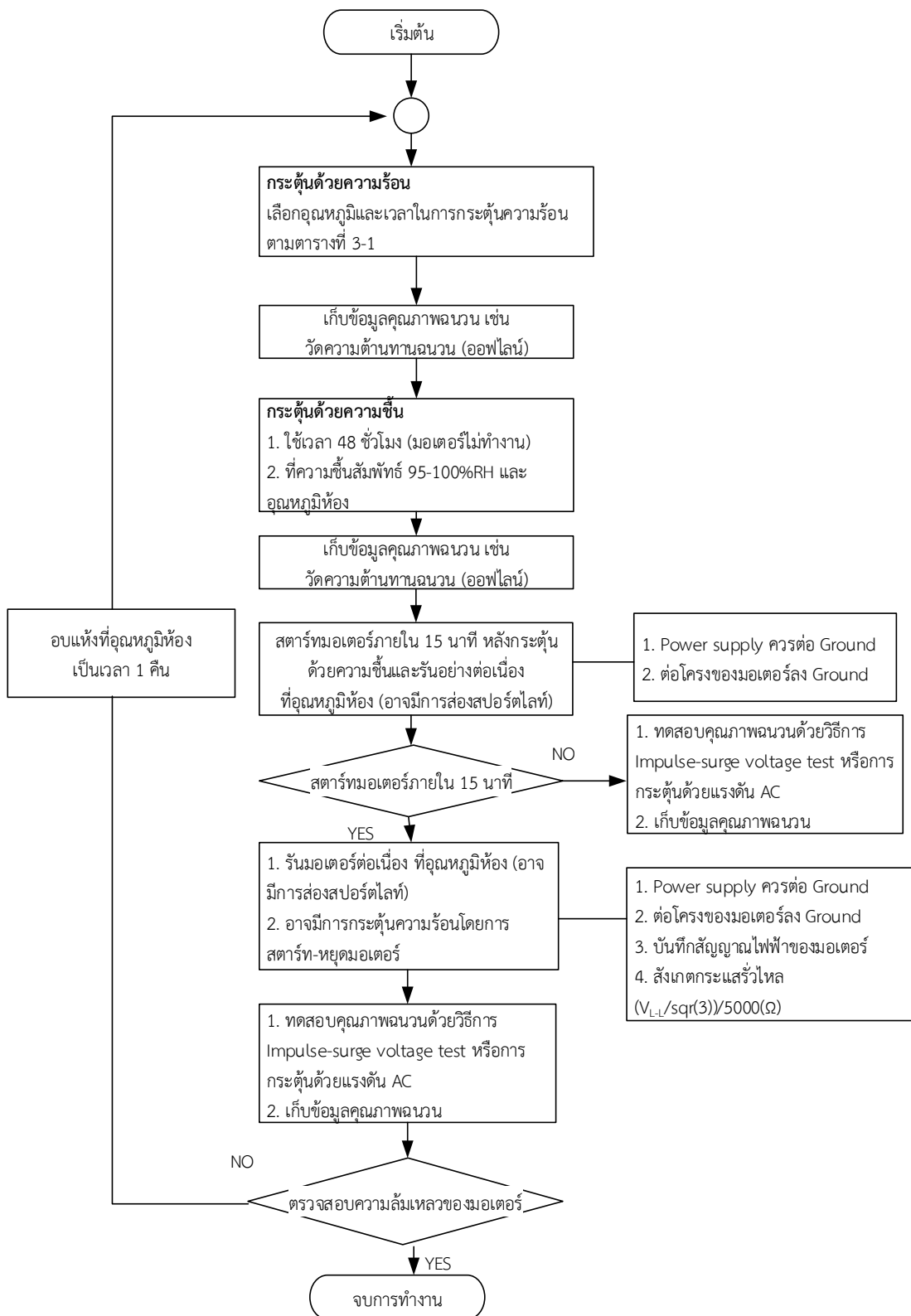
ฉนวนไฟฟ้าตามระดับแรงดันทดสอบในตาราง 3-2 ในที่นี้สามารถคำนวณค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้าได้เท่ากับ 5000 โอห์ม ($R=1000/0.2$) ดังนั้นเกณฑ์ประเมินสภาพฉนวนไฟฟ้าลงดินของมอเตอร์ทำงานจึงมีค่าเท่ากับ ผลหารของพิกัดแรงดัน (ไลน์-ไลน์) กับรากที่สองของสามแล้วหารด้วยความต้านทานฉนวนไฟฟ้า 5000 โอห์ม $\left(\left(\frac{V_{rated}}{\sqrt{3}}\right)/5000\right)$ สามารถสรุปกระบวนการเร่งอายุฉนวนไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นผังงานดังแสดงในภาพประกอบ 3-1

อุณหภูมิกระตุ้น (องศาเซลเซียส)	คลาสของฉนวนไฟฟ้า			
	คลาส A (105 องศาเซลเซียส)	คลาส B (130 องศาเซลเซียส)	คลาส F (155 องศาเซลเซียส)	คลาส H (180 องศาเซลเซียส)
250				1 วัน
240				2 วัน
230				4 วัน
220			1 วัน	7 วัน
210			2 วัน	14 วัน
200		1 วัน	4 วัน	28 วัน
190		2 วัน	7 วัน	49 วัน
180	1 วัน	4 วัน	14 วัน	
170	2 วัน	7 วัน	28 วัน	
160	4 วัน	14 วัน	49 วัน	
150	7 วัน	28 วัน		
140	14 วัน	49 วัน		
130	28 วัน			
120	49 วัน			

ตาราง 3-1 อุณหภูมิและเวลาสำหรับการกระตุ้นฉนวนไฟฟ้าเพื่อเร่งอายุ [13]

พิกัดแรงดันไลน์-ไลน์ ของอุปกรณ์ (โวลต์)	แรงดันกระแสลับสำหรับ ทดสอบจนลงดินและ ระหว่างขดลวด (โวลต์)	ทดสอบจนระหว่างตัวนำ	
		แรงดันอิมพัลส์สูงสุด (โวลต์)	แรงดันกระแสลับ (โวลต์)
ต่ำกว่า 500	1000	250	115
551-1000	2000	250	115
1001-1500	3000	250	115
1501-2000	4000	250	115
2001-2500	5000	250	115
2501-3500	7000	250	115
3501-4500	9000	250	115
4501-5500	11000	250	115
5501-6900	13000	250	115

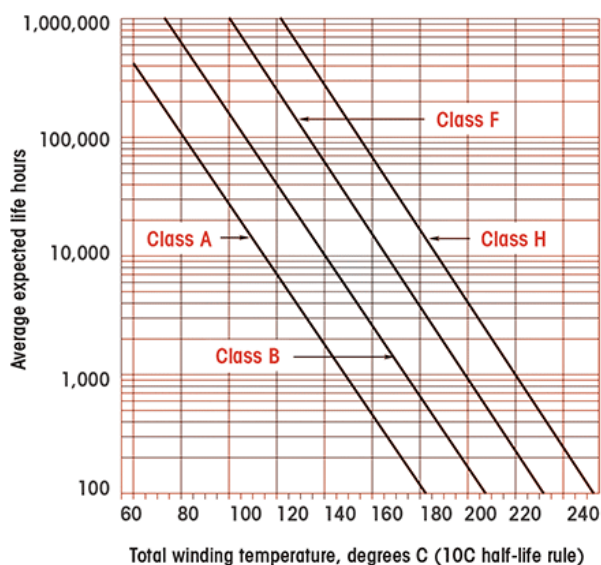
ตาราง 3-2 ระดับแรงดันทดสอบสภาพฉนวนไฟฟ้า [13]



ภาพประกอบ 3-1 ฟังงานกระบวนการเร่งอายุฉนวนไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

3.2 การประมาณอายุการทำงานที่เหลืออยู่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

อายุการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าที่สูญเสียไปขึ้นอยู่กับความเค้นที่มอเตอร์ได้รับ ซึ่งได้แก่ ความเค้นทางความร้อน ความเค้นทางไฟฟ้า ความเค้นทางกล และความเค้นทางสภาพแวดล้อม ซึ่งฉนวนไฟฟ้าของขดลวดสเตเตอร์ถือเป็นส่วนประกอบที่อ่อนแอที่สุดสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกเมื่อได้รับความเค้นทางความร้อน ดังนั้นเราจึงสามารถประมาณอายุการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าที่เหลืออยู่ได้โดยใช้การประมาณอายุของฉนวนไฟฟ้า การประมาณอายุของฉนวนไฟฟ้าโดยส่วนใหญ่นิยมใช้สมการการคำนวณที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิ ตามกฎ 10 องศาเซลเซียส (หมายความว่า อายุของฉนวนไฟฟ้าจะลดลงครึ่งหนึ่งเมื่อมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นทุกๆ 10 องศาเซลเซียส) [2] กราฟอายุฉนวนไฟฟ้าที่เหลืออยู่โดยเฉลี่ยเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสำหรับฉนวนไฟฟ้าคลาสต่างๆ แสดงดังภาพประกอบ 3-2 สมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) ซึ่งเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของปฏิกิริยากับอุณหภูมิ สามารถประมาณอายุฉนวนไฟฟ้าที่เหลืออยู่ได้ ตามสมการ (3-1) [4, 30, 31]



ภาพประกอบ 3-2 อายุฉนวนไฟฟ้าที่เหลืออยู่โดยเฉลี่ยตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ [32]

$$L_x = L_{100} \cdot 2^{(T_c - T_x)/10} \text{ in (years, h, min, etc)} \quad (3-1)$$

- เมื่อ L_x คือ อายุการทำงานที่เหลือที่อุณหภูมิ T_x (องศาเซลเซียส)
 L_{100} คือ อายุการทำงานที่อุณหภูมิปกติ T_c (องศาเซลเซียส)
 T_x คือ อุณหภูมิที่ hot-spot สำหรับคลาสฉนวนไฟฟ้า (องศาเซลเซียส)
 T_c คือ อุณหภูมิที่ยอมรับได้สำหรับคลาสฉนวนไฟฟ้า (องศาเซลเซียส)

HIC คือ ช่วงเวลาที่ลดลงครั้งหนึ่ง (องศาเซลเซียส); (14, 11, 9.3, 8, และ 10 สำหรับคลาส *A, B, F, H* และ *H'* ตามลำดับ)

การคำนวณอายุขณไฟฟ้าที่เหลืออยู่โดยใช้สมการ (3-1) โดยกำหนดให้

1. จำนวนที่ใช้เป็นจำนวนคลาส *F* ซึ่งมีอายุ 99.4 ปี [4] ที่อุณหภูมิแวดล้อม 40 องศาเซลเซียสและทำงานโหลดเต็มพิกัดอย่างต่อเนื่อง หรือมีอายุ 133 ปี [4] ที่อุณหภูมิแวดล้อม 25 องศาเซลเซียสและทำงานโหลดเต็มพิกัดอย่างต่อเนื่อง ดังนั้น $L_{100} = 99.4 \times 24 \times 365 = 870744 \text{ Hr}$

2. อุณหภูมิของจำนวนคลาส *F* สูงสุดที่ยอมรับได้ขณะทำงานที่พิกัดโหลดสูงสุด คือ $T_c = 105^\circ\text{C}$

3. อุณหภูมิที่ใช้อบรมอเตอร์ 220 องศาเซลเซียส ดังนั้น $T_x = 220^\circ\text{C}$

4. เวลาที่ใช้อบรมอเตอร์ 24 ชั่วโมง $Times_{T_x} = 24 \text{ Hr}$

ขั้นตอนการคำนวณอายุขณไฟฟ้าที่เหลืออยู่

1. คำนวณอัตราการเสื่อมสภาพของจำนวนไฟฟ้า ($1/L_x$) โดยใช้สมการ (3-1) ได้ผลลัพธ์ตามสมการ (3-2)

$$1/L_x = 1/((99.4 \times 365 \times 24) \cdot 2^{((105-220)/9.3)}) = 0.0061 \quad (3-2)$$

2. คำนวณอัตราการเสื่อมสภาพของจำนวนไฟฟ้า เมื่ออบที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ได้ดังสมการ (3-3)

$$1/L_{x-24Hr} = (1/((99.4 \times 365 \times 24) \cdot 2^{((105-220)/9.3)})) \times 24 = 0.1464 \quad (3-3)$$

อัตราการเสื่อมสภาพของจำนวนไฟฟ้าที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 0.1464 เท่า หมายความว่า การอบที่อุณหภูมิและเวลานี้จะทำให้อายุขณไฟฟ้าลดลง 0.1464 เท่าของอายุขณไฟฟ้าปัจจุบัน ซึ่งใกล้เคียงตามมาตรฐาน *IEEE 275-1992* [13] กล่าวไว้

3. คำนวณเวลาที่สูญเสียไป (Loss times) โดยใช้ค่าอัตราเวลาการเสื่อมสภาพ แสดงดังสมการ (3-4)

$$\text{LossTimes} = ((1/L_x) \times L_{100}) \times Times_{T_x} = ((0.0061) \times 870744) \times 24 = 127477 \text{ Hr} \quad (3-4)$$

4. ถ้าอบมอเตอร์ที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทั้งหมด 7 รอบ จะทำให้จำนวนเวลาที่สูญเสียไป ได้ดังสมการ (3-5)

$$\text{TotalLossTimes} = ((1/L_x) \times L_{100}) \times \text{Times}_{T_x} \times 7 = 127477 \times 7 = 892339 \text{ Hr} \quad (3-5)$$

เมื่อเปรียบเทียบอายุฉนวนไฟฟ้ากับเวลาที่สูญเสียไปทั้งหมด จะพบว่า การเร่งอายุฉนวนไฟฟ้าด้วยการอบความร้อนที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง อย่างน้อย 7 รอบ ก็สามารถทำให้ฉนวนไฟฟ้าเสื่อมเหลวได้ ซึ่งใกล้เคียงกับการทดลองเร่งอายุฉนวนไฟฟ้าตามมาตรฐาน *IEEE 275-1992* [13] ที่สามารถเร่งอายุฉนวนไฟฟ้าให้ลดลงได้ 0.1 เท่าของอายุฉนวนไฟฟ้าปัจจุบัน หรือหมายความว่า การเร่งอายุฉนวนไฟฟ้าด้วยกระบวนการตามมาตรฐานนี้ จะต้องดำเนินการอย่างน้อย 10 รอบของมอเตอร์ใหม่ที่ยังไม่ผ่านการทำงาน จึงจะทำให้มอเตอร์พัง ดังนั้นวิธีการเร่งอายุฉนวนไฟฟ้าเหล่านี้ สามารถนำไปใช้เตรียมมอเตอร์สำหรับการวิจัยต่อไป

3.3 การออกแบบการเร่งอายุฉนวนไฟฟ้า

- (1) การตรวจวัดสภาพฉนวนไฟฟ้าด้วยเมกเกอร์ โดยวัดค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้าระหว่างขดลวดกับดินและค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้าระหว่างเฟส ใช้แรงดันทดสอบ 500 โวลต์เป็นเวลา 1 นาที แสดงดังภาพประกอบ 3-3



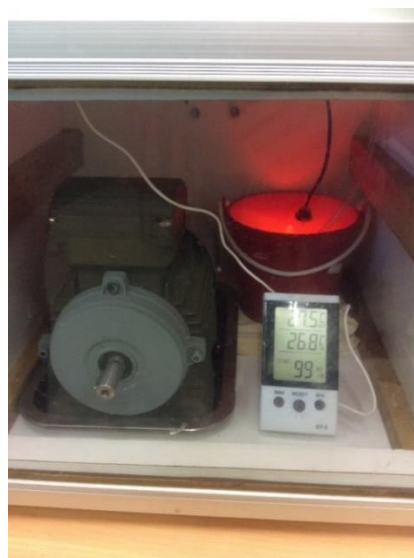
ภาพประกอบ 3-3 การวัดค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้าด้วยเมกเกอร์

- (2) การกระตุ้นมอเตอร์ด้วยความเค้นทางความร้อน เนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ มีฉนวนไฟฟ้าเป็นคลาส F ดังนั้นจึงเลือกกระตุ้นมอเตอร์ด้วยอุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน ตามตาราง 3-1 เพื่อให้มอเตอร์พังเร็วที่สุด โดยจะนำมอเตอร์เฉพาะ ส่วนขดลวดสเตเตอร์ไปอบที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพประกอบ 3-4



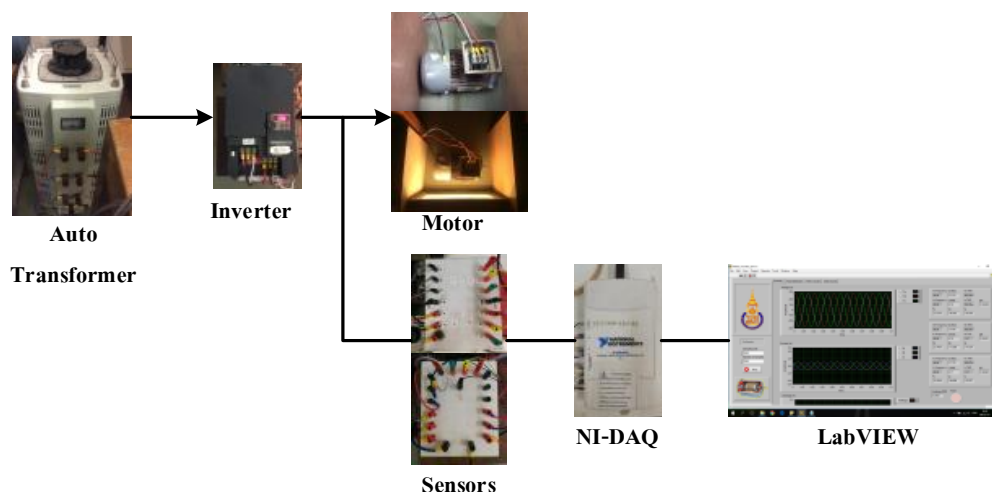
ภาพประกอบ 3-4 การอบมอเตอร์ที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เพื่อกระตุ้นมอเตอร์ ด้วยความร้อน

- (3) การกระตุ้นมอเตอร์ด้วยความชื้น หลังจากกระตุ้นมอเตอร์ด้วยความร้อนแล้ว จึงนำมอเตอร์มาอบความชื้นที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 95-100%RH ณ อุณหภูมิห้อง โดยการพ่นไอน้ำใส่มอเตอร์ที่ถูกประกอบแล้ว ดังภาพประกอบ 3-5 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

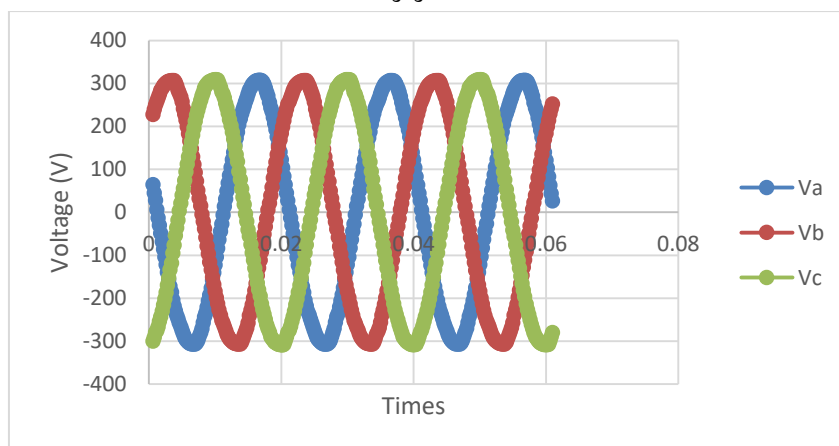


ภาพประกอบ 3-5 การกระตุ้นมอเตอร์ด้วยความชื้น

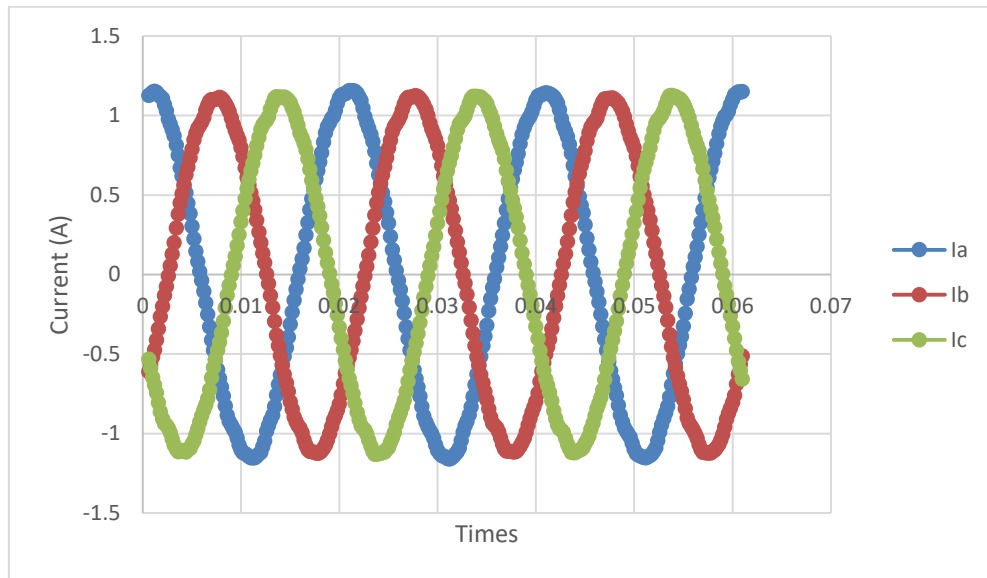
(4) การเก็บบันทึกสัญญาณทางไฟฟ้าของมอเตอร์ที่กำลังทำงาน โดยมอเตอร์ถูกกระตุ้นความร้อนด้วยการส่องสปอร์ตไลท์ ตรวจสอบวัดสัญญาณทางไฟฟ้าโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดกระแสและแรงดัน บันทึกข้อมูลด้วยอุปกรณ์ NI-DAQ ผ่านโปรแกรม LabVIEW ที่ความถี่ซีกตัวอย่าง (Sampling rate) 5,000 เฮิร์ต บันทึกข้อมูลเป็นไฟล์ .lvm ทุก 10 วินาที (50,000 ตัวอย่าง) ขณะเก็บบันทึกสัญญาณทางไฟฟ้าของมอเตอร์จะบันทึกอุณหภูมิที่โครงมอเตอร์ทุกๆ 1 ชั่วโมง แสดงดังภาพประกอบ 3-6 สัญญาณแรงดันกระแส และกระแสรั่วไหลที่บันทึกได้ แสดงดังภาพประกอบ 3-7 - ภาพประกอบ 3-9 ตามลำดับ และสามารถแสดงสัญญาณกระแสไฟฟ้าเมื่อมีความผิดปกติเกิดขึ้นดังภาพประกอบ 3-10 ซึ่งจะพบว่าเมื่อมีความผิดปกติเกิดขึ้นกระแสทั้ง 3 เฟส จะมีค่าสูงขึ้นและอยู่ในสภาวะไม่สมดุล



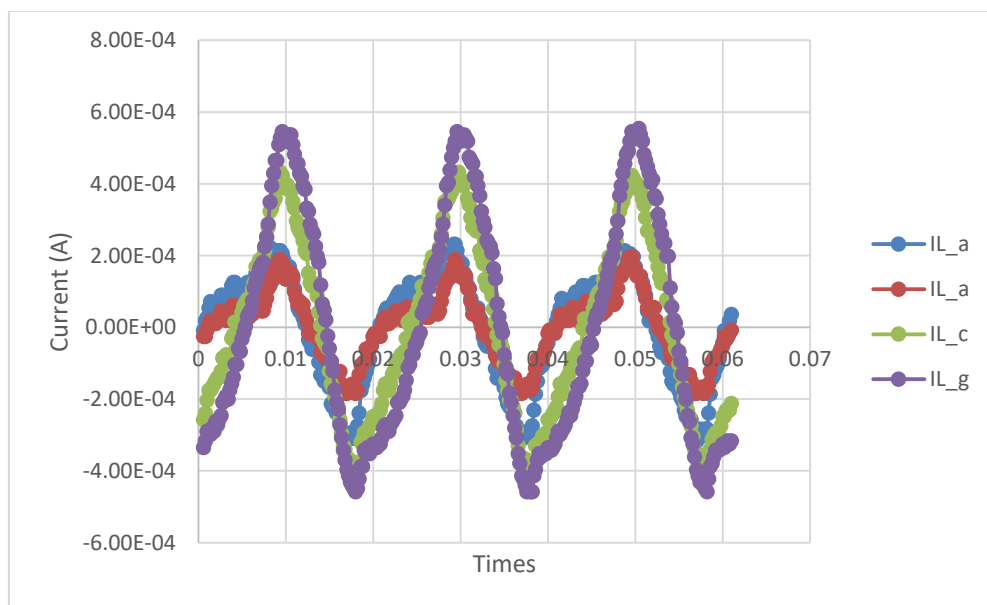
ภาพประกอบ 3-6 การเก็บบันทึกสัญญาณทางไฟฟ้าของมอเตอร์ที่กำลังทำงาน



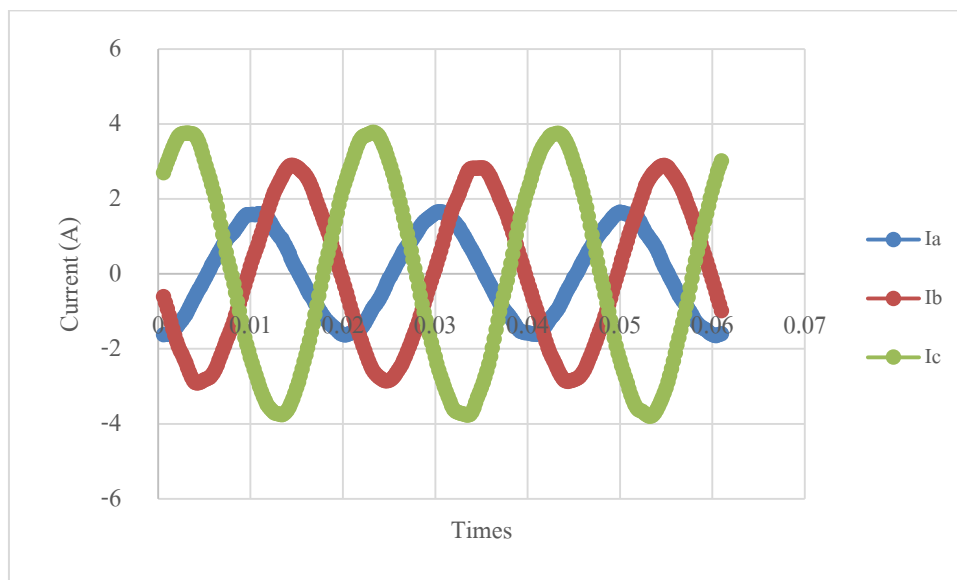
ภาพประกอบ 3-7 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่บันทึก (สภาวะปกติ)



ภาพประกอบ 3-8 สัญญาณกระแสไฟฟ้าที่บันทึก (สภาวะปกติ)



ภาพประกอบ 3-9 สัญญาณกระแสรั่วไหลไฟฟ้าที่บันทึก (สภาวะปกติ)



ภาพประกอบ 3-10 สัญญาณกระแสไฟฟ้าที่บันทึก (สภาวะผิดปกติ)

3.4 ผลการเร่งอายุฉนวนไฟ

การทดลองเร่งอายุฉนวนไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้ความร้อนและความชื้น ซึ่งได้ทดลองกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด 0.37 กิโลวัตต์ จำนวน 2 ตัว พบว่ามอเตอร์ทั้ง 2 ตัว มีจำนวนรอบการเร่งอายุฉนวนไฟฟ้าจนกระทั่งมอเตอร์เกิดความผิดปกติแตกต่างกัน แสดงดังตาราง 3-3 โดยมีมอเตอร์ตัวที่ 1 ถูกกระตุ้นด้วยกระบวนการเร่งอายุฉนวนไฟฟ้าจำนวน 13 รอบ จนกระทั่งฉนวนมอเตอร์เกิดความผิดปกติ แต่มีระยะเวลาการกระตุ้นด้วยความร้อนจำนวน 276 ชั่วโมง เนื่องจาก รอบที่ 1 - 3 ของการเร่งอายุฉนวนไฟฟ้า มอเตอร์ถูกกระตุ้นด้วยความร้อนรอบละ 12 ชั่วโมง เท่านั้น ในขณะที่มอเตอร์ตัวที่ 2 ถูกกระตุ้นด้วยกระบวนการเร่งอายุฉนวนไฟฟ้าจำนวน 9 รอบ หรือมีระยะเวลาการกระตุ้นด้วยความร้อนจำนวน 216 ชั่วโมง จนกระทั่งมอเตอร์เกิดความผิดปกติ เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน *IEEE 275-1992* พบว่ามีจำนวนรอบการเร่งอายุฉนวนไฟฟ้า และระยะเวลาการกระตุ้นด้วยความร้อน ใกล้เคียงกัน มีความคลาดเคลื่อน 1 – 2 รอบ หรือ 24 – 48 ชั่วโมงตามลำดับ

ลำดับมอเตอร์	จำนวนรอบการเร่งอายุฉนวนไฟฟ้า (รอบ)	ระยะเวลาการกระตุ้นความร้อน ต่อฉนวนไฟฟ้า (ชั่วโมง)
<i>IEEE std. 275-1992</i>	10	240
#Thermal Motor 1	13	276
# Thermal Motor 2	9	216

ตาราง 3-3 ผลการทดลองเร่งอายุฉนวนไฟฟ้า

กระบวนการเร่งอายุฉนวนไฟฟ้าด้วยความเค้นทางความร้อนและความชื้นที่ออกแบบโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน *IEEE std 275-1992* สามารถเร่งอายุฉนวนไฟฟ้าจนกระทั่งเกิดการเสื่อมสภาพได้ โดยข้อมูลสัญญาณไฟฟ้าที่ถูกบันทึกได้ในกระบวนการเร่งอายุฉนวนไฟฟ้าจนกระทั่งมอเตอร์เกิดความผิดปกติ จะถูกใช้คำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้าเพื่อวิเคราะห์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าปริมาณทางไฟฟ้าต่อสภาพฉนวนไฟฟ้า และถูกใช้สร้างแบบจำลองการประมาณอายุการทำงานของมอเตอร์ต่อไป

บทที่ 4

ผลการบันทึกสัญญาณทางไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำและการวิเคราะห์

เมื่อมอเตอร์ผ่านกระบวนการเร่งอายุจนวนไฟฟ้าแล้ว จะถูกนำมาใช้งานเพื่อเก็บบันทึกข้อมูลสัญญาณไฟฟ้า โดยรูปแบบการเชื่อมต่อและบันทึกผลข้อมูลของมอเตอร์แต่ละตัว ในรอบการทดลองช่วงแรกจะแตกต่างจากรอบการทดลองช่วงหลัง เนื่องจากการทดลองที่ต้องใช้เวลานานดังนั้นจึงต้องออกแบบการทดลองควบคู่ไปกับการเก็บผลการทดลองจริง สามารถสรุปรูปแบบการเชื่อมต่อและบันทึกผลข้อมูลของมอเตอร์ได้ตามตาราง 4-1 และ ตาราง 4-2

โดยเบื้องต้น เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบข้อมูลค่าปริมาณทางไฟฟ้าได้ จึงพิจารณาข้อมูลของมอเตอร์ที่มีการเชื่อมต่อแบบสตาร์ ไม่มีการเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์ และบันทึกสัญญาณทางไฟฟ้าจำนวน 10 สัญญาณ ได้แก่ $V_a, V_b, V_c, I_a, I_b, I_c, I_{leakage}, I_{leakage_a}, I_{leakage_b}, I_{leakage_c}$ สัญญาณทางไฟฟ้าเหล่านี้ถูกนำมาคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้าต่างๆ ตามตาราง 1-8

การคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้าต่างๆ จะถูกคำนวณ โดยใช้ข้อมูลทุกๆ 4999 ตัวอย่าง (ข้อมูลถูกตัดออก 10 ตัวอย่างแรก เพื่อแก้ปัญหาของเซ็นเซอร์) สามารถแสดงกราฟค่ากระแส Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 6 – 9 ดังภาพประกอบ 4-1 และขยายกราฟค่ากระแส Per unit เฟส A, B, C ดังภาพประกอบ 4-2 พบว่า ในช่วงรอบการทดลองที่มอเตอร์ทำงานปกติ คือ รอบที่ 6 – 8 กระแสไฟฟ้าทั้ง 3 เฟสจะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อมีความผิดปกติเกิดขึ้นในรอบที่ 9 ค่ากระแสจะเพิ่มขึ้นจากสภาวะปกติทั้ง 3 เฟส และอยู่ในสภาวะไม่สมดุล สำหรับค่ากระแสรั่วไหล Per unit เฟส A, B, C เมื่อมีความผิดปกติเกิดขึ้น ค่ากระแสรั่วไหลจะมีค่าสูงขึ้นกว่ากระแสปกติ และจะสูงขึ้นในเฟสที่คาดว่าจะมีความผิดปกติเกิดขึ้น ดังภาพประกอบ 4-3 และภาพประกอบ 4-4 การเปลี่ยนแปลงของค่าอิมพีแดนซ์ Per unit เฟส A, B, C แสดงดังภาพประกอบ 4-5 และ ภาพประกอบ 4-6 โดยจะแสดงค่าอิมพีแดนซ์ Per unit ในรอบที่ 6 – 9 และขยายในรอบที่ 9 ตามลำดับ พบว่าเมื่อมีความผิดปกติเกิดขึ้นค่าอิมพีแดนซ์จะมีค่าลดลงในเฟสที่คาดว่าจะเกิดความผิดปกติ

กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ตัวประกอบการแผ่กระจาย (DF) รวม 3 เฟสของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 6 – 9 กราฟขยายในรอบที่ 9 แสดงดังภาพประกอบ 4-7 และ ภาพประกอบ 4-8 ตามลำดับ พบว่า เมื่อมีความผิดปกติเกิดขึ้น ค่าตัวประกอบการแผ่กระจาย (DF) จะมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม ขณะที่การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้า Per unit เฟส A, B, C ในรอบที่ 6 – 9 และกราฟขยายในรอบที่ 9 แสดงดังภาพประกอบ 4-9 และ ภาพประกอบ 4-10 ตามลำดับ โดยความต้านทานฉนวนไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่อมีความผิดปกติเกิดขึ้นในเฟสที่คาดว่าจะเกิดความผิดปกติ

สำหรับค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนไฟฟ้า Per unit เฟส A, B, C จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีความผิดปกติเกิดขึ้นในเฟสที่คาดว่าจะเกิดความผิดปกติเช่นเดียวกัน แสดงดังภาพประกอบ 4-11 และภาพประกอบ 4-12 การเปลี่ยนแปลงของทั้ง 3 ค่านี้เกิดขึ้นเนื่องจากมีกระแสรั่วไหล ไหลผ่านฉนวนไฟฟ้า ในส่วนของมอเตอร์ตัวที่ 1 จะมีลักษณะแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าปริมาณทางไฟฟ้าเหมือนกับมอเตอร์ตัวที่ 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ในภาคผนวก ก ผลการบันทึกสัญญาณทางไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

สรุปแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าปริมาณทางไฟฟ้าเมื่อมีความผิดปกติเกิดขึ้นในตาราง 4-3 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่าปริมาณทางไฟฟ้าต่างๆ สอดคล้องกับทฤษฎีการเปลี่ยนแปลงของค่าปริมาณทางไฟฟ้าเมื่อมีความผิดปกติเกิดขึ้นกับฉนวนไฟฟ้า

เนื่องจากสามารถบันทึกข้อมูลสัญญาณมอเตอร์ขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงจากสภาวะมอเตอร์ปกติไปยังสภาวะมอเตอร์ผิดปกติ ซึ่งทางกายภาพขณะทำการเก็บบันทึกสัญญาณทางไฟฟ้า มอเตอร์จะทำงานปกติช่วงหนึ่งหลังจากนั้นมอเตอร์จึงมีการสันสะท้อนอย่างรุนแรงและมีเสียงขณะทำงานดังขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อทดลองนำสัญญาณกระแสไฟฟ้าเฟส A, B, C มาวิเคราะห์ กราฟ Fast Fourier transform (*FFT*) ดังภาพประกอบ 4-13 - ภาพประกอบ 4-16 แสดงการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีความผิดปกติเกิดขึ้นแล้ว (สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงของกราฟ *FFT* กระแสไฟฟ้าจากสภาวะปกติไปยังสภาวะผิดปกติในภาพประกอบ ก-42 - ภาพประกอบ ก-51) พบว่าเมื่อมอเตอร์มีความผิดปกติเกิดขึ้น กระแสไฟฟ้าที่ความถี่ 50 เฮิร์ตสูงขึ้น และปรากฏกระแสที่ความถี่ 150, 250 เฮิร์ต ซึ่งแตกต่างจากสภาวะมอเตอร์ทำงานปกติ

ขณะที่ทำการบันทึกสัญญาณทางไฟฟ้าของมอเตอร์ในแต่ละรอบการเร่งอายุฉนวนไฟฟ้า ตั้งแต่รอบที่ 6 – 8 ผู้วิจัยได้กระตุ้นการทำงานของมอเตอร์ด้วยการส่องสปอร์ทไลท์ให้แก่มอเตอร์ เพื่อเป็นการกระตุ้นทางความร้อนให้แก่มอเตอร์ และบันทึกค่าอุณหภูมิบริเวณโครงมอเตอร์ทุกชั่วโมง โดยอุณหภูมิจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดประมาณ 100 องศาเซลเซียส พบว่าค่ากระแสไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิภายนอกที่บริเวณโครงมอเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น ดังภาพประกอบ 4-17 ซึ่งเป็นไปได้ว่าความร้อนจากสปอร์ทไลท์ยังไม่สูงมากพอที่จะทำให้อุณหภูมิของขดลวดสเตเตอร์เพิ่มขึ้นจนค่าความต้านทานขดลวดลดลง และไปเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณทางไฟฟ้า ในทางเดียวกันทฤษฎีได้กล่าวไว้ว่าความร้อนเป็นปัจจัยสำคัญที่จะทำให้ฉนวนไฟฟ้าเกิดการเบรกดาวน์และทำให้มอเตอร์เกิดความผิดปกติอันจะส่งผลต่อค่าปริมาณทางไฟฟ้า ซึ่งผลการทดลองดังภาพประกอบ 4-17 ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นั่นแสดงว่า ณ ขณะนั้นฉนวนไฟฟ้ายังไม่เกิดการเบรกดาวน์

รอบที่	ระยะเวลากระตุ้นด้วยความร้อนที่ 220 องศาเซลเซียส (ชม.)	กระตุ้นด้วยความชื้น		การเชื่อมต่อและบันทึกข้อมูลมอเตอร์					หมายเหตุ
		%RH	เวลา (ชม.)	การเชื่อมต่อ	ระดับแรงดัน	อินเวอร์เตอร์	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	จำนวนสัญญาณ	
1	12	80	72	เคลด้า	220 V _{L-L}	ไม่ต่อ	12	7	
2	12	80	72	เคลด้า	220 V _{L-L}	ไม่ต่อ	12	7	มีการปรับหลายระดับแรงดัน
3	12	99	72	เคลด้า	220 V _{L-L}	ไม่ต่อ	12	7	ขณะมอเตอร์ทำงานมีการส่งสปอร์ตไลท์เพื่อเพิ่มอุณหภูมิภายนอก
4	24	99	90	-	-	-	-	-	ไม่มีการเก็บบันทึกข้อมูลมอเตอร์ขณะทำงาน
5	24	99	48	เคลด้า	220 V _{L-L}	ไม่ต่อ	12	7	ขณะมอเตอร์ทำงานมีการส่งสปอร์ตไลท์เพื่อเพิ่มอุณหภูมิภายนอก
5	-	-	-	สตาร์	380 V _{L-L}	ต่อ	6	7	ขณะมอเตอร์ทำงานมีการส่งสปอร์ตไลท์เพื่อเพิ่มอุณหภูมิภายนอก
6	24	99	48	สตาร์	380 V _{L-L}	ต่อ	6	7	ขณะมอเตอร์ทำงานมีการส่งสปอร์ตไลท์เพื่อเพิ่มอุณหภูมิภายนอก

รอบที่	ระยะเวลากระตุ้นด้วยความร้อนที่ 220 องศาเซลเซียส (ชม.)	กระตุ้นด้วยความชื้น		การเชื่อมต่อและบันทึกข้อมูลมอเตอร์					หมายเหตุ
		%RH	เวลา (ชม.)	การเชื่อมต่อ	ระดับแรงดัน	อินเวอร์เตอร์	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	จำนวนสัญญาณ	
7	24	99	48	สตาร์	380 V _{L-L}	ต่อ	6	7	ขณะมอเตอร์ทำงานมีการส่องสปอร์ตไลท์ เพื่อเพิ่มอุณหภูมิภายนอก
8	24	99	48	สตาร์	380 V _{L-L}	ต่อ	6	7	ขณะมอเตอร์ทำงานมีการส่องสปอร์ตไลท์ เพื่อเพิ่มอุณหภูมิภายนอก
9	24	99	48	สตาร์	380 V _{L-L}	ไม่ต่อ	6	10	ขณะมอเตอร์ทำงานมีการส่องสปอร์ตไลท์ เพื่อเพิ่มอุณหภูมิภายนอก
10	24	99	48	สตาร์	380 V _{L-L}	ไม่ต่อ	6	10	ขณะมอเตอร์ทำงานมีการส่องสปอร์ตไลท์ เพื่อเพิ่มอุณหภูมิภายนอก
11	24	99	48	สตาร์	380 V _{L-L}	ไม่ต่อ	6	10	ขณะมอเตอร์ทำงานมีการส่องสปอร์ตไลท์ เพื่อเพิ่มอุณหภูมิภายนอก
12	24	99	48	สตาร์	380 V _{L-L}	ไม่ต่อ	6	10	ขณะมอเตอร์ทำงานมีการส่องสปอร์ตไลท์ เพื่อเพิ่มอุณหภูมิภายนอก

รอบที่	ระยะเวลากระตุ้นด้วยความร้อนที่ 220 องศาเซลเซียส (ชม.)	กระตุ้นด้วยความชื้น		การเชื่อมต่อและบันทึกข้อมูลมอเตอร์					หมายเหตุ
		%RH	เวลา (ชม.)	การเชื่อมต่อ	ระดับแรงดัน	อินเวอร์เตอร์	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	จำนวนสัญญาณ	
13 (R13 Fault)	24	99	48	สตาร์	220, 179 V _{L-L}	ไม่ต่อ	40 ไฟล์	10	มอเตอร์แสดงสัญญาณผิดปกติ
13 (R13 220 Normal, R13 380Normal)	-	-	-	สตาร์	220, 380 V _{L-L}	ไม่ต่อ	1 ชั่วโมง (200 V _{L-L}), 2 ชั่วโมง (380 V _{L-L})	10	รีมอเตอร์แล้วนำมารันใหม่, สัญญาณที่ได้ไม่แสดงอาการมอเตอร์ผิดปกติ
13 (R13 220 Normal2, R13 380Normal2)	-	-	-	สตาร์	220, 380 V _{L-L}	ไม่ต่อ	1 ชั่วโมง (200 V _{L-L}), 2 ชั่วโมง (380 V _{L-L})	10	สัญญาณที่ได้ไม่แสดงอาการมอเตอร์ผิดปกติ
<p>หมายเหตุ V_{L-L} หมายถึง แรงดันระหว่าง ไลน์ – ไลน์</p> <p>การเก็บบันทึกข้อมูล 7 สัญญาณ ได้แก่ V_a, V_b, V_c, I_a, I_b, I_c, I_{leakage}</p> <p>การเก็บบันทึกข้อมูล 10 สัญญาณ ได้แก่ V_a, V_b, V_c, I_a, I_b, I_c, I_{leakage}, I_{leakage_a}, I_{leakage_b}, I_{leakage_c}</p>									

ตาราง 4- 1 รูปแบบการเร่งอายุฉนวนไฟฟ้าและการเชื่อมต่อมอเตอร์ตัวที่ 1

รอบที่	ระยะเวลากระตุ้นด้วยความร้อนที่ 220 องศาเซลเซียส (ชม.)	กระตุ้นด้วยความชื้น		การเชื่อมต่อและบันทึกข้อมูลมอเตอร์					หมายเหตุ
		%RH	เวลา (ชม.)	การเชื่อมต่อ	ระดับแรงดัน	อินเวอร์เตอร์	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	จำนวนสัญญาณ	
1	24	99	48	เคลด้า	220 V _{L-L}	ไม่ต่อ	6	7	ขณะมอเตอร์ทำงานมีการส่องสปอร์ตไลท์ เพื่อเพิ่มอุณหภูมิภายนอก
2	24	99	48	สตาร์	380 V _{L-L}	ต่อ	6	7	ขณะมอเตอร์ทำงานมีการส่องสปอร์ตไลท์ เพื่อเพิ่มอุณหภูมิภายนอก
3	24	99	66	สตาร์	380 V _{L-L}	ต่อ	6	7	ขณะมอเตอร์ทำงานมีการส่องสปอร์ตไลท์ เพื่อเพิ่มอุณหภูมิภายนอก
4	24	99	69 ชม. 40 นาที	สตาร์	380 V _{L-L}	ต่อ	6	7	ขณะมอเตอร์ทำงานมีการส่องสปอร์ตไลท์ เพื่อเพิ่มอุณหภูมิภายนอก
5	24	99	48	สตาร์	380 V _{L-L}	ไม่ต่อ	6	7	นักศึกษาปริญญาตรี ปี 4 เป็นผู้เก็บผลการทดลอง
6	24	99	48	สตาร์	380 V _{L-L}	ไม่ต่อ	6	10	ขณะมอเตอร์ทำงานมีการส่องสปอร์ตไลท์ เพื่อเพิ่มอุณหภูมิภายนอก

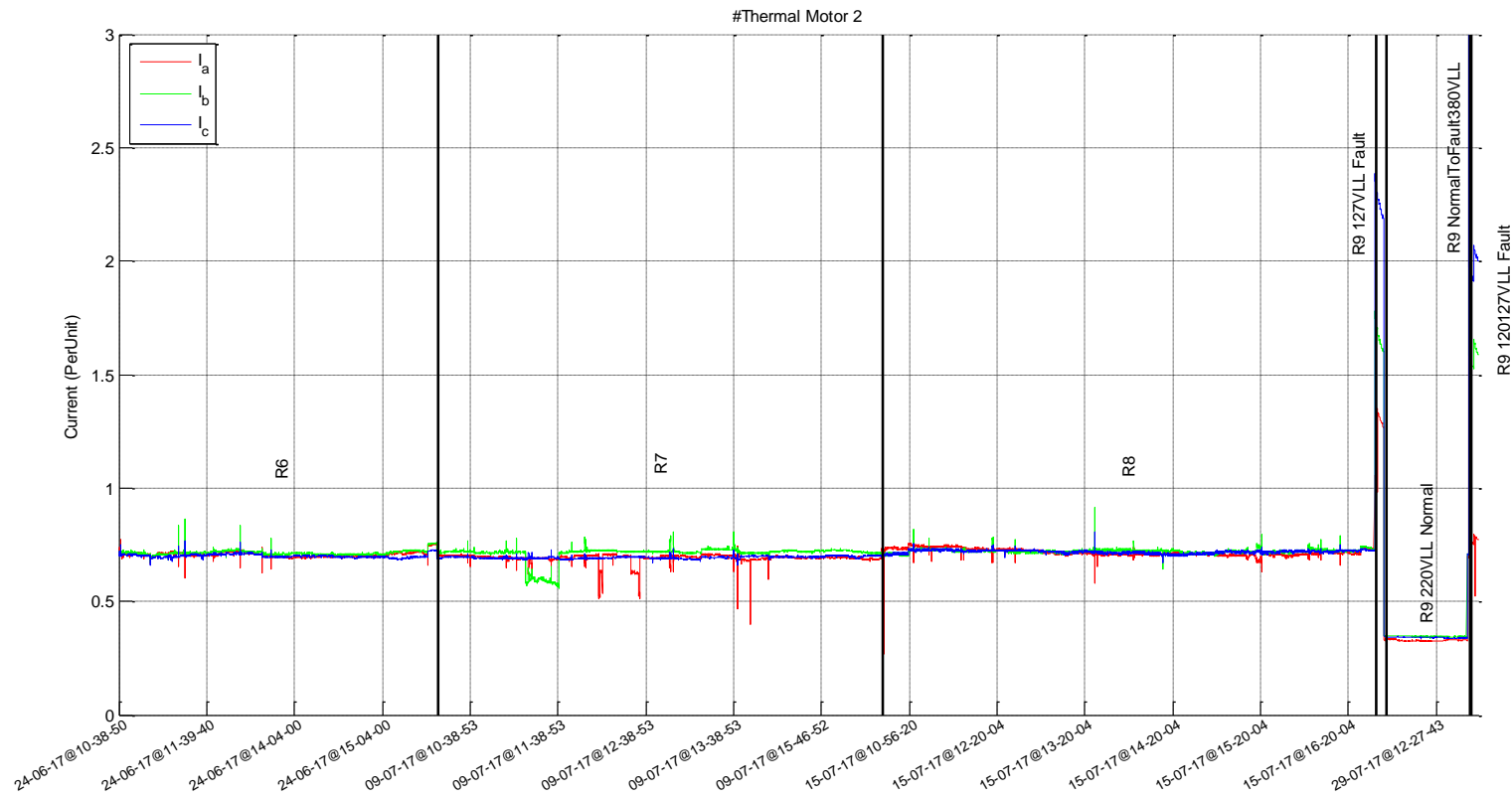
รอบที่	ระยะเวลากระตุ้นด้วยความร้อนที่ 220 องศาเซลเซียส (ชม.)	กระตุ้นด้วยความชื้น		การเชื่อมต่อและบันทึกข้อมูลมอเตอร์					หมายเหตุ
		%RH	เวลา (ชม.)	การเชื่อมต่อ	ระดับแรงดัน	อินเวอร์เตอร์	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	จำนวนสัญญาณ	
7	24	99	48	สตาร์	380 V _{L-L}	ไม่ต่อ	6	10	ขณะมอเตอร์ทำงานมีการส่องสปอร์ตไลท์ เพื่อเพิ่มอุณหภูมิภายนอก
8	24	99	48	สตาร์	380 V _{L-L}	ไม่ต่อ	6	10	ขณะมอเตอร์ทำงานมีการส่องสปอร์ตไลท์ เพื่อเพิ่มอุณหภูมิภายนอก
9 (R9 127VLL Fault)	24	99	48	สตาร์	127 V _{L-L}	ไม่ต่อ	40 ไฟล์	10	มอเตอร์แสดงอาการผิดปกติ
9 (R9 220VLL Normal, R9 NormalToFault 380VLL)	-	-	-	สตาร์	220 V _{L-L} , 380 V _{L-L}	ไม่ต่อ	1 ชั่วโมง (220 V _{L-L}) 7 ไฟล์ (380 V _{L-L})	10	รีมอเตอร์แล้วนำมารันใหม่, ที่แรงดัน 220 V _{L-L} ไม่แสดงอาการมอเตอร์ผิดปกติ แต่เมื่อปรับเป็น 380 V _{L-L} มอเตอร์จึงแสดงอาการผิดปกติ
9 (R9 120127VLL Fault)	-	-	-	สตาร์	120 V _{L-L} , 127 V _{L-L}	ไม่ต่อ	20 ไฟล์ (120 V _{L-L}) 20 ไฟล์ (127 V _{L-L})	10	มอเตอร์แสดงอาการผิดปกติ

รอบที่	ระยะเวลากระตุ้นด้วยความร้อนที่ 220 องศาเซลเซียส (ชม.)	กระตุ้นด้วยความชื้น		การเชื่อมต่อและบันทึกข้อมูลมอเตอร์					หมายเหตุ
		%RH	เวลา (ชม.)	การเชื่อมต่อ	ระดับแรงดัน	อินเวอร์เตอร์	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	จำนวนสัญญาณ	
หมายเหตุ V_{L-L} หมายถึง แรงดันระหว่าง ไลน์ – ไลน์ การเก็บบันทึกข้อมูล 7 สัญญาณ ได้แก่ $V_a, V_b, V_c, I_a, I_b, I_c, I_{leakage}$ การเก็บบันทึกข้อมูล 10 สัญญาณ ได้แก่ $V_a, V_b, V_c, I_a, I_b, I_c, I_{leakage}, I_{leakage_a}, I_{leakage_b}, I_{leakage_c}$									

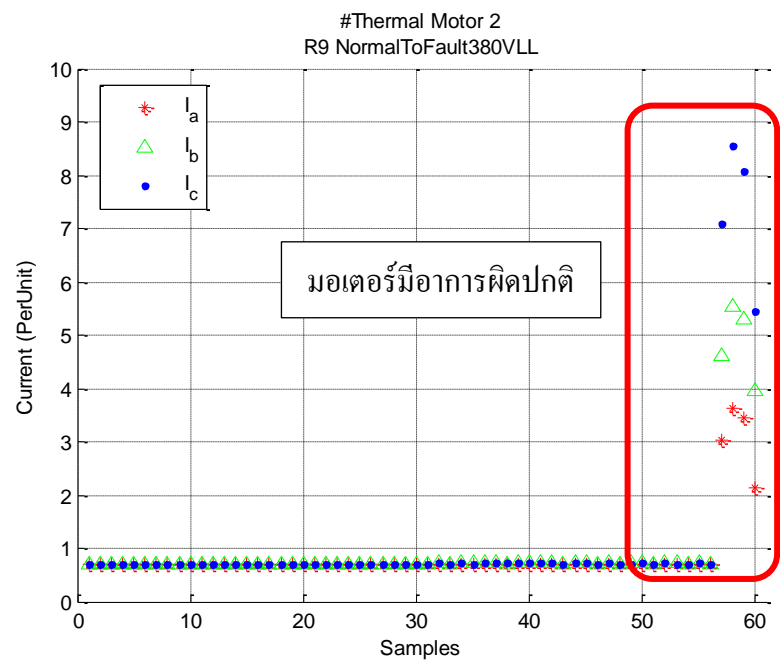
ตาราง 4-2 รูปแบบการเร่งอายุฉนวนไฟฟ้าและการเชื่อมต่อมอเตอร์ตัวที่ 2

ค่าปริมาณทางไฟฟ้า	แนวโน้มการเปลี่ยนแปลง
ค่ากระแส Per unit เฟส A, B, C	↑
ค่ากระแสรั่วไหล Per unit เฟส A, B, C	↑
ค่าเปอร์เซ็นต์ตัวประกอบการแผ่กระจาย รวม 3 เฟส	↑
ค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนไฟฟ้า Per unit เฟส A, B, C	↑
ค่าอิมพีแดนซ์ Per unit เฟส A, B, C	↓
ค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้า Per unit เฟส A, B, C	↓

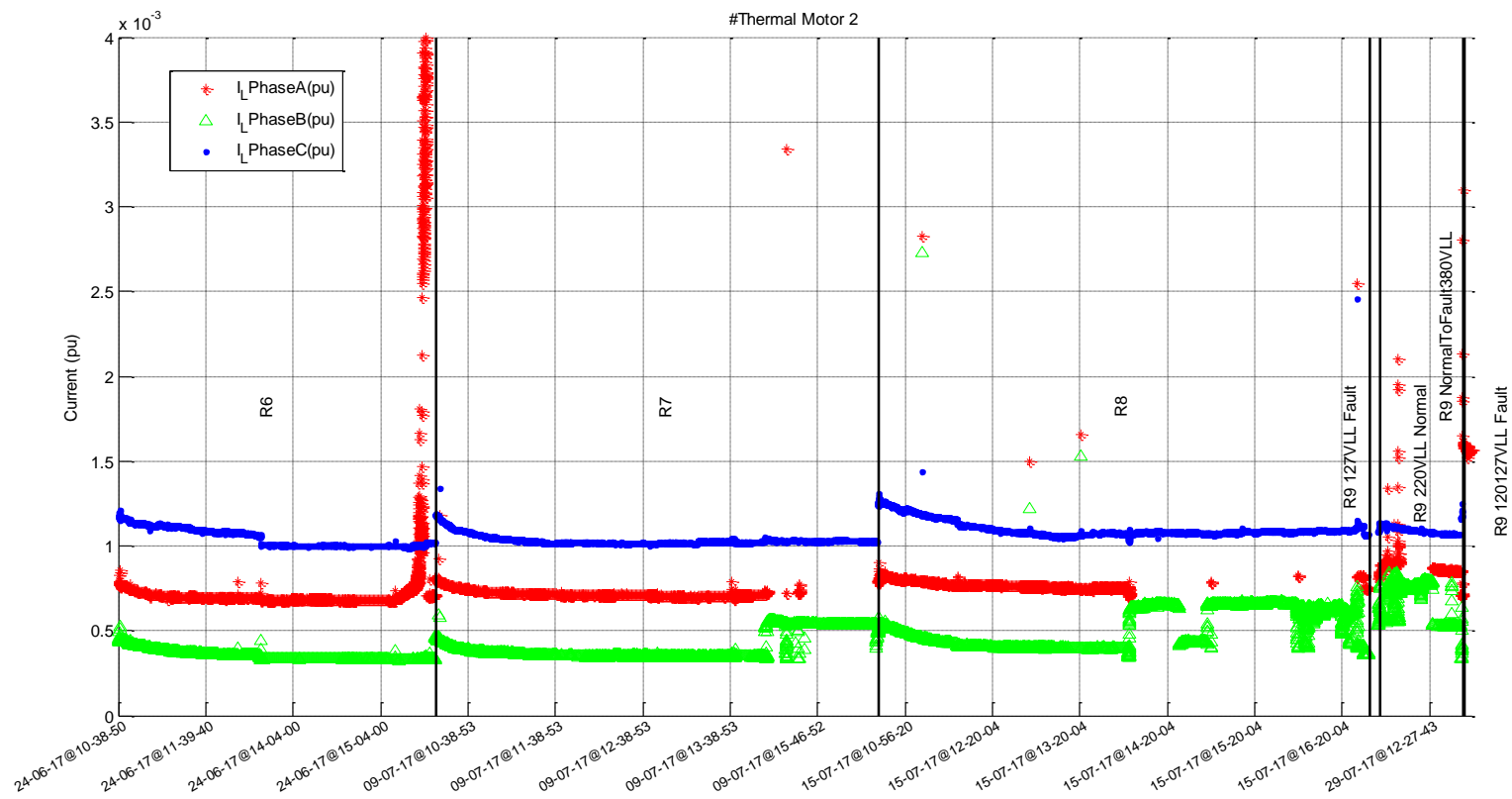
ตาราง 4-3 สรุปแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าปริมาณทางไฟฟ้าเมื่อมีความผิดปกติเกิดขึ้น



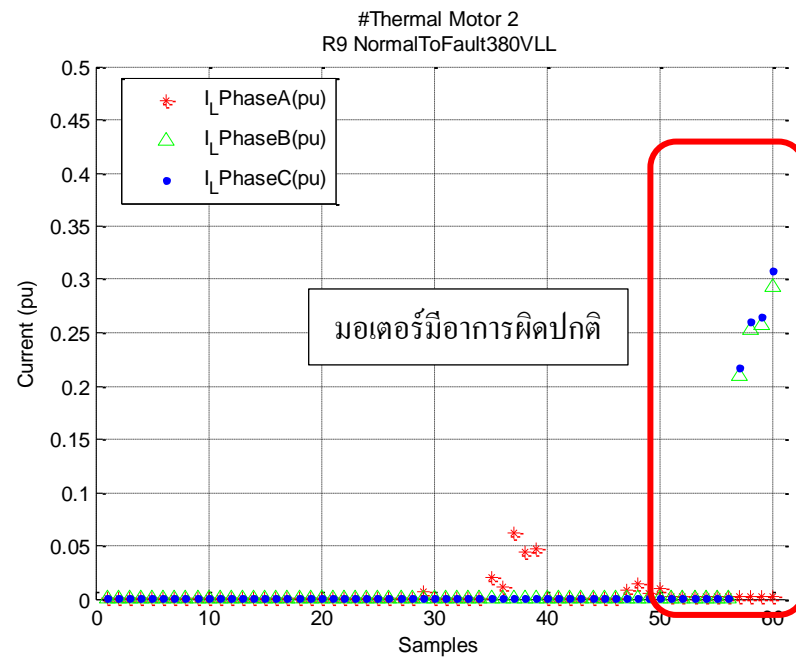
ภาพประกอบ 4-1 กราฟแสดงค่ากระแส Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 6 – 9



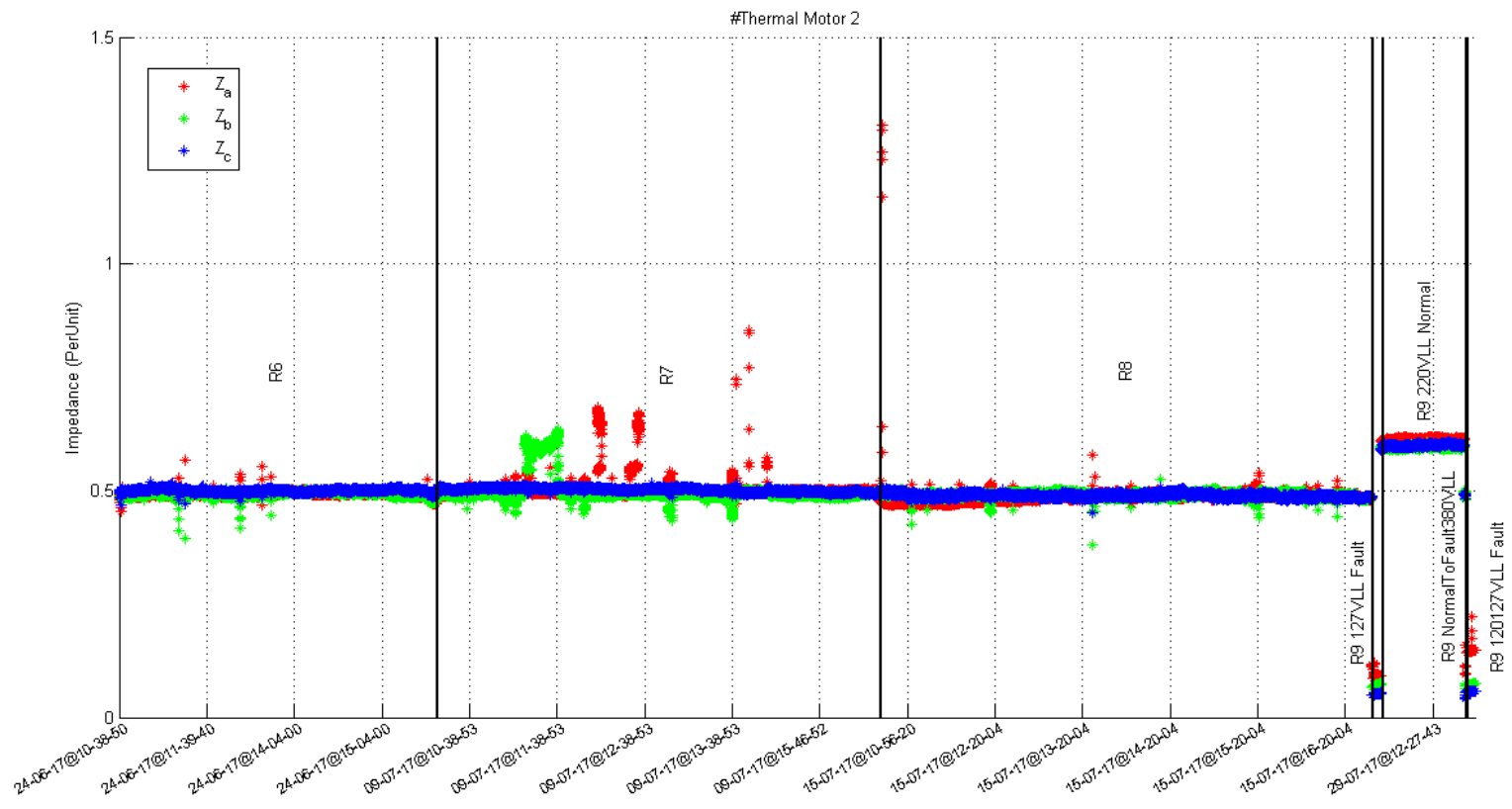
ภาพประกอบ 4-2 กราฟแสดงค่ากระแส Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 9 (R9 NormalToFault380VLL)



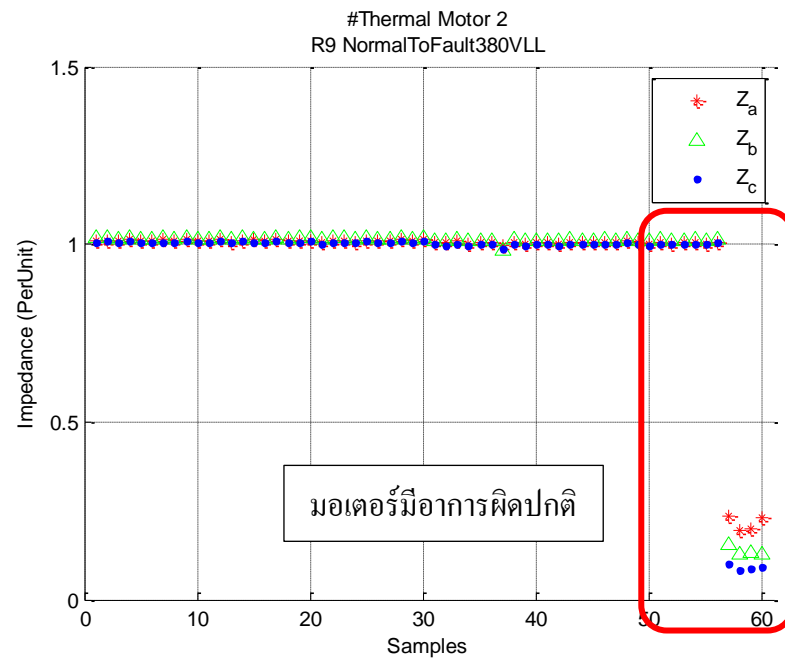
ภาพประกอบ 4-3 กราฟแสดงค่ากระแสรั่วไหล Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 6 – 9



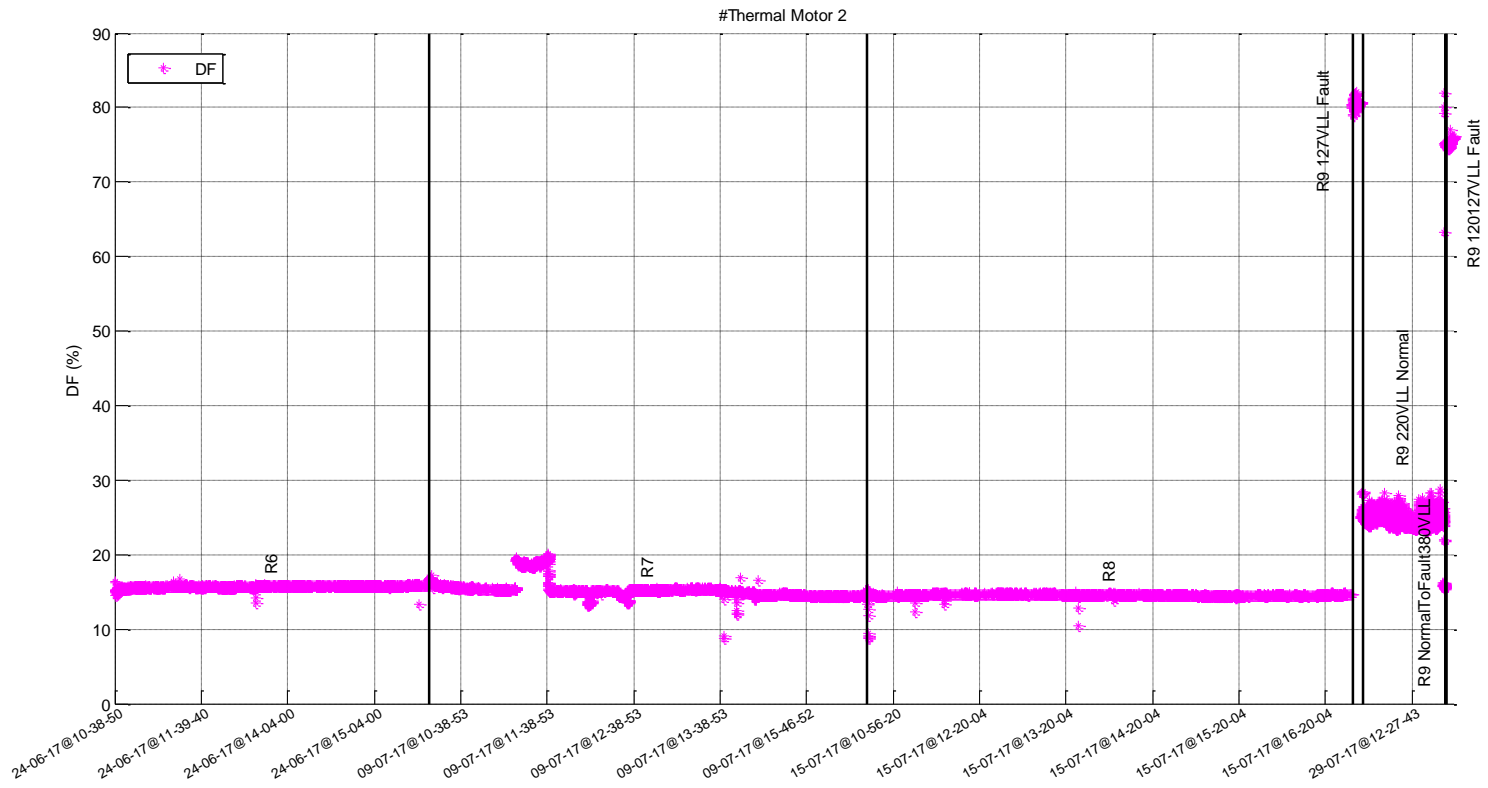
ภาพประกอบ 4-4 กราฟแสดงค่ากระแสรั่วไหล Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 9 (R9 NormalToFault380VLL)



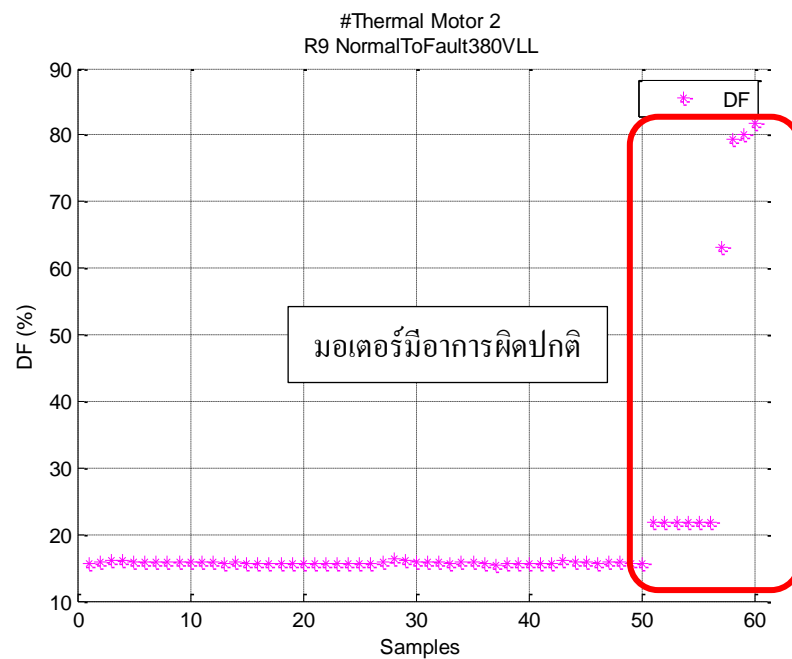
ภาพประกอบ 4-5 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 6 - 9



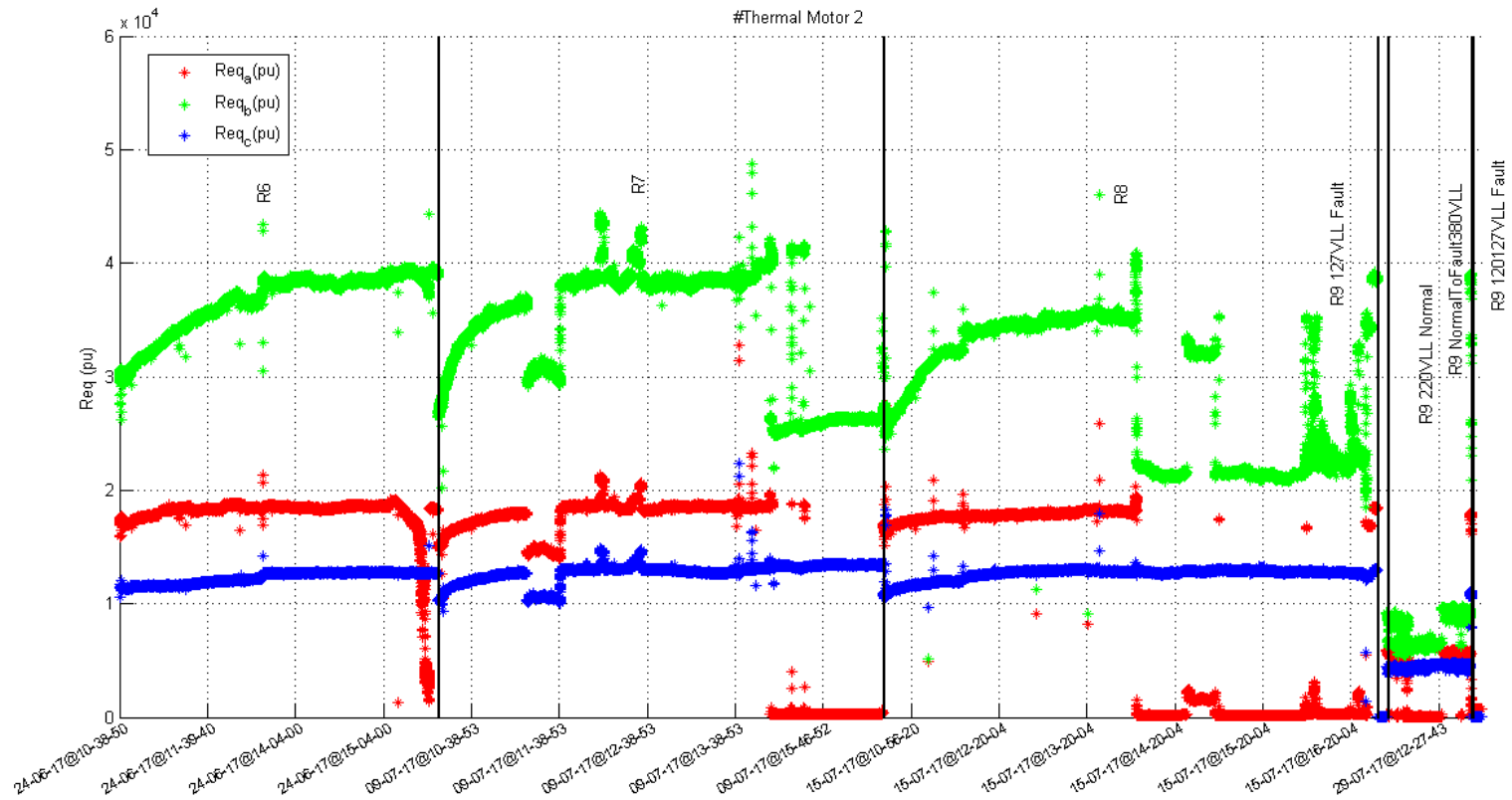
ภาพประกอบ 4-6 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 9 (R9 NormalToFault380VLL)



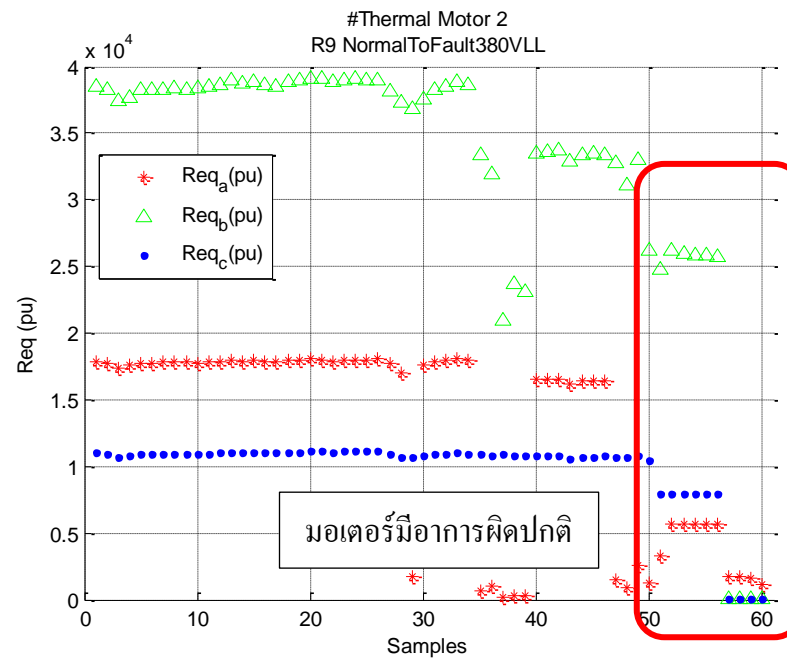
ภาพประกอบ 4-7 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ตัวประกอบการแผ่กระจาย ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 6 – 9



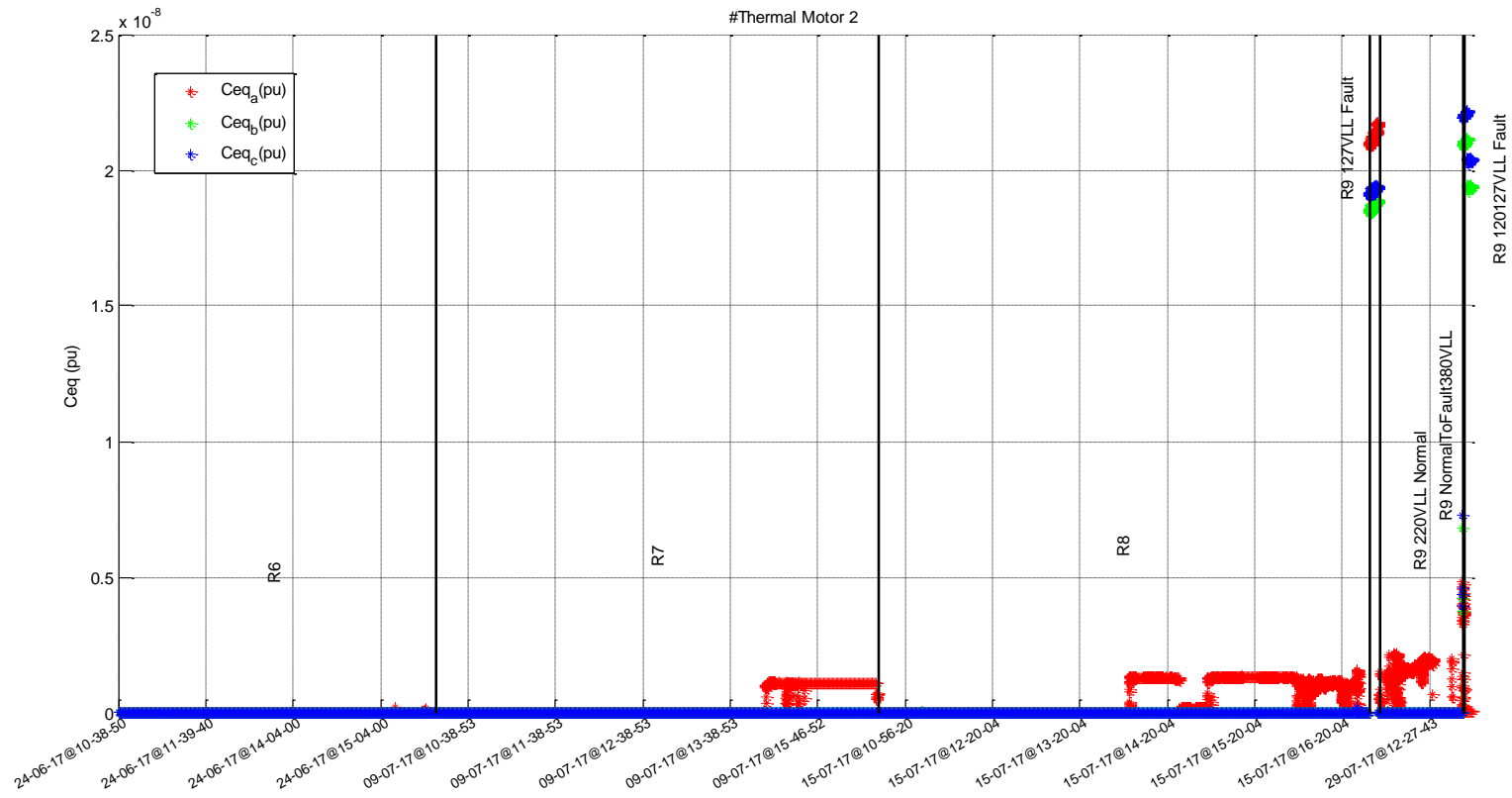
ภาพประกอบ 4-8 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ตัวประกอบการแผ่กระจาย ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 9 (R9 NormalToFault380VLL)



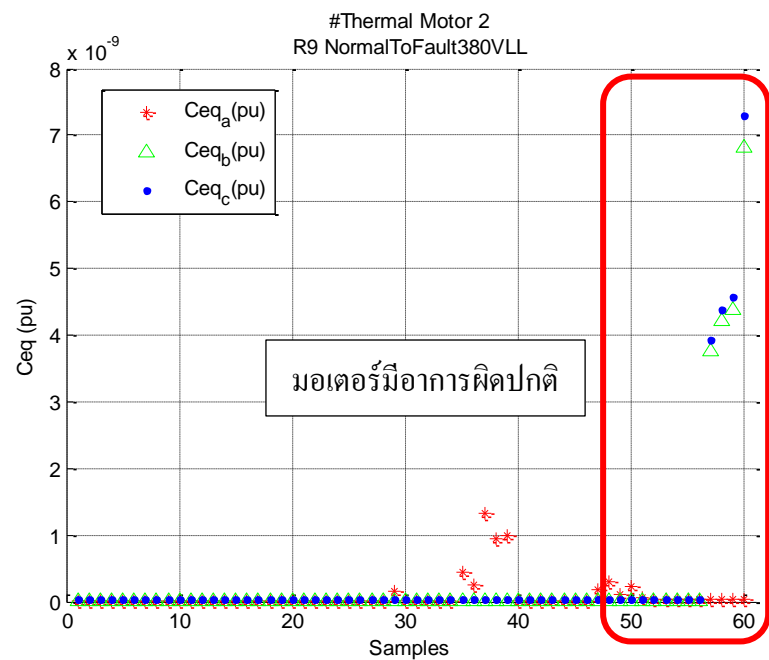
ภาพประกอบ 4-9 กราฟแสดงค่าความต้านทานจนวนไฟฟ้า Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 6 – 9



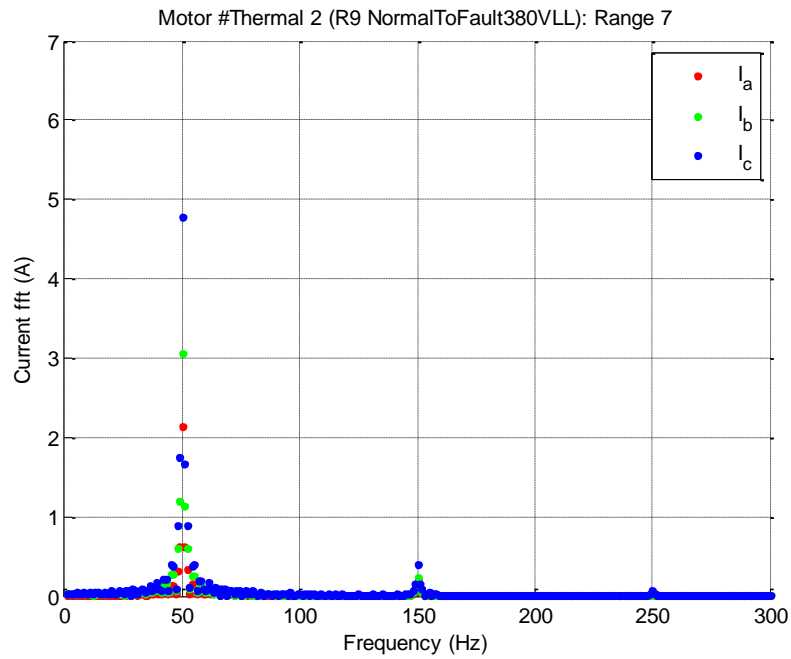
ภาพประกอบ 4-10 กราฟแสดงค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้า Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 9 (R9 NormalToFault380VLL)



ภาพประกอบ 4-11 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนไฟฟ้า Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 6 – 9

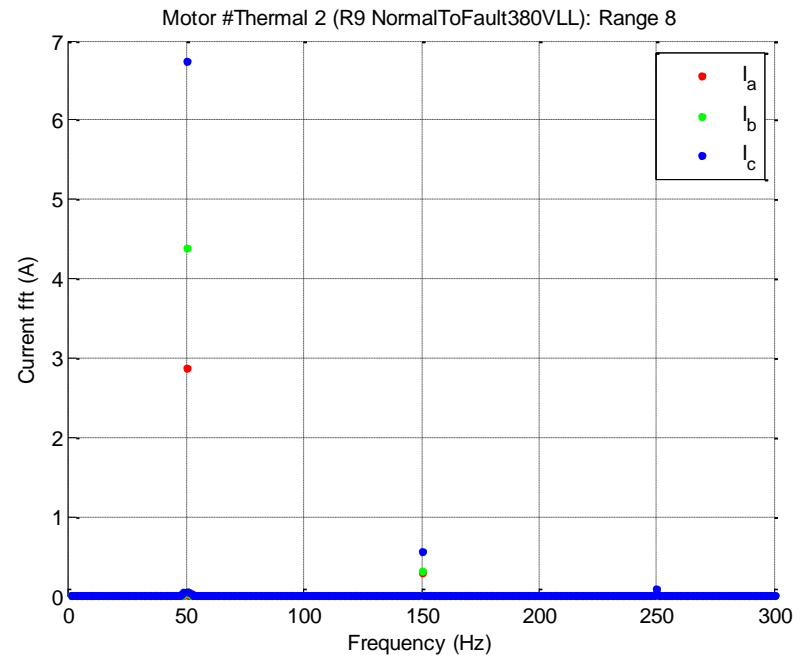


ภาพประกอบ 4-12 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนไฟฟ้า Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 9 (R9 NormalToFault380VLL)



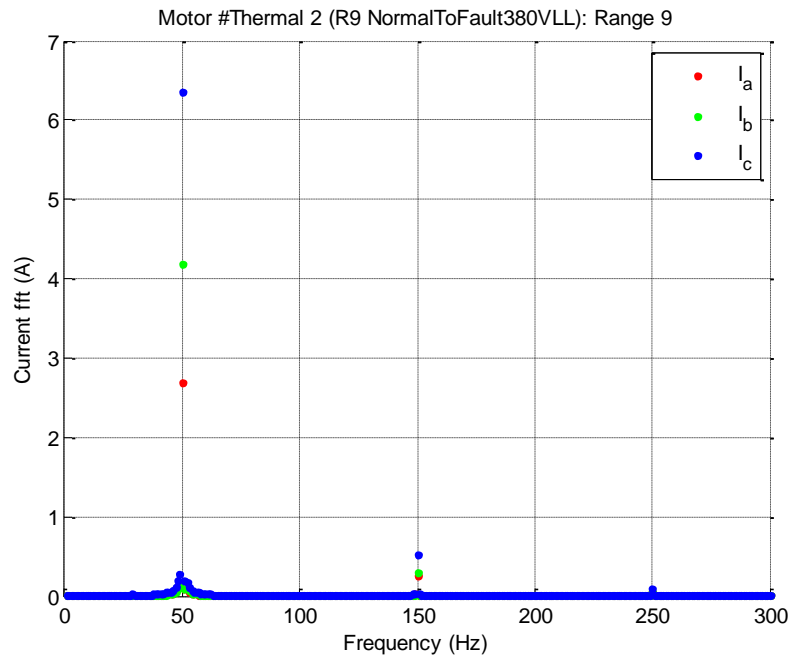
ภาพประกอบ 4-13 กราฟ *FFT* กระแสเฟส *A, B, C*
ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในช่วงที่ 7

(ข้อมูลที่แสดงการเปลี่ยนแปลงในสภาวะปกติไปยังสภาวะผิดปกติ)



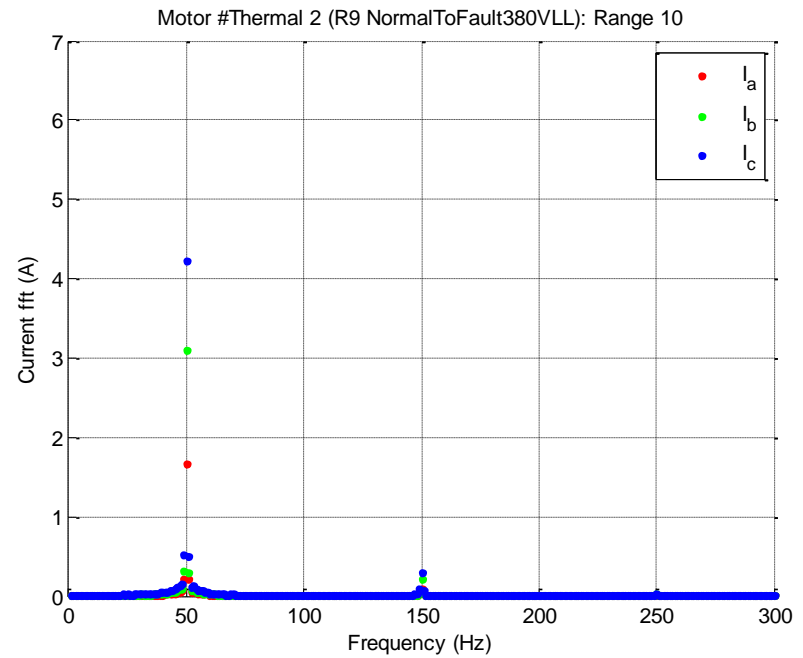
ภาพประกอบ 4-14 กราฟ *FFT* กระแสเฟส *A, B, C*
ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในช่วงที่ 8

(ข้อมูลที่แสดงการเปลี่ยนแปลงในสภาวะปกติไปยังสภาวะผิดปกติ)



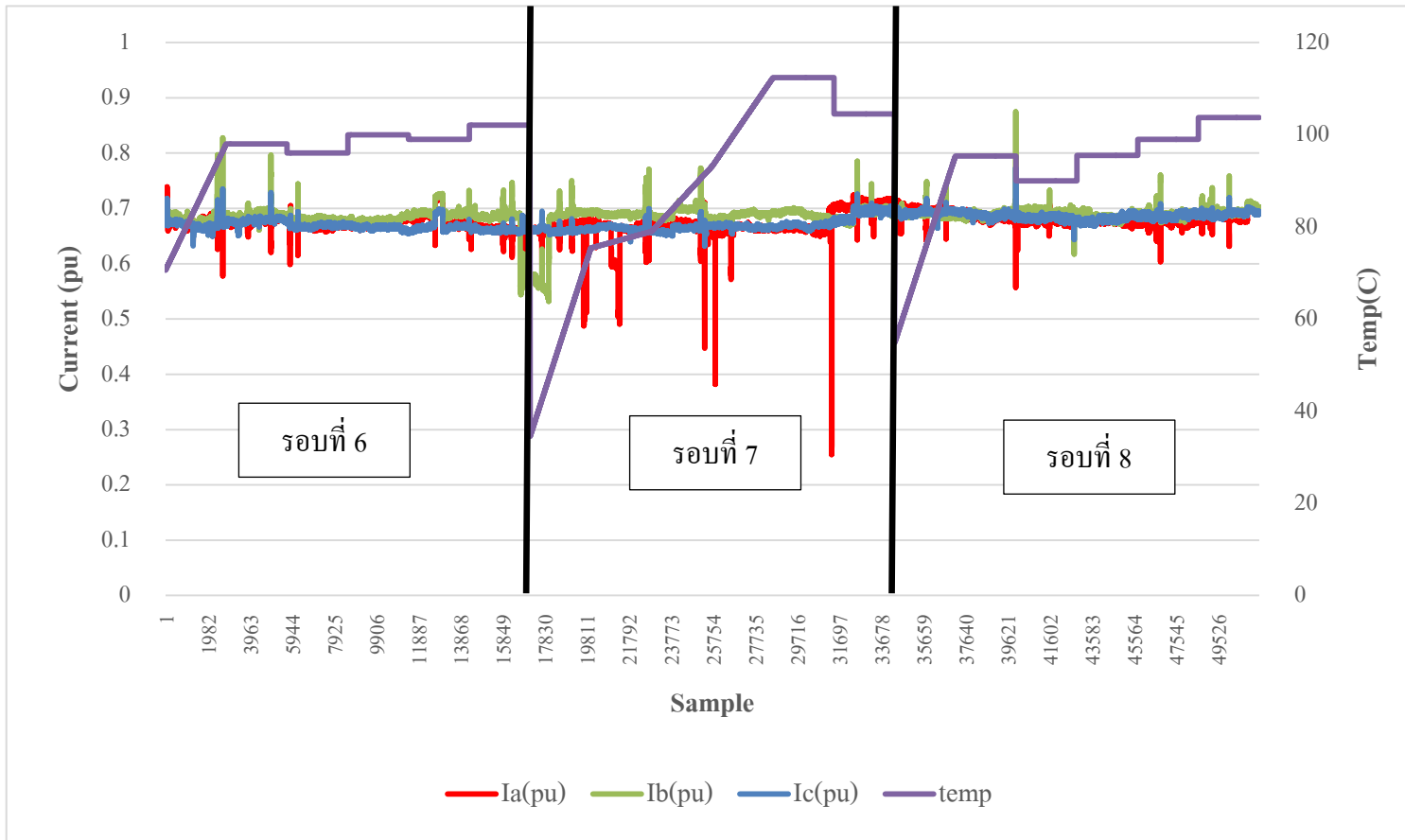
ภาพประกอบ 4-15 กราฟ *FFT* กระแสเฟส *A, B, C*
ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในช่วงที่ 9

(ข้อมูลที่แสดงการเปลี่ยนแปลงในสภาวะปกติไปยังสภาวะผิดปกติ)



ภาพประกอบ 4-16 กราฟ *FFT* กระแสเฟส *A, B, C*
ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในช่วงที่ 10

(ข้อมูลที่แสดงการเปลี่ยนแปลงในสภาวะปกติไปยังสภาวะผิดปกติ)



ภาพประกอบ 4-17 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของกระแสกับอุณหภูมิ

จากผลการเปลี่ยนแปลงของค่าปริมาณทางไฟฟ้าจะพบว่ามอเตอร์ทั้งสองตัว มีความผิดปกติเกิดขึ้น แต่ความผิดปกติที่เกิดขึ้นนี้ไม่สามารถระบุได้ว่าเป็นความผิดปกติชนิดใด ดังนั้นจึงทำการทดลองมอเตอร์หนึ่งยูนิตอีก 1 ตัว ซึ่งเป็นมอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ที่มีค่าพารามิเตอร์และพิกัดคังตาราง 4-4 โดยเก็บบันทึกผลสัญญาณทางไฟฟ้าขณะเกิดความผิดปกติ ลัดวงจรระหว่างเฟส และลัดวงจรระหว่างรอบในเฟสต่างๆ มาวิเคราะห์เปรียบเทียบเพื่อจำแนกความผิดปกติของมอเตอร์ตัวที่ 1 และตัวที่ 2

V	Hz	r/min	kW	$\cos\theta$	A
230 Δ / 400 Y	50	1430	2.2	0.79	8.66/4.98
415 Y	50	1435	2.2	0.765	4.94
IE1 – 80.1 (100%) – 81.3 (75%) – 79.6 (50%)					33 kg

ตาราง 4-4 พารามิเตอร์และพิกัดของมอเตอร์หนึ่งยูนิต ขนาด 2.2 กิโลวัตต์

ผลการทดลองแสดงกราฟค่ากระแส Per unit เฟส A, B, C ค่ากระแสรั่วไหลลงดิน Per unit ค่ากระแสรั่วไหล Per unit เฟส A, B, C และค่าอิมพีแดนซ์ Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ แสดงดังภาพประกอบ 4-18 - ภาพประกอบ 4-21 ตามลำดับ แต่ละกราฟจะแสดงค่าปริมาณทางไฟฟ้าของมอเตอร์ที่มีความผิดปกติคือ การลัดวงจรระหว่าง เฟส $C-B, B-A, A-C$ และการลัดรอบของขดลวดจำนวน 7, 15, 31 ของเฟส C, B, A ตามลำดับ

จากกราฟจะพบว่าเมื่อเกิดการลัดวงจรระหว่างเฟส ค่ากระแส Per unit ของ 1 ในเฟสที่เกิดความผิดปกติจะมีค่าสูงที่สุด และอีกหนึ่งเฟสจะมีค่าใกล้เคียงกับเฟสที่ไม่มีความผิดปกติเกิดขึ้น ในขณะที่เมื่อมีการลัดรอบของขดลวดเกิดขึ้น ค่ากระแส Per unit ของเฟสที่เกิดความผิดปกติจะมีค่าสูงชันกว่าเฟสที่ไม่มีความผิดปกติ และจะมีค่ากระแสสูงชันตามระดับความรุนแรงที่มีจำนวนรอบการลัดรอบเพิ่มขึ้น แสดงดังภาพประกอบ 4-18

ค่ากระแสรั่วไหลลงดิน Per unit จะมีค่าสูงชันกว่าค่าปกติเมื่อมีความผิดปกติเกิดขึ้นกับขดลวดสเตเตอร์ ดังภาพประกอบ 4-19 ค่ากระแสรั่วไหล Per unit เฟส A, B, C จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยมีค่าสูงเฉพาะเฟสที่มีความผิดปกติเกิดขึ้น เมื่อเกิดการลัดวงจรระหว่างเฟส แต่หากเกิดการลัดรอบของขดลวดจะไม่ปรากฏค่ากระแสรั่วไหล Per unit เฟส A, B, C แสดงดังภาพประกอบ 4-20

ค่าอิมพีแดนซ์ Per unit เฟส A, B, C จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยจะมีค่าอิมพีแดนซ์ลดลงสำหรับ 1 ในเฟส หรือเฟสที่มีความผิดปกติเกิดขึ้น เมื่อเกิดการลัดวงจรระหว่างเฟสและการ

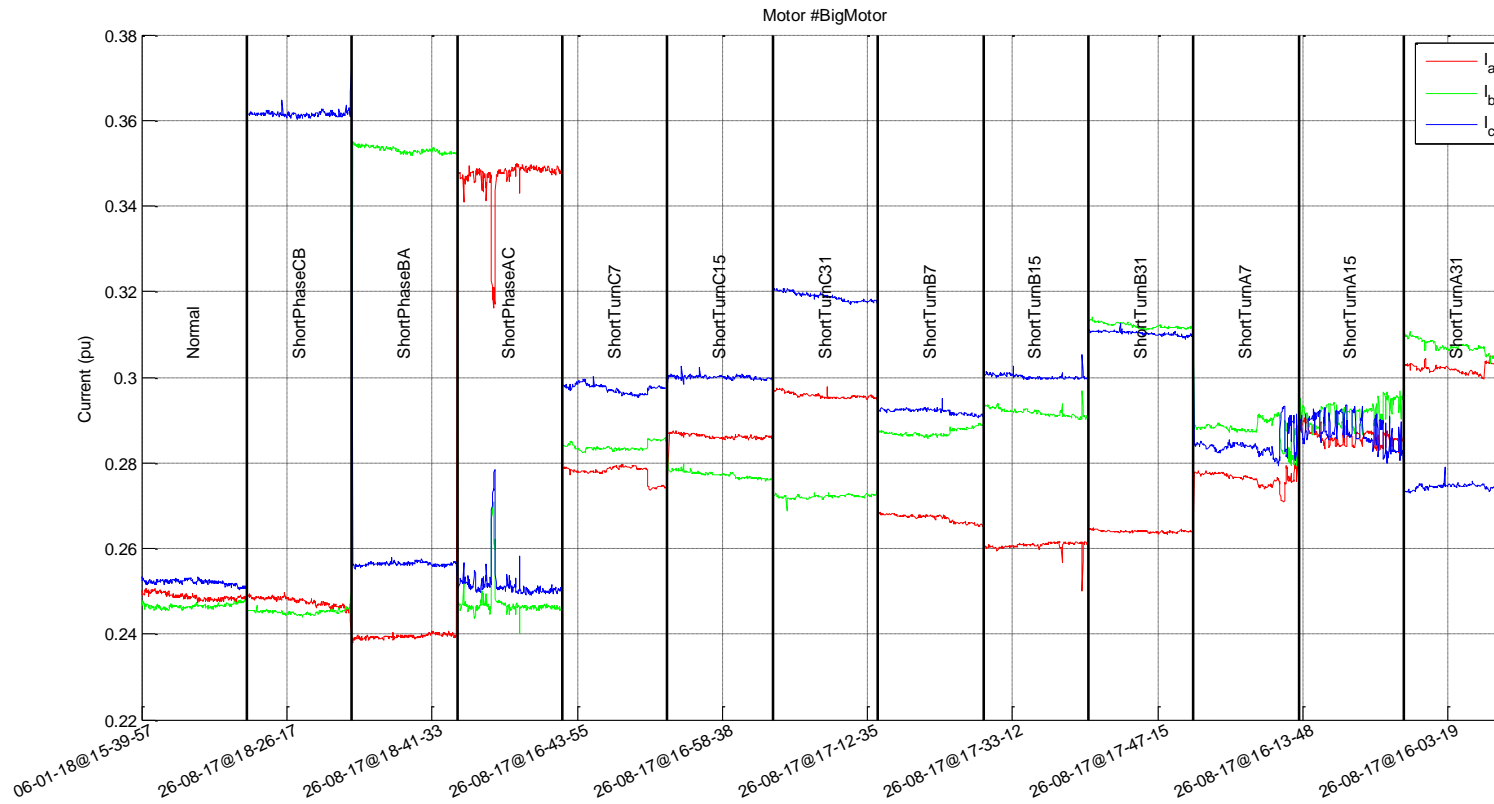
ลัทธิของขดลวด ตามลำดับ โดยจะมีค่าอิมพีแดนซ์ลดน้อยลงเมื่อมีการลัทธิของขดลวดจำนวนมากขึ้น แสดงดังภาพประกอบ 4-21

ค่าเปอร์เซ็นต์ตัวประกอบการแผ่กระจายจะมีค่าสูงขึ้นกว่าค่าปกติเมื่อมีความผิดปกติเกิดขึ้นดังภาพประกอบ 4-22 ในขณะที่ค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้า เฟส A, B, C จะมีค่าลดลงในเฟสที่มีความผิดปกติเกิดขึ้น และมีค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนไฟฟ้า เฟส A, B, C เพิ่มขึ้นในเฟสที่มีความผิดปกติ กรณีที่เกิดการลัดวงจรระหว่างเฟส ดังภาพประกอบ 4-23 และ ภาพประกอบ 4-24 ตามลำดับ

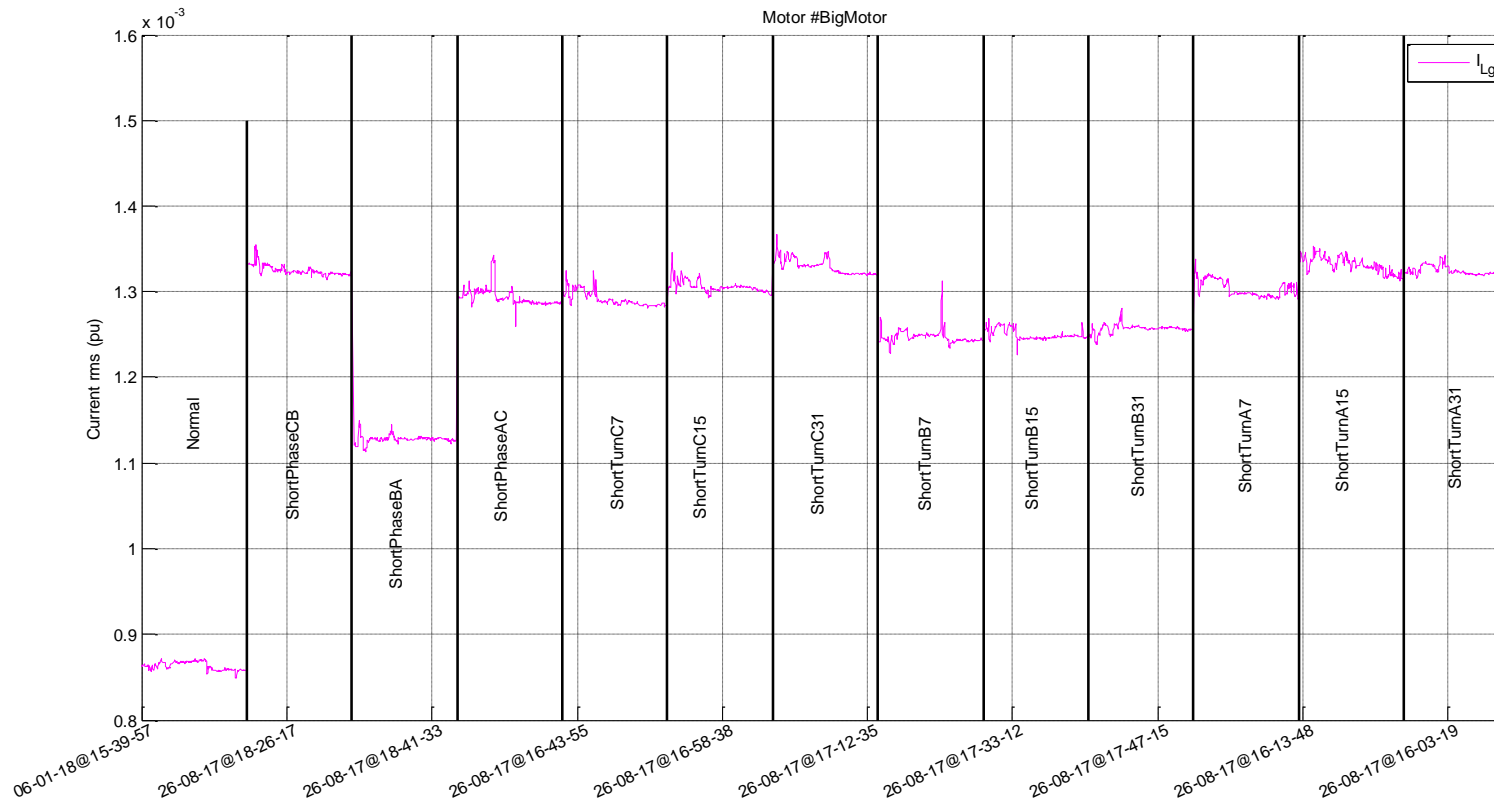
จากผลการทดลองและเปรียบเทียบค่าปริมาณทางไฟฟ้าระหว่างมอเตอร์ตัวที่ 1 และมอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ สามารถคาดเดาได้ว่ามอเตอร์ตัวที่ 1 น่าจะเกิดความผิดปกติขึ้นที่เฟส A และเฟส B เนื่องจากค่ากระแส Per unit และค่ากระแสรั่วไหล Per unit เฟส A, B มีค่าสูงเกินกว่าสภาวะปกติ อีกทั้งค่าอิมพีแดนซ์ เฟส A, B มีค่าลดน้อยลงกว่าสภาวะปกติด้วยเช่นกัน ดังนั้นเป็นไปได้ว่ามอเตอร์ตัวที่ 1 เกิดความผิดปกติคือ การลัดวงจรระหว่างเฟส $A-B$ เนื่องจากมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่ากระแส Per unit และค่ากระแสรั่วไหล Per unit คล้ายคลึงกับการเปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ แต่กรณีนั้นแล้ว ก็ยังไม่สามารถยืนยันได้อย่างชัดเจน เนื่องจากแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่ากระแส Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ทั้ง 2 ตัว ยังแตกต่างกัน ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นผลจากการจัดเรียงตัวของขดลวดที่แตกต่างกัน

ในส่วนของมอเตอร์ตัวที่ 2 คาดเดาได้ว่าน่าจะเกิดความผิดปกติขึ้นทั้งเฟส A, B, C เนื่องจากค่ากระแส Per unit และกระแสรั่วไหล Per unit ทั้ง 3 เฟสมีค่าสูงเกินจากสภาวะปกติรวมทั้งค่าอิมพีแดนซ์ของทั้ง 3 เฟสมีค่าลดน้อยลงจากสภาวะปกติด้วยเช่นกัน แต่ไม่สามารถจำแนกได้ว่าเป็นความผิดปกติชนิดใด หรืออาจจะมีความผิดปกติมากกว่า 1 ชนิดก็เป็นได้

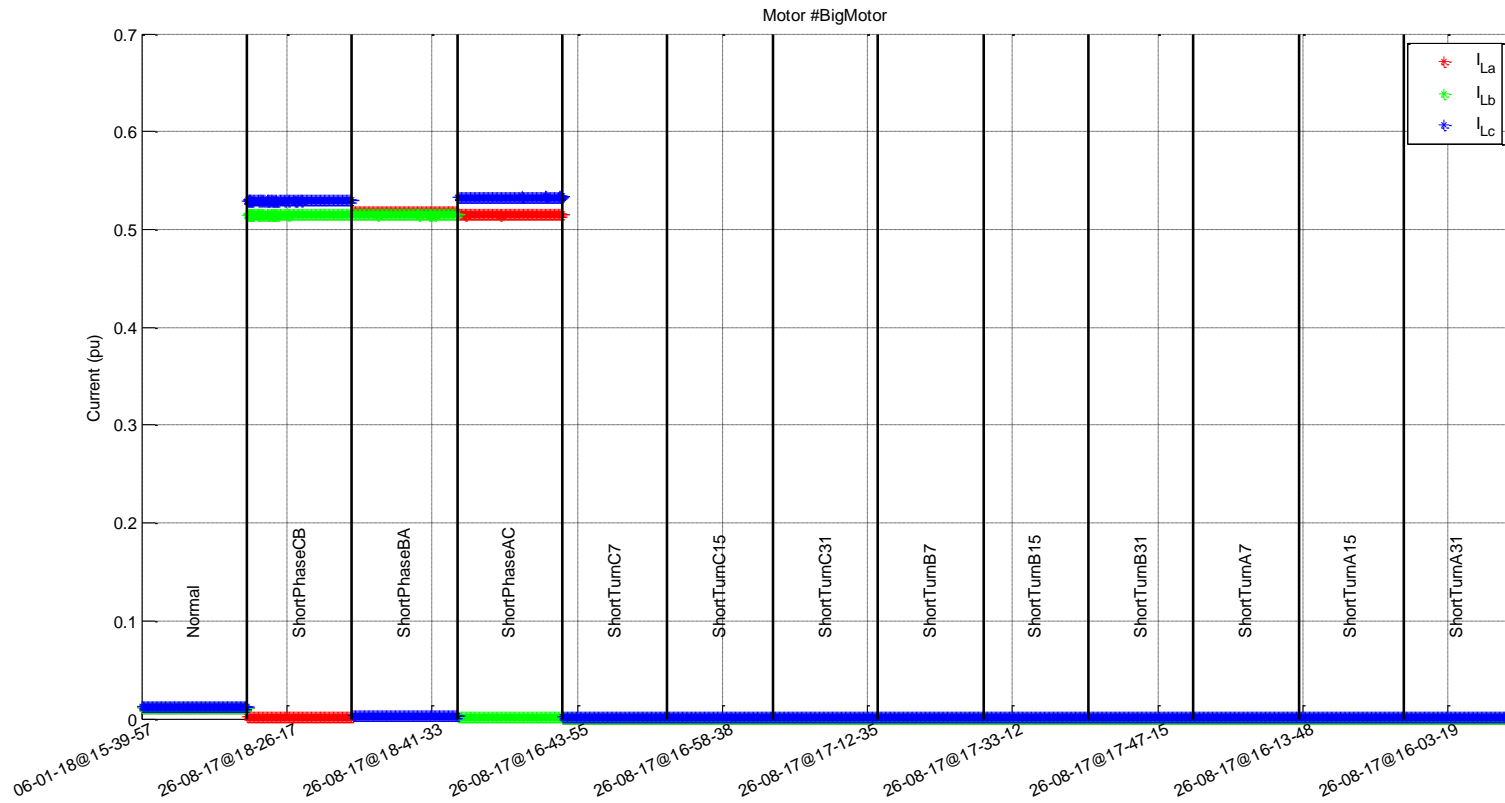
จากการวิเคราะห์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าปริมาณทางไฟฟ้าต่างๆ ตามรอบการเร่งอายุฉนวนไฟฟ้า มีความแตกต่างระหว่างสภาพฉนวนมอเตอร์ปกติ และฉนวนมอเตอร์ผิดปกติ ความแตกต่างนี้ทำให้สามารถใช้ข้อมูลปริมาณทางไฟฟ้าต่างๆ สร้างแบบจำลองการทำงานอายุการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ได้



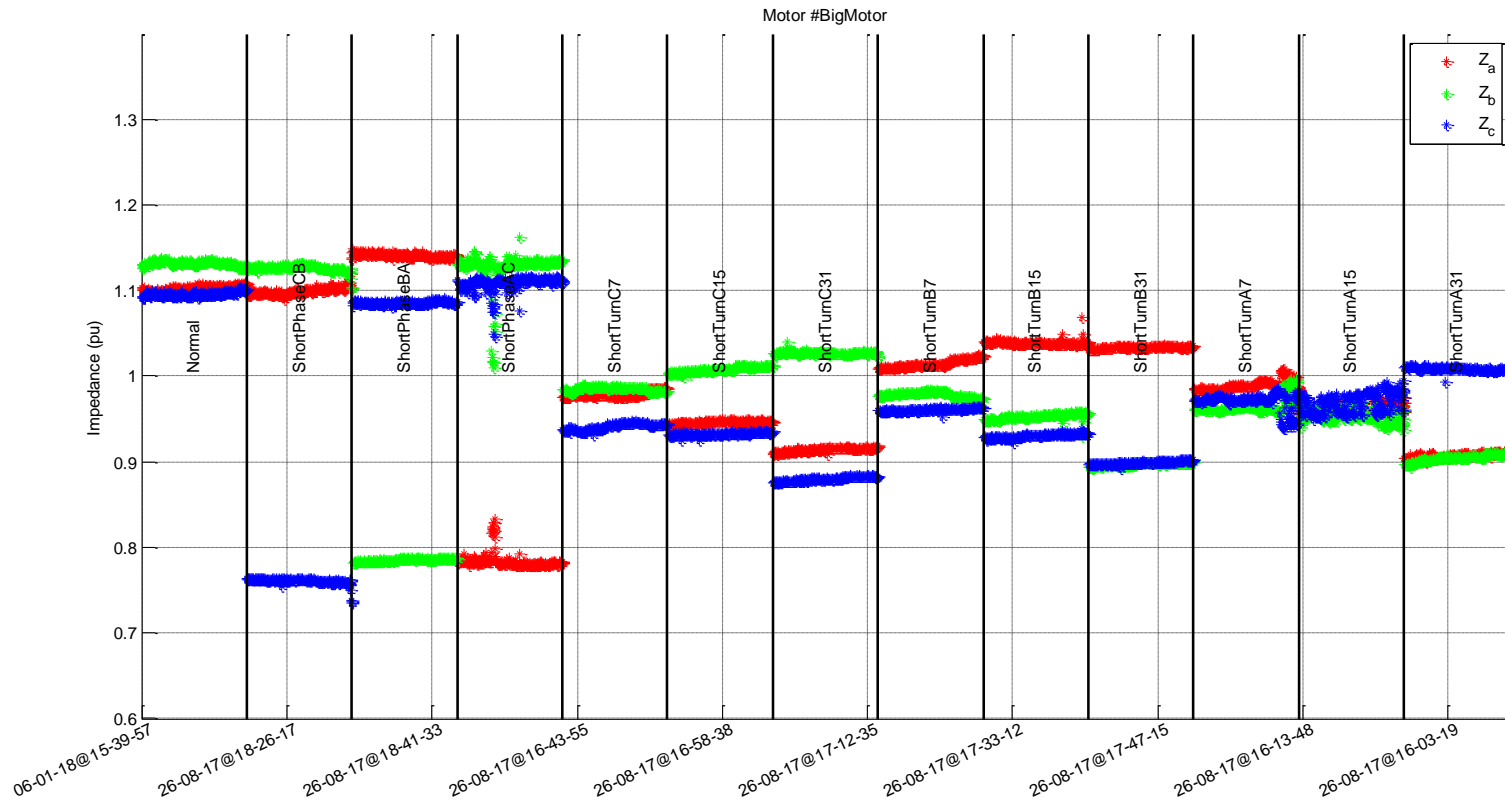
ภาพประกอบ 4-18 กราฟแสดงค่ากระแส Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ที่เกิดความผิดปกติต่างๆ



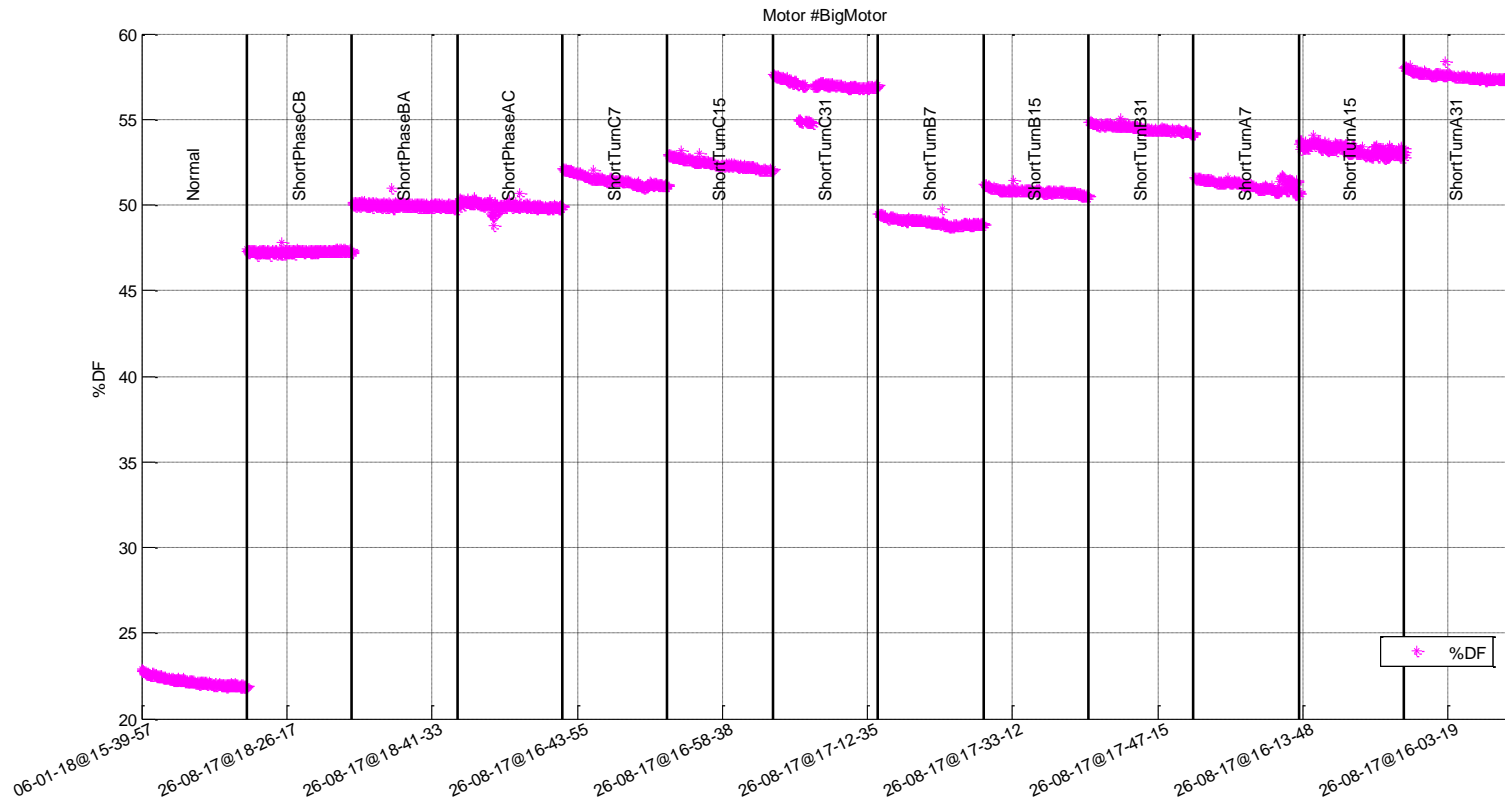
ภาพประกอบ 4-19 กราฟแสดงค่ากระแสรั่วไหลลงดิน Per unit ของมอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ที่เกิดความผิดปกติต่างๆ



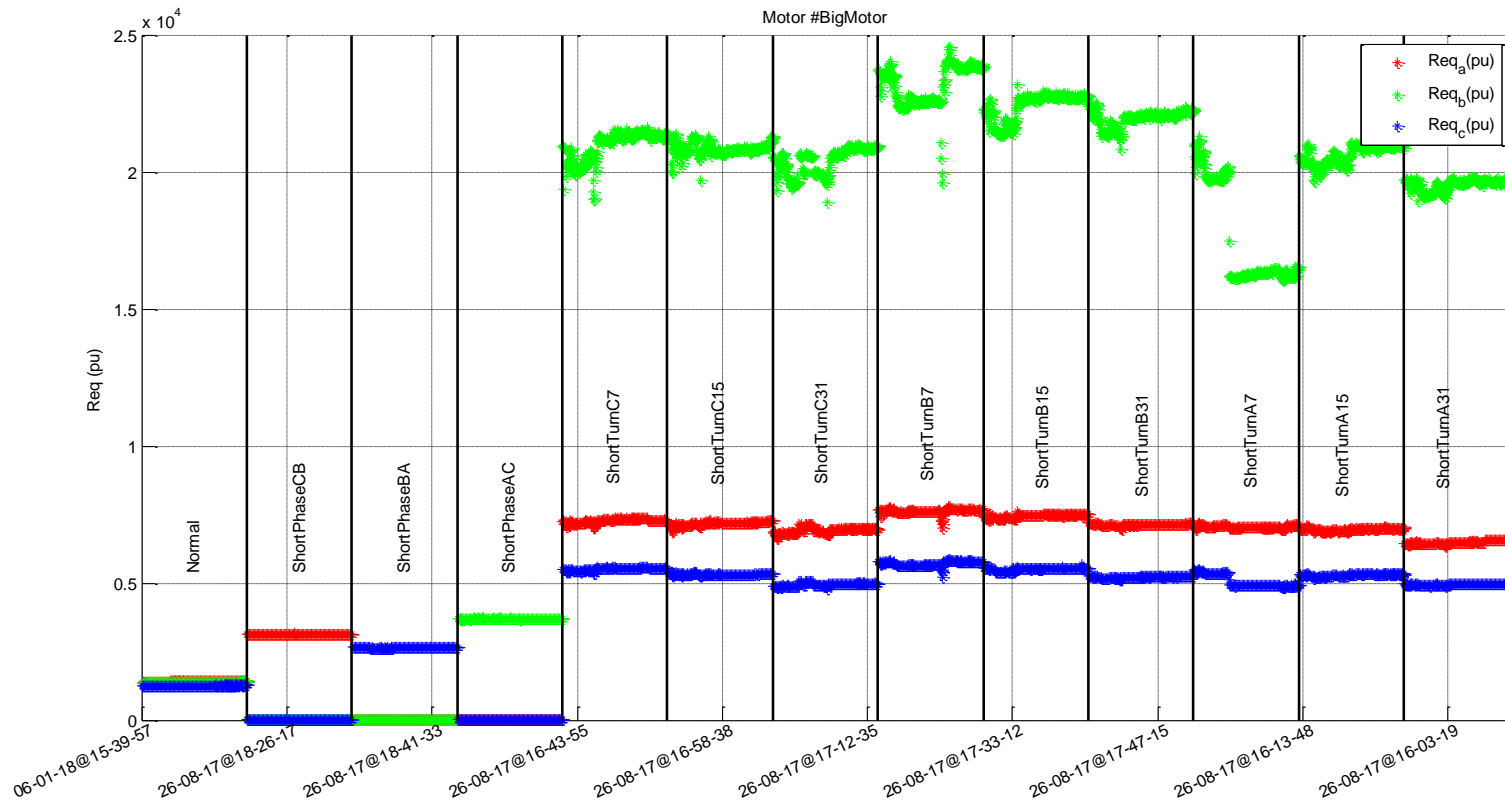
ภาพประกอบ 4-20 กราฟแสดงค่ากระแสรั่วไหล Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ที่เกิดความผิดปกติต่างๆ



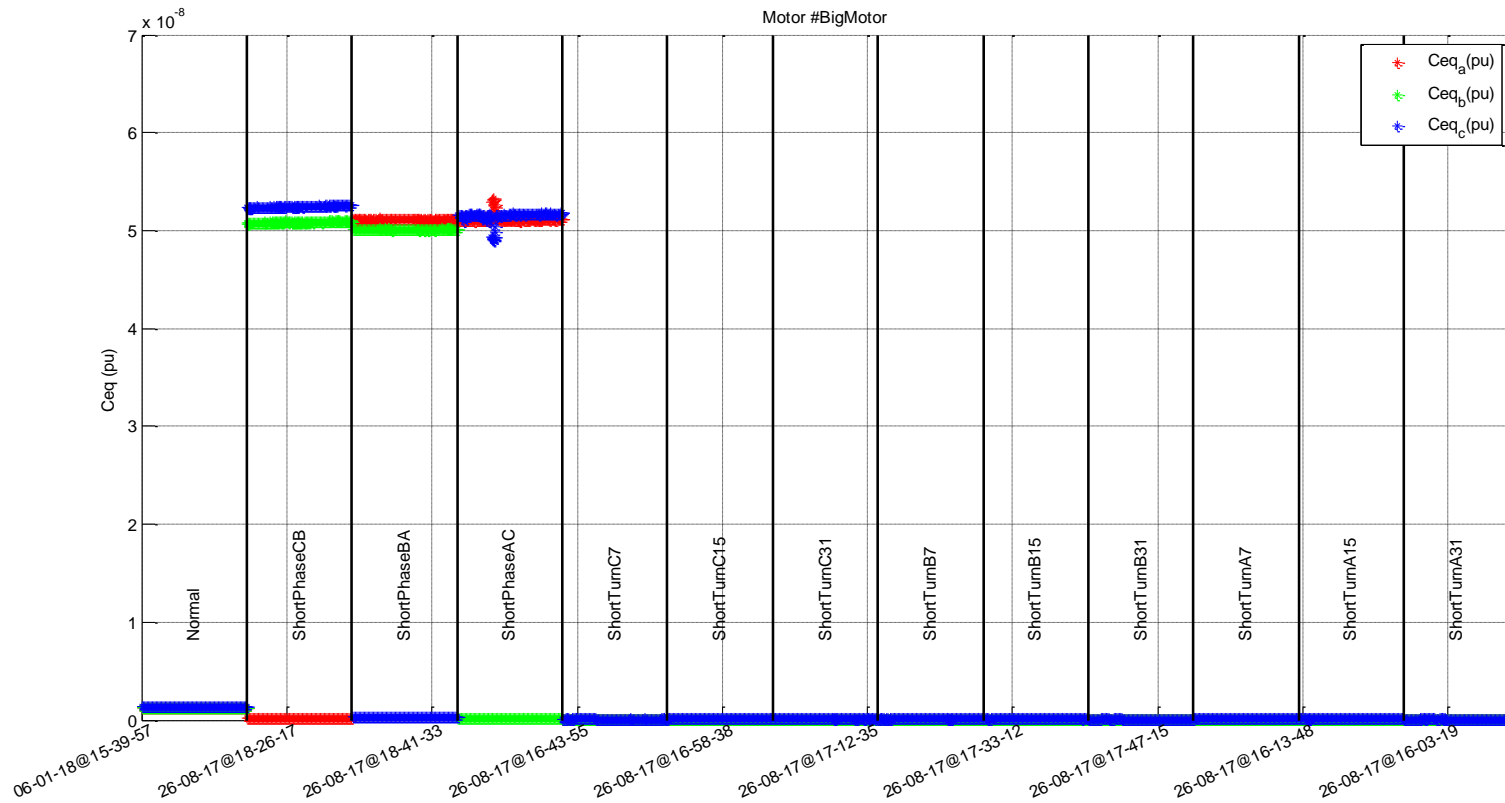
ภาพประกอบ 4-21 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ที่เกิดความผิดปกติต่างๆ



ภาพประกอบ 4-22 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ตัวประกอบการแผ่กระจาย ของมอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ที่เกิดความผิดปกติต่างๆ



ภาพประกอบ 4-23 กราฟแสดงค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้า เฟส A, B, C ของมอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ที่เกิดความผิดปกติต่างๆ



ภาพประกอบ 4-24 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนไฟฟ้าเฟส A, B, C ของมอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ที่เกิดความผิดปกติต่างๆ

บทที่ 5

การลดขนาดตัวแปร และการจำแนกประเภทข้อมูล

เนื่องจากงานวิจัยชิ้นนี้ สามารถสกัดค่าปริมาณทางไฟฟ้าจากสัญญาณกระแสและแรงดันได้ 60 ตัวแปร โดยในชุดตัวแปรนี้มีตัวแปรที่เกี่ยวข้อง และตัวแปรที่ไม่เกี่ยวข้องสำหรับการบ่งชี้สภาพฉนวนไฟฟ้า ดังนั้น ในงานวิจัยชิ้นนี้ จึงนำกระบวนการลดขนาดตัวแปรมาใช้งาน เพื่อลดความซับซ้อนและซ้ำซ้อนของข้อมูล กำจัดตัวแปรที่ไม่เกี่ยวข้องซึ่งไม่จำเป็นต่อการสร้างแบบจำลอง ทำให้ประสิทธิภาพของแบบจำลองการประมาณอายุการทำงานของมอเตอร์เพิ่มขึ้น

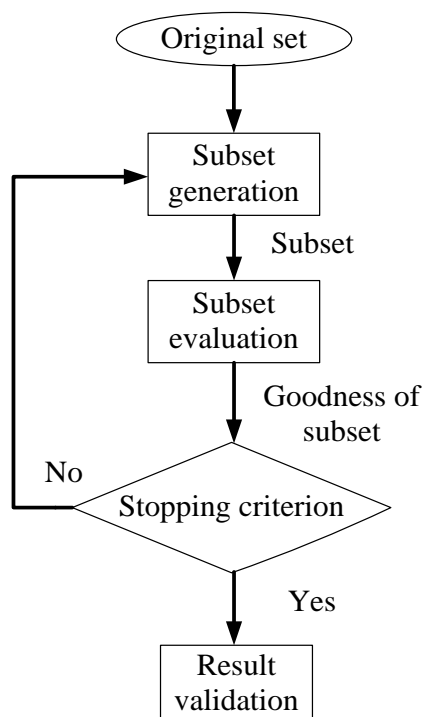
5.1 การลดขนาดตัวแปร

การลดขนาดตัวแปรเป็นกระบวนการที่มักจะถูกใช้เมื่อตัวแปรสำหรับการวินิจฉัยมีจำนวนมาก เพื่อลดความซับซ้อนของระบบวินิจฉัยโดยการกำจัดตัวแปรที่ไม่เกี่ยวข้องและมีความซ้ำซ้อน สามารถแบ่งเป็น 2 วิธีการ คือ

5.1.1 การคัดเลือกตัวแปร (Feature selection)

เป็นการคัดเลือกตัวแปรสำคัญที่อยู่ในชุดข้อมูล เพื่อช่วยลดตัวแปรที่ซ้ำซ้อน ไม่มีความเกี่ยวข้องกับการจำแนกประเภท และลดความซับซ้อนของการเก็บข้อมูล แบ่งได้เป็น 4 วิธีการ คือ **วิธีกรอง (Filter)** **วิธีห่อหุ้ม (Wrapper)** **วิธีผสม (Hybrid)** และ **วิธีฝังตัว (Embedded)** [33] โดย**วิธีกรอง** เป็นการเลือกตัวแปรโดยไม่นำอัลกอริทึมทางด้านการจำแนกประเภทมาใช้งานร่วมกับการประเมินชุดตัวแปรแต่จะใช้เทคนิคการวัดสำหรับการประเมินตัวแปร เช่น การประเมินความสัมพันธ์ของตัวแปร (Correlation based feature selection: CFS) [34] และ การประเมินความแข็งแกร่งของเซตย่อย (Consistency based subset evaluation) **วิธีห่อหุ้ม** เป็นการเลือกตัวแปรโดยนำอัลกอริทึมทางด้านการจำแนกประเภทมาใช้งานร่วมกับการประเมินตัวแปรเพื่อหาเป้าหมายและคาดคะเนค่าของชุดตัวแปร วิธีการนี้ดีกว่าวิธีกรอง แต่ใช้เวลาในการคำนวณนานกว่า **วิธีผสม** เป็นการนำข้อดีของ 2 วิธีการแรกมารวมกัน โดยเริ่มต้นจะค้นหาชุดตัวแปรที่ดีผ่านกระบวนการกรอง หลังจากนั้นจะนำชุดตัวแปรที่ได้ไปผ่านอัลกอริทึมด้านการจำแนกประเภท ซึ่งจะเลือกชุดตัวแปรที่ให้ค่าความถูกต้อง (Accuracy) มากที่สุด และ**วิธีฝังตัว** เป็นการเลือกตัวแปรที่คล้ายกับวิธีห่อหุ้ม คือนำอัลกอริทึมทางด้านการจำแนกประเภทมาใช้งานร่วมกับการประเมินตัวแปร แต่มีประสิทธิภาพสูงกว่าเนื่องจากอัลกอริทึมดังกล่าวถูกฝังอยู่ภายในแล้ว

การเลือกตัวแปรมีการทำงาน 4 ขั้นตอน [35] คือ 1) การสร้างชุดข้อมูลเซตย่อย (Subset generation) เป็นการค้นหาชุดตัวแปรโดยใช้อัลกอริทึมการค้นหา 2) การประเมินเซตย่อย จะประเมินชุดตัวแปรที่ถูกค้นหา 3) การกำหนดเกณฑ์การหยุดของอัลกอริทึมการค้นหา (Stopping criteria) 4) การตรวจสอบผลลัพธ์ (Result validation) ทำหน้าที่ตรวจสอบผลการเลือกตัวแปร กระบวนการดังกล่าวแสดงดังภาพประกอบ 5-1



ภาพประกอบ 5-1 ขั้นตอนการเลือกตัวแปร [35]

5.1.2 การสกัดตัวแปร (Feature extraction)

เป็นการลดขนาดตัวแปรโดยการแปลงชุดตัวแปรไปยังอีกมิติหนึ่งที่มีจำนวนตัวแปรน้อยกว่าชุดตัวแปรเดิมดังสมการ (5-1) เช่น วิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal component analysis: *PCA*) [36] เป็นเทคนิคที่ใช้ในการลดมิติของเวกเตอร์ตัวแปร โดยการฉายเวกเตอร์ไปบนแกนใหม่ที่เรียกว่า แกนองค์ประกอบหลัก (Principal component) ซึ่งแกนเหล่านี้มีความสำคัญมากน้อยตามค่าความแปรปรวนที่สามารถคำนวณได้จากค่าลักษณะเฉพาะ (Eigenvalue)

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ x_N \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ y_M \end{bmatrix} = f \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ x_N \end{bmatrix} \quad (5-1)$$

เมื่อ $[X]$ คือ เวกเตอร์ของชุดตัวแปรเดิม
 $[Y]$ คือ เวกเตอร์ของชุดตัวแปรใหม่
 f คือ ฟังก์ชันการแปรงชุดตัวแปร

5.2 การจำแนกประเภทข้อมูล

ในงานวิจัยจะนำข้อมูลทางไฟฟ้าที่เก็บบันทึกได้มาสกัดเป็นค่าปริมาณทางไฟฟ้าต่างๆ เพื่อสร้างแบบจำลองการประมาณอายุคนวนไฟฟ้าที่เหลืออยู่ โดยใช้การจำแนกประเภทข้อมูล ซึ่งเป็นการจัดหมวดหมู่ข้อมูลที่มีค่าไม่ต่อเนื่องและผู้ใช้จะต้องกำหนดคลาส (Class) กำกับ ในงานวิจัยเลือกใช้ตัวจำแนกประเภทข้อมูลที่เป็นที่นิยม ได้แก่ การประมาณแบบนาอิวเบย์ (Naïve-Bayes) การค้นหาเพื่อนบ้านใกล้สุด k อันดับ (k-Nearest Neighbor) การสร้างต้นไม้ตัดสินใจ (Decision tree) และโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network) โดยใช้ค่าความถูกต้องการ จัดหมวดหมู่เหล่านี้มาเปรียบเทียบกัน เพื่อพิจารณาประสิทธิภาพของแบบจำลอง การจำแนกประเภทแต่ละวิธีมีรายละเอียดดังนี้

5.2.1 การประมาณแบบนาอิวเบย์ (Naïve-Bayes) [37]

นาอิวเบย์ คือ โมเดลการจำแนกกลุ่มที่ใช้หลักความน่าจะเป็นซึ่งอยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีของเบย์ (Bayesian theorem) และมีสมมติฐานของการเป็นอิสระต่อกันของตัวแปรอิสระทุกตัว โดยจะเลือกประเภทกลุ่มจากค่าความน่าจะเป็นสูงสุด มีกระบวนการทำงานดังนี้

1) คำนวณค่าความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ x_1, x_2, \dots, x_m ด้วยเงื่อนไข ω_i ดังนี้

$$P(x_1, x_2, \dots, x_m | \omega_i) = P(x_1 | \omega_i) \cdot P(x_2 | \omega_i) \cdot \dots \cdot P(x_m | \omega_i) \quad (5-2)$$

เมื่อ x_1, x_2, \dots, x_m คือ ข้อมูลของตัวแปร (Feature) ที่ 1, 2, ..., m

ω_i คือ ประเภทกลุ่มที่ต้องการจำแนก (Class)

2) คำนวณค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิด $\omega_i : P(\omega_i)$

3) คำนวณค่าความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ ω_i ด้วยเงื่อนไข x_1, x_2, \dots, x_m ดังนี้

$$P(\omega_i | x_1, x_2, \dots, x_m) = P(x_1, x_2, \dots, x_m | \omega_i) \cdot P(\omega_i) \quad (5-3)$$

4) พิจารณาค่าที่คำนวณได้จากข้อที่ 3) ตามกรณีของประเภทกลุ่มต่างๆ หากกลุ่มใดให้ค่าความน่าจะเป็นที่คำนวณได้จากข้อ 3) สูงสุด แสดงว่าข้อมูลชุดนี้จำแนกเป็นกลุ่มดังกล่าว

5.2.2 การค้นหาเพื่อนบ้านใกล้สุด k อันดับ (k-Nearest Neighbor)

เป็นวิธีการจัดแบ่งคลาสของข้อมูลโดยการพิจารณาค่าระยะห่างรวมระหว่างแต่ละตัวแปรในข้อมูล เป็นจำนวน k ตัวอย่าง (มักกำหนดค่าล่วงหน้าเป็นจำนวนคี่) ที่มีค่าระยะห่างรวมกันน้อยที่สุด จาก k ตัวอย่างนี้ จึงนำมานับจำนวนคลาส หากมีคลาสใดมากที่สุดจะถือว่าข้อมูลนี้เป็นคลาสดังกล่าวทันที สมการในการคำนวณระยะห่างมีหลายสมการเช่น Euclidean, Manhattan, Minkowski เป็นต้น แสดงดัง (5-4) - (5-6)

$$Distance_{Euclidean} = \sqrt{\sum_{i=1}^k (x_i - y_i)^2} \quad (5-4)$$

$$Distance_{Manhattan} = \left| \sum_{i=1}^k (x_i - y_i) \right| \quad (5-5)$$

$$Distance_{Minkowski} = \left(\sqrt[q]{\sum_{i=1}^k (x_i - y_i)^q} \right)^{1/q} \quad (5-6)$$

เมื่อ	x_i	คือ ค่าข้อมูล Test ของ Feature ที่ i
	y_i	คือ ค่าข้อมูลตัวอย่างของ Feature ที่ i
	k	คือ จำนวน Feature ทั้งหมด
	q	คือ จำนวนเต็มที่กำหนดขึ้นมา

5.2.3 การสร้างต้นไม้ตัดสินใจ (Decision tree)

การจำแนกข้อมูลด้วยต้นไม้ตัดสินใจ เป็นตัวจำแนกประเภทที่มีวิธีการเรียนรู้ที่ไม่ซับซ้อน มีโครงสร้างเป็นต้นไม้ แตกแขนงไปตามเงื่อนไขหรือข้อมูลที่ได้คาดคะเนไว้ว่าจะเกิดขึ้น ใช้สำหรับการตัดสินใจจำแนกข้อมูลออกเป็นคลาส (Class) ต่างๆ ต้นไม้ตัดสินใจ ประกอบด้วย

1) โหนดภายใน (Internal node) คือ ตัวแปรต่างๆ ของข้อมูล ซึ่งใช้ในการตัดสินใจจำแนกข้อมูล โดยโหนดเริ่มต้น เรียกว่า โหนดราก

2) กิ่ง (Branch, link) คือ ค่าของตัวแปรในโหนดที่ใช้สำหรับการจำแนกข้อมูล ซึ่งโหนดภายในจะแตกกิ่งเป็นจำนวนเท่ากับจำนวนค่าของตัวแปรของโหนดภายใน

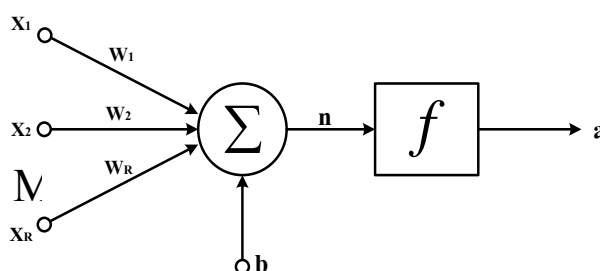
3) โหนดใบ (Leaf node) คือ คลาสต่างๆ ซึ่งเป็นผลลัพธ์ในการจำแนกข้อมูล

ตัวจำแนกข้อมูลประเภทนี้จะมีกระบวนการคัดเลือกตัวแปรอยู่ภายใน โดยการใช้ค่า Informaiton gain สำหรับเลือกตัวแปรในแต่ละโหนดของต้นไม้ ซึ่งค่า Information gain นี้ คล้ายกับค่าความสัมพันธ์ (Correlation) ระหว่างตัวแปรกับคลาส หลังจากสร้างต้นไม้ตัดสินใจตามการพิจารณาค่า Information gain ได้แล้ว จะอาศัยเงื่อนไขตามต้นไม้เป็นตัวช่วยในการตัดสินใจ เมื่อเหตุการณ์ใดๆ เกิดขึ้น

5.2.4 โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network: ANNs) [37]

โครงข่ายประสาทเทียมเป็นการจำลองการทำงานของสมองมนุษย์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยมีแนวคิดที่ต้องการให้คอมพิวเตอร์มีความชาญฉลาดในการเรียนรู้เหมือนที่มนุษย์มีการเรียนรู้ สามารถฝึกฝน และสามารถนำความรู้และทักษะไปแก้ปัญหาต่างๆ ได้ การทำงานของโครงข่ายประสาทในสมองมนุษย์ ประกอบด้วย เซลล์ประสาท (Neurons) จุดประสานประสาท (Synapses) ปลายรับกระแสประสาท เรียกว่า เดนไดรต์ (Dendrite) และปลายส่งกระแสประสาท เรียกว่า แอกซอน (Axon) เซลล์ประสาทเหล่านี้จะทำงานด้วยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีและทำงานเชื่อมต่อกันระหว่างเซลล์ประสาทจนเกิดเป็นโครงข่ายทำงานร่วมกัน สำหรับโครงข่ายประสาทเทียมในคอมพิวเตอร์จะมีโหนดที่ประกอบด้วย อินพุตและเอาต์พุตเช่นกัน โดยอินพุตแต่ละอันจะมีค่าน้ำหนัก (Weight) เป็นตัวกำหนดน้ำหนักของอินพุต และนิวรอนแต่ละหน่วยจะมีค่าเกณฑ์ซึ่งกำหนดโดยฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) เป็นตัวบ่งชี้ว่าน้ำหนักรวมของอินพุตต้องมากขนาดไหนจึงจะสามารถส่งเอาต์พุตไปยังนิวรอนตัวอื่นได้ เมื่อนำนิวรอนแต่ละหน่วยมาต่อให้ทำงานร่วมกัน เกิดเป็นโครงข่ายประสาทเทียม เหมือนปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในสมองมนุษย์

โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ชั้นอินพุต (Input layer) ชั้นซ่อน (Hidden layer) และชั้นเอาต์พุต (Output layer) โดยทุกรูปแบบของโครงข่ายประสาทเทียมจะประกอบด้วยส่วนของชั้นอินพุตและชั้นเอาต์พุต แต่แตกต่างกันที่จำนวนชั้นซ่อน จำนวนอินพุต จำนวนเอาต์พุต และจำนวนโหนดในแต่ละชั้นซ่อน แสดงโครงสร้างอย่างง่ายของโครงข่ายประสาทเทียมดังภาพประกอบ 5-2



ภาพประกอบ 5-2 โครงข่ายประสาทเทียมแบบเปอร์เซ็ปตรอน

การทำงานของโครงข่ายประสาทเทียมจะต้องป้อนข้อมูลให้กับโครงข่ายเพื่อให้โครงข่ายเกิดการเรียนรู้รูปแบบ ซึ่งการเรียนรู้รูปแบบของโครงข่ายคือการปรับค่าน้ำหนักและค่าเอนเอียง (Bias) ที่เป็นพารามิเตอร์ในการคำนวณค่าเอาต์พุต จนกว่าจะได้ค่าน้ำหนักและค่าเอนเอียงที่สามารถคำนวณค่าเอาต์พุตใกล้เคียงกับค่าเอาต์พุตที่ต้องการ (Target) มากที่สุด สมการในการคำนวณเอาต์พุต ค่าความผิดพลาด ปรับค่าน้ำหนัก และปรับค่าเอนเอียงแสดงใน (5-7) - (5-10) ตามลำดับ หลังจากสามารถสอนรูปแบบให้กับโครงข่ายได้แล้วจะนำค่าน้ำหนักและค่าเอนเอียงนี้ไปใช้งานต่อไป

$$a_k = f(\mathbf{W}_k \times \mathbf{p} + b_k) \quad (5-7)$$

$$e_k = t - a_k \quad (5-8)$$

$$\mathbf{W}_{k+1} = \mathbf{W}_k + e_k \cdot \mathbf{p} \quad (5-9)$$

$$b_{k+1} = b_k + e_k \quad (5-10)$$

เมื่อ	a_k	คือ ค่าเอาต์พุต
	f	คือ ฟังก์ชันถ่ายโอน
	e_k	คือ ค่าความผิดพลาด
	t	คือ ค่าตอบที่ต้องการ (Target)
	\mathbf{p}	คือ เวกเตอร์ของอินพุต
	\mathbf{W}_k	คือ เมทริกซ์ของค่าน้ำหนักเก่า
	\mathbf{W}_{k+1}	คือ เมทริกซ์ของค่าน้ำหนักใหม่
	b_k	คือ ค่าเอนเอียงเก่า
	b_{k+1}	คือ ค่าเอนเอียงใหม่

5.2.5 การเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับ

การเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม คือ การปรับค่าน้ำหนักและค่าเอนเอียง ที่เป็นพารามิเตอร์ในการคำนวณค่าเอาต์พุต จนค่าน้ำหนักและค่าเอนเอียงที่ได้สามารถคำนวณค่าเอาต์พุตที่ใกล้เคียงกับค่าเอาต์พุตที่ต้องการ โดยกระบวนการในการปรับค่าน้ำหนักและค่าเอนเอียงนั้นมีหลายกระบวนการ แต่ที่นิยมใช้ คือ การเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับ (Backpropagation)

ขั้นตอนการปรับค่าน้ำหนักและค่าเอนเอียงนี้มีหลายวิธีการ เช่น Gradient Descent, Gradient Descent with Adaptive Learning Rate, Gradient Descent with Momentum, Gradient Descent with Momentum and Adaptive Learning Rate, Resilient, Rayesian Regularization และ Levenberg-Marquardt เป็นต้น โดยวิธีการที่จะกล่าวถึงในงานวิจัยชิ้นนี้คือ วิธี Levenberg-

Marquardt Algorithm เนื่องจากเป็นวิธีการที่เหมาะสมในการแก้ปัญหาประเภทการประมาณค่า และเป็นวิธีที่มีความรวดเร็วในการปรับค่าน้ำหนักและค่าเอนเอียง มีสมการในการปรับค่าดังนี้

$$x_{new} = x_{old} + \Delta x \quad (5-11)$$

$$x_{new} = x_{old} - [\mathbf{J}^T \cdot \mathbf{J} + \mu \mathbf{I}]^{-1} \cdot \mathbf{J}^T \quad (5-12)$$

$$g = \mathbf{J}^T \cdot \mathbf{e} \quad (5-13)$$

- เมื่อ x คือ ค่าน้ำหนัก (Weight) และค่าเอนเอียง (Bias)
- \mathbf{J} คือ จาโคเบียนเมทริกซ์ (Jacobian Matrix) ของอนุพันธ์ของค่าผิดพลาด (แต่ละค่าต่อค่า x (แต่ละค่า))
- g คือ Gradient Factor
- \mathbf{e} คือ เมทริกซ์ของค่าผิดพลาด (Error) ระหว่างเอาต์พุตที่ต้องการ (Target) และเอาต์พุต (Output)
- \mathbf{I} คือ เมทริกซ์เอกลักษณ์
- μ คือ Mu Factor หรือ Learning Factor

จาโคเบียนเมทริกซ์ของค่าน้ำหนัก (Weigh, w)

$$\mathbf{J}(w) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1}{\partial w_{1,1}} & \frac{\partial e_1}{\partial w_{1,2}} & \Lambda & \frac{\partial e_1}{\partial w_{1,s2}} \\ \frac{\partial e_2}{\partial w_{2,1}} & \frac{\partial e_2}{\partial w_{2,1}} & \Lambda & \frac{\partial e_2}{\partial w_{2,s2}} \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & \Lambda & \mathbf{M} \\ \frac{\partial e_{s3}}{\partial w_{s3,1}} & \frac{\partial e_{s3}}{\partial w_{s3,2}} & \Lambda & \frac{\partial e_{s3}}{\partial w_{s3,s2}} \end{bmatrix} \quad (5-14)$$

จาโคเบียนเมทริกซ์ของค่าเอนเอียง (Bias, b)

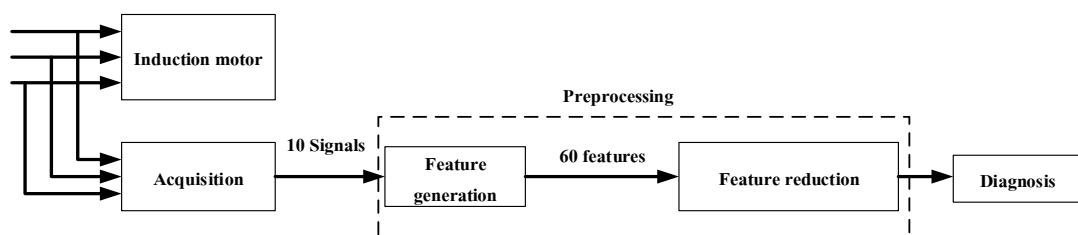
$$\mathbf{J}(b) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1}{\partial b_1} \\ \frac{\partial e_2}{\partial b_2} \\ \mathbf{M} \\ \frac{\partial e_{s3}}{\partial b_{s3}} \end{bmatrix} \quad (5-15)$$

เมทริกซ์ของค่าผิดพลาด (Error, e)

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_{s3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_1 - o_1 \\ t_2 - o_2 \\ \vdots \\ t_{s3} - o_{s3} \end{bmatrix} \quad (5-16)$$

5.3 การออกแบบการสร้างแบบจำลองประมาณอายุการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

การสร้างแบบจำลองประมาณอายุการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะใช้สัญญาณทางไฟฟ้าที่เก็บข้อมูลได้ นำมาคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้าของมอเตอร์ตามตาราง 1-8 เพื่อสร้างเป็นตัวแปรดั้งเดิม 60 ตัวแปร แล้วนำตัวแปรเหล่านี้ผ่านกระบวนการลดขนาดตัวแปร เพื่อจำแนกข้อมูลต่อไป แสดงกระบวนการสร้างแบบจำลองดังภาพประกอบ 5-3

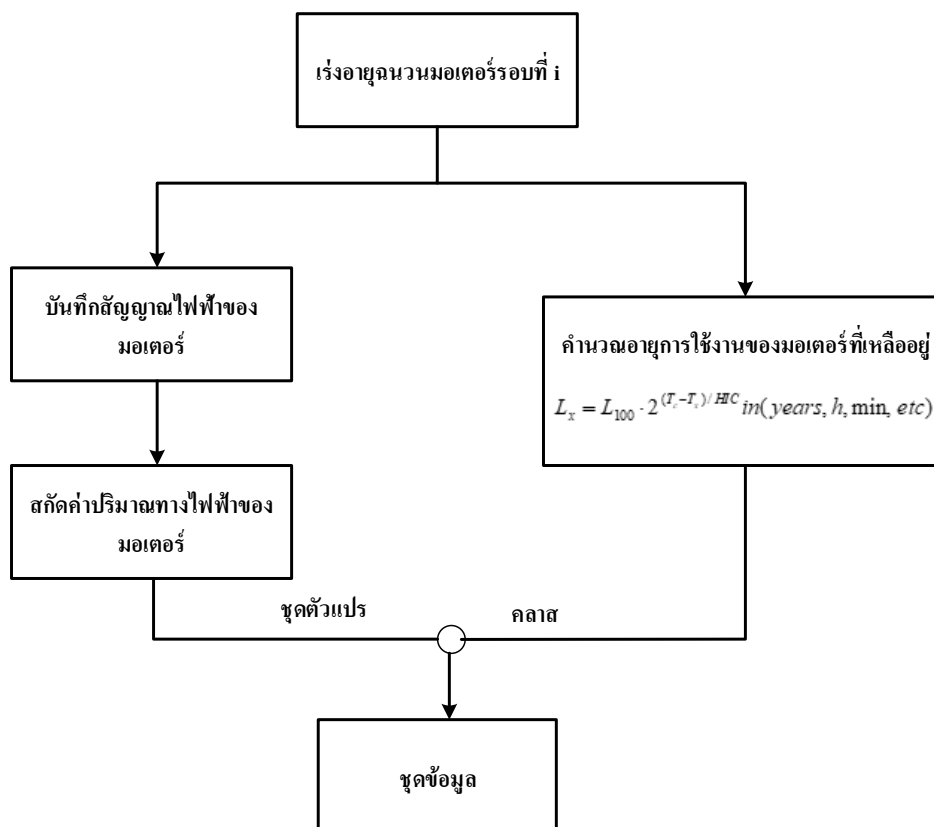


ภาพประกอบ 5-3 กระบวนการสร้างแบบจำลอง

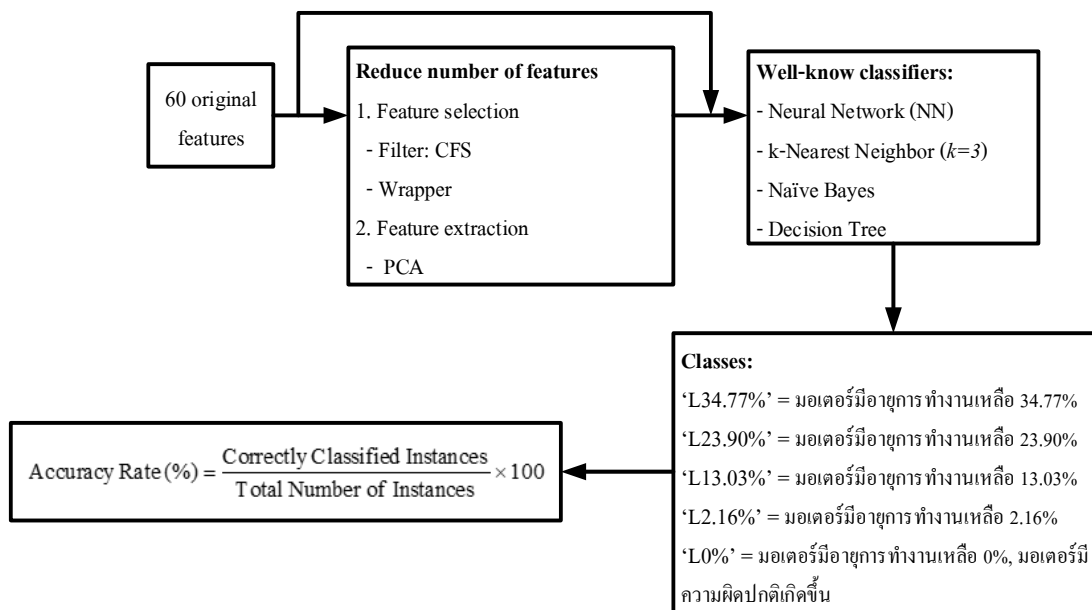
โดยเบื้องต้นผู้วิจัยจะทดลองนำข้อมูลของมอเตอร์ตัวที่ 2 ซึ่งมีจำนวนตัวแปร 60 ตัวแปร จำนวนข้อมูลทั้งหมด 55732 จำนวน และแบ่งคลาสข้อมูลออกเป็น 5 คลาส อธิบายดังตาราง 5-1 ซึ่งคลาสในการจำแนกประเภทข้อมูลถูกกำหนดขึ้นจากการคำนวณอายุการทำงานที่เหลืออยู่ของฉนวนไฟฟ้าในแต่ละรอบการเร่งอายุฉนวนไฟฟ้า ตามหัวข้อ 3.2 หรือสามารถแสดงการกำหนดคลาสดังภาพประกอบ 5-4 การสร้างแบบจำลองจำแนกอายุการทำงานของมอเตอร์ที่เหลืออยู่จะใช้ตัวจำแนกประเภท 4 ตัวที่ได้รับความนิยม ได้แก่ 1) การประมาณแบบนาอิวเบย์ 2) การค้นหาเพื่อนบ้านใกล้สุด k อันดับ ($k = 3$) 3) การสร้างต้นไม้ตัดสินใจ (Decision tree) 4) โครงข่ายประสาทเทียม (NN) โดยแบ่งข้อมูลสำหรับการเรียนรู้ (Train) 80% สำหรับการทดสอบ (Test) 20% รวมทั้งใช้การลดขนาดตัวแปรเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแบบจำลอง โดยจะพิจารณาประสิทธิภาพของแบบจำลองจากค่าความถูกต้องในการจำแนกประเภท (Accuracy rate) แสดงกระบวนการออกแบบการทดลองเพื่อสร้างแบบจำลองดังภาพประกอบ 5-5

คลาส	คำอธิบาย
L34.77%	มอเตอร์มีอายุการทำงานเหลือ 34.77%
L23.90%	มอเตอร์มีอายุการทำงานเหลือ 23.90%
L13.03%	มอเตอร์มีอายุการทำงานเหลือ 13.03%
L2.16%	มอเตอร์มีอายุการทำงานเหลือ 2.16%
L0%	มอเตอร์มีอายุการทำงาน 0%, มอเตอร์มีความผิดปกติเกิดขึ้น

ตาราง 5-1 คำอธิบายคลาสของชุดข้อมูล



ภาพประกอบ 5-4 การกำหนดคลาสข้อมูล



ภาพประกอบ 5-5 วิธีการทดลองเพื่อสร้างแบบจำลอง

บทที่ 6

ผลการสร้างแบบจำลองการประมาณอายุการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำและ การวิเคราะห์

จากการทดลองสร้างแบบจำลองการประมาณอายุการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่เหลืออยู่แสดงค่าความถูกต้องในการจำแนกอายุการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่เหลืออยู่ดังตาราง 6-1

ภาพประกอบ 6-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประเมินชุดตัวแปรและอัลกอริทึมการค้นหาชุดตัวแปรกับค่าความถูกต้องเฉลี่ยโดยเรียงลำดับตามค่าความถูกต้องเฉลี่ยจากมากไปน้อย พบว่า ตัวแปรที่ถูกค้นหาด้วยวิธีการ Best First, Greedy Stepwise และ Linear forward Selection ซึ่งมีจำนวน 16 ตัว ได้แก่ $I_{c(pu)}$, $\%THD(I_b)$, $\%THD(I_c)$, $\%THD(V_b)$, $P_{c(pu)}$, $Q_{c(pu)}$, pf , $Z_{c(pu)}$, $Z_{p(pu)}$, $DF(\%)$, $C_{eq,b(pu)}$, $C_{eq,c(pu)}$, $SigPow_{120-180Hz,a}(u)$, $SigPow_{120-180Hz,c}(u)$, $SigPow_{120-180Hz,b}(u)$, $I_{100Hz(pu)}$ ให้ค่าความถูกต้องเฉลี่ยอยู่ในช่วง 98.51-98.56% ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงกว่าการใช้ชุดตัวแปรดั้งเดิม และการใช้ชุดตัวแปรที่ได้จากการสกัดตัวแปร (Feature extraction) สำหรับภาพประกอบ 6-2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประเมินชุดตัวแปรกับค่าความถูกต้องเฉลี่ย พบว่าการประเมินชุดตัวแปรด้วยการ Filter ด้วยวิธี CFS ให้ค่าความถูกต้องเฉลี่ยสูงสุด ซึ่งตัวประเมินชุดตัวแปรวิธีการนี้เป็นการคัดเลือกตัวแปรโดยใช้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรและคลาส ขณะที่การค้นหาชุดตัวแปรให้เหลือ 16 ตัว ให้ค่าความถูกต้องสูงกว่าการค้นหาตัวแปรด้วยวิธีการอื่นๆ และ 16 ตัวแปรนี้มักถูกคัดเลือกให้อยู่ในกลุ่มตัวแปรของการค้นหาตัวแปรด้วยวิธีการอื่น แสดงดังภาพประกอบ 6-3 ดังนั้น 16 ตัวแปรนี้จึงเป็นชุดตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับการสร้างแบบจำลองการประมาณอายุจนวนไฟฟ้า สำหรับกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวจำแนกประเภทข้อมูลกับค่าความถูกต้องเฉลี่ยแสดงดังภาพประกอบ 6-4 พบว่าตัวจำแนกประเภท Decision Tree ให้ค่าความถูกต้องเฉลี่ยที่สูงในระดับ 97.97% ใกล้เคียงกับตัวจำแนกประเภท k-NN ที่ให้ค่าความถูกต้องเฉลี่ย 97.93% และ NN ที่ให้ค่าความถูกต้องเฉลี่ย 96.29% ในขณะที่ Naïve Bayes ให้ค่าความถูกต้องน้อยที่สุด 89.25%

จากการคัดเลือก 16 ตัวแปรที่เหมาะสม พบว่าตัวแปรที่ถูกคัดเลือกคือค่าปริมาณทางไฟฟ้าของบางเฟสจากมอเตอร์ 3 เฟส เท่านั้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงทดลองจัดกลุ่มตัวแปรที่มีค่าปริมาณทางไฟฟ้าเหมือน 16 ตัวแปรที่เหมาะสม ครบทั้ง 3 เฟส ซึ่งจะได้ตัวแปรทั้งหมด 28 ตัว ได้แก่ $I_{a(pu)}$, $I_{b(pu)}$, $I_{c(pu)}$, $\%THD(I_a)$, $\%THD(I_b)$, $\%THD(I_c)$, $\%THD(V_a)$, $\%THD(V_b)$, $\%THD(V_c)$, $P_{a(pu)}$, $P_{b(pu)}$, $P_{c(pu)}$, $Q_{a(pu)}$, $Q_{b(pu)}$, $Q_{c(pu)}$, pf , $Z_{a(pu)}$, $Z_{b(pu)}$, $Z_{c(pu)}$, $Z_{p(pu)}$,

$I_{100\text{Hz}(pu)}$, $C_{eq,a(pu)}$, $C_{eq,b(pu)}$, $C_{eq,c(pu)}$, $DF(\%)$, $SigPow_{120-180\text{Hz},a}(u)$, $SigPow_{120-180\text{Hz},b}(u)$, $SigPow_{120-180\text{Hz},c}(u)$ พบว่าชุดตัวแปรนี้สามารถให้ค่าความถูกต้องเฉลี่ย 99.00% (ค่าความถูกต้องเฉลี่ย พิจารณาเฉพาะตัวจำแนกประเภท Decision Tree, k-NN และ NN) ใกล้เคียงกับการใช้ 16 ตัวแปร ขณะเดียวกันผู้วิจัยได้ทดลองจัดอีก 1 ชุดตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับฉนวนไฟฟ้า มีจำนวน 11 ตัวแปร ได้แก่ $DF(\%)$, $I_{leak,g(pu)}$, $I_{leak,a(pu)}$, $I_{leak,b(pu)}$, $I_{leak,c(pu)}$, $C_{eq,a(pu)}$, $C_{eq,b(pu)}$, $C_{eq,c(pu)}$, $R_{eq,a(pu)}$, $R_{eq,b(pu)}$, $R_{eq,c(pu)}$ พบว่าให้ค่าความถูกต้องเฉลี่ย 99.72% ดังนั้น ชุดตัวแปร 16 ตัวแปรที่เหมาะสม ชุดตัวแปรที่เพิ่มข้อมูลให้ครบทั้ง 3 เฟสจาก 16 ตัวแปร (28 ตัวแปร) และ 11 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับฉนวนไฟฟ้า จัดเป็นกลุ่มตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับการสร้างแบบจำลองการจำแนกอายุการทำงานของมอเตอร์

จากตัวแปรที่มักถูกคัดเลือกต่างๆ เหล่านี้ เมื่อทดลองนำมาพล็อตกราฟการกระจาย พบว่า การกระจายของข้อมูลค่อนข้างเกาะกลุ่มแบ่งตามคลาสกันอย่างชัดเจนดังตัวอย่างภาพประกอบ 6-6 - ภาพประกอบ 6-10 และเมื่อทดลองหาค่าความสัมพันธ์ของตัวแปรและคลาสหรือค่า Merit ดังแสดงในตาราง 6-2 พบว่า ตัวแปรจาก 3 กลุ่มที่กล่าวข้างต้น มีค่า Merit ที่ค่อนข้างสูง ซึ่งกล่าวได้ว่าตัวแปรเหล่านี้มีความสัมพันธ์กับคลาสและสามารถนำมาใช้จำแนกประเภทอายุการทำงานของมอเตอร์ได้

เนื่องจากการบันทึกสัญญาณทางไฟฟ้ากระทำขณะที่มอเตอร์ไม่ได้เชื่อมต่อกับอินเวอร์เตอร์และโหลด แต่กลุ่มตัวแปร 16 ตัวและ 28 ตัว ที่ถูกคัดเลือก ซึ่งประกอบด้วยค่าปริมาณทางไฟฟ้า $I_{(pu)}$, pf , $\%THD(I)$, $\%THD(V)$, $P_{(pu)}$, $Q_{(pu)}$, $Z_{(pu)}$, $Z_{p(pu)}$, $I_{100\text{Hz}(pu)}$, $DF(\%)$, $C_{eq,a(pu)}$, $SigPow_{120-180\text{Hz}}(u)$ สามารถนำไปใช้งานกับระบบที่มีการเชื่อมต่อกับอินเวอร์เตอร์และโหลดได้ เนื่องจากภายในกลุ่มตัวแปรประกอบด้วยตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับอินเวอร์เตอร์ ได้แก่ $\%THD(I)$, $\%THD(V)$ และประกอบด้วยตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับโหลด คือ pf ขณะเดียวกันค่าปริมาณไฟฟ้าที่นำมาใช้งานผ่านการ Normalized แล้ว ดังนั้น กลุ่มตัวแปรนี้สามารถนำไปใช้เป็นตัวแปรตั้งต้นในการสร้างแบบจำลองการประมาณอายุฉนวนไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ขนาดต่างๆ ที่ภายในระบบมีการเชื่อมต่อกับอินเวอร์เตอร์และโหลดได้

Search algorithms	Subset evaluators	Number of selected features	Selected features	Accuracy rate (%)				Averaged accuracy rate (%)	Label
				NN	Naïve Bayes	kNN (k=3)	Decision Tree		
Original Features	-	60	Original Features	99.94	91.07	99.14	99.94	97.5225	Original Features (60)
Best First	CFS	16	$I_{c(pu)}, \%THD(I_b), \%THD(I_c),$ $\%THD(V_b), P_{c(pu)}, Q_{c(pu)},$ $pf, Z_{c(pu)}, Z_{p(pu)}, I_{100Hz(pu)},$ $SigPow_{120-180Hz,a}(u),$ $SigPow_{120-180Hz,b}(u),$ $SigPow_{120-180Hz,c}(u),$ $DF(\%), C_{eq,b(pu)}, C_{eq,c(pu)}$	98.44	96.33	99.35	99.92	98.51	CFS+BestFirst (16)

Search algorithms	Subset evaluators	Number of selected features	Selected features	Accuracy rate (%)				Averaged accuracy rate (%)	Label
				NN	Naïve Bayes	kNN (k=3)	Decision Tree		
คัดเลือกตัวแปรตาม CFS+BestFirst โดยเพิ่มตัวแปรให้ครบ 3 เฟส (CFS+Best First')		28	$I_{a(pu)}, I_{b(pu)}, I_{c(pu)}, \%THD(I_a),$ $\%THD(I_b), \%THD(I_c),$ $\%THD(V_a), \%THD(V_b),$ $\%THD(V_c), P_{a(pu)}, P_{b(pu)}, P_{c(pu)},$ $Q_{a(pu)}, Q_{b(pu)}, Q_{c(pu)}, pf, Z_{a(pu)},$ $Z_{b(pu)}, Z_{c(pu)}, Z_{p(pu)}, I_{100Hz(pu)},$ $SigPow_{120-180Hz,a}(u),$ $SigPow_{120-180Hz,b}(u),$ $SigPow_{120-180Hz,c}(u),$ $DF(\%), C_{eq,a(pu)}, C_{eq,b(pu)},$	97.36	92.87	99.73	99.92	97.47	CFS+BestFist' (28)

Search algorithms	Subset evaluators	Number of selected features	Selected features	Accuracy rate (%)				Averaged accuracy rate (%)	Label
				NN	Naïve Bayes	kNN (k=3)	Decision Tree		
Genetic Search	CFS	24	$I_{a(pu)}, I_{c(pu)}, \%THD(I_b),$ $\%THD(I_c), \%THD(V_b), P_{a(pu)},$ $P_{c(pu)}, P_{Total(pu)}, Q_{b(pu)}, Q_{c(pu)},$ $Q_{Total(pu)}, pf, Z_{c(pu)}, Energy,$ $I_{p(pu)}, Z_{p(pu)}, I_{100Hz(pu)},$ $SigPow_{120-180Hz,a}(u),$ $SigPow_{120-180Hz,b}(u),$ $SigPow_{120-180Hz,c}(u),$ $SigPow_{120-180Hz,b}(dB),$ $DF(\%), C_{eq,b(pu)}, C_{eq,c(pu)}$	94.77	94.9	99.68	99.93	97.32	CFS+Genetic Search (24)

Search algorithms	Subset evaluators	Number of selected features	Selected features	Accuracy rate (%)				Averaged accuracy rate (%)	Label
				NN	Naïve Bayes	kNN (k=3)	Decision Tree		
คัดเลือกตัวแปรตาม CFS+Genetic Search โดยเพิ่มตัวแปรให้ครบ 3 เฟส (CFS+Genetic Search')		35	$I_{a(pu)}, I_{b(pu)}, I_{c(pu)}, \%THD(I_a),$ $\%THD(I_b), \%THD(I_c),$ $\%THD(V_a), \%THD(V_b),$ $\%THD(V_c), P_{a(pu)}, P_{b(pu)}, P_{c(pu)},$ $P_{Total(pu)}, Q_{a(pu)}, Q_{b(pu)}, Q_{c(pu)},$ $Q_{Total(pu)}, pf, Z_{a(pu)}, Z_{b(pu)},$ $Z_{c(pu)}, Energy, I_{p(pu)}, Z_{p(pu)},$ $I_{100Hz(pu)}, SigPow_{120-180Hz,a}(u),$ $SigPow_{120-180Hz,b}(u),$ $SigPow_{120-180Hz,c}(u),$ $SigPow_{120-180Hz,a}(dB),$ $SigPow_{120-180Hz,b}(dB),$ $SigPow_{120-180Hz,c}(dB),$ $DF(\%), C_{eq,a(pu)}, C_{eq,b(pu)},$ $C_{eq,c(pu)}$	99.7	92.69	98.23	99.92	97.635	CFS+Genetic Search' (35)
Genetic Search	Wrapper	9	$V_{a(pu)}, P_{c(pu)}, Q_{a(pu)}, S_{Total(pu)},$ $Z_{c(pu)}, I_{leak,a(pu)}, I_{leak,c(pu)},$ $Z_{n(pu)}, SigPow_{120-180Hz,c}(dB)$	97.9	85.26	98.9	99.86	95.48	Wrapper+Genetic Search (9)

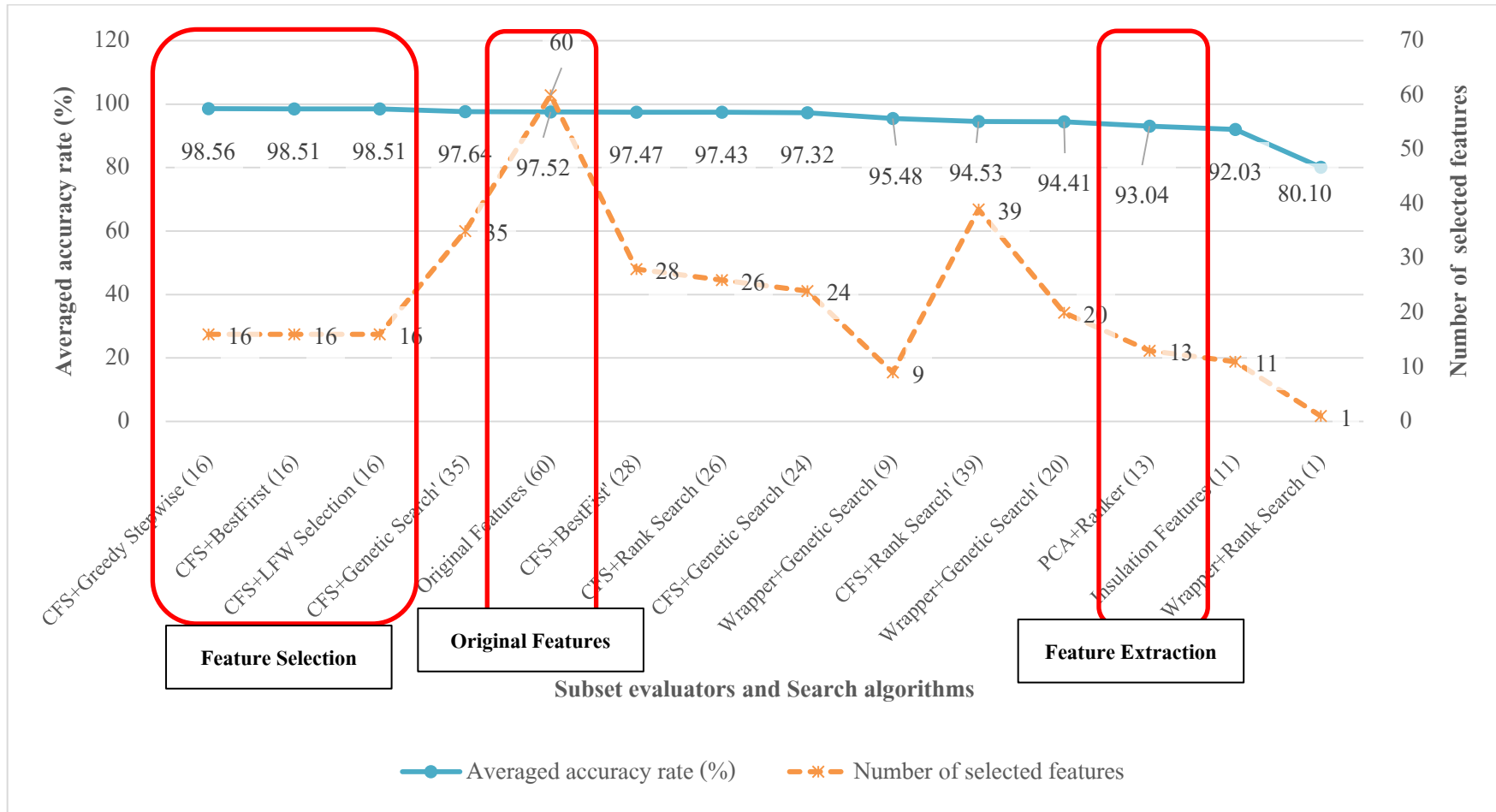
Search algorithms	Subset evaluators	Number of selected features	Selected features	Accuracy rate (%)				Averaged accuracy rate (%)	Label
				NN	Naïve Bayes	kNN (k=3)	Decision Tree		
คัดเลือกตัวแปรตาม Wrapper+Genetic โดยเพิ่มตัวแปรให้ครบ 3 เฟส (Wrapper+Genetic')		20	$V_{a(pu)}, V_{b(pu)}, V_{c(pu)}, P_{a(pu)}, P_{b(pu)},$ $P_{c(pu)}, Q_{a(pu)}, Q_{b(pu)}, Q_{c(pu)},$ $S_{Total(pu)}, Z_{a(pu)}, Z_{b(pu)}, Z_{c(pu)},$ $I_{leak,a(pu)}, I_{leak,b(pu)}, I_{leak,c(pu)},$ $Z_{n(pu)}, SigPow_{120-180Hz,a} (dB),$ $SigPow_{120-180Hz,b} (dB),$ $SigPow_{120-180Hz,c} (dB)$	98.3	83.65	95.76	99.93	94.41	Wrapper+Genetic Search' (20)
Greedy Stepwise	CFS	16	$I_{c(pu)}, \%THD(I_b), \%THD(I_c),$ $\%THD(V_b), P_{c(pu)}, Q_{c(pu)}, pf,$ $Z_{c(pu)}, Z_{p(pu)}, I_{100Hz(pu)},$ $SigPow_{120-180Hz,a} (u),$ $SigPow_{120-180Hz,b} (u),$ $SigPow_{120-180Hz,c} (u),$ $DF(\%), C_{eq,b(pu)}, C_{eq,c(pu)}$	98.58	96.37	99.38	99.92	98.5625	CFS+Greedy Stepwise (16)

Search algorithms	Subset evaluators	Number of selected features	Selected features	Accuracy rate (%)				Averaged accuracy rate (%)	Label
				NN	Naïve Bayes	kNN (k=3)	Decision Tree		
LFW Selection	CFS	16	$I_{c(pu)}, \%THD(I_b), \%THD(I_c),$ $\%THD(V_b), P_{c(pu)}, Q_{c(pu)}, Pf,$ $Z_{c(pu)}, Z_{p(pu)}, I_{100Hz(pu)},$ $SigPow_{120-180Hz,a}(u),$ $SigPow_{120-180Hz,b}(u),$ $SigPow_{120-180Hz,c}(u),$ $DF(\%), C_{eq,b(pu)}, C_{eq,c(pu)}$	98.44	96.33	99.35	99.92	98.51	CFS+LFW Selection (16)
Rank Search	CFS	26	$I_{c(pu)}, \%THD(I_b), \%THD(I_c),$ $\%THD(V_b), P_{c(pu)}, P_{Total(pu)}, Q_{c(pu)},$ $Q_{Total(pu)}, S_{c(pu)}, S_{Total(pu)}, Pf,$ $Z_{c(pu)}, Energy, I_{leak,a(pu)},$ $I_{leak,b(pu)}, I_{leak,c(pu)}, I_{p(pu)}, Z_{p(pu)}$ $I_{100Hz(pu)}, SigPow_{120-180Hz,a}(u),$ $SigPow_{120-180Hz,b}(u),$ $SigPow_{120-180Hz,c}(u),$ $DF(\%), C_{eq,a(pu)}, C_{eq,b(pu)}, C_{eq,c(pu)}$	97.99	92.6	99.2	99.93	97.43	CFS+Rank Search (26)

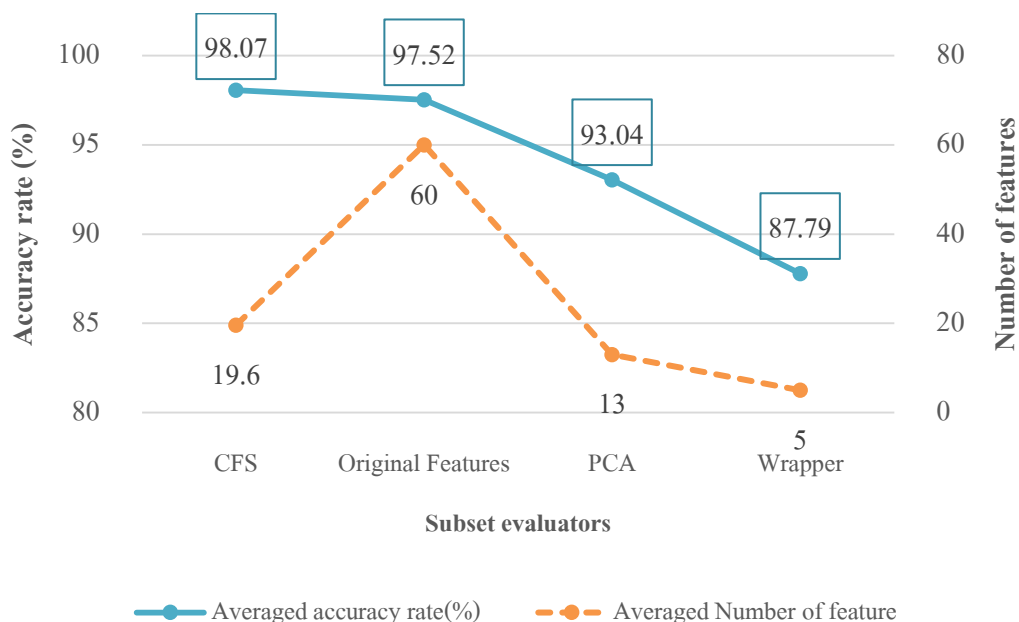
Search algorithms	Subset evaluators	Number of selected features	Selected features	Accuracy rate (%)				Averaged accuracy rate (%)	Label
				NN	Naïve Bayes	kNN (k=3)	Decision Tree		
คัดเลือกตัวแปรตาม CFS+Rank Search โดยเพิ่มตัวแปรให้ครบ 3 เฟส (CFS+Rank Search')		39	$I_{a(pu)}, I_{b(pu)}, I_{c(pu)}, \%THD(I_a),$ $\%THD(I_b), \%THD(I_c),$ $\%THD(V_a), \%THD(V_b),$ $\%THD(V_c), P_{a(pu)}, P_{b(pu)}, P_{c(pu)},$ $P_{Total(pu)}, Q_{a(pu)}, Q_{b(pu)}, Q_{c(pu)},$ $Q_{Total(pu)}, S_{a(pu)}, S_{b(pu)}, S_{c(pu)},$ $S_{Total(pu)}, Pf, Z_{a(pu)}, Z_{b(pu)},$ $Z_{c(pu)}, Energy, I_{leak,a(pu)},$ $I_{leak,b(pu)}, I_{leak,c(pu)}, I_{p(pu)}, Z_{p(pu)},$ $I_{100Hz(pu)}, SigPow_{120-180Hz,a}(u),$ $SigPow_{120-180Hz,b}(u),$ $SigPow_{120-180Hz,c}(u),$ $DF(\%), C_{eq,a(pu)}, C_{eq,b(pu)}, C_{eq,c(pu)}$	87.85	90.56	99.75	99.94	94.525	CFS+Rank Search' (39)
Rank Search	Wrapper	1	$DF(\%)$	80.02	84.63	84.24	71.49	80.095	Wrapper+Rank Search (1)
Ranker	PCA	13	-	96.47	79.41	97.73	98.56	93.0425	PCA+Ranker (13)

Search algorithms	Subset evaluators	Number of selected features	Selected features	Accuracy rate (%)				Averaged accuracy rate (%)	Label
				NN	Naïve Bayes	kNN ($k=3$)	Decision Tree		
คัดเลือกตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับฉนวนไฟฟ้า		11	$I_{leak,g(pu)}, I_{leak,a(pu)}, I_{leak,b(pu)},$ $I_{leak,c(pu)}, DF(\%), C_{eq,a(pu)},$ $C_{eq,b(pu)}, C_{eq,c(pu)}, R_{eq,a(pu)},$ $R_{eq,b(pu)}, R_{eq,c(pu)}$	99.35	68.95	99.92	99.9	92.03	Insulation Features (11)

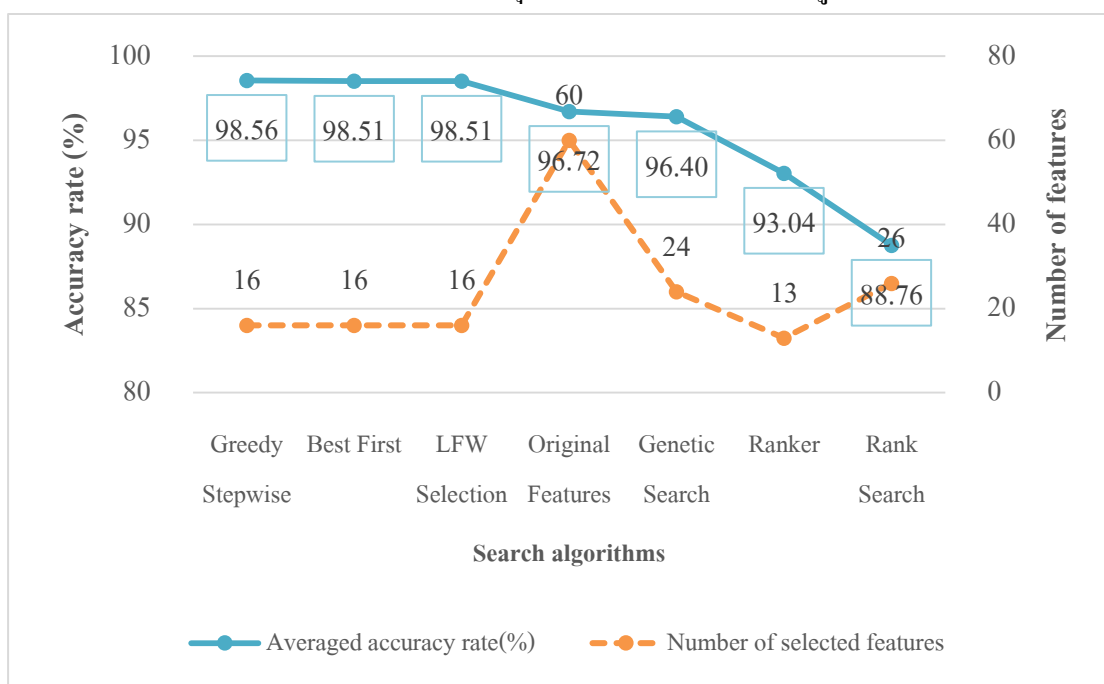
ตาราง 6-1 ค่าความถูกต้องการจำแนกประเภทข้อมูล



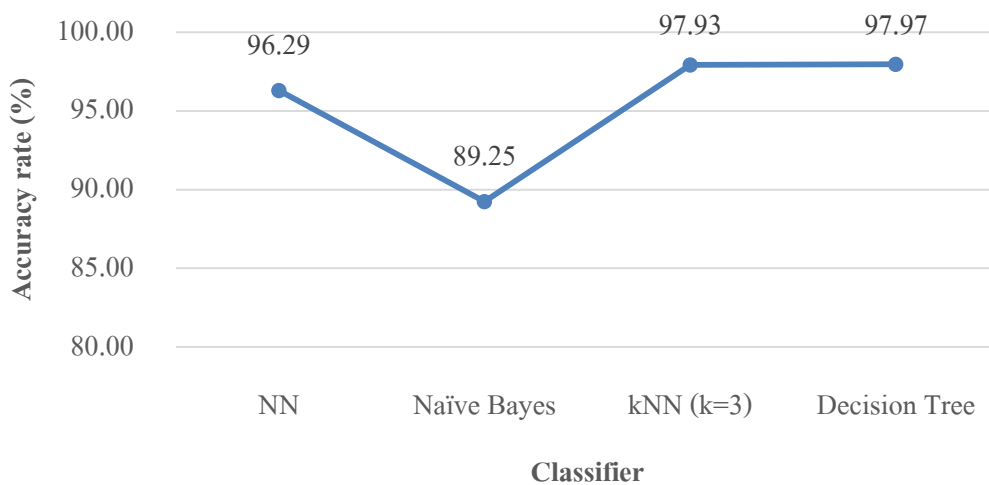
ภาพประกอบ 6-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประเมินชุดตัวแปรและอัลกอริทึมการค้นหาชุดตัวแปรกับค่าความถูกต้องเฉลี่ย
เรียงตามลำดับค่าความถูกต้องเฉลี่ย



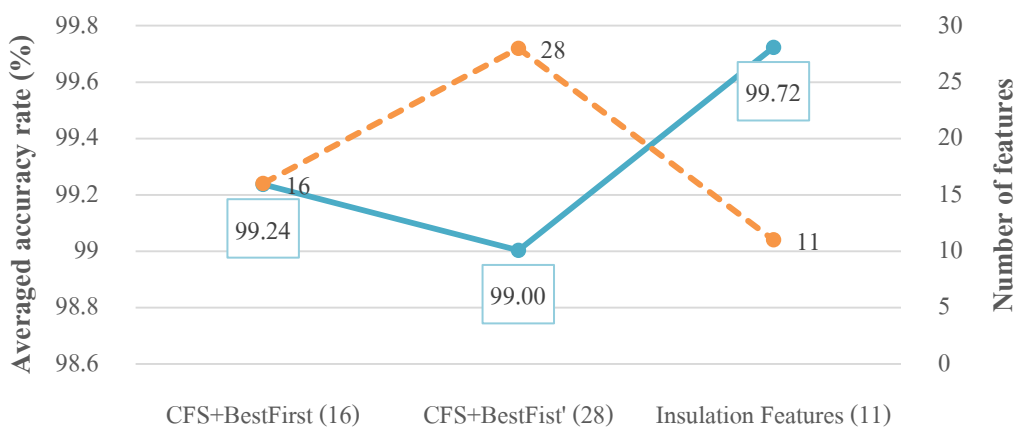
ภาพประกอบ 6-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประเมินชุดตัวแปรกับค่าความถูกต้องรวมเฉลี่ยของอัลกอริทึมการค้นหาชุดตัวแปรเรียงตามค่าความถูกต้องเฉลี่ย



ภาพประกอบ 6-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัลกอริทึมการค้นหาชุดตัวแปรกับค่าความถูกต้องรวมเฉลี่ยของตัวประเมินชุดตัวแปรเรียงตามค่าความถูกต้องเฉลี่ย



ภาพประกอบ 6-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวจำแนกประเภทข้อมูล กับค่าความถูกต้องเฉลี่ย

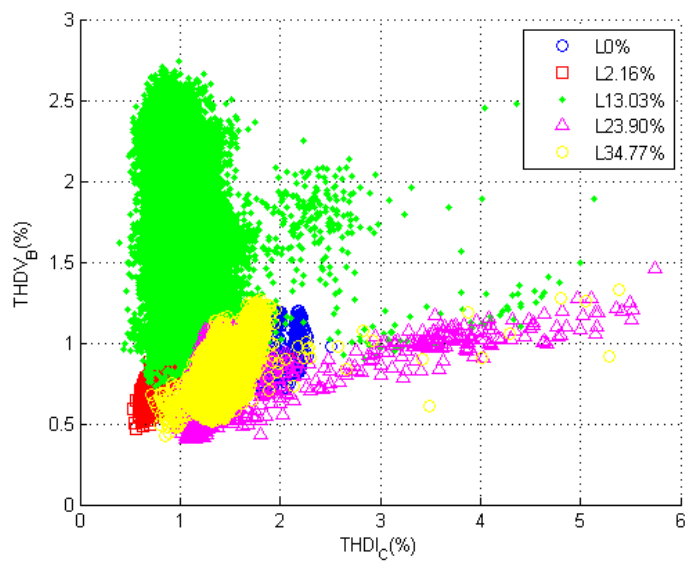


Subset evaluators and Search algorithms

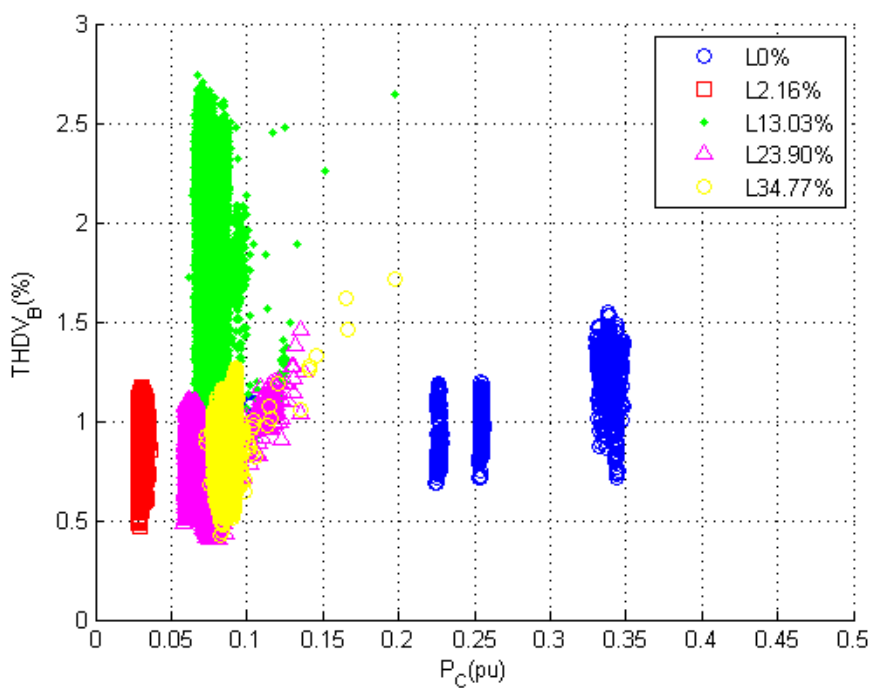
ตัด Naive bayes เนื่องจากให้ % ความถูกต้อง

● Averaged accuracy rate (%) ● Number of selected features

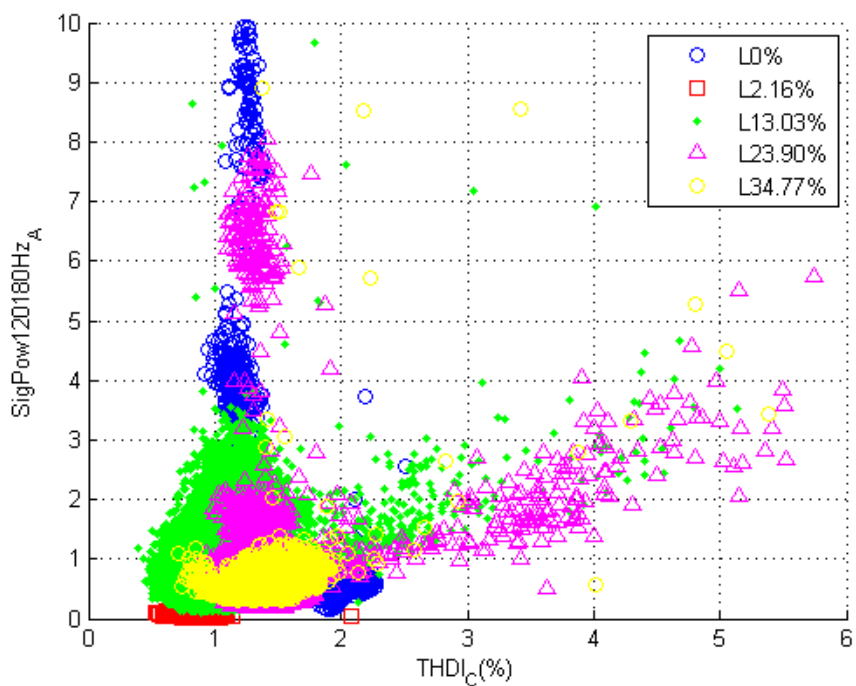
ภาพประกอบ 6-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ชุดตัวแปรกับค่าความถูกต้องเฉลี่ย



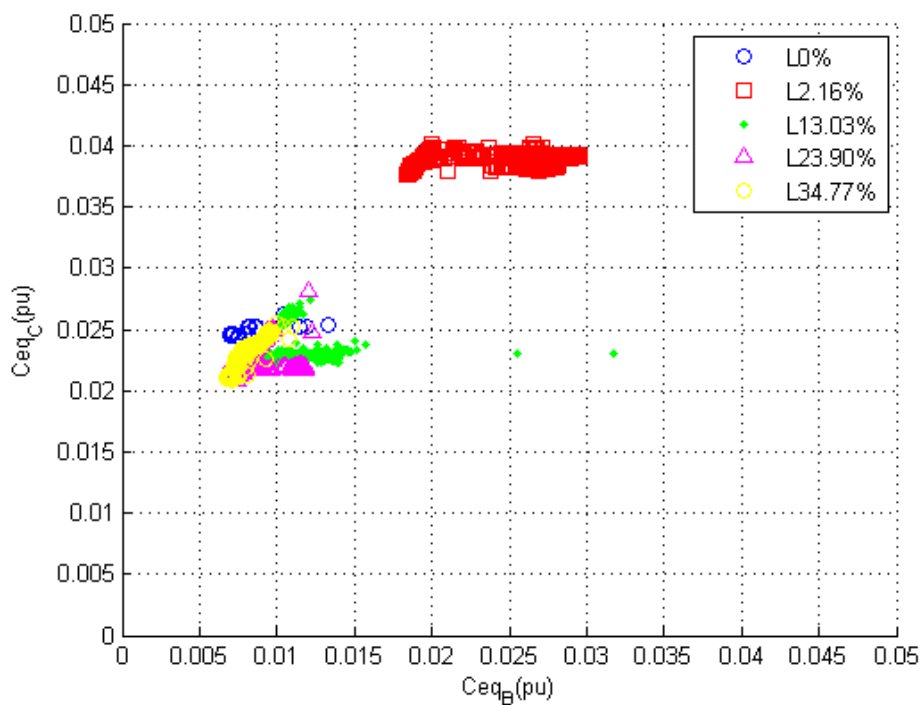
ภาพประกอบ 6-6 กราฟการกระจายระหว่าง %THD(I_c)และ %THD(V_b)



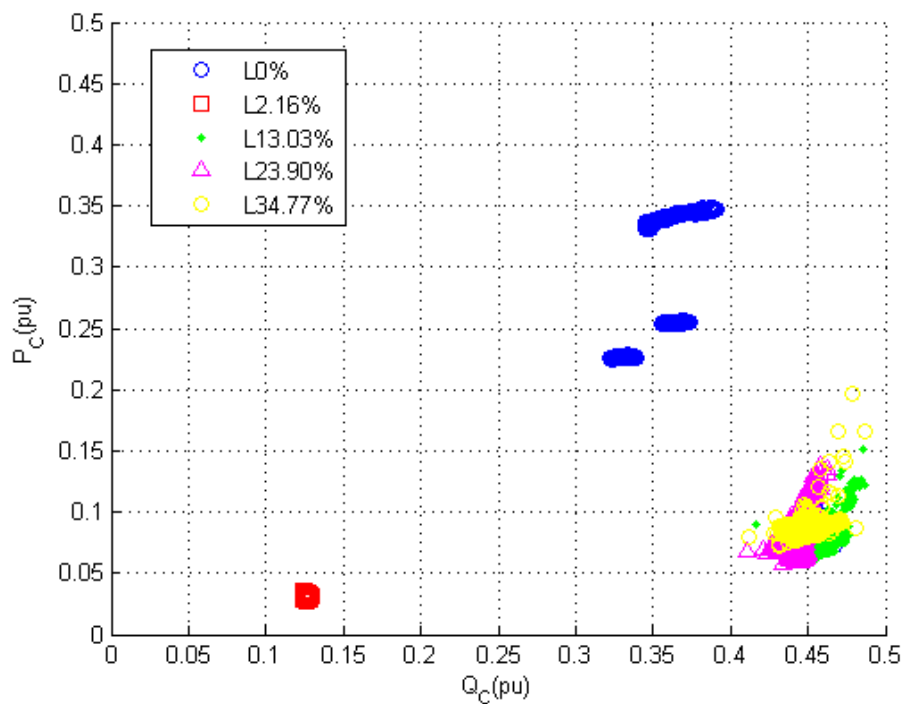
ภาพประกอบ 6-7 กราฟการกระจายระหว่าง P_{c(pu)}และ %THD(V_b)



ภาพประกอบ 6-8 กราฟการกระจายระหว่าง $\%THD(I_c)$ และ $SigPow_{120180Hz_a}(u)$



ภาพประกอบ 6-9 กราฟการกระจายระหว่าง $C_{eq,b}(pu)$ และ $C_{eq,c}(pu)$



ภาพประกอบ 6-10 กราฟการกระจายระหว่าง $Q_c(pu)$ และ $P_c(pu)$

ลำดับ	ตัวแปร	ค่า Merit
1	$R_{eq,b(pu)}$	0.701178
2	$I_{leak,g(pu)}$	-0.67119
3	$V_{a(pu)}$	0.535216
4	$V_{p(pu)}$	0.529224
5	$V_{c(pu)}$	0.526724
6	$V_{b(pu)}$	0.521726
7	$R_{eq,a(pu)}$	0.513768
8	$Q_{b(pu)}$	0.508196
9	$Q_{a(pu)}$	0.490397
10	$R_{eq,c(pu)}$	0.48825
11	$S_{a(pu)}$	0.488084
12	$\%THD(V_b)$	-0.48458
13	$Q_{Total(pu)}$	0.484385

ลำดับ	ตัวแปร	ค่า Merit
14	$\%THD(V_a)$	-0.46678
15	$S_{b(pu)}$	0.457203
16	$S_{Total(pu)}$	0.448583
17	$\%THD(I_c)$	0.445397
18	$Q_{c(pu)}$	0.418142
19	$S_{c(pu)}$	0.374602
20	$\%THD(V_c)$	-0.37199
21	$I_{leak,a(pu)}$	-0.34253
22	pf	-0.34008
23	$DF(\%)$	-0.33322
24	$C_{eq,a(pu)}$	-0.28743
25	$P_{a(pu)}$	0.286684
26	$I_{a(pu)}$	0.282736
27	$I_{leak,b(pu)}$	-0.25034
28	$C_{eq,b(pu)}$	-0.24924
29	$I_{leak,c(pu)}$	-0.24911
30	$C_{eq,c(pu)}$	-0.24895
31	$SeverityFactor \ r$	-0.23937
32	$I_{n(pu)}$	-0.2365
33	$\%THD(I_a)$	-0.18007
34	$I_{100Hz(pu)}$	-0.1723
35	$I_{p(pu)}$	0.109493
36	$P_{b(pu)}$	-0.09594
37	$I_{b(pu)}$	0.090306
38	$\%THD(I_b)$	0.082851
39	$I_{dc(pu)}$	-0.08066
40	$Z_{c(pu)}$	0.078362
41	$SigPow_{120-180Hz,b}(u)$	-0.06245

ลำดับ	ตัวแปร	ค่า Merit
42	$V_{n(pu)}$	0.052985
43	$P_{c(pu)}$	0.035222
44	$Z_{p(pu)}$	0.034324
45	$SigPow_{120-180Hz,c}(dB)$	-0.03371
46	$I_{c(pu)}$	-0.0323
47	$SigPow_{120-180Hz,a}(u)$	-0.03051
48	$SigPow_{120-180Hz,c}(u)$	-0.02225
49	$Z_{b(pu)}$	0.022044
50	$SigPow_{120-180Hz,a}(dB)$	-0.01733
51	$Angle(V_n)$	0.013479
52	$SigPow_{120-180Hz,b}(dB)$	0.013269
53	$Angle(I_n)$	0.010235
54	$Energy$	0.009976
55	$P_{Total(pu)}$	0.009976
56	$Z_{a(pu)}$	-0.00866
57	$Z_{n(pu)}$	0.006313
58	$Angle(I_p)$	0.00586
59	$Angle(V_p)$	-0.00503
60	f_1	-1.13E-12

ตาราง 6-2 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรและคลาส (Merit)

บทที่ 7

บทสรุป

7.1 บทสรุป

งานวิจัยชิ้นนี้เก็บบันทึกข้อมูลสัญญาณทางไฟฟ้าของมอเตอร์ที่ถูกเร่งอายุจนวนไฟฟ้า เพื่อสร้างแบบจำลองการจำแนกอายุการทำงานของมอเตอร์ และเพิ่มประสิทธิภาพการสร้างแบบจำลองด้วยการลดขนาดตัวแปร จากกระบวนการเร่งอายุจนวนไฟฟ้า สามารถสรุปได้ว่า ความร้อนเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้อายุจนวนไฟฟ้านลดลง โดยกระบวนการเร่งอายุจนวนไฟฟ้าด้วยความเค้นทางความร้อนและความชื้นที่ออกแบบโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน *IEEE std. 275-1992* สามารถนำมาใช้งานการเตรียมมอเตอร์สำหรับบันทึกข้อมูลสัญญาณทางไฟฟ้าเพื่อสังเกตการเสื่อมสภาพของจนวนไฟฟ้าได้

การเปลี่ยนแปลงจากสภาวะปกติจนกระทั่งเกิดความผิดปกติของมอเตอร์ จะมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสเฟสอย่างฉับพลัน และปรากฏค่ากระแสที่ความถี่ 150, 250 Hz เมื่อมีการแปลง *FFT* ของกระแส ในขณะที่ทางกายภาพ มอเตอร์จะเกิดการสั่นสะเทือนอย่างรุนแรงและมีเสียงดังขณะทำงาน สำหรับแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าปริมาณทางไฟฟ้า $I_{(pu)}$, $I_{leak, phase(pu)}$, $DF(\%)$, C_{eq} มีค่าเพิ่มขึ้น และ $Z_{phase(pu)}$, R_{eq} มีค่าลดลง เมื่อมอเตอร์มีความผิดปกติเกิดขึ้น

การสร้างแบบจำลองการจำแนกอายุการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่เหลื่ออยู่พบว่า การคัดเลือกตัวแปร สามารถลดขนาดตัวแปรและเพิ่มประสิทธิภาพของแบบจำลองได้ดีกว่าการใช้ชุดตัวแปรดั้งเดิมทั้งหมด และการใช้การสกัดตัวแปร โดยกลุ่มตัวแปร 16 ตัว และ 28 ตัว ที่ถูกคัดเลือก ประกอบด้วยค่าปริมาณทางไฟฟ้า $I_{(pu)}$, pf , $\%THD(I)$, $\%THD(V)$, $P_{(pu)}$, $Q_{(pu)}$, $Z_{(pu)}$, $Z_{p(pu)}$, $I_{100Hz(pu)}$, $DF(\%)$, $C_{eq,a(pu)}$, $SigPow_{120-180Hz}(u)$ และ 11 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับจนวนไฟฟ้า ได้แก่ $I_{leak,g(pu)}$, $I_{leak,a(pu)}$, $I_{leak,b(pu)}$, $I_{leak,c(pu)}$, $DF(\%)$, $C_{eq,a(pu)}$, $C_{eq,b(pu)}$, $C_{eq,c(pu)}$, $R_{eq,a(pu)}$, $R_{eq,b(pu)}$, $R_{eq,c(pu)}$ จัดเป็นกลุ่มตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับการสร้างแบบจำลองการจำแนกอายุการทำงานของมอเตอร์ ซึ่งกลุ่มตัวแปร 2 กลุ่มแรก สามารถนำไปใช้เป็นตัวแปรตั้งต้นในการสร้างแบบจำลองการประมาณอายุจนวนไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ขนาดต่างๆ ที่ภายในระบบมีการเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์และโหลดได้

7.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข

- (1) การบันทึกผลสัญญาณทางไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ผ่านการเร่งอายุจนวนไฟฟ้า มีสภาพการเชื่อมต่อการทำงานของมอเตอร์ที่แตกต่างกัน เนื่องจากการดำเนินงานที่ต้องออกแบบการทดลองควบคู่กับการบันทึกผลการทดลอง ทำให้ผลการทดลองที่ได้มีข้อจำกัดในการเปรียบเทียบข้อมูล ดังนั้นผู้สนใจศึกษางานวิจัยในหัวข้อนี้ต่อไปสามารถนำแนวทางการเร่งอายุจนวนไฟฟ้านี้ไปใช้งานได้ และควบคุมรูปแบบการเชื่อมต่omotorเพื่อบันทึกสัญญาณทางไฟฟ้าให้มีรูปแบบเดียวกันทั้งหมด เพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ต่อไป
- (2) เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านเวลา ทำให้สามารถบันทึกข้อมูลสัญญาณทางไฟฟ้าของมอเตอร์ได้จำนวน 2 ตัว ดังนั้นเพื่อความน่าเชื่อถือของข้อมูลและแบบจำลองการประมาณอายุการทำงานของมอเตอร์ จึงควรทำการทดลองเร่งอายุจนวนไฟฟ้าและบันทึกสัญญาณทางไฟฟ้าเพิ่ม โดยมาตรฐาน *IEEE std. 275-1992* แนะนำให้ทำการทดลองเร่งอายุจนวนไฟฟ้าของมอเตอร์ครั้งละ 2 ตัว ต่อ 1 อุณหภูมิการเร่งอายุจนวนไฟฟ้า และทำการทดลองเร่งอายุจนวนไฟฟ้าที่อุณหภูมิอื่นๆ (ต่างกัน 10 องศาเซลเซียส) อีก 2 อุณหภูมิ ดังนั้นในการเก็บบันทึกข้อมูลสัญญาณทางไฟฟ้าจึงควรใช้มอเตอร์อย่างน้อย 6 ตัว

7.3 แนวทางการพัฒนาต่อไป

- (1) นำข้อมูลสัญญาณทางไฟฟ้าจากงานวิจัยสกัดค่าปริมาณทางไฟฟ้าอื่นๆ เช่น ตัวประกอบการแผ่กระจายแต่ละเฟส (Dissipation factor: *DF*) ค่าความต้านทานเหนี่ยวนำของขดลวด เฟอร์เร้นต์โพลด์ สลิป เป็นต้น เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของตัวแปรที่จะถูกคัดเลือกนำไปใช้สร้างแบบจำลองการประมาณอายุการทำงานของมอเตอร์ต่อไป
- (2) นำข้อมูลจากงานวิจัยชิ้นนี้ ทดลองสร้างแบบจำลองการทำนายอายุการทำงานของมอเตอร์โดยใช้วิธีการทำนายข้อมูลวิธีการอื่นๆ เช่น การวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) เป็นต้น
- (3) เลือกใช้กลุ่มตัวแปรจาก 3 กลุ่มตัวแปรที่แนะนำจากงานวิจัยชิ้นนี้ ในการสร้างระบบการทำนายอายุการทำงานของมอเตอร์
- (4) สามารถใช้แบบจำลองที่ได้จากงานวิจัยชิ้นนี้เป็นเกณฑ์ในการสร้างระบบแจ้งเตือนการเกิดความผิดปกติที่จะเกิดขึ้นกับมอเตอร์

บรรณานุกรม

- [1] E. L. Bonaldi, L. E. d. L. d. Oliveira, J. G. B. d. Silva, G. Lambert-Torres and L. E. B. d. Silva, "Predictive maintenance by electrical signature analysis to induction motors," in *Induction Motors-Modelling and Control*, InTech, 2012, pp. 487-520.
- [2] S. Grubic, J. M. Aller, B. Lu and T. G. Habetler, "A survey on testing and monitoring methods for stator insulation systems of low-voltage induction machines focusing on turn insulation problems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 12, pp. 4127-4136, 2008.
- [3] A. Siddique, G. S. Yadava and B. Singh, "A review of stator fault monitoring techniques of induction motors," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 20, no. 1, pp. 106-114, 2005.
- [4] P. Pillay and M. Manyage, "Loss of life in induction machines operating with unbalanced supplies," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 21, no. 4, pp. 813-822, 2006.
- [5] N. Lahoud, M. Q. Nguyen, P. Maussion, D. Malec and D. Mary, "Using the design of experiments (DoE) method to elaborate an electrical ageing model for the insulation of low voltage rotating machines fed by inverters," in *2010 International Conference on Solid Dielectrics*, Potsdam, Germany, 2010.
- [6] N. Lahoud, J. Faucher, D. Malec and P. Maussion, "Electrical aging of the insulation of low-voltage machines: model definition and test with the design of experiments," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 9, pp. 4147-4155, 2013.
- [7] S.-B. Lee, K. Younsi and G. B. Kliman, "An online technique for monitoring the insulation condition of AC machine stator windings," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 20, no. 4, pp. 737-745, 2005.
- [8] S. B. Lee, J. Yang, K. Younsi and R. Bharadwaj, "An online groundwall and phase-to-phase insulation quality assessment technique for AC-machine stator windings," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 42, no. 4, pp. 946-957, 2006.
- [9] S. M. A. Cruz and A. J. M. Cardoso, "Stator winding fault diagnosis in three-phase synchronous and asynchronous motors, by the extended Park's vector approach," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 37, no. 5, pp. 1227-1233, 2001.
- [10] M. B. K. Bouzid and G. Champenois, "New expressions of symmetrical components of the induction motor under stator faults," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 9, pp. 4093-4120, 2013.
- [11] F. Villada, D. R. Cadavid, J. E. Aedo, B. A. Benavides and E. Velilla, "The negative sequence impedance as fault indicator in induction motors," *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, vol. 52, pp. 226-232, 2010.
- [12] T. Likitjarernkul, K. Sengchai, R. Duangsoithong, K. Chalermyanont and A. Prasertsit, "Correlation feature selection analysis for fault diagnosis of induction motors," in *Advanced Computer and*

- Communication Engineering Technology*, Switzerland, Springer International Publishing, 2016, pp. 1219-1228.
- [13] *IEEE Recommended Practice for Thermal Evaluation of Insulation Systems for Alternating-Current Electric Machinery Employing Form-Wound Preinsulated Stator Coils for Machines Rated 6900 V and Below*, IEEE 275-1992.
- [14] J.-H. Jung, J.-J. Lee and B.-H. Kwon, "Online diagnosis of induction motors using MCSA," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 6, pp. 1842-1852, 2006.
- [15] W. T. Thomson, "On-line MCSA to diagnose shorted turns in low voltage stator windings of 3-phase induction motors prior to failure," in *Electric Machines and Drives Conference*, 2001.
- [16] M. Arkan, D. Perovic and P. Unsworth, "Online stator fault diagnosis in induction motors," in *Electr. Power Appl. IEE Proc.* -, 2001.
- [17] S. Cheng and T. G. Habetler, "A new method to detect stator turn-to-turn faults in a closed-loop multiple-motor drive system," 2009.
- [18] S. Cheng, P. Zhang and T. G. Habetler, "An impedance identification approach to sensitive detection and location of stator turn-to-turn faults in a closed-loop multiple-motor drive," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 5, pp. 1545-1554, 2011.
- [19] X. Chang, V. Cocquempot and C. Christophe, "A model of asynchronous machines for stator fault detection and isolation," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 50, no. 3, pp. 578-584, 2003.
- [20] S. Bachir, S. Tnani, J.-C. Trigeassou and G. Champenois, "Diagnosis by parameter estimation of stator and rotor faults occurring in induction machines," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 3, pp. 963-973, 2006.
- [21] H. W. Penrose, "Estimating motor life using motor circuit analysis predictive measurements," in *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Technology Conference*, 2003.
- [22] G. C. Stone, "Condition monitoring and diagnostics of motor and stator windings-a review," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 20, no. 6, pp. 2073-2080, 2013.
- [23] G. C. Stone, E. A. Boulter, I. Culbert and H. Dhirani, *Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair*, Piscataway, NJ: IEEE Press, 2004.
- [24] S. Ohta, "Temperature classes of electrical insulators," *Three Bond Technical News*, pp. 1-10, 1 December 1985.
- [25] H. W. Penrose, 2004. [Online]. Available: <http://www.reliabilityweb.com>.

- [26] ช. ศศิภานุเดช, "ThailandIndustry.com," 09 March 2011. [Online]. Available: <http://www.thailandindustry.com/guru/view.php?id=13377§ion=9>. [Accessed 29 December 2015].
- [27] *IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery*, IEEE 43-2013.
- [28] Fluke, "Cole-Parmer," 09 August 2010. [Online]. Available: <http://www.coleparmer.com/TechLibraryArticle/1216>. [Accessed 08 February 2016].
- [29] *IEEE Recommended Practice-General Principles for Temperature Limits in the Rating of Electrical Equipment and for the Evaluation of Electrical Insulation*, IEEE 1-2000.
- [30] E. L. Brancato, "Estimation of lifetime expectancies of motors," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 8, no. 3, pp. 5-13, 1992.
- [31] S. Movahed, S. Oraee mizamani, A. Rajabi and H. Daneshvar, "Estimation of insulation life of inverter-fed induction motors," in *1st Power Electronic & Drive Systems & Technologies Conference*, 2010.
- [32] J. Bryan, "Cool Advice On Hot Motors," Maintenance Technology The Source For Reliability Solutions, 6 August 2015. [Online]. Available: <http://www.maintenancetechnology.com/2015/08/cool-advice-on-hot-motors/>. [Accessed 29 12 2015].
- [33] R. Duangsoithong and T. Windeatt, "Relevance and redundancy analysis for ensemble classifiers," in *Machine Learning and Data Mining in Pattern Recognition*, Springer, Heidelberg, P. Perner (eds.), 2009, pp. 206-220.
- [34] M. Hall, "Correlation-based feature selection for discrete and numeric class machine learning," in *Proceeding of the 17th International Conference on Machine Learning*, Morgan Kaufmann, San Francisco, 2000.
- [35] H. Liu and L. Yu, "Toward integrating feature selection algorithms for classification and clustering," *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.*, vol. 17, no. 4, pp. 491-502, 2005.
- [36] I. T. Jolliffe, *Principal Component Analysis*, New York: Springer, 1986.
- [37] R. O. Duda, P. E. Hart and D. G. Stork, *Pattern Classification (2nd Edition)*, New York: John Wiley & Sons, 2001.
- [38] D. L. McKinnon, "Using a six fault zone approach for predictive maintenance on motors," in *2007 Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo*, Nashville, TN, 2007.

ภาคผนวก ก

มาตรฐาน *IEEE* Std. 275-1992

IEEE Std 275-1992
(Revision of IEEE Std 275-1981)

IEEE Recommended Practice for Thermal Evaluation of Insulation Systems for Alternating-Current Electric Machinery Employing Form-Wound Preinsulated Stator Coils for Machines Rated 6900 V and Below

Sponsor
**Electric Machinery Committee
of the
IEEE Power Engineering Society**

Approved June 18, 1992
IEEE Standards Board

Abstract: A test procedure for comparing two or more insulation systems in accordance with their expected life at rated temperature is described. The procedure is limited to insulation systems for ac electric machines using form-wound preinsulated stator coils and rated 6900 V and below. This procedure is intended to evaluate insulation systems for use in usual service conditions with air cooling. It does not cover such special requirements as machines that are enclosed in gas atmospheres, or that are subjected to strong chemicals, to metal dusts, or to submersion in liquids, etc. The procedure includes instructions for testing candidate systems in comparison with known systems having a proven record of service experience and interpretation of the results.

Keywords: electric machinery, ac; form-wound preinsulated stator coils; insulation systems

The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
345 East 47th Street, New York, NY 10017-2394, USA
Copyright © 1992 by the Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
All rights reserved. Published 1992. Printed in the United States America
ISBN 1-55937-235-4

No part of this publication may be reproduced in any form, in an electronic retrieval system or otherwise, without the prior written permission of the publisher.

IEEE Standards documents are developed within the Technical Committees of the IEEE Societies and the Standards Coordinating Committees of the IEEE Standards Board. Members of the committees serve voluntarily and without compensation. They are not necessarily members of the Institute. The standards developed within IEEE represent a consensus of the broad expertise on the subject within the Institute as well as those activities outside of IEEE that have expressed an interest in participating in the development of the standard.

Use of an IEEE Standard is wholly voluntary. The existence of an IEEE Standard does not imply that there are no other ways to produce, test, measure, purchase, market, or provide other goods and services related to the scope of the IEEE Standard. Furthermore, the viewpoint expressed at the time a standard is approved and issued is subject to change brought about through developments in the state of the art and comments received from users of the standard. Every IEEE Standard is subjected to review at least every five years for revision or reaffirmation. When a document is more than five years old and has not been reaffirmed, it is reasonable to conclude that its contents, although still of some value, do not wholly reflect the present state of the art. Users are cautioned to check to determine that they have the latest edition of any IEEE Standard.

Comments for revision of IEEE Standards are welcome from any interested party, regardless of membership affiliation with IEEE. Suggestions for changes in documents should be in the form of a proposed change of text, together with appropriate supporting comments.

Interpretations: Occasionally questions may arise regarding the meaning of portions of standards as they relate to specific applications. When the need for interpretations is brought to the attention of IEEE, the Institute will initiate action to prepare appropriate responses. Since IEEE Standards represent a consensus of all concerned interests, it is important to ensure that any interpretation has also received the concurrence of a balance of interests. For this reason IEEE and the members of its technical committees are not able to provide an instant response to interpretation requests except in those cases where the matter has previously received formal consideration.

Comments on standards and requests for interpretations should be addressed to:

Secretary, IEEE Standards Board
445 Hoes Lane
P.O. Box 1331
Piscataway, NJ 08855-1331
USA

IEEE Standards documents are adopted by the Institute of Electrical and Electronics Engineers without regard to whether their adoption may involve patents on articles, materials, or processes. Such adoption does not assume any liability to any patent owner, nor does it assume any obligation whatever to parties adopting the standards documents.

Foreword

(This foreword is not a part of IEEE Std 275-1992, IEEE Recommended Practice for Thermal Evaluation of Insulation Systems for Alternating-Current Electric Machinery Employing Form-Wound Preinsulated Stator Coils for Machines Rated 6900 V and Below.)

This recommended practice is a revision of IEEE Std 275-1981. The revision was initiated by the Insulation (now Materials) Subcommittee of the Rotating (now Electric) Machinery Committee of the IEEE Power Engineering Society. At the time this standard was completed, the P275 Working Group had the following membership:

E. M. Fort, Chair

R. L. Balke	E. L. Brancato	M. Zraggen
E. A. Boulter	R. J. Flaherty	

At the time that it balloted and approved this standard for submission to the IEEE Standards Board, the Materials Subcommittee of the Electric Machinery Committee of the IEEE Power Engineering Society had the following membership:

E. J. Adolphson	F. H. Grooms	O. M. Nassar
P. E. Alexander	B. K. Gupta	R. H. Rehder
D. Arndt	R. A. Huber	C. M. Rowe
R. L. Balke	A. M. Iversen	D. E. Schump
W. H. Bentley	T. B. Jenkins	R. F. Sharrow
E. A. Boulter	L. F. Klataske	R. L. Shultz
L. E. Braswell, III	T. M. Kluk	W. G. Stiffler
L. W. Buchanan	S. Lindholm	G. C. Stone
A. W. W. Cameron	T. J. Lorenz	J. E. Timperly
J. L. Cohon	C. Y. Lu	R. F. Weddleton
F. T. Emery	B. Mayschak	C. A. Wilson
R. J. Flaherty	R. J. McGrath	M. Zraggen
N. K. Ghai	G. H. Miller	

When the IEEE Standards Board approved this standard on June 18, 1992, it had the following membership:

Marco W. Migliaro, Chair
Donald C. Loughry, Vice Chair
Andrew G. Salem, Secretary

Dennis Bedson	Donald N. Heirman	T. Don Michael*
Paul L. Borrill	Ben C. Johnson	John L. Rankine
Clyde Camp	Walter J. Karplus	Wallace S. Read
Donald C. Fleckenstein	Ivor N. Knight	Ronald H. Reimer
Jay Forster*	Joseph Koepfinger*	Gary S. Robinson
David F. Franklin	Irving Kolodny	Martin Schneider
Ramiro Garcia	D. N. "Jim" Logothetis	Terrance R. Whittemore
Thomas L. Hannan	Lawrence V. McCall	Donald W. Zipse

*Member Emeritus

Also included are the following nonvoting IEEE Standards Board liaisons:

Satish K. Aggarwal	Richard B. Engelman	David E. Soffrin
James Beall		Stanley Warshaw

Kristin M. Dittmann
IEEE Standards Project Editor

iii

CLAUSE	PAGE
1. Introduction	1
1.1 Scope	1
1.2 Purpose	1
1.3 General Conditions	1
1.4 Methods of Evaluation	2
2. References	2
3. Test Models	3
3.1 Scope	3
3.2 Models	3
4. Test Exposures	3
4.1 Scope	3
4.2 Temperature Exposure	4
4.3 Mechanical Stress Exposure	7
4.4 Moisture Exposure	7
4.5 Voltage Exposure	8
5. Procedure for Reporting and Analyzing	9
5.1 Data	9
5.2 Analysis	9
5.3 Comparison	9
5.4 Extrapolation	9
5.5 Nonlinear or Dissimilar Curves	9
5.6 System Identification	10

IEEE Recommended Practice for Thermal Evaluation of Insulation Systems for Alternating-Current Electric Machinery Employing Form-Wound Preinsulated Stator Coils for Machines Rated 6900 V and Below

1. Introduction

1.1 Scope

This standard outlines a test procedure for *comparing* two or more insulation systems in accordance with their expected life at rated temperature. The procedure is limited to insulation systems for ac electric machines using form-wound preinsulated stator coils and rated 6900 V and below.

It is the intent of this procedure to evaluate insulation systems for use in usual service conditions with air cooling. It does not cover such special requirements as machines that are enclosed in gas atmospheres, or that are subjected to strong chemicals, to metal dusts, or to submersion in liquids, etc.

The procedure includes instructions for testing candidate systems in comparison with known systems having a proven record of service experience and interpretation of the results.

1.2 Purpose

The purpose of this procedure is to classify insulation systems for the machinery within the scope of this standard in accordance with their temperature limits by test, rather than by chemical composition. Data from such tests may be used to establish the temperature classification of new insulation systems before they are service proven.

Service-proven systems shall also be tested according to this test procedure.

1.3 General Conditions

The concepts implemented herein are based on IEEE Std 99-1980 [3].¹

¹The numbers in brackets correspond to those of the references listed in Section 2 of this document.

The recognized A, B, F, and H temperature classes, whose IEEE classification temperatures are 105 °C, 130 °C, 155 °C, and 180 °C, respectively, are used in this standard.

It is expected that the several insulating materials, or components, making up any insulation system to be evaluated by these procedures, will first be screened by the appropriate test procedures for each type of material. Thermal indexes for insulating materials may be obtained by following the procedures outlined in IEEE Std 98-1984 [2].

1.4 Methods of Evaluation

This test procedure describes specimens suitable for use in insulation evaluation tests, and recommends a series of exposures to heat to which the specimens may be subjected to represent cumulative effects of long service, under accelerated conditions. Procedures are given for applying periodic voltage checks, preceded by periods of mechanical stress and moisture to establish the end point of insulation life by electric failure.

An adequate number of specimens to obtain a good statistical average should be carried through the test procedure until failure occurs, for each chosen temperature of heat exposure. It is recommended that the tests be performed on the indicated number of specimens for at least three different test temperatures for each insulation system to be evaluated.

When final results of the tests are reported, and the test life hours are projected to rated temperature, the ratio of such hours for a new insulation system to the test life hours for an old established insulation system provides a rough measure of the relation of the service life expectancy of the new system to that of the old system. At the present state of the art, no accurate estimation of actual service life can be made from test results alone.

This procedure will permit approximate comparisons only, and cannot be relied upon to completely determine the merits of any particular insulation. Such information can only be obtained from extended service experience. Following the general procedures outlined above, the temperature classification in which any new insulating system belongs may be determined.

2. References

- [1] IEC 34-18-1 (1992), Functional Evaluation of Insulation Systems for Rotating Electrical Machines, Pt. 1: General Guidelines.²
- [2] IEEE Std 98-1984, IEEE Standard for the Preparation of Test Procedures for the Thermal Evaluation of Solid Electrical Insulating Materials (ANSI).³
- [3] IEEE Std 99-1980, IEEE Recommended Practice for the Preparation of Test Procedures for the Thermal Evaluation of Insulation Systems for Electric Equipment (ANSI).
- [4] IEEE Std 101-1987, IEEE Guide for the Statistical Analysis of Thermal Life Test Data (ANSI).
- [5] IEEE Std 522-1992, IEEE Guide for Testing Turn-to-Turn Insulation on Form-Wound Stator Coils for Alternating-Current Rotating Electric Machines.

²IEC publications are available from the Sales Department, Central Office of the International Electrotechnical Commission, 3, rue de Varembe, P.O. Box 131, 1211 Geneva 20, Switzerland.

³IEEE publications are available from the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Service Center, 445 Hoes Lane, P. O. Box 1331, Piscataway, NJ 08855-1331.

3. Test Models

3.1 Scope

This section makes general suggestions concerning appropriate samples of insulating systems that may be subjected to the exposures outlined in Section 4.

Test specimens may be actual machines, machine components, or models. When it is inconvenient to use actual machines or machine components for the tests because of size, models are used.

Suitable models can be designed to adequately represent machines employing form-wound coils in the voltage class 6900 V and below. It is recognized that all machines covered by this range cannot be represented by any single model.

3.2 Models

The models should be made to embody all the essential elements, and should be representative of a complete winding system and its structural supports. The generic name *formettes* shall be applied to models coming within the scope of this procedure.

It shall be the responsibility of the test laboratory to use suitable formettes. Full and complete design information on the formette shall be published at the time of presenting the data. It shall be the responsibility of the organization using a formette to make the formette, the design, or the specialized component available so that the results of all functional evaluation tests may be subject to recheck by independent laboratories.

The slot and support structure shall simulate the magnetic core and mechanical supports insofar as it is necessary to reproduce operational exposure conditions during the testing. It is recognized that different models may be employed to cover the range of machines included in this test procedure. A typical slot assembly is shown in Fig 1.

The test coils and the end-winding bracing structure shall contain all the elements employed in the winding they simulate and shall be considered only as smaller replicas. Insulation thickness and creepages shall be appropriate for the voltage class and industry or equipment standards or practices. If the winding turns are not to be tested with impulse testing equipment, the test coils may be wound with two parallel conductors so that turn-to-turn tests may be made with conventional alternating voltage.

Each designer of a specific formette shall select carefully the overall design and components with the objective of evaluating the insulation system as a whole. Each component used should be subjected to separate screening tests, to establish uniformity and normality before they are assembled. The completed formettes should be subjected to all of the diagnostic tests described in Section 4, before starting the thermal cycle, to establish their adequacy.

4. Test Exposures

4.1 Scope

This section specifies appropriate exposures to heat in repeated cycles, which will represent the thermal deteriorating effects of service on insulation systems on an accelerated basis. It will also specify the exposure to diagnostic factors of mechanical stress, moisture, and voltage to apply after each thermal cycle to check the condition of the insulation systems.

Before proceeding with the multi-temperature testing, it is suggested that the laboratory or investigator submit a small number of formettes (one or two) to extreme aging (for example, 300 °C or higher for 48 h). These aged specimens should be subjected to a suitable diagnostic procedure. The procedure chosen will depend upon the operating conditions of the equipment.

In many cases, experience has indicated that the best evaluation of the thermally deteriorated, and thus usually brittle, insulation system is obtained by exposure to mechanical stress, thus producing cracks in the mechanically stressed parts, then exposure to moisture, and finally application of the test voltage.

In other cases, mechanical stress, moisture exposure, and application of voltage might not be the best diagnostic test. It may be appropriate to replace them by selected dielectric tests to check the condition of the insulation.

Experience has shown ovens to be a convenient and economical method of obtaining high temperatures, in spite of some disadvantages, which are listed below. This method of aging subjects all the parts of the insulation system to the full temperature, while in actual service a large proportion of the insulation may operate at considerably lower temperatures than the hottest-spot temperature. Also, the products of decomposition are likely to remain near the insulation during oven aging, whereas they are usually carried away by the ventilating air in actual operation.

4.2 Temperature Exposure

Table 1 lists the corresponding periods of exposure in each cycle for insulating systems for different temperature classes. Either the time or the temperatures may be adjusted to make the best use of facilities, but comparisons must take such variations into consideration.

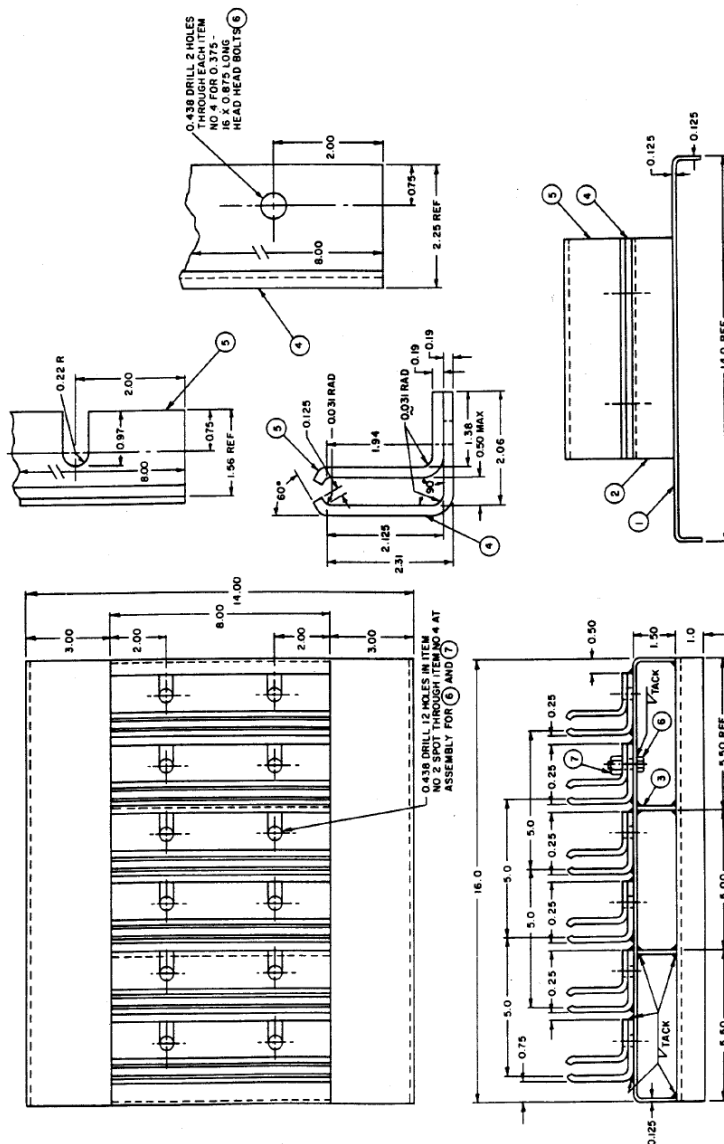


Figure 1 – Typical Slot Assembly

The selected temperature of heat exposure for the tests should be held constant within ± 2 °C up to 180 °C, ± 3 °C above 180 °C.

Table 1—*Temperature and Exposure Periods

Exposure Temperature [†]	Insulation Classification Temperature (°C)			
	105 °C	130 °C	155 °C	180 °C
250				1 day
240				2 days
230				4 days
220			1 day	7 days
210			2 days	14 days
200		1 day	4 days	28 days
190		2 days	7 days	49 days
180	1 day	4 days	14 days	
170	2 days	7 days	28 days	
160	4 days	14 days	49 days	
150	7 days	28 days		
140	14 days	49 days		
130	28 days			
120	49 days			

*The schedule is selected to fit into a five-day work week with most of the humidity exposure occurring on weekends and is based upon an approximate 10°C rule for insulation deterioration, which states that the life of the insulation is reduced one half for each 10°C rise in temperature. However, the aging times at the lowest temperatures for each of the above four classifications have purposely been shortened in order to have more tests at the lower temperature.

†The temperature measurements should be taken in the immediate neighborhood of each model, as the temperature is rarely uniform over the entire oven space. Random rearrangements of the specimens from time to time will minimize this effect.

It is recommended that the specimens be subjected to the temperature corresponding to the 28- or 49-day exposure period, and to at least two other temperatures in Table 1. The other high temperatures should be separated by intervals of 20 °C or more. Intervals of 10 °C may be suitable when more than three temperatures are studied. A statistically adequate number of test coils should be carried through successive cycles of exposure at each of the test temperatures until satisfactory data are obtained.

Normally, it is intended that these temperature exposures be obtained by placing the specimens in enclosed ovens, with just sufficient ventilation or forced convection to maintain temperatures uniform over them. The cold specimens should be placed directly in the preheated ovens, so as to subject them to a uniform thermal shock in each cycle. Likewise, the hot specimens should be removed from the ovens directly into room air, so as to subject them to uniform thermal shock on cooling as well as on heating.

It is recognized that some materials deteriorate more rapidly when the products of decomposition remain in contact with the insulation surface, whereas other materials deteriorate more rapidly when the decomposition products are continually removed. The same conditions of ventilation and temperature should be maintained for both test and reference coils. If the insulation in actual service is so arranged that the products of decomposition remain in contact

with it, as in totally enclosed motors, the tests should then be designed in the same way so that the oven ventilation will not remove these decomposition products.

It is also recognized that, depending on the test facilities available, the type of models employed, and other factors, it may be desirable to modify the methods of exposing and ventilating the coils during these tests. It is also important that, when any two different insulation systems are to be compared, the test coils of each shall be subjected to the *same* exposure of diagnostic factors.

It is recommended that the periods of exposure time for each of the temperatures and each of the insulation classes be selected so as to give a mean life of about 10 cycles before failure for each condition, under normal circumstances.

4.3 Mechanical Stress Exposure

As an initial test before the first cycle of temperature exposure and following each cycle of high temperature exposure as outlined in 4.2, each specimen shall be subjected to a period of 1 h of mechanical stress.

It is recommended that the mechanical stress applied be of the same general nature as would be experienced in service and of a severity comparable with the highest forces expected in normal service. The procedure for applying this stress may vary with each type of specimen and kind of service. It is important that whenever any new insulating systems are subjected to stress exposure, the stresses should also be applied in the same way to the reference insulation system so that the test results will be comparable.

A method often used of applying mechanical stress to formettes is, after each cycle of high temperature exposure, to mount each formette on a shaker table, and operate it for a period of 1 h with a 60 Hz oscillating motion. Peak-to-peak amplitude should be approximately 0.2 mm, corresponding to a peak acceleration of about 1 1/2 times the acceleration of gravity.

The formettes should be so mounted that the motion occurs at right angles to the plane of the coils, so that the coil ends will be free to vibrate as they would under radial end-winding forces in an actual machine. This vibration test should be made at room conditions and without applied voltage. After removal from the oven, adequate time should be allowed to reach room temperature.

4.4 Moisture Exposure

Humidity, in most cases, is recognized to be a major cause of variation in the properties of electrical insulation. It may cause several different types of insulation failure under electric stress. The absorption of moisture by solid insulation has a gradual effect of increasing dielectric loss and reducing insulation resistance, and may contribute to a change in electric strength. The presence of condensed moisture on insulation permits overvoltages to seek out and discern cracks and porosities in the insulation.

After each cycle of mechanical stress exposure, as described in 4.3, each specimen should be exposed for 48 h to an atmosphere of 95–100% relative humidity with visible condensation on the winding. During this period, voltage should not be applied to the coils.

Exposure to condensation for a two-day period is recognized to be a more severe test than is usually met in normal service. The time period of two days is recommended because experience has shown that at least this length of time is required for moisture to penetrate throughout the winding, that is, for the insulation resistance to reach a fairly stable value.

NOTE: An atmosphere of 95–100% relative humidity and condensation is readily obtained by covering the floor of the test chamber with a shallow layer of water, and using an immersion heater to heat the water to 5–10 °C above room temperature. The specimen must remain at a temperature lower than the atmosphere surrounding it in order to ensure continuous condensation. The exterior walls of the moisture chamber should be thermally insulated. The roof of the

chamber should not be insulated and should be sloped so as to drain the condensed water to the back of the sides of the cabinet and prevent dripping on the samples. The interior of the cabinet should be constructed of corrosion-resistant materials, and junctions of dissimilar metals should be avoided. Doors or removable covers should be constructed with overhanging lips so that moisture collecting around them will drain into the interior of the chamber. Visible and continuous moisture may also be achieved by other means, for example, fog chamber, condensation chamber, etc.

4.5 Voltage Exposure

Each specimen shall be carried through repeated cycles of the high temperature, mechanical stress, and moisture exposure in sequence until failure occurs as determined by the voltage test indicated in Table 2. In order to check the condition of the coils and determine when the end of their useful life has been reached, a 60 Hz voltage will be applied both after the initial exposure to mechanical stress and moisture, and after each successive exposure to heat, mechanical stress, and moisture as follows.

Table 2—Test Voltages

Rated Line-to-Line rms Voltage in Service, Volts	To Ground and Between Coils: †	Test Between Conductors*	
		Peak Impulse‡ Voltage, Volts	Alternating rms Voltage, Volts
500 and below	1 000	250	115
551–1000	2 000	250	115
1001–1500	3 000	250	115
1501–2000	4 000	250	115
2001–2500	5 000	250	115
2501–3500	7 000	250	115
3501–4500	9 000	250	115
4501–5500	11 000	250	115
5501–6900	13 800	250	115

*Optional tests depending on a available equipment.

† It is recommended that an overcurrent device set at least five times normal charging current be used, or failure is considered if current exceeds 200 mA— ϕ to ϕ and ϕ to ground, or 90 mA turn to turn.

‡Surge comparison test volts per turn
Turn-to-turn tests are described in [5].

The voltage will be applied in succession to ground, between coils, and between conductors for a period of 10 min following each exposure to moisture, while the specimens are still in the humidity chamber and are wet from exposure, at approximately room temperature. Experience has shown that this prolonged time of voltage application in the wet condition is necessary to detect failures. Many of the failures in this condition occur as the result of creepage along wet surfaces, with gradual building up of the leakage current, which could not occur in the usual 1 min test.

Failure in any of these voltage check tests will be indicated by an unusual current. Minor spitting and surface sparking should be recorded, but they do not constitute a failure. It is desirable in these tests to use an alternating voltage, *nonsurge*, high-potential tester that automatically trips on overcurrent. (See dagger noted in Table 2.) Test equipment should be of sufficient capacity, 1 kVA or more, to assure identification of failure.

Any failure in any component of the insulation system constitutes failure of the entire coil and fixes the end of life.

It is recognized that by applying the voltages as recommended above, which are fixed by the intended voltages in actual service, markedly different periods of life may be obtained for the same insulating materials, depending on the insulation barriers and lengths of the creepage paths employed.

The end of insulation life is assumed to have occurred at the midpoint of the exposure time between the two consecutive applications of diagnostic factors, the one during which failure was observed and the last prior application of diagnostic factors with no failure.

5. Procedure for Reporting and Analyzing

5.1 Data

Report the total number of hours of heat aging to the end of life (see 4.5) for each coil and for each test temperature.

5.2 Analysis

For statistical analysis of data, refer to IEEE Std 101-1987 [4].

5.3 Comparison

When the candidate System 2 is to be compared to the reference System 1, the regression line (log life versus reciprocal of the absolute temperature) of System 1 is extrapolated to its temperature rating, defining a mean test life X for the reference system.

In the normal case where the service lives of System 1 and System 2 are required to be the same, the regression line of System 2 is extrapolated to the mean test life X of the reference system. If the temperature for System 2 at this test life is equal to or greater than the temperature rating of System 1, then it has, at least, the same temperature rating as System 1.

In special cases, where the required service lives of the two systems are different, the regression line of System 2 is extrapolated to a test life that differs in the same proportion. (For example, if System 2 is required to have twice the service life of System 1, then the extrapolation is carried out to a test life of $2X$.) In this case, if the temperature for System 2 at this new and different test life is equal to or greater than the temperature rating of System 1, then it has, at least, the same temperature rating as System 1.

5.4 Extrapolation

It must be understood that extrapolation carries with it a degree of uncertainty. Extrapolation from the lowest test temperature should preferably be no greater than 20 °C, but in some cases it may go up to 30 °C.

5.5 Nonlinear or Dissimilar Curves

Nonlinear or dissimilar thermal endurance curves may arise when insulation systems are aged over a range of temperatures that cause more than one chemical process during aging. When thermal aging data is plotted on graph paper in the form of log life versus the reciprocal of the absolute temperature, the introduction of new aging mechanisms will normally be shown as a knee, or bend, in the thermal aging curve. Data from the elevated temperature region where the new aging mechanism is activated cannot be used to extrapolate to estimated life at service conditions. When this situation occurs, additional aging temperature points, beginning at least 10 °C below the lowest

existing temperature point, should be obtained and used for extrapolation instead of the points above the bend in the curve.

Dissimilar curves that plot as straight lines may represent greatly different aging rates for the two insulation systems being compared. When this situation occurs, the investigator should obtain additional lower temperature aging points to determine if the endurance curves continue as straight lines, or if a bend occurs below the original aging points.

5.6 System Identification

The report shall identify the systems being tested, place them in the proper temperature class, and recommend end usage.

ภาคผนวก ข
การคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้า

ค่าปริมาณทางไฟฟ้าจะถูกคำนวณโดยใช้ข้อมูลสัญญาณกระแสและแรงดันที่ถูกวัดผ่านเซ็นเซอร์ด้วย DAQ ผ่านโปรแกรม LabVIEW ซึ่งสัญญาณที่ได้มีลักษณะเป็นสัญญาณไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นต้องใช้สมการการคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้าของสัญญาณเวลาไม่ต่อเนื่อง ดังนี้ กำหนดให้

$$v_a(kT_s) = \sqrt{2}V_a \sin(\omega(kT_s) + \alpha_a) \quad (\text{ข-1})$$

$$v_b(kT_s) = \sqrt{2}V_b \sin(\omega(kT_s) + \alpha_b - 120^\circ) \quad (\text{ข-2})$$

$$v_c(kT_s) = \sqrt{2}V_c \sin(\omega(kT_s) + \alpha_c + 120^\circ) \quad (\text{ข-3})$$

$$i_a(kT_s) = \sqrt{2}I_a \sin(\omega(kT_s) + \beta_a) \quad (\text{ข-4})$$

$$i_b(kT_s) = \sqrt{2}I_b \sin(\omega(kT_s) + \beta_a - 120^\circ) \quad (\text{ข-5})$$

$$i_c(kT_s) = \sqrt{2}I_c \sin(\omega(kT_s) + \beta_c + 120^\circ) \quad (\text{ข-6})$$

(1) ค่ากระแสและแรงดัน *rms*

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N i^2(kT_s)}{N}} \quad (\text{ข-7})$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N v^2(kT_s)}{N}} \quad (\text{ข-8})$$

(2) ค่ากำลังไฟฟ้าจริง

$$P = \frac{\sum_{k=1}^N v(kT_s) \cdot i(kT_s)}{N} \quad (\text{ข-9})$$

$$P_{Total} = P_a + P_b + P_c \quad (\text{ข-10})$$

(3) ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ

$$S = V_{rms} I_{rms} \quad (\text{ข-11})$$

$$S_{Total} = S_a + S_b + S_c \quad (\text{ข-12})$$

(4) ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

$$Q_a = \sqrt{S_a^2 - P_a^2} \quad (\text{ข-13})$$

$$Q_{Total} = Q_a + Q_b + Q_c \quad (\text{ข-14})$$

(5) ค่าตัวประกอบกำลัง

$$pf = \frac{P_{Total}}{S_{Total}} \quad (\text{ข-15})$$

(6) ค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวมและค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม

$$THD_V = \frac{V_H}{V_1} = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots}}{V_1} \quad (\text{ข-16})$$

$$THD_I = \frac{I_H}{I_1} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_1} \quad (\text{ข-17})$$

(7) ค่าอิมพีแดนซ์

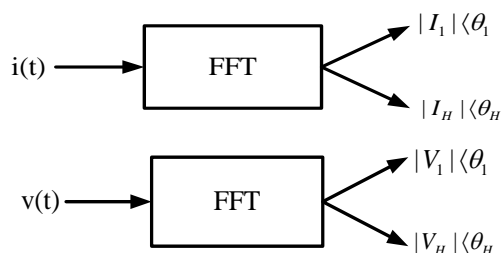
$$Z = \frac{V_{rms}}{I_{rms}} \quad (\text{ข-18})$$

(8) ค่าพลังงานไฟฟ้า

$$E(W \cdot h) = P_{Total}(W) \times t(h) \quad (\text{ข-19})$$

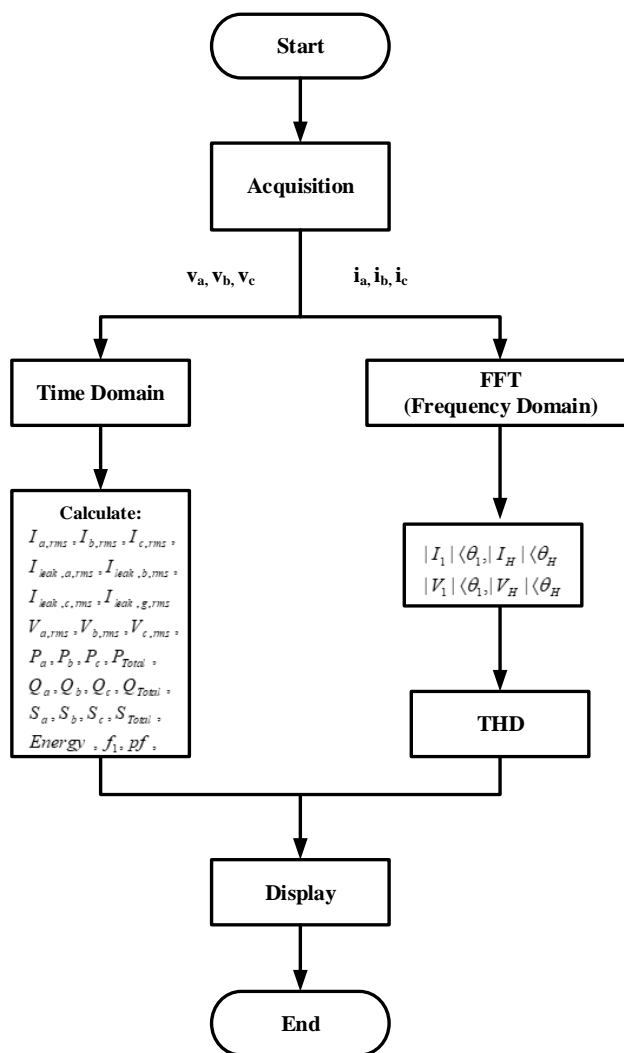
เมื่อ	v	คือ สัญญาณแรงดันไฟฟ้า
	i	คือ สัญญาณกระแสไฟฟ้า
	k	คือ ค่าจำนวนเต็มบวก
	T_s	คือ คาบการซีกตัวอย่าง
	N	คือ จำนวนตัวอย่าง
	t	คือ เวลา

การคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้าต่างๆ จะใช้การแปลงฟูริเยอร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform: *FFT*) เข้ามาช่วยเพื่อหาส่วนประกอบความถี่ของสัญญาณกระแสและแรงดัน ทำให้รู้ขนาดและมุมของกระแสและแรงดันที่ความถี่มูลฐานและความถี่ฮาร์มอนิก แสดงดังภาพประกอบ ข-1



ภาพประกอบ ข-1 การหาส่วนประกอบความถี่ของสัญญาณกระแสและแรงดัน

ค่ากระแสและแรงดันที่มีความถี่มูลฐานจะแสดงที่ความถี่ 50 เฮิร์ต สำหรับค่ากระแสและแรงดันที่มีความถี่ฮาร์โมนิกจะพิจารณาความถี่อื่นๆ ตั้งแต่ความถี่ 100 เฮิร์ต ถึง 50 เท่าของความถี่มูลฐาน (2500 เฮิร์ต) สามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมของโปรแกรมการคำนวณได้ดังภาพประกอบ ข-2



ภาพประกอบ ข-2 บล็อกไดอะแกรมการคำนวณปริมาณทางไฟฟ้า

(9) การคำนวณโมดูลเวกเตอร์ปาร์ก

กำหนดให้

$$i_a = i_d \cos(\omega t - \alpha_d) + i_i \cos(\omega t - \beta_i) \quad (\text{ข-20})$$

$$i_b = i_d \cos\left(\omega t - \alpha_d - \frac{2\pi}{3}\right) + i_i \cos\left(\omega t - \beta_i + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{ข-21})$$

$$i_c = i_d \cos\left(\omega t - \alpha_d + \frac{2\pi}{3}\right) + i_i \cos\left(\omega t - \beta_i - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{ข-22})$$

เมื่อ i_d คือ ค่าสูงสุดของกระแสลำดับบวก i_i คือ ค่าสูงสุดของกระแสลำดับลบ α_d คือ มุมเฟสเริ่มต้นของกระแสลำดับบวก (rad) β_i คือ มุมเฟสเริ่มต้นของกระแสลำดับลบ (rad)

สามารถเขียน Current Park's vector ได้ดังนี้

$$i_D = \left(\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}}\right)(i_d \cos(\omega t - \alpha_d) + i_i \cos(\omega t - \beta_i)) \quad (\text{ข-23})$$

$$i_Q = \left(\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}}\right)(i_d \cos(\omega t - \alpha_d) - i_i \cos(\omega t - \beta_i)) \quad (\text{ข-24})$$

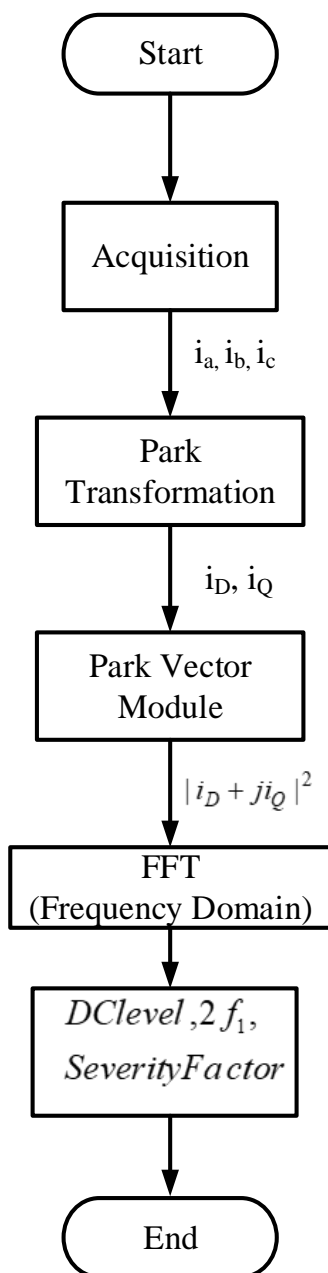
ขนาดกำลังสองของ Park's vector module

$$|i_D + ji_Q|^2 = \left(\frac{3}{2}\right)(i_d^2 + i_i^2) + 3i_d i_i \cos(2\omega t - \alpha_d - \beta_i) \quad (\text{ข-25})$$

คำนวณค่า Severity factor ได้ดังนี้

$$\text{SeverityFactor} = \frac{\text{Amplitude}(2f_1)}{\text{DClevel}} \quad (\text{ข-26})$$

บล็อกไดอะแกรมการทำงานเพื่อคำนวณค่าขนาดของโมดูลเวกเตอร์ปาร์ก แสดง
 ดังภาพประกอบ ข-3



ภาพประกอบ ข-3 บล็อกไดอะแกรมการคำนวณค่าขนาดของโมดูลเวกเตอร์พาร์ก

(10) การคำนวณส่วนประกอบสมมาตร

คำนวณค่าเวกเตอร์เชิงซ้อนของกระแสและแรงดันดังสมการ (ข-27) และ (ข-28)

$$\vec{I} = \frac{2}{3} (i_a + i_b \cdot e^{j120^\circ} + i_c \cdot e^{j240^\circ}) \quad (\text{ข-27})$$

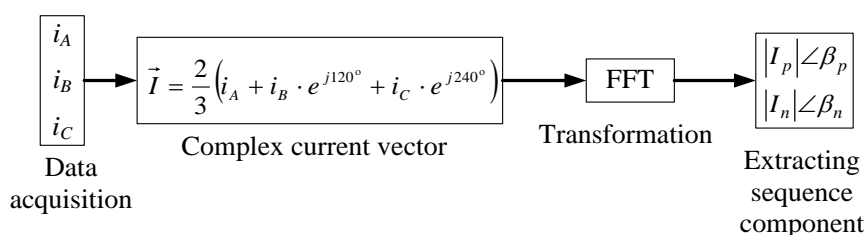
$$\vec{V} = \frac{2}{3} (v_a + v_b \cdot e^{j120^\circ} + v_c \cdot e^{j240^\circ}) \quad (\text{ข-28})$$

เมื่อ i_a, v_a คือ สัญญาณกระแส, แรงดัน เฟส A

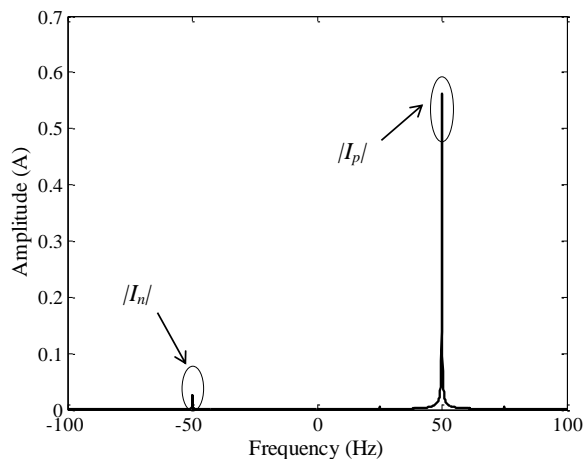
i_b, v_b คือ สัญญาณกระแส, แรงดัน เฟส B

i_c, v_c คือ สัญญาณกระแส, แรงดัน เฟส C

เมื่อนำเวกเตอร์กระแสหรือแรงดันเชิงซ้อน แปลงฟูริเยอร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform: *FFT*) สามารถแยกส่วนประกอบลำดับบวกและลบได้ แสดงบล็อกไดอะแกรมกระบวนการคำนวณได้ดังภาพประกอบ ข-4 ส่วนประกอบสมมาตรจะปรากฏที่สเปกตรัมสัญญาณเชิงซ้อนดังตัวอย่างในภาพประกอบ ข-5



ภาพประกอบ ข-4 บล็อกไดอะแกรมคำนวณค่าส่วนประกอบสมมาตร



ภาพประกอบ ข-5 สเปกตรัมกระแสเชิงซ้อน

คำนวณอิมพีแดนซ์ลำดับบวกและลบได้ดังนี้

$$Z_p = \frac{V_p}{I_p} \tag{ข-29}$$

$$Z_n = \frac{V_n}{I_n} \tag{ข-30}$$

(11) การคำนวณกำลังสัญญาณสเปกตรัมกระแสไฟฟ้า

สัญญาณสเปกตรัมกระแสไฟฟ้าจะถูกกรองข้อมูลในช่วงความถี่ 120-180 เฮิร์ต เนื่องจากเป็นช่วงความถี่ที่มักถูกใช้เพื่อพิจารณาความผิดปกติบริเวณขดลวดสเตเตอร์ ข้อมูลในช่วงความถี่นี้ถูกนำมาคำนวณกำลังสัญญาณดังสมการ (ข-31)

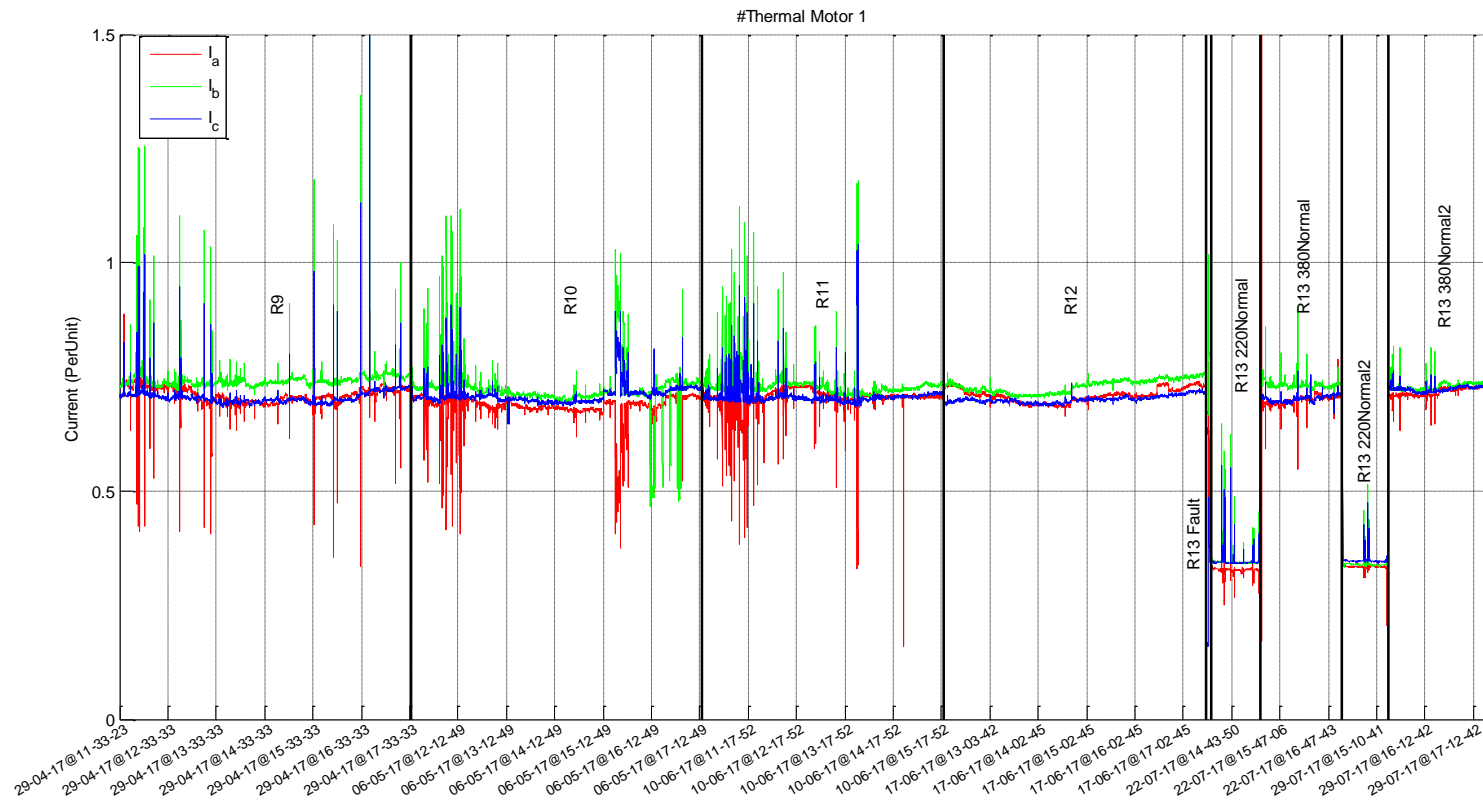
$$P = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n^2 \quad (\text{ข-31})$$

เมื่อ x คือ สัญญาณสเปกตรัมกระแสในช่วงความถี่ 120-180 เฮิร์ต
 N คือ จำนวนข้อมูล

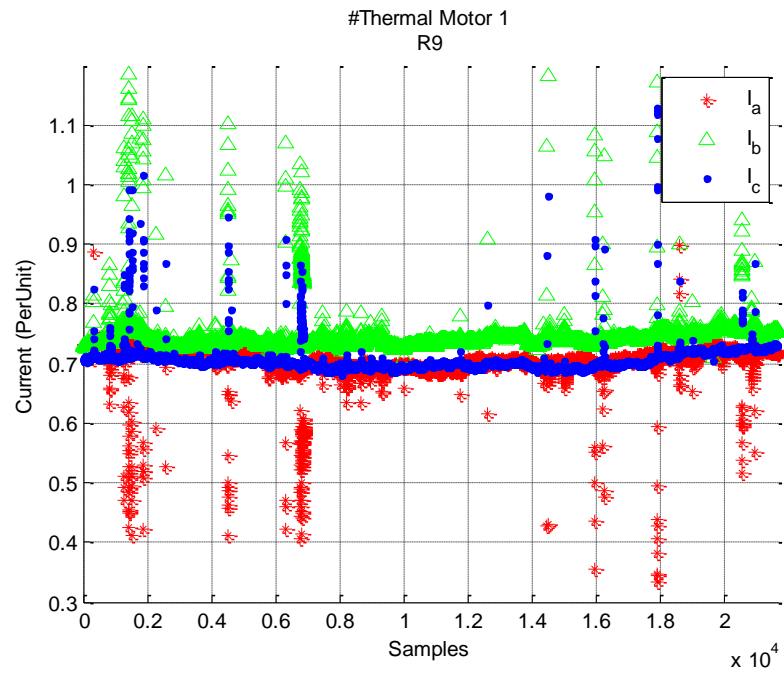
ภาคผนวก ค

ผลการบันทึกสัญญาณทางไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

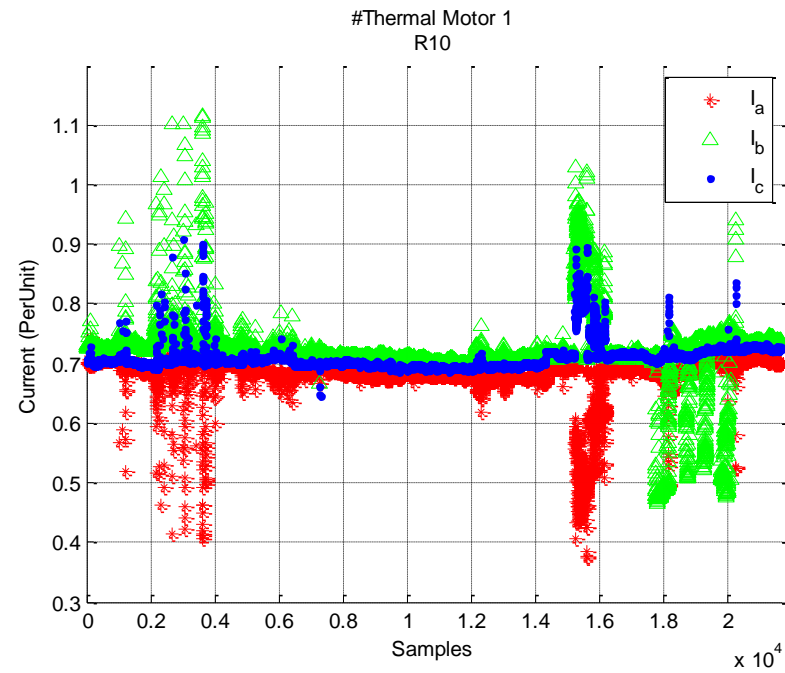
กราฟแสดงแนวโน้มค่าปริมาณทางไฟฟ้าของมอเตอร์ตัวที่ 1



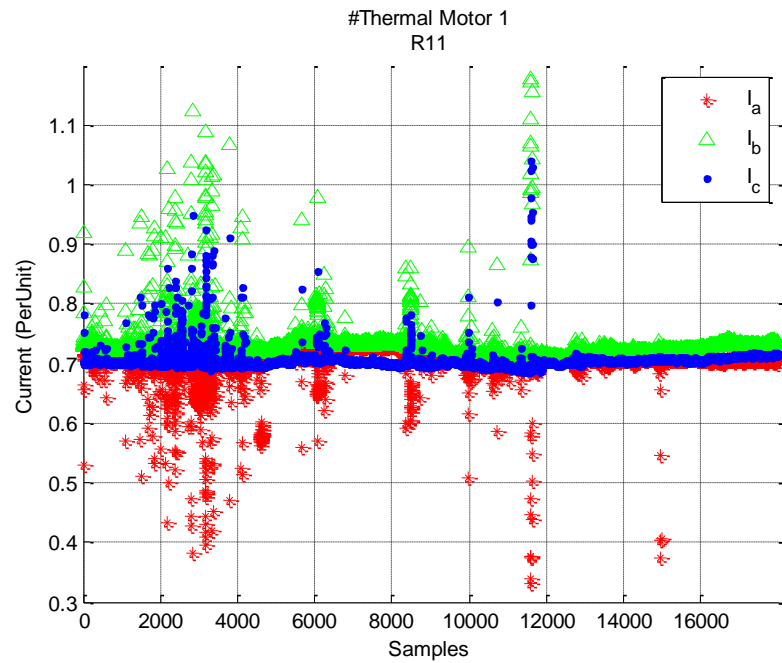
ภาพประกอบ ค-1 กราฟแสดงค่ากระแส Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 1 ในรอบที่ 9 – 13



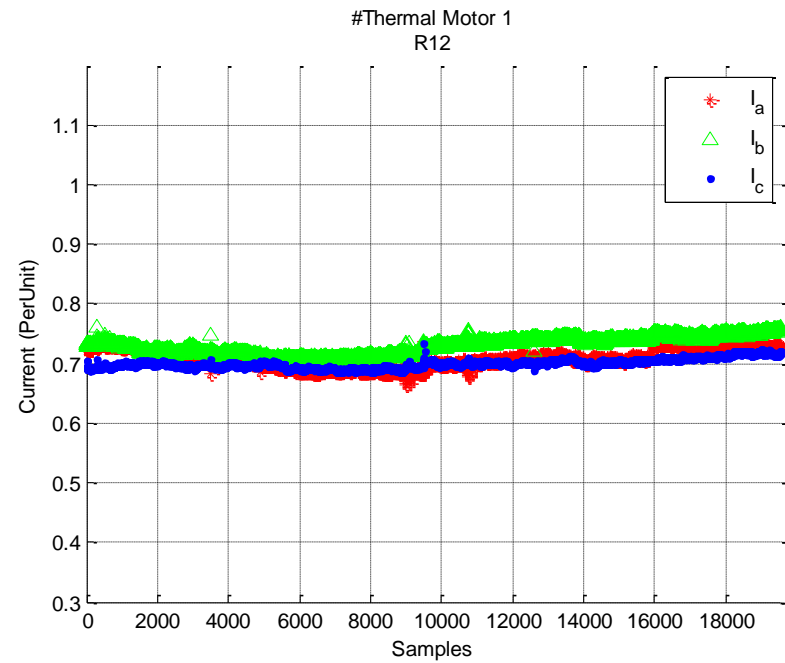
ภาพประกอบ ค-2 กราฟแสดงค่ากระแส Per unit เฟส A, B, C
ของมอเตอร์ตัวที่ 1 ในรอบที่ 9



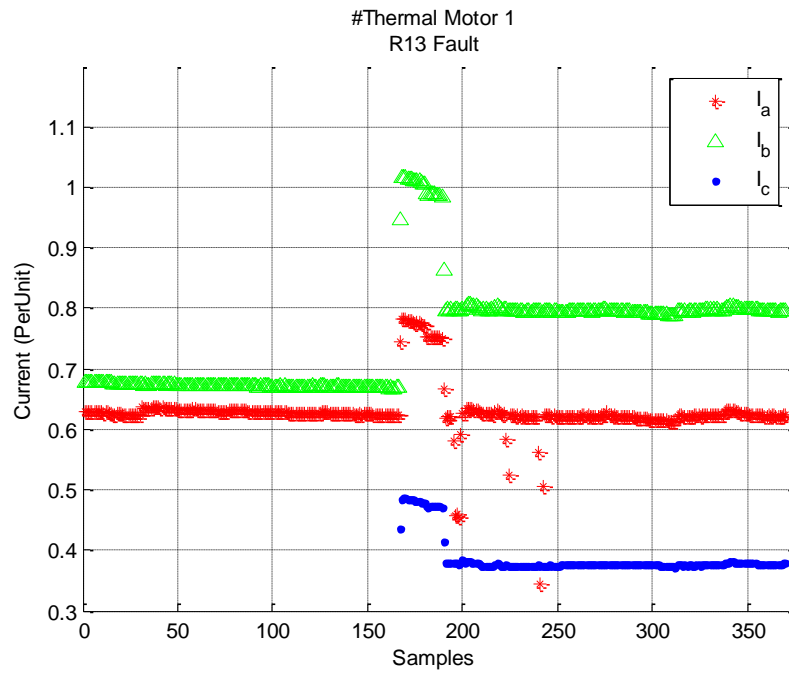
ภาพประกอบ ค-3 กราฟแสดงค่ากระแส Per unit เฟส A, B, C
ของมอเตอร์ตัวที่ 1 ในรอบที่ 10



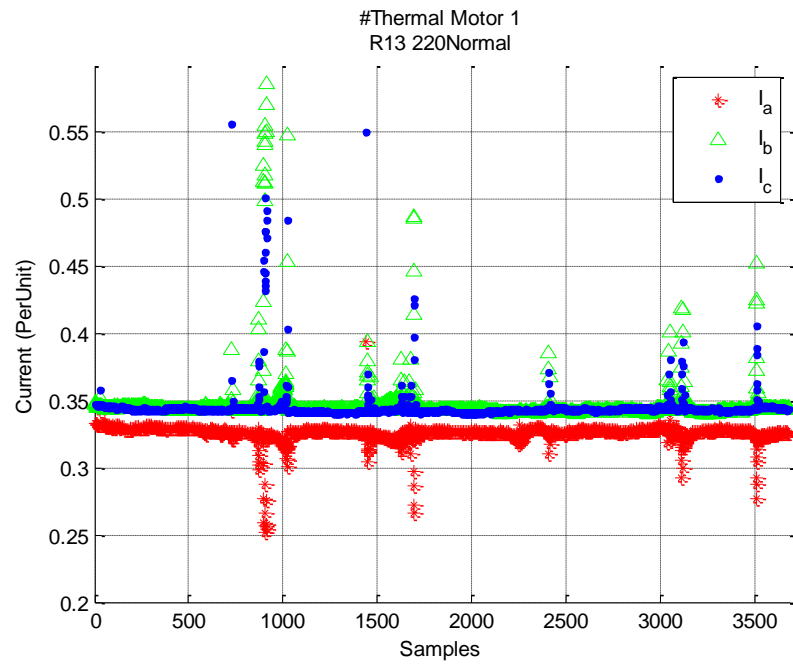
ภาพประกอบ ค-4 กราฟแสดงค่ากระแส Per unit เฟส A, B, C
ของมอเตอร์ตัวที่ 1 ในรอบที่ 11



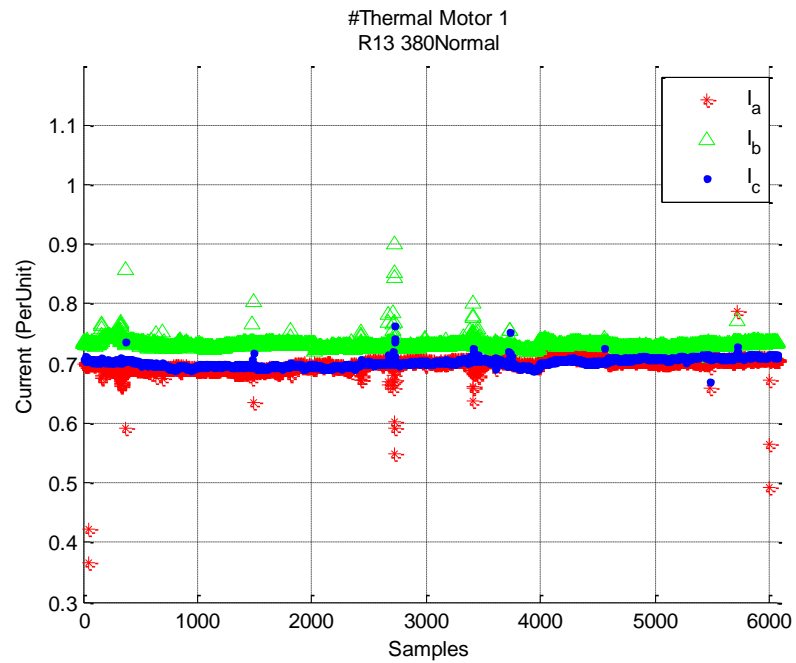
ภาพประกอบ ค-5 กราฟแสดงค่ากระแส Per unit เฟส A, B, C
ของมอเตอร์ตัวที่ 1 ในรอบที่ 12



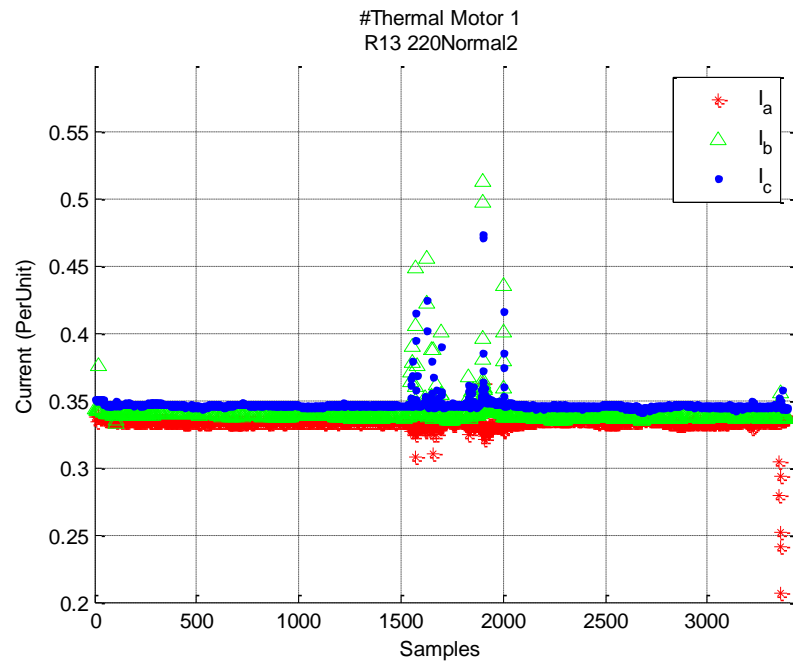
ภาพประกอบ ค-6 กราฟแสดงค่ากระแส Per unit เฟส A, B, C
ของมอเตอร์ตัวที่ 1 ในรอบที่ 13 (R13 Fault)



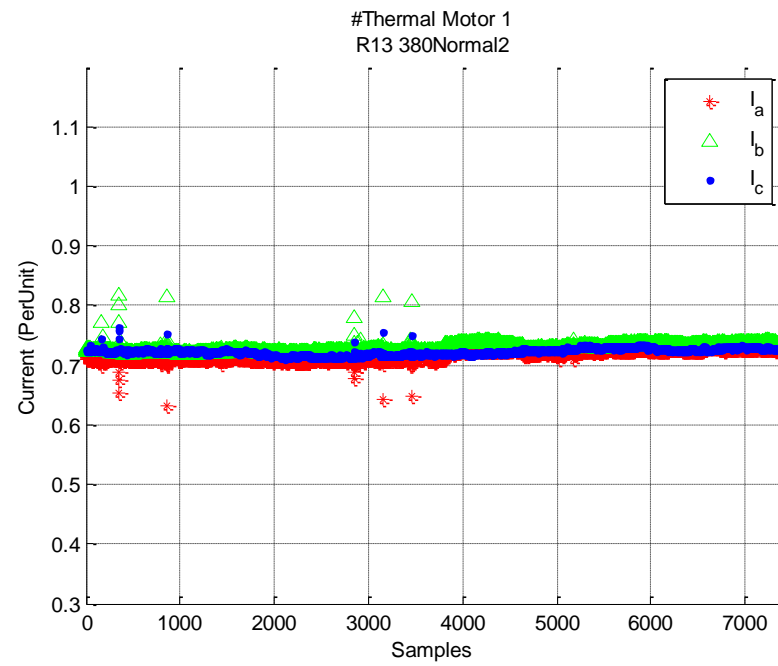
ภาพประกอบ ค-7 กราฟแสดงค่ากระแส Per unit เฟส A, B, C
ของมอเตอร์ตัวที่ 1 ในรอบที่ 13 (R13 220Normal)



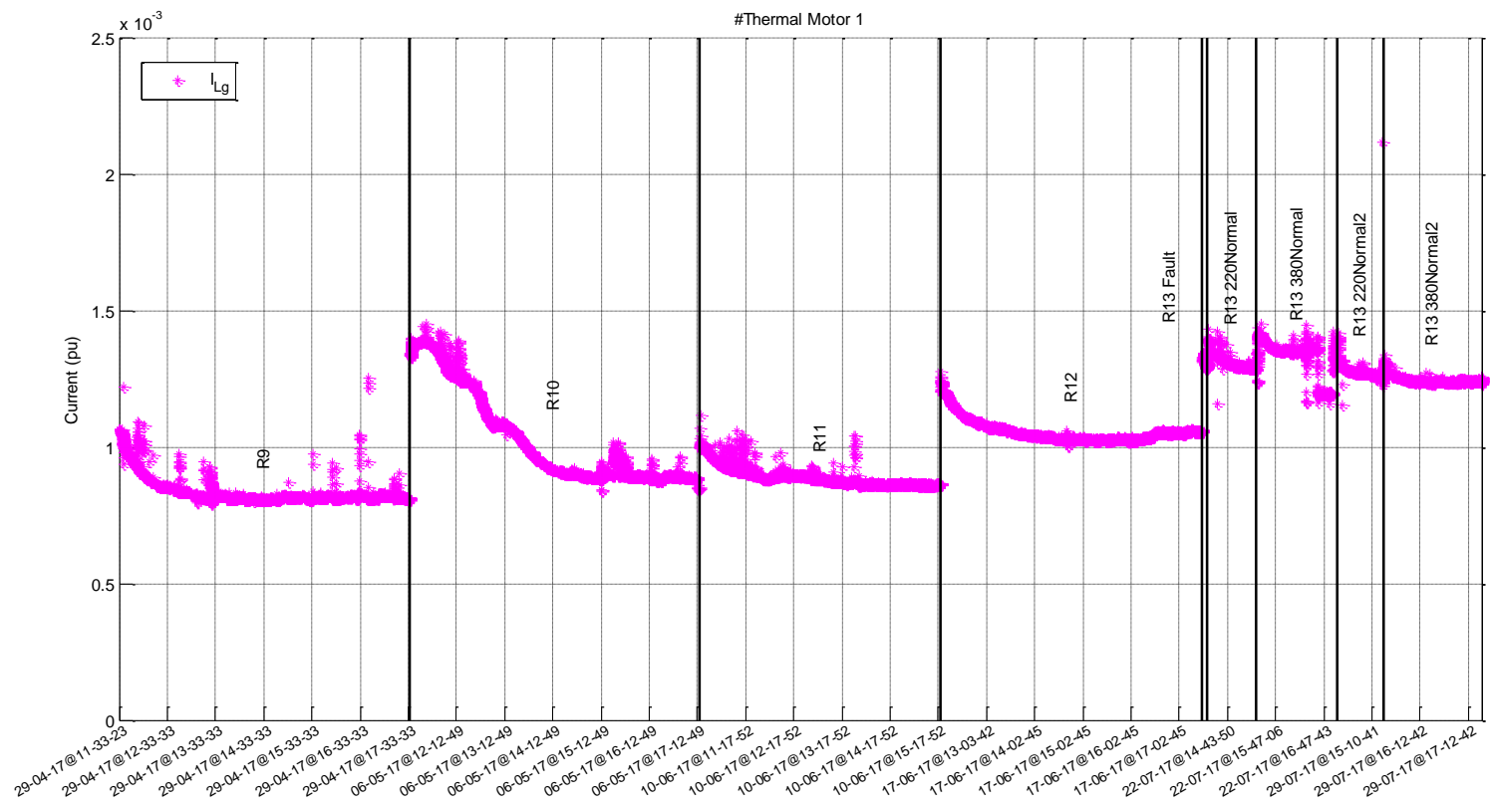
ภาพประกอบ ค-8 กราฟแสดงค่ากระแส Per unit เฟส A, B, C
ของมอเตอร์ตัวที่ 1 ในรอบที่ 13 (R13 380Normal)



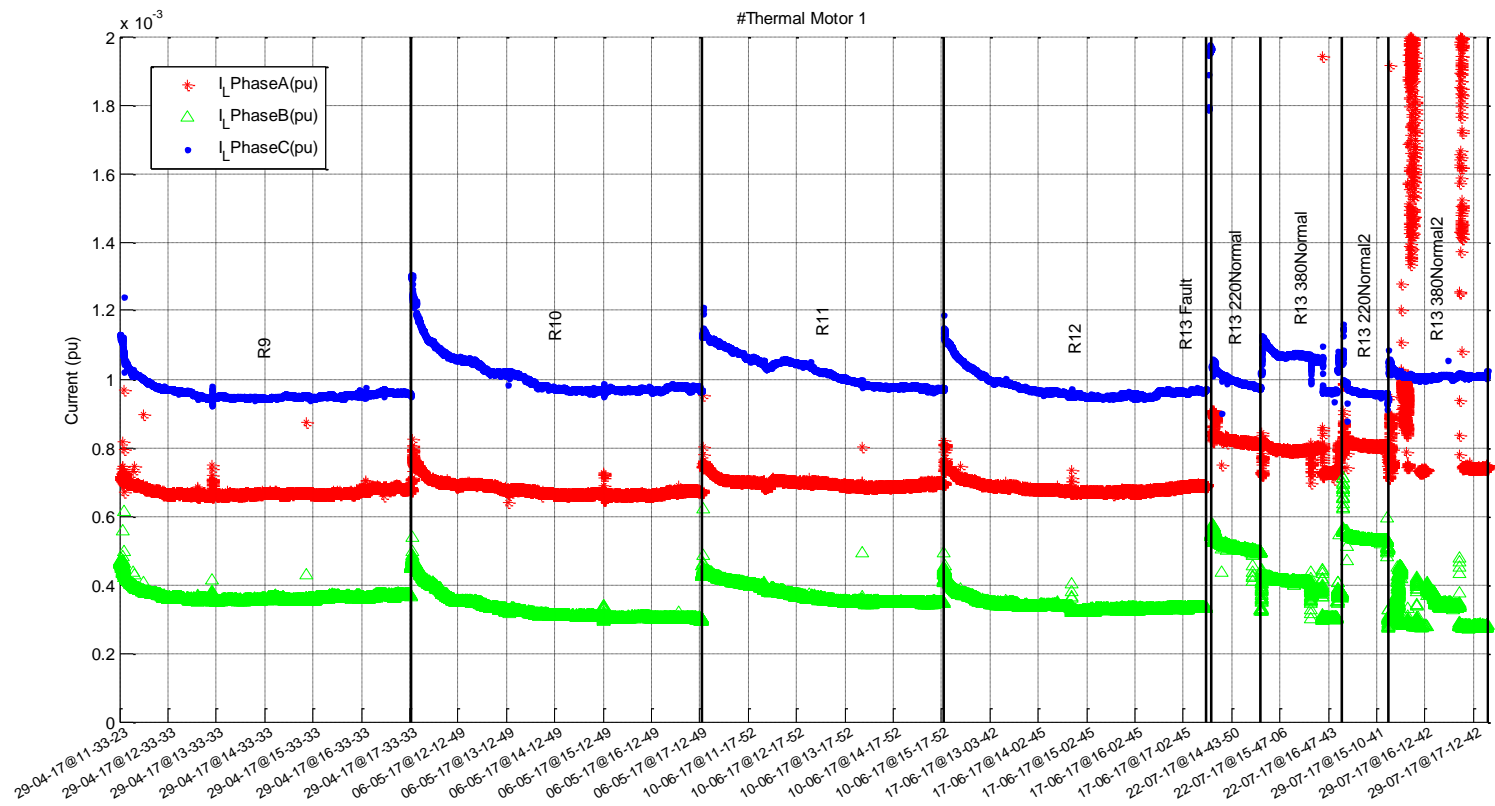
ภาพประกอบ ค-9 กราฟแสดงค่ากระแส Per unit เฟส A, B, C
ของมอเตอร์ตัวที่ 1 ในรอบที่ 13 (R13 220Normal2)



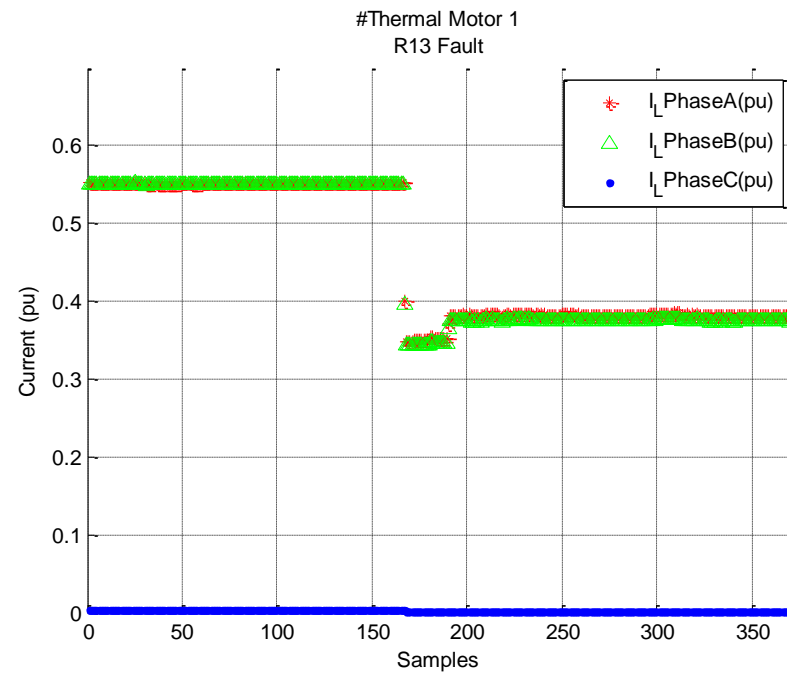
ภาพประกอบ ค-10 กราฟแสดงค่ากระแส Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 1 ในรอบที่ 13 (R13 380Normal2)



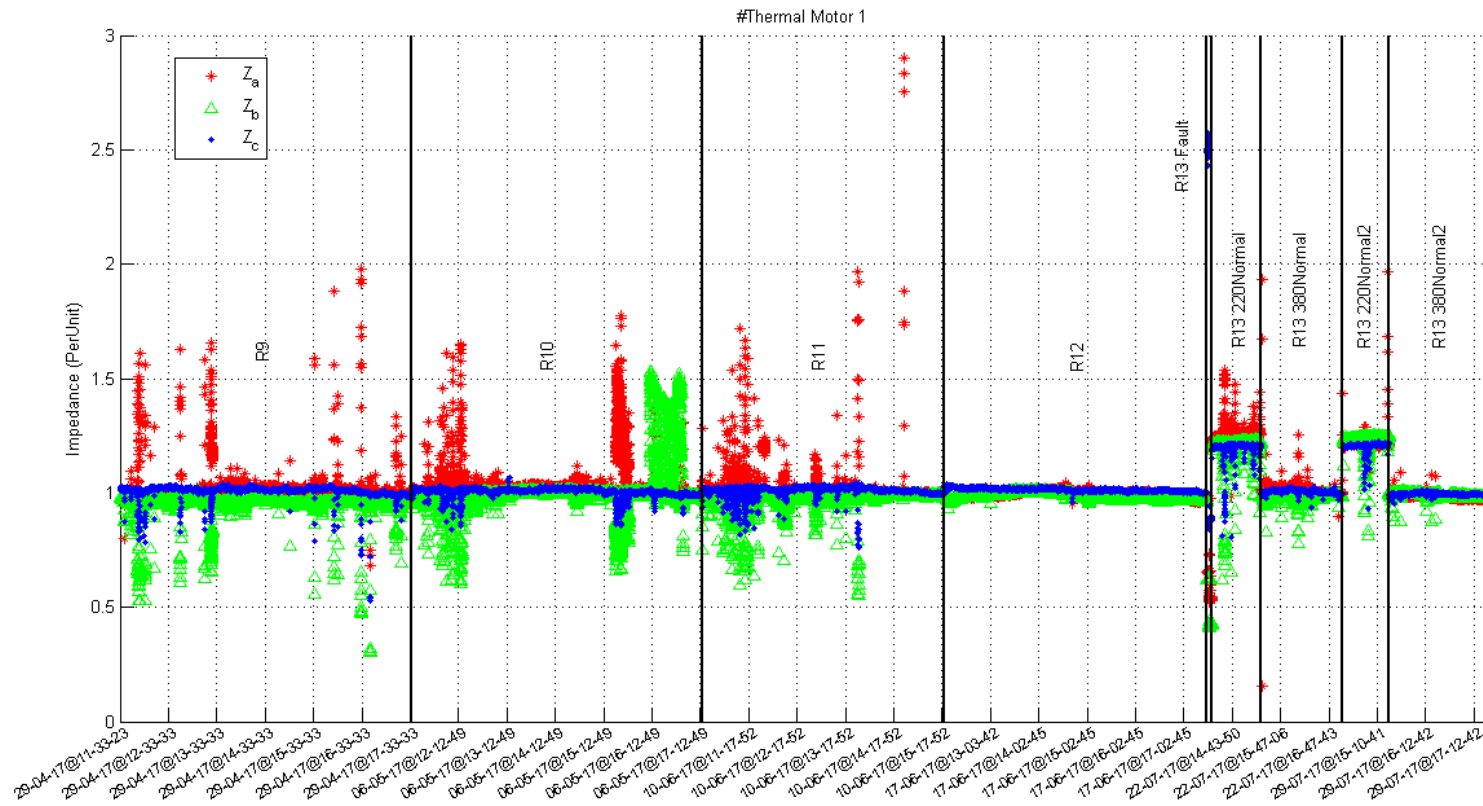
ภาพประกอบ ค-11 กราฟแสดงค่ากระแสรั่วไหลลงดิน Per unit ของมอเตอร์ตัวที่ 1 ในรอบที่ 9 – 13



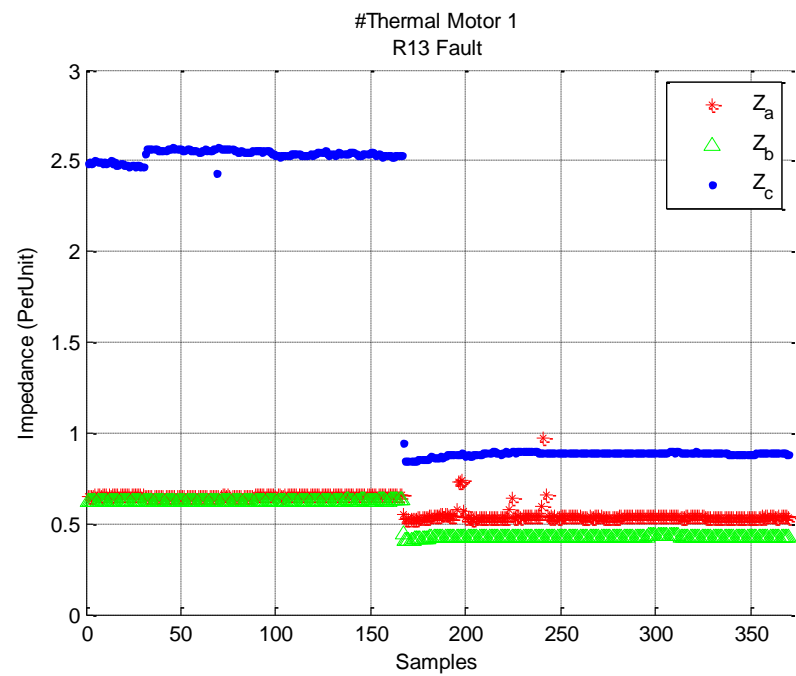
ภาพประกอบ ค-12 กราฟแสดงค่ากระแสรั่วไหล Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 1 ในรอบที่ 9 – 13



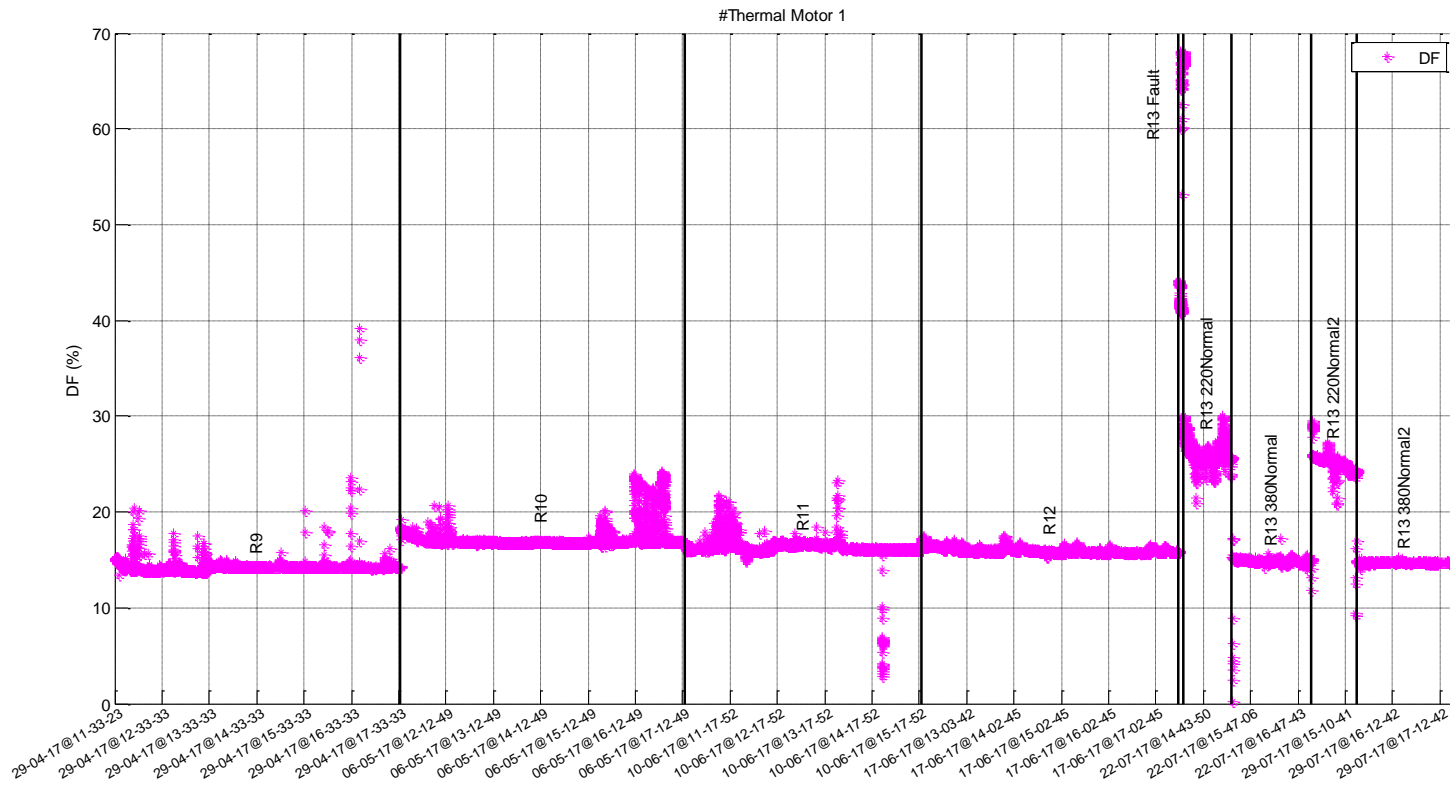
ภาพประกอบ ค-13 กราฟแสดงค่ากระแสรั่วไหล Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 1 ในรอบที่ 13 (R13 Fault)



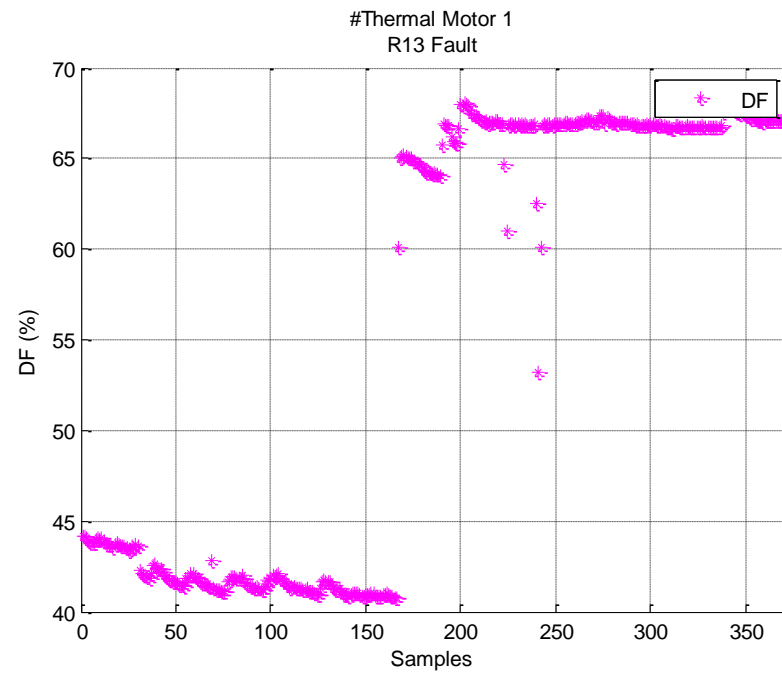
ภาพประกอบ ค-14 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 1 ในรอบที่ 9 – 13



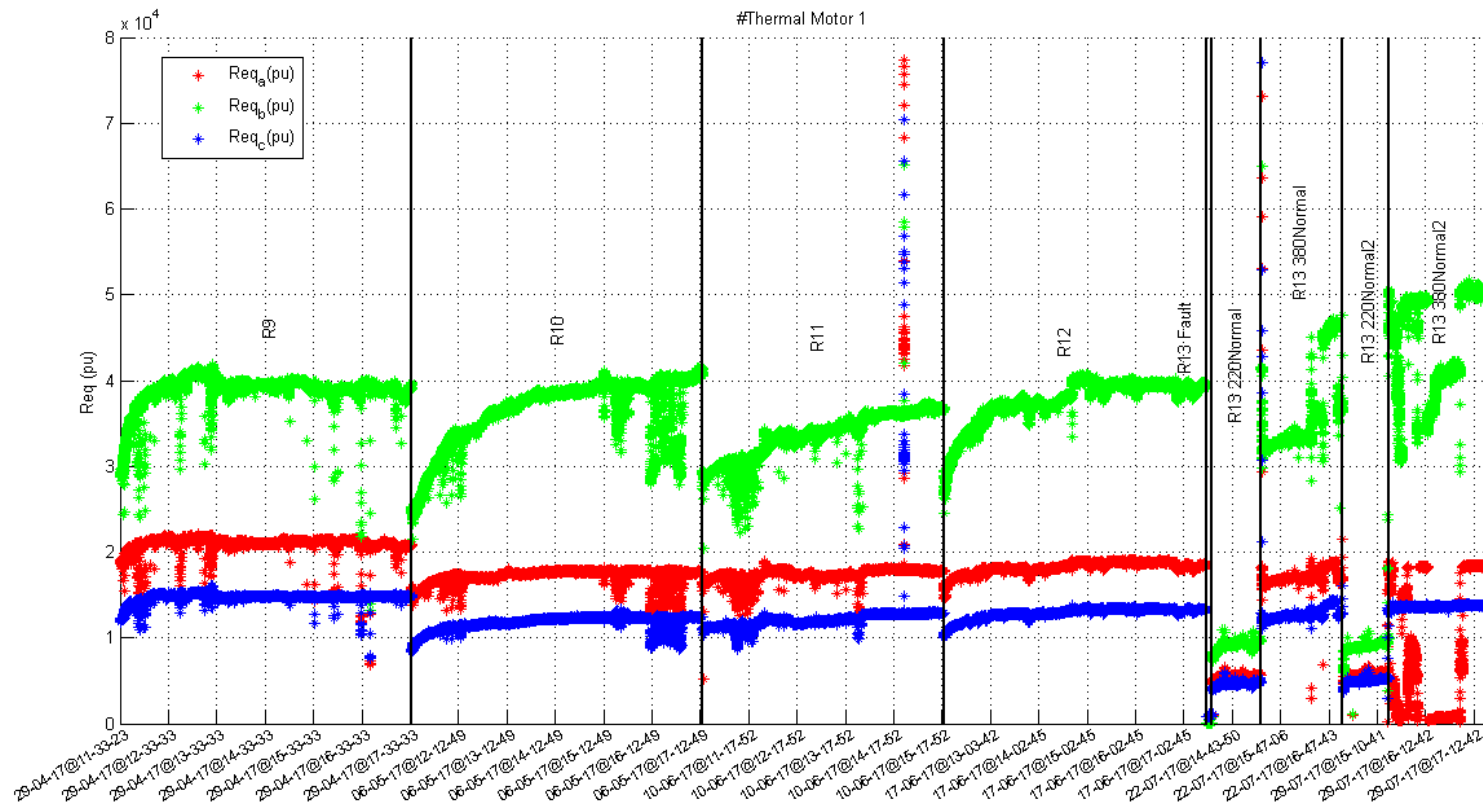
ภาพประกอบ ค-15 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 1 ในรอบที่ 13 (R13 Fault)



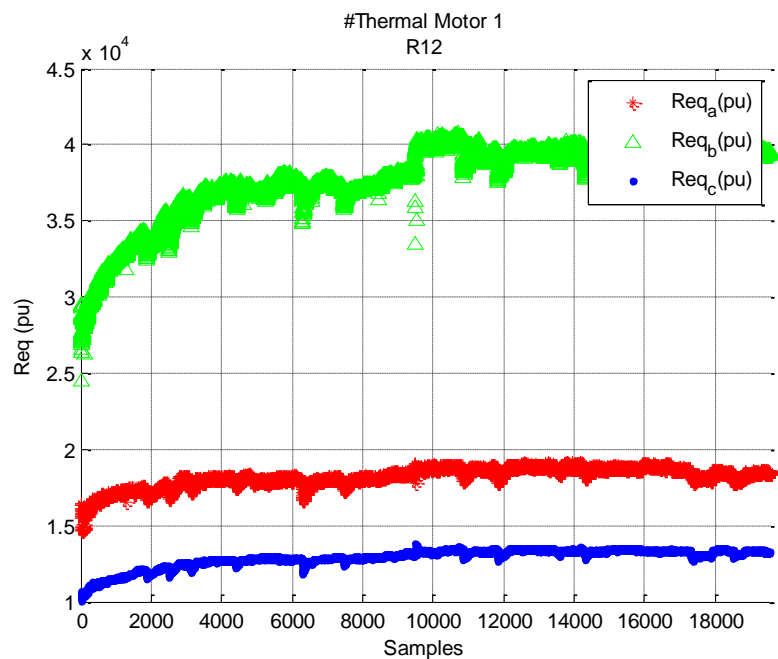
ภาพประกอบ ค-16 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ตัวประกอบการแผ่กระจาย ของมอเตอร์ตัวที่ 1 ในรอบที่ 9 – 13



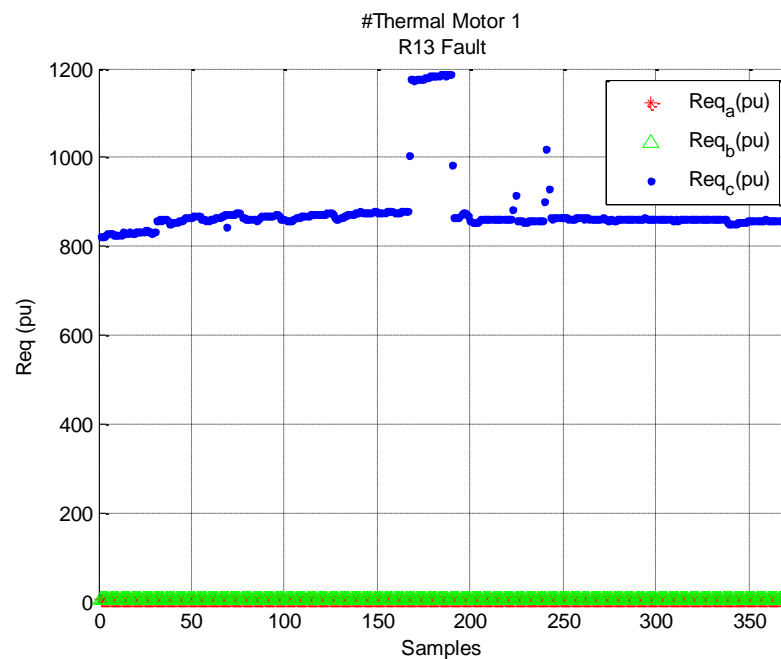
ภาพประกอบ ค-17 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ตัวประกอบการแผ่กระจาย ของมอเตอร์ตัวที่ 1 ในรอบที่ 13 (*R13 Fault*)



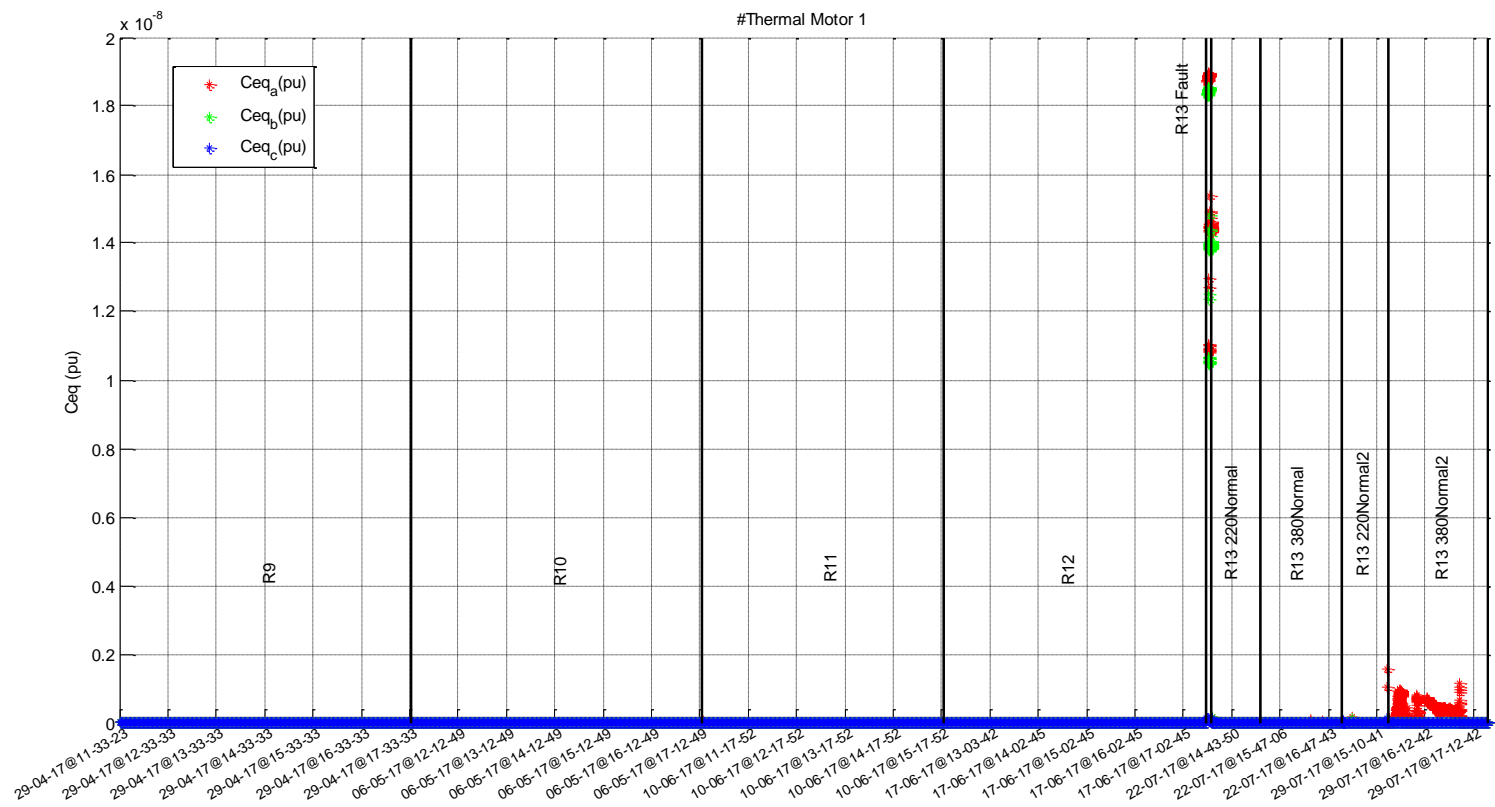
ภาพประกอบ ค-18 กราฟแสดงค่าความต้านทานจนวนไฟฟ้า Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 1 ในรอบที่ 9 – 13



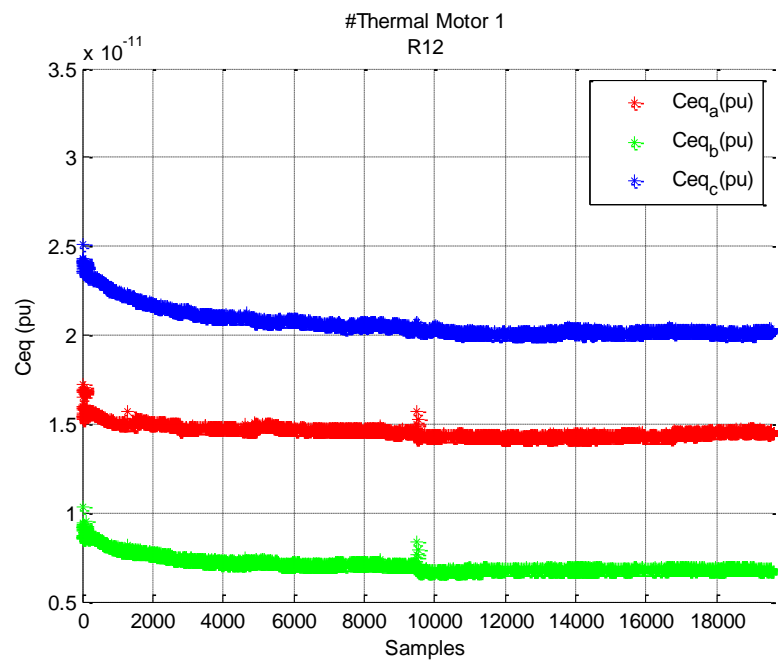
ภาพประกอบ ค-19 กราฟแสดงค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้า Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 1 ในรอบที่ 12 (R12)



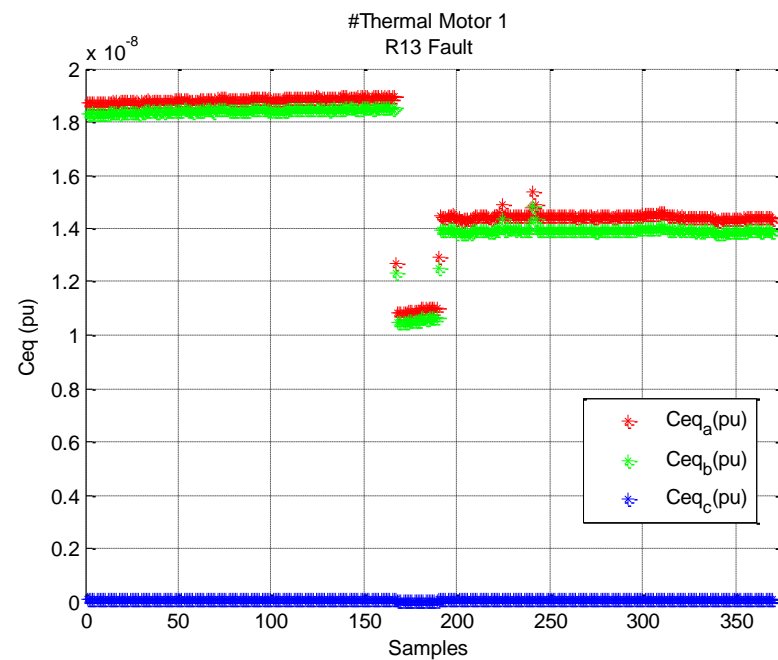
ภาพประกอบ ค-20 กราฟแสดงค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้า Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 1 ในรอบที่ 13 (R13 Fault)



ภาพประกอบ ก-21 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนไฟฟ้า Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 1 ในรอบที่ 9 – 13

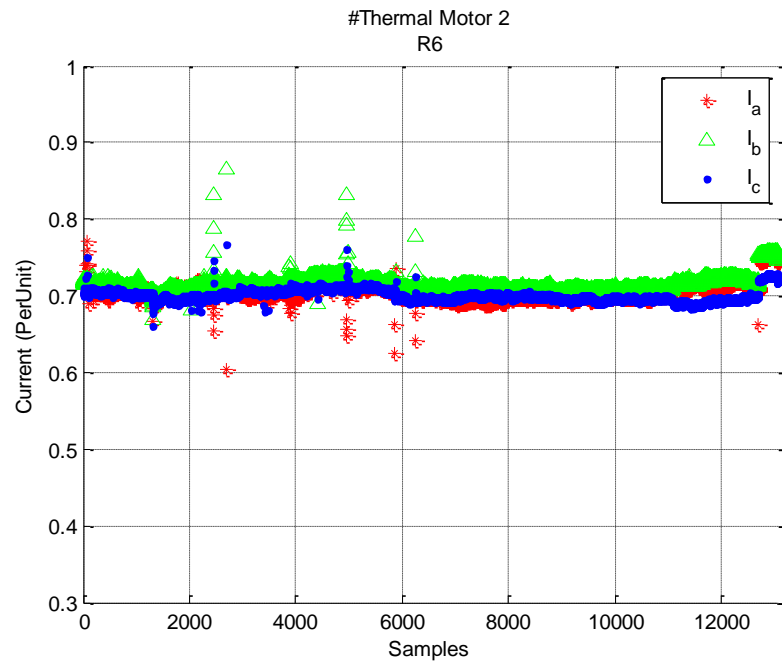


ภาพประกอบ ค-22 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนไฟฟ้า Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 1 ในรอบที่ 12 (R12)

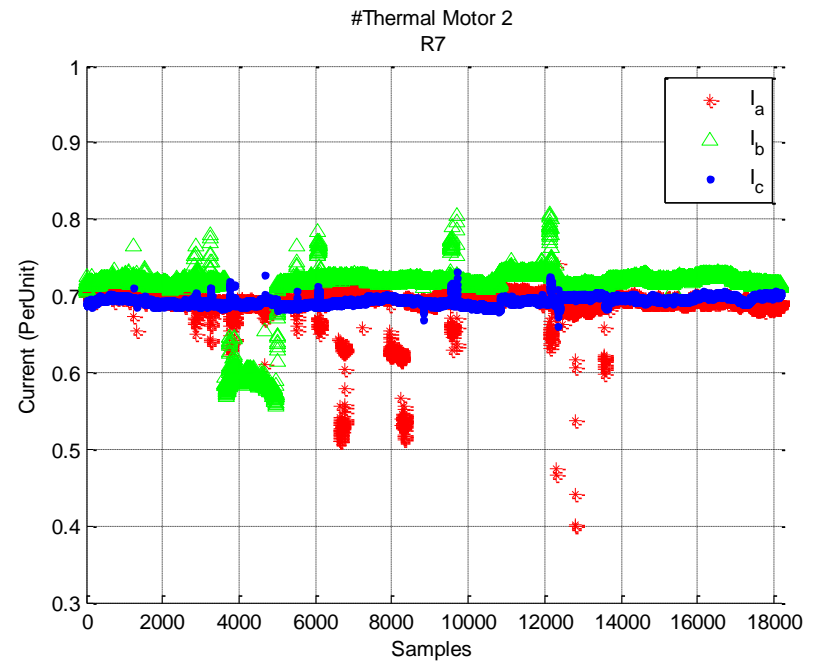


ภาพประกอบ ค-23 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนไฟฟ้า Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 1 ในรอบที่ 13 (R13 Fault)

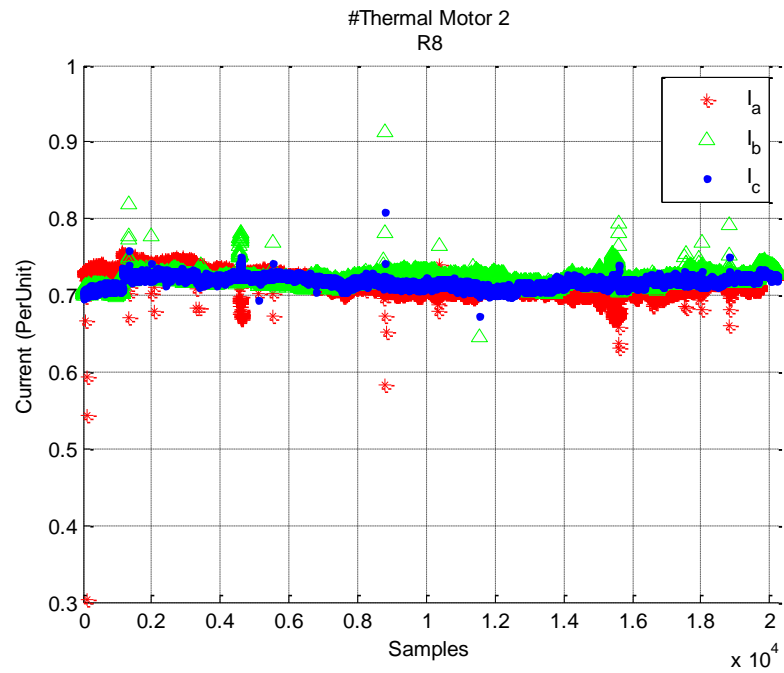
กราฟแสดงแนวโน้มค่าปริมาณทางไฟฟ้าของมอเตอร์ตัวที่ 2



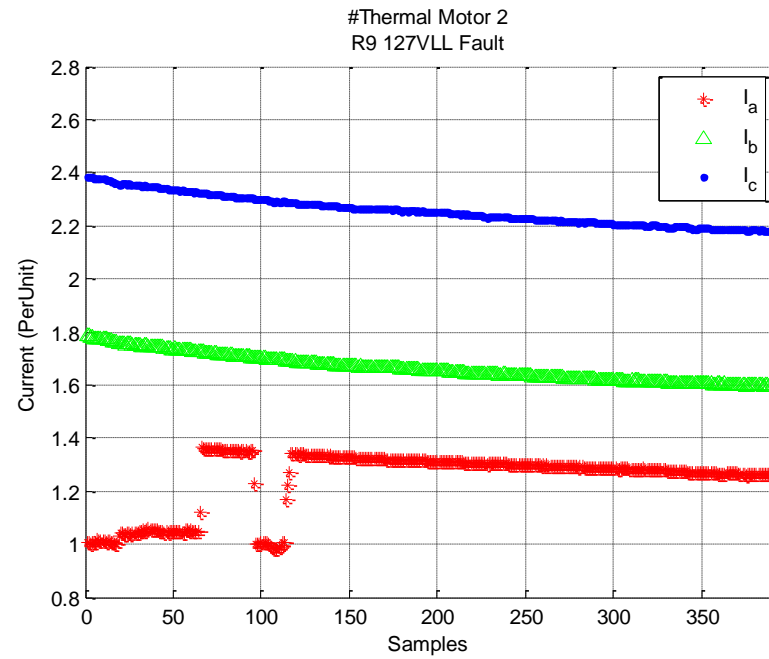
ภาพประกอบ ค-24 กราฟแสดงค่ากระแส Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 6



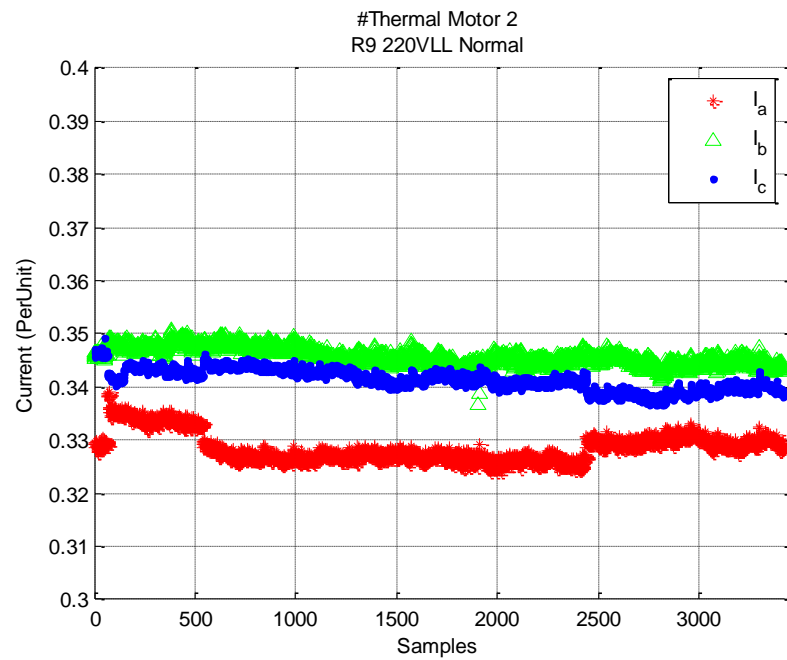
ภาพประกอบ ค-25 กราฟแสดงค่ากระแส Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 7



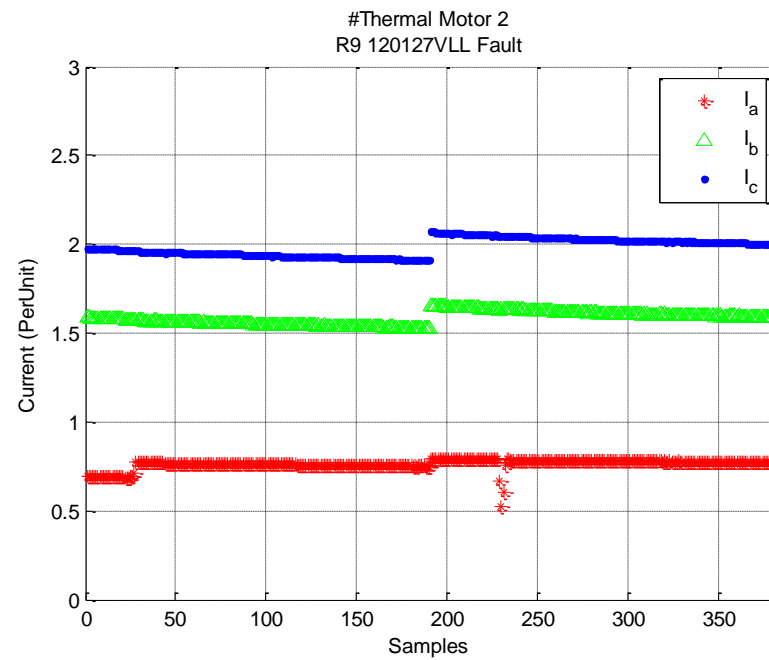
ภาพประกอบ ค-26 กราฟแสดงค่ากระแส Per unit เฟส A, B, C
ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 8



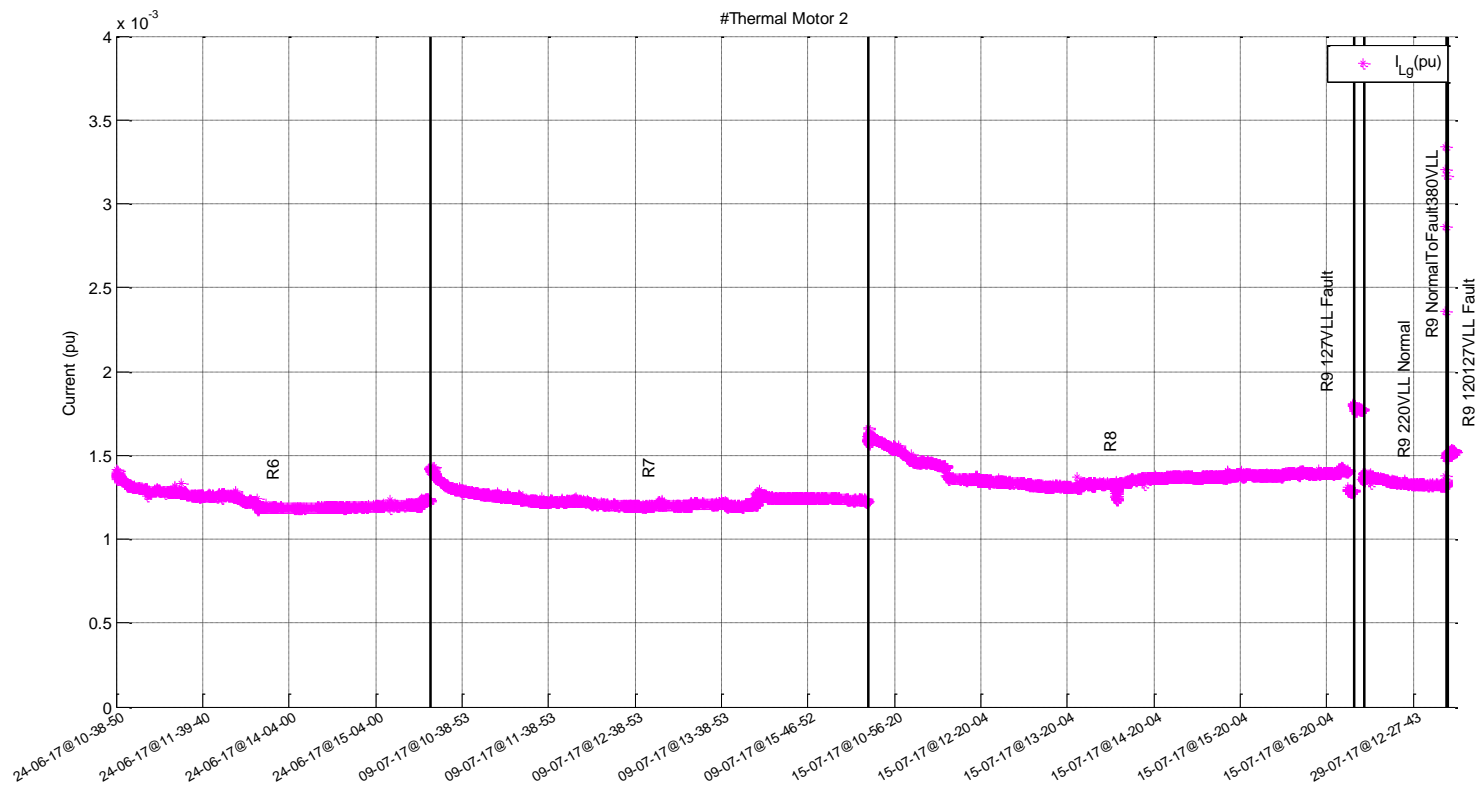
ภาพประกอบ ค-27 กราฟแสดงค่ากระแส Per unit เฟส A, B, C
ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 9 (R9 127VLL Fault)



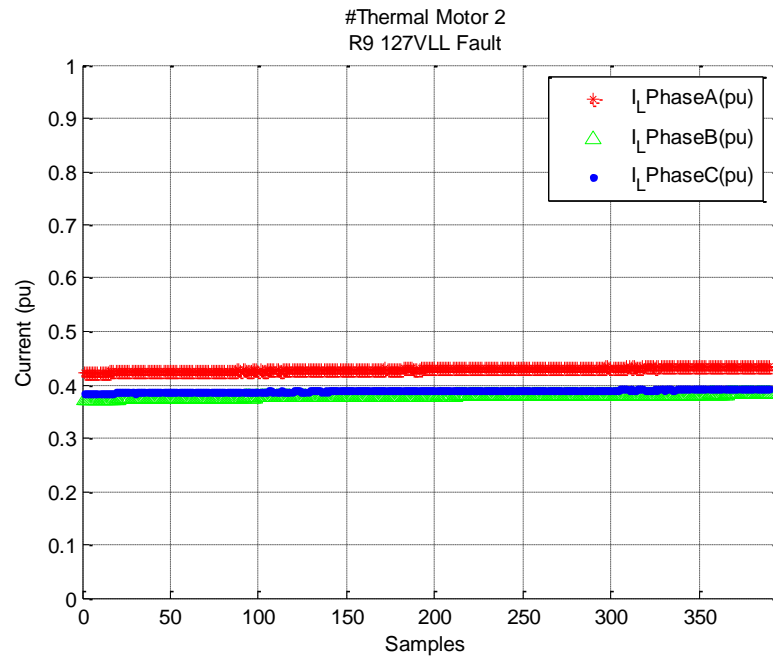
ภาพประกอบ ค-28 กราฟแสดงค่ากระแส Per unit เฟส A, B, C
ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 9 (R9 220VLL Normal)



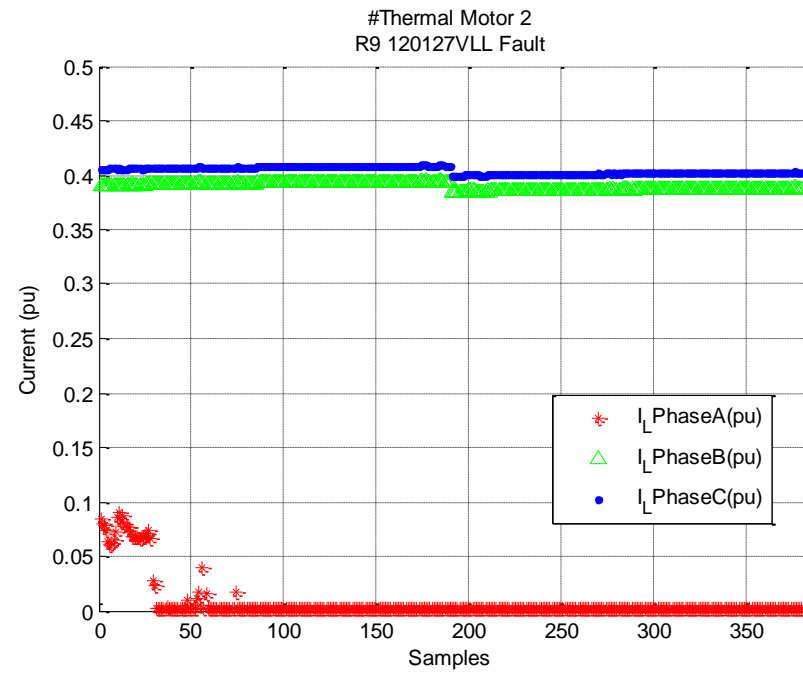
ภาพประกอบ ค-29 กราฟแสดงค่ากระแส Per unit เฟส A, B, C
ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 9 (R9 120127VLL Fault)



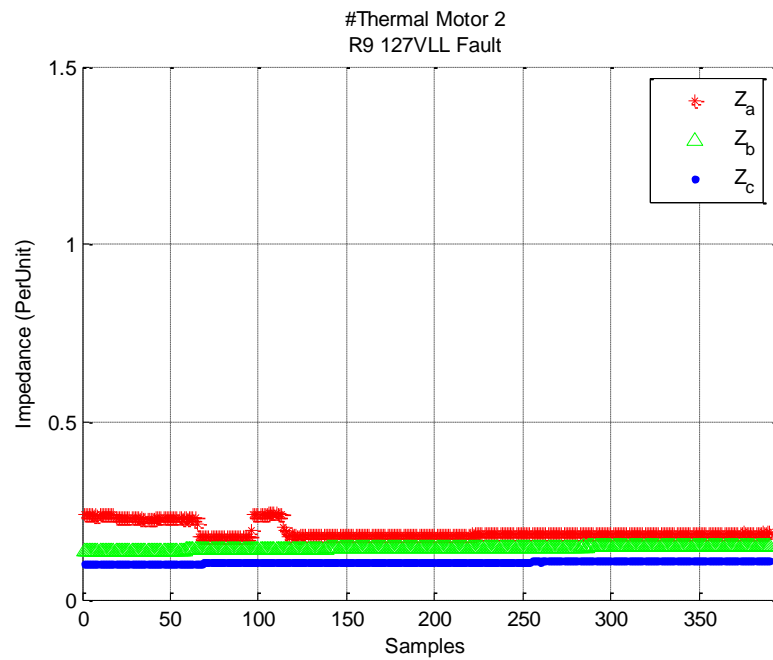
ภาพประกอบ ก-30 กราฟแสดงค่ากระแสรั่วไหลลงดิน Per unit ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 6 – 9



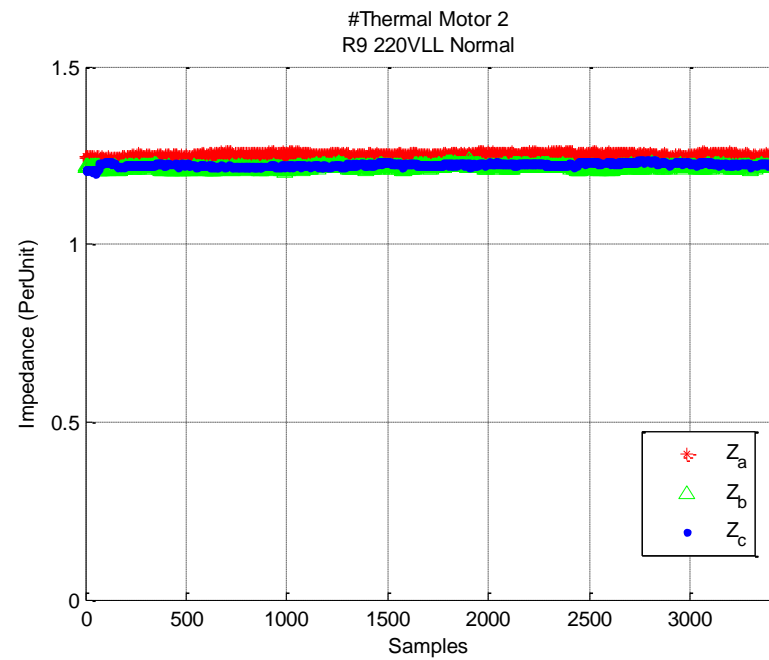
ภาพประกอบ ค-31 กราฟแสดงค่ากระแสรั่วไหล Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 9 (R9 127VLL Fault)



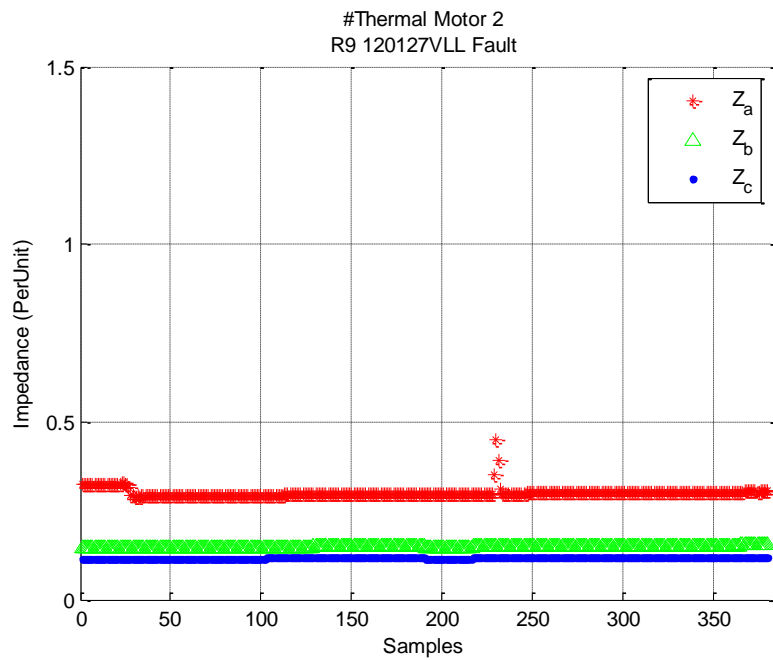
ภาพประกอบ ค-32 กราฟแสดงค่ากระแสรั่วไหล Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 9 (R9 120127VLL Fault)



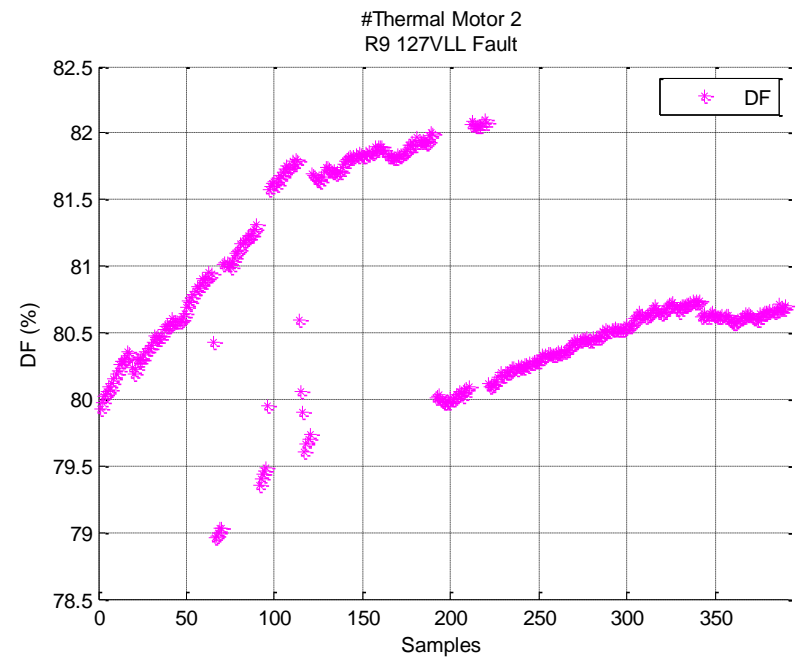
ภาพประกอบ ค-33 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 9 (R9 127VLL Fault)



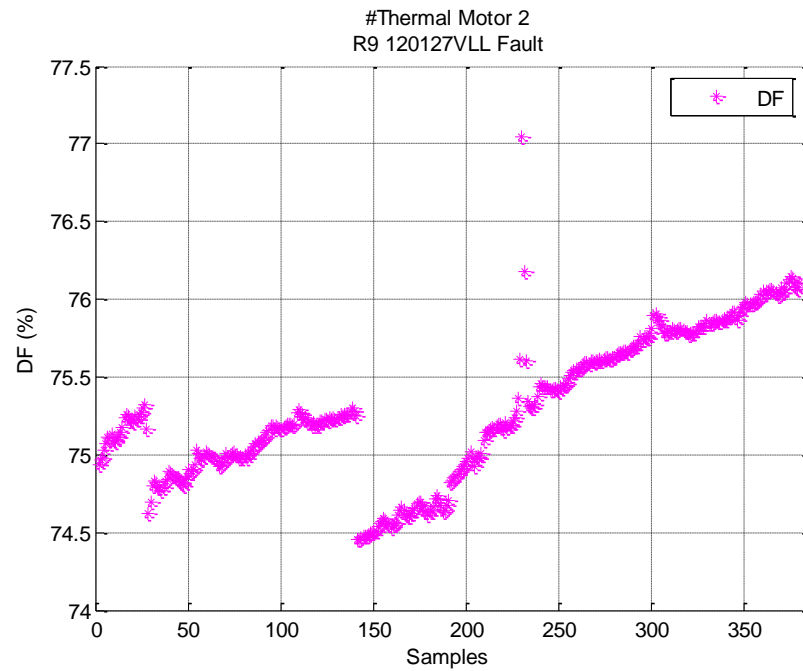
ภาพประกอบ ค-34 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 9 (R9 220VLL Normal)



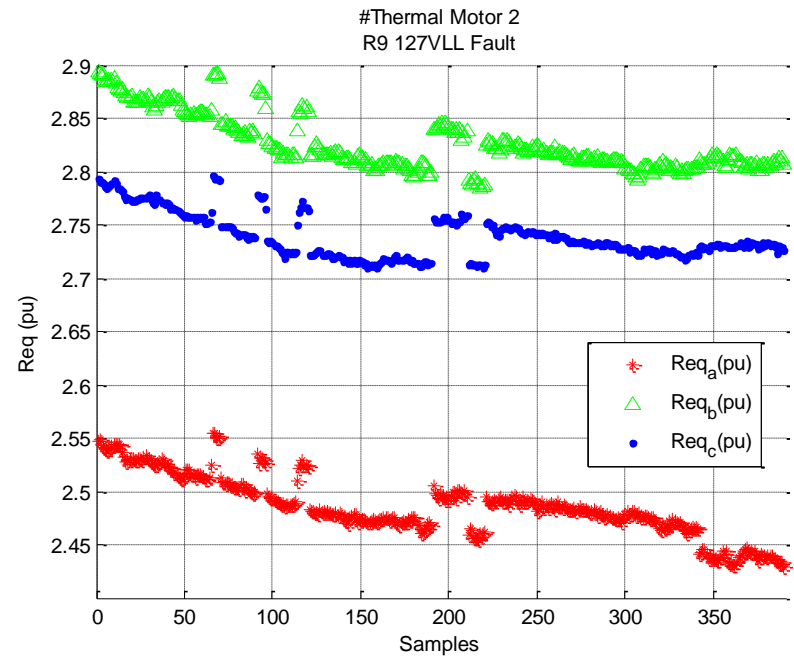
ภาพประกอบ ค-35 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 9 (R9 120127VLLFault)



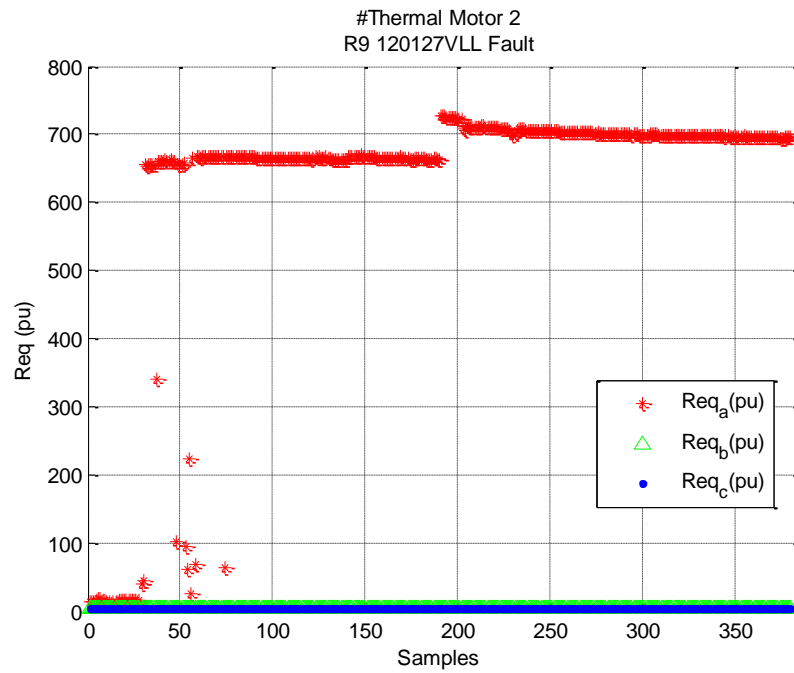
ภาพประกอบ ค-36 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ตัวประกอบการแผ่กระจาย ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 9 (R9 127VLL Fault)



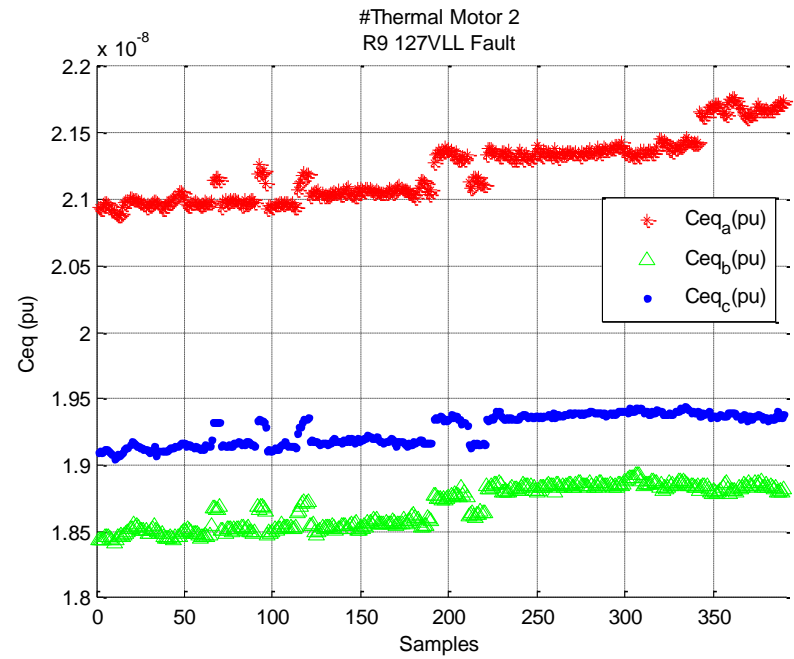
ภาพประกอบ ค-37 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ตัวประกอบการแผ่กระจาย ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 9 (R9 120127VLLFault)



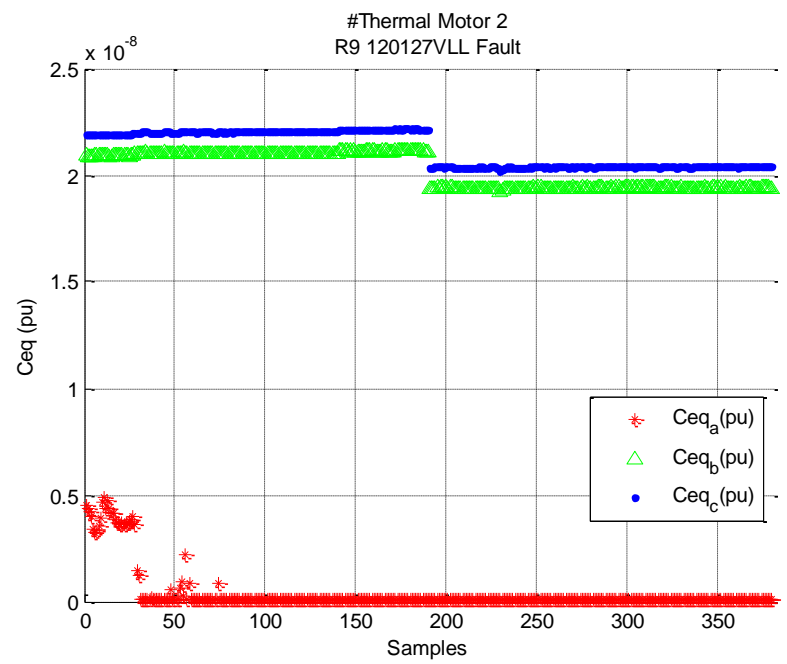
ภาพประกอบ ค-38 กราฟแสดงค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้า Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 9 (R9 127VLL Fault)



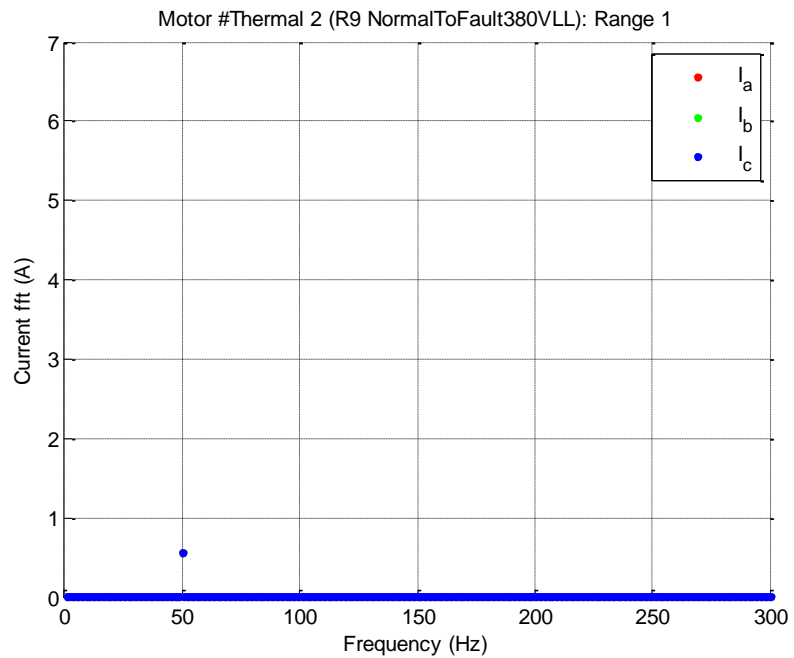
ภาพประกอบ ค-39 กราฟแสดงค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้า Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 9 (R9 120127VLL Fault)



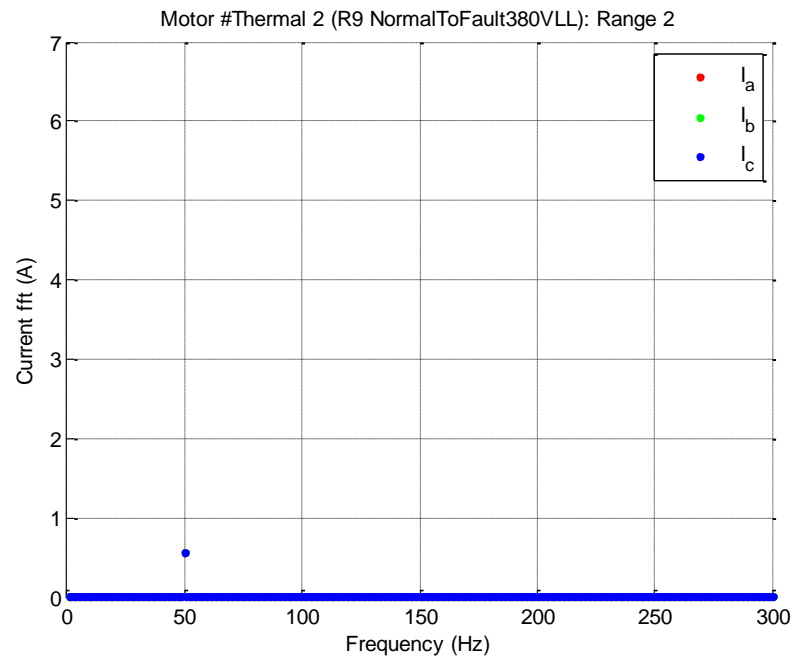
ภาพประกอบ ค-40 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนไฟฟ้า Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 9 (R9 127VLL Fault)



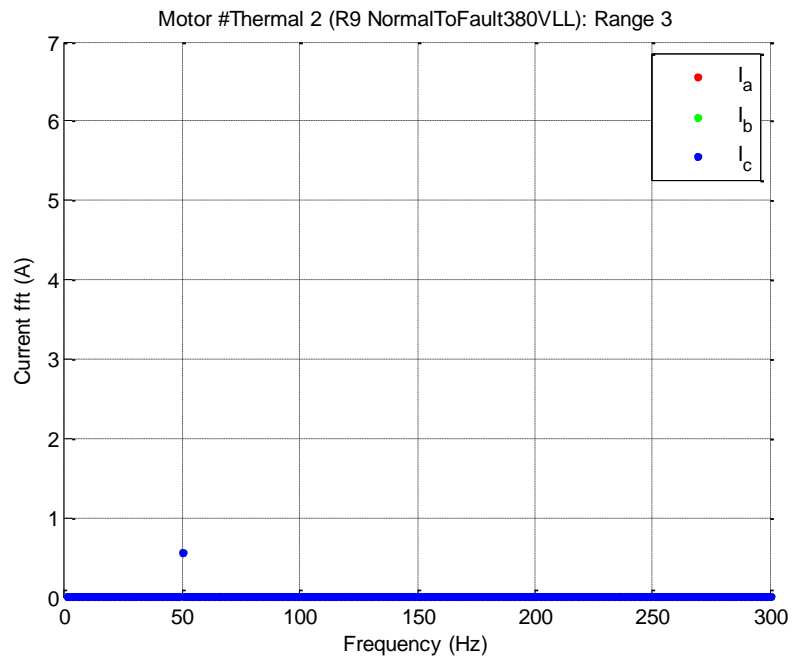
ภาพประกอบ ค-41 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนไฟฟ้า Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในรอบที่ 9 (R9 120127VLLFault)



ภาพประกอบ ค-42 กราฟ *FFT* กระแสเฟส *A, B, C*
 ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในช่วงที่ 1
 (ข้อมูลที่แสดงการเปลี่ยนแปลงในสถานะปกติไปยังสถานะผิดปกติ)



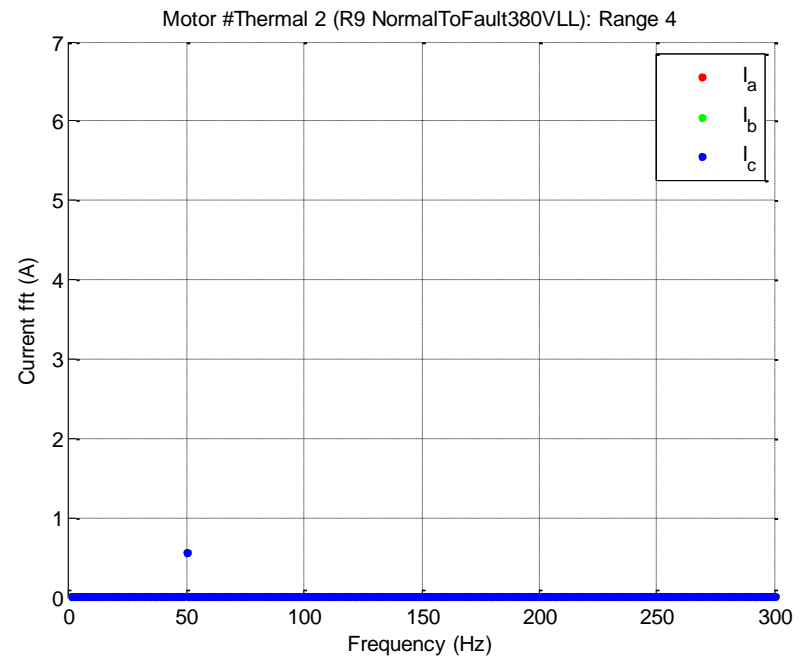
ภาพประกอบ ค-43 กราฟ *FFT* กระแสเฟส *A, B, C*
 ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในช่วงที่ 2
 (ข้อมูลที่แสดงการเปลี่ยนแปลงในสถานะปกติไปยังสถานะผิดปกติ)



ภาพประกอบ ค-44 กราฟ *FFT* กระแสเฟส *A, B, C*

ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในช่วงที่ 3

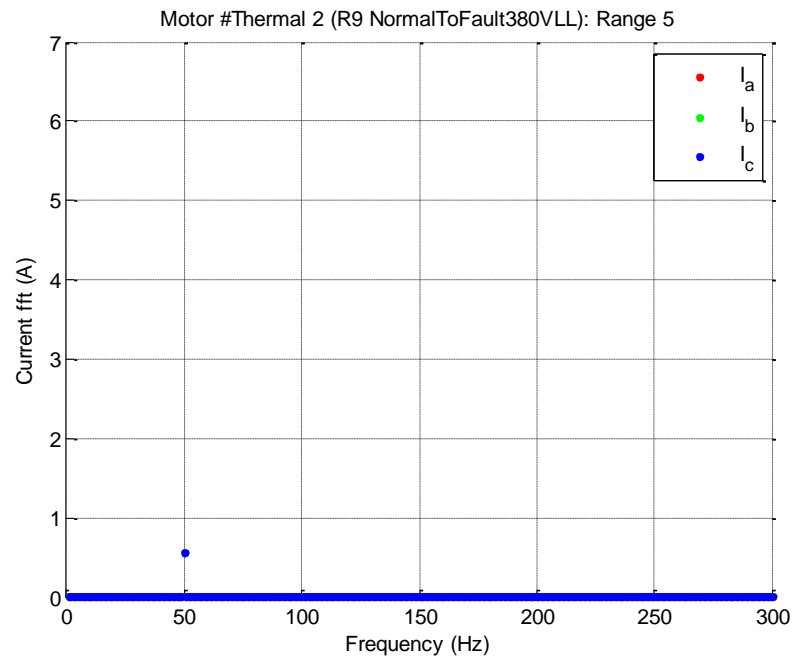
(ข้อมูลที่แสดงการเปลี่ยนแปลงในสถานะปกติไปยังสถานะผิดปกติ)



ภาพประกอบ ค-45 กราฟ *FFT* กระแสเฟส *A, B, C*

ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในช่วงที่ 4

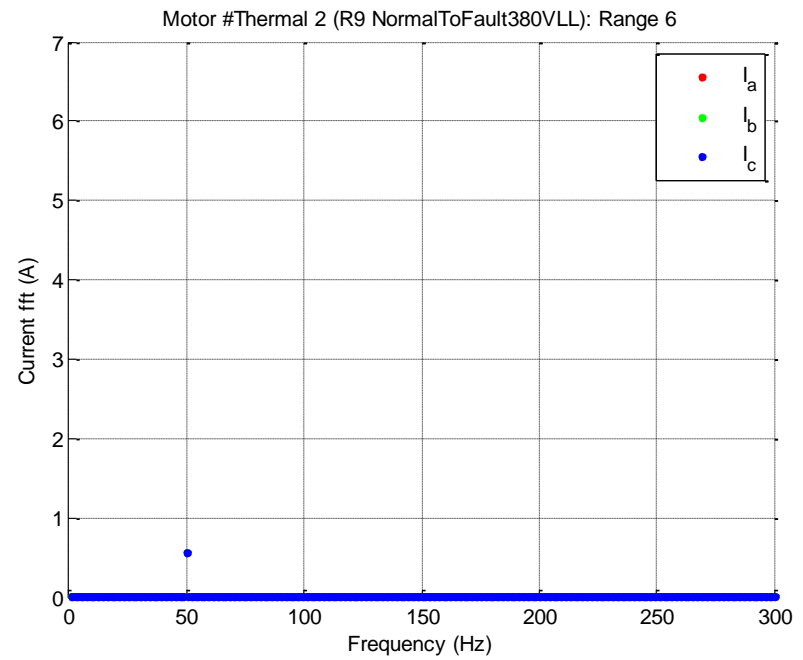
(ข้อมูลที่แสดงการเปลี่ยนแปลงในสถานะปกติไปยังสถานะผิดปกติ)



ภาพประกอบ ค-46 กราฟ *FFT* กระแสเฟส *A, B, C*

ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในช่วงที่ 5

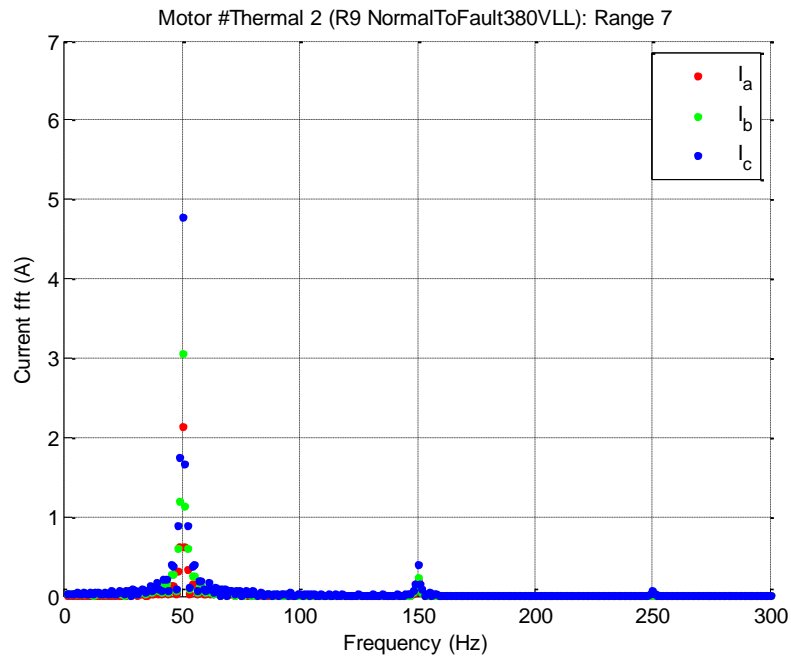
(ข้อมูลที่แสดงการเปลี่ยนแปลงในสถานะปกติไปยังสถานะผิดปกติ)



ภาพประกอบ ค-47 กราฟ *FFT* กระแสเฟส *A, B, C*

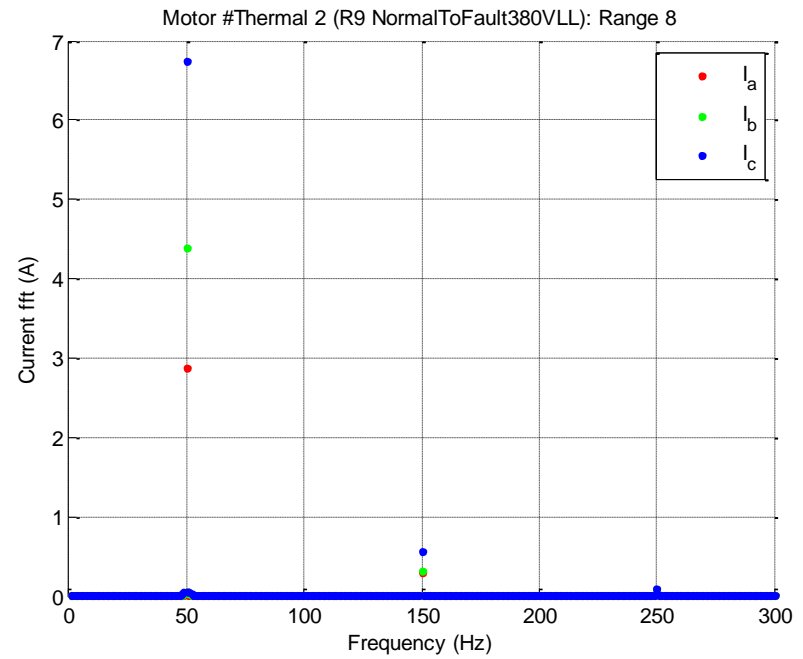
ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในช่วงที่ 6

(ข้อมูลที่แสดงการเปลี่ยนแปลงในสถานะปกติไปยังสถานะผิดปกติ)



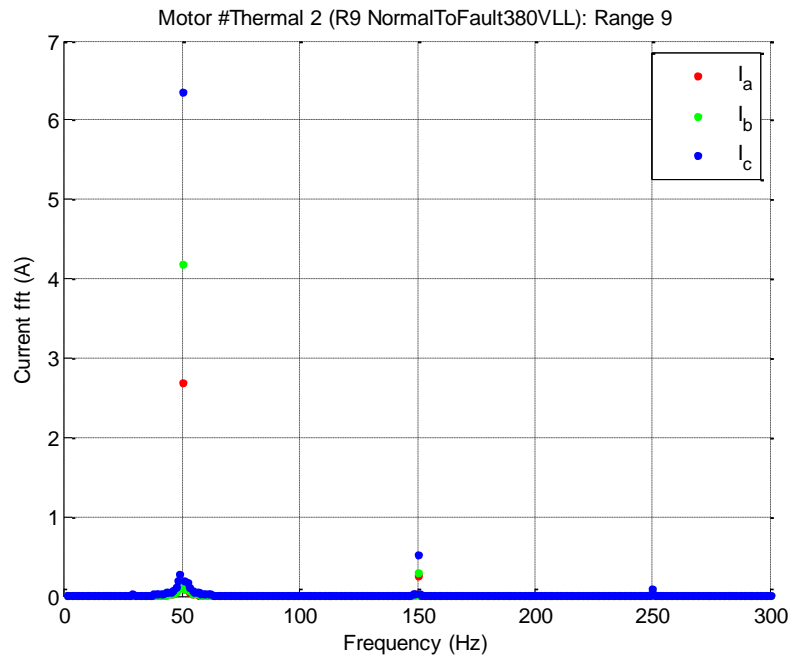
ภาพประกอบ ค-48 กราฟ *FFT* กระแสเฟส *A, B, C*
ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในช่วงที่ 7

(ข้อมูลที่แสดงการเปลี่ยนแปลงในสถานะปกติไปยังสถานะผิดปกติ)

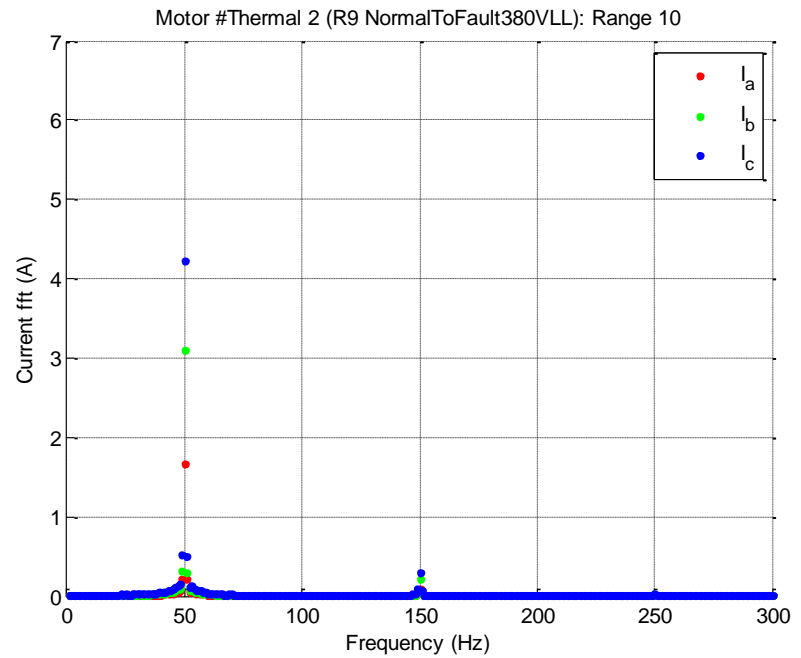


ภาพประกอบ ค-49 กราฟ *FFT* กระแสเฟส *A, B, C*
ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในช่วงที่ 8

(ข้อมูลที่แสดงการเปลี่ยนแปลงในสถานะปกติไปยังสถานะผิดปกติ)

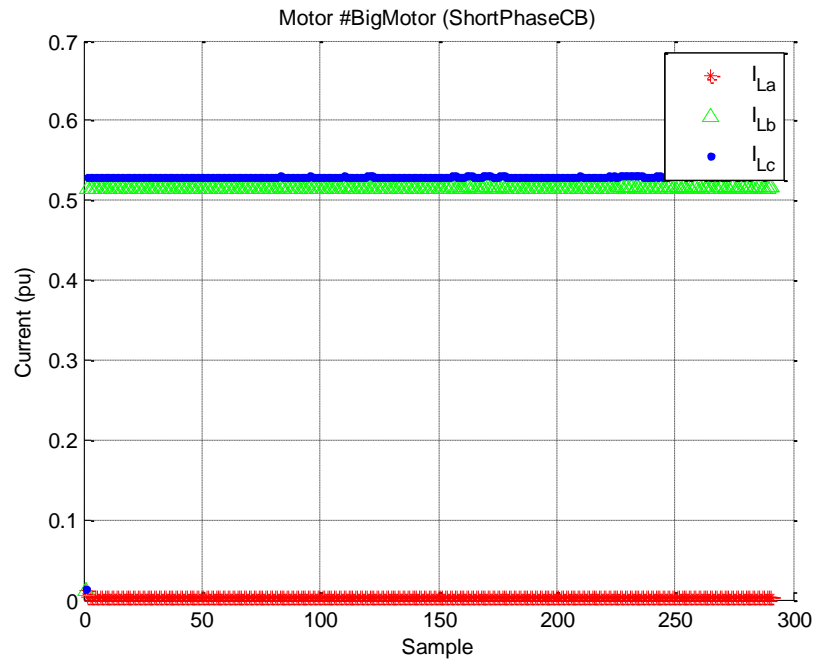


ภาพประกอบ ค-50 กราฟ *FFT* กระแสเฟส *A, B, C*
 ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในช่วงที่ 9
 (ข้อมูลที่แสดงการเปลี่ยนแปลงในสถานะปกติไปยังสถานะผิดปกติ)

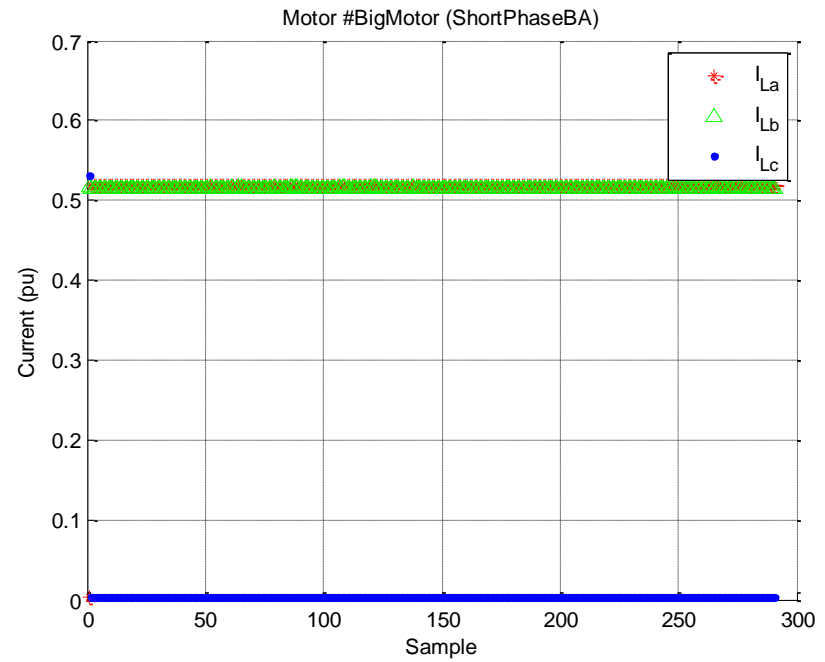


ภาพประกอบ ค-51 กราฟ *FFT* กระแสเฟส *A, B, C*
 ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในช่วงที่ 10
 (ข้อมูลที่แสดงการเปลี่ยนแปลงในสถานะปกติไปยังสถานะผิดปกติ)

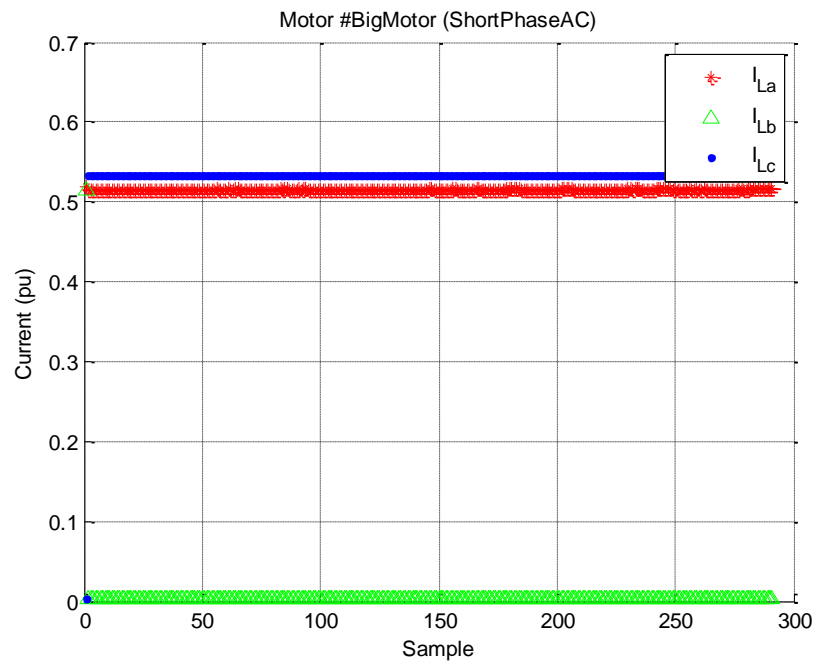
กราฟแสดงแนวโน้มค่าปริมาณทางไฟฟ้าของมอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์



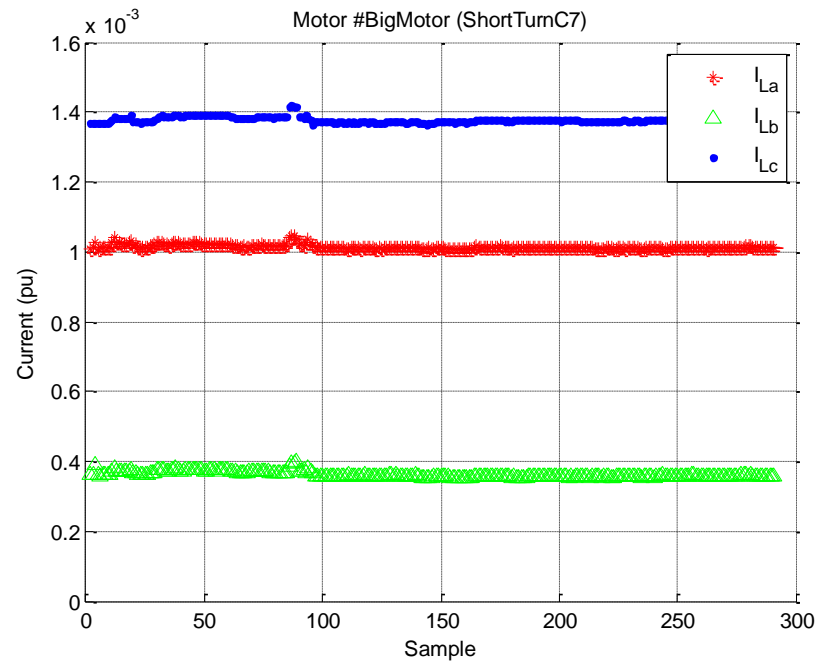
ภาพประกอบ ค-52 กราฟแสดงค่ากระแสรั่วไหล Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ที่เกิดการลัดวงจรระหว่างเฟส C และ B



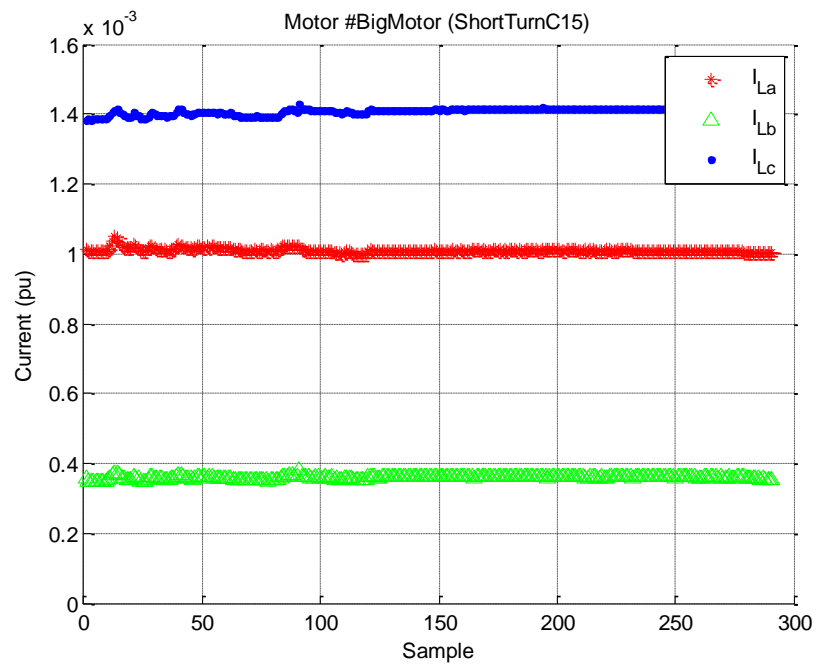
ภาพประกอบ ค-53 กราฟแสดงค่ากระแสรั่วไหล Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ที่เกิดการลัดวงจรระหว่างเฟส B และ A



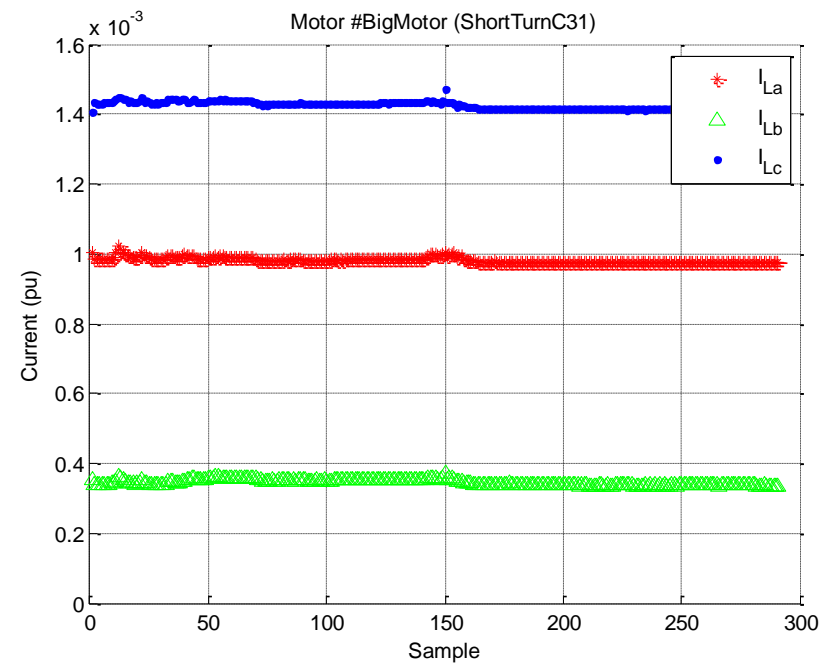
ภาพประกอบ ค-54 กราฟแสดงค่ากระแสรั่วไหล Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ที่เกิดการลัดวงจรระหว่างเฟส A และ C



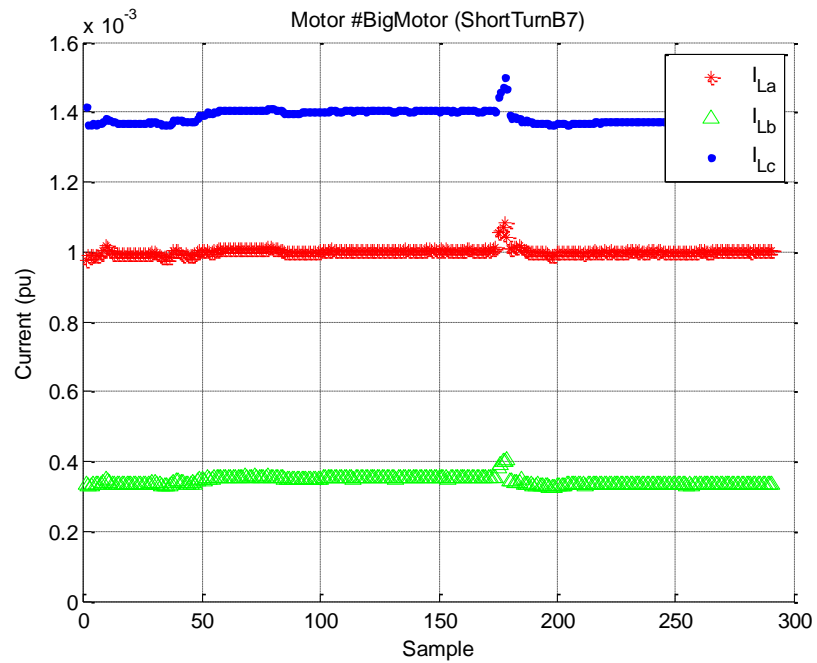
ภาพประกอบ ค-55 กราฟแสดงค่ากระแสรั่วไหล Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ที่เกิดการลัดรอบเฟส C จำนวน 7 รอบ



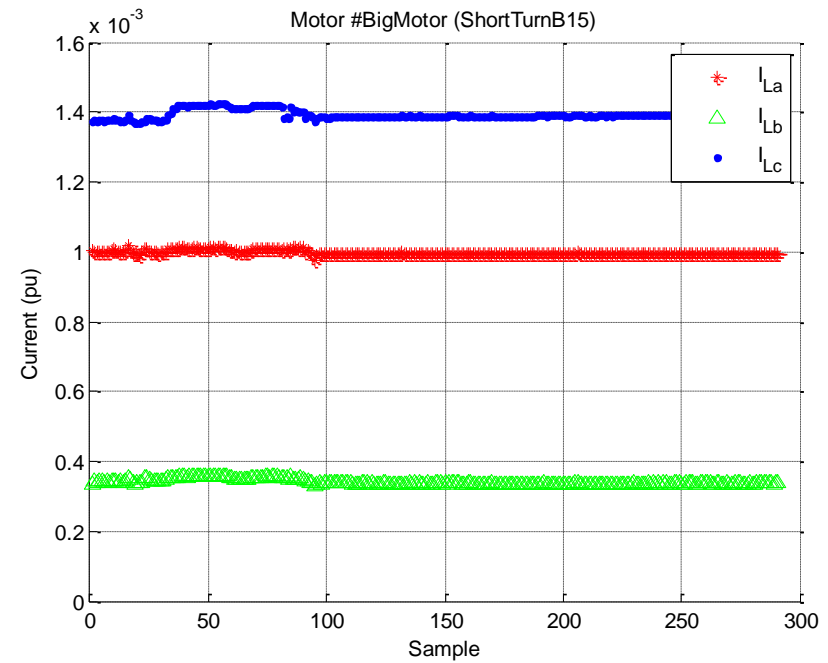
ภาพประกอบ ค-56 กราฟแสดงค่ากระแสรั่วไหล Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ที่เกิดการลัดรอบเฟส C จำนวน 15 รอบ



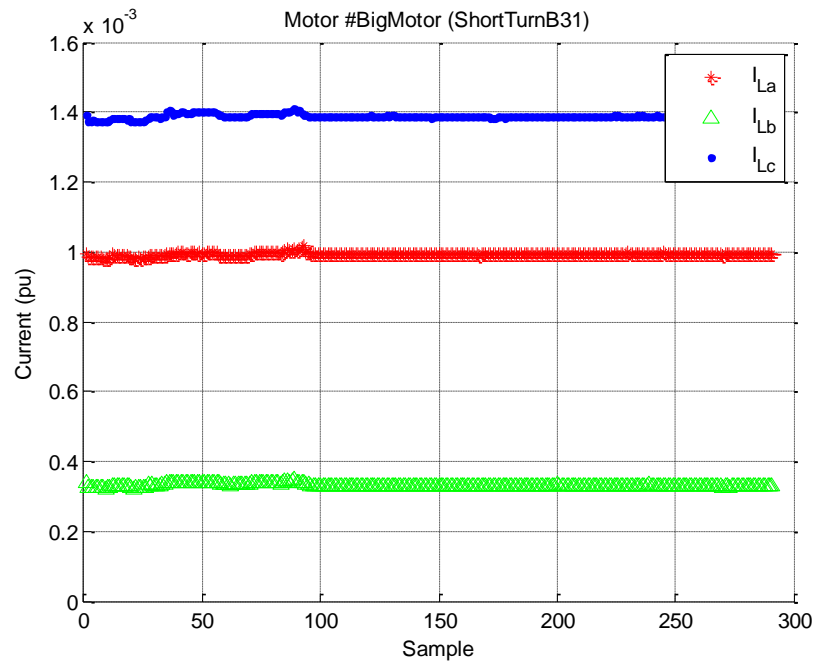
ภาพประกอบ ค-57 กราฟแสดงค่ากระแสรั่วไหล Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ที่เกิดการลัดรอบเฟส C จำนวน 31 รอบ



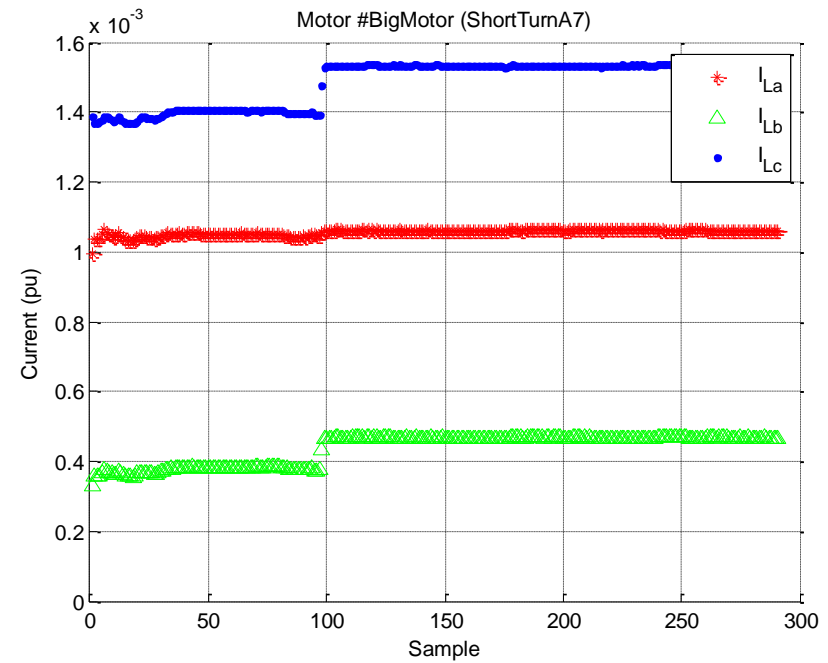
ภาพประกอบ ค-58 กราฟแสดงค่ากระแสรั่วไหล Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ที่เกิดการลัดรอบเฟส B จำนวน 7 รอบ



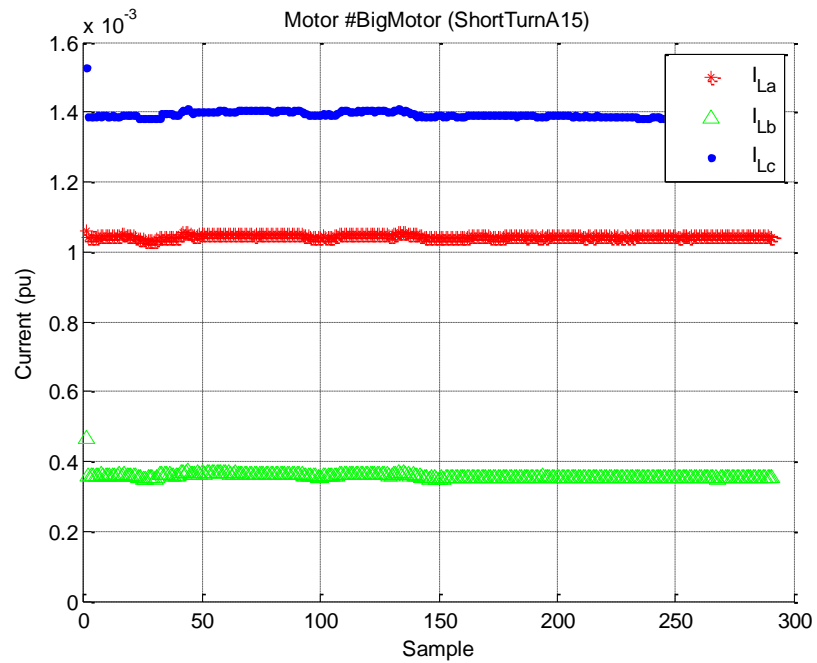
ภาพประกอบ ค-59 กราฟแสดงค่ากระแสรั่วไหล Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ที่เกิดการลัดรอบเฟส B จำนวน 15 รอบ



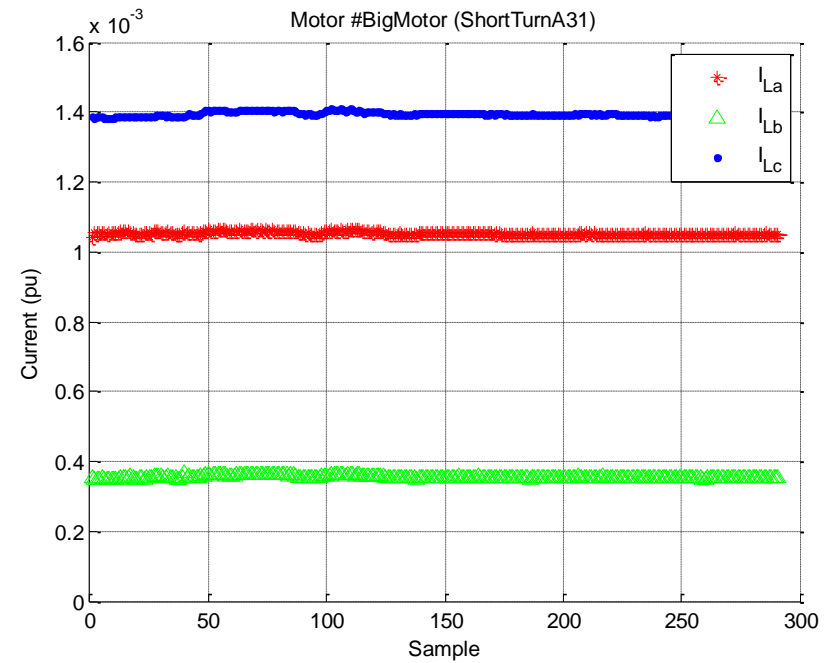
ภาพประกอบ ค-60 กราฟแสดงค่ากระแสรั่วไหล Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ที่เกิดการลัดรอบเฟส B จำนวน 31 รอบ



ภาพประกอบ ค-61 กราฟแสดงค่ากระแสรั่วไหล Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ที่เกิดการลัดรอบเฟส A จำนวน 7 รอบ



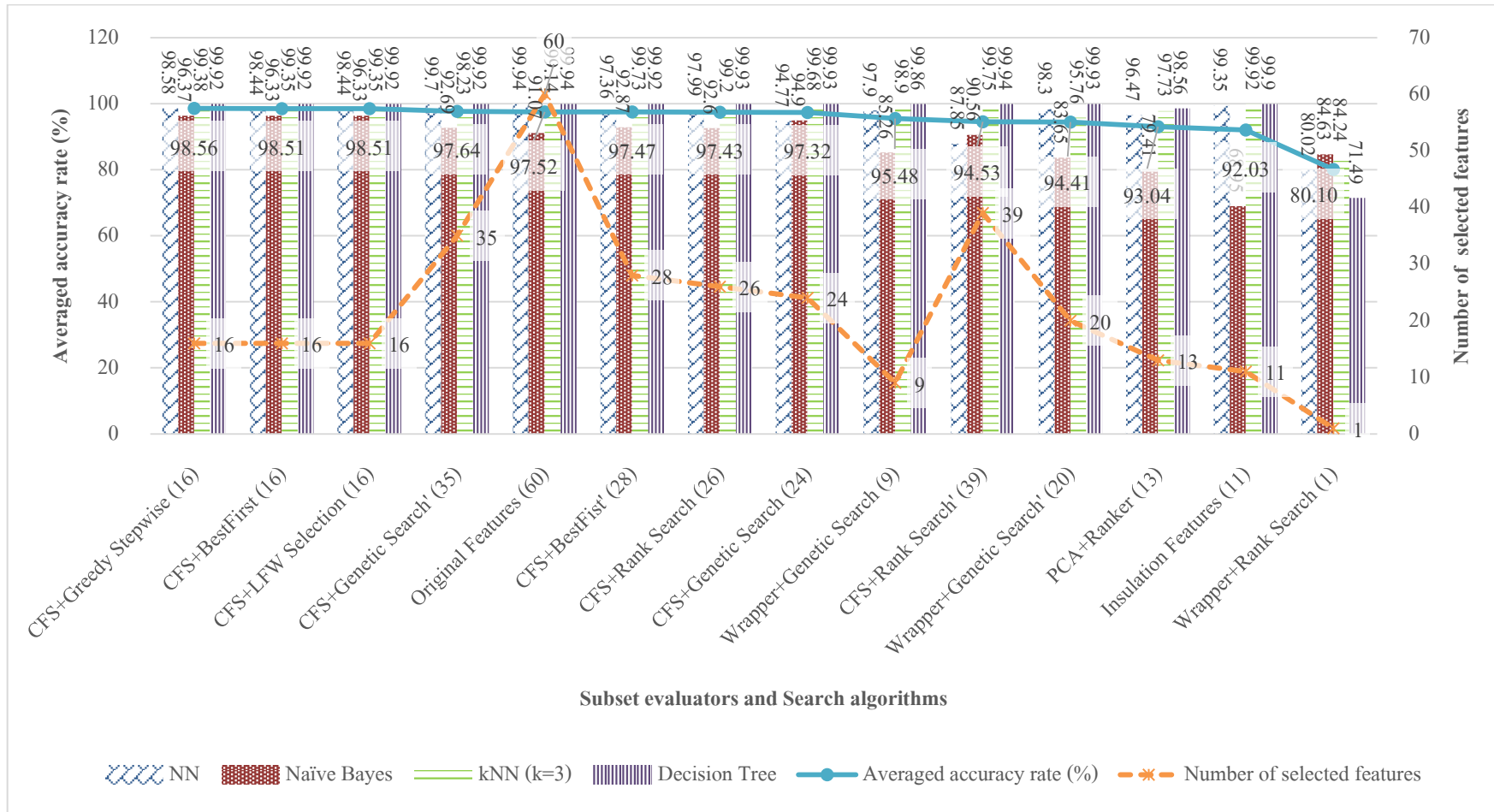
ภาพประกอบ ค-62 กราฟแสดงค่ากระแสรั่วไหล Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ที่เกิดการลัดรอบเฟส A จำนวน 15 รอบ



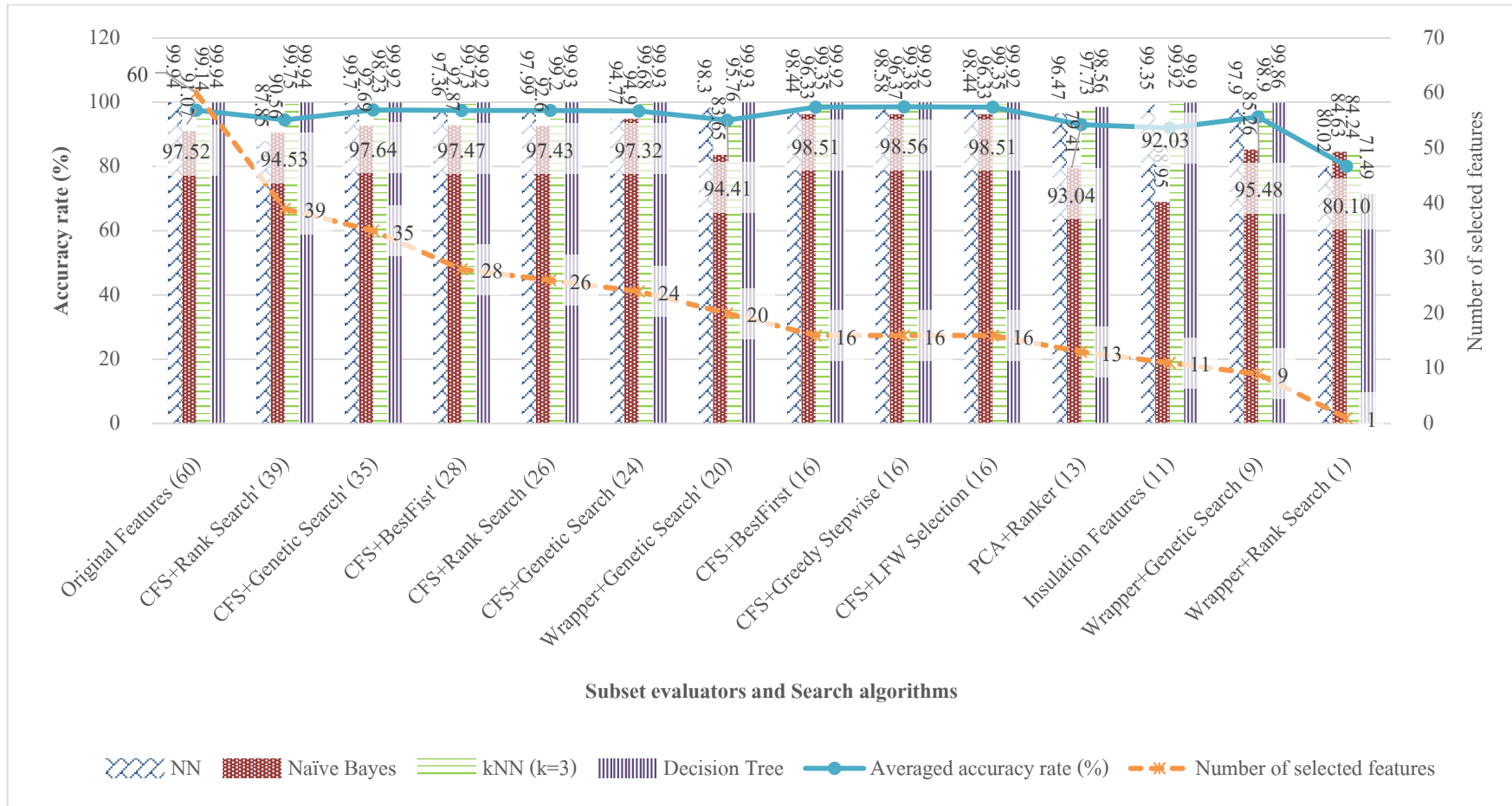
ภาพประกอบ ค-63 กราฟแสดงค่ากระแสรั่วไหล Per unit เฟส A, B, C ของมอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ที่เกิดการลัดรอบเฟส A จำนวน 31 รอบ

ภาคผนวก ง

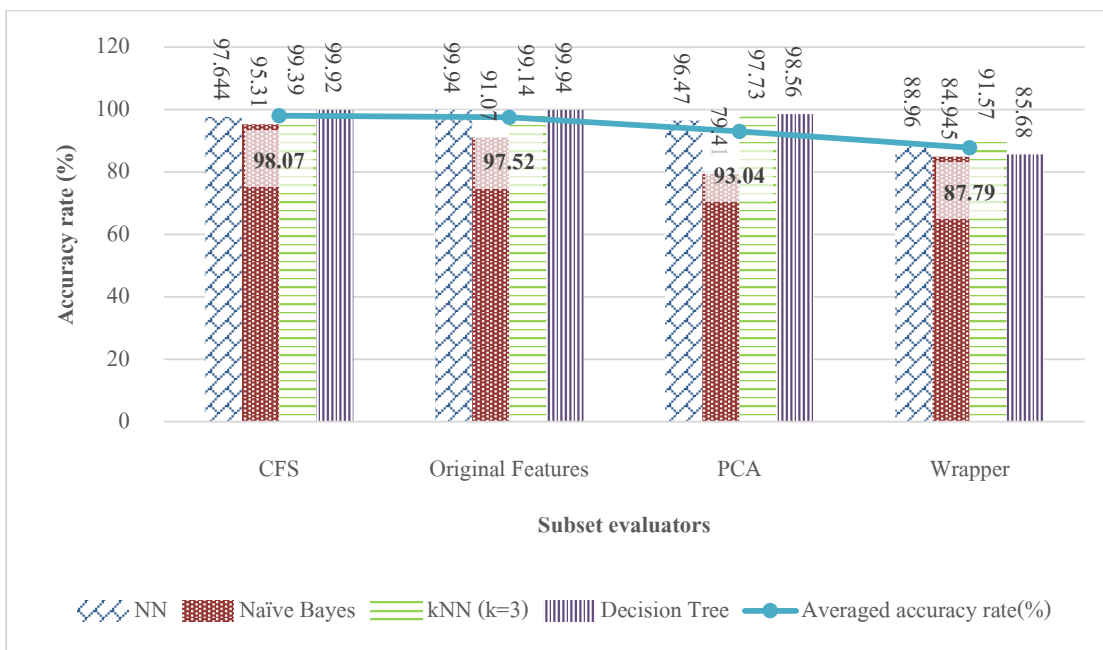
ผลการสร้างแบบจำลองการประมาณอายุการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ



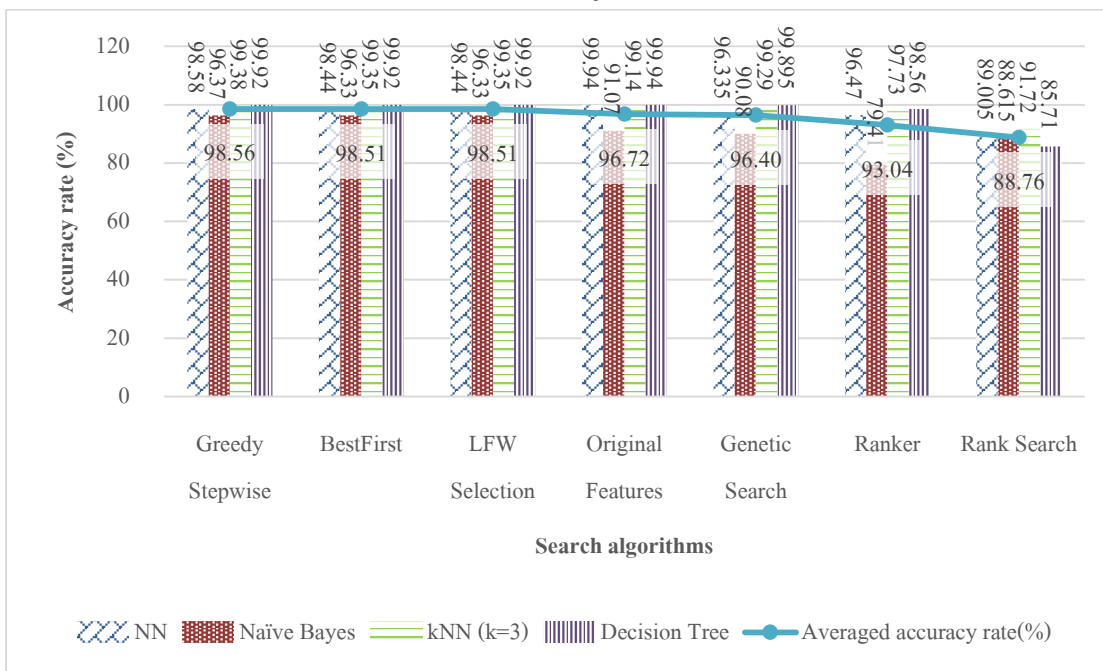
ภาพประกอบ ง-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประเมินชุดตัวแปรและอัลกอริทึมการค้นหาชุดตัวแปรกับค่าความถูกต้องเปรียบเทียบแต่ละตัวจำแนกประเภทเรียงตามลำดับค่าความถูกต้องเฉลี่ย



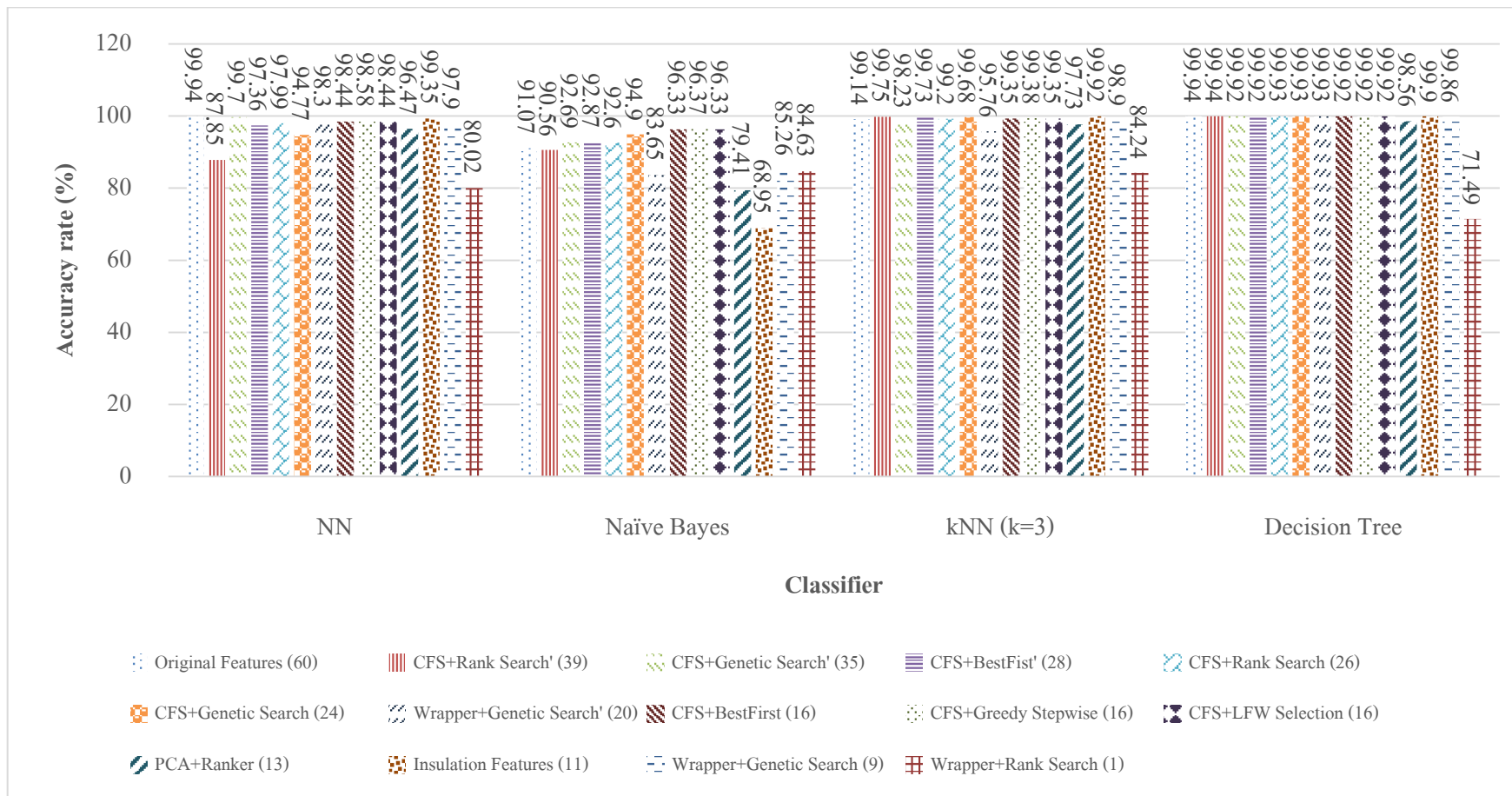
ภาพประกอบ ง-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประเมินชุดตัวแปรและอัลกอริทึมการค้นหาชุดตัวแปรกับค่าความถูกต้องเปรียบเทียบแต่ละตัวจำแนกประเภทเรียงตามลำดับจำนวนตัวแปรที่ถูกเลือก



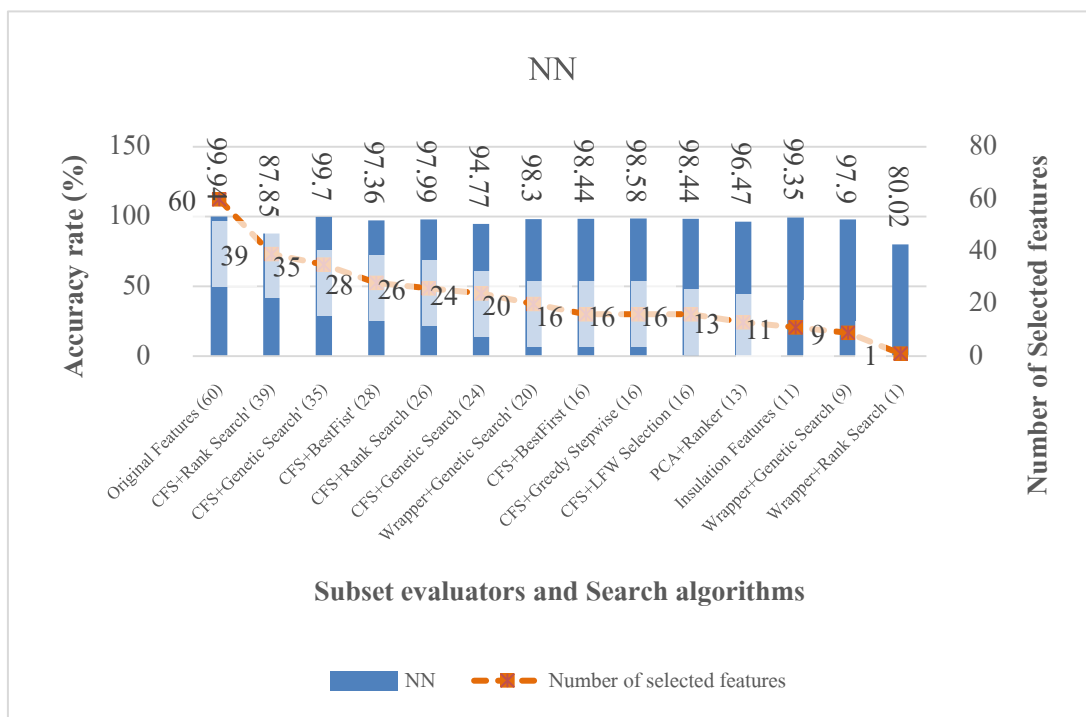
ภาพประกอบ ง-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประเมินชุดตัวแปรกับค่าความถูกต้องรวมเฉลี่ยของอัลกอริทึมการค้นหาชุดตัวแปรเปรียบเทียบแต่ละตัวจำแนกประเภท เรียงตามค่าความถูกต้องเฉลี่ย



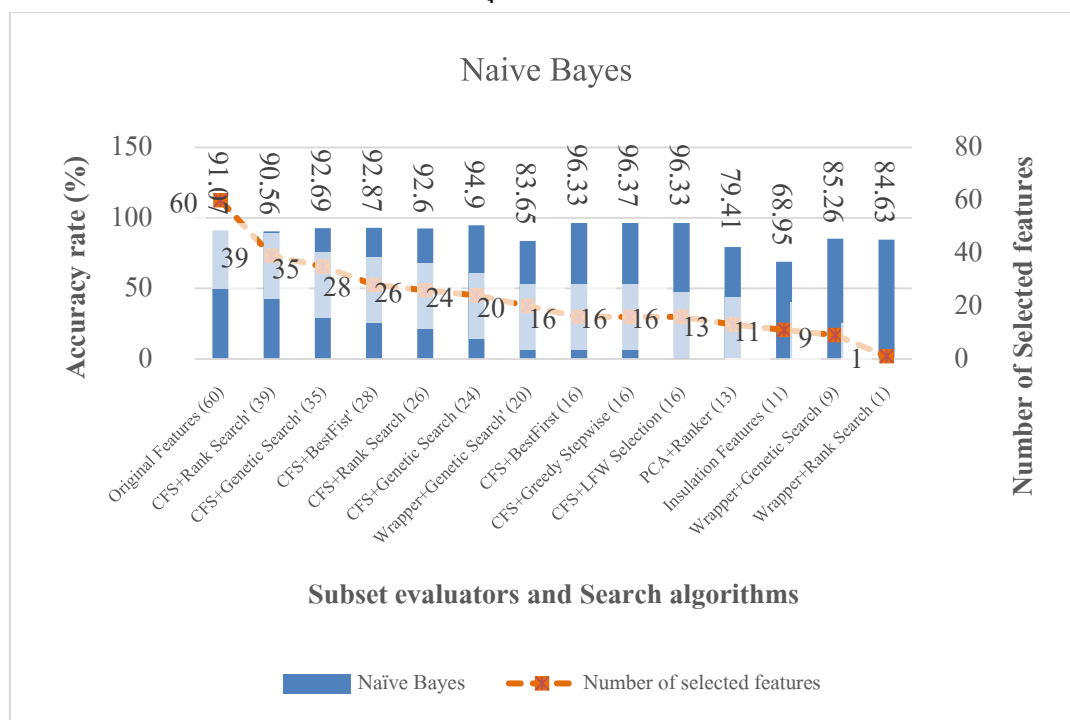
ภาพประกอบ ง-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัลกอริทึมการค้นหาชุดตัวแปรกับค่าความถูกต้องรวมเฉลี่ยของตัวประเมินชุดตัวแปรเปรียบเทียบแต่ละตัวจำแนกประเภท เรียงตามค่าความถูกต้องเฉลี่ย



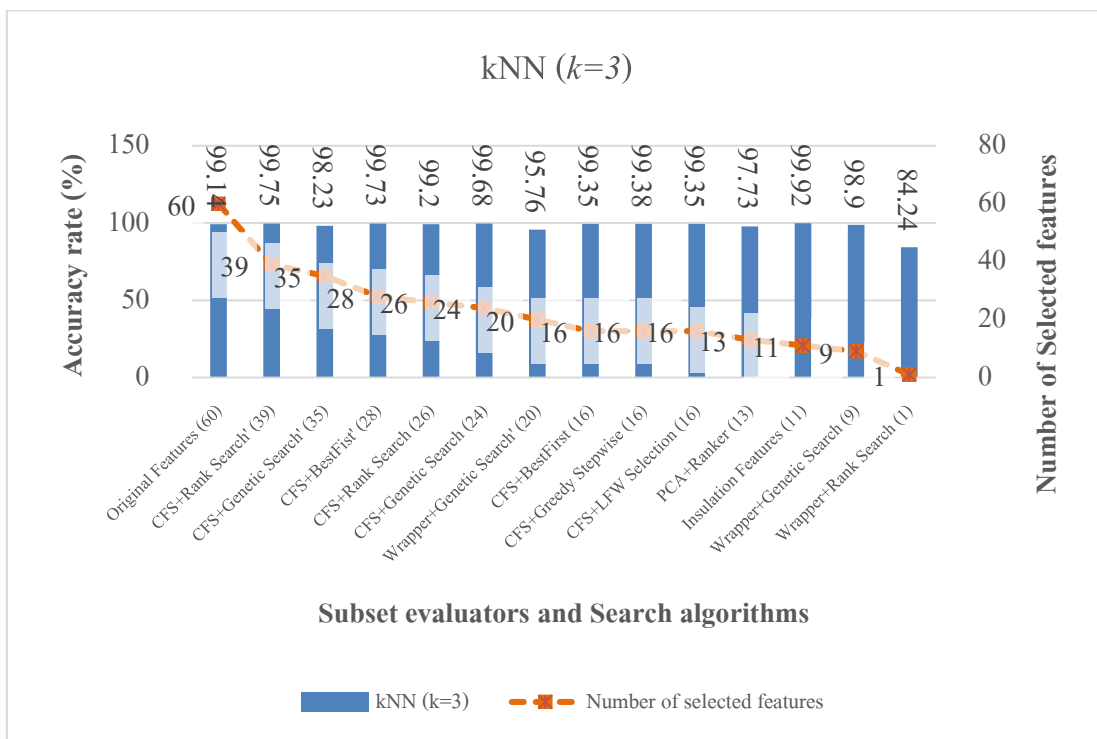
ภาพประกอบ ง-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวจำแนกประเภทข้อมูลกับค่าความถูกต้องเปรียบเทียบแต่ละตัวประเมินชุดตัวแปร และอัลกอริทึมการค้นหาชุดตัวแปร



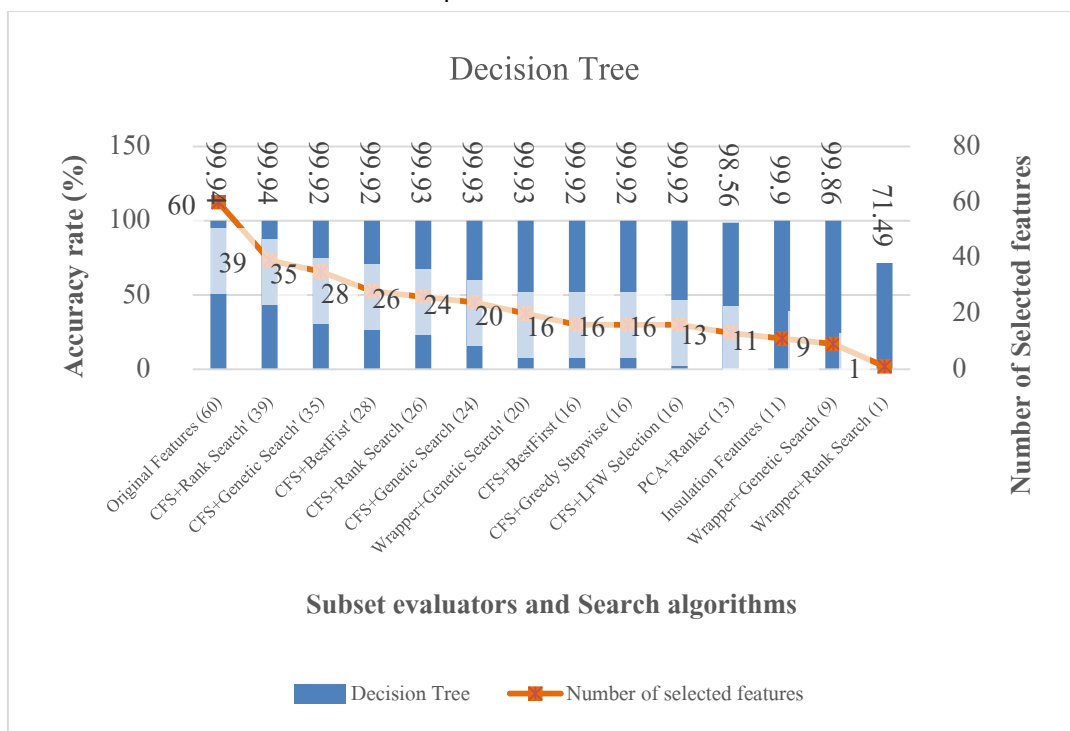
ภาพประกอบ ง-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องกับตัวแปรเมินชุดตัวแปร และอัลกอริทึมการค้นหาชุดตัวแปรของตัวจำแนกประเภท NN



ภาพประกอบ ง-7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องกับตัวแปรเมินชุดตัวแปร และอัลกอริทึมการค้นหาชุดตัวแปรของตัวจำแนกประเภท Naive Bayes



ภาพประกอบ ง-8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องกับตัวแปรเลือกตัวแปร และอัลกอริทึมการค้นหาชุดตัวแปรของตัวจำแนกประเภท kNN ($k=3$)



ภาพประกอบ ง-9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องกับตัวแปรเลือกตัวแปร และอัลกอริทึมการค้นหาชุดตัวแปรของตัวจำแนกประเภท Decision Tree

ภาคผนวก จ
การตีพิมพ์เผยแพร่



PCA based Feature Extraction for Classification of Stator-Winding Faults in Induction Motors

Thanaporn Likitjarernkul*, Kiattisak Sengchuai, Rakkrit Duangsoithong, Kusumal Chalermyanont* and Anuwat Prasertsit¹

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Thailand

ABSTRACT

Nowadays, induction motors are widely used for many industrial processes. The shorted-turn fault of the stator-winding is the initial point of stator winding faults. This paper proposes using the Principal Component Analysis (PCA) to reduce the dimension of the feature set which is obtained from the Motor Current Signature Analysis (MCSA). The six original features consist of the signal power of the three-phase filtered current signal at 20 Hz to 80 Hz and 120 Hz to 180 Hz of the phases A, B and C. After using the PCA, the dimension of the feature set decreases to two new features. These two new features are then used to classify the shorted-turn phases of the stator-winding by applying the Artificial Neural Network (ANN) classifier. The experimental results demonstrate that the new feature set can decrease the complexity of the system. Additionally, the accuracy rate using the new feature set is higher than using the original feature set. Therefore, the new feature set can properly improve the efficiency of the classification.

Keywords: Induction motor, interturn short circuit fault, shorted-turn fault, stator-winding fault, Principal Component Analysis (PCA), Artificial Neural Network (ANN)

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 24 August 2016

Accepted: 02 December 2016

E-mail addresses:

L.thanapond@gmail.com (Thanaporn Likitjarernkul),

ak.kiattisak@hotmail.com (Kiattisak Sengchuai),

rakkrit.d@psu.ac.th (Rakkrit Duangsoithong),

kusumal.c@psu.ac.th (Kusumal Chalermyanont),

anuwat.p@psu.ac.th (Anuwat Prasertsit)

*Corresponding Author

INTRODUCTION

Induction motors are critical components of industries. Approximately 37% of the induction motor faults are those of stator-winding faults and the shorted-turn fault or the interturn short circuit fault of the stator-winding. (Bonaldi et al., 2012). Consequently, a shorted-turn fault detection system is necessary. The shorted-turn fault can be observed in harmonic components of the current signal. A popular detection method

Thanaporn Likitjaremkul, Kiattisak Sengchuai, Rakkrit Duangsoithong, Kusumal Chalermyanont and Anuwat Prasertsit

for stator faults is the MCSA which is employed to analyse the motor faults by identifying the current spectra at harmonic components of faults (Jung et al., 2006; Thomson, 2001). The current spectra are calculated by using Fast Fourier Transform (FFT). The advantage of the MCSA is it does not encroach on the motor operations. Commonly, the MCSA method provides many features from the current spectra for the fault detection. These features can be reduced by a feature extraction to decrease the dimension of features and the complexity of the system. The feature extraction transforms the original feature set into a smaller number of features without eliminating the information of features. The combination of feature reduction and an Artificial Intelligence (AI) method for induction motor fault diagnosis can improve the performance of the system (Casimir et al., 2006; Widode et al., 2007; Lei et al., 2008; Do & Chong, 2011; Sawitri et al., 2012; Gholamshahi et al., 2014; Hammo, 2014; Yang et al., 2006).

This paper presents the feature extraction method to reduce the size of the feature set using the PCA. The reduced set of the new feature is used to classify the shorted-turn phases by applying the ANN classifier. The system is verified by experiments, and the experimental results reveal that using the new feature set can improve both the complexity and the accuracy of the system.

STATOR-WINDING FAULTS

The shorted-turn fault in the stator-winding can be detected by using an air gap flux waveform. This waveform is changed by the distortion of the net MMF which is caused from the short circuit current flowed into the shorted circuit stator-winding. The harmonic frequency components of the air-gap flux waveform in a stator-winding current are calculated by (1),

$$f_{st} = f_i \left(\frac{n}{p} (1-s) \pm k \right) \quad (1)$$

where f_{st} is the harmonic frequency components, f_i is the supply frequency, p is the pole-pairs, s is the slip, k is 1, 3, 5, ... and n is 1, 2, 3, ..., respectively.

The harmonic frequency components depend on a load size which is related to the slip. Normally, the harmonic frequency components dominantly appear when calculation uses parameter $k = 1$, $n = 3$, and $k = 1$, $n = 5$ (Thomson, 2001). In this paper, a three-phase, four-pole ($p = 2$) induction motor is tested at no-load condition. Therefore, the frequency components that are used to detect the shorted-turn fault are 25, 50, 75, 100, 125, 150 and 175 Hz, respectively. The line current power spectra of phase A for the normal motor is shown in Figure 1(a). Whereas, Figure 1(b) shows the harmonic frequency components of the line current power spectra of phase A in a shorted-turn motor. Since spectra components occur at 125 Hz and 175 Hz, the shorted-turn fault can be identified.

PCA for Classification of Stator-Winding Faults in Motors

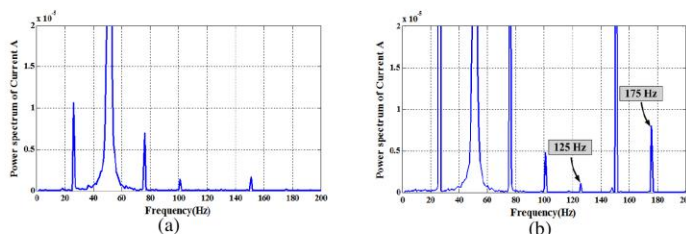


Figure 1. The current power spectra of the phase A (a) the normal motor; (b) the shorted-turn fault in the phase A

FEATURE GENERATION

The three-phase current signals are measured and used to generate the original features. The original features are calculated by the following methods:

Signal power

The shorted-turn fault of the stator-winding can be detected by the air gap flux spectrum analysis. The ranges of the harmonic frequency components for the shorted-turn fault detection are 25, 50, 75, 100, 150, 125 and 175 Hz. Accordingly, each phase of the current signal is filtered by the band-pass filter at 20 Hz to 80 Hz and 120 Hz to 180 Hz. The filtered current signals are used to calculate the signal powers as expressed by (2),

$$P = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n^2 \quad (2)$$

where P is the signal power, x is the band-pass filtered signal and N is the number of samples.

Normalization of Data

Since the signal power values at 20 Hz to 80 Hz and at 120 Hz to 180 Hz are very different, then these values should first be normalised. The signal power of each phase is normalised by the min-max normalisation technique. The normalised value can be calculated by (3)

$$x^* = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (3)$$

where x^* is the normalised value and x is the signal power value.

PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS

The feature extraction is one of the methods used for reducing the feature dimension. The PCA (Jolliffe, 1986) is one of the examples of the feature extraction. The dimension of features is reduced by the PCA without eliminating the signal information. The PCA is a technique that

Thanaporn Likitjaremkul, Kiattisak Sengchui, Rakkrit Duangsoithong, Kusumal Chalermyanont and Anuwat Prasertsit

transforms an original feature set into a smaller feature set. The smaller feature set is transformed by using a function that related to the eigenvectors and eigenvalues. The procedures of the PCA have 4 steps. In the first step, the original feature set is used to calculate a covariance matrix as expressed by (4).

$$C_{ij} = \frac{1}{n-1} \sum_{m=1}^n (x_{im} - \bar{x}_i)(x_{jm} - \bar{x}_j) \quad (4)$$

Where C_{ij} is the covariance matrix between the feature i and the feature j , x_{im} is the sample m of the feature i , \bar{x}_i is the average value of the feature i , x_{jm} is the sample m of the feature j , \bar{x}_j is the average value of the feature j and n is the number of samples.

In the second step, the eigenvectors and eigenvalues of the covariance matrix are calculated using (5) and (6), respectively.

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{v} = \lambda \cdot \mathbf{v} \quad (5)$$

$$|\mathbf{A} - \lambda \mathbf{I}| = 0 \quad (6)$$

Where \mathbf{A} is the covariance matrix, \mathbf{v} is the eigenvector, λ is the eigenvalue and \mathbf{I} is the identity matrix.

In the third step, the principal components are the eigenvectors which are selected from the eigenvalue ranking. Finally, the fourth step, the smaller feature set is calculated by (7). The smaller feature set is the new feature set which is used to classify the shorted-turn fault of the stator-winding.

$$\mathbf{Y} = (\mathbf{v}^T \times \mathbf{X})^T \quad (7)$$

Where \mathbf{Y} is the new feature set matrix, \mathbf{X} is the original feature set matrix and \mathbf{v} is the eigenvector.

ARTIFICIAL NEURAL NETWORK CLASSIFICATION

The ANN is a type of classifier. It is a model that is inspired from the study of biological neural networks. A perceptron is one type of the ANNs that it has many models depended on the number of the hidden layer and the hidden cell. In this paper, a single layer perceptron is used. The perceptron has a learning algorithm for classification and make adjustments to the weights of input and the biases of hidden layer. The updated weights and the updated biases are calculated by (8) and (9), respectively and the output is calculated by (10). The output is calculated by a transfer function which estimates the output by using the total product between the weight vector and the input vector. An error between the output and the target can be calculated by (11). Finally, the last weights and the last biases are used to classify the shorted-turn fault of the stator-winding.

PCA for Classification of Stator-Winding Faults in Motors

$$\mathbf{W}_{k+1} = \mathbf{W}_k + e_k \cdot \mathbf{p}^T \quad (8)$$

$$b_{k+1} = b_k + e_k \quad (9)$$

$$a_k = f(\mathbf{W}_k \times \mathbf{p} + b_k) \quad (10)$$

$$e_k = t - a_k \quad (11)$$

Where \mathbf{w}_{k+1} is the new weight matrix, \mathbf{w}_k is the old weight matrix, e_k is the error, p is the input vector, b_{k+1} is the new bias, b_k is the old bias, a_k is the output, f is the transfer function and t is the target.

EXPERIMENTAL SETUP

The three-phase, four-pole, star-connected induction motor is used for the experiment as shown in Figure 2. The motor parameters and ratings are also illustrated in Table 1. The three-phase current signals are measured by three current sensors. National Instrument (NI) data acquisition device at 6,000 Hz sampling rate are used. These measured current signals are filtered at 20 Hz to 80 Hz and 120 Hz to 180 Hz. Then, the filtered signals are used to calculate the power signal, and the results are normalised by (2) and (3), respectively. Therefore, the normalised value is the original feature set which is reduced the dimension of features by the PCA. The block diagram of the experiment is presented in Figure 3. As mentioned before, this paper uses the ANN classifier. Classes of the fault classification include [0 0], [0 1], [1 0] and [1 1]. These classes mean a normal motor and shorted-turn faults in the phase A, B and C, respectively. The total data set contains of six features and 160 samples. The 80 samples are used as the training set, and the 80 samples are used as the test set.

Table 1
Parameters and ratings of test machines

V	Hz	r/min	kW	cos ϕ	A
230 Δ /400Y	50Hz	1430	2.2	0.79	8.66/4.98
415Y	50Hz	1435	2.2	0.765	4.94

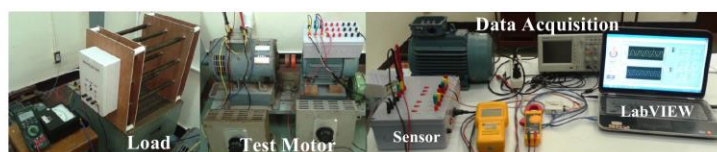


Figure 2. The experimental setup

Thanaporn Likitjaremkul, Kiattisak Sengchuai, Rakkrit Duangsoithong, Kusumal Chalermyanont and Anuwat Prasertsit

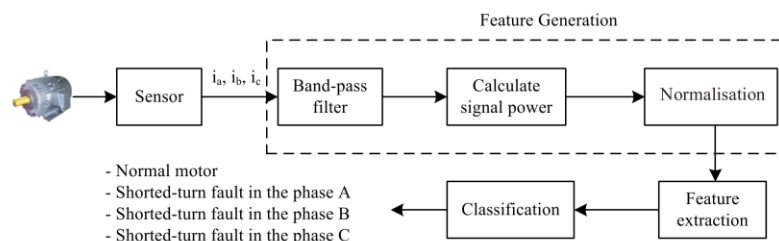


Figure 3. The block diagram of the experiment

EXPERIMENTAL RESULTS

The original data set has six features: the signal power of the 20 Hz to 80 Hz filtered signal and the 120 Hz to 180 Hz filtered signal in the phase A, B and C. The signal power values are normalised between zero to one. The original data set is reduced the size by the PCA. The PCA can extract up to two features. The two new features can be plotted the scattered graph as presented in Figure 4. From the graph, classes of the fault classification are clearly separated. The new feature set is used to create the learning system. The learning results are also shown in Table 2. From the learning results, it found that the new feature set uses less number of training epoch than the original feature set for all ratio of the train/test data. Similarly, the new feature set has less numbers of error samples than the original feature set. Finally, the efficiency of the classification is illustrated in Table 3. According to such results, the new feature set has the number of training and the classification error less than the original feature set. The new feature set provides an accuracy rate that is higher than the original feature set. As reason of the result, the new feature set is the reduced feature set, but it does not eliminate the information of features. Therefore, the new feature set can decrease the complexity of the system and increase the accuracy rate of the classification system.

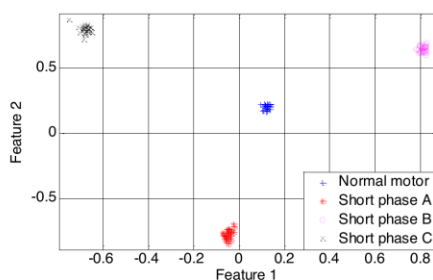


Figure 4. The scattered graph of the new features

PCA for Classification of Stator-Winding Faults in Motors

Table 2
The number of training

Train/Test (%)	With the PCA		Without the PCA	
	Epochs	Error	Epochs	Error
30/70	5	0/112	134	4/112
50/50	4	0/80	46	3/80
70/30	3	0/48	40	1/48

Table 3
The number of training

	Classification (Perceptron ANN)	
	With the PCA	Without the PCA
Training sets	80	80
Test sets	80	80
Epochs	4	46
Classification error (%)	0	3.75
Accuracy rate (%)	100	96.25

CONCLUSION

This paper is on using the PCA to reduce the dimension of features. The new feature set is used to classify the shorted-turn fault of the stator-winding. Based on our experimental results, the six original features remained in only two new features. This new feature set can decrease the complexity of the classification system. The accuracy rate using the new feature set is 100% and could improve the fault classification system.

ACKNOWLEDGEMENT

This work has been financial support from the Prince of Songkla University Graduate Studies Grant, No. PSU/95000201/2556, Prince of Songkla University funding contact number ENG560014S and partially supported by Center of Excellence in Wireless Sensor Networks (CoE-WSN), Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, Thailand.

REFERENCES

- Bonaldi, E. L., de Oliveira, L. E. L., Borges da Silva, J. G., Lambert-Torres, G., & Borges da Silva, L. E. (2012). Predictive maintenance by electrical signature analysis to induction motors. In R. E. Araujo (Eds), *Induction Motors Modelling and Control*. InTech.
- Casimir, R., Boutleux, E., Clerc G., & Yahoui, A. (2006). The use of feature selection and nearest neighbors rule for faults diagnostic in induction motors. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 19, 169-177.

Thanaporn Likitjaremkul, Kiattisak Sengchui, Rakkrit Duangsoithong, Kusumal Chalermyanont and Anuwat Prasertsit

- Do, V. T., & Chong, U.-P. (2011). Signal model-based fault detection and diagnosis for induction motors using features of vibration signal in two-dimension domain. *Journal of Mechanical Engineering*, 57(9), 655-666.
- Gholamshahi, R., Poshtan, J., & Poshtan, M. (2014). Improving stator winding fault diagnosis in induction motor using Dempster-Shafer theory. *Electrical and Electronics Engineering: An International Journal (ELELIJ)*, 3(2), 161-173.
- Hammo, R. (2014). *Faults identification in three-phase induction motors using support vector machines*. Springer.
- Jolliffe, I. T. (1986). *Principal Component Analysis*. New York: Springer-Verlag.
- Jung, J.-H., Lee, J.-J., & Kwon, B.-H. (2006). Online diagnosis of induction motors using MCSA. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53(6), 1842-1852.
- Lei, Y., He, Z., & Zi, Y. (2008). A new approach to intelligent fault diagnosis of rotating machinery. *Expert Systems with Applications*, 35, 1593-1600.
- Sawitri, D. R., Purnama, I. E., & Ashari, M. (2012). Detection of electrical faults in induction motor fed by inverter using support vector machine and receiver operating characteristic. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 40(1), 15-22.
- Thomson, W. T. (2001). On-line MCSA to diagnose shorted turns in low voltage stator windings of 3-phase induction motors prior to failure. *Proceedings of IEEE Conference on Electrical Machines and Drives (IEMDC)* (p. 891-898).
- Widode, A., Yang, B.-S., & Han, T. (2007). Combination of independent component analysis and support vector machines for intelligent faults diagnosis of induction motor. *Expert Systems with Applications*, 32, 299-312.
- Yang, B.-S., Han, T., & Yin, Z.-J. (2006). Fault diagnosis system of induction motors using feature extraction, feature selection and classification algorithm. *JSME International Journal*, 49(3), 734-741.

Thanaporn Likitjarernkul, Kiattisak Sengchuai, Rakkrit Duangsoithong, Kusumal Chalermyanont

Acknowledgements

This work has been financial support from the Prince of Songkla University Graduate Studies Grant, No, PSU/95000201/2556, Prince of Songkla University funding contact number ENG560014S and partially supported by Center of Excellence in Wireless Sensor Networks (CoE-WSN), Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, Thailand.

REFERENCES

- [1] Bonaldi, E.L., de Oliveira, L.E.L., Borges da Silva, J.G., Lambert-Torres, G., Borges da Silva, L.E. (2012). Predictive Maintenance by Electrical Signature Analysis to Induction Motors. Induction Motors Modelling and Control, R. E. Araujo (eds), InTech.
- [2] Jung, J.-H., Lee, J.-J., Kwon, B.-H. (2006). Online Diagnosis of Induction Motors Using MCSA. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 53(6), 1842-1852.
- [3] Thomson, W.T. (2001). On-line MCSA to diagnose Shorted turns in low voltage stator windings of 3-phase induction motors prior to failure. Electric Machines and Drives Conference, 2001. IEMDC 2001. IEEE International, 891-898.
- [4] Jolliffe, I.T. (1986). Principal Component Analysis, Springer-Verlag, New York.

International Conference on Electrical & Electronic Technology 2016

PCA based Feature Extraction for Classification of Stator-Winding Faults in Induction motors

Thanaporn Likitjarernkul, Kiattisak Sengchuai, Rakkrit Duangsoithong, Kusumal Chalermyanont

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112, Thailand

ABSTRACT

Nowadays, induction motors are widely used in many industrial processes. The shorted-turn fault of the stator-winding is the initial point of stator winding faults. This paper proposes using the Principal Component Analysis (PCA) to reduce the dimension of the feature set which is obtained from the Motor Current Signature Analysis (MCSA). The six original feature set consists of the signal power of the three-phase filtered current signal at 20 Hz to 80 Hz and 120 Hz to 180 Hz of the phases a, b and c. After using the PCA, the dimension of the feature set decreases to two new features. These two new features are then used to classify the shorted-turn phases of the stator-winding by applying the Artificial Neural Network (ANN) classifier. The experimental results demonstrate that the new feature set can decrease the complexity of the system. Additionally, the accuracy rate using the new feature set is higher than using the original feature set. Therefore, the new feature set can properly improve the efficiency of the classification.

Keywords: Induction motor, interturn short circuit fault, shorted-turn fault, stator-winding fault, Principal Component Analysis (PCA), Artificial Neural Network (ANN);

INTRODUCTION

Induction motors are critical components which are widely used in industries. Approximately 37% of the induction motor faults is the stator-winding faults [1] and the shorted-turn fault or the interturn short circuit fault of the stator-winding is the initial point of the stator winding faults. Consequently, a shorted-turn fault detection is the necessary process for industrial factories. The shorted-turn fault can be observed in harmonic components of the current signal. A popular detection method for stator faults is the MCSA which is employed to analyze the motor faults by identifying the current spectra at harmonic components of faults [2, 3]. The current spectra are calculated by using Fast Fourier Transform (FFT). The advantage of the MCSA is that it does not encroach the motor operations. Commonly, the MCSA method provides many features from the current spectra for the fault detection. These features can be reduced by a feature extraction to decrease the dimension of features and the complexity of the system. The feature extraction transforms the original feature set into a smaller number of features without eliminating the information of features.

This paper presents the feature extraction method to reduce a size of the feature set by using the PCA. The reduced set of the new feature is used to classify the shorted-turn phases by applying the ANN classifier. The propose system is verified by experiments, and the experimental results reveal that using the new feature set can improve both the complexity and the accuracy of the system.

STATOR-WINDING FAULTS

The shorted-turn fault in the stator-winding can be detected by using an air gap flux waveform. This waveform is changed by the distortion of the net MMF which is caused from the short circuit current flowed into the shorted circuit stator-winding. The harmonic frequency components of the air-gap flux waveform in a stator-winding current are calculated by (1),

Thanaporn Likitjarernkul, Kiattisak Sengchui, Rakkrit Duangsoithong, Kusumal Chalermyanont

$$f_{st} = f_1 \left(\frac{n}{p} (1-s) \pm k \right) \quad (1)$$

where f_{st} is the harmonic frequency components, f_1 is the supply frequency, p is the pole-pairs, s is the slip, k is 1, 3, 5, ... and n is 1, 2, 3, ..., respectively.

The harmonic frequency components depend on a load size which is related to the slip. Normally, the harmonic frequency components dominantly appear when calculation uses parameter $k=1$, $n=3$ and $k=1$, $n=5$ [3]. In this paper, a three-phase, four-pole ($p=2$) induction motor is tested at no-load condition. Therefore, the frequency components that are used to detect the shorted-turn fault are 25, 50, 75, 100, 125, 150 and 175Hz, respectively. The line current power spectra of phase A for the normal motor is shown in Fig. 1(a). Whereas, Fig. 1(b) shows the harmonic frequency components of the line current power spectra of phase A in a shorted-turn motor. Since spectra components occur at 125 Hz and 175 Hz, the shorted-turn fault can be identified.

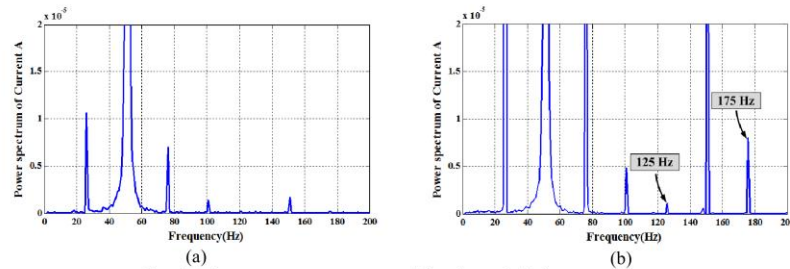


Fig. 1: The current power spectra of the phase A (a) the normal motor; (b) the shorted-turn fault in the phase A.

FEATURE GENERATION

The three-phase current signals are measured and used to generate the original features. The original features are calculated by the following methods:

Signal power

The shorted-turn fault of the stator-winding can be detected by the air gap flux spectrum analysis. The ranges of the harmonic frequency components for the shorted-turn fault detection are 25, 50, 75, 100, 150, 125 and 175 Hz. Accordingly, each phase of the current signal is filtered by the band-pass filter at 20 Hz to 80 Hz and 120 Hz to 180 Hz. The filtered current signals are used to calculate the signal powers as expressed by (2)

$$P = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n^2 \quad (2)$$

where P is the signal power, x is the band-pass filtered signal and N is the number of samples.

Normalization of data

Since the signal power values at 20 Hz to 80 Hz and at 120 Hz to 180 Hz are very different, then these values should first be normalized. The signal power of each phase is normalized by the min-max normalization technique. The normalized value can be calculated by (3)

Thanaporn Likitjarernkul, Kiattisak Sengchuai, Rakkrit Duangsoithong, Kusumal Chalermyanont

$$x^* = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (3)$$

where x^* is the normalized value and x is the signal power value.

PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS

The feature extraction is one of the methods to reduce the feature dimension. The PCA [4] is one of the examples of the feature extraction. The dimension of features is reduced by the PCA without eliminating the signal information using. The PCA is a technique that transforms an original feature set into a smaller feature set. The smaller feature set is transformed by using a function that related to the eigenvectors and eigenvalues. The procedures of the PCA have 4 steps. In the first step, the original feature set is used to calculate a covariance matrix as expressed by (4).

$$C_{ij} = \frac{1}{n-1} \sum_{m=1}^n (x_{im} - \bar{x}_i)(x_{jm} - \bar{x}_j) \quad (4)$$

Where C_{ij} is the covariance matrix between the feature i and the feature j , x_{im} is the sample m of the feature i , \bar{x}_i is the average value of the feature i , x_{jm} is the sample m of the feature j , \bar{x}_j is the average value of the feature j and n is the number of samples.

In the second step, the eigenvectors and eigenvalues of the covariance matrix are calculated using (5) and (6), respectively.

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{v} = \lambda \cdot \mathbf{v} \quad (5)$$

$$|\mathbf{A} - \lambda \mathbf{I}| = 0 \quad (6)$$

Where \mathbf{A} is the covariance matrix, \mathbf{v} is the eigenvector, λ is the eigenvalue and \mathbf{I} is the identity matrix.

In the third step, the principal components are the eigenvectors which are selected from the eigenvalue ranking. Finally, the fourth step, the smaller feature set is calculated by (7). The small feature set is the new feature set which is used to classify the shorted-turn fault of the stator-winding.

$$\mathbf{Y} = (\mathbf{v}^T \times \mathbf{X}^T)^T \quad (7)$$

Where \mathbf{Y} is the new feature set matrix, \mathbf{X} is the original feature set matrix and \mathbf{v} is the eigenvector.

ARTIFICIAL NEURAL NETWORK CLASSIFICATION

The ANN is one type of the classifiers. It is a model that inspired from the biological neural networks. A perceptron is one type of the ANNs that it has many models depended on the number of the hidden layer and the hidden cell. In this paper, a single layer perceptron is used. The perceptron has a learning algorithm for the classification. The learning algorithm is to adjust the weights of input and the biases of hidden layer until the output close to the target. The updated weights and the updated biases are calculated by (8) and (9), respectively and the output is calculated by (10). The output is calculated by a transfer function which estimates the output by using the total product between the weight vector and the input vector. An error between the output and the target can be calculated by (11). Finally, the last weights and the last biases are used to classify the shorted-turn fault of the stator-winding.

$$\mathbf{W}_{k+1} = \mathbf{W}_k + e_k \cdot \mathbf{p}^T \quad (8)$$

$$b_{k+1} = b_k + e_k \quad (9)$$

Thanaporn Likitjarernkul, Kiattisak Sengchui, Rakkrit Duangsoithong, Kusumal Chalermyanont

$$a_k = f(\mathbf{W}_k \times \mathbf{p} + b_k) \quad (10)$$

$$e_k = t - a_k \quad (11)$$

Where \mathbf{W}_{k+1} is the new weight matrix, \mathbf{W}_k is the old weight matrix, e_k is the error, \mathbf{p} is the input vector, b_{k+1} is the new bias, b_k is the old bias, a_k is the output, f is the transfer function and t is the target.

EXPERIMENTAL SETUP

The three-phase, four-pole, star-connected induction motor is used for the experiment as shown in Fig. 2. The motor parameters and ratings are also illustrated in TABLE 1. The three-phase current signals are measured by three current sensors. National Instrument (NI) data acquisition device at 6,000Hz sampling rate are used. These measured current signals are filtered at 20 Hz to 80 Hz and 120 Hz to 180 Hz. Then, the filtered signals are used to calculate the power signal, and the results are normalized by (2) and (3), respectively. Therefore, the normalized value is the original feature set which is reduced the dimension of features by the PCA. The block diagram of the experiment is presented in Fig. 3. As mentioned before, this paper uses the ANN classifier. Classes of the fault classification include [0 0], [0 1], [1 0] and [1 1]. These classes mean a normal motor and shorted-turn faults in the phase A, B and C, respectively. The total data set contains of six features and 160 samples. The 80 samples are used as the training set, and the 80 samples are used as the test set.

TABLE 1 Parameters and ratings of test machines.

V	Hz	r/min	kW	cos ϕ	A
230 Δ /400Y	50Hz	1430	2.2	0.79	8.66/4.98
415Y	50Hz	1435	2.2	0.765	4.94

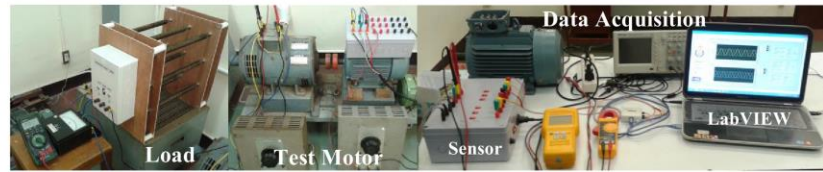


Fig. 2: The experimental setup.

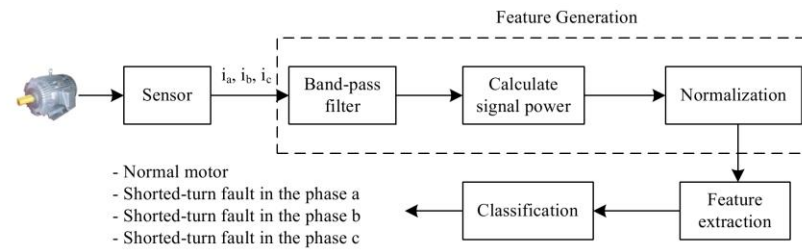


Fig. 3: The block diagram of the experiment.

EXPERIMENTAL RESULTS

The original data set has six features: the signal power of the 20 Hz to 80 Hz filtered signal and the 120 Hz to 180 Hz filtered signal in the phase A, B and C. The signal power values are normalized between zero to one. The original data set is reduced the size by the PCA. The PCA can extract to two features. The two new features

Thanaporn Likitjarernkul, Kiattisak Sengchui, Rakkrit Duangsoithong, Kusumal Chalermyanont

can be plotted the scattered graph as presented in Fig. 4. From the graph, classes of the fault classification are clearly separated. The new feature set is used to create the learning system. The learning results are also shown in TABLE 2. From the learning results, it found that the new feature set uses less number of training data than the original feature set for all ratio of the train/test data. Similarly, the new feature set has less numbers of error samples than the original feature set. Finally, the efficiency of the classification is illustrated in TABLE 3. According to such results, the new feature set has the number of training and the classification error less than the original feature set. The new feature set provides the accuracy rate higher than the original feature set. As reason of the result, the new feature set is the reduced feature set, but it does not eliminate the information of features. Therefore, the new feature set can decrease the complexity of the system and increase the accuracy rate of the classification system.

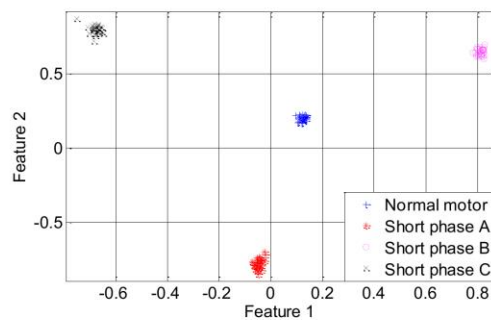


Fig. 4: The scattered graph of the new features.

TABLE 2 The number of training.

Train/Test (%)	With the PCA		Without the PCA	
	Epochs	Error	Epochs	Error
30/70	5	0/112	134	4/112
50/50	4	0/80	46	3/80
70/30	3	0/48	40	1/48

TABLE 3 The efficiency of the classification.

	Classification (Perceptron ANN)	
	With the PCA	Without the PCA
Training sets	80	80
Test sets	80	80
Epochs	4	46
Classification error (%)	0	3.75
Accuracy rate (%)	100	96.25

CONCLUSIONS

This paper presents using the PCA to reduce the dimension of features. The new feature set is used to classify the shorted-turn fault of the stator-winding. Based on our experimental results, the six original features are extracted remained only the two new features. This new feature set can decrease the complexity of the classification system. The accuracy rate using the new feature set are 100%, then this feature set can improve the fault classification system.

Correlation Feature Selection Analysis for Fault Diagnosis of Induction Motors

Thanaporn Likitjarernkul, Kiattisak Sengchai,
Rakkrit Duangsoithong, Kusumal Chalermyanont
and Anuwat Prasertsit

Abstract This paper presents a feature selection method for stator winding fault analysis of induction motors by using a Correlation-based Feature Selection (CFS) method. The 14 original motor parameters are selected from the feature selection method with various searching approaches. The classification efficiency of optimal features obtained from the feature selection method is compared with results from the feature extraction method and the original features. In our experiment, we employ a 2.2 kW delta-connected motor which drives a dc generator as a load. The experimental results demonstrate that 4 common selected features for stator winding fault analysis of induction motors are a percent of load ($%Load$), a power factor (pf), a negative sequence voltage (V_n), and a negative sequence impedance (Z_n). The accuracy of the classification using this feature subset is higher than using all original features for three classification methods.

Keywords Feature selection · Induction motor · Stator winding faults

T. Likitjarernkul (✉) · K. Sengchai · R. Duangsoithong · K. Chalermyanont · A. Prasertsit
Faculty of Engineering, Department of Electrical Engineering, Prince of Songkla University,
Hat Yai, Songkhla 90112, Thailand
e-mail: t.thanapond@gmail.com

K. Sengchai
e-mail: ak.kiattisak@hotmail.com

R. Duangsoithong
e-mail: rakkrit.d@psu.ac.th

K. Chalermyanont
e-mail: kusumal.c@psu.ac.th

A. Prasertsit
e-mail: anuwat.p@psu.ac.th

© Springer International Publishing Switzerland 2016
H.A. Sulaiman et al. (eds.), *Advanced Computer and Communication
Engineering Technology*, Lecture Notes in Electrical Engineering 362,
DOI 10.1007/978-3-319-24584-3_104

1219

1 Introduction

Electrical motors are critical equipments for any machine in process industries. Motor deteriorations or any fault occurred since rotors and stators have been forced by electromagnetic field all the time. Moreover, mechanical damages caused by thermal and electrical stresses have an effect to the performance and the lifetime of motors.

About 37 % [1] of induction motor faults are stator winding faults due to the deterioration of the winding insulation from contamination of oil, humidity, and sewage. They impact on opening or shorting one or more circuits of windings.

Current and voltage signals of the induction motor contain information of stator winding faults, and they are widely used to detect and locate stator winding faults in various methods. The Motor Current Signature Analysis (MCSA) method is one of the most frequently used methods to analyze the motor fault by identifying stator current spectrums in abnormal harmonics [2, 3]. In addition, the Extended Park's Vector Approach (EPVA) is applied to analyze EPVA signatures by identifying a spectral component at twice the fundamental supply frequency [4]. Motor sequence components (i.e. negative and zero sequence components of the current) are also used for stator fault diagnosis [5–8]. Moreover, modeling and simulation studies can provide useful information about the electric behavior of the motors, and they relate to the analysis of the presence of the internal fault in the stator windings [9, 10]. Other techniques, such as an instantaneous angular speed technique, temperature monitoring, air-gap torque monitoring, magnetic flux monitoring, noise/acoustic noise, induced voltage monitoring, surge testing, gas analysis, and partial discharge [11] are also used in order to diagnose stator winding faults.

Currently, some or all electrical features of induction motors mentioned previously are used for the motor fault analysis and detection. However, using all or inappropriate electrical features will increase the complexity of the system and the stodgy storages. Moreover, they may not be able to classify the motor faults correctly. Consequently, the feature selection should be required in as preprocessing in order to reduce original features and extract the appropriate features. Basically, there are two methods to reduce the feature dimension. One is the feature selection and the other is feature extraction. The feature selection can be used to choose optimal features from original features to remove irrelevant and redundant of original features and also decreases the complexity of the system. The feature extraction is another method to reduce a number of features by transforming original features to lower dimensional spaces. The Principal Component Analysis (PCA) [12] is one of the example of the feature extraction. The PCA reduces the dimension of features without eliminating the signal information using the principal component. The proposed fault diagnosis system is shown in Fig. 1.

This paper presents the use of the correlation feature selection for selecting electric features. Optimal electric features are obtained by the feature selection for stator winding fault analysis of induction motors. The accuracy of motor fault classification obtained by the optimal features from the feature selection method is

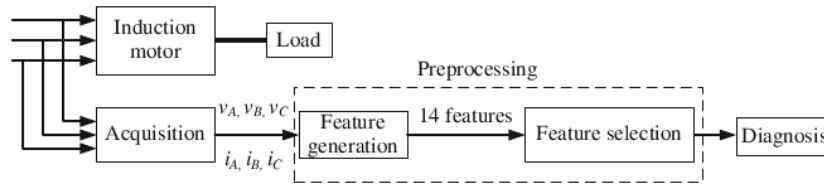


Fig. 1 The proposed fault diagnosis system

compared with one that obtained from the feature extraction method and original features. Various theories related to electrical features calculation are reviewed in Sect. 2. In Sect. 3, the feature selection methods are explained. Section 4, an experimental setup is described and the experimental results of the feature selection analysis are showed and discussed in Sect. 5 and conclude in Sect. 6.

2 Feature Generation

The electrical features were calculated by motor current and voltage signals. These features are popular features for the stator winding fault diagnosis. These signals were fed to the preprocessing block to reduce a number of features, and optimal features are searched and selected for such faults. The original features in this paper can be obtained from the following methods.

2.1 Symmetrical Components

The positive and the negative sequence components of the induction motor are normally used to indicate the stator faults. Figure 2 shows a workflow for extracting the positive (I_p) and the negative (I_n) sequence components from three-phase

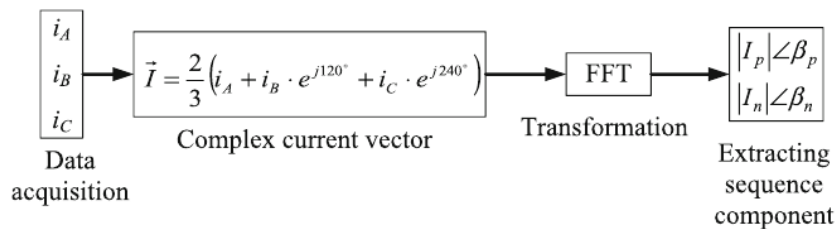


Fig. 2 Signal processing workflow to extract sequence components

current signals. The three-phase currents are used to construct a complex current vector (\vec{T}), as expressed by

$$\vec{T} = \frac{2}{3} (i_A + i_B \cdot e^{j120^\circ} + i_C \cdot e^{j240^\circ}) \quad (1)$$

where i_A , i_B , and i_C are the currents in the phase A, B, and C, respectively.

Fast Fourier Transform (FFT) of the complex current vector can automatically separate the positive and the negative sequence currents for all frequency components. An example of an actual current spectrum is shown in Fig. 3. The three-phase voltages are processed in the similar approach.

2.2 Extended Park's Vector Approach (EPVA)

The EPVA method is the observation of the spectrum of the Park's vector module. The motor current Park's vector components (i_D , i_Q) are

$$i_D = \left(\sqrt{\frac{2}{3}} \right) i_A - \left(\sqrt{\frac{1}{6}} \right) i_B - \left(\sqrt{\frac{1}{6}} \right) i_C \quad (2)$$

$$i_Q = \left(\sqrt{\frac{1}{2}} \right) i_B - \left(\sqrt{\frac{1}{2}} \right) i_C \quad (3)$$

Fig. 3 A magnitude spectrum of the complex current vector

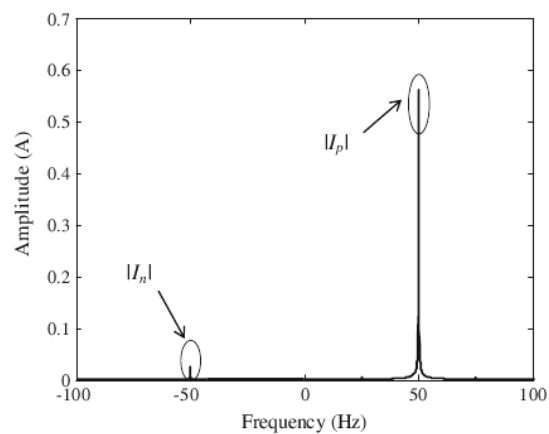


Table 1 The original features

	Features	Description
1	<i>%Load</i>	Percent of load
2	<i>pf</i>	Power factor
3	I_p	Positive sequence current
4	<i>Angle (I_p)</i>	Angle of positive sequence current
5	I_n	Negative sequence current
6	<i>Angle (I_n)</i>	Angle of negative sequence current
7	V_p	Positive sequence voltage
8	<i>Angle (V_p)</i>	Angle of positive sequence voltage
9	V_n	Negative sequence voltage
10	<i>Angle (V_n)</i>	Angle of negative sequence voltage
11	Z_p	Positive sequence impedance
12	Z_n	Negative sequence impedance
13	I_{dc}	Magnitude of square of Park's vector module at DC level
14	I_{100Hz}	Magnitude of square of Park's vector module at twice the supply frequency

The square of the Park's vector module is given by

$$|i_D + ji_Q|^2 = \left(\frac{3}{2}\right)(i_d^2 + i_i^2) + 3i_d i_i \cos(2\omega t - \alpha_d - \beta_i) \quad (4)$$

where i_d is the maximum value of the direct sequence current, i_i is the maximum value of the reverse sequence current, ω is the angular frequency (rad/s), t is the time variable (s), α_d is the initial phase angle of the direct sequence current (rad), and β_i is the initial phase angle of the reverse sequence current (rad).

The square of the Park's vector module can be used to identify unbalanced three-phase currents. The spectrums of dc level and the component located at twice the supply frequency are obtained by applying the FFT to the square of the Park's vector module [1].

Two feature generation methods contain 12 original features and two extra features including the percent of load (*%Load*) and the power factor (*pf*) are added to be the original features. The 14 original features as shown in Table 1 are used to be the inputs for the next feature selection process.

3 Feature Selection

The Feature selection is a process to select optimal features from original features. It can reduce a number of features by removing irrelevant and redundant features. Basically, it can be divided into four categories: Filter, Wrapper, Hybrid, and Embedded methods [13]. The Filter method is the feature selection that applied

independent evaluation criteria without involving any classification algorithms with measurement technique such as CFS [14] and consistency based subset evaluation. The Wrapper method applies a classification algorithm for a feature subset evaluation. This method is better than the Filter method, but it takes longer time for a computation. The Hybrid method combines the advantage of above two approaches. Finally, the Embedded method has built-in the feature selection in classifier.

Generally, the feature selection has four steps [15]: subset generation, subset evaluation, stopping criteria, and result validation. First, it searches optimal features by using searching algorithms. Then, this subset is evaluated by subset evaluator, and it stop by stopping criteria. Finally, it validates selected features.

Searching algorithms for finding the feature set have several methods which are shown below

1. **Best first** is the searching method that selects the feature with the best heuristic value.
2. **Exhaustive search** searches all possible feature subset.
3. **Greedy stepwise** is the searching method. It starts with empty or full feature set. Then, it adds the suitable feature or removes the inappropriate feature.
4. **Linear forward selection (LFW selection)** is the searching method that begins with an empty set and successively adding features.
5. **Random search** randomly selects the feature subset from original features.
6. **Rank search** selects the feature subset from ranking of total features.

CFS [14] is a well-known feature selection method that considers the correlation between features and classes and between features and other features. Relevance of the feature subset can be defined by using Pearson's correlation equation [13] which is expressed by (5)

$$Merit_s = \frac{kr_{kc}}{\sqrt{k + (k - 1)r_{kk}}} \quad (5)$$

where k is the number of features, c is the number of classes, $Merit_s$ is relevance of the feature subset, r_{kc} is the average linear correlation coefficient between these features and classes, and r_{kk} is the average linear correlation coefficient between different features.

The linear correlation coefficient is defined by

$$r = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x}_i)(y_i - \bar{y}_i)}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x}_i)^2} \sqrt{\sum_i (y_i - \bar{y}_i)^2}} \quad (6)$$

where i is the number of values (x or y), x_i is the x value for observation i , \bar{x}_i is the mean x value, y_i is the y value for observation i , and \bar{y}_i is the mean y value.

4 Experimental Setup

The three-phase four-pole delta-connected induction motor is used in the experimental setup as shown in Fig. 4. The motor parameters and ratings are summarized in Table 2. The motor is modified for interturn stator winding faults in each phase. A shorting resistor is used to limit the short-circuit current in the winding not exceed to 5 A. The induction motor is monitored by three current sensors and three voltage sensors. The measured signals are sent to the computer through a National Instruments (NI) data acquisition device with 6000 Hz sampling rate and ten operate conditions. The operation conditions contain of four cases: healthy motor, and the short- turns motor of 7, 15, and 31 turns in each phase. Each condition is operated under 6, 30, 60, and 90 % rated load of the motor. Note that the 14 original features are obtained from the normalized signals with rated parameters of the testing motor. Classes for the fault classification consist of '0', 'A', 'B', and 'C' as the following meanings

- '0' is Healthy motor
- 'A' is Interturn fault in phase A
- 'B' is Interturn fault in phase B
- 'C' is Interturn fault in phase C

Optimal features analyzed from the correlation feature selection algorithms are used in three well-known classifiers: k-Nearest Neighbor or kNN ($k = 3$), Naïve Bayes, and Decision Tree. The accuracy rated of classification will be compared with one obtained from the feature extraction using the PCA by using data set of 1320 samples. The result is validated by using 10 folds cross-validation technique.

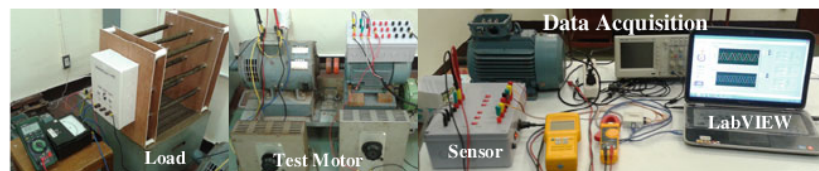


Fig. 4 Experimental setup

Table 2 Parameters and ratings of test machines

V	Hz	r/min	kW	cos ϕ	A
230 Δ /400Y	50	1430	2.2	0.79	8.66/4.98
415Y	50	1435	2.2	0.765	4.94

5 Results and Discussions

The original features are analyzed by CFS for the feature selection method with aforementioned search algorithms. The results in Table 3 show that the correlation feature selection can effectively select 4 or 5 optimal features, while the PCA can reduce to 8 features. The 4 common features including *%Load*, *pf*, V_n , and Z_n are chosen from each search algorithms. These features are the part of optimal features for stator winding fault analysis. It is shown that these features have high correlation between features and classes, and they have low correlation between features and other features.

According to experimental results, the accuracy rates using original features are 58.5606, 43.0303, and 85.0758 % for kNN, Naïve Bayes, and Decision Tree, respectively. Based on feature selection, the accuracy rates using Decision Tree is higher than using kNN and Naïve Bayes. These classifiers provide the accuracy rates as ranged 85–87, 75–78, and approximately 43 %, respectively. Significantly, it can be explained that using the feature selection to select optimal features can reduce a number of features and increase the accuracy of the classification system. Fault classification provides better performance than using the feature extraction and original features, respectively.

Table 3 Classification correction of the proposed approach

Search algorithms	Subset evaluators	Number of selected features	Selected features	Accuracy rate (%)		
				kNN ($k = 3$)	Naïve Bayes	Decision tree
Original features	–	14	Original feature set	58.5606	43.0303	85.0758
Best first	CFS	5	<i>%Load</i> , <i>pf</i> , I_n , V_n , Z_n	75.1515	43.7121	86.0606
Exhaustive search	CFS	5	<i>%Load</i> , <i>pf</i> , I_n , V_n , Z_n	75.1515	43.7121	86.0606
Greedy stepwise	CFS	4	<i>%Load</i> , <i>pf</i> , V_n , Z_n	76.1364	43.0303	85.6818
LFW selection	CFS	5	<i>%Load</i> , <i>pf</i> , I_n , V_n , Z_n	75.1515	43.7121	86.0606
Random search	CFS	4	<i>%Load</i> , <i>pf</i> , V_n , Z_n	78.1818	42.803	87.1212
Rank search	CFS	4	<i>%Load</i> , <i>pf</i> , V_n , Z_n	77.0455	42.9545	85.6061
Ranker	PCA	8	–	60.5303	43.1061	59.8485

6 Conclusions

This paper presents the correlation feature selection for stator winding fault analysis of the induction motor. According to our experimental results, it can be found that the common selected features for stator winding fault analysis of the induction motor are $\%Load$, pf , V_n , and Z_n . These features are good indicators to predict stator winding faults, and they can be applied for any size of motors. Furthermore, using the feature selection and the feature extraction can improve the accuracy of the classification system. For future works of our research, more features will be considered and compared with other feature selection methods.

Acknowledgments This work was fully supported by Prince of Songkla University Graduate Studies Grant Contract number 95000201 and partially supported by Center of Excellence in Wireless Sensor Networks (CoE-WSN), Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, Thailand.

References

1. Bonaldi, E.L., de Oliveira, L.E.L., Borges da Silva, J.G., Lambert-Torres, G., Borges da Silva, L.E.: Predictive maintenance by electrical signature analysis to induction motors. In: Araujo R. E (ed.) *Induction Motors Modelling and Control*, InTech (2012)
2. Jung, J.-H., Lee, J.-J., Kwon, B.-H.: Online diagnosis of induction motors using MCSA. *IEEE Trans. Industr. Electron.* **53**(6), 1842–1852 (2006)
3. Thomson, W.T.: On-line MCSA to diagnose shorted turns in low voltage stator windings of 3-phase induction motors prior to failure. In: *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2001*, pp. 891–898 (2001)
4. Cruz, S.M.A., Cardoso, A.J.M.: Stator winding fault diagnosis in three-phase synchronous and asynchronous motor, by the extended park's vector approach. *IEEE Trans. Industr. Appl.* **37**(5), 1227–1233 (2001)
5. Ben Khader Bouzid, M., Champenois, G.: New expressions of symmetrical components of the induction motor under stator faults. *IEEE Trans. Industr. Electron.* **60**(9), 4093–4102 (2013)
6. Arkan, M., Perovic, D.K., Unsworth, P.: Online stator fault diagnosis in induction motors. *Proc. IEE Electr Power Appl.* **148**(6), 537–547 (2001)
7. Cheng, S., Habetler, T.G.: A new method to detect stator turn to turn faults in a closed-loop multiple-motor drive system. In: *IEEE international symposium on diagnostics for electric machines, power electronics and drives, SDEMPED 2009*, pp. 1–6 (2009)
8. Cheng, S., Zhang, P., Habetler, T.G.: An impedance identification approach to sensitive detection and location of stator turn-to-turn Faults in a closed-loop multiple-motor drive. *IEEE Trans. Industr. Electron.* **58**(5), 1545–1554 (2011)
9. Chang, X., Cocquempot, V., Christophe, C.: A model of asynchronous machines for stator fault detection and isolation. *IEEE Trans. Industr. Electron.* **50**(3), 578–584 (2003)
10. Bachir, S., Tnani, S., Trigeassou, J.-C., Champenois, G.: Diagnosis by parameter estimation of stator and rotor faults occurring in induction machines. *IEEE Trans. Industr. Electron.* **53**(3), 963–973 (2006)
11. Siddique, A., Yadava, G.S., Singh, B.: A review of stator fault monitoring techniques of induction motor. *IEEE Trans. Energy Convers.* **20**(1), 106–114 (2005)
12. Jolliffe, I.T.: *Principal Component Analysis*. Springer, New York (1986)

13. Duangsoithong, R., Windeatt, T.: Relevance and redundancy analysis for ensemble classifiers. In: P. Perner (ed.) *Machine Learning and Data Mining in Pattern Recognition, MLDM 2009*, LNAI 5632, pp. 206–220. Springer, Heidelberg (2009)
14. Hall, M.A.: Correlation-based feature selection for discrete and numeric class machine learning. In: *Proceeding of the 17th International Conference on Machine Learning*, pp. 359–366. Morgan Kaufmann, San Francisco (2000)
15. Liu, H., Yu, L.: Toward integrating feature selection algorithms for classification and clustering. *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.* **17**(4), 491–502 (2005)

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นางสาวชนาภรณ์ ถิขิตเจริญกุล	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5610120108	
วุฒิการศึกษา		
	วุฒิ	ชื่อสถาบัน
	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
		ปีที่สำเร็จการศึกษา
		2555

ทุนการศึกษา

ทุนบัณฑิตศึกษาสงขลานครินทร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

- T. Likitjarernkul, K. Sengchai, R. Duangsoithong, K. Chalermyanont, A. Prasertsit “ PCA based Feature Extraction for Classification of Stator-Winding Fault in Induction Motors” *Pertanika Journal of Science and Technology.*, vol. 25(S), pp. 197-207, Jan. 2017.
- T. Likitjarernkul, K. Sengchai, R. Duangsoithong, K. Chalermyanont, A. Prasertsit “ PCA based Feature Extraction for Classification of Stator-Winding Fault in Induction Motors” *International Conference on Electrical & Electronic Technology (ICEETech)*, 2016.
- T. Likitjarernkul, K. Sengchai, R. Duangsoithong, K. Chalermyanont and A. Prasertsit, "Correlation feature selection analysis for fault diagnosis of induction motors," in *Advanced Computer and Communication Engineering Technology*, Switzerland, Springer International Publishing, 2016, pp. 1219-1228.