

วิธีการแบบประหยัดสำหรับการประเมินประสิทธิภาพขณะใช้งาน  
ของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน

ECONOMICAL ON-SITE EFFICIENCY ESTIMATION TECHNIQUE OF  
SUBWAY TUNNEL VENTILATION FAN MOTOR

อารีย์ หวังศุภผล  
AREE WANGSUPPHAPHOL

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

วิธีการแบบประหยัดสำหรับการประเมินประสิทธิภาพขณะใช้งาน  
ของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน

ECONOMICAL ON-SITE EFFICIENCY ESTIMATION TECHNIQUE OF  
SUBWAY TUNNEL VENTILATION FAN MOTOR

อารีย์ หวังศุภผล

AREE WANGSUPPHAPHOL

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2550

**ECONOMICAL ON-SITE EFFICIENCY ESTIMATION TECHNIQUE OF  
SUBWAY TUNNEL VENTILATION FAN MOTOR**

**AREE WANGSUPPHAPHOL**

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

**2007**

**COPYRIGHT 2007**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

|                   |   |
|-------------------|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | วิธีการแบบประหยัดสำหรับการประเมินประสิทธิภาพขณะใช้งานของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์รถไฟใต้ดิน |
| นักศึกษา          | นายอารีย์ หวังสุภผล   |
| รหัสนักศึกษา      | 45061021  |
| ปริญญา            | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  |
| สาขาวิชา          | วิศวกรรมไฟฟ้า   |
| พ.ศ.              | 2549  |
| อาจารย์ที่ปรึกษา  | รศ.ดร.ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย   |

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการแบบประหยัดสำหรับการประเมินประสิทธิภาพขณะใช้งานของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์รถไฟใต้ดินที่มีการขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ การประเมินค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ใช้พื้นฐานของวงจรสมมูลซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จะพิจารณาหาได้จากการใช้หลักการหาค่าที่เหมาะสม (จินตคณิตออลกอริทึม) ร่วมกับการใช้เพียงข้อมูลทางไฟฟ้าที่วัดได้จริงขณะใช้งาน ได้แก่ แรงดันไฟฟ้าประสิทธิผล กระแสไฟฟ้าประสิทธิผล กำลังไฟฟ้า ความถี่ และข้อมูลทางกลคือความเร็วรอบมอเตอร์โดยไม่ต้องวัดกำลังทางกลซึ่งยุ่งยากและเสียค่าใช้จ่ายสูง วิธีการที่นำเสนอนี้ได้ทำการทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดเล็กพิกัด 2.2 kW และ 5.5 kW ที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ ทำงานที่ความถี่ค่าต่าง ๆ เพื่อประเมินประสิทธิภาพเปรียบเทียบกับวิธีการทดสอบแบบมีภาระ พบว่าผลลัพธ์ที่ได้มีความคลาดเคลื่อนจากวิธีการทดสอบแบบมีภาระไม่เกิน 2 % จากนั้นได้นำวิธีการที่นำเสนอไปประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์รถไฟใต้ดินพิกัด 108 kW ขณะใช้งานจริงที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ที่ใช้งานอยู่ตามสถานีต่าง ๆ จำนวน 22 ตัว จากการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลการประเมินประสิทธิภาพ พบว่าผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอนี้มีค่าที่แม่นยำและมีความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ ดังนั้นวิธีการนี้จึงเป็นวิธีการที่สะดวก และประหยัดเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในการจัดการบริหารพลังงาน และการซ่อมบำรุงในระบบอุตสาหกรรม ทั้งนี้เนื่องมาจากมีความแม่นยำที่ยอมรับได้และไม่ยุ่งยาก

|                       |  |
|-----------------------|--|
| <b>Thesis</b>         | Economical On-Site Efficiency Estimation Technique of<br>Subway Tunnel Ventilation Fan Motor |
| <b>Student</b>        | Mr.Aree Wangsupphaphol   |
| <b>Student ID.</b>    | 45061021   |
| <b>Degree</b>         | Master Degree  |
| <b>Program</b>        | Electrical Engineering   |
| <b>Year</b>           | 2006   |
| <b>Thesis Advisor</b> | Assoc.Prof.Dr. Chaiwut Chat-uthai  |

### **ABSTRACT**

This thesis proposes the economical technique of subway tunnel ventilation fan motors on-site efficiency estimation (OEE) fed by inverter (variable speed drive; VSD). The estimated efficiency is based on the equivalent circuit model. These model parameters can be determined by using the optimization technique (genetic algorithms) coupled with the use of only data of on-site measured effective electrical input, e.g. effective voltage and current, power, frequency, and motor speed without the need for measuring output of motor which is highly intrusive task. The 2.2 kW and 5.5 kW induction motors fed by inverter (PWM) were tested under various operating frequencies and at various loads. The estimated results of proposed technique are compared to the measured values obtained from laboratory load test and found to give a better correlation over a wide range of speeds and loads (error less than 2 %). Then this proposed technique was implemented to estimate an on-site efficiency of the 108 kW subway tunnel ventilation fan motors (22 items) fed by inverter (direct torque control) operating at several stations. The results show that the estimated efficiencies were accurate and practical. Therefore, it can be seen that this proposed technique is economical and suitable for the use in energy management and maintenance in industry because of its acceptable accuracy and non-intrusive operation.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยการสั่งสอนวิชาความรู้ ให้การสนับสนุน และโอกาส จาก รศ.ดร. ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ตั้งแต่รับข้าพเจ้าเข้าเป็น นักศึกษาผู้รับคำแนะนำในช่วงเวลาประมาณ 2 ปีสุดท้ายของระยะเวลาการศึกษา ข้าพเจ้าได้รับวิชา ความรู้ วิธีการในการแก้ปัญหา และ การบริหารจัดการเวลาในการทำวิทยานิพนธ์อย่างเป็นระบบ ซึ่งช่วยให้ข้าพเจ้าเกิดมุมมองในการเรียนรู้และแก้ปัญหาใหม่ ๆ มีระบบในการคิด และการทำงาน มากขึ้น รวมถึงมีโลกทัศน์ที่กว้างขึ้นจากการศึกษาและทำความเข้าใจในสิ่งหนึ่งสิ่งใดอย่างลึกซึ้ง ข้าพเจ้าจักขอขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณอาจารย์ธนภวิวัฒน์ ภูมิภาคที่ให้การสนับสนุนการทดสอบ ให้คำชี้แนะ และ เพิ่มเติมวิชาการในส่วนที่จำเป็นแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ บริษัท รถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน) ที่ได้ให้โอกาสในการเข้าตรวจวัดและ บันทึกราคาต่าง ๆ จากมอเตอร์พัดลมระบายอากาศในสถานีและขอขอบคุณวิศวกรของบริษัท Wire & Wireless จำกัด ที่ช่วยสนับสนุนการวัดและข้อมูลต่าง ๆ ด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ นักศึกษาในห้องวิจัยเครื่องกลไฟฟ้า ฯ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ฯ ลาดกระบัง ที่ได้ช่วยแนะนำการเขียน โปรแกรมประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำ บางส่วนและการสนับสนุนข้อมูลต่าง ๆ

ขอขอบคุณ คุณธีรพล โพธิ์พงษ์วิวัฒน์ที่ช่วยแบ่งปันประสบการณ์ในการทำวิทยานิพนธ์ และสนับสนุนเอกสารความรู้ทางวิชาการ ด้วยดีเสมอมา

ท้ายที่สุดขอขอบพระคุณ คุณพ่อ และทุก ๆ คนในครอบครัวหวังสุภผล ที่ได้ให้กำลังใจและ สนับสนุนข้าพเจ้าให้ศึกษาได้สำเร็จลุล่วง

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

อารีย์ หวังสุภผล

# สารบัญ

|  | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....   | I    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....  | II   |
| กิตติกรรมประกาศ.....   | III  |
| สารบัญ.....  | IV   |
| สารบัญตาราง.....   | VIII |
| สารบัญรูป.....   | IX   |
| บทที่ 1 บทนำ.....  | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....                                | 1    |
| 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....                        | 1    |
| 1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....   | 2    |
| 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....                           | 2    |
| 1.5 ขอบเขตการวิจัย.....  | 3    |
| 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....  | 3    |
| บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....  | 5    |
| 2.1 บทนำ.....  | 5    |
| 2.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำ.....  | 5    |
| 2.2.1 โครงสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....                                   | 6    |
| 2.2.2 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....                                | 7    |
| 2.2.3 การไหลของกำลังในมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....                            | 7    |
| 2.3 ความรู้เบื้องต้นของการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบควบคุมแรงบิด โดยตรง..... | 9    |
| 2.3.1 ความเป็นมาของการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบควบคุมแรงบิด โดยตรง.....     | 9    |
| 2.3.2 ทฤษฎีพื้นฐานของการควบคุม.....                                    | 9    |
| 2.4 หลักการออกแบบที่เหมาะสม.....                                       | 10   |
| 2.4.1 กำหนดเป้าหมายการออกแบบ.....                                      | 12   |
| 2.4.2 กำหนดรูปแบบของปัญหา.....   | 12   |
| 2.4.3 หลักการออกแบบและการสังเคราะห์.....                               | 12   |

## สารบัญ (ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| 2.4.4 การหาค่าที่เหมาะสม .....   | 12   |
| 2.4.5 อภิปรายผลการออกแบบ .....   | 12   |
| 2.5 หลักการเบื้องต้นของการหาค่าที่เหมาะสม .....  | 12   |
| 2.6 จีเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithms).....  | 14   |
| 2.6.1 ฟังก์ชันเป้าหมายและฟังก์ชันค่าความเหมาะสม.....   | 15   |
| 2.6.2 การทำงานของจีเนติกอัลกอริทึม .....   | 15   |
| 2.7 การระบายอากาศในอุโมงค์.....  | 17   |
| 2.8 ความรู้พื้นฐานการซ่อมบำรุง.....  | 18   |
| 2.9 การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบทั่วไป .....   | 20   |
| 2.9.1 วิธีการใช้ค่ากำลังไฟฟ้า (nameplate method) .....   | 20   |
| 2.9.2 วิธีการใช้ค่าความเร็ว (slip method ; SM).....  | 21   |
| 2.9.3 วิธีการใช้ค่ากระแสไฟฟ้า (current method ; CM).....   | 22   |
| 2.9.4 การทดสอบแบบมีภาระ (shaft torque method).....   | 22   |
| 2.9.5 การหาค่าประสิทธิภาพโดยทดสอบตามมาตรฐาน IEEE Std.122 .....   | 22   |
| 2.9.5.1 Method B การแยกค่าการสูญเสียต่างๆออกจากกัน .....   | 22   |
| 2.9.5.2 Method F วงจรสมมูล .....   | 23   |
| บทที่ 3 การประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์โดยใช้จีเนติกอัลกอริทึม..... | 25   |
| 3.1 บทนำ .....   | 25   |
| 3.2 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่นำเสนอ .....  | 25   |
| 3.3 การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ด้วยวิธีการที่นำเสนอ .....   | 26   |
| 3.4 การทดสอบการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ขนาดเล็กด้วยวิธีการที่นำเสนอ.....                                  | 29   |
| 3.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ .....  | 29   |
| 3.4.2 ขั้นตอนการดำเนินการทดสอบ.....  | 30   |
| 3.4.3 ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบ.....  | 31   |
| 3.4.4 สรุปผลการทดสอบ .....   | 37   |

## สารบัญ (ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| บทที่ 4 การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์ขณะใช้งาน.....                       | 38   |
| 4.1 บทนำ .....   | 38   |
| 4.2 การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศขณะใช้งาน .....                                   | 39   |
| 4.2.1 อุปกรณ์ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์.....                                | 39   |
| 4.2.2 เครื่องมือวัดที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ .....                                    | 39   |
| 4.2.3 ขั้นตอนการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ขณะใช้งาน .....   | 40   |
| 4.2.4 การวิเคราะห์ค่าที่ได้จากเครื่องมือวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้า.....                                | 42   |
| 4.2.5 การเปรียบเทียบกำลังทางกลของมอเตอร์พัดลม F700.....  | 44   |
| 4.2.6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพมอเตอร์ F700 โดยวิธีที่นำเสนอกับวิธีการใช้ค่า<br>กระแสไฟฟ้า ..... | 45   |
| 4.3 การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศตัวอื่น ๆ ในสถานีสูขุมวิท.....                    | 46   |
| 4.4 การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศในสถานีอื่นๆ .....                                | 53   |
| 4.4.1 สถานีหัวลำโพง .....  | 54   |
| 4.4.2 สถานีสามย่าน .....   | 55   |
| 4.4.3 สถานีลุมพินี .....   | 56   |
| 4.4.4 สถานีคลองเตย .....   | 57   |
| 4.4.5 สถานีศูนย์สิริกิติ์.....   | 58   |
| 4.4.6 อาคารระบายอากาศระหว่างสถานีศูนย์สิริกิติ์-สูขุมวิท.....                                    | 59   |
| 4.5 สรุปผลการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์ขณะใช้งาน .....                    | 60   |
| บทที่ 5 บทสรุป.....  | 61   |
| 5.1 บทนำ .....   | 61   |
| 5.2 สรุปผลการวิจัย.....  | 61   |
| 5.3 ข้อเสนอแนะ .....   | 65   |
| เอกสารอ้างอิง.....   | 66   |

## สารบัญ (ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| ภาคผนวก ก. จีเนติกอัลกอริทึม.....  | 68   |
| ภาคผนวก ข. Method B and Method F (IEEE Std 112).....   | 79   |
| ภาคผนวก ค. Technical Specification for ACS Family .....  | 87   |
| ภาคผนวก ง. Three Phase Power Quality Analyzer Specification (Fluke 434) .....                        | 90   |
| ภาคผนวก จ. Test Report of Tunnel Ventilation Fan.....  | 105  |
| ภาคผนวก ฉ. ข้อมูลที่วัดได้จาก Three Phase Power Quality Analyzer.....                                | 107  |
| ภาคผนวก ช. ค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศที่จีเนติกอัลกอริทึม<br>ประมาณขึ้นมา..... | 111  |
| ภาคผนวก ซ. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ (อยู่ระหว่างดำเนินการตีพิมพ์) .....                             | 118  |
| ประวัติผู้เขียน.....   | 125  |

# สารบัญตาราง

| ตารางที่  | หน้า |
|---|------|
| 2.1 ค่าประสิทธิภาพมอเตอร์ขนาด 100 แรงม้า ที่หาได้จากมาตรฐานต่างๆ .....  | 21   |
| 3.1 ข้อมูลของมอเตอร์ที่ใช้ทดสอบ .....   | 29   |
| 3.2 ค่าที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์ขนาด 2.2 kW ที่ความถี่ 40 Hz.....  | 31   |
| 3.3 ค่าที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์ขนาด 2.2 kW ที่ความถี่ 45 Hz.....  | 32   |
| 3.4 ค่าที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์ขนาด 2.2 kW ที่ความถี่ 50 Hz.....  | 32   |
| 3.5 ค่าที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์ขนาด 5.5 kW ที่ความถี่ 40 Hz.....  | 33   |
| 3.6 ค่าที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์ขนาด 5.5 kW ที่ความถี่ 45 Hz.....  | 34   |
| 3.7 ค่าที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์ขนาด 5.5 kW ที่ความถี่ 50 Hz.....  | 35   |
| 4.1 พิกัดของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์ .....   | 39   |
| 4.2 ค่าที่วัดได้จากมอเตอร์พัดลมระบายอากาศ F700 สถานีสุขุมวิท .....  | 41   |
| 4.3 การเปรียบเทียบกำลังทางกลของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศ F700 สถานีสุขุมวิท.....   | 45   |
| 4.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศ F700 สถานีสุขุมวิท.....  | 45   |
| 4.5 ข้อมูลที่ตรวจวัดและการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศ F701 สถานี<br>สุขุมวิท.....                                    | 47   |
| 4.6 ข้อมูลที่ตรวจวัดและการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศ F750 สถานี<br>สุขุมวิท .....                                   | 49   |
| 4.7 ข้อมูลที่ตรวจวัดและการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศ F751 สถานี<br>สุขุมวิท.....                                    | 51   |
| 4.8 ค่าที่วัดได้และการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศสถานีหัวลำโพง.....  | 54   |
| 4.9 ค่าที่วัดได้และการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศสถานีสามย่าน.....   | 55   |
| 4.10 ค่าที่วัดได้และการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศสถานีลุมพินี.....  | 56   |
| 4.11 ค่าที่วัดได้และการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศสถานีคลองเตย.....  | 57   |
| 4.12 ค่าที่วัดได้และการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศสถานีศูนย์สิริกิติ์ .....  | 58   |
| 4.13 ค่าที่วัดได้และการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศอาคารระบายอากาศ<br>ระหว่างสถานีศูนย์สิริกิติ์-สุขุมวิท (SV03)..... | 59   |
| 5.1 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศสถานีสุขุมวิทโดยวิธีการที่นำเสนอ .....  | 62   |
| 5.2 ค่าประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศสถานีต่าง ๆ ที่ประเมินโดยวิธีการที่นำเสนอ .....   | 63   |
| 5.2 (ต่อ) ค่าประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศสถานีต่าง ๆ ที่ประเมินโดยวิธีการที่นำเสนอ<br>.....                                  | 64   |

# สารบัญรูป

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 2.1 (ก) มอเตอร์ขนาดเล็กพันขดลวดสเตเตอร์แบบสลุ้ม (ข) มอเตอร์ขนาดใหญ่รูปแบบการพันขดลวดสเตเตอร์แบบแน่นอน                                   | 5    |
| 2.2 โรเตอร์แบบกรงกระรอก   | 6    |
| 2.3 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่โอนย้ายค่าต่างๆมาทางสเตเตอร์   | 7    |
| 2.4 วงจรสมมูลต่อเฟสที่แสดงการเปลี่ยนแปลงทางกำลังไฟฟ้ากล   | 8    |
| 2.5 แผนผังการไหลของกำลังในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส  | 8    |
| 2.6 แผนผังส่วนควบคุมของอินเวอร์เตอร์แบบควบคุมแรงบิดโดยตรง   | 9    |
| 2.7 แผนผังขั้นตอนการออกแบบทางวิศวกรรม   | 11   |
| 2.8 แผนผังขั้นตอนการออกแบบที่เหมาะสม  | 12   |
| 2.9 ค่าตอบของค่าต่ำสุดของฟังก์ชัน $f(x)$ เป็นจุดเดียวกันกับค่าสูงสุดของฟังก์ชัน $-f(x)$   | 13   |
| 2.10 แผนผังของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบดิทอมินิสติก   | 16   |
| 2.11 Train Piston Effect  | 17   |
| 2.12 พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์   | 17   |
| 2.13 วิวัฒนาการของระบบการบำรุงรักษา   | 18   |
| 2.14 แผนภูมิของทฤษฎีการบำรุงรักษาแผนใหม่  | 20   |
| 2.15 การหาประสิทธิภาพด้วยวิธี shaft torque method   | 23   |
| 3.1 วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำที่นำเสนอ  | 25   |
| 3.2 ขั้นตอนการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยจินตคติอัลกอริธึม  | 27   |
| 3.3 การทดสอบหาประสิทธิภาพมอเตอร์ไฟฟ้าขนาดเล็ก   | 30   |
| 3.4 แรงบิดและประสิทธิภาพที่ได้จากวิธีทดสอบและที่ได้จากการประเมินประสิทธิภาพด้วยวิธีที่นำเสนอที่ภาระทางกลต่าง ๆ กันของมอเตอร์ขนาด 2.2 kW | 36   |
| 3.5 แรงบิดและประสิทธิภาพที่ได้จากวิธีทดสอบและที่ได้จากการประเมินประสิทธิภาพด้วยวิธีที่นำเสนอที่ภาระทางกลต่าง ๆ กันของมอเตอร์ขนาด 5.5 kW | 37   |
| 4.1 แผนที่เส้นทางสถานีรถไฟใต้ดินที่ทำการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์   | 38   |
| 4.2 (ก) เครื่องมือวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้า (ข) เครื่องวัดที่อุปกรณ์ขับเคลื่อน   | 40   |
| 4.3 การวัดข้อมูลของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์  | 40   |
| 4.4 ค่ากำลังไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าประสิทธิภาพของมอเตอร์พัดลม F700S  | 42   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 4.5 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์พัดลม F700S.....   | 42   |
| 4.6 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้ามอเตอร์พัดลม F700S .....  | 43   |
| 4.7 กราฟแท่งของฮาร์โมนิกของกระแสไฟฟ้ามอเตอร์พัดลม F700S .....   | 43   |
| 4.8 ตารางค่าฮาร์โมนิกของกระแสไฟฟ้ามอเตอร์พัดลม F700S .....  | 43   |
| 4.9 การเปรียบเทียบการประเมินประสิทธิภาพขณะใช้งานจริงของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศ<br>F700 สถานีสุขุมวิท.....                                  | 46   |
| 4.10 การเปรียบเทียบการประเมินประสิทธิภาพขณะใช้งานจริงของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศ<br>F701 สถานีสุขุมวิท.....                                 | 48   |
| 4.11 การเปรียบเทียบการประเมินประสิทธิภาพขณะใช้งานจริงของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศ<br>F750 สถานีสุขุมวิท .....                                | 50   |
| 4.12 การเปรียบเทียบการประเมินประสิทธิภาพขณะใช้งานจริงของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศ<br>F751 สถานีสุขุมวิท.....                                 | 52   |
| 4.13 การเปรียบเทียบการประเมินประสิทธิภาพขณะใช้งานจริงของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศ<br>สถานีหัวลำโพง.....                                      | 54   |
| 4.14 การเปรียบเทียบการประเมินประสิทธิภาพขณะใช้งานจริงของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศ<br>สถานีสามย่าน .....                                      | 55   |
| 4.15 การเปรียบเทียบการประเมินประสิทธิภาพขณะใช้งานจริงของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศ<br>สถานีลุมพินี .....                                      | 56   |
| 4.16 การเปรียบเทียบการประเมินประสิทธิภาพขณะใช้งานจริงของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศ<br>สถานีคลองเตย .....                                      | 57   |
| 4.17 การเปรียบเทียบการประเมินประสิทธิภาพขณะใช้งานจริงของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศ<br>สถานีศูนย์สิริกิติ์.....                                | 58   |
| 4.18 การเปรียบเทียบการประเมินประสิทธิภาพขณะใช้งานจริงของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศ<br>อาคารระบายอากาศระหว่างสถานีศูนย์สิริกิติ์-สุขุมวิท..... | 59   |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การประเมินประสิทธิภาพที่มีความแม่นยำของมอเตอร์ขณะใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ นั้นกระทำได้ยาก เนื่องจากอาจต้องถอดมอเตอร์ออกจากการใช้งานไปทดสอบในห้องปฏิบัติการ หากการถอดถอน ติดตั้งมีค่าใช้จ่ายสูงและใช้เวลานาน จะทำให้เกิดความยากลำบากต่อการประเมินประสิทธิภาพที่แม่นยำของมอเตอร์นั้น วิธีการประเมินประสิทธิภาพแบบทั่วไป เช่น การวัดค่ากำลังไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า หรือ ความเร็วของมอเตอร์นั้นมีความคลาดเคลื่อนสูง ไม่เหมาะกับการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ขนาดใหญ่ที่ต้องการข้อมูลที่แม่นยำต่อการตัดสินใจดำเนินการอย่างใดอย่างหนึ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากมอเตอร์นั้นถูกขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์วิธีการประเมินประสิทธิภาพแบบทั่วไปจะให้ข้อมูลที่คลาดเคลื่อนสูงมาก

ในระบบรถไฟฟ้าได้คินมีมอเตอร์ใช้งานอยู่เป็นจำนวนมากตั้งแต่ขนาดไม่กี่กิโลวัตต์ จนถึงถึงร้อยกิโลวัตต์ ทั้งขับเคลื่อนด้วยแหล่งจ่ายปกติและใช้อินเวอร์เตอร์ขับเคลื่อน มอเตอร์ส่วนมากต้องพร้อมใช้งานอยู่เสมอ การบำรุงรักษามอเตอร์ใช้การซ่อมบำรุงแบบต่าง ๆ เช่น การซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน การซ่อมบำรุงเชิงแก้ไขเมื่อมอเตอร์เกิดความเสียหาย เป็นต้น การซ่อมบำรุงตามสภาพซึ่งเป็นการซ่อมบำรุงสมัยใหม่แบบหนึ่งที่ทำให้ทราบสภาวะการทำงานของมอเตอร์อาจจำเป็นสำหรับมอเตอร์ที่มีความสำคัญต่อระบบรถไฟฟ้า เช่น มอเตอร์เครื่องสูบน้ำดับเพลิง มอเตอร์พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์ เป็นต้น แต่มอเตอร์เหล่านี้มีขนาดใหญ่ไม่สะดวกในการถอดออกจากการใช้งานเพื่อนำมาประเมินประสิทธิภาพในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากมีขนาดใหญ่ ต้องพร้อมใช้งานตลอดเวลา และมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการทดสอบ และถอดถอนติดตั้งสูง

ดังนั้นจึงต้องหาวิธีการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ที่มีความถูกต้องแม่นยำ สะดวก และประหยัด เพื่อใช้งานกับมอเตอร์ที่สำคัญเพื่อประโยชน์ในการซ่อมบำรุงและประโยชน์ในด้านอื่น ๆ ในที่นี้จึงได้นำเสนอวิธีประเมินประสิทธิภาพโดยใช้วิธีการเชิงเลขในการหาค่าที่เหมาะสม (numerical optimization method) ของพารามิเตอร์ของมอเตอร์ เพื่อนำไปสู่การประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ โดยการใช้ข้อมูลที่สามารตรวจวัดได้ทางด้านไฟฟ้า และด้านทางกลของมอเตอร์

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

จุดมุ่งหมายของวิทยานิพนธ์นี้คือการนำเสนอวิธีการประเมินประสิทธิภาพขณะใช้งานจริง (on-site audit) ของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์รดไฟฟ้าใต้ดินที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ในแนวทางใหม่ที่มีความแม่นยำสูง โดยการใช้เพียงข้อมูลทางไฟฟ้าที่ได้จากการวัดจริง ซึ่งประกอบด้วย แรงดันไฟฟ้าประสิทธิภาพ กระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพ กำลังไฟฟ้า ความถี่ และข้อมูลทางกลคือความเร็วรอบมอเตอร์ขณะใช้งาน ซึ่งจะเห็นได้ว่าวิธีการนี้มีความสะดวก และประหยัด

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ขณะใช้งานจริงโดยวิธีทั่ว ๆ ไปจะใช้วิธีการที่สามารถนำข้อมูลที่ตรวจวัดได้มาประเมินประสิทธิภาพเช่น ค่ากำลังไฟฟ้า (nameplate method) ค่ากระแสไฟฟ้า (current method) หรือค่าความเร็ว (slip method) วิธีการต่าง ๆ ดังกล่าวมีความคลาดเคลื่อนสูงเนื่องจากเป็นค่าโดยประมาณจากผู้ผลิต และโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมอเตอร์นั้นถูกขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์เพื่อปรับความเร็วของมอเตอร์ จะทำให้ข้อมูลที่ป้ายพิกัดจะไม่สามารถใช้อ้างอิงในการคำนวณโดยวิธีทั่วไปได้ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดค่าคลาดเคลื่อนอย่างมาก อย่างไรก็ตามในการหาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์อาจจะใช้วิธีการนำมอเตอร์เข้าทดสอบในห้องปฏิบัติการ เช่น การทดสอบแบบมีภาระ (shaft torque method) หรือการทดสอบแบบไม่มีภาระ (no-load test) และแบบยึดโรเตอร์ (blocked-rotor) ในการดำเนินการในลักษณะนี้อาจจะพบกับปัญหามากมายเช่น มอเตอร์นั้นจำเป็นจะต้องใช้งานอยู่ตลอดเวลา มอเตอร์มีขนาดใหญ่ทำให้ลำบากต่อการถอดหรือติดตั้ง เป็นต้น ดังนั้นในการพิจารณาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ข้อมูลที่ได้มาจะต้องมีความแม่นยำสูงเพื่อใช้ในการตัดสินใจดำเนินการกับมอเตอร์ตัวนั้น ๆ จึงทำให้ต้องหาวิธีการที่สามารถประเมินประสิทธิภาพได้อย่างแม่นยำมากยิ่งขึ้น สะดวก และประหยัดเพื่อใช้ในการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ขณะใช้งานจริง

## 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ขณะใช้งานจริง โดยอาศัยทฤษฎีการหาค่าที่เหมาะสมแบบสโตกาสติก (stochastic) ซึ่งเป็นการหาค่าที่เหมาะสมโดยพื้นฐานของความน่าจะเป็น ค่าที่เหมาะสมที่ดำเนินการหาคือค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรสมมูลของมอเตอร์ขณะใช้งาน โดยการใช้ข้อมูลของค่าที่วัดได้จริงคือแรงดันไฟฟ้าประสิทธิภาพ กระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพ กำลังไฟฟ้า ความถี่ และความเร็วรอบของมอเตอร์นำไปประมวลผลร่วมกับวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบจินตคณิตอัลกอริทึม (genetic algorithms) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของมอเตอร์ ซึ่งจะนำไปสู่การหาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ได้ต่อไป

## 1.5 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตในการวิจัยของวิทยานิพนธ์นี้คือการเสนอแนวทางการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ด้วยวิธีการที่นำเสนอกับมอเตอร์ขนาด 2.2 kW และ 5.5 kW ในห้องปฏิบัติการทดสอบโดยทำการทดสอบเปรียบเทียบกับวิธีการทดสอบแบบมีภาระ (มีความแม่นยำมากที่สุด) ที่ความเร็ว และภาระทางกลต่าง ๆ เพื่อดูความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นของวิธีการที่นำเสนอ จากนั้นจะนำวิธีการนี้ไปประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์รถไฟใต้ดินขนาด 108 kW ที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์เช่นกัน มอเตอร์พัดลมระบายอากาศแต่ละตัวมีการใช้งานใน 2 ทิศทางการหมุนที่ภาระทางกลต่างกันขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของลม (flow rate) ที่ออกแบบไว้ซึ่งมีผลมาจากรูปแบบโครงสร้างของสถานี มอเตอร์ที่จะทำการประเมินประกอบไปด้วยมอเตอร์ในสถานีต่าง ๆ ดังนี้ สถานีสุขุมวิทจำนวน 4 ตัว สถานีหัวลำโพงจำนวน 4 ตัว สถานีสามย่านจำนวน 3 ตัว สถานีลุมพินีจำนวน 4 ตัว สถานีคลองเตยจำนวน 2 ตัว สถานีศูนย์สิริกิติ์จำนวน 3 ตัว และอาคารระบายอากาศระหว่างสถานีศูนย์สิริกิติ์-สุขุมวิทจำนวน 2 ตัว รวมทั้งหมด 22 ตัว โดยดำเนินการเก็บข้อมูลทางไฟฟ้าและทางกลและนำไปประมวลผลภายใต้เงื่อนไขและข้อจำกัดเดียวกันทั้งหมดเพื่อดูผลการประเมินประสิทธิภาพขณะใช้งานจริงในเชิงสถิติ ผลลัพธ์ของกำลังทางกลที่ได้จะนำเสนอเปรียบเทียบกำลังทางกลที่ได้จากอุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์ (variable speed drive; VSD) และที่ได้จากวิธีการใช้ค่ากระแสไฟฟ้า ในตอนสุดท้ายจะทำการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพที่ได้จากวิธีที่นำเสนอกับวิธีการใช้ค่ากระแสไฟฟ้าเพื่อให้เห็นถึงความแม่นยำถูกต้องในการนำไปใช้งาน

## 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ ส่วนแรกทำการศึกษาค้นคว้าพื้นฐานเกี่ยวกับการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ซึ่งจำเป็นต้องรู้ระบบการทำงานของระบบและอุปกรณ์ต่าง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ การขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์ การหาค่าที่เหมาะสม การระบายอากาศในอุโมงค์ ความรู้พื้นฐานงานซ่อมบำรุง และวิธีการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์แบบทั่วไป

ในส่วนที่สองทำการศึกษาวิธีการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์โดยใช้จันเนตริกอัลกอริทึม โดยดำเนินการทดสอบกับมอเตอร์ขนาด 2.2 kW และ 5.5 kW ในห้องปฏิบัติการเทียบกับวิธีการทดสอบแบบมีภาระเพื่อดูความคลาดเคลื่อนของวิธีการที่นำเสนอ จากนั้นนำไปประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์ขนาด 108 kW ในสถานีต่าง ๆ ของรถไฟใต้ดิน

ขั้นตอนของการศึกษาในงานวิจัยที่ได้กล่าวมาข้างต้นสามารถนำเสนอได้ดังนี้

บทที่ 2 เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องได้แก่ มอเตอร์เหนี่ยวนำ ความรู้เบื้องต้นของการขับเคลื่อนมอเตอร์โดยอินเวอร์เตอร์ที่มีเทคนิคการควบคุมแบบควบคุมแรงบิดโดยตรง ความรู้เบื้องต้นของวิธีการหาค่าที่เหมาะสม การระบายอากาศในอุโมงค์ ความรู้พื้นฐานการซ่อมบำรุง และการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบทั่วไป

บทที่ 3 เป็นการกล่าวถึงการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์โดยใช้จิ้นติกอัลกอริธึม โดยกล่าวถึงวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่นำเสนอ การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ด้วยวิธีที่นำเสนอ การทดสอบการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ขนาดเล็กด้วยวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการทดสอบแบบมีภาระและสรุปผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบ

บทที่ 4 กล่าวถึงการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัฒนาการระบายอากาศในอุโมงค์ในสถานีต่าง ๆ ทั้งหมดจำนวน 22 ตัว สำหรับในบทนี้ได้อธิบายขั้นตอนและวิธีการตรวจวัดพร้อมทั้งวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ จากนั้นเปรียบเทียบกำลังทางกลของมอเตอร์ทุกตัวที่ได้จากวิธีที่นำเสนอกับค่าที่อ่านได้จากอุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์และค่าที่คำนวณได้โดยวิธีการใช้ค่ากระแสไฟฟ้า และทำการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัฒนาการระบายอากาศเปรียบเทียบกันระหว่างวิธีที่นำเสนอกับวิธีการใช้ค่ากระแสไฟฟ้า

บทที่ 5 เป็นการสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ โดยสรุปผลลัพธ์ที่ได้จากมอเตอร์ทุกตัวที่ทำการประเมินประสิทธิภาพโดยวิธีการที่นำเสนอ ซึ่งมอเตอร์ทั้งหมดเป็นมอเตอร์ที่ถูกขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ ทำให้เห็นได้ถึงความต้องการแม่นยำในการนำไปใช้งานจริงกับมอเตอร์ประเภทนี้ ซึ่งพบปัญหาความคลาดเคลื่อนในการประเมินประสิทธิภาพด้วยวิธีทั่วไป และยังไม่สะดวกต่อการถอดถอนออกไปประเมินประสิทธิภาพในห้องปฏิบัติการ และได้ให้ข้อเสนอแนะในการตรวจวัดและการนำไปใช้งานกับมอเตอร์ในระบบอื่น ๆ ต่อไป

## บทที่ 2

# ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

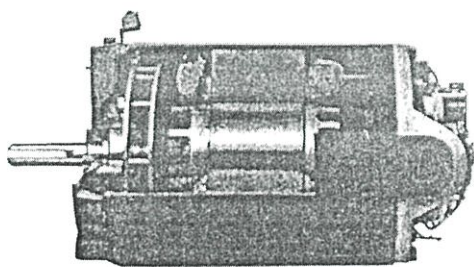
### 2.1 บทนำ

ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีและความรู้ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์ขณะใช้งานที่ถูกขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ตามวิธีการที่นำเสนอซึ่งประกอบไปด้วยเนื้อหาต่าง ๆ คือ โครงสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำ การไหลของกำลังในมอเตอร์เหนี่ยวนำ ความรู้เบื้องต้นของการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบควบคุมแรงบิดโดยตรง หลักการออกแบบที่เหมาะสม หลักการเบื้องต้นของการหาค่าที่เหมาะสม จีเนติกอัลกอริทึม (genetic algorithms) การระบายอากาศในอุโมงค์ ความรู้พื้นฐานการซ่อมบำรุง และการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบทั่วไป

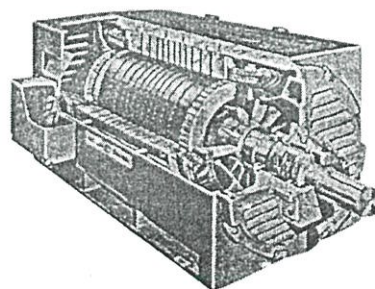
### 2.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำ

#### 2.2.1 โครงสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นมีส่วนประกอบหลักๆคือ ส่วนที่อยู่กับที่หรือสเตเตอร์หรือค้ำานปฐมภูมิซึ่งเป็นโครงทรงกระบอกที่ทำมาจากวัสดุที่เป็นสารแม่เหล็กแผ่นบางๆซ้อนกันเป็นชั้นๆ และมีขดลวดพันอยู่ภายในร่องของมัน ขดลวดแต่ละขดนั้นจะพันแตกต่างกัน หากเป็นมอเตอร์ตัวเล็กก็จะพันแบบสุ่ม (random-wound stator coils) ถ้าเป็นมอเตอร์ตัวใหญ่ก็จะมีรูปแบบการพันที่แน่นอน (form-wound stator coils) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 [1-4]



(ก)

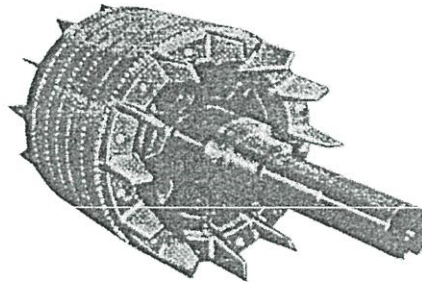


(ข)

รูปที่ 2.1 (ก) มอเตอร์ขนาดเล็กพันขดลวดสเตเตอร์แบบสุ่ม (ข) มอเตอร์ขนาดใหญ่รูปแบบการพันขดลวดสเตเตอร์แบบแน่นอน

ส่วนที่หมุนหรือโรเตอร์หรือด้านทุติยภูมินี้เป็นส่วนประกอบหลักอีกส่วนหนึ่ง ซึ่งทำมาจากวัสดุที่เป็นสารแม่เหล็กแผ่นบางซ้อนกันเป็นชั้นๆ รูปร่างทรงกระบอก ติดอยู่บนเพลลา ตามเส้นรอบวงด้านนอกทรงกระบอกของโรเตอร์จะมีการเจาะทะลุตามแนวยาวแกนเพลลาโดยรอบเพื่อรองรับการพันขดลวดโรเตอร์ ซึ่งมีการพันอยู่ 2 แบบคือแบบกรงกระรอก (squirrel cage) และแบบวาวด์โรเตอร์

การพันแบบกรงกระรอกสามารถขึ้นรูปโดยการหล่อโลหะหรือใช้เครื่องจักรพันขดลวดขดลวดที่อยู่ในสล๊อตของโรเตอร์และโลหะในส่วนปลายที่ใช้ลัดวงจรขดลวดที่อยู่ในโรเตอร์นี้อาจทำจากทองแดงหรืออลูมิเนียม ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โรเตอร์แบบกรงกระรอก

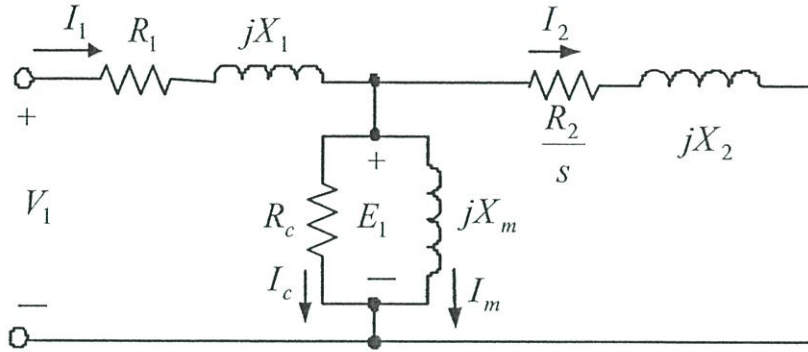
การพันขดลวดโรเตอร์แบบวาวด์สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นคล้ายกับการพันที่สเตเตอร์ โดยทั่วไปขดลวดจะต่อแบบวายเข้ากับสล๊อปริง และต่อออกไปยังความต้านทานปรับค่าได้แบบ 3 เฟส

### 2.2.2 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

วงจรสมมูลของมอเตอร์นั้นเสมือนกับหม้อแปลงไฟฟ้า แรงดันจากแหล่งจ่ายที่จ่ายให้กับขดลวดสเตเตอร์หรือขดลวดปฐมภูมิ นั้นจะสร้างฟลักซ์เชื่อมโยงไปยังขดลวดโรเตอร์หรือขดทุติยภูมิ ฟลักซ์ร่วม (mutual flux) ที่หมุนตัดขวางแกนเหล็กที่เป็นเฟโรโรแมกเนติกเหล่านี้ทำให้เกิดความสูญเสียจากกระแสไหลวนและฮิสเตอร์ซิส นอกจากนี้ยังมีฟลักซ์รั่วไหลเกิดขึ้นอีกด้วย กระแสที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ยังแสดงพฤติกรรมต่อต้านการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ที่สร้างจากขดลวดสเตเตอร์ซึ่งจะทำให้เกิดความสมดุลของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (mmf) จากผลลัพธ์นี้จึงเสมือนว่าสามารถนำวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้ามาเป็นโมเดลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ อย่างไรก็ตามมี 3 สิ่งที่ไม่เหมือนกับหม้อแปลงไฟฟ้าคือฟลักซ์ร่วมนั้นจะต้องข้ามช่องว่างอากาศที่มีค่าความต้านทานทางแม่เหล็กสูง (high reluctance) เสมือนกับการที่ค่าความต้านทานในแกนเหล็ก (magnetizing reactance;  $X_m$ ) ซึ่งจะส่งผลให้สนามแม่เหล็กรั่วไหล (leakage reactance;  $X_1, X_2$ ) มากขึ้นด้วย ข้อ

ที่สองคือขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิมีการเคลื่อนที่สัมพันธ์กัน สุดท้ายคือขดลวดทุติยภูมิมีการลัดวงจรที่ปลาย

จากแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อเปรียบเทียบกับหม้อแปลงสามารถนำมาเขียนวงจรสมมูลต่อเฟสทางด้านสเตเตอร์ได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่โอนย้ายค่าต่างๆมาทางสเตเตอร์

โดยกำหนดให้

- $R_1$  หมายถึงความต้านทานขดลวดที่สเตเตอร์
- $R_2$  หมายถึงความต้านทาน โรเตอร์ที่โอนย้ายไปยังสเตเตอร์
- $jX_1$  หมายถึงรีแอกแตนซ์รั่วไหลของสเตเตอร์
- $jX_2$  หมายถึงรีแอกแตนซ์รั่วไหลของโรเตอร์ที่โอนย้ายไปยังสเตเตอร์
- $R_c$  หมายถึงความต้านทานที่เป็นผลให้เกิดการสูญเสียในแกนเหล็ก
- $jX_m$  หมายถึงรีแอกแตนซ์ที่เกิดสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์
- $s$  หมายถึงค่าสลิป

### 2.2.3 การไหลของกำลังในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จากการที่โรเตอร์รับกำลังไฟฟ้าเข้ามาทางสเตเตอร์ข้ามผ่านช่องว่างอากาศในรูปสนามแม่เหล็กมาเปลี่ยนเป็นกำลังงานกลที่โรเตอร์ ( $P_g$ ) กำลังเฉลี่ยที่ข้ามผ่านช่องว่างอากาศนั้นต้องเท่ากับผลรวมการสูญเสียของความต้านทานขดลวด โรเตอร์ที่แปรเปลี่ยนไปในรูปความร้อนและกำลังทางกล กำลังที่ข้ามผ่านช่องว่างอากาศแต่ละเฟสนั้นสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.1

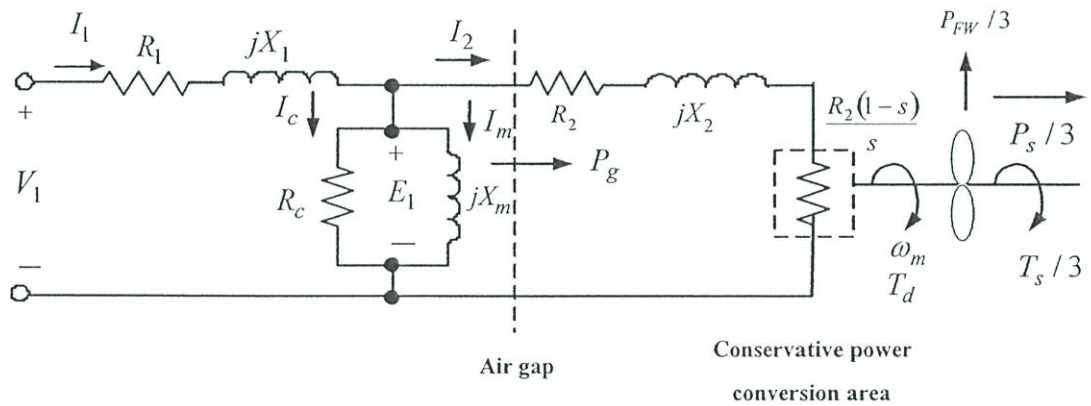
$$P_g = (I_2)^2 \frac{R_2}{s} = (I_2)^2 R_2 + (I_2)^2 \left( \frac{1-s}{s} \right) R_2 \quad (2.1)$$

ในเทอมแรกทางด้านขวามือแสดงถึงค่าความสูญเสียของความต้านทานขดลวดโรเตอร์ในเทอมต่อมาเป็นกำลังที่เปลี่ยนมาเป็นรูปทางกลหรือกำลังที่สร้างขึ้น (developed power;  $P_d$ ) จากสมการที่ 2.2 จะเห็นได้ถึงความสูญเสียของความต้านทานขดลวดต่อเฟส ( $P_{rcu}$ ) และกำลังที่สร้างขึ้น ( $P_d$ ) สามารถหาได้จากสมการที่ 2.3

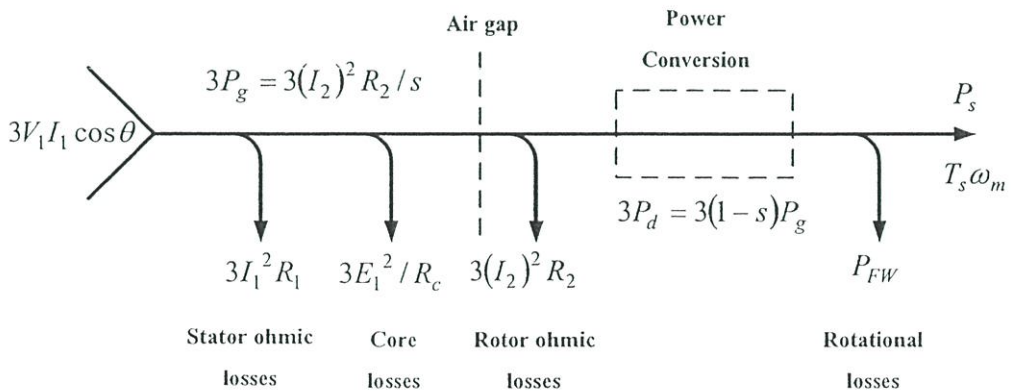
$$P_{rcu} = (I_2)^2 R_2 = sP_g \quad (2.2)$$

$$P_d = (I_2)^2 \frac{(1-s)}{s} R_2 = (1-s)P_g \quad (2.3)$$

ดังนั้นสามารถเขียนวงจรสมมูลแสดงการเปลี่ยนแปลงของกำลังแม่เหล็กได้ดังรูปที่ 2.4 แสดงความสูญเสียจากความเสียดทานและแรงลมต่อเฟส ( $P_{FW}/3$ ) ลำดับถัดไปคือกำลังทางกลที่เพลา ( $P_s/3$ ) และแรงบิดทางกลที่เพลา ( $T_s/3$ ) การแสดงค่าโดยหาร 3 เพื่อให้สอดคล้องกับวงจรสมมูลที่คำนวณต่อเฟส ในรูปที่ 2.5 แสดงแผนผังการไหลของกำลังมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสมมูล



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลต่อเฟสที่แสดงการเปลี่ยนแปลงทางกำลังไฟฟ้ากล



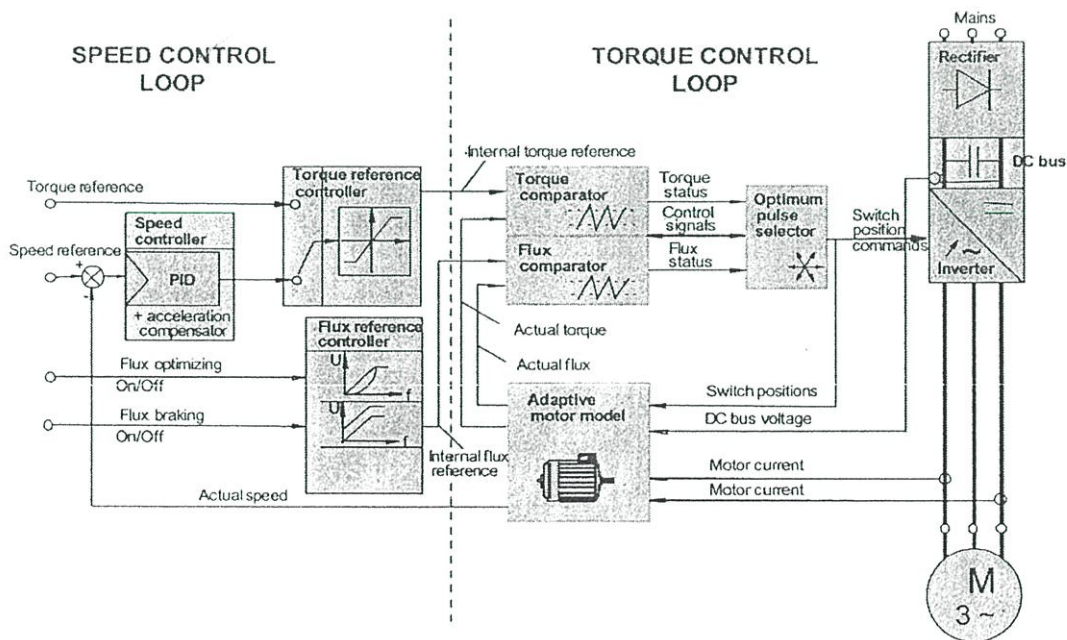
รูปที่ 2.5 แผนผังการไหลของกำลังในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

## 2.3 ความรู้เบื้องต้นของการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบควบคุมแรงบิดโดยตรง

### 2.3.1 ความเป็นมาของการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบควบคุมแรงบิดโดยตรง

การขับเคลื่อนมอเตอร์โดยควบคุมแรงบิดทางแม่เหล็ก (electromagnetic torque) ของมอเตอร์ทำให้เกิดการตอบสนองทางพลวัต (dynamic) ที่รวดเร็วนั้น มีการใช้งานมานานกว่า 20 ปี ตั้งแต่การขับเคลื่อน โดยการควบคุมแบบเวกเตอร์ที่นำเสนอโดย Siemens จนกระทั่งต่อมาเป็นการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบควบคุมแรงบิดโดยตรง (direct torque control; DTC) ที่นำเสนอโดย ABB [5-6] การควบคุมแรงบิดโดยตรงนี้เป็นแนวคิดในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำที่แตกต่างไปจากการควบคุมแบบเวกเตอร์ โดยการควบคุมแรงบิดโดยตรงจะทำการกำหนดรูปแบบการสวิทช์ของอินเวอร์เตอร์โดยตรงไม่ผ่านการทำพัลส์วิธซุ่มอดดูเลชั่น (PWM) เหมือนกับการควบคุมแบบอื่นๆ ในการควบคุมแบบนี้อินเวอร์เตอร์จะทำการคำนวณค่าฟลักซ์ทางด้านสเตเตอร์และค่าแรงบิดโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ จากนั้นก็จะนำค่าที่ได้เปรียบเทียบกับค่าที่ตั้งไว้ (setting) ของฟลักซ์และแรงบิดผ่านตัวเปรียบเทียบแบบฮิสเตอร์รีซิส สถานะของสัญญาณขาออกของตัวเปรียบเทียบแบบฮิสเตอร์รีซิสจะทำให้เราทราบว่าต้องเพิ่มหรือลดฟลักซ์และแรงบิด ซึ่งข้อมูลนี้ก็จะถูกนำไปใช้ในการเลือกรูปแบบการสวิทช์ของอินเวอร์เตอร์จากตาราง เพื่อให้ได้แรงดันสเตเตอร์ที่เหมาะสมที่ทำให้ฟลักซ์และแรงบิดเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่ต้องการได้

### 2.3.2 ทฤษฎีพื้นฐานของการควบคุม



รูปที่ 2.6 แผนผังส่วนควบคุมของอินเวอร์เตอร์แบบควบคุมแรงบิดโดยตรง

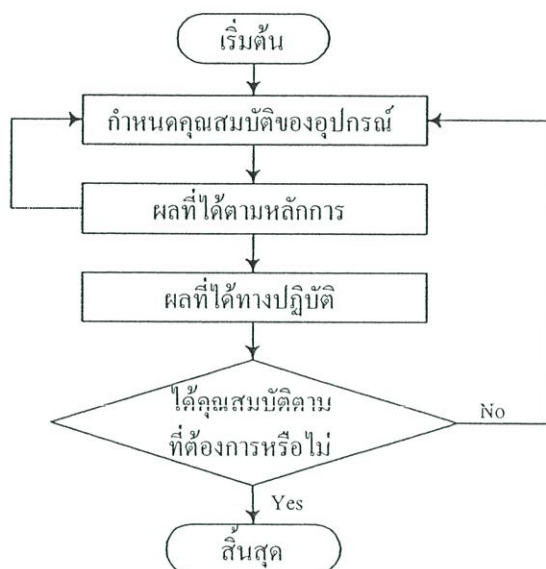
จากแผนผังในรูปที่ 2.6 แสดงถึงส่วนประกอบของอินเวอร์เตอร์แบบควบคุมแรงบิด โดยตรงซึ่งมี 2 ส่วนคือ ลูปควบคุมแรงบิด (torque control loop) และลูปควบคุมความเร็ว (speed control loop) เริ่มต้นอธิบายการใช้งานคือมีการตรวจวัดกระแสของมอเตอร์ 2 เฟสและแรงดันดีซีบัส พร้อมกับตำแหน่งของการสวิตช์ซึ่งส่งไปยังแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ (adaptive motor model) การหาแบบจำลองนี้ได้มาจากการรันมอเตอร์เพื่อหาคุณลักษณะ (identification run) ซึ่งเรียกว่าออโต้จูนนิ่ง (auto-tuning) ทำให้ได้ความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ อินดักแตนซ์ร่วม และสัมประสิทธิ์อิ่มตัวต่างๆ (saturation coefficients) จากแรงเหนี่ยวนำในการรันทดสอบของมอเตอร์ การรันเพื่อหาคุณลักษณะ ทำได้โดยไม่ต้องให้มอเตอร์หมุนซึ่งทำให้ง่ายต่อการนำอินเวอร์เตอร์แบบนี้ไปใช้งานกับมอเตอร์ที่มีการปรับเปลี่ยนส่วนประกอบใหม่ แต่การที่จะได้มอเตอร์โมเดลที่มีความแม่นยำมากที่สุดจะต้องทำการรันเพื่อหาคุณลักษณะ โดยการขับเคลื่อนมอเตอร์ร่วมด้วยอินเวอร์เตอร์ชนิดนี้มีความแม่นยำของความเร็วรอบสูงแต่หากต้องการความคลาดเคลื่อนของความเร็ว ณ จุดทำงานคงที่น้อยกว่า 0.5 % จะต้องใช้เอ็นโคเดอร์หรือทาโคมิเตอร์

สัญญาณเข้าพุทที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์คือ แรงบิด ฟลักซ์ของสเตเตอร์ และความเร็วรอบ ค่าแรงบิดและฟลักซ์ที่ได้มานี้จะถูกส่งไปยังตัวเปรียบเทียบแรงบิดและฟลักซ์ (torque and flux comparator) ที่มีการเปรียบเทียบค่าที่แท้จริงกับค่าที่ตั้งไว้ทุกๆ 25 ไมโครวินาที กำหนดโดยใช้วิธีเปรียบเทียบแบบฮิสเตอร์ซิส 2 ระดับ จากนั้นจะส่งค่าฟลักซ์และแรงบิดที่ได้จากการเปรียบเทียบนี้ต่อไปยัง optimum pulse selector ซึ่งมีการคำนวณรูปแบบการสวิตช์ทุก 25 ไมโครวินาทีเช่นเดียวกันส่งต่อไปยังอินเวอร์เตอร์ เพื่อทำการสวิตช์ที่ความถี่ 4 kHz ต่อไป จะเห็นได้ว่าการเปรียบเทียบและคำนวณค่า 40,000 ครั้งต่อวินาทีดังนั้นก็ทำให้ได้การตอบสนองทางแรงบิดและและความเร็วรอบที่แม่นยำสูง

ในลูปควบคุมความเร็วเริ่มต้นการทำงานตั้งแต่ตัวควบคุมแรงบิดอ้างอิง (torque reference controller) ที่ถูกกำหนดโดยค่าลิมิตของแรงบิดและแรงดันดีซีบัส ในส่วนของตัวควบคุมความเร็ว (speed controller) ประกอบด้วยตัวควบคุม PID และตัวชดเชยความเร่ง (acceleration compensator) สัญญาณความเร็วภายนอกอ้างอิงจะถูกเปรียบเทียบกับความเร็วแท้จริงที่ได้มาจากแบบจำลองของมอเตอร์ ผลต่างของทั้งสองสัญญาณนี้จะส่งไปยังตัวควบคุม PID และตัวชดเชยความเร่ง ผลลัพธ์ที่ออกมาจากตัวควบคุมความเร็วนี้คือผลรวมของทั้งสองส่วนนี้ ค่าสมบูรณของฟลักซ์ที่สเตเตอร์จะได้มาจากตัวควบคุมฟลักซ์อ้างอิง (flux reference controller) ส่งต่อไปยังตัวเปรียบเทียบฟลักซ์ต่อไป

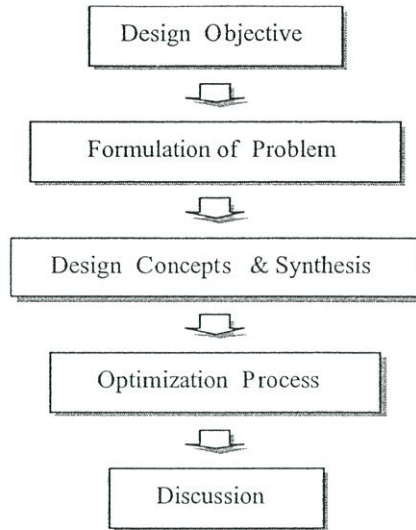
## 2.4 หลักการออกแบบที่เหมาะสม

การออกแบบโครงสร้างหรือระบบต่าง ๆ ในงานวิศวกรรมจะมีการกำหนดเป้าหมายและเงื่อนไขขึ้นเพื่อให้ตรงกับความต้องการใช้งาน ซึ่งการออกแบบโครงสร้างหรือระบบต่าง ๆ ที่มีความซับซ้อนซึ่งจะทำให้การออกแบบด้วยแผนผังดังรูปที่ 2.7 จะเป็นไปได้ด้วยความยุ่งยากและจำเป็นต้องใช้ความรู้และประสบการณ์ของผู้ออกแบบอย่างสูง



รูปที่ 2.7 แผนผังขั้นตอนการออกแบบทางวิศวกรรม

ผลลัพธ์อาจเกิดจากการลองผิดลองถูกจนกระทั่งได้ค่าที่มีความเหมาะสมตามเป้าหมายที่ต้องการซึ่งต้องเสียเวลาในการออกแบบอีกทั้งโอกาสที่จะได้ค่าที่เหมาะสมตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ก็มีความเป็นไปได้น้อยและเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงวัสดุหรือราคาของวัสดุก็จำเป็นต้องทำการลองผิดลองถูกใหม่ซึ่งทำให้เสียเวลาและต้นทุนในการสร้างต้นแบบเพื่อทดสอบ จากเหตุผลข้างต้นจึงทำให้มีการนำเสนอหลักการออกแบบที่เหมาะสม โดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมช่วยในการออกแบบ ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนต่างแสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แผนผังขั้นตอนการออกแบบที่เหมาะสม

จากแผนผังขั้นตอนการออกแบบที่เหมาะสมตามรูปที่ 2.8 รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนในการออกแบบเป็นดังนี้

#### 2.4.1 กำหนดเป้าหมายการออกแบบ

การกำหนดเป้าหมายการออกแบบ (design objective) คือการกำหนดความต้องการที่จะให้ผลของการออกแบบนั้นมีลักษณะเป็นอย่างไรตามเงื่อนไขที่กำหนด

#### 2.4.2 กำหนดรูปแบบของปัญหา

กำหนดรูปแบบของปัญหา (formulation of problem) เป็นการศึกษาวิธีและขั้นตอนต่าง ๆ ของสิ่งที่ต้องการออกแบบ รวบรวมสมการที่ใช้ในการออกแบบในส่วนที่เกี่ยวข้องกับเป้าหมายที่ต้องการให้ได้เพียงพอ ทั้งนี้เพราะจะช่วยนำไปสู่การกำหนดสมการเป้าหมายและเงื่อนไขที่ถูกต้อง

#### 2.4.3 หลักการออกแบบและการสังเคราะห์

หลักการและการสังเคราะห์การออกแบบ (design concept and synthesis) เป็นการพิจารณาความสัมพันธ์ต่าง ๆ ของสมการที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 จัดความสัมพันธ์ของสมการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกันเพื่อให้แสดงถึงสิ่งที่เป้าหมายต้องการ รวมทั้งการกำหนดเงื่อนไขต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและตัวแปรที่เลือกใช้

#### 2.4.4 การหาค่าที่เหมาะสม

การหาค่าที่เหมาะสม (optimization process) เป็นวิธีเชิงตัวเลขในการหาค่าที่เหมาะสม โดยทั่วไปวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบ่งได้ 2 ลักษณะคือ ดิเทอร์มินิสติก (deterministic) เป็นการหาค่าที่เหมาะสมโดยพื้นฐานของเกรเดียน และสโตคาสติก (stochastic) เป็นการหาค่าที่เหมาะสมโดยพื้นฐานของความน่าจะเป็น

### 2.4.5 อภิปรายผลการออกแบบ

อภิปรายผลการออกแบบ (discussion) เป็นการตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้หลังจากกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมว่ามีลักษณะเป็นตามเป้าหมายและเงื่อนไขที่กำหนดหรือไม่ ซึ่งการที่ผลลัพธ์ไม่เป็นไปตามเป้าหมายที่ต้องการนั้นอาจเกิดจากการพิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ที่ผิดพลาดหรือสาเหตุใดก็ตามที่อาจเกิดขึ้นได้ ดังนั้นหลังการออกแบบจะต้องมีการนำผลลัพธ์มาอภิปรายเสมอเพื่อตรวจสอบความถูกต้องเสมอ

## 2.5 หลักการเบื้องต้นของการหาค่าที่เหมาะสม

โดยทั่วไปการหาค่าที่เหมาะสมจะเป็นการหาค่าตัวแปรของฟังก์ชันเป้าหมาย (objective function) และเงื่อนไข (constraints function) ที่กำหนด [7-8] ซึ่งรูปแบบของฟังก์ชันเป้าหมายและเงื่อนไขจะแสดงดังสมการที่ 2.4 – 2.7 ดังนี้

$$\text{Minimize } F(x) \quad \text{Objective Function} \quad (2.4)$$

$$\text{Subject to} \quad \text{constraints Function}$$

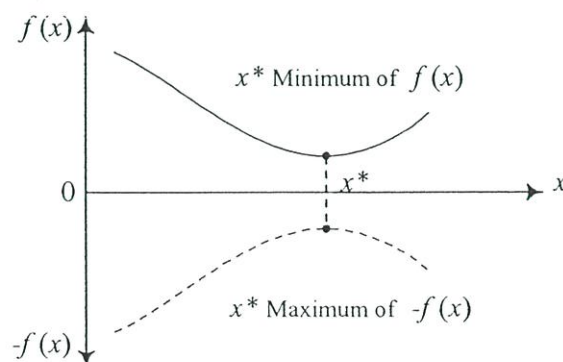
$$g_j(x) \leq 0 \quad j = 1, \dots, l \quad \text{Inequality Constraint} \quad (2.5)$$

$$h_k(x) = 0 \quad k = 1, \dots, m \quad \text{Equality Constraint} \quad (2.6)$$

$$x_i^l \leq x_i \leq x_i^u \quad i = 1, \dots, n \quad \text{Side Constraint} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$  เป็นเวกเตอร์ของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบฟังก์ชันเป้าหมายและฟังก์ชันเงื่อนไขในการหาค่าที่เหมาะสมซึ่งอาจจะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นหรือไม่เชิงเส้นก็ได้

สมการที่ 2.4 เป็นสมการที่แสดงถึงฟังก์ชันเป้าหมายที่ต้องการหาค่าที่เหมาะสมซึ่งอาจเป็นการหาค่าสูงสุดหรือต่ำสุดของฟังก์ชันก็ได้ จากรูปที่ 2.9 จะเห็นได้ว่า  $x^*$  เป็นจุดต่ำสุดของฟังก์ชัน  $f(x)$  และเป็นจุดสูงสุดของฟังก์ชัน  $-f(x)$  ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันจะมีความหมายเดียวกันกับการหาค่าสูงสุดของค่าลบของฟังก์ชันนั้น



รูปที่ 2.9 ค่าตอบของค่าต่ำสุดของฟังก์ชัน  $f(x)$  เป็นจุดเดียวกันกับค่าสูงสุดของฟังก์ชัน  $-f(x)$

สมการที่ 2.5 แสดงฟังก์ชันเงื่อนไขที่น้อยกว่าหรือเท่ากับศูนย์ (inequality constraint) ซึ่งในการออกแบบอาจจะมีเงื่อนไข กำหนดเป็นฟังก์ชันที่อยู่ในรูปของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบ เพื่อให้ฟังก์ชันนั้นมีค่าที่น้อยกว่าหรือเท่ากับค่าที่กำหนด

สมการที่ 2.6 เป็นสมการที่แสดงถึงฟังก์ชันของเงื่อนไขที่เท่ากับศูนย์ (equality constraint) ซึ่งในการออกแบบอาจจะมีเงื่อนไข กำหนดเป็นฟังก์ชันที่อยู่ในรูปของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบ เพื่อให้ฟังก์ชันนั้นมีค่าเท่ากับค่าที่กำหนด

สมการที่ 2.7 เป็นสมการที่ใช้กำหนดช่วงของค่าตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบเพื่อป้องกันการได้ค่าคำตอบที่เป็นไปไม่ได้ในทางปฏิบัติ

โดยทั่วไปวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบ่งได้ 2 ลักษณะคือ

1. ดิโอมินิสติก เป็นการหาค่าที่เหมาะสมโดยพื้นฐานของแกรเดียน
2. สโตชาสติก เป็นการหาค่าที่เหมาะสมโดยพื้นฐานของความน่าจะเป็น

## 2.6 จีเนติกอัลกอริทึม (genetic algorithms)

จีเนติกอัลกอริทึม [9-12] คือ อัลกอริทึมที่ใช้ในการค้นหาคำตอบให้ได้คำตอบที่ดีที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ (optimization) และปรับปรุงคำตอบโดยเลียนแบบพฤติกรรมของสิ่งมีชีวิตตามธรรมชาติ โดยมีวิธีการขยายพันธุ์ทางธรรมชาติ (reproduction) การคัดเลือก โดยธรรมชาติ (natural selection) ตัวจีเนติกอัลกอริทึมจะดำเนินการในลักษณะของพันธุศาสตร์

การทำงานของของจีเนติก อัลกอริทึม นั้นจะมีตัวดำเนินการของจีเนติกอัลกอริทึม (operators of genetic algorithms) ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการที่ลอกเลียนมาจากธรรมชาติดังนี้

1. การคัดเลือก (reproduction)
2. การสร้างโครโมโซม (crossover)
3. การกลายพันธุ์ (mutation)

จีเนติกอัลกอริทึมเหมาะสำหรับการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ แต่บางครั้งอาจไม่สามารถหาค่าที่ถูกต้องแม่นยำ (exact optimum) แต่มีนักวิจัยหลายคนได้ใช้จีเนติกอัลกอริทึมช่วยในการหาค่าให้ได้ค่าใกล้เคียงที่สุดแล้วจึงใช้วิธีการอื่นเพื่อเอาคำตอบที่ถูกต้องแม่นยำ

จีเนติกอัลกอริทึมแตกต่างจากวิธีการหาค่าที่เหมาะสม (optimization) อื่นๆ ดังนี้

1. เป็นกระบวนการที่อาศัยข้อมูลทางสถิติ
2. เป็นการค้นหาคำตอบที่หลายๆจุดพร้อมกัน ไม่ใช่เพียงจุดเดียว
3. เป็นการหาคำตอบจากการแทนค่าลงไปในสมการเพื่อหาคำตอบไม่ใช่การแก้สมการเพื่อหาคำตอบ

4. ไม่ต้องการเทคนิคทางคณิตศาสตร์อื่นๆเข้ามาช่วย ต้องการเพียงฟังก์ชันเป้าหมายและฟังก์ชันความเหมาะสมในการหาคำตอบ

จีเนติกอัลกอริทึมมีการทำงานแบบเอากลุ่มตัวแปรมาทำเป็นรหัส โดยจะไม่รับทวนรูปแบบสมการฟังก์ชันและตัวแปรโดยตรง และยังมีการค้นหาคำตอบจากจำนวนโครโมโซมทั้งหมด โครโมโซมที่ผ่านการคัดเลือกแล้วเท่านั้นที่สามารถให้กำเนิดรุ่นต่อไปได้ โอกาสของการค้นหาคำตอบได้จะมีมากขึ้น เทคนิคการค้นหาคำตอบอื่นเช่น gradient techniques ต้องใช้ผลการคำนวณหรือผลจากการวิเคราะห์ที่ตัดแปลงแล้วเพื่อหาจุดอ้างอิงให้ช่วยค้นหาคำตอบต่อไปได้แค่จีเนติกอัลกอริทึมค้นหาคำตอบโดยการสุ่มตัวอย่างจากข้อมูลหรือค่าผลลัพธ์ที่ได้มาโดยไม่มีการตัดแปลงซึ่งเป็นแนวทางในการค้นหาคำตอบต่อไป และนอกจากนี้จีเนติกอัลกอริทึมยังใช้กระบวนการเพิ่มสุ่มทางสถิติใช้เป็นแนวทางในการค้นหาคำตอบด้วยเช่นกัน

### 2.6.1 ฟังก์ชันเป้าหมายและฟังก์ชันค่าความเหมาะสม (objective function & fitness function)

การหาคำตอบที่ดีที่สุดของจีเนติกอัลกอริทึมนี้มีพื้นฐานอยู่บนผลลัพธ์จากการหาคำตอบที่ผ่านมา วิธีการของจีเนติกอัลกอริทึมจะไม่พิจารณาจากขั้นตอนของการแก้สมการ แต่จะพิจารณาโดยตัดสินว่าคำตอบที่ได้รับนั้นดีพอหรือไม่ ดีขึ้นหรือแย่ลง หรือเป็นคำตอบที่ใกล้เคียงกับที่ต้องการหรือไม่ โดยจะพิจารณาจากฟังก์ชันเป้าหมาย (objective function :  $F$ ) เนื่องจากแต่ละปัญหาสามารถกำหนดฟังก์ชันเป้าหมายซึ่งมีความสัมพันธ์ของตัวแปรแต่ละตัว เงื่อนไข หรือข้อกำหนดต่างๆของปัญหานั้นๆได้ โดยสมการที่มีเงื่อนไขของตัวแปรหรือข้อกำหนดที่กล่าวมานั้นเรียกว่า ฟังก์ชันความเหมาะสม (fitness function :  $f$ ) ซึ่งค่าความเหมาะสมนี้เปรียบเสมือนค่าความสามารถในการอยู่รอดของแต่ละโครโมโซม กล่าวอีกนัยหนึ่ง ฟังก์ชันความเหมาะสมคือฟังก์ชันที่แสดงถึงความใกล้เคียงของผลลัพธ์ที่ต้องการของแต่ละโครโมโซม เป็นตัวบ่งบอกว่าค่าชุดตัวแปรที่อยู่ในโครโมโซมนั้นๆส่งผลให้ได้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการได้ขนาดไหน โดยทั่วไปแล้วเรามักใช้ฟังก์ชันเป้าหมายที่ถูกปรับให้เหมาะสมกับการหาคำตอบของจีเนติก อัลกอริทึม เป็นฟังก์ชันความเหมาะสม

ในปัญหาต่างๆทั่วไป ฟังก์ชันเป้าหมายอาจเป็นการหาค่าสูงสุด-ต่ำสุดหรือไม่ก็ได้ ซึ่งฟังก์ชันเป้าหมายนี้อาจมีค่าเป็นลบได้ในบางกรณี แต่ในแนวคิดของจีเนติก อัลกอริทึม ฟังก์ชันความเหมาะสมซึ่งเป็นตัววัดสถานะของโครโมโซม จะต้องที่ค่าเป็นบวกเสมอ ดังนั้นจึงต้องมีการแปลงฟังก์ชันเป้าหมายให้เป็นฟังก์ชันความเหมาะสม

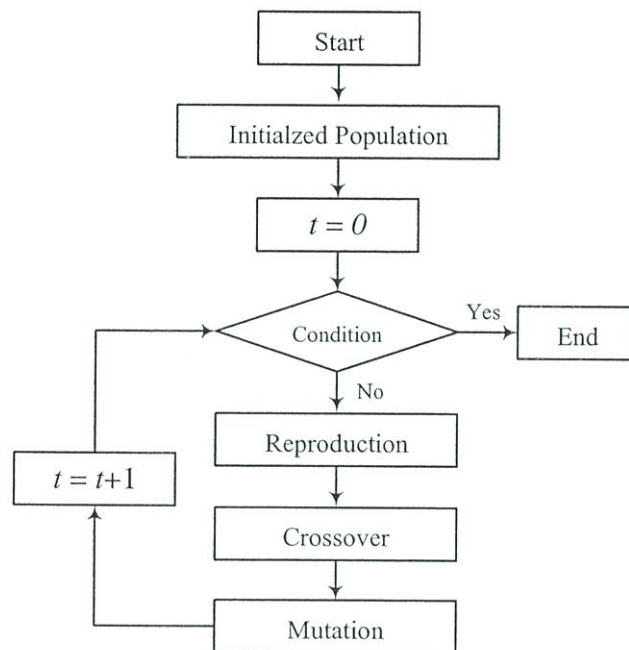
### 2.6.2 การทำงานของจีเนติกอัลกอริทึม

ขั้นตอนการทำงานของจีเนติกอัลกอริทึมมีดังนี้คือ

1. การสร้างจำนวนโครโมโซมและจำนวนบิต (initialization)
2. การหาค่าฟังก์ชัน (cost function)
3. การคัดเลือก (reproduction or selection)

4.การสร้างโครโมโซมลูก (crossover)

5.การกลายพันธุ์ (mutation)



รูปที่ 2.10 แผนผังของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบจีนติก

การทำงานของจีนติกอัลกอริทึมเริ่มต้นจากโครโมโซมจำนวน  $k$  โครโมโซมซึ่งในแต่ละโครโมโซมประกอบด้วยจำนวน  $n$  บิต โครโมโซมดังกล่าวเขียนเป็นสัญลักษณ์ได้ดังสมการที่ (2.8)

$$\text{โครโมโซม } (k) = \{ \text{บิต1, บิต2, ..., บิต } n \} \quad (2.8)$$

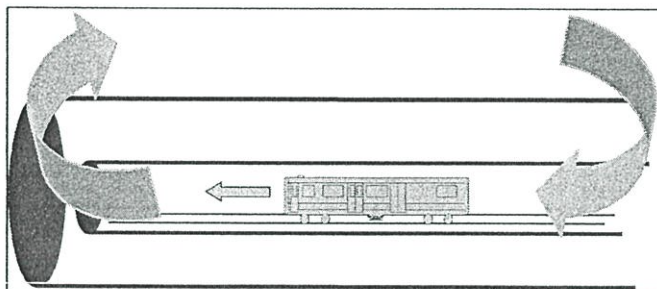
โดยที่ค่า  $k$  มีค่าตั้งแต่ 1 ถึงจำนวนโครโมโซมที่ต้องการ

คำนวณค่าของแต่ละฟังก์ชันของแต่ละโครโมโซม ซึ่งค่าฟังก์ชันที่ได้แต่ละโครโมโซมจะมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากค่าของบิตในแต่ละโครโมโซมมีค่าแบบสุ่ม (randomly) จากนั้นทำการคัดเลือกโครโมโซมเพื่อเรียงลำดับโครโมโซมใหม่โดยการคัดเลือกโครโมโซมจะคัดเลือกค่าฟังก์ชันแต่ละโครโมโซม โดยเรียงลำดับจากโครโมโซมที่มีค่าฟังก์ชันใกล้เคียงกับที่ต้องการมากที่สุดไปยังค่าที่น้อยที่สุด แล้วทำการคัดเลือกโครโมโซมที่ดีที่สุด ณ รุ่น (generation) นั้นซึ่งเรียกโครโมโซมเหล่านี้ว่าโครโมโซมพ่อ-แม่ (parent) จากโครโมโซมพ่อ-แม่ที่ได้สามารถสร้างโครโมโซมลูก (offspring) ได้โดยการ crossover การสร้างโครโมโซมลูกกระทำด้วยวิธีใดก็ได้ขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบ หลังจากได้โครโมโซมลูกแล้ว ทำการกลายพันธุ์ หรือ mutation กับโครโมโซมลูกดังกล่าวแล้วหาฟังก์ชันใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการมากที่สุดไปยังค่าที่การน้อยสุดทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2, 3, 4 และ 5 จนกระทั่งได้คำตอบที่ต้องการ (ภาคผนวก ก)

## 2.7 การระบายอากาศในอุโมงค์

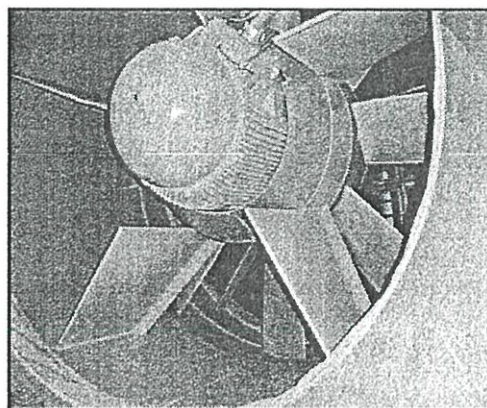
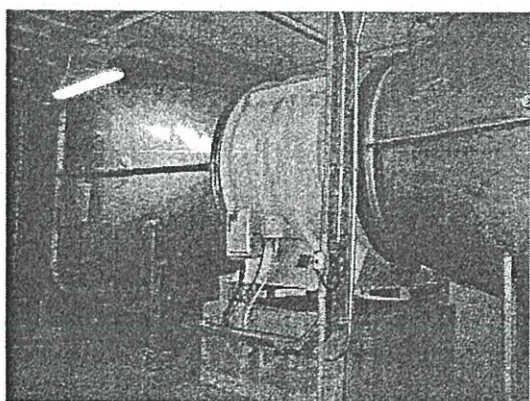
การระบายอากาศในอุโมงค์ [13] มีการทำงานที่สัมพันธ์กันอยู่ 3 ส่วนคือ ระบบระบายอากาศในอุโมงค์ (tunnel ventilation system: TVS), ระบบดูดอากาศใต้ชานชาลา (under platform exhaust system: UPE) และ ระบบสายตรวจจับความร้อน (linear heat detection system: LHD)

ระบบระบายอากาศในอุโมงค์มีไว้เพื่อ ระบายอากาศร้อนภายในอุโมงค์ ในสภาวะปกติ สภาวะคับคั่งและสภาวะฉุกเฉิน, โดยปกติจะช่วยลดแรงดันที่มาจาก การอัดอากาศจากการวิ่งของรถไฟไฟฟ้า (train piston effect) ออกสู่ปล่องระบายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 Train Piston Effect

ระบบระบายอากาศในอุโมงค์ประกอบด้วยอาคารระบายอากาศ(ventilation building) ทั้งสองฝั่งของสถานีรถไฟไฟฟ้าใต้ดิน หากสถานีมีระยะห่างกันมากกว่า 1 กิโลเมตรจะมีการก่อสร้างอาคารระบายอากาศระหว่างสถานี (intervention shaft: IVS) เพื่อใช้ระบายอากาศในอุโมงค์เพิ่มเติม ในระบบนี้มีพัดลมระบายอากาศในอุโมงค์ดังรูปที่ 2.12 ติดตั้งอยู่ 4 ตัวที่สถานีและ 2 ตัวสำหรับอาคารระบายอากาศระหว่างสถานี



รูปที่ 2.12 พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์

มอเตอร์พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์นี้มีพิกัดดังนี้

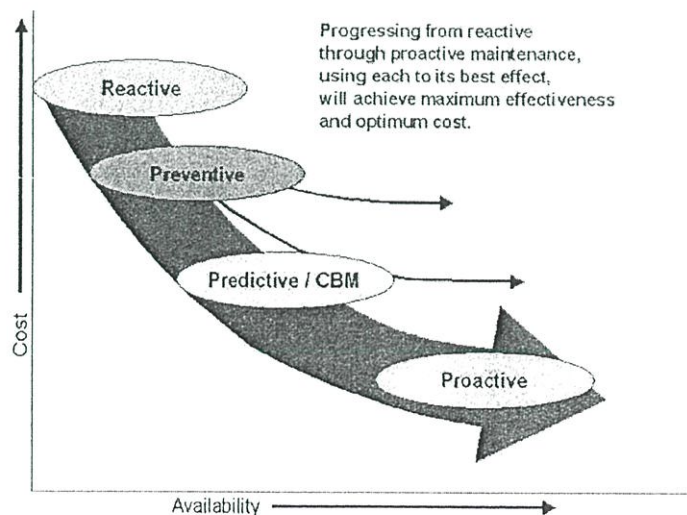
|                |                     |
|----------------|---------------------|
| Rating 108 kW, | pf 0.85             |
| 380 V,         | 985 rpm,            |
| 50 Hz,         | Insulation Class H, |
| 205 A,         | Axial Flow          |

การทำงานของพัดลมระบายอากาศในอุโมงค์มี 2 ทิศทางคือการจ่ายลมเข้าอุโมงค์ (supply : S) และดูดลมออกจากอุโมงค์ (exhaust : E) ในที่นี้จะใช้อักษรย่อของชื่อพัดลมในสถานีต่างๆ ประกอบกับทิศทางการทำงานเป็นการแสดงการทำงานของพัดลมเพื่อใช้ในการประเมินประสิทธิภาพเช่น สถานีหัวลำโพงมีพัดลมระบายอากาศในอุโมงค์ชื่อว่า F100 หากพัดลมทำงานแบบ supply จะใช้ชื่อย่อว่า F100S และหากทำงานแบบ exhaust จะใช้ชื่อย่อว่า F100E เป็นต้น

สำหรับส่วนประกอบของการระบายอากาศในอุโมงค์ที่เหลือคือระบบดูดอากาศใต้ขานขาลา และระบบสายตรวจจับความร้อน จะไม่กล่าวถึงในที่นี้เนื่องจากมิได้เกี่ยวข้องกับหัวข้อวิทยานิพนธ์

## 2.8 ความรู้พื้นฐานการซ่อมบำรุง

วิวัฒนาการในการบำรุงรักษา (maintenance) [14-15] มีการพัฒนาการอย่างต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 2.13 โดยเริ่มตั้งแต่การบำรุงรักษาเมื่อเครื่องจักรนั้นเกิดชำรุดขัดข้อง (reactive maintenance) มาเป็นระบบการบำรุงรักษาแบบป้องกัน (preventive maintenance) และต่อมาเป็นแนวคิดแบบการบำรุงรักษาตามสภาพ (condition based maintenance) จนกระทั่งมาเป็นระบบการบำรุงรักษาเชิงรุก (proactive maintenance) จะเห็นได้ว่าการดำเนินการบำรุงรักษาแต่ละรูปแบบนั้นมีความแตกต่างกันอยู่มากพอควร โดยสามารถอธิบายความหมายของการบำรุงรักษาต่างๆ ได้ดังนี้



รูปที่ 2.13 วิวัฒนาการของระบบการบำรุงรักษา

1 การบำรุงรักษาแบบแก้ไข(reactive maintenance) บางครั้งเรียกว่า maintenanceless, run-to-failure, failure maintenance, panic maintenance เป็นวิธีที่ไม่มีการวางแผนล่วงหน้า และมักทำให้เกิดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงที่สูง พร้อมทั้งเกิดความเสี่ยงสูงด้วย

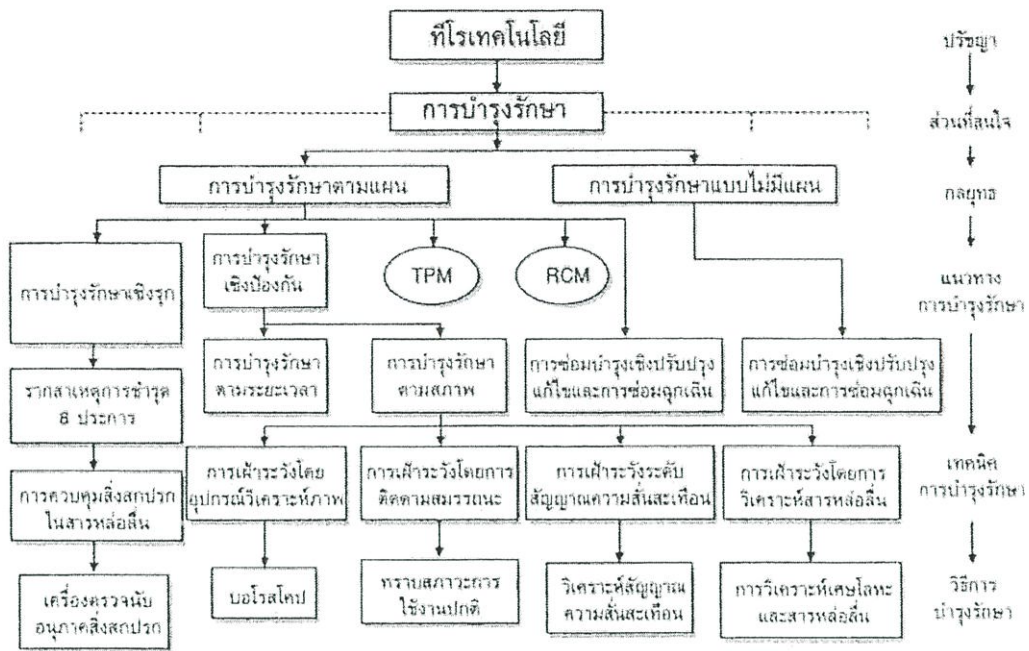
2. การบำรุงรักษาแบบป้องกัน(preventive maintenance) เป็นการบำรุงรักษาที่มีประโยชน์อย่างมากต่อเครื่องจักร โดยมีการบำรุงรักษาในช่วงระยะเวลาที่เหมาะสม การบำรุงรักษาแบบนี้ต้องมีการติดตามดูแล ตรวจสอบสภาพเครื่องจักรมากพอสมควร เพื่อให้มีมีหลักเกณฑ์ที่น่าเชื่อถือว่าควรดำเนินการบำรุงรักษาที่จุดใดและเมื่อใดจึงจะเหมาะสมที่สุด มักเรียกการบำรุงรักษาแบบนี้ว่าการบำรุงรักษาตามระยะเวลา (time-based maintenance : TBM)

3. การบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ หรือการบำรุงรักษาตามสภาพ(predictive/condition based maintenance) เป็นการคาดคะเน/ทำนาย/พยากรณ์อาการชำรุดในปัจจุบัน โดยการตรวจวัดสภาพเครื่องจักรขณะใช้งานจริง ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากเนื่องจากมีข้อมูลในการวินิจฉัยสภาพจริงทำให้สามารถลดการขัดข้องของเครื่องจักรได้มากยิ่งขึ้น และยังช่วยลดขั้นตอนการบำรุงรักษาแบบป้องกันได้อีกด้วย เป็นการลดค่าใช้จ่ายลงได้

4. การบำรุงรักษาเชิงรุก(proactive maintenance) เป็นการติดตามสถานะของปัจจัยที่มีผลทำให้เครื่องจักรเกิดการชำรุด การบำรุงรักษาแบบนี้ไม่ใช่การติดตามสัญญาณ/เหตุการณ์ที่เกิดอาการของการชำรุดไปแล้ว แต่เป็นการวิเคราะห์หาสาเหตุที่อาจจะทำให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องจักรก่อนความเสียหายจะเกิดขึ้น เพื่อกำหนดวิธีการบำรุงรักษาที่เหมาะสมเพื่อป้องกันการเริ่มเสื่อมสภาพของเครื่องจักรและอุปกรณ์ตั้งแต่เริ่มติดตั้งหรือซื้อเครื่องจักร

จากรูปที่ 2.13 จะเห็นได้ว่าการบำรุงรักษาเชิงรุกนั้นจะมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการซ่อมบำรุงต่ำที่สุดและทำให้เครื่องจักรมีความพร้อมใช้งานมากที่สุดด้วย

สำหรับการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการบำรุงรักษาตามสภาพที่มีการตรวจติดตามสมรรถนะเครื่องจักรเพื่อกำหนดวิธีการบำรุงรักษาที่เหมาะสมต่อไป จากรูปที่ 2.14 แสดงแผนภูมิของทฤษฎีการบำรุงรักษาแผนใหม่ ที่มีอยู่ในปัจจุบัน จะเห็นได้ว่าการเฝ้าระวังโดยการติดตามสมรรถนะ เป็นเทคนิคการบำรุงรักษาของการบำรุงรักษาตามสภาพ



TPM : การบำรุงรักษาที่ผลแบบที่ทุกคนมีส่วนร่วม  
 RCM : การบำรุงรักษาโดยการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือเป็นแกน

รูปที่ 2.14 แผนภูมิของทฤษฎีการบำรุงรักษาแผนใหม่

## 2.9 การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบทั่วไป

การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นมีหลายวิธีขึ้นอยู่กับความต้องการความแม่นยำถูกต้อง ความสะดวก และประหยัด ดังวิธีต่างๆต่อไปนี้

### 2.9.1 วิธีการใช้ค่ากำลังไฟฟ้า (nameplate method)

วิธีนี้เป็นวิธีที่มีความแม่นยำน้อยในการหาประสิทธิภาพมอเตอร์ขณะใช้งานจริง เป็นการสมมติว่าประสิทธิภาพของมอเตอร์คงที่และเท่ากับค่าที่ป้ายพิกัด (ประสิทธิภาพตอนภาระเต็มพิกัด (full load) สามารถใช้งานได้กับสภาพภาระ (load) ส่วนใหญ่) สาเหตุที่มีความคลาดเคลื่อนอาจเนื่องจาก

- ก. มอเตอร์ถูกพันใหม่ ทำให้ข้อมูลบนป้ายพิกัดกับความเป็นจริงไม่ตรงกัน
- ข. ข้อมูลจากป้ายพิกัดที่ได้มาจากสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน อุณหภูมิต่างกัน

การหาประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ใช้ข้อมูลจากป้ายพิกัด มีหลายมาตรฐานด้วยกัน ที่นิยมมี 3 แบบคือ

1. NEMA (national electrical manufacturers association) ซึ่งใช้ IEEE standard 112-1996 (ภาคผนวก ข) [16]
2. JEC (japanese electrotechnical committee)
3. IEC (international electrotechnical commission)

ตารางที่ 2.1 ค่าประสิทธิภาพมอเตอร์ขนาด 100 แรงม้า ที่หาได้จากมาตรฐานต่างๆ

| IEEE 112 Method B                 | JEC37 | IEC34-2 |
|-----------------------------------|-------|---------|
| 90.0%                             | 93.1% | 92.7%   |
| Per H.Jordan and A.Gattozzi, 1979 |       |         |

สภาพที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนมากที่สุดคือ ความเร็วต่ำ, พันมอเตอร์ใหม่, ไม่ลดทอนค่าประสิทธิภาพตามมาตรฐาน EASA, มอเตอร์ที่ไม่ผ่านมาตรฐาน IEEE Standard 112-1996 และทำงานที่แหล่งจ่ายที่ไม่เหมาะสม.

### 2.9.2 วิธีการใช้ค่าความเร็ว (slip method ; SM)

เป็นวิธีการหาประสิทธิภาพของมอเตอร์โดยสันนิษฐานว่าค่าเปอร์ยูนิตของภาระทางกลนั้นใกล้เคียงกับเปอร์ยูนิตของอัตราส่วนของสลลิปที่วัดได้กับค่าสลลิปที่ภาระทางกลเต็มพิกัด โดยใช้สมการดังนี้

$$Load(p.u.) = \frac{N_{syn} - N_{r(Measured)}}{(N_{syn} - N_{fl(Nameplate)}) \left( \frac{V_{Nameplate}}{V_{Measured}} \right)^2} \quad (2.9)$$

$$Output \ Power \ P_{out} = P_{rated(Nameplate)} \times Load(p.u.) \quad (2.10)$$

$$Field \ Efficiency = \frac{P_{out}}{P_{in(Measured)}} \quad (2.11)$$

|     |                        |  |
|-----|------------------------|--|
| โดย | $N_{syn}$              | หมายถึงความเร็วซิงโครนัส                 |
|     | $N_{r(Measured)}$      | หมายถึงความเร็วโรเตอร์                   |
|     | $N_{fl(Nameplate)}$    | หมายถึงความเร็วเต็มพิกัดแสดงที่ป้ายพิกัด |
|     | $V_{Nameplate}$        | หมายถึงแรงดันไฟฟ้าที่ป้ายพิกัด           |
|     | $V_{Measured}$         | หมายถึงแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้              |
|     | $P_{out}$              | หมายถึงกำลังทางกล                        |
|     | $P_{rated(Nameplate)}$ | หมายถึงกำลังทางกลพิกัดแสดงที่ป้ายพิกัด   |
|     | $P_{in(Measured)}$     | หมายถึงกำลังไฟฟ้าที่วัดได้               |

การหาค่ากำลังทางกลและประสิทธิภาพสามารถหาได้โดยใช้สมการที่ (2.10) และ (2.11) อย่างไรก็ตามวิธีนี้ยังไม่แม่นยำสำหรับการคำนวณประสิทธิภาพของมอเตอร์ขณะใช้งานจริงเพราะ

1. วิธีการนี้ไม่ได้ทำการวัดกระแสไฟฟ้าจริงในการพิจารณาค่าการสูญเสียที่ภาวะทดสอบแบบมีภาระ (load test) และไม่มีภาระ (no load test) และความเร็วของมอเตอร์กับภาระนั้นไม่เป็นเชิงเส้นกัน
2. จากการคำนวณโดยใช้ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ภาระพิกัดจากข้อมูลของป้ายพิกัดพบว่า เป็นตัวเลขโดยเฉลี่ยจากการทดสอบมอเตอร์ของผู้ผลิต ซึ่งสามารถคลาดเคลื่อนได้ 5 รอบต่อนาที
3. ในการคำนวณวิธีนี้ ไม่ได้คำนึงถึงเรื่องอุณหภูมิและแรงดันที่เปลี่ยนแปลงขณะใช้งานซึ่งมีผลต่อความเร็วขณะภาระที่พิกัด

### 2.9.3 วิธีการใช้ค่ากระแสไฟฟ้า (current method ; CM)

วิธีการนี้เป็นขบวนการในการหาค่ากำลังทางกลของมอเตอร์โดยสันนิษฐานว่าค่าเปอร์เซ็นต์ของภาระทางกลนั้นใกล้เคียงกับอัตราส่วนของเปอร์เซ็นต์ของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้กับกระแสไฟฟ้าที่พิกัดโดยสามารถหาได้จากสมการที่ (2.12)

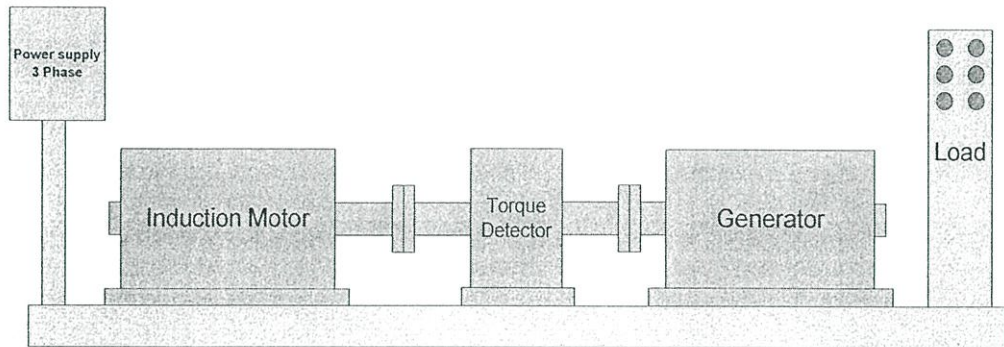
$$Load(p.u.) = \left( \frac{I_{Measured}}{I_{fl(Nameplate)}} \right) \left( \frac{V_{Measured}}{V_{Nameplate}} \right) \quad (2.12)$$

โดย  $I_{Measured}$  หมายถึงกระแสไฟฟ้าที่วัดได้  
 $I_{fl(Nameplate)}$  หมายถึงกระแสไฟฟ้าเต็มพิกัดที่ป้ายพิกัด

จากนั้นสามารถหาค่ากำลังทางกลและประสิทธิภาพได้จากสมการที่ (2.10) และ (2.11) เช่นเดียวกัน การหาประสิทธิภาพโดยวิธี SM และ CM นี้มักจะมีปัญหาในการนำไปใช้งานซึ่งเกิดจากประการแรกประสิทธิภาพที่แสดงที่ป้ายพิกัดของมอเตอร์แต่ละตัวได้มาจากการหาค่าด้วยมาตรฐานที่แตกต่างกัน ลำดับต่อมาป้ายพิกัดอาจถูกเปลี่ยนแปลงไปแล้ว ปัญหาต่อมาคือมอเตอร์อาจถูกพันใหม่ จากปัญหาที่พบทั้งหมดนี้มักทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนสูงในการหาประสิทธิภาพด้วยวิธี CM และ SM

### 2.9.4 การทดสอบแบบมีภาระ (shaft torque method)

เป็นวิธีที่ง่ายและมีความแม่นยำมากที่สุด นั่นคือการวัดโดยตรงที่แกนเพลาส่งที่เราไม่ต้องนำค่าต่างๆมาลบออกเพื่อที่จะหาค่าประสิทธิภาพ วิธีนี้นิยมใช้ในห้องปฏิบัติการดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การหาประสิทธิภาพด้วยวิธีทดสอบแบบมีภาระ

### 2.9.5 การหาค่าประสิทธิภาพโดยทดสอบตามมาตรฐาน IEEE Std.122 [16]

#### 2.9.5.1 Method B การแยกค่าการสูญเสียต่างๆออกจากกัน

มีขั้นตอนในการทดสอบดังนี้

1. วัดค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ (DC resistance)
2. ทดสอบอุณหภูมิภายใต้สภาวะภาระที่พิกัด (rated load temperature test) บันทึกอุณหภูมิของขดลวดสเตเตอร์ทุกครึ่งชั่วโมง สิ้นสุดเมื่ออุณหภูมิแตกต่างกันไม่เกิน 1 องศาเซลเซียสที่ภาระที่พิกัด ทำการวัดค่าความต้านทานสุดท้ายและอุณหภูมิโดยรวม
3. ทดสอบภายใต้สภาวะมีภาระ (test under load) โดยใช้ dynamometer เป็นภาระทางกล อุณหภูมิสูงสุดต้องแตกต่างกันไม่เกิน 10 องศาเซลเซียสจากข้อมูลที่พิกัดของมอเตอร์แบบเดียวกันตลอดการทดสอบ ทำการปรับภาระทางกลตั้งแต่ 25-150 %
4. ทดสอบแบบไม่มีภาระ (no-load test) ทำการเดินมอเตอร์แบบไม่มีภาระ บันทึกค่ากำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิทุกครึ่งชั่วโมง สิ้นสุดเมื่อค่ากำลังไฟฟ้าแตกต่างกันไม่เกิน 3 % และอุณหภูมิแตกต่างกันไม่เกิน 1 องศาเซลเซียส
5. ทำการคำนวณ โดยใช้แบบฟอร์มมาตรฐานของ IEEE Std.112 (ภาคผนวก ข)

### 2.9.5.2 Method F วงจรสมมูล

มีขั้นตอนในการทดสอบดังนี้

1. ทดสอบแบบไม่มีภาระ (no-load test) ทำการเดินมอเตอร์แบบไม่มีภาระ บันทึกค่ากำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิทุกครึ่งชั่วโมง สิ้นสุดเมื่อค่ากำลังไฟฟ้าแตกต่างไม่เกิน 3 % และอุณหภูมิแตกต่างไม่เกิน 1 องศาเซลเซียส

2. แบบยัดโรเตอร์ (blocked-rotor test) ถ้าเป็นแบบवालัวเตอร์ ต้องทำการลัดวงจรก่อนแล้วทำการยัดโรเตอร์ ค่อยๆเพิ่มขึ้นจนได้กระแสฟัดัด ยอมให้โรเตอร์หมุนช้ามากๆเพิ่มหาตำแหน่งที่เป็นค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าสูงสุด และกระแสไฟฟ้าต่ำสุด ยัดโรเตอร์หยุดอยู่ที่ตำแหน่งค่าเฉลี่ย ทำการพล็อตกราฟกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า หาค่ารีแอกแตนซ์ทั้งหมด (total reactance) และ ความต้านทานโรเตอร์ (rotor resistance) จากกราฟ หาค่าความต้านทานโรเตอร์, รีแอกแตนซ์รวมทั้งหมด ( $X_1 + X_2$ )

3. ทำการคำนวณโดยใช้แบบฟอร์มมาตรฐานของ IEEE Std.112 (ภาคผนวก ข)

### บทที่ 3

## การประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขับเคลื่อน

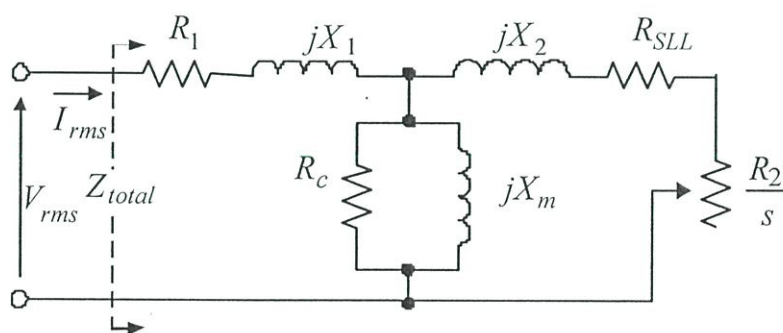
### ด้วยอินเวอร์เตอร์โดยใช้จเนติกอัลกอริธึม

#### 3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ โดยใช้จเนติกอัลกอริธึม หาค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลแบบสมบูรณ [17] ซึ่งการใช้วงจรสมมูลแบบสมบูรณนี้จะเกิดความคลาดเคลื่อนในการคำนวณน้อยกว่าวงจรสมมูลแบบประมาณ และยังแสดงการทำงานของจเนติกอัลกอริธึมในการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ละขั้นตอน ในตอนท้ายได้แสดงผลการทดลองจากห้องปฏิบัติการที่ได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างวิธีการหาประสิทธิภาพของมอเตอร์โดยการทดสอบแบบมีภาระ กับวิธีการประเมินประสิทธิภาพที่นำเสนอ (genetic algorithms)

#### 3.2 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่นำเสนอ

วงจรสมมูลของมอเตอร์ที่ใช้เป็นวงจรสมมูลแบบสมบูรณดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำที่นำเสนอ

|        |             |  |
|--------|-------------|--|
| โดยที่ | $V_{rms}$   | หมายถึงแรงดันไฟฟ้าประสิทธิผล                     |
|        | $I_{rms}$   | หมายถึงกระแสไฟฟ้าประสิทธิผล                      |
|        | $Z_{total}$ | หมายถึงอิมพีแดนซ์รวม                             |
|        | $R_1$       | หมายถึงความต้านทานขดลวดที่สเตเตอร์               |
|        | $R_2$       | หมายถึงความต้านทานโรเตอร์ที่โอนย้ายไปยังสเตเตอร์ |

|           |   |
|-----------|---|
| $R_{SLL}$ | หมายถึง stray load loss ในรูปของความต้านทาน               |
| $jX_1$    | หมายถึงรีแอกแตนซ์รั่วไหลของสเตเตอร์                       |
| $jX_2$    | หมายถึงรีแอกแตนซ์รั่วไหลของโรเตอร์ที่โอนย้ายไปยังสเตเตอร์ |
| $R_c$     | หมายถึงความต้านทานที่เป็นผลให้เกิดการสูญเสียในแกนเหล็ก    |
| $jX_m$    | หมายถึงรีแอกแตนซ์ที่เกิดสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์           |
| $s$       | หมายถึงค่าสลลิป   |

ค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลที่นำเสนอนี้เป็นค่าที่รวม Fundamental และองค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ต่าง ๆ แล้วไม่แยกตามความถี่ตามวิธีการคำนวณแบบ Superposition ค่าพารามิเตอร์ที่จีเนติกอัลกอริทึมประเมินขึ้นมาเหล่านี้ใช้สำหรับคำนวณประสิทธิภาพมอเตอร์ในขณะนั้นเพียงจุดเดียว มิใช่ค่าพารามิเตอร์ที่สามารถนำไปใช้ประเมินประเมินประสิทธิภาพได้ตลอดย่าน

ในวงจรสมมูลนี้มีการเพิ่ม stray load loss ( $R_{SLL}$ ) เข้ามาเพื่อให้เกิดสภาพใกล้เคียงกับการใช้งานจริงมากขึ้น การเพิ่มความต้านทานนี้มีส่วนสำคัญที่ทำให้ความคลาดเคลื่อนในการคำนวณลดลงเนื่องจาก เป็นความต้านทานที่เพิ่มขึ้นจากการที่กระแสไหลไม่สม่ำเสมอในตัวนำและค่าสูญเสียในแกนเหล็กที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากผลของฟลักซ์แม่เหล็กที่มาจากกระแสทางกลสามารถหาได้จากสมการที่ (3.1)

$$R_{SLL} = \frac{m(1-s_f)R_2}{s_f} \quad (3.1)$$

โดยที่  $m$  หมายถึงค่าเปอร์เซ็นต์ของกำลังที่พิกัด (ในที่นี้มีค่าระหว่าง 0.5 – 3%)  
 $s_f$  หมายถึงค่าสลลิปที่พิกัด

### 3.3 การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ด้วยวิธีการที่นำเสนอ

การที่เลือกใช้จีเนติกอัลกอริทึมในการหาคำตอบนั้นเนื่องจากสามารถหาคำตอบได้ดีกว่าวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบอื่น ๆ โดยการประมาณค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลที่ทำให้สมการเป้าหมายมีค่าต่ำที่สุดดังแสดงไว้ในสมการที่ (3.2)

$$\text{Min. } F_{\text{objective}} = \left| \frac{I_{rms,cal}}{I_{rms,mea}} - 1 \right|^2 + \left| \frac{P_{in,cal}}{P_{in,mea}} - 1 \right|^2 \quad (3.2)$$

โดยที่  $I_{rms,cal}$  หมายถึงกระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพที่คำนวณได้  
 $I_{rms,mea}$  หมายถึงกระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพที่วัดได้จริง  
 $P_{in,cal}$  หมายถึงกำลังไฟฟ้าที่คำนวณได้  
 $P_{in,mea}$  หมายถึงกำลังไฟฟ้าที่วัดได้จริง

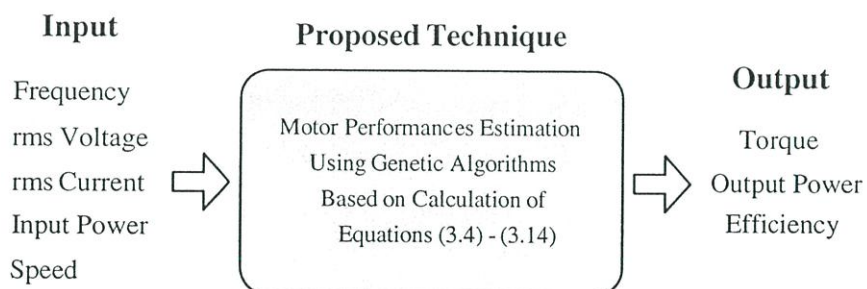
การทำงานของจินตિકอัลกอริธึมนั้นจะทำการประมาณค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลขึ้นมาโดยอาศัยข้อมูลที่วัดได้คือ แรงดันไฟฟ้าประสิทธิภาพ กระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพ กำลังไฟฟ้า ความถี่ และความเร็วยรอบ ประมาณค่าพารามิเตอร์ขึ้นมา และใช้สมการเป้าหมายในการตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ที่ได้มาเหล่านั้นว่าเหมาะสมหรือไม่ กล่าวคือเมื่อใดก็ตามที่พารามิเตอร์วงจรสมมูลที่ได้มาทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพที่คำนวณได้และกำลังไฟฟ้าที่คำนวณได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้ จะทำให้สมการเป้าหมายมีค่าต่ำ ซึ่งหมายถึงพารามิเตอร์วงจรสมมูลที่จินตિકอัลกอริธึมประมาณขึ้นมาได้นั้นใกล้เคียงความถูกต้องมากที่สุด สมการที่ใช้ตรวจสอบความถูกต้องได้แสดงไว้ดังสมการที่ (3.3)

$$Fitness = \frac{100}{100 + F_{objective}} \quad (3.3)$$

โดยเมื่อสมการที่ (3.3) ได้ผลลัพธ์ออกมาเท่ากับ 1 แสดงว่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลมีค่าใกล้เคียงความถูกต้องมากที่สุด

การที่จะต้องใช้ค่ากระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพและกำลังไฟฟ้าในการดำเนินการนั้นเนื่องจากเป็นค่าที่สามารถตรวจวัดได้จริงในทางปฏิบัติ ในส่วนการคำนวณนั้นการใช้ค่ากระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพซึ่งประกอบไปด้วยค่าในแกนจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพนั้นยังไม่สามารถทำให้ได้พารามิเตอร์วงจรสมมูลที่ประมาณขึ้นมาถูกต้องได้ จำเป็นต้องใช้ค่าที่อยู่ในแกนจำนวนจริงเพียงอย่างเดียว คือกำลังไฟฟ้ามาเป็นตัวกำกับให้ค่าพารามิเตอร์ที่อยู่ในแกนจำนวนจริงมีความถูกต้องมากขึ้น ส่งผลให้พารามิเตอร์วงจรสมมูลทั้งหมดใกล้เคียงความถูกต้องมากที่สุด

เมื่อจินตિકอัลกอริธึมประมาณค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลขึ้นมาได้แล้วค่าหนึ่ง ขั้นตอนต่อไปโปรแกรมจะทำการหาค่า  $Z_{total}$  เพื่อนำไปสู่การหากำลังทางกล ( $P_{out}$ ) แรงบิด (torque) และประสิทธิภาพมอเตอร์ (efficiency) ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยจินตિકอัลกอริธึม

ค่าต่างๆที่ได้มาต้องอาศัยการคำนวณดังสมการที่ (3.4)-(3.7)

$$Z_1 = R_1 + jX_1 \quad (3.4)$$

$$Z_c = \frac{R_c jX_m}{R_c + jX_m} \quad (3.5)$$

$$Z_2 = R_{SLL} + jX_2 + \frac{R_2}{s} \quad (3.6)$$

$$Z_{total} = Z_1 + \frac{Z_2 Z_c}{Z_2 + Z_c} \quad (3.7)$$

จากนั้นจะหาค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ได้จากสมการที่ (3.8)

$$PF = \cos \left( \tan^{-1} \left( \frac{\text{Im}(Z_{total})}{\text{Re}(Z_{total})} \right) \right) \quad (3.8)$$

ดังนั้น  $I_{rms,cal}$  และ  $P_{in,cal}$  จะหาได้จากสมการที่ (3.9) ถึง (3.10)

$$I_{rms,cal} = \frac{V_{rms}}{Z_{total}(R_1, R_2, R_c, R_{SLL}, jX_1, jX_2, jX_m)} \quad (3.9)$$

$$P_{in,cal} = 3V_{rms}I_{rms,cal}(PF) \quad (3.10)$$

เมื่อได้พารามิเตอร์วงจรสมมูลที่เหมาะสมแล้วสามารถดำเนินการหาค่ากำลังทางกล แรงบิด และประสิทธิภาพได้จากสมการที่ (3.11) ถึง (3.14)

$$I_{2,cal} = \frac{I_{rms,cal}Z_c}{Z_c + Z_2} \quad (3.11)$$

$$P_{out,cal} = \frac{3I_{2,cal}^2 R_2 (1-s)}{s} \quad (3.12)$$

$$T_{out,cal} = \frac{P_{out,cal}}{\omega_r} \quad (3.13)$$

$$\text{Estimated Efficiency} = \frac{P_{out,cal}}{P_{in,mea}} \cdot 100 \quad (3.14)$$

|        |               |   |
|--------|---------------|---|
| โดยที่ | $P_{out,cal}$ | หมายถึงกำลังทางกลที่คำนวณได้                                  |
|        | $I_{2,cal}$   | หมายถึงกระแสไฟฟ้าของโรเตอร์ที่โอนย้ายไปยังสเตเตอร์ที่คำนวณได้ |
|        | $T_{out,cal}$ | หมายถึงแรงบิดทางกลที่คำนวณได้                                 |
|        | $\omega_r$    | หมายถึงความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์                              |

### 3.4 การทดสอบการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ขนาดเล็กด้วยวิธีการที่นำเสนอ

การหาประสิทธิภาพมอเตอร์ไฟฟ้าขณะใช้งานจริง (field efficiency) นั้นสามารถหาได้โดยการวัดกำลังทางกลที่เพลา ( $P_{mechanical}$ ) และกำลังไฟฟ้า ( $P_{electrical}$ ) เพื่อนำมาหาประสิทธิภาพต่อไปดังสมการ

$$\text{Field Efficiency} = \frac{P_{mechanical}}{P_{electrical}} \cdot 100 \quad (3.15)$$

แต่ในสภาพความเป็นจริงการติดตั้งอุปกรณ์วัดกำลังกลที่เพลา นั้นไม่สะดวก เนื่องจากมอเตอร์ในอุตสาหกรรมจะมีภาระต่ออยู่ที่เพลา และการถอดภาระออกจะใช้เวลา และอาจมีค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นการประเมินประสิทธิภาพด้วยจันติกอัลกอริทึมจึงเป็นขั้นตอนที่นำมาใช้ทดแทนการหาประสิทธิภาพขณะใช้งานทั่วไปที่มีความแม่นยำน้อย โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากมอเตอร์ถูกขับเคลื่อนโดยอินเวอร์เตอร์แล้ว วิธีการแบบทั่วไปจะหาประสิทธิภาพได้แม่นยำน้อยมาก สำหรับวิธีการที่นำเสนอนี้ไม่จำเป็นต้องนำมอเตอร์เข้าทดสอบในห้องปฏิบัติการ ไม่ต้องถอดภาระออกจากมอเตอร์ เหมาะกับมอเตอร์ที่ใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ

ดังนั้นจึงทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องแม่นยำของวิธีประเมินประสิทธิภาพ โดยจันติกอัลกอริทึมกับวิธี การทดสอบแบบมีภาระ ที่ถือว่ามีแม่นยำมากที่สุด ในห้องปฏิบัติการทดสอบ โดยดำเนินการกับมอเตอร์ขนาด 2.2 kW และ 5.5 kW ที่ใช้อินเวอร์เตอร์ขับเคลื่อน เพื่อจะได้นำผลลัพธ์ของวิธีการที่นำเสนอเป็นข้อยืนยันนำไปใช้งานกับมอเตอร์ฟัดคอื่น ๆ ที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ต่อไป

#### 3.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้

1. มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 2 ตัวพิกัดต่างกันมีข้อมูลที่ป้ายพิกัดดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลของมอเตอร์ที่ใช้ทดสอบ

|      | 2.2 kW (3 hp) | 5.5 kW (7.5 hp) |
|------|---------------|-----------------|
| Hz   | 50            | 50              |
| V    | 220/380       | 220/380         |
| A    | 8.7/5.0       | 20.4/11.8       |
| rpm  | 1420          | 1430            |
| Pole | 4             | 4               |

2. อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 380-440 V, 50/60 Hz, 27.9 A, switching frequency 1 kHz, Fuji FRENIC 5000G11, Type FRN7.5G11S-4JE

3. เครื่องวัดกำลังไฟฟ้าแบบดิจิทัล (digital power meter) รุ่น WT230, Yokogawa (true RMS)

4. เครื่องวัดความเร็วรอบ (tachometer)

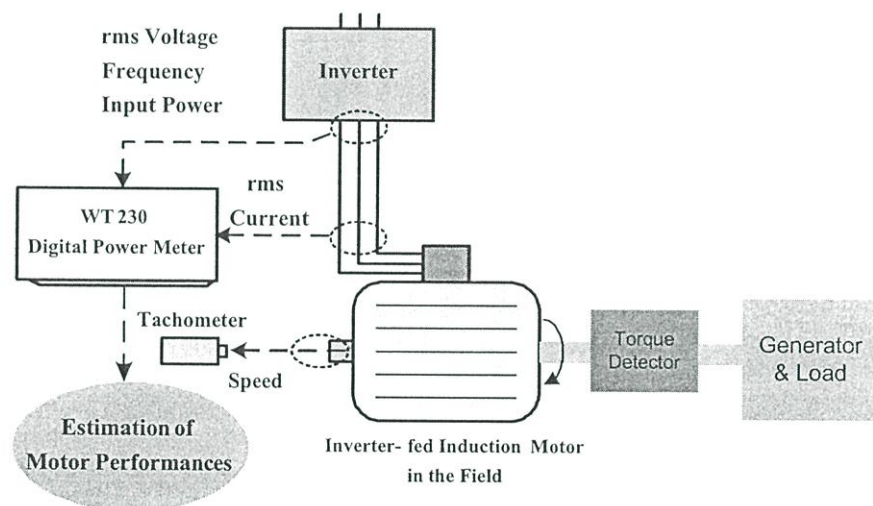
5. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและภาระทางไฟฟ้าปรับค่าได้

6. เครื่องวัดแรงบิด (torque Detector)

### 3.4.2 ขั้นตอนการดำเนินการทดสอบ

วิธีดำเนินการทดสอบมีขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

1. ตัวอย่างของอินเวอร์เตอร์เข้ากับมอเตอร์ทดสอบ และต่อเพลลาของมอเตอร์เข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จ่ายภาระทางไฟฟ้าพร้อมทั้งต่ออุปกรณ์วัดแรงบิด (torque detector) ที่เพลลาและติดตั้งมิเตอร์วัดกำลังไฟฟ้าแบบดิจิทัลดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การทดสอบหาประสิทธิภาพมอเตอร์ไฟฟ้าขนาดเล็ก

2. ทำการทดสอบมอเตอร์แต่ละตัวที่ความถี่ 40, 45 และ 50 Hz โดยจ่ายภาระทางกลและปรับภาระทางกลลดลงทีละขั้น

3. ทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าประสิทธิผล ( $V_{rms}$ ) กระแสไฟฟ้าประสิทธิผล ( $I_{rms}$ ) กำลังไฟฟ้า ( $P_{in}$ ) และความเร็วรอบ (speed) เพื่อใช้ในการประเมินประสิทธิภาพโดยวิธีที่นำเสนอและวัดแรงบิดที่เพลลา (torque) เพื่อหาค่ากำลังกลขาออก ( $P_{out}$ ) เพื่อนำไปหาประสิทธิภาพ (efficiency; Eff) ตามวิธี การทดสอบแบบมีภาระ

### 3.4.3 ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบ

จากการทดสอบทำการหาประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยวิธี การทดสอบแบบมีภาระ และวิธีที่นำเสนอ (proposed technique) เปรียบเทียบกันที่ความถี่ต่าง ๆ และปรับภาระทางกลลดลงทีละขั้นได้ผลลัพธ์ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ถึง 3.7

ตารางที่ 3.2 ค่าที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์ขนาด 2.2 kW ที่ความถี่ 40 Hz

| Measurement Data    |                    |                    |                 |                |                     |            | Proposed Technique |                     |            |
|---------------------|--------------------|--------------------|-----------------|----------------|---------------------|------------|--------------------|---------------------|------------|
| $V_{rms}$<br>(volt) | $I_{rms}$<br>(amp) | $P_{in}$<br>(watt) | Torque<br>(N-m) | Speed<br>(rpm) | $P_{out}$<br>(watt) | Eff<br>(%) | Torque<br>(N-m)    | $P_{out}$<br>(watt) | Eff<br>(%) |
| Avg                 | Avg                |                    |                 |                |                     |            |                    |                     |            |
| 226.63              | 5.46               | 2559               | 15.95           | 1096.9         | 1832.29             | 71.60      | 16.19              | 1860.45             | 72.70      |
| 226.56              | 5.12               | 2371               | 14.86           | 1104.5         | 1719.67             | 72.53      | 14.56              | 1684.73             | 71.06      |
| 226.62              | 4.84               | 2207               | 13.88           | 1111.5         | 1616.23             | 73.23      | 13.61              | 1584.79             | 71.81      |
| 226.55              | 4.58               | 2057               | 12.99           | 1118.1         | 1521.57             | 73.97      | 12.70              | 1487.61             | 72.32      |
| 226.24              | 4.28               | 1883               | 11.81           | 1125.8         | 1392.88             | 73.97      | 11.94              | 1408.21             | 74.79      |
| 226.23              | 4.00               | 1715               | 10.73           | 1133.2         | 1273.82             | 74.28      | 10.61              | 1259.58             | 73.44      |
| 225.96              | 3.73               | 1549               | 9.65            | 1140.8         | 1153.29             | 74.45      | 9.56               | 1142.54             | 73.76      |
| 224.01              | 3.42               | 1346               | 8.36            | 1149.9         | 1007.09             | 74.82      | 8.35               | 1005.89             | 74.73      |
| 224.22              | 3.20               | 1200               | 7.38            | 1156.3         | 893.99              | 74.50      | 7.44               | 901.25              | 75.10      |
| 223.76              | 2.97               | 1034               | 6.20            | 1163.5         | 755.72              | 73.09      | 6.21               | 756.94              | 73.21      |

หมายเหตุ : ค่าแรงดันประสิทธิผล และค่ากระแสไฟฟ้าประสิทธิผลที่วัดได้เป็นค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่รวมค่าฮาร์โมนิกส์ต่าง ๆ เข้ามาด้วย

ตารางที่ 3.3 ค่าที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์ขนาด 2.2 kW ที่ความถี่ 45 Hz

| Measurement Data    |                    |                    |                 |                |                     |            | Proposed Technique |                     |            |
|---------------------|--------------------|--------------------|-----------------|----------------|---------------------|------------|--------------------|---------------------|------------|
| $V_{rms}$<br>(volt) | $I_{rms}$<br>(amp) | $P_{in}$<br>(watt) | Torque<br>(N-m) | Speed<br>(rpm) | $P_{out}$<br>(watt) | Eff<br>(%) | Torque<br>(N-m)    | $P_{out}$<br>(watt) | Eff<br>(%) |
| Avg                 | Avg                |                    |                 |                |                     |            |                    |                     |            |
| 238.08              | 5.37               | 2791               | 15.64           | 1249.5         | 2047.28             | 73.35      | 15.92              | 2083.93             | 74.67      |
| 238.21              | 4.86               | 2469               | 13.97           | 1260.8         | 1845.21             | 74.74      | 13.83              | 1826.72             | 73.99      |
| 238.16              | 4.56               | 2278               | 12.89           | 1268.4         | 1712.82             | 75.19      | 12.95              | 1720.80             | 75.54      |
| 237.85              | 4.29               | 2110               | 11.90           | 1275.1         | 1589.62             | 75.34      | 11.81              | 1577.60             | 74.77      |
| 237.52              | 4.03               | 1942               | 11.02           | 1281.8         | 1479.81             | 76.20      | 10.98              | 1474.44             | 75.92      |
| 237.57              | 3.81               | 1773               | 10.03           | 1288.4         | 1353.80             | 76.36      | 10.17              | 1372.70             | 77.42      |
| 237.68              | 3.57               | 1604               | 9.05            | 1295.2         | 1227.97             | 76.56      | 9.14               | 1240.18             | 77.32      |
| 238.05              | 3.34               | 1432               | 7.97            | 1302.1         | 1087.19             | 75.92      | 8.17               | 1114.47             | 77.83      |
| 237.53              | 3.12               | 1262               | 6.88            | 1308.7         | 943.26              | 74.74      | 6.90               | 946.00              | 74.96      |

ตารางที่ 3.4 ค่าที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์ขนาด 2.2 kW ที่ความถี่ 50 Hz

| Measurement Data    |                    |                    |                 |                |                     |            | Proposed Technique |                     |            |
|---------------------|--------------------|--------------------|-----------------|----------------|---------------------|------------|--------------------|---------------------|------------|
| $V_{rms}$<br>(volt) | $I_{rms}$<br>(amp) | $P_{in}$<br>(watt) | Torque<br>(N-m) | Speed<br>(rpm) | $P_{out}$<br>(watt) | Eff<br>(%) | Torque<br>(N-m)    | $P_{out}$<br>(watt) | Eff<br>(%) |
| Avg                 | Avg                |                    |                 |                |                     |            |                    |                     |            |
| 248.57              | 5.18               | 2933               | 15.15           | 1402.6         | 2226.13             | 75.90      | 14.82              | 2177.64             | 74.25      |
| 249.69              | 4.75               | 2634               | 13.58           | 1413.2         | 2010.51             | 76.33      | 13.51              | 2000.15             | 75.94      |
| 250.37              | 4.44               | 2413               | 12.50           | 1420.6         | 1860.31             | 77.10      | 12.58              | 1872.22             | 77.59      |
| 249.44              | 4.21               | 2250               | 11.61           | 1427.5         | 1736.25             | 77.17      | 11.73              | 1754.19             | 77.96      |
| 249.54              | 3.98               | 2073               | 10.62           | 1433.9         | 1595.32             | 76.96      | 10.72              | 1610.34             | 77.68      |
| 248.81              | 3.74               | 1890               | 9.64            | 1440.7         | 1454.97             | 76.98      | 9.76               | 1473.08             | 77.94      |
| 248.48              | 3.58               | 1762               | 8.95            | 1445.7         | 1355.52             | 76.93      | 9.03               | 1367.63             | 77.62      |
| 250.13              | 3.38               | 1605               | 8.07            | 1451.2         | 1226.89             | 76.44      | 7.94               | 1207.12             | 75.21      |
| 249.53              | 3.20               | 1436               | 7.18            | 1457.9         | 1096.62             | 76.37      | 7.08               | 1081.35             | 75.30      |
| 249.68              | 3.02               | 1285               | 6.29            | 1463.3         | 964.25              | 75.04      | 6.14               | 941.25              | 73.25      |

ตารางที่ 3.5 ค่าที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์ขนาด 5.5 kW ที่ความถี่ 40 Hz

| Measurement Data    |                    |                    |                 |                |                     |            | Proposed Technique |                     |            |
|---------------------|--------------------|--------------------|-----------------|----------------|---------------------|------------|--------------------|---------------------|------------|
| $V_{rms}$<br>(volt) | $I_{rms}$<br>(amp) | $P_{in}$<br>(watt) | Torque<br>(N-m) | Speed<br>(rpm) | $P_{out}$<br>(watt) | Eff<br>(%) | Torque<br>(N-m)    | $P_{out}$<br>(watt) | Eff<br>(%) |
| Avg                 | Avg                |                    |                 |                |                     |            |                    |                     |            |
| 228.76              | 11.53              | 5486               | 37.11           | 1133.4         | 4406.34             | 80.32      | 37.34              | 4433.64             | 80.82      |
| 227.92              | 11.22              | 5300               | 35.92           | 1135.0         | 4271.06             | 80.59      | 35.48              | 4218.74             | 79.60      |
| 227.87              | 10.81              | 5076               | 34.35           | 1137.7         | 4094.09             | 80.66      | 34.75              | 4141.77             | 81.60      |
| 227.35              | 10.37              | 4821               | 32.77           | 1140.4         | 3915.05             | 81.21      | 32.64              | 3899.52             | 80.89      |
| 226.85              | 9.97               | 4587               | 31.20           | 1143.2         | 3736.63             | 81.46      | 30.96              | 3707.89             | 80.83      |
| 227.96              | 9.60               | 4380               | 29.82           | 1145.8         | 3579.48             | 81.72      | 29.60              | 3553.07             | 81.12      |
| 227.30              | 9.02               | 4029               | 27.46           | 1150.2         | 3308.85             | 82.13      | 27.78              | 3347.41             | 83.08      |
| 227.09              | 8.69               | 3839               | 26.18           | 1152.7         | 3161.47             | 82.35      | 26.16              | 3159.06             | 82.29      |
| 227.88              | 8.17               | 3535               | 24.11           | 1156.8         | 2921.86             | 82.66      | 24.46              | 2964.27             | 83.85      |
| 227.53              | 7.85               | 3352               | 22.73           | 1159.1         | 2760.09             | 82.34      | 22.56              | 2739.45             | 81.73      |
| 226.98              | 6.85               | 2751               | 18.50           | 1167.7         | 2263.11             | 82.27      | 18.43              | 2254.55             | 81.95      |
| 226.82              | 6.67               | 2627               | 17.62           | 1169.0         | 2157.86             | 82.14      | 17.63              | 2159.09             | 82.19      |
| 226.85              | 6.44               | 2490               | 16.63           | 1171.0         | 2040.11             | 81.93      | 16.69              | 2047.47             | 82.23      |
| 226.49              | 5.75               | 2043               | 13.48           | 1176.7         | 1661.72             | 81.34      | 13.22              | 1629.67             | 79.77      |
| 225.95              | 5.35               | 1746               | 11.32           | 1180.1         | 1399.49             | 80.15      | 11.36              | 1404.43             | 80.4       |

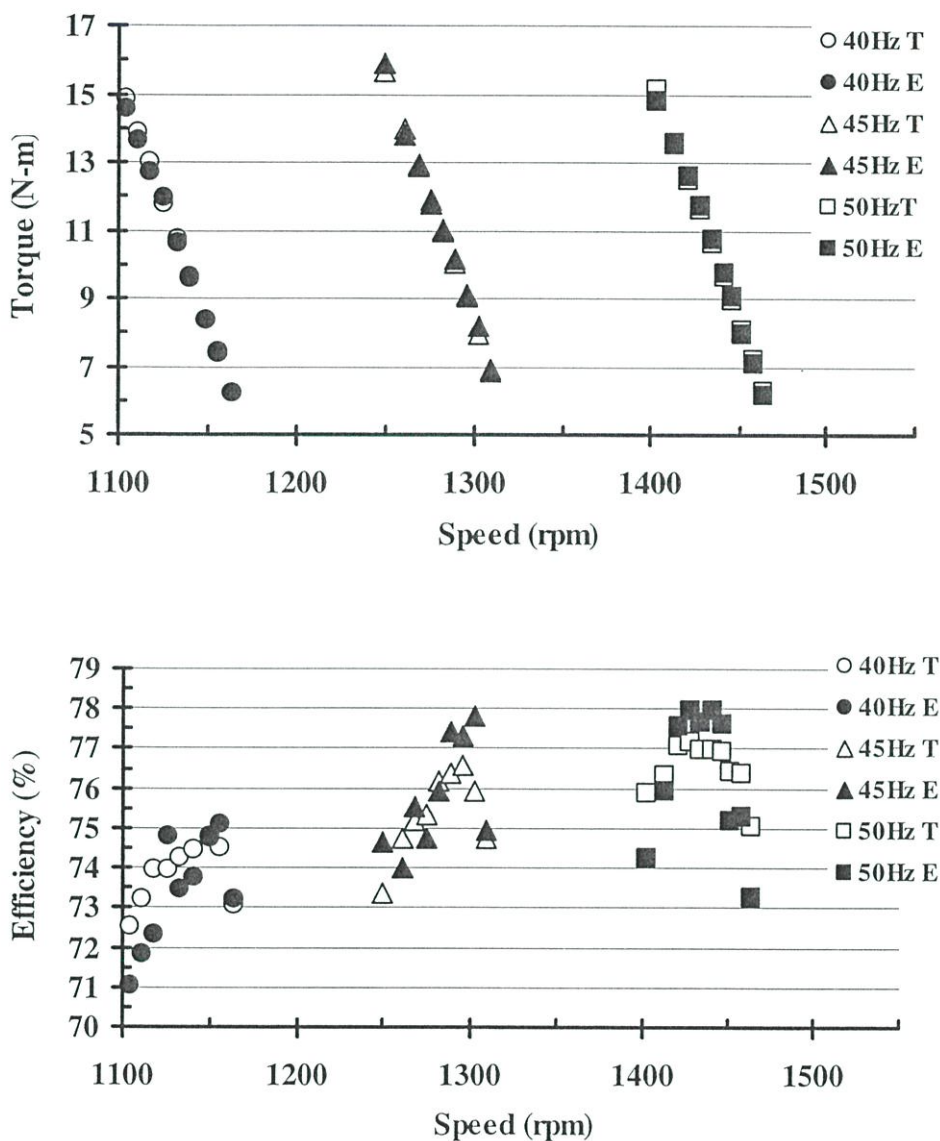
ตารางที่ 3.6 ค่าที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์ขนาด 5.5 kW ที่ความถี่ 45 Hz

| Measurement Data    |                    |                    |                 |                |                     |            | Proposed Technique |                     |            |
|---------------------|--------------------|--------------------|-----------------|----------------|---------------------|------------|--------------------|---------------------|------------|
| $V_{rms}$<br>(volt) | $I_{rms}$<br>(amp) | $P_{in}$<br>(watt) | Torque<br>(N-m) | Speed<br>(rpm) | $P_{out}$<br>(watt) | Eff<br>(%) | Torque<br>(N-m)    | $P_{out}$<br>(watt) | Eff<br>(%) |
| Avg                 | Avg                |                    |                 |                |                     |            |                    |                     |            |
| 241.02              | 11.63              | 6124               | 37.20           | 1286.0         | 5011.73             | 81.84      | 37.34              | 5030.59             | 82.15      |
| 240.76              | 11.19              | 5867               | 35.63           | 1288.1         | 4808.05             | 81.95      | 36.16              | 4879.57             | 83.17      |
| 240.57              | 10.77              | 5600               | 34.15           | 1290.3         | 4616.20             | 82.43      | 34.08              | 4606.74             | 82.26      |
| 240.30              | 10.36              | 5335               | 32.57           | 1292.6         | 4410.47             | 82.67      | 32.88              | 4452.45             | 83.46      |
| 239.98              | 9.94               | 5072               | 30.90           | 1295.6         | 4194.04             | 82.69      | 31.36              | 4256.48             | 83.92      |
| 239.75              | 9.52               | 4809               | 29.33           | 1298.6         | 3990.16             | 82.97      | 29.27              | 3982.00             | 82.80      |
| 239.28              | 9.15               | 4553               | 27.75           | 1300.6         | 3781.03             | 83.04      | 27.71              | 3775.58             | 82.93      |
| 239.07              | 8.96               | 4439               | 27.06           | 1302.4         | 3692.12             | 83.17      | 27.37              | 3734.41             | 84.13      |
| 238.95              | 8.78               | 4330               | 26.37           | 1303.8         | 3601.84             | 83.18      | 26.49              | 3618.23             | 83.56      |
| 238.45              | 8.59               | 4200               | 25.68           | 1304.7         | 3510.02             | 83.57      | 25.73              | 3516.85             | 83.73      |
| 238.43              | 8.31               | 4011               | 24.50           | 1306.9         | 3354.38             | 83.63      | 24.68              | 3379.02             | 84.24      |
| 237.83              | 7.75               | 3638               | 22.14           | 1311.3         | 3041.47             | 83.60      | 22.40              | 3077.18             | 84.58      |
| 237.25              | 6.76               | 2975               | 17.90           | 1318.9         | 2473.25             | 83.13      | 17.89              | 2471.87             | 83.09      |
| 236.43              | 6.55               | 2853               | 17.12           | 1320.0         | 2367.45             | 82.98      | 16.87              | 2332.88             | 81.77      |
| 236.36              | 6.05               | 2483               | 14.76           | 1324.6         | 2048.21             | 82.49      | 14.48              | 2009.36             | 80.92      |
| 235.88              | 5.71               | 2223               | 13.09           | 1327.3         | 1820.17             | 81.88      | 13.04              | 1813.22             | 81.57      |
| 235.68              | 5.27               | 1903               | 10.92           | 1330.9         | 1522.55             | 80.01      | 10.79              | 1504.42             | 79.06      |

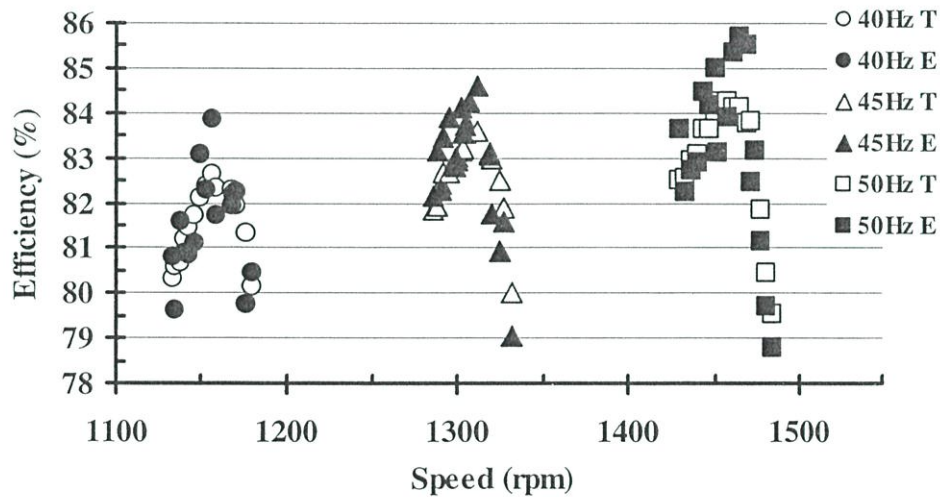
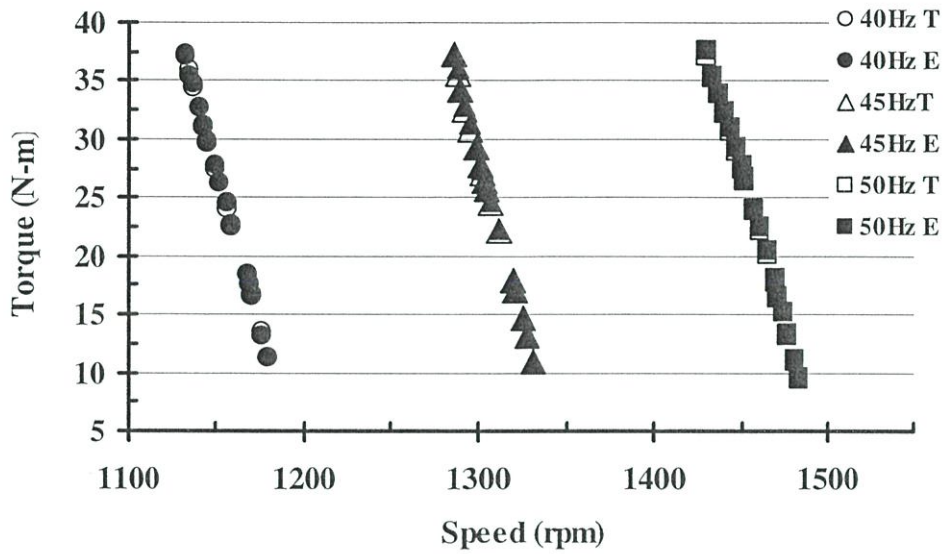
ตารางที่ 3.7 ค่าที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์ขนาด 5.5 kW ที่ความถี่ 50 Hz

| Measurement Data    |                    |                    |                 |                |                     |            | Proposed Technique |                     |            |
|---------------------|--------------------|--------------------|-----------------|----------------|---------------------|------------|--------------------|---------------------|------------|
| $V_{rms}$<br>(volt) | $I_{rms}$<br>(amp) | $P_{in}$<br>(watt) | Torque<br>(N-m) | Speed<br>(rpm) | $P_{out}$<br>(watt) | Eff<br>(%) | Torque<br>(N-m)    | $P_{out}$<br>(watt) | Eff<br>(%) |
| Avg                 | Avg                |                    |                 |                |                     |            |                    |                     |            |
| 247.70              | 11.79              | 6737               | 37.10           | 1430.1         | 5558.32             | 82.50      | 37.62              | 5636.23             | 83.66      |
| 248.31              | 11.28              | 6446               | 35.43           | 1433.3         | 5320.00             | 82.53      | 35.31              | 5301.98             | 82.25      |
| 248.33              | 10.77              | 6158               | 33.95           | 1436.3         | 5108.44             | 82.96      | 33.86              | 5094.90             | 82.74      |
| 248.60              | 10.36              | 5862               | 32.28           | 1439.9         | 4869.33             | 83.07      | 32.21              | 4858.77             | 82.89      |
| 249.01              | 9.94               | 5552               | 30.71           | 1443.4         | 4643.76             | 83.64      | 31.01              | 4689.13             | 84.46      |
| 249.20              | 9.52               | 5264               | 29.04           | 1446.9         | 4401.88             | 83.62      | 29.23              | 4430.68             | 84.17      |
| 248.80              | 9.15               | 4954               | 27.40           | 1450.0         | 4162.19             | 84.02      | 27.72              | 4210.80             | 85.00      |
| 249.40              | 8.96               | 4831               | 26.77           | 1451.5         | 4070.70             | 84.26      | 26.41              | 4015.95             | 83.13      |
| 249.09              | 8.31               | 4349               | 24.00           | 1457.2         | 3663.82             | 84.25      | 23.90              | 3648.55             | 83.89      |
| 249.38              | 8.05               | 4045               | 22.24           | 1460.5         | 3402.83             | 84.12      | 22.56              | 3451.79             | 85.33      |
| 249.93              | 7.75               | 3661               | 20.07           | 1464.5         | 3079.22             | 84.11      | 20.45              | 3137.52             | 85.70      |
| 250.00              | 7.31               | 3253               | 17.71           | 1468.9         | 2725.30             | 83.78      | 18.08              | 2782.24             | 85.53      |
| 249.98              | 6.76               | 3057               | 16.63           | 1470.9         | 2562.59             | 83.83      | 16.36              | 2520.98             | 82.47      |
| 249.95              | 6.55               | 2830               | 15.25           | 1473.4         | 2353.93             | 83.18      | 15.25              | 2353.93             | 83.18      |
| 250.34              | 6.34               | 2510               | 13.28           | 1476.6         | 2054.30             | 81.84      | 13.17              | 2037.29             | 81.17      |
| 248.81              | 5.45               | 2144               | 11.12           | 1480.4         | 1724.60             | 80.44      | 11.02              | 1709.09             | 79.71      |
| 248.58              | 4.94               | 1864               | 9.54            | 1483.5         | 1482.65             | 79.54      | 9.45               | 1468.67             | 78.79      |

จากตารางข้างต้นนำมาพล็อตกราฟโดยแสดงระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบและประสิทธิภาพกับความเร็วรอบของมอเตอร์แต่ละตัวทุกความถี่และภาระทางกลต่างๆ โดยค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธี การทดสอบแบบมีภาระ ใช้อักษรย่อ T และค่าที่ได้จากการประเมินโดยวิธีที่นำเสนอใช้อักษรย่อ E ดังรูปที่ (3.4) ถึง (3.5)



รูปที่ 3.4 แรงบิดและประสิทธิภาพที่ได้จากวิธีทดสอบและที่ได้จากการประเมินประสิทธิภาพด้วยวิธีที่นำเสนอที่ภาระทางกลต่างๆ กันของมอเตอร์ขนาด 2.2 kW



รูปที่ 3.5 แรงบิดและประสิทธิภาพที่ได้จากวิธีทดสอบและที่ได้จากการเฝ้าประสิทธิภาพด้วยวิธีที่นำเสนอที่ภาระทางกลต่าง ๆ กันของมอเตอร์ขนาด 5.5 kW

#### 3.4.4 สรุปผลการทดสอบ

ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 3.2 ถึง 3.7 และรูปที่ 3.4 ถึง 3.5 จะเห็นได้ว่ามีความคลาดเคลื่อนของการประเมินประสิทธิภาพด้วยวิธีที่นำเสนอไม่เกิน 2% เทียบกับวิธีการทดสอบแบบมีภาระ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าวิธีการที่นำเสนอนี้สามารถนำไปใช้ได้จริงในทางปฏิบัติกับมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ โดยไม่รบกวนการทำงานของมอเตอร์ เพียงอาศัยข้อมูลที่วัดได้จริงขณะใช้งานร่วมกับเงินดิคัลกอรีทึมเพื่อประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์

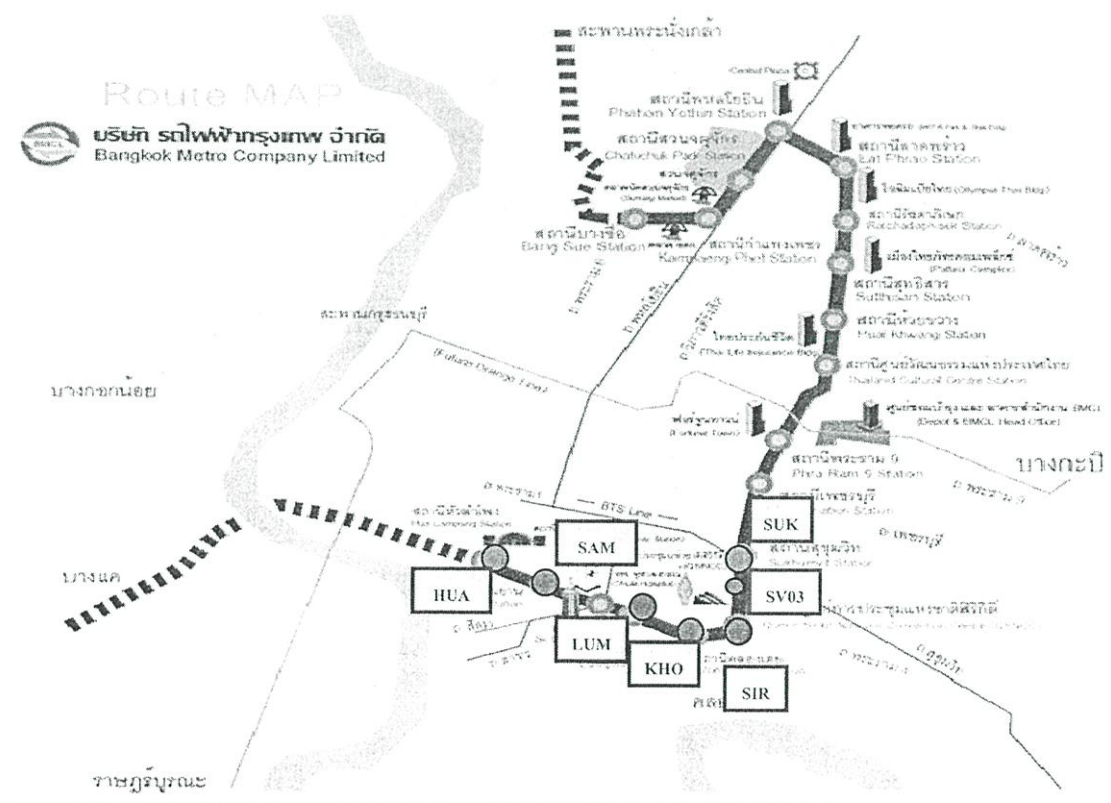
## บทที่ 4

### การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์

### พัฒนาระบายอากาศในอุโมงค์ขณะใช้งาน

#### 4.1 บทนำ

ในบทนี้เป็นการนำวิธีประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัฒนาระบายอากาศในอุโมงค์ขณะใช้งาน (on-site efficiency estimation: OEE) ที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์โดยจเนติกอัลกอริทึม มอเตอร์พัฒนาระบายอากาศนี้ติดตั้งอยู่ภายในสถานีรถไฟใต้ดินจำนวน 4 ตัวต่อหนึ่งสถานี(บาง สถานีประเมินไม่ครบทั้ง 4 ตัว) สถานีที่ทำการวิจัยประกอบไปด้วยสถานีสุขุมวิท (SUK) สถานีหัวลำโพง (HUA) สถานีสามย่าน (SAM) สถานีลุมพินี (LUM) สถานีคลองเตย (KHO) สถานีศูนย์สิริกิติ์ (SIR) และอาคารระบายอากาศระหว่างสถานีศูนย์สิริกิติ์-สุขุมวิท (SV03) ซึ่งอยู่ตามเส้นทางที่ ในแผนที่ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แผนที่เส้นทางสถานีรถไฟใต้ดินที่ทำการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัฒนาระบายอากาศในอุโมงค์

## 4.2 การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัฒนาประสิทธิภาพใช้งาน

ตามที่ได้ทดสอบมอเตอร์ขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการเพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องแม่นยำของวิธีประเมินประสิทธิภาพด้วยวิธีที่นำเสนอกับวิธีการทดสอบแบบมีภาระ นั้นได้ผลลัพธ์ที่นำมาสู่การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัฒนาประสิทธิภาพในอุโมงค์ที่มีการขับเคลื่อนโดยใช้อินเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมแบบควบคุมแรงบิดโดยตรง

### 4.2.1 อุปกรณ์ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์พัฒนาประสิทธิภาพในอุโมงค์

ประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลักต่างๆเหล่านี้

1. มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสซึ่งมีค่าที่ป้ายพิกัดดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 พิกัดของมอเตอร์พัฒนาประสิทธิภาพในอุโมงค์

|                         | 108 kW (145 hp) |
|-------------------------|-----------------|
| Hz                      | 50              |
| V                       | 380             |
| A                       | 205             |
| rpm                     | 985             |
| Pole                    | 6               |
| pf                      | 0.85            |
| Design/Protection class | B5/IP55         |
| Insulation class        | H               |

2. อุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์ (variable speed drive; VSD) ABB type ACS 604-0140-3 ขนาด 140 kVA, 380/400/415 V (ภาคผนวก ค)

3. อุปกรณ์ช่วยในการหยุดหมุนของมอเตอร์ (dynamic brake unit; DBU)

หมายเหตุ : อุปกรณ์ของระบบมอเตอร์พัฒนาประสิทธิภาพนี้จะเหมือนกันทุกสถานี

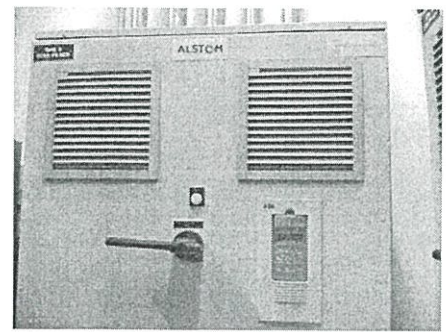
### 4.2.2 เครื่องวัดที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์

ประกอบไปด้วยเครื่องมือวัดต่าง ๆ เหล่านี้

1. เครื่องมือวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้า (three phase power quality analyzer; PQA; Fluke 434; true RMS) (ภาคผนวก ง) ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ก)
2. เครื่องวัดที่อุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์ที่แสดงผลค่าต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ข)



(ก)

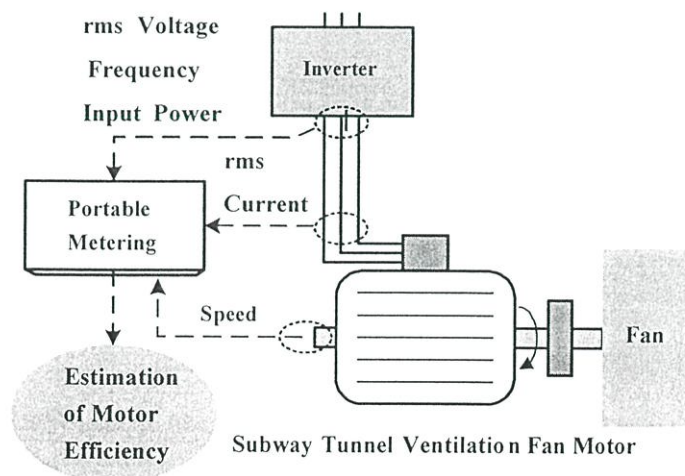


(ข)

รูปที่ 4.2 (ก) เครื่องมือวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้า (ข) เครื่องวัดที่อุปกรณ์ขับเคลื่อน

#### 4.2.3 ขั้นตอนการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ขณะใช้งาน

1. ต่อเครื่องมือวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าเข้าที่ขั้วของมอเตอร์ เครื่องวัดนี้ใช้วัดค่าแรงดันไฟฟ้าประสิทธิผล ( $V_{rms}$ ) กระแสไฟฟ้าประสิทธิผล ( $I_{rms}$ ) กำลังไฟฟ้า ( $P_{in}$ ) เพื่อนำไปเป็นข้อมูลให้กับจีเนติกอัลกอริทึมทำงาน และยังสามารถวัดค่าตัวประกอบกำลัง ( $PF$ ) และฮาร์โมนิก (harmonic) เพื่อนำไปวิเคราะห์ค่าฮาร์โมนิกต่าง ๆ ได้
2. เดินเครื่องเป็นเวลามากกว่า 30 นาที และวัดค่าต่าง ๆ จำนวน 5 ครั้งจาก PQA และเครื่องวัดที่ VSD โดยบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าประสิทธิผล ( $V_{rms}$ ) กระแสไฟฟ้าประสิทธิผล ( $I_{rms}$ ) กำลังไฟฟ้า ( $P_{in}$ ) จาก PQA สำหรับค่าความถี่ ( $f$ ) และความเร็วรอบ (Speed) กำลังทางกล ( $P_{out}$ ) และแรงบิด ( $T_{out}$ ) สามารถอ่านได้จากเครื่องวัดที่ VSD ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การวัดข้อมูลของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์

การบันทึกค่าภายหลังเดินเครื่องไปแล้ว 30 นาทีเนื่องจากเป็นระยะเวลามาตรฐานในการวัดค่าเพื่อการซ่อมบำรุงของมอเตอร์ตามปกติ (ภาคผนวก จ) โดยทำการบันทึกข้อมูลทั้ง 2 ทิศทาง คือ

ขณะจ่ายลมเข้าอุโมงค์ (supply, S) และดูดลมออกจากอุโมงค์ (exhaust, E) ทิศทางละ 5 ครั้ง การทำงานทั้ง 2 ทิศทางนี้มีความเร็วรอบแตกต่างกันขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของอากาศ (flow rate) ที่ออกแบบ ข้อมูลทั้ง 2 ทิศทางนี้จะนำไปประเมินประสิทธิภาพเพื่อจะให้เห็นประสิทธิภาพในย่านการทำงานต่าง ๆ ของมอเตอร์

การแสดงสัญลักษณ์การทำงานของมอเตอร์ทั้ง 2 ทิศทางนั้นจะแสดงควบคู่ไปกับชื่อของพัดลมแต่ละสถานี เช่น สถานีสุขุมวิท มีพัดลมชื่อว่า F700 เมื่อทำการบันทึกค่าของมอเตอร์พัดลมตัวนี้ในทิศทางทำงานแบบจ่ายลมเข้าอุโมงค์จะใช้ชื่อว่า **F700S** และหากทำการบันทึกค่าในทิศทางดูดลมออกจากอุโมงค์จะใช้ชื่อว่า **F700E** เป็นต้น ค่าที่วัดได้ของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศในสถานีสุขุมวิทแสดงไว้ดังตารางที่ 4.2 (ดูข้อมูลที่วัดได้จาก PQA ภาคผนวก ก)

ตารางที่ 4.2 ค่าที่วัดได้จากมอเตอร์พัดลมระบายอากาศ F700 สถานีสุขุมวิท

|                          |     | F700S         | 1st    | 2nd    | 3rd    | 4th    | 5th    |
|--------------------------|-----|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| On-site Measurement Data | PQA | $V_{rms}$ (V) | 382.80 | 381.67 | 380.80 | 382.21 | 381.73 |
|                          |     | $I_{rms}$ (A) | 174.90 | 174.70 | 175.70 | 176.00 | 176.20 |
|                          |     | $P_{in}$ (kW) | 89.70  | 90.60  | 89.80  | 90.20  | 90.40  |
|                          | VSD | Speed (rpm)   | 1014.6 | 1014.6 | 1014.6 | 1014.6 | 1014.6 |
|                          |     | $f$ (Hz)      | 51.31  | 51.31  | 51.31  | 51.31  | 51.31  |
|                          |     | $P_{out}$ (%) | 78.64  | 78.81  | 77.59  | 79.95  | 79.97  |
|                          |     | $T_{out}$ (%) | 76.34  | 76.51  | 76.42  | 77.61  | 77.63  |

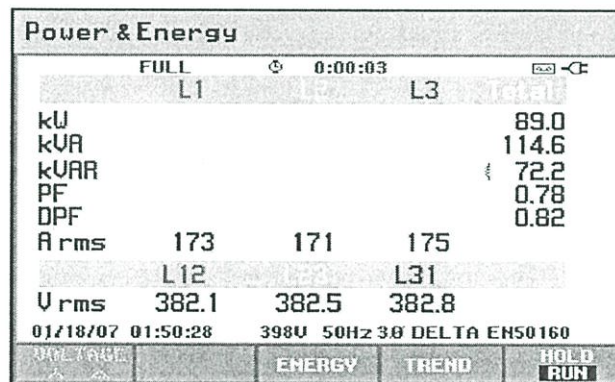
|                          |     | F700E         | 1st    | 2nd    | 3rd    | 4th    | 5th    |
|--------------------------|-----|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| On-site Measurement Data | PQA | $V_{rms}$ (V) | 357.48 | 358.41 | 358.43 | 358.06 | 357.52 |
|                          |     | $I_{rms}$ (A) | 137.50 | 138.30 | 137.50 | 137.70 | 136.90 |
|                          |     | $P_{in}$ (kW) | 57.60  | 58.00  | 57.60  | 57.70  | 57.20  |
|                          | VSD | Speed (rpm)   | 880.0  | 880.0  | 880.0  | 880.0  | 880.0  |
|                          |     | $f$ (Hz)      | 44.38  | 44.38  | 44.38  | 44.38  | 44.38  |
|                          |     | $P_{out}$ (%) | 49.47  | 49.97  | 50.09  | 50.15  | 49.62  |
|                          |     | $T_{out}$ (%) | 55.37  | 55.93  | 56.06  | 56.13  | 55.54  |

3. ทำการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์โดยใช้ข้อมูลทางไฟฟ้าที่ได้จากการวัดจริงขณะใช้งาน คือ แรงดันไฟฟ้าประสิทธิภาพ กระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพ กำลังไฟฟ้า ความถี่ และข้อมูลทางกลคือความเร็วรอบมอเตอร์ดังรูปที่ 4.3 ประมวลผลร่วมกับวิธีการหาค่าที่

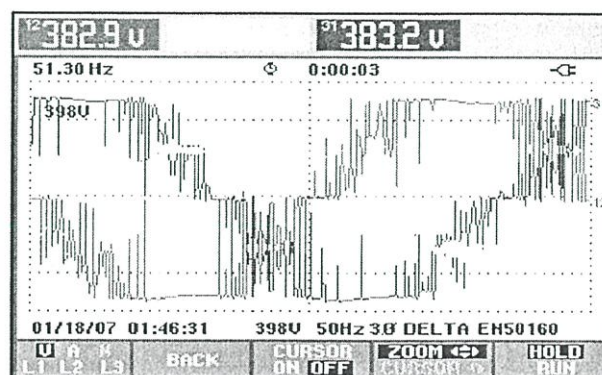
เหมาะสมแบบจินตคณิตออลกอริทึม ซึ่งเป็นหลักการประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรสมมูลที่เหมาะสมดังรูปที่ 3.1 จากวงจรสมมูลนี้จะทำการหาค่ากระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพที่คำนวณได้ ( $I_{rms,cal}$ ) และกำลังไฟฟ้าที่คำนวณได้ ( $P_{in,cal}$ ) ที่มีค่าใกล้เคียงกับค่ากระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพที่วัดได้จริง ( $I_{rms,mea}$ ) และกำลังไฟฟ้าที่วัดได้จริง ( $P_{in,mea}$ ) ซึ่งจะทำให้สมการเป้าหมาย (objective function) ในสมการที่ (3.2) มีค่าต่ำที่สุด โดยกระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพที่คำนวณได้ และกำลังไฟฟ้าที่คำนวณได้สามารถหาได้จากสมการที่ (3.9), (3.10) ตามลำดับ สำหรับการประเมินประสิทธิภาพขณะใช้งานจริงหาได้จากสมการที่ (3.14)

#### 4.2.4 วิเคราะห์ค่าที่ได้จากเครื่องมือวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้า

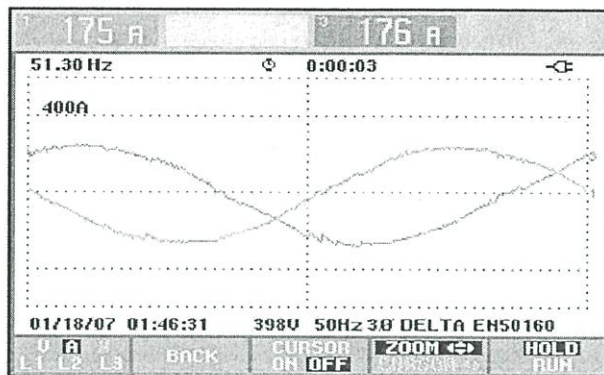
ค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าสามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบคุณลักษณะประกอบต่าง ๆ ของข้อมูลที่ได้จากมอเตอร์พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์ในที่นี้ยกตัวอย่างมอเตอร์พัดลมระบายอากาศสถานีสุขุมวิทชื่อว่า F700 ทำงานแบบจ่ายลมเข้าอุโมงค์ (F700S) แสดงดังรูปที่ 4.4 ถึง 4.8



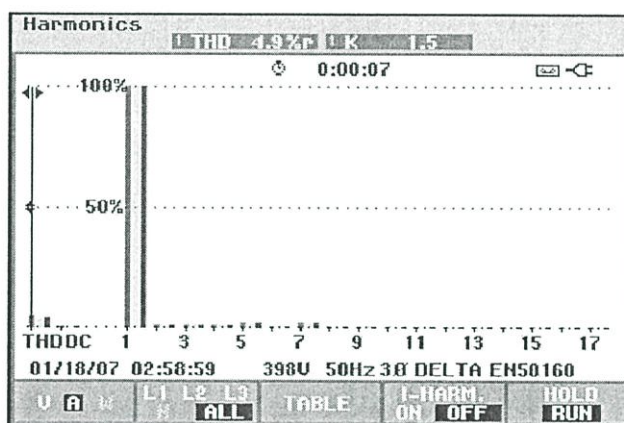
รูปที่ 4.4 ค่ากำลังไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าประสิทธิภาพของมอเตอร์พัดลม F700S



รูปที่ 4.5 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์พัดลม F700S



รูปที่ 4.6 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้ามอเตอร์พัดลม F700S



รูปที่ 4.7 กราฟแท่งของฮาร์โมนิกของกระแสไฟฟ้ามอเตอร์พัดลม F700S

| HARMONICS TABLE |     |     |     |
|-----------------|-----|-----|-----|
|                 | L1  | L2  | L3  |
| THD%r           | 4.9 | 4.7 | 4.9 |
| H3%r            | 1.5 | 1.5 | 1.3 |
| H5%r            | 2.1 | 1.7 | 2.2 |
| H7%r            | 2.4 | 2.2 | 2.0 |
| H9%r            | 0.9 | 0.8 | 0.8 |
| H11%r           | 0.7 | 0.8 | 0.8 |
| H13%r           | 1.0 | 1.0 | 0.9 |
| H15%r           | 0.5 | 0.6 | 0.5 |

รูปที่ 4.8 ตารางค่าฮาร์โมนิกของกระแสไฟฟ้ามอเตอร์พัดลม F700S

จากนั้นทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้า เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ของค่าที่อ่านได้จากรูปที่ 4.4 ถึง 4.8 เช่น กระแสประสิทธิผล ( $I_{rms}$ ) และ กระแสหลัก

มูล ( $I_{fundamental}$ ) หรือ ( $I_{1,rms}$ ) ซึ่งสัมพันธ์กับฮาร์โมนิกของกระแส ( $THD_I$ ) [18] โดยสามารถตรวจสอบได้ตามสมการที่ (4.1)

$$I_{rms} = I_{1,rms} \sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100}\right)^2} \quad (4.1)$$

สำหรับค่าฮาร์โมนิกของแรงดัน ( $THD_V$ ) ใช้สมการที่ (4.2) ในการหาค่าโดยอาศัยความสัมพันธ์กับค่าต่างๆที่วัดดังนี้

$$PF \approx DPF \times \left( \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{THD_V}{100}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100}\right)^2}} \right) \quad (4.2)$$

โดย  $PF$  หมายถึงค่าตัวประกอบกำลัง

$DPF$  หมายถึงค่าตัวประกอบกำลัง displacement

จากสมการที่ (4.2) สามารถคำนวณค่าฮาร์โมนิกของแรงดันโดยใช้ข้อมูลที่ตรวจวัดได้ ผลลัพธ์ประมาณ 32 % ซึ่งเครื่องมีวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้า แสดงผลในส่วนนี้ออกมาไม่ตรงกับการคำนวณเนื่องจากขีดจำกัดของเครื่องวัดในการคำนวณค่าฮาร์โมนิกในลำดับสูง ๆ จึงต้องอาศัยการคำนวณตรวจสอบ การหาค่าฮาร์โมนิกของแรงดันยังสามารถหาได้จากสมการที่ (4.3) อีกวิธีหนึ่งโดยอาศัยความสัมพันธ์ของแรงดันประสิทธิผล ( $V_{rms}$ ) แรงดันหลักมูล ( $V_{1,rms}$ )

$$V_{rms} = V_{1,rms} \sqrt{1 + \left(\frac{THD_V}{100}\right)^2} \quad (4.3)$$

การวิเคราะห์ข้อมูลดังกล่าวทำให้ทราบว่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์มีฮาร์โมนิกปะปนอยู่โดยแรงดันไฟฟ้ามีค่า  $THD_V$  ประมาณ 32% สำหรับกระแสไฟฟ้ามีค่า  $THD_I$  ประมาณ 4.9 % ดังนั้นจึงเห็นได้ว่ารูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าจะไม่เป็นรูปคลื่นซายนด์ (non-sinusoidal) ซึ่งแตกต่างจากรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นรูปคลื่นซายนด์มากกว่า

#### 4.2.5 การเปรียบเทียบกำลังทางกลของมอเตอร์พัดลม F700

เมื่อนำข้อมูลที่ได้ไปประมวลผลตามวิธีที่นำเสนอเพื่อประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ขณะใช้งาน (OEE) จะได้ค่ากำลังทางกลของมอเตอร์ ( $P_{out}$ ) ออกมา จึงทำการเปรียบเทียบกับค่ากำลังทางกลของมอเตอร์ที่อ่านได้จากอุปกรณ์ขับเคลื่อน (VSD) ในเวลาที่ใกล้เคียงกันพบว่ามีความใกล้เคียงกัน ผลลัพธ์แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบกำลังทางกลของมอเตอร์พัฒนาบรรยากาศ F700 สถานีสูบน้ำ

| F700S          |     | 1st   | 2nd   | 3rd   | 4th   | 5th   |
|----------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| $P_{out}$ (kW) | VSD | 84.93 | 85.11 | 83.80 | 86.35 | 86.37 |
|                | OEE | 86.06 | 85.60 | 84.62 | 85.74 | 85.37 |
|                | CM  | 92.82 | 92.44 | 92.76 | 93.26 | 93.25 |

| F700E          |     | 1st   | 2nd   | 3rd   | 4th   | 5th   |
|----------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| $P_{out}$ (kW) | VSD | 53.43 | 53.97 | 54.10 | 54.16 | 53.59 |
|                | OEE | 53.30 | 54.15 | 53.85 | 53.72 | 53.33 |
|                | CM  | 68.15 | 68.72 | 68.33 | 68.36 | 67.86 |

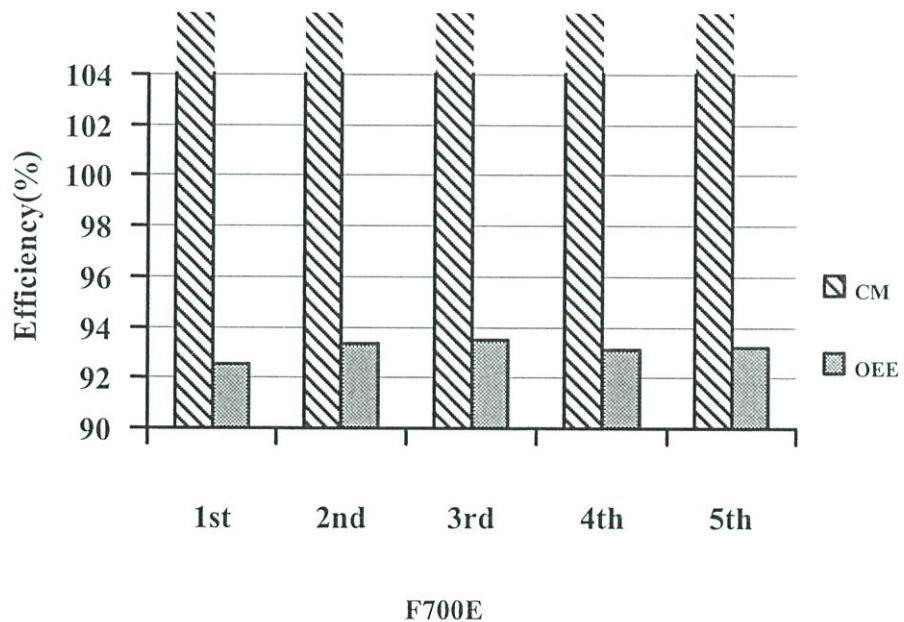
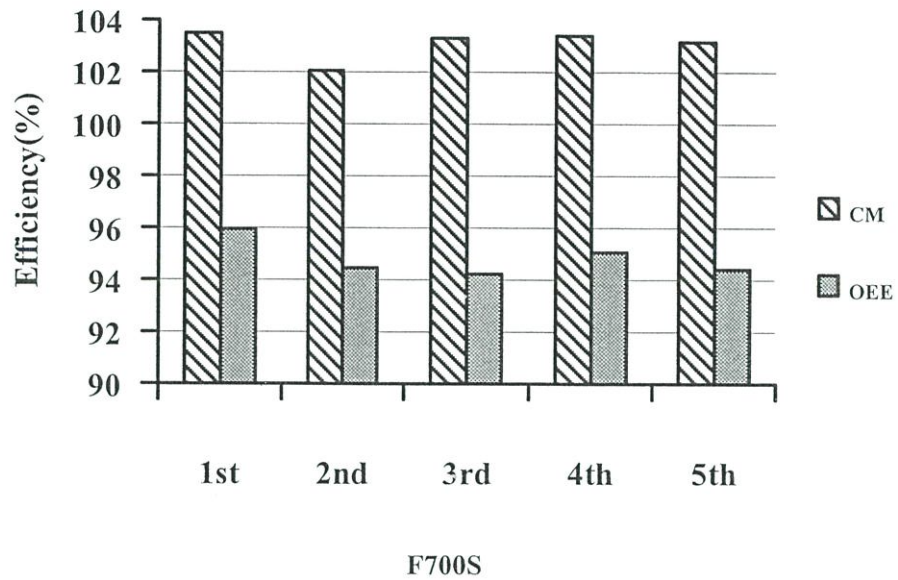
#### 4.2.6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพมอเตอร์ F700 โดยวิธีที่นำเสนอกับวิธีการใช้ค่ากระแสไฟฟ้า

เมื่อนำกำลังทางกลของมอเตอร์ที่ได้จากวิธีที่นำเสนอไปหาประสิทธิภาพ (efficiency; Eff) และเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพที่ได้จากวิธีการใช้ค่ากระแสไฟฟ้า พบว่าวิธีการใช้ค่ากระแสไฟฟ้า จะหาค่าประสิทธิภาพได้สูงกว่าความเป็นจริง สำหรับวิธีการใช้ค่ากระแสไฟฟ้า ที่ใช้กระแสขณะไม่มีภาระ (no load) มาร่วมคำนวณด้วยไม่สามารถนำมาใช้ได้เนื่องจากเป็นกระแสขณะไม่มีภาระที่ความถี่ตามปกติตามป้ายพิกัดแต่เมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ที่มีการปรับความถี่และแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์ จะนำค่าที่ป้ายพิกัดมาใช้ในการคำนวณไม่ได้ ประสิทธิภาพที่ประเมินออกมาแสดงดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพที่หาได้จากวิธีที่นำเสนอ นั้นมีค่าที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติ (ค่าประสิทธิภาพที่เต็มพิกัดของมอเตอร์จากป้ายพิกัดมีค่าประมาณ 94 %) แต่สำหรับวิธีการใช้ค่ากระแสไฟฟ้านั้นได้ค่าสูงเกินความเป็นจริง

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์พัฒนาบรรยากาศ F700 สถานีสูบน้ำ

| F700S   |     | 1st    | 2nd    | 3rd    | 4th    | 5th    |
|---------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|
| Eff (%) | CM  | 103.48 | 102.03 | 103.29 | 103.39 | 103.15 |
|         | OEE | 95.95  | 94.48  | 94.23  | 95.06  | 94.43  |

| F700E   |     | 1st    | 2nd    | 3rd    | 4th    | 5th    |
|---------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|
| Eff (%) | CM  | 118.31 | 118.48 | 118.62 | 118.47 | 118.63 |
|         | OEE | 92.54  | 93.37  | 93.48  | 93.11  | 93.23  |



รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบการประเมินประสิทธิภาพขณะใช้งานจริงของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศ F700 สถานีสุขุมวิท

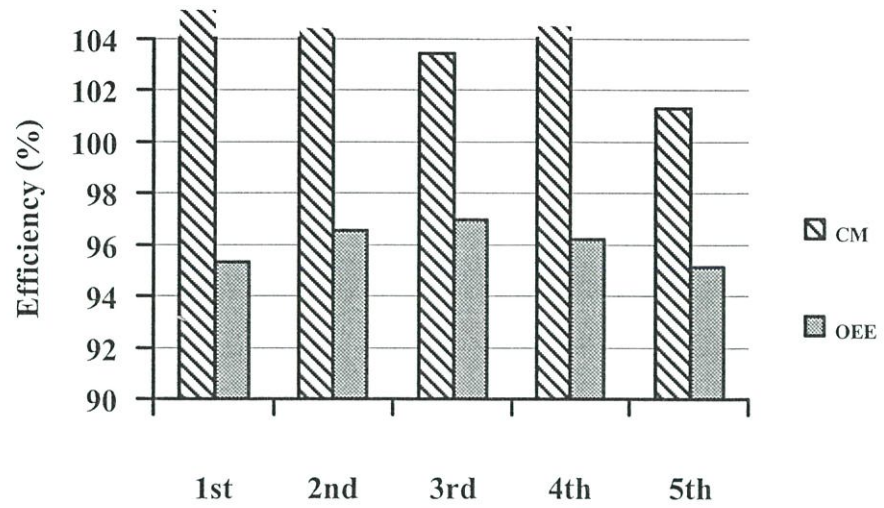
#### 4.3 การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศตัวอื่น ๆ ในสถานีสุขุมวิท

จากที่ได้ทำการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศ F700 ในสถานีสุขุมวิท แล้วจึงได้ดำเนินการกับมอเตอร์พัดลมระบายอากาศที่เหลืออีก 3 ตัวในสถานีคือ F701, F750 และ F751 ผลการตรวจวัดค่าทางไฟฟ้าและทางกลของมอเตอร์ และการประมวลผลหาค่าลังทางกล รวมถึงการหาค่าประสิทธิภาพแสดงไว้ดังตารางที่ 4.5 ถึง 4.7 และรูปที่ 4.10 ถึง 4.12

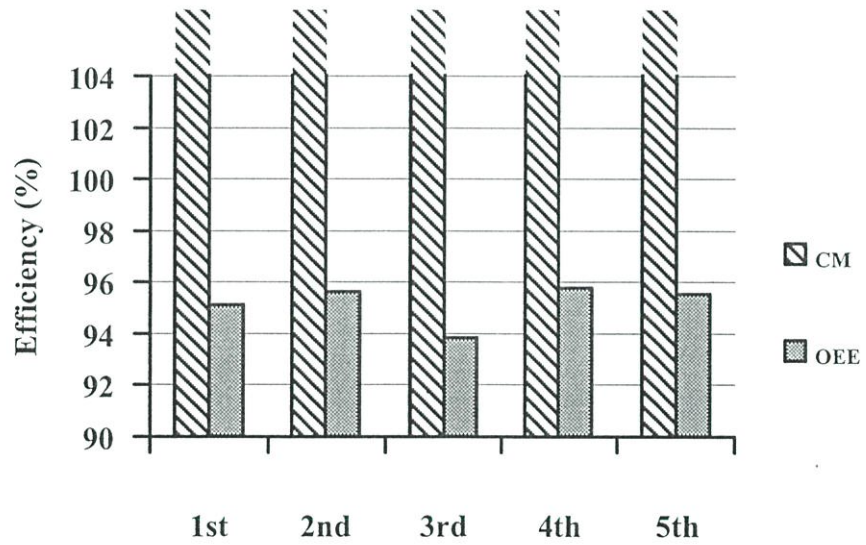
ตารางที่ 4.5 ข้อมูลที่ตรวจวัดและการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศ F701  
สถานีสุขุมวิท

| <b>F701S</b>                |               | 1st    | 2nd    | 3rd    | 4th    | 5th    |
|-----------------------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| On-site Measurement<br>Data | $V_{rms}$ (V) | 381.02 | 380.57 | 381.30 | 381.00 | 378.17 |
|                             | $I_{rms}$ (A) | 164.80 | 168.40 | 167.10 | 168.40 | 177.80 |
|                             | $P_{in}$ (kW) | 82.80  | 85.10  | 85.40  | 85.10  | 92.00  |
|                             | Speed (rpm)   | 1014.6 | 1014.6 | 1014.6 | 1014.6 | 1014.6 |
|                             | $f$ (Hz)      | 51.27  | 51.27  | 51.27  | 51.27  | 51.27  |
| $P_{out}$ (kW)              | <b>VSD</b>    | 78.96  | 82.40  | 82.58  | 80.41  | 87.07  |
|                             | <b>OEE</b>    | 78.92  | 82.15  | 82.81  | 81.88  | 87.53  |
|                             | <b>CM</b>     | 87.05  | 88.85  | 88.33  | 88.95  | 93.22  |
| <b>Eff (%)</b>              | <b>CM</b>     | 105.14 | 104.41 | 103.44 | 104.53 | 101.33 |
|                             | <b>OEE</b>    | 95.31  | 96.53  | 96.97  | 96.22  | 95.15  |

| <b>F701E</b>                |               | 1st    | 2nd    | 3rd    | 4th    | 5th    |
|-----------------------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| On-site Measurement<br>Data | $V_{rms}$ (V) | 355.82 | 357.65 | 357.56 | 354.95 | 356.79 |
|                             | $I_{rms}$ (A) | 143.10 | 144.40 | 144.80 | 143.40 | 144.20 |
|                             | $P_{in}$ (kW) | 60.60  | 61.40  | 61.60  | 60.60  | 61.20  |
|                             | Speed (rpm)   | 880.0  | 880.0  | 880.0  | 880.0  | 880.0  |
|                             | $f$ (Hz)      | 44.38  | 44.38  | 44.38  | 44.38  | 44.38  |
| $P_{out}$ (kW)              | <b>VSD</b>    | 57.59  | 58.45  | 57.64  | 57.89  | 57.99  |
|                             | <b>OEE</b>    | 57.65  | 58.73  | 57.82  | 58.06  | 58.47  |
|                             | <b>CM</b>     | 70.59  | 71.60  | 71.78  | 70.57  | 71.33  |
| <b>Eff (%)</b>              | <b>CM</b>     | 116.49 | 116.61 | 116.53 | 116.45 | 116.55 |
|                             | <b>OEE</b>    | 95.13  | 95.64  | 93.86  | 95.80  | 95.53  |



F701S



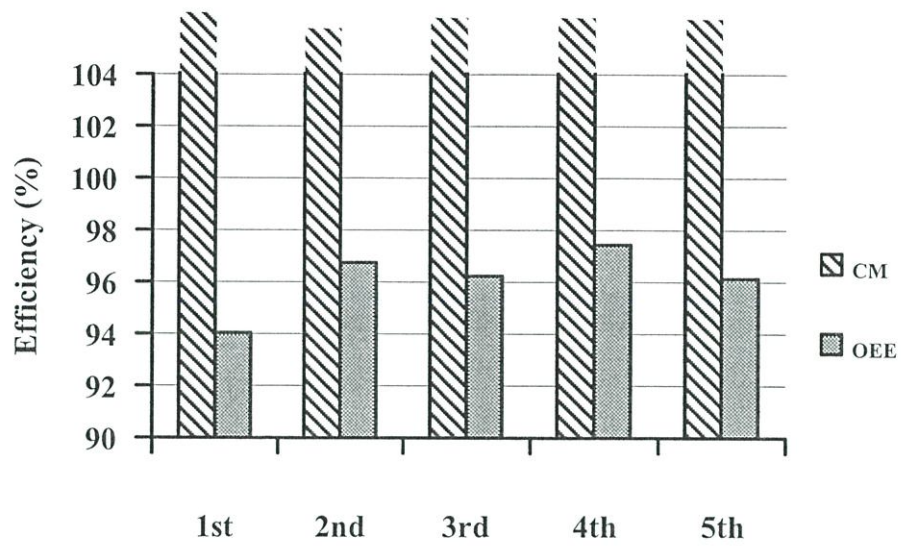
F701E

รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบการประเมินประสิทธิภาพขณะใช้งานจริงของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศ F701 สถานีสุขุมวิท

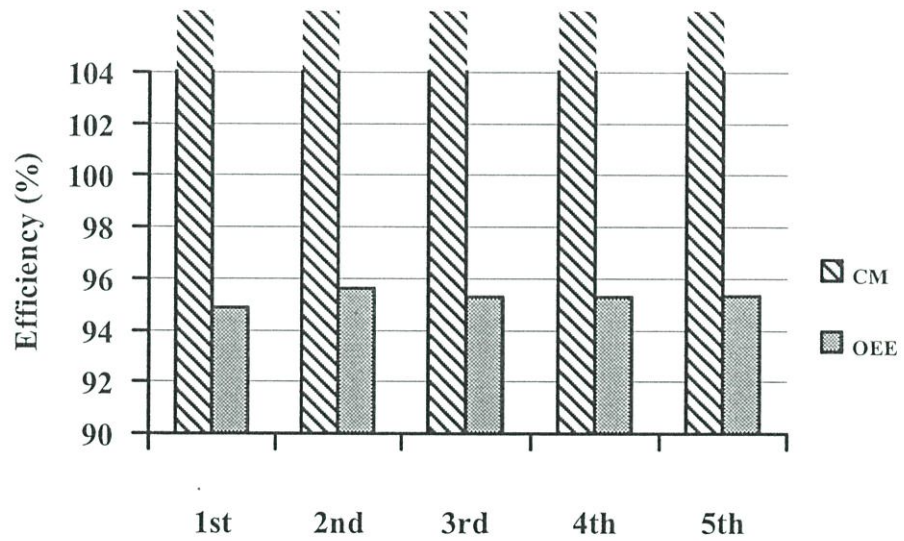
ตารางที่ 4.6 ข้อมูลที่ตรวจวัดและการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศ F750  
สถานีสูบน้ำวิท

| <b>F750S</b>                |               | 1st    | 2nd    | 3rd    | 4th    | 5th    |
|-----------------------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| On-site Measurement<br>Data | $V_{rms}$ (V) | 382.40 | 381.41 | 382.44 | 382.01 | 382.36 |
|                             | $I_{rms}$ (A) | 171.30 | 176.40 | 174.00 | 173.00 | 174.00 |
|                             | $P_{in}$ (kW) | 85.10  | 88.20  | 86.90  | 86.30  | 86.90  |
|                             | Speed (rpm)   | 999.9  | 999.9  | 999.9  | 999.9  | 999.9  |
|                             | $f$ (Hz)      | 50.48  | 50.48  | 50.48  | 50.48  | 50.48  |
| $P_{out}$ (kW)              | <b>VSD</b>    | 79.93  | 84.66  | 84.21  | 83.39  | 83.99  |
|                             | <b>OEE</b>    | 80.03  | 85.32  | 83.62  | 84.09  | 83.54  |
|                             | <b>CM</b>     | 90.82  | 93.28  | 92.26  | 91.62  | 92.24  |
| <b>Eff (%)</b>              | <b>CM</b>     | 106.72 | 105.76 | 106.16 | 106.17 | 106.14 |
|                             | <b>OEE</b>    | 94.04  | 96.73  | 96.22  | 97.44  | 96.13  |

| <b>F750E</b>                |               | 1st    | 2nd    | 3rd    | 4th    | 5th    |
|-----------------------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| On-site Measurement<br>Data | $V_{rms}$ (V) | 358.10 | 357.95 | 358.00 | 358.41 | 358.28 |
|                             | $I_{rms}$ (A) | 135.60 | 135.40 | 135.00 | 136.00 | 136.00 |
|                             | $P_{in}$ (kW) | 55.40  | 55.30  | 55.20  | 55.60  | 55.60  |
|                             | Speed (rpm)   | 880.0  | 880.0  | 880.0  | 880.0  | 880.0  |
|                             | $f$ (Hz)      | 44.37  | 44.37  | 44.37  | 44.37  | 44.37  |
| $P_{out}$ (kW)              | <b>VSD</b>    | 52.21  | 52.38  | 52.23  | 52.28  | 52.19  |
|                             | <b>OEE</b>    | 52.55  | 52.88  | 52.61  | 52.98  | 53.01  |
|                             | <b>CM</b>     | 67.32  | 67.19  | 67.00  | 67.58  | 67.55  |
| <b>Eff (%)</b>              | <b>CM</b>     | 121.52 | 121.51 | 121.38 | 121.54 | 121.50 |
|                             | <b>OEE</b>    | 94.86  | 95.63  | 95.31  | 95.29  | 95.34  |



F750S



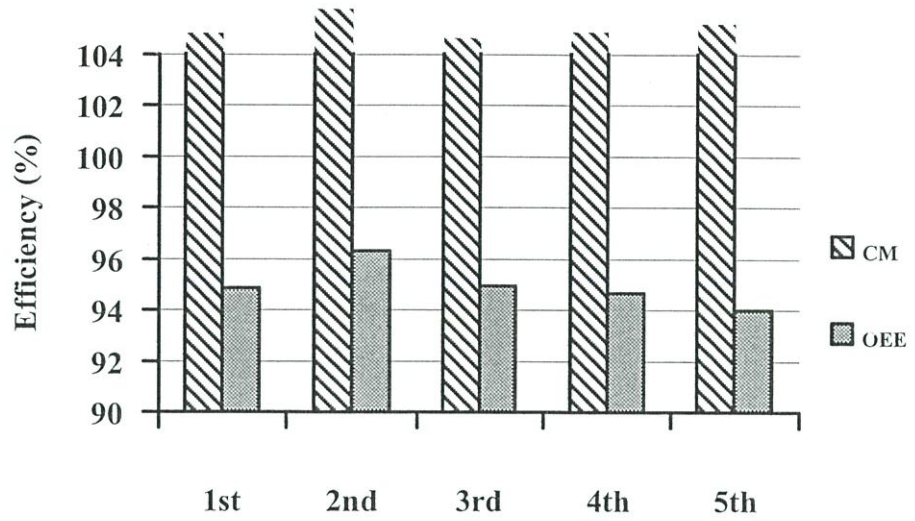
F750E

รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบการประเมินประสิทธิภาพขณะใช้งานจริงของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศ F750 สถานีสุภูมิวิท

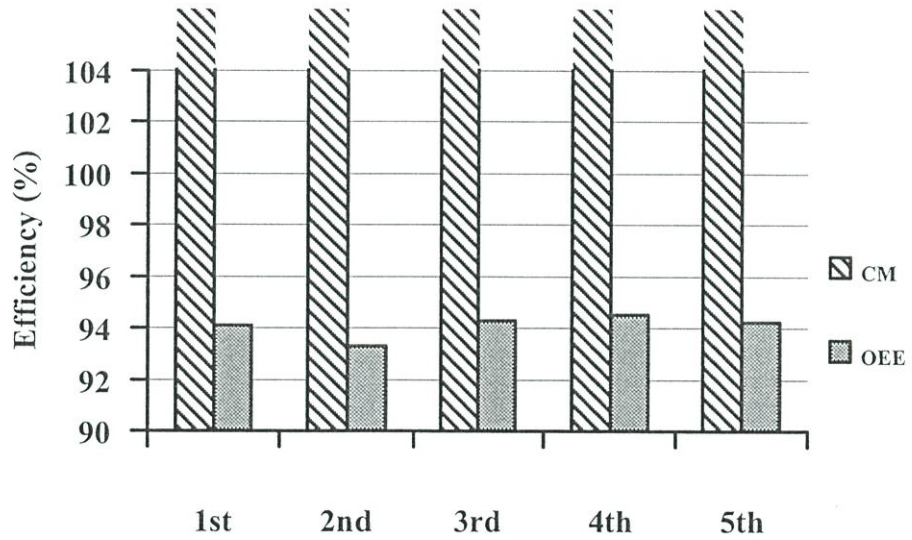
ตารางที่ 4.7 ข้อมูลที่ตรวจวัดและการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศ F751  
สถานีสูบน้ำ

| <b>F751S</b>                |               | 1st    | 2nd    | 3rd    | 4th    | 5th    |
|-----------------------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| On-site Measurement<br>Data | $V_{rms}$ (V) | 383.16 | 384.49 | 382.47 | 383.37 | 383.85 |
|                             | $I_{rms}$ (A) | 175.70 | 171.30 | 175.90 | 174.70 | 173.40 |
|                             | $P_{in}$ (kW) | 89.00  | 86.30  | 89.10  | 88.50  | 87.70  |
|                             | Speed (rpm)   | 1009.5 | 1009.5 | 1009.5 | 1009.5 | 1009.5 |
|                             | $f$ (Hz)      | 51.03  | 51.03  | 51.03  | 51.03  | 51.03  |
| $P_{out}$ (kW)              | <b>VSD</b>    | 83.73  | 82.78  | 84.81  | 83.27  | 81.94  |
|                             | <b>OEE</b>    | 84.42  | 83.11  | 84.62  | 83.77  | 82.45  |
|                             | <b>CM</b>     | 93.33  | 91.31  | 93.27  | 92.85  | 92.28  |
| <b>Eff (%)</b>              | <b>CM</b>     | 104.87 | 105.81 | 104.68 | 104.92 | 105.22 |
|                             | <b>OEE</b>    | 94.85  | 96.30  | 94.97  | 94.65  | 94.01  |

| <b>F751E</b>                |               | 1st    | 2nd    | 3rd    | 4th    | 5th    |
|-----------------------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| On-site Measurement<br>Data | $V_{rms}$ (V) | 349.77 | 349.56 | 348.20 | 350.90 | 348.57 |
|                             | $I_{rms}$ (A) | 135.60 | 135.20 | 135.20 | 136.20 | 135.20 |
|                             | $P_{in}$ (kW) | 55.00  | 54.80  | 54.60  | 55.30  | 54.60  |
|                             | Speed (rpm)   | 880.0  | 880.0  | 880.0  | 880.0  | 880.0  |
|                             | $f$ (Hz)      | 44.41  | 44.41  | 44.41  | 44.41  | 44.41  |
| $P_{out}$ (kW)              | <b>VSD</b>    | 50.65  | 51.18  | 51.94  | 51.18  | 51.74  |
|                             | <b>OEE</b>    | 51.76  | 51.13  | 51.47  | 52.27  | 51.46  |
|                             | <b>CM</b>     | 65.75  | 65.52  | 65.27  | 66.26  | 65.34  |
| <b>Eff (%)</b>              | <b>CM</b>     | 119.55 | 119.57 | 119.54 | 119.82 | 119.66 |
|                             | <b>OEE</b>    | 94.11  | 93.31  | 94.27  | 94.51  | 94.25  |



F751S



F751E

รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบการประเมินประสิทธิภาพขณะใช้งานจริงของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศ F751 สถานีสุขุมวิท

ผลลัพธ์การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศที่สถานีสูบบุหรี่ขณะใช้งานจริงที่ได้มาทั้งหมดนี้ จะเห็นได้ว่าถึงแม้จะทำการสูบบันทีกค่าเพื่อมาประมวลผล 5 ครั้งของทั้ง 2 จุดทำงานของมอเตอร์ ผลที่ได้ก็ยังคงออกมาในทิศทางเดียวกันไม่แตกต่างกันมาก แสดงถึงความแม่นยำในการนำไปใช้งานของวิธีที่นำเสนอ โดยมีสิ่งจำเป็นคือข้อมูลที่วัดได้เพื่อนำไปประมวลผลนั้นต้องมีความถูกต้องแม่นยำ ค่าประสิทธิภาพที่ได้จึงจะไม่แปรปรวน

และเมื่อเปรียบเทียบกำลังทางกลของมอเตอร์จะเห็นว่าวิธีที่นำเสนอมีค่าใกล้เคียงกับกำลังทางกลที่ได้จากอุปกรณ์ขับเคลื่อนมากกว่าวิธีการใช้ค่ากระแสไฟฟ้า และเมื่อนำค่าที่ได้ไปหาประสิทธิภาพก็จะเห็นว่าวิธีที่นำเสนอมีความแม่นยำในการนำไปใช้ประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ขณะใช้งานจริงมากกว่าวิธีการใช้ค่ากระแสไฟฟ้า

#### 4.4 การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศในสถานีอื่นๆ

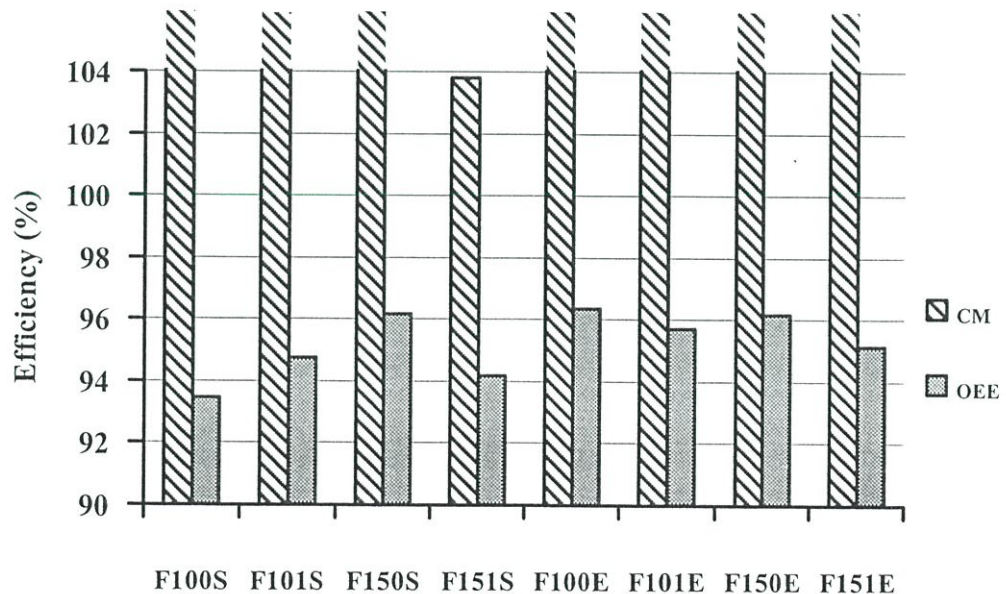
เมื่อการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ด้วยวิธีที่นำเสนอมีความแม่นยำในการนำไปประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ขณะใช้งานจริง จึงได้ดำเนินการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศในสถานีอื่นๆ โดยทำการประมวลผลหาประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมแต่ละตัวโดยใช้ข้อมูลเพียงชุดเดียว ภายหลังจากเดินมอเตอร์เป็นเวลามากกว่า 30 นาที ได้ผลดังนี้

#### 4.4.1 สถานีหัวลำโพง

ผลการตรวจวัดและบันทึกค่าทางไฟฟ้าและทางกลพร้อมทั้งการเปรียบเทียบกำลังทางกลและประสิทธิภาพที่ได้จากวิธีต่าง ๆ แสดงไว้ดังตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.13

ตารางที่ 4.8 ค่าที่วัดได้และการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัฒนาระบายอากาศสถานีหัวลำโพง

| สถานีหัวลำโพง            |               | F100S  | F101S  | F150S  | F151S  | F100E  | F101E  | F150E  | F151E  |
|--------------------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| On-site Measurement Data | $V_{rms}$ (V) | 367.00 | 373.00 | 368.00 | 370.00 | 340.00 | 330.00 | 337.40 | 339.00 |
|                          | $I_{rms}$ (A) | 177.00 | 172.00 | 160.00 | 170.00 | 145.00 | 135.00 | 144.22 | 145.00 |
|                          | $P_{in}$ (kW) | 84.00  | 84.00  | 75.38  | 84.00  | 61.56  | 53.45  | 59.59  | 61.98  |
|                          | Speed (rpm)   | 1010.0 | 1010.0 | 1000.0 | 1015.0 | 880.0  | 880.0  | 880.0  | 880.0  |
|                          | $f$ (Hz)      | 51.04  | 51.02  | 50.45  | 51.27  | 44.37  | 44.35  | 44.38  | 44.37  |
| $P_{out}$ (kW)           | VSD           | 79.92  | 78.84  | 72.36  | 78.84  | 58.32  | 51.84  | 57.62  | 58.32  |
|                          | OEE           | 78.51  | 79.60  | 72.50  | 79.11  | 59.33  | 51.16  | 57.31  | 58.97  |
|                          | CM            | 90.06  | 88.95  | 81.63  | 87.20  | 68.35  | 61.76  | 67.46  | 68.15  |
| Eff (%)                  | CM            | 107.21 | 105.89 | 108.29 | 103.81 | 111.02 | 115.56 | 113.20 | 109.96 |
|                          | OEE           | 93.46  | 94.76  | 96.17  | 94.18  | 96.37  | 95.72  | 96.17  | 95.14  |



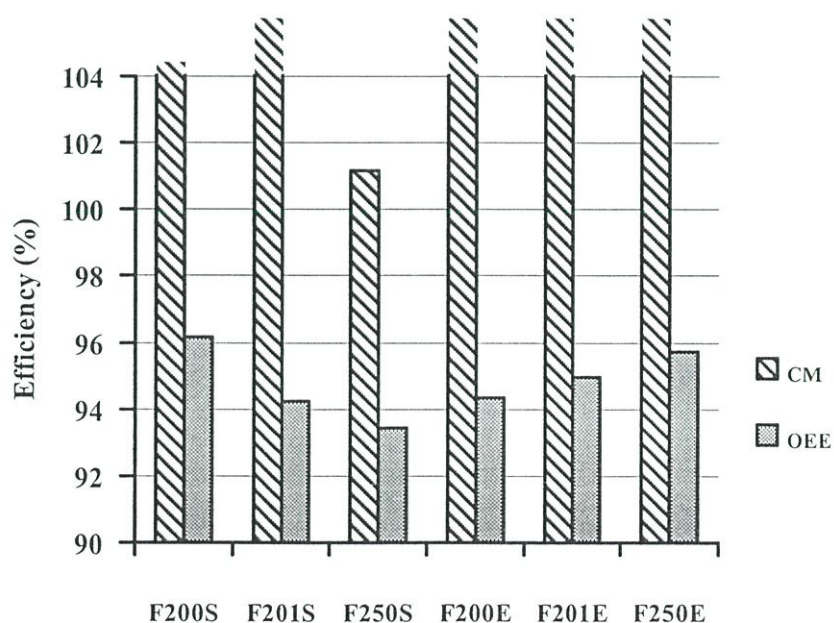
รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบการประเมินประสิทธิภาพขณะใช้งานจริงของมอเตอร์พัฒนาระบายอากาศสถานีหัวลำโพง

#### 4.4.2 สถานีสามย่าน

ผลการตรวจวัดและบันทึกค่าทางไฟฟ้าและทางกลพร้อมทั้งการเปรียบเทียบกำลังทางกลและประสิทธิภาพที่ได้จากวิธีต่าง ๆ แสดงไว้ดังตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.14

ตารางที่ 4.9 ค่าที่วัดได้และการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัฒนาบาระบายอากาศสถานีสามย่าน

| สถานีสามย่าน             |               | F200S  | F201S  | F250S  | F200E  | F201E  | F250E  |
|--------------------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| On-site Measurement Data | $V_{rms}$ (V) | 370.00 | 370.00 | 370.00 | 345.00 | 336.00 | 320.00 |
|                          | $I_{rms}$ (A) | 171.00 | 174.00 | 201.00 | 150.00 | 145.00 | 146.00 |
|                          | $P_{in}$ (kW) | 84.00  | 84.00  | 101.92 | 62.55  | 58.41  | 61.15  |
|                          | Speed (rpm)   | 1015.0 | 1015.0 | 1015.0 | 880.0  | 880.0  | 880.0  |
|                          | $f$ (Hz)      | 51.27  | 51.27  | 51.38  | 44.39  | 44.38  | 44.40  |
| $P_{out}$ (kW)           | VSD           | 80.46  | 81.00  | 95.58  | 60.48  | 56.16  | 57.78  |
|                          | OEE           | 80.79  | 79.16  | 95.23  | 59.03  | 55.47  | 58.54  |
|                          | CM            | 87.72  | 89.26  | 103.11 | 71.75  | 67.55  | 64.77  |
| Eff (%)                  | CM            | 104.43 | 106.26 | 101.16 | 114.70 | 115.64 | 105.92 |
|                          | OEE           | 96.18  | 94.24  | 93.44  | 94.37  | 94.97  | 95.73  |



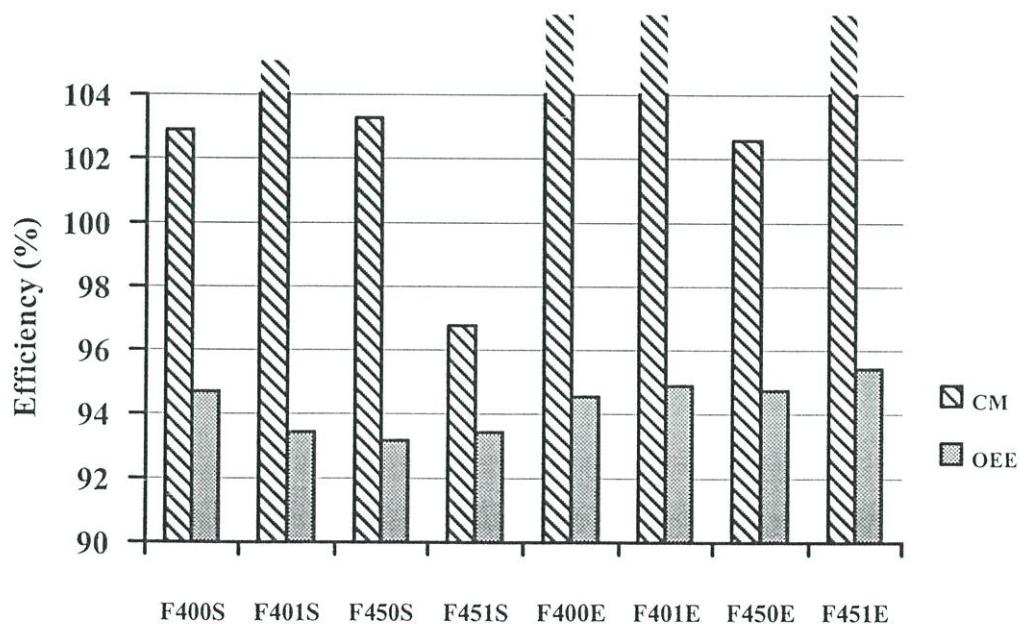
รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบการประเมินประสิทธิภาพขณะใช้งานจริงของมอเตอร์พัฒนาบาระบายอากาศสถานีสามย่าน

#### 4.4.3 สถานีลุมพินี

ผลการตรวจวัดและบันทึกค่าทางไฟฟ้าและทางกลพร้อมทั้งการเปรียบเทียบกำลังทางกลและประสิทธิภาพที่ได้จากวิธีต่าง ๆ แสดงไว้ดังตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.15

ตารางที่ 4.10 ค่าที่วัดได้และการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศสถานีลุมพินี

| สถานีลุมพินี             | F400S         | F401S  | F450S  | F451S  | F400E  | F401E  | F450E  | F451E  |        |
|--------------------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| On-site Measurement Data | $V_{rms}$ (V) | 371.00 | 365.00 | 365.00 | 368.00 | 339.00 | 333.00 | 340.00 | 351.00 |
|                          | $I_{rms}$ (A) | 168.00 | 168.00 | 200.00 | 200.00 | 144.00 | 141.00 | 146.00 | 163.00 |
|                          | $P_{in}$ (kW) | 84.00  | 80.92  | 98.00  | 105.43 | 56.17  | 54.78  | 67.08  | 72.00  |
|                          | Speed (rpm)   | 1009.6 | 1010.2 | 1009.6 | 1010.2 | 880.0  | 880.1  | 880.0  | 880.0  |
|                          | $f$ (Hz)      | 50.97  | 50.97  | 51.17  | 51.17  | 44.35  | 44.35  | 44.41  | 44.44  |
| $P_{out}$ (kW)           | VSD           | 78.84  | 76.68  | 92.88  | 98.28  | 54.00  | 52.92  | 62.64  | 69.30  |
|                          | OEE           | 79.56  | 75.63  | 91.32  | 98.52  | 53.11  | 51.98  | 63.56  | 68.70  |
|                          | CM            | 86.41  | 85.01  | 101.21 | 102.04 | 67.68  | 65.10  | 68.82  | 79.32  |
| Eff (%)                  | CM            | 102.88 | 105.06 | 103.27 | 96.78  | 120.48 | 118.82 | 102.59 | 110.17 |
|                          | OEE           | 94.72  | 93.46  | 93.18  | 93.45  | 94.55  | 94.88  | 94.75  | 95.42  |



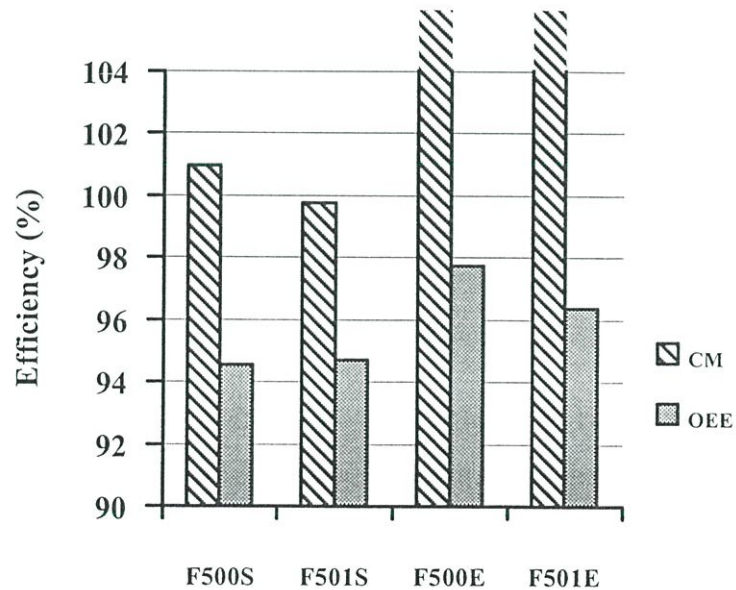
รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบการประเมินประสิทธิภาพขณะใช้งานจริงของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศสถานีลุมพินี

#### 4.4.4 สถานีคลองเตย

ผลการตรวจวัดและบันทึกค่าทางไฟฟ้าและทางกลพร้อมทั้งการเปรียบเทียบกำลังทางกลและประสิทธิภาพที่ได้จากวิธีต่าง ๆ แสดงไว้ดังตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.16

ตารางที่ 4.11 ค่าที่วัดได้และการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศสถานีคลองเตย

| สถานีคลองเตย             |               | F500S  | F501S  | F500E  | F501E  |
|--------------------------|---------------|--------|--------|--------|--------|
| On-site Measurement Data | $V_{rms}$ (V) | 370.00 | 365.00 | 337.30 | 336.00 |
|                          | $I_{rms}$ (A) | 191.00 | 178.00 | 143.00 | 138.00 |
|                          | $P_{in}$ (kW) | 97.02  | 90.30  | 56.84  | 55.82  |
|                          | Speed (rpm)   | 1009.6 | 1009.6 | 880.0  | 880.0  |
|                          | $f$ (Hz)      | 51.04  | 51.02  | 44.36  | 44.34  |
| $P_{out}$ (kW)           | VSD           | 91.80  | 84.24  | 55.08  | 52.92  |
|                          | OEE           | 91.73  | 85.51  | 55.56  | 53.80  |
|                          | CM            | 97.98  | 90.07  | 66.87  | 64.28  |
| Eff (%)                  | CM            | 100.99 | 99.75  | 117.65 | 115.16 |
|                          | OEE           | 94.55  | 94.69  | 97.75  | 96.38  |



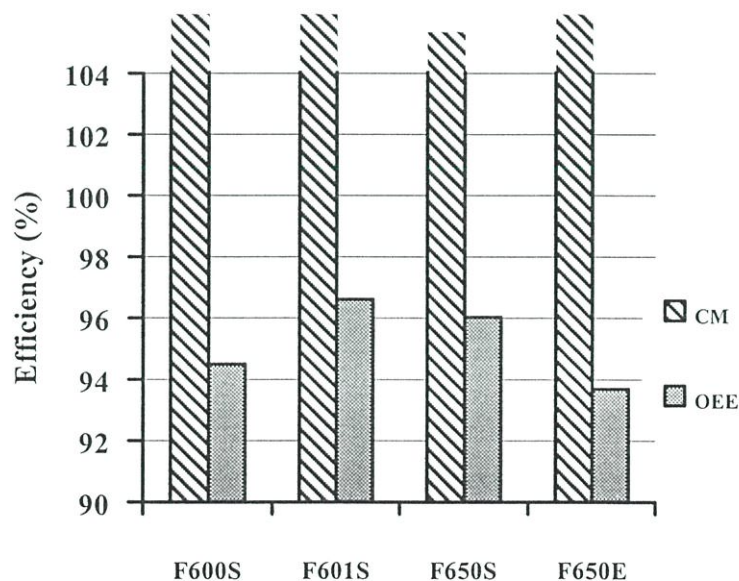
รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบการประเมินประสิทธิภาพขณะใช้งานจริงของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศสถานีคลองเตย

#### 4.4.5 สถานีศูนย์สิริกิติ์

ผลการตรวจวัดและบันทึกค่าทางไฟฟ้าและทางกลพร้อมทั้งการเปรียบเทียบกำลังทางกลและประสิทธิภาพที่ได้จากวิธีต่าง ๆ แสดงไว้ดังตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.17

ตารางที่ 4.12 ค่าที่วัดได้และการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศสถานีศูนย์สิริกิติ์

| สถานีศูนย์สิริกิติ์      |               | F600S  | F601S  | F650S  | F650E  |
|--------------------------|---------------|--------|--------|--------|--------|
| On-site Measurement Data | $V_{rms}$ (V) | 366.72 | 360.39 | 374.55 | 355.91 |
|                          | $I_{rms}$ (A) | 136.66 | 136.24 | 167.18 | 134.90 |
|                          | $P_{in}$ (kW) | 58.88  | 57.02  | 82.42  | 54.80  |
|                          | Speed (rpm)   | 900.0  | 900.0  | 1009.9 | 880.0  |
|                          | $f$ (Hz)      | 45.36  | 45.38  | 51.02  | 44.35  |
| $P_{out}$ (kW)           | VSD           | 55.41  | 54.41  | 78.62  | 51.58  |
|                          | OEE           | 55.64  | 55.10  | 79.16  | 51.34  |
|                          | CM            | 69.48  | 68.07  | 86.81  | 66.56  |
| Eff (%)                  | CM            | 118.00 | 119.38 | 105.33 | 121.47 |
|                          | OEE           | 94.50  | 96.63  | 96.04  | 93.69  |



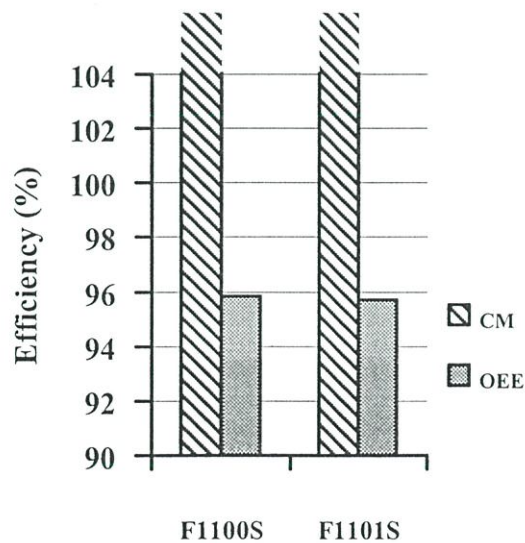
รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบการประเมินประสิทธิภาพขณะใช้งานจริงของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศสถานีศูนย์สิริกิติ์

#### 4.4.6 อาคารระบายอากาศระหว่างสถานีศูนย์สิริกิติ์-สุขุมวิท

ผลการตรวจวัดและบันทึกค่าทางไฟฟ้าและทางกลพร้อมทั้งการเปรียบเทียบกำลังทางกลและประสิทธิภาพที่ได้จากวิธีต่าง ๆ แสดงไว้ดังตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.18

ตารางที่ 4.13 ค่าที่วัดได้และการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศอาคารระบายอากาศระหว่างสถานีศูนย์สิริกิติ์-สุขุมวิท (SV03)

| SV03                     |               | F1100S | F1101S |
|--------------------------|---------------|--------|--------|
| On-site Measurement Data | $V_{rms}$ (V) | 346.00 | 350.00 |
|                          | $I_{rms}$ (A) | 137.00 | 130.00 |
|                          | $P_{in}$ (kW) | 54.80  | 51.00  |
|                          | Speed (rpm)   | 880.0  | 880.0  |
|                          | $f$ (Hz)      | 44.34  | 44.34  |
| $P_{out}$ (kW)           | VSD           | 51.84  | 48.06  |
|                          | OEE           | 52.52  | 48.81  |
|                          | CM            | 65.72  | 63.08  |
| Eff (%)                  | CM            | 119.92 | 123.69 |
|                          | OEE           | 95.83  | 95.70  |



รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบการประเมินประสิทธิภาพขณะใช้งานจริงของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศอาคารระบายอากาศระหว่างสถานีศูนย์สิริกิติ์-สุขุมวิท

#### 4.5 สรุปผลการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์

จากผลการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศในสถานีต่าง ๆ จะเห็นได้ว่า ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ได้จากวิธีที่นำเสนอมีความเป็นไปได้มากกว่าวิธีการประเมินประสิทธิภาพโดยใช้ค่ากระแสไฟฟ้า วิธีที่นำเสนอประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศขณะใช้งานของสถานีสุขุมวิททั้ง 5 ครั้ง ทำงานที่ภาระประมาณ 80-90 เปอร์เซ็นต์ (การจ่ายลมเข้าอุโมงค์) ได้ประมาณ 96 เปอร์เซ็นต์ และการทำงานที่ภาระประมาณ 50-60 เปอร์เซ็นต์ (การดูดลมออกจากอุโมงค์) ได้ประมาณ 94 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 4.9 ถึง 4.12 สำหรับสถานีอื่น ๆ ได้ทำการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศขณะใช้งานด้วยวิธีที่นำเสนอโดยใช้ข้อมูลชุดเดียว ที่ภาระทำงานทั้ง 2 จุด มีผลลัพธ์ใกล้เคียงกัน หรืออย่างน้อยแตกต่างกัน ซึ่งเกิดมาจากคุณลักษณะของมอเตอร์ตัวนั้นและข้อมูลที่บันทึกได้ในขณะนั้นเพื่อประมวลผล ดังรูปที่ 4.13 ถึง 4.18 สำหรับค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศที่สถานีสุขุมวิทที่ทำการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์แต่ละตัว 5 ครั้งจะสังเกตเห็นได้ว่าค่าพารามิเตอร์ที่จันติกอัลกอริทึมประมาณขึ้นมาเหล่านั้นมีความแตกต่างกันทั้งที่เป็นมอเตอร์ตัวเดียวกันเนื่องจากค่าทางไฟฟ้าที่บันทึกเพื่อนำไปประมวลผลทั้ง 5 ครั้งนั้นแตกต่างกัน ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการประมาณค่าพารามิเตอร์ (ภาคผนวก ข)

การประเมินประสิทธิภาพโดยวิธีที่นำเสนอเป็นการประเมินประสิทธิภาพที่การทำงานขณะนั้นเพียงจุดเดียวของมอเตอร์ ค่าพารามิเตอร์ที่ได้มาก็คือค่าที่เหมาะสมที่ประมวลขึ้นมาโดยจันติกอัลกอริทึมในขณะนั้น ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ไม่สามารถนำไปใช้หาประสิทธิภาพตลอดช่วงการทำงานของมอเตอร์ได้

สำหรับวิธีการประเมินประสิทธิภาพโดยใช้ค่ากระแสไฟฟ้า นั้นไม่สามารถหาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ได้ใกล้เคียงความเป็นจริง เนื่องจากอินเวอร์เตอร์ปรับแรงดันไฟฟ้าและความถี่ให้แตกต่างไปจากภาวะขับเคลื่อนโดยใช้แหล่งจ่ายตามปกติ เพื่อให้ได้ความเร็วและกำลังทางกลตามที่ต้องการ ทำให้ค่ากำลังทางกล ( $P_{out}$ ) ที่คำนวณได้จากสมการที่ 2.10 และ 2.12 มีค่ามากกว่ากำลังไฟฟ้า ( $P_{in}$ ) ค่าประสิทธิภาพที่ได้จึงสูงผิดปกติดังแสดงในตารางที่ 4.4 ถึง 4.13

## บทที่ 5

### บทสรุป

#### 5.1 บทนำ

วิทยานิพนธ์นี้เสนอวิธีการแบบประหยัดสำหรับการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์โดยอาศัยทฤษฎีการหาค่าที่เหมาะสมเพื่อหาค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำที่เหมาะสม โดยการหาค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้สามารถคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพและกำลังไฟฟ้าได้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้มากที่สุด ซึ่งจะนำไปสู่การหาประสิทธิภาพของมอเตอร์ต่อไป มอเตอร์พัดลมระบายอากาศนี้ใช้อุปกรณ์ขับเคลื่อนที่ใช้เทคนิคการควบคุมแบบควบคุมแรงบิดโดยตรงซึ่งแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ไม่เป็นคลื่นชานด์ซึ่งวิธีการประเมินประสิทธิภาพแบบทั่วไปให้ค่าที่มีความคลาดเคลื่อนสูงจากความเป็นจริงมากสำหรับวิธีการที่นำเสนอสามารถหาประสิทธิภาพของมอเตอร์ได้ใกล้เคียงหรือมีความแม่นยำมากกว่า ทั้งยังมีความสะดวก และประหยัด สามารถนำไปใช้หาประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ถูกขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ได้

#### 5.2 สรุปผลการวิจัย

จากการวิจัยได้ทำการทดลองกับมอเตอร์ขนาด 2.2 kW และ 5.5 kW ที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์แบบพีคดับลิวเอ็ม ผลการประเมินโดยใช้ข้อมูลแรงดันไฟฟ้าประสิทธิภาพขาเข้ากระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพขาเข้า กำลังไฟฟ้า ความถี่ และความเร็รรอบ ที่ความถี่และภาระต่างกัน มาประมวลผลหาประสิทธิภาพได้ผลลัพธ์คลาดเคลื่อนจากวิธีทดสอบแบบมีภาระ (shaft torque method) ไม่เกิน 2 % จึงทำให้เห็นได้ว่าวิธีการที่นำเสนอมีความแม่นยำสูงและสามารถนำไปงานได้กับมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ได้

จากนั้นได้ประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์ของรถไฟใต้ดินขนาด 108 kW ขณะใช้งาน ที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน มีเทคนิคการควบคุมแบบควบคุมแรงบิดโดยตรง ทั้งหมด 22 ตัวซึ่งประกอบไปด้วย สถานีสูขุมวิทจำนวน 4 ตัว สถานีหัวลำโพงจำนวน 4 ตัว สถานีสามย่านจำนวน 3 ตัว สถานีลุมพินีจำนวน 4 ตัว สถานีคลองเตยจำนวน 2 ตัว สถานีศูนย์สิริกิติ์จำนวน 3 ตัว และอาคารระบายอากาศระหว่างสถานีศูนย์สิริกิติ์-สูขุมวิทจำนวน 2 ตัว มอเตอร์นี้มีการทำงานสองทิศทางคือจ่ายลมเข้าอุโมงค์ (ภาระประมาณ 70-90 เปอร์เซ็นต์) และดูดลมออกจากอุโมงค์ (ภาระประมาณ 40-60 เปอร์เซ็นต์) สถานีตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์คือสถานีสูขุมวิท ทำการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกแรงดันได้ประมาณ 32 % และ

ฮาร์โมนิกกระแสประมาณ 4.9 % ทำให้ได้เห็นถึงความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ในสถานนีตัวอย่างนี้ได้ทำการสุ่มบันทึกค่าจำนวน 5 ครั้งภายหลังเดินมอเตอร์ไปแล้วเป็นเวลา 30 นาทีตามมาตรฐานงานซ่อมบำรุง ผลลัพธ์ที่ได้ทำการเปรียบเทียบกำลังทางกลที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอกับค่าที่อ่านได้จากอุปกรณ์ขับเคลื่อน (VSD) และวิธีการใช้ค่ากระแส (CM) ปรากฏว่าวิธีการที่นำเสนอมีความใกล้เคียงกับค่าจากอุปกรณ์ขับเคลื่อนมากกว่า และจากนั้นประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เปรียบเทียบกันระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการใช้ค่ากระแส ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอมีความเป็นได้มากกว่าวิธีการประเมินประสิทธิภาพโดยใช้ค่ากระแสไฟฟ้า ที่ได้ค่าประสิทธิภาพออกมาสูงผิดปกติ ซึ่งมีผลมาจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าและความถี่ในการทำงานของมอเตอร์ไปจากปกติ แต่สำหรับวิธีการที่นำเสนอจะใช้หลักการหาค่าที่เหมาะสมแบบเงินดิกลอริซึมซึ่งทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า

ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์พัฒนากระบายนอากาศสถานีสุนุมวิทที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอขณะมอเตอร์ทำงานจ่ายลมเข้าอุโมงค์ส่วนใหญ่จะสูงกว่าประสิทธิภาพเมื่อทำงานแบบดูดลมออกจากอุโมงค์ เนื่องจากภาระของการจ่ายลมเข้าอุโมงค์สูงกว่า แนวโน้มนี้เกิดขึ้นในการประเมินทั้ง 5 ครั้งของมอเตอร์แต่ละตัว และเกิดขึ้นในทำนองเดียวกันทั้ง 4 ตัวในสถานนี ซึ่งหากหาค่าเฉลี่ยจะพบว่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหล่านี้ขณะทำงานที่ภาระสูงจะมีค่ามากกว่าทำงานที่ภาระต่ำดังแสดงในตารางที่ 5.1 จากผลที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่ามอเตอร์ทั้งหมดยังคงมีสมรรถนะที่ดี อย่างไรก็ตามหากประสิทธิภาพที่ประเมินได้โดยวิธีหาค่าประสิทธิภาพที่ได้มีค่าต่ำจนผิดปกติเช่น ต่ำกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ (ค่าประสิทธิภาพที่เต็มพิกัดของมอเตอร์จากป้ายพิกัดมีค่าประมาณ 94 %) อาจแสดงว่ามอเตอร์ตัวนั้นกำลังมีปัญหาต้องหาทางปรับปรุงแก้ไขต่อไป

ตารางที่ 5.1 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพมอเตอร์พัฒนากระบายนอากาศสถานีสุนุมวิทโดยวิธีการที่นำเสนอ

| มอเตอร์พัฒนากระบายนอากาศ |       | $f$ (Hz) | Speed (rpm) | $P_{out}$ (kW) | Eff (%) |
|--------------------------|-------|----------|-------------|----------------|---------|
| สถานีสุนุมวิท            | F700S | 51.31    | 1014.6      | 85.88          | 95.28   |
|                          | F701S | 51.27    | 1014.6      | 83.02          | 96.44   |
|                          | F750S | 50.48    | 999.9       | 82.65          | 95.35   |
|                          | F751S | 51.03    | 1009.5      | 84.33          | 95.70   |
|                          | F700E | 44.38    | 880         | 53.55          | 92.93   |
|                          | F701E | 44.38    | 880         | 58.27          | 96.00   |
|                          | F750E | 44.37    | 880         | 52.60          | 94.92   |
|                          | F751E | 44.41    | 880         | 51.68          | 94.21   |

จากผลการประเมินประสิทธิภาพที่ได้จึงได้ใช้วิธีการนี้ประเมินมอเตอร์พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์ขณะใช้งานของสถานีอื่น ๆ อีกทั้งหมด 18 ตัว โดยการตรวจวัดและบันทึกข้อมูลครั้งเดียวที่เชื่อถือได้นำมาประมวลผล ได้ผลลัพธ์การเปรียบเทียบกำลังขาออกและการประเมินประสิทธิภาพเช่นเดียวกันว่ามีความเป็นไปได้ของค่าที่ได้จากการประเมินด้วยวิธีการที่นำเสนอ ดังแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ค่าประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศสถานีต่าง ๆ ที่ประเมิน โดยวิธีการที่นำเสนอ

| มอเตอร์พัดลมระบายอากาศ |       | $f$ (Hz) | Speed (rpm) | $P_{out}$ (kW) | Eff (%) |
|------------------------|-------|----------|-------------|----------------|---------|
| สถานีหัวลำโพง          | F100S | 51.04    | 1010        | 78.51          | 93.46   |
|                        | F101S | 51.02    | 1010        | 79.60          | 94.76   |
|                        | F150S | 50.45    | 1000        | 72.50          | 96.17   |
|                        | F151S | 51.27    | 1015        | 79.11          | 94.18   |
|                        | F100E | 44.37    | 880         | 59.33          | 96.37   |
|                        | F101E | 44.35    | 880         | 51.16          | 95.72   |
|                        | F150E | 44.38    | 880         | 57.31          | 96.17   |
|                        | F151E | 44.37    | 880         | 58.97          | 95.14   |
| สถานีสามย่าน           | F200S | 51.27    | 1015        | 80.79          | 96.18   |
|                        | F201S | 51.27    | 1015        | 79.16          | 94.24   |
|                        | F250S | 51.38    | 1015        | 95.23          | 93.44   |
|                        | F200E | 44.39    | 880         | 59.03          | 94.37   |
|                        | F201E | 44.38    | 880         | 55.47          | 94.97   |
|                        | F250E | 44.40    | 880         | 58.54          | 95.73   |

ตารางที่ 5.2 (ต่อ) ประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศสถานีต่าง ๆ ที่ประเมินโดยวิธีการที่นำเสนอ

| มอเตอร์พัดลมระบายอากาศ |        | $f$ (Hz) | Speed (rpm) | $P_{out}$ (kW) | Eff (%) |
|------------------------|--------|----------|-------------|----------------|---------|
| สถานีลุมพินี           | F400S  | 50.97    | 1009.6      | 79.56          | 94.72   |
|                        | F401S  | 50.97    | 1010.2      | 75.63          | 93.46   |
|                        | F450S  | 51.17    | 1009.6      | 91.32          | 93.18   |
|                        | F451S  | 51.17    | 1010.2      | 98.52          | 93.45   |
|                        | F400E  | 44.35    | 880         | 53.11          | 94.55   |
|                        | F401E  | 44.35    | 880.1       | 51.98          | 94.88   |
|                        | F450E  | 44.41    | 880         | 63.56          | 94.75   |
|                        | F451E  | 44.44    | 880         | 68.70          | 95.42   |
| สถานีคลองเตย           | F500S  | 51.04    | 1009.6      | 91.73          | 94.55   |
|                        | F501S  | 51.02    | 1009.6      | 85.51          | 94.69   |
|                        | F500E  | 44.36    | 880         | 55.56          | 97.75   |
|                        | F501E  | 44.34    | 880         | 53.80          | 96.38   |
| สถานีศูนย์สิริกิติ์    | F600S  | 45.36    | 900         | 55.64          | 94.50   |
|                        | F601S  | 45.38    | 900         | 55.10          | 96.63   |
|                        | F650S  | 51.02    | 1009.9      | 79.16          | 96.04   |
|                        | F650E  | 44.35    | 880         | 51.34          | 93.69   |
| SV03                   | F1100S | 44.34    | 880         | 52.52          | 95.83   |
|                        | F1101S | 44.34    | 880         | 48.81          | 95.70   |

จากการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศที่ได้นี้เมื่อทำงานที่ภาระสูงและภาระต่ำอาจมีค่าประสิทธิภาพที่มากหรือน้อย หรือใกล้เคียงกัน เนื่องจากคุณลักษณะของมอเตอร์ตัวนั้นและข้อมูลที่บันทึกได้มาในขณะนั้น อย่างไรก็ตามค่าประสิทธิภาพที่ประเมินออกมาได้ทั้งหมดยังอยู่ในขอบเขตที่เป็นไปได้ แสดงให้เห็นว่ามอเตอร์ยังมีสมรรถนะที่ดีในการใช้งาน แต่หากค่าประสิทธิภาพที่ประเมินได้มีค่าต่ำผิดปกติเช่น ต่ำกว่า 90 เปอร์เซ็นต์อาจเป็นสัญญาณชี้ชัดได้ว่าเกิดความผิดปกติขึ้นกับมอเตอร์แล้วต้องบำรุงรักษา หรือแก้ไขโดยด่วน การประเมิน

ประสิทธิภาพมอเตอร์จึงควรทำเป็นระยะเพื่อตรวจสอบสมรรถนะของมอเตอร์ตามหลักการซ่อมบำรุงตามสภาพ ซึ่งจะช่วยให้ปรับลดหรือเพิ่มการซ่อมบำรุงได้ตามสภาพของมอเตอร์นั้น ๆ อยู่ตลอดเวลา ส่งผลต่อความคุ้มค่าในการซ่อมบำรุงและความน่าเชื่อถือต่อระบบ

การประเมินประสิทธิภาพโดยวิธีที่นำเสนอนี้เป็นการประเมินประสิทธิภาพที่การทำงานขณะนั้นเพียงจุดเดียวของมอเตอร์ ค่าพารามิเตอร์ที่ได้มาคือค่าที่เหมาะสมที่เงินดักอัตรื้มประมวลขึ้นมาในขณะนั้น ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ไม่สามารถนำไปใช้หาประสิทธิภาพตลอดย่านการทำงานของมอเตอร์ได้

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

การประเมินประสิทธิภาพด้วยวิธีที่นำเสนอนี้จำเป็นต้องใช้เครื่องมือวัดที่สามารถวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพได้ เพื่อให้ได้รับข้อมูลที่ถูกต้องครบถ้วนมาประมวลผลและจะได้รับผลการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ขณะใช้งานจริงที่ขับเคลื่อนอินเวอร์เตอร์ที่ถูกต้องตามความเป็นจริง ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องมือวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้า (three phase power quality analyzer; PQA; Fluke 434; true RMS) (ภาคผนวก ง) และการวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ขนาดใหญ่อาจมีปัญหาในด้านความปลอดภัยได้ หากไม่สามารถตรวจวัดได้โดยใช้เครื่องวัดความเร็วรอบหรือไม่มีการแสดงค่าที่อุปกรณ์ขับเคลื่อน ในโอกาสต่อไปอาจจะประยุกต์ใช้วิธีการวิเคราะห์สัญญาณกระแสของมอเตอร์ (motor current signature analysis; MCSA) เพื่อหาค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ซึ่งแนวทางนี้จะเป็นวิธีการที่สะดวกและปลอดภัยยิ่งขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Fitzgerald A.E., Charles Kingley and Stephen D. Umans. **Electrical Machinery.** 5<sup>th</sup>Ed. New York : McGraw-Hill, Inc. 1990.
- [2] พิษิต ถ้ายอง. เอกสารประกอบการสอนรายวิชาเครื่องจักรกลไฟฟ้า 2. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2539.
- [3] Jimmie J. Cathey. **Electric Machines : Analysis and Design Applying MATLAB.** New York : McGraw-Hill, Inc. 2000.
- [4] ธนภวิวัฒน์ ภูมิภาค. เอกสารประกอบการสอนรายวิชาเครื่องจักรไฟฟ้า 2. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร. 2549.
- [5] ABB Industrial System, Inc. **Technical Guide No. 1. Direct Torque Control.** n.p. n.d.
- [6] Peter Vas. **Sensorless Vector and Direct Torque Control.** New York : Oxford University Press, Inc. 2003.
- [7] Arora, J.S. **Introduction to Optimum Design.** New York : McGraw-Hill, Inc. 1989.
- [8] Vanderplatts, G.N. **Numerical Optimization Techniques for Engineering design with Applications.** New York : McGraw-Hill, Inc. 1984.
- [9] K. F. Man, K.S. Tang and S. Kwong. **Genetic Algorithms Concepts and Designs.** Great Britain : Spriger-Verlag Limited. 1999.
- [10] John J. Grefenstette. **Genetic Algorithm for Machine Learning.** Boston : Kluwer Academic Publishers. 1994.
- [11] A. M. S. Zalzal and P.J. Fleming. **Genetic Algorithms in Engineering System.** London : Bookcraft. 1997.
- [12] Chaiwut Chat-uthai. **“The Development of Non-Linear Constrained Optimization Methods Applied to Electromagnetic Devices.”** Ph.D.Thesis of the University of London and for the Diploma of Membership of Imperial College. 1995.
- [13] นัตริฐา ทองชาติ. เอกสารการฝึกอบรมการระบายอากาศในอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน. กรุงเทพฯ : รถไฟฟ้ากรุงเทพ. 2546.
- [14] ประยุทธ์ จันทร์เจริญสุข. เอกสารการฝึกอบรมระบบจัดการงานซ่อมบำรุง. กรุงเทพฯ : รถไฟฟ้ากรุงเทพ. 2548.

- [15] สุรพล ราษฎร์นุ้ย. วิศวกรรมการบำรุงรักษา. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดยูเคชั่น. 2545.
- [16] IEEE. **IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and generators.** New York. 2004.
- [17] T.Phumphak and C. Chat-uthai. “An Economical Method for Induction Motor Field Efficiency Estimation for Use in On-site Energy Audit and Management” **2004 International Conference on Power System Technology, PowerCon 2004.** November, 2004.
- [18] วีระเชษฐ์ ชันเงิน และ วุฒิพล ธาราธิรเศรษฐ์. อิเล็กทรอนิกส์กำลัง. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.

ภาคผนวก ก.  
จิเนติกอัลกอริธึม

## จีเนติกอัลกอริธึม

จุดเริ่มแรกของพันธุศาสตร์เริ่มขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1859 เมื่อ ชาร์ล ดาร์วิน (Charles Darwin) ได้เสนอทฤษฎีซึ่งทำให้เกิดข้อถกเถียงอย่างมากในชื่อหนังสือ “พื้นฐานของสิ่งมีชีวิตโดยการคัดสรรทางธรรมชาติหรือการปรับตัวเพื่อรักษาเผ่าพันธุ์” (On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favored races in the struggle for life) หรือที่รู้จักกันในชื่อ “พื้นฐานของสิ่งมีชีวิต” (The origin of species) ในหนังสือนั้นได้นำเสนอการค้นคว้าของเขาโดยเปรียบเทียบระหว่างสิ่งมีชีวิตสายพันธุ์เดียวกันแต่ถิ่นที่อยู่อาศัยคนละที่ มีผลให้เกิดการปรับตัวให้เหมาะสมกับการดำรงชีวิต

และในเวลาไล่เลี่ยกัน เกเกอร์ เมนเดล (Gregor Mendel) ได้ทำการค้นคว้าในเรื่องของลักษณะเฉพาะของตัวบุคคล โดยได้ทำการทดลองกับต้นถั่ว และได้ค้นพบยีน (Gene) แต่การค้นพบของไมเมนเดลนั้นไม่เป็นที่แพร่หลายและไม่มีคนสนใจมากนัก แต่การค้นพบของเมนเดลนี้ก็เป็นที่พื้นฐานสำหรับการศึกษาพันธุศาสตร์ในเวลาต่อมา ภายหลังกเมนเดลเสียชีวิตไปประมาณ 30 ปี วอลเตอร์ ซูทตัน (Walter Sutton) ทำการทดลองและค้นพบว่ายีนนั้นเป็นส่วนประกอบของโครโมโซม (Chromosomes) ซึ่งโครโมโซมนั้นจะอยู่ในนิวเคลียส (Nucleus) อีกที่หนึ่ง โดยโครโมโซมนั้นจะเป็นตัวกำหนดรูปแบบลักษณะของสิ่งมีชีวิต

โครโมโซมนั้นประกอบด้วยชิ้นเป็น DNA (Deoxyribonucleic Acid) โดยพันธะเคมีของ DNA นั้นจะเรียกว่านิวคลีโอไทด์ (Nucleotides) โดยประกอบขึ้นจากสาร 4 ชนิด อันได้แก่ อะดีนีน (Adenine : A) , กวานีน (Guanine : G) , ไซโตซีน (Cytosine : C) และ ไทมิน (thymine : T) โดยกระบวนการจับคู่กันแบบพันธะทางเคมีพบว่า การจับคู่กันของนิวคลีโอไทด์ 3 ตัวเรียกว่า โคดอน (Codon) และการที่โคดอนหลายๆตัวจับรวมกันเป็นสายเราเรียกว่า สายของโคดอนหรือยีน ชิ้นต่อไปของกระบวนการคือการจับรวมกันเป็นสายของยีนเพื่อถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมที่เราเรียกว่า DNA

จีเนติกอัลกอริธึม นั้นถูกคิดค้นโดยจอห์น ฮอลแลนด์ (John Holland) ซึ่งสนใจในทฤษฎีวิวัฒนาการทางธรรมชาติในการกำเนิดประชากรของสิ่งมีชีวิตรุ่นต่อไป ซึ่งประกอบด้วย การคัดเลือกทางธรรมชาติ คือสิ่งมีชีวิตใดมีความแข็งแรงกว่าย่อมมีโอกาสในการอยู่รอดมากกว่า หรืออาจกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า ยีนใดๆซึ่งประกอบด้วยชิ้นจากโครโมโซมที่มีลักษณะดีกว่ายีนอื่นๆ ย่อมมีโอกาสอยู่รอดสูงกว่า และยีนที่สามารถอยู่รอดได้ก็จะสามารถถ่ายทอดลักษณะเด่น ไปยังลูกหลานได้ จากที่กล่าวมานี้ จอห์น ฮอลแลนด์และคณะผู้ร่วมงานในมหาวิทยาลัยมิชิแกนได้ทดลองนำมาใช้กับการคำนวณทางคณิตศาสตร์จนเกิดเป็น จีเนติก อัลกอริธึม เมื่อปี ค.ศ. 1960 โดยเริ่มแรกนั้นถูกออกแบบให้เป็นแบบจำลองที่ใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของธรรมชาติ (Computer Base Model for Natural Genetic) ซึ่งใช้ในทางชีววิทยา (Biological) ทุกวันนี้จีเนติกอัลกอริธึมกลายเป็นเทคนิคทาง

คณิตศาสตร์มากกว่าที่จะเป็นแบบจำลองทางชีววิทยา ต่อมาในปี ค.ศ. 1995 กอสรี่และเยน (Ghosshry & Yen) ได้เสนอวิธีที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นเรียกว่า MGA (Modified Genetic Algorithm) ซึ่งได้รับการพัฒนามาจากการผสมกันระหว่าง จีเนติกอัลกอริธึมแบบปกติ (Simple Genetic Algorithm : SGA) และ SA (Simulated Annealing) ขั้นตอนการคำนวณที่ได้เสนอมานั้นทั้งหมดเป็นการทำงานแบบวิฤตเชิงพันธุศาสตร์ แต่ได้พัฒนาเป็นฟังก์ชันชุดใหม่ ซึ่งใช้หลักของ SA ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า MGA มีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดในรูปแบบต่าง ๆ ด้วยเวลาที่น้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีเดิม และผลที่ได้มีความถูกต้อง นอกจากนี้ผลที่ได้ยังแสดงให้เห็นว่า MGA มีความคลุมเครือลดลง ต่อมาในปี ค.ศ. 1997 ชิโมไดระ (Shimodaira) ได้นำเสนอวิธีเชิงพันธุศาสตร์แบบใหม่ เรียกว่า DCGA (Diversity Control oriented Genetic Algorithm) ซึ่งสามารถป้องกันการเกิดปัญหาการจับกลุ่มของผลลัพธ์ (Local Optimum Solution) โดยโครงสร้างประชากรรุ่นใหม่ในวิธี DCGA นั้นได้รับการคัดเลือกจากการรวมกันของประชากรในรุ่นก่อนและรุ่นต่อมาด้วยวิธีที่เรียกว่า CPSS (Cross-generational Probabilistic Survival Selection) ซึ่งเป็นการคำนวณโดยใช้ระยะทาง ระหว่างโครงสร้างใหม่และโครงสร้างที่ดีที่สุด พบว่าการทำงานของ DCGA ดีกว่าวิธีเชิงพันธุศาสตร์แบบธรรมดาตรงในการหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุด (Global Optimum Solution) แต่ที่ใช้เวลาในการคำนวณในขั้นตอนการคัดเลือกมากกว่า

### ก.1 ตัวดำเนินการทางจีเนติกอัลกอริธึม (Operator of genetic algorithms)

แบบจำลองทางพันธุกรรมที่นำมาใช้ในจีเนติกอัลกอริธึมถูกเรียกว่าโครโมโซม (chromosome) ในโครโมโซมประกอบด้วยบิตจำนวน  $n$  บิต ค่าของบิตในของแต่ละโครโมโซมที่นิยมใช้มี 3 แบบคือ

1. บิต 0 หรือบิต 1 (binary coding)
2. บิตจำนวนเต็ม (integer coding)
3. บิตจำนวนจริง (real number coding)

ค่าบิตในแต่ละแบบมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน การเลือกใช้ขึ้นอยู่กับลักษณะของงานค่าบิต 0 หรือบิต 1 เป็นทฤษฎีที่ยอมรับและถูกออกแบบมานานแล้ว ข้อดีแบบบิต 0 หรือ บิต 1 คือลดขนาดช่วงการหาค่าที่เหมาะสม (optimization space) ลงแต่การใช้งานในบางอย่างทำให้เกิดการสูญเสียค่าความละเอียดของผลลัพธ์ที่ได้ ซึ่งถ้าค่าบิตเป็นจำนวนเต็มหรือจำนวนจริง ขนาดช่วงการหาค่าที่เหมาะสม (optimization space) จะมีขนาดใหญ่กว่าและมีความละเอียดของผลลัพธ์ที่ได้มากกว่า

บิตในโครโมโซมของจีเนติกอัลกอริธึมนั้นคือค่าของชุดตัวแปรที่จะนำไปทดลองแทนในสมการเพื่อดูผลลัพธ์ที่ได้ โดยนิยามว่าถูกเรียงกันอยู่ในแนวนอน

ความมีประสิทธิภาพของจีเนติกอัลกอริทึมขึ้นอยู่กับตัวดำเนินการทางจีเนติกอัลกอริทึมซึ่งตัวดำเนินการจีเนติกอัลกอริทึมประกอบด้วย

1. การคัดเลือก
2. การสร้างโครโมโซมลูก
3. การกลายพันธุ์
4. ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของจีเนติกอัลกอริทึม

## ก.2 การคัดเลือก (reproduction or selection)

การคัดเลือกเป็นกระบวนการที่จะตัดสินว่าโครโมโซมใดจะคงอยู่ในรุ่น (generation) เพื่อนำไปคัดเลือกต่อไป โดยจะตัดสินจากค่าความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซมโดยค่าความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซมนั้นหาได้จากการฟังก์ชันความเหมาะสม โดยโครโมโซมที่มีค่าตัวแปรที่ทำให้เกิดผลลัพธ์ได้ใกล้เคียงกับฟังก์ชันความเหมาะสมมาก ก็จะมีค่าความเหมาะสมสูง และมีโอกาสที่จะถูกคัดเลือกสูง ในบางกรณีฟังก์ชันเป้าหมายและฟังก์ชันความเหมาะสมอาจเป็นฟังก์ชันเดียวกัน โดยโครโมโซมที่ถูกคัดเลือกนั้นแทนด้วย  $P_{select(i)}$  หาได้จากสมการที่ (ก.1)

$$P_{select(i)} = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^k f_i} \quad (\text{ก.1})$$

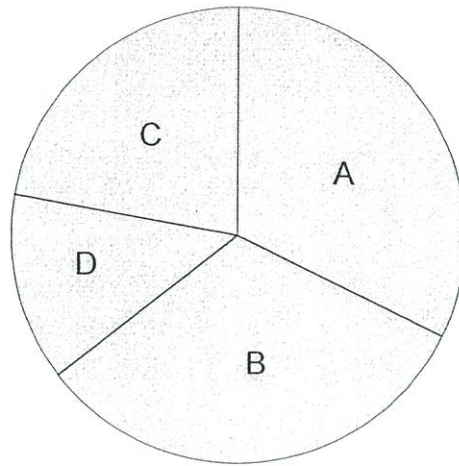
โดยที่  $f_i$  คือค่าความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซม

ส่วนจำนวนโครโมโซมที่ถูกคัดเลือก ( $num_i$ ) เพื่อนำไปจับคู่และสร้างโครโมโซมลูกสามารถหาได้จากสมการที่ (ก.2)

$$num_i = N * P_{select(i)} \quad (\text{ก.2})$$

โดยที่  $N$  คือจำนวนโครโมโซมทั้งหมด (population size)

กระบวนการที่ตัดสินว่าโครโมโซมใดจะยังอยู่เพื่อนำไปคัดเลือกในรุ่นต่อไปโดยตัดสินจากความน่าจะเป็นของแต่ละโครโมโซม ถ้าเป็นบิตแบบไบนารีจะใช้เทคนิควงล้อรูเล็ตและบิตเป็นจำนวนจริงหรือจำนวนเต็มจะใช้ normalized geometric การคัดเลือกโครโมโซมโดยเทคนิควงล้อรูเล็ตแสดงดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 การคัดเลือกโครโมโซมโดยเทคนิควงล้อรูเล็ต

เทคนิคของวงล้อรูเล็ตนี้เป็นวิธีการคัดเลือกตามอัตราส่วน โดยพิจารณาค่าความเหมาะสมของโครโมโซมแต่ละตัว โดยจะทำการแบ่งพื้นที่วงล้อตามสัดส่วนของค่าความเหมาะสมของโครโมโซมแต่ละตัว โดยให้ผลรวมของวงล้อรูเล็ตคือผลรวมของค่าความเหมาะสมของโครโมโซมทั้งหมด จากนั้นจะทำการสุ่มค่าตั้งแต่ 0 ถึง ค่าผลรวมความเหมาะสม ถ้าตัวเลขที่สุ่มไปหยุดบนพื้นที่ของโครโมโซมใด โครโมโซมตัวนั้นจะถูกเลือก ดังนั้น โครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมสูงย่อมมีโอกาสถูกเลือกมากกว่าโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมต่ำ

ตัวอย่างการทำงานของวงล้อรูเล็ต สมมติให้โครโมโซมที่เข้าสู่กระบวนการคัดเลือกมี 4 โครโมโซม อันได้แก่ A, B, C และ D ดังรูปที่ ก.1 โดยโครโมโซมแต่ละโครโมโซมมีค่าความเหมาะสมดังนี้

$$A = 0.9926, \quad B = 0.9214, \quad C = 0.7352 \text{ และ } D = 0.3463$$

ผลรวมของค่าความเหมาะสมทั้งหมด (Sum of Fitness) = 2.9955 เมื่อนำมาจัดอัตราส่วนแล้ว ค่า A จะมีพื้นที่ในวงกลม 33% ค่าภายในพื้นที่ตั้งแต่ 0 ถึง 0.9926, ค่า B จะมีพื้นที่ในวงกลม 30.75% ค่าภายในพื้นที่ตั้งแต่ 0.9927 ถึง 1.914, ค่า C จะมีพื้นที่ในวงกลม 11.56% ค่าภายในพื้นที่ตั้งแต่ 1.915 ถึง 2.2603 และ ค่า D จะมีพื้นที่ในวงกลม 24.54% ค่าภายในพื้นที่ตั้งแต่ 2.2603 ถึง 2.9955 จากนั้นจะทำการสุ่มค่าคงที่ขึ้นมา 1 ค่า โดยค่าคงที่นั้นมีค่าอยู่ระหว่างอยู่ระหว่าง 0 ถึง 2.9955 ถ้าค่าคงที่ที่สุ่มขึ้นมา มีค่าเท่ากับค่าภายในพื้นที่ของโครโมโซมใด โครโมโซมนั้นจะถูกเลือก

ในกระบวนการของการคัดเลือกนี้บางครั้งอาจมีวิธีการบางส่วนที่แตกต่างกันไป เช่น จำนวนโครโมโซมที่ถูกการคัดเลือก ( $num_i$ ) ซึ่งในงานวิจัยของเรนดี (Randy L.Haupt) ได้ใช้วิธีการคัดเอา 50% ของจำนวนโครโมโซมจากโครโมโซมที่มีค่าฟังก์ชันความเหมาะสมที่ดีที่สุดของทั้งหมดมาเป็นโครโมโซมพ่อแม่ ส่วนงานวิจัยของโคจิ, ยาซุชิซะและโทชิโอะ (Koji Shimojima ,

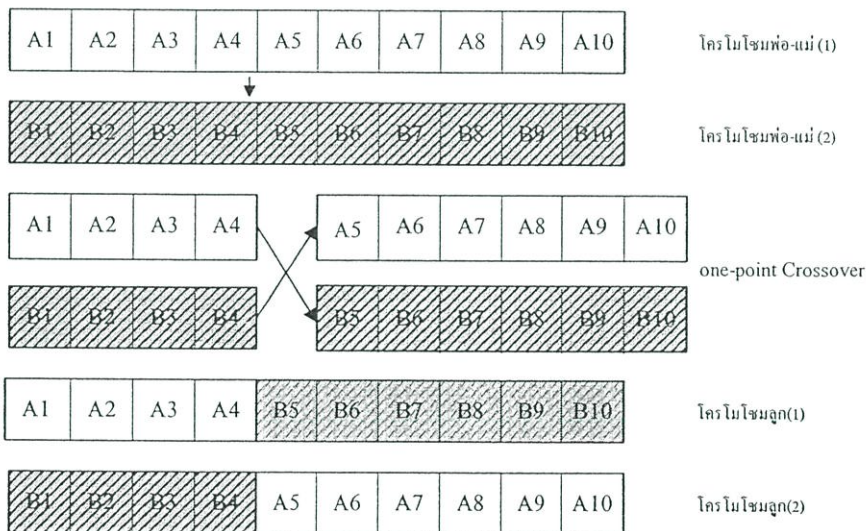
Yasuhisa Hasegawa & Toshio Fukuda) โดยใช้วิธีการคัดเอาโครโมโซมที่มีค่าฟังก์ชันสูงกว่าค่าฟังก์ชันที่กำหนดไว้เท่านั้น แล้วจึงทำการสุมคัดเอาเพื่อเป็นโครโมโซมพ่อแม่เป็นต้น

### ก.3 การสร้างโครโมโซมลูก (crossover)

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการพื้นฐานขั้นต่อมาของจีเนติก อัลกอริทึม หลังจากกระบวนการคัดเลือกได้โครโมโซม พ่อ-แม่แล้วขั้นตอนต่อมาคือการสร้างโครโมโซมลูก หรือการ (crossover) โดยโครโมโซมลูกที่เกิดขึ้นนั้นจะมีลักษณะของโครโมโซมพ่อและแม่ปะปนกันอยู่ กระบวนการขั้นต่อไปซึ่งโดยทั่วไปมี 3 วิธี อันได้แก่ one-point crossover, two-point crossover และ uniform crossover

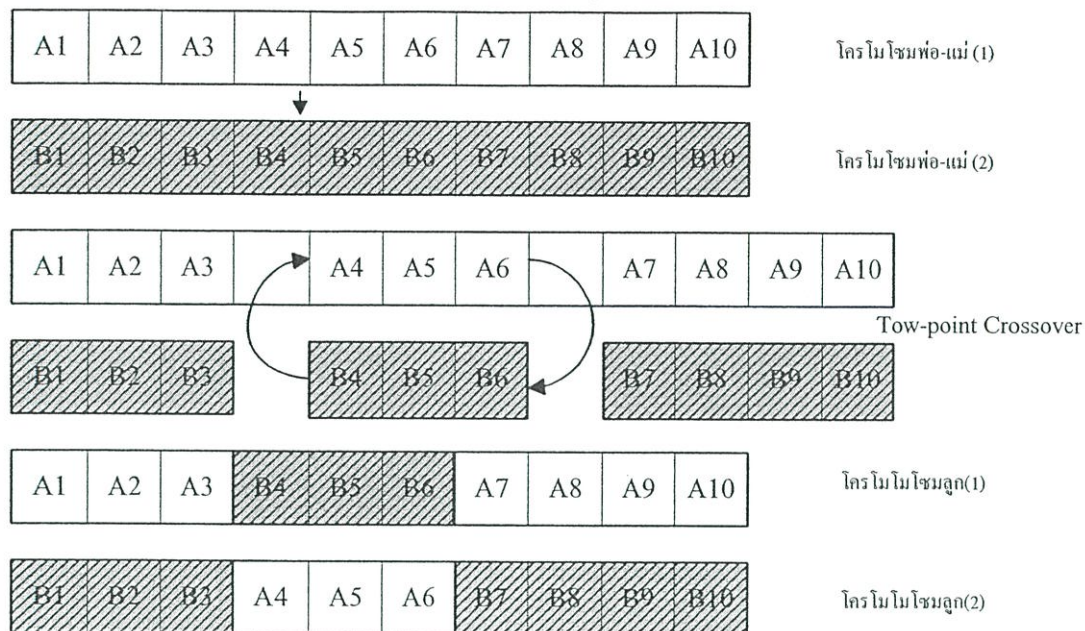
วิธีของ one-point crossover คือการสุ่มค่าตั้งแต่ 1 ถึง  $n-1$  เพื่อหาตำแหน่งในการ crossover โดยที่  $n$  คือค่าจำนวนบิตทั้งหมดในโครโมโซมดังกล่าวอย่างรูปที่ ก.2

จากรูปที่ 3-9 โครโมโซม พ่อ-แม่ (1) และโครโมโซม พ่อ-แม่ (2) นำมาสร้างโครโมโซมลูกแบบ one-point crossover โดยมีตำแหน่งสำหรับการครอสโอเวอร์ที่สุ่มได้คือ 4 ทำให้โครโมโซมลูก 2 โครโมโซมที่มีการสลับกันของโครโมโซม พ่อ-แม่ ณ ตำแหน่งบิตที่ 4



รูปที่ ก.2 การสร้างโครโมโซมลูกแบบ one-point crossover

วิธี two-point crossover คือการสุ่มค่า 2 ค่า ตั้งแต่ 1 ถึง  $n-1$  เพื่อตำแหน่ง 2 ตำแหน่งในการครอสโอเวอร์แล้วทำการสลับบิต โดยการเอาบิตที่อยู่ระหว่างค่าตำแหน่งบิตที่สุ่มได้ 2 ตำแหน่งมาสลับกันระหว่างโครโมโซม พ่อ-แม่ (1) กับโครโมโซม พ่อ-แม่ (2) เพื่อให้ได้โครโมโซมลูก 2 ดังรูปที่ ก.3

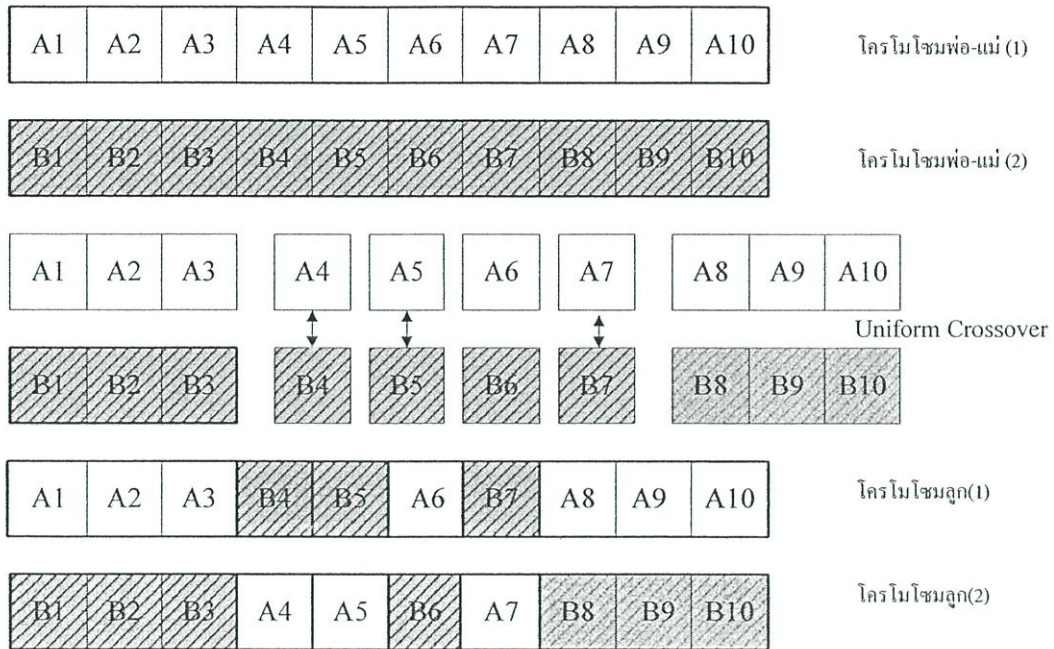


รูปที่ ก.3 การสร้างโครโมโซมลูกแบบ two-point crossover

จากตัวอย่างรูปที่ ก.3 เป็นการสร้างโครโมโซมลูกแบบ two-point crossover ค่าตำแหน่งบิตที่สุ่มได้คือ 3 และ 6 โดยการสลับค่าบิตที่อยู่ระหว่าง 3 กับ 6 ของโครโมโซม พ่อ-แม่ ทั้ง 2 โครโมโซมจะได้โครโมโซมลูก 2 โครโมโซม

วิธี uniform crossover คือกำหนดจำนวนบิตที่ต้องการแลกเปลี่ยนกันระหว่างโครโมโซม พ่อ-แม่ (1) กับโครโมโซม พ่อ-แม่ (2) แล้วสุ่มจำนวนบิตที่ได้โดยทั่วไปจำนวนบิตที่แลกเปลี่ยนกันจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0% ถึง 5 % ดังตัวอย่างรูปที่ ก.4

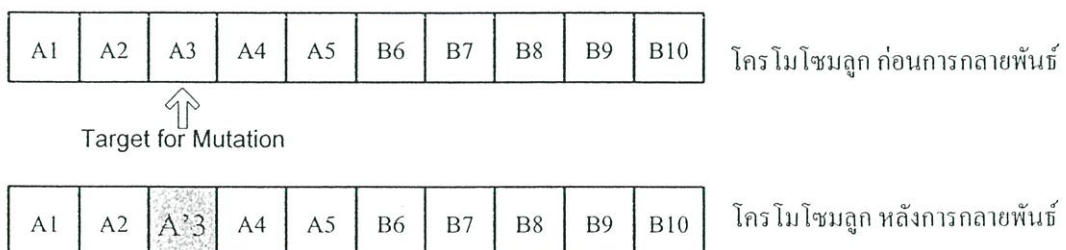
จากรูปที่ ก.4 กำหนดให้จำนวนบิตที่ต้องการแลกเปลี่ยนมีค่าเท่ากับ 30% ดังนั้น 30% ของจำนวนบิตทั้งหมดคือ 10 บิต มีค่าเท่ากับ 3 บิต แล้วสุ่มตำแหน่งบิตที่ 3 ตำแหน่งโดยมีค่าที่สุ่มได้คือ 4, 5, 7 ดังนั้น โครโมโซมลูกที่ได้จะมีการแลกเปลี่ยนบิตกันระหว่างบิตที่ 4, 5, 7 ของโครโมโซม พ่อ-แม่ (1) กับโครโมโซม พ่อ-แม่ (2)



รูปที่ ก.4 การสร้างโครโมโซมลูกแบบ uniform crossover

#### ก.4 การกลายพันธุ์ (mutation)

ในธรรมชาติ กระบวนการกลายพันธุ์นั้นเกิดจากการที่สาร 4 สารที่ประกอบตัวขึ้นเป็น DNA นั้น เกิดการแทนที่กันผิดตำแหน่ง ทำให้เกิดโครงสร้างทางพันธุกรรมแบบใหม่ขึ้นมา ซึ่งสายพันธุ์ใหม่ที่เกิดขึ้นนี้อาจจะดีขึ้นหรือแย่ลงก็ได้ และในจีเนติกอัลกอริทึม จะกำหนดให้มีกระบวนการกลายพันธุ์ขึ้นมา เพื่อเพิ่มความหลากหลายของโครโมโซม แต่จะกำหนดอัตราของการกลายพันธุ์ไว้ต่ำ โดยมีวิธีการคือ ทำการสุ่มโครโมโซมลูกแล้วสุ่มตำแหน่งบิตในโครโมโซมนั้นเพื่อเปลี่ยนค่าของบิตในโครโมโซมดังกล่าวเนื่องจากโครโมโซมลูกที่ได้จากการครอสโอเวอร์ของโครโมโซม พ่อ-แม่นั้น มีส่วนประกอบของพันธุกรรมที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง การกลายพันธุ์จึงสามารถป้องกันข้อบกพร่องดังกล่าวได้ วิธีการกลายพันธุ์ของโครโมโซมลูกแสดงตัวอย่างดังรูป ก.5



รูปที่ ก.5 การกลายพันธุ์(mutation)

จากรูปที่ ก.5 ตำแหน่งที่ถูกสุ่มให้มีการกลายพันธุ์คือตำแหน่งที่ 3 โดยมีค่าบิตเปลี่ยนจาก A3 เป็น A'3 โดยที่ค่าของบิตโครโมโซมที่ใช้เป็นแบบบิต 0 หรือ 1 ค่าของ B'3 เปลี่ยนจาก 1 เป็น 0 หรือ 0 เป็น 1 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าของ A3 แต่สำหรับค่าบิตที่เป็นแบบจำนวนเต็มหรือจำนวนจริง ค่าของ A'3 จะเป็นค่าที่เกิดจากการสุ่มค่าจำนวนเต็มสำหรับโครโมโซมมีค่าบิตเป็นจำนวนเต็มและจำนวนจริงสำหรับโครโมโซมที่มีค่าบิตเป็นจำนวนจริง

### ก.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของจีเนติกอัลกอริธึม

ในการใช้จีเนติกอัลกอริธึม ซึ่งประกอบด้วยตัวดำเนินการต่างๆตามที่ได้อธิบายมาแล้ว ตัวดำเนินการที่ถือว่าเป็นตัวดำเนินการหลักของจีเนติกอัลกอริธึมได้แก่ตัวดำเนินการ คrossover และ ตัวดำเนินการกลายพันธุ์ เนื่องจากการ crossover เป็นการสร้างโครโมโซมขึ้นมาใหม่ โดยจากโครโมโซมที่ถูกคัดเลือกแล้วส่วนการกลายพันธุ์เป็นการเพิ่มโอกาสในเปลี่ยนค่าของบิต ดังนั้นปัจจัยที่เป็นตัวกำหนดผลการทำงานของจีเนติกอัลกอริธึมได้แก่จำนวนโครโมโซมทั้งหมด (population size,  $Popsiz$ e), ความน่าจะเป็นจากการสร้างโครโมโซมลูก (crossover rate or crossover probability,  $P_c$ ) และ ค่าความน่าจะเป็นของการกลายพันธุ์ (mutation rate or mutation probability,  $P_m$ )

#### ก.5.1 จำนวนโครโมโซมทั้งหมด (population size, $Popsiz$ e)

จำนวนโครโมโซมหรือ  $Popsiz$ e คือค่าจำนวนโครโมโซมทั้งหมดที่กำหนดขึ้นในกระบวนการของจีเนติกอัลกอริธึมยังมีค่า  $Popsiz$ e มากจะทำให้มีตัวเลือกมากขึ้นด้วยแต่ทั้งนี้การกำหนดค่า  $Popsiz$ e ขึ้นอยู่กับค่าที่กำหนดผู้ใช้เองหรือความซับซ้อนของงานที่จะนำมาค้นหาคำตอบ (optimization)

#### ก.5.2 ค่าความน่าจะเป็นของการสร้างโครโมโซมลูก (crossover probability, $P_c$ )

ค่าความน่าจะเป็นของการสร้างโครโมโซมลูกหรือค่า  $P_c$  คือค่าความน่าจะเป็นที่จะทำให้เกิดการ crossover ของโครโมโซม พ่อ-แม่ โดยทั่วไปจะกำหนดให้  $P_c$  มีค่าอยู่ในช่วง 0.75 ถึง 0.95 ได้มีการเสนอแนะการหาจำนวนโครโมโซมที่จะถูก crossover ไว้ดังสมการที่ (ก.3)

$$N_x = P_c * Popsiz \quad (ก.3)$$

|        |          |                                    |
|--------|----------|------------------------------------|
| โดยที่ | $N_x$    | คือจำนวนโครโมโซมที่จะถูก crossover |
|        | $Popsiz$ | คือจำนวนโครโมโซมทั้งหมด            |

หรืออีกวิธีหนึ่งของการคัดเลือกโครโมโซมที่ใช้ค่า  $P_c$  เป็นแนวทางโดยในแต่ละโครโมโซมจะสุ่มค่า  $r$  โดยที่  $r$  มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยมีเงื่อนไขว่า  $r < P_c$  โครโมโซมนั้นจะถูกครอสโอเวอร์แล้วทำการจับคู่โครโมโซมแบบสุ่มเพื่อทำการครอสโอเวอร์

### ก.5.3 ค่าความน่าจะเป็นของการกลายพันธุ์ (mutation probability, $P_m$ )

ค่าความน่าจะเป็นของการกลายพันธุ์หรือค่า  $P_m$  เป็นปัจจัยอีกค่าหนึ่งที่ทำให้เกิดการกลายพันธุ์ซึ่งทุกบิตในโครโมโซมจะถูกมีโอกาสในการกลายพันธุ์โดยทั่วไปจะกำหนดให้  $P_m$  มีค่าอยู่ในช่วง 0.001 ถึง 0.01 และค่า  $P_m$  มักจะกำหนดให้มีค่าน้อยๆเพื่อให้โครโมโซมที่ดีมีโอกาสถูกทำลายน้อยลง Dejong ได้เสนอแนะว่าค่า  $P_m$  ควรมีค่าแปรผกผันกับ  $Popsiz$ e และ H essner และ Manner ได้เสนอแนวทางการหาค่า  $P_m$  โดยประมาณดังสมการที่ (ก.4) เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเลือกค่า  $P_m$

$$P_m = \frac{1}{Popsiz \times \sqrt{m}} \quad (\text{ก.4})$$

โดยที่  $m$  คือจำนวนบิตใน 1 โครโมโซม

นอกจากนี้ยังมีข้อเสนอแนะในจำนวนบิตที่จะถูกกลายพันธุ์ดังสมการที่ (ก.5)

$$N_m = P_m \times m \times Popsiz \quad (\text{ก.5})$$

โดยที่  $N_m$  คือจำนวนบิตทั้งหมดที่ถูกกลายพันธุ์  $m$  คือจำนวนบิตใน 1 โครโมโซม

เมื่อได้ค่า  $P_m$  แล้วในแต่ละโครโมโซมจะถูกสุ่มค่า  $r$  โดยที่  $r$  มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยมีเงื่อนไขว่าถ้า  $r < P_m$  โครโมโซมนั้นจะถูกเลือกให้มีบิตที่ถูกกลายพันธุ์

จากที่กล่าวมาแล้วว่า ตัวดำเนินการครอส โอเวอร์เป็นตัวดำเนินการหลักของจินตนาการ อัลกอริทึมการ ครอส โอเวอร์ จึงถือเป็นกระบวนการหลักที่ทำให้จินตนาการอัลกอริทึมเป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่มีประสิทธิภาพวิธีหนึ่ง ดังนั้น ค่า  $P_c$  จึงมักถูกกำหนดให้มีค่าสูงแต่วิธีการครอสโอเวอร์ จะนำเอาโครโมโซมพ่อ-แม่ ที่อยู่ติดกันมาครอสโอเวอร์กัน หรือจะกระทำโดยการสุ่มเอาโครโมโซมพ่อ-แม่มาครอสโอเวอร์ กันก็ได้และเช่นเดียวกันกับการกลายพันธุ์ ผู้ใช้อาจสุ่มเอาโครโมโซมลูกขึ้นมาเพื่อทำการกลายพันธุ์ หรือสุ่มจากค่า  $r$  ของแต่ละโครโมโซมเพื่อเปรียบเทียบกับค่า  $P_m$  ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดผู้ใช้งาน L.Haupt ได้เสนอแนะการใช้จินตนาการอัลกอริทึมเพื่อให้เกิดการลู่เข้าสู่ค่าตอบ (algorithms convergence) อย่างได้ผลมากขึ้น โดยได้มีข้อเสนอแนะดังนี้คือ

1. เพิ่มจำนวนการกลายพันธุ์
2. เพิ่มจำนวนโครโมโซม ( $Popsiz$ e)
3. เพิ่มเติมเงื่อนไขหรือบังคับ (constrains) ของปัญหาที่ต้องวิเคราะห์

จากข้อเสนอแนะดังกล่าวอาจช่วยให้สามารถหาคำตอบได้ดีขึ้นหรือรวดเร็ว แต่ Randy L. Haupt ได้กล่าวถึงปัจจัยบางประการที่มีผลต่อการลู่เข้าสู่คำตอบ convergence เช่นจำนวนบิตโครโมโซม ถ้ายิ่งจำนวนบิตมากค่าความถูกต้องแม่นยำ (accuracy) ของคำตอบจะมีค่ามากกว่าการหาค่าที่เหมาะสม (optimization) จะมีตัวเลือกเพื่อให้ใกล้คำตอบมากขึ้นแต่จะทำให้แต่ถ้าเกิดการลู่เข้าสู่คำตอบ convergence จะช้า และต้องใช้หน่วยความจำในการทำงานของจีเนติกอัลกอริธึมดังกล่าวมาก

ภาคผนวก ข.

**Method B and Method F (IEEE Std 112)**

## 9.4 Form B—Method B

Type \_\_\_\_\_ Design \_\_\_\_\_ Frame \_\_\_\_\_ Rating \_\_\_\_\_ Phase \_\_\_\_\_  
 Frequency \_\_\_\_\_ Volts \_\_\_\_\_ Synchronous r/min \_\_\_\_\_ Serial No. \_\_\_\_\_  
 Degrees C Temperature Rise \_\_\_\_\_ Time Rating \_\_\_\_\_ Model No. \_\_\_\_\_

| Cold Stator Winding Resistance Between Terminals _____ Ohms @ _____ °C                                      |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Rated Load Temp. Test Stator Winding Resistance Between Terminals _____ Ohms @ _____ °C in _____ °C Ambient |   |   |   |   |   |   |
| Rated Load Temperature Test Stator Temperature Rise _____ °C  |   |   |   |   |   |   |
| Total Stator Temperature, $t_s$ _____ °C in a 25 °C Ambient   |   |   |   |   |   |   |
| Description (Motoring)(Generating)  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Ambient Temperature, in °C  |   |   |   |   |   |   |
| Stator Winding Temperature, $t_s$ , in °C   |   |   |   |   |   |   |
| Frequency, in Hz  |   |   |   |   |   |   |
| Synchronous Speed, in r/min   |   |   |   |   |   |   |
| Speed, in r/min   |   |   |   |   |   |   |
| Slip Speed, in r/min  |   |   |   |   |   |   |
| Slip in p.u.  |   |   |   |   |   |   |
| Line-to-Line Voltage, in V  |   |   |   |   |   |   |
| Line Current, in A  |   |   |   |   |   |   |
| Stator Power, in W  |   |   |   |   |   |   |
| Core Loss, in W   |   |   |   |   |   |   |
| Stator $I^2R$ Loss, in W, at $t_s$  |   |   |   |   |   |   |
| Power Across Air Gap, in W  |   |   |   |   |   |   |
| Rotor $I^2R$ Loss, in W   |   |   |   |   |   |   |
| Friction and Windage Loss, in W   |   |   |   |   |   |   |
| Total Conventional Loss, in W   |   |   |   |   |   |   |
| Torque, in N·m  |   |   |   |   |   |   |
| Dynamometer Correction, in N·m  |   |   |   |   |   |   |
| Corrected Torque, in N·m  |   |   |   |   |   |   |
| Shaft Power, in W   |   |   |   |   |   |   |
| Apparent Total Loss, in W   |   |   |   |   |   |   |
| Stray-Load Loss, in W   |   |   |   |   |   |   |
| Intercept _____ Slope _____ Correlation Factor _____ Point Deleted _____                                    |   |   |   |   |   |   |
| Stator $I^2R$ Loss, in W, at $t_s$  |   |   |   |   |   |   |
| Corrected Power Across Air Gap, in W  |   |   |   |   |   |   |
| Corrected Slip, in p.u.   |   |   |   |   |   |   |
| Corrected Speed, in r/min   |   |   |   |   |   |   |
| Rotor $I^2R$ Loss, in W, at $t_s$   |   |   |   |   |   |   |
| Corrected Stray-Load Loss, in W   |   |   |   |   |   |   |
| Corrected Total Loss, in W  |   |   |   |   |   |   |
| Corrected Shaft Power, in W   |   |   |   |   |   |   |
| Efficiency, in %  |   |   |   |   |   |   |
| Power Factor, in %  |   |   |   |   |   |   |

The Summary of Characteristics shall be presented as with Form A in 9.2. For additional guidance, see 9.1.1.

## 9.5 Form B2–Method B calculations

| Cold Stator Winding Resistance Between Terminals ___(1)___ Ohms @ ___(2)___ °C From 6.4.1.1  |   |  |
|--|---|--|
| Hot Stator Winding Resistance Between Terminals ___(3)___ Ohms @ ___(4)___ °C in ___(5)___ °C Ambient From 6.4.1.2   |   |  |
| Rated Load Temp. Test Stator Temperature Rise ___(6)___ °C, (6) = (4) – (5) (4) = $\{[(3) / (1)] \times [k_1 + (2)]\} - k_1$   |   |  |
| Total Stator Temperature, $t_s$ , ___(7)___ °C in a 25 °C Ambient, (7) = (6) + 25 If (6) & (7) are from duplicate, (3), (4) & (5) are N/A  |   |  |
| Item   | Description (Motoring)(Generating)        | Source or Calculation  |
| 8  | Ambient Temperature, in °C                | From each test point, from 6.4.1.3                                       |
| 9  | Stator Winding Temperature, $t_s$ , in °C | From each point, adjusted per 6.4.2.4                                    |
| 10   | Frequency, in Hz                          | From each test point, from 6.4.1.3                                       |
| 11   | Synchronous Speed, in r/min               | $= 120 \times (10) / \text{number of poles}$                             |
| 12   | Speed, in r/min                           | $* = (11) - (13)$  |
| 13   | Slip Speed, in r/min                      | $* = (11) - (12)$  |
| 14   | Slip in p.u.                              | $= (13) / (11)$  |
| 15   | Line-to-Line Voltage, in V                | From each test point, from 6.4.1.3                                       |
| 16   | Line Current, in A                        | From each test point, from 6.4.1.3                                       |
| 17   | Stator Power, in W                        | From each test point, from 6.4.1.3                                       |
| 18   | Core Loss, in W                           | From 5.5.5 at voltage equal to (15)                                      |
| 19   | Stator $I^2R$ Loss, in W.                 | $= 1.5 \times (16)^2 \times R$ , Adjust $R$ see 6.4.2.4                  |
| 20   | Power Across Air Gap, in W                | $= (17) - (18) - (19)$ for motor<br>$= (17) + (18) + (19)$ for generator |
| 21   | Rotor $I^2R$ Loss, in W                   | $= (20) \times (14)$   |
| 22   | Friction and Windage Loss, in W           | From 5.5.4   |
| 23   | Total Conventional Loss, in W             | $= (18) + (19) + (21) + (22)$  |
| 24   | Torque, in N·m                            | From each test point, from 6.4.1.3                                       |
| 25   | Dynamometer Correction, in N·m            | From test per 5.6.1.2, if needed   |
| 26   | Corrected Torque, in N·m                  | $= (24) + (25)$  |
| 27   | Shaft Power, in W                         | $= (26) \times (12) / 9.549$   |
| 28   | Apparent Total Loss, in W                 | $= (17) - (27)$ for a motor<br>$= (27) - (17)$ for a generator           |
| 29   | Stray-Load Loss, in W                     | $= (28) - (23)$  |
| Intercept ___(30)___ Slope ___(31)___ Correlation Factor ___(32)___ Point Deleted ___(33)___<br>(30), (31), (32) & (33) from the linear regression analysis of (29) & (26) entries as described in 6.4.2.8 |   |  |
| 34   | Stator $I^2R$ Loss, in W, at $t_s$        | $= 1.5 \times (16)^2 \times (3) \times \{[k_1 + (7)] / [k_1 + (4)]\}$    |
| 35   | Corrected Power Across Air Gap, in W      | $= (17) - (18) - (34)$   |
| 36   | Corrected Slip, in p.u.                   | $= (14) \times [k_1 + (7)] / [k_1 + (9)]$                                |
| 37   | Corrected Speed, in r/min                 | $= (11) \times [1.00 - (36)]$  |
| 38   | Rotor $I^2R$ Loss, in W, at $t_s$         | $= (36) \times (35)$   |
| 39   | Corrected Stray-Load Loss, in W           | $= (31) \times (26)^2$   |
| 40   | Corrected Total Loss, in W                | $= (18) + (22) + (34) + (38) + (39)$                                     |
| 41   | Corrected Shaft Power, in W               | $= (17) - (40)$  |
| 42   | Efficiency, in %                          | $= 100(41)/(17)$ for a motor<br>$= 100(17)/(41)$ for a generator         |
| 43   | Power Factor, in %                        | $= 100 \times (17) / [1.732 \times (15) \times (16)]$                    |

\*Enter the measured speed or measured slip speed for each test point on the proper line and use the formula provided to calculate the other parameter. In (4), (19), (34), and (36), select  $k_1$  based on conductor material. See 5.2.1 and 5.3.2. See 9.1.1 for Summary of Characteristics.

**9.6 Form B1–Method B1**

Type \_\_\_\_\_ Design \_\_\_\_\_ Frame \_\_\_\_\_ Rating \_\_\_\_\_ Phase \_\_\_\_\_  
 Frequency \_\_\_\_\_ Volts \_\_\_\_\_ Synchronous r/min \_\_\_\_\_ Serial No. \_\_\_\_\_  
 Degrees C Temperature Rise \_\_\_\_\_ Time Rating \_\_\_\_\_ Model No. \_\_\_\_\_

|  |   |   |   |   |   |   |
|--|---|---|---|---|---|---|
| Cold Stator Winding Resistance Between Terminals _____ Ohms @ _____ °C       |   |   |   |   |   |   |
| Specified Stator Temperature, $t_s$ _____ °C in a 25 °C Ambient              |   |   |   |   |   |   |
| Description (Motoring)/(Generating)  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Ambient Temperature, in °C   |   |   |   |   |   |   |
| Stator Winding Temp, ( $t_s$ ), in °C  |   |   |   |   |   |   |
| Frequency, in Hz   |   |   |   |   |   |   |
| Synchronous Speed, in r/min  |   |   |   |   |   |   |
| Speed, in r/min  |   |   |   |   |   |   |
| Slip Speed, in r/min   |   |   |   |   |   |   |
| Slip in p.u.   |   |   |   |   |   |   |
| Line-to-Line Voltage, in V   |   |   |   |   |   |   |
| Line Current, in A   |   |   |   |   |   |   |
| Stator Power, in W   |   |   |   |   |   |   |
| Core Loss, in W  |   |   |   |   |   |   |
| Stator $I^2R$ Loss, in W, at $t_s$   |   |   |   |   |   |   |
| Power Across Air Gap, in W   |   |   |   |   |   |   |
| Rotor $I^2R$ Loss, in W  |   |   |   |   |   |   |
| Friction and Windage Loss, in W  |   |   |   |   |   |   |
| Total Conventional Loss, in W  |   |   |   |   |   |   |
| Torque, in N-m   |   |   |   |   |   |   |
| Dynamometer Correction, in N-m   |   |   |   |   |   |   |
| Corrected Torque, in N-m   |   |   |   |   |   |   |
| Shaft Power, in W  |   |   |   |   |   |   |
| Apparent Total Loss, in W  |   |   |   |   |   |   |
| Stray-Load Loss, in W  |   |   |   |   |   |   |
| Intercept: _____ Slope: _____ Correlation Factor: _____ Point Deleted: _____ |   |   |   |   |   |   |
| Stator $I^2R$ Loss, in W, at $t_s$   |   |   |   |   |   |   |
| Corrected Power Across Air Gap, in W   |   |   |   |   |   |   |
| Corrected Slip, in p.u.  |   |   |   |   |   |   |
| Corrected Speed, in r/min  |   |   |   |   |   |   |
| Rotor $I^2R$ Loss, in W, at $t_s$  |   |   |   |   |   |   |
| Corrected Stray-Load Loss, in W  |   |   |   |   |   |   |
| Corrected Total Loss, in W   |   |   |   |   |   |   |
| Corrected Shaft Power, in W  |   |   |   |   |   |   |
| Efficiency, in %   |   |   |   |   |   |   |
| Power Factor, in %   |   |   |   |   |   |   |

The Summary of Characteristics shall be presented as with Form A in 9.2. For additional guidance, see 9.1.1.

## 9.7 Form B1-2—Method B1 calculations

| Cold Stator Winding Resistance Between Terminals ____ (1) ____ Ohms @ ____ (2) ____ °C From 6.5.1.1  |                                      |  |  |
|--|--------------------------------------|--|--|
| Specified Stator Temperature, ( $t_s$ ), ____ (3) ____ °C in a 25 °C Ambient, From 3.3.2 c)  |                                      |  |  |
| Item   | Description (Motoring)/(Generating)  | Source or Calculation  |  |
| 4  | Ambient Temperature, in °C           | From each test point, from 6.5.1.4   |  |
| 5  | Stator Winding Temp, $t_s$ , in °C   | From each test point, from 6.5.1.4   |  |
| 6  | Frequency, in Hz                     | From each test point, from 6.5.1.4   |  |
| 7  | Synchronous Speed, in r/min          | $= 120 \times (6) / \text{number of poles}$                                  |  |
| 8  | Speed, in r/min                      | $* = (7) - (9)$  |  |
| 9  | Slip Speed, in r/min                 | $* = (7) - (8)$  |  |
| 10   | Slip in p.u.                         | $= (9) / (7)$  |  |
| 11   | Line-to-Line Voltage, in V           | From each test point, from 6.5.1.4   |  |
| 12   | Line Current, in A                   | From each test point, from 6.5.1.4   |  |
| 13   | Stator Power, in W                   | From each test point, from 6.5.1.4   |  |
| 14   | Core Loss, in W                      | From 5.3.5 at voltage equal to (11)  |  |
| 15   | Stator $I^2R$ Loss, in W, at $t_s$   | $= 1.5 \times (12)^2 \times (1) \times \{[k_1 + (5)] / [k_1 + (2)]\}$        |  |
| 16   | Power Across Air Gap, in W           | $= (13) - (14) - (15)$ for a motor<br>$= (13) + (14) + (15)$ for a generator |  |
| 17   | Rotor $I^2R$ Loss, in W              | $= (16) \times (10)$   |  |
| 18   | Friction and Windage Loss, in W      | From 5.5.4   |  |
| 19   | Total Conventional Loss, in W        | $= (14) + (15) + (17) + (18)$  |  |
| 20   | Torque, in N·m                       | From each test point, from 6.5.1.4   |  |
| 21   | Dynamometer Correction, in N·m       | From test per 5.6.1.2, if needed   |  |
| 22   | Corrected Torque, in N·m             | $= (20) + (21)$  |  |
| 23   | Shaft Power, in W                    | $= (22) \times (8) / 9.549$  |  |
| 24   | Apparent Total Loss, in W            | $= (13) - (23)$ for a motor<br>$= (23) - (13)$ for a generator               |  |
| 25   | Stray-Load Loss, in W                | $= (24) - (19)$  |  |
| Intercept ____ (26) ____ Slope ____ (27) ____ Correlation Factor ____ (28) ____ Point Deleted ____ (29) ____<br>(26), (27), (28) & (29) from the linear regression analysis of (25) & (22) entries as described in 6.4.2.7 |                                      |  |  |
| 30   | Stator $I^2R$ Loss, in W, at $t_s$   | $= 1.5 \times (16)^2 \times (1) \times \{[k_1 + (3)] / [k_1 + (2)]\}$        |  |
| 31   | Corrected Power Across Air Gap, in W | $= (13) - (14) - (30)$   |  |
| 32   | Corrected Slip, in p.u.              | $= (10) \times [k_1 + (3)] / [k_1 + (5)]$                                    |  |
| 33   | Corrected Speed, in r/min            | $= (7) \times [1.00 - (32)]$   |  |
| 34   | Rotor $I^2R$ Loss, in W, at $t_s$    | $= (31) \times (32)$   |  |
| 35   | Corrected Stray-Load Loss, in W      | $= (27) \times (22)^2$   |  |
| 36   | Corrected Total Loss, in W           | $= (14) + (18) + (30) + (34) + (35)$   |  |
| 37   | Corrected Shaft Power, in W          | $= (13) - (36)$  |  |
| 38   | Efficiency, in %                     | $= 100(37)/(13)$ for a motor<br>$= 100(13)/(37)$ for a generator             |  |
| 39   | Power Factor, in %                   | $= 100 \times (13) / [1.732 \times (11) \times (12)]$                        |  |

\*Enter the measured speed or measured slip speed for each test point on the proper line and use the formula provided to calculate the other parameter. In (15), (30), and (32), select  $k_1$  based on conductor material. See 5.2.1 and 5.3.2. See 9.1.1 for Summary of Characteristics.

## 9.12 Form F—Methods F, F1, C/F, E/F, and E1/F1

Serial No. \_\_\_\_\_ Model No. \_\_\_\_\_

Type \_\_\_\_\_ Rating \_\_\_\_\_ Voltage \_\_\_\_\_ Synchronous Speed \_\_\_\_\_ Phase \_\_\_\_\_ Frequency \_\_\_\_\_

| Description (Motoring)/(Generating) |  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-------------------------------------|--|---|---|---|---|---|---|
| $s$                                 | Slip in p.u.                           |   |   |   |   |   |   |
| $R_2/s$                             | Effective rotor resistance             |   |   |   |   |   |   |
| $X_2$                               | Rotor reactance                        |   |   |   |   |   |   |
| $Z_2^2$                             | Rotor impedance                        |   |   |   |   |   |   |
| $G_1$                               | Rotor conductance                      |   |   |   |   |   |   |
| $G_{fe}$                            | Core conductance                       |   |   |   |   |   |   |
| $G$                                 | Rotor & mag. circuit conductance       |   |   |   |   |   |   |
| $-B_2$                              | Rotor susceptance                      |   |   |   |   |   |   |
| $-B_M$                              | Magnetizing susceptance                |   |   |   |   |   |   |
| $-B$                                | Rotor & magnetic circuit susceptance   |   |   |   |   |   |   |
| $Y_2^2$                             | Rotor & magnetizing circuit admittance |   |   |   |   |   |   |
| $R_g$                               | Rotor & magnetic circuit resistance    |   |   |   |   |   |   |
| $R_1$                               | Stator resistance per phase            |   |   |   |   |   |   |
| $R$                                 | Total resistance                       |   |   |   |   |   |   |
| $X_g$                               | Rotor & magnetic circuit reactance     |   |   |   |   |   |   |
| $X_1$                               | Stator reactance                       |   |   |   |   |   |   |
| $X$                                 | Total reactance                        |   |   |   |   |   |   |
| $Z$                                 | Total impedance                        |   |   |   |   |   |   |
| $I_1$                               | Stator current                         |   |   |   |   |   |   |
| $I_2$                               | Rotor current                          |   |   |   |   |   |   |
|                                     | Stator power                           |   |   |   |   |   |   |
|                                     | Rotor power                            |   |   |   |   |   |   |
|                                     | Stator $I^2R$ loss                     |   |   |   |   |   |   |
| $P_h$                               | Core loss                              |   |   |   |   |   |   |
|                                     | Rotor $I^2R$ loss                      |   |   |   |   |   |   |
| $P_f$                               | Friction & Windage loss                |   |   |   |   |   |   |
| $P_{SL}$                            | Stray-Load loss                        |   |   |   |   |   |   |
|                                     | Total losses                           |   |   |   |   |   |   |
|                                     | Shaft power, in W                      |   |   |   |   |   |   |
|                                     | Efficiency in %                        |   |   |   |   |   |   |
|                                     | Power factor in %                      |   |   |   |   |   |   |
|                                     | Speed in r/min                         |   |   |   |   |   |   |
|                                     | Torque in N m                          |   |   |   |   |   |   |

### 9.13 Form F2—Methods F, F1, C/F, E/F, and E1/F1 calculations

Serial No. \_\_\_\_\_ Model No. \_\_\_\_\_

Type \_\_\_\_\_ Rating \_\_\_\_\_ Voltage \_\_\_\_\_ Synchronous Speed \_\_\_\_\_ Phase \_\_\_\_\_ Frequency \_\_\_\_\_

| Before starting calculation, fill in following items, obtained from previous tests:<br>$R_2 =$ (1) _____ $V =$ phase volts (2) _____ $P'_{SL}$ (3) _____ at $I_2$ (4) _____ and $n_s$ (5) _____ also all the items below that are marked with an asterisk. ( $n_s =$ synchronous speed) |                                    |   |  |
|---|------------------------------------|---|--|
| Assume a value of slip, $s$ , corresponding to expected full-load speed for full-load point and proportional values for other loads. For motor operation, $s$ is positive. For generator operation, $s$ is negative. Numbers in ( ) represent item numbers.                             |                                    |   |  |
| Item  | Description (Motoring)(Generating) |   | Source or Calculation  |
| 6   | $s$                                | Slip in p.u.  | Assume values for each load point  |
| 7   | $R_2/s$                            | Effective rotor resistance                                | (7) = (1) / (6)  |
| *8  | $X_2$                              | Rotor reactance   | From equivalent circuit, see 5.9   |
| 9   | $Z_2^2$                            | Rotor impedance [Quantity squared]                        | (9) = (7) <sup>2</sup> + (8) <sup>2</sup>  |
| 10  | $G_1$                              | Rotor conductance   | (10) = (7) / (9)   |
| *11   | $G_{fe}$                           | Core conductance  | From equivalent circuit, see 5.9   |
| 12  | $G$                                | Rotor & magnetic circuit conductance                      | (12) = (10) + (11)   |
| 13  | $-B_2$                             | Rotor susceptance   | (13) = (8) / (9)   |
| *14   | $-B_M$                             | Magnetizing susceptance                                   | From equivalent circuit, see 5.9   |
| 15  | $-B$                               | Rotor & magnetic circuit susceptance                      | (15) = (13) + (14)   |
| 16  | $Y_2^2$                            | Rotor & magnetizing circuit admittance [Quantity squared] | (16) = (12) <sup>2</sup> + (15) <sup>2</sup>                                       |
| 17  | $R_g$                              | Rotor & magnetic circuit resistance                       | (17) = (12)/(16)   |
| *18   | $R_1$                              | Stator resistance per phase                               | From tests, see 5.9  |
| 19  | $R$                                | Total resistance  | (19) = (17) + (18)   |
| 20  | $X_g$                              | Rotor & magnetic circuit reactance                        | (20) = (15) / (16)   |
| *21   | $X_1$                              | Stator reactance  | From equivalent circuit, see 5.9   |
| 22  | $X$                                | Total reactance   | (22) = (20) + (21)   |
| 23  | $Z$                                | Total impedance   | (23) = square root of [(19) <sup>2</sup> + (22) <sup>2</sup> ]                     |
| 24  | $I_1$                              | Stator current  | (24) = (2) / (23)  |
| 25  | $I_2$                              | Rotor current   | (25) = (24) / square root of [(9) × (16)]  |
| 26  |                                    | Stator power  | (26) = 3 × (24) <sup>2</sup> × (19)  |
| 27  |                                    | Rotor power   | (27) = 3 × (25) <sup>2</sup> × (7)   |
| 28  |                                    | Stator $I^2R$ loss  | (28) = 3 × (24) <sup>2</sup> × (18)  |
| 29  | $P_h$                              | Core loss   | (29) = 3 × (24) <sup>2</sup> × (11) / (16)   |
| 30  |                                    | Rotor $I^2R$ loss   | (30) = (6) × (27)  |
| *31   | $P_f$                              | Friction & Windage loss                                   | From tests, see 9.14   |
| 32  | $P_{SL}$                           | Stray-Load loss   | (32) = (3) × [(25) / (4)] <sup>2</sup>   |
| 33  |                                    | Total losses  | (33) = (28) + (29) + (30) + (31) + (32)  |
| 34  |                                    | Shaft power, in W   | (34) = (26) - (33)   |
| 35  |                                    | Efficiency in %   | For Motoring: (35) = 100 × (34) / (26)<br>For Generating: (35) = 100 × (26) / (34) |
| 36  |                                    | Power factor in %   | (36) = 100 × (19) / (23)   |
| 37  |                                    | Speed in r/min  | (37) = (5) × [1 - (6)]   |
| 38  |                                    | Torque in N·m   | (38) = 9.549 × (34) / (37)   |

## 9.14 Test and equivalent circuit results

Machine \_\_\_\_\_ Serial No. \_\_\_\_\_ Model No. \_\_\_\_\_  
 Type \_\_\_\_\_ Rating \_\_\_\_\_ Voltage \_\_\_\_\_ Synchronous Speed \_\_\_\_\_ Frequency \_\_\_\_\_ Phases \_\_\_\_\_

### Summary of Tests

| No Load                       |                               |
|-------------------------------|-------------------------------|
| Line Current, $I_0$ ,<br>in A | Stator Power, $P_0$ ,<br>in W |
|                               |                               |

| Impedance Data by Method ____ of 5.9.1 |                     |                             |                             |
|--|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Frequency<br>Hz                        | Line Volts<br>$V_L$ | Line Current, $I$ ,<br>in A | Stator Power, $P$ ,<br>in W |
|  |                     |                             |                             |
|  |                     |                             |                             |
|  |                     |                             |                             |
|  |                     |                             |                             |

### Constants and Summary of Equivalent Circuit Parameters

$V_1$  \_\_\_\_\_ volts per phase  
 $R_1$  \_\_\_\_\_ ohms  
 $R_2$  \_\_\_\_\_ ohms  
 $R_{fe}$  \_\_\_\_\_ ohms  
 $X_1$  \_\_\_\_\_ ohms  
 $X_2$  \_\_\_\_\_ ohms  
 $(X_1 + X_2)$  \_\_\_\_\_ ohms  
 $B_M$  \_\_\_\_\_ siemens  
 $G_{fe}$  \_\_\_\_\_ siemens  
 $P_f$  \_\_\_\_\_ # watts See 5.5.4.  
 $P_h$  \_\_\_\_\_ #watts See 5.5.5.  
 $P_{SL}$  \_\_\_\_\_ # \* watts at  $I_2 =$  \_\_\_\_\_ amperes  
 $N_s$  \_\_\_\_\_ r/min

\*See 5.7.2, 5.7.3, or 5.7.4.

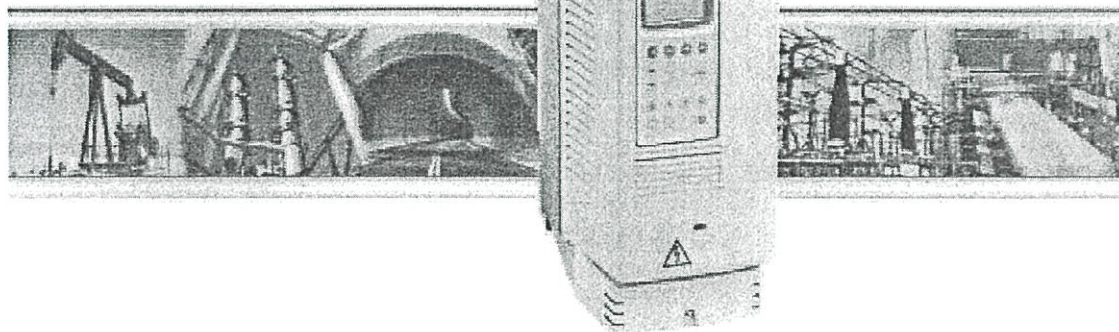
# When used in Method F, F1, C/F, E/F, or E1/F1 tests, these quantities are for the total machine and all others are per phase.

ภาคผนวก ค.

**Technical Specification for ACS Family**

## ACS800

up to 2800 kW AC motors,  
compact and complete.



### Common technology for different applications

One of the main benefits of the ACS800 series is a wide range of drive products with common technologies. This includes Start-up Assistant, Adaptive Programming and DTC, common user and process interfaces, software tools for sizing, commissioning and maintenance and common spare parts.

### Premium Technology - DTC

The heart of the ACS800 is DTC - Direct Torque Control, its first class motor control system. The consistently excellent performance of the ACS800 guarantees that the drive is not the limiting factor in your process.

DTC technology is well proven in various applications and demanding environments guaranteeing the high reliability of the drive.

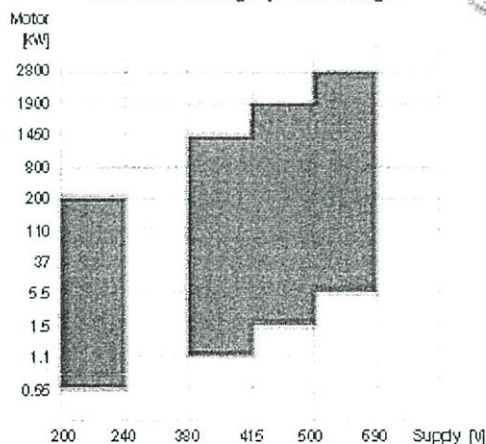
### Start-up Assistant

The ABB AC drives have always been top of their class in user-friendliness. The new product series brings a whole new meaning to "user-friendliness". Thanks to the Start-up Assistant, the commissioning and tuning of a high performance drive could not be easier.

### Adaptive Programming

The ACS800 goes one step further compared to normal parameter programming with the addition of Adaptive Programming. It is like having a small PLC inside your drive. Adaptive Programming needs no additional hardware or software but is always there when needed.

ACS800 voltage power range



### Integration and Compact Design

Anything that is required from an AC drive, like EMC and harmonic filters, is inside the drive, so no extra space or cabling is needed. Furthermore, there is always space inside the ACS800 for three option modules for I/O extensions, fieldbuses, pulse encoder interface or a PC connection.

## Environmentally sound products

ABB is a signatory to the ICC (International Chamber of Commerce) Business Charter for Sustainable Development and is working towards fulfilling its requirements. ABB AC drives follow all 16 ICC principles and the basic function of variable speed drives is to minimize the environmental impact by matching the speed of the driven machine to the actual need in the process. This often means that the environmental load reduction in the process is ten times more than the environmental load caused by the manufacture, transport and disposal of the drives.

The manufacturing of AC drives complies with ISO 14001 standards.

## Technical specifications for the ACS800-01/-02/-04/-07/-17

### Mains connection

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| <b>3-Phase supply voltage:</b>   | $U_{2M} = 208...240\text{ V} \pm 10\%$ |
|                                  | $U_{3M} = 380...415\text{ V} \pm 10\%$ |
|                                  | $U_{5M} = 380...500\text{ V} \pm 10\%$ |
|                                  | $U_{7M} = 525...690\text{ V} \pm 10\%$ |
| <b>Frequency:</b>                | 48...63 Hz                             |
| <b>Power factor:</b>             | $\cos\varphi_1 = 0.98$ (fundamental)   |
|                                  | $\cos\varphi = 0.93...0.95$ (total)    |
| <b>Power factor (ACS800-17):</b> | $\cos\varphi_1 = 1$ (fundamental)      |
|                                  | $\cos\varphi = 0.99$ (total)           |

### Efficiency

#### At nominal power:

|                  |     |
|------------------|-----|
| <b>ACS800-0x</b> | 98% |
| <b>ACS800-17</b> | 97% |

### Motor connection

|                                |  |                                      |
|--------------------------------|--|--------------------------------------|
| <b>3-Phase output voltage:</b> | $0...U_{2M}/U_{3M}/U_{5M}/U_{7M}$      |                                      |
| <b>Frequency control:</b>      | $0...300\text{ Hz}$                    |                                      |
|                                | $0...120\text{ Hz}$ with du/dt filters |                                      |
| <b>Field weakening point:</b>  | 8...300 Hz                             |                                      |
| <b>Motor control software:</b> | ABB's Direct Torque Control (DTC)      |                                      |
| <b>Torque control:</b>         | <u>Torque step rise time:</u>          |                                      |
|                                | Open loop                              | <5 ms with nominal torque            |
| Closed loop                    | Open loop                              | <5 ms with nominal torque            |
|                                | Closed loop                            | Non-linearity:                       |
| Open loop                      | Open loop                              | $\pm 4\%$ with nominal torque        |
|                                | Closed loop                            | Closed loop                          |
| <b>Speed control:</b>          | <u>Static accuracy:</u>                |                                      |
|                                | Open loop                              | 10% of motor slip                    |
| Closed loop                    | Open loop                              | 0.01% of nominal speed               |
|                                | Closed loop                            | <u>Dynamic accuracy:</u>             |
| Open loop                      | Open loop                              | 0.3...0.4%sec. with 100% torque step |
|                                | Closed loop                            | Closed loop                          |

### Environmental limits

#### Ambient temperature:

|                        |   |
|------------------------|---|
| Transportation:        | -40...+70°C                                     |
| Storage:               | -40...+70°C                                     |
| Operation:             | -15...+50°C, no frost allowed                   |
|                        | 40...50°C at reduced output current (1%/1°C).   |
| Operation (ACS800-17): | 0...+50°C                                       |
|                        | 40...50°C at reduced output current (1.5%/1°C). |

Relative humidity: 5 to 95%, no condensation allowed.

Cooling method: Dry clean air

Altitude: 0...1000 m without derating  
1000...4000 m with derating (690 V units 1000...2000 m with derating)

Common software features  
please see pages 18 - 20

**ภาคผนวก ง.**

**Three Phase Power Quality Analyzer Specification**

**(Fluke 434)**

## **Chapter 23**

# **Specifications**

### **Introduction**

#### **Performance Characteristics**

Fluke guarantees the properties expressed in numerical values within the tolerances stated. Numerical values without tolerances are typical and represent the characteristics of an average instrument excluding accessories. The Analyzer meets the specified accuracy 30 minutes and two complete acquisitions after power-on. All operational specifications are valid under the restrictions mentioned in section 'Environmental' unless otherwise specified.

Specifications are based on a one year calibration cycle.

#### **Environmental Data**

The environmental data mentioned in this manual are based on the results of the manufacturer's verification procedures.

#### **Safety Characteristics**




The Analyzer has been designed and tested in accordance with standard EN61010-1 2<sup>nd</sup> edition (2001), Safety Requirements for Electrical Equipment for Measurements Control and Laboratory Use for Class III Pollution Degree 2 instruments.


This manual contains information and warnings that must be followed by the user to ensure safe operation and to keep the Analyzer and its accessories in a safe condition. Use of this Analyzer and its accessories in a manner not specified by the manufacturer may impair the protection provided by the equipment.

## Electrical Measurements

The following specifications of the instrument are verified using the “implementation verification” table 3 as specified in 61000-4-30 chap-6-2.

### INPUT CHARACTERISTICS

| Voltage inputs  |  |
|---|--|
| Number of inputs  | 4 (3 phases + neutral) DC coupled                                    |
|  Maximum input voltage | 1000 Vrms  |
|  Nominal Voltage range | 50...500 V internally divided in three ranges 500 V, 250 V and 125 V |
|  Maximum peak voltage  | 6 kV   |
| Input impedance   | 4 M $\Omega$ // 5 pF   |
| Bandwidth   | > 10 kHz, up to 100kHz for transient display                         |
| Scaling   | 1:1, 10:1, 100:1, 1000:1 and variable                                |

| Current inputs  |   |
|---|---|
| Number of inputs  | 4 (3 phases + neutral) DC coupled   |
| Type  | Clamp on current transformer with mV output                                     |
|  Nominal input Range | 0 - $\pm$ 5.625 Vpeak, 0 - 3.97 Vrms sinewave                                   |
| Range   | 1..400 Arms with included clamps (I400S)<br>0.1..3000 Arms with optional clamps |
| Input impedance   | 50 k $\Omega$   |
| Bandwidth   | >10 kHz   |
| Scaling   | 0.1, 1, 10, 100, 1000 mV/A, variable, i5s and i430flex                          |

| Nominal frequency      | 40..70 Hz   |
|------------------------|---|
| Sampling system        |   |
| Resolution             | 16 bit analog to digital converter on 8 channels          |
| Maximum sampling speed | 200kS/s on each channel simultaneously                    |
| RMS sampling           | 5000 samples on $10/12^2$ cycles according IEC 61000-4-30 |
| PLL synchronization    | 4096 samples on $10/12^2$ cycles according IEC 61000-4-7  |

## DISPLAY MODES

|                  |  |
|------------------|--|
| Waveform display | Available in Scope and Transient mode<br>Captures 8 waveforms simultaneously<br>Display update rate 5x per second<br>Up to 10/12 times horizontal zoom<br>Cursors: Single vertical line showing min, max, avg reading at cursor position.                      |
| Phasor           | Shows real time phasor diagram<br>Available in Scope and Unbalance mode<br>Display update rate 5x per second   |
| Meter readings   | Available in Volts/Amps/Hertz, Harmonics, Power & Energy, Flicker, Unbalance and Logger4 mode.   |
| AutoTrend graph  | Available in Volts/Amps/Hertz, Dips & Swells, Harmonics, Power & Energy, Flicker, Unbalance, Inrush, Mains Signaling <sup>4</sup> Logger <sup>4</sup> and Monitor mode<br>Cursors: single vertical line showing with min, max, avg reading at cursor position. |
| Bargraph         | Available in Harmonics and Monitor mode  |
| Eventlist        | Available in Dips & Swells Mains Signaling <sup>4</sup> , Logger <sup>4</sup> and Monitor mode   |

## MEASUREMENT MODES

|                              |   |
|------------------------------|---|
| Scope                        | Vrms, Arms, Vcursor, Acursor, Vfund, Afund, Hz, V phase angles, A phase angles  |
| Volts/Amps/Hertz             | Vrms, Vpk, V Crest Factor, Arms, Apk, A Crest Factor, Hz  |
| Dips and Swells              | Vrms $\frac{1}{2}$ , Arms $\frac{1}{2}$<br>Captures up to 1000 events with date, time, duration, magnitude and phase identification with programmable thresholds  |
| Harmonics<br>DC, 1 ... 50    | Harmonic Volts, THD Volt, Harmonic Amps, THD Amps, K Amps, Harmonic Watts, THD Watts, K Watts, Interharmonic Volts <sup>4</sup> , Interharmonic Amps <sup>4</sup><br>(relative to fundamental or to total rms)  |
| Power and Energy             | Watts, VA, VAR, Power factor, Cos $\phi$ / DPF, Arms, Vrms, kWh, kVAh, KVARh, peak demand interval using trend, KYZ revenue meter verification via optional input.  |
| Flicker                      | Pst(1min), Pst, Plt, PF5, Vrms $\frac{1}{2}$ , Arms $\frac{1}{2}$ , Dc, Dmax, TDEX  |
| Unbalance                    | Vneg, Vzero, Aneg, Azero, Vfund, Afund, Hz, V phase angles, A phase angles  |
| Transients                   | Vrms, Arms, Vcursor, Acursor  |
| Inrush Currents              | Inrush Current, Inrush duration, Arms $\frac{1}{2}$ , Vrms $\frac{1}{2}$  |
| Mains Signaling <sup>4</sup> | Relative signaling voltage and absolute signaling voltage averaged over three seconds for two customer selectable frequencies   |
| Logger <sup>4</sup>          | Measures and records up to 100 parameters on all 4 phases simultaneously with selectable averaging time.<br>Captures up to 10000 events with date, time, duration, magnitude and phase identification with programmable thresholds  |
| System Monitor               | Vrms, Arms, Harmonic Volts, THD Volts, Plt, Vrms $\frac{1}{2}$ , Arms $\frac{1}{2}$ , Vneg, Hz, dips and swells, unbalance. All parameters are measured simultaneously in accordance with EN50160.<br>Using Flagging to indicate unreliable readings according IEC61000-4-30. |

### ACCURACY, RESOLUTION AND RANGE

| Volt/Amps/Hertz   | Measurement Range   | Resolution   | Accuracy  |
|---|---|--|---|
| Vrms(AC+DC)<br>Fluke 435  | 1...600 Vrms  | 0.01 Vrms  | ± 0.1% of nominal voltage   |
| Fluke 434   | 600...1000 Vrms<br>1...1000 Vrms  | 0.01 Vrms<br>0.1 Vrms  | ± 0.1%<br>± 0.5% of nominal voltage   |
| Vpk   | 1...1400 Vpk  | 1 V  | 5% of nominal voltage   |
| Voltage Crest Factor (CF)   | 1.0 ... > 2.8   | 0.01   | ± 5%  |
| Arms (AC+DC)<br>Fluke 435<br>Fluke 434<br>Fluke 434 with i400s<br>Fluke 435 with I430flex                                       | 0...20.00 kArms <sup>1</sup><br>0...20.00 kArms <sup>1</sup><br>0...40 / 400 Arms<br>30...3000 Arms | 0,001...10 Arms <sup>1</sup><br>0,001...10 Arms <sup>1</sup><br>0.1 and 1 Arms<br>1 Arms | ± 0.5% ± 5 counts <sup>3</sup><br>± 1% ± 5 counts <sup>3</sup><br>± 1% ± 5 counts <sup>3</sup><br>± 0.5% ± 20 counts <sup>3</sup> |
| Apk using 1mV/A scaling   | 0 - 5500 Apk  | 1A   | ± 5%  |
| A Crest Factor (CF)   | 1 ... 10  | 0.01   | ± 5%  |
| Hz <sup>5</sup><br>Fluke 435 @ 50Hz nominal<br>Fluke 435 @ 60Hz nominal<br>Fluke 434 @ 50Hz nominal<br>Fluke 434 @ 60Hz nominal | 42.500 ... 57.500 Hz<br>51.000 ... 69.000 Hz<br>42.50 ... 57.50 Hz<br>51.00 ... 69.00 Hz            | 0.001 Hz<br>0.001 Hz<br>0.01 Hz<br>0.01 Hz   | ± 0.01Hz<br>± 0.01Hz<br>± 0.01Hz<br>± 0.01Hz  |

| Dips and swells  | Measurement Range  | Resolution  | Accuracy   |
|--|--|---|--|
| Vrms½ (AC+DC)<br>Fluke 435<br>Fluke 434  | 0.0% ....200% of nominal voltage<br>0.0% ....200% of nominal voltage   | 0.1Vrms<br>0.1Vrms  | ± 0.2% of nominal voltage<br>± 1% of nominal voltage   |
| Arms½ (AC+DC)<br>Fluke 435<br>Fluke 434<br>Fluke 434 with i400s<br>Fluke 435 with i430flex | 0 ... 20,000 Arms <sup>1</sup><br>0 ... 20,000 Arms <sup>1</sup><br>0 ... 400 Arms<br>30 ... 3000 Arms   | 0,001 Arms...10 Arms<br>0,001 Arms...10 Arms<br>0.1 Arms and 1 Arms<br>1 Arms | ± 1% ± 10 counts <sup>3</sup><br>± 2% ± 10 counts <sup>3</sup><br>± 2% ± 10 counts <sup>3</sup><br>± 1% ± 20 counts <sup>3</sup> |
| Threshold levels   | Programmable thresholds in percent of nominal voltage<br>Event detection based upon ½cycle rms voltages<br>Captures Dips, Swells Interruptions and Rapid Voltage Changes |   |  |
| Duration   | hhh,mm,ss,mmm  | Half cycle  | One cycle  |

| Harmonics  | Measurement Range   | Resolution  | Accuracy  |
|--|---|---|---|
| Harmonic order (n)   | DC, 1..50 Grouping: Harmonic groups according to IEC 61000-4-7  |   |   |
| Inter-Harmonic order   | Off, 1..49 Grouping: Harmonic and Interharmonic subgroups according to IEC 61000-4-7  |   |   |
| Vrms Relative (%f):<br>Fluke 435 Absolute:<br>Fluke 434 Absolute:                            | 0.0 ... 100.0%<br>0.0 ... 1000 Vrms<br>0.0 ... 1000 Vrms  | 0.1%<br>0.1 Vrms<br>0.1 Vrms  | $\pm 0.1\% \pm n \times 0.1\%$<br>( $\pm 0.4\%$ for %r)<br>$\pm 0.05\%$ of nominal voltage if < 1% of nominal voltage<br>$\pm 5\%$ if $\geq 1\%$ of nominal voltage<br>$\pm 5\% \pm 2$ counts |
| Arms Relative (%f):<br>Absolute:   | 0.0 ... 100.0%<br>0.0 ... 4000 mV x clamp scaling   | 0.1%<br>1 mVrms x clamp scaling   | $\pm 0.1\% \pm n \times 0.1\%$<br>( $\pm 0.4\%$ for %r)<br>$\pm 5\% \pm 5$ counts   |
| Watts Relative:<br>(Harmonics only)<br>Watts Absolute:<br>(Harmonics only)                   | 0.0 ... 100.0%<br>depends on clamp and voltage scaling  | 0.1%  | $\pm n \times 2\%$<br>$\pm 5\% \pm n \times 2\% \pm 10$ counts  |
| DC Relative:<br>Fluke 435 Absolute V:<br>Fluke 434 Absolute V:<br>Absolute A:<br>Absolute W: | 0.0 ... 100.0%<br>0.0 ... 1000V<br>0.0 ... 1000V<br>0.0 ... 4000 mV x clamp scaling<br>depends on clamp and voltage scaling | 0.1%<br>0.1V<br>0.1V<br>1 mVrms x clamp scaling<br>0.1V<br>depends on scaling | $\pm 0.1\% V$ and A ( $\pm 2\%$ Watt)<br>$\pm 0.2\%$ of nominal voltage<br>$\pm 5\% \pm 10$ counts<br>$\pm 5\% \pm 10$ counts<br>$\pm 5\% \pm 10$ counts                                      |
| THD <sub>(n=0)</sub> (relative %f or %r)   | 0.0 ... 100.0 %   | 0.1%  | $\pm 2.5\% V$ and A ( $\pm 5\%$ Watt)   |
| Hz   | 0 ... 3500 Hz   | 1 Hz  | $\pm 1\text{Hz}$  |
| Phase angle<br>Fluke 435<br>Fluke 434  | -360° ... +0°<br>-360° ... +0°  | 1°<br>1°  | $\pm n \times 1^\circ (^{\circ})$<br>$\pm n \times 1.5^\circ (^{\circ})$  |

| Power and Energy   | Measurement Range  | Resolution   | Accuracy   |
|--|--|--|--|
| Watt (VA, VAR)<br>Fluke 435<br>Fluke 434                 | 1.0 ... 20.00MW <sup>1</sup><br>1.0 ... 20.00MW <sup>1</sup>                       | 0.1 ... 1 kW <sup>1</sup><br>0.1 ... 1 kW <sup>1</sup>               | ± 1% ± 10 counts <sup>3</sup><br>± 1.5% ± 10 counts <sup>3</sup> |
| kWh <sup>6</sup> (kVA <sup>6</sup> , kVAR <sup>6</sup> ) | 00.00 kWhr...200.0<br>GWhr <sup>1</sup><br>00.00 kWhr...200.0<br>GWhr <sup>1</sup> | 0.01 Xhr....100 Whr <sup>1</sup><br>0.01 Whr....100 Whr <sup>1</sup> | ± 1% ± 10 counts <sup>3</sup><br>± 1.5% ± 10 counts <sup>3</sup> |
| Power Factor   | 0...1  | 0.01   | ± 0.03 <sup>3</sup>  |
| Cos φ / DPF  | 0...1  | 0.01   | ± 0.03 <sup>3</sup>  |

| Flicker  | Measurement Range  | Resolution                                      | Accuracy   |
|--|--|---|--|
| Pst (1min), Pst, Plt, PF5<br>instantaneous Flicker                               | 0.00 ... 20.00   | 0.01  | Within ±5% of tabulated<br>values according<br>IEC61000-4-15 |
| Dc%, Dmax% and Time<br>d(t) exceeds limits. As<br>described per IEC<br>61000-3-3 | 0.0 ... ± 100.0% for Dc%<br>and Dmax% and 0.000<br>... 9.999s for Time | 0.1% for Dc% and<br>Dmax% and 10 ms for<br>Time | ± 1% for Dc% and<br>Dmax% and 20 ms for<br>Time              |

| Unbalance                               | Measurement Range | Resolution | Accuracy |
|---|-------------------|------------|----------|
| Volts Fluke 435 (neg.<br>and zero seq.) | 0.0 ... 5.0%      | 0.1%       | ± 0.15%  |
| Volts Fluke 434 neg. and<br>zero seq.)  | 0.0 ... 5.0%      | 0.1%       | ± 0.5%   |
| Current (neg. and zero<br>seq.)         | 0.0 ... 20%       | 0.1%       | ± 1%     |

| Transient capture                      | Measurement Range              | Resolution | Accuracy                                      |
|--|--------------------------------|------------|---|
| Volts<br>cursor reading<br>rms reading | ± 6000 Vpk<br>10 ... 1000 Vrms | 1 V<br>1 V | ± 15% of cursor reading<br>± 2.5% of Vnominal |
| Minimum detect duration                | 5 μs                           |            |   |
| Sampling rate                          | 200kS/s                        |            |   |

| Inrush mode     | Measurement Range                                     | Resolution                   | Accuracy                      |
|-----------------|---|------------------------------|-------------------------------|
| Arms (AC+DC)    | 0.000 ... 20.00 kArms <sup>1</sup>                    | 0.001.. 10 Arms <sup>1</sup> | ± 1% of meas ± 5 counts       |
| Inrush Duration | mm:ss:mmm between<br>7.5s ... 30minutes<br>selectable | 10ms                         | ± 20 ms (Fnominal = 50<br>Hz) |

| Mains Signaling <sup>4</sup>    | Measurement Range   | Resolution | Accuracy                |
|---------------------------------|---|------------|-------------------------|
| Threshold levels                | Thresholds, limits and signaling duration is programmable for two independent signalling frequencies. |            |                         |
| Signaling frequency             | 60 ... 3000 Hz  | 0.1 Hz     |                         |
| Relative V%                     | 0% .. 100% of   | 0.1%       | ± 0.4%                  |
| Absolute V3s (3 second average) | 0.0 ... 1000 V  | 0.1 V      | ± 5% of nominal voltage |

### TREND RECORDING

|        |   |
|--------|---|
| Method | AutoTrend automatically records min, max and average values over time for all readings being displayed for the 3 phases and neutral simultaneously. |
|--------|---|

| Volts/Amps/Hertz, Harmonics, Power & Energy, Flicker, Unbalance and Mains Signaling <sup>4</sup> mode |   |       |       |      |      |        |         |         |         |
|---|---|-------|-------|------|------|--------|---------|---------|---------|
| Sampling  | 5 readings/sec continuous sampling per channel  |       |       |      |      |        |         |         |         |
| Recording time  | From 30 min with 1 second display resolution up to 450 days with 6 hour display resolution. |       |       |      |      |        |         |         |         |
| Zoom  | Up to 6x horizontal zoom  |       |       |      |      |        |         |         |         |
| Memory  | 1800 min, max and avg points for each reading   |       |       |      |      |        |         |         |         |
| Duration  | 30 min.   | 2.5 h | 7.5 h | 15 h | 30 h | 150 hr | 450 hr  | 900 hr  | 75 days |
| Resolution  | 1 s   | 5 s   | 15 s  | 30 s | 60 s | 5 min. | 15 min. | 30 min. | 1 hr    |

| Dips & Swells mode |   |       |        |         |         |      |        |        |       |       |
|--------------------|---|-------|--------|---------|---------|------|--------|--------|-------|-------|
| Sampling           | 100/120 <sup>2</sup> readings/sec continuous sampling per channel                       |       |        |         |         |      |        |        |       |       |
| Recording time     | From 90 sec with 25msec display resolution up to 450 days with 3 hr display resolution. |       |        |         |         |      |        |        |       |       |
| Zoom               | Up to 12x horizontal zoom   |       |        |         |         |      |        |        |       |       |
| Memory             | 3600 min, max and avg points for each reading   |       |        |         |         |      |        |        |       |       |
| Duration           | 90 s  | 180 s | 6 min. | 12 min. | 30 min. | 1 hr | 2.5 hr | 7.5 hr | 15 hr | 30 hr |
| Resolution         | 25 ms   | 50 ms | 100 ms | 200 ms  | 500 ms  | 1s   | 2.5 s  | 7.5 s  | 15 s  | 30 s  |

| Inrush Currents and Flicker PF5 mode |  |       |       |       |       |        |         |         |      |     |
|--------------------------------------|--|-------|-------|-------|-------|--------|---------|---------|------|-----|
| Sampling                             | 100/120 <sup>2</sup> readings/sec continuous sampling per channel  |       |       |       |       |        |         |         |      |     |
| Recording time                       | From 7.5 sec with 25msec display resolution up to 30 min with 500msec display resolution for Inrush measurements and up to 2hr with 2.5 sec display resolution for PF5 recordings. |       |       |       |       |        |         |         |      |     |
| Zoom                                 | Up to 12x horizontal zoom  |       |       |       |       |        |         |         |      |     |
| Memory                               | 3600 min, max and avg points for each reading  |       |       |       |       |        |         |         |      |     |
| Duration                             | 7.5 s  | 15 s  | 30 s  | 90 s  | 180 s | 6 min. | 12 min. | 30 min. | 1 hr | 2hr |
| Resolution                           | 25 ms  | 25 ms | 25 ms | 25 ms | 50 ms | 100 ms | 200 ms  | 500 ms  | 1 s  | 2s  |

| Logger mode                          |   |         |           |       |          |          |        |         |        |  |
|--------------------------------------|---|---------|-----------|-------|----------|----------|--------|---------|--------|--|
| Sampling                             | Combination of 5 readings/sec and 100/120 <sup>2</sup> readings/sec continuous sampling per channel depending on the parameter measured |         |           |       |          |          |        |         |        |  |
| Recording time                       | Depends on selected readings and averaging time   |         |           |       |          |          |        |         |        |  |
| Zoom                                 | Two zoom positions, display all or 1x   |         |           |       |          |          |        |         |        |  |
| Memory                               | User configurable shared memory, up to 15 MB on Fluke 435, Up to 7 MB on Fluke 434 <sup>4</sup>   |         |           |       |          |          |        |         |        |  |
| Nr of readings on 3 phases + N       | 1   |         |           | 10    |          |          | 100    |         |        |  |
| Averaging time                       | 0.5 s   | 10 min  | 2 hr      | 0.5 s | 10 min   | 2 hr     | 0.5 s  | 10 min  | 2 hr   |  |
| Max <sup>7</sup> duration using 15MB | 66 hr   | 9 years | 100 years | 6 hr  | 333 days | 10 years | 18 min | 31 days | 1 year |  |

| Monitor mode   |  |
|----------------|--|
| Sampling       | Combination of 5 readings/sec and 100/120 <sup>2</sup> readings/sec continuous sampling per channel depending on the parameter measured. |
| Recording time | Up to 1 week with 10 min resolution  |
| Memory         | 1008 min, max and avg points for each reading, 10 minute resolution  |
| Limits         | According EN50160 or customer definable  |

## MEASUREMENT METHOD

|   |  |
|---|--|
| Vrms, Arms                                | 10/12 <sup>2</sup> cycle contiguous non overlapping intervals using 500/416 <sup>2</sup> samples per cycle in accordance with IEC 61000-4-30   |
| Vpeak, Apeak                              | Absolute highest sample value within 10/12 <sup>2</sup> cycle interval with 40µs sample resolution   |
| V Crest Factor                            | Measures ratio between the Vpeak and Vrms  |
| A Crest Factor                            | Measures ratio between the Apeak and Arms  |
| Hz  | Measured every 10 sec in accordance with IEC61000-4-30   |
| Vrms <sup>1/2</sup> , Arms <sup>1/2</sup> | Value is measured over 1 cycle, commencing at a fundamental zero crossing, and refreshed each half-cycle. This technique is independent for each channel in accordance with IEC 61000-4-30.  |
| Harmonics                                 | Calculated from 10/12-cycle gapless harmonic group measurements on Voltage and Amps according to IEC 61000-4-7   |
| Watt                                      | Selectable Total or Fundamental real power display<br>Calculates average value of instantaneous power over 10/12 cycle period for each phase Total Active Power $P_T = P_1 + P_2 + P_3$  |
| VA  | Selectable Total or Fundamental apparent power display<br>Calculates apparent power using Vrms x Arms value over 10/12 cycle period<br>Total Apparent Power is root mean square of real and apparent power   |
| VAR                                       | Selectable Total of Fundamental reactive power display<br>Calculates reactive power as root of VA squared minus Watt squared over 10/12 cycle period. Capacitive and inductive load is indicated with capacitor and inductor icons   |
| Power Factor                              | Calculated Watt / VA   |
| Cos φ / DPF                               | Cos of angle between fundamental voltage and current   |
| Unbalance                                 | The supply voltage unbalance is evaluated using the method of symmetrical components according to IEC61000-4-30  |
| Flicker                                   | According to IEC 61000-4-15 Flickermeter - Functional and design specification. Includes 230V 50Hz lamp and 120V 60Hz lamp models  |
| Transient capture                         | Captures waveform triggered on signal envelope. Additionally triggers on dips, swells, interruptions and Amps level as specified by IEC61000-4-30  |
| Inrush current                            | The inrush current begins when the Arms half cycle rises above the inrush threshold, and ends when the Arms half cycle rms is equal to or below the inrush threshold minus a user-selected hysteresis value. The measurement is the square root of the mean of the squared Arms half cycle values measured during the inrush duration. Each half-cycle interval is contiguous and non-overlapping as recommended by IEC 61000-4-30. Markers indicate inrush duration. Cursors allow measurement of peak Arms half cycle. |

|                      |  |
|----------------------|--|
| Mains Signaling      | Measurement are based on: either the corresponding 10/12-cycle r.m.s. value interharmonic bin or the rms of the four nearest 10/12-cycle rms value interharmonic bins per IEC 61000-4-30 Limit setup for Monitor mode follows EN50160 "Meistercurve" |
| Time Synchronisation | Optional GPS430 timesync module provides time uncertainty $\leq 20$ ms or $\leq 16.7$ ms <sup>2</sup> for time tagging of events and time aggregated measurements. When synchronisation becomes unavailable, time tolerance is $\leq 1$ -s/24h       |

### WIRING COMBINATIONS

|                  |  |
|------------------|--|
| 3Ø WYE           | Three phase four wire system WYE   |
| 3Ø DELTA         | Three phase three wire system Delta  |
| 1Ø + NEUTRAL     | Single phase with neutral  |
| 1Ø SPLIT PHASE   | Split phase  |
| 1Ø IT NO NEUTRAL | Single phase system with two phase voltages without neutral                                |
| 3Ø IT            | Three phase system without neutral WYE   |
| 3Ø HIGH LEG      | Four wire three phase Delta system with center tapped high leg                             |
| 3Ø OPEN LEG      | Open delta three wire system with 2 transformer windings                                   |
| 2-ELEMENT        | Three phase three wire system without current sensor on phase L2 / B (2 Watt meter method) |
| 2½-ELEMENT       | Three phase four wire system without voltage sensor on phase L2 / B                        |

### GENERAL

|                     |  |
|---------------------|--|
| Case                |  |
| Design              | Rugged, shock proof with integrated protective holster   |
| Drip and dust proof | IP51 according to IEC60529 when used in tilt stand position  |
| Shock and Vibration | Shock 30g, Vibration: 3g Sinusoid, Random 0.03g <sup>2</sup> /Hz according to MIL-PRF-28800F Class 2 |



|                         |  |
|-------------------------|--|
| Display                 | Bright Full-Color LCD with CCFL backlight, 80cd/m <sup>2</sup> |
| Size                    | 115.2 x 86.4 mm  |
| Resolution              | 320 x 240 pixels   |
| Contrast and brightness | User adjustable, temperature compensated                       |

| Memory          |   |
|-----------------|---|
| Screens         | 50 screen memories  |
| Data            | 10 data memories for storing data including recordings  |
| Logger          | User configurable shared memory, up to 15 MB on Fluke 435, Up to 7 MB on Fluke 434 <sup>4</sup> |
| Limit templates | 2 preprogrammed, 2 administrator (programmable via FlukeView), 2 user locations                 |
| Real-time clock | Time and date stamp for AutoTrend, Transient display and SystemMonitor                          |

### MECHANICAL

|        |                   |
|--------|-------------------|
| Size   | 256 x 169 x 64 mm |
| Weight | 2kg               |

### POWER

|   |   |
|---|---|
|  Line power                  | Switchable 115V, 230V adapter with country specific plug            |
|  Power Adapter input voltage | 15 ... 23 V dc; Use only Power Adapter BC430                        |
| Battery power   | Rechargeable NiMH BP190 (installed)                                 |
| Battery operating time  | > 7 hours   |
| Battery charging time   | 4 hours, 8 hours for /006 version (Instrument off)                  |
| Power saving  | Adjustable time for dimmed backlight with on screen power indicator |




### STANDARDS

|                          |  |
|--------------------------|--|
| Measurement methods used | IEC61000-4-30 class A  |
| Measurement performance  | Fluke 435 IEC61000-4-30 Class A, Fluke 434 IEC61000-4-30 Class B |
| Power Quality            | EN50160  |
| Flicker                  | IEC 61000-4-15   |
| Harmonics                | IEC 61000-4-7  |

### CROSS TALK

|                          |                   |
|--------------------------|-------------------|
| Between V inputs         | -60 dB @ Fnominal |
| Voltage to current input | -95 dB @ Fnominal |

## SAFETY

|   |   |   |
|---|---|---|
|  | Compliance with                           | IEC/EN61010-1-2001,<br>CAN/CSA C22.2 No 61010-1-04,<br>UL std No 61010-1,<br>Safety Requirements for Electrical Equipment for Measurement, Control and Laboratory Use, Part 1: General requirements,<br>Rated: 600V CAT IV 1000V CAT III Pollution Degree 2 |
|  | Max voltage on banana input               | 1000 V CAT III / 600 V CAT IV   |
|  | Max voltage on current BNC input 42 Vpeak |   |

## ENVIRONMENTAL

|                            |   |
|----------------------------|---|
| Operating temperature      | 0°C to +50°C battery only, 0°C to +40°C with adapter, within spec +15°C to +35°   |
| Storage temperature        | -20 °C to +60 °C  |
| Humidity                   | 10 .. 30 °C: 95% RH non condensing<br>30 .. 40 °C: 75% RH non condensing<br>40 .. 50 °C: 45% RH non condensing battery only |
| Maximum operating altitude | 3000m. Derate to 1000 V CAT II / 600 V CAT III / 300 V CAT IV above 2000m   |
| Maximum storage altitude   | 12km  |

## PRINTERS AND INTERFACE

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| Type                          | Serial, optically isolated. Compatible with PM9080 (RS-232) or OC4USB (USB) |
| Baud rate                     | 1200, 2400, 9600 ... 57k6   |
| Print out facility (B&W only) | Via optional adapter PM9080 or PAC 91                                       |
| Print protocol                | Epson FX LQ, Deskjet, LaserJet , DPU-414 or PostScript                      |

## ELECTRO MAGNETIC COMPATIBILITY (EMC)

| Item                  | Customer Specification | Additional Information   |
|-----------------------|------------------------|--|
| Emission and Immunity | EN-61326               | Fluke 434/435, including standard accessories, conforms with the EEC directive 89/336 for EMC immunity, as defined by EN-61326, with the addition of the table below |

| Frequency  | Disturbance < 0.5 % | Disturbance < 10 % |
|--|---------------------|--------------------|
| 80 – 400 MHz   | All ranges          |                    |
| 400 – 600 MHz  | All other ranges    | 125 V range        |
| 600 MHz – 1 GHz  | All ranges          |                    |
| The Analyzer is susceptible for RF fields with a field strength of 10 V/m, between 400 and 600 MHz (Performance criteria B). |                     |                    |

<sup>1</sup> depending clamp scaling, volt scaling 1:1

<sup>2</sup> 50Hz/60Hz nominal frequency according to IEC 61000-4-30

<sup>3</sup> Add clamp accuracy

<sup>4</sup> The logger and Mains Signaling function are optional for the Fluke 434 and standard available on the Fluke 435

<sup>5</sup> Measured on reference voltage input A/L1

<sup>6</sup> Maximum time 9999 hours

<sup>7</sup> Estimated duration

<sup>8</sup> Add  $\pm(n-1) \times 2.5^\circ$  for Amp. when using i430flex

**ภาคผนวก จ.**

**Test Report of Tunnel Ventilation Fan**



WIRE & WIRELESS CO.,LTD.



TUNNEL VENTILATION SYSTEM

[ FAN ]

CUSTOMER BANGKOK METRO CO.,LTD. DATE: \_\_\_\_\_ TIME: \_\_\_\_\_ TO \_\_\_\_\_

EQUIPMENT NO.: \_\_\_\_\_ MODEL \_\_\_\_\_ SERIAL NO. \_\_\_\_\_

STATION \_\_\_\_\_ Work Order No. \_\_\_\_\_

DESCRIPTION OF MAINTENANCE EVERY 1 MONTH

Period  1  2  3  4        1  1   1

1. Inspection Current and voltage by measuring at circuit breaker. (Test run 30-60 minutes)

| Measurement after start motor 30 minutes. |                  | Extract | Supply | Extract | Supply | Extract | Supply | Runtime: |
|---|------------------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|----------|
| Running Current (Amp)                     | HIGH SPEED (TVF) | R       |        | S       |        | T       |        | FLA      |
| Running Current (Amp)                     | LOWSPEED (TVF)   | R       |        | S       |        | T       |        | FLA      |
| Running Current (Amp)                     | UPE FAN          | R       |        | S       |        | T       |        | FLA      |
| Supply Voltage (Volt)                     |                  | R-S     |        | R-T     |        | S-T     |        | L-N      |
| Vibration Monitor                         |                  | H       |        | V       |        | A       |        |          |

2. Check vibration monitoring and monitoring of bearing

|  | Equipment        | Standard Value |
|--|------------------|----------------|
| <input type="checkbox"/> Check vibration attenuators proper operation against mechanical vibration | UPE              | ≤185 amp.      |
| <input type="checkbox"/> Check to relubrication the bearing (greasing 20g / 4000 HR)               | TVF              | ≤205 amp.      |
| <input type="checkbox"/> Check noise of bearing by earing  | Bearing sensor   | ≤1500 Ω        |
| <input type="checkbox"/> Inspection temperature of bearing ..... Ω                                 | Vibration sensor | ≤4.5 mm/s      |
| <input type="checkbox"/> Inspection the mechanical vibration on motor                              | Supply Voltage   | 380 ± 5% Volt  |
| <input type="checkbox"/> Inspection the mechanical vibration on the impeller                       | Insulation test  | ≥300 MΩ        |

3. Mechanical starting coupling impeller inspection

Check abrasion, corrosion, or dirt deposited on the impeller

DESCRIPTION OF MAINTENANCE EVERY 12 MONTH

Period  1

1. Check monitoring of bearing

check to replacing the bearing

2. Mechanical starting coupling impeller inspection and electrical insulation testing

Check roller bearing, sealing and abrasion of the coupling ( 2000 Hrs. Operate )

Cleaning and repeated the bearing

Insulation test @ 500 VDC. ....MΩ

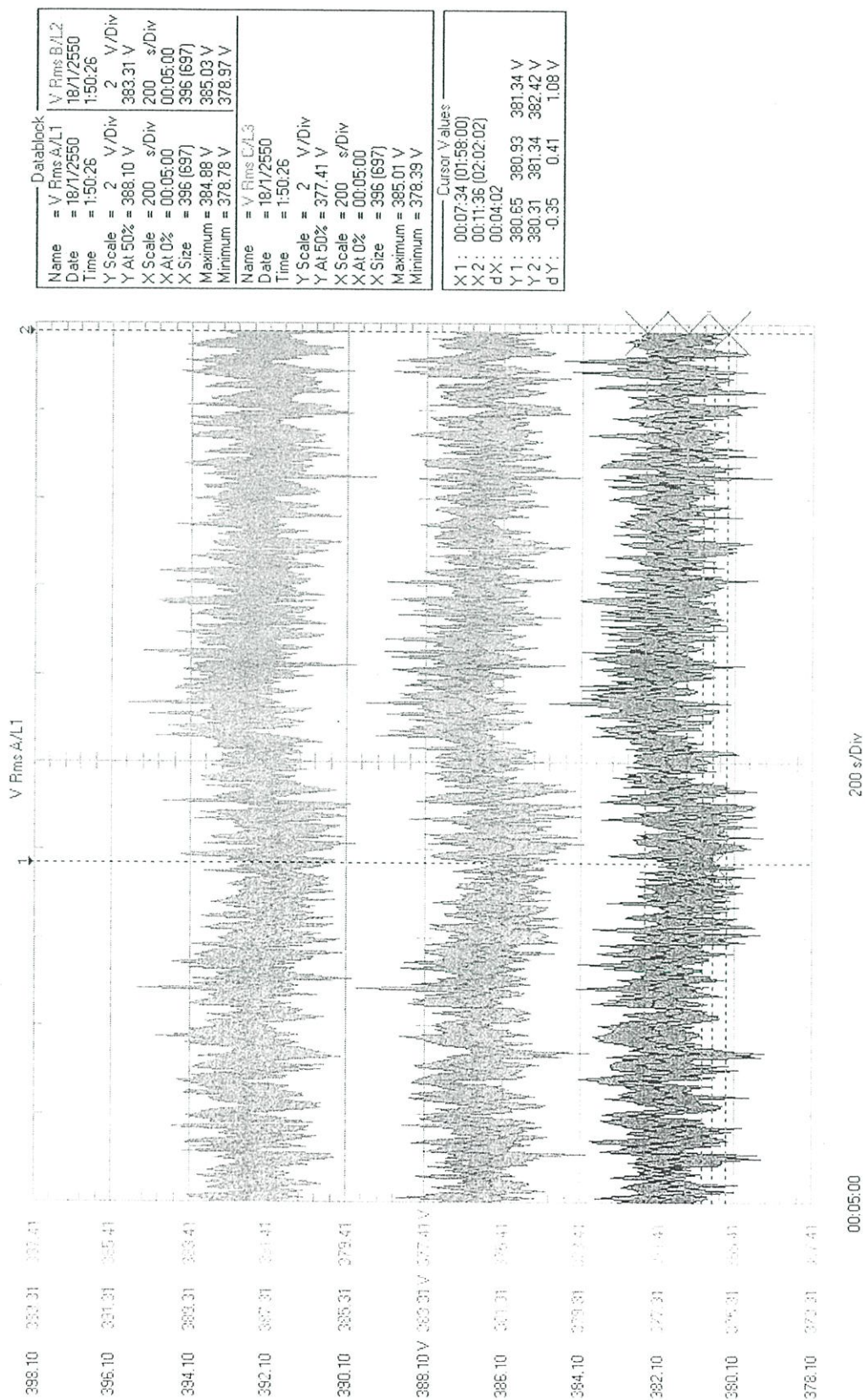
Remark: .....

| Tested By                  | Inspected By               | Approved By                |
|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| .....<br>...../...../..... | .....<br>...../...../..... | .....<br>...../...../..... |

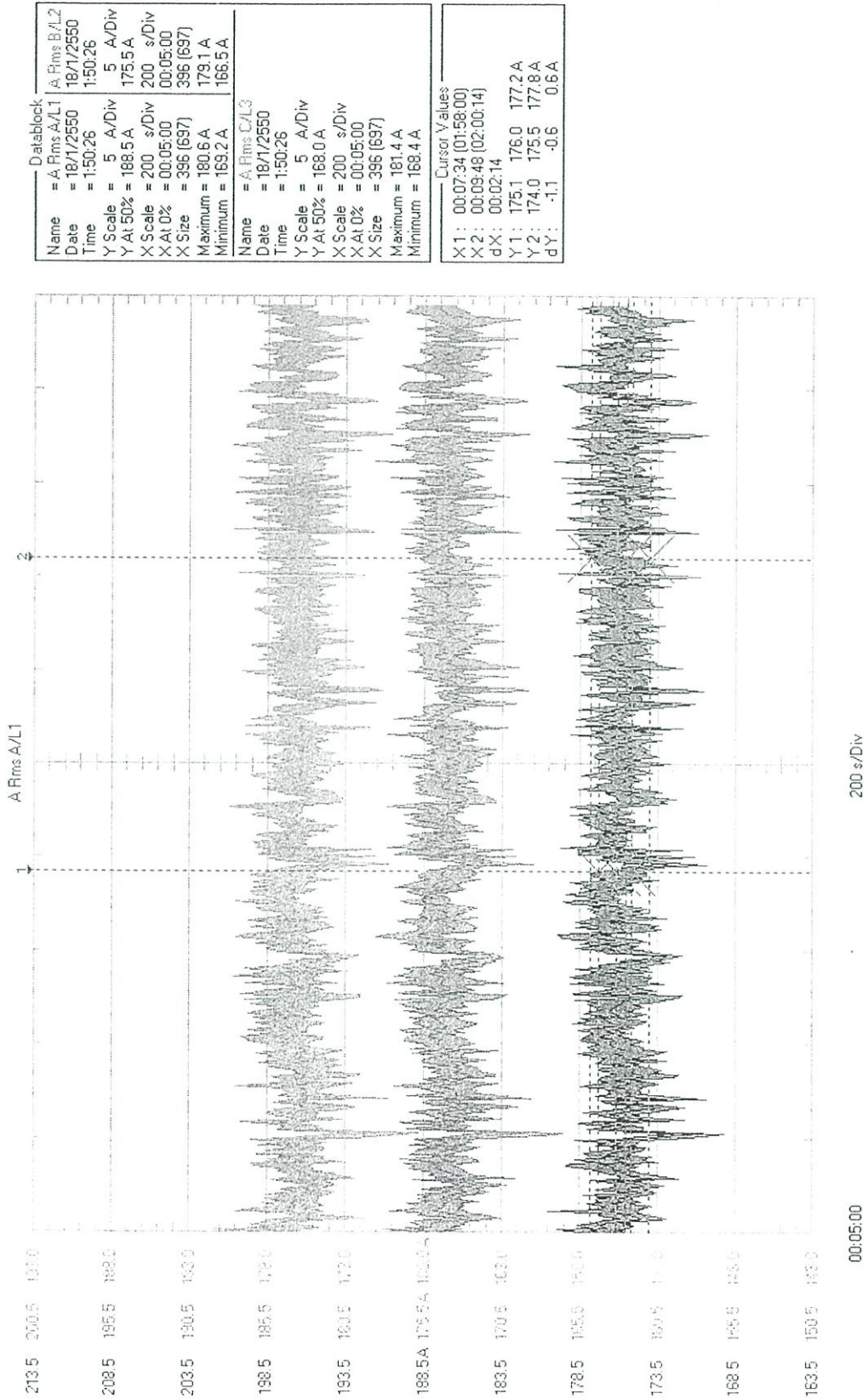
ภาคผนวก ฉ.

ข้อมูลที่วัดได้จาก Three Phase Power Quality Analyzer

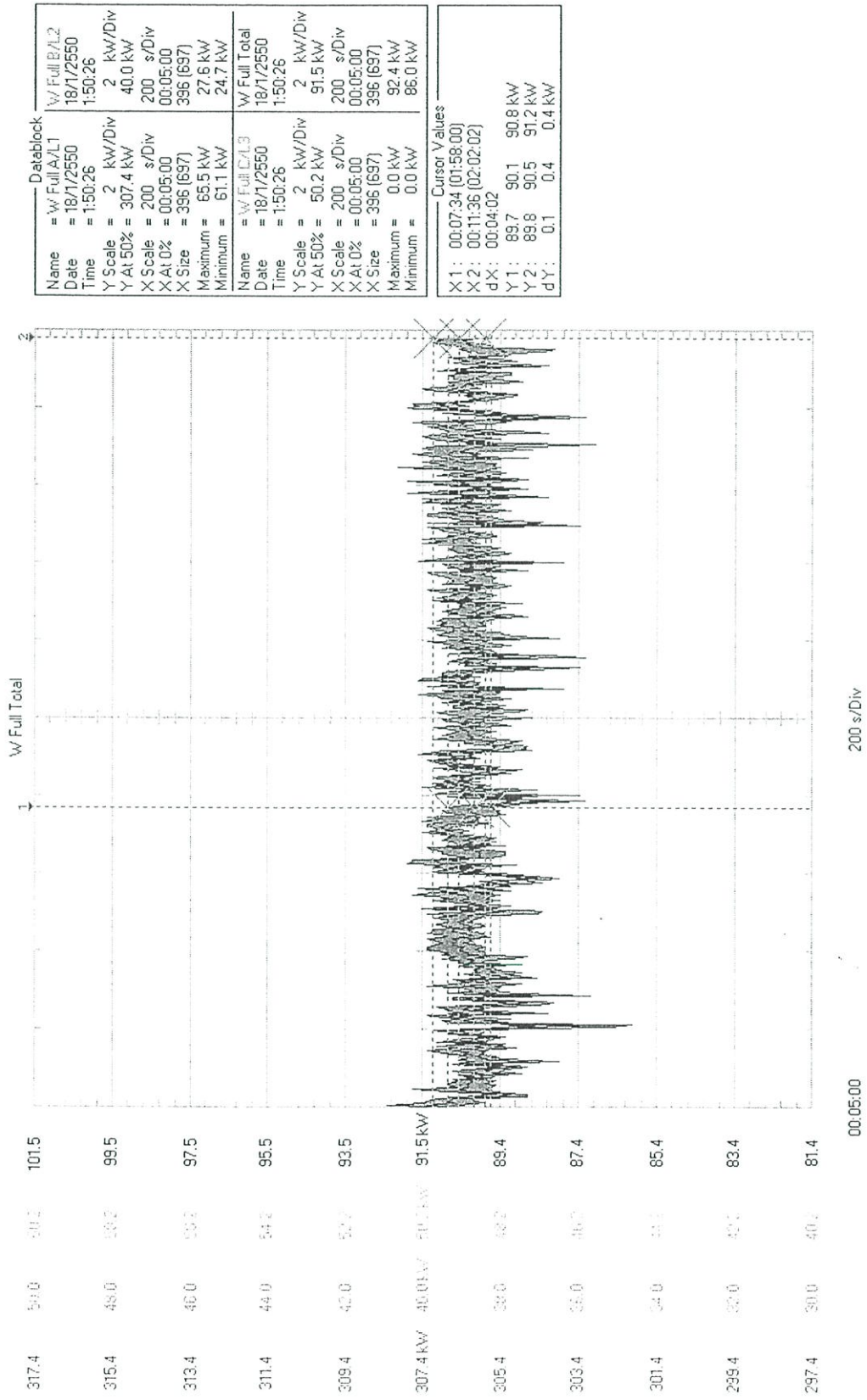
ตารางที่ ๓.1 ค่าแรงดันไฟฟ้าประสิทธิผลของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศสถานีสูบน้ำุมวิท F700S



ตารางที่ จ.2 ค่ากระแสไฟฟ้าประสัทธิผลของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศสถานีสูบน้ำวิท F700S



ตารางที่ จ.3 ค่ากำลังไฟฟ้าของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศสถานีสุมวิท F700S



ภาคผนวก ช.

ค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศ  
ที่จีเนติกอัลกอริทึมประมาณขึ้นมา

ตารางที่ ข.1 ค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศสถานีสูบน้ำที่จังหวัดฉะเชิงเทรา  
อัลกอริทึมประมาณขึ้นมา

| <b>F700S</b> | 1st      | 2nd      | 3rd      | 4th      | 5th      |
|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $R_1$        | 0.0281   | 0.051    | 0.0869   | 0.0871   | 0.0916   |
| $R_2$        | 0.0383   | 0.0396   | 0.041    | 0.0351   | 0.041    |
| $jX_1$       | 0.193336 | 0.580008 | 0.451118 | 1.385575 | 0.451118 |
| $jX_2$       | 1.997806 | 1.256685 | 1.32113  | 0.418895 | 1.32113  |
| $R_c$        | 918.83   | 659.39   | 785.11   | 912.57   | 868.59   |
| $jX_m$       | 25.35925 | 15.43466 | 12.85685 | 14.98355 | 12.92129 |
| $m$          | 0.0209   | 0.03     | 0.0168   | 0.0074   | 0.0124   |

| <b>F700E</b> | 1st      | 2nd      | 3rd      | 4th      | 5th      |
|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $R_1$        | 0.0864   | 0.0545   | 0.0797   | 0.0712   | 0.0707   |
| $R_2$        | 0.0339   | 0.0343   | 0.0339   | 0.0342   | 0.0342   |
| $jX_1$       | 0.668895 | 0.641025 | 0.668895 | 0.668895 | 0.668895 |
| $jX_2$       | 2.424746 | 2.396875 | 2.424746 | 2.424746 | 2.424746 |
| $R_c$        | 203.91   | 204.82   | 223.57   | 228.69   | 238.17   |
| $jX_m$       | 17.36341 | 16.88961 | 17.39128 | 17.19618 | 17.25193 |
| $m$          | 0.0244   | 0.0277   | 0.0246   | 0.0244   | 0.0273   |

| <b>F701S</b> | 1st      | 2nd      | 3rd      | 4th      | 5th      |
|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $R_1$        | 0.0464   | 0.0183   | 0.0207   | 0.0262   | 0.01     |
| $R_2$        | 0.0361   | 0.034    | 0.0436   | 0.0469   | 0.0436   |
| $jX_1$       | 1.159112 | 1.57768  | 0.289778 | 0.25758  | 0.321976 |
| $jX_2$       | 0.869334 | 0.12879  | 1.416693 | 0.901532 | 1.416693 |
| $R_c$        | 532.15   | 892.99   | 998.98   | 755.93   | 977.12   |
| $jX_m$       | 16.29197 | 11.94529 | 11.97749 | 8.435761 | 12.26727 |
| $m$          | 0.0222   | 0.0218   | 0.0128   | 0.0189   | 0.0053   |

ตารางที่ ข.1 (ต่อ) ค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศสถานีสูบน้ำุมวิทที่จีนติก  
อัลกอริทึมประมาณขึ้นมา

| <b>F701E</b> | 1st      | 2nd      | 3rd      | 4th      | 5th      |
|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $R_1$        | 0.0875   | 0.0686   | 0.1      | 0.0716   | 0.0736   |
| $R_2$        | 0.0466   | 0.0467   | 0.0282   | 0.0466   | 0.0464   |
| $jX_1$       | 0.222965 | 0.195094 | 1.895204 | 0.195094 | 0.222965 |
| $jX_2$       | 1.477144 | 1.477144 | 0.195094 | 1.477144 | 1.477144 |
| $R_c$        | 948.49   | 807.66   | 999      | 849.54   | 650.27   |
| $jX_m$       | 7.83165  | 7.83165  | 9.057958 | 7.83165  | 7.83165  |
| $m$          | 0.0092   | 0.0091   | 0.03     | 0.005    | 0.005    |

| <b>F750S</b> | 1st      | 2nd     | 3rd      | 4th      | 5th      |
|--------------|----------|---------|----------|----------|----------|
| $R_1$        | 0.0859   | 0.0329  | 0.0869   | 0.0378   | 0.0373   |
| $R_2$        | 0.0289   | 0.0376  | 0.041    | 0.0378   | 0.0372   |
| $jX_1$       | 1.426565 | 0.66573 | 0.44382  | 0.760835 | 0.760835 |
| $jX_2$       | 0.824237 | 0.22191 | 1.299759 | 0.031701 | 0.063403 |
| $R_c$        | 598.48   | 832.85  | 785.11   | 683.26   | 826.57   |
| $jX_m$       | 25.36115 | 6.81581 | 12.64887 | 6.530497 | 6.562198 |
| $m$          | 0.026    | 0.0114  | 0.0168   | 0.0065   | 0.0192   |

| <b>F750E</b> | 1st      | 2nd      | 3rd      | 4th      | 5th      |
|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $R_1$        | 0.011    | 0.0476   | 0.0476   | 0.0831   | 0.0831   |
| $R_2$        | 0.0503   | 0.0352   | 0.0352   | 0.0282   | 0.0282   |
| $jX_1$       | 0.139322 | 1.142439 | 1.142439 | 1.97837  | 1.97837  |
| $jX_2$       | 2.034098 | 1.588269 | 1.588269 | 1.003117 | 1.003117 |
| $R_c$        | 274.95   | 337.26   | 333.99   | 405.92   | 426.87   |
| $jX_m$       | 8.554359 | 11.56371 | 11.59157 | 17.58241 | 17.52668 |
| $m$          | 0.03     | 0.0113   | 0.0173   | 0.005    | 0.005    |

ตารางที่ ข.1 (ต่อ) ค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลของมอเตอร์พัฒนาบะบายอากาศสถานีสูบน้ำุมวิทที่จีนติก  
อัลกอริทึมประมาณขึ้นมา

| <b>F751S</b> | 1st      | 2nd      | 3rd      | 4th      | 5th      |
|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $R_1$        | 0.0822   | 0.01     | 0.0869   | 0.0521   | 0.0106   |
| $R_2$        | 0.0328   | 0.0344   | 0.041    | 0.0339   | 0.0373   |
| $jX_1$       | 1.570295 | 1.410061 | 0.448656 | 1.538248 | 0.993452 |
| $jX_2$       | 0.352515 | 0.672984 | 1.31392  | 0.064094 | 1.057546 |
| $R_c$        | 923.85   | 866.72   | 785.11   | 311.99   | 107.08   |
| $jX_m$       | 15.44658 | 19.58062 | 12.78669 | 10.31908 | 17.08097 |
| $m$          | 0.0136   | 0.0275   | 0.0168   | 0.0222   | 0.0174   |

| <b>F751E</b> | 1st      | 2nd      | 3rd      | 4th      | 5th      |
|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $R_1$        | 0.059    | 0.0828   | 0.0558   | 0.0396   | 0.0547   |
| $R_2$        | 0.034    | 0.0338   | 0.034    | 0.0341   | 0.034    |
| $jX_1$       | 1.645479 | 1.61759  | 1.645479 | 1.61759  | 1.645479 |
| $jX_2$       | 1.004021 | 1.004021 | 1.004021 | 1.004021 | 1.004021 |
| $R_c$        | 183.5    | 230.22   | 177.59   | 182.55   | 184.52   |
| $jX_m$       | 12.43871 | 12.10403 | 12.4666  | 12.38293 | 12.41082 |
| $m$          | 0.0165   | 0.0246   | 0.0144   | 0.02     | 0.0167   |

ตารางที่ ข.2 ค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศสถานีหัวลำโพงที่จีนติก  
อัลกอริทึมประมาณขึ้นมา

| HUA    | F100S    | F101S    | F150S    | F151S    | F100E    | F101E    | F150E    | F151E    |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $R_1$  | 0.0499   | 0.0864   | 0.0327   | 0.0711   | 0.0556   | 0.0468   | 0.051    | 0.0872   |
| $R_2$  | 0.0303   | 0.0325   | 0.0303   | 0.0291   | 0.0266   | 0.0229   | 0.0244   | 0.0244   |
| $jX_1$ | 1.666762 | 0.54469  | 0.633652 | 0.708346 | 1.504675 | 2.200292 | 1.895204 | 0.835931 |
| $jX_2$ | 0.192319 | 1.69815  | 1.774226 | 1.642076 | 0.947388 | 0.807702 | 0.89186  | 1.922641 |
| $R_c$  | 98.88    | 507.15   | 994.36   | 736.79   | 840.09   | 739.35   | 794.92   | 754.98   |
| $jX_m$ | 13.68668 | 24.47899 | 23.06493 | 111.146  | 21.12118 | 104.9456 | 107.4413 | 157.1271 |
| $m$    | 0.0133   | 0.0069   | 0.025    | 0.03     | 0.0097   | 0.03     | 0.0153   | 0.0107   |

ตารางที่ ข.3 ค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศสถานีสามย่านที่จีนติก  
อัลกอริทึมประมาณขึ้นมา

| SAM    | F200S    | F201S    | F250S    | F200E    | F201E    | F250E    |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $R_1$  | 0.0208   | 0.0531   | 0.1      | 0.024    | 0.0703   | 0.0738   |
| $R_2$  | 0.0314   | 0.0322   | 0.0353   | 0.0499   | 0.0233   | 0.0257   |
| $jX_1$ | 1.19131  | 1.674273 | 0.645333 | 2.5368   | 2.118169 | 1.923941 |
| $jX_2$ | 0.901532 | 0.193185 | 0.871199 | 0.278769 | 0.752507 | 0.446131 |
| $R_c$  | 466.73   | 102.72   | 433.51   | 196.95   | 414.24   | 526.5    |
| $jX_m$ | 23.6974  | 14.03814 | 12.58399 | 210.2477 | 160.7579 | 61.53822 |
| $m$    | 0.0216   | 0.0076   | 0.0097   | 0.0295   | 0.0184   | 0.005    |

ตารางที่ ข.4 ค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศสถานีลูมพินีที่จันตึก  
อัลกอริทึมประมาณขึ้นมา

| LUM    | F400S    | F401S    | F450S    | F451S    | F400E    | F401E    | F450E    | F451E    |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $R_1$  | 0.0141   | 0.1      | 0.0806   | 0.069    | 0.0494   | 0.0896   | 0.1      | 0.0585   |
| $R_2$  | 0.0348   | 0.0276   | 0.0366   | 0.043    | 0.0251   | 0.0261   | 0.039    | 0.0282   |
| $jX_1$ | 0.896256 | 1.472421 | 0.546291 | 0.128539 | 0.891258 | 1.281183 | 0.055779 | 1.562866 |
| $jX_2$ | 0.832238 | 0.096027 | 1.156851 | 0.964043 | 1.866071 | 1.225479 | 1.896485 | 0.6698   |
| $R_c$  | 120.11   | 571.23   | 508.06   | 610.75   | 507.86   | 932.22   | 988.1    | 629.78   |
| $jX_m$ | 12.99572 | 9.762794 | 17.48131 | 9.801102 | 19.80263 | 12.97894 | 13.61007 | 21.21032 |
| $m$    | 0.0119   | 0.03     | 0.0195   | 0.0266   | 0.02     | 0.0149   | 0.0119   | 0.0159   |

ตารางที่ ข.5 ค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศสถานีคลองเตยที่จันตึก  
อัลกอริทึมประมาณขึ้นมา

| KHO    | F500S    | F501S    | F500E    | F501E    |
|--------|----------|----------|----------|----------|
| $R_1$  | 0.0606   | 0.062    | 0.0172   | 0.0503   |
| $R_2$  | 0.0288   | 0.0341   | 0.023    | 0.0289   |
| $jX_1$ | 1.634709 | 0.352446 | 2.507227 | 1.670731 |
| $jX_2$ | 0.128212 | 1.441825 | 0.027858 | 0.946748 |
| $R_c$  | 550.86   | 814.66   | 998.99   | 911.77   |
| $jX_m$ | 24.16805 | 18.167   | 17.43916 | 10.66483 |
| $m$    | 0.024    | 0.0241   | 0.0104   | 0.0148   |

ตารางที่ ข.6 ค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศสถานีศูนย์สิริกิติ์ที่จีเนติก  
อัลกอริทึมประมาณขึ้นมา

| SIR    | F600S    | F601S    | F650S    | F650E    |
|--------|----------|----------|----------|----------|
| $R_1$  | 0.0389   | 0.0179   | 0.0104   | 0.0772   |
| $R_2$  | 0.0276   | 0.0329   | 0.0372   | 0.0291   |
| $jX_1$ | 2.307372 | 0.683967 | 0.096122 | 1.08622  |
| $jX_2$ | 0.341833 | 2.450883 | 2.178758 | 2.061033 |
| $R_c$  | 170.27   | 805.5    | 999      | 285.9    |
| $jX_m$ | 13.67332 | 19.83505 | 20.538   | 18.91137 |
| $m$    | 0.0299   | 0.0241   | 0.03     | 0.0279   |

ตารางที่ ข.7 ค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศอาคารระบายอากาศ  
ระหว่างสถานีศูนย์สิริกิติ์-สุขุมวิทที่จีเนติกอัลกอริทึมประมาณขึ้นมา

| SV03   | F1100S   | F1101S   |
|--------|----------|----------|
| $R_1$  | 0.0428   | 0.0655   |
| $R_2$  | 0.0327   | 0.0284   |
| $jX_1$ | 1.280894 | 2.11626  |
| $jX_2$ | 0.863211 | 0.55691  |
| $R_c$  | 715.48   | 418.9    |
| $jX_m$ | 8.186583 | 9.913005 |
| $m$    | 0.0277   | 0.0105   |

ภาคผนวก ซ.  
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์  
(อยู่ระหว่างดำเนินการตีพิมพ์)

# วิธีการแบบประหยัดสำหรับการประเมินประสิทธิภาพขณะใช้งาน ของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน

## Economical On-Site Efficiency Estimation Technique of Subway Tunnel Ventilation Fan Motor

อารีย์ หวังสุภผล\* ธนภวัฒน์ ภูมิภาค\*\* ชัยวุฒิ นัตรอุทัย\*

\* ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

\*\* ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการแบบประหยัดสำหรับการประเมินประสิทธิภาพขณะใช้งานของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินเพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการซ่อมบำรุงตามสภาพ การประเมินค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ใช้พื้นฐานของวงจรสมมูลซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆจะพิจารณาหาได้จากการใช้ข้อมูลทางไฟฟ้าและความเร็วมอเตอร์ที่วัดได้จริงขณะใช้งานร่วมกับการใช้หลักการหาค่าที่เหมาะสม (จินตคณิตอัลกอริทึม) วิธีการที่นำเสนอนี้จะทำการทดสอบกับมอเตอร์พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินพิกัด 108 kW ที่ใช้งานอยู่ตามสถานีต่างๆ ซึ่งผลการประเมินประสิทธิภาพที่ได้จะทำการเปรียบเทียบกับผลที่คำนวณจากค่าที่วัดได้จริงจากอุปกรณ์ของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 2% จะเห็นได้ว่าวิธีการที่นำเสนอนี้มีความสะดวก ประหยัด ความแม่นยำ และเหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับระบบการซ่อมบำรุงตามสภาพเพื่อทำให้เกิดผลที่ดียิ่งขึ้น

### Abstract

This paper proposes the economical technique of subway tunnel ventilation fan motors on-site efficiency estimation (OEE) for condition based maintenance. The estimated efficiency is based on the equivalent circuit model. These model parameters can be determined by using the data of on-site measured electrical input and motor speed coupled with the optimization technique (Genetic Algorithms). The subway tunnel ventilation fan motors (108 kW) operated at various stations are tested by using this proposed technique. The comparison of motor efficiencies obtained from the estimation and the calculated values from the reliable variable speed drive (VSD) are illustrated and discussed. The efficiency results show that the errors are less than 2%. It can be seen that this proposed technique is simple, low cost, accurate and suitable for the application of improved condition based maintenance.

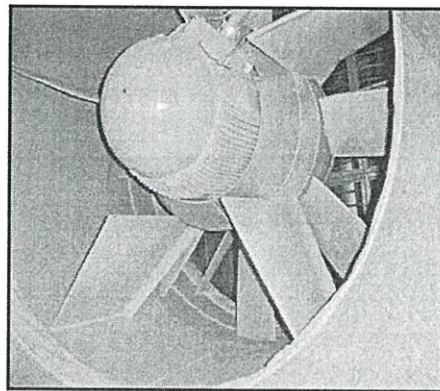
## 1. บทนำ

พลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานหลักที่ใช้ในระบบการดำเนินการรถไฟฟ้าใต้ดินของประเทศไทย ซึ่งพบว่ามีการใช้พลังงานไฟฟ้ามากกว่า 10 ล้านหน่วยต่อเดือน ดังนั้นการใช้พลังงานไฟฟ้าจึงจำเป็นต้องจัดการให้มีความคุ้มค่าและมีประสิทธิภาพมากที่สุด การกำหนดแนวทางการตรวจสอบและการซ่อมบำรุงเครื่องจักรในระบบให้อยู่ในสภาพที่ดีและมีประสิทธิภาพที่สูงจึงเป็นส่วนหนึ่งในการช่วยลดการสิ้นเปลืองพลังงานได้ มอเตอร์พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์ (tunnel ventilation fan motor, TVF) เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีพิกัดกำลังสูงกลุ่มหนึ่งซึ่งมีการใช้งานอยู่เป็นจำนวนมากตามสถานีต่าง ๆ จึงมีความจำเป็นต้องทำการตรวจวัดหาค่าประสิทธิภาพขณะที่ใช้จริงอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ดังกล่าว โดยทั่วไปแล้ววิธีการหาค่าประสิทธิภาพที่มีความแม่นยำ จำเป็นจะต้องกระทำในห้องปฏิบัติการเช่น การทดสอบภาระทางกล (load test) หรือการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูล (no-load and blocked-rotor tests) จะเห็นได้ว่าวิธีการเหล่านี้ไม่สามารถนำมาใช้ได้กับมอเตอร์ที่จำเป็นต้องอยู่ในระบบการให้บริการตลอดเวลา ทั้งนี้เนื่องมาจากต้องมีการถอดมอเตอร์ออกจากระบบเพื่อทำการทดสอบและต้องทำการติดตั้งมอเตอร์กลับเข้าไปใหม่ซึ่งจำเป็นต้องใช้เวลานานและมีค่าใช้จ่ายสูงอีกด้วย อย่างไรก็ตามยังคงมีวิธีการอื่น ๆ ที่สะดวกเช่น การวัดค่าความเร็ว (slip method) หรือการวัดค่ากระแส (current method) ขณะมอเตอร์ทำงานอยู่ในระบบแต่วิธีการเหล่านี้จะมีความคลาดเคลื่อนที่สูง [1] ดังนั้นบทความนี้จะนำเสนอแนวทางใหม่ที่สะดวก ประหยัด (economical technique) และมีความแม่นยำสูง สำหรับการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ขณะใช้งานจริง (on-site efficiency estimation, OEE)

## 2. ระบบระบายอากาศในอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน

ระบบระบายอากาศในอุโมงค์มีไว้เพื่อระบายอากาศร้อนในอุโมงค์ในสภาวะปกติและสภาวะที่คับคั่ง รวมถึงการระบายอากาศร้อนและควันในสภาวะฉุกเฉิน อีกทั้งยังจำเป็นต้องควบคุมทิศทางและแรงดันลมจากการอัด

อากาศในการวิ่งของรถไฟฟ้า (train piston effect) ออกสู่ภายนอก



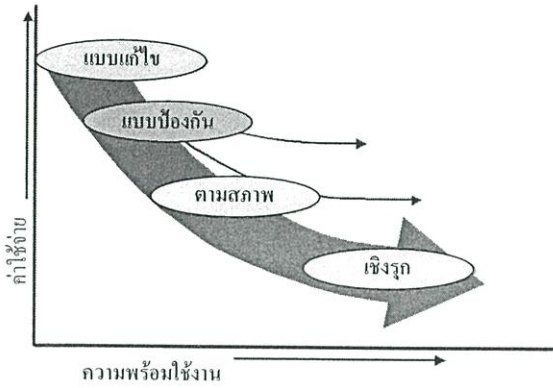
รูปที่ 1 มอเตอร์พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์

พัดลมระบายอากาศเป็นส่วนหนึ่งของระบบระบายอากาศในอุโมงค์ซึ่งประกอบไปด้วย ระบบควบคุมความร้อนใต้ซาลา ระบบระบายอากาศในอุโมงค์ และระบบตรวจจับความร้อนในอุโมงค์ ในบทความนี้จะทำการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์ที่ใช้งานอยู่ตามสถานีต่าง ๆ ในปัจจุบันซึ่งมีพิกัดดังนี้ 108 kW, 380 V, 50 Hz, 205 A, cos 0.85, 985 rpm, Ins. Class H ซึ่งมีการใช้งานติดตั้งแบบ Axial Flow หมายถึงลมผ่านในแนวแกนของโรเตอร์ ดังรูปที่ 1 ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ใช้แหล่งจ่ายที่เป็น Inverter ABB, type ACS 604-0140-3, 140 kVA, 380/400/415 VAC เพื่อควบคุมความเร็วรอบของพัดลม (variable speed drive, VSD)

## 3. ระบบการบำรุงรักษา

วิวัฒนาการในการบำรุงรักษา (maintenance) [2-3] มีพัฒนาการอย่างต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 2 โดยเริ่มตั้งแต่การบำรุงรักษาเมื่อเครื่องจักรนั้นเกิดชำรุดขัดข้อง (reactive maintenance) มาเป็นระบบการบำรุงรักษาแบบป้องกัน (preventive maintenance) และต่อมาเป็นแนวคิดแบบการบำรุงรักษาตามสภาพ (condition based maintenance) และในที่สุดมาเป็นระบบการบำรุงรักษาแบบเชิงรุก (proactive maintenance) จากรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่าการดำเนินการบำรุงรักษาแต่ละรูปแบบนั้นมีความแตกต่างกันอยู่มากพอควร โดยเริ่มตั้งแต่การบำรุงรักษาแบบแก้ไขซึ่งจะกระทำเมื่อเครื่องจักรบกพร่องทำให้เกิดค่าใช้จ่ายและความเสี่ยงสูง

การบำรุงรักษาแบบป้องกันเป็นการปฏิบัติตามวาระซึ่งช่วยลดความล้มเหลวการทำงานของเครื่องจักรให้น้อยลงได้แต่



รูปที่ 2 วิวัฒนาการของระบบการบำรุงรักษา

ยังคงมีค่าใช้จ่ายสูงและอาจเกิดความเสียหายของเครื่องจักรได้ในอนาคต สำหรับการบำรุงรักษาตามสภาพเป็นการตรวจวัดสภาพเครื่องจักรขณะใช้งานจริงซึ่งจะมีประโยชน์อย่างมากเนื่องจากมีข้อมูลในการวินิจฉัยสภาพจริงทำให้สามารถลดการขัดข้องของเครื่องจักรได้มากยิ่งขึ้น และยังช่วยลดขั้นตอนการบำรุงรักษาแบบป้องกันได้อีกด้วยซึ่งเป็นการลดค่าใช้จ่ายลงได้ การบำรุงรักษาแบบล่าสุดคือการบำรุงรักษาเชิงรุกซึ่งเป็นการวิเคราะห์หาสาเหตุที่อาจจะทำให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องจักรก่อนความเสียหายจะเกิดขึ้นทำให้เครื่องจักรเกิดความล้มเหลวในการทำงานน้อยที่สุด จะเห็นได้ว่าการบำรุงรักษาเชิงรุกนั้นจะมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการซ่อมบำรุงต่ำที่สุดและทำให้เครื่องจักรมีความพร้อมใช้งานมากที่สุดด้วย สำหรับแนวทางการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์ที่นำเสนอนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์เป็นข้อมูลส่วนหนึ่งในระบบการบำรุงรักษาตามสภาพ

4. การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ขณะใช้งาน

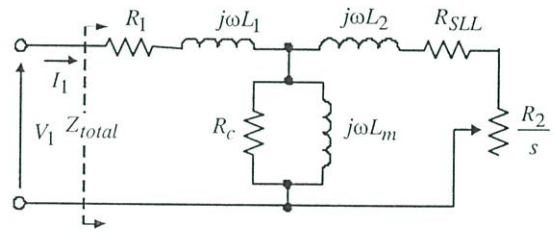
โดยทั่วไปวิธีการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ขณะใช้งานที่สะดวกจะเป็นการใช้ข้อมูลจากแผ่นป้ายพิกัดร่วมกับข้อมูลที่วัดได้จากมอเตอร์เช่น current method ซึ่งค่าประสิทธิภาพสามารถประมาณได้จาก

$$\text{Load (p.u.)} = \left( \frac{I_{\text{Measured}}}{I_{\text{fl(Nameplate)}}} \right) \left( \frac{V_{\text{Measured}}}{V_{\text{Nameplate}}} \right) \tag{1}$$

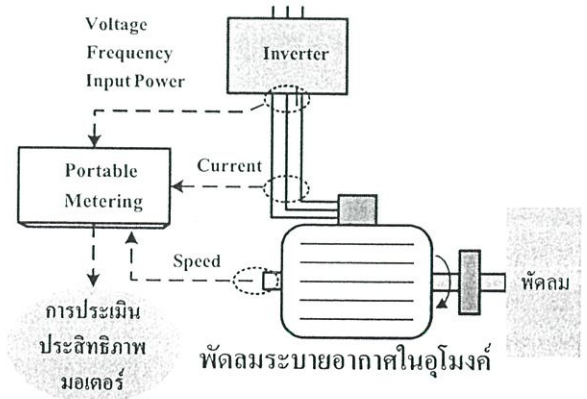
$$P_{\text{out}} = P_{\text{rated(Nameplate)}} \times \text{Load (p.u.)} \tag{2}$$

$$\text{Field Efficiency} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in(Measured)}}} \tag{3}$$

เมื่อค่า  $I_{\text{Measured}}$ ,  $V_{\text{Measured}}$  และ  $P_{\text{in}}$  เป็นกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าจากการวัดตามลำดับ ค่า  $I_{\text{fl}}$ ,  $V_{\text{Nameplate}}$  และ  $P_{\text{rated}}$  เป็นกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าพิกัดจากแผ่นป้ายพิกัดตามลำดับ ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากวิธีการนี้ จะมีความคลาดเคลื่อนสูงเนื่องจากค่ากำลังของมอเตอร์  $P_{\text{out}}$  ใช้เพียงค่ากระแสที่วัดได้เปรียบเทียบกับข้อมูลที่อ้างอิงจากแผ่นป้ายพิกัด แต่ถ้าต้องการเพิ่มความแม่นยำของวิธีนี้จำเป็นต้องทราบข้อมูลของกระแสขณะไม่มีภาระร่วมพิจารณาด้วยซึ่งเป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติ



รูปที่ 3 วงจรสมมูลมอเตอร์พัดลมระบายอากาศต่อเฟส



รูปที่ 4 การตรวจวัดข้อมูลของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศ

บทความนี้เป็น การนำเสนอวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ วงจรสมมูลของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศดังรูปที่ 3 ใน

แนวทางใหม่โดยการใช้ข้อมูลทางไฟฟ้าที่ได้จากการวัดจริง (แรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า ความถี่) และข้อมูลทางกลคือ ความเร็วรอบมอเตอร์ขณะใช้งานดังรูปที่ 4 นำมาในการประมวลผลร่วมกับวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบจีเนติก อัลกอริทึม (Genetic Algorithms) ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดของคำตอบฟังก์ชันที่เป็นไปได้ โดยการจำลองการขยายพันธุ์ของยีน (gene) ซึ่งเป็นการคัดเลือกโครโมโซม (chromosome) ที่เหมาะสมที่สุด และถ่ายทอดไปยังคุณลักษณะโครโมโซมลูก โครโมโซมทางพันธุกรรม จะเป็นข้อมูลที่ประกอบด้วยบิตจำนวน  $n$  บิต บทความนี้ใช้ข้อมูลบิตเป็นแบบจำนวนจริง (real) ขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมจะประกอบด้วยฟังก์ชันหลัก (objective) และเงื่อนไข (constraints) โดยจะจัดให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันจำลอง (pseudo) และค่า Fitness นำมาประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรสมมูลที่เหมาะสมที่ทำให้ค่ากระแส ( $I_{1,cal}$ ) และกำลังไฟฟ้า ( $P_{in,cal}$ ) ที่คำนวณได้ มีค่าใกล้เคียงกับค่ากระแส ( $I_{1,mea}$ ) และกำลังไฟฟ้า ( $P_{in,mea}$ ) ที่วัดได้จริงซึ่งจะทำให้สมการเป้าหมาย (Objective Function) มีค่าต่ำที่สุด [4]

$$\text{Min. } F_{\text{objective}} = \left| \frac{I_{1,cal}}{I_{1,mea}} - 1 \right|^2 + \left| \frac{P_{in,cal}}{P_{in,mea}} - 1 \right|^2 \quad (4)$$

โดยกระแส และกำลังไฟฟ้าที่คำนวณได้สามารถหาได้จาก

$$I_{1,cal} = \frac{V_1}{Z_{total}(R_1, R_2, R_c, R_{SLL}, L_1, L_2, L_m)} \quad (5)$$

$$P_{in,cal} = 3V_1 I_{1,cal} (PF) \quad (6)$$

จะเห็นได้ว่าการเพิ่ม  $R_{SLL}$  (stray load loss parameter) [5] ในรูปที่ 3 เป็นการปรับปรุงวงจรสมมูลให้ใกล้เคียงกับสภาพใช้งานจริงเพื่อทำให้ได้ค่าประสิทธิภาพที่ประเมินมีความแม่นยำยิ่งขึ้น เมื่อทราบค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลแล้วจะสามารถหาค่ากำลังของมอเตอร์  $P_{out}$  ขณะใช้งานจริงได้จากกรคำนวณโดยใช้หลักการของวงจรสมมูล และนำไปประเมินค่าประสิทธิภาพโดยใช้สมการที่ (3)

## 5. การทดลองและการวิเคราะห์ผล

ในบทความนี้ได้นำวิธีการที่นำเสนอไปประเมินหาค่าประสิทธิภาพขณะใช้งานจริงของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์ที่ติดตั้งอยู่ในสถานีนต่าง ๆ ซึ่งมอเตอร์จะมีประสิทธิภาพที่พิกัดประมาณ 94 % (จากแผ่นป้ายพิกัด) มอเตอร์แต่ละตัวจะมทำงานอยู่ 2 รูปแบบ คือ การจ่ายลมเข้าอุโมงค์ (supply-S) และการดูดลมออกจากอุโมงค์ (exhaust-E) ซึ่งจะใช้ความเร็วที่แตกต่างกัน ในการทำงานของมอเตอร์จะใช้แหล่งจ่ายที่เป็น Inverter เพื่อควบคุมความเร็วพัดลมให้ทำงานในแต่ละรูปแบบ จากรูปที่ 4 ทำการวัดข้อมูลต่าง ๆ ของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศที่สถานีหัวลำโพง (HUA) จำนวน 3 ตัว (F100, F101, F150) โดยวัดข้อมูลในขณะที่พัดลมทำงานทั้งแบบจ่ายลมเข้า (S) และดูดลมออก (E) ซึ่งข้อมูลต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลจากการวัดขณะใช้งานของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศที่สถานีหัวลำโพงด้วยวิธี OEE

การวัดค่าขณะใช้งาน

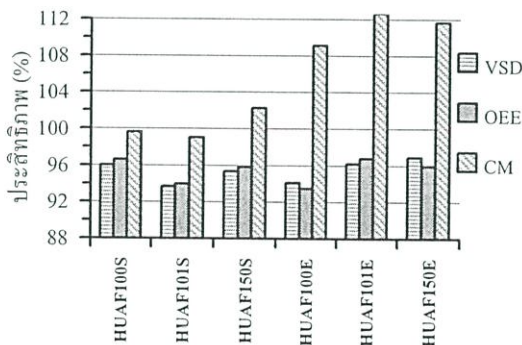
|          | Speed<br>(rpm) | Freq.<br>(Hz) | Voltage<br>(V) | Current<br>(A) | $P_m$<br>(kW) |
|----------|----------------|---------------|----------------|----------------|---------------|
| TVF      |                |               |                |                |               |
| HUAF100S | 1010.0         | 51.04         | 368.14         | 172.24         | 88.24         |
| HUAF101S | 1010.0         | 51.02         | 370.80         | 170.18         | 88.36         |
| HUAF150S | 1000.0         | 50.44         | 366.22         | 154.90         | 76.92         |
| HUAF100E | 880.0          | 44.37         | 341.54         | 144.75         | 62.82         |
| HUAF101E | 880.0          | 44.35         | 329.44         | 134.53         | 54.54         |
| HUAF150E | 880.0          | 44.38         | 335.80         | 145.85         | 60.81         |

เมื่อนำข้อมูลในตารางที่ 1 ของมอเตอร์แต่ละตัวไปทำการประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูล และสามารถนำไปใช้คำนวณหาค่า  $P_{out}$  (OEE) ของมอเตอร์แต่ละตัวได้ซึ่งเมื่อนำผลมาเปรียบเทียบกับค่า  $P_{out}$  (VSD) ที่เกิดขึ้นจริงซึ่งได้จากการแสดงค่าของ Inverter พบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกันมากดังแสดงในตารางที่ 2 และเมื่อนำไปพิจารณาประเมินหาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์โดยเปรียบเทียบกับวิธี CM (current method) เท่านั้น จะเห็นว่าวิธีการวัดความเร็ว (slip method) จะไม่สามารถนำมาใช้ประเมินประสิทธิภาพได้ทั้งนี้เนื่องจากมอเตอร์พัดลมมีการควบคุมความเร็ว ข้อมูลจากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าค่า

ประสิทธิภาพที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอมีความแม่นยำสูงเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จาก Inverter โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 2 % ในขณะที่วิธี CM จะมีความคลาดเคลื่อนที่สูงมากซึ่งแสดงผลการเปรียบเทียบดังรูปที่ 5

ตารางที่ 2 ผลการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมที่สถานีหัวลำโพงโดยใช้วิธี OEE และ CM

| TVF      | VSD               | OEE               | VSD         | OEE         | CM          |
|----------|-------------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|
|          | $P_{out}$<br>(kW) | $P_{out}$<br>(kW) | Eff.<br>(%) | Eff.<br>(%) | Eff.<br>(%) |
| HUAF100S | 84.73             | 85.22             | 96.02       | 96.58       | 99.62       |
| HUAF101S | 82.81             | 83.03             | 93.71       | 93.97       | 99.01       |
| HUAF150S | 73.33             | 73.73             | 95.34       | 95.85       | 102.25      |
| HUAF100E | 59.12             | 58.73             | 94.11       | 93.48       | 109.11      |
| HUAF101E | 52.44             | 52.77             | 96.15       | 96.75       | 112.66      |
| HUAF150E | 58.91             | 58.35             | 96.87       | 95.96       | 111.66      |



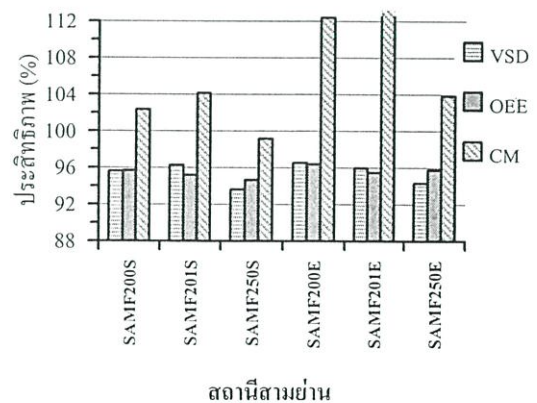
รูปที่ 5 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพขณะใช้งานจริงของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศที่สถานีหัวลำโพง

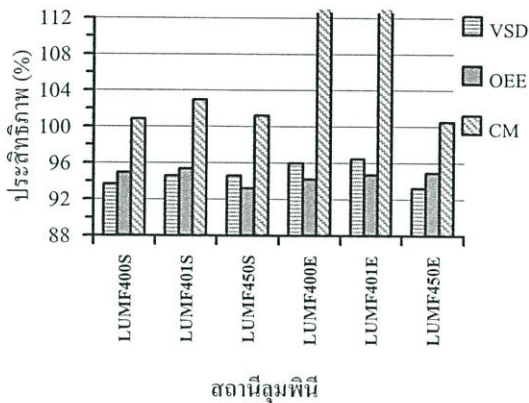
เพื่อเป็นการยืนยันผลสำเร็จของวิธีการที่นำเสนอได้ทำการประเมินค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศที่สถานีสามย่าน (SAM) จำนวน 3 ตัว (F200, F201, F250) และสถานีลุมพินี (LUM) จำนวน 3 ตัว (F400, F401, F450) ซึ่งผลการวัดค่าต่าง ๆ เมื่อใช้วิธีการที่นำเสนอแสดงดังตารางที่ 3 และผลการประเมินประสิทธิภาพขณะใช้งานจริงของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศแสดงได้ดังรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่าค่าประสิทธิภาพที่ประเมินได้ (OEE) มีความคลาดเคลื่อนจากค่าจริง (VSD) ไม่เกิน 2 % เช่นเดียวกัน

จากการประเมินค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศที่สถานีต่าง ๆ โดยใช้วิธีการที่นำเสนอจะเห็นว่าสามารถให้ค่าประสิทธิภาพที่มีความแม่นยำสูงซึ่งเป็นแนวทางใหม่ที่สะดวกรวดเร็ว และประหยัด เหมาะสมสำหรับการตรวจสอบและวินิจฉัยสภาพจริงของมอเตอร์ได้ในกรณีที่ไม่สามารถวัดค่า  $P_{out}$  ของมอเตอร์เพื่อนำมาใช้ตารางที่ 3 ข้อมูลจากการวัดขณะใช้งานของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศที่สถานีสามย่านและลุมพินีด้วยวิธี OEE

| TVF      | การวัดค่าขณะใช้งาน |               |                |                |                  |
|----------|--------------------|---------------|----------------|----------------|------------------|
|          | Speed<br>(rpm)     | Freq.<br>(Hz) | Voltage<br>(V) | Current<br>(A) | $P_{in}$<br>(kW) |
| SAMF200S | 1010.0             | 51.04         | 370.00         | 171.00         | 85.71            |
| SAMF201S | 1015.0             | 51.27         | 370.00         | 174.00         | 85.71            |
| SAMF250S | 1015.0             | 51.38         | 370.00         | 201.00         | 104.0            |
| SAMF200E | 880.0              | 44.39         | 345.00         | 150.00         | 63.83            |
| SAMF201E | 880.0              | 44.38         | 336.00         | 145.00         | 59.60            |
| SAMF250E | 880.0              | 44.40         | 320.00         | 146.00         | 62.40            |

| สถานีลุมพินี | การวัดค่าขณะใช้งาน |               |                |                |                  |
|--------------|--------------------|---------------|----------------|----------------|------------------|
|              | Speed<br>(rpm)     | Freq.<br>(Hz) | Voltage<br>(V) | Current<br>(A) | $P_{in}$<br>(kW) |
| LUMF400S     | 1009.6             | 50.97         | 371.00         | 168.00         | 85.71            |
| LUMF401S     | 1010.2             | 50.97         | 365.00         | 168.00         | 82.57            |
| LUMF450S     | 1009.6             | 51.17         | 365.00         | 200.00         | 100.0            |
| LUMF400E     | 880.0              | 44.35         | 339.00         | 144.00         | 57.32            |
| LUMF401E     | 880.0              | 44.35         | 333.00         | 140.00         | 54.87            |
| LUMF450E     | 880.0              | 44.41         | 340.00         | 146.00         | 68.45            |





รูปที่ 6 ค่าประสิทธิภาพขณะใช้งานจริงของมอเตอร์พัฒนา  
ระบบอากาศที่สถานีสามย่านและลมพินิ

เป็นข้อมูลที่สำคัญในระบบการบำรุงรักษาตามสภาพ ตัวอย่างเช่น ถ้าจากการตรวจสอบพบว่ามอเตอร์พัฒนาบางตัวมีประสิทธิภาพประมาณ 90 % ซึ่งต่ำกว่าปกติ (94 %) แสดงว่ามอเตอร์ตัวนั้นอาจจะมีสิ่งผิดปกติเกิดขึ้นแล้ว จำเป็นต้องมีการบำรุงรักษาโดยเร่งด่วนเพื่อป้องกันการเสียหายซึ่งอาจจะทำให้เกิดการขัดข้องในระบบการทำงาน ข้อได้เปรียบที่สำคัญของวิธีการที่นำเสนอนี้คือสามารถให้ผลการประเมินค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ขณะใช้งานจริงที่แม่นยำกว่าการใช้วิธีการดั้งเดิมเช่น การวัดค่ากระแสหรือการวัดค่าความเร็วซึ่งอาจจะไม่สามารถใช้ได้กับกรณีที่มีมอเตอร์มีการควบคุมความเร็ว

## 6. บทสรุป

การประเมินประสิทธิภาพมีความจำเป็นต่องานบำรุงรักษามอเตอร์ในปัจจุบันที่ใช้วิธีการบำรุงรักษาตามสภาพซึ่งมีการปรับระยะเวลาและรูปแบบของการซ่อมบำรุงเครื่องจักรตามความเหมาะสมเพื่อให้เกิดความคุ้มค่าสูงสุด และยังช่วยให้ทราบปัญหาหรือสภาพของมอเตอร์ได้อย่างลึกซึ้งซึ่งมากกว่าวิธีการตรวจวัดทั่วไป การประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์พัฒนาประเภทอากาศขณะใช้งานโดยใช้วิธีการที่นำเสนอนี้จะมีความสะดวกรวดเร็วและประหยัดเนื่องจากไม่มีการถอดมอเตอร์ออกจากระบบระบบอากาศเพื่อไปทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และมีความแม่นยำสูง (คลาดเคลื่อนไม่เกิน 2 %) วิธีการนี้จะใช้เพียงข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าแรงดัน กระแส ความถี่ และ

กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ และความเร็วรอบที่เพลลาของมอเตอร์ขณะใช้งานเท่านั้น ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการประเมินประสิทธิภาพตามวิธีที่นำเสนอนี้เป็นวิธีการใหม่ในปัจจุบันที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้งานได้จริงกับมอเตอร์ที่ไม่สามารถถอดออกจากระบบการทำงานได้ เนื่องจากการติดตั้งหรือการถอดมอเตอร์นั้นมีความยุ่งยากหรือมีค่าใช้จ่ายที่สูงมาก และที่สำคัญวิธีการที่นำเสนอนี้จะมีประโยชน์อย่างมากกับระบบการบำรุงรักษาตามสภาพ

## 7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท รถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน) และ Wire & Wireless Co., Ltd. ที่ได้ให้ความสะดวกและคำแนะนำเป็นอย่างดีในการเข้าทำการตรวจวัดค่าของมอเตอร์พัฒนาประเภทอากาศในอุโมงค์ที่สถานีต่าง ๆ

## 8. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. S. Hsu, and B. P. Scoggins, "Field test of motor efficiency and load changes through air-gap torque," IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 10, No. 3, pp. 471-477, September 1995.
- [2] ประยูท จันทระเจริญสุข, Module 202 ระบบจัดการงานซ่อมบำรุง Part 1, เอกสารการฝึกอบรม, บริษัท รถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน), 2548.
- [3] สุรพล ราษฎร์นุ้ย, วิศวกรรมการบำรุงรักษา, ซีเอ็ดยูเคชั่น, กรุงเทพฯ, 2545.
- [4] T.Phumphak, and C. Chat-uthai, "An Economical Method for Induction Motor Field Efficiency Estimation for Use in On-site Energy Audit and Management," Proceeding of 2004 International Conference on Power System Technology, PowerCon 2004, Singapore, November 2004.
- [5] IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motor and Generators, IEEE Standard 112-1996, New York, May 1997.

## ประวัติผู้เขียน

นายอารีย์ หวังสุภผล เกิดวันที่ 11 พฤศจิกายน พ.ศ. 2518 ที่อำเภอบางคอกแหลม จังหวัด กรุงเทพฯ ๑ จบการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง แผนกวิชาช่างไฟฟ้ากำลัง จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพฯ ๑ (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพฯ ในปัจจุบัน) ในปีการศึกษา 2537 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2541 ขณะนี้ทำงานอยู่ที่บริษัท รถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน) ซึ่งเป็นผู้ให้บริการรถไฟฟ้าใต้ดินสายแรกของประเทศไทย มีผลงานเขียนบทความเกี่ยวกับระบบรถไฟฟ้าใต้ดินลงในวารสารอุตสาหกรรมหลายฉบับ