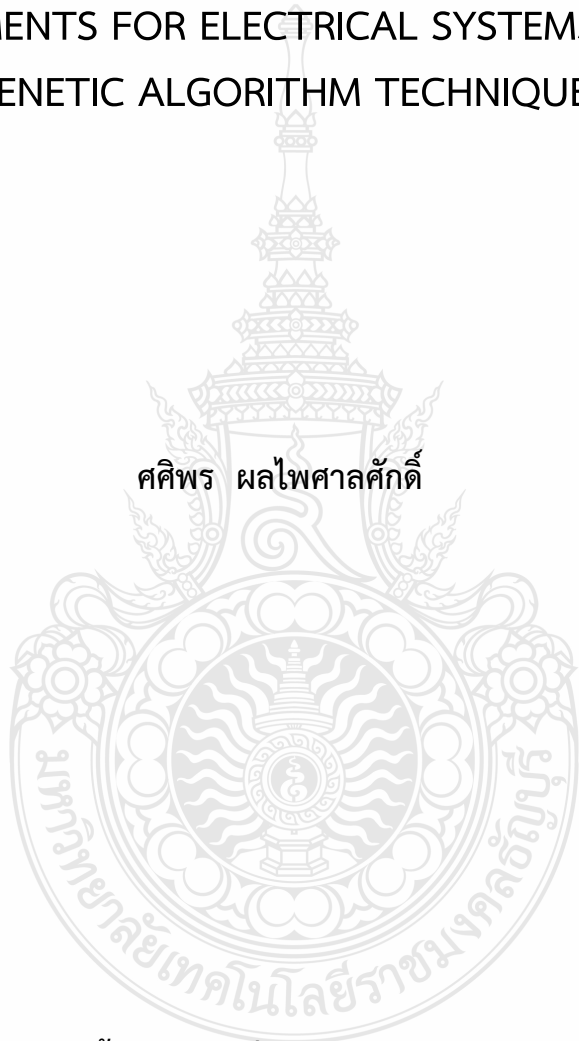


การวิเคราะห์ความสามารถที่สังเกตได้ในการประมาณค่าสถานะของ
เครื่องมือวัดสำหรับระบบไฟฟ้าด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

ANALYSIS OF OBSERVABILITY IN STATE ESTIMATION OF
INSTRUMENTS FOR ELECTRICAL SYSTEMS USING
GENETIC ALGORITHM TECHNIQUE

ศศิพร ผลไพศาลศักดิ์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การวิเคราะห์ความสามารถที่สังเกตได้ในการประมาณค่าสถานะของ
เครื่องมือวัดสำหรับระบบไฟฟ้าด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม




ศศิพร ผลไพศาลศักดิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

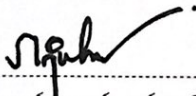
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์ความสามารถที่สังเกตได้ในการประมาณค่าสถานะของ
เครื่องมือวัดสำหรับระบบไฟฟ้าด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม
Analysis of Observability in State Estimation of Instruments for
Electrical Systems Using Genetic Algorithm Technique
ชื่อ - นามสกุล นางสาวศศิพร ผลไพศาลศักดิ์
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์, Ph.D.
ปีการศึกษา 2562

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

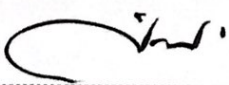

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐภัทร พันธุ์คง, Ph.D.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประมุข อุณหเลขกะ, วศ.ด.)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์บุญยัง ปลั่งกลาง, Dr.-Ing.)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)
วันที่ 22 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2562

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ความสามารถที่สังเกตได้ในการประมาณค่าสถานะของเครื่องมือวัดสำหรับระบบไฟฟ้าด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม
ชื่อ - นามสกุล	นางสาวศศิพร ผลไพศาลศักดิ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2562

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์ความสามารถที่สังเกตได้ในการประมาณค่าสถานะของเครื่องมือวัดสำหรับระบบไฟฟ้าด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม โดยการนำการประมาณค่าสถานะมาใช้แก้ไขปัญหาค่าข้อมูลที่ขาดหายไปในการวัดของเครื่องมือวัดและปัญหาการติดตั้งเครื่องมือวัดในทุกบัส เป้าหมายหลักคือการหาค่าจำนวนให้น้อยที่สุดและตำแหน่งการติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องมือวัดสำหรับระบบไฟฟ้า

นอกจากการศึกษาการประมาณค่าสถานะของเครื่องมือวัดด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม ในการการหาจำนวนและตำแหน่งการติดตั้งของเครื่องมือวัดในระบบไฟฟ้าแล้ว ยังได้มีการศึกษาการวิเคราะห์การหาความสามารถที่สังเกตได้ เพื่อนำมาใช้ในการหาตัวแปรที่ส่งผลต่อสมการเครื่องมือวัด โดยศึกษาบนพื้นฐานระบบมาตรฐาน IEEE 14 บัสแทนระบบไฟฟ้า

จากการศึกษาบนพื้นฐานระบบมาตรฐาน IEEE 14 บัส ผลการทดสอบพบว่า การจำลองการติดตั้งเครื่องมือวัดในระบบไฟฟ้า ที่มีจำนวนเครื่องมือวัดทั้งหมด 122 ตัว เมื่อทำการติดตั้งเครื่องมือวัดด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม ทำให้สามารถลดจำนวนของเครื่องมือวัดลงเหลือ 56 ตัว และเมื่อทำการวิเคราะห์เฉพาะเครื่องมือวัดอัตโนมัติ AMR ในระบบไฟฟ้าที่มีจำนวนทั้งหมด 42 ตัว โดยใช้วิธีเชิงพันธุกรรม ผลที่ได้พบว่าสามารถลดจำนวนของเครื่องมือวัดอัตโนมัติเหลือ 13 ตัว และระบบการวัดไฟฟ้าก็ยังสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ความสามารถที่สังเกตได้ การประมาณค่าสถานะ เทคนิควิธีเชิงพันธุกรรม

Thesis Title Analysis of Observability in State Estimation of Instruments for Electrical Systems Using Genetic Algorithm Technique
Name – Surname Ms.Sasiporn Phonpaisansak
Program Electrical Engineering
Thesis Advisor Associate Professor Krischonme Bhumkittipich, Ph.D.
Academic Year 2019

ABSTRACT

This thesis presents an analysis of observability in state estimation of instruments for electrical systems using genetic algorithm technique. This proposed algorithm can be solved for preventing the instruments from the measurement data missing in electrical power systems, and for installing the instruments in all bus standards. The goal of this research focuses on the minimum number of instruments and their most appropriate locations for electrical systems.

Besides the state estimation of instruments by using genetic algorithm technique to find the minimum number of instruments and their most appropriate locations, the analysis of observability can be used to find the variables affecting the instrumentation equations. This is experimented on the basis of the IEEE 14-bus system standard instead of the electrical system.

The simulation results showed that the instruments in electrical systems had a total of 122 sets, but after installing the instruments using a genetic algorithm technique, the number of instruments decreased by 56 sets. Also, the technique was used with the AMR instruments in electrical systems with a total of 42 sets, the instruments decreased by 13 sets. The decreased number of instruments could function efficiently.

Keywords: observability, state estimation, genetic algorithm technique

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้เป็นอย่างดี เพราะได้รับความอนุเคราะห์ ความช่วยเหลือและ คำแนะนำจากอาจารย์ที่ปรึกษา คือ รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักติพิชญ์ ที่ได้กรุณา เสียสละเวลาอันมีค่ามาให้คำปรึกษา ตลอดจนคำชี้แนะแนวทาง ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในการจัดทำ วิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูง กราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.นภาพร พ่วงพรพิทักษ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมุข อุณหเลขกะ ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐภัทร พันธุ์คง ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์รวมถึงกรรมการควบคุมการ สอบ ดร.บุญยั้ง ปลั่งกลาง ที่กรุณาให้คำแนะนำและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ และ ขอกราบ ขอบพระคุณ ดร.ยุทธนา คงจัน ที่สละเวลามาช่วยเหลือ ให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ด้วย

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ให้คำปรึกษา และบุคคลในครอบครัวของข้าพเจ้าที่ให้ กำลังใจ รวมทั้งทีมงานวิจัย ณ ห้องปฏิบัติการระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ใช้สถานที่ในการศึกษาค้นคว้า และ พี่น้อง PSRC Lab ทุกคน ที่เป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

ศศิพร ผลไพศาลศักดิ์

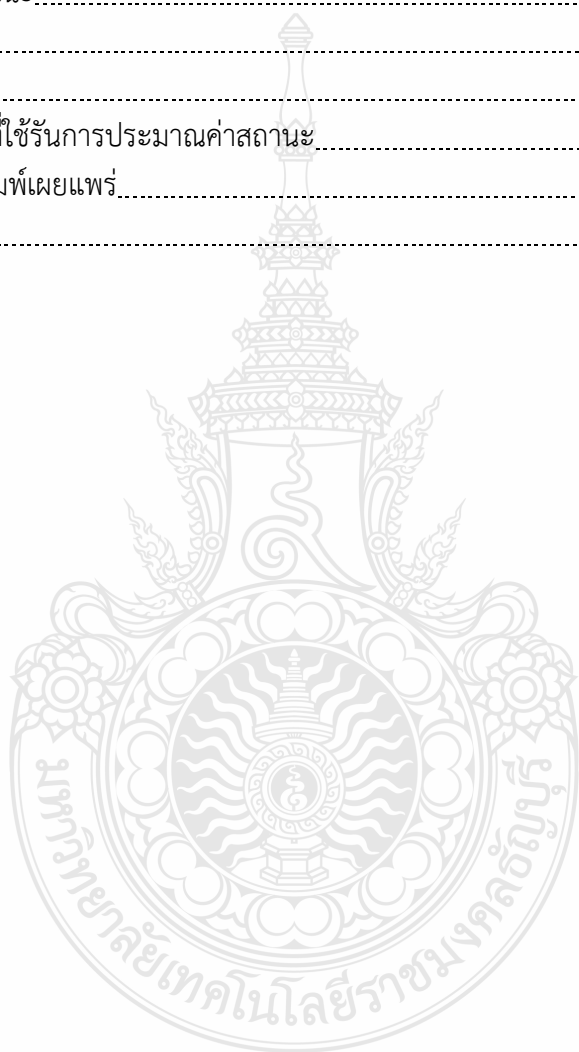


สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(10)
บทที่ 1 บทนำ.....	12
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	13
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	13
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	13
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	13
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	13
1.6 ข้อจำกัดของวิทยานิพนธ์.....	14
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	14
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
2.1 บทนำ.....	15
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
2.3 การศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้า.....	16
2.4 วิธีการประมาณค่าสถานะ.....	20
2.5 วิธีการหาค่าตอบของการประมาณค่าสถานะ.....	24
2.6 เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม.....	26
2.7 การวิเคราะห์ข้อมูลที่ผิดพลาด.....	38
2.8 การวัดความถูกต้องของการประมาณสถานะ.....	40
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	41
3.1 การไหลของกำลังไฟฟ้า.....	42
3.2 การประมาณสถานะโดยใช้โปรแกรม MATLAB.....	42
3.3 การหาตำแหน่งการติดตั้งเครื่องวัดโดยวิธีการเชิงพันธุกรรม.....	43
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	47
4.1 ผลการทดสอบการติดตั้งมิเตอร์ด้วยวิธีการเชิงพันธุกรรม.....	47
4.2 ผลการทดสอบการติดตั้งมิเตอร์ AMR ด้วยวิธีการเชิงพันธุกรรม.....	50

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 สรุป.....	53
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	54
5.1 สรุปผลการประมาณสถานะจากเทคนิควิธีการเชิงพันธุกรรม.....	54
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	55
บรรณานุกรม.....	56
ภาคผนวก.....	58
ก. โปรแกรมที่ใช้รันการประมาณค่าสถานะ.....	59
ข. ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	63
ประวัติผู้เขียน.....	70



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	15
ตารางที่ 2.2 ความเพียงพอของข้อมูลระหว่างจำนวนตัวแปรสถานะที่ต้องการประมาณค่า (N_s) กับ จำนวนข้อมูลที่วัดได้จากเครื่องมือวัด (N_m).....	25
ตารางที่ 4.1 การทดสอบการติดตั้งเครื่องมือวัดในระบบไฟฟ้า.....	47
ตารางที่ 4.2 การทดสอบการติดตั้งมิเตอร์ AMR ในระบบไฟฟ้า.....	50



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 แผนผังความสัมพันธ์ระหว่างการวิเคราะห์ความสามารถที่สังเกตได้และ การประมาณค่าสถานะ.....	12
รูปที่ 2.1 ตัวอย่างไดอะแกรมเส้นเดียวชนิด 4 บัส.....	17
รูปที่ 2.2 ค่าพารามิเตอร์แต่ละชนิด.....	18
รูปที่ 2.3 แบบจำลองสายส่ง.....	23
รูปที่ 2.4 ขั้นตอนแผนผังการทำงานของวิธีการ SA.....	28
รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาค.....	29
รูปที่ 2.6 ขั้นตอนการหาค่าเทคนิคที่เหมาะสมด้วยวิธีการกลุ่มอนุภาค.....	30
รูปที่ 2.7 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม.....	32
รูปที่ 2.8 ตัวอย่างการข้ามสายพันธ์.....	33
รูปที่ 2.9 ตัวอย่างการกลายพันธ์.....	33
รูปที่ 2.10 โครงสร้างของระบบการล๊อคด้วยแม่กุญแจ.....	34
รูปที่ 2.11 ขั้นตอนวิธีการสะเดาะกุญแจ.....	36
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนวิธีดำเนินงาน.....	41
รูปที่ 3.2 ระบบ IEEE 14 บัส.....	42
รูปที่ 3.3 ระบบทดสอบ IEEE 14 บัส.....	43
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนของเทคนิควิธีเชิงพันธุกรรม.....	45
รูปที่ 4.1 กรณีศึกษาที่ 5 จำนวนมิเตอร์ 56 ตัว.....	48
รูปที่ 4.2 ตำแหน่งการติดตั้งมิเตอร์ในกรณีที่ 5.....	49
รูปที่ 4.3 กรณีศึกษาที่ 10 จำนวนมิเตอร์ 13 ตัว.....	51
รูปที่ 4.4 ตำแหน่งการติดตั้งมิเตอร์ในกรณีที่ 10.....	52

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย
e	เวกเตอร์ผิดพลาดของการวัด
εP_i	ค่าผิดพลาดที่วัดกำลังไฟฟ้าจริงที่บัส i
εQ_i	ค่าผิดพลาดที่วัดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัส i
εV_i	ค่าแรงดันที่ผิดพลาดของการวัด
G	Gain Matrix
H	เมตริกจาโคเบียน
$H(x^k)$	เมตริกจาโคเบียนของ $h(x^k)$
h_{iNs}	ค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชัน $f(x)$
$h(x)$	เมตริกค่าสัมประสิทธิ์ของเมตริก $f(x)$
$h(x)$	ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น
i	บัสที่พิจารณา
$\bar{I} = I \angle \theta$	เมตริกซ์เฟสเซอร์ของกระแส
$J(x)$	ผลที่เหลือจากการวัด
K	องศาอิสระของการแจกแจงโค-สแควร์
k	จำนวนรอบการวนซ้ำ
N	จำนวนบัสทั้งหมด
N_m	จำนวนการวัด
Ns	จำนวนของตัวแปรสถานะมีค่าเท่ากับ $(2n - 1)$
n	จำนวนของบัสในระบบ
P_i^{meas}	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส i
P_{ij}^{meas}	กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลระหว่างบัส i ไปบัส j
Q_i^{meas}	กำลังรีแอกทีฟที่บัส i
Q_{ij}^{meas}	กำลังรีแอกทีฟที่ไหลระหว่างบัส i ไปบัส j
t_j	ค่าขีดเริ่มเปลี่ยน
V_i	ขนาดแรงดันที่บัส i
V_n	ขนาดแรงดันที่บัส n
V_i^{meas}	ค่าที่ V ที่วัดได้จากบัส i

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
$\bar{v} = v \angle \theta$	เมตริกซ์เฟสเซอร์ของแรงดัน
\mathbf{x}	เวกเตอร์ตัวแปรของสถานะ
x^k	ค่าตอบของ x ในรอบที่ k
Y_{sh}	ขนาดแอดมิตแตนซ์ขนาน
Y_{se}	ขนาดแอดมิตแตนซ์อนุกรมระหว่างบัส i ไปบัส j
Y_{in}	ขนาดแอดมิตแตนซ์ระหว่างบัส i และบัส n
$\bar{y} = Y \angle \theta$	เมตริกซ์แอดมิตแตนซ์ของระบบ
\mathcal{Z}	เวกเตอร์ของการวัด
δ_n	มุมเฟสของแรงดันที่บัส n
δ_i	มุมเฟสของแรงดันที่บัส i
δ_j	มุมเฟสของแรงดันที่บัส j
θ_{in}	มุมเฟสของแอดมิตแตนซ์ระหว่างบัส i และ บัส n
θ_{se}	มุมเฟสของแอดมิตแตนซ์อนุกรม
θ_{sh}	มุมเฟสของแอดมิตแตนซ์ขนาน
σ_i^2	ค่าแปรปรวนที่บัส i
α	ระดับความมีนัยสำคัญ
AMR	อุปกรณ์เครื่องมืออัตโนมัติในระบบไฟฟ้ากำลัง
GA	เป็นกระบวนการในการค้นหาคำตอบให้กับระบบแบบการสุ่มเลือก

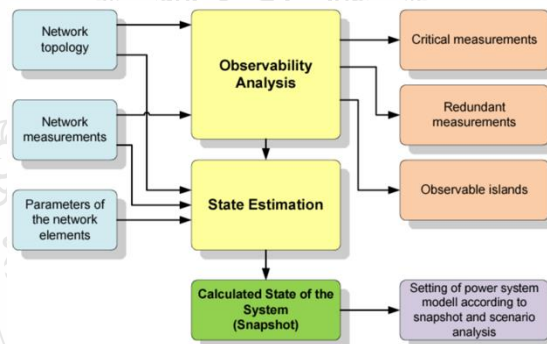
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การบริหารจัดการระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ (Smart grid) ในอนาคตจะเข้ามามีบทบาทอย่างยิ่งต่อการบริหารจัดการพลังงานไฟฟ้าโดยรวมของระบบจำหน่ายไฟฟ้า ระบบผลิตไฟฟ้า ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า และยังมีกระแสเทคโนโลยีของโลกในการสื่อสารแบบไร้พรมแดน การเฝ้าติดตามผลการใช้พลังงานไฟฟ้าแบบทันเวลา (Real time) ได้รับความนิมอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน

ระบบการวัดพลังงานไฟฟ้าของระบบไฟฟ้านั้นมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการบริหารจัดการพลังงานไฟฟ้า เมื่อเกิดปัญหาเกี่ยวกับระบบเครื่องวัดนั้น เช่น อ่านค่าผิดพลาด การชำรุดเสียหาย เป็นต้น ซึ่งเป็นทำให้ระบบเครื่องวัดไม่สามารถประมาณค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าในช่วงที่เครื่องวัดเกิดปัญหาขึ้นได้ เมื่อเกิดปัญหาเหล่านี้เกิดขึ้น ส่วนใหญ่แล้วจะมีการจัดการโดยใช้วิธีหลักการนำค่าตัวประกอบโพลตของเครื่องวัดเกิดปัญหาดังกล่าวมาทำการเฉลี่ยค่าตัวประกอบโพลต ทำให้เกิดปัญหาที่เป็นภาระต่อผู้ใช้งานไฟฟ้าที่จำต้องยอมรับในเงื่อนไขของหลักการดังกล่าว ที่ค่าของการใช้พลังงานไฟฟ้านั้นอาจจะไม่ใกล้เคียงกับค่าของความเป็นจริง หรือการไฟฟ้าอาจเป็นฝ่ายที่เสียเปรียบในการคิดการใช้พลังงานไฟฟ้าดังกล่าวได้ และอาจส่งผลทำให้ความน่าเชื่อถือของระบบเครื่องวัดลดน้อยลงได้



รูปที่ 1.1 แผนผังความสัมพันธ์ระหว่างการวิเคราะห์ความสามารถที่สังเกตได้และการประมาณค่าสถานะ

รูปที่ 1.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการวิเคราะห์ความสามารถที่สังเกตได้และการประมาณค่าสถานะของระบบไฟฟ้าเพื่อทำการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าที่ต้องการ ดังนั้นการวิเคราะห์ความสามารถสังเกตได้โดยการใช้เทคนิคการประมาณค่าสถานะนั้นจึงมีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งต่อการบริหารจัดการการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยภาพรวม เทคนิคการประมาณค่าสถานะมีการนำมาประยุกต์ใช้ในหลายด้านในปัจจุบัน และเริ่มกลับมาได้รับความนิยมอีกครั้งในการประยุกต์ใช้การประมาณค่าช่วงสภาวะทรานเซียนต์ (Transient State Estimation, TSE) [1]และงานอื่น ๆ ที่เป็นในลักษณะการควบคุมแบบทันเวลา (Dynamic State Estimation, DSE) [2] และค่าใช้จ่ายของจำนวนเครื่องมือวัดทั้งหมดใน

ระบบ การมีเครื่องมือวัดที่เหมาะสมกับระบบไฟฟ้าก็เป็นอีกเงื่อนไขหนึ่งในทางเศรษฐศาสตร์ที่ต้องพิจารณา ในด้านภาระค่าใช้จ่ายและความเหมาะสมต่อจำนวนของเครื่องมือวัด ที่ไม่เกินความเป็นจริง ซึ่งการลดจำนวนเครื่องมือวัดในระบบโดยการใช้เทคนิคการหาค่าตัวแปรสถานะและเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมก็ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย [3] เป็นต้น

งานวิจัยนี้จึงนำเสนอหลักการประยุกต์เบื้องต้นของวิธีการประมาณค่าสถานะ (State Estimation ,SE) และจัดเตรียมนำไปใช้งานในสนามจริงโดยทำการศึกษาจากพื้นฐานระบบมาตรฐาน IEEE14 บัสแทนระบบไฟฟ้า โดยนำเสนอโปรแกรมประมาณค่าสถานะของระบบไฟฟ้า

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาและนำทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวิธีการประมาณค่าสถานะ

1.2.2 เพื่อศึกษาวิเคราะห์ความสามารถที่สังเกตได้และการประมาณค่าสถานะของระบบไฟฟ้าที่ต้องการ

1.2.3 เพื่อศึกษาแนวทางในการปรับปรุงระบบการวัด สำหรับการประมาณค่าสถานะ

1.2.4 เพื่อพัฒนาโปรแกรมสำหรับใช้ประมาณค่าสถานะของระบบไฟฟ้า

1.3 สมมุติฐานของงานวิจัย

1.3.1 การวิเคราะห์การกำหนดตำแหน่งและจำนวนการติดตั้งเครื่องมือวัดในระบบไฟฟ้าที่ไม่เหมาะสมนั้นส่งผลต่อคุณภาพการประมาณค่าสถานะเครื่องมือวัดในระบบไฟฟ้า

1.3.2 การศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าที่ทำการติดตั้งเครื่องมือวัดที่น้อยลงเพื่อทราบถึงผลที่เกิดขึ้นต่อการวัดค่าพลังงานในระบบไฟฟ้า

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 สามารถออกแบบการประมาณค่าสถานะของระบบไฟฟ้า โดยศึกษาระบบมาตรฐาน IEEE14 บัสแทนระบบไฟฟ้า

1.4.2 วิเคราะห์ผลกระทบที่สามารถเกิดขึ้นได้ที่มีผลต่อการประมาณค่าสถานะของระบบไฟฟ้า เช่น การชำรุด การสูญเสียของเครื่องมือวัดในระบบไฟฟ้า ด้วยเทคนิควิธีเชิงพันธุกรรมในระบบไฟฟ้า

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

วิทยานิพนธ์นี้ ได้นำระบบไฟฟ้ากำลัง 14 บัส ของ IEEE มาสร้างเป็นแบบจำลองของการทดสอบเพื่อหาค่าการประมาณสถานะของระบบไฟฟ้า

1.5.1 ศึกษารายละเอียดของวิทยานิพนธ์และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อทำการกำหนดขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1.5.2 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเบื้องต้น

1.5.2.1 ศึกษาการไหลของระบบกำลังไฟฟ้า 14 บัส

1.5.2.2 ศึกษาการประมาณค่าสถานะ

1.5.2.3 ศึกษาการเขียนโปรแกรมเพื่อนำมาวิเคราะห์ การประมาณค่าสถานะ

1.5.3 ขั้นตอนการทดลอง

1.5.3.1 สร้างจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 14 บัส

1.5.3.2 กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในระบบไฟฟ้ากำลัง 14 บัส

1.5.3.3 ดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลจาก โปรแกรม MATLAB เพื่อวิเคราะห์หาการประมาณค่าสถานะในระบบไฟฟ้า

1.5.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง ตามผลขั้นตอนการทดลอง

1.5.5 สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

1.5.6 จัดทำวิทยานิพนธ์

1.6 ข้อยกจำกัดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้จะศึกษาการประมาณค่าสถานะของระบบไฟฟ้าโดยใช้ระบบมาตรฐาน IEEE14 บัสแทนระบบไฟฟ้า

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 เป็นการศึกษาค่าสถานะของระบบไฟฟ้า

1.7.2 เป็นแนวทางแก้ไขปัญหาค่าสถานะของเครื่องมือวัดไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า

1.7.3 เป็นการเผยแพร่ผลการวิจัยในการประชุมวิชาการด้านวิศวกรรมไฟฟ้า

1.7.4 ผลการศึกษาวิจัยและพัฒนาสามารถนำไปเป็นข้อมูลในการประมาณค่าสถานะของระบบไฟฟ้า

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการวิเคราะห์ความสามารถที่สังเกตได้ในการประมาณค่าตัวแปรสถานะของระบบไฟฟ้าครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการไหลของกระแสไฟฟ้า วิธีการประมาณค่าสถานะ วิธีการหาค่าตอบของการประมาณค่าสถานะและจากนั้นทำการศึกษาการวิเคราะห์ข้อมูลที่ผิดพลาด

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาการประมาณค่าสถานะของระบบเครื่องมือวัดสำหรับระบบไฟฟ้านั้น ในปัจจุบันได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก โดยทั่วไปจะมีการติดตั้งเครื่องมือวัดในทุกบัส เพื่อที่จะวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของงบประมาณของการจัดซื้อ เพื่อลดความสิ้นเปลืองดังกล่าว ทำให้ต้องมีลดจำนวนเครื่องมือวัดลงให้ได้มากที่สุดโดยมีวิธีการที่เหมาะสมและเมื่อลดจำนวนเครื่องมือวัดแล้วก็ยังต้องสามารถวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในระบบไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถนำเสนอบทสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและนำเสนอสาระสำคัญนำมาประยุกต์ใช้กับวิทยานิพนธ์ที่นำเสนอโดยสามารถนำเสนอได้ตามลำดับดังนี้

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปี	นักวิจัย	สาระสำคัญ
2005	Ashwani Kumar และ Biswarup Das [4]	นำเสนอวิธีการกำหนดตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดได้อย่างเหมาะสม และได้มีการพิจารณาหาแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ในสภาวะคงตัวในระบบไฟฟ้า ด้วยวิธีการเชิงพันธุกรรม ในการแทนเครื่องมือวัดและตำแหน่งการติดตั้งในระบบแต่ละตำแหน่งและใช้วิธีการความแปรปรวนต่ำที่สุดของผลต่างระหว่างค่าที่ประมาณการกับค่าที่วัดได้จริง วิธีการนี้ได้ผลเช่นเดียวกับวิธีการแจนนับแต่จำนวนรอบการค้นหานั้นดีกว่า
2007	Thawatch Kerdchuen, Weerakorn Ongsakul [5]	นำเสนอวิธีการที่ทำให้ตำแหน่งของเครื่องมือวัดมีประสิทธิภาพที่สุดใน การวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้ากำลัง ให้ดีขึ้นและมีความเหมาะสมมากขึ้น โดยใช้วิธีการแบบต้องห้าม (Tabu search algorithm, TA) ซึ่งวิธีการนี้สามารถใช้ในการแก้ไขปัญหาและทำให้ เครื่องวัดมีประสิทธิภาพและสามารถประมาณค่าสถานะได้

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ปี	นักวิจัย	สาระสำคัญ
2008	G. D'Antona', C. Muscas และ S. Sulis [6]	นำเสนอวิธีการกระจายเครื่องมือวัดที่จำเป็นต่อการสังเกตปริมาณไฟฟ้า โดยใช้วิธีการประมาณสถานะและได้ติดตามการวัดแบบเรียลไทม์ ซึ่งได้นำเสนอวิธีการแบบใหม่ในการประมาณค่าฮาร์มอนิกส์โดยใช้วิธีการแบบเบย์
2014	Markos Asprou, Elias Kyriakides และ Mihaela Albu [7]	นำเสนอวิธีการประมาณค่าสถานะกำลังสองน้อยที่สุด (WLS) โดยการตรวจสอบความผกผันของความไม่แน่นอนรวมของหม้อแปลงและอุปกรณ์การวัด วิธีการที่นำเสนอได้รับการทดสอบในตัวประมาณเชิงเส้นและสถานะไฮบริด เนื่องจากสามารถสรุปได้จากผลการจำลองเชิงตัวเลขวิธีการซึ่งนำหน้าการวัดตามความไม่แน่นอนรวมของหม้อแปลงเครื่องมือและอุปกรณ์การวัดช่วยปรับปรุงความแม่นยำของตัวประมาณสภาพอย่างมาก
2014	Scott G. Ghiocel, Joe H. Chow, George Stefopoulos และคณะ [8]	บทความนี้นำเสนอการประมาณค่าสถานะตามการวัดเฟส (PSE) สำหรับการปรับปรุงความสอดคล้องของข้อมูลโดยการระบุดัชนีและข้อผิดพลาดการปรับขนาดปัจจุบันในข้อมูลเฟสเซอร์โดยใช้วิธีการเพิ่มเวกเตอร์สถานะ ซึ่งผลที่ได้ PSE ช่วยให้การคำนวณกระแสไฟฟ้าของอินเทอร์เฟซสำหรับการตรวจสอบการรบกวนและความมั่นคง

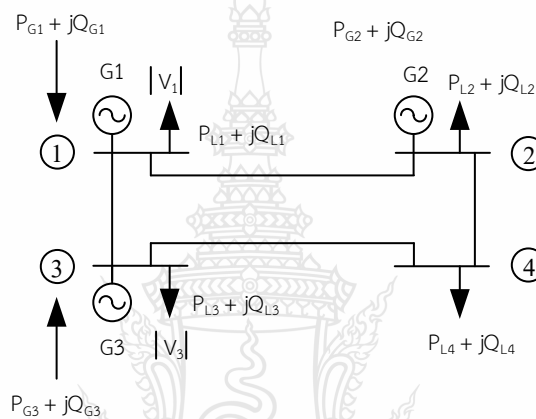
จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องทำให้ทราบถึงวิธีการประมาณค่าสถานะต่างๆ ที่มีรูปแบบการใช้งานตามความเหมาะสมกับการวิเคราะห์ข้อมูลที่ต่างกัน จากการศึกษาทำให้เห็นว่าเมื่อต้องการพิจารณาการตำแหน่งที่เหมาะสมของเครื่องมือวัดในแต่ละบัส ยังไม่มีงานวิจัยใดที่ใช้วิธีเชิงพันธุกรรมมาวิเคราะห์เครื่องมือวัดในระบบไฟฟ้า ทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะจัดทำงานวิจัยนี้ขึ้นมา

2.3 การไหลของกำลังไฟฟ้า (Power flow)

ระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าในปัจจุบันมีความเชื่อมโยงสถานีผลิตกำลังไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกันโดยใช้สายส่งเชื่อมโยงเพื่อส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าซึ่งมีการใช้งานอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นการไฟฟ้าฝ่ายผลิตจึงต้องมีการวางแผนให้มีผลการผลิตกำลังไฟฟ้าที่เพียงพอต่อความต้องการของกลุ่มผู้ใช้งาน นอกจากนี้ยังต้องเผื่อกำลังผลิตสำรองเอาไว้ใช้ในกรณีที่เกิดเหตุฉุกเฉินหรือกรณีที่มีความต้องการใช้กำลังไฟฟ้ามามากขึ้นกว่าปกติที่เป็นอยู่ และต้องสามารถรองรับอัตราเพิ่มขึ้นของผู้ใช้ไฟฟ้าในทุกๆ ปี

ซึ่งการศึกษาและวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าจึงเป็นประโยชน์อย่างมากในการวางแผนการจัดการการต่อเติมอุปกรณ์เข้าในระบบ ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มหรือลดโหลดเพื่อสามารถวิเคราะห์และสามารถตัดสินใจได้ว่ากำลังผลิตควรมีการแก้ไขอย่างไรเพื่อให้การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามีประสิทธิภาพมากขึ้นซึ่งสามารถคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าได้หลายวิธี เช่น เกาส์-ไซเดลและระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน [9]

สามารถแสดงตัวอย่างการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าได้จากรูปที่ 2.1 ซึ่งเป็นระบบ 4 บัสที่มีบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชื่อมต่ออยู่ 3 บัส ทุกๆ บัสมีโหลดอยู่และทราบค่าโหลดทุกบัส ดังนั้นเราสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละบัสได้ว่าควรจ่ายกำลังไฟฟ้าจากบัสไหน และยังสามารถวางแผนการผลิตกำลังไฟฟ้าได้อีกด้วย[10]



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างไดอะแกรมเส้นเดียวชนิด 4 บัส [10]

2.3.1 ชนิดของบัส

ชนิดของบัสสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ บัสอ้างอิง (Slack bus) บัสเครื่องกำเนิด (Generator bus) และบัสโหลด (Load bus) ซึ่งบัสแต่ละชนิดมีค่าพารามิเตอร์หรือข้อกำหนดที่แตกต่างกัน โดยแต่ละบัสประกอบด้วยดังนี้

1. ขนาดของแรงดันไฟฟ้า $|V|$
2. มุมของแรงดันไฟฟ้า $\angle V$
3. กำลังไฟฟ้าบัสจริง P
4. กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ Q

2.3.1.1 บัสอ้างอิง (Slack bus)

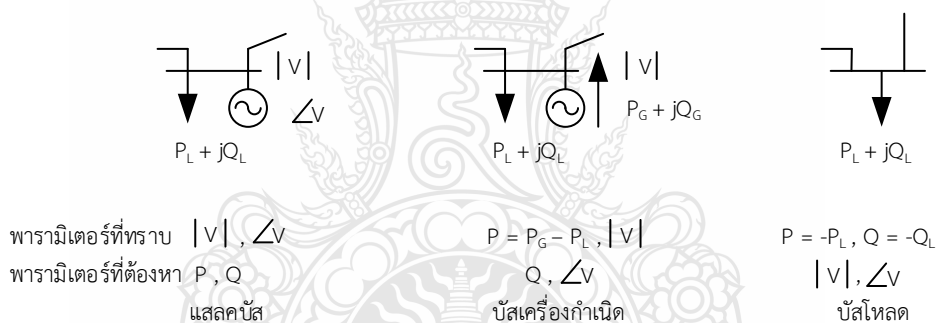
บัสชนิดนี้มีขนาดแรงดันไฟฟ้าและมุมคงที่โดยทั่วไปกำหนดให้เป็นมุมศูนย์โดยมุมอื่น ๆ ในระบบจะมาเทียบกับบัสนี้ ซึ่งบัสนี้จะเป็นแหล่งกำเนิดขนาดใหญ่ที่สุดที่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าโดยที่ขนาดแรงดันไฟฟ้า และความถี่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดค่าคงที่สำหรับบัสนี้คือ ขนาดแรงดันไฟฟ้าและมุมของแรงดันไฟฟ้า ส่วน P และ Q ของบัสนี้สามารถหาได้จากรูปที่ 2.2

2.3.1.2 บัสเครื่องกำเนิด (Generator bus)

บัสเครื่องกำเนิดเป็นบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ โดยเราสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่บัสเครื่องกำเนิดให้มีขนาดคงที่ได้โดยใช้ Automatic Voltage Regulator (AVR) ดังนั้นขนาดแรงดันไฟฟ้าเครื่องกำเนิดจะมีค่าคงที่ที่บัสชนิดนี้กำลังไฟฟ้าจริงจะมีค่าคงที่ หรือยังสามารถจึงเรียกบัสชนิดนี้ว่า PV bus นอกจากนี้ เราสามารถกำหนดบัสชนิดนี้ให้มีกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟคงที่ ในกรณีนี้เราจะ เรียกบัสชนิดนี้ว่า PQ bus ถ้าบัสเครื่องกำเนิดเป็นชนิด PV bus ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องหาค่าจากการไหลของกำลังไฟฟ้าก็คือค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ และมุมของแรงดันไฟฟ้า AV ถ้าบัสเครื่องกำเนิดเป็นชนิด PQ bus พารามิเตอร์ที่ต้องการหาค่าจากการไหลของกำลังไฟฟ้าก็คือขนาดของแรงดันไฟฟ้า และมุมของแรงดันไฟฟ้า เราสามารถพิจารณาได้รูปที่ 2.2 เพื่อให้เข้าใจบัสเครื่องกำเนิดและพารามิเตอร์ของบัสมากขึ้น

2.3.1.3 บัสโหลด (Load bus)

บัสโหลดเป็นบัสที่มีโหลดต่ออยู่ ที่บัสชนิดนี้จะมีค่าพารามิเตอร์ของกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ บางครั้งสามารถเรียกบัสนี้ได้ว่าคือ PQ bus



รูปที่ 2.2 ค่าพารามิเตอร์แต่ละชนิด [10]

2.3.2 สมการการไหลของกำลังไฟฟ้า

สมการกำลังไฟฟ้าที่เข้าบัส k ใด ๆ ในระบบไฟฟ้ากำลังมีความสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าและกระแส ดังนี้ [11]

$$S_k = V_k I_k \quad (2.1)$$

เมื่อ V_k คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส

I_k คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าบัส

$$S_k = V_k + jQ_k = V_k I_k \quad (2.2)$$

$$S_k^* = P_k - jQ_k = V_k^* I_k \quad (2.3)$$

$$I_k = \frac{P_k - jQ_k}{V_k} \quad (2.4)$$

จากสมการเมตริก $[I_{BUS}] = [Y_{BUS}][V_{BUS}]$ สามารถเขียนสมการกระแสไฟฟ้าที่บัส k ใด ๆ คือ I_k ได้สำหรับระบบไฟฟ้าที่มี n บัส

$$I_k = Y_{k1}V_1 + Y_{k2}V_2 + \dots + Y_{kn}V_n = \sum_{i=1}^n Y_{ki} V_i \quad (2.5)$$

แทนค่ากระแส I_k ในสมการที่ (2.5) เข้าไปในสมการที่ (2.4) จะได้

$$Y_{k1}V_1 + Y_{k2}V_2 + \dots + Y_{kn}V_n = \frac{P_k - jQ_k}{V_k} \quad (2.6)$$

เมื่อทำการจัดสมการที่ (2.5) ได้

$$Y_{kk}V_k = \frac{P_k - jQ_k}{V_k} - (Y_{k1}V_1 + Y_{k2}V_2 + \dots + Y_{k(k-1)}V_{k-1} + Y_{k(k+1)}V_{k+1} + \dots + Y_{kn}V_n) \quad (2.7)$$

แรงดันไฟฟ้าที่บัส k ใด ๆ

$$V_k = \frac{1}{Y_{kk}} \left[\frac{P_k - jQ_k}{V_k} - \sum_{i=1}^n Y_{ki} V_i \right] \quad (2.8)$$

กำลังไฟฟ้าในสมการที่ (2.3) สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในเทอมของแรงดันไฟฟ้าที่บัสและแอดมิตแตนซ์ของระบบได้โดยการแทนค่า I_k ในสมการ (2.5) เข้าไปในสมการที่ (2.3) จะได้

$$S_k = P_k + jQ_k = V_k I_k \left[\sum_{i=1}^n Y_{ki} V_i \right] \quad (2.9)$$

กำลังไฟฟ้าจริง

$$P_k = \text{Re} \left[V_k \sum_{i=1}^n Y_{ki} V_i \right] \quad (2.10)$$

กำลังไฟฟ้าเสมือน

$$Q_k = -\text{Im} \left[V_k \sum_{i=1}^n Y_{ki} V_i \right] \quad (2.11)$$

หาค่า $\Delta P, \Delta Q, \Delta |V|^2$ จากผลต่างของค่าที่กำหนดกับค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ (2.10) และ (2.11) ซึ่งจะได้สมการดังนี้

$$\Delta P = P_{spec} - P_{cal} \quad (2.12)$$

$$\Delta Q = Q_{spec} - Q_{cal} \quad (2.13)$$

$$\Delta |V|^2 = |V_{spec}|^2 - |V_{cal}|^2 \quad (2.14)$$

แล้วนำสมการที่ (2.12), (2.13) และ (2.14) ไปแทนในสมการ (2.15) ซึ่งเป็นสมการจาโคเบียนเมตริก

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta |V_2|^2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta |V_3|^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial a_2} & \frac{\partial P_2}{\partial b_2} & \frac{\partial P_2}{\partial a_3} & \frac{\partial P_2}{\partial b_3} \\ \frac{\partial |V_2|^2}{\partial a_2} & \frac{\partial |V_2|^2}{\partial b_2} & \frac{\partial |V_2|^2}{\partial a_3} & \frac{\partial |V_2|^2}{\partial b_3} \\ \frac{\partial P_3}{\partial a_2} & \frac{\partial P_3}{\partial b_2} & \frac{\partial P_3}{\partial a_3} & \frac{\partial P_3}{\partial b_3} \\ \frac{\partial |V_3|^2}{\partial a_2} & \frac{\partial |V_3|^2}{\partial b_2} & \frac{\partial |V_3|^2}{\partial a_3} & \frac{\partial |V_3|^2}{\partial b_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta a_2 \\ \Delta b_2 \\ \Delta a_3 \\ \Delta b_3 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

2.4 วิธีการประมาณค่าสถานะ

การประมาณค่าสถานะนั้นเป็นการประมาณค่าตัวแปรที่ไม่สามารถทราบค่าได้ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งที่ทำมาเพื่อสามารถวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้า ซึ่งระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ในปัจจุบันมีการเชื่อมต่อเข้าด้วยกันทำให้ระบบนั้นมีความซับซ้อนมากขึ้น การประมาณค่าสถานะนั้นจึงเป็นตัวช่วยอย่างหนึ่งที่สามารถช่วยวิเคราะห์ระบบที่มีความซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ระบบนั้นจำเป็นต้องมีการพิจารณาข้อมูลจากการวัด โยทั่วไปข้อมูลที่ได้จากการวัดจะเป็นข้อมูลของ ขนาดแรงดันที่บัส กำลังไฟฟ้าที่บัส และมุมเฟสของแรงดันที่บัส โดยตัวแปรสถานะเหล่านี้จะที่ถูกนำมาประมาณค่าสถานะของระบบไฟฟ้ากำลัง การหาค่าการประมาณสถานะ เพื่อที่จะให้ได้ค่าที่เป็นจริงมากที่สุด โดยนำไปใช้เป็นฐานข้อมูลในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อที่จะทำให้ระบบกำลังมีเสถียรภาพมากและมีประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่งสมการการประมาณค่าสถานะระบบไฟฟ้ากำลังที่ไม่เป็นเชิงเส้นสามารถเขียนได้เป็น [3]

$$z = h(x) + \varepsilon \quad (2.16)$$

- เมื่อ \mathcal{Z} คือ เวกเตอร์ของการวัด
 \mathcal{X} คือ เวกเตอร์ตัวแปรของสถานะ
 $h(x)$ คือ ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น
 \mathcal{E} คือ เวกเตอร์ผิดพลาดของการวัด

ซึ่งในระบบไฟฟ้ากำลัง จะมีตัวแปรสถานะคือ ขนาดและมุมเฟสของแรงดันบัส (V และ δ) ที่ถูกประมาณค่าจำนวน $2n-1$ ตัวแปร ซึ่งตัวแปรสถานะและค่าที่วัดได้เขียนสมการได้ดังนี้

2.4.1 ขนาดของแรงดันบัส

ขนาดแรงดันบัสที่วัดได้ V_i^{meas} จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน V_i และค่าผิดพลาดในการวัด εV_i และเขียนสมการได้เป็น

$$V_i^{meas} = V_i + \varepsilon V_i \quad (2.17)$$

- เมื่อ i คือ บัสที่พิจารณา
 εV_i คือ ค่าแรงดันที่ผิดพลาดของการวัด
 V_i^{meas} คือ ค่าที่ V ที่วัดได้จากบัส i

2.4.2 กำลังไฟฟ้า

กำลังไฟฟ้าที่บัสจะมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ของสายส่งและหม้อแปลงที่เชื่อมโยงกับบัสนั้น ๆ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$[\bar{Y}][\bar{V}] = [\bar{I}] \quad (2.18)$$

- เมื่อ $\bar{V} = V \angle \theta$ คือ เมทริกซ์แอดมิตแตนซ์ของระบบ
 $\bar{V} = V \angle \theta$ คือ เมทริกซ์เฟสเซอร์ของแรงดัน
 $\bar{I} = I \angle \theta$ คือ เมทริกซ์เฟสเซอร์ของกระแส

ซึ่งกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนคำนวณได้จากสมการ

$$S = VI^* = P + jQ \quad (2.19)$$

และได้สมการของกำลังไฟฟ้าที่บัส i เป็น

$$P_i = \sum_{j=1}^i V_i V_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.20)$$

$$Q_i = -\sum_{j=1}^i V_i V_j Y_{ij} \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.21)$$

ดังนั้นสมการของการวัดที่บัส i จึงเขียนได้เป็น

$$P_i^{meas} = \sum_{j=1}^i V_i V_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) + \varepsilon P_i \quad (2.22)$$

$$Q_i^{meas} = \sum_{j=1}^i V_i V_j Y_{ij} \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) + \varepsilon Q_i \quad (2.23)$$

- เมื่อ P_i^{meas} คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส i
 Q_i^{meas} คือ กำลังไฟฟ้าเสมือนที่บัส i
 V_i คือ ขนาดแรงดันที่บัส i
 V_n คือ ขนาดแรงดันที่บัส n
 Y_{in} คือ ขนาดแอดมิตแตนซ์ระหว่างบัส i และบัส n
 εP_i คือ ค่าผิดพลาดที่วัดกำลังไฟฟ้าจริงที่บัส i
 εQ_i คือ ค่าผิดพลาดที่วัดกำลังไฟฟ้าเสมือนที่บัส i
 δ_n คือ มุมเฟสของแรงดันที่บัส n
 δ_i คือ มุมเฟสของแรงดันที่บัส i
 θ_{in} คือ มุมเฟสของแอดมิตแตนซ์ระหว่างบัส i และ บัส n
 N คือ จำนวนบัสทั้งหมด

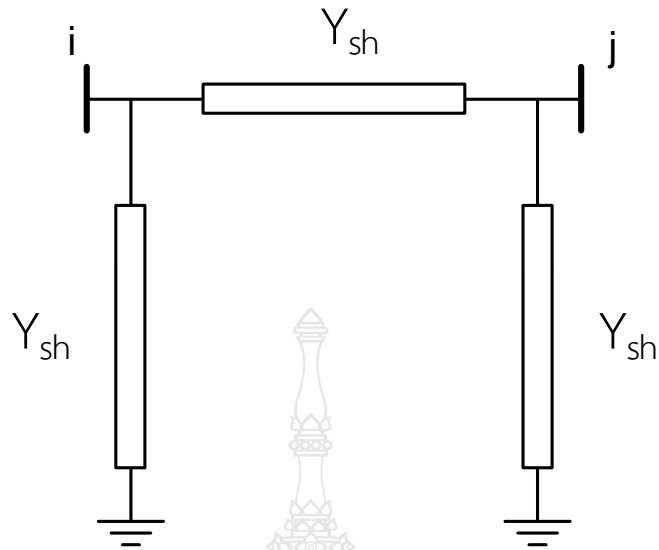
2.4.3 กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง

รูปที่ 2.3 แสดงแบบจำลองสายส่งซึ่งแทนด้วยวงจรสมมูล แบบ π จากรูปสามารถเขียนสมการของกระแสที่ไหลจากบัส i ไปยังบัส j ได้ดังนี้

$$I_{ij} = Y_{si} V_i + Y_{se} (V_i - V_j) \quad (2.24)$$

ซึ่งกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนคำนวณการไหลจากบัส i ไปบัส j ได้จากสมการ

$$S_{ij} = V_i I_{ij} = P_{ij} + jQ_{ij} \quad (2.25)$$



รูปที่ 2.3 แบบจำลองสายส่ง

ซึ่งจะได้สมการของกำลังไฟฟ้าที่ไหลจากบัส i ไปยังบัส j ได้ดังนี้

$$P_{ij} = V_i^2 [Y_{se} \cos \theta_{se} + Y_{sh} \cos \theta_{sh}] - V_i V_j Y_{se} \cos(\theta_{se} - \delta_i - \delta_j) \quad (2.26)$$

$$Q_{ij} = -V_i^2 [Y_{se} \sin \theta_{se} + Y_{sh} \sin \theta_{sh}] - V_i V_j Y_{se} \sin(\theta_{se} - \delta_i - \delta_j) \quad (2.27)$$

สมการการวัดของกำลังไฟฟ้าที่ไหลระหว่างบัส i และบัส j จะได้สมการที่ (2.28) และ (2.29)

$$P_{ij}^{meas} = V_i^2 [Y_{se} \cos \theta_{se} + Y_{sh} \cos \theta_{sh}] - V_i V_j Y_{se} \cos(\theta_{se} - \delta_i - \delta_j) + \varepsilon P_{ij} \quad (2.28)$$

$$Q_{ij}^{meas} = -V_i^2 [Y_{se} \sin \theta_{se} + Y_{sh} \sin \theta_{sh}] - V_i V_j Y_{se} \sin(\theta_{se} - \delta_i - \delta_j) + e Q_{ij} \quad (2.29)$$

เมื่อ P_{ij}^{meas} คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลระหว่างบัส i ไปบัส j

Q_{ij}^{meas} คือ กำลังไฟฟ้าเสมือนที่ไหลระหว่างบัส i ไปบัส j

Y_{se} คือ ขนาดแอดมิตแตนซ์อนุกรมระหว่างบัส i ไปบัส j

Y_{sh} คือ ขนาดแอดมิตแตนซ์ขนาน

θ_{se} คือ มุมเฟสของแอดมิตแตนซ์อนุกรม

θ_{sh} คือ มุมเฟสของแอดมิตแตนซ์ขนาน

δ_i คือ มุมเฟสของแรงดันที่บัส i

δ_j คือ มุมเฟสของแรงดันที่บัส j

หากเครื่องมือวัดถูกติดตั้งที่ทุกๆ 3 บัสและสายส่งทั้งหมดในระบบไฟฟ้ากำลังสมการการวัดที่เป็นไปได้ทั้งหมดของแรงดันไฟฟ้าที่บัสและกำลังที่ไหลในสายส่ง (ทุกๆบัสและทุกสายส่ง) จะต้องถูกจัดรูปสมการที่(2.16) เพื่อนำไปใช้ในการประมาณค่าสถานะ อย่างไรก็ตามการติดตั้งเครื่องมือวัดที่มุกตำแหน่งที่เป็นไปได้จะต้องลงทุนสูง อีกทั้งยังการติดตั้งเครื่องมือวัดที่เหลือเพื่อเกินความจำเป็นทั้งนี้เพราะสมการการวัดเพียง $2n-1$ สมการ ก็เพียงพอต่อการประมาณค่าตัวแปรสถานะแรงดันบัสทั้งหมดแล้ว[11]

2.5 วิธีการหาค่าตอบของการประมาณค่าสถานะ

การประมาณสถานะโดยส่วนมากจะใช้ค่าจากเครื่องวัดที่มากกว่าหนึ่งค่าเพื่อที่จะหาค่าสถานะของการประมาณสถานะได้ จากสมการที่ (2.16) เป็นค่าที่วัดได้จากเครื่องวัดหลายค่า ซึ่งจะดูตัวแปรที่มีผลต่อการวิเคราะห์ในระบบ ซึ่งจะได้สมการดังนี้

$$\min J(X) = \sum_{i=1}^{N_m} \left[\frac{(Z_i - f_i(X))^2}{\sigma_i^2} \right] \quad (2.30)$$

เมื่อ $J(x)$ คือ ผลที่เหลือจากการวัด

i คือ ลำดับการวัด

N_m คือ จำนวนการวัด

σ_i^2 คือ ค่าแปรปรวนที่บัส i

การประมาณสถานะจำนวนตัวแปรสถานะ N_s ตัว จะต้องอาศัยค่าจากการวัด N_m ค่า ซึ่งจะได้สมการดังนี้

$$\min J(x_1, x_2, \dots, x_{N_s}) = \sum_{i=1}^{N_m} \left[\frac{(Z_i - f_i(x_1, x_2, \dots, x_{N_s}))^2}{\sigma_i^2} \right] \quad (2.31)$$

โดยทั่วไปตัวแปรสถานะจะมีจำนวนมากกว่าหนึ่ง ดังนั้นจะต้องจัดให้อยู่ในรูปที่ง่ายในการวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งสามารถจัดให้อยู่ในรูปของเมตริกดังนี้

$$f_i(x) = f_i(x_1, x_2, \dots, x_{N_s}) \quad (2.32)$$

$$f(x) = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ \vdots \\ f_{N_m}(x) \end{bmatrix} = h(x) \quad (2.33)$$

เมื่อ $h(x)$ คือ เมตริกค่าสัมประสิทธิ์ของเมตริก $f(x)$

h_{iNs} คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชัน $f(x)$

N_m คือ จำนวนครั้งของการวัด

Ns คือ ตัวแปรสถานะที่ไม่ทราบค่าที่ต้องประมาณค่า

$$Z = \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ \vdots \\ Z_{N_m} \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

เมื่อ Z คือ เมตริกของค่าที่วัดจากสมการที่ (2.31) จัดให้อยู่ในรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$J(x) = [z - f(x)]^T R^{-1} [z - f(x)] \quad (2.35)$$

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{N_m}^2 \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

แทนสมการที่ (2.33) ลงในสมการที่ (2.35) จะได้สมการใหม่ดังนี้

$$\min [z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)] \quad (2.37)$$

เมื่อ R คือ ค่าความผิดพลาดจากการวัด (Measurement Covariance) โดยให้ R เป็นเมตริกหนึ่งหน่วย ซึ่งสามารถหาค่าตอบโดยการทำซ้ำ จากสมการดังนี้

$$\Delta x = G^{-1} H^T(x^k) R^{-1} [z - h(x^k)] \quad (2.38)$$

$$G = H^T(x^k) R^{-1} H(x^k) \quad (2.39)$$

ซึ่งการหาค่าตอบของ x รอบใหม่เป็น

$$x^{k+1} = x^k + \Delta x \quad (2.40)$$

- เมื่อ H คือ จาคอบีเยนเมตริก
 $H(x^k)$ คือ เมตริกจาคอบีเยนของ $h(x^k)$
 G คือ Gain Matrix
 k คือ จำนวนรอบการวนซ้ำ
 x^k คือ คำตอบของ x ในรอบที่ k

ในการประมาณค่าสถานะใด ๆ ความถูกต้องของการประมาณค่าจะขึ้นอยู่กับเพียงพอของข้อมูลระหว่างจำนวนตัวแปรสถานะที่ต้องการประมาณค่า (N_s) กับจำนวนข้อมูลที่วัดได้จากเครื่องมือวัด (N_m) หากจำนวนข้อมูลทั้งสองมีความเพียงพอต่อการวิเคราะห์ จะส่งผลให้การวิเคราะห์มีความถูกต้อง แม่นยำ แต่ถ้าจำนวนข้อมูลทั้งสองนั้นไม่เพียงพอต่อการวิเคราะห์ จะทำให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ผิดพลาดซึ่งส่งผลโดยตรงกับการประมาณค่าสถานะ สามารถแบ่งการตรวจสอบความเพียงพอได้ 3 กรณี ดังนี้

ตารางที่ 2.2 ความเพียงพอของข้อมูลระหว่างจำนวนตัวแปรสถานะที่ต้องการประมาณค่า (N_s) กับจำนวนข้อมูลที่วัดได้จากเครื่องมือวัด (N_m)

เงื่อนไข	ผลที่ได้
1. ($N_s < N_m$)	มีข้อมูลที่วัดได้จากเครื่องมือวัด จำนวนมากเกินความจำเป็น ดังนั้นหากเครื่องมือวัดบางตัวเสียจะส่งผลถึงความถูกต้องในการประมาณค่าได้
2. ($N_s = N_m$)	การวัดผลในการประมาณค่าสำหรับกรณีนี้จะดีที่สุด เนื่องจากจำนวนของข้อมูลนั้นมีจำนวนที่เพียงพอต่อการประมาณค่าสถานะ
3. ($N_s > N_m$)	มีจำนวนข้อมูลที่ไม่เพียงพอต่อการประมาณค่าสถานะ ส่งผลจากการประมาณค่าจะแย่มากที่สุด ผลที่ได้จะมีความผิดพลาดสูง

จากวิธีการหาค่าของการประมาณสถานะในระบบไฟฟ้า ฟังก์ชัน h_x จะมีผลเป็นอย่างมากสำหรับการคำนวณหาค่าที่ออกมาได้ เพราะฟังก์ชัน h_x เป็นสมการการวัด ซึ่งได้มาจากการวางตำแหน่งของเครื่องมือวัดในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งในระบบของการวัดที่ดีจะช่วยให้ได้ค่าของการประมาณสถานะและค่าจริงของระบบไฟฟ้ากำลังที่ได้มามีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน [11]

2.6 เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม

ในการประยุกต์ใช้งานเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการต่างๆ กับการแก้ไขปัญหาการกำหนดตำแหน่งติดตั้งมิเตอร์อย่างเหมาะสมนั้น จำเป็นที่จะต้องมีการศึกษาหลักการเบื้องต้นของการ

ทำงานของวิธีการต่างๆ ก่อนที่จะนำเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมเหล่านั้นนำไป ประยุกต์ใช้งาน โดยแต่ ละเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมนั้นสามารถอธิบายหลักการและขั้นตอนได้ดังหัวข้อต่อไปนี้

2.6.1 วิธีการจำลองการอบอ่อน (Simulated Annealing: SA)

วิธีการอบอ่อนเป็นหลักการค้นหาคำตอบแบบสุ่มโดยที่อาศัยหลักการมาจากกระบวนการทาง กลศาสตร์สถิติ (Statistical Mechanics) ของฟิสิกส์ของแข็งโดยการคำนวณเป็นการคำนวณที่อาศัย ความน่าจะเป็นในการหาคำตอบของปัญหา การคำนวณจะประกอบด้วยฟังก์ชันการยอมรับ ฟังก์ชัน ปฏิเสธ และการคำนวณซ้ำที่อาศัยพารามิเตอร์ที่เป็นตัวกำหนดรอบของการคำนวณที่เปรียบกับอุณหภูมิ ในทางฟิสิกส์ ในเรื่องฟิสิกส์ของ ของแข็งเมื่อสสารอยู่ในสภาวะที่ร้อนหรืออุณหภูมิเริ่มต้น $T(0)$ การจะทำให้ สสารให้อยู่ในสภาวะที่เป็นผลึกที่มีสถานะเสถียรนั้น สามารถทำได้โดยค่อย ๆ ทำให้สสารนั้น เย็นตัวลง อย่างช้า ๆ หรืออุณหภูมิลดลง ซึ่งจะให้ความน่าจะเป็นของกลุ่มอะตอม ณ ตำแหน่ง r_i จะมีค่า พลังงานเฉพาะค่าหนึ่งคือ $E(r_i)$ ที่อุณหภูมิ T ค่าความน่าจะเป็นดังกล่าวสามารถนิยามได้จากค่าความ น่าจะเป็นแบบโบลต์ซมันน์(Boltzmann Probability) ดังนี้ [12]

$$P_r [E(r_i)] = e^{-E(r_i)/K_B T} \quad (2.41)$$

โดยที่ K_B คือค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์

จากสมการที่ (2.41) ซึ่งเป็นพื้นฐานที่มาการพัฒนาออกแบบอัลกอริทึม การจำลองการอบอ่อน รูปที่ 2.4 แสดงขั้นตอนแผนผังการทำงานของ SA ซึ่งมีองค์ประกอบที่สำคัญ 4 อย่างดังนี้

- รูปแบบของคำตอบที่ต้องการค้นหา
- ตัวกำเนิดสุ่ม(Random Generator) เพื่อหาคำตอบของระบบไปยังคำตอบใหม่
- ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) ของระบบ
- ตารางจัดการการอบอ่อน (Annealing schedule) ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้ปรับค่าอุณหภูมิและ

กำหนดเวลาของระบบเพื่อให้อุณหภูมิของ ระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ยกตัวอย่างเช่น การอบ อ่อนแบบมาตรฐาน การอบอ่อนแบบโบลต์ซมันน์ , การอบอ่อนแบบเร็วและ การอบอ่อนแบบเชิง ปรับตัว เป็นต้น

รายละเอียดของอัลกอริทึมการจำลองการอบอ่อนมีดังต่อไปนี้

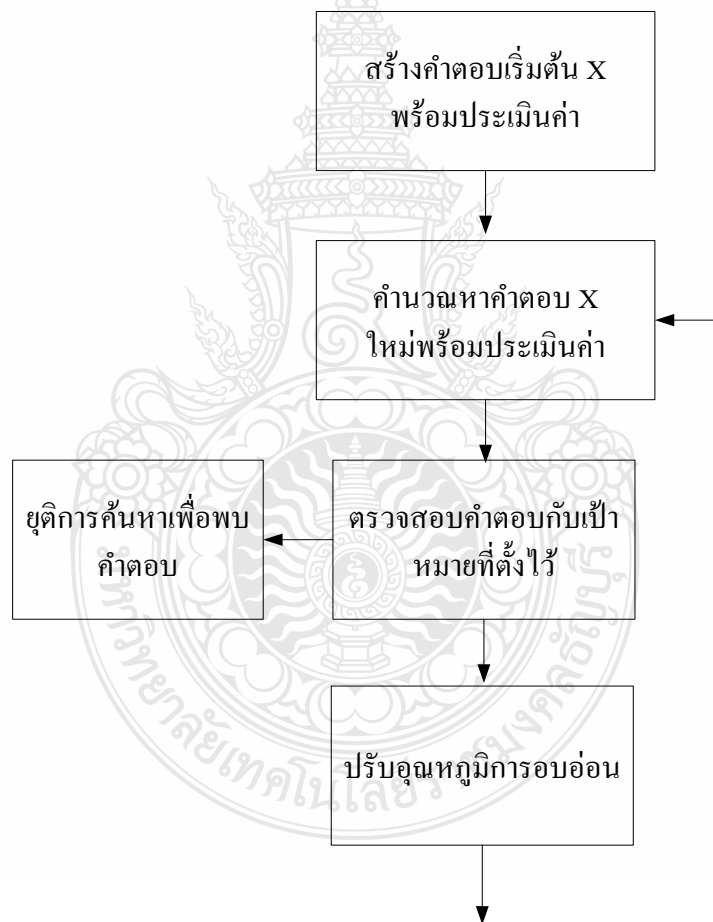
1. กำหนดรอบการทำงานของอัลกอริทึมด้วยตัวชี้ k ใช้ค่าเริ่มต้นการทำงานของระบบ $k = 0$
2. สุ่มค่าเริ่มต้นเวกเตอร์คำตอบ x_k ในปริภูมิการค้นหา ค่าเวกเตอร์คำตอบ x_k พิจารณาเป็น สถานะปัจจุบันของระบบก็ได้
3. กำหนดตารางการอบอ่อนสำหรับพารามิเตอร์อุณหภูมิ T และตั้งค่าเริ่มต้นของ T สูงอย่าง เพียงพอ
4. คำนวณหาเวกเตอร์คำตอบใหม่ $x_{k+1} = x_k + \Delta x$ โดยที่ Δx เป็นการเปลี่ยนแปลงที่ถูก นำเสนอต่อระบบ

5. คำนวณหาการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $\Delta f = f(x_{k+1}) - f(x_k)$ พิจารณาว่า Δf ตามค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต้องการค้นหา

6. ทำการคำนวณว่าควรจะใช้ x_{k+1} เป็นคำตอบหรือสถานะใหม่ของระบบหรือไม่ โดยใช้ค่าความน่าจะเป็นในการตัดสินใจที่จะเปลี่ยนสถานะตามเงื่อนไขต่อไปนี้

7. ขั้นตอนข้างต้นจะถูกทำซ้ำ (เพิ่มค่าตัวชี้ k) จนกระทั่งระบบเข้าสู่จุดสมดุล ซึ่งพิจารณาได้จากค่าการเปลี่ยนแปลงสถานะของระบบน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ซึ่งสภาวะดังกล่าวนี้จะเกิดขึ้นเมื่อระบบมีคำตอบหรือสถานะเข้าใกล้ค่าที่เหมาะสมที่สุด และจำนวนครั้งของการวนซ้ำจะถูกกำหนดไว้ก่อนล่วงหน้า

8. ทำการปรับค่าอุณหภูมิ T ตามตารางจัดการรอบอ่อน แล้วเริ่มทำขั้นตอนทำซ้ำทั้งหมดใหม่อีกครั้ง กระบวนการทั้งหมดสามารถยุติได้เมื่อค่าอุณหภูมิ T มีค่าเป็นศูนย์



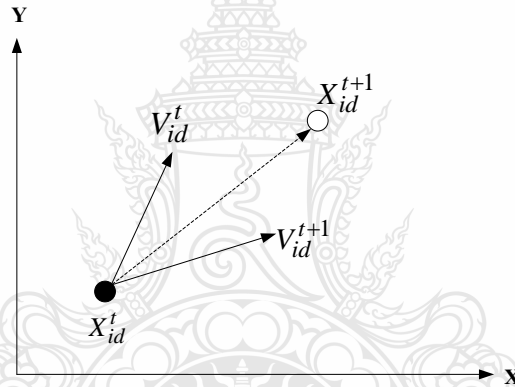
รูปที่ 2.4 ขั้นตอนแผนผังการทำงานของวิธีการ SA

$$P_r(x_k \rightarrow x_{k+1}) = \begin{cases} 1 & \text{if } \Delta f < 0 \\ e^{-\Delta f/T} & \text{if } \Delta f > 0 \end{cases} \quad (2.42)$$

โดยที่ T แทนอุณหภูมิของระบบ พิจารณาได้จาก $\Delta f < 0$ จะได้ว่าวัตถุประสงคค่าต่ำที่สุด ดังนั้นค่าความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนแปลงสถานะจึงมีค่าเท่ากับ 1 หรือมีการเปลี่ยนแปลงสถานะใหม่อย่างแน่นอน ในกรณีที่ $\Delta f \geq 0$ ซึ่งค่าความน่าจะเป็นของสถานะ η จะถูกสุ่มในช่วง $[0,1]$ $P_r(x_k \rightarrow x_{k+1}) > \eta$ แล้วเวกเตอร์คำตอบ x_{k+1} จะถูกใช้เป็นคำตอบหรือสถานะใหม่ของระบบ ฉะนั้นแล้ว ให้คงคำตอบของระบบไว้ที่ x_k เหมือนเดิม

2.6.2 วิธีการกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO)

อัลกอริทึมในการปรับตำแหน่งของวิธีกลุ่มอนุภาคเป็นอัลกอริทึมที่อาศัยการปรับตัวเอง บนพื้นฐานของการเรียนรู้สถานการณ์และใช้ข้อมูลร่วมกันของอนุภาคที่อยู่ภายในกลุ่มจะปรับเปลี่ยนตำแหน่งโดยการอาศัยการเรียนรู้จากอนุภาคข้างเคียงที่อยู่ในตำแหน่งที่ให้ค่าที่ดีกว่า การปรับเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาค สามารถแสดงดังรูปที่ 2.5 [13] ดังนี้



รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาค

โดยความเร็วในการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของกลุ่มอนุภาคนั้นสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (2.43) และสมการที่ (2.44) ส่วนสมการค่าถ่วงน้ำหนักสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.45) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$V_{id}^{t+1} = W \times V_{id}^t + \text{Rand}_1(\cdot) \times C_1 \times (Pbest_{id} - X_{id}^t) + \text{Rand}_2(\cdot) \times C_2 \times (Gbest_d - X_{id}^t) \quad (2.43)$$

$$X_{id}^{t+1} = X_{id}^t + V_{id}^{t+1} \quad (2.44)$$

- เมื่อ
- X_{id}^t คือ ตำแหน่งของอนุภาค i ของตัวแปร d ในรอบการคำนวณที่ t
 - X_{id}^{t+1} คือ ตำแหน่งของอนุภาค i ของตัวแปร d ในรอบการคำนวณที่ $t+1$
 - V_{id}^t คือ ความเร็วในการเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาค i ของตัวแปร d ในรอบการคำนวณที่ t
 - V_{id}^{t+1} คือ ความเร็วในการเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาค i ของตัวแปร d ในรอบการคำนวณที่ $t+1$

$Rand_1(), Rand_2()$ คือ ตัวเลขสุ่มระหว่าง 0 ถึง 1

$Pbest_{id}$ คือ ตำแหน่งที่ดีที่สุดของอนุภาค i ของตัวแปร d

$Gbest_d$ คือ ตำแหน่งที่ดีที่สุดในทุก ๆ อนุภาคของตัวแปร d

W คือ ค่าถ่วงน้ำหนักโดยกำหนดขอบเขต

C_1, C_2 คือ ค่าคงที่ความเร่ง

$$W = W_{\max} - \frac{W_{\max} - W_{\min}}{k} t \quad (2.45)$$

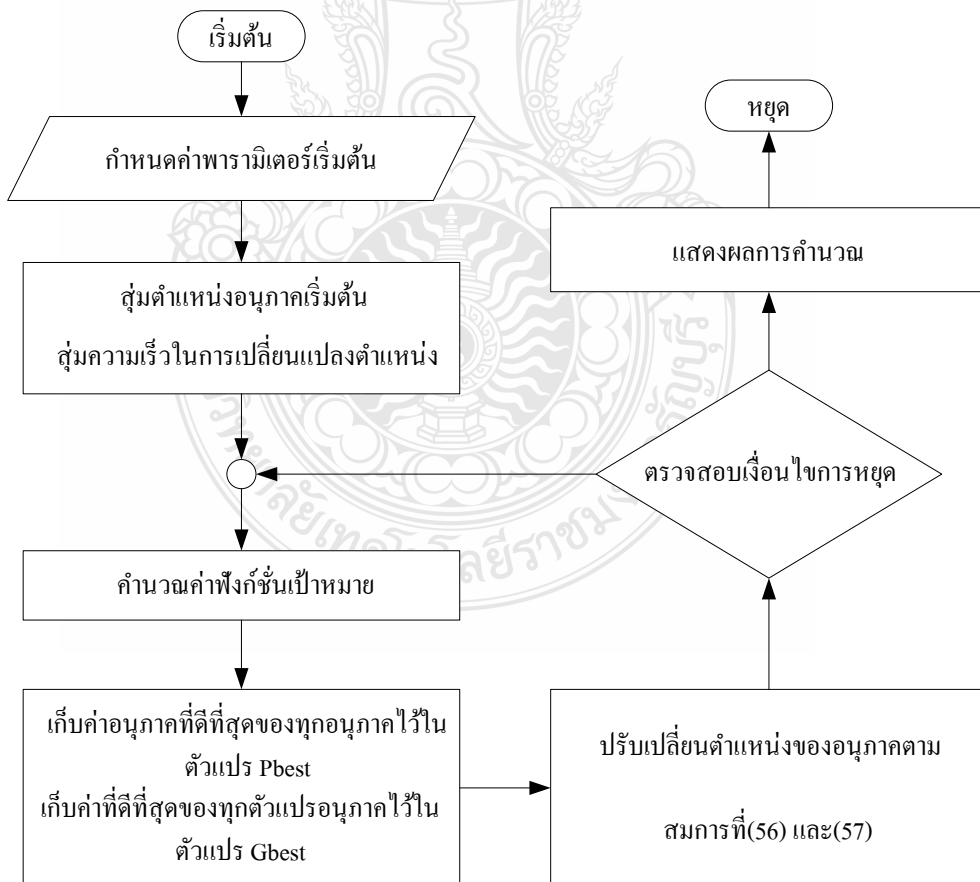
เมื่อ W_{\min} คือ ขอบเขตล่างของค่าถ่วงน้ำหนัก

W_{\max} คือ ขอบเขตบนของค่าถ่วงน้ำหนัก

t คือ รอบการคำนวณทั้งหมด

k คือ รอบการคำนวณทั้งหมด

จากหลักการวิธีการจำลองการอบอ่อนที่กล่าวมาข้างต้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาเพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมได้สามารถแสดงขั้นตอนได้ดัง แสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ขั้นตอนการหาค่าเทคนิคที่เหมาะสมด้วยวิธีการกลุ่มอนุภาค

2.6.3 วิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Optimization)

ปี ค.ศ 1970 John Hollan ได้นำเสนอแนวคิดของวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm: GA) โดยตั้งสมมติฐานว่าสิ่งมีชีวิตมีทั้งคุณลักษณะที่ดีและไม่ดี ซึ่งสิ่งมีชีวิตที่ดี ที่แข็งแรงจะมีโอกาสอยู่รอด และมีการถ่ายทอดพันธุกรรมสู่รุ่นต่อไปได้มากกว่า โดยมีกระบวนการทางพันธุศาสตร์ ซึ่งเป็นหลักการวิวัฒนาการของสายพันธุ์สิ่งมีชีวิตในแต่ละกลุ่ม หลักการพื้นฐานของวิธีเชิงพันธุกรรม จะนำเสนอข้อมูลในรูปแบบของโครโมโซม (Chromosome) ในแต่ละโครโมโซมจะประกอบไปด้วย บิต (Bit) เรียกว่า ยีน (Gene) โดยมีการคัดเลือกโครโมโซมจากความเหมาะสมจากกลุ่มทั้งหมดเพื่อที่จะหาโครโมโซมที่ดีที่สุดในการอยู่รอดโดยมีฟังก์ชันความเหมาะสมที่สุดที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ มีขั้นตอนในของการดำเนินการหาค่าที่เหมาะสมได้ดังต่อไปนี้ [14]

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดฟังก์ชันเป้าหมาย

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดรูปแบบการแทนโครโมโซม

ขั้นตอนที่ 3 สร้างประชากรเริ่มต้นในรูปแบบของโครโมโซม โดยการสุ่มจากประชากรหลัก

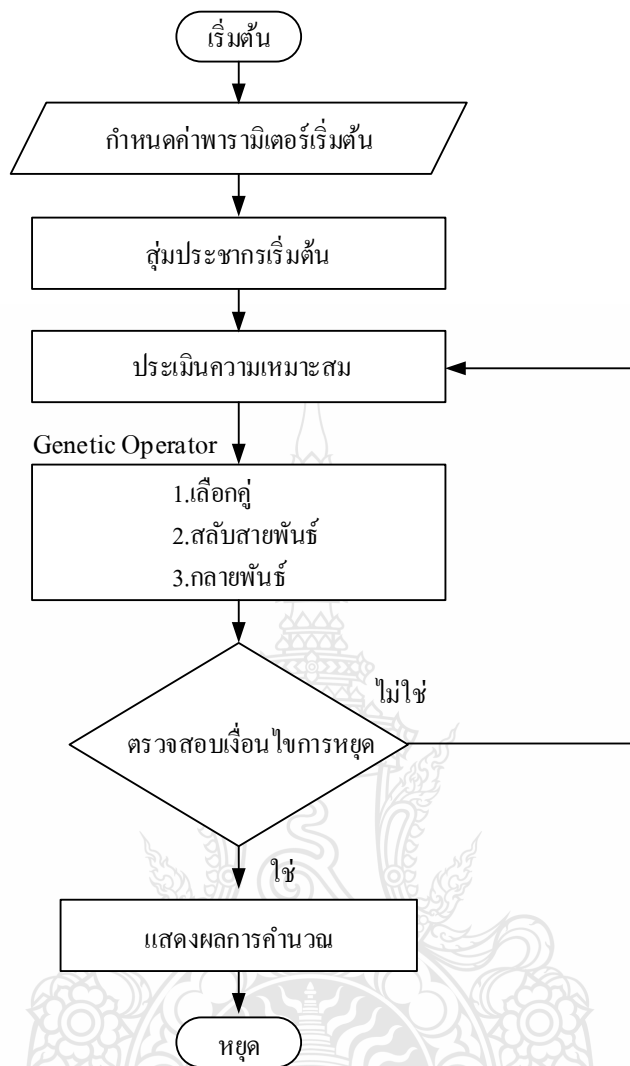
ขั้นตอนที่ 4 วิเคราะห์หาค่าฟังก์ชันที่ความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซม

ขั้นตอนที่ 5 การคัดเลือกโครโมโซมต้นแบบ (Selection) โดยคำนึงถึงความเหมาะสมที่สุด

ขั้นตอนที่ 6 การข้ามสายพันธุ์ (Crossover) โดยทำการกำหนดการสุ่มของโครโมโซมต้นแบบที่เลือกมาทั้งหมดโครโมโซมตัวใดมีค่าสุ่มน้อยจะถูกนำไปรวมกับโครโมโซมต้นแบบแล้วมีการปรับเปลี่ยนโครโมโซมเพื่อสร้างโครโมโซมรุ่นใหม่

ขั้นตอนที่ 7 การกลายพันธุ์ (Mutation) ทำได้โดยการเปลี่ยนค่าของโครโมโซมบางตำแหน่งเป็นค่าใหม่ ตามความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์

ขั้นตอนที่ 8 การแทนที่ประชากร (Replacement) ด้วยประชากรรุ่นใหม่ซึ่งเป็นชุดโครโมโซมที่เกิดจากการวิวัฒนาการต่างๆ โดยกระบวนการนี้จะทำซ้ำๆ จนถึงรุ่นที่ต้องการ



รูปที่ 2.7 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

2.6.3.1 ฟังก์ชันจุดประสงค์ (Objective Function)

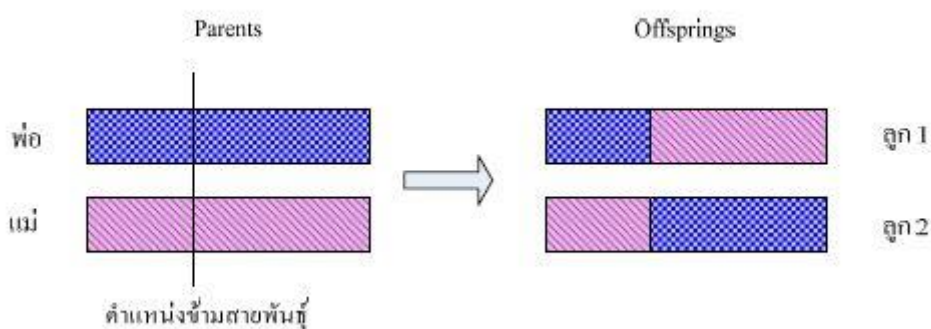
ฟังก์ชันจุดประสงค์ คือเกณฑ์ในการหาจำนวนโครโมโซมที่เหมาะสมที่คำนึงถึงค่าฟังก์ชันที่เหมาะสมที่สุด (Fitness Function) โดยโครโมโซมที่ใช้งานทุกตัวต้องมีค่าบ่งบอกถึงความเหมาะสมเพื่อประกอบการพิจารณาว่าสมควรแก่การจะนำไปสืบสายพันธุ์หรือไม่ ดังนั้นการพิจารณาความเหมาะสมของโครโมโซมต้องมีความสอดคล้องกันกับปัญหาที่จะทำการศึกษา

2.6.3.2 การคัดเลือก (Selection)

การคัดเลือกโครโมโซมที่นำไปใช้เป็นโครโมโซมต้นแบบ เพื่อทำการสืบสายพันธุ์ ซึ่งมีรูปแบบในการคัดเลือกอยู่หลายรูปแบบ เช่น การคัดเลือกแบบวงล้อรูเล็ต (Roulette wheel) การคัดเลือกแบบจัดลำดับ (Ranking) และการคัดเลือกแบบอีลิทิสต์ (Eitist) ซึ่งความเหมาะสมในการเลือกใช้ก็ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง

2.6.3.3 การข้ามสายพันธุ์ (Crossover)

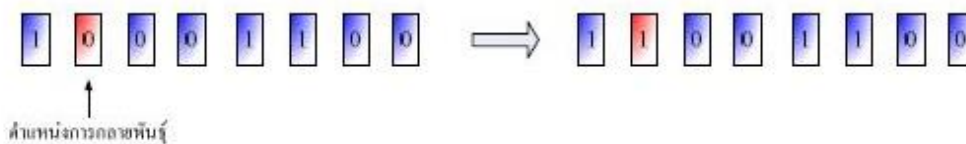
การข้ามสายพันธุ์ เป็นกระบวนการที่สำคัญต่อวิธีการเชิงพันธุกรรม มีการแลกเปลี่ยนยีนในโครโซมนั้นทำให้โครโมโซมมีค่าที่เหมาะสมที่สุด ส่งผลดีทำให้โครโมโซมที่กลายพันธุ์ที่ดีกว่าตัวต้นแบบ แต่กระบวนการนี้ใช้เวลานาน และต้องระวังในเลือกโครโซมเพราะถ้าเลือกโครโมโซมที่มีค่าเหมือนกันก็จะทำให้ไม่เกิดผลอะไรเกิดขึ้น



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างการข้ามสายพันธุ์

2.6.3.4 การกลายพันธุ์ (Mutation)

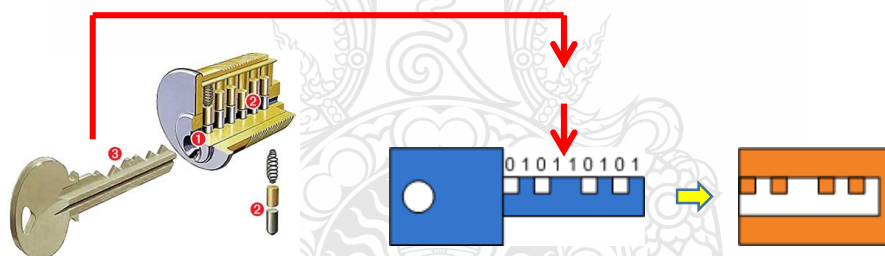
การกลายพันธุ์เป็นกระบวนการที่ต่อจากการข้ามสายพันธุ์โดย จะทำการสุ่มโครโมโซมจากรุ่นต้นแบบขึ้นมาจากนั้นจึงมีการปรับเปลี่ยนค่ายีนส์ ณ ตำแหน่งนั้น เช่นถ้าโครโมโซมอยู่ในรูปของเลขฐานสองถ้ามีค่าเป็น 0 ก็จะเปลี่ยนไปเป็น 1 ซึ่งที่ค่าเปลี่ยนไปจากเดิมเพื่อเพิ่มข้อมูลให้สามารถมีค่าตอบที่แปลกใหม่



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างการกลายพันธุ์ [14]

2.6.4 วิธีการ Key Cutting Algorithm (KCA)

ปี ค.ศ. 2009 Jing Qin ได้นำเสนอแนวความคิดเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธี KCA เพื่อใช้ในการแก้ไขปัญหาลักษณะเกี่ยวกับปัญหาการจัดเรียง Puzzle และการแก้สมการต่าง ๆ โดยมีแนวความคิดจากการใช้ชีวิตประจำวันของผู้คนโดยทั่วไปที่มีความเกี่ยวข้องกับการใช้กุญแจ ที่พบเจอสถานการณ์ที่ไม่อยากให้เกิดขึ้นเช่น ลืมกุญแจไว้ในสถานที่ต่าง ๆ หรืออาจสูญหาย แต่ในเหตุการณ์ดังกล่าวหากมีกุญแจสำรองก็สามารุใช้ในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้อย่างดี แต่หากว่าไม่เป็นเช่นนั้นแล้วอาจทำให้ต้องมีการทำลายแม่กุญแจที่ลืตกอยู่เพื่อทำการปลดล็อคซึ่งอาจทำให้ทรัพย์สินเสียหายทางเลือกอื่นที่สามารถทำได้เพื่อใช้ในการแก้ไขปัญหาคือใช้บริการช่างผู้ชำนาญในการปลดล็อคแม่กุญแจหรือช่างทำกุญแจ (Lock Smith) ช่วยในการแก้ไขปัญหาคือ ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของแนวความคิดในการแก้ไขปัญหาค่าที่เหมาะสมด้วยการปลดล็อคแม่กุญแจของช่างทำกุญแจ โดยหลักการเบื้องต้นของช่างทำกุญแจนั้นจะทำการเลือกชนิดของกุญแจที่มีความคล้ายกับกุญแจเดิมที่สูญหายเพื่อทำการทดลองปลดล็อค เมื่อพบกุญแจรูปแบบที่สอดคล้องกับแม่กุญแจได้ดีแล้วจากนั้นก็พยายามค้นหาลูกกุญแจ จากกุญแจในชุดเดียวกันจากหลักการความคล้ายคลึงกัน (Similarity) ของลักษณะลิ้มรอยบากของฟันกุญแจ ที่จะสามารถเข้ากับแม่กุญแจได้ดีที่สุด สร้างกุญแจชุดใหม่ของลักษณะลิ้มรอยบากของฟันกุญแจหรือรหัสที่เป็นไปได้ในการปลดล็อคขึ้นมาและทำซ้ำ จนสามารถปลดล็อคแม่กุญแจได้ ลักษณะโครงสร้างของระบบการล็อคด้วยแม่กุญแจสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.9 ดังนี้ [15]



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของระบบการล็อคด้วยแม่กุญแจ [11]

การจำลองกระบวนการปลดล็อคแม่กุญแจของช่างทำกุญแจ สามารถดำเนินการได้ตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้

ข้อกำหนดของอัลกอริทึมการสะเดาะกุญแจ

ข้อที่ 1 ล็อก (Lock) หรือแม่กุญแจ

แทนปัญหาที่ต้องการผลเฉลย ดังเช่น กุญแจที่จะใช้ในการปลดล็อค ดังนั้น กรณีของล็อกหรือแม่กุญแจนี้เปรียบเสมือนปัญหาหรือฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหา

ข้อที่ 2 กุญแจ (Key)

เป็นผลเฉลยของปัญหา เช่น $f(x) = x^2 - 1$ ค่า x ของปัญหาจะเรียกว่าผลเฉลย แต่จะมีผลเฉลยอย่างน้อย 1 ชุดที่ให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าต่ำที่สุด ผลเฉลยเปรียบเสมือนกุญแจที่สามารถปลดล็อคได้ ดังรูปที่ 2.6

ข้อที่ 3 ฟัน (Tooth)

เป็นส่วนประกอบของเวกเตอร์ของผลเฉลย โดยการจำลองกุญแจหนึ่งดอกใด ๆ เป็นรหัสเลขฐานสองคล้ายกับการเข้ารหัสไบนารีของจินเนติกอัลกอริทึม ดังนั้น หนึ่งรอยบากหรือฟันบนกุญแจเป็นรหัสของเวกเตอร์ผลเฉลย เช่น ถ้าให้ $x = 5$ ได้เป็น 00000101

ข้อที่ 4 การตั้งค่ากุญแจ (Key set)

เป็นการกำหนดคำตอบที่เป็นไปได้

ข้อที่ 5 ค่าความฟิต (Fitness)

เป็นค่าที่บ่งบอกว่ากุญแจที่ได้จะปลดล็อกแม่กุญแจได้มากน้อยเพียงใด ในจะประเมินค่าความฟิตได้จากค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยตรง

ข้อที่ 6 ความคล้าย (Similarity)

เป็นค่าความคล้ายคลึงระหว่างผลเฉลยกุญแจทั้งหมดกับกุญแจที่กำหนดไว้ในตอนเริ่มต้นโดยพิจารณาที่รอยบากของฟันลูกกุญแจที่ละบิต

ข้อที่ 7 การปลดล็อกกุญแจ (Key cutting)

เป็นกระบวนการปรับแต่งรอยบากหรือฟันของลูกกุญแจ แทนการปรับเปลี่ยนรหัสเลขฐานสองของเวกเตอร์ผลเฉลย เช่น $x = 5(0000101)$ อาจจะเปลี่ยนฟันลำดับที่สองจาก 0 เป็น 1 ดังนี้ $0000101 \geq 0000111$

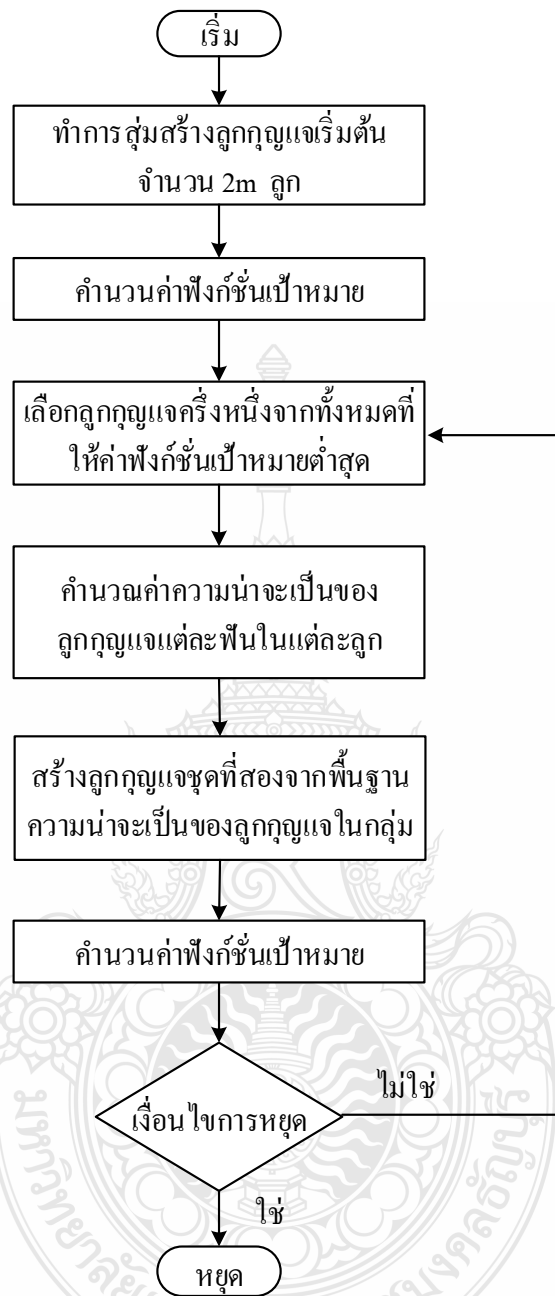
ข้อที่ 8 ตัวประกอบความน่าจะเป็นของการปลดล็อกกุญแจ

การเปลี่ยนแปลงของฟันกุญแจจะถูกควบคุมด้วยหลักความน่าจะเป็นเช่น $x = 5(0000101)$ จะมีค่าความน่าจะเป็นค่าหนึ่งที่จะเปลี่ยนแปลงได้ตลอดกระบวนการค้นหาเป็นค่าประจำตำแหน่งบิตของฟันกุญแจ คือ ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนจาก 1 เป็น 0 หรือจาก 0 เป็น 1 ก็ได้ในกระบวนการสะเดาะกุญแจ ตัวประกอบความน่าจะเป็นของการปลดล็อกกุญแจ (Probability factor of Key cutting) จะถูกคำนวณจากความคล้ายกันในเซตของลูกกุญแจที่มีอยู่ในขณะนั้น

ข้อที่ 9 การเลือกกุญแจ (Key selection)

เป็นการเลือกกุญแจจากเซตของลูกกุญแจที่มีอยู่เพื่อไปเป็นกุญแจต้นแบบในรอบถัดไปสมมติให้กุญแจ คือ $K_{i,j} = [S_{i,n} S_{i,n-1} \dots S_{i,1}]$ เมื่อ n แทนจำนวนบิต หรือจำนวนรอยบากของฟันกุญแจที่ใช้แก้ปัญหา

จากหลักการวิธีการสะเดาะกุญแจที่กล่าวมาข้างต้นนั้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการแก้ปัญหาเพื่อหาค่าที่เหมาะสมได้โดยสามารถแสดงขั้นตอนวิธีการได้ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.11 ขั้นตอนวิธีการสะเดาะกุญแจ [16]

จากรูปที่ 2.10 สามารถอธิบายขั้นตอนการทำงานของแต่ละขั้นตอนของวิธีการสะเดาะกุญแจได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดตัวนับ ($h = 0$)

ขั้นตอนที่ 2 ทำการสุมลูกกุญแจในพวงกุญแจเริ่มต้น (k_h) จำนวน $2m$ ดอก

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่าความพิทหรือฟังก์ชันเป้าหมายของกุญแจทุกดอกในพวงกุญแจ

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณตัวประกอบความน่าจะเป็นของการสละคะแนน $p_{i,j}$ โดย $i = 1, 2, 3, \dots, m$ และ $j = 1, 2, 3, \dots, n$ ซึ่งเป็นค่าประจำตำแหน่ง $S_{i,j}$ ใด ๆ จากพวงกุญแจที่มีอยู่สามารถเขียนแจกแจงเป็นเมตริกซ์พวงกุญแจได้ดังนี้

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{1n} & S_{1(n-1)} & \cdots & S_{12} & S_{11} \\ S_{2n} & S_{2(n-1)} & \cdots & S_{22} & S_{21} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ S_{(m-1)n} & S_{(m-1)(n-1)} & \cdots & S_{(m-1)2} & S_{(m-1)1} \\ S_{mn} & S_{m(n-1)} & \cdots & S_{m2} & S_{m1} \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

โดยที่ $p_{i,j}$ คำนวณได้จาก $p_{i,j} = 1 - \frac{z}{m}$ เมื่อ z แทนจำนวนนับที่ปรากฏค่า $S_{i,j}$ ในหลักที่ j ที่พิจารณา

$$K_0 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

เช่น $S_{1,8}$ มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อพิจารณาในหลักที่ $j=8$ จะพบว่า มี 1 อยู่ทั้งสิ้น 7 ตำแหน่ง จากทั้งหมด 10 ตำแหน่ง ดังนั้น $p_{1,8} = 1 - \frac{7}{10} = 0.3$ ซึ่งมีค่าต่ำกว่า 0.5 โดยทั่วไป กรณีที่ใช้รหัสไบนารีมีโอกาสเป็นไปได้ 2 รหัส คือ 0 หรือ 1 นั่นคือ ถ้าความน่าจะเป็นนี้มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.5 นั่นคือในตำแหน่งที่พิจารณานี้ ค่ารหัสในตำแหน่งดังกล่าวมีความคล้ายคลึงกันกับของกุญแจดอกอื่นที่อยู่ในพวงเดียวกัน ดังนั้น ตำแหน่งนี้จะถือว่ามีโอกาสน้อยที่จะถูกปรับเปลี่ยนในขณะที่ $S_{1,7}$ มีค่าเท่ากับ 1 เช่นกัน แต่จะได้ $p_{1,8} = 1 - \frac{4}{10} = 0.6$ ซึ่งมีค่าเกิน 0.5 ดังนั้น ตำแหน่งนี้มีโอกาสจะถูกปรับเปลี่ยนมากกว่า

ขั้นตอนที่ 5 เลือกกุญแจที่ให้ค่าความพิດดีที่สุดครั้งหนึ่งมาสร้างกุญแจชุดใหม่โดยการพิจารณาตำแหน่งบิตที่มีค่า p_{ij} สูงที่สุดให้ปรับเปลี่ยนรหัส จากนั้น ทำการประเมินค่าความพิດของกุญแจที่ได้ใหม่ เมื่อดำเนินการครบทั้งหมดจะได้กุญแจทั้งสิ้น $2m$ ดอกคัดสรรดอกกุญแจจำนวน m ดอก ที่มีค่าความพิດดีที่สุดเป็นพวงกุญแจในหน่วยความจำเพื่อใช้ในรอบการค้นหาลัดไป

ขั้นตอนที่ 6 ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 ถึง 5 จนกระทั่งเข้าเงื่อนไขการหยุด ผลลัพธ์ของกุญแจที่ดีที่สุด ในพวงกุญแจสุดท้าย คือ ผลเฉลย

2.7 การวิเคราะห์ข้อมูลที่เกิดพลาด

เป็นการเกิดขึ้นของข้อมูลจากความผิดพลาดจากสัญญาณรบกวน ความผิดพลาดต่างๆ ไป ซึ่งจะมีวิธีการแก้ไขโดยการตรวจจับ (Detection) และการบ่งชี้ (Identification) และเคลื่อนย้ายข้อมูลที่ไม่ดีออกไป กระบวนการเหล่านี้โดยทั่วไปจะต้องมีจำนวนสมการระบบมากกว่าจำนวนตัวแปรสถานะที่จะถูกประมาณ หรืออาจกล่าวได้ว่าจะต้องมีเครื่องวัดที่เหลือเฟือเกินความจำเป็นทางปฏิบัติ นั้น หลักวิธีที่จะใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ไม่ดีควรมีสมรรถนะบ่งชี้ที่ดีและมีการคำนวณที่มีประสิทธิภาพ

2.7.1 การตรวจจับข้อมูลผิดพลาด

วิธีการหนึ่งที่ใช้ในการตรวจจับข้อมูลผิดพลาด และใช้หลักการทางสถิติคือวิธีการทดสอบแบบไค-สแควร์ (Chi-squares test) โดยใช้การแจกแจงแบบไค-สแควร์ $X^2 (K)$ (Chi-square)

สำหรับในกระบวนการการตรวจจับข้อมูลผิดพลาดจากระบบการวัด จำนวนของข้อมูลที่ได้จากเครื่องวัด และจำนวนตัวแปรสถานะ มีผลต่อการกำหนดวิธีการทางสถิติที่จะนำมาใช้ โดยแสดงได้ดังสมการที่ (2.47)

$$K = N_m - N_s \quad (2.47)$$

เมื่อ K คือ องศาอิสระของการแจกแจงไค-สแควร์

N_m คือ จำนวนข้อมูลการวัด

N_s คือ จำนวนของตัวแปรสถานะมีค่าเท่ากับ $(2n - 1)$

n คือ จำนวนของบิตในระบบ

เมื่อมีข้อมูลที่ผิดพลาดเกิดขึ้น จะสามารถทราบได้จากค่า $J(x)$ ที่ได้จากการคำนวณ โดยถ้าหากมีค่ามากกว่าค่า t_j (Threshold) ที่กำหนดสำหรับ $J(x)$ แสดงว่ามีข้อมูลที่ผิดพลาดเกิดขึ้น การทดสอบค่า t_j อาจจะทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้นได้ ถ้าหากมีการกำหนดค่า t_j ที่มีค่าน้อยเกินไป หรือกำหนดค่า t_j ที่มีค่ามากเกินไป การกำหนดค่า t_j แสดงได้ดังสมการที่ (2.48)

$$\text{prob}(J(x) > t_j \mid J(x) \text{ is a chi-squared with } K \text{ degrees of freedom}) = \alpha \quad (2.48)$$

เมื่อ t_j คือ ค่าขีดเริ่มเปลี่ยน

α คือ ระดับความมีนัยสำคัญ (Significance Level) = 0.05

สมการที่ (2.48) อธิบายได้ว่า ความน่าจะเป็นที่ค่า $J(x)$ จะมีค่ามากกว่า t_j เท่ากับ α โดยกำหนดให้ความหนาแน่นความน่าจะเป็นของ $J(x)$ เป็นแจกแจงโค-สแควร์ที่มีค่าองศาอิสระ

2.7.2 การบ่งชี้ข้อมูลผิดพลาด

การทดสอบค่าสูงสุดของเรซิดิวที่ถูกละเมิด (largest normalized residual) เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในบ่งชี้ข้อมูลที่ผิดพลาด วิธีการนี้ให้ผลลัพธ์ที่น่าพอใจในกรณีที่เกิดข้อมูลผิดพลาดขึ้นแค่หนึ่งตัว ซึ่งกระบวนการทดสอบมีดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 หาค่าตอบการประมาณค่าสถานะ โดยหลักการกำลังสองน้อยที่สุดที่ถูกถ่วงน้ำหนักและคำนวณหาค่าเรซิดิวการวัด

$$r_i = z_i - h_i(x) \quad i=1, \dots, m \quad (2.49)$$

เมื่อ m คือ จำนวนของสมการวัด

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณหาเรซิดิวที่ถูกละเมิด

$$r_i^N = \frac{r_i}{\sqrt{\Omega_{ii}}} \quad i=1, \dots, m \quad (2.50)$$

เมื่อ $\Omega = R - HG^{-1}H^T$

ขั้นตอนที่ 3 หาค่าสูงสุดของเรซิดิวที่ถูกละเมิด ถ้าค่าสูงสุดของเรซิดิวที่ถูกละเมิดมีค่าสูงกว่าค่าที่กำหนด แสดงว่าข้อมูลการวัดที่สัมพันธ์กับค่าของเรซิดิวที่ถูกละเมิดที่มีค่าสูงสุดนั้นเป็นข้อมูลผิดพลาดซึ่งต้องขจัดออกไป โดยทั่วไปค่าที่ถูกกำหนดไว้จะมีค่าเป็น 3.0 ถ้าค่าสูงสุดของเรซิดิวที่ถูกละเมิดที่มีค่าต่ำกว่าค่าที่กำหนด แสดงว่าไม่มีข้อมูลผิดพลาดและค่าที่ประมาณได้มีความน่าเชื่อถือ

ขั้นตอนที่ 4 ให้ขจัดข้อมูลการวัดซึ่งเป็นข้อมูลผิดพลาดออกจากระบบการวัดแล้วย้อนไปทำขั้นตอนที่ 1 ใหม่

2.8 การวัดความถูกต้องของการประมาณสถานะ

ความถูกต้องของการประมาณค่าสถานะจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับว่าได้ค่าใกล้เคียงกับค่าจริงมากหรือน้อยเพียงใด ถ้าค่าจริงต่างจากค่าที่ประมาณได้มาก ค่าความคลาดเคลื่อนก็จะมีค่าสูงและในทางตรงข้ามถ้าหากค่าที่ประเมินได้ค่าใกล้เคียงกับค่าจริง ค่าความถูกต้องก็จะสูงโดยค่าฟังก์ชันของความคลาดเคลื่อนที่ใช้ช่วยวัดความถูกต้องได้แก่ ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (Absolute of Percentage Error ,APE) และค่าความสมบูรณ์เฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ผิดพลาด (Mean Absolute of Percentage Error ,MAPE) เป็นค่าวัดความถูกต้องของการประมาณค่าสถานะที่วัดจากค่าความคลาดเคลื่อนของค่าที่ประมาณได้เทียบกับค่าจริงดังสมการที่ (2.51) สมการที่ (2.52) และสมการที่ (2.53)[17]

$$APE_i = \frac{(XT_i - XE_i)}{XT_i} \times 100 \quad (2.51)$$

$$MAPE = \frac{1}{N_T} \sum_{i=1}^{N_T} APE_i \quad (2.52)$$

เมื่อ	XT_i	คือ	ค่าจริงลำดับที่ i
	XE_i	คือ	ค่าที่ได้จากการประมาณค่าสถานะลำดับที่ i
	i	คือ	ลำดับที่ของการคำนวณ
	N_T	คือ	จำนวนข้อมูลทั้งหมดของค่า APE

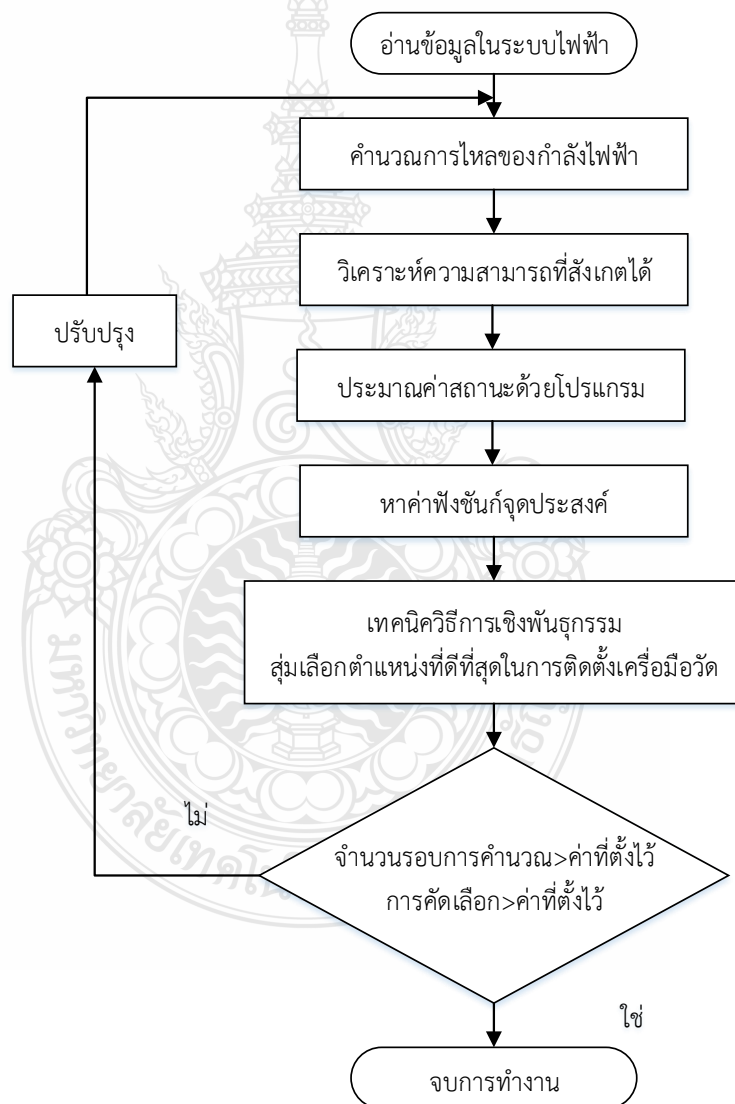
หรือหาค่า MAPE จากสมการที่ (2.53)

$$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^n \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right|}{n} \times 100 \quad (2.53)$$

เมื่อ	F_t	คือ	ค่าพยากรณ์ในงวดที่ 1
	A_t	คือ	ยอดที่เกิดขึ้นจริงในช่วงเวลา t
	n	คือ	จำนวนข้อมูล

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

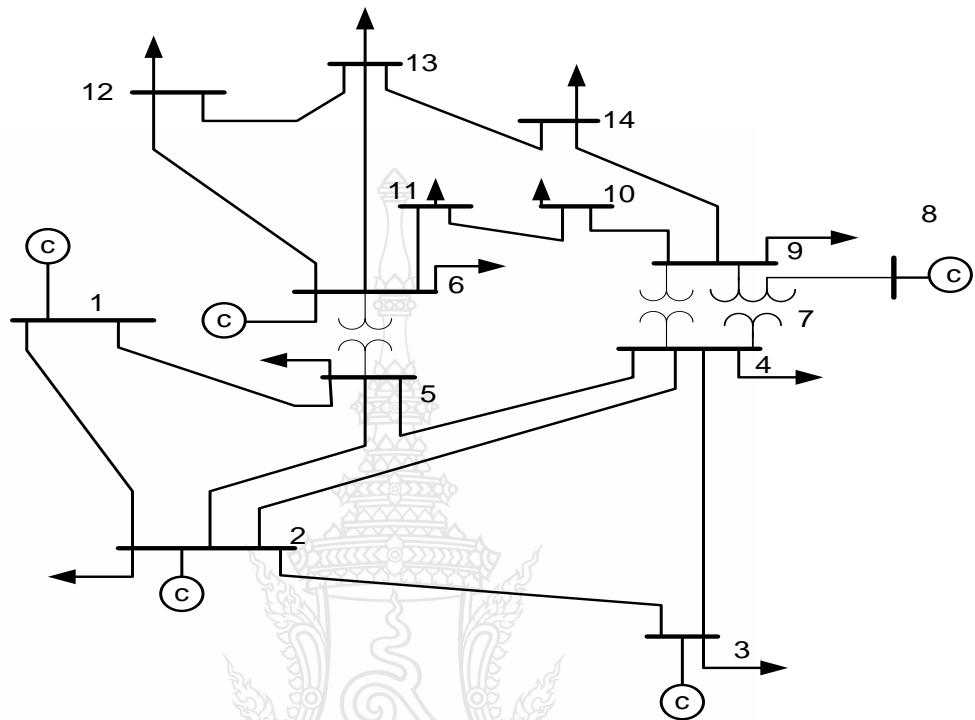
วิทยานิพนธ์นี้เป็นการประมาณค่าสถานะของเครื่องมือวัดสำหรับระบบไฟฟ้า ซึ่งในบทนี้จะเป็นการนำเอาโปรแกรม MATLAB มาประมาณค่าสถานะของระบบไฟฟ้า IEEE 14 บัส และจะทำการวิเคราะห์ผลกระทบที่สามารถเกิดขึ้นได้ที่มีผลต่อการประมาณค่าสถานะของเครื่องมือวัดสำหรับระบบไฟฟ้า เช่น การชำรุด การสูญเสียและการอ่านข้อมูลที่ผิดพลาดของเครื่องมือวัดในระบบไฟฟ้า ด้วยเทคนิควิธีเชิงพันธุกรรมในการกำหนดตำแหน่งเครื่องมือวัด ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนวิธีดำเนินงาน

3.1 การไหลของกำลังไฟฟ้า

ได้ทดสอบการไหลของกำลังไฟฟ้าบนพื้นฐานของระบบ IEEE 14 บัส โดยนำข้อมูลต่างๆ ของ IEEE 14 มาเป็นข้อมูลพื้นฐานของการประมาณค่าสถานะ

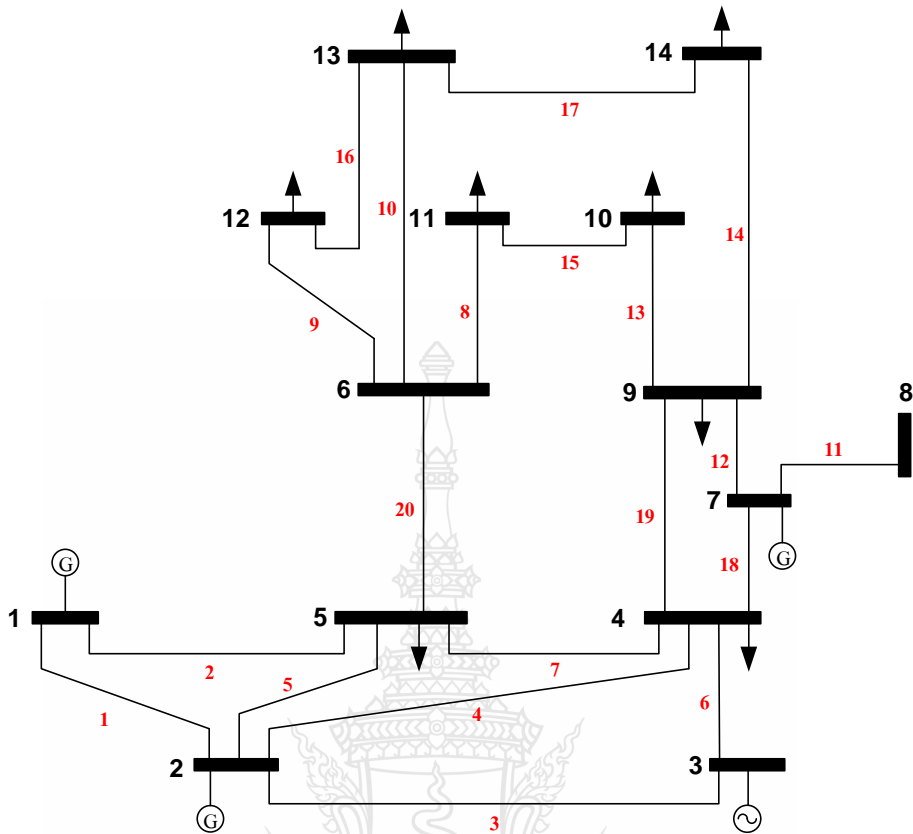


รูปที่ 3.2 ระบบ IEEE 14 บัส

จากรูปที่ 3.2 แสดงระบบของ IEEE 14 บัสจะประกอบด้วย เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส 5 เครื่อง ได้แก่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2 เครื่อง และอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าซิงโครนัส 3 เครื่อง มีสายส่ง 20 สาย และมีบัสทั้งหมด 14 บัส มีโหลดทั้งหมด 259 เมกะวัตต์ และ 81.4 เมกะวาร์ ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากข้อมูลพื้นฐานของ IEEE 14 บัส

3.2 การประมาณค่าสถานะโดยใช้โปรแกรม MATLAB

ระบบที่ได้นำมาใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ คือระบบของ IEEE 14 บัส ดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยการนำข้อมูลต่างๆ ของระบบไฟฟ้ามาใช้ในการเขียนโปรแกรมใน MATLAB เพื่อหาค่าประมาณสถานะของเครื่องมือวัด ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานดังนี้



รูปที่ 3.3 ระบบทดสอบ IEEE 14 บัส

3.3 การหาคำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดโดยวิธีการเชิงพันธุกรรม

ในการหาคำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดโดยใช้วิธีเทคนิคเชิงพันธุกรรมในการสุ่มเลือกหาบัสที่เหมาะสมที่สุดที่สามารถวัดค่าพารามิเตอร์ได้มีประสิทธิภาพดีที่สุดโดยจะมีค่าที่ใช้เป็นค่าพารามิเตอร์คือจำนวนบัส ข้อมูลการเชื่อมต่อระหว่างบัสของสายส่งกำลังไฟฟ้า โดยไม่พิจารณาการต่อโหลดที่บัส หรือประเภทของโหลด เงื่อนไขที่ใช้ในการติดตั้งเครื่องมือวัดในระบบไฟฟ้า ต้องพิจารณาทุกตำแหน่งที่สามารถติดตั้งเครื่องมือวัดได้แทนจำนวนเครื่องมือวัดทั้งหมดที่ติดตั้งในระบบไฟฟ้า

$$\text{เครื่องมือวัดแรงดันที่โหนด (Bus Voltage Measurement)} = N \text{ ตำแหน่ง} \quad (3.1)$$

$$\text{เครื่องมือวัดกระแสเข้าสู่โหนด (Bus Current Injection Measurement)} = N \text{ ตำแหน่ง} \quad (3.2)$$

เมื่อพิจารณาเครื่องมือวัดกระแสไหลในสายส่งกำลังไฟฟ้า (Line Current Measurement) ตำแหน่งที่สามารถติดตั้งได้ในระบบ คือทุกสายส่งกำลังไฟฟ้าที่เชื่อมต่อระหว่างบัส (L) แต่เนื่องจากสายส่งที่พิจารณาเป็นแบบ π ทำให้กระแสที่ไหลในสายส่งต้นทางและปลายทางมีค่าไม่เท่ากันดังนั้นจำนวนเครื่องมือวัดที่สามารถติดตั้งได้จึงสามารถติดตั้งได้ 2 ตำแหน่งคือที่ต้นทางและปลายทางสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3.3

$$\text{เครื่องมือวัดกระแสไหลในสาย (Line Current Measurement)} = 2L \text{ ตำแหน่ง} \quad (3.3)$$

จากสมการที่ (3.1) ถึง สมการที่ (3.3) สามารถแสดงจำนวนที่สามารถติดตั้งเครื่องมือวัดในระบบ ได้ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.4) ดังนี้

$$\text{จำนวนเครื่องมือวัดที่สามารถติดตั้งในระบบไฟฟ้า } M = 2N + 2L \text{ ตำแหน่ง} \quad (3.4)$$

การกำหนดฟังก์ชันต้องมีความสอดคล้องกับปัญหาที่ต้องพิจารณา โดยเป้าหมายของการ ประเมินค่านี้ต้องการค่าที่ต่ำที่สุดของจำนวนที่ติดตั้งของเครื่องมือวัดโยมีเงื่อนไขที่ต้องพิจารณาคือการ ติดตั้งในตำแหน่งที่ดีที่สุดและต้องไม่มีมิเตอร์วิกฤตติดตั้งในระบบไฟฟ้า ดังสมการที่ 3.5

$$\text{fitness} = (n - \text{rank}(\mathbf{H})) + \text{Abs}((n+1) - M) + (CM \times n) \quad (3.5)$$

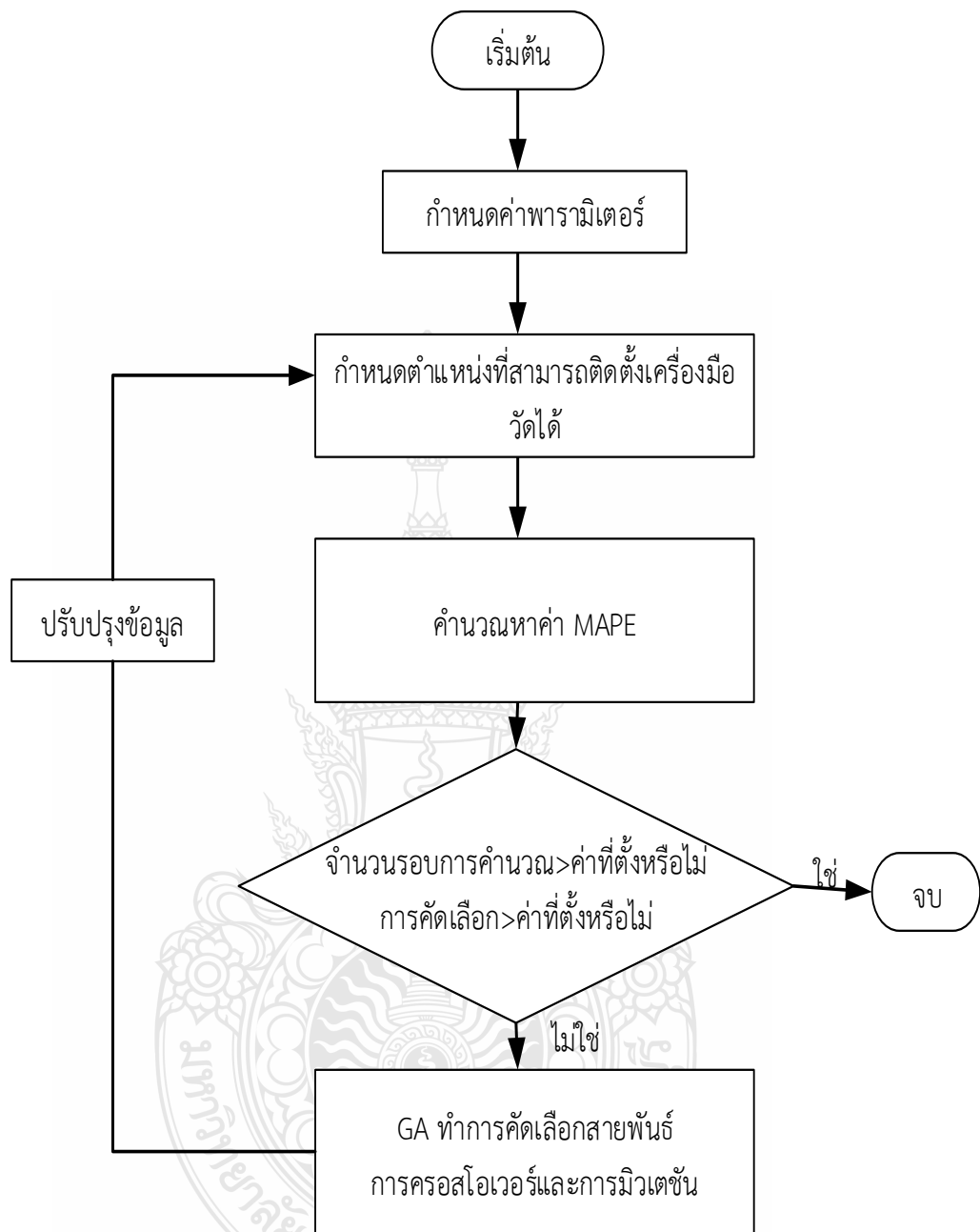
โดยที่ M คือ จำนวนเครื่องมือวัด

n คือ จำนวนตัวแปรสถานะหรือจำนวนบัสในระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

H คือ เมตริกส์การวัดที่สร้างขึ้นจากเครื่องมือวัดที่ติดตั้งในระบบ

CM คือ มิเตอร์วิกฤต

ซึ่งวิธีการดำเนินการของวิธีการเชิงพันธุกรรม GA ได้แสดงลำดับขั้นตอนของการทำงานในการ ทำการเลือกหาตำแหน่งของบัสที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพมากที่สุด สำหรับการติดตั้งเครื่องมือใน ระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อที่จะให้การวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ครอบคลุมการวัดทุกตำแหน่ง ซึ่งได้แสดง ขั้นตอนการทำงานตามรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนของเทคนิควิธีเชิงพันธุกรรม

จากรูปที่ 3.4 เป็นขั้นตอนของเทคนิควิธีเชิงพันธุกรรมสามารถอธิบายการทำงานได้ดังนี้

กำหนดค่าพารามิเตอร์ของเทคนิควิธีเชิงพันธุกรรม โดยใช้พื้นฐานแทนค่าเครื่องมือวัดด้วยเลขฐานสองเพื่อใช้ในการกำหนดตำแหน่งที่จะติดตั้งเครื่องมือวัด จากนั้นก็จะกำหนดตำแหน่งของการติดตั้งเครื่องวัดจำนวนในตำแหน่งของบัสที่ต้องการ

ขั้นตอนที่ 1 รับข้อมูลบัสของแบบจำลองของระบบไฟฟ้าที่ต้องการพิจารณา

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดตำแหน่งที่สามารถติดตั้งเครื่องมือวัดในระบบ ตามสมการที่ 3.4

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดค่าเริ่มต้นของประชากร ด้วยขนาดประชากร $pop = 25$ รอบการค้นหาคำตอบ $gens = 50$ มีการปรับเปลี่ยนยีนภายในโครโมโซมเดียวกันด้วยความน่าจะเป็นเท่ากับ $\mu = 0.02$

ขั้นตอนที่ 4 ทำการสุ่มสร้างประชากรเริ่มต้นที่จำนวนเท่ากับ $2N + 2L$ โดยแทนเครื่องมือวัดแต่ละตำแหน่งด้วย “0” คือไม่ได้มีการติดตั้งเครื่องมือวัด และ “1” คือมีการติดตั้งเครื่องมือวัด

ขั้นตอนที่ 5 ทำการคำนวณหาค่าฟิตเนสฟังก์ชัน

ขั้นตอนที่ 6 เลือกโครโมโซมต้นแบบจากรุ่นต้นฉบับหรือรุ่นพ่อแม่ ใช้ความน่าจะเป็นในการพิจารณาจากค่าที่ได้จากฟิตเนสฟังก์ชัน

ขั้นตอนที่ 7 เมื่อจำนวนรอบของการคำนวณและการคัดเลือกมีค่ามากกว่าค่าที่กำหนดไว้ และใช้วิธีเชิงพันธุกรรม ดำเนินการคัดเลือกสายพันธุ์ การครอสโอเวอร์ และการมิวเตชันแล้วดำเนินการปรับปรุงข้อมูลไปเรื่อยๆ จนกว่าจะได้ค่าที่เหมาะสม

ขั้นตอนที่ 8 จบการทำงาน



บทที่ 4

ผลการทดลอง

จากการดำเนินงานโดยการวิเคราะห์ความสามารถที่สังเกตได้ในการประมาณค่าสถานะของเครื่องมือสำหรับระบบไฟฟ้าด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเพื่อให้นักวิจัยฉบับนี้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ ซึ่งจะมีการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดสอบการติดตั้งเครื่องมือวัดด้วยวิธีการเชิงพันธุกรรม

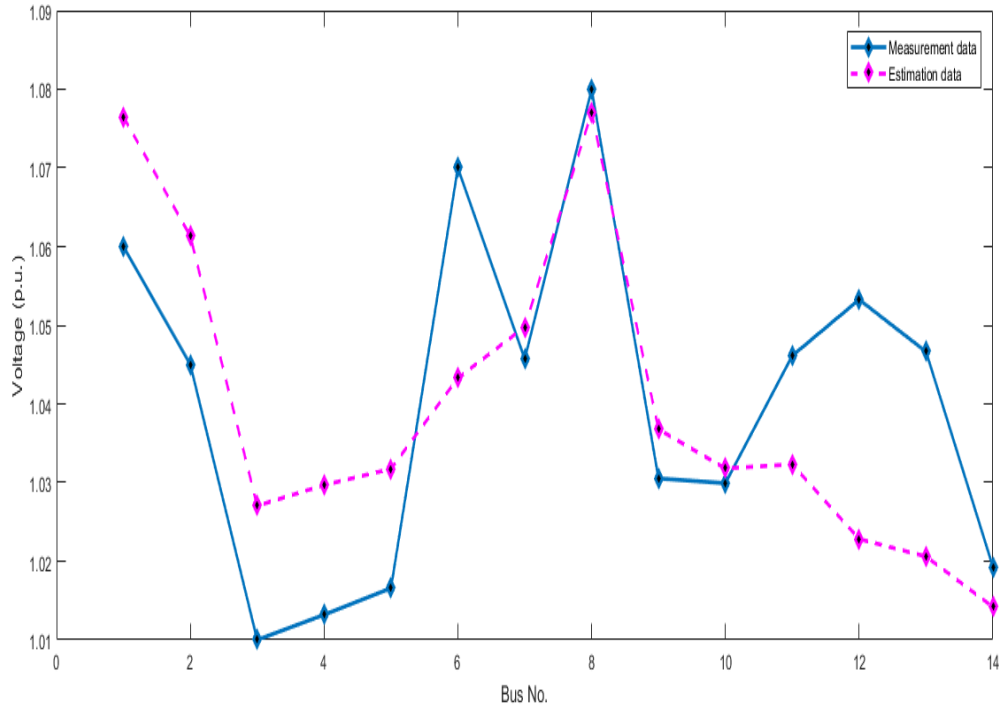
ในการการวิเคราะห์ความสามารถที่สังเกตได้และการหายไปของเครื่องมือวัดโดยใช้เทคนิคการประมาณค่าสถานะนั้นได้ทำการจำลอง ด้วยระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE14 บัส โดยเครื่องมือวัดที่ติดตั้งในระบบไฟฟ้าสามารถกำหนดชนิดเครื่องมือวัดประกอบไปด้วยเครื่องมือวัดขนาดแรงดันที่บัส (V) เครื่องวัดกำลังไฟฟ้าเข้าสู่บัส (P_i, Q_i) เครื่องวัดกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสาย (P_{ij}, Q_{ij}) ตามลำดับ เมื่อได้พิจารณาค่า MAPE ที่ดีที่สุดแล้ว คือ 1.3624 หลังจากนั้นก็ได้ทำการจำลองกรณีศึกษาทั้งหมด 10 กรณี และได้ทำการติดตั้งเครื่องมือวัดไปในแต่ละตำแหน่งเพื่อให้สามารถวัดค่าพารามิเตอร์ในระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด

ตารางที่ 4.1 การทดสอบการติดตั้งเครื่องมือวัดในระบบไฟฟ้า

กรณี	จำนวนเครื่องมือวัด					ผลรวม
	V	Pi	Qi	Pij	Qij	
1	8	8	6	21	24	67
2	8	4	10	19	16	57
3	9	7	6	23	19	64
4	5	9	9	19	18	60
5	8	9	5	17	17	56
6	8	8	8	19	19	62
7	12	7	6	21	17	63
8	9	4	8	23	19	63
9	6	10	9	19	23	67
10	8	10	8	25	20	71

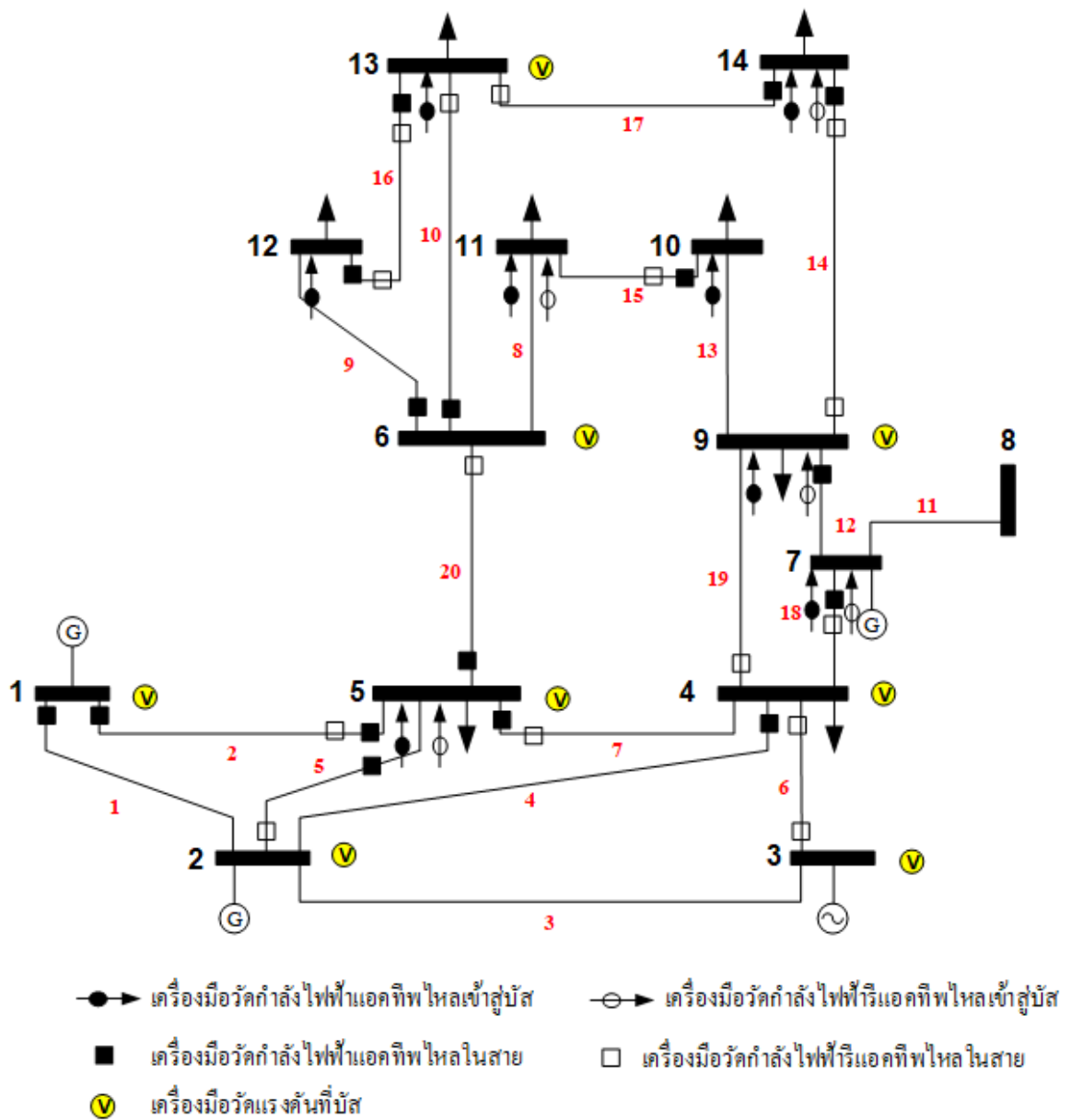
จากตารางที่ 4.1 ทำการจำลองทั้งหมด 10 กรณี โดยทำการติดตั้งเครื่องมือวัดทั้งหมด ด้วยวิธีการเชิงพันธุกรรมในการติดตั้งมิเตอร์แต่ละตำแหน่ง แสดงให้เห็นว่า การติดตั้งเครื่องมือวัดด้วยวิธีเชิง

พันธุกรรมสามารถลดจำนวนที่ติดตั้งเครื่องมือลงไปในระบบไฟฟ้าได้และยังสามารถมีค่าประสิทธิภาพดีที่สุดในเมื่อเทียบกับจำนวนเครื่องมือวัดทั้งระบบได้



รูปที่ 4.1 กรณีศึกษาที่ 5 จำนวนมิเตอร์ 56 ตัว

จากการศึกษาทั้งหมด 10 กรณี จะพบว่าในกรณีที่ 5 ในตารางที่ 4.1 เครื่องมือวัดที่สามารถติดตั้งได้ในระบบไฟฟ้าโดยมีจำนวนน้อยที่สุดนั้น อยู่ที่ 56 ตัว จากระบบทั้งหมด 122 ตัว ซึ่งค่าแรงดันแต่ละบัสจากการประมาณค่าเทียบกับการวัดค่าจริงนั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ค่าแรงดันนี้ไม่ได้พิจารณา มิเตอร์วิกฤตและมิเตอร์อ่านค่าผิดพลาด จากผลการประมาณการเบื้องต้นจากเครื่องมือวัดที่ติดตั้งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานจริงและต้องเพิ่มการพิจารณาความเหมาะสมในเครื่องมือวัดแต่ละชนิดประกอบการออกแบบของกรณีที่ 5 ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ตำแหน่งการติดตั้งมิเตอร์ในกรณีที่ 5

จากรูปที่ 4.2 ได้ทำการติดตั้งเครื่องมือวัดแต่ละประเภทไปในระบบพื้นฐาน IEEE 14 บัส เพื่อได้แสดงให้เห็นถึงตำแหน่งของเครื่องมือที่ติดตั้งในแต่ละตำแหน่งที่สามารถวัดค่าพารามิเตอร์ของระบบได้อย่างครบถ้วน

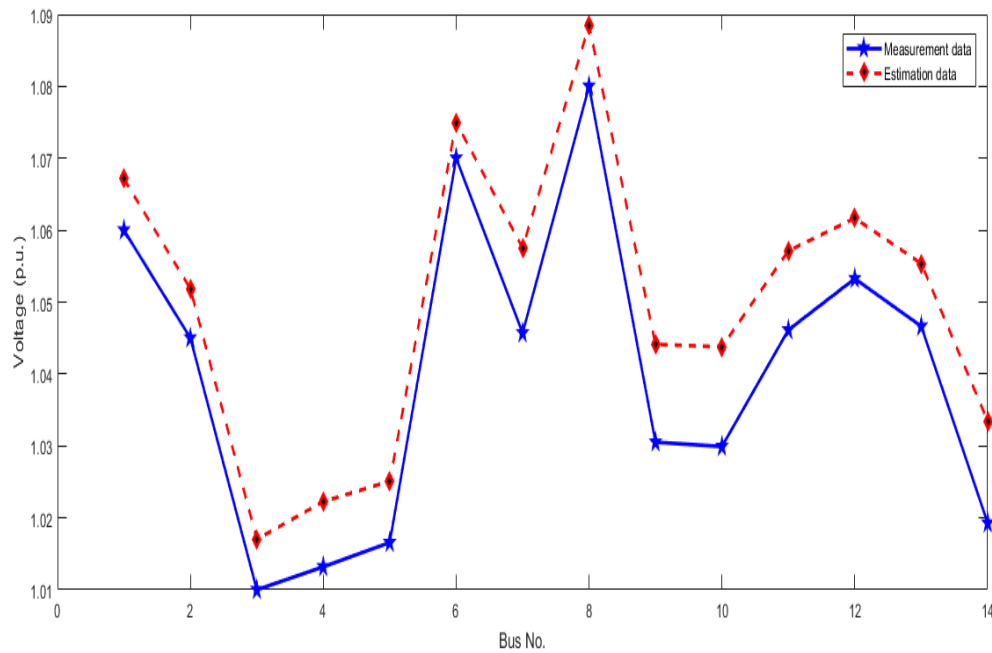
4.2 ผลการทดสอบการติดตั้งเครื่องมือวัด AMR ด้วยวิธีการเชิงพันธุกรรม

ในการวิเคราะห์ความสามารถที่สังเกตได้และการหายไปของการวัดของย่านอุตสาหกรรม โดยใช้เทคนิคการประมาณค่าสถานะนั้นได้ทำการจำลอง ด้วยระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE14 บัส โดยเครื่องมือวัดที่ติดตั้งในระบบไฟฟ้าสามารถกำหนดชนิดเครื่องมือวัดประกอบไปด้วยเครื่องมือวัดขนาดแรงดันที่บัส ($|V|$) เครื่องกำลังไฟฟ้าเข้าสู่บัส (P_i, Q_i) ตามลำดับ เมื่อได้ทำการวิเคราะห์ความสามารถที่สังเกตได้แล้วนั้นทำให้ได้ค่า MAPE ที่ดีที่สุด คือ 0.9201 หลังจากนั้นได้ทำการจำลองกรณีศึกษา 10 กรณีในการประมาณค่าสถานะของเครื่องมือวัด AMR สำหรับระบบไฟฟ้า

ตารางที่ 4.2 การทดสอบการติดตั้งเครื่องมือวัด AMR ในระบบไฟฟ้า

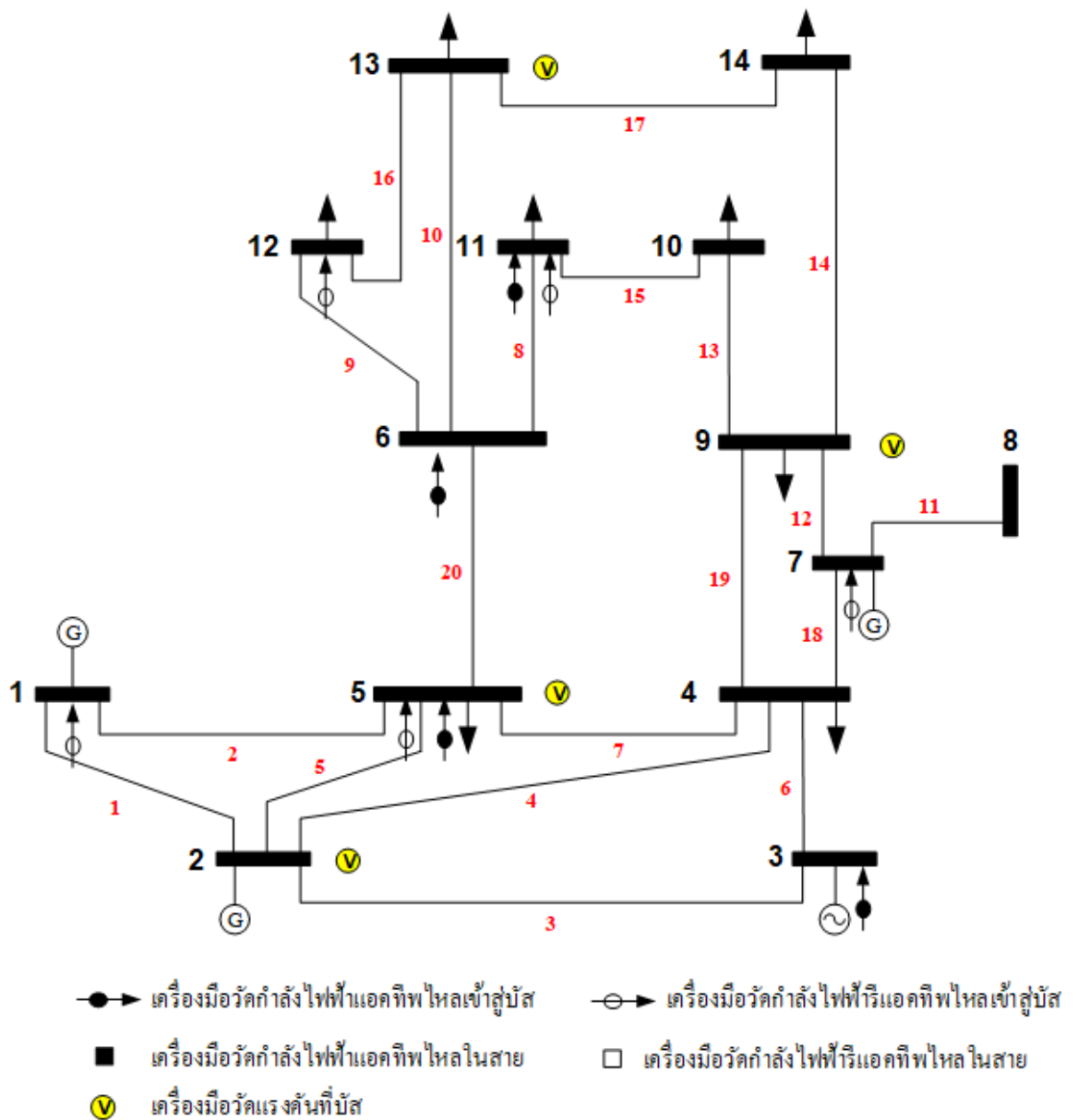
กรณี	จำนวนเครื่องมือวัด			
	V	Pi	Qi	ผลรวม
1	5	5	8	18
2	6	6	13	25
3	8	6	5	19
4	7	9	5	21
5	7	9	11	27
6	4	6	5	15
7	8	7	5	20
8	6	8	10	24
9	6	8	7	21
10	4	4	5	13

จากตารางที่ 4.2 ทำการจำลองทั้งหมด 10 กรณี โดยทำการติดตั้งเครื่องมือวัด AMR ด้วยวิธีการเชิงพันธุกรรมในการติดตั้งแต่ละตำแหน่งของระบบไฟฟ้าโดยมีค่า MAPE ที่เท่ากันทุกกรณี และทุกกรณียังสามารถวัดค่าพารามิเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 4.3 กรณีศึกษาที่ 10 จำนวนเครื่องมือวัด 13 ตัว

จากการศึกษาในกรณีศึกษาที่ 10 จะพบว่า เครื่องมือวัดที่สามารถติดตั้งได้ในระบบไฟฟ้าโดยมีจำนวนน้อยที่สุดนั้น อยู่ที่ 13 ตัวจากระบบทั้งหมด 42 ตัว ซึ่งค่าแรงดันแต่ละบัสจากการประมาณค่าเทียบกับการวัดค่าจริงนั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ค่าแรงดันนี้ไม่ได้พิจารณา มิเตอร์วิกฤตและมิเตอร์อ่านค่าผิดพลาด ผลการประมาณการเบื้องต้นจากเครื่องมือวัดที่ติดตั้งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานจริงและต้องเพิ่มการพิจารณาความเหมาะสมในเครื่องมือวัดแต่ละชนิดประกอบการออกแบบของกรณีศึกษาที่ 10 ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดในกรณีที่ 10

จากรูปที่ 4.4 แสดงถึงการนำเครื่องมือวัดไปติดตั้งในระบบไฟฟ้าตามกรณีที่ 10 ที่มีจำนวนเครื่องมือวัดที่น้อยที่สุด ที่ 13 ตัว แต่ก็ยังวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ครบถ้วน และมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับการติดตั้งเครื่องมือวัดในทุกตำแหน่งของระบบไฟฟ้า

4.3 สรุป

จากการศึกษาการวิเคราะห์ความสามารถที่สังเกตของระบบไฟฟ้าในย่านอุตสาหกรรมได้โดยใช้เทคนิคการประมาณค่าสถานะ ด้วยการวิเคราะห์การหาค่าตอบได้ของตัวแปรสถานะของสมการเครื่องมือวัดด้วยการวิเคราะห์ความสามารถที่สังเกตได้ ทำการการติดตั้งเครื่องมือวัดแต่ละประเภทด้วยวิธีการเทคนิคเชิงพันธุกรรม เพื่อทำการประมาณค่าแรงดันในแต่ละบัส จากผลการทดสอบพบว่า การจำลองการติดตั้งเครื่องมือวัดในระบบไฟฟ้า ซึ่งมีจำนวนเครื่องมือวัดทั้งหมด 122 ตัว แต่เมื่อทำการติดตั้งด้วยวิธีเชิงพันธุกรรมก็สามารถแสดงให้เห็นถึงการลดจำนวนเครื่องมือวัดลงได้ในกรณีศึกษาที่ 5 ด้วยจำนวนเครื่องมือวัดติดตั้ง 56 ตัว และการจำลองการติดตั้งเครื่องมือวัดอัตโนมัติ (AMR) ด้วยวิธีการเช่นเดียวกัน จากเครื่องมือวัดทั้งหมด 42 ตัว สามารถลดจำนวนเครื่องมือวัดลงได้เหลือ 13 ตัว ดังในกรณีศึกษาที่ 10 ดังนั้นพบว่า เมื่อลดจำนวนเครื่องมือวัดลง ระบบเครื่องวัดไฟฟ้าก็สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ แสดงว่า การติดตั้งเครื่องมือวัดที่เหมาะสมในระบบไฟฟ้านั้นทำให้ได้ค่าการประมาณค่าสถานะที่ดีที่สุด ในลำดับถัดไปคณะผู้วิจัยจะทำการศึกษาการติดตั้งเครื่องมือวัดที่เหมาะสมในแต่ละชนิด พิจารณาค่าอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อให้ได้การติดตั้งเครื่องมือวัดที่สมบูรณ์ และคุ่มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ความสามารถที่สังเกตได้ในการประมาณค่าสถานะของเครื่องมือวัดสำหรับระบบไฟฟ้าด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม หลังจากนั้นทำการสรุปผลการจำลอง เพื่อให้เป็นแนวทางในการประมาณค่าสถานะของระบบไฟฟ้าและหาข้อบกพร่องในการทำงาน เพื่อหลีกเลี่ยงอุปสรรคที่จะเกิดขึ้นในครั้งต่อไป

5.1 สรุปผลการประมาณสถานะจากเทคนิควิธีการเชิงพันธุกรรม

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเอาวิธีการประมาณค่าสถานะของระบบไฟฟ้ากำลังโดยการจำลองบนระบบ IEEE 14 บัสแทนระบบไฟฟ้าโดยใช้เทคนิควิธีการเชิงพันธุกรรม เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการระบุหาตำแหน่งจุดติดตั้งเครื่องมือวัดที่เหมาะสมในระบบไฟฟ้า และทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในระบบไฟฟ้า

เทคนิควิธีการประมาณค่าสถานะได้นำมาใช้กับการประมาณค่าที่ยังไม่ทราบค่าโดยอาศัยข้อมูลพื้นฐานเพียงบางส่วน ทำให้ไม่ต้องวัดค่าต่างๆ ทั้งหมด เช่น ขนาดของแรงดันที่บัส กำลังไฟฟ้าที่บัส และกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง สำหรับข้อดีของการประมาณค่าสถานะคือ เมื่อข้อมูลที่ได้จากการวัดเกิดข้อผิดพลาด การสูญหายของข้อมูลบางส่วน เมื่อใช้วิธีการประมาณค่าสถานะจะสามารถทราบถึงค่าที่ประมาณที่ดีที่สุดได้ นอกจากนี้วิธีการประมาณค่าสถานะยังอาจตรวจจับและบ่งชี้ว่าเครื่องมือวัดตัวใดที่มีปัญหาในระบบไฟฟ้าที่ไม่สามารถอ่านข้อมูลได้อย่างถูกต้อง การที่จะให้คำตอบจากการประมาณค่าสถานะให้ได้ค่าใกล้เคียงกับค่าจริงในระบบ IEEE 14 บัส จะต้องมีการปรับปรุงระบบการวัดให้จำนวนข้อมูลที่ได้จากการวัดมีค่าเท่ากับจำนวนตัวแปรสถานะ เนื่องจากจำนวนครั้งของการวัดมีจำนวนที่เพียงพอต่อการประมาณค่าสถานะ และควรมีการปรับปรุงระบบของการวัด โดยเลือกการวางตำแหน่งของเครื่องมือวัดให้เหมาะสมและปริมาณของเครื่องมือวัดที่พอเพียงต่อการวัดค่าพารามิเตอร์

ซึ่งจากวิธีการเชิงพันธุกรรมจะเป็นตัวดำเนินการสุ่มเลือกหาตำแหน่งของบัสที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการติดตั้งเครื่องมือวัดซึ่งจากวิธีดำเนินการของวิธีการพันธุกรรมสามารถที่จะลดจำนวนของการติดตั้งเครื่องวัดจำนวน 56 ตัว แทนที่จะติดตั้งเครื่องวัด 122 ตัว และถ้าพิจารณาเฉพาะเครื่องมือวัดอัตโนมัติ AMR สามารถลดเครื่องมือวัดลงได้เหลือ 13 ตัว จากทั้งหมด 42 ตัว ซึ่งตำแหน่งที่ทำการติดตั้งเครื่องมือวัดแต่ละบัสก็แสดงให้เห็นไว้ในการทดลองการติดตั้งแล้ว ผลที่ได้สามารถที่จะวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในระบบได้ ซึ่งจากวิธีเชิงพันธุกรรม ที่ใช้ในการระบุตำแหน่งของการติดตั้งเครื่องมือวัด เป็นวิธีการที่ดีที่ช่วยลดจำนวนเครื่องมือวัดลงได้มากและยังมีประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในระบบไฟฟ้า

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 สามารถนำประยุกต์ใช้กับงานวิจัยกับระบบอื่นได้ อาจจำเป็นต้องมีการปรับเปลี่ยนขั้นตอนเพื่อความเหมาะสมกับระบบต่างๆ โดยต้องคำนึงถึงสมมุติฐานเบื้องต้นที่ใช้ และข้อจำกัดต่างๆ

5.2.2 สามารถเพิ่มข้อมูลต่างๆ เพื่อให้สามารถประมาณค่าสถานะได้อย่างถูกต้องที่สุด

5.2.3 จากการจำลองยังใช้ระบบ IEE 14 บัสอยู่ เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการใช้งานควรวีเคราะห์ข้อมูลจากระบบไฟฟ้าจริงในย่านอุตสาหกรรมเพื่อให้เกิดประโยชน์มากขึ้น

5.2.4 สามารถนำไปวิเคราะห์เฉพาะข้อมูลของเครื่องมือวัดที่มีค่าใช้จ่ายที่สูง ที่แตกต่างกัน เพื่อให้สามารถลดการจัดซื้อเครื่องมือได้อย่างดีมากขึ้น



บรรณานุกรม

- [1] I.Molina-Moreno, A.Medina, R.Cisneros-Magaña and O.Anaya-Lara, “**A Methodology for Transient State Estimation Based on Numerical Derivatives Optimal Monitoring and Filtered Measurements,**” IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 33, no. 4, pp. 1527-1535, 2018.
- [2] A. Abur, “**Observability and dynamic state estimation,**” IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp. 1-5, 2015.
- [3] Y. Kongjeen, P.Inrawong, K.Buayai and T.Kerdchuen, “**Key Cutting Algorithm Application to Measurement Placement for Power System State Estimation,**” Energy Procedia, vol. 34, pp. 142-147, 2013.
- [4] Ashwani Kumar and Biswarup Das, “**Genetic Algorithm-Based Meter Placement for Static Estimation of Harmonic Sources,**” IEEE Transactions on Power Delivery, 2005.
- [5] Thawatch Kerdchuen, Weerakorn Ongsakul and Paisan Boonchaim, “**Improving of Measurement System for State Estimation.**” Electrical Engineering Conference, 2007.
- [6] G. D'Antona, C. Muscas and S. Sulis, “**State Estimation for the Localization of Harmonic Sources in Electric Distribution Systems.**” IEEE Transactions on Power Delivery, 2008.
- [7] Markos Asprou, Elias Kyriakides and Mihaela Albu, “**The Effect of Variable Weights in a WLS State.**” IEEE Transactions on Power Delivery, 2014.
- [8] Scott G. Ghiocel, Joe H. Chow, George Stefopoulos, Bruce Fardanesh, Deepak Maragal, Michael Razanousky, and David B. Bertagnolli, “**Phasor Measurement Based State Estimation for Synchro Phasor Data Quality Improvement and Power Transfer Interface Monitoring.**” IEEE Transactions on Power Delivery, 2014.
- [9] พลอยพิมพ์ แก้วทะนง, “**การไหลของกำลังไฟฟ้าและการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์ของ กังหันลมผลิตไฟฟ้าในภาคใต้,**” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2558.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [10] ประทีป ฟูผล, “การศึกษาผลกระทบกำลังสูญเสียในรับจำหน่ายการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย,” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2553.
- [11] รัชชานันท์ นามศิริ, “การวางตำแหน่งของหน่วยวัดมุมเฟสที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการประมาณสถานะ,” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2553.
- [12] อาทิตย์ ศรีแก้ว, “ปัญญาเชิงคำนวณ,” (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ, 2552
- [13] จักรินทร์ วิเศษยา, “การวิเคราะห์หาตำแหน่งการติดตั้ง FACTS ที่เหมาะสมในระบบจำหน่ายโดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาค,” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2554.
- [14] พิพัฒน์ ดุรงค์ด่างชัย, “ตัวควบคุมฟuzzyลอจิกพีไอที่เหมาะสมที่สุดสำหรับไฮโดร-เทอร์โมลโดยใช้วิธีฝูงผึ้ง,” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 2557.
- [15] Jing Qin, “A new optimization Algorithms and Its Application Key Cutting Algorithms,” IEEE International Conference on Gray Systems and Intelligent Services, 2009.
- [16] Yuttana Kongjeen, Prajuab Inrawong, Kittavit Buayai, and Thawatch Kerdchuen, “Key Cutting Algorithm Application to Measurement Placement for Power System State Estimation,” Energy Procedia, Volume 34, pp. 142-147, 2013.
- [17] Chawasak Rakpenthai, Suttichai Premrudeepreechacharn, Sermsak Uatrongjit and Neville R. Watson, “Measurement Placement for Power System state estimation using decomposition technique,” Harmonics and Quality of Power International Conference, pp. 414-418, 2004.

ภาคผนวก



ภาคผนวก ก.
โปรแกรมที่ใช้รับการประเมินค่าสถานะ




```

function[results1,results2] =ga_AMR
%% Problem Definition

CostFunction=@(x) MinOne(x);      % Cost Function

    nVar=42;          % AMR Meter V+Pi+Qi=42 Pcs
    % nVar=122;      % All Meter 122 Pcs

VarSize=[1 nVar]; % Decision Variables Matrix Size

%% GA Parameters

MaxIt=50; % Maximum Number of Iterations

nPop=25; % Population Size

pc=0.8; % Crossover Percentage
nc=2*round(pc*nPop/2); % Number of Offsprings (also Parnets)

pm=0.3; % Mutation Percentage
nm=round(pm*nPop); % Number of Mutants
mu=0.02; % Mutation Rate
% Yuttana Modify
% ANSWER=questdlg('Choose selection method:', 'Genetic Algorith', ...
% 'Roulette Wheel', 'Tournament', 'Random', 'Roulette Wheel');
% Yuttana

ANSWER='Roulette Wheel';

UseRouletteWheelSelection=strcmp(ANSWER, 'Roulette Wheel');
UseTournamentSelection=strcmp(ANSWER, 'Tournament');
UseRandomSelection=strcmp(ANSWER, 'Random');

if UseRouletteWheelSelection
    beta=8; % Selection Pressure
end

if UseTournamentSelection
    TournamentSize=3; % Tournamnet Size
end

pause(0.01); % Needed due to a bug in older versions of MATLAB

```

```

%% Initialization

empty_individual.Position=[];
empty_individual.Cost=[];

pop= repmat(empty_individual,nPop,1);

for i=1:nPop

    % Initialize Position
    pop(i).Position=randi([0 1],VarSize);

    % Evaluation
    pop(i).Cost=CostFunction(pop(i).Position);

end

% Sort Population
Costs=[pop.Cost];
[Costs, SortOrder]=sort(Costs);
pop=pop(SortOrder);

% Store Best Solution
BestSol=pop(1);

% Array to Hold Best Cost Values
BestCost=zeros(MaxIt,1);

% Store Cost
WorstCost=pop(end).Cost;

%% Main Loop
for it=1:MaxIt

    % Calculate Selection Probabilities
    if UseRouletteWheelSelection
        P=exp(-beta*Costs/WorstCost);
        P=P/sum(P);
    end
end

```

```

% Based on AMR Meter
% The AMR meter is considered only Voltage Magnitude, Pi and
% Qi, respectively.

function MAPE = SE_AMR(staus1)

global E22 E11
num = 14; % Bus System..IEEE-30 or IEEE-14..
E1 = nrlfppg(num); % Obtain State from NRLF..
[E2, W1] = wls_AMR(staus1); % Obtain State from WLS..
% E3 = pmu(num,E2,W1);
hold off % Estimated State from WLS+PMU..
% errors(E1,E2,E3); % Calculate Error w.r.t NRLF and
Plot Errors..
plot(1:14,abs(E1(:,1)))
hold on
plot(1:14,abs(E2(:,1)))
err = immse(abs(E1),abs(E2))

n=14;
up=0;
for i=1:n
    up(i)=abs((E11(i)-E22(i))/E11(i));

end
up
MAPE=(sum(up)/n)*100
end

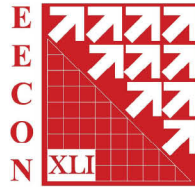
```

ภาคผนวก ข.
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่





SPU
SRIPATUM
UNIVERSITY



การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๔๑

The 41st Electrical Engineering Conference (EECON-41)

วันที่ ๒๑ - ๒๓ พฤศจิกายน ๒๕๖๑

โรงแรมสุโขทัย แกรนด์ โฮเทล แอนด์ คอนเวนชั่น เซ็นเตอร์ จังหวัดอุบลราชธานี
เจ้าภาพจัดงาน มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี และ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

Volume 1

ไฟฟ้ากำลัง
อิเล็กทรอนิกส์กำลัง
ระบบควบคุมและการวัดคุม
การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล
ไฟโตนิคส์



รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
IPW01	การวิเคราะห์ปัจจัยการป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์	1
IPW02	Review of Wind Turbine Technologies and Combined Scheme for DFIG FRT Capability	5
PW01	การประมาณการลดการใช้ไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศในอาคารสำนักงานภายในกรุงเทพมหานครและปริมณฑลโดยการปรับอุณหภูมิภายในอาคาร	11
PW02	การศึกษาผลกระทบต่อบรรยากาศและกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้าเมื่อมีระบบรถโดยสารไฟฟ้าแบบโทรลลีส้อย่าง	15
PW03	ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบหนึ่งแกนสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์	19
PW04	การศึกษาเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีแหล่งกำเนิดพลังงานแสงอาทิตย์	23
PW05	ระบบตรวจวัดและเก็บข้อมูลของระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสมผสาน ณ เกาะห้อง	27
PW06	แนวทางการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ แบบติดตั้งบนภาคพื้นดินกรณีฟ้าผ่าทางตรง	31
PW07	การประมาณรัศมีดักฟ้าผ่าสมมูลและวิเคราะห์จำนวนการเกิดฟ้าผ่าต่อปีของแท่งตัวนำล่อฟ้าแนวตั้ง	35
PW08	การวิเคราะห์ความสามารถที่สังเกตได้ในการประมาณค่าตัวแปรสถานะของระบบไฟฟ้าย่านอุตสาหกรรม ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์	39
PW09	การทดสอบหาแรงดันเบรกดาว์นของแก๊สอากาศทรงกลม - ระบาย	43
PW10	Ground Electrode Resistance Calculation Using Finite Element Method	48
PW11	ผลกระทบจากการต่อลงดินต่อแรงดันปลอกโลหะของสายเคเบิลใต้ดิน 22 กิโลโวลต์	53
PW12	การสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า กรณีศึกษามหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	57
PW13	การคำนวณหาค่าความจุของตัวเก็บประจุที่เหมาะสมสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสซึ่งเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส	61
PW14	การวิเคราะห์ผลกระทบของหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยเทคนิคการตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้า	65
PW15	ผลกระทบความผิดปกติเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมต่อก๊าซฉนวนในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า	69
PW16	การจัดสรรกำลังการผลิตไฟฟ้าอย่างประหยัดที่เหมาะสมที่สุดด้วยการปรับปรุงขั้นตอนวิธีปลาหว	73
PW17	การปรับปรุงขั้นตอนวิธีการคำนวณการไหลด้วยวิธีนิวตันราฟสันโดยพิจารณาไหลดมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงคู่	77
PW18	Application of Multi-Verse Optimizer for Optimal Placement and Size of Distributed Generation in Radial Distribution Networks	81
PW19	การวางแผนขยายสถานีไฟฟ้าในระบบจำหน่ายแบบหลายขั้นตอน	85
PW20	Optimal Power Flow Considering Price-Based Real-Time Demand Response	89
PW21	การประมาณสถานะแอลเอวีที่ไม่มีประวัติพยากรณ์สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้พีเอ็มยู	93
PW22	Impacts of Low Inertia on Frequency Stability Transmission Systems with High PV Penetration	97
PW23	การประเมินศักยภาพต้นทุนการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเชื้อเพลิง RDF-5 จากขยะผสมกากมะพร้าวและใยปาล์มในชุมชนโดยใช้เทคโนโลยีความร้อนไพโรไลซิส/แก๊สซิฟิเคชัน	101
PW24	การศึกษาผลกระทบของการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	105

การวิเคราะห์ความสามารถที่สังเกตได้ในการประมาณค่าตัวแปรสถานะของระบบไฟฟ้าย่านอุตสาหกรรม ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์

Observability Analysis in Industrial Zone Power State Estimation Based on MAPE

ศศิพร ผลไพศาลศักดิ์¹ ยุทธนา คงจีน² กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี e-mail: krischonme.b@en.rmutt.ac.th

²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

บทคัดย่อ

การทำทนายเพื่อหาความสัมพันธ์การควบคุมเวลาจริงของระบบไฟฟ้ากำลังสมัยใหม่คือการพัฒนาความเร็วและความถูกต้องของการประมาณค่าสถานะ ตามที่รู้ปัญหาการประมาณค่าสถานะของระบบไฟฟ้ากำลังจะเชื่อมโยงกับเครื่องมือวัดในโครงข่ายด้วยชุดสมการไม่เป็นเชิงเส้นเชื่อมระหว่างเฟสแรงดันไฟฟ้าของโหนดโครงข่ายและจำนวนของการวัด บทความนี้จึงนำเสนอการวิเคราะห์ความสามารถที่สังเกตได้และการหายไปของการวัดของย่านอุตสาหกรรมโดยใช้เทคนิคการประมาณค่าสถานะ การหาแรงดันไฟฟ้าที่คำนวณโดยสมการปัญหาการหาค่าน้อยที่สุดด้วยวิธีถ่วงน้ำหนักกำลังสองน้อยที่สุด การวิเคราะห์ความสามารถที่สังเกตได้จำเป็นต้องคำนวณหาด้วยเทคนิคที่เร็วและถูกต้องที่สุด การศึกษาทำให้สามารถทราบถึงข้อมูลการวัดที่ถูกต้องและค่าประมาณสถานะในเงื่อนไขเวลาจริงได้

คำสำคัญ: ความสามารถที่สังเกตได้ การประมาณค่าสถานะ ย่านอุตสาหกรรม ค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์

Abstract

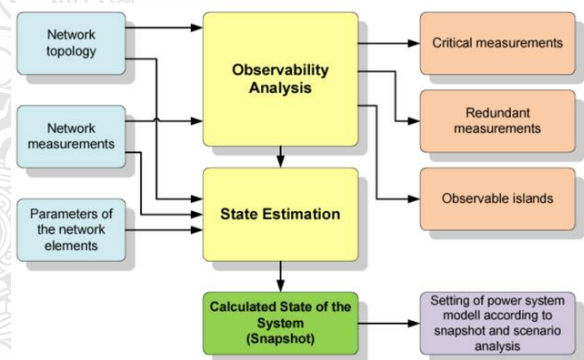
One of the challenging tasks related to the real-time control of active distribution networks is represented by the development of fast in sub-second state estimation processes. As known, the problem of SE of power networks links the measurement performed in the networks with a set of non-linear equations representing the links between the networks node voltage phasors and measured quantities. This paper presents observability analysis and measurement missing of industrial zone using state estimation technique. The calculation of these voltages is accomplished by the solution of a minimization problem by using, for instance, Weighted Least Squares method.

Keywords: Observability, state estimation, industrial zone, MAPE

1. บทนำ

การบริหารจัดการระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ (Smart grid) ในอนาคตอันใกล้นี้จะเข้ามามีบทบาทต่อการบริหารจัดการพลังงานโดยภาพรวมของระบบจำหน่าย ระบบผลิตไฟฟ้า ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ด้วยกระแสเทคโนโลยีของโลกของการสื่อสารแบบไร้พรมแดน การเฝ้าติดตามการใช้พลังงานแบบทันเวลา (Real time) ได้รับความนิยมน้อยกว่าหลายในปัจจุบัน ระบบมิเตอร์การวัดพลังงานของระบบนั้นมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการบริหารจัดการพลังงานในภาพโดยซึ่งปัญหาที่อาจเกิดขึ้นได้สำหรับระบบมิเตอร์ เช่น อ่านค่าผิดพลาด มิเตอร์ชำรุด เป็นต้น ทำให้ระบบไม่สามารถประมาณค่าการใช้พลังงานในช่วงที่มีมิเตอร์เกิดปัญหาได้ แต่ส่วนใหญ่จะนำค่าตัวประกอบโหนดของมิเตอร์ที่มีปัญหาทำการเฉลี่ย ซึ่งก็เกิดปัญหาที่เป็นภาระต่อผู้ใช้ไฟฟ้าที่ต้องยอมรับในหลักการดังกล่าวที่อาจไม่ใกล้เคียงกับความเป็นจริง หรือไม่การไฟฟ้าอาจเป็นฝ่ายเสียเปรียบในกรณีดังกล่าวได้ ทำให้ความเชื่อมั่นของระบบเครื่องมือวัดลดลง



รูปที่ 1 แผนผังความสัมพันธ์ระหว่างการวิเคราะห์ความสามารถที่สังเกตได้และการประมาณค่าสถานะ

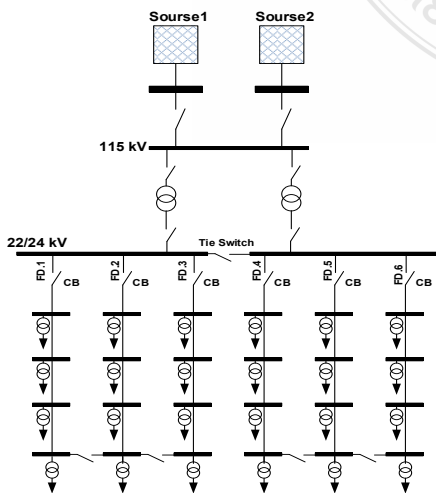
รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการวิเคราะห์ความสามารถที่สังเกตได้และการประมาณค่าสถานะของระบบไฟฟ้าเพื่อวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าที่ต้องการ ดังนั้นการวิเคราะห์ความสามารถสังเกตได้โดยการใช้เทคนิคการประมาณค่าจึงมีความสำคัญและจำเป็นต้องการบริหารจัดการการใช้พลังงานโดยภาพรวม เทคนิคการประมาณค่าสถานะมีการนำมายุคที่ใช้ในหลายด้านในปัจจุบัน และเริ่มกลับมาได้รับความนิยมนอกครั้งในการประยุกต์ใช้การประมาณค่าช่วงสภาวะทรานเซียนต์ (Transient State Estimation, TSE) [1] และงานอื่นๆ ที่เป็นในลักษณะการควบคุมแบบทันเวลา (Dynamic State Estimation, DSE) [2] และเหนือสิ่งอื่นใดคือค่าใช้จ่ายของจำนวนเครื่องมือวัดทั้งหมดในระบบ การมีมิเตอร์ที่

เหมาะสมในระบบก็เป็นอีกเงื่อนไขในทางเศรษฐศาสตร์ที่ต้องพิจารณา ในด้านภาระค่าใช้จ่ายและความเหมาะสมในจำนวน ไม่เกินเลยความเป็นจริง ซึ่งการลดจำนวนมิเตอร์ในระบบโดยการใช้นวัตกรรมหาค่าตัวแปรสถานะและเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมก็ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย [3] เป็นต้น

บทความนี้นำเสนอการหลักการประยุกต์ใช้งานเบื้องต้นและจัดเตรียมนำไปใช้ในงานภาคสนามจริง โดยได้ทำการศึกษาโดยอาศัยพื้นฐานระบบมาตรฐาน IEEE 14 บัสแทนระบบไฟฟ้าสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม และการออกแบบโดยการสุ่มติดตั้ง โดยละเว้นการพิจารณา มิเตอร์วิกฤตและมิเตอร์อ่านข้อมูลผิดพลาด (Bad Data Measurement) โดยสามารถนำเสนอหัวข้อที่เกี่ยวข้องดังนี้คือ ระบบไฟฟ้าย่านอุตสาหกรรม การประมาณค่าตัวแปรสถานะ (State Estimation, SE) การวิเคราะห์ความสังเกตได้ ผลการจำลอง และบทสรุป ตามลำดับ

2. ระบบไฟฟ้าย่านอุตสาหกรรม

ระบบไฟฟ้าสำหรับย่านอุตสาหกรรมส่วนใหญ่การนิคมอุตสาหกรรมจะมีการออกแบบระบบสายส่งเพื่อรองรับการดำเนินงานด้านอุตสาหกรรมไว้อย่างเหมาะสม ร่วมกับการไฟฟ้า ระบบเครื่องมือวัดสำหรับการวัดปริมาณการใช้พลังงานนั้นถือว่ามีค่าสำคัญอย่างยิ่งต่อการบริหารจัดการพลังงานของระบบไฟฟ้าอย่างมาก ระบบเครื่องมือวัดพลังงานของระบบไฟฟ้านั้นในแต่ละโรงงานจะมีการแยกตามประเภทผู้ใช้ไฟฟ้าและระดับแรงดันที่รับซื้อ ไฟฟ้าจากการไฟฟ้า ด้วยระบบการส่งจ่ายดังรูปในปัจจุบันได้ออกแบบมาในการใช้งานในลักษณะทางเดียวคือสามารถจ่ายไฟฟ้าได้ ในส่วนระบบแหล่งจ่ายก็อาจจะมีการจัดเตรียมแหล่งจ่ายพลังงานสองแหล่งเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้าในการจ่ายกระแสไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องไม่กระทบต่อการผลิตของโรงงานย่านอุตสาหกรรม หรืออาจจะมีการสับเปลี่ยนวงจรป้อนในกรณีฉุกเฉินแต่ในระบบมิเตอร์ไม่ได้ออกแบบสำหรับการประมาณค่าตัวแปรสถานะ



รูปที่ 2 วงจรเส้นเดียวของย่านนิคมอุตสาหกรรม

ดังนั้นในการออกแบบอาจจำเป็นต้องพัฒนาระบบมิเตอร์อัจฉริยะและต้องประสานกันให้ได้ในเรื่องของการบริหารจัดการพลังงานในภาพองค์กรรวมสามารถนำเสนอวงจรรเส้นเดี่ยวเบื้องต้น ดังรูปที่ 2

3. การประมาณค่าตัวแปรสถานะ (State estimation, SE)

วิธีการประมาณค่าตัวแปรสถานะเป็นวิธีการที่นำมาประยุกต์ใช้ในการบริหารจัดการด้านพลังงาน ด้วยข้อดีหลายอย่างในการลดจำนวนมิเตอร์ที่ติดตั้งในระบบไฟฟ้า ลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งมิเตอร์ และใช้ในการประมาณค่าในกรณีที่มีมิเตอร์ที่ติดตั้งในระบบเกิดชำรุดหรือมีข้อผิดพลาดในการอ่านข้อมูลขาดหาย ความถูกต้องในการประมาณค่าขึ้นอยู่กับจำนวนค่าที่อ่านมาได้ และรูปแบบของโครงข่าย(Network model) เป็นต้น โดยสมการของเครื่องมือวัดสามารถนำเสนอได้ดังสมการที่ (1) [2].

$$z = h(x) + \varepsilon \tag{1}$$

เมื่อ z คือเวกเตอร์เครื่องมือวัด, $h(X)$ คือ เวกเตอร์ฟังก์ชันไม่เชิงเส้นที่เกี่ยวข้องกับเวกเตอร์ตัวแปรสถานะ x , ε คือเวกเตอร์ค่าผิดพลาดของค่าการวัด วิธีการถ่วงกำลังสองน้อยที่สุด (Weighted Least Squares, WLS) เป็นวิธีการที่นิยมนำมาใช้ในการประมาณค่าตัวแปรสถานะ โดยจะเกี่ยวข้องกับค่าผลรวมค่าส่วนที่เหลือกำลังสอง (Sum of Squared Measurement Residuals) โดยค่าถ่วงน้ำหนักเกี่ยวกับค่าผิดพลาดของค่าความแปรปรวน โดยสามารถนำเสนอค่าฟังก์ชันเป้าหมายดังสมการที่ (2)

$$J(x) = \sum_{i=1}^m \frac{(z_i - h_i(x))^2}{R_{ii}} \tag{2}$$

โดยสามารถนำเสนอในรูปแบบเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$J(x) = [z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)] \tag{3}$$

เมื่อ R คือค่าเมทริกซ์ค่าถ่วงน้ำหนักในแนวทแยงมุมของค่าความแปรปรวน σ_i^2

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & & & & & \\ & \sigma_1^2 & & & & \\ & & \dots & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \sigma_m^2 \end{bmatrix} \tag{4}$$

เมื่อ m คือ จำนวนเครื่องมือวัดทั้งหมดที่ติดตั้งในระบบไฟฟ้า

ซึ่งสมการที่ (3) นั้นจำเป็นต้องคำนวณหาจำนวนค่าความเปลี่ยนแปลงนั้นเข้าสู่ค่าตอบที่กำหนดโดยเมื่อกำหนดค่าเริ่มต้น $k=1$ รอบในการคำนวณสามารถกำหนดได้ดังนี้

$$X^{k+1} = X^k + \Delta X \quad (5)$$

$$\Delta X = (H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1} (z - h(X^k)) \quad (6)$$

เมื่อ H คือเมทริกซ์ของสมการดิฟเฟอเรนเชียลบางส่วนขององค์ประกอบของเวกเตอร์ฟังก์ชันไม่เชิงเส้น h ที่เกี่ยวข้องกับเวกเตอร์ x (Jacobian matrix) ที่ถูกใช้ในการประเมินในแต่ละรอบ

$$H = \frac{\partial h(x)}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial h_1(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial h_1(x)}{\partial x_n} \\ \frac{\partial h_2(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial h_2(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial h_2(x)}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial h_m(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial h_m(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial h_m(x)}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (7)$$

4. การวิเคราะห์ความสังเกตได้

การวิเคราะห์การหาค่าตอบได้ (Observability Analysis: OA) [4, 5] ของสมการระบบนั้นจะเกี่ยวข้องกับจำนวนเครื่องมือวัดที่ติดตั้งในระบบประกอบไปด้วย เครื่องมือวัดแรงดันที่โหนด เครื่องมือวัดกำลังไฟฟ้าเข้าสู่โหนดและเครื่องมือวัดกำลังไฟฟ้าไหลในสาย ซึ่งเครื่องมือวัดแต่ละประเภทจะมีผลต่อการสร้างสมการเมทริกซ์การวัดของเครื่องมือที่ติดตั้งในระบบความสำคัญของการวิเคราะห์การหาค่าตอบได้ของสมการระบบมีความจำเป็นก่อนที่จะนำข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือวัด ที่ติดตั้งในระบบไฟฟ้าไปทำการคำนวณด้วยวิธีการประมาณค่าตัวแปรสถานะสามารถคำนวณได้สมการที่ (8)

$$\text{rank}(\mathbf{H}) = n \quad (8)$$

เมื่อ n คือ จำนวนตัวแปรสถานะ \mathbf{H} คือ เมทริกซ์การวัด โดยที่จำนวนตัวแปรสถานะเท่ากับค่าลำดับชั้น rank ซึ่งจากเงื่อนไขจะเป็นการวิเคราะห์แบบ Full observable ซึ่งวิธีการดังกล่าวให้ผลการนำข้อมูลจากการวัดมาคำนวณด้วยวิธีการประมาณค่าตัวแปรสถานะซึ่งให้ผลของการประมาณค่าตัวแปรสถานะออกมาอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

5. ค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์

ค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์ (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) เป็นวิธีการวัดความแม่นยำโดยการคำนวณเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการพยากรณ์ โดยไม่คำนึงถึงเครื่องหมายค่าที่ได้มีความแม่นยำสูง เช่น ถ้า MAPE = 4% แสดงว่าวิธีที่เลือกมีความคลาดเคลื่อนในการพยากรณ์เฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 4

$$\text{MAPE} = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{A_i - F_i}{A_i} \right|}{n} \times 100 \quad (9)$$

โดย F_i หมายถึง ค่าพยากรณ์ในงวดที่ i A_i หมายถึง ยอดที่เกิดขึ้นจริงในช่วงเวลา t และ n หมายถึง จำนวนข้อมูล

6. ผลการจำลอง

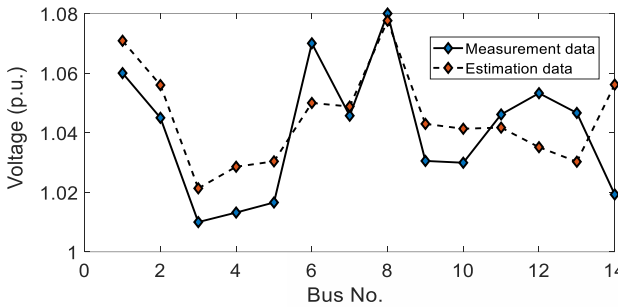
ในการการวิเคราะห์ความสามารถที่สังเกตได้และการหายไปของการวัดของย่านอุตสาหกรรมโดยใช้เทคนิคการประมาณค่าสถานะนั้นได้ทำการจำลองโดยการพิจารณาระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าเป็นแบบโครงข่ายโดยสมมุติระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในย่านอุตสาหกรรมแทนด้วยระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE14 บัส โดยเครื่องมือวัดที่ติดตั้งในระบบไฟฟ้าสามารถกำหนดชนิดเครื่องมือวัดประกอบไปด้วยเครื่องมือวัดขนาดแรงดันที่บัส ($|V|$) เครื่องมือวัดกำลังไฟฟ้าเข้าสู่บัส (P_i, Q_i) เครื่องมือวัดกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสาย (P_{ij}, Q_{ij}) ตามลำดับ ซึ่งในการทดสอบจะทำการกำหนดให้มีการบังคับติดตั้งมิเตอร์วัดขนาดแรงดันที่บัสอ้างอิงและทำการติดตั้งเครื่องมือวัดในแต่ละประเภท ในการหาค่าตัวแปรสถานะสามารถคำนวณหาค่าตัวแปรสถานะคือขนาดและมุมของแรงดันในแต่ละบัส โดยจำนวนตัวแปรสถานะสามารถคำนวณหาได้จาก $n = 2N - 1$ เมื่อ N คือจำนวนบัส ดังนั้นจำนวนตัวแปรสถานะ (n) ของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE14 บัสจะมีค่ามากกว่า 27 และรวมกับขนาดแรงดันที่บัส 1 อีก 1 ตัว ดังนั้นจึงทำการแบ่งการทดสอบออกเป็นในแต่ละกรณีสามารถนำเสนอได้ดังนี้

ตารางที่ 1 กรณีทดสอบการจำลองการติดตั้งเครื่องมือวัดในระบบไฟฟ้า

กรณี	ชนิดมิเตอร์					จำนวนมิเตอร์รวม	ค่า MAPE %
	Voltage Magnitude	Active Power injection	Reactive Power injection	Active Power Flow	Reactive Power Flow		
1	14	14	14	40	40	122	1.353
2	10	11	14	40	40	108	1.356
3	8	10	4	40	40	102	2.539
4	9	8	5	31	30	83	1.903
5	9	5	4	17	29	64	2.002
6	6	4	4	15	32	61	1.510
7	6	4	4	15	28	57	0.701
8	2	4	4	15	28	53	0.957
9	2	2	2	15	28	49	1.338
10	6	5	2	13	13	39	1.293

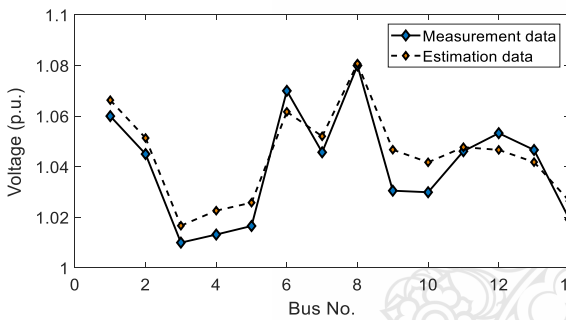
จากตารางที่ 1 ทำการจำลองทั้งหมด 10 กรณี โดยการสุ่มการติดตั้งมิเตอร์ในระบบไฟฟ้า จะพบว่า ในกรณีที่มีการติดตั้งมิเตอร์จำนวนมากนั้นก็ไม่ได้แสดงว่าค่า MAPE จะมีค่าที่ต่ำกว่า กรณีที่มีมิเตอร์จำนวนน้อยกว่านั้นแสดงให้เห็นว่า การติดตั้งมิเตอร์ในระบบที่เหมาะสมแล้วก็จะทำให้การประมาณค่าแรงดันมีความผิดพลาดน้อย จากกรณีที่ 7 ให้ค่า MAPE

ที่ต่ำที่สุดและจำนวนมิเตอร์อยู่ที่ 57 ตัว ในขณะที่กรณีที่ 8 ก็ให้ค่าใกล้เคียงกันและมีจำนวนมิเตอร์น้อยกว่า 5 ตัว



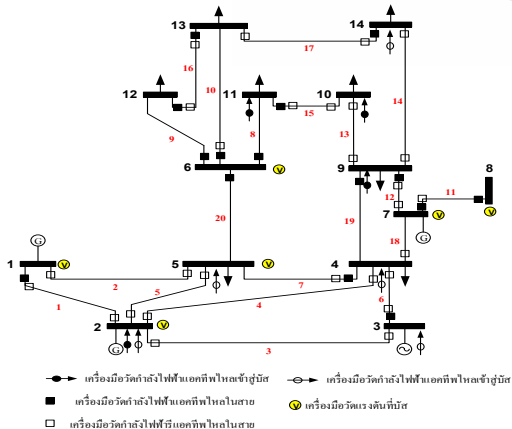
รูปที่ 3 กรณีที่ 10 เมื่อมิเตอร์ทั้งหมด 39 ตัวค่า MAPE มีค่าร้อยละ 1.2928

จากรูปที่ 3 และ 4 จะพบว่าค่าขนาดแรงดันในแต่ละบัสที่ประมาณค่าเทียบจากค่าที่ได้จากการวัด นั้นพบว่าในกรณีที่ 7 และ 10 นั้นพบว่าค่าทั้ง 2 ที่ประมาณค่าได้ไปในทางเดียวกับค่าจริงที่วัดได้ ซึ่งทั้ง 2 กรณีมีจำนวนมิเตอร์ต่างกัน และ ในการประมาณ



รูปที่ 4 กรณีที่ 7 เมื่อมิเตอร์ทั้งหมด 57 ตัวค่า MAPE มีค่าร้อยละ 0.701

ค่าแรงดันนี้ไม่ได้พิจารณามิเตอร์วิกฤตและมิเตอร์อ่านค่าผิดพลาดจากการประมาณการเบื้องต้นจากมิเตอร์ที่ติดตั้งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานจริงและต้องเพิ่มการพิจารณาความเหมาะสมในมิเตอร์แต่ละชนิดประกอบการออกแบบ โดยสามารถนำเสนอตำแหน่งการติดตั้งมิเตอร์ที่ให้ค่า MAPE ต่ำที่สุดของ กรณีที่ 7 ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ตำแหน่งการติดตั้งมิเตอร์ กรณีศึกษาที่ 7

7. บทสรุป

จากการศึกษาการวิเคราะห์ความสามารถที่สังเกตของระบบไฟฟ้าในย่านอุตสาหกรรมได้โดยใช้เทคนิคการประมาณค่าสถานะ ด้วยการวิเคราะห์การหาค่าตอบได้ของตัวแปรสถานะของสมการเครื่องมือวัดด้วยการวิเคราะห์ OA ทำการสุ่มการติดตั้งเครื่องมือวัดแต่ละประเภท เพื่อทำการประมาณค่าแรงดันในแต่ละบัส จากผลการทดสอบพบว่า ในกรณีศึกษาที่ 7 ได้ผลค่า MAPE ต่ำที่สุด ที่ 0.701 % ด้วยจำนวนมิเตอร์ติดตั้ง 57 ตัว และพบว่า จำนวนมิเตอร์นั้นจะมีผลอย่างยิ่งกับจำนวน MAPE บางครั้งค่า MAPE สูงทั้ง ๆ ที่มีจำนวนมิเตอร์มากกว่า นั้นแสดงให้เห็นว่า การติดตั้งมิเตอร์ที่เหมาะสมในระบบทำให้ได้ค่าการประมาณสถานะที่ดีได้ ในลำดับถัดไปคณะผู้วิจัยจะทำการศึกษาการติดตั้งมิเตอร์ที่เหมาะสมในแต่ละชนิด พิจารณาค่าอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อให้ได้การติดตั้งมิเตอร์ที่สมบูรณ์ และคุ่มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

- [1] I. Molina-Moreno, A. Medina, R. Cisneros-Magaña, and O. Anaya-Lara, "A Methodology for Transient State Estimation Based on Numerical Derivatives, Optimal Monitoring, and Filtered Measurements," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 33, no. 4, pp. 1527-1535, 2018.
- [2] A. Abur, "Observability and dynamic state estimation," in 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2015, pp. 1-5.
- [3] Y. Kongjeen, P. Inrawong, K. Buayai, and T. Kerdchuen, "Key Cutting Algorithm Application to Measurement Placement for Power System State Estimation," Energy Procedia, vol. 34, pp. 142-147, 2013/01/01/ 2013.
- [4] C. Rakpenthai, S. Premrudeepreechacharn, S. Uatrongjit, and N. R. Watson, "An Optimal PMU Placement Method Against Measurement Loss and Branch Outage," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 1, pp. 101-107, 2007.
- [5] A. Monticelli and F. F. Wu, "Observability Analysis for Orthogonal Transformation Based State Estimation," IEEE Power Engineering Review, vol. PER-6, no. 2, pp. 45-45, 1986.
- [6] รุ่งนภา ศรีประโล. (2557). "การลดปริมาณการขาดแคลนสินค้าโดยใช้เทคนิคการพยากรณ์: กรณีศึกษา บริษัท ไอเซิล (ประเทศไทย) จำกัด". วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์

ECTI-CON 2019

Proceedings

10 - 13 July 2019
Pattaya, Thailand

*International Conference on Electrical Engineering/Electronics,
Computer, Telecommunications and Information Technology*

**Special Session: Energy storage system management and control in smart grid**

Paper ID	Title/Author	Page
1056	Optimal Operation of Battery Energy Storage System for Mitigating Voltage Fluctuation in Microgrid Using Cuckoo Search Optimization Keerachat Tantrapon, Peerapol Jirapong, Panida Thararak	912-915
1109	Hierarchical Clustering of Electric Load: Case study in Lower South region of Thailand Phattarawat Phetsangkat, Kusumal Chalermyanont, Rakkrit Duangsoithong	916-919
1269	Observability Analysis of Instrument Missing in Industrial Zone Power System using Power System State Estimation Sasiporn Pholpaisansak, Yuttana Kongjeen, Krischonme Bhumkittipich	920-923
1275	Analysis of The 115/22 kV Transformer Fault Tripping using Fault Tree Analysis based on Python Platform Radomboon Taksana, Krischonme Bhumkittipich	924-927



Observability Analysis of Instrument Missing in Industrial Zone Power System using Power System State Estimation

Sasiporn Pholpaisansak and Yuttana Kongjeen

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Thanyaburi,
Pathumtani, Thailand
e-mail: sasiporn_p@mail.rmutt.ac.th

Krischonme Bhumkittipich*

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Thanyaburi,
Pathumtani, Thailand
e-mail: krischonme.b@en.rmutt.ac.th

Abstract— One of the challenging tasks related to the real-time control of active distribution networks is represented by the development of fast in sub-second state estimation processes. As known, the problem of state estimation of power networks links the measurement performed in the networks with a set of non-linear equations representing the links between the network node voltage phasors and measured quantities. This paper presents observability analysis and measurement missing of industrial zone using state estimation technique. The calculation of these voltages is accomplished by the solution of a minimization problem by using weighted least squares method.

Keywords— *Observability, state estimation, industrial zone, MAPE*

I. INTRODUCTION

The power system management of future smart grid is the energy management system in the power distribution system, power generation system and transmission system by using the communication technology. Real-time energy monitoring is the most widely popular way to observe the smart power grid. The energy metering system is the most important system to manage energy. The failure causes of energy metering system was the meter reading error and damaged the measurement equipment. The power metering system could not display and estimate the real value of energy consumption during the power meter had problem. This problem state could receive a wrong value of electrical measurement data or the electric authority can be reduce the reliability of electrical users from the power monitoring system.

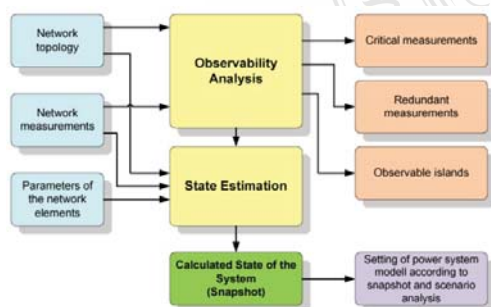


Fig.1 Schematic of relationship between observability analysis and state estimation in power system

Fig. 1 presents the relationship between the observability analysis and the state estimation of the electrical power system to analyze the desired measurement data of electrical power system. Therefore, observability analysis by using estimated method is important and necessary for managing energy management system. At present, the state estimating technique had become popular again for applying of Transient State Estimation (TSE) [1] and other work that using Dynamic State Estimation (DSE) [2]. Furthermore, the cost of metering equipment in electrical power system must be considered because of economic conditions. The reducing of metering equipment by using state estimation and optimal estimation has applied in energy management widely [3].

This paper proposes the method for applying and preparing in fieldwork by studying about standard IEEE 14 Bus test systems for industrial and designing the random installation ignored from critical measurement and bad data measurement [4]. The related proposed article consists of electrical system, state estimation (SE), observability analysis, simulated results and summary [5]. The rest of this paper is organized as follows: Section 2 presents the power system industrial zone. The state estimation technique is explained in Section 3. Section 4 proposes the proposed observability analysis. The main absolute percentage error technique is presented in Section 5. Section 6 shows the simulation results that express the comparison of measurement and simulation data on IEEE 14 Bus system. Finally, the conclusion and discussion are given in Section 7.

II. POWER SYSTEM INDUSTRIAL ZONE

Industrial power systems generally, industrial power systems had designed and arranged the transmission line and fix-point substation system for supporting industrial operations appropriately with electricity authority. The power monitoring system had measured the energy quantities using power instruments that was very important for managing energy consumption of industrial zone. The energy monitoring system of each industrial zone was divided by electrical power customers that was purchased from the electricity authority. The power distribution system as shown in Fig.2 was designed using radial system, the power system can only transmit the power to industrial zone. In large power system, it might be preparing two power sources for supplying to electrical system continuously or transfer the power supplying when the fault failure condition occurred. However, the previous power monitoring system did not design by using the intelligent state estimation.

Therefore, this paper will propose the new development of power monitoring system for controlling the energy management efficiency of the power system.

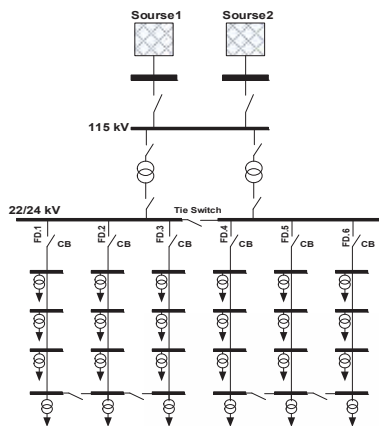


Fig.2 The one direction transmitting system of the industrial zone

III. POWER STATE ESTIMATION TECHNIQUE

State estimation technique is the method that was applied in energy management system because of many advantages such as the reducing number of power meters. This state estimation can average the electrical data when the installed meter was damaged or failure in the electrical power system. The estimation accuracy depended on data reading that obtained the electricity data and the power network model. The state estimation equation of measuring equipment purport as expressed in Equation (1) [2].

$$z = h(x) + \varepsilon \quad (1)$$

when z is vector of measuring parameters, $h(x)$ is vector of nonlinear function that related to state variable (x), ε is vector of error measured value.

The Weighted Least Squares (WLS) is a popular method for estimating state variable that related with the sum of squared measurement residuals, the weighted value depended on the error value of variation which can propose as target function in shown in Equation (2).

$$J(x) = \sum_{i=1}^m \frac{(z_i - h_i(x))^2}{R_{ii}} \quad (2)$$

or can propose in matrix form as shown in Equation (3),

$$J(x) = [z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)] \quad (3)$$

when R is matrix of the weighted value as diagonal line of variance (σ_i^2) as shown in equation (4).

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & & & \\ & \sigma_1^2 & & \\ & & \dots & \\ & & & \sigma_m^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

when m is number of measuring equipment that installed in the electrical system.

Equation (3) must calculate the values continuously until the final value had changed and approximates to define the target value. When it defined initial value $k=1$, the loop of calculation can be defined as expressed in Equation (5) and (6),

$$X^{k+1} = X^k + \Delta X \quad (5)$$

$$\Delta X = (H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1} (z - h(X^k)) \quad (6)$$

when H is a matrix of partial differential equations of nonlinear functional vector component (h) related with Jacobian matrix (x) for evaluating in each loops as shown in Equation (8).

$$H = \frac{\partial h(x)}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial h_1(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial h_1(x)}{\partial x_n} \\ \frac{\partial h_2(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial h_2(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial h_2(x)}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial h_m(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial h_m(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial h_m(x)}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (7)$$

IV. PROPOSED OBSERABILITY ANALYSIS

Observability Analysis (OA) of the system equation related with number of measuring equipment that installed in system [4-5]. It consists of node voltage measuring equipment, node power measuring and wire power flow measuring equipment. Each of measuring equipment affects to make the matrix equation of measuring equipment that installed in power system. The main purpose of analyzing of power system equation is the first thing that needs to be done before bringing measured data from instruments. The instrument was installed in power system to calculate by using state estimation that calculated in Equation (8).

$$\text{rank}(\mathbf{H}) = n \quad (8)$$

when n is number of status variables, \mathbf{H} is measuring matrix. The number of state variables must be equaled with rank value by using condition of full observable analysis. The bring results of data from the power measuring to calculate with state estimation that reached the acceptable results of state estimation.

V. MEAN ABSOLUTE PERCENTAGE ERROR

The Mean Absolute Percentage Error (MAPE) is the measuring accuracy method of the value by calculating error percentage for predicting without sign considering. The obtained values are high accuracy such as, if MAPE = 4% that means the used method has predicted error around 4 percentages. The MAPE calculation can be computed by using Equation (9).

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|A_i - F_i|}{A_i}}{n} \times 100 \quad (9)$$

when F_t is the first predicted value, A_t is raw value at time t and n is amount of data.

VI. SIMULATION RESULTS

The observability analysis of instrument missing in industrial zone power system by using the state estimation. The simulation selected the IEEE 14 bus system for explaining the proposed study. The installed measuring equipment can define types of measuring equipment consists of Voltage Magnitude Measurement ($|V|$), Power Injection Measurement (P, Q) and Power Flow Measurement (P_{ij}, Q_{ij}). The testing procedure have 2 parts: the first part is defining of instrument installation for measuring reference bus voltage and randomly installed each types of instrument. The second part is finding the number of value of state variables such as voltage magnitude and voltage angle. It calculated with $n = 2N - 1$ when N is numbers of bus. Therefore, the number of state variables (n) of the standard IEEE14 bus test system is higher than 27 and combined with the first bus voltage magnitude. The 10 testing cases is shown in Table 1.

TABLE 1 SIMULATION RESULTS OF 10 CASES IN POWER SYSTEM

Case study	Types of meter					Total meter	MAPE %
	Voltage Magnitude	Active Power injection	Reactive Power injection	Active Power Flow	Reactive Power Flow		
1	14	14	14	40	40	122	1.353
2	10	11	14	40	40	108	1.356
3	8	10	4	40	40	102	2.539
4	9	8	5	31	30	83	1.903
5	9	5	4	17	29	64	2.002
6	6	4	4	15	32	61	1.510
7	6	4	4	15	28	57	0.701
8	2	4	4	15	28	53	0.957
9	2	2	2	15	28	49	1.338
10	6	5	2	13	13	39	1.293

Table 1 shows simulation results of the 10 cases of testing power system that installed randomly of instrument in electrical system finding. The case of high numbers of instrument installation did not show that MAPE value is better than low number of instrument installation. It means the suitable number of instrument installation in power system can make the less error of estimated voltage. Case study 7 gave a minimum MAPE value and number of instrument are 57, Case study 8 has a value which closed to MAPE value of case study 7 and has number of instrument lower than case study 7 for 5 instruments.

Fig.3 and Fig. 4 show the voltage in each bus that estimated the comparing value from measuring finding. The case study 7 and case study 10 have both estimated values which are closed to real measured data even if 2 cases have different instrument number.

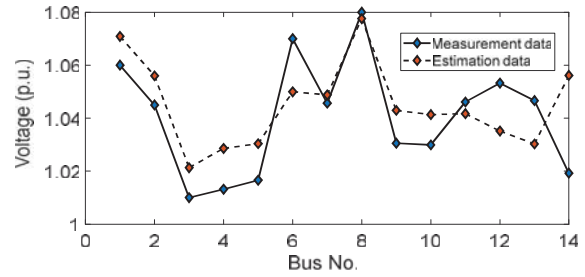


Fig. 3 Case study 10 has 39 instruments and MAPE value is 1.2928%.

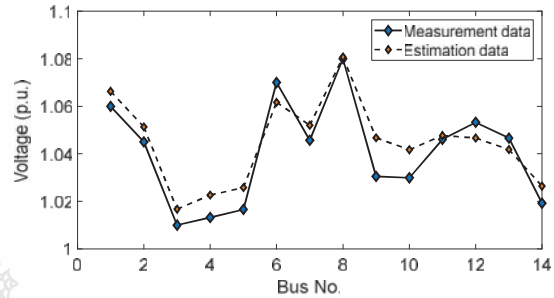


Fig.4 Case study 7 has 57 instruments and MAPE value is 0.701%.

This voltage considers the critical measurement and bad data measurement. The result of estimation from installed meter can use in actual work but must adding the considering of suitable meter type for designing efficiently. Fig. 5 shows the installed positions of meter that got a less MAPE value (case study 7).

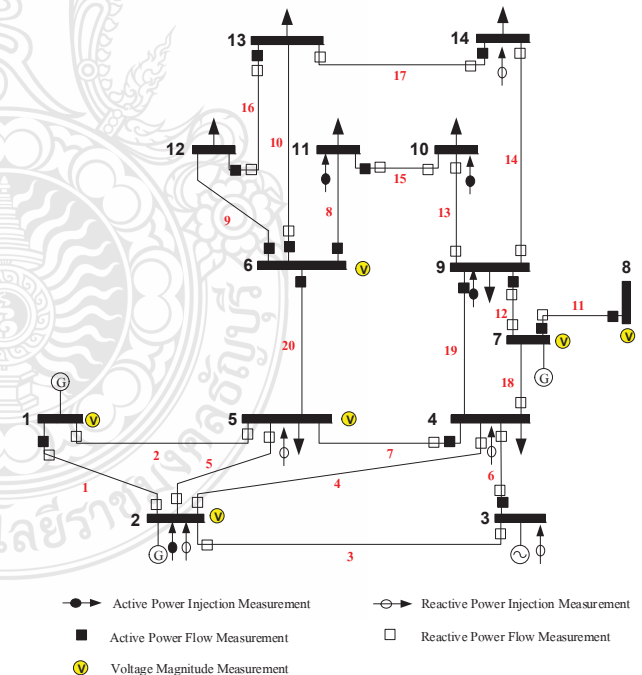


Fig.5 The installed instrument positions in case study 7

VII. CONCLUSION

The study of observability analysis of industrial zone power system by using state estimation and installed types of instruments randomly in each bus. From experimental result showed that case study 7 had lowest MAPE value is 0.701% with number of instruments is 57 realized numbers. The MAPE value was affected by number of instruments. The suitable instrument installation in power system received a good the estimated data. Therefore, this study can be verified that the state estimation technique can estimate the measurement data under the instrument missing.

REFERENCES

- [1] I. Molina-Moreno, A. Medina, R. Cisneros-Magaña, and O. Anaya-Lara, "A Methodology for Transient State Estimation Based on Numerical Derivatives, Optimal Monitoring, and Filtered Measurements," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 33, no. 4, pp. 1527-1535, 2018.
- [2] A. Abur, "Observability and dynamic state estimation," in 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2015, pp. 1-5.
- [3] Y. Kongjeen, P. Inrawong, K. Buayai, and T. Kerdchuen, "Key Cutting Algorithm Application to Measurement Placement for Power System State Estimation," *Energy Procedia*, vol. 34, pp. 142-147, 2013/01/01/ 2013.
- [4] C. Rakpenthai, S. Premrudeepreechacharn, S. Uatrongjit, and N. R. Watson, "An Optimal PMU Placement Method Against Measurement Loss and Branch Outage," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 1, pp. 101-107, 2007.
- [5] A. Monticelli and F. F. Wu, "Observability Analysis for Orthogonal Transformation Based State Estimation," *IEEE Power Engineering Review*, vol. PER-6, no. 2, pp. 45-45, 1986.



system for the future.

Sasiporn Pholpaisansak was born in Prachuap Khiri Khan, Thailand. She received the B.Tech.Ind. in Electrical Engineering from Rajamangala University of Technology Thanyaburi (RMUTT). She is currently toward M.Eng. degree in Electrical Engineering at RMUTT. Her research interests including the power system analysis, power state estimation, and power



stability and renewable energy integration system.

Yuttana Kongjeen was born in Petchaboon, Thailand. He received the B.Eng. and M.Eng. degree in Electrical Engineering from Rajamangala University of Technology Isan (RMUTI), Nakorn Ratchasima, Thailand. He received D.Eng. degree in Electrical Engineering at Rajamangala University of Technology Thanyaburi (RMUTT), Pathumthani, Thailand. His research interests including power system optimization technique, power system



Krischonme Bhumkittipich was born in Surin, Thailand. He received the B. Eng., M. Eng. and D. Eng. degree in Electrical Engineering. During 2001-2003, he received Siemens scholarship to research about multilevel converter for power system applications at ISEA, RWTH-Aachen, Germany. During 2006-2008, he became to an assistant research at Asian Institute of Technology (AIT.), Thailand.

Started in 1997, he became a young lecturer at Department of Electrical Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi (RMUTT), Thailand, Assistant Professor in 2010 after he graduated doctoral degree at Department of Electrical engineering, RMUTT. Assistant to Dean in Academic Affair of Faculty of Engineering in 2011, Director of Power System Research Center under Faculty of Engineering in 2009 where he has now advised the Master/Doctoral Student about 20 students per year, Vice Dean of Academic and Research Affair in 2014 to 2018 and Associate Professor at Department of Electrical Engineering, RMUTT in 2015. He is currently the director of Graduate School of RMUTT University, head of Modern Electric Vehicle Research Unit (MEV), and director of Power System Research Center (PSRC). He is the author of the articles and research papers more than 100 publications (including Thai and English) in various research fields including the books *Mathematical Model of Power System Analysis*, *Power System Quality and Voltage Stability and Control*. His current research interests include power system interconnection, Power System Operation and Automation, Power System Dynamic and Stability, Power Electronics Application in Power System, Power Quality and Regulation, Electric Vehicles, Charging Station integrated to Power grids, Energy Storage Systems, and Application on Railway Electrification. Dr. Bhumkittipich has held a member of IEEE, IEE, EEAAT, ECTI and IEEEJ. He is also the member of IEEE Thailand section on PES Chapter, PELS/IAS Chapter. He is the member of EENET, EMSSES and High Voltage Pulsed Plasmas for Agriculture Applications.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - สกุล	นางสาวศศิพร ผลไพศาลศักดิ์
วัน เดือน ปีเกิด	7 มิถุนายน 2537
ที่อยู่	139/2 หมู่ 1 ตำบลอ่าวน้อย อำเภอเมือง จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 77210
การศึกษา	ปริญญาตรี คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์ทำงาน	ครูฝึกในสถานประกอบการบริษัท สมาร์ท (2015) เซอร์วิสเซส จำกัด จังหวัด กรุงเทพมหานคร ครูพิเศษสอน วิทยาลัยเทคนิคสระบุรี จังหวัด สระบุรี
เบอร์โทรศัพท์	098-8651828
อีเมล	sasiporn_p@mail.mutt.ac.th

