

# การหาตำแหน่งติดตั้งหน่วยวัดเฟสเซอร์ในระบบไฟฟ้ากำลังที่ทำให้ใช้จำนวนหน่วยวัดเฟสเซอร์น้อยที่สุด ด้วยวิธีการค้นหาแบบนกกาเหว่า

## Minimum Phasor Measurement Units (PMUs) Placement in Power Systems Using Cuckoo Search Algorithm

สุทธิคุณ วิเขตกิจ พิสุทธิ รพีศักดิ์ และ ดุลย์พิเชษฐ์ ฤกษ์ปรีดาพงศ์  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
Email: suthikun\_w@hotmail.com, pisut.r@ku.th, dulpichet.r@ku.th

### บทคัดย่อ

หน่วยวัดเฟสเซอร์ (PMU) เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดที่มีความสำคัญในการเฝ้าสังเกตค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า เนื่องจากสามารถตรวจวัดค่าได้แบบเวลาจริง (real-time) จึงทำให้เกิดประเด็นสำคัญที่ควรนำมาพิจารณาคือ หากต้องการทราบค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของทุกบัสในระบบ จะต้องพิจารณาวางหน่วยวัดเฟสเซอร์ที่ตำแหน่งใด ดังนั้นบทความนี้จึงนำเสนอวิธีการค้นหาแบบนกกาเหว่า (Cuckoo Search Algorithm, CSA) เพื่อค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในการวางหน่วยวัดเฟสเซอร์ และนำตำแหน่งที่ได้มาพิจารณาความสามารถในการสังเกตค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของทุกบัสในระบบ โดยทำการศึกษาและทดสอบกับระบบ IEEE 14-bus, 30-bus, 57-bus และ 118-bus ซึ่งผลที่ได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบในด้านจำนวนหน่วยวัดเฟสเซอร์ที่ถูกใช้ติดตั้ง ด้านเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งในการวางหน่วยวัดเฟสเซอร์ และขั้นตอนในการกำหนดค่าตัวแปรเริ่มต้นสำหรับการหาตำแหน่งดังกล่าว ร่วมกับวิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA) และวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization, PSO) ซึ่งพบว่าวิธีการค้นหาแบบนกกาเหว่าจะใช้จำนวนหน่วยวัดเฟสเซอร์ที่ถูกติดตั้ง และใช้เวลาในการคำนวณหาตำแหน่งในการวางหน่วยวัดเฟสเซอร์ที่น้อยกว่า รวมทั้งมีขั้นตอนในการกำหนดค่าตัวแปรเริ่มต้นที่ง่ายกว่าวิธีการทั้งสอง

### คำสำคัญ:

หน่วยวัดเฟสเซอร์ การวางหน่วยวัดเฟสเซอร์ ความสามารถในการสังเกตได้ของระบบ วิธีการค้นหาแบบนกกาเหว่า

### Abstract

Phasor measurement unit (PMU) is an important component in real-time monitoring of electrical power parameters. PMU placement is an issue in any power system network since the network observability is required. This paper proposes an optimal method for minimal PMU

placement. In the method, a power network observability check algorithm is implemented, and the cuckoo search algorithm (CSA) is applied to compute for the optimal placement solution. The IEEE 14-bus, 30-bus, 57-bus, and 118-bus test system are used as the test network. The result from the proposed method are compared to other minimal PMU placement methods using genetic algorithm (GA) and particle swarm optimization (PSO) as search algorithms. The proposed method provides the optimal results in all test systems, but other methods give sub-optimal results in some test systems. Moreover, the proposed method has lower computation time and the initial values are easier to set compared to PSO and GA.

### Keywords:

phasor measurement units, phasor measurement unit placement, observability, cuckoo search algorithm (CSA)

## 1. คำนำ

ความต้องการด้านพลังงานไฟฟ้ามีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นทั้งในภาคอุตสาหกรรม และภาคครัวเรือน ส่งผลให้มีการเพิ่ม และปรับปรุงระบบการผลิตไฟฟ้า (Generation System), ระบบสายส่งไฟฟ้า (Transmission Line System) และระบบจำหน่ายไฟฟ้า (Distribution Line System) ให้สามารถรองรับความต้องการด้านพลังงานไฟฟ้า ประกอบกับในปัจจุบันมีผู้ผลิตไฟฟ้าหลายรายที่ติดตั้งระบบ Distributed Generation (DG) เพื่อขายไฟเข้ากับระบบสายส่งไฟฟ้า และระบบจำหน่ายไฟฟ้า ส่งผลให้การบริหารจัดการด้านพลังงานมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ดังนั้นในการควบคุม และจัดการดูแลคุณภาพไฟฟ้าของทั้งระบบจำเป็นต้องอาศัยอุปกรณ์เครื่องวัดที่สามารถตรวจวัดค่าได้แบบเวลาจริง (Real-time) หน่วยวัดเฟสเซอร์ (Phasor Measurement Unit หรือ PMU) ซึ่งเป็นเครื่องวัดคลื่นแรงดันและกระแส โดยติดตั้งที่บัสต่างๆ ในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบผลิต

และส่งไฟฟ้ากำลัง หน่วยวัดเฟสเซอร์ใช้สัญญาณนาฬิกาจากดาวเทียมในระบบบอกตำแหน่งบนพื้นผิวโลก (Global Positioning Systems หรือ GPS) ในการปรับเทียบเวลา (Time Synchronization) เพื่อให้หน่วยวัดเฟสเซอร์บันทึกคลื่นแรงดันและกระแสที่เวลาเดียวกัน ซึ่งจำเป็นอย่างมากในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า (Load Flow Analysis) การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ (Stability Analysis) และการวิเคราะห์พิจารณาเพื่อฟื้นฟูระบบให้กลับคืนสู่สภาพปกติ เป็นต้น

การติดตั้งหน่วยวัดเฟสเซอร์ในระบบไฟฟ้ากำลังจำเป็นต้องติดตั้งในตำแหน่งที่ทำให้ระบบสามารถสังเกตได้ (Observable) นั่นคือสามารถทราบค่าคลื่นแรงดันและกระแสของทุกบัส โดยค่าแรงดันและกระแสของบัสที่ไม่ได้ติดตั้งหน่วยวัดเฟสเซอร์สามารถคำนวณจากบัสที่ทราบค่าแรงดันและกระแสตามกฎของเคอร์ชอร์ฟ ในบทความนี้พิจารณาวิธีการค้นหาตำแหน่งการติดตั้งที่ทำให้ใช้จำนวนหน่วยเฟสเซอร์น้อยที่สุด จากการ

ตรวจเอกสาร ได้มีการเอนำอัลกอริทึมค้นหา (Search Algorithms) ต่างๆ มาประยุกต์ใช้ในการค้นหาตำแหน่งติดตั้งที่ทำให้ใช้จำนวนหน่วยเฟสเซอร์น้อยที่สุด เช่น งานวิจัย [1], [2] ได้นำเสนอด้วยวิธีการหาแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization หรือ PSO) และวิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm หรือ GA) ตามลำดับ ทั้งสองวิธีเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการค้นหาตำแหน่งติดตั้งที่ทำให้ใช้จำนวนหน่วยเฟสเซอร์น้อยที่สุด แต่จะมีความยุ่งยากซับซ้อนในการกำหนดค่าของตัวแปรเบื้องต้นเพื่อให้การค้นหาเข้าสู่ค่าที่ดีที่สุด ดังนั้นในบทความนี้จึงนำเสนอวิธีการค้นหาแบบนกกาเหว่า (Cuckoo Search Algorithm หรือ CSA) [8] ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ และการกำหนดค่าของตัวแปรเบื้องต้นก็เพื่อให้การค้นหาเข้าสู่ค่าที่ดีที่สุดทำได้ง่าย นอกจากนี้ยังเปรียบเทียบวิธีค้นหาแบบนกกาเหว่ากับวิธีการหาแบบกลุ่มอนุภาคและวิธีการเชิงพันธุกรรมในด้านจำนวน PMU ที่ถูกติดตั้ง เวลาที่ใช้ในการคำนวณ และจำนวนรอบที่ใช้ในการค้นหาค่าตอบ

## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 หน่วยวัดเฟสเซอร์ (PMU)

หน่วยวัดเฟสเซอร์เป็นอุปกรณ์เครื่องวัดชนิดหนึ่งที่ถูกติดตั้งที่บัสหรือที่สถานีไฟฟ้า เพื่อวัดค่าคลื่นแรงดัน และกระแส ซึ่งสามารถตรวจวัดค่าได้แบบเวลาจริง (Real-time) โดยการใช้สัญญาณนาฬิกาจากดาวเทียมในระบบบอกตำแหน่งบนพื้นผิวโลก (Global Positioning Systems หรือ GPS) ในการปรับเทียบเวลา (Time Synchronization) เพื่อให้การวัดและบันทึกค่าคลื่นแรงดันและกระแสที่เวลาเดียวกัน และเมื่อถูกนำไปใช้ในระบบเฝ้าระวังแบบพื้นที่กว้าง (Wide

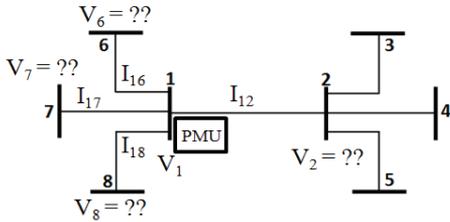
Area Monitoring หรือ WAMS) จะเป็นประโยชน์ต่อการเฝ้าติดตามการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน รวมถึงการเปลี่ยนแปลงความถี่ เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจของเจ้าหน้าที่ในการควบคุมและวางแผนปฏิบัติงานในระบบไฟฟ้ากำลังให้รัดกุมยิ่งขึ้น ทั้งนี้ข้อมูลที่ได้ยังสามารถนำไปใช้ในการออกแบบและปรับปรุงระบบสายส่งไฟฟ้ากำลัง รวมทั้งการกำหนดค่าของอุปกรณ์ป้องกันภายในระบบ ซึ่งเหมาะกับระบบที่มีความซับซ้อน เช่น ระบบที่มี Distributed Generation (DG) และระบบ Smart Grid ในอนาคต เป็นต้น

### 2.2 การวิเคราะห์ความสามารถในการสังเกตได้ของระบบ (Observability Analysis, OA)

เป็นการวิเคราะห์ความสามารถในการสังเกตค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าภายในระบบ กล่าวคือระบบที่มีความเป็น Observability หมายถึงระบบใดๆ เมื่อติดตั้ง PMU แล้ว จำนวนและตำแหน่งของ PMU มีความเหมาะสมเพียงพอต่อการสังเกตค่าพารามิเตอร์ของทั้งระบบได้ แต่ในทางตรงกันข้ามหากไม่สามารถสังเกตค่าพารามิเตอร์ค่าใดค่าหนึ่งได้ จะหมายความว่าระบบดังกล่าวไม่มีความสามารถในการสังเกตได้ เนื่องจากจำนวนและตำแหน่ง PMU ไม่เหมาะสมเพียงพอต่อการสังเกตค่าพารามิเตอร์ของทั้งระบบได้ ซึ่งขั้นตอนการวิเคราะห์ความสามารถในการสังเกตได้ของระบบจะใช้กฎของโอห์ม (Ohm's Law) และกฎของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Law) เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ โดยสามารถอธิบายขั้นตอนผ่านกฎทั้ง 5 ข้อ ดังต่อไปนี้ [1]

กฎข้อที่ 1 หากทราบค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัสใดบัสหนึ่ง และยังทราบค่ากระแสไฟฟ้าจากสายส่งที่เชื่อมโยงกับบัสนั้น จะทำให้สามารถคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้า

ของอีกบัสที่เชื่อมโยงกับบัสดังกล่าวได้ (เนื่องจากค่า impedance ของสายส่งเป็นค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ทราบ)



ภาพที่ 1 แสดงตัวอย่างค่าเริ่มต้นที่สังเกตได้เมื่อติดตั้ง PMU

จากภาพที่ 1 แสดงให้เห็นว่าเมื่อติดตั้ง PMU บนบัสที่ 1 แล้ว จะทำให้สังเกตค่าเริ่มต้นได้ ดังต่อไปนี้

1) ทราบค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 1 ( $V_1$ )

2) ทราบค่ากระแสไฟฟ้าของสายส่งที่เชื่อมโยงกับบัสที่ 1 คือ  $I_{12}$  และ  $I_{16}$ ,  $I_{17}$  และ  $I_{18}$  ดังนั้นเมื่อวิเคราะห์ผ่านกฎของโอมท์ (Ohm's Law) และกฎของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Law) จะทำให้สามารถทราบค่าต่างๆ เพิ่มเติมได้จากกฎที่ 1 ดังนี้

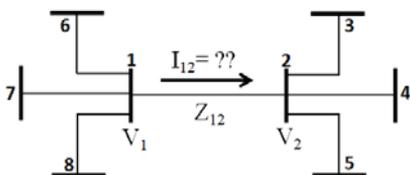
$$V_2 = V_1 - I_{12}Z_{12} \quad (1)$$

$$V_6 = V_1 - I_{16}Z_{16} \quad (2)$$

$$V_7 = V_1 - I_{17}Z_{17} \quad (3)$$

$$V_8 = V_1 - I_{18}Z_{18} \quad (4)$$

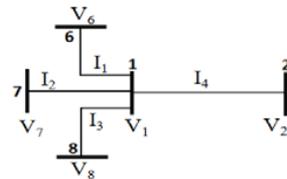
กฎข้อที่ 2 หากทราบค่าแรงดันไฟฟ้าของบัสทั้งสองที่เชื่อมต่อกันแล้ว จะทำให้สามารถคำนวณหากระแสของสายส่งที่เชื่อมโยงระหว่างบัสทั้งสองนั้นได้



$$I_{12} = \frac{V_2 - V_1}{Z_{12}} \quad (5)$$

ในกรณีที่ระบบมีบัส zero-injection โดย zero-injection คือ บัสที่ไม่มีมีการเชื่อมต่อทั้งกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้า และโหลดไฟฟ้า ซึ่งสามารถอธิบายการวิเคราะห์ได้จากกฎข้อที่ 3, 4, และ 5 ได้ดังนี้

กฎข้อที่ 3 หากทราบค่าทุกค่าของกระแสที่ไหลผ่านบัส zero-injection แล้ว ผลรวมของกระแสทั้งหมดที่ไหลผ่านบัสดังกล่าวจะมีค่าเท่ากับศูนย์จากกฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (กำหนดบัสที่ 1 เป็น Zero-injection bus)



$$I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 0 \quad (6)$$

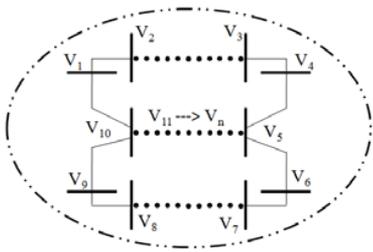
กฎข้อที่ 4 หากทราบค่าแรงดันไฟฟ้าของบัสทุกบัสที่เชื่อมต่อกับบัส zero-injection แล้วจะทำให้สามารถคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัส zero-injection ได้ (กำหนดบัสที่ 1 และ 2 เป็นบัส Zero-injection)

$$\frac{V_1 - V_6}{Z_{16}} + \frac{V_1 - V_7}{Z_{17}} + \frac{V_1 - V_8}{Z_{18}} + \frac{V_1 - V_2}{Z_{12}} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{V_2 - V_3}{Z_{23}} + \frac{V_2 - V_4}{Z_{24}} + \frac{V_2 - V_5}{Z_{25}} + \frac{V_2 - V_1}{Z_{21}} = 0 \quad (8)$$

จากสมการ (7) และ (8) จะเห็นได้ว่าเมื่อเราทราบค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัส 3, 4, 5, 6, 7, และ 8 แล้ว จะสามารถคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 และ 2 ได้ โดยการแก้สมการ 2 ตัวแปร

กฎข้อที่ 5 หากทราบค่าแรงดันไฟฟ้าของบัสทุกบัสที่เชื่อมต่อกับกลุ่มของบัส zero-injection แล้ว จะสามารถคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าของกลุ่มบัส zero-injection ได้ทั้งหมด



$$\sum_{j=1}^N Y_{ij} V_j = 0 \text{ for } i=1, \dots, k \quad (9)$$

เมื่อ  $K$  คือจำนวนบัสในกลุ่มบัส zero-injection

### 2.3 การค้นหาแบบนกกาเหว่า (Cuckoo Search Algorithm, CSA)

วิธีการค้นหาแบบนกกาเหว่า (Cuckoo Search Algorithm, CSA) เป็นวิธีการหนึ่งที่ถูกนำมาใช้เพื่อแก้ปัญหาในการหาค่าที่เหมาะสม [6], [7], [8] โดยได้แรงบันดาลใจจากพฤติกรรมวางไข่ของนกกาเหว่าที่จะไม่ยอมสร้างรัง และฟักไข่ของมันเอง โดยจะแอบวางไข่ของมันเองไว้ในรังของนกสายพันธุ์อื่นๆ ซึ่งในที่นี้เราจะเรียกนกเจ้าของรัง (Host Birds) โดยที่บางครั้งอาจถูกนกเจ้าของรังค้นพบแล้วถูกโยนทิ้ง หรือบางครั้งนกเจ้าของรังเองก็จะทิ้งรังนั้นไว้ แล้วไปสร้างรังใหม่ที่อื่นแทน ซึ่งโดยทั่วไปไข่ของนกกาเหว่าจะมีระยะเวลาในการฟักน้อยกว่าไข่ของนกเจ้าของรังเล็กน้อย

นกกาเหว่าจะสุ่มค้นหารังที่เหมาะสมในการวางไข่ (คำตอบของปัญหา) และไข่ของนกกาเหว่าที่มีคุณภาพ (ค่าใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุด) จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับไข่ของนกเจ้าของรัง ซึ่งส่งผลให้เพิ่มโอกาสรอดพ้นจากการค้นพบของนกเจ้าของรัง ทำให้มีโอกาสเติบโตเป็นนกกาเหว่ารุ่นถัดไปได้ ส่วนไข่ที่ไม่มีคุณภาพ (มีค่าห่างไกลจากคำตอบที่ดีที่สุด) จะถูกค้นพบโดยนกเจ้าของรัง ด้วยความน่าจะเป็น  $P_a$  มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยอาจถูกโยนทิ้ง หรือนกเจ้าของรังจะทิ้งรังเดิมแล้วไปสร้างรังใหม่ที่อื่น การกระจายประชากรเริ่มต้นของรัง ( $X_i^1$ ) จะถูกสร้างขึ้นโดยการสุ่ม

เริ่มต้น และจะสุ่มผ่านวิธี CSA ที่มีหลักการเคลื่อนที่แบบ Lévy Flights ซึ่งเป็นพฤติกรรมการบินของสัตว์หลายชนิด ในการสุ่มเลือกตำแหน่งรังถัดไป ( $X_i^{(t+1)}$ ) จนกระทั่งได้ประชากรที่เป็นคำตอบ สามารถแทนได้ด้วยสมการ (10) และ (11)

$$x_i^{(t+1)} = x_i^t + \alpha \oplus \text{Lévy}(\lambda) \quad (10)$$

$$\text{Lévy}(\lambda) = \left[ \frac{\Gamma(1+\lambda) \cdot \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{1+\lambda}{2}\right) \cdot \lambda \cdot 2^{\left(\frac{\lambda-1}{2}\right)}} \right]^{1/\lambda} \quad (11)$$

เมื่อ  $\lambda$  คือ ค่าคงที่ มีค่าอยู่ในช่วง 1 ถึง 2

$\alpha$  คือ ช่วงการสุ่ม (Step Size) ที่สัมพันธ์

กับมาตราส่วนของปัญหาที่สนใจ

ส่วนใหญ่จะใช้ค่า = 1

$\Gamma$  คือ ฟังก์ชันแกมมาที่เป็นส่วนขยายของ

ฟังก์ชันแฟกทอเรียลบนจำนวนเชิงซ้อน

จากหลักการข้างต้น วิธีการค้นหาแบบนกกาเหว่า

มีขั้นตอนในค้นหาคำตอบแสดงในภาพที่ 2 และมีรายละเอียด ดังนี้

1) กำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของวิธี CSA โดยค่าที่ต้องกำหนด คือ จำนวนสมาชิกในรังเริ่มต้น (ชุดตำแหน่งที่สุ่มติดตั้ง ( $n$ ), ช่วงการสุ่ม ( $\alpha$ ), ความน่าจะเป็นของรังที่ถูกค้นพบโดยนกเจ้าของรัง ( $P_a$ ) และจำนวนรอบที่ต้องหยุดค้นหา (MaxGen)

2) สุ่มค่าสมาชิกของรังเริ่มต้น (ตำแหน่ง) และประเมินคุณภาพของรังตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์และเก็บค่ารังไว้

3) สุ่มค่ารังใหม่จากสูตรการเคลื่อนที่แบบ Lévy Flights จากนั้นประเมินคุณภาพของรังใหม่ตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์

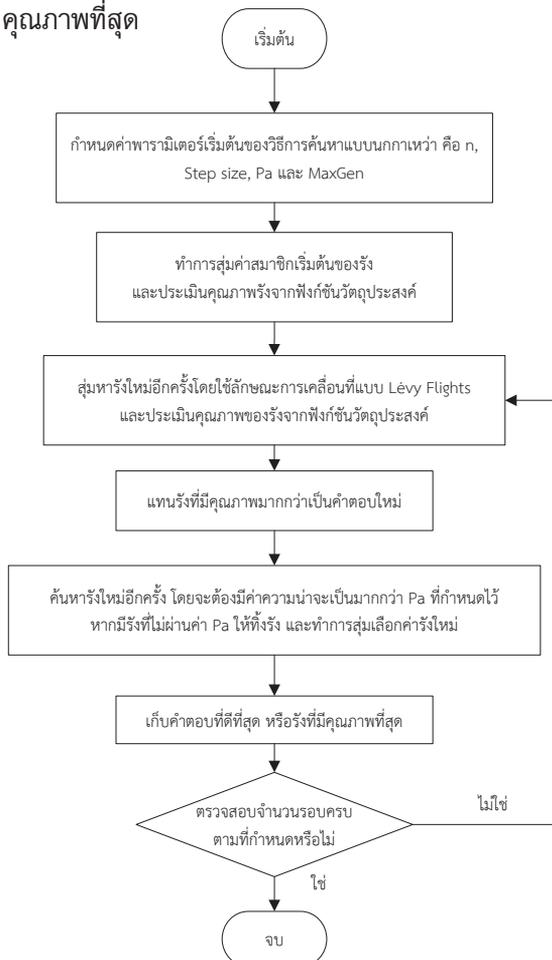
4) นำค่าจากข้อ 2) และ 3) มาเปรียบเทียบ ถ้าวิ่ง (ตำแหน่ง) จากการสุ่มใหม่มีไข่ที่มีคุณภาพมากกว่า ไข่จากรั้งเดิม ให้แทนที่เป็นคำตอบใหม่

5) ค้นหารั้งใหม่อีกครั้ง โดยให้การค้นพบ รั้งใหม่นั้นจะต้องมีความน่าจะเป็นมากกว่า  $P_a$  ที่กำหนดไว้สำหรับรั้งที่ไม่มีคุณภาพ หรือไม่ผ่านค่า  $P_a$  ให้ละทิ้ง และสุ่มเลือกคำรังใหม่

6) เก็บคำตอบที่ดีที่สุด หรือรั้งที่มีคุณภาพที่สุด

7) ตรวจสอบจำนวนรอบว่าครบตามจำนวน รอบที่ต้องหยุดค้นหา (MaxGen) หรือไม่ ถ้าใช่ให้ทำ ขั้นตอนต่อไป แต่ถ้าไม่ใช่ให้กลับไปทำตามขั้นตอน 3)

8) ผลลัพธ์สุดท้ายจะได้ตำแหน่งรั้งที่ให้ไข่ที่มีคุณภาพที่สุด



ภาพที่ 2 แผนผังขั้นตอนของวิธี CSA

### 3. วิธีการ

บทความนี้จะหาค้นหาตำแหน่งที่จำเป็นในติดตั้ง หน่วยวัดเฟสเซอร์ ซึ่งส่งผลให้ระบบมีความสามารถในการสังเกตได้ (Observability) นั่นคือสามารถทราบ ค่าคลื่นแรงดันและกระแสของทุบัสได้ โดยการใช้ โปรแกรม MATLAB ช่วยในการคำนวณ ผ่านวิธีการ ค้นหาแบบนกกาเหว่า (Cuckoo Search Algorithm, CSA) ทั้งนี้จะทดสอบกับระบบ IEEE Bus System ทั้ง 4 แบบ โดยสามารถอธิบายขั้นตอนได้ ดังต่อไปนี้

#### 3.1 วิธีการค้นหาตำแหน่งติดตั้ง PMU

1) กำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของวิธีการ CSA และกำหนดจำนวนรอบที่ใช้ในการค้นหา

2) สุ่มจำนวนและตำแหน่งติดตั้ง PMU ตามวิธีการ CSA และประเมินคุณภาพของคำตอบที่ได้ ตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (f)

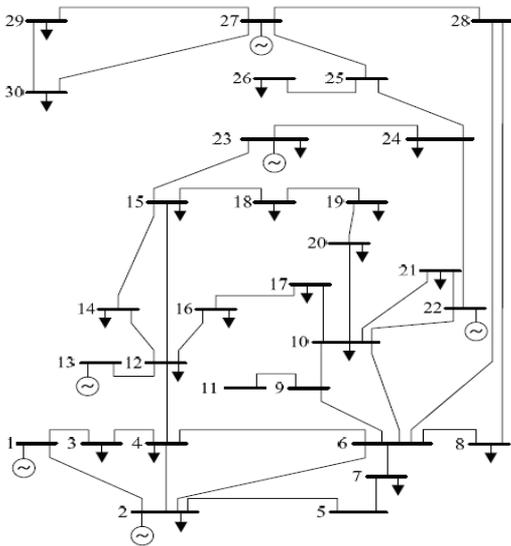
3) เก็บคำตอบที่ดีที่สุด หรือคำตอบที่ทำให้ได้ ค่า f ที่น้อยที่สุด ( $f_{min}$ )

4) ตรวจสอบจำนวนรอบว่าครบตามกำหนด จำนวนรอบที่ใช้ในการค้นหาหรือไม่ ถ้าใช่ให้ทำขั้นตอนต่อไป แต่ถ้าไม่ใช่ให้กลับไปทำตามขั้นตอน 2

5) เก็บคำตอบที่ดีที่สุด คือ จำนวนและตำแหน่งที่ใช้ในการติดตั้ง PMU เวลา และจำนวนรอบที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นๆ ที่แตกต่างกัน

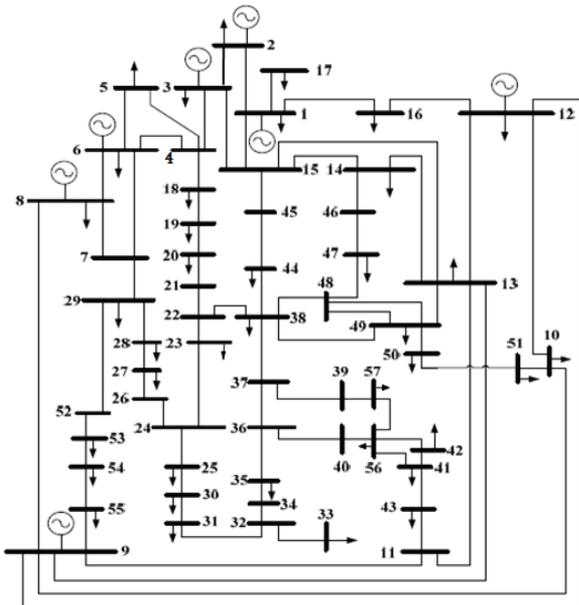


ข. ระบบศึกษาที่ 2 (30 bus)



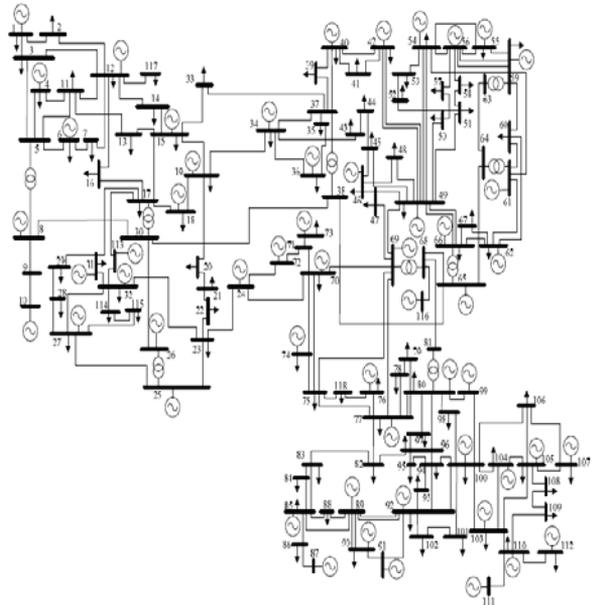
ภาพที่ 5 แสดงรูปแบบการเชื่อมโยงของระบบ IEEE 30 bus System

ค. ระบบศึกษาที่ 3 (57 bus)



ภาพที่ 6 แสดงรูปแบบการเชื่อมโยงของระบบ IEEE 57 bus System

ง. ระบบศึกษาที่ 4 (118 bus)



ภาพที่ 7 แสดงรูปแบบการเชื่อมโยงของระบบ IEEE 118 bus System

5. ผลการศึกษา

ผลการศึกษาในบทความนี้ได้มาจากการวิเคราะห์และค้นหาคำตอบด้วยวิธีการ CSA (Cuckoo Search Algorithms) และอัลกอริทึมค้นหา (Search Algorithms) อื่นๆ ที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายอีก 3 วิธีการ ซึ่งมีขั้นตอนและวิธีการในการวิเคราะห์และค้นหาคำตอบที่แตกต่างกันออกไป โดยอัลกอริทึมค้นหาอีก 3 วิธีการ ประกอบไปด้วย วิธีการ BFM (Brute Force Method) ซึ่งเป็นวิธีการขั้นพื้นฐาน เนื่องจากมีขั้นตอนและวิธีการที่ง่าย และสามารถนำไปใช้เป็นตัวเปรียบเทียบพื้นฐานร่วมกับอัลกอริทึมค้นหาวิธีการอื่นๆ วิธีการ GA (Genetic Algorithm) เป็นวิธีการที่อาศัยทฤษฎีการวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต คือ ผู้ที่แข็งแกร่งกว่าย่อมมีโอกาสที่จะอยู่รอด และสามารถถ่ายทอดคุณลักษณะเด่นที่มีไปยังรุ่นถัดไป และวิธีการสุดท้าย คือ วิธีการ

PSO (Particle Swarm Optimization) ซึ่งมีแนวคิดมาจากการสังเกตพฤติกรรมการเคลื่อนไหวของฝูงนกที่มีลักษณะการเคลื่อนที่ที่สอดคล้องกันในช่วงเวลาที่บินอพยพ หรือบินออกหาอาหาร

เนื่องจากบทความนี้จะเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบของอัลกอริทึมค้นหาทั้ง 4 วิธีการ (BFM, GA, PSO และ CSA) ดังนั้นจึงใช้จำนวนครั้งในการวิเคราะห์และค้นหาคำตอบที่เท่ากัน คือ 30 ครั้ง และเลือกคำตอบที่ดีที่สุด เพื่อนำมาเปรียบเทียบในด้านจำนวน PMU ที่น้อยที่สุดที่ถูกติดตั้ง เวลาและจำนวนรอบที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ ที่ทำให้ระบบมีความสามารถในการสังเกตได้ (Observability) โดยผลการศึกษาและเปรียบเทียบสามารถแสดงได้จากตารางที่ 2 – 4 โดยมีรายละเอียด ดังนี้

ตารางที่ 2 แสดงผลการค้นหาจำนวนที่น้อยที่สุดและตำแหน่งในการติดตั้ง PMU ด้วยวิธีการ CSA ของแต่ละกรณีศึกษา โดย N คือ จำนวนบัสทั้งหมด  $n_{min}$  คือจำนวน PMU ที่น้อยที่สุดที่ใช้ในการติดตั้ง

ตารางที่ 3 แสดงผลการเปรียบเทียบจำนวน PMU ที่น้อยที่สุดที่ได้จากการค้นหาด้วยวิธีการที่ต่างกัน

ตารางที่ 4 แสดงผลการเปรียบเทียบเวลาและจำนวนรอบที่ใช้ในการค้นหาจำนวนที่น้อยที่สุดและตำแหน่งในการติดตั้ง PMU ที่เหมาะสมที่สุดจากวิธีการอื่นๆ โดยบทความนี้ใช้คอมพิวเตอร์ (Intel(R) Core (TM)) i5 CPU M460 @ 2.53 GHz, Ram 4.00 GB สำหรับการวิเคราะห์และค้นหาคำตอบ

**ตารางที่ 2** แสดงผลการค้นหาจำนวนที่น้อยที่สุดและตำแหน่งในการติดตั้ง PMU ด้วยวิธีการ CSA ของแต่ละกรณีศึกษา

ระบบศึกษาที่	จำนวนบัส (N)	$n_{min}$	ตำแหน่งบัสที่ติดตั้ง PMU
1	14	3	2, 6, 9
2	30	6	1, 10, 12, 18, 23, 27
3	57	11	1, 4, 13, 19, 25, 29, 32, 38, 51, 54, 56
4	118	29	2, 9, 11, 12, 17, 20, 23, 29, 36, 40, 43, 46, 51, 52, 57, 59, 67, 71, 75, 77, 80, 85, 86, 91, 94, 101, 105, 110, 115

**ตารางที่ 3** แสดงผลการเปรียบเทียบจำนวน PMU ที่น้อยที่สุดที่ได้จากการค้นหาด้วยวิธีการที่ต่างกัน

วิธีการ	14 Bus	30 Bus	57 Bus	118 Bus
BFM	3	6	หน่วยความจำไม่เพียงพอ	
GA	3	6	12	30
PSO	3	6	11	30
CSA	3	6	11	29

**ตารางที่ 4** แสดงผลการเปรียบเทียบเวลา และจำนวนรอบที่ใช้ในการค้นหาจำนวน PMU ที่เหมาะสมที่สุดจากวิธีการอื่นๆ โดยพิจารณาตามแต่ละระบบศึกษา ดังนี้

**ตารางที่ 4.1** การเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการคำนวณ

วิธีการ	เวลาที่ใช้คำนวณ (วินาที)			
	14 Bus	30 Bus	57 Bus	118 Bus
BFM	0.075	116.673	-	-
GA	1.006	2.124	185.057	330.720
PSO	1.730	8.566	1449.11	3,162.120
CSA	0.554	5.245	264.622	1,696.270

**ตารางที่ 4.2** การเปรียบเทียบจำนวนรอบที่ใช้ในการคำนวณ

วิธีการ	จำนวนรอบในการคำนวณ			
	14 Bus	30 Bus	57 Bus	118 Bus
BFM	469	764,968	-	-
GA	12	45	1,510	2,654
PSO	6	350	2,000	8,425
CSA	15	107	1,180	6,729

## 6. วิเคราะห์ผล

การวิเคราะห์ผลบทความนี้ให้ความสำคัญกับจำนวนที่น้อยที่สุดในการติดตั้งหน่วยวัดเฟสเซอร์ที่ทำให้ระบบมีความสามารถในการสังเกตได้ (Observability) เป็นอันดับแรก และให้ความสำคัญกับเวลา รวมทั้งจำนวนรอบที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ เป็นอันดับถัดมา จากผลการเปรียบเทียบที่แสดงในตารางที่ 3 และ 4 สามารถนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ได้ ดังต่อไปนี้

1. ระบบที่มีความซับซ้อนไม่มาก เช่น ระบบศึกษาที่ 1 (14 bus) และระบบศึกษาที่ 2 (30 bus) พบว่า แต่ละวิธีการจะให้คำตอบที่ดีที่สุดเหมือนกัน แต่

จะแตกต่างกันในด้านเวลา และจำนวนรอบที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ

2. ระบบที่มีความซับซ้อนสูงขึ้น เช่น ระบบศึกษาที่ 3 (57 bus) พบว่าเมื่อเปรียบเทียบด้านจำนวนที่ใช้ในการติดตั้ง PMU จะเห็นได้ว่าวิธีการ CSA และหน่วยวัดเฟสเซอร์ได้จำนวนติดตั้ง PMU เพียง 11 เครื่องเท่านั้น แต่เมื่อเปรียบเทียบด้านเวลา และจำนวนรอบที่ใช้ในการค้นหาคำตอบพบว่าวิธีการ CSA ใช้เวลา และจำนวนรอบที่ใช้ในการค้นหาคำตอบที่น้อยกว่าวิธีการ PSO

3. ระบบที่มีความซับซ้อนสูงสุด เช่น ระบบศึกษาที่ 4 (118 bus) พบว่าวิธีการ CSA สามารถค้นหาคำตอบได้ดีกว่าวิธีการ BFM, GA และ PSO เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบด้านจำนวนที่ใช้ติดตั้งหน่วยวัดเฟสเซอร์พบว่าใช้จำนวนที่น้อยกว่า คือ ติดตั้งเพียง 29 เครื่องเท่านั้น

## 7. สรุป

บทความนี้นำเสนอวิธีการหาตำแหน่งติดตั้งหน่วยวัดเฟสเซอร์ในระบบไฟฟ้ากำลังที่ทำให้ใช้จำนวนหน่วยวัดเฟสเซอร์น้อยที่สุดด้วยวิธีการค้นหาแบบนกกาเหว่า และทำให้ระบบมีความสามารถในการสังเกตได้ (Observability) โดยพบว่าการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดในการณ์ที่ระบบมีความซับซ้อนไม่มาก เช่น ระบบ IEEE 14 bus และระบบ IEEE 30 bus สามารถใช้วิธีการอื่นๆ ที่แตกต่างกัน เพื่อค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดได้เหมือนกัน แต่กรณีระบบมีความซับซ้อนที่สูงขึ้น เช่น ระบบ IEEE 57 bus และระบบมีความซับซ้อนสูงสุด เช่น IEEE 118 bus พบว่าวิธีการที่แตกต่างกันจะส่งผลให้ได้คำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละวิธีการแตกต่างกัน

ออกไปด้วย และเมื่อเปรียบเทียบ โดยบทความนี้ให้ความสำคัญกับจำนวนหน่วยวัดเฟสเซอร์ที่ถูกนำมาติดตั้งเป็นอันดับแรก ซึ่งพบว่าวิธีการค้นหาแบบนกกาเหว่า (CSA) สามารถค้นคำตอบที่ดีที่สุดได้อย่างมีประสิทธิภาพดีกว่าวิธีการอื่นๆ รวมทั้งขั้นตอนและการกำหนดค่าของตัวแปรเบื้องต้น เพื่อให้การค้นหาลู่เข้าสู่ค่าที่ดีที่สุด สามารถทำได้ง่ายและรวดเร็วกว่าวิธีการอื่นๆ ส่งผลให้ใช้เวลาและจำนวนรอบในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด ทำได้อย่างรวดเร็วกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการ BFM, GA และ PSO ซึ่งวิธีการดังกล่าวมีขั้นตอนและการกำหนดค่าตัวแปรเบื้องต้นที่ซับซ้อนกว่าวิธีการ CSA ซึ่งทำให้ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบที่มากกว่า และหากกำหนดค่าตัวแปรเบื้องต้นผิดพลาด จะส่งผลให้ไม่สามารถค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดได้

#### เอกสารอ้างอิง

[1] Hajian M. A., Ranjbar M., Amraee T. and Shirani. A. R. Optimal Placement of Phasor Measurement Units: Particle Swarm Optimization Approach. Electrical Engineering Department of Sharif University of Technology.

[2] Phadke A. G., Thorp J. S. and Karimi K. J. 1986. State Estimation with Phasor Measurements, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 1, No. 1 : 233-241.

[3] Baldwin T. L., Mili L. M. B. and Adapa R. 1993. "Power system observability with minimal phasor measurement placement" IEEE Trans. Power System, vol. 8, pp. 707- 715, May. 1993.

[4] Niqui R. F. and Phadke A. G. 2005. "Phasor measurement unit placement techniques for complete and incomplete observability", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 20 : 2381-2388, Oct. 2005.

[5] Yang X. S. and Deb S. 2009. Cuckoo Search via Lévy Flights, pp. 210-214. In World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBIC). December 2009, Coimbatore, India.

[6] Yang X. S. and Deb S. 2010. Engineering Optimization by Cuckoo Search, pp. 330-343. In International Journal of Mathematical Modeling and Numerical Optimisation. 23 December 2010.

[7] Civicioglu P. and Besdok E. 2011. A conceptual comparison of the Cuckoo-search, particle swarm optimization, differential evolution and artificial bee colony algorithms, pp. 1-32. In Springer Science+Business Media B. V. July 2011.

[8] Ahmadi A., Beromi Y. A. and Moradi M. 2011. Optimal PMU placement for power system observability using Binary PSO and considering measurement redundancy, Expert Systems with Applications, Vol. 38 : 7263-7269.

[9] Xu B. and Abur A. 2014. "Observability Analysis and measurement placement for system with PMUs", In Proc. 2004 IEEE Power System Conf. Expo, vol. 2 : 943-946.

[10] ฐิติพร พงศ์กิตติการ. 2556. การจ่ายโหลดอย่างประหยัดด้วยวิธีการค้นหาแบบนกกาเหว่า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

[11] อีรพงษ์ พลมาตย์. 2556. การบริหารการทำงานอย่างเหมาะสมของระบบไฟฟ้าแบบโครงข่ายไฟฟ้าขนาดเล็กมากด้วยวิธีกลุ่มอนุภาพและฟิชชี่ลอจิก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ