

**การจัดวางตำแหน่งของหน่วยวัดเฟสเซอร์ให้เหมาะสมสูงสุดสำหรับการเฝ้าสังเกต
ระบบไฟฟ้าของโครงข่ายบ่อวิน กฟภ.**
Optimal Phasor Measurement Unit Placement for Monitoring of PEA Bowin Power

วิศวกร ชุณนิการณ วิชัย สุระพัฒน์ ดุลย์พิเชษฐ์ ฤกษ์ปรีดาพงศ์
และ ลัญชัย เดชานุกาพฤธา

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Email: vissavakorn.khu@gmail.com, fengvis@ku.ac.th, dulpichet.r@ku.ac.th, sanchai.
de@gmail.com



บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการจัดวางตำแหน่งของหน่วยวัดเฟสเซอร์ (Phasor Measurement Unit ; PMU) อย่างเหมาะสมที่สุดในโครงข่ายระบบสายส่ง 115 เควี ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ด้วยวิธีการที่ปรับปรุง (Improved Greedy Method ; IGM) เพื่อให้ได้จำนวน PMU ที่น้อยที่สุด โดยมีความสามารถในการสังเกตค่าสถานะได้ครบทุกบัส วิธีการนี้ได้นำเสนอเกณฑ์การเลือกบัสสำหรับการวางตำแหน่ง PMU โดยพิจารณาจากจำนวนบรานซ์ที่เชื่อมต่อกับบัสและความยาวของบรานซ์นั้นๆ จากนั้นจึงนำค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันบัสต่างๆ ที่ได้จากการสังเกตมาเปรียบเทียบกับระหว่างวิธีที่นำเสนอกับวิธีการค้นหาเชิงลึก (Depth First Search ; DFS) โดยใช้โปรแกรม PSAT และวิธีการที่แบบดั้งเดิม (Conventional Greedy method ; CGM) เพื่อประเมินประสิทธิภาพของวิธีต่างๆ โดยวิธีการวาง PMU ด้วย DFS และ CGM ซึ่งจะมีการเลือกบัสเริ่มต้นด้วยการพิจารณาบัสที่มีจำนวน บรานซ์มากที่สุด ในกรณีที่บัสมีจำนวนบรานซ์เท่ากัน จะเลือกบัสเริ่มต้นด้วยวิธีการสุ่ม แต่ในวิธี IGM นั้น ถ้าพบว่าบัสมีจำนวนบรานซ์เท่ากันจะพิจารณาติดตั้ง PMU ที่บัสซึ่งมีผลรวมของระยะทางของบรานซ์ต่ำที่สุด หรืออิมพีแดนซ์น้อยที่สุด ผลจากการวิจัยในวิธี IGM จะได้ตำแหน่งการวาง PMU Bus และได้ระยะทางหรืออิมพีแดนซ์รวมของบรานซ์ที่เชื่อมกับบัสที่สามารถสังเกตค่าได้ (Observable Bus) มีจำนวนน้อยกว่าวิธีอื่น โดยเฉพาะที่เป็นโครงข่ายขนาดใหญ่ และจะได้ผลค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยของมุมและขนาดแรงดันรวมทุกบัสน้อยที่สุด เมื่อทดสอบที่ค่าสภาวะโหลดต่างๆ กัน



คำสำคัญ:

วิธีการวางตำแหน่งหน่วยวัดเฟสเซอร์ ซิงค์โครเฟสเซอร์ การเฝ้ามองของระบบไฟฟ้ากำลัง กริดอัลกอริทึม



Abstract

This paper presents an optimal placement method of Phasor Measurement Unit (PMU) in the



115-kV grid of the Provincial Electricity Authority (PEA) using the Improved Greedy Method (IGM) in order to achieve a minimum number of PMUs for complete observability of all bus voltages. The proposed method presents the criteria of bus selection for PMU placement, regarding a number of branches connected to the bus as well as the length of those branches. Consequently, the mismatches of the observed voltages resulted from the proposed method are compared with those resulted from the Depth First Search (DFS) using the Power System Analysis Toolbox (PSAT) and the original Greedy method (CGM) to illustrate the effectiveness of the placement methods. For the DFS and CGM methods, the bus with the highest number of connected branches is selected as the first bus. However, if there is more than one, the first bus will be randomly selected from those qualified. On the other hand, the PMU bus selected by the IGM is to have the highest number of connected branches as well as the minimum of total distance or total impedance of all observable buses. The findings resulted from the IGM are the optimal PMU placement with the total distance of the connected branches less than the other methods, especially for, large-scale networks. According to the comparison results among the DFS, CGM and IGM, the mean absolute error (MAE) of the angle and the magnitude voltage of all buses resulted from the IGM is the lowest for a wide range of load conditions, while the MAE resulted from the DFS is the highest.

Keywords:

PMU placement, synchrophasor, power system monitoring, greedy algorithm

1. คำนำ

ระบบโครงข่ายสายส่ง 115 เควี ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ได้มีโครงการต่างๆ เพื่อเพิ่มความมั่นคงในการจ่ายไฟด้วยการสร้างสถานีไฟฟ้าเพิ่มในบริเวณพื้นที่ซึ่งมีอัตราการใช้ไฟมาก บริเวณที่ต้องการความมั่นคงการจ่ายไฟสูง เช่น เขตอุตสาหกรรม พื้นที่ธุรกิจ เป็นต้น ประกอบกับในระบบมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Distributed Generator ; DG) เข้ามาเชื่อมกับสายส่งทำให้มีความยาววงจรกิโลเมตรเพิ่มขึ้น และมีสภาพการจ่ายไฟซับซ้อนมากขึ้น เช่น ถ้าเกิดกรณี DG หรือโหลดขนาดใหญ่เข้าสู่ระบบ หรือหลุด

ออกจากระบบ หากขาดการเฝ้าสังเกตและควบคุมในระบบที่ดีในสถานะที่มีความเป็นพลวัตสูงเช่นนี้ เมื่อเกิดเหตุผิดปกติอาจทำให้ขาดเสถียรภาพและความมั่นคง และนำไปสู่เหตุการณ์ไฟฟ้าดับได้ในที่สุด [1, 2]

การนำระบบการตรวจวัดด้วยเทคนิคซิงโครเฟสเซอร์ (Synchrophasor) มาประยุกต์ใช้กับระบบที่มีความซับซ้อนและต้องการเฝ้าระวังด้านเสถียรภาพและความมั่นคงให้คงอยู่ ด้วยการติดตั้งอุปกรณ์หน่วยวัดเฟสเซอร์ (PMU) จะช่วยเพิ่มความสามารถการสังเกตค่า (Observability) ในหลายตำแหน่งพร้อม



กันได้อย่างเที่ยงตรง ในงานวิจัยอื่น [3, 4, 5, 6] เป็นงานวิจัยการวางตำแหน่ง PMU ด้วยจำนวนน้อยที่สุดเพื่อให้สามารถสังเกตค่าได้ครบทุกบัส และใช้งานในการตรวจเฝ้าไลน์สายส่งที่เกิดไฟดับ แล้วส่งผลกระทบต่อพื้นที่บริเวณกว้าง โดยใช้อัลกอริทึมในการหาจำนวน PMU ที่ติดตั้งบนบัสในระบบไฟฟ้า ซึ่ง PMU ในปัจจุบันนี้เป็นอุปกรณ์ IED (Intelligent Electronic Device) ชนิดหนึ่งที่ใช้งานรองรับระบบสมรรถกิริยาในอนาคต สามารถวัดค่าขนาดและมุมของแรงดันแบบละเอียด โดยการใช้เทคนิคซิงค์โครเฟสเซอร์ มีข้อดีที่แตกต่างจากเครื่องวัดชนิดอื่นๆ เนื่องจากมีการซิงโครไนซ์เวลาด้วย GPS (Global Positioning System) บนอุปกรณ์ PMU ทุกตัวจึงทำให้สามารถเฝ้าสังเกตและบันทึกค่าที่แต่ละตำแหน่งของบัส เมื่อเกิดเหตุการณ์ต่างๆ บนโครงข่ายไฟฟ้าได้ในเวลาเดียวกันแต่มีสถานที่ต่างกัน ในปัจจุบัน กฟผ. ติดตั้งใช้งานระบบควบคุมสั่งการจ่ายไฟด้วยคอมพิวเตอร์ (SCADA) สามารถสั่งการในระบบจำหน่ายและระบบสายส่ง 115 กิโลโวลต์ (เควี) แต่การตรวจวัดค่ายังไม่สามารถแสดงค่าในแบบเวลาจริง (Real Time) หรือเวลาใกล้เคียงได้ แต่การใช้ PMU ทำให้สามารถช่วยในการเฝ้าสังเกตเสถียรภาพของระบบ ตั้งแต่ระดับพื้นที่แคบจนถึงระดับหลายพื้นที่ที่เป็นโครงข่ายของภูมิภาคอื่นๆ และสามารถเชื่อมโยงการเฝ้าสังเกตเป็นแบบ Wide Area Monitoring System (WAMS) ได้

งานวิจัยนี้ศึกษาการจัดวางตำแหน่ง PMU โดยการใช้กริดอัลกอริทึม (Greedy Algorithm) ที่มีหลักการคัดเลือกบัสที่มีบรานซ์เชื่อมบัสมากที่สุดแล้วติดตั้ง PMU (PMU Bus) และเรียงจำนวนบัสที่มีบรานซ์จากมากไปน้อย โดยใช้แบบจำลองสายส่ง 115 เควี ในพื้นที่อุตสาหกรรมบ่อวิน จังหวัดชลบุรี

ระบบประกอบด้วย 93 บัส และ 95 บรานซ์ วิธีการนี้สามารถวางจำนวน PMU อย่างเหมาะสม และมีค่าคลาดเคลื่อนน้อยบนบัสที่สังเกตค่าได้ (Observable Bus) และได้มีการพัฒนาปรับปรุงจากวิธีการดั้งเดิม (CGM) ให้มีความสามารถสูงขึ้น และได้ค่าคลาดเคลื่อนน้อยลง เรียกว่าวิธีการที่ปรับปรุง (IGM) โดยการเลือกตำแหน่งบัสที่ติดตั้ง PMU ที่มีบรานซ์เชื่อมต่อมากที่สุด หากมีจำนวนบรานซ์เท่ากันตั้งแต่สองบัสขึ้นไปจะเพิ่มเงื่อนไขโดยการเลือกใช้ผลรวมของระยะทาง หรือค่าอิมพีแดนซ์ของบรานซ์ที่มีค่าน้อยที่สุด และเปรียบเทียบผลที่ได้กับวิธีค้นหาเชิงลึก (DFS) และวิธี CGM เดิม โดยพิจารณาจากจำนวน PMU ที่ใช้ในการวางตำแหน่งของแต่ละวิธี และค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น

2. หลักการและวิธีการ

2.1 หลักการจัดวางด้วยวิธีค้นหาเชิงลึก (DFS)

2.1.1 เลือกบัสที่มีจำนวนบรานซ์มากที่สุดก่อน และถ้ามีบัสที่มีจำนวนบรานซ์เท่ากันตั้งแต่สองบัสขึ้นไปก็ให้เลือกบัสด้วยวิธีสุ่ม [7]

2.1.2 เมื่อเลือกบัสในขั้นที่ n ($n=1$) ได้แล้วก็ติดตั้ง PMU ก่อน แล้วเลือกบัสในขั้นที่ $n+1$ ถัดลงไปที่มีบรานซ์มากที่สุด หากมีจำนวนบรานซ์เท่ากัน ก็ใช้วิธีสุ่ม ในขั้นนี้ยังไม่วาง PMU เนื่องจากขั้นที่แล้วยังสังเกตค่าได้

2.1.3 เลือกบัสในขั้นที่ $n+2$ หากในขั้นนี้มีบัสที่มีจำนวนบรานซ์เท่ากันอีก ตั้งแต่สองบัสขึ้นไป ให้เลือกบัสด้วยวิธีสุ่ม พร้อมกับวาง PMU ในขั้นนี้ และก็ค้นหาตำแหน่ง PMU ในขั้นถัดลงไปแนวลึกเหมือนข้อ 2.1.2 จนหมดสาย

2.1.4 เมื่อค้นหาตำแหน่งวาง PMU จากข้อ 2.1.3 จนหมดสายแล้ว ให้เริ่มวางใหม่บนบัสเดิมในข้อ



2.1.1 เพื่อลงในบรานชีใหม่ และดูค่าความสามารถในการสังเกต ถ้าสังเกตค่าได้แล้ว ให้วาง PMU ในชั้นถัดลงไปแนวลึก ตามข้อ 2.1.2 – 2.1.3 จนหมดสาย

2.1.5 เมื่อทำจนครบทุกบรานชีในบัสที่มีบรานชีมากที่สุด ก็ดำเนินการตามข้อ 2.1.2 ถึง 2.1.4 ใหม่ในบัสที่มีจำนวนบรานชีรองลงไป จนครบทุกบัส และทุกบรานชีและทุกลำดับชั้นในแต่ละสาย

2.2 หลักการจัดวางด้วยวิธีกรีดีแบบดั้งเดิม (CGM)

หลักการทำงานของ CGM มีลักษณะคล้ายกับวิธี DFS โดยมีขั้นตอนดังนี้

2.2.1 เลือกบัสที่มีบรานชี (ไม่นับรวมอุปกรณ์อื่น) มาเชื่อมมากที่สุด เพื่อติดตั้ง PMU เป็น PMU Bus หลักในชั้นที่ n ($n = 1$)

2.2.2 ตัด PMU Bus หลัก ข้อ 2.2.1 และบรานชีทั้งกลุ่มรวมถึงบัสที่มาเชื่อมกับบรานชี (บัสที่สังเกตค่าได้) ออกไป

2.2.3 ตรวจสอบและเลือกบัสคงเหลือที่มีบรานชีมาเชื่อมมากที่สุด เพื่อติดตั้ง PMU เป็น PMU Bus หลักในชั้นที่ $n+1$

2.2.4 ตัด PMU Bus หลัก ข้อ 2.2.3 และบรานชีทั้งกลุ่มออก (เหมือนข้อ 2.2.2) เหลือบัสที่ไม่สามารถสังเกตค่าได้ (Unobservable Bus)

2.2.5 ทำตามข้อ 2.2.3 ถึง 2.2.4 จนไม่เหลือบัสที่ไม่สามารถสังเกตค่าได้ แล้วจะได้ระบบที่สามารถสังเกตค่าได้ครบถ้วนทุกบัส (Full Observability)

2.2.6 ทำตามข้อ 2.2.1 ถึง 2.2.5 จะได้จำนวน PMU พร้อมตำแหน่ง PMU Bus และจำนวนบัสที่สังเกตค่าได้ (Observable Bus)

2.2.7 คำนวณหาค่าแรงดันและมุมของบัสที่สังเกตค่าได้โดยใช้วิธีการคำนวณในหัวข้อ 2.4.1

2.3 หลักการจัดวางด้วยวิธีกรีดีที่ปรับปรุง (IGM)

2.3.1 จัดเรียงลำดับบรานชีตามระยะทางจากค่าน้อยไปหาค่ามาก

2.3.2 จัดเรียงลำดับบัสที่มีจำนวนบรานชีจากค่ามากไปหาค่าน้อย

2.3.3 หากมีบัสที่มีจำนวนบรานชีมาเชื่อมเท่ากันหลายบัส เลือกบัสที่มีผลรวมระยะทางของบรานชีที่มาเชื่อมที่มีค่าน้อยที่สุดก่อน แล้วจัดเรียงบัสจากค่าผลรวมระยะทางของบรานชีที่มาเชื่อมจากค่าน้อยที่สุดไปหาค่ามากที่สุด

2.3.4 เลือกบัสที่มีบรานชี (ไม่นับรวมอุปกรณ์อื่น) มาเชื่อมมากที่สุดเพื่อติดตั้ง PMU เป็น PMU Bus หลักในชั้นที่ n (เริ่ม $n = 1$)

2.3.5 ตัด PMU Bus หลัก ข้อ 2.3.4 และบรานชีทั้งกลุ่มรวมถึงบัสที่มาเชื่อมกับบรานชี (บัสที่สังเกตค่าได้) ออกไป

2.3.6 ตรวจสอบและเลือกบัสคงเหลือที่มีบรานชีมาเชื่อมมากที่สุด เพื่อติดตั้ง PMU เป็น PMU Bus หลักในชั้นที่ $n+1$

2.3.7 ตัด PMU Bus หลัก ในข้อ 2.3.6 และบรานชีทั้งกลุ่มออก (เหมือนข้อ 2.3.5) เหลือบัสที่ไม่สามารถสังเกตค่าได้ (Unobservable Bus)

2.3.8 ทำตามข้อ 2.3.6 ถึง 2.3.7 จนไม่เหลือบัสที่ไม่สามารถสังเกตค่าได้ แล้วจะได้ระบบที่สามารถสังเกตค่าได้ครบถ้วนทุกบัส (Full Observability)

2.3.9 จากข้อ 2.3.1 ถึง 2.3.8 จะได้จำนวน PMU พร้อมตำแหน่ง PMU Bus และจำนวนบัสที่สังเกตค่าได้ (Observable Bus)

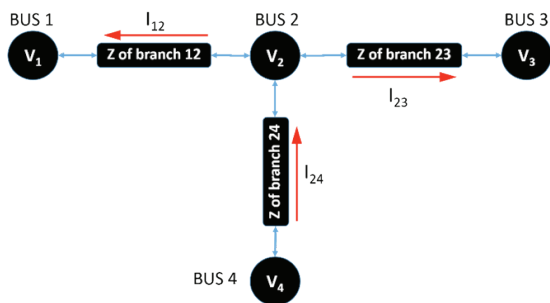
2.3.10 คำนวณหาค่าแรงดันและมุมของบัสที่สังเกตค่าได้ ด้วยวิธีการคำนวณในหัวข้อ 2.4.1 โดยคัดเลือกบรานชีที่มีระยะทางสั้นที่สุดที่เชื่อมระหว่าง



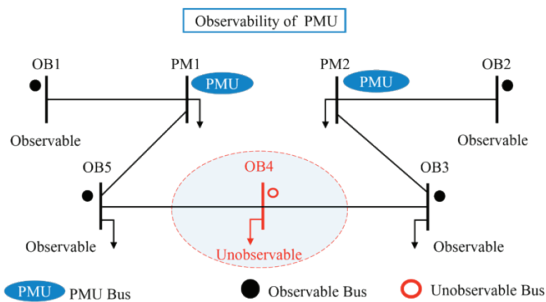
PMU Bus และ บัสที่สังเกตค่าได้

2.4 ความสามารถในการสังเกตค่าได้ทั้งระบบ
(Full Observability)

ความสามารถการสังเกตค่าได้หมายถึงชุดตรวจวัดนั้นสามารถแสดงค่าที่วัด และคำนวณค่าที่สังเกตได้ ความสามารถในการสังเกตค่าได้ทั้งระบบ หมายถึงชุดตรวจวัดมีเพียงพอต่อการสังเกตค่าของระบบได้ทั้งหมด เพื่อรับรู้สถานะของระบบที่เกิดขึ้นขณะนั้นได้ การสังเกตค่าได้ตามภาพที่ 1 โดยพิจารณาตามกฎ KCL และสามารถคำนวณค่าแรงดันและมุมของแต่ละกรณีได้ดังหัวข้อที่ 2.4.1 ถึง 2.4.3



ภาพที่ 1 ตัวอย่างบัสในการสังเกตค่า



ภาพที่ 2 แผนภาพหลักการสังเกตค่าได้ของ PMU

2.4.1 กรณีรู้ค่าแรงดัน 1 บัส V_2 , กระแส $I_{12}, I_{23}, I_{24}, Z_{12}, Z_{23}, Z_{24}$ แต่ไม่รู้ค่า V_1, V_3, V_4

$$V_3 = V_2 - I_{12} (Z_{12}) \quad : \quad Z_{12} = R_{12} + jX_{12}$$

$$V_3 = V_2 - I_{23} (Z_{23}) \quad : \quad Z_{23} = R_{23} + jX_{23}$$

$$V_3 = V_2 + I_{24} (Z_{24}) \quad : \quad Z_{24} = R_{24} + jX_{24}$$

2.4.2 กรณีรู้ค่าแรงดัน 2 บัส V_1, V_4 , กระแส

$I_{12}, Z_{12}, Z_{23}, Z_{24}$ แต่ไม่รู้ค่า V_2, V_3, I_{23}, I_{24}

$$V_2 = V_1 + I_{12} (Z_{12}) \quad : \quad Z_{12} = R_{12} + jX_{12}$$

$$V_3 = V_2 + I_{23} (Z_{23}) \quad : \quad Z_{23} = R_{23} + jX_{23}$$

$$I_{23} = I_{24} - I_{12}$$

$$I_{24} = (V_4 - V_2) / (Z_{24}) \quad : \quad Z_{24} = R_{24} + jX_{24}$$

2.4.3 กรณีรู้ค่าแรงดัน 3 บัส V_1, V_3, V_4 , Z_{12}, Z_{23}, Z_{24} แต่ไม่รู้ค่ากระแส $V_2, I_{12}, I_{23}, I_{24}$

$$V_2 = V_1 + I_{12} (Z_{12}) \quad : \quad Z_{12} = R_{12} + jX_{12}$$

$$V_2 = V_3 + I_{23} (Z_{23}) \quad : \quad Z_{23} = R_{23} + jX_{23}$$

$$V_2 = V_4 - I_{24} (Z_{24}) \quad : \quad Z_{24} = R_{24} + jX_{24}$$

$$0 = I_{24} - I_{23} - I_{12}$$

การสังเกตค่าได้ ของ PMU จะสามารถทำได้ตามที่แสดงในภาพที่ 2 ค่าจากบัสที่ติดตั้ง PMU จะวัดได้ทั้งแรงดันและกระแสที่ PMU Bus และได้ค่าจากการสังเกตค่าที่บัสลำดับที่สองหรือบัสที่สังเกตค่าได้ ซึ่งคำนวณด้วยวิธีในหัวข้อ 2.4.1 แต่ในบัสลำดับที่สาม PMU ไม่สามารถสังเกตค่าได้ เนื่องจากไม่ทราบค่ากระแสในบรานช์ที่เชื่อมจากบัสที่สังเกตค่าได้ ไปบัสลำดับที่สาม ทั้งนี้ที่ PMU Bus จะต้องติดตั้งเครื่องวัด CT และ PT พร้อมด้วยระบบสื่อสารครบถ้วน ส่วนในบัสที่ PMU สังเกตค่าได้ หรือบัสที่สังเกตค่าได้ จะไม่มีการติดตั้ง PMU

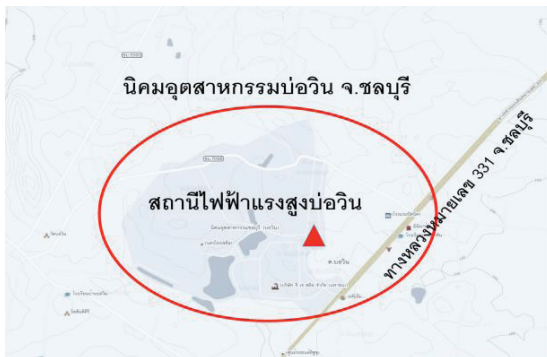
3. กรณีศึกษาการจัดวางตำแหน่ง PMU ในพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมบ่อวิน จ.ชลบุรี

3.1 การสร้างแบบจำลอง

ในกรณีศึกษานี้ได้สร้างแบบจำลองสายส่ง 115 เควี โดยอาศัยข้อมูลระบบไฟฟ้าของ กฟผ. ในพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมบ่อวิน จ.ชลบุรี ดังแสดงในภาพที่ 3 ข้อมูลการใช้ไฟสูงสุด ประมาณ 900 MW



การจ่ายไฟ ประกอบด้วยสถานีไฟฟ้าจำนวน 12 สถานี จ่ายไฟ Closed Loop ดังแสดงในภาพที่ 3 โดยรับไฟจากสถานีไฟฟ้าแรงสูงบ่อวิน (กฟผ.) และปลวกแดง (กฟผ.) มี DG ติดตั้งรวม 180 MW



ภาพที่ 3 เขตพื้นที่อุตสาหกรรมบ่อวิน จ.ชลบุรี

3.2 การจัดวาง PMU ด้วยวิธี DFS CGM และ IGM

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมสร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้า 2 โปรแกรม คือ DigSilent Power Factory และ PSAT โดยใช้โปรแกรม DigSilent เพื่อคำนวณหาคำตอบ Power flow ได้แก่ ค่าแรงดันและค่ากระแส เพื่อจำลองการวัดค่าของ PMU สำหรับวิธี CGM และ IGM ส่วนโปรแกรม PSAT ใช้ในการหาตำแหน่ง PMU ด้วยวิธี DFS

3.2.1 สร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้าบน DigSilent เพื่อคำนวณหาคำตอบ Power flow ได้แก่ ค่าแรงดันและกระแสพร้อมมุมของทุกบัสและบรานช์ โดยให้เสมือนค่าที่วัดด้วย PMU ที่ PMU Bus และให้เป็นค่าคำตอบอ้างอิงของบัสที่สังเกตค่าได้ เพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณด้วยวิธีในข้อ 2.4.1

3.2.2 สร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้าบน PSAT เพื่อคำนวณหาคำตอบ Power flow จากนั้นใช้ฟังก์ชัน PMU Placement เลือก DFS Method เพื่อหาตำแหน่งติดตั้งและจำนวน PMU

3.2.3 หาตำแหน่งติดตั้ง PMU ด้วยวิธี CGM โดยอาศัยผลคำตอบ Power flow จากโปรแกรม DigSilent

3.2.4 หาตำแหน่งติดตั้ง PMU ด้วยวิธี IGM โดยอาศัยผลคำตอบ Power flow จากโปรแกรม DigSilent ตามวิธีในข้อ 2.3

4. ผลการศึกษาและวิเคราะห์แบบจำลอง

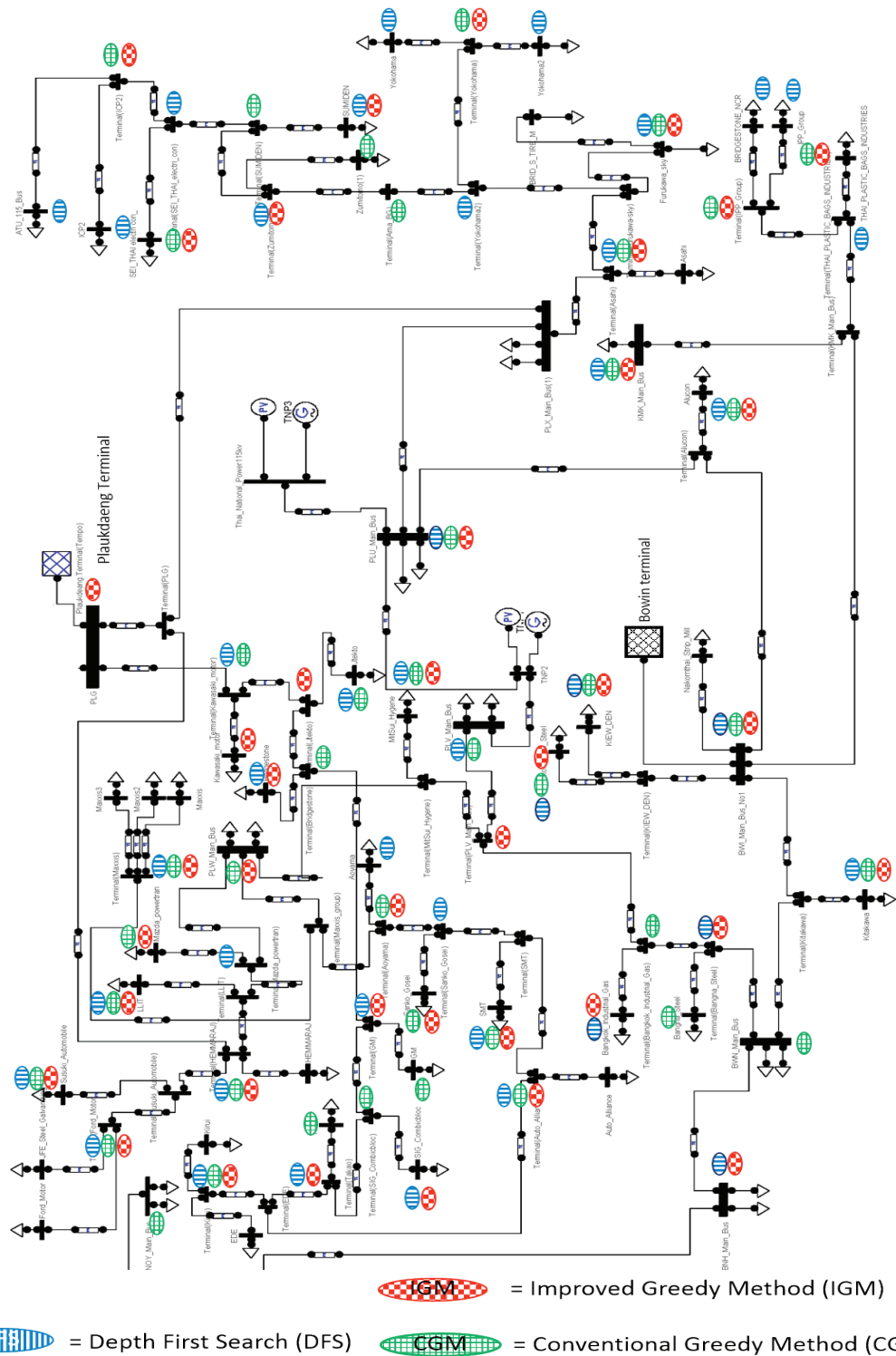
งานวิจัยนี้นำเสนอวิธี IGM โดยเพิ่มเงื่อนไขการจัดวาง PMU บนวิธี CGM เดิมซึ่งเลือกแบบมีเงื่อนไขไม่ใช่วิธีสุ่ม แต่ละวิธีจะให้ตำแหน่ง PMU Bus และบรานช์ที่เชื่อมกับบัสที่สังเกตค่าได้ต่างกันไป โดยผลการวิเคราะห์เพื่อหาตำแหน่งติดตั้งและจำนวน PMU ของทั้ง 3 วิธี แสดงในภาพที่ 4 และในตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบผลการจัดวางตำแหน่ง PMU

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบผลการจัดวาง PMU

Placement Method	PMU Bus	Observable Bus / All Bus	Total Distance Observed* (km)
DFS	42	51/93	132.68
CGM	41	52/93	94.96
IGM	40	53/93	48.55

*Total Distance Observed คือผลรวมความยาวของบรานช์ที่ใช้คำนวณค่าที่ Observable Bus

การจัดวางตำแหน่งของหน่วยวัดเฟสเซอร์ให้เหมาะสมที่สุดสำหรับการเฝ้า
สังเกตระบบไฟฟ้าของโครงข่ายบ่อวิน กฟผ.



ภาพที่ 4 แบบจำลองสายส่ง 115 กิโลโวลต์พื้นที่นิคมอุตสาหกรรมบ่อวินและจุดติดตั้ง PMU ด้วยวิธี DFS CGM และ IGM



ตารางที่ 2 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Error ; MAE) ของมุมและแรงดันรวมทุกบัสด้วยวิธีต่างๆ

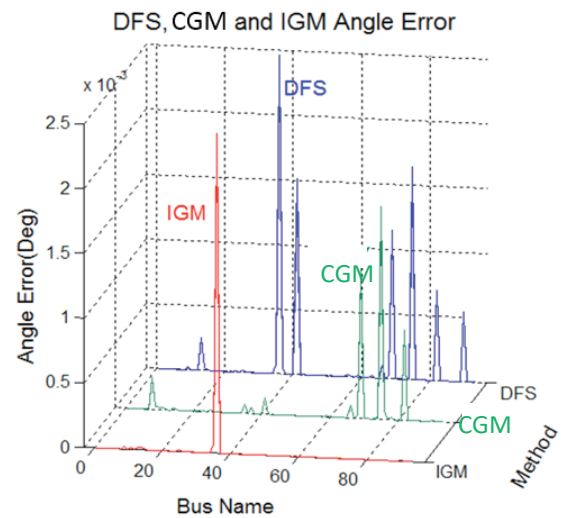
Placement Method	Line Voltage Error		
	Angle (Degree)	Magnitude	
		(V)	(%)
DFS	0.00050	6.325	0.0055
CGM	0.00024	2.99	0.0026
IGM	0.00016	2.07	0.0018

ตารางที่ 2 แสดงผลเปรียบเทียบค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Error ; MAE) ของมุมและแรงดันรวมทุกบัสและค่าคลาดเคลื่อนเปลี่ยนตามสภาวะโหลด ซึ่งปรากฏว่าวิธี DFS มีค่าคลาดเคลื่อนมากที่สุด และวิธี IGM มีค่าคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด จากผลการศึกษาค่าคลาดเคลื่อนของมุมโดยเปรียบเทียบทั้ง 3 วิธี พบว่าค่าคลาดเคลื่อนขึ้นกับความยาวหรืออิมพีแดนซ์ของบรานช์ที่เชื่อมกับบัสที่สังเกตค่าได้

โดยระบบที่ใช้ในการศึกษามีความยาวของบรานช์อยู่ระหว่าง 0.01 ถึง 21.66 กิโลเมตร และมีค่า Loading อยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 1.3 pu ถึงแม้ว่าวิธี DFS และ IGM มีบรานช์ที่มีความยาวมากที่สุดที่ 21.66 กิโลเมตร รวมอยู่ด้วย แต่ผลรวมค่าคลาดเคลื่อนของวิธี IGM มีค่าน้อยที่สุดใน 3 วิธี เนื่องจากวิธี IGM มีผลรวมความยาวของบรานช์ที่ใช้คำนวณจำนวนบัสที่สามารถสังเกตได้น้อยที่สุด ทำให้ค่าที่ได้จากการสังเกตมีค่าคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดด้วย และค่าแรงดันที่ได้จากการสังเกตก็มีผลในลักษณะเช่นเดียวกัน

จากภาพที่ 5 ค่าคลาดเคลื่อนของมุมที่คำนวณได้ ตามตำแหน่งบัสที่สังเกตค่าได้ครอบคลุมทุกบัส

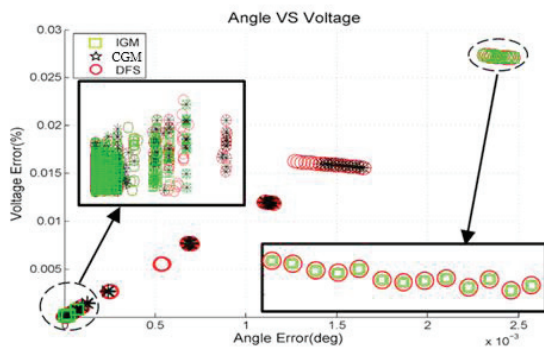
โดยบัสที่ถูกสังเกตค่าได้ที่มีระยะทางของบรานช์มีความยาวมากก็มีค่าคลาดเคลื่อนมากตาม วิธี IGM มีค่าคลาดเคลื่อนมากที่สุด เดียว ซึ่งเปรียบเทียบกับวิธี DFS และ CGM มีบัสที่มีค่าความคลาดเคลื่อนจำนวนมากกว่าวิธี IGM และค่าแรงดันก็เป็นทำนองเดียวกัน



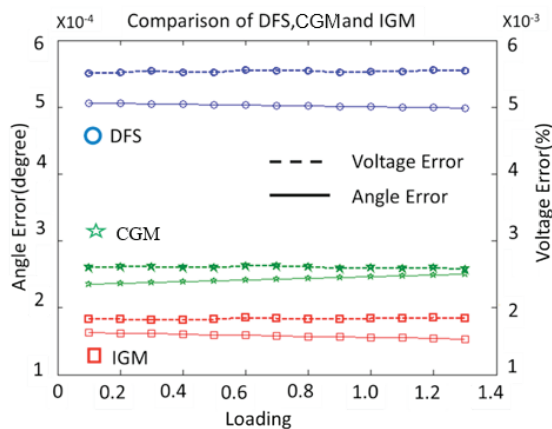
ภาพที่ 5 ผลค่าคลาดเคลื่อนของมุมตามตำแหน่งบัส

ในภาพที่ 6 แสดงค่าคลาดเคลื่อนของมุมต่อแรงดัน (X:Y) แต่ละวิธีตามลำดับ แกน X เป็นค่าคลาดเคลื่อนของมุมหน่วยเป็นองศา แกน Y เป็นค่าคลาดเคลื่อนของแรงดันหน่วยเป็น เปอร์เซนต์ เมื่อเปลี่ยนสภาวะโหลด ตั้งแต่ 0.1 ถึง 1.3 pu สังเกตว่าวิธี IGM นั้น เมื่อโหลดเพิ่มขึ้นค่าคลาดเคลื่อนจะมีค่าเกาะกลุ่มกัน 2 กลุ่ม บริเวณล่างสุดและบนสุด ส่วนวิธี DFS และ CGM มีค่าคลาดเคลื่อนเกาะกลุ่มหลายกลุ่มมากกว่า เนื่องจากมีจำนวนบัสที่มีค่าคลาดเคลื่อนมากอยู่มากกว่า

การจัดวางตำแหน่งของหน่วยวัดเฟสเซอร์ให้เหมาะสมที่สุดสำหรับการเฝ้า
สังเกตระบบไฟฟ้าของโครงข่ายบ่อวิน กฟผ.



ภาพที่ 6 ผลค่าคลาดเคลื่อนระหว่างมุมและ
แรงดันแต่ละวิธี



ภาพที่ 7 ผลค่าคลาดเคลื่อนของมุมและแรงดัน
ตามโหลด

ส่วนภาพที่ 7 แสดงค่าคลาดเคลื่อนของมุม
และแรงดัน แกน X เป็นค่าการเปลี่ยนแปลงสถานะ
ของโหลด วิธี IGM ค่าคลาดเคลื่อนมีค่าคงที่และต่ำ
ที่สุดกว่าวิธีอื่นจึงทำให้มีความแม่นยำและเที่ยงตรง
มากกว่า และแรงดันก็มีแนวโน้มเดียวกัน

5. สรุปผลการวิเคราะห์

งานวิจัยนี้ศึกษาการจัดวาง PMU ให้มีจำนวน
เหมาะสมน้อยที่สุด หมายถึงมีจำนวน PMU น้อย
ที่สุดที่ยังสามารถวัดและสังเกตค่าของระบบได้ทุก
บัสอย่างครอบคลุมครบถ้วน และสามารถนำค่ามา

ประมวลผลได้ และมีค่าคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด เมื่อ
ทดสอบกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าขนาด 93 บัส พบว่า
วิธี IGM มี PMU จำนวนน้อยที่สุดกว่าวิธีอื่น คือ 40 ชุด
สำหรับวิธี DFS และ CGM มี PMU จำนวน 42 และ
41 ชุดตามลำดับ ค่าคลาดเคลื่อนรวมของ วิธี IGM
มีค่าน้อยที่สุด มีค่าความคลาดเคลื่อนมุม 0.00016
องศา และมีค่าความคลาดเคลื่อนขนาด 0.0018 %
ค่ามุมในวิธี IGM มีความแม่นยำมากกว่าแม้ว่าขนาด
โหลดเปลี่ยนแปลงไปก็ตาม เนื่องจากมีความยาว
รวมของบรรทัดทั้งหมดแล้วน้อยที่สุด 48.55 กิโลเมตร
ผลโดยสรุปแล้วจากการเปรียบเทียบผลค่าคลาดเคลื่อน
ของมุมและแรงดันตามสถานะโหลด วิธี IGM มีค่า
คลาดเคลื่อนต่ำสุดจากทั้ง 3 วิธี

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการความ
ร่วมมือทางวิชาการและพัฒนาผู้เชี่ยวชาญ โดย
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

เอกสารอ้างอิง

- [1] Mohamed, A. Ghareeb A. Youssef, T and
Mohammed, O.A. "Wide Area Monitoring and
Control for Voltage Assessment in Smart Grids
with Distributed Generation", IEEE PES Innovative
Smart Grid Technologies (ISGT) 2013, pp.1-6.
- [2] Ngamroo I. , Dechanupaprittha S. and
Mitani Y. "PMU Based Monitoring of Inter-Area
Oscillation in Thailand Power System via Home
Power Outlets", ECTI Transactions on Electrical
Eng., Electronics, and Communications, vol.5(2):
199-204, August 2007.



[3] Altman J. "A Practical Comprehensive Approach to PMU Placement for Full Observability", Thesis of Master of Science in Electrical Engineering of The Virginia Polytechnic Institute and State University.

[4] Anderson J.E. and Chakraborty A. "A Minimum Cover Algorithm for PMU Placement in Power System Networks Under Line Observability Constraints", IEEE Power and Energy Society General Meeting 2012, pp. 1-7.

[5] Li Q. , Negi R. and Marija D. "Phasor Measurement Units Placement for Power System State Estimation: A Greedy Approach", IEEE Power and Energy Society General Meeting 2011, pp. 1-8.

[6] Despa D. , Li C. , Mitani Y. and Watanabe M. "PMU Base Monitoring and Estimation of Interarea Power Oscillation for Singapore-Malaysia Interconnection Power System", IPEC Conference Proceedings 2010, pp. 476-480.

[7] Milano F. "Power System Analysis Toolbox Documentation for PSAT version 1.3.4", July 14, 2005.