

## การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายรัศมีไม่ได้คูล ที่มีส่วนแบ่งโหลดยานยนต์ไฟฟ้า

ณัฐพงศ์ บุตรธนู<sup>1</sup> บรรณณัฐติ บริบูรณ์<sup>2\*</sup> นพรัตน์ ธรรมวงษา<sup>3</sup> ไพบุลย์ บุปผา<sup>4</sup> นิวัตร ภูมิพันธ์<sup>5</sup>  
คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี<sup>1 2\*3 4 5</sup>  
อีเมล : banyat.bo@udru.ac.th<sup>2\*</sup>

วันที่รับบทความ 31 พฤษภาคม 2566

วันแก้ไขบทความ 29 ตุลาคม 2566

วันที่ตอบรับบทความ 2 พฤศจิกายน 2566

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแบบจำลองและการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายรัศมีไม่ได้คูล สำหรับกรณีในระบบจำหน่ายสามเฟสไม่ได้คูลมีส่วนแบ่งโหลดยานยนต์ไฟฟ้า พารามิเตอร์คุณภาพกำลังไฟฟ้าที่ต้องการศึกษาผลกระทบจากโหลดยานยนต์ไฟฟ้าคือขนาดของแรงดัน แบบจำลององค์ประกอบของระบบที่นำเสนอ ในบทความประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิด หม้อแปลง สายส่งจำหน่าย โหลดสายป้อน และโหลดอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้า ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นแบบการแจกแจงปกติของระบบ IEEE สืบเสาะถูกประยุกต์ใช้เพื่อ คำนวณโหลดอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้า 24,001 กรณี เพื่อนำไปวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีกวดย้อนกลับ และไปหน้า ผลจากการจำลองด้วยรหัสคำสั่งไพทอนของงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่า โหลดอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้า ที่เป็นโหลดแบบสุ่มทั้งระดับของส่วนแบ่งโหลด และช่วงเวลาของการต่อกับระบบจำหน่าย มีผลกระทบทำให้ขนาดของแรงดันสามเฟสมีค่าไม่เท่ากัน และเป็นสาเหตุของปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าของระบบจำหน่ายรัศมีไม่ได้คูล

**คำสำคัญ :** การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า ระบบจำหน่ายรัศมีไม่ได้คูล โหลดอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้า ส่วนแบ่ง โหลดยานยนต์ไฟฟ้า คุณภาพกำลังไฟฟ้า

## Load Flow Analysis for Unbalanced Radial Distribution System with the Penetration of Electric Vehicles

Nuttapong Bootthanu<sup>1</sup>, Banyat Boribun<sup>2\*</sup>, Nopparat Thammawongsa<sup>3</sup>, Phaiboon Boupha<sup>4</sup>,  
Niwat Bhumiphan<sup>5</sup>

Faculty of Technology, Udon Thani Rajabhat University<sup>1, 2\*, 3, 4, 5</sup>

E – mail : banyat.bo@udru.ac.th<sup>2\*</sup>

Received 10 May 2023

Revised 29 October 2023

Accepted 2 November 2023

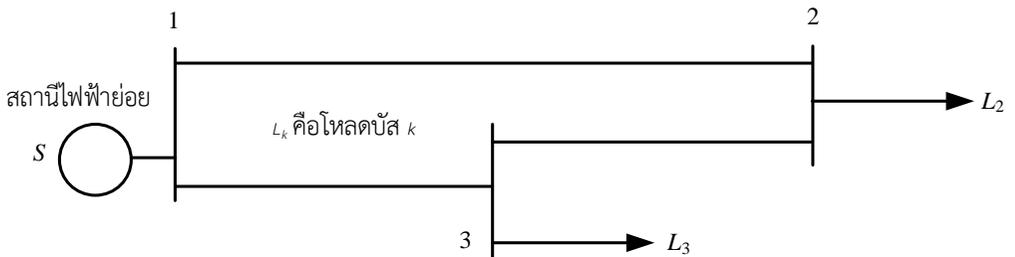
### Abstract

This article presents the modeling and analysis of power flow in an unbalanced radial distribution system with the penetration of electric vehicles. The power quality parameter that needs to be studied for the impact of electric vehicle load is the voltage magnitude. The system component models presented in the article includes a source, transformer, distribution line, feed line, load, and electric vehicle charging load. The normal distribution probability density function of an IEEE 4-bus test system is applied to calculate 24,001 cases of electric vehicle charging load, to analyze the power flow using the backward and forward sweep methods. The results from the simulation with the Python codes of this research were summarized. The electric vehicle charging load is randomly about penetration levels and the time of connection to the distribution system. These affect the magnitudes of the three-phase voltage are unequal, and is the cause of the power quality problem of the unbalanced radial distribution system.

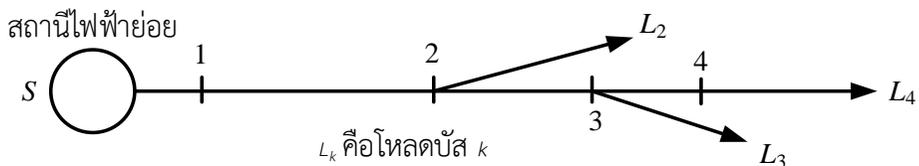
Keywords : Power Flow Analysis, Unbalanced Three-Phase Distribution System, Electric Vehicle Charging Load, Electric Vehicles Load Penetration, Power Quality

## 1. บทนำ

ยานยนต์ไฟฟ้าได้รับการคาดหมายว่าเป็นยานยนต์แห่งอนาคต เพราะเป็นยานยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ และมีแหล่งพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ ดังนั้นจึงมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศในปริมาณที่น้อยมากจนอาจพิจารณาได้ว่าเท่ากับศูนย์ การใช้ยานยนต์เผาไหม้ภายในในอดีตไม่มีปัญหาหรือความเกี่ยวข้องใด ๆ กับระบบจำหน่ายไฟฟ้า เพราะแหล่งเชื้อเพลิงของยานยนต์ชนิดนี้คือน้ำมันเชื้อเพลิงที่สามารถเติมได้จากสถานีบริการที่มีอยู่เพียงพอ แต่ในภาวะปัจจุบันจำนวนของยานยนต์ไฟฟ้ามีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง ระบบจำหน่ายของการไฟฟ้านครหลวงหรือการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จึงมีความเกี่ยวข้องกับโหลดอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้ามากยิ่งขึ้น เนื่องจากการต่อยานยนต์ไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้าเพื่ออัดประจุแบตเตอรี่เป็นภาวะที่เกิดขึ้นแบบสุ่มทั้งในประเด็นเกี่ยวกับระดับพลังงานการอัดประจุ เวลา และระยะเวลาของการอัดประจุ ดังนั้นการที่โหลดมีภาวะดังกล่าวนี้ย่อมส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบจำหน่ายรัศมีไม่ได้ดุลของการไฟฟ้า โดยเฉพาะคุณภาพกำลังไฟฟ้าของระบบ เช่น ขนาดของแรงดัน แรงดันต่ำเกิน แรงดันสูงเกิน เป็นต้น การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าเพื่อศึกษาผลกระทบอันเนื่องมาจากส่วนแบ่งโหลดยานยนต์ไฟฟ้า จึงเป็นความจำเป็นที่จะต้องมีการศึกษาและวิเคราะห์ให้เกิดผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำมากที่สุดวัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าคือการหาค่าในภาวะอยู่ตัวของแรงดัน กระแส และการไหลของกำลังภายในระบบ การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบมาตรฐานสามารถประยุกต์ใช้ได้กับระบบไฟฟ้าแบบลูบซึ่งมีทอพอโลยีดังแสดงในรูปที่ 1 แต่โครงข่ายของระบบจำหน่ายมีทอพอโลยีเป็นแบบรัศมีดังแสดงในรูปที่ 2 มีอัตราส่วนของ R/X สูง การประยุกต์ใช้วิธีการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบมาตรฐานกับระบบจำหน่ายจึงให้ความถูกต้องของผลลัพธ์ในระดับที่ไม่สามารถยอมรับได้ (Mishra & Das, 2008) อีกทั้งระบบจำหน่ายมีความใกล้ชิดกับผู้ใช้ไฟฟ้ามากที่สุด การเปลี่ยนแปลงของโหลดจึงเกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลาและรวดเร็ว เช่น ระบบไฟฟ้าในช่วงเวลาการระบาดของโรคโควิด-19 โหลดยานยนต์ไฟฟ้าแบบเสียบเข้า เป็นต้น ดังนั้นการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายสามเฟสไม่ได้ดุลจึงได้รับการพัฒนาโดยนักวิจัยอย่างต่อเนื่องจากอดีตจนถึงปัจจุบัน



รูปที่ 1 ทอพอโลยีระบบไฟฟ้ากำลังแบบลูบ



รูปที่ 2 ทอพอโลยีระบบไฟฟ้ากำลังแบบรัศมี

ย้อนหลังไปเมื่อ 35 ปีที่แล้วในปี ค.ศ. 1988 Shirmohammadi, Hong, Semlyen, & Luo (1988) เสนอวิธีการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบจำหน่ายสามเฟสสามสายได้ดุลและไม่ได้ดุลเพื่อจำแนกบัสอ่อนแอของระบบ จุดเด่นของงานวิจัยนี้คือมีการกำหนดชั้นของบัสและกิ่งของสายป้อน ซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้เป็นพื้นฐานที่สำคัญของงานวิจัยอื่น ๆ จนถึงปัจจุบัน โดยเฉพาะการประยุกต์ใช้ในงานวิจัยของ Das, Kothari, & Kalam (1995) อย่างไรก็ตาม งานวิจัยทั้งคู่นี้ไม่มีการพิจารณาชนิดของโหลดที่แตกต่างกัน และไม่มีการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับงานวิจัยอื่นเช่นเดียวกันกับงานวิจัยที่นำเสนอโดย Rana, Darji, & Pandya (2014)

วิธีการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าที่ได้รับความนิยมในการพัฒนาให้มีความถูกต้องและรวดเร็วมากยิ่งขึ้นคือการคำนวณแบบกวาดย้อนกลับและไปหน้า Bompard, Carpaneto, Chicco, & Napoli (2000) นำเสนอผลศึกษาการลู่เข้าสู่คำตอบของรหัสคำสั่งที่พัฒนาขึ้นมาจากขั้นตอนวิธีการคำนวณแบบกวาดย้อนกลับและไปหน้าสำหรับโหลดแตกต่างกันห้าระดับ ชนิดของโหลดที่นำเสนอในงานวิจัยนี้คือโหลดที่มีกำลังคงที่และแอดมิตแตนซ์คงที่ ผลจากการจำลองสรุปว่าระดับของโหลดที่มากกว่าต้องใช้จำนวนรอบของการวนซ้ำมากกว่า ในปี ค.ศ. 2011 Kocar & Lacroix (2011) ได้มีการประยุกต์วิธีการดังกล่าวนี้และนำเสนอแบบจำลองของหม้อแปลงเพื่อสร้างแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์แบบโนดตัดแปลง ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้ากับระบบทดสอบ IEEE ขนาดสี่บัส พบว่าแรงดันบัสและจำนวนรอบของการวนซ้ำมีค่าใกล้เคียงกับการประยุกต์ใช้ซอฟต์แวร์ EMTP-RV และ OpenDSS อย่างไรก็ตามผลลัพธ์ดังกล่าวนี้อาจไม่สามารถยืนยันได้กับระบบที่มีขนาดมากกว่า IEEE ขนาดสี่บัส

สำหรับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าในปัจจุบัน ความหลากหลายและความไม่แน่นอนของแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทนหรือโหลดมีระดับที่สูงขึ้น โดยเฉพาะโหลดที่เกี่ยวข้องกับยานยนต์ไฟฟ้าแบบเสียบเข้า Adusumilii & Kumar (2020) จึงนำเสนอการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบกวาดย้อนกลับ โดยเพิ่มข้อมูลรบกวนแบบแบ่งเลขคณิตสัมพรรคเข้าไปในทุกรอบของการวนซ้ำ ผลการจำลองที่ได้จากงานวิจัยนี้พบว่ามีความใกล้เคียงกับการจำลองมอนติคาร์โล ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสามารถนำไปประยุกต์สำหรับการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบอื่นที่มีการพิจารณาความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์ภายในระบบจำหน่าย

เมื่อพิจารณาจากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าวข้างต้น และสภาพความเป็นจริงของระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคในปัจจุบัน ผู้วิจัยจึงต้องการนำเสนอการสร้างแบบจำลองขององค์ประกอบในระบบจำหน่ายรัศมีไม่ได้ดุลที่มีส่วนแบ่งของโหลดยานยนต์ไฟฟ้าด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบกวาดย้อนกลับ โดยใช้รหัสคำสั่งที่พัฒนาขึ้นจากทรัพยากรของโปรแกรมไพทอน ข้อมูลของระบบทดสอบที่นำมาจำลองเพื่อศึกษาผลกระทบอันเนื่องมาจากส่วนแบ่งโหลดยานยนต์ไฟฟ้าคือระบบ 4 บัสของ IEEE ซึ่งมีรายละเอียดที่ปรากฏใน Kersting & Kerestes (2023)

## 2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อศึกษาและพัฒนาแบบจำลององค์ประกอบของระบบจำหน่ายรัศมีสามเฟสไม่ได้ดุลกับส่วนแบ่งโหลดยานยนต์ไฟฟ้า

2.2 เพื่อศึกษาขั้นตอนวิธีการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการกวาดย้อนกลับและไปหน้า และพัฒนาเป็นรหัสคำสั่งภาษาไพทอน

2.3 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของขนาดแรงดันระบบจำหน่ายรัศมีสามเฟสไม่ได้ดุลเมื่อพิจารณาระดับที่แตกต่างกันของส่วนแบ่งโหลดยานยนต์ไฟฟ้า โดยใช้รหัสคำสั่งไพทอนวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการกวาดย้อนกลับและไปหน้า

### 3. วิธีการวิจัย

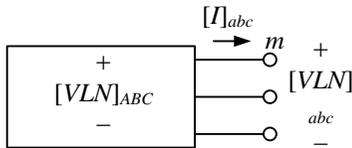
ผู้วิจัยดำเนินการวิจัยตามรายละเอียดขั้นตอนของวิธีการวิจัยดังต่อไปนี้

3.1 พัฒนาแบบจำลองในภาวะอยู่ตัวขององค์ประกอบในระบบจำหน่ายสามเฟสไม่สมดุล องค์ประกอบดังกล่าวประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิด หม้อแปลง สายป้อนจำหน่าย โหลดสายป้อน และโหลดยานยนต์ไฟฟ้าแบบเสียบเข้า โดยมีรายละเอียดของแบบจำลองดังต่อไปนี้

#### 3.1.1 แหล่งกำเนิดสามเฟส

แหล่งกำเนิดสามเฟสอาจต่อแบบวายหรือเดลตา กำหนดให้แผนภาพบล็อกของแหล่งกำเนิดแสดงในรูปที่ 3-(ก) กำหนดให้  $[B_i]$  คือเมทริกซ์อิมพีแดนซ์ภายในของแหล่งกำเนิด นิพจน์ของสมการแรงดันเฟสที่บัสปลายรับ  $m$  คือ

$$[VLN]_{abc} = [VLN]_{ABC} - [B_i] \cdot [I]_{abc} \quad (1)$$



(ก) แหล่งกำเนิด



(ข) หม้อแปลง

รูปที่ 3 แผนภาพบล็อกของแหล่งกำเนิดและหม้อแปลงสามเฟส

#### 3.1.2 หม้อแปลง

หม้อแปลงจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคทำหน้าที่ปรับแรงดันของสายส่งจากระบบส่งจ่ายของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตให้มีค่าแรงดันที่เหมาะสมสำหรับสถานีไฟฟ้าหรือผู้ใช้ไฟฟ้า กำหนดให้  $[A_i]$   $[B_i]$   $[c_i]$  และ  $[d_i]$  คือเมทริกซ์ค่าคงตัวขึ้นอยู่กับชนิดของการต่อหม้อแปลงสามเฟสที่แสดงในรูปที่ 3-(ข) รูปแบบนิพจน์ทั่วไปของสมการคำนวณกวดไปข้างหน้า และการคำนวณกวดย้อนกลับตามลำดับคือ

$$[VLN]_{abc} = [A_i] \cdot [VLN]_{ABC} - [B_i] \cdot [I]_{abc} \quad (2)$$

$$[I]_{ABC} = [c_i] \cdot [VLN]_{ABC} + [d_i] \cdot [I]_{abc} \quad (3)$$

รายละเอียดสมการคำนวณเมทริกซ์ค่าคงตัวของหม้อแปลงสามเฟสแสดงใน (Kersting & Kerestes. 2023)

ตารางที่ 1 เมทริกซ์ค่าคงตัว  $[A_i]$   $[B_i]$   $[c_i]$  และ  $[d_i]$  ของหม้อแปลงสามเฟส

ชนิดการต่อหม้อแปลง	เมทริกซ์ค่าคงตัว
$\Delta - Yg$ ลดแรงดัน	$n_t = VLL_{RatedPrimary} / VLN_{RatedSecondary}$ $[A_i] = (n_t)^{-1} \cdot [-1 \ 0 \ 1; 1 \ -1 \ 0; 0 \ 1 \ -1]$ , $[B_i] = [Zt_a \ 0 \ 0; 0 \ Zt_b \ 0; 0 \ 0 \ Zt_c]$ $[c_i] = [0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0]$ , $[d_i] = (n_t)^{-1} \cdot [1 \ -1 \ 0; 0 \ 1 \ -1; -1 \ 0 \ 1]$
$\Delta - Yg$ เพิ่มแรงดัน	$n_t = VLL_{RatedPrimary} / VLN_{RatedSecondary}$ $[A_i] = (n_t)^{-1} \cdot [1 \ 0 \ -1; 0 \ 1 \ -1; -1 \ 0 \ 1]$ , $[B_i] = [Zt_a \ 0 \ 0; 0 \ Zt_b \ 0; 0 \ 0 \ Zt_c]$ $[c_i] = [0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0]$ , $[d_i] = (n_t)^{-1} \cdot [1 \ 0 \ -1; 0 \ 1 \ -1; -1 \ 0 \ 1]$

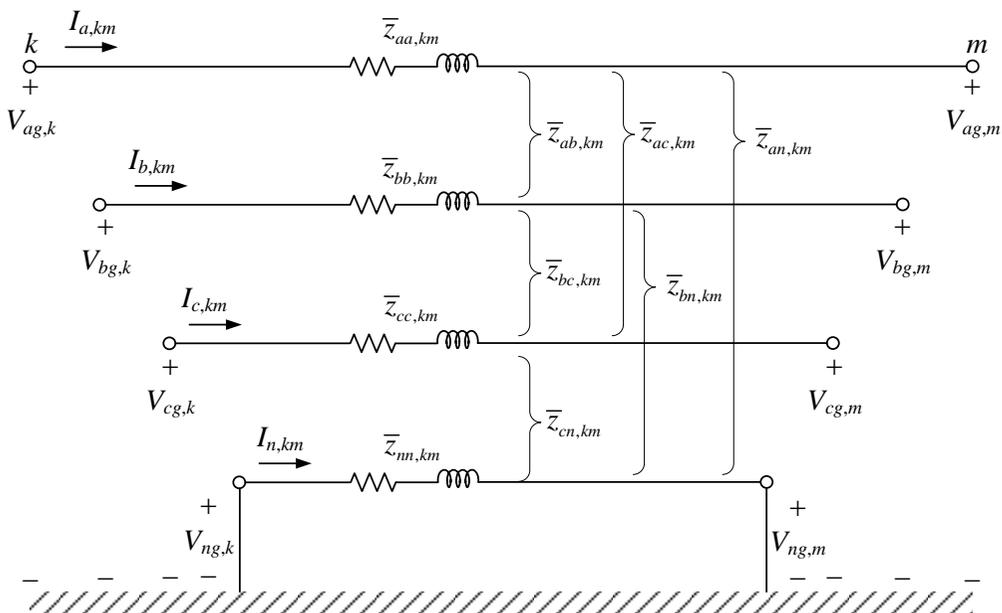
ตารางที่ 1 (ต่อ)

ชนิดการต่อหม้อแปลง	เมทริกซ์ค่าคงตัว
Y - Δ ลดแรงดัน	$n_t = VLN_{RatedPrimary}/VLL_{RatedSecondary}$ $[A_t] = (3n_t)^{-1} \cdot [2 \ 1 \ 0; 0 \ 2 \ 1; 1 \ 0 \ 2]$ $[B_t] = (9)^{-1} \cdot [2Z_{tab} + Z_{tbc} \ 2Z_{tbc} - Z_{tab} \ 0;$ $2Z_{tbc} - 2Z_{tca} \ 4Z_{tbc} - Z_{tca} \ 0;$ $Z_{tab} - 4Z_{tca} \ -Z_{tab} - 2Z_{tca} \ 0]$ $[c_t] = [0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0], [d_t] = (3n_t)^{-1} \cdot [1 \ -1 \ 0; 1 \ 2 \ 0; -2 \ -1 \ 0]$
Yg - Yg	$n_t = VLN_{RatedPrimary}/VLL_{RatedSecondary}$ $[A_t] = (n_t \cdot [1 \ 0 \ 0; 0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 1])^{-1}, [B_t] = [Z_{ta} \ 0 \ 0; 0 \ Z_{tb} \ 0; 0 \ 0 \ Z_{tc}]$ $[c_t] = [0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0], [d_t] = (n_t)^{-1} \cdot [1 \ 0 \ 0; 0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 1]$
Δ - Δ	$n_t = VLL_{RatedPrimary}/VLL_{RatedSecondary}$ $[A_t] = [W] \cdot (n_t \cdot [1 \ 0 \ 0; 0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 1])^{-1} \cdot [D_v],$ $[B_t] = [W] \cdot [Z_{ta} \ 0 \ 0; 0 \ Z_{tb} \ 0; 0 \ 0 \ Z_{tc}] \cdot [G_1]$ $[c_t] = [0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0], [d_t] = (n_t)^{-1} \cdot [1 \ 0 \ 0; 0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 1]$

3.1.3 สายป้อนจำหน่าย

ทอพอโลยีของส่วนย่อยของสายส่งพาดในอากาศสี่เส้นและนิวทรัลต่อกับกราวด์แสดงในรูปที่ 4 การคำนวณอิมพีแดนซ์อนุกรมของสายส่งพาดในอากาศจะได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นเมทริกซ์อิมพีแดนซ์ดั้งเดิม  $[z_{pri}]$  ที่มีมิติเท่ากับ  $n \times n$  โดยที่  $n$  คือจำนวนของตัวนำสายส่ง รูปแบบทั่วไปของเมทริกซ์อิมพีแดนซ์ดั้งเดิมจะมีพจน์ดังสมการที่ (4) (Grigsby, 2012)

$$[z_{pri}] = \begin{bmatrix} [\bar{z}_{ij}] & [\bar{z}_{in}] \\ [\bar{z}_{nj}] & [\bar{z}_{nm}] \end{bmatrix} \tag{4}$$



รูปที่ 4 ส่วนย่อยของสายส่งสี่เส้นนิวทรัลต่อกับกราวด์ (Kersting & Kerestes. 2023)

การวิเคราะห์ระบบจำหน่ายใช้เมทริกซ์อิมพีแดนซ์เฟสที่มีมิติ  $3 \times 3$  เมทริกซ์อิมพีแดนซ์ดั้งเดิมจะถูกลดรูปด้วยวิธีการลดแบบกรน (Kron. 1951) ดังรายละเอียดในสมการที่ (5)

$$[z_{abc}] = [\bar{z}_{ij}] - [\bar{z}_{in}][\bar{z}_{nn}]^{-1}[\bar{z}_{nj}] = \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} \end{bmatrix} \quad (5)$$

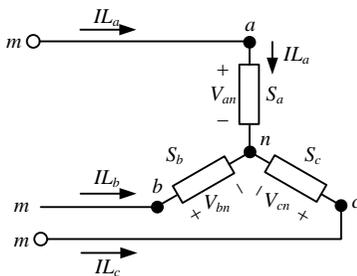
สมการที่เกี่ยวข้องกับแรงดันของบัสปลายส่ง  $k$  และบัสปลายรับ  $m$  สำหรับการคำนวณกวาดย้อนกลับและกวาดไปข้างหน้าคือ

$$[VLG]_k = [VLG]_m + [Z_{abc}] \cdot [I_{abc}] \quad (6)$$

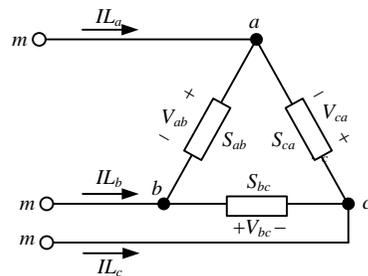
เมื่อ  $[VLG]$ ,  $[VLG]_m$  คือแรงดันเฟสเทียบกับกราวด์ของบัสปลายส่ง  $k$  และบัสปลายรับ  $m$  ตามลำดับ  $[Z_{abc}]$  คือเมทริกซ์อิมพีแดนซ์ และ  $[I_{abc}]$  เวกเตอร์ของกระแสที่ไหลในส่วนย่อยของสายส่ง

### 3.1.4 โหลดสายป้อน

เมื่ออ้างอิงตามลักษณะที่โหลดต่อกับสายป้อนอาจจำแนกโหลดได้สองชนิดคือโหลดแบบจุดและแบบกระจาย ทอพอโลยีการต่อของโหลดสามเฟสมีสองรูปแบบคือวายและเดลตามีแสดงในรูปที่ 5 แบบจำลองของโหลดมีสามแบบจำลองคือกำลังจริงและรีแอกทีฟคงที่ กระแสคงที่ อิมพีแดนซ์คงที่ หรือแบบผสม รายละเอียดของสมการและขั้นตอนการคำนวณที่เกี่ยวข้องกับโหลดสามชนิดแสดงในตารางที่ (Kersting & Kerestes. 2023)



(ก) วาย



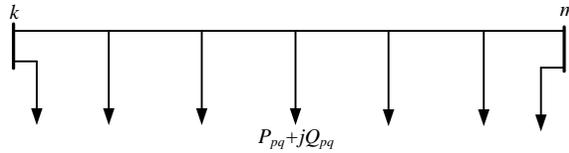
(ข) เดลตา

## รูปที่ 5 ทอพอโลยีโหลดสามเฟส

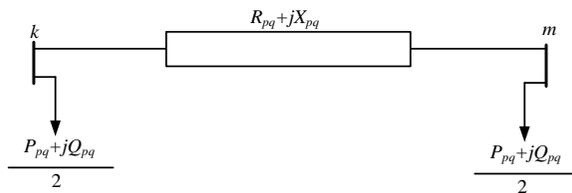
ตารางที่ 2 ขั้นตอนและสมการคำนวณของโหลด 3 แบบจำลอง

แบบจำลองโหลด	ขั้นตอนและสมการคำนวณกระแส
กำลังจริงและรีแอกทีฟคงที่	วาย : $[IL]_{abc} = ([S]_{abc}/[Vn]_{abc})^*$ , เดลตา : $[IL]_{abc} = ([S]_{abc}/[V]_{abc})^*$
กระแสคงที่	วายและเดลตา $[\theta]_{abc} = \cos^{-1}([P]_{abc}/ [S]_{abc} )$ , $[IL]_{abc} =  [IL]_{abc}  \angle ([\theta]_{abc} - [\theta]_{abc})$
อิมพีแดนซ์คงที่	วาย: $[Z]_{abc} =  [Vn]_{abc} ^2/([S]_{abc})^*$ , $[IL]_{abc} = [Vn]_{abc}/[Z]_{abc}$ เดลตา: $[Z]_{abc} =  [V]_{abc} ^2/([S]_{abc})^*$ , $[IL]_{abc} = [V]_{abc}/[Z]_{abc}$

กรณีของโหลดแบบกระจายจะมีค่าสม่ำเสมอตลอดระยะเวลาความยาวของสายป้อนดังแสดงในรูปที่ 6(ก) การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าต้องเปลี่ยนแปลงให้เป็นโหลดแบบจุด โดยเปลี่ยนค่ากำลังเชิงซ้อนของโหลดและย้ายไปเชื่อมต่อที่ปลายส่ง  $k$  และปลายรับ  $m$  บัลละ 0.5 เท่าของโหลดค่าเดิม ดังแสดงในรูปที่ 6(ข)



(ก) โหลดกระจายสม่ำเสมอตลอดระยะเวลาความยาวของสายป้อน



(ข) โหลดกระจายสมมูลถูกย้ายไปที่ปลายส่งและปลายรับของสายป้อน

รูปที่ 6 ทอพอโลยีโหลดแบบกระจาย

3.1.5 โหลดยานยนต์ไฟฟ้า

การต่อยานยนต์ไฟฟ้าแบบเสียบเข้า กับระบบจำหน่ายเพื่ออัดประจุแบตเตอรี่ของยานยนต์เป็นเหตุการณ์ที่ไม่สามารถพยากรณ์ล่วงหน้าได้ ตัวอย่างของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับโหลดยานยนต์ไฟฟ้าแบบเสียบเข้า เช่น จำนวนยานยนต์ไฟฟ้าแบบเสียบเข้าที่อัดประจุ เวลาเริ่มต้นและสิ้นสุดการหยุดอัดประจุ กำลังไฟฟ้าของการอัดประจุ เป็นต้น ดังนั้นการพยากรณ์โหลดอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้าแบบเสียบเข้าจึงเป็นปัญหาที่สำคัญของการวางแผนสำหรับระบบจำหน่าย (Tian et al. 2022) การจำลองโหลดยานยนต์ไฟฟ้าแบบเสียบเข้า สำหรับงานวิจัยนี้ จะเป็นการสุ่มค่าของพารามิเตอร์โดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นแบบการแจกแจงปกติ  $f(x)$  ดังนี้

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \tag{7}$$

เมื่อ  $\sigma$  คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน  $\mu$  คือค่ามัธยฐาน และ  $x$  คือค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการทราบความน่าจะเป็นพารามิเตอร์ของโหลดยานยนต์ไฟฟ้าแบบเสียบเข้าที่ต้องคำนวณหาจากฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นแบบการแจกแจงปกติดังต่อไปนี้

- ก) จำนวนยานยนต์ไฟฟ้าแบบเสียบเข้า ที่ต่อกับระบบจำหน่ายอัดประจุ (NV) กำหนดให้  $n = 1, 2, 3, \dots, NV$
- ข) กำลังอัดประจุของยานยนต์ไฟฟ้าแบบเสียบเข้าคันที่  $n$  ( $Pch_n$ )
- ค) เวลาเริ่มต้นอัดประจุของยานยนต์ไฟฟ้าแบบเสียบเข้า คันที่  $n$  ( $Tst_n$ )
- ง) เวลาหยุดอัดประจุของยานยนต์ไฟฟ้าแบบเสียบเข้า คันที่  $n$  ( $Tfn_n$ )

จากพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากข้อ ก)-ง) สามารถคำนวณหาโหลดอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้าแบบเสียบเข้าได้จากสมการที่ (8)

$$P_{EV} = \sum_{n=1}^{NV} Pch_n \quad (8)$$

3.2 เขียนรหัสคำสั่งของไพทอนสำหรับวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีกวาดย้อนกลับและไปหน้า ซึ่งเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากสำหรับการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายแบบรัศมีสามเฟสไม่ได้ดูล ชั้นตอนวิธีดังกล่าวนี้ถูกดัดแปลงมาจากชั้นตอนวิธีเกาส์-ไซเดลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและเสถียรภาพของการลู่อู่เข้าสู่ค่าตอบที่ถูกต้อง ชั้นตอนกวาดวิธีย้อนกลับและไปหน้ามีรายละเอียดดังต่อไปนี้ (Adusumilii & Kumar, 2020)

- 1) กำหนดค่าเริ่มต้นของขนาดและเฟสของแรงดันบัส โดยทั่วไปนิยมกำหนดให้มีค่าเท่ากับ  $1.0 \angle 0^\circ$  pu
- 2) ชั้นตอนการคำนวณกวาดย้อนกลับ

ชั้นตอนนี้จะเป็นการคำนวณกระแสที่บัส ( $I_i$ ) ปล่อยให้ไหลด้วยสมการที่ (9) โดยที่  $i = 2, 3, 4, \dots, N$ ,  $[P]_{abc,i}$  และ  $[Q]_{abc,i}$  คือกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่บัส  $i$  ปล่อยให้ไหลตามลำดับ

$$[I]_{abc,i} = \left\{ \left( [P]_{abc,i} + j[Q]_{abc,i} \right) / [V]_{abc,i} \right\}^* \quad (9)$$

คำนวณกระแสกึ่ง  $[Ibr]_{abc,l}$  ของสายส่งส่วนที่  $l$  ซึ่งต่อบัส  $k$  และ  $m$  ด้วยสมการที่ (10) โดยที่  $M$  คือเซตของกิ่งที่ต่อกับบัส  $m$  และอยู่ด้านหลังบัส  $m$

$$[Ibr]_{abc,l} = [I]_{abc,n} + \sum_{p \in M} [Ibr]_p \quad (10)$$

- 3) ชั้นตอนการคำนวณกวาดไปหน้า:

หลังจากปรับปรุงค่ากระแสที่กิ่ง ( $[Ibr]_{abc,l}$ ) ด้วยชั้นตอนการคำนวณกวาดย้อนกลับแล้ว ชั้นตอนนี้จะเป็นการคำนวณแรงดันบัสกวาดไปหน้าด้วยสมการที่ (10) กำหนดให้  $k = 1, 2, 3, \dots, N$  และ  $m = 2, 3, 4, \dots, N$

$$[V]_{abc,m} = [V]_{abc,k} - [Z]_{abc,km} \cdot [Ibr]_{abc,p} \quad (11)$$

4) ตรวจสอบผลต่างของขนาดและมุมเฟสของแรงดันบัสด้วยสมการที่ (12) หากผลต่างในรอบปัจจุบัน ( $\varepsilon_{q+1}$ ) มีค่ามากกว่าความคลาดเคลื่อนยินยอมในรอบที่ผ่านมาหนึ่งรอบ ( $\varepsilon_q$ ) ให้ย้อนกลับไปชั้นตอนที่ 2) แต่หากมีค่าน้อยกว่าให้สิ้นสุดการคำนวณ

$$\varepsilon_{mag,q+1} = \max \left( \frac{[V]_{abc,q+1} - [V]_{abc,q}}{[V]_{abc,q}} \right) \times 100\% \quad (12)$$

$$\varepsilon_{arg,q+1} = \max \left( \frac{\angle [V]_{abc,q+1} - \angle [V]_{abc,q}}{\angle [V]_{abc,q}} \right) \times 100\% \quad (13)$$

$$\varepsilon_{q+1} = \max (\varepsilon_{mag}, \varepsilon_{arg}) \times 100\% \quad (14)$$

กำหนดให้  $\mathcal{E}_{mag}$  คือความคลาดเคลื่อนของขนาดแรงดัน  $\mathcal{E}_{arg}$  คือความคลาดเคลื่อนของเฟสแรงดัน และ  $q$  คือเลขที่ของการคำนวณซ้ำ

5) คำนวณกำลังสูญเสียในสายส่งด้วยสมการที่(15)พร้อมทั้งแสดงผลกำลังสูญเสียของสายส่งและแรงดันบัส

$$P_l = [Rbr]_{abc,l} \cdot \left( [Ibr]_{abc,l} \right)^2 \quad (15)$$

กำหนดให้  $[Rbr]_{abc,l}$  คือความต้านทานของสายส่งส่วนที่  $l$

3.3 แสดงผลการจำลองในรูปแบบของขนาดแรงดัน  $N_{sample}$  กรณี

#### 4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการศึกษาและพัฒนาแบบจำลององค์ประกอบของระบบจำหน่ายรัศมีที่ไม่สมดุลกับส่วนแบ่งโหลดยานยนต์ไฟฟ้า

ผลการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองถูกนำมาประยุกต์ใช้กับข้อมูลของระบบจำหน่าย IEEE ขนาดสี่บัส ซึ่งมีข้อมูลของสถานีไฟฟ้าย่อย สายส่ง และโหลดดังแสดงใน

ตารางที่ (Kersting & Kerestes. 2023) การคำนวณหาโหลด PEVs แบบสุ่มค่าโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นสำหรับการแจกแจงปกติในสมการที่ (7) ค่าเฉลี่ย ( $\mu$ ) ของโหลดคือ 1.225 kW และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ( $\sigma$ ) คือ 130.30 W ผลลัพธ์ของจำนวนข้อมูลและการจำลองเพื่อวิเคราะห์หาแรงดันบัสที่ 3 – 4 ซึ่งมีความอ่อนไหวมากที่สุดเท่ากับ 24,001 ตัวอย่าง

ตารางที่ 3 ข้อมูลระบบจำหน่าย IEEE ขนาดสี่บัส

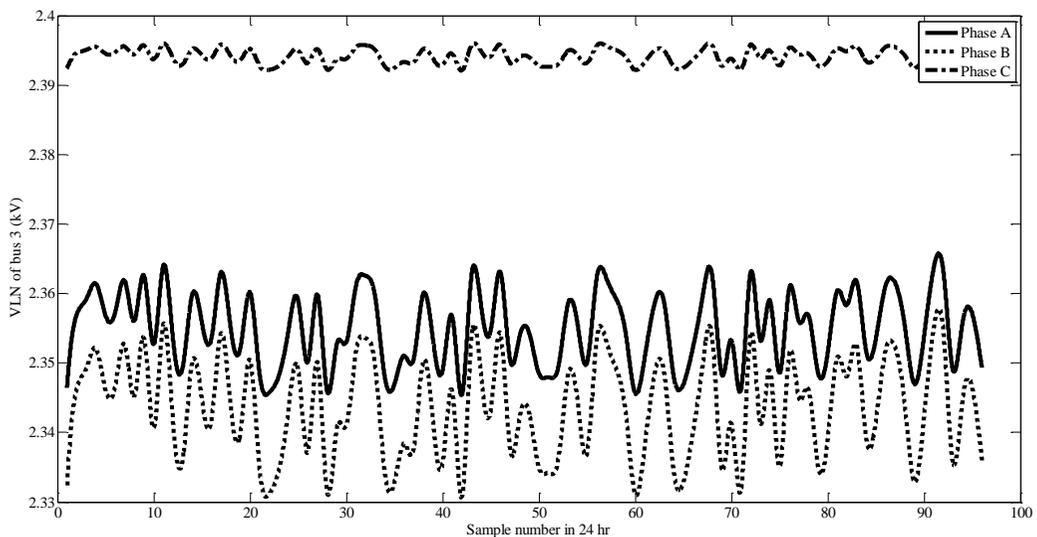
บัสอนันต์				
บัส	แรงดัน (kV <sub>L</sub> )			
1	12.47			
หม้อแปลง				
บัส ปลายส่ง	บัส ปลายรับ	กำลังปรากฏ (MVA)	แรงดัน (kV <sub>L</sub> ) (Δ/Yg)	อิมพีแดนซ์ (pu)
2	3	6	12.47/4.16	0.01+j 0.06
สายส่ง				
บัสปลายส่ง	บัส ปลายรับ	อิมพีแดนซ์ (Ω)		
1	2	[0.1520+j0.5353 0.0361+j0.3225 0.0361+j0.2752; 0.0361+j0.3225 0.1520+j0.5353 0.0361+j0.2955; 0.0361+j0.2752 0.0361+j0.2955 0.1520+j0.5353]		
3	4	[0.2166+j0.5140 0.0738+j0.2375 0.0727+j0.1823; 0.0738+j0.2375 0.2209+j0.4963 0.0748+j0.2006; 0.0727+j0.1823 0.0748+j0.2006 0.2185+j0.5043]		
โหลด				

## ตารางที่ 3 (ต่อ)

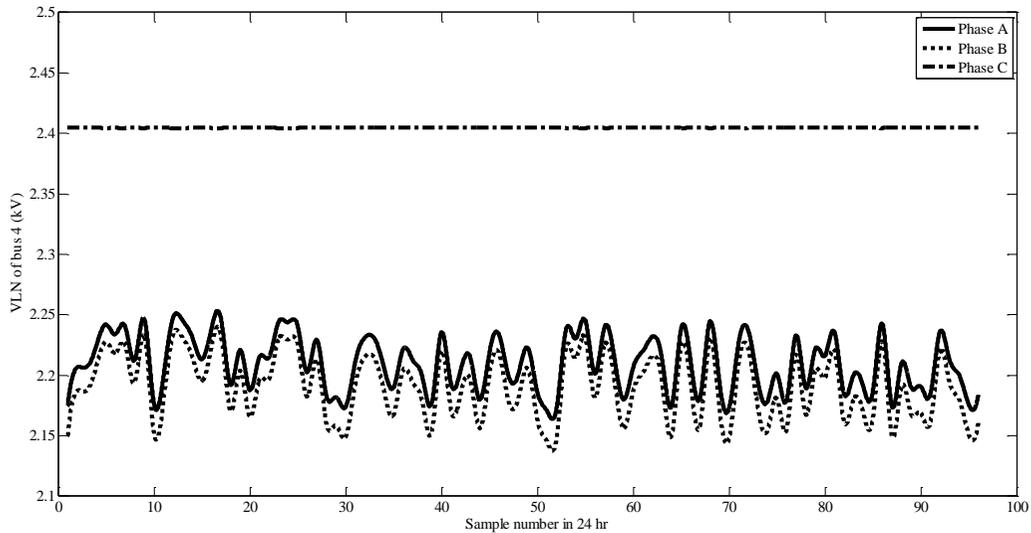
บัส	กำลังเชิงซ้อน (kVA)	ชนิดของโหลด	ทอพอโลยีของการต่อ
4	$[-637.50 + j395.09;$ $-810.00 + j392.30;$ $-1045.0 + j343.48]$	PQ คงที่	Y

4.2 ผลการพัฒนารหัสคำสั่งภาษาไพทอนสำหรับการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยขั้นตอนวิธีวิถีกวาดย้อนกลับและไปหน้า คือไฟล์รหัสคำสั่งภาษาไพทอนทั้งหมดสำหรับการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยขั้นตอนวิธีกวาดย้อนกลับและไปหน้า ถูกเก็บรวบรวมไว้ในลิงค์ <https://shorturl.at/jwxzO>

4.3 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของขนาดแรงดันระบบจำหน่ายรัศมีสามเฟสไม่ได้ดูเฉพาะเมื่อพิจารณาระดับที่แตกต่างกันของส่วนแบ่งโหลดยานยนต์ไฟฟ้า โดยใช้รหัสคำสั่งไพทอนวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีกวาดย้อนกลับและไปหน้า พบว่าบัสที่ 3 - 4 ถูกเลือกแสดงผลแรงดันเพราะมีความอ่อนไหวมากที่สุด ผลการจำลองการวิเคราะห์หาแรงดันจากโหลด 24,001 ตัวอย่างพบว่ากรณีที่ขนาดของแรงดันมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดสำหรับบัสที่ 3 แสดงในรูปที่ 7 ส่วนแรงดันของบัสที่ 4 แสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันบัสที่ 3



รูปที่ 8 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันบัสที่ 4

## 5. อภิปรายผลและสรุป

ผลการวิจัยนี้เป็นการพัฒนาจากการวิเคราะห์การไหลกำลังไฟฟ้าระบบจำหน่ายรัศมีไม่ได้ดูล IEEE ขนาดสี่บัสของ Kersting & Kerestes (2023) ซึ่งไม่มีการพิจารณาความน่าจะเป็นของโหนดยานยนต์ไฟฟ้า ดังนั้นการจำลองโหนดด้วยทฤษฎีความน่าจะเป็นสำหรับกลุ่มตัวอย่างที่มีจำนวนมากเพียงพอจึงเป็นการวิเคราะห์ที่ให้ผลลัพธ์แม่นยำมากกว่า Kersting & Kerestes (2023) ปัญหาของการพัฒนาเครื่องมือจำลองคือความยุ่งยากของการเขียนรหัสคำสั่ง และระยะเวลาในการจำลองที่มีมากกว่ากรณีปกติ ดังนั้นรหัสคำสั่งภาษาไพทอนเป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดเพราะสามารถดำเนินการรหัสคำสั่งได้หลายชุดพร้อมกันบนเบราร์เซอร์

ผลจากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของขนาดแรงดันระบบจำหน่ายรัศมีสามเฟสไม่ได้ดูลเมื่อพิจารณาระดับที่แตกต่างกันของส่วนแบ่งโหนดยานยนต์ไฟฟ้าสำหรับระบบจำหน่าย IEEE ขนาดสี่บัส โดยใช้รหัสคำสั่งไพทอนวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีกวาดย้อนกลับและไปหน้า ได้ผลลัพธ์ของสัญญาณแรงดันดังแสดงในรูปที่ 7 และรูปที่ 8 ระดับความไม่ได้ดูลของแรงดันสามเฟสจะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนแบ่งโหนดยานยนต์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะบัสที่มีความอ่อนแอมากที่สุดจะมีการเปลี่ยนแปลงของความไม่ได้ดูลและขนาดของแรงดันมากที่สุด

ดังนั้นผลจากการวิจัยจึงสามารถสรุปได้ว่า ระบบจำหน่ายสามเฟสไม่ได้ดูลมีผลตอบสนองโดยตรงต่อส่วนแบ่งโหนดยานยนต์ไฟฟ้าแบบเสียบเข้า โดยเฉพาะบัสที่อยู่ห่างจากสถานีไฟฟ้าย่อยมากที่สุดจะมีระดับของแรงดันจะที่อ่อนแอมากที่สุด จากการจำลองของงานวิจัยนี้บ่งชี้ชัดเจนว่าระดับของแรงดันบัสจะเปลี่ยนแปลงเมื่อส่วนแบ่งโหนดยานยนต์ไฟฟ้าแบบเสียบเข้ามีการเปลี่ยนแปลง และความไม่ได้ดูลของแรงดันสามเฟสแปรผันตรงกับส่วนแบ่งโหนดยานยนต์ไฟฟ้าแบบเสียบเข้าที่ไม่มีการควบคุมให้เหมาะสมที่สุด

## 6. ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบจำหน่ายรัศมีสามเฟสไม่ได้ดูลเมื่อพิจารณาระดับที่แตกต่างกันของส่วนแบ่งโหนดยานยนต์ไฟฟ้า ควรพัฒนาขั้นตอนวิธีหรือเทคนิคที่ช่วยให้การดำเนินงานของรหัสคำสั่งวนรอบซ้ำเพื่อสุ่มค่าโหนดด้วยฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นมีความรวดเร็วมากยิ่งขึ้น

## 7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะและยานยนต์ไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี

### เอกสารอ้างอิง

- Adusumilii, B. S., & Kumar, B. K. (2020). **Backward/forward sweep based power flow analysis of distribution systems under uncertainty using new affine arithmetic division**. Paper presented at the 2020 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT).
- Bompard, E., Carpaneto, E., Chicco, G., & Napoli, R. (2000). “Convergence of the backward/forward sweep method for the load-flow analysis of radial distribution systems”. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**. 22(7) : 521-530.
- Das, D., Kothari, D., & Kalam, A. (1995). “Simple and efficient method for load flow solution of radial distribution networks”. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**. 17(5) : 335-346.
- Grigsby, L. L. (2012). **Electric power generation, transmission, and distribution**. 3<sup>ed</sup>. Taylor & Francis Group, LLC.
- Kersting, W. H., & Kerestes, R. J. (2023). **Distribution system modeling and analysis with MATLAB and WindMil**. Florida: CRC Press.
- Kocar, I., & Lacroix, J.-S. (2011). “Implementation of a modified augmented nodal analysis based transformer model into the backward forward sweep solver”. **IEEE Transactions on Power Systems**. 27(2) : 663-670.
- Kron, G. (1951). “Tensorial Analysis of Integrated Transmission Systems Part I. The Six Basic Reference Frames”. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**. 70(2) : 1239-1248.
- Mishra, S., & Das, D. (2008). **Distribution system load flow methods: a review**. Icfai Univ. J. Electr. Electron. Eng. I, 2.
- Rana, A., Darji, J., & Pandya, M. (2014). “Backward/forward sweep load flow algorithm for radial distribution system”. **International journal for scientific research and development**. 2(1) : 398-400.
- Shirmohammadi, D., Hong, H. W., Semlyen, A., & Luo, G. X. (1988). “A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks”. **IEEE Transactions on Power Systems**. 3(2) : 753-762.
- Tian, J., Lv, Y., Zhao, Q., Gong, Y., Li, C., Ding, H., & Yu, Y. (2022). “Electric vehicle charging load prediction considering the orderly charging”. **Energy Reports**. 8 : 124-134.