

## การประยุกต์ใช้เทคนิคการไหลของไหลในระบบจำหน่ายไฟฟ้า เพื่อวางแผนบริการระบบจำหน่ายไฟฟ้าทุกติยภูมิ

ธวัช เกิดขึ้น ประเสริฐ เตือนหมื่นไวย วุฒิชัย สง่างาม และมงคล คำนับรุ่งตระกูล  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
744 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 e-mail: thawatch.ke@rmuti.ac.th

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้เทคนิคการคำนวณการไหลของไหลในระบบจำหน่ายไฟฟ้า เพื่อวางแผนการให้บริการระบบจำหน่ายไฟฟ้าทุกติยภูมิ เทคนิคการแพร่กระจายถอยหลัง-เดินหน้าเพื่อการวิเคราะห์การไหลของไหลถูกประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์หาระดับแรงดันที่แต่ละ โหนด กระแสของมาตรวัดพลังงานไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าถูกใช้เป็นโหลดสำหรับการแพร่กระจายถอยหลัง ระดับแรงดันที่ได้แต่ละ โหนด หรือแต่ละเสาไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าทุกติยภูมิเป็นคำตอบที่ได้ช่วงการแพร่กระจายเดินหน้า จากการทดลองพบว่าเทคนิคการแพร่กระจายถอยหลัง-เดินหน้า สามารถให้คำตอบที่ดีต่อการวางแผนของผู้ให้บริการไฟฟ้า ส่งผลให้ผู้ให้บริการไฟฟ้าสามารถตัดสินใจในการให้บริการไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: การไหลของไหลในระบบจำหน่าย, การแพร่กระจายถอยหลัง-เดินหน้า

### 1. บทนำ

การให้บริการไฟฟ้าแก่ผู้ใช้ไฟฟ้าทุกติยภูมิต้องคำนึงถึงระดับแรงดันที่อยู่ในระดับที่ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าสามารถทำงานได้อย่างปลอดภัย การวางแผนให้บริการระบบไฟฟ้าทุกติยภูมิของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคในปัจจุบันใช้ระยะห่างจากหม้อแปลงจำหน่ายเป็นตัวกำหนด แต่เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าและโหลดทางไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าไม่เป็นตามที่ต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้า โดยเฉพาะผู้ใช้ไฟฟ้าที่อยู่ไกลจากหม้อแปลงไฟฟ้าจำหน่ายนั้นอาจต้องเจอกับสถานะแรงดันที่ต่ำมาก

การวิเคราะห์การไหลของไหลในระบบจำหน่ายเป็นการวิเคราะห์เมื่อโหลดไม่สมดุล การวิเคราะห์ลักษณะนี้ต่างจากการวิเคราะห์ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าที่พิจารณาเป็นโหลดสมดุล ถึงแม้ว่าตามสภาพของโหลดอาจขึ้นอยู่กับขนาดแรงดัน หรืออาจต้องการกำลังไฟฟ้าคงที่ แต่การศึกษาการไหลของไหลในระบบจำหน่ายพิจารณาโหลดได้หลายรูปแบบ อาทิ โหลดกำลังคงที่ อิมพีแดนซ์คงที่ และกระแสคงที่เป็นต้น โดยทั่วไปการคำนวณการไหลของไหลเป็นการคำนวณของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ระบบจำหน่ายส่วนใหญ่เป็นระบบเบรเดิลจะทำให้การคำนวณการไหลของไหลวิธีทั่วไปอย่างนิวตันราฟตัน นั้นมีการเข้าสู่คำตอบได้ยาก [1] วิธีการแพร่กระจายถอยหลัง-เดินหน้า (Backward-forward propagations) [2-7] จึงได้รับความนิยมมากกว่า เพราะวิธีการ

นี้ไม่ต้องการเมทริก แต่จะใช้วิธีการวนซ้ำของแพร่กระจายถอยหลัง-เดินหน้า เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันตาม KCL และ KVL เราก็จะได้คำตอบเป็นแรงดันที่แต่ละโหนดได้ นอกจากนี้ถ้าหากพิจารณาว่าโหลดมีกระแสคงที่ การวิเคราะห์ก็ยิ่งสะดวกขึ้นไปอีก ทำให้การศึกษานั้นสะดวกและรวดเร็ว

บทความนี้เน้นการศึกษาให้โหลดทางไฟฟ้าเป็นแบบกระแสคงที่ ทั้งนี้เพื่อความสัมพันธ์กับขนาดของมาตรวัดพลังงานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค หรือแม้แต่ในการไฟฟ้านครหลวงก็ตาม กระแสไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละรายส่วนใหญ่แล้วเป็นระบบ 1 เฟส ซึ่งทำให้การวิเคราะห์การไหลของโหลดเป็นแบบไม่สมดุล วิธีการวิเคราะห์เริ่มจากการแพร่กระจายถอยหลัง โดยกระแสไฟฟ้าจะถูกเก็บเป็นข้อมูลกระแสไฟฟ้าในสายจำหน่ายของระบบในแต่ละช่วงเสา ต่อจากนั้นจึงเป็นการแพร่กระจายเดินหน้า จากข้อมูลกระแสไฟฟ้าในแต่ละช่วงเสาทำให้หาค่าแรงดันในแต่ละโหนดได้ คำตอบของการศึกษานี้คือขนาดแรงดันของแต่ละโหนด หรือแต่ละเสานั้นเอง ระดับแรงดันไฟฟ้านี้สามารถเป็นข้อมูลให้ผู้บริหารไฟฟ้า หรือการไฟฟ้าฯตัดสินใจว่าจะให้บริการผู้ใช้ไฟฟ้าอย่างไร ยกตัวอย่างเช่น เลือกเฟสที่จะติดตั้งมาตรวัดพลังงานรายใหม่ ติดตั้งสายจำหน่ายทุกขุมมิเพิ่มเติม หรือ เปลี่ยนขนาดหม้อแปลงไฟฟ้า เป็นต้น

## 2. การศึกษาการไหลของโหลดแบบแพร่กระจายถอยหลัง-เดินหน้า

การคำนวณกระแสในสายจะเริ่มจากกระแสที่โหนดใดๆ จะมีค่าเป็น [1, 8]

$$\mathbf{I}_i^k = \left( \frac{\mathbf{S}_i}{\mathbf{V}_i^{(k-1)}} \right)^* - \mathbf{Y}_i \mathbf{V}_i^{(k-1)} \quad (1)$$

เมื่อ  $\mathbf{S}_i$  เป็นกำลังที่โหนด  $i$  ( $\mathbf{S}_i = P_i \pm jQ_i$ )

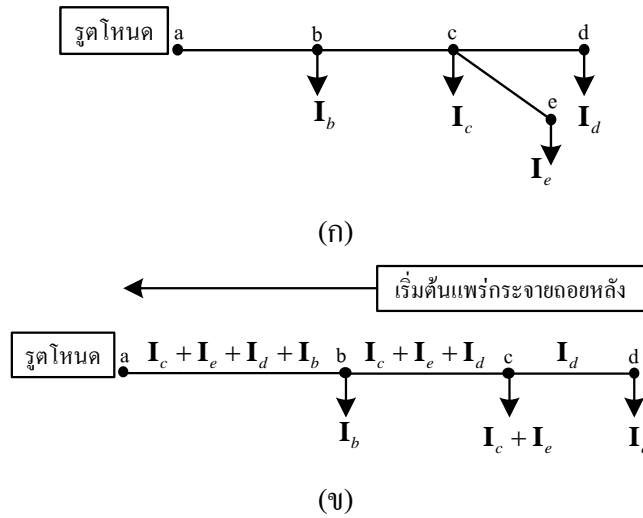
$\mathbf{Y}_i$  เป็นผลรวมของแอดมิตแตนซ์ส่วนลงดินทั้งหมดที่โหนด  $i$  และ

$\mathbf{V}_i^{(k-1)}$  เป็นแรงดันที่โหนด  $i$  ณ รอบคำนวณที่  $k-1$

การคำนวณกระแสเริ่มจากให้ขนาดแรงดันเป็น 1 pu. และมุมแรงดันเป็นศูนย์ ที่ทุกๆ โหนด การคำนวณกระแสในสายเริ่มจากการคำนวณที่เรียกว่าการแพร่กระจายถอยหลัง โดยในรอบคำนวณที่  $k$  จะคำนวณกระแส  $\mathbf{J}$  ในสายที่สุดท้าย จนกระทั่งเข้าสู่รูตโหนด (Root node) หรือรูตบัส (Root bus) โดยกระแสที่สาย  $L$  หาได้จาก

$$\mathbf{J}_L^k = -\mathbf{I}_{L2}^k + \sum (\text{กระแสในสายที่พุ่งมาจากโหนด } L2) \quad (2)$$

กระแสในสายดังสมการที่ (2) อาจเขียนเป็นรูปภาพได้ดังรูปที่ 1 โดยกระแสจะถูกเริ่มหาจากปลายสายดังรูปที่ 1 (จ)



รูปที่ 1 กระแสในสายส่ง (ก) ตัวอย่างระบบไฟฟ้าแบบเรเดียล  
(ข) ค่ากระแสในสายส่งแต่ละช่วง

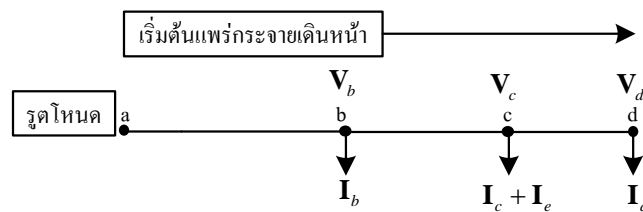
การคำนวณแรงดันจะมีลักษณะการแพร่กระจายแบบเดินทาง เริ่มต้นจากบัสอ้างอิง หรือรูดโหนด โดยที่ค่าแรงดันกำหนดให้มีค่าคงที่และมุมเฟสเป็นศูนย์ ส่วนค่าแรงดันและมุมเฟสของแรงดันที่บัสอื่นๆ ถัดไปจากบัสอ้างอิงในรอบคำนวณที่  $k$  จะถูกคำนวณค่าแรงดันที่บัส เรื่อยไปสู่อบัสสุดท้ายด้วยสมการที่ 3

$$\mathbf{V}_{L2}^{(k)} = \mathbf{V}_{L1}^{(k)} - \mathbf{Z}_L \mathbf{J}_L^{(k)} \quad (3)$$

เมื่อ

- $\mathbf{Z}_L$  ค่าอิมพีแดนซ์อนุกรมของสายส่งช่วง  $L$  ระหว่างโหนด  $L2$  และ  $L1$
- $L2$  เป็นโหนดปลายทาง และ
- $L1$  เป็นโหนดต้นทาง

การแพร่กระจายเดินทางของแรงดันแสดงได้ในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การคำนวณค่าแรงดันโหนดแบบเดินทาง

การคำนวณค่ากระแสแบบแพร่กระจายถอยหลังและการคำนวณค่าแรงดันแบบการแพร่กระจายเดินหน้า จะกระทำในลักษณะวนซ้ำ ในแต่ละรอบการคำนวณจะตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันที่พอยอมรับได้ (mismatch) ของค่าแรงดันในแต่ละบัสดังแสดงในสมการที่ 4

$$\Delta \mathbf{V}_j^k = \mathbf{V}_j^k - \mathbf{V}_j^{k-1} \quad (4)$$

เมื่อ

$\Delta \mathbf{V}_j^k$  เป็นค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันที่พอยอมรับได้ที่บัส  $j$  หลังจากการคำนวณในรอบที่  $k$   $\mathbf{V}_j^k$  และ  $\mathbf{V}_j^{k-1}$  เป็นแรงดันที่บัส  $j$  ในรอบการคำนวณที่  $k$  และ  $k-1$  ตามลำดับ

หรือการเข้าสู่คำตอบของแรงดันอาจตรวจสอบได้จากผลต่างของค่าอื่นๆ ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} |\operatorname{Re}(\Delta \mathbf{V}_j^k)| &\leq \varepsilon \\ |\operatorname{Im}(\Delta \mathbf{V}_j^k)| &\leq \varepsilon \\ |\Delta \mathbf{V}_j^k| &\leq \varepsilon \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

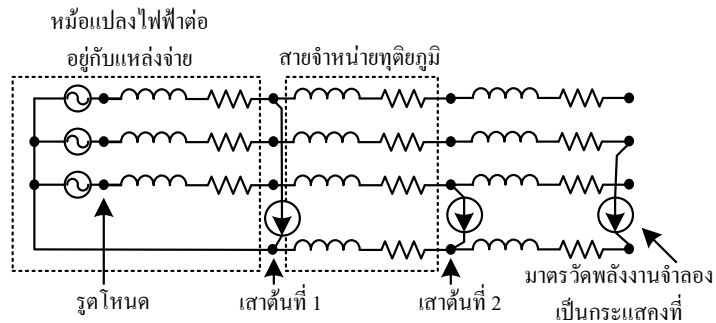
เมื่อ

$\varepsilon$  เป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่พอยอมรับได้

ค่าแรงดันที่บัสต่างๆที่เป็นคำตอบนั้นจะได้ออกมาจากการคำนวณในรอบที่สุดท้าย ซึ่งรอบสุดท้ายนี้จะเกิดขึ้นเมื่อผลต่างของแรงดันทุกๆ บัส มีค่าต่ำกว่าหรือเท่ากับค่าความคลาดเคลื่อนที่พอยอมรับที่กำหนด และค่ากระแสในแต่ละสาขาสามารถคำนวณค่าได้จากสมการที่ (2)

### 3. การประยุกต์ใช้วิธีการแพร่กระจายถอยหลัง-เดินหน้าต่อระบบจำหน่ายทุติยภูมิ

ระบบจำหน่ายทุติยภูมิในประเทศไทยมีระดับแรงดันเป็น 220 โวลต์ ผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละรายควรได้รับแรงดันที่ระดับดังกล่าว หรือใกล้เคียง การติดตั้งมาตรวัดพลังงานให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละรายมิได้กระทำโดยคำนึงถึงระดับแรงดันอย่างถี่ถ้วน ดังนั้นเวลาที่มีผู้ใช้ไฟฟ้าหลายรายพร้อมๆกันจึงส่งผลต่อระดับแรงดัน ถ้าหากมีการวางแผนก่อนการติดตั้งมาตรวัดพลังงานก็น่าจะทำให้ผู้ให้บริการไฟฟ้าทราบถึงผลที่เกิดขึ้นต่อผู้ใช้ไฟฟ้าได้ ตัวอย่างระบบไฟฟ้าทุติยภูมิจำลองแสดงได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าทุติยภูมิ

จากรูปที่ 3 รูตโหนดเป็นจุดที่หม้อแปลงไฟฟ้าต่ออยู่กับแหล่งจ่ายไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ 22 กิโลโวลต์ แต่ที่จุดนี้จะกำหนดให้เป็นแรงดันอ้างอิง คือ 230 โวลต์ มุมแรงดันเป็น 0 (เฟส A) ซึ่งเป็นขนาดแรงดันที่ขั้วหม้อแปลง ขณะไม่มีโหลดเมื่อย้ายค่ามาด้านทุติยภูมิ สายจำหน่ายทุติยภูมิปกติแล้วเป็นชนิดอลูมิเนียม THW-A เดินในอากาศ มาตรฐานวัดพลังงานอาจมีขนาดแตกต่างกันไป อาทิ 5(15), 15(45), 30(100) A เป็นต้น ขนาดกระแสไฟฟ้าของมาตรฐานวัดพลังงานนี้จะเป็นตัวกำหนดกระแสไฟฟ้าให้กับการคำนวณแบบแพร่กระจายถอยหลัง-เดินหน้านั่นเอง

ลำดับขั้นการคำนวณแพร่กระจายถอยหลัง-เดินหน้าสำหรับระบบจำหน่ายทุติยภูมิเป็นดังต่อไปนี้

- ขั้นที่ 1 ให้กระแสไฟฟ้าเข้าบ้านแต่ละหลังเป็น 80% ของกระแสพิกัดมาตรฐานวัดพลังงาน ที่ตัวประกอบกำลัง 0.80 ล้าหลัง (อ้างอิงที่รูตโหนด)
- ขั้นที่ 2 หาค่ากระแสในสายของแต่ละช่วงเสาของทุกเฟส ตาม KCL รวมทั้งกระแสในสายนิวทรัลด้วย ช่วงนี้เรียกว่าการแพร่กระจายถอยหลัง
- ขั้นที่ 3 หาค่าแรงดันของแต่ละโหนดตาม KVL โดยเริ่มจากรูตโหนดจนกระทั่งถึงเสาต้นสุดท้าย ช่วงนี้เรียกว่าการแพร่กระจายเดินหน้า

จากลำดับขั้นข้างบน ถ้าหากเรากำหนดโหลดโดยไม่อ้างอิงรูตโหนด เราต้องคำนวณเป็นแบบวนซ้ำ แต่ในที่นี้เรากำหนดให้โหลดเป็นแบบกระแสที่ ซึ่งเป็นการประมาณนั่นเอง และมุมเฟสของกระแสก็อ้างอิงที่รูตโหนด ทำให้การคำนวณเพียงรอบเดียวก็หาค่าตอบ คือแรงดันที่ทุกเสาทุกเฟสได้

#### 4. ผลการทดลอง

ระบบที่ทำการทดสอบเป็นระบบที่ใช้อุปกรณ์ในทางปฏิบัติจริง คือหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 315 เควีเอ สายไฟฟ้าด้านนอกเป็นชนิด THW-A ขนาด 4 x 50 ตร.มม. ระยะความยาวสายห่างจากหม้อแปลงเป็น 60 เมตร โดยมีเสาจำนวน 3 ต้น แต่ละต้นห่างกันเป็น 30 เมตร ที่แต่ละเสามีมาตรฐานวัดพลังงานต่ออยู่เป็นตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลระบบจำหน่ายทุติยภูมิ

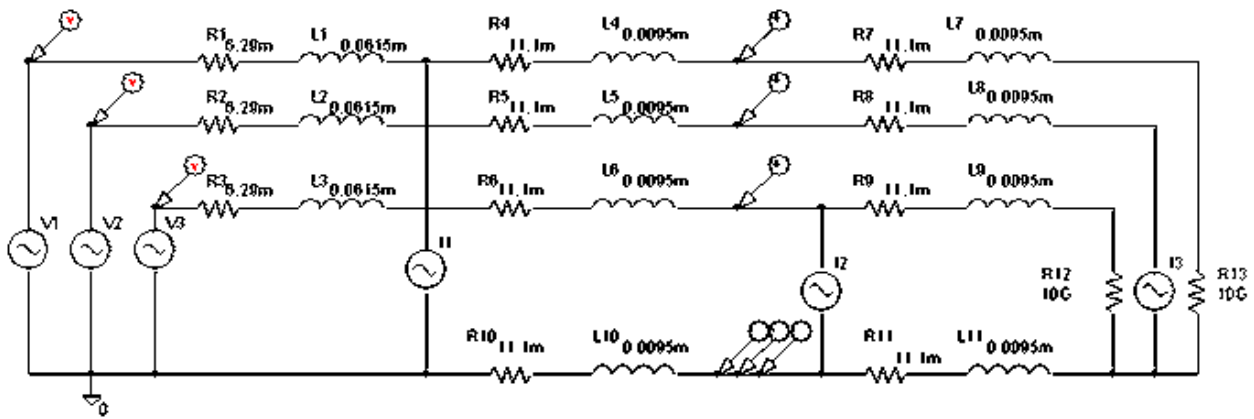
โหนด	แรงดัน เฟส A	อิมพีแดนซ์ (mΩ)		โหลด (A)		
				เฟส A	เฟส B	เฟส C
จุด	$230\angle 0^\circ$	6.29		-	-	-
1	-	+j19.32	11.1	$36\angle -36.79^\circ$	-	-
2	-	11.1	+j3	-	-	$36\angle 83.21^\circ$
3	-	+j3		-	$100\angle -151.79^\circ$	-

ผลการคำนวณด้วยวิธีการแพร่กระจายถอยหลัง-เดินหน้า และเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วย Pspice เป็นตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดลอง

โหนด	แรงดันจากวิธีถอยหลัง-เดินหน้า (V)			แรงดันจาก Pspice (V)		
	เฟส A	เฟส B	เฟส C	เฟส A	เฟส B	เฟส C
จุด	$230\angle 0^\circ$	$230\angle -120^\circ$	$230\angle 120^\circ$	$230\angle 0^\circ$	$230\angle -120^\circ$	$230\angle 120^\circ$
1	$229.40\angle -0.11^\circ$	$228.45\angle -120.33^\circ$	$229.40\angle 119.89^\circ$	$229.40\angle -0.11^\circ$	$228.45\angle -120.33^\circ$	$229.40\angle 119.89^\circ$
2	$230.30\angle -0.01^\circ$	$226.57\angle -120.10^\circ$	$228.90\angle 119.69^\circ$	$230.30\angle -0.01^\circ$	$226.57\angle -120.10^\circ$	$228.90\angle 119.69^\circ$
3	$231.14\angle 0.19^\circ$	$224.37\angle -119.93^\circ$	$229.18\angle 119.41^\circ$	$231.14\angle 0.19^\circ$	$224.37\angle -119.93^\circ$	$229.18\angle 119.41^\circ$

จากตารางที่ 2 คำตอบเป็นแรงดันที่ได้ในแต่ละเสาแต่ละเฟส จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับ Pspice พบว่ามีคำตอบที่ค่าเดียวกัน แรงดันนี้แสดงทั้งมุมเฟสด้วย ซึ่งจะอ้างอิงกับจุดโหนด อย่างไรก็ตามถ้าหากต้องการให้โหลดอ้างอิงกับแรงดันเฉพาะถิ่นจริงๆ การวิเคราะห์ด้วยวิธีแพร่กระจายถอยหลังเดินหน้าต้องเป็นแบบวนซ้ำ ซึ่งการจำลองด้วย Pspice เป็นดังรูปที่ 4 โดยในรูปที่ 4 มีการต่อค่าความต้านค่าสูงมากเพื่อให้สามารถจำลองได้



รูปที่ 4 วงจรที่ใช้จำลองด้วย Pspice

ในการวางแผนติดตั้งมาตรวัดพลังงาน ผู้ให้บริการไฟฟ้าอาจพิจารณาด้วยมาตรการง่ายๆ อันดับแรกคือ เฟสใดที่แรงดันคงเหลือดีที่สุด ก็สมควรที่จะติดตั้งมาตรวัดพลังงานให้ผู้ใช้ไฟฟ้า แต่ถ้าหากแรงดันทุกเฟสมีค่าต่ำ ก็อาจพิจารณามาตรการอื่น อาทิ ปรับจุดแยกที่หม้อแปลง เปลี่ยนขนาดสายจำหน่ายทุกขุมุมิ เพิ่มสายจำหน่ายทุกขุมุมิ หรือ เปลี่ยนขนาดหม้อแปลงไฟฟ้า เป็นต้น

## 5. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์หาระดับแรงดันจำหน่ายไฟฟ้าทุกขุมุมิที่ตำแหน่งเสาของระบบจำหน่ายทุกขุมุมิ โดยใช้เทคนิคของการแพร่กระจายถอยหลัง-เดินหน้า ระดับแรงดันที่ได้สามารถนำมาเป็นแนวทางในการให้บริการต่อผู้ใช้ไฟฟ้า วิธีการนี้มีข้อดีคือไม่ต้องใช้เมทริกเพื่อการคำนวณ คำตอบที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับ Pspice พบว่าได้ค่าที่ไปในทางเดียวกัน อย่างไรก็ตามทางคณะผู้วิจัยมีแนวคิดจะพัฒนาโปรแกรมให้เหมาะสมกับระบบจำหน่ายทุกขุมุมิมากขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] D. Shirmohammadi, H. W. Hong, A. Semlyen and G. X. Luo, "A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 2, May 1988.
- [2] D. Das, H.S. Nagi and D.P. Kothar, "Novel method for solving radial distribution networks," IEE Proc. - Gener. Transm. Distrib., Vol. 141, No. 4, July 1994.
- [3] M.H.Haque, "Efficient load flow method for distribution systems with radial or mesh configuration," IEE Proc-Germ Transm. Distrib., Vol. 143, No. 1, January 1996.

- [4] S.Ghosh and D.Das, "Method for load-flow solution of radial distribution networks," IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 146, No. 6, November 1999.
- [5] E. Bompard, E. Carpaneto, G. Chicco and R. Napoli, "Convergence of the backward/forward sweep method for the load-flow analysis of radial distribution systems," International Journal of Electrical power & energy system, Volume 22, pp. 521–530, 2000.
- [6] G. P. Aravindhababu, S. Ganapathy and K.R. Nayar, "A novel technique for the analysis of radial distribution systems," International Journal of Electrical power & energy system, Volume 23, Issue 3, March 2001
- [7] Zhuding Wang, Fen Chen and Jingui Li, "Implementing Transformer Nodal Admittance Matrices Into Backward/Forward Sweep-Based Power Flow Analysis for Unbalanced Radial Distribution Systems," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 4, November 2004.
- [8] ธวัช เกิดชื่น และกฤตวิทย์ บัวใหญ่, "เทคนิคการคำนวณการไหลของกำลังในระบบจำหน่าย," การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้าราชมงคล ครั้งที่ 1 EENET2008, พฤศจิกายน 2551.

**ธวัช เกิดชื่น** สำเร็จการศึกษา วศ.บ. (ไฟฟ้า-ไฟฟ้ากำลัง) จาก รม. วศ.ม. (ไฟฟ้า) จาก มข. และ D. Eng. (Energy, Electric Power System Management) จาก AIT ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ศูนย์กลางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา งานวิจัยที่สนใจเกี่ยวกับระบบไฟฟ้ากำลัง การหาค่าที่เหมาะสม และการบริหารจัดการพลังงาน

**ประเสริฐ เมื่อนหมื่นไวย** สำเร็จการศึกษา คอ.บ. วศ.บ. (ไฟฟ้า-ไฟฟ้ากำลัง) จาก รม. และ วศ.ม. (ไฟฟ้า) จาก มข. ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วย-ศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ศูนย์กลางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา งานวิจัยที่สนใจเกี่ยวกับวงจรไฟฟ้า ระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และการบริหารจัดการพลังงาน

**วุฒิชัย สง่างาม** สำเร็จการศึกษา วศ.บ. (ไฟฟ้า-ไฟฟ้ากำลัง) จาก รม. และ วศ.ม. (ไฟฟ้า) จาก มทส. ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ศูนย์กลางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา งานวิจัยที่สนใจเกี่ยวกับวงจรไฟฟ้า และ FPGA

**มงคล ด่านบำรุงตระกูล** สำเร็จการศึกษา วศ.บ. (ไฟฟ้า-ไฟฟ้ากำลัง) จาก รม. และ วศ.ม. (ไฟฟ้า) จาก มก. ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ศูนย์กลางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา งานวิจัยที่สนใจเกี่ยวกับวงจรไฟฟ้า คุณภาพระบบไฟฟ้ากำลัง และการป้องกันระบบไฟฟ้า

บทความนี้คัดลอกและปรับปรุงจากการประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 32 (EECON32) ตีพิมพ์ออนไลน์ใน JPEE เมื่อ 5 พฤศจิกายน 2552