



KKU Engineering Journal

<http://www.en.kku.ac.th/enjournal/th/>

การใช้ทฤษฎีปริมาณซ้อนทับและวงจรลำดับลบเพื่อระบุพื้นที่ของสาเหตุของแรงดันตกชั่วขณะชนิดไม่สมดุล

Using superimposed quantity theory and negative sequence network for unbalanced voltage sag source detection

วีรวุฒิ กนกบรรณกร* ตฤณ แสงสุวรรณ และ ศิริโรจน์ ศิริสุขประเสริฐ

Weerawoot Kanokbannakorn*, Trin Saengsuwan and Siriroj Sirisukprasert

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10900

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, Thailand, 10900

Received November 2012

Accepted April 2013

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีใหม่ในการระบุบริเวณเกิดลัดวงจรซึ่งเป็นสาเหตุของแรงดันตกชั่วขณะชนิดไม่สมดุลโดยใช้ทฤษฎีปริมาณซ้อนทับร่วมกับวงจรลำดับลบ วิธีการนี้ได้จากการพิสูจน์ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ และทำการทดสอบความถูกต้องด้วยการจำลองโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และทดสอบด้วยผลการตรวจวัดภาคสนาม ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเครื่องหมายของอิมพีแดนซ์ลำดับลบสามารถใช้ในการระบุพื้นที่ของสาเหตุของแรงดันตกชั่วขณะชนิดไม่สมดุลได้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถนำไปใช้กับระบบไฟฟ้าจริงได้

คำสำคัญ : การระบุตำแหน่ง วงจรลำดับลบ คุณภาพไฟฟ้า ทฤษฎีปริมาณซ้อนทับ แรงดันตกชั่วขณะ

Abstract

This paper proposed a new algorithm to identify the unbalanced voltage sag source location using superimposed quantity theory and negative sequence. This algorithm is derived mathematically. The accuracy of model is verified by computer simulation and field test. The results demonstrate that the negative incremental impedance can effectively reveal sag source location and this algorithm can be applied to real power system.

Keywords : Identification, Negative sequence, Power quality, Superimposed quantity theory, Voltage sags/dips.

*Corresponding author. Tel.: +66-2942-8555 Ext. 1551; fax: +66-2942-8555 Ext. 1550

Email address: Weerawoot_k@hotmail.com

1. บทนำ

แรงดันตกชั่วขณะเป็นปัญหาด้านคุณภาพไฟฟ้าที่สำคัญอย่างหนึ่งในระบบไฟฟ้า เนื่องจากในปัจจุบันโหลดในระบบไฟฟ้ามีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันมากขึ้น การไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้าจึงให้ความสนใจแรงดันตกชั่วขณะมากขึ้น เพื่อหาวิธีป้องกัน และแก้ไขรวมถึงการประเมินประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้าจากการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ (System voltage sag performance assessment) โดยการประเมินนี้บางครั้งมีการถกเถียงกันถึงพื้นที่ที่เป็นสาเหตุของแรงดันตกชั่วขณะในระบบ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวิธีการระบุพื้นที่ของสาเหตุของแรงดันตกชั่วขณะเพื่อให้การประเมินมีความถูกต้องและยุติธรรม [1] ซึ่งการระบุตำแหน่งนี้ อาจไม่จำเป็นต้องระบุจุดเกิดเหตุให้มีความแม่นยำดังเช่นวิธีที่ใช้กับรีเลย์ป้องกัน แต่เป็นการระบุพื้นที่เพื่อแบ่งเขตความรับผิดชอบต่อสาเหตุของแรงดันตกชั่วขณะระหว่างสองการไฟฟ้า หรือระหว่างการไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้า และเนื่องจากสาเหตุส่วนใหญ่ของแรงดันตกชั่วขณะเกิดจากการลัดวงจรในระบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเกิดลัดวงจรแบบไม่สมมูล จากการตรวจสอบเอกสารวิชาการต่างๆ พบว่ามีการนำเสนอวิธีการระบุตำแหน่งหลายวิธี เช่น [1] ใช้ค่ากระแส แรงดัน และตัวประกอบกำลังในการระบุตำแหน่ง [2] ใช้ค่าองค์ประกอบจริงของกระแส [3] ใช้ค่าพลังงานไฟฟ้าขณะเกิดเหตุการณ์เป็นดัชนีในการระบุตำแหน่ง [4] ใช้วิธีหาค่าอิมพีแดนซ์ร่วมกับการประมาณค่าอิมพีแดนซ์ [5] ใช้หลักการของรีเลย์แบบระยะทาง [6] ใช้รูปคลื่นแรงดันเพียงอย่างเดียวในการระบุตำแหน่งจุดเกิดลัดวงจรระหว่างหม้อแปลง ซึ่งวิธีต่างๆ ที่ได้นำเสนอเหล่านี้ได้รับการทดสอบใน [7], [8] และ [9] พบว่าในวิธีการเหล่านี้สามารถระบุตำแหน่งได้ดีในกรณีของแรงดันตกชั่วขณะชนิดสมมูล แต่ในกรณีของแรงดันตกชั่วขณะชนิดไม่สมมูล วิธีการเหล่านี้จะมีประสิทธิภาพลดลง นอกจากนี้เนื่องจากแรงดันตกชั่วขณะชนิดไม่สมมูล ค่าแรงดันและกระแสใน

แต่ละเฟสมีค่าแตกต่างกัน ดังนั้นในการเลือกใช้ค่าดังกล่าวจากเฟสที่ต่างกันอาจทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ต่างกันเป็นผลให้ไม่สามารถระบุตำแหน่งได้ เช่น วิธี (1) และ (2) เป็นต้น

ดังนั้นบทความนี้จะนำเสนอวิธีการระบุพื้นที่ที่เกิดลัดวงจรจากรูปคลื่นแรงดันตกชั่วขณะชนิดไม่สมมูล โดยใช้ทฤษฎีปริมาณซ้อนทับร่วมกับปริมาณแรงดันและกระแสในวงจรลำดับลบ โดยรายละเอียดของหลักการและผลการทดสอบจะแสดงในส่วนถัดไป

2. ทฤษฎีและหลักการ

ในส่วนนี้อธิบายวิธีการหาสมการคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการระบุบริเวณเกิดลัดวงจรโดยใช้ทฤษฎีการซ้อนทับและวงจรลำดับลบ จากทฤษฎีการซ้อนทับ [10], [11] ระบบไฟฟ้าเมื่อเกิดลัดวงจรสามารถแทนด้วย วงจรก่อนเกิดลัดวงจร (Pre-fault network) และวงจรขณะเกิดลัดวงจร (During-fault network) โดยสมการแรงดันและกระแสขณะเกิดลัดวงจรสามารถแสดงได้ดังนี้

$$V_{dur} = V_{pre} + \Delta V, I_{dur} = I_{pre} + \Delta I \quad (1)$$

โดยที่ V_{dur} , I_{dur} คือ แรงดันและกระแสขณะเกิดลัดวงจร

V_{pre} , I_{pre} คือ แรงดันและกระแสก่อนเกิดลัดวงจร

ΔV , ΔI คือ การเปลี่ยนแปลงของแรงดันและ

กระแสขณะเกิดลัดวงจร

จากสมการที่ (1) สามารถหาตำแหน่งลัดวงจรได้โดยการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ที่เพิ่มขึ้น (Incremental impedance) ดังแสดงในสมการที่ (2)

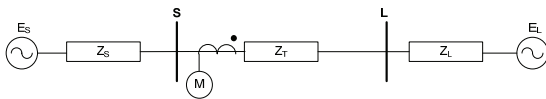
$$\Delta Z = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V_{dur} - V_{pre}}{I_{dur} - I_{pre}} \quad (2)$$

แต่ในการระบุตำแหน่งลัดวงจรด้วยสมการนี้จะเกิดความผิดพลาดได้ง่ายเนื่องจากในการคำนวณต้องใช้ค่าแรงดันและกระแสก่อนเกิดลัดวงจร ซึ่งถ้าเลือกค่าทั้งสองนี้แตกต่างกัน อาจให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกันด้วย ซึ่งทำให้ไม่สามารถระบุตำแหน่งได้อย่างถูกต้อง [4] ในบทความนี้

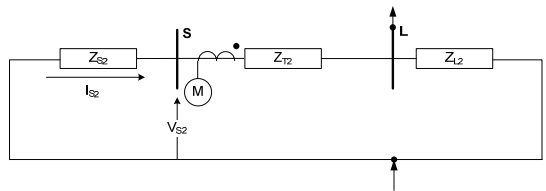
เสนอวิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวคือ การใช้ค่าแรงดัน และ กระแสจากวงจรลำดับลบ จากสมมุติฐานที่ว่า ระบบ ไฟฟ้าก่อนเกิดลัดวงจรเป็นระบบสมดุล ดังนั้นค่ากระแส และแรงดันจากวงจรลำดับลบขณะก่อนเกิดลัดวงจรมีค่า เท่ากับศูนย์ เป็นผลให้ค่า V_{dur} และ I_{dur} ในสมการที่ (1) มี ค่าเท่ากับ ΔV และ ΔI ตามลำดับ ดังนั้นสมการที่ (2) สามารถเขียนได้ใหม่ในรูปของกระแสลำดับลบ (I_2) และ แรงดันลำดับลบ (V_2) คือ

$$\Delta Z_2 = \frac{\Delta V_2}{\Delta I_2} = \frac{V_2}{I_2} \quad (3)$$

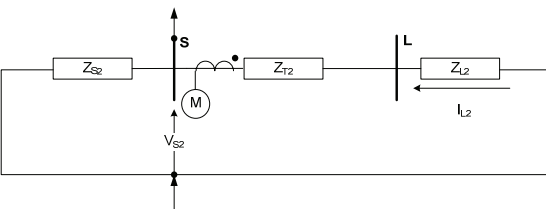
โดย ΔZ_2 คือ อิมพีแดนซ์ลำดับลบที่เพิ่มขึ้น (Negative incremental impedance) สมการที่ (3) นี้จะ นำไปใช้ในการระบุบริเวณเกิดลัดวงจรที่เป็นสาเหตุของ แรงดันตกชั่วขณะต่อไป



(a) ระบบไฟฟ้าก่อนเกิดลัดวงจร



(b) วงจรลำดับลบเมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส L



(c) วงจรลำดับลบเมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส S

รูปที่ 1 ระบบไฟฟ้าตัวอย่างในการระบุบริเวณสาเหตุของ แรงดันตกชั่วขณะ

พิจารณาระบบไฟฟ้าในรูปที่ 1 (a) ซึ่งประกอบด้วย แหล่งกำเนิดสองแหล่ง คือ E_s , E_L และสายส่ง ซึ่งมีค่า อิมพีแดนซ์ Z_s , Z_L และ Z_T ตามลำดับ เครื่องวัดคุณภาพ ไฟฟ้า (M) ติดตั้งที่บัส S เพื่อวัดค่าแรงดันและกระแสขณะ เกิดแรงดันตกชั่วขณะ กำหนดให้ทิศของกระแสไหลออกจาก บัส S มีเครื่องหมายเป็นบวก กรณีเกิดลัดวงจรแบบ ไม่สมดุลที่บัส L โดยในที่นี้กำหนดให้เป็นตำแหน่ง ด้านหน้า (Forward) เมื่อเทียบกับจุดตรวจวัด วงจรลำดับ ลบของระบบสามารถแสดงดังรูปที่ 1 (b) จากสมการที่ (3) สามารถคำนวณค่า ΔZ_2 ได้ดังนี้

$$\Delta Z_2 = \frac{V_{s2}}{I_{s2}} = -Z_{s2} \quad (4)$$

และในทำนองเดียวกันกรณีเกิดลัดวงจรไม่สมดุลที่ บัส S โดยในที่นี้กำหนดให้เป็นตำแหน่งด้านหลัง (Backward) เมื่อเทียบกับจุดตรวจวัด ΔZ_2 สามารถคำนวณได้ดังนี้

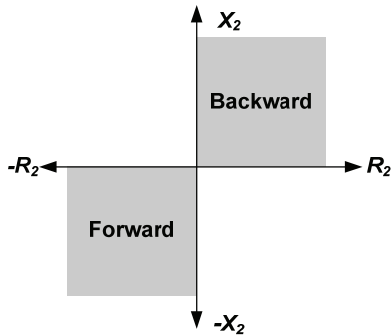
$$\Delta Z_2 = \frac{\Delta V_{2s}}{\Delta I_{L2}} = Z_{L2} + Z_{T2} \quad (5)$$

จากสมการที่ (4) และ (5) สามารถสรุปได้ดังนี้

1) กรณีเกิดลัดวงจรด้านหน้าจุดตรวจวัด เครื่องหมายของ ΔZ_2 จะมีค่าเป็นลบ และขนาดมีค่า เท่ากับค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิดด้านหลังจุดตรวจวัด (Z_{s2})

2) กรณีเกิดลัดวงจรด้านหลังจุดตรวจวัด เครื่องหมายของ ΔZ_2 จะมีค่าเป็นบวก และขนาดมีค่า เท่ากับผลรวมของค่าอิมพีแดนซ์ด้านหน้าจุดตรวจวัด ($Z_{L2} + Z_{T2}$)

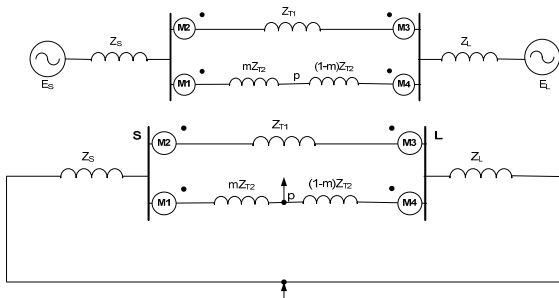
ตำแหน่งลัดวงจรนี้สามารถแสดงด้วยแผนภาพ อาร์-เอ็กซ์ (R-X diagram) ดังรูปที่ 2 โดยกรณีตำแหน่ง ลัดวงจรอยู่ด้านหน้าจุดตรวจวัด ΔZ_2 จะอยู่ในควอดแดรนต์ ที่ 3 (3rd Quadrant) และกรณีเกิดลัดวงจรด้านหลังจุด ตรวจวัด ΔZ_2 จะอยู่ในควอดแดรนต์ที่ 1 (1st Quadrant)



รูปที่ 2 การแสดงตำแหน่งจุดเกิดลัดวงจรด้วยแผนภาพอาร์-เอ็กซ์

3. ผลของลักษณะระบบต่อการระบุตำแหน่ง

โดยทั่วไปลักษณะของระบบไฟฟ้าจะมีความซับซ้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบส่งซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดมากกว่าหนึ่งแหล่ง ระบบสายส่งแบบวงรอบ (Loop line) หรือสายส่งแบบขนาน (Parallel line) โดยลักษณะของระบบนี้มีผลต่อการระบุตำแหน่งเช่นกัน พิจารณาระบบไฟฟ้างดรูปที่ 3 ประกอบด้วยสายส่งแบบขนาน T1 และ T2 กำหนดให้เครื่องวัด M1-M4 ติดตั้ง ณ ตำแหน่งดังรูป ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง T1 และ T2 มีค่าเท่ากับ Z_{T1} และ Z_{T2} ตามลำดับ ตัวแปร A คือ อัตราส่วนระหว่าง Z_{T2} / Z_{T1} กำหนดให้เกิดลัดวงจรแบบไม่สมดุลที่จุด p โดย ณ จุดนี้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง T2 แบ่งออกเป็นสองส่วน คือ mZ_{T2} และ $(1-m)Z_{T2}$ โดยที่ $0 < m < 1$ ผลการคำนวณ ΔZ_2 ณ จุดตรวจวัดทั้งสองแสดงดังตารางที่ 1 พบว่า ΔZ_2 มีค่าแปรตามตำแหน่งเกิดลัดวงจร ซึ่งค่า ΔZ_2 นี้สามารถแบ่งได้เป็นสองกลุ่ม ดังนี้



รูปที่ 3 ระบบส่งที่ประกอบด้วยสายส่งขนาน

ตารางที่ 1 ผลการคำนวณ ΔZ_2 ณ จุดตรวจวัด M1-4

จุดตรวจวัด	ΔZ_2
M1	$\frac{-(A(1-m) \cdot Z_{T1} + (A+1) \cdot Z_L) \cdot Z_S}{A(1-m) \cdot (Z_S + Z_L + Z_{T1}) + Z_L}$
M2	$\frac{-(A(1-m) \cdot Z_{T1} + (A+1) \cdot Z_L) \cdot Z_S}{(A \cdot m \cdot Z_L - A(1-m) \cdot Z_S)}$
M3	$\frac{(A \cdot m \cdot Z_{T1} + (A+1) \cdot Z_S) \cdot Z_L}{(A \cdot m \cdot Z_L - A(1-m) \cdot Z_S)}$
M4	$\frac{-(A \cdot m \cdot Z_{T1} + (A+1) \cdot Z_S) \cdot Z_L}{A \cdot m \cdot (Z_S + Z_L + Z_{T1}) + Z_S}$

1) จุดตรวจวัดที่อยู่บนสายส่งที่เกิดลัดวงจร ได้แก่ M1 และ M4 เครื่องหมายของ ΔZ_2 ที่ได้จากเครื่องวัดทั้งสองมีค่าเป็นลบ แสดงถึงจุดเกิดลัดวงจรอยู่ระหว่างจุดตรวจวัดทั้งสองนี้

2) จุดตรวจวัดที่อยู่บนสายส่งที่ไม่เกิดลัดวงจร ได้แก่ M2 และ M3 เครื่องหมายของ ΔZ_2 ที่ได้จากเครื่องวัดทั้งสองจะมีค่าต่างกัน ซึ่งเครื่องหมายและขนาดของ ΔZ_2 นี้มีค่าแปรตามจุดเกิดลัดวงจร m

จากการคำนวณค่า ΔZ_2 ข้างต้นพบว่าในระบบดังกล่าว จำเป็นต้องใช้จุดตรวจวัดมากกว่าหนึ่งจุดในการระบุตำแหน่ง ซึ่งเครื่องหมายของ ΔZ_2 ยังคงสามารถใช้ระบุตำแหน่งจุดเกิดลัดวงจรได้ แต่ขนาดของ ΔZ_2 นั้นจะมีค่าต่างไปจากที่แสดงไว้ในสมการที่ (4) และ (5)

4. ผลของโหลดต่อการระบุตำแหน่ง

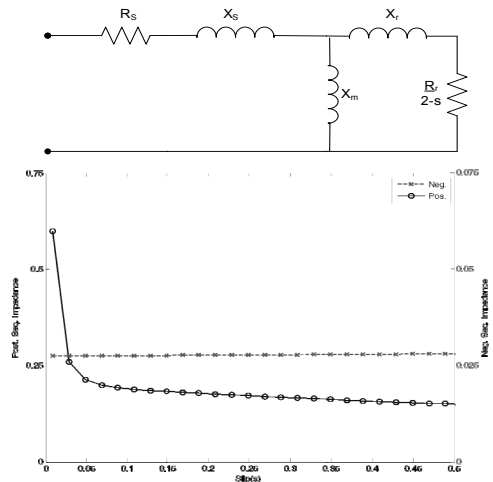
เนื่องจากวิธีการระบุตำแหน่งนี้ใช้วิธีการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ ดังนั้นโหลดที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าคงที่ (Constant power load) อาจส่งผลกระทบต่อการระบุตำแหน่ง โดยโหลดที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าคงที่ที่นิยมใช้มากในระบบไฟฟ้าชนิดหนึ่ง คือ มอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction motor) ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำนี้มีค่าแปรตามค่าสลิป (Slip) ในขณะที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะมอเตอร์จะมีความเร็วลดลง ขณะที่ค่าสลิปมีค่าสูงขึ้น เป็นผลให้กระแสที่ผ่านมอเตอร์มีค่าสูงขึ้น [12] รูปที่ 4 แสดงวงจรสมมูลลำดับลบของมอเตอร์เหนี่ยวนำและ

อิมพีแดนซ์ที่ค่าสลิปต่างๆ ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ลำดับลบมีค่าเป็นสัดส่วนกับ $(2-S)$ ในขณะที่อิมพีแดนซ์ลำดับบวกมีค่าเป็นสัดส่วนกับ S ซึ่งจะพบว่าอิมพีแดนซ์ลำดับบวกมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสลิปมากกว่าอิมพีแดนซ์ลำดับลบ โดยจะเห็นว่าเมื่อสลิปมีค่าเพิ่มขึ้นค่าอิมพีแดนซ์ลำดับบวกมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่อิมพีแดนซ์ลำดับลบมีค่าค่อนข้างคงที่ จะเห็นว่าการใช้ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับลบนั้นสามารถลดผลของโหลดต่อการระบุตำแหน่งได้

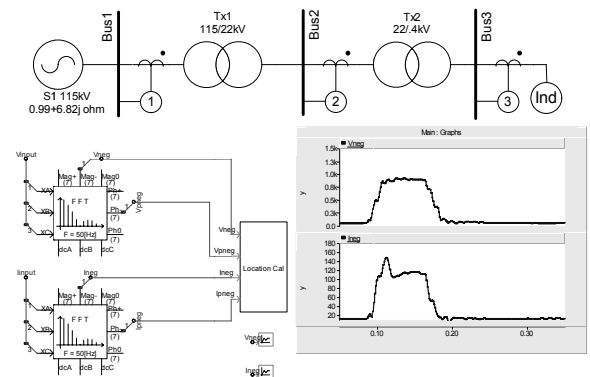
5. ผลการทดสอบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งแรงดันตกชั่วขณะที่ได้นำเสนอนี้ เริ่มด้วยการจำลองระบบไฟฟ้าดังรูปที่ 5 โดยใช้โปรแกรม PSCAD/EMTDC โดยระบบประกอบด้วยแหล่งกำเนิด (S1) หม้อแปลง (Tx1) ขนาด 115/22 กิโลโวลต์ หม้อแปลง (Tx2) ขนาด 22/0.4 กิโลโวลต์ มอเตอร์เหนี่ยวนำ (Ind) และจุดตรวจวัด (1-3) กำหนดให้เกิดลัดวงจรชนิดหนึ่งเฟสลงดิน (SLG) สองเฟสลงดิน (DBG) และสองเฟส (DB) ที่แต่ละบัสเพื่อสร้างแรงดันตกชั่วขณะ หลังจากนั้นนำค่ากระแสและแรงดันที่จุดตรวจวัดทั้งสามไปคำนวณหาองค์ประกอบลำดับลบ โดยใช้อัลกอริทึมการแปลงฟูเรียร์ (FFT) ที่อยู่ในโปรแกรม PSCAD และนำค่าที่ได้ไปคำนวณ ΔZ_2 เพื่อระบุตำแหน่งลัดวงจรที่เกิดขึ้น โดยตัวอย่างส่วนหนึ่งของการจำลองแสดงดังรูปที่ 5

โดยผลการคำนวณนี้จะนำมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณค่า ΔZ_2 จากพารามิเตอร์ของระบบ ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 2 โดยสัญลักษณ์ B หมายถึง จุดเกิดลัดวงจรอยู่ด้านหลังจุดตรวจวัด สัญลักษณ์ F หมายถึง จุดเกิดลัดวงจรอยู่ด้านหน้าจุดตรวจวัด สัญลักษณ์ N/A หมายถึง ขณะเกิดลัดวงจรไม่ทำให้เกิดแรงดันตกชั่วขณะ และค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการคำนวณโดยค่าพารามิเตอร์ของระบบแสดงด้านล่างของตารางที่ 2



รูปที่ 4 วงจรลำดับลบและค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ค่าสลิป 0-0.5



รูปที่ 5 การจำลองด้วย PSCAD/EMTDC

จากผลการทดสอบในตารางที่ 2 พบว่ากรณีเกิดลัดวงจรที่บัส 1 (ผลการทดสอบในหลักที่สามของตารางที่ 2) ΔZ_2 จากจุดตรวจวัดทั้งสามมีค่าเป็นบวก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าจุดเกิดลัดวงจรอยู่ด้านหลังจุดตรวจวัดทั้งสาม โดยขนาดของ ΔZ_2 มีค่าเท่ากับผลรวมของค่าอิมพีแดนซ์ที่อยู่ด้านหน้าจุดตรวจวัด เช่น ขนาด ΔZ_2 ณ จุดตรวจวัดที่ 2 มีค่าเท่ากับผลรวมของอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง Tx2 และมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งมีค่าประมาณ $20.72 + j92.31$ โอห์ม ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยพารามิเตอร์ของระบบ เป็นต้น

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบโดยการจำลองระบบด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC

จุดตรวจวัด	ชนิดลัดวงจร	ΔZ_2 ตำแหน่ง		
		ลัดวงจรที่บัส 1	ลัดวงจรที่บัส 2	ลัดวงจรที่บัส 3
1	SLG	523.84+j2473.72/B	N/A	N/A
	DBG	542.09+j2479.88/B	-0.94-j6.60/F	N/A
	DB	545.99+j2477.56/B	-0.99-j6.76/F	N/A
Calculated Imp. (115kV): Source impedance(S1)=0.99+ j6.88 Ω /Load impedance(T1+T2+Ind)=533+ j2480 Ω				
2	SLG	20.11+j92.15/B	20.44+j92.37/B	-0.11-j1.72/F
	DBG	20.82+j92.71/B	21.74+j92.22/B	-0.11-j1.73/F
	DB	21.05+j92.49/B	21.11+j92.53/B	-0.09-j1.85/F
Calculated Imp. (22kV): Source impedance(S1+T1)=0.12+ j1.83 Ω /Load impedance(T2+Ind)=20.72+ j92.31 Ω				
3	SLG	0.007+j0.029/B	0.007+j0.029/B	0.007+j0.029/B
	DBG	0.007+j0.029/B	0.007+j0.029/B	0.007+j0.029/B
	DB	0.007+j0.029/B	0.007+j0.029/B	0.007+j0.029/B
Calculated Imp. (0.4kV): Source impedance(S1+T1+T2)=0.0002+ j 0.0025 Ω /Load impedance(Ind)=0.006+ j0.028 Ω				

กรณีเกิดลัดวงจรที่บัส 2 (ผลการทดสอบในหลักที่สี่ของตารางที่ 2) พบว่า ΔZ_2 ที่ได้จากจุดตรวจวัดที่ 1 มีเครื่องหมายเป็นลบ แสดงว่าจุดเกิดลัดวงจรอยู่ด้านหน้าจุดตรวจวัด โดยขนาดของ ΔZ_2 มีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิดด้านหลังจุดตรวจวัด (0.99+j6.88 โอห์ม) ส่วนจุดตรวจวัดที่ 2 และ 3 เครื่องหมายของ ΔZ_2 มีค่าเป็นบวก แสดงว่าจุดเกิดลัดวงจรอยู่ด้านหลังจุดตรวจวัดทั้งสอง โดย ΔZ_2 โดยมีขนาดเท่ากับผลรวมของอิมพีแดนซ์ด้านหน้าจุดตรวจวัด กล่าวคือ กรณีจุดตรวจวัดที่ 2 ขนาด ΔZ_2 มีค่าเท่ากับผลรวมของอิมพีแดนซ์ของ Tx2 และมอเตอร์เหนี่ยวนำ (20.72+j92.31โอห์ม) และในกรณีจุดตรวจวัดที่ 3 ขนาด ΔZ_2 มีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (0.006+j0.028 โอห์ม) ตามลำดับ

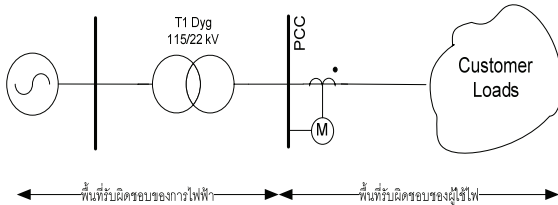
จากการทดสอบจะพบว่าวิธีการที่ได้นำเสนอ นั้นสามารถระบุตำแหน่งจุดเกิดลัดวงจรที่เป็นสาเหตุของแรงดันตกชั่วขณะได้อย่างถูกต้อง ซึ่งการระบุตำแหน่งนี้สามารถพิจารณาได้จากเครื่องหมายของ ΔZ_2 ซึ่งเป็นไปตามวิธีที่ได้นำเสนอไว้

6. การทดสอบโดยผลการตรวจวัดภาคสนาม

การทดสอบในส่วนนี้จะทำการทดสอบโดยการใช้รูปคลื่นแรงดันและกระแสขณะเกิดแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากการตรวจวัดด้วยเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าที่ติดตั้ง ณ สถานีไฟฟ้า โดยทำการทดสอบกับระบบจำหน่ายระดับแรงดัน 22 กิโลโวลต์ และระบบส่งระดับแรงดัน 115 กิโลโวลต์ และนำผลที่ได้จากการคำนวณไปเปรียบเทียบกับตำแหน่งเกิดลัดวงจรจริงที่ได้จากการบันทึกของการไฟฟ้า

6.1 ผลการทดสอบกับระบบจำหน่าย

ในการทดสอบได้ติดตั้งเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าเพื่อบันทึกการเปลี่ยนแปลงแรงดันตกชั่วขณะ โดยเครื่องวัดติดตั้งที่ด้าน 22 กิโลโวลต์ (PCC) ดังรูปที่ 6 โดยจุดนี้สมมติให้เป็นจุดแบ่งเขตพื้นที่รับผิดชอบระหว่างการไฟฟ้า (Utility) และผู้ใช้ไฟ (Customer)



รูปที่ 6 ระบบจำหน่ายในการทดสอบภาคสนาม

ตัวอย่างที่ 1 เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าบันทึกแรงดันตกชั่วขณะขนาด 0.35 pu ได้ดังรูปที่ 7 จากรูปคลื่นนี้นำไปคำนวณหาองค์ประกอบลำดับลบ และค่า ΔZ_2 ผลการคำนวณพบว่า ΔZ_2 ขณะเกิดแรงดันตกชั่วขณะอยู่ในบริเวณควอดแดรนต์ที่สามของแผนภาพอาร์-เอ็กซ์ และมีเครื่องหมายเป็นลบ ดังนั้นจุดเกิดลัดวงจรที่เป็นสาเหตุของแรงดันตกชั่วขณะนี้อยู่ในส่วนของผู้ใช้ไฟ ซึ่งตำแหน่งนี้ได้รับการยืนยันจากข้อมูลของการไฟฟ้า ว่าเกิดลัดวงจรในสายจำหน่าย 22 กิโลโวลต์ โดยมีทีมงานของรีเลย์ป้องกันกระแสเกิน

ตัวอย่างที่ 2 เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าบันทึกแรงดันตกชั่วขณะขนาด 0.87 pu ได้ดังรูปที่ 8 จากผลการคำนวณพบว่า ΔZ_2 ระหว่างเกิดแรงดันตกชั่วขณะอยู่ในควอดแดรนต์ที่หนึ่งของแผนภาพอาร์-เอ็กซ์ และมีเครื่องหมายเป็นบวก ดังนั้นบริเวณจุดเกิดลัดวงจรที่เป็นสาเหตุของแรงดันตกชั่วขณะนี้อยู่ในส่วนของการไฟฟ้า โดยตำแหน่งนี้ได้รับการตรวจสอบจากการไฟฟ้าว่าเกิดลัดวงจรบนสายส่งแรงดัน 115 กิโลโวลต์ จากเหตุการณ์นี้จะพบว่า ถึงแม้แรงดันตกชั่วขณะจะมีขนาดลดลงเพียง

เล็กน้อย วิธีการที่นำเสนอนี้ยังสามารถระบุตำแหน่งได้อย่างถูกต้อง

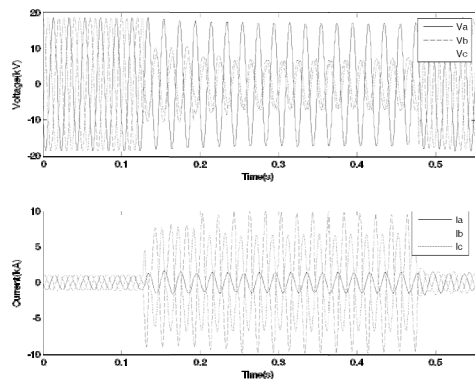
6.2 ผลการทดสอบกับระบบส่ง

ในการทดสอบนี้ได้ทำการติดตั้งเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าเพื่อบันทึกการเปลี่ยนแปลงแรงดันตกชั่วขณะ โดยติดตั้งเครื่องวัดที่สถานีไฟฟ้าระดับ 115 กิโลโวลต์ จำนวน 14 เครื่อง โดยตำแหน่งเครื่องวัดแสดงดังรูปที่ 9

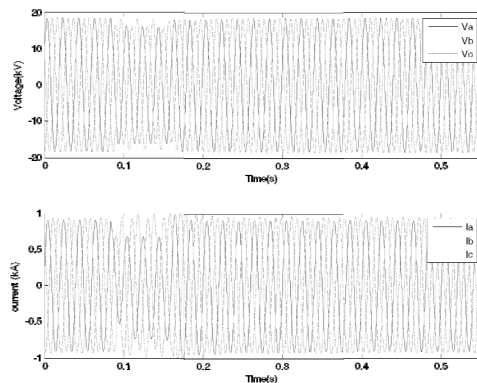
ตัวอย่างที่ 3 เครื่องวัดจำนวน 13 เครื่องบันทึกการเปลี่ยนแปลงแรงดันตกชั่วขณะไว้ได้ (เครื่องวัดที่ 12 ไม่สามารถบันทึกเหตุการณ์นี้เนื่องจากขนาดแรงดันตกชั่วขณะมีค่ามากกว่าร้อยละ 90 ซึ่งเป็นค่าปรับตั้งของเครื่องวัด) โดยผลการคำนวณค่า ΔZ_2 จากเครื่องวัดทั้ง 13 เครื่องแสดงในตารางที่ 3 จากการวิเคราะห์เครื่องหมายของ ΔZ_2 ที่ได้จากแต่ละเครื่องวัด พบว่าบริเวณเกิดลัดวงจรอยู่ในส่วนพื้นที่ของ UTIL1 (บริเวณเส้นประในรูปที่ 9) โดยตำแหน่งลัดวงจรนี้ได้รับการตรวจสอบจากบันทึกของการไฟฟ้า ซึ่งรายงานว่าเกิดลัดวงจรในพื้นที่ UTIL1

ตัวอย่างที่ 4 ผลการคำนวณค่า ΔZ_2 แสดงดังตารางที่ 4 เมื่อพิจารณาเครื่องหมายของ ΔZ_2 ที่ได้จากเครื่องวัดที่ 5 และ 9 พบว่า มีเครื่องหมายเป็นลบเช่นเดียวกัน แสดงว่าจุดเกิดลัดวงจรอยู่บริเวณสายส่งระหว่าง SubA1 และ SubB (บริเวณเส้นประในรูปที่ 10) ซึ่งจุดเกิดลัดวงจรนี้ได้รับการยืนยันจากข้อมูลจากการบันทึกของการไฟฟ้า นอกจากนี้เมื่อพิจารณา

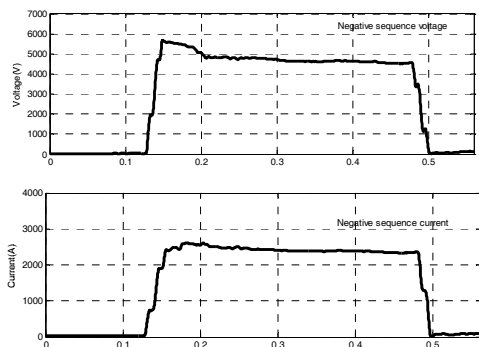
เครื่องหมายของ ΔZ_2 ที่ได้จากเครื่องวัดที่ติดตั้งอยู่บนสายส่งที่ไม่เกิดลัดวงจร เช่น เครื่องวัดที่ 7 และเครื่องวัดที่ 11 พบว่ามีเครื่องหมายที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นไปตามการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 3



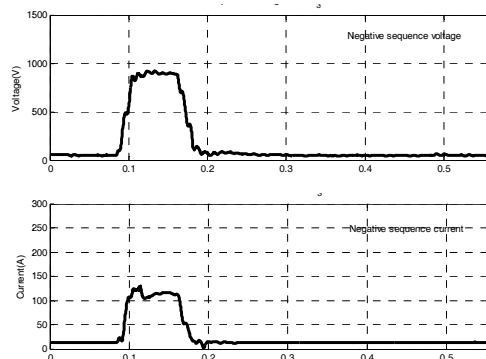
(ก)



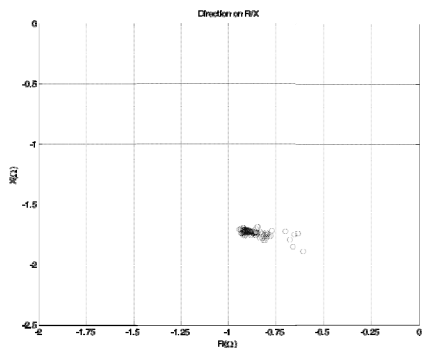
(ก)



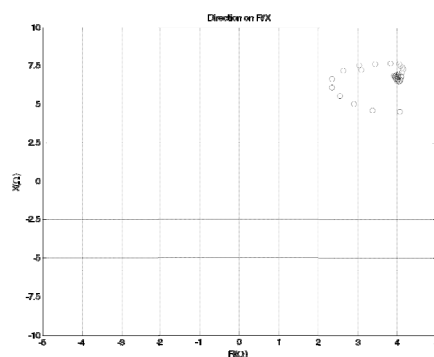
(ข)



(ข)



(ค)



(ค)

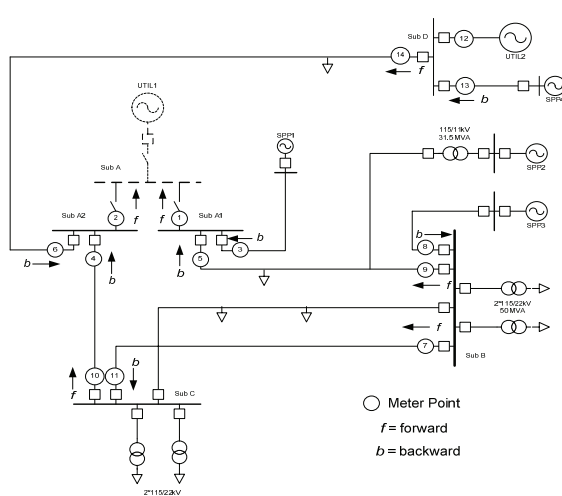
รูปที่ 7 (ก) รูปคลื่นแรงดัน และกระแสจากเครื่องวัด (ข) องค์ประกอบลำดับลบของแรงดันและกระแส และ (ค) ΔZ_2 ขณะเกิดแรงดันตกชั่วขณะของตัวอย่างที่ 1

รูปที่ 8 (ก) รูปคลื่นแรงดัน และกระแสจากเครื่องวัด (ข) องค์ประกอบลำดับลบของแรงดันและกระแส และ (ค) ΔZ_2 ขณะเกิดแรงดันตกชั่วขณะของตัวอย่างที่ 2

จากผลการทดสอบตัวอย่างที่ 3 และ 4 พบว่า การระบุพื้นที่ที่เกิดลัดวงจรในระบบสายส่งที่มีลักษณะระบบเป็นวงรอบนั้นจำเป็นต้องใช้จุดตรวจวัดจำนวนมากกว่าหนึ่งจุด เพื่อยืนยันตำแหน่งดังกล่าว

ตารางที่ 3 ผลทดสอบกรณีตัวอย่างที่ 3

Meter	Mag. (pu.)	Duration (s)	ΔZ_2 (Ω)	Relative Direction
1	0.49	0.09	-12.38-j12.72	F
2	0.49	0.09	-7.73-j11.71	F
3	0.49	0.09	24.73+j36.16	B
4	0.49	0.09	27.90+j32.95	B
5	0.49	0.09	20.46+j18.12	B
6	0.49	0.09	9.47+j17.63	B
7	0.58	0.09	-10.58-j33.79	F
8	0.58	0.09	4.92+j19.11	B
9	0.57	0.09	-8.87-j16.24	F
10	0.55	0.09	-10.37-j27.32	F
11	0.85	0.09	11.42+j34.61	B
12	-	-	-	-
13	0.81	0.07	1.79+j6.47	B
14	0.81	0.07	-0.30-j1.81	F



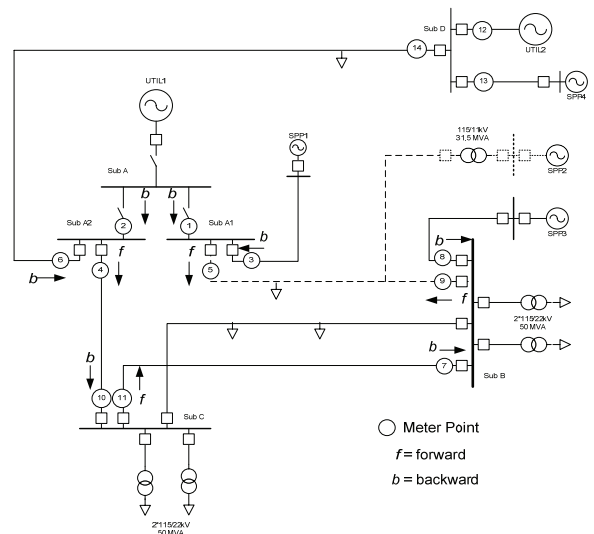
รูปที่ 9 ผลการระบุพื้นที่ ตัวอย่างที่ 3

7. สรุป

บทความนี้เสนอวิธีการระบุบริเวณเกิดลัดวงจรที่เป็นสาเหตุการเกิดแรงดันตกชั่วขณะชนิดไม่สมดุลโดยใช้วิธีการทับซ้อนร่วมกับวงจรลำดับลบ โดยบริเวณดังกล่าวสามารถระบุได้จากเครื่องหมายของอิมพีแดนซ์ลำดับลบที่คำนวณได้จากรูปคลื่นแรงดันและกระแสขณะเกิดแรงดันตกชั่วขณะ ซึ่งในบทความนี้ได้แสดงวิธีการพิสูจน์ทางคณิตศาสตร์ รวมไปถึงการทดสอบความถูกต้องของวิธีที่ได้นำเสนอ ผลการวิจัย

ตารางที่ 4 ผลทดสอบกรณีตัวอย่างที่ 4

Meter	Mag. (pu)	Duration (s)	ΔZ_2 (Ω)	Relative Direction
1	0.57	0.13	1.99 + j3.33	B
2	0.56	0.13	0.37+j14.15	B
3	0.56	0.13	4.42+j16.03	B
4	0.56	0.13	-1.52-j11.08	F
5	0.56	0.13	-4.81-j3.69	F
6	0.56	0.13	18.62+j34.45	B
7	0.30	0.13	8.28+j28.14	B
8	0.30	0.13	4.06+j13.21	B
9	0.30	0.13	-7.72+j14.48	F
10	0.38	0.13	3.34+j12.66	B
11	0.38	0.13	-3.67-j11.76	F
12	-	-	-	-
13	-	-	-	-
14	-	-	-	-



รูปที่ 10 ผลการระบุพื้นที่ ตัวอย่างที่ 4

แสดงให้เห็นว่าวิธีการนี้สามารถระบุบริเวณลัดวงจรที่เป็นสาเหตุของการเกิดแรงดันตกชั่วขณะได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถนำไปใช้กับระบบไฟฟ้าจริงได้ แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้สามารถใช้กับแรงดันตกชั่วขณะชนิดไม่สมดุลเท่านั้น ซึ่งผู้วิจัยเสนอว่าควรนำวิธีนี้ไปใช้ร่วมกับวิธีอื่นที่สามารถระบุตำแหน่งของแรงดันตกชั่วขณะชนิดสมดุลได้ ซึ่งจะทำให้การระบุตำแหน่งมีความสมบูรณ์มากขึ้น และสำหรับระบบที่มีการติดตั้งตัวเก็บประจุอนุกรมในระบบวิธีการนี้อาจระบุตำแหน่งผิดพลาด

ได้เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุอนุกรม ซึ่งต้องได้รับการศึกษาและทดสอบต่อไป

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่เอื้อเฟื้อข้อมูลจากการตรวจวัดภาคสนาม และข้อมูลพารามิเตอร์ระบบไฟฟ้า และขอขอบคุณห้องปฏิบัติการและวิจัยระบบไฟฟ้ากำลัง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์สำหรับอุปกรณ์วิจัย

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Li C, Tayjasanant T, Xu W, Liu X. Method for voltage-sag source detection by investigating slope of the system trajectory Proc. Inst. Elect. Eng. Gener. Transm. Distrib., 2003; p. 367–372
- [2] Hamzah N, Mohamed A, Hussain A. A new approach to locate the voltage sag source using real current component Electr. Power Syst. Res. 2004; 72(2): 113–123.
- [3] Parsons A C, Grady W M, Powers E J, Soward J C. A direction finder for power quality disturbances based upon disturbance power and energy. IEEE Transaction on Power Delivery 2000; 15(3): 1081–1086.
- [4] Tayjasanant T, Li V, Xu W. A resistance sign-based method for voltage sag source detection. IEEE Transaction on Power Delivery 2005; 20(4): 2544–2551.
- [5] Pradhan A K, Routray A. Applying distance relay for voltage sag source detection. IEEE Transaction on Power Delivery 2005; 20(1): 529–531.

- [6] Leborgne R C, Karlsson D. Voltage sag source location based on voltage measurements only electrical power quality and utilisation, Journal 2008; 14(1): 25-30.
- [7] Nunez V B, Frigola J M, Jaramillo S H, Losada J S. Evaluation of fault relative location algorithms using voltage sag data collected at 25-kV substations Euro. Trans. Electr. Power 2009; 20: 34-51.
- [8] Leborgne RC, Karlsson D. Daalder J. Voltage sag source location methods performance under symmetrical and asymmetrical fault conditions Proc. Transmiss. Distrib. Conf. Expo.: Latin America, Caracas, Venezuela: 2006; p. 1–6.
- [9] Makaliki R. Voltage sag source location in power systems [Master Thesis], Faculty Elect. Eng. Chalmers Tekniska, Göteborg, Sweden; 2006.
- [10] Benmouyal G, Roberts J. Superimposed quantities: Their true nature and application in relays. Schweitzer Eng. Lab., Inc.
- [11] Vargas J, Guzmán A, Robles J. Underground/ Submarine cable protection using a negative-sequence directional comparison scheme. Schweitzer Eng. Lab, Inc.
- [12] Yalcinkaya G, Bollen M H J, Crossley P A. Characterization of voltage sags in industrial distribution systems. IEEE Trans. Ind. App. 1998; 34: 682–688.