

ความเชื่อมโยงระหว่างทฤษฎีวงจรไฟฟ้าเบื้องต้นและการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง

Linkage between Basic Circuit Theory and Power System Analysis

สุวิทย์ กิระวิทยา

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก suwitki@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้แสดงถึงความเชื่อมโยงระหว่างทฤษฎีวงจรไฟฟ้าเบื้องต้นและการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง โดยวงจรตัวต้านทานที่ต่ออนุกรมกันถูกนำมาเทียบเคียงกับระบบไฟฟ้ากำลังอย่างง่ายที่มี 2 บัส ซึ่งทั้งสองระบบนี้สามารถมองเป็นวงจรเดียวกันได้ในแง่ทอพอโลยี แต่มีความแตกต่างคือ การกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจร การเปรียบเทียบที่แสดงในบทความนี้ เป็นความรู้พื้นฐานที่จะทำให้ผู้ที่ศึกษาในด้านวิศวกรรมไฟฟ้ากำลังสามารถสร้างมุมมองใหม่โดยใช้ทฤษฎีวงจรไฟฟ้าที่เคยศึกษามาก่อนร่วมกับการพิจารณาวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง

คำสำคัญ: ทฤษฎีวงจรไฟฟ้า, การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง, วิศวกรรม

Abstract

This paper presents a linkage between basic circuit theory and power system analysis. Series resistive circuit is compared with a simple 2-bus power system. Both circuits/systems have the same topology but they are different in term of the typical defined parameters. The comparison shown in this paper is a fundamental knowledge, which gives a novel viewpoint for applying previously known basic circuit theory to the power system analysis.

Keywords: Circuit Theory, Power System Analysis, Engineering Education

1. บทนำ

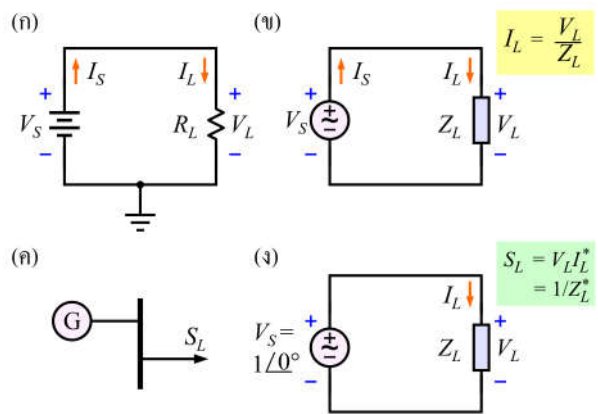
วิศวกรรมไฟฟ้ากำลังถือเป็นสาขาที่สำคัญมากในด้านวิศวกรรมศาสตร์ในทุกประเทศทั่วโลก [1-3] การศึกษาในสาขานี้ ผู้เรียนจะต้องศึกษาดตามแผนการศึกษาซึ่งตั้งเป็นกฎเกณฑ์ไว้ในหลักสูตรวิศวกรรมไฟฟ้าสาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง เพื่อให้ผู้เรียนเมื่อจบการศึกษาออกไปแล้วสามารถปฏิบัติงานได้อย่างถูกต้อง สำหรับประเทศไทย สภาวิศวกร [4] เป็นผู้กำหนดรายละเอียดของความรู้ต่าง ๆ ที่จำเป็น เพื่อให้ทั้งผู้สอนและผู้เรียนได้มีแนวทางในการศึกษาดตามมาตรฐานวิชาชีพ โดยวิชาหลักในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลังสองวิชา คือ วิชาวงจรไฟฟ้า (Electric Circuits) และวิชาการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง (Electrical Power System Analysis) เป็นวิชาที่มีความเกี่ยวข้องและต่อเนื่องกัน

ปัญหาในการศึกษาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และสาขาอื่น ๆ ทางวิทยาศาสตร์ คือ ผู้เรียนมักจะไม่สามารถเชื่อมโยงความรู้พื้นฐานที่เรียนในวิชาก่อนหน้านี้กับความรู้ใหม่ที่ได้รับ [5,6] ทั้งนี้อาจเกิดเนื่องจากปัญหาในทางปฏิบัติหลายประการ เช่น ข้อจำกัดด้านเวลา เนื่องจากแต่ละวิชามีเนื้อหาที่มาก ทำให้ผู้สอนไม่สามารถทบทวนพื้นฐานความรู้เดิมที่เกี่ยวข้อง กับเนื้อหาวิชาใหม่ ๆ ได้

ในบทความนี้จะกล่าวถึง ความเชื่อมโยงระหว่างทฤษฎีวงจรไฟฟ้าเบื้องต้นและการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งวงจรอย่างง่ายได้แก่ วงจรที่มีโหลดเดียวและวงจรอนุกรม ถูกนำมาใช้ในการเทียบเคียงกับระบบไฟฟ้ากำลังพื้นฐานที่มี 1 และ 2 บัส โดยการวิเคราะห์ในเชิงทฤษฎีทำให้เห็นถึงความเชื่อมโยงของสูตรต่าง ๆ รวมถึงการประมาณที่มักจะนำมาใช้ในการพิจารณาระบบไฟฟ้ากำลัง โดยหลักการที่กล่าวถึงในบทความนี้สามารถขยายไปสู่ระบบไฟฟ้ากำลังทั่วไปได้

2. กรณีระบบ 1 บัส — วงจรไฟฟ้าอย่างง่ายที่สุด

รูปที่ 1(ก) แสดงวงจรอย่างง่ายที่สุดของตัวต้านทาน โหลด R_L และแหล่งจ่ายไฟตรง V_S วงจรนี้ประกอบด้วยสองโหนดและหนึ่งเมฆ ซึ่งวงจรนี้เทียบเคียงได้กับวงจรไฟสลัที่มีโหลดคืออิมพีแดนซ์ Z_L และมีแหล่งจ่ายสัญญาณไฟสลั V_S ซึ่งสามารถแทนได้ด้วยปริมาณเฟสเซอร์ โดยในวงจรของรูปที่ 1(ก) และ (ข) เราสามารถวิเคราะห์ให้ได้โดยง่าย โดย



รูปที่ 1 (ก) วงจรไฟตรงอย่างง่ายที่สุด, (ข) วงจรไฟสลัที่มีทอพอโลยีเดียวกับรูป (ก), (ค) แผนภาพเส้นเดียวของระบบไฟฟ้ากำลัง 1 บัสที่ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดกำลัง G และโหลด S_L และ (ง) วงจรไฟสลัที่สอดคล้องกับรูป (ค) รูปเล็กในรูป (ข) และ (ง) แสดงสูตรที่เกี่ยวข้อง

จะได้ว่า แรงดัน โหลดและกระแสคือ

$$V_L = V_S \quad \text{และ} \quad I_L = I_S \quad (1)$$

สำหรับความแตกต่างหลัก ๆ ของการวิเคราะห์วงจรไฟตรงและวงจรไฟสลับเช่นในรูปที่ 1(ก) และ 1(ข) คือในวงจรไฟสลับกระแสและแรงดันจะเป็นปริมาณเฟสเซอร์และโหลดจะมีลักษณะเป็นอิมพีแดนซ์ซึ่งเสมือนตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานเชิงซ้อน

รูปที่ 1(ค) แสดงแผนภาพเส้นเดียว (single line diagram) ของระบบ 1 บัส ซึ่งใช้ในการอธิบายระบบไฟฟ้ากำลังอย่างง่ายที่สุด คือเพียงมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า G และ โหลด S_L ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง เรามักจะนิยามค่ากำลังเชิงซ้อน S_L เป็นปริมาณที่โหลดต้องการได้รับ ขึ้นอยู่กับชนิดและลักษณะของโหลดที่นำมาต่อกับระบบ โดยในทางวงจรไฟฟ้าค่า S_L นี้สามารถคำนวณได้จากผลคูณของแรงดันและค่าสังยุคเชิงซ้อนกระแส [1-3, 7, 8] และอาจมีค่าไม่คงที่ โดยในทางวงจรไฟฟ้า เราสามารถแผนภาพเส้นเดียวที่แสดงในรูปที่ 1(ค) ได้เป็นวงจรในรูปที่ 1(ง) ซึ่งจากวงจรจะได้ว่า กระแสที่ไหลเข้าสู่โหลด I_L และอิมพีแดนซ์สมมูลของโหลด Z_L คือ

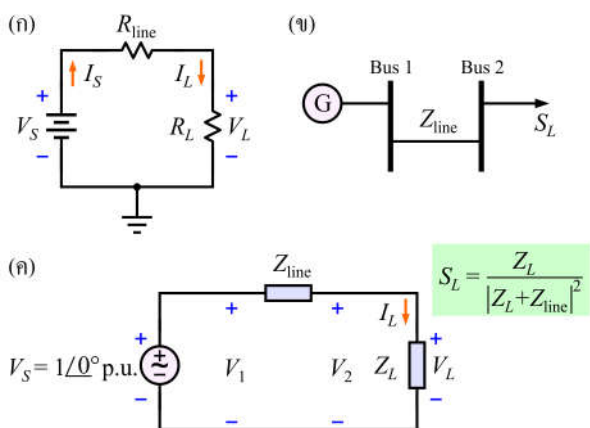
$$I_L = \frac{S_L^*}{V_L^*} = \frac{S_L^*}{V_S^*} \quad \text{และ} \quad Z_L = \frac{V_L}{I_L} = \frac{|V_S|^2}{S_L^*} \quad (2)$$

โดย * คือ ตัวดำเนินการสังยุคเชิงซ้อน (complex conjugate) และหากเราใช้ระบบแรงดันต่อหน่วย (per unit, p.u.) [1-3] คือให้ $V_S = 1$ p.u. และมีแรงดันเฟสเป็นแรงดันอ้างอิง จะได้ความสัมพันธ์ของกระแสโหลดและอิมพีแดนซ์สมมูลของโหลดคือ

$$I_L = S_L^* \quad \text{และ} \quad Z_L = 1/S_L^* \quad (3)$$

3. กรณีระบบ 2 บัส — วงจรอนุกรม

รูปที่ 2(ก) แสดงวงจรตัวต้านทานสองตัวที่ต่ออนุกรมกัน โดยมี



รูปที่ 2 (ก) วงจรตัวต้านทานอนุกรม, (ข) แผนภาพเส้นเดียวของระบบไฟฟ้ากำลัง 2 บัส ที่ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดกำลัง G อิมพีแดนซ์สาย Z_{line} และ โหลด S_L และ (ค) วงจรไฟสลับที่สอดคล้องกับรูป (ข) สมการในรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่กักของโหลดและค่าอิมพีแดนซ์ (ในกรณีกำลังคงที่)

ความต้านทานสาย R_{line} , ความต้านทานโหลด R_L และแหล่งจ่ายไฟตรง V_S วงจรนี้ประกอบด้วยสามโหนดและหนึ่งเมฆ ซึ่งวงจรนี้เทียบเคียงได้กับระบบไฟฟ้ากำลัง 2 บัสดังแสดงในรูปที่ 2(ข) และสามารถเขียนเป็นวงจรไฟสลับได้ดังรูปที่ 2(ค) ในการวิเคราะห์ระบบ 2 บัสในรูปที่ 2(ข) นี้ ผู้ที่เรียนวิชาการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง มักจะใช้ระเบียบวิธีเชิงเลขเพื่อแก้ปัญหาทางจรและหาปริมาณกระแสและกำลังไฟฟ้าที่ไหลระหว่างบัส [1-3] โดยพิจารณาให้โหนดกินกำลังไฟฟ้า (และกระแส) คงที่ การพิจารณาเช่นนี้อาจไม่สอดคล้องกับความเป็นจริงหากอุปกรณ์ที่เป็นโหลดไม่มีลักษณะที่คงกำลังคงที่ แต่เป็นเพียงโหลดอย่างง่ายเช่น เป็นโหลดคงที่ ซึ่งมีกำลังที่ใช้แปรผันตรงกับค่าแรงดันที่ตกคร่อมขั้วกำลังสอง ($P \propto V^2$) ดังนั้นการพิจารณากำลังโหลดคงที่นี้จึงถือเป็นการประมาณอย่างหนึ่ง สำหรับการวิเคราะห์วงจรอย่างรัดกุม เราจะต้องแบ่งเป็นสองกรณี คือ กรณีที่ 1 โหลดเป็นโหลดที่รับกำลัง S_L คงที่ และ กรณีที่ 2 โหลดมีอิมพีแดนซ์คงที่ ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของโหลดนี้ สามารถหาได้จากกรณีการวิเคราะห์ที่ไม่มีอิมพีแดนซ์ในสายส่ง (คือค่า Z_L สมการที่ (3))

กรณีที่ 1 โหลดรับกำลังคงที่: หากใช้ระบบแรงดันต่อหน่วย จะได้ว่าแรงดันโหลด V_L และ กระแสโหลด I_L คือ

$$V_L = \frac{Z_L}{Z_L + Z_{line}} \quad \text{และ} \quad I_L = \frac{V_L}{Z_L} = \frac{1}{Z_L + Z_{line}} \quad (4)$$

โดยค่า Z_L จะขึ้นกับค่ากำลังโหลด S_L คือ

$$S_L = V_L I_L^* = \frac{Z_L}{|Z_L + Z_{line}|^2} \quad (5)$$

ซึ่งสมการข้างต้นไม่สามารถเขียน Z_L ให้อยู่ในรูป S_L ได้ในกรณีทั่วไป แต่หากพิจารณาให้ทุกตัวแปรเป็นจำนวนจริง คือกำลังจริง $P_L = S_L$, ความต้านทานโหลด $R_L = Z_L$ และความต้านทานสายส่ง $R_{line} = Z_{line}$ จากสมการที่ (4) และ (5) จะได้ว่า

$$R_L = \frac{1 - 2P_L R_{line} \pm \sqrt{1 - 4P_L R_{line}}}{2P_L} \quad (6)$$

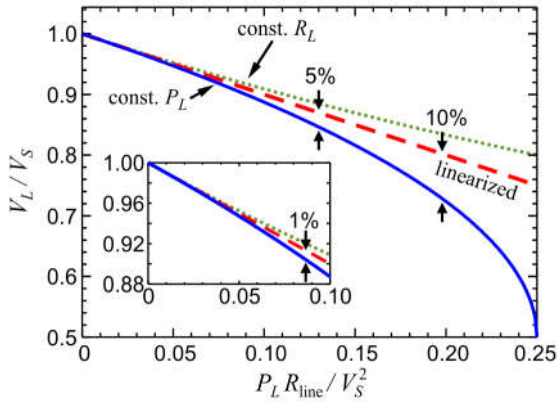
และ

$$V_L = \frac{1 \pm \sqrt{1 - 4P_L R_{line}}}{2} \quad (7)$$

ซึ่งกรณีทั่วไป แรงดันที่โหลดจะใกล้เคียงกับค่าแรงดันแหล่งจ่าย ดังนั้น ค่าตอบของสมการที่ (6) และ (7) จะมีเพียงกรณีเดียว และ เมื่อประมาณเชิงเส้นสมการทั้งสอง จะได้ว่า

$$R_L \approx P_L R_{line}^2 \quad \text{และ} \quad V_L \approx 1 - P_L R_{line} \quad (8)$$

รูปที่ 3 เส้นทึบและเส้นประ แสดงผลการคำนวณเปรียบเทียบในหน่วยนอร์มัลไลซ์ของค่าแรงดันโหลดที่ลดลง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความต้านทานของสายส่ง (จากสมการที่ (7) และ (8)) โดยหากค่าความต้านทานสายส่งมีค่าสูงก็จะทำให้การประมาณเชิงเส้นมีความผิดพลาด



รูปที่ 3 ผลการคำนวณเชิงเลขแสดงค่าแรงดันที่โหลด V_L เมื่อขนาดความต้านทานสายส่งมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเส้นทึบแสดงค่า V_L ในกรณีกำลังโหลดคงที่ (สมการที่ (7)) เส้นประแสดงผลจากการประมาณเชิงเส้น (สมการที่ (8)) และ เส้นจุดแสดงผลการคำนวณกรณีความต้านทานโหลดคงที่ (สมการที่ (10)) รูปเล็กแสดงผลการคำนวณในช่วงที่มีค่าความต้านทานสายส่งต่ำ

มาก โดยความผิดพลาดน้อยกว่า 1%, 5% และ 10% อยู่ที่ระดับ $P_L R_{line}$ น้อยกว่า 0.086, 0.160 และ 0.197 ตามลำดับ

กรณีที่ 2 โหลดมีอิมพีแดนซ์ Z_L คงที่: กรณีนี้เป็นกรณีอย่างง่ายที่มีวิธีการคำนวณสอดคล้องกับการวิเคราะห์วงจรอนุกรมพื้นฐานมากที่สุด นั่นคือ เราสามารถใช้กฎการแบ่งแรงดันในการคำนวณหาค่าแรงดันโหลดได้คือ

$$V_L = \frac{Z_L}{Z_L + Z_{line}} V_S = \frac{1}{1 + S_L^* Z_{line}} \quad (9)$$

และ หากพิจารณาให้ทุกตัวแปรเป็นจำนวนจริงเช่นเดียวกันกับในกรณีที่ 1 ข้างต้น เราจะสามารถเขียนได้ว่า

$$V_L = \frac{1}{1 + P_L R_{line}} \quad (10)$$

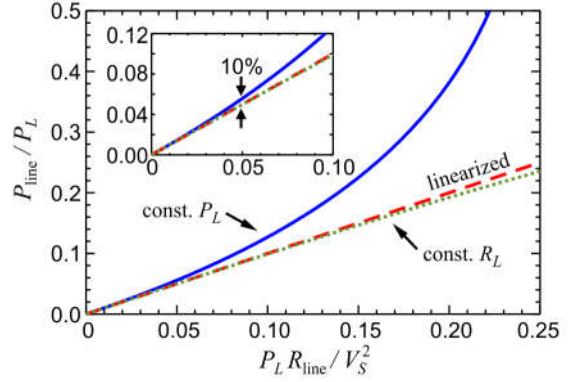
และสามารถพล็อตกราฟเพื่อเปรียบเทียบค่าแรงดันโหลดได้ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยจากรูปที่ 3 นี้ เราจะเห็นได้ว่า ในช่วงที่มีค่าความต้านทานสายส่งต่ำ คือ

$$R_{line} < \frac{1}{10 P_L} = \frac{R_L}{10} \quad (11)$$

ซึ่งในย่านนี้ ผลการคำนวณทั้งสองกรณีจะประมาณได้ว่าเท่ากัน (คือมีความผิดพลาดน้อย 2.5%)

4. การสูญเสียในสายส่ง

ในระบบแจกจ่ายกำลังไฟฟ้า (Power Distribution System) การสูญเสียในสายส่ง (Transmission Loss) S_{line} เป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างมาก วิศวกรผู้ออกแบบระบบจะต้องคำนึงถึงการสูญเสียนี้และพยายามทำให้มีค่าจริงน้อยที่สุดภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ สำหรับระบบ 1 บัสที่แสดงใน



รูปที่ 4 ผลการคำนวณเชิงเลขแสดงค่าการสูญเสียในสายส่ง P_{line} เมื่อขนาดความต้านทานสายส่งมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเส้นทึบแสดงค่า P_{line} ในกรณีกำลังโหลดคงที่ เส้นประแสดงผลจากการประมาณเชิงเส้น และ เส้นจุดแสดงผลการคำนวณกรณีความต้านทานโหลดคงที่ รูปเล็กแสดงผลการคำนวณในช่วงที่มีค่าความต้านทานสายส่งต่ำ

หัวข้อที่ 2 จะไม่มีกำลังสูญเสียนี้ เนื่องจากไม่มีการพิจารณาความต้านทานในสายส่ง ในขณะที่ระบบ 2 บัสที่แสดงในหัวข้อที่ 3 จะมีการสูญเสียนี้ ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$S_{line} = \frac{|V_S - V_L|^2}{Z_{line}} \quad (12)$$

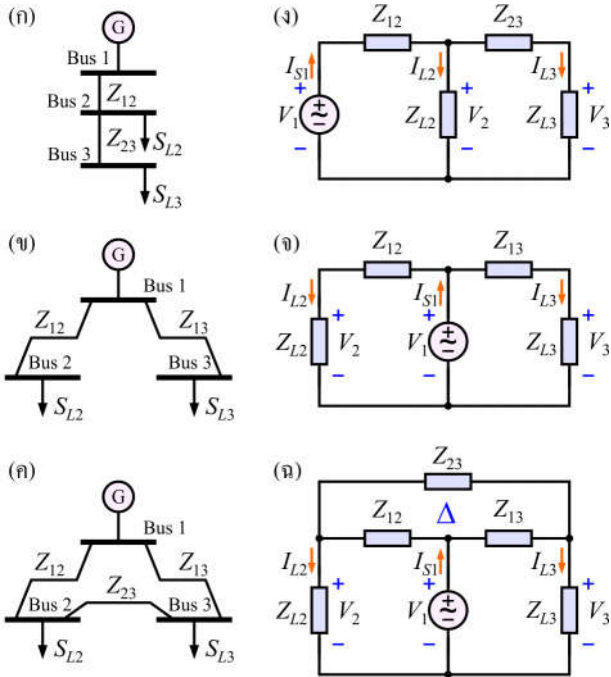
ซึ่งหากพิจารณาเป็นค่าต่อหน่วยและเป็นค่าจำนวนจริงเท่านั้นจะได้ว่ากำลังจริงที่สูญเสียในสายส่งคือ

$$P_{line} = \frac{(V_S - V_L)^2}{R_{line}} \quad (13)$$

เมื่อแทนค่า V_L จากสมการที่ (7), (8) และ (10) เราสามารถพล็อตเปรียบเทียบกันได้ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยจากรูปจะเห็นได้ว่า ผลการคำนวณในกรณีที่มีประมาณเชิงเส้น ใกล้เคียงกับ ผลในกรณีที่สมมติให้โหลดมีอิมพีแดนซ์คงที่ สำหรับกรณีที่โหลดได้รับกำลังคงที่ จะมีค่าที่แตกต่างกับกรณีอื่นมาก และมีค่ามากขึ้นเมื่อความต้านทานสายส่งมีค่ามากขึ้น โดยค่าความแตกต่างที่มากกว่า 10% จะเกิดขึ้นในย่านที่มีความต้านทานของสายส่งที่นอร์มัลไลซ์แล้ว ($P_L R_{line}$) มากกว่า 0.05

5. กรณีระบบ 3 บัส

ในกรณีระบบ 3 บัส ทอพอโลยีการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้ากำลังจะมีได้ทั้งหมด 3 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 5(ก) – 5(ค) ซึ่งระบบทั้งสามมีทอพอโลยีโครงสร้างแบบขั้นบันได (ladder structure) แบบรัศมี (radial structure) และแบบเมชกริด (mesh structure) ตามลำดับ โดยมีองค์ประกอบคือ แหล่งกำเนิดกำลัง G (หรือแหล่งจ่าย V_S) อิมพีแดนซ์สาย Z_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) ที่เชื่อมต่อระหว่างบัสที่ i และบัสที่ j และโหลด S_{L2} และ S_{L3} ซึ่งระบบทั้งสามสามารถเขียนได้เป็นวงจรไฟฟสลับดังแสดงในรูปที่



รูปที่ 5 (ก)-(ค) แผนภาพเส้นเดียวของระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัสที่มีทอพอโลยีโครงสร้างแบบขั้นบันได, แบบรัศมี และแบบเมฆกริด แต่ละระบบประกอบด้วยแหล่งกำเนิดกำลัง G 1 ตัว อิมพีแดนซ์สาย Z_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) และโหลด S_{L2} และ S_{L3} (ง)-(จ) วงจรไฟสลับที่สอดคล้องกับรูป (ก)-(ค) ตามลำดับ รูปสามเหลี่ยมในเมฆด้านบนในรูป (ด) ระบุเมฆที่สามารถใช้การแปลงวาย-เดลต้าได้

5(ง) - 5(จ) ตามลำดับ แนวการวิเคราะห์วงจรเหล่านี้ทำได้โดยง่าย หากเราห่ออิมพีแดนซ์สมมูลของโหลดแต่ละตัวเสียก่อน โดยสมมติให้ค่าอิมพีแดนซ์นี้คงที่ (ไม่ขึ้นกับแรงดันโหลด) จะได้ว่า

$$Z_{L2} = 1/S_{L2}^* \quad \text{และ} \quad Z_{L3} = 1/S_{L3}^* \quad (14)$$

จากนั้นจึงใช้ทฤษฎีวงจรพื้นฐาน เช่น การรวมค่าอิมพีแดนซ์แบบอนุกรมและแบบขนาน สำหรับรูปที่ 5(ง) และ 5(จ) หรือการแปลงวาย-เดลต้า (wye-delta transformation) ในเมฆของอิมพีแดนซ์สายส่งในรูปที่ 5(ค) หรือใช้ทฤษฎีทั่วไปในการวิเคราะห์วงจร [7] ได้แก่ ทฤษฎีการวิเคราะห์แรงดัน โหนด การวิเคราะห์กระแส การสร้างวงจรสมมูลเทวินิน ในการแก้ปัญหาวงจรเหล่านี้ เพื่อให้ทราบค่าแรงดันที่แต่ละ โหนด (บัส) และกระแสที่ไหลในแต่ละเมฆ โดยเมื่อได้ค่าเหล่านี้แล้ว เราจะสามารถคำนวณค่ากำลังที่สูญเสียในแต่ละกิ่งของวงจรได้ โดยกำลังที่คำนวณได้สำหรับโหลด Z_{L2} และ Z_{L3} สามารถนำย้อนกลับมาเปรียบเทียบกับค่า S_{L2} และ S_{L3} ที่กำหนดในตอนต้น เพื่อบ่งบอกความผิดพลาดของการคำนวณ โดยการประมาณว่าอิมพีแดนซ์คงที่ ซึ่งในกรณีทั่วไปหากความต้านทานสายส่งมีค่าต่ำแล้ว ผลการคำนวณโดยประมาณนี้จะถือว่าถูกต้อง

6. สรุป

บทความนี้แสดงความเชื่อมโยงระหว่างแผนภาพเส้นเดียวของระบบไฟฟ้ากำลัง 1, 2, และ 3 บัส และ วงจรไฟสลับพื้นฐาน โดยการใช้ทฤษฎีวงจร เนื่องจากโดยทั่วไปในระบบไฟฟ้ากำลัง เราจะกำหนดให้โหลดกินกำลังคงที่ ทำให้ผลที่คำนวณได้แตกต่างจากกรณีที่วิธีการวิเคราะห์วงจรพื้นฐานอยู่บ้าง แต่หากวงจรที่เราพิจารณาอิมพีแดนซ์ของสายส่งค่า เราก็คสามารถใช้การประมาณที่นำเสนอในบทความนี้ได้ วิธีการที่แสดงในบทความนี้ เป็นความรู้พื้นฐานที่ทำให้ผู้ที่สนใจด้านวิศวกรรมไฟฟ้ากำลังได้มุมมองใหม่ ในการใช้ทฤษฎีวงจรไฟฟ้าที่เคยศึกษาก่อนร่วมกับการพิจารณาวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ Mr. Pisey Heng, นางสาวอัญชัชฐา ปราสาททรัพย์ และ ว่าที่ร้อยตรี ธานี โกสุม นิสิตและครูช่าง ในสังกัดคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่สนับสนุนการทำวิจัยที่นำเสนอในบทความนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. J. Grainger and W. D. Stevenson, Jr., *Power System Analysis*, McGraw-Hill, 1994.
- [2] J. D. Glover, M. S. Sarma, and T. J. Overbye, *Power System: Analysis & Design*, 5th Ed.: Cengage, 2012.
- [3] นิตย์ เพ็ชรรัศมี, การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2557.
- [4] ระเบียบคณะกรรมการสภามหาวิทยาลัย สืบค้นจาก <http://www.coe.or.th> (10 มิถุนายน 2560)
- [5] N. Hashemi, M. S. Abu, H. Kashefi, and K. Rahimi, "Undergraduate Students' Difficulties in Conceptual Understanding of Derivation," *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 143, pp. 358-366, 2014.
- [6] S. Firouzian, Z. Ismail, R. A. Rahman, Y. M. Yusof, "Mathematical Learning of Engineering Undergraduates," *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 56, pp. 537 - 545, 2012.
- [7] สุวิทย์ ภิระวิทยา, *วิศวกรรมไฟฟ้าเบื้องต้น สำหรับนิสิตนักศึกษาวิศวกรรมศาสตร์สาขาอื่นที่เกี่ยวข้อง*, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2557.