



การตรวจวัดค่าประสิทธิภาพของกำลังไฟฟ้าปรากฏในระบบไฟฟ้าในกรณีระบบโหลดไม่เป็นเชิงเส้นและไม่สมดุล

EFFECTIVE APPARENT POWER MEASUREMENT BASED ON NONLINEAR AND UNBALANCED LOAD

สืบศักดิ์ สุขแสงพนมรุ้ง^{1*}, ชญานนท์ เจ๊ะเต๊ะ², ชัยณพพงศ์ ฉัตรคุณเสถียร³ และ ธวัชชัย ชยวานิช⁴

^{1,2,3} นักศึกษา, ⁴ อาจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

*Corresponding author, E Mail: suebsak_hall@hotmail.com

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าชนิดต่างๆ ที่ใช้กันในชีวิตประจำวันนั้น มักจะเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทที่ไม่เป็นเชิงเส้น เป็นส่วนใหญ่ซึ่งแตกต่างจากอุปกรณ์ไฟฟ้าในยุคคลาสสิกที่มักจะเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบเชิงเส้นส่งผลทำให้การคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏนั้น มีความซับซ้อนและแตกต่างไปจากในยุคคลาสสิก เครื่องวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าปรากฏในยุคคลาสสิกจำนวนมากมักจะใช้วิธีในการหาค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมทั้ง 3 เฟสแบบพีชคณิต ในขณะที่เครื่องวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าสมัยใหม่นั้น เริ่มมีการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมของระบบไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่มีการกำหนดนิยามการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าต่างๆ ไว้ ทั้งนี้จากการศึกษาวิจัยเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมของระบบที่ได้จากการจัดทำเครื่องวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าปรากฏที่พัฒนาขึ้นโดยทีมวิจัยและพัฒนา (SCC-2020) นั้นจะเห็นได้ว่าการคำนวณโดยมาตรฐาน IEEE 1459-2010 ของประเทศสหรัฐอเมริกา, มาตรฐาน DIN 40110 ของประเทศเยอรมันและแบบพีชคณิตนั้น มีความแตกต่างกันค่อนข้างมากอย่างมีนัยยะสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีระบบไฟฟ้าแบบ 3 เฟส 4 สาย ที่ต่อเข้ากับโหลดที่ไม่สมดุลหรือเป็นโหลดทางไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้น แต่ในกรณีที่โหลดทั้ง 3 เฟสนั้นเป็นโหลดแบบเชิงเส้นและสมดุลค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมของระบบที่ได้จากการคำนวณทั้งสามแบบนี้จะมีค่าเท่ากัน นอกจากนั้นแล้วค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้ารวมของระบบไฟฟ้าแบบ 3 เฟส 4 สายในกรณีที่ระบบไฟฟ้านั้นต่อเข้ากับโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นหรือโหลดที่ไม่สมดุลที่คำนวณได้จากกำลังไฟฟ้าแบบพีชคณิตนั้นยังมีค่าต่ำกว่าค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 Std. และ DIN 40110 Std.

คำสำคัญ: กำลังไฟฟ้าปรากฏรวม; โหลดไม่สมดุล; โหลดชนิดไม่เป็นเชิงเส้น; IEEE 1459-2010 Std.; DIN 40110 Std.

ABSTRACT

Based on the discrimination of measurement results, the total apparent power in 3 phases, 4 wires system with terminal is corresponding to unbalanced and nonlinear loads. We come to the conclusion that the total apparent power followed by the IEEE 1459-2010 Standard and DIN 40110 Standard have a similar value whether the load is linear or nonlinear. By the way, the

Suebsak Suksangpanomrung^{1*}, Chayanon Jehteh², Chitsanupong Chatkunsathien³ and Thawatchai Chayawanich⁴

¹⁻³ Undergraduate student, ⁴ Lecture

total apparent power for the system according to the arithmetic summation will less than another two values from the IEEE 1459-2010 and DIN 40110 Standard significantly. Since the total apparent power is different, the total power factor of the system is also miscellaneous in each of the calculation method. The only way that the total apparent power equivalent in all calculations is the condition of the balanced and linear load.

KEYWORDS: Total Apparent Power; Unbalanced Load; Nonlinear Load; Harmonics; 3 phases 4 wires system.

1. บทนำ

สืบเนื่องจากทางคณะผู้วิจัยได้พบเจอปัญหาเกี่ยวกับการวัดค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวม (Total Apparent Power) ของระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย โดยพบว่าค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมของระบบ 3 เฟสที่ได้จากการตรวจวัดโดยใช้เครื่องวิเคราะห์กำลังไฟฟ้า (Power Analyzer) ยี่ห้อต่างๆ ที่ตรวจวัดระบบเดียวกันเพื่อเปรียบเทียบกันนั้น มีค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมของระบบที่แตกต่างกัน ซึ่งจากการสำรวจเครื่องวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าส่วนใหญ่จะมีการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมในกรณีระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สายเป็นการรวมค่าโดยตรงแบบพีชคณิต (Arithmetic Summation) อีกทั้งยังพบว่าในปัจจุบันได้มีแนวคิดการหาค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวม 3 เฟสหลายแนวคิดซึ่งแตกต่างไปจากตำราที่เรียนกันโดยทั่วไปมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นและไม่สมดุลที่มีความซับซ้อนกว่าวงจรเชิงเส้นทั่วไปมาก จึงเป็นเหตุให้การคำนวณค่าตัวประกอบกำลังไฟฟารวมของระบบมีค่าแตกต่างกันไป และอาจจะทำให้เข้าใจผิดได้ว่าค่าที่ตรวจวัดได้นั้นเป็นไปตามนิยามที่คุ้นเคยตามความรู้เดิมที่เรียนมาจากตำรา ทั้งนี้เนื่องจากการคำนวณค่าตัวประกอบกำลังไฟฟานั้น จะพิจารณาจากอัตราส่วนระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยรวมของระบบ (Total Average Power) กับค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมของระบบนั่นเอง ทำให้ทางกลุ่มผู้วิจัยเกิดความสนใจที่จะศึกษาเกี่ยวกับการตรวจวัดค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมของระบบที่สามารถใช้เป็นค่าอ้างอิงที่ถูกต้อง โดยพบว่าค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมของระบบที่คำนวณตามนิยามต่างๆ จะให้ผลลัพธ์ออกมาต่างกันตามแต่เงื่อนไขของความสมดุลและชนิดของโหลดในแต่ละเฟส ทั้งนี้ ทางคณะผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องมือวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าปรากฏแบบต้นทุนต่ำด้วยงบประมาณที่มีอย่างจำกัด สำหรับวัดค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมของระบบและค่ากำลังไฟฟ้าอื่นๆ ในระบบไฟฟ้าแบบ 3 เฟส 4 สายขึ้น และนำค่าตัวแปรทางไฟฟ้าต่างๆ ที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าปรากฏที่ทางคณะผู้วิจัยได้สร้างขึ้น มาเปรียบเทียบกับเครื่องวิเคราะห์กำลังไฟฟ้ายี่ห้ออื่นที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในแวดวงวิศวกรรม ผลการศึกษาพบว่าจากการวัดค่าตัวแปรพื้นฐานทางไฟฟ้าที่จำเป็นต่อการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าปรากฏรวมของระบบได้แก่ ค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย ค่าฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสไฟฟ้าลำดับต่างๆ ที่ตรวจวัดได้ในแต่ละเฟสจากเครื่องวัดทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกันหมด ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะศึกษาเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวม 3 เฟสจากเครื่องวัดแต่ละยี่ห้อที่ใช้แนวคิดในการหาค่ารวมที่แตกต่างกัน เช่นหาค่ารวมแบบพีชคณิต หรือหาค่ารวมแบบเวกเตอร์ โดยทางคณะผู้วิจัยได้นำเครื่องวัดที่พัฒนาขึ้นเองเพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวม 3 เฟส ตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 และ DIN 40110 มาทำการศึกษาเปรียบเทียบ อย่างไรก็ตามเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าขณะทำการทดสอบอาจจะไม่คงที่นักและเครื่องวัดแต่ละเครื่องมีช่วงเวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อค่าที่วัดไม่เท่ากัน จึงทำให้ค่าที่บันทึกได้ในบางขณะทำการทดสอบจึงอาจแตกต่างกันได้บ้าง ประกอบกับค่าทางไฟฟ้าที่วัดได้ในแต่ละเฟสจากเครื่องวัดที่พัฒนาขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับเครื่องวัดยี่ห้อต่างๆ ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้

จะเน้นสังเกตค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวม 3 เฟส จากเครื่องวัดที่พัฒนาขึ้นเป็นสำคัญ เพื่อจะชี้ให้เห็นถึงความแตกต่างของค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวม 3 เฟสที่วัดได้ตามนิยามต่างๆ โดยสามารถแบ่งกรณีในการศึกษาออกได้เป็นกรณีดังต่อไปนี้

1.1 การคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมของระบบ 3 เฟส แบบพีชคณิต [1]

สำหรับในกรณีของระบบไฟฟ้าแบบ 3 เฟส 4 สายนั้น การคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมของระบบแบบพีชคณิตคือการนำค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏในแต่ละเฟสมาบวกรวมกันแบบตรงไปตรงมา ดังแสดงในสมการที่ 1

$$S_A = S_a + S_b + S_c \quad (1)$$

S_A คือค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมแบบพีชคณิต (Total Arithmetic Apparent Power) หน่วย โวลต์แอมป์ (VA)

S_k คือค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏในแต่ละเฟสโดยที่ $k = a, b, c$ หน่วย โวลต์แอมป์ (VA)

โดยค่าของกำลังไฟฟ้าปรากฏในแต่ละเฟสนั้น จะสามารถพิจารณาได้จากผลคูณของค่าแรงดันไฟฟ้าเฟสเทียบกับกระแสที่ไหลผ่านเฟส และค่ากระแสไฟฟ้าเฟสเทียบกับกำลังสองที่วัดได้ในแต่ละเฟส ซึ่งในกรณีระบบ 3 เฟส 4 สาย ที่ต่อเข้ากับโหลดทางไฟฟ้าที่สมดุล จะได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏในแต่ละเฟสจะมีค่าเท่ากันจึงสามารถที่จะเลือกพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏจากเฟสใดเฟสหนึ่งแล้วนำมาคูณสามจะเท่ากับค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมของระบบ แต่ทว่าหากระบบนั้นถูกเชื่อมต่อเข้ากับโหลดที่ไม่สมดุลจะส่งผลทำให้การวัดค่าเพียงเฟสเดียวแล้วนำมาคูณสามนั้น จะเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้น

1.2 การคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมของระบบ 3 เฟส แบบเวกเตอร์ [2]

สำหรับในกรณีของระบบไฟฟ้าแบบ 3 เฟส 4 สายนั้น การคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมของระบบแบบเวกเตอร์คือการนำค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมของระบบ จากการพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยรวมของระบบและค่าของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟรวมของระบบ (Total Reactive Power) แทนการบวกค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมในแต่ละเฟส ดังแสดงในสมการที่ 2

$$S_V = \sqrt{(P_a + P_b + P_c)^2 + (Q_a + Q_b + Q_c)^2} \quad (2)$$

S_V คือค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมแบบเวกเตอร์ (Total Vector Apparent Power) หน่วย โวลต์แอมป์ (VA)

P_k คือค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยในแต่ละเฟสโดยที่ $k = a, b, c$ หน่วย วัตต์ (W)

Q_k คือค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในแต่ละเฟสโดยที่ $k = a, b, c$ หน่วย วาร์ (var)

โดยหากพิจารณาจากรูปแบบของสมการแล้วจะพบว่าเป็นการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมของระบบในลักษณะนี้จะเป็นการคำนวณรวมค่ากำลังไฟฟ้าจากส่วนประกอบของแกนกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยค่าหนึ่งและแกนกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟอีกค่าหนึ่งใกล้เคียงกับการหาขนาดของปริมาณทางเวกเตอร์ทั่วไป

1.3 การคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมของระบบ 3 เฟส ตามมาตรฐาน DIN 40110 [3]

สำหรับในกรณีของระบบไฟฟ้าแบบ 3 เฟส 4 สาย การคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมของระบบตามมาตรฐาน DIN 40110 นั้น จะมีวิธีการคำนวณที่แตกต่างออกไปจากสองวิธีข้างต้นดังที่ได้กล่าวมา คือการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมของระบบจะคำนวณผ่านค่าแรงดันไฟฟ้ารวม (Collective Voltage) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่าแรงดันไฟฟ้าเฟสเทียบกราวด์เฉลี่ยยกกำลังสองในแต่ละเฟส A,B,C รวมทั้งค่าแรงดันไฟฟ้าเฟสเทียบเฟสเฉลี่ยยกกำลังสองของแต่ละเฟส และค่ากระแสไฟฟ้ารวม (Collective Current) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยยกกำลังสองในแต่ละเฟส A,B,C และ N เข้าไว้ด้วยกัน เพื่อใช้เป็นค่าตัวแทนของแรงดันและกระแสไฟฟ้ารวมจากทั้งระบบโดยจะอาศัยการคำนวณเทียบเคียงระบบไฟฟ้าแบบ 3 เฟส 4 สาย ให้กลายเป็นเพียงแค่ระบบไฟฟ้าแบบ 1 เฟสเท่านั้นดังแสดงในสมการที่ 3

$$S_{\Sigma} = V_{\Sigma} I_{\Sigma} \quad (3)$$

โดยที่ค่าแรงดัน และกระแสไฟฟ้ารวมที่ใช้ในการคำนวณนั้น สามารถที่จะคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 4 และ 5 ดังแสดงตามลำดับ

$$V_{\Sigma} = \frac{1}{2} \sqrt{V_{AN}^2 + V_{BN}^2 + V_{CN}^2 + V_{AB}^2 + V_{BC}^2 + V_{CA}^2} \quad (4)$$

$$I_{\Sigma} = \sqrt{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_n^2} \quad (5)$$

S_{Σ} คือค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมของระบบ (Collective Apparent Power) หน่วย โวลต์แอมป์ (VA)

V_{Σ} คือค่าแรงดันไฟฟ้ารวมของระบบ (Collective voltage) หน่วย โวลต์ (V)

I_{Σ} คือค่ากระแสไฟฟ้ารวมของระบบ (Collective current) หน่วย แอมป์ (A)

1.4 การคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมของระบบ 3 เฟส ตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 [4]

สำหรับในกรณีของระบบไฟฟ้าแบบ 3 เฟส 4 สาย การคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมของระบบตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 จะอาศัยการคำนวณผ่านค่าแรงดันประสิทธิผล (Effective Voltage) และกระแสไฟฟ้าประสิทธิผล (Effective Current) เป็นค่าตัวแทนของแรงดันและกระแสไฟฟ้าในระบบคล้ายคลึงกับมาตรฐาน DIN 40110 ของเยอรมัน แต่แตกต่างกันตรงที่ว่าการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมของระบบตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 นั้นจะพิจารณาเรื่องของลักษณะโครงสร้างการเชื่อมต่อระบบของโหลด (Topology of Load) และผลของ Skin effect เข้าไปในการวิเคราะห์รวมอยู่ด้วย นอกจากนั้นการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมของระบบจะอาศัยการคำนวณเทียบเคียงกับระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย ในกรณีที่โหลดสมดุล ดังแสดงในสมการที่ 6

$$S_e = 3V_e I_e \quad (6)$$

โดยที่ค่าแรงดัน และกระแสไฟฟ้าประสิทธิผลที่ใช้ในการคำนวณนั้นสามารถที่จะคำนวณได้ โดยใช้สมการที่ 7 และ 8 ดังแสดง

$$V_e = \sqrt{\frac{3(V_{AN}^2 + V_{BN}^2 + V_{CN}^2) + \xi(V_{AB}^2 + V_{AC}^2 + V_{BC}^2)}{9(1 + \xi)}} \quad (7)$$

$$I_e = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + \rho I_n^2}{3}} \quad (8)$$

S_e คือค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏประสิทธิผลของระบบ (Effective Apparent Power) หน่วย โวลต์แอมป์ (VA)

V_e คือค่าแรงดันไฟฟ้าประสิทธิผลของระบบ (Effective voltage) หน่วย โวลต์ (V)

I_e คือค่ากระแสไฟฟ้าประสิทธิผลของระบบ (Effective current) หน่วย แอมป์ (A)

เมื่อค่า ρ นั้นเป็นค่าอัตราส่วนของค่าความต้านทานในสายนิวทรัล และสายไลน์ ซึ่งโดยปกติแล้วค่าคงที่นี้จะเป็นค่าที่ไม่ทราบค่า ดังนั้นแล้วในมาตรฐาน IEEE 1459-2010 นั้นจึงได้มีการแนะนำให้แทนค่า $\rho = 1$ แทนได้ส่วนค่า ξ เป็นค่าอัตราส่วนของค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยระหว่างโหลดที่ต่อแบบเดลต้าและต่อแบบวายในระบบซึ่งค่าคงที่นี้ในทางปฏิบัติแล้วจะขึ้นอยู่กับรูปแบบการเชื่อมต่อโครงสร้างของโหลดซึ่งไม่แน่นอน ดังนั้นจึงได้มีการกำหนดไว้ในมาตรฐานเช่นเดียวกันว่าให้แทนค่า $\xi = 1$ ได้เช่นเดียวกัน ดังนั้นก็จะสามารถคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมของทั้งระบบภายใต้เงื่อนไขดังกล่าวออกมาได้

ตารางที่ 1 ตัวแปรค่ากำลังไฟฟ้าในระบบตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010

Quantity or indicator	Combined	Fundamental powers	Nonfundamental powers
Apparent Power (VA)	S	S_1	$S_N \ S_H$
Active (W)	P	P_1	P_H
Nonactive (var)	N	Q_1	$D_I \ D_V \ D_H$
Line utilization	$PF = P / S$	$PF_1 = P_1 / S_1$	—
Harmonic Pollution	—	—	S_N / S_1

1.5 การคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมของระบบแบบเวกเตอร์ตามแนวคิดของ Budeanu-Curtis-Silsbee [5]

สำหรับในกรณีของระบบไฟฟ้าแบบ 3 เฟส 4 สาย การคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมของระบบนั้น จะใกล้เคียงกับการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมของระบบแบบเวกเตอร์ตามปกติ แต่จะมีแกนของค่ากำลังไฟฟ้า Distortion Power เข้ามาพิจารณาในสมการด้วยโดยมองว่าแกนของ Distortion Power นั้นเป็นแกนกำลังทางไฟฟ้าอีกตัวหนึ่งที่แยกออกมาดังแสดงในสมการที่ 9

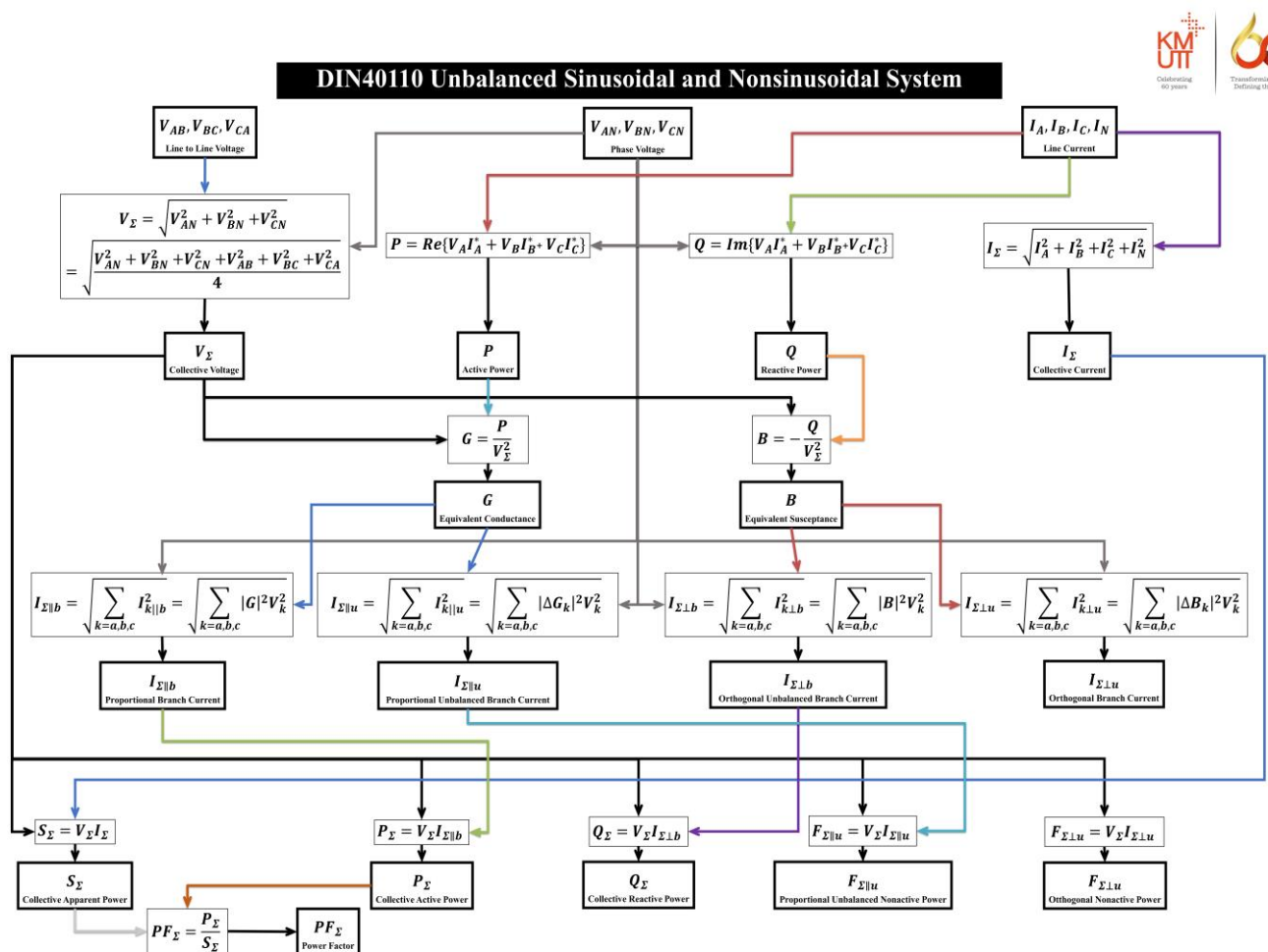
$$S_v' = \sqrt{(P_a + P_b + P_c)^2 + (Q_a + Q_b + Q_c)^2 + (D_a + D_b + D_c)^2} \quad (9)$$

S'_V คือค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมแบบเวกเตอร์ตามแนวคิดของ Budeanu-Curtis-Silsbee หน่วย โวลต์แอมป์ (VA)

D'_V คือค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน (Distortion Power) ในแต่ละเฟสโดยที่ $k = a, b, c$ หน่วย วาร์ (var)

โดยที่ค่าของ Distortion Power นั้นจะมีหน่วยเป็น var เช่นเดียวกับกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 10

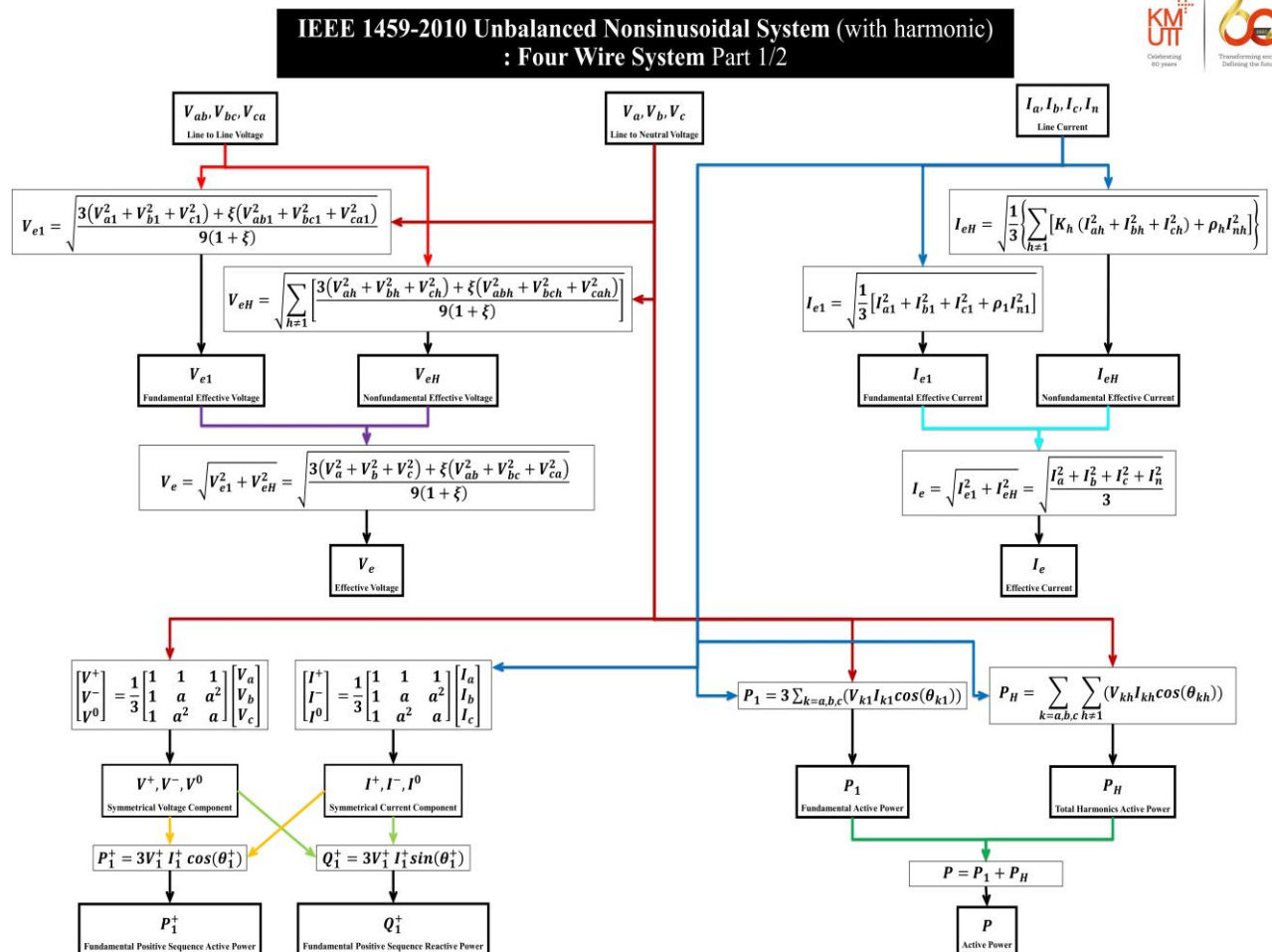
$$D_k = \sqrt{S_k^2 - P_k^2 - Q_k^2} \text{ เมื่อ } S_k = \sqrt{\sum_h V_{kh}^2 \sum_h I_{kh}^2} \quad (10)$$



รูปที่ 1 วิธีการคำนวณตัวแปรค่ากำลังไฟฟ้าในระบบตามมาตรฐาน DIN 40110

จึงสังเกตได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมของระบบจากที่ได้กล่าวมาในเบื้องต้นนั้น มีนิยามในการคำนวณที่แตกต่างกันซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมของระบบที่แตกต่างกัน ย่อมที่จะส่งผลทำให้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้ารวมของทั้งระบบนั้นแตกต่างกันด้วย อีกทั้งในอนาคตทางกลุ่มผู้วิจัยมีความมุ่งหวังที่จะให้มีการกำหนดหรือจัดทำมาตรฐานการที่เกี่ยวข้องกับการวัดค่าตัวแปรกำลังทางไฟฟ้าต่างๆให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน เพื่อประโยชน์ในการนำไปใช้ในทางวิศวกรรมศาสตร์สำหรับประเทศไทยต่อไปในอนาคต

เช่น การระบุค่าของขนาดพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งโดยทั่วไปนั้นจะระบุเป็น kVA โดยในการจัดทำงานวิจัยในครั้งนี้ทางคณะผู้วิจัยมุ่งเน้นที่จะเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมของระบบระหว่างมาตรฐาน IEEE 1459-2010, DIN 40110 และแบบพีชคณิตเป็นหลัก



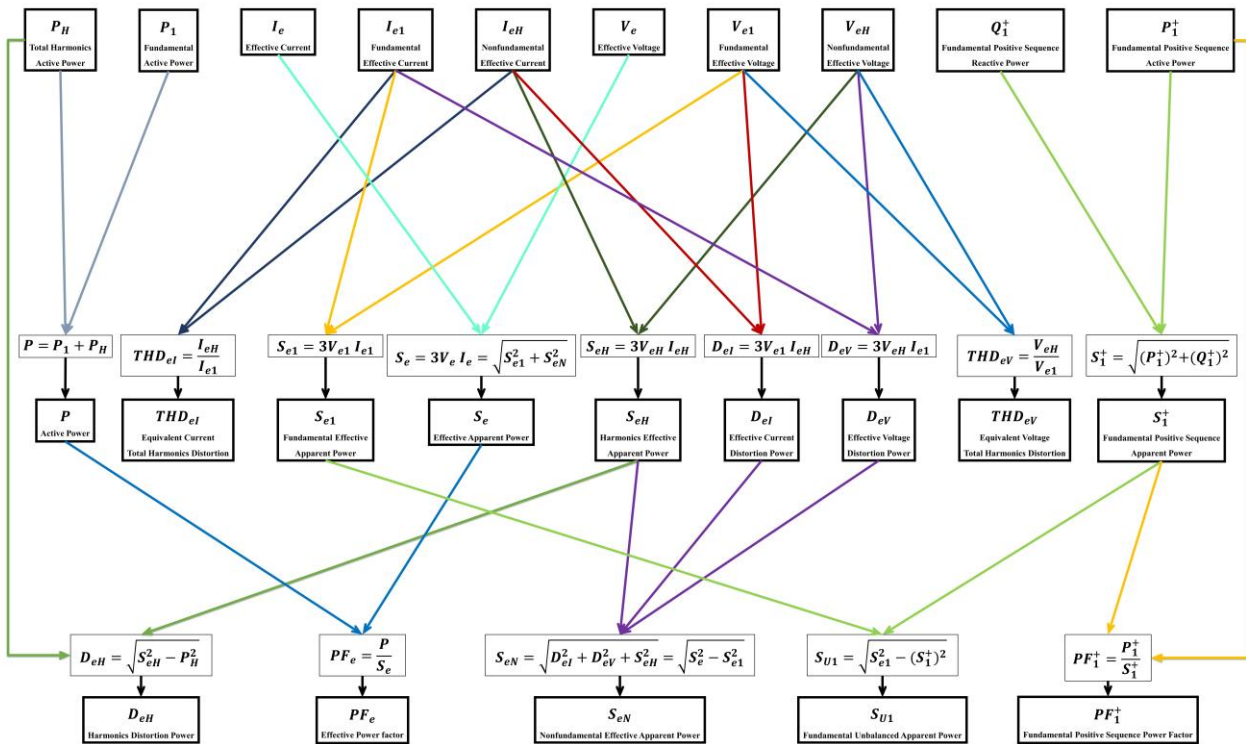
รูปที่ 2 วิธีการคำนวณตัวแปรค่ากำลังไฟฟ้าในระบบตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010

2. การออกแบบเครื่องวัดกำลังไฟฟ้าปรากฏรวมของระบบไฟฟ้าแบบ 3 เฟส 4 สาย

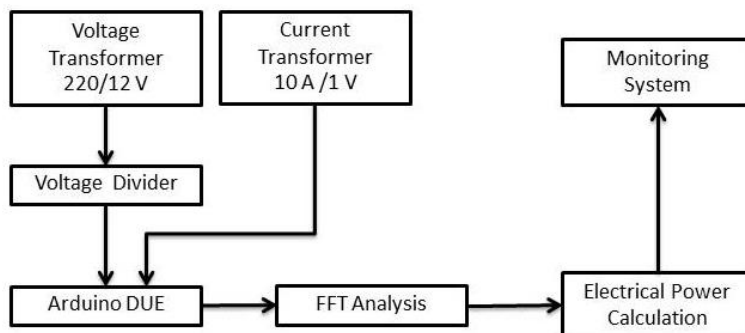
ในการออกแบบเครื่องมือวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าปรากฏรวมทั้ง 3 เฟสนั้น จะเลือกใช้อุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino DUE ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีระบบประมวลผลจาก Atmel 32-bit SAM3X8E CPU ในตระกูล ARM Cortex-M3 โดยมีค่าความถี่ของสัญญาณนาฬิกาที่สูงถึง 84 MHz และ SRAM ที่ 96 kB ซึ่งเหมาะสำหรับงานที่ต้องการทำการซักข้อมูลที่มีความถี่สูง โดยอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำหน้าที่เป็นตัวรับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากวงจรแบ่งแรงดันซึ่งทำหน้าที่ในการลดทอนแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าไม่สูงเกิน 3.3 โวลต์จากหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าขนาด 220/12 โวลต์ชนิดแกนเหล็กธรรมดา เพื่อเข้าพอร์ตอนาล็อกอินพุตของอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ รวมทั้งค่าของกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการวัดโดยใช้หม้อแปลงกระแสไฟฟ้าแบบแยก

แกน (Split-Core Type) ขนาดพิกัด 10A/1V ก็จะถูกนำมาเพื่อคำนวณองค์ประกอบของฮาร์มอนิกขนาด 32 ลำดับด้วยอัลกอริทึม FFT ซึ่งทางกลุ่มผู้วิจัยได้ทำการเขียนขึ้นโดยใช้โปรแกรม Arduino IDE ดังแสดงเป็นแผนภาพบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4

**IEEE 1459-2010 Unbalanced Nonsinusoidal System (with harmonic)
: Four Wire System Part 2/2**



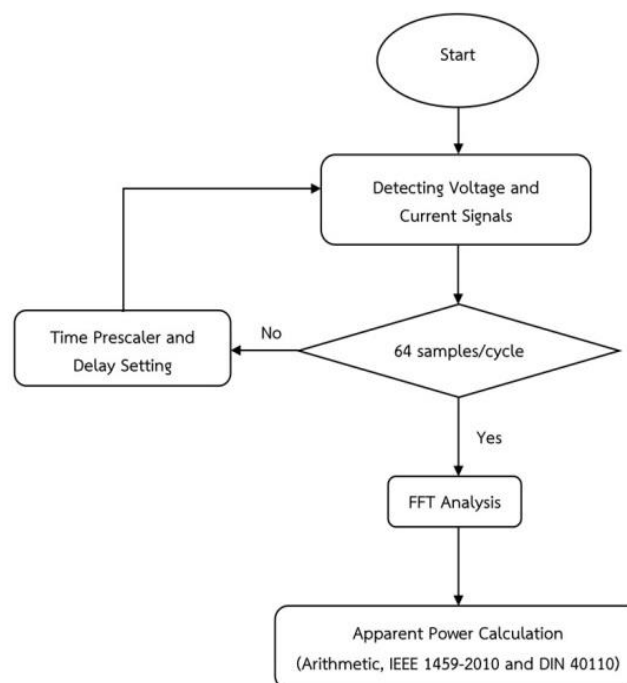
รูปที่ 3 วิธีการคำนวณตัวแปรค่ากำลังไฟฟ้าในระบบตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010



รูปที่ 4 บล็อกไดอะแกรมการทำงานในแต่ละเฟสและลักษณะของเครื่องวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าปรากฏ SCC-2020

3. การตรวจวัดค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมของระบบ

ในการออกแบบเพื่อทำการทดลองตรวจวัดค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏของระบบไฟฟ้าแบบ 3 เฟส 4 สายนั้น จะประกอบไปด้วยชุดตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าซึ่งใช้เป็นหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าแบบ 1 เฟส 3 ตัวมาต่อแบบวายเพื่อเชื่อมต่อเข้ากับระบบทั้งเฟส A,B,C และ N ที่ขนาดพิกัด 220 V/12 V ก่อนนำค่าแรงดันไฟฟ้านี้มาเชื่อมต่อเข้ากับวงจรสำหรับแบ่งแรงดันไฟฟ้าเพื่อนำไปเข้าอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ต่อไป โดยจะทำการวัดกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสซึ่งประกอบด้วยเฟส A,B และ C ด้วยหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าแบบแยกแกนขนาดพิกัด 10A/1V และใช้อุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino DUE ประเภท 32-Bit ARM ในการเขียนคำสั่งเพื่อใช้ในการแยกองค์ประกอบที่เกิดขึ้น เนื่องจากค่าฮาร์มอนิกของทั้งแรงดันและกระแสไฟฟ้าโดยใช้วิธีการวิเคราะห์จากการแปลงฟูริเยร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform) [6] ตามอัลกอริทึมที่แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ผังงานการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมของระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย

โดยจะมีการทำการวัดค่าของแรงดันและกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยยกกำลังสอง อีกทั้งตัวแปรที่ใช้สำหรับวิเคราะห์กำลังทางไฟฟ้าเบื้องต้น เช่นค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยหรือค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเป็นต้น เพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำและความถูกต้องที่ได้จากการวัดค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมของระบบที่ต่อเข้ากับโหลดที่ไม่สมดุล และมีส่วนประกอบของฮาร์มอนิก โดยเครื่องวิเคราะห์กำลังทางไฟฟ้า (Power Analyzer) ที่ทางกลุ่มผู้วิจัยได้จัดทำขึ้นเพื่อทดสอบกับเครื่องวัดวิเคราะห์กำลังทางไฟฟ้ายี่ห้อต่างๆ 4 เครื่องได้แก่

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของเครื่องวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าที่นำมาใช้ในการเปรียบเทียบและทดลอง

	Meter A	Meter B	Meter C	Meter D
Voltage input	• Phase – Phase 0 - 960 Vrms • Phase – Neutral 0 - 480 Vrms	• Phase – Phase 0 - 2000 Vrms • Phase – Neutral 0 - 1000 Vrms	• Phase – Phase 0 - 600 Vrms • Phase – Neutral 0 - 1000 Vrms	• Phase – Neutral 0 - 1000 Vrms
Input Impedance	340 k Ω between phase and neutral	969 k Ω between phase and neutral	10 M Ω between phase and neutral	4 M Ω between phase and neutral / 5 pF
Total Apparent Power Calculation	Arithmetic	Arithmetic	Vector	Arithmetic
Admissible Overload	• 1.2 Vn permanently • 2 Vn for 1 sec	• 1.2 Vn permanently • 2 Vn for 1 sec	• CAT IV 600V to Ground, max 1000V between inputs	• CAT IV 600V to Ground, max 1000V between inputs
Network Frequency	50/60 Hz $\pm$ 0.1 Hz	50/60 Hz $\pm$ 0.1 Hz	50/60 Hz $\pm$ 0.1 Hz	50/60 Hz
Sampling frequency	12.8 kHz per channel at 50 Hz	12.8 kHz per channel at 50 Hz	-	5000 samples on 10/121 cycles according IEC 61000-4-30
Measurement Std.	EN50160	EN50160	IEC/EN61000-4-30 Class B, IEC/EN50160	IEC61000-4-30 2nd edition class A / EN50160

โดยเครื่องวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าทั้ง 4 เครื่องนี้จะนำมาเปรียบเทียบผลประกอบการวิเคราะห์เทียบกับเครื่องวิเคราะห์กำลังไฟฟ้า SCC-2020 ซึ่งเป็นเครื่องวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นโดยผู้วิจัย

ตารางที่ 3 รายละเอียดของโหลดจำลองที่ไม่สมดุลในระบบไฟฟ้าแบบ 3 เฟส 4 สาย

Phase A	ตัวเหนี่ยวนำขนาด 29 mH ต่ออนุกรมกับ 59 mH
Phase B	ตัวเก็บประจุขนาด 2 uF ต่อขนานจำนวน 5 ตัว
	ตัวเก็บประจุขนาด 7.82 uF ต่อขนานจำนวน 1 ตัว
	ตัวเก็บประจุขนาด 7.81 uF ต่อขนานจำนวน 1 ตัว
	ตัวเก็บประจุขนาด 7.74 uF ต่อขนานจำนวน 1 ตัว
	ตัวเก็บประจุขนาด 7.48 uF ต่อขนานจำนวน 1 ตัว
Phase C	หลอดไส้ Incandescent ขนาด 200 W ต่อขนานจำนวน 2 หลอด

ตารางที่ 4 รายละเอียดของโหลดจำลองที่ไม่สมดุลและไม่เป็นเชิงเส้นในระบบไฟฟ้าแบบ 3 เฟส 4 สาย

Phase A	หลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาด 36 W จำนวน 1 หลอด
Phase B	หลอด LED ขนาด 3 W จำนวน 1 หลอด
	หลอด LED ขนาด 5 W จำนวน 1 หลอด
Phase C	หลอด Incandescent จำนวนอย่างละ 1 หลอดขนาด 200 W และ 100 W ต่อขนานกัน โดยผ่านการควบคุมจาก Triac

4. ผลการทดลอง

4.1 กรณีโหลดไม่สมดุลในระบบไฟฟ้าแบบ 3 เฟส 4 สาย

จากการทดลองในกรณีที่ระบบไฟฟ้าแบบ 3 เฟส 4 สาย ต่อเข้ากับ โหลดที่ไม่สมดุล ดังแสดงรายละเอียดไว้ในตารางที่ 1 พบว่าค่าของแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ตรวจวัดนั้นมีค่าดังแสดงในรูปที่ 7 โดยค่าของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากส่วนประกอบของฮาร์มอนิกลำดับอื่นที่นอกเหนือจากที่ความถี่มูลฐานที่ 50 เฮิรตซ์ นั้น เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการวัดของเครื่องวิเคราะห์กำลังไฟฟ้า เครื่องต่างๆ

Parameter	Meter A	Meter B	Meter C	Meter D	SCC-2020
V_a (V)	60.1	60.1	59.6	59.7	60.4
V_b (V)	63.1	63.1	63.2	63.3	63.5
V_c (V)	65	65.1	64.8	64.8	66.4
V_{ab} (V)	109	109.1	108.6	108.7	109.7
V_{bc} (V)	110.7	110.8	110.4	110.4	111.7
V_{ca} (V)	106	106	105.8	105.8	108.1
I_a (A)	6.1	6.1	6.2	6.2	6.1
I_b (A)	2.4	2.4	2.4	2.3	2.4
I_c (A)	2.8	2.8	2.7	2.7	2.8
I_n (A)	5.2	-	5.3	5.2	5.2

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบค่ากำลังทางไฟฟ้าที่ได้จากการวัดของเครื่องวิเคราะห์กำลังไฟฟ้า เครื่องต่างๆ

Parameter	Meter A	Meter B	Meter C	Meter D	SCC-2020		
					Arithmetic	IEEE 1459-2010	DIN 40110
P Total (W)	242.8	243	250	240	266.4	266.4	266.4
Q Total (var)	-	211	-	210	-	181	-
D Total (var)	-	624	-	-	-	-	-
N Total (var)	208.3	-	210	-	-	935.6	-
D _{ei} (var)	-	-	-	-	-	70.2	-
D _{ev} (var)	-	-	-	-	-	25.0	-
D _{eH} (var)	-	-	-	-	-	1.8	-
S _{eH} (var)	-	-	-	-	-	1.8	-
S Total (VA)	699.1	702	320	690	(S _A) 706.37	(S _Q) 972.77	(S _Σ) 973.43
PF Total	0.4	0.3	0.8	0.4	(PF _A) 0.38	(PF _Q) 0.27	(PF _Σ) 0.27

4.2 กรณีโหลดไม่สมดุลและโหลดไม่เป็นเชิงเส้นเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าแบบ 3 เฟส 4 สาย

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการวัดของเครื่องวิเคราะห์กำลังไฟฟ้า เครื่องต่างๆ

Parameter	Meter A	Meter B	Meter C	Meter D	SCC-2020
V _a (V)	219.7	219.9	219.5	220.1	220.7
V _b (V)	220.1	220.5	219.9	220.0	220.3
V _c (V)	222.8	223.1	225.6	226.2	224.5
V _{ab} (V)	383.1	383.6	382.4	383.2	384.9
V _{bc} (V)	384.4	384.9	385.3	385.6	382.5
V _{ca} (V)	380.1	380.5	383.1	383.7	384.5
I _a (A)	4.1	4.1	4.0	4.1	4.1
I _b (A)	0.9	0.8	0.9	0.8	1.1
I _c (A)	4.8	4.7	4.9	4.8	4.8
I _n (A)	6.4	-	6.5	6.5	5.8

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบค่ากำลังทางไฟฟ้าที่ได้จากการวัดของเครื่องวิเคราะห์กำลังไฟฟ้า เครื่องต่างๆ

Parameter	Meter A	Meter B	Meter C	Meter D	SCC-2020		
					Arithmetic	IEEE 1459-2010	DIN 40110
P Total (W)	708.6	710.0	730.0	710.0	743.3	743.3	743.3
Q Total (var)	-	1131.0	-	1530.0	-	1113.2	-
D Total (var)	-	1672.0	-	-	-	-	-
N Total (var)	1654.5	-	1690.0	-	-	3231.2	-
D _{ei} (var)	-	-	-	-	-	2077.5	-
D _{ev} (var)	-	-	-	-	-	83.9	-
D _{eH} (var)	-	-	-	-	-	44.8	-
S _{eH} (var)	-	-	-	-	-	67.6	-
S Total (VA)	2145.3	2140.0	1780.0	1620.0	(S _A) 2219.2	(S _e) 3315.6	(S _Σ) 3316.8
PF Total	0.4	0.3	0.4	0.3	(PF _A) 0.3	(PF _e) 0.2	(PF _Σ) 0.2

4. สรุปผลการทดลอง

ในกรณีที่หนึ่งทีโหลตทั้งสามเฟสเป็นโหลตที่ไม่สมดุล ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมของทั้งระบบไฟฟ้า 3 เฟส นั้น เครื่องวิเคราะห์กำลังไฟฟ้า SCC-2020 ซึ่งได้คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมทั้งระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย ตามที่ได้อ้างอิงจากมาตรฐาน IEEE 1459-2010 และมาตรฐาน DIN 40110 นั้น จะมีค่าใกล้เคียงกันมาก แต่ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมทั้งระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สายของเครื่องวิเคราะห์กำลังไฟฟ้า Meter C และเครื่องวิเคราะห์กำลังไฟฟ้า Meter A รวมทั้ง Meter B ให้ค่าที่แตกต่างกันออกไปโดยสิ้นเชิง โดยพบว่าจะมีค่าน้อยกว่าค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมทั้งระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สายตามที่ได้อ้างอิงจากมาตรฐาน IEEE 1459-2010 และมาตรฐาน DIN 40110 อยู่อย่างมากอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับกรณีที่สองนี้โหลตทั้งสามเฟสเป็นโหลตที่ไม่สมดุลและเป็นโหลตประเภทที่ไม่เป็นเชิงเส้นนั้น ส่งผลทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์และเกิดฮาร์โมนิกลำดับต่างๆ ตามมา ทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏที่วัดรวมของทั้งระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย จากเครื่องวิเคราะห์กำลังไฟฟ้า SCC-2020 ให้ผลในลักษณะเดียวกันกับกรณีที่โหลตเป็นโหลตที่ไม่สมดุล แต่ในกรณีนี้ค่าของกำลังไฟฟ้าปรากฏรวมของระบบไฟฟ้าจะคำนวณค่าเนื่องจากองค์ประกอบของแรงดันและกระแสไฟฟ้าในส่วนที่เกิดจากฮาร์โมนิกลำดับอื่น ๆ ที่นอกเหนือจากที่ค่าความถี่มูลฐาน 50 เฮิร์ตซ์ รวมด้วย จากทั้งสองกรณีข้างต้นที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่าในระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย ในสภาวะที่โหลตไม่สมดุลหรือโหลตเป็นลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น การคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมในระบบแบบคณิตศาสตร์และแบบเวกเตอร์จะให้ค่าที่ได้ไม่เท่ากัน และค่าที่คำนวณได้จากสองวิธีนี้จะแตกต่างจากค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมที่คำนวณที่มาตรฐาน IEEE 1459-2010 และมาตรฐาน DIN 40110 รองรับ ซึ่งค่าที่ได้ตามมาตรฐานทั้งสองนี้จะมีค่าใกล้เคียงกันมาก ยกเว้นหากระบบที่กำลังพิจารณา

อยู่นั้นเป็นระบบแบบโหลดสมดุลและเป็นเชิงเส้นค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมของทั้งระบบจะมีค่าเท่ากันไม่ว่าจะคำนวณด้วยวิธีใดก็ตาม ดังนั้นการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมของระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สายนี้ จะสังเกตได้ว่าการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมของทั้งระบบแบบคณิตศาสตร์ในกรณีทั่วไปที่โหลดเป็นลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นหรือเป็นโหลดที่ไม่สมดุล จะมีค่าที่แตกต่างกับการคำนวณที่ได้จากมาตรฐานทั้ง IEEE 1459-2010 และ DIN 40110 อย่างมีนัยยะสำคัญ การคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏที่คลาดเคลื่อนนี้จะส่งผลทำให้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้ารวมของทั้งระบบไม่ถูกต้อง เนื่องจากค่าของตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจะต้องหาจากอัตราส่วนของค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยต่อค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ ซึ่งค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้ารวมของทั้งระบบตามนิยามของมาตรฐาน IEEE 1459-2010 และมาตรฐาน DIN 40110 จะมีค่าต่ำกว่าการคำนวณโดยการเฉลี่ยค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในแต่ละเฟสซึ่งเป็นวิธีการที่ไม่ถูกต้อง เนื่องจากพฤติกรรมของโหลดในแต่ละเฟส นั้นอาจจะมีค่าเป็นลักษณะของตัวประกอบกำลังไฟฟ้าแบบนำหน้า (Leading power factor) หรือเป็นลักษณะของตัวประกอบกำลังไฟฟ้าแบบล่าหลัง (Lagging power factor) ก็ได้จึงไม่สามารถจะเฉลี่ยรวมกันได้ ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 และมาตรฐาน DIN 40110 จึงสะท้อนให้เห็นพฤติกรรมรวมของระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบ 4 สายได้อย่างชัดเจนมากกว่า ดังนั้นแล้วควรอ้างอิงค่าจากมาตรฐาน IEEE 1459-2010 หรือมาตรฐาน DIN 40110 จึงจะเป็นค่าที่เหมาะสม

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีในการให้ความอนุเคราะห์ในการจัดเตรียมสถานที่ห้องแลปที่ใช้ในการทำการทดลองประกอบการวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Alexander, C. K. and Sadiku, M. N.O. *Fundamental of Electric Circuit*, 5th ed. Singapore: McGraw-Hill, 2013
- [2] Alexander, E. E. *POWER DEFINITIONS AND THE PHYSICAL MECHANISM OF POWER FLOW*, A John Wiley and Sons, Ltd., IEEE Press, 2010
- [3] Canturk, S. Balci, M.E. Hocaoglu M.H. *On the Definition of Apparent Power*, 2015, 17(2), pp. 1-2.
- [4] Helmut, S. *A general purpose definition of active current and non-active power based on German standard DIN 40110*, Electrical engineering, 2005, 89, pp. 167-175. DOI: 10.1007/s00202-005-0333-z.
- [5] IEEE-SA Standards Board. IEEE 1459: 2010. *Definition for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal Balanced, or Unbalanced Conditions*. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 2010
- [6] Won Y. Yang, et al. *Signal and Systems with Matlab*, Heidelberg: Springer -Verlag Berlin Heidelberg, 2009