

การประมาณค่าความถี่ของระบบไฟฟ้าสามเฟสไม่สมดุลในระบบสมาร์ทกริด Frequency Estimation of Unbalanced Three-Phase Power Systems in Smart Grids

ประยูทธ อินแบน¹ ราชู พันธุ์ฉลาด^{1*} โชคชัย แสงดาว¹ วุฒิพร เลิศวาสนา¹ และ บุญชัย บุญชู²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชชนรินทร์

²สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการประมาณค่าความถี่ของระบบไฟฟ้าสามเฟสไม่สมดุลในระบบสมาร์ทกริด โดยใช้ตัวประมาณแบบ Phase Error Criterion (PEC) ซึ่งมีความสามารถต้านทานสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ได้ดี หลักการที่นำเสนออาศัยการแปลงของคลาร์คเพื่อแยกสัญญาณความถี่บวกออกจากความถี่ลบก่อนประมวลผล ซึ่งช่วยเพิ่มความแม่นยำของการประมาณในกรณีที่ระบบอยู่ในสภาวะไม่สมดุล การทดลองด้วยสัญญาณจำลองแสดงให้เห็นว่า PEC ให้ผลลัพธ์ที่เสถียรและแม่นยำกว่าวิธีมาตรฐาน เช่น CLMS และ ACLMS โดยเฉพาะในกรณีที่สัญญาณอิมพัลส์แทรกซ้อนมีขนาดใหญ่ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า PEC สามารถใช้เป็นเครื่องมือเฝ้าระวังความผิดปกติในระบบจ่ายไฟฟ้าสามเฟสภายใต้สภาวะแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ระบบไฟฟ้าสามเฟสไม่สมดุล การประมาณค่าความถี่แบบปรับตัว

Abstract

In this paper, the Phase Error Criterion (PEC) estimator, which is robust against impulse noise, is used to estimate the frequency of unbalanced three-phase power systems in smart grids. The suggested method improves estimation accuracy in unbalanced situations by using Clarke's transform to isolate the positive frequency component from the negative one before processing. According to simulation data, PEC performs more accurately and steadily than conventional techniques like CLMS and ACLMS, especially when high impulsive noise is present. According to the results, PEC can be used as a monitoring tool to identify anomalies in three-phase power distribution systems that are subjected to dynamic conditions.

Keywords: Unbalanced three-phase power system, Adaptive Frequency Estimation

1. บทนำ

ระบบสมาร์ทกริด (Smart Grid) [1] เป็นโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะที่ใช้เทคโนโลยีดิจิทัลและการสื่อสารขั้นสูงเข้ามาเสริมการทำงานของระบบไฟฟ้าแบบดั้งเดิม เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือ ประสิทธิภาพ ความยืดหยุ่น และความยั่งยืนของระบบพลังงาน โดยสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของความต้องการพลังงานและการผลิตพลังงานจากแหล่งที่หลากหลาย เช่น พลังงานหมุนเวียน

ระบบสมาร์ทกริดประกอบด้วยระบบผลิตไฟฟ้า (Power Generation) ระบบส่งไฟฟ้า (Transmission System) ระบบจำหน่ายไฟฟ้า (Distribution System) อุปกรณ์ผู้ใช้ปลายทาง (End-user devices) ระบบการสื่อสาร (Communication System) และระบบบริหารจัดการข้อมูล (Data Management and Control System) ระบบผลิตไฟฟ้าสามารถรองรับทั้งแบบแหล่งพลังงานดั้งเดิม (โรงไฟฟ้าถ่านหิน แก๊ส เป็นต้น) และพลังงานหมุนเวียน (โซลาร์เซลล์ ลม น้ำ เป็นต้น) และรองรับการผลิตไฟฟ้าแบบกระจาย (Distributed generation) คือ การผลิตไฟฟ้าในหรือใกล้กับจุดที่ใช้งานไฟฟ้า โดยอาศัยหน่วยผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กหลากหลายชนิดที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าหรือแม้กระทั่งติดตั้งโดยตรง ณ สถานที่ของผู้ใช้ไฟฟ้า ระบบส่งไฟฟ้าใช้เทคโนโลยีเช่นเซอร์และระบบควบคุมที่สามารถตรวจจับปัญหา เช่น ไฟฟ้าตก ไฟฟ้ากระชาก ได้รวดเร็ว ระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีการใช้ระบบอัตโนมัติ (Automation) เพื่อตรวจสอบคุณภาพไฟฟ้า และควบคุมการจ่ายไฟแบบทันที อุปกรณ์ผู้ใช้ปลายทางใช้มิเตอร์อัจฉริยะ (Smart Meter) บันทึกการใช้พลังงานแบบเรียลไทม์ ส่งข้อมูลกลับไปยังศูนย์ควบคุม และให้ผู้บริโภคสามารถตรวจสอบการใช้ไฟได้เองและมีระบบบริหารพลังงานภายในบ้าน (Home Energy Management System (HEMS)) เช่น ควบคุมเครื่องปรับอากาศ ให้เปิด/ปิดตามเวลาหรือโหลด ระบบสื่อสารใช้เครือข่ายสื่อสาร เช่น ZigBee, Wi-Fi, LTE, 5G เชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อส่งข้อมูลและควบคุมระบบ และสุดท้ายระบบจัดการข้อมูลใช้ Big Data และ AI วิเคราะห์พฤติกรรมการใช้ไฟฟ้า คาดการณ์โหลดไฟฟ้า และบริหารจัดการระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ระบบสมาร์ทกริดมีคุณสมบัติที่สำคัญหลายประการ เช่น มีการสื่อสารสองทางระหว่างผู้ใช้และผู้ให้บริการ สามารถควบคุมการใช้พลังงานในช่วงที่โหลดสูงโดยอัตโนมัติ เช่น ลดการใช้ไฟฟ้าในอาคารสำนักงานตอนกลางวัน หากเกิดไฟฟ้าขัดข้อง ระบบสามารถหาตำแหน่งที่เสีย และตัดเฉพาะส่วนนั้นโดยไม่กระทบทั้งระบบ รองรับการเชื่อมต่อแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีการจ่ายพลังงานไม่คงที่ และมีระบบความปลอดภัยไซเบอร์ ป้องกันการโจมตีหรือแทรกแซงจากภายนอก เป็นต้น

ประโยชน์ของระบบสมาร์ทกริดมีหลายประการเช่น ลดต้นทุนพลังงานสะอาด เพิ่มความมั่นคงทางพลังงาน ส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากผู้ผลิต และบริหารพลังงานได้ดี เป็นต้น สำหรับประเทศไทยมีการนำระบบสมาร์ทกริดนําร่องมาทดลองใช้ที่จังหวัดแม่ฮ่องสอน และโครงการมิเตอร์อัจฉริยะของการไฟฟ้านครหลวง (MEA Smart Metro Grid)

อย่างไรก็ตาม แม้วาระบบสมาร์ทกริดจะมีระบบจัดการพลังงานไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพแต่ก็อาจจะประสบกับปัญหาที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้หลายประการ อาทิ ค่าความถี่ของสัญญาณเบี่ยงเบนไปจากค่าความถี่ที่กำหนด (Nominal Frequency) (50 Hz) ซึ่งมีสาเหตุมาจากมีโหลดแบบไม่เชิงเส้นในระบบจำนวนเพิ่มขึ้นจึงเกิดสัญญาณฮาร์มอนิกและแรงดันตกเนื่องจาก

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ

การดึงกระแสไฟฟ้าของโหลดในแต่ละเฟสไม่เท่ากัน [2] ซึ่งในระบบไฟฟ้าสามเฟสหากแรงดันในแต่ละเฟสไม่เท่ากันจะทำให้แรงดันไฟฟ้าเกิดความไม่สมดุล (Unbalanced) ระหว่างเฟสและส่งผลเสียต่ออุปกรณ์ผู้ใช้ปลายทาง เช่น ทำให้เกิดกระแสหมุนวน (Eddy current) ในมอเตอร์สามเฟสส่งผลให้กระแสไม่สมดุลสูงกว่าแรงดันไม่สมดุล 6 ถึง 15 เท่า กระแสไฟฟ้าส่วนเกินมีส่วนทำให้มอเตอร์ร้อนขึ้นกว่าปกติทำให้อายุการใช้งานสั้นลง ตามมาตรฐาน NEMA (National Electrical Manufacturers Association) ได้กำหนดให้ค่าแรงดันไม่สมดุลที่ขั้วของมอเตอร์ต้องมีค่าไม่เกิน 1% และไม่แนะนำให้เชื่อมมอเตอร์เมื่อค่าแรงดันไม่สมดุลมีค่า 5% หรือมากกว่า [3] ปัญหาที่สำคัญอีกประการคือระบบไฟฟ้าต้องเผชิญหน้ากับสัญญาณแทรกสอดทั้งที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติและที่เกิดจากมนุษย์สร้างขึ้น ได้แก่ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากฟ้าผ่า การเปิด-ปิดของสวิตช์ไฟฟ้า และไฟฟ้าแรงสูง ในรูปของสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ (Impulse noise) สัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์นั้นจะเกิดขึ้นแบบฉับพลันทันด่วนในช่วงสั้น ๆ มีแอมพลิจูดขนาดใหญ่ ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าได้รุนแรงมากกว่าสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน (Gaussian noise) [4] ดังนั้นจะเห็นว่าการประมาณค่าและการเฝ้าติดตามค่าความถี่ (Frequency Estimation and Monitoring) ของระบบไฟฟ้าสามเฟสในระบบสมาร์ทกริดเป็นเรื่องที่จำเป็นและท้าทายอย่างยิ่ง ทั้งนี้เพราะหากระบบเฝ้าระวังตรวจพบการเบี่ยงเบนของค่าความถี่ออกไปจากค่าปกติ 50 Hz ก็จะมีปัญหาบางประการเกิดขึ้นในระบบสมาร์ทกริดนั่นเอง

ตลอดหลายสิบปีที่ผ่านมา มีงานวิจัยเกี่ยวกับการประมาณค่าความถี่ในระบบสมาร์ทกริดมากมายถูกนำเสนอ อาทิ Discrete Fourier Transform (DFT) [5] Least Mean Square (LMS) [6] Complex LMS (CLMS) [7] และ Augmented CLMS (ACLMS) [8] เป็นต้น ตัวประมาณค่าที่พัฒนาจาก LMS มีโครงสร้างเป็นตัวกรองความถี่แบบปรับตัวได้ (Adaptive Filter) ซึ่งเหมาะกับการนำมาใช้ในระบบสมาร์ทกริดอย่างมาก เนื่องจากสามารถปรับการทำงานได้ด้วยตัวเองตามสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป อย่างไรก็ตาม เมื่อเกิดเหตุการณ์ไม่สมมาตรขึ้นระบบไฟฟ้าและภายใต้การทำงานในสภาวะที่มีสัญญาณรบกวนอิมพัลส์ จะทำให้ประสิทธิภาพของตัวกรองความถี่แยลงอย่างมีนัย ในปี 2025 Prayuth Inban และคณะ [9] ได้นำเสนอตัวกรองความถี่แบบปรับตัวได้แบบ Phase Error Criterion (PEC) ซึ่งมีความคมทนต่อสัญญาณอิมพัลส์ แต่หากต้องทำงานภายใต้ความไม่สมมาตรของระบบไฟฟ้า PEC ก็มีประสิทธิภาพไม่ต่างจาก LMS

บทความนี้แนะนำเสนอการนำตัวกรอง PEC มาใช้ในระบบสมาร์ทกริดเพื่อประมาณค่าความถี่ของระบบไฟฟ้าสามเฟสแบบไม่สมดุล เนื่องจากสัญญาณรูปคลื่นไซน์เชิงซ้อน (Complex Sinusoidal Signal) ที่ได้จาก การแปลงของคลาร์ค (Clarke's Transform) ในระบบไม่สมดุลจะประกอบด้วยผลรวมของสัญญาณความถี่บวก (Positive Frequency Sequence) กับ สัญญาณความถี่ลบ (Negative Frequency Sequence) ดังนั้นเพื่อให้ PEC สามารถทำได้ดีที่สุดในสภาวะไม่สมดุลและภายใต้สัญญาณรบกวนอิมพัลส์ สัญญาณความถี่ลบจะถูกตัดทิ้งไปภายหลังจากการแปลงของคลาร์คคลื่นสลับ ผลการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ยืนยันได้ว่าตัวกรองความถี่ที่นำเสนอสามารถทำได้จริงตามที่กล่าวมา

2. ระบบไฟฟ้าสามเฟสไม่สมดุล

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าสามเฟสไม่สมดุลในรูปแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลา คือ [4]

$$v_1(n) = V_1(n) \cos(\Omega_0 n + \phi) + q_1(n) \quad (1)$$

$$v_2(n) = V_2(n) \cos(\Omega_0 n - \frac{2\pi}{3} + \phi) + q_2(n) \quad (2)$$

$$v_3(n) = V_3(n) \cos(\Omega_0 n + \frac{2\pi}{3} + \phi) + q_3(n) \quad (3)$$

เมื่อ $v_i(n), i=1,2,3$ คือสัญญาณไฟฟ้าเฟสที่ i $V_i(n)$ คือค่าสูงสุดในเฟสที่ i Ω_0 คือค่าความถี่ที่กำหนดดิจิทัล ϕ คือเฟสเริ่มต้น และ $q_i(n)$ คือสัญญาณรบกวนในเฟสที่ i โดยทั่วไปขนาดแรงดันของระบบไฟฟ้าสามเฟสจะมีค่าในช่วง 380 – 400 โวลต์ และมีค่าความถี่เชิงมุมที่กำหนดแอนะลอกเป็น $\omega_0 = 2\pi f_0$ เรเดียน/วินาที โดยที่ $f_0 = 50$ Hz คือค่าความถี่ที่กำหนดแอนะลอก การประมาณค่าความถี่โดยใช้สัญญาณจากระบบไฟฟ้าสามเฟสโดยตรงไม่สามารถทำได้เนื่องจากขนาดแรงดันมีค่าสูงมาก ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงต้องอาศัยเซนเซอร์ (Sensor) และตัวแปลง (Transducer) ในการตรวจจับและแปลงค่าสัญญาณแรงดันสูงให้เป็นสัญญาณแรงดันต่ำที่เฟสและความถี่เหมือนกันทุกประการ สัญญาณขนาดเล็กที่ได้จะถูกนำไปซิกตัวอย่าง (Sampling) ด้วยอัตราซิก f_s Hz เพื่อประมวลผลในแบบดิจิทัล ดังนั้นจึงสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เชิงมุมดิจิทัลและแอนะลอกได้ว่า

$$\Omega_0 = 2\pi \frac{f_0}{f_s} \quad (4)$$

สัญญาณที่ได้จากการซิกตัวอย่างทั้งสามจะถูกแปลงเป็นสัญญาณเชิงซ้อน (Complex Sinusoidal Signal) โดยอาศัยการแปลงของคลาร์ค ดังนี้

$$\begin{bmatrix} v_\alpha(n) \\ v_\beta(n) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1(n) \\ v_2(n) \\ v_3(n) \end{bmatrix} \quad (5)$$

ดังนั้นจะได้

$$v(n) = v_\alpha(n) + jv_\beta(n) \quad (6)$$

สมการที่ (6) สามารถเขียนในรูปของสัญญาณความถี่บวกและลบได้ว่า

$$v(n) = v_+(n)e^{j(\Omega_0 n + \phi)} + v_-(n)e^{-j(\Omega_0 n + \phi)} + q(n) \quad (7)$$

โดยที่

$$v_+(n) = \frac{\sqrt{6}}{6} (v_1(n) + v_2(n) + v_3(n)) \quad (8)$$

$$v_-(n) = \frac{\sqrt{6}}{12}(2v_1(n) - v_2(n) - v_3(n)) - j \frac{\sqrt{2}}{4}(v_2(n) - v_3(n)) \quad (9)$$

และ

$$q(n) = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(q_1(n) - \frac{1}{2}(q_2(n) + q_3(n)) \right) + j \frac{\sqrt{2}}{2}(q_2(n) - q_3(n)) \quad (10)$$

จากสมการที่ (7) จะสามารถคำนวณหาค่าสัญญาณความถี่บวกและลบได้ตามลำดับ ดังนี้ [2]

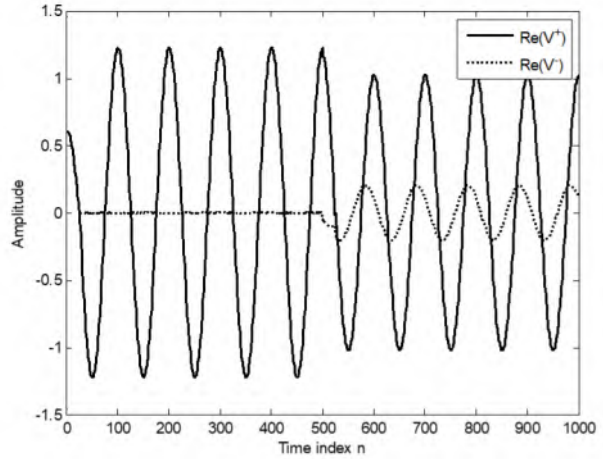
$$V^+(n) = \frac{1}{2}(v(n) + jv(n-L)) \quad (11)$$

$$V^-(n) = \frac{1}{2}(v(n) - jv(n-L)) \quad (12)$$

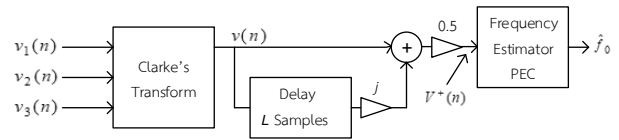
โดยที่

$$L = k \frac{f_s}{4f_0} \quad (13)$$

เมื่อ k คือเลขจำนวนเต็มที่น้อยที่สุดที่ยังคงทำให้ L เป็นจำนวนเต็มที่น้อยที่สุด เนื่องจากสัญญาณความถี่ลบจะเกิดขึ้นเฉพาะกรณีที่ระบบไฟฟ้าเกิดความไม่สมดุลเท่านั้น ดังตัวอย่างในรูปที่ 1 ซึ่งแสดงเฉพาะส่วนจริง (Real part) ของของ $V^+(n)$ และ $V^-(n)$ โดยกำหนดให้ $f_0 = 50$ Hz $f_s = 5000$ Hz ซึ่งจะได้ $L = 25$ ตัวอย่าง และกำหนดให้ $N = 1000$ คือความยาวของสัญญาณ ในช่วง 500 ตัวอย่างแรกกำหนดให้ $V_i(n) = 1$ ทุกเฟส ส่วนใน 500 ตัวอย่างถัดมา กำหนดให้ $V_1(n) = V_2(n) = 1$ และ $V_3(n) = 0.5$ โดยสมมติให้ $q_i(n) = 0$ จากรูปจะเห็นว่าเกิดความไม่สมดุลในระบบไฟฟ้าที่ตำแหน่ง $n = 500$ ส่งผลให้เกิดสัญญาณค่าลบขึ้นตั้งแต่ตัวอย่างที่ 500 เป็นต้นไป แต่หากระบบไฟฟ้าอยู่ในสภาวะสมดุล สัญญาณความถี่ลบจะมีค่าเป็นศูนย์ซึ่งแสดงใน 500 ตัวอย่างแรก (สำหรับค่าจินตภาพก็จะเป็นไปในทิศทางเดียวกันจึงไม่นำมาแสดงในบทความนี้) ด้วยเหตุนี้ ในบทความนี้จึงสนใจเฉพาะสัญญาณความถี่บวกเท่านั้น ดังนั้นแทนที่จะประมาณค่าความถี่จากสัญญาณที่ได้จากการแปลงของคลาร์คโดยตรง แต่จะนำสัญญาณที่ได้ไปคำนวณหาค่าสัญญาณความถี่บวกตามสมการที่ (11) ก่อน จากนั้นจึงป้อนให้กับตัวประมาณค่าความถี่ในลำดับถัดไป ดังแสดงหลักการการทำงานของระบบที่นำเสนอในรูปที่ 2



รูปที่ 1 ค่าจริงของสัญญาณความถี่บวก $V^+(n)$ (เส้นทึบ) และลบ $V^-(n)$ (เส้นประ) เมื่อเกิดความไม่สมดุลในระบบไฟฟ้าสามเฟส



รูปที่ 2 หลักการทำงานของตัวประมาณค่าความถี่ที่นำเสนอ

3. ตัวประมาณความถี่แบบ PEC

ตัวประมาณค่าความถี่แบบ PEC [9] มีจุดเด่นที่สำคัญคือสามารถทนต่อสัญญาณรบกวนอิมพัลส์ได้ดีทั้งนี้เนื่องจาก PEC ใช้ค่าเฟสชั่วขณะของระบบเป็นเกณฑ์ในการปรับตัวเพื่อค้นหาความถี่ของสัญญาณอินพุต PEC มีส่วนประกอบตามรูปที่ 3 โดยที่ $V^+(n)$ คือสัญญาณอินพุต CLP คือ Complex Linear Predictor $e(n)$ คือเอาต์พุตของ CLP $D(n)$ คือค่าเฟสชั่วขณะ และ $\hat{\Omega}_0(n)$ คือค่าความถี่เชิงมุมดิจิทัลชั่วขณะที่ประมาณได้ ซึ่งสามารถคำนวณย้อนกลับไปหาค่าความถี่แอนะลอกได้โดยอาศัยความสัมพันธ์

$$\hat{f}_0(n) = \frac{\hat{\Omega}_0(n)f_s}{2\pi} \text{ Hz} \quad (14)$$

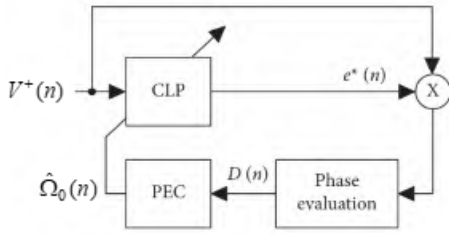
ระเบียบวิธี PEC ได้ถูกอธิบายด้วยสมการ

$$\hat{\Omega}_0(n+1) = \hat{\Omega}_0(n) + \mu \angle(D(n)) \quad (15)$$

โดยที่

$$D(n) = V^+(n)e^*(n) \quad (16)$$

สัญลักษณ์ $\angle z$ หมายถึง ค่ามุมของ z และ z^* หมายถึง ค่าสังยุคของ z



รูปที่ 3 หลักการทำงานของตัวประมาณค่าความถี่แบบ PEC

$$e(n) = V^+(n) + e^{j\hat{\Omega}_0(n)}V^+(n-1) \quad (17)$$

และ μ คือ สเตปไซส์ (Step size) เป็นตัวแปรควบคุมความเร็วในการปรับตัวของตัวประมาณค่าความถี่เป็นค่าคงที่

4. แบบจำลองสัญญาณอิมพัลส์

สัญญาณอิมพัลส์ [9] มีคุณสมบัติที่สำคัญสองประการคือ ขนาดเป็นค่าสุ่มและไม่สามารถคาดเดาเวลาที่เกิดได้ เมื่อสัญญาณอิมพัลส์เกิดขึ้นกำลังงานของสัญญาณรบกวนจะเท่ากับค่าของอิมพัลส์ในห้วงเวลาสั้นๆที่มันเกิดขึ้น ทำให้สัญญาณอิมพัลส์มีคุณสมบัติทางสถิติแบบ nonstationary และมีลักษณะสองประการคือ binary-state (เกิด กับ ไม่เกิด) และ time varying process (กระบวนการที่แปรผันตามเวลา) ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ค่าสเปกตรัมกำลังงาน (Power spectral density) และค่าอัตสหสัมพันธ์ (Autocorrelation) มีลักษณะเป็น binary-state process ดังนั้นจึงสามารถสร้างแบบจำลองของสัญญาณอิมพัลส์ได้ว่า

$$I(n) = u(n)b(n) \quad (18)$$

เมื่อ $u(n)$ คือค่าแอมพลิจูดแบบสุ่มและ $b(n)$ คือ binary-state sequence มีค่าเป็น 1 และ 0 ด้วยกับความน่าจะเป็น p และ $1-p$ ตามลำดับและมีค่าฟังก์ชันความหนาแน่นน่าจะเป็นดังนี้

$$f(b) = \begin{cases} p & ,b(n)=1 \\ 1-p & ,b(n)=0 \end{cases} \quad (19)$$

มีค่า mean เป็น p และค่าความแปรปรวนเป็น $p(1-p)$ สำหรับ $u(n)$ สามารถจำลองให้เป็นการแจกแจงแบบเกาส์เซียนที่มี mean เป็นศูนย์และความแปรปรวนเป็น σ_u^2 และมีค่าฟังก์ชันความหนาแน่นน่าจะเป็นดังนี้

$$f(u) = \frac{1}{\sigma_u \sqrt{2\pi}} e^{-u^2(n)/2\sigma_u^2} \quad (20)$$

เนื่องจากตัวแปรสุ่ม $u(n)$ และ $b(n)$ เป็นอิสระกันทางสถิติ ค่าความแปรปรวนของ $I(n)$ จึงมีค่าเป็น

$$\sigma_I^2 = p\sigma_u^2 \quad (21)$$

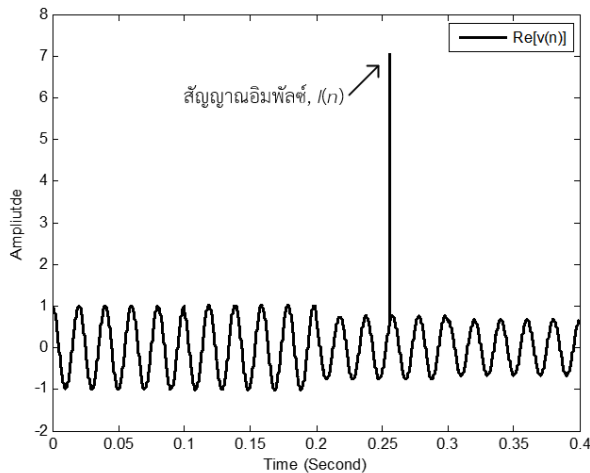
ดังนั้นถ้ากำหนดให้ P^+ เป็นกำลังงานของสัญญาณความถี่บวกที่อินพุตของ PEC ทำให้สามารถคำนวณหาค่าอัตรากำลังงานของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนอิมพัลส์ (Signal to Impulse Noise power Ratio: SINR) ได้ว่า

$$SINR = \frac{P^+}{p\sigma_u^2} \quad (22)$$

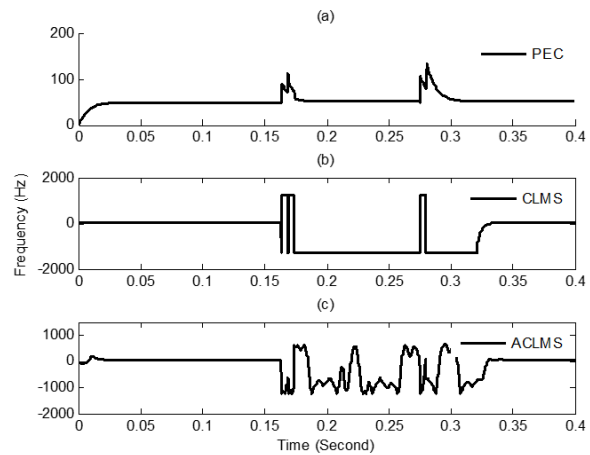
จากสมการที่ (22) พบว่า มีคู่ของ p และ σ_u^2 จำนวนมากมายที่ทำให้ค่า SINR มีค่าเท่ากัน ในกรณีที่กำหนดให้ σ_u^2 เป็นค่าคงที่ ถ้าค่า p น้อยจะทำให้ได้ค่า SINR ที่สูง ในทางกลับกันจะได้รับค่า SINR ที่ต่ำ

5. ผลจำลองการทำงาน

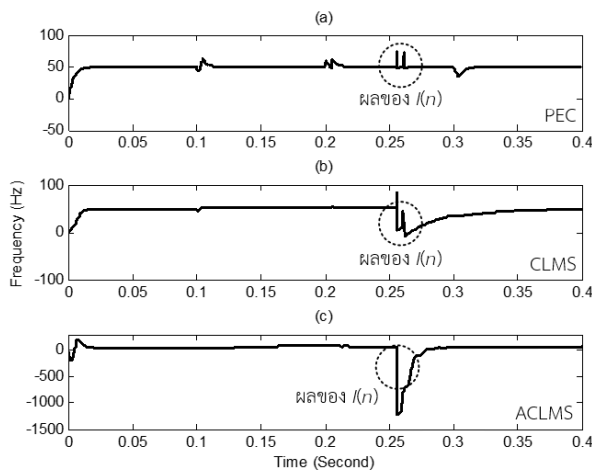
ในหัวข้อนี้จะแสดงผลการจำลองการทำงานของตัวประมาณค่าความถี่ที่นำเสนอ โดยจะสมมติให้ระบบทำงานภายใต้สภาวะที่ระบบไฟฟ้าสามเฟสเกิดความไม่สมดุลและมีสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ โดยจะเปรียบเทียบกับวิธี CLMS และ ACLMS ในช่วงเวลา 0 ถึง 0.1 วินาที กำหนดให้ระบบไฟฟ้ามีสภาวะสมดุล โดยกำหนดให้ $V_1(n)$ ทุกตัวมีค่าเท่ากับ 1 ในช่วง 0.1 ถึง 0.4 วินาที กำหนดให้ระบบไฟฟ้ามีสภาวะไม่สมดุลโดยในช่วง 0.1 ถึง 0.2 วินาทีที่กำหนดให้ $V_1(n) = V_2(n) = 1$ และ $V_3(n) = 0.5$ ในช่วง 0.2 ถึง 0.3 วินาที กำหนดให้ $V_1(n) = 0.5$ $V_2(n) = 0.8$ และ $V_3(n) = 1$ และในช่วง 0.3 ถึง 0.4 วินาที กำหนดให้ $V_1(n) = 1$ $V_2(n) = 0$ และ $V_3(n) = 1$ เนื่องจากระบบไฟฟ้าอยู่ในสภาวะไม่สมดุล ทำให้สัญญาณมีคุณสมบัติทางสถิติแบบ nonstationary จึงไม่สามารถตั้งค่า SINR ในการทดลองในแต่ละช่วงเวลาให้มีค่าที่แน่นอนได้ ดังนั้นเพื่อความสะดวก จะใช้วิธีลองผิดลองถูกโดยการปรับค่า σ_u^2 และ p จนได้ผลการทดลองที่เหมาะสม สำหรับในบทความนี้ได้กำหนดให้ $\sigma_u^2 = 1 \times 10^2$ และ $p = 1 \times 10^{-3}$ รูปที่ 4 แสดงส่วนจริง (real part) ของสัญญาณ $v(n)$ ในบทความนี้จะนำสัญญาณ $v(n)$ ไปประมวลผลเพื่อให้ได้สัญญาณความถี่บวก $V^+(n)$ ตามสมการที่ (11) จากนั้นจึงป้อนให้กับตัวประมาณค่าความถี่ PEC และ CLMS สำหรับตัวประมาณค่าความถี่แบบ ACLMS นั้นถูกออกแบบมาเพื่อรับมือกับสัญญาณไฟฟ้าไม่สมดุล $v(n)$ โดยตรง จึงไม่ต้องใช้สัญญาณความถี่บวก กำหนดให้ค่าสเตปไซส์ของของตัวประมาณค่าความถี่ทั้งสามมีค่าเป็น $\mu = 0.05$ ตัวอย่างผลการประมาณค่าที่ได้จากตัวประมาณค่าความถี่ทั้งสามแบบแสดงดังรูปที่ 5 จากรูปที่ 4 สัญญาณอิมพัลส์เกิดขึ้นแบบสุ่มที่วินาทีที่ 0.26 ซึ่งจากผลการทดลองในรูปที่ 5 พบว่าที่เวลา 0.26 วินาที ตัวประมาณค่าความถี่ PEC CLMS และ ACLMS ต่างก็ได้รับผลกระทบจากสัญญาณอิมพัลส์ แต่จะสังเกตเห็นว่า PEC จะสามารถทนต่อสัญญาณอิมพัลส์ได้ดีที่สุด โดย ACLMS จะได้รับผลกระทบที่รุนแรงที่สุด นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนจากผลการทดลองในรูปที่ 5(a) ว่าที่เวลา 0.1 0.2 และ 0.3 วินาที นั้นค่าความถี่ที่ประมาณได้มีค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าที่กำหนด 50 Hz เป็นช่วงสั้นๆ ซึ่งทำให้ทราบว่า ในเวลาดังกล่าวทั้งสามนั้น ระบบไฟฟ้าเกิดความไม่สมดุลขึ้นนั่นเอง รูปที่ 6 แสดงการทำงานของตัวประมาณค่าความถี่ในสภาวะระบบไฟฟ้าไม่สมดุลและสัญญาณอิมพัลส์มีค่าสูงมากโดยกำหนดให้ $\sigma_u^2 = 1 \times 10^5$



รูปที่ 4 ส่วนจริงของสัญญาณ $v(n)$ เมื่อระบบไฟฟ้าสามเฟสอยู่ในสภาวะไม่สมดุลและมีสัญญาณรบกวนอิมพัลส์เกิดขึ้นในระบบ



รูปที่ 6 ผลการประมาณค่าความถี่เมื่ออิมพัลส์มีขนาดใหญ่
 (a) PEC (b) CLMS (c) ACLMS



รูปที่ 5 ผลการประมาณค่าความถี่เมื่ออิมพัลส์มีขนาดเล็ก
 (a) PEC (b) CLMS (c) ACLMS

และ $p = 1 \times 10^{-3}$ จะพบว่า PEC ยังสามารถทำงานได้ ในขณะที่ CLMS และ ACLMS ให้สมรรถนะที่แย่งลงอย่างเห็นได้ชัดเจนดังนั้นจะเห็นได้ว่าสามารถนำค่าความถี่ที่ได้จากตัวประมาณค่าความถี่ที่นำเสนอไปใช้ในระบบสมรรถกิริยาได้โดยการนำไปแสดงเป็นตัวเลขหรือในรูปของกราฟให้ผู้ดูแลระบบใช้เป็นข้อมูลเพื่อเฝ้าระวังและติดตามความผิดปกติที่อาจเกิดขึ้นในระบบจ่ายไฟฟ้าสามเฟส

6. สรุป

บทความนี้เสนอวิธีประมาณค่าความถี่ของระบบไฟฟ้าสามเฟสไม่สมดุลในสมรรถกิริยา โดยใช้ตัวประมาณแบบ Phase Error Criterion (PEC) ซึ่งมีความสามารถในการต้านทานสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ได้ดีวิธีที่นำเสนอใช้การแปลงของคลาร์คเพื่อแยกสัญญาณความถี่บวกก่อนประมวลผล ช่วยเพิ่มความแม่นยำเมื่อต้องรับมือกับสัญญาณที่ไม่สมดุล การทดลองด้วยสัญญาณจำลองแสดงให้เห็นว่า PEC มีความเสถียรและแม่นยำสูงกว่าวิธีมาตรฐานอย่าง CLMS และ ACLMS โดยเฉพาะในสถานการณ์ที่มีสัญญาณอิมพัลส์แทรกซ้อน ผลลัพธ์ชี้ให้เห็นว่า PEC เหมาะสมสำหรับการใช้งานจริงในการเฝ้าระวังความผิดปกติของระบบจ่ายไฟฟ้าสามเฟสภายใต้สภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Zaboli, S. L. Choi, T.-J. Song, and J. Hong, "ChatGPT and other large language models for cybersecurity of smart grid applications," *2021 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, pp. 1–5, Jul. 2024, doi: 10.1109/pesgm51994.2024.10688863.
- [2] D. P. Marčetić, J. J. Tomić, and M. D. Kušljević, "Unbalanced three-phase distribution system frequency estimation using least mean squares method and positive voltage sequence," *IET Science Measurement & Technology*, vol. 8, no. 1, pp. 30–38, Dec. 2013, doi: 10.1049/iet-smt.2012.0003.
- [3] <https://alltestpro.com/th>
- [4] Y. Yu, Y. Yang, X. Wang, L. Lv, and Y. Chen, "Robust algorithm development of frequency estimation in smart grid," *Research Square (Research Square)*, Apr. 2025, doi: 10.21203/rs.3.rs-5081483/v1.
- [5] Salcic, Z., Nguang, S. K. & Wu, Y. "An improved Taylor method for frequency measurement in power systems."



- IEEE Transactions on Instrumentation & Meas.* Vol. 58, pp. 3288–3294, 2009.
- [6] Ramos, C. J., Martins, A. P. & da Silva Carvalho, A. “Power system frequency estimation using a least mean squares differentiator.” *Int. J. Electr. Power & Energy Syst.* Vol. 87, pp. 166–175, 2017.
- [7] Pradhan, A. K., Routray, A. & Basak, A. “Power system frequency estimation using least mean square technique.” *IEEE Transactions on Power Deliv.* Vol. 20, pp. 1812–1816, 2005.
- [8] Xia, Y. & Mandic, D. P. “Widely linear adaptive frequency estimation of unbalanced three-phase power systems.” *IEEE Transactions on Instrumentation Meas.* Vol. 61, pp. 74–83, 2012.
- [9] P. Inban, R. Punalard, and C. Benjangkprasert, “Phase Error Criterion based Adaptive Algorithm for frequency estimation,” *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2024, pp. 1–13, Mar. 2024, doi: 10.1155/2024/9055869.