

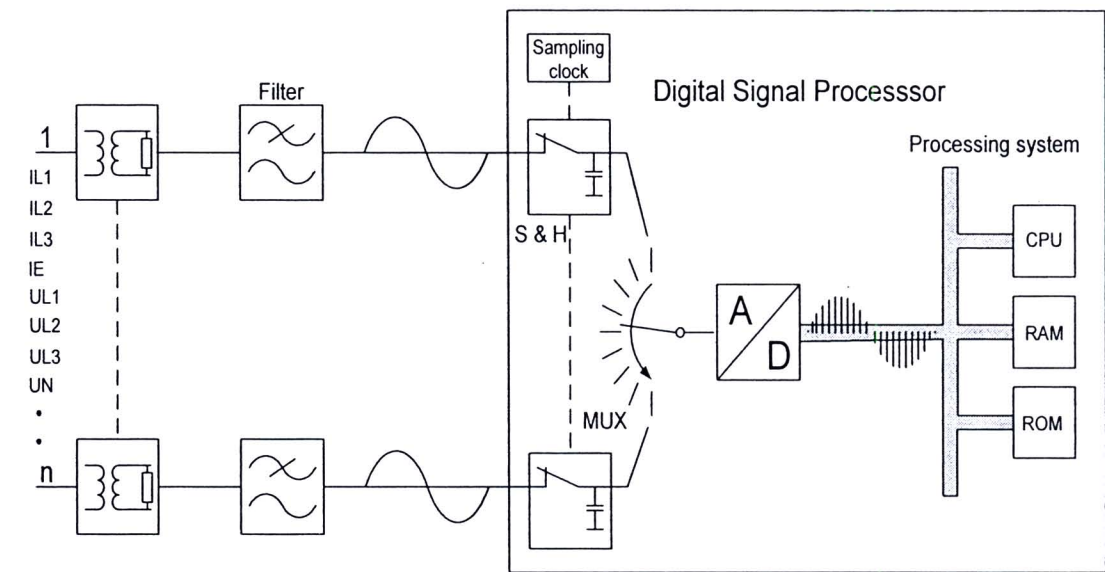
บทที่ 3

อัลกอริธึมของรีเลย์ผลต่างที่มีความทนทานต่อ การผิดเพี้ยนของสัญญาณกระแส

3.1 บทนำ

ในการทำงานของรีเลย์ผลต่าง รีเลย์จะต้องทำการตรวจวัดกระแสในทุกช่องทางที่กระแสสามารถไหลเข้าหรือไหลออกจากเขตป้องกัน แล้วนำสัญญาณกระแสดังกล่าวไปใช้ในการประเมินว่าเกิดความผิดปกติขึ้นในเขตป้องกันหรือไม่ กลไกในการตัดสินใจนั้นทำได้หลากหลายวิธี ในสมัยที่ยังไม่มีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ การตรวจจับความผิดปกติจะเป็นหน้าที่ของรีเลย์กลไฟฟ้า (Electro-mechanical Differential Relay) รีเลย์ชนิดนี้จะทำงานโดยนำสัญญาณกระแสผลต่างที่วัดได้มาแปลงให้เป็นแรงกล แรงดังกล่าวจะดึงหน้าสัมผัสให้เกิดการตัดหรือต่อวงจร ด้วยเหตุนี้ การทำงานของรีเลย์กลไฟฟ้าจึงต้องการกำลังงานเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนชิ้นส่วนต่างๆ ให้เคลื่อนไหว หม้อแปลงกระแสที่นำมาใช้จึงต้องมีพิกัดการจ่ายกำลังงานสูง เพื่อให้เหมาะสมกับรีเลย์กลไฟฟ้า

หลังจากที่ได้มีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ การประมวลผลต่าง ๆ นั้นทำได้โดยใช้วงจรไฟฟ้าแบบแอนะล็อก เนื่องจากไม่มีชิ้นส่วนเคลื่อนไหว ทำให้รีเลย์ใช้กำลังงานน้อยลงมาก ต่อมาได้มีการนำเอาเทคโนโลยีไมโครคอมพิวเตอร์เข้ามาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณ รีเลย์ประเภทนี้เรียกว่า รีเลย์เชิงเลข (Numerical Relay) รีเลย์ป้องกันชนิดนี้มีขีดความสามารถในการคำนวณที่สูงขึ้น มีความแม่นยำและเที่ยงตรงสูงขึ้น สามารถทำงานแบบมีการติดต่อสื่อสารกับอุปกรณ์อื่นทั้งในสถานีและต่างสถานีไฟฟ้าได้ สามารถทำงานกับระบบที่มีเงื่อนไขการทำงานซับซ้อนได้ สามารถบันทึกข้อมูลและเหตุการณ์ต่าง ๆ ทำให้สะดวกในการวิเคราะห์เหตุการณ์ที่เกิดขึ้น รีเลย์เชิงเลขเกือบทั้งหมดจะมีองค์ประกอบที่คล้ายกันไม่ว่าจะเป็นรีเลย์กระแสเกิน รีเลย์ระยะทาง หรือ รีเลย์ผลต่าง โครงสร้างหลักของรีเลย์จะประกอบไปด้วย ชุดปรับแต่งสัญญาณ ชุดกรองความถี่ต่ำผ่าน ชุด Sampling & Hold ชุดแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล และหน่วยประมวลผลสัญญาณ ดังแสดงในภาพที่ 3-1 สิ่งที่ทำให้รีเลย์แต่ละชนิดมีการทำงานที่ต่างกันคือ โปรแกรมที่บรรจุไว้ในหน่วยประมวลผลซึ่งจะเป็นตัวกำหนดระเบียบวิธีการในการคิดคำนวณหรือการตัดสินใจ เราเรียกระเบียบวิธีการเหล่านี้ว่า อัลกอริธึม ผู้ออกแบบและผู้ผลิตรีเลย์ป้องกันพยายามที่จะพัฒนาอัลกอริธึมโดยมีเป้าหมายหลัก 2 ประการคือ

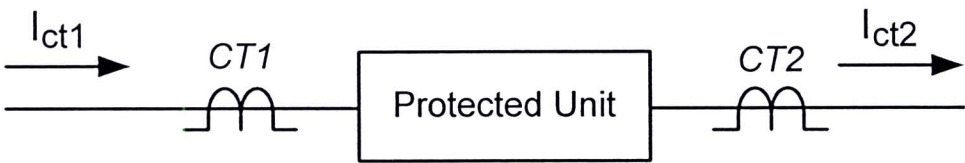


ภาพที่ 3-1 องค์ประกอบพื้นฐานของรีเลย์เชิงเลข

1. มีการตัดสินใจที่ถูกต้อง หากมีความผิดปกติเกิดขึ้นในขอบเขตที่รีเลย์รับผิดชอบ รีเลย์จะต้องตรวจพบและดำเนินการตอบสนองต่อเหตุการณ์ตามที่กำหนดไว้ เช่น สั่งเปิดหน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์ และในทางกลับกัน หากไม่มีเหตุผิดปกติเกิดขึ้นภายในขอบเขตที่รับผิดชอบ รีเลย์จะต้องไม่สั่งปลดวงจร

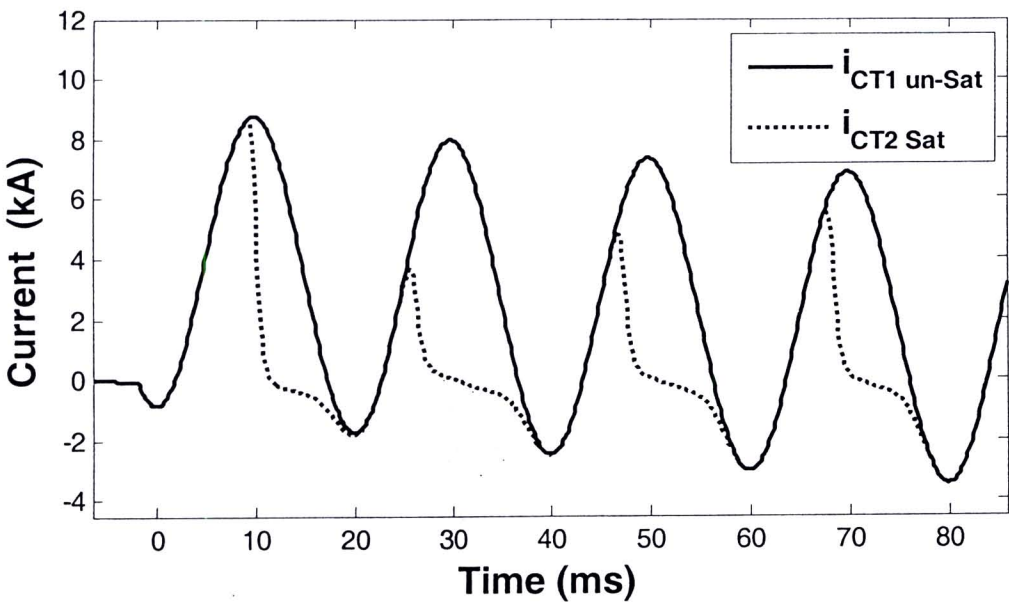
2. การตอบสนองต้องมีความแม่นยำด้านเวลา ในกรณีที่พบเหตุผิดปกติ หากรีเลย์ถูกกำหนดให้มีการหน่วงเวลา รีเลย์จะต้องหน่วงเวลาตรงตามที่กำหนดไว้เสมอ เช่น ในกรณีของรีเลย์กระแสเกิน หากตรวจพบเหตุผิดปกติและมีการกำหนดให้ตัดวงจรที่ 5 มิลลิวินาที ก็จะต้องทำการตัดวงจรที่ 5 มิลลิวินาทีพอดี จะช้าหรือเร็วกว่าที่กำหนดไม่ได้ ในกรณีของรีเลย์ที่ไม่มีการหน่วงเวลา เช่น รีเลย์ผลต่าง รีเลย์จะต้องสั่งปลดวงจรให้เร็วที่สุดเท่าที่จะทำได้ อัลกอริทึมที่สามารถสั่งตัดวงจรได้รวดเร็วและแม่นยำจะช่วยลดความรุนแรงของความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากความผิดพร่องนั้น ๆ

สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้จะมุ่งให้ความสนใจกับการพัฒนาอัลกอริทึมของรีเลย์ผลต่างให้มีเสถียรภาพสูง แม้สัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดของหม้อแปลงกระแสจะเกิดการผิดเพี้ยนขึ้น รีเลย์ผลต่างจะยังต้องทำงานได้ถูกต้องเหมือนเดิม การผิดเพี้ยนของสัญญาณกระแสนั้นเป็นตัวสร้างปัญหาให้กับนักออกแบบรีเลย์มานานหลายสิบปี จนกระทั่งปัจจุบันยังไม่มีใครสามารถแก้ปัญหานี้ได้อย่างสมบูรณ์ การผิดเพี้ยนของสัญญาณกระแสส่งผลกระทบอย่างมากต่อการทำงานของรีเลย์ผลต่าง เนื่องจากการผิดเพี้ยนจะส่งผลให้การคำนวณขนาดของกระแสเกิดความคลาดเคลื่อน ภาพที่ 3-2 แสดงตัวอย่างของการป้องกันแบบผลต่างโดยมีการติดตั้งหม้อแปลงกระแสที่ขาเข้าและขาออกของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน



ภาพที่ 3-2 การป้องกันอุปกรณ์โดยใช้กระแสผลต่าง

หากไม่มีความผิดพลาดใด ๆ เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ที่รับการป้องกัน กระแส I_{ct1} จะต้องเท่ากับ I_{ct2} เสมอ แต่ในกรณีที่หม้อแปลงกระแสตัวใดตัวหนึ่งเกิดการอิ่มตัว กระแสที่ได้จากขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสจะเกิดการผิดเพี้ยนขึ้น ภาพที่ 3-3 แสดงสัญญาณกระแสด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแส CT1 ซึ่งไม่เกิดการอิ่มตัว (เส้นทึบ) เปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสที่ได้จากการตรวจวัดของหม้อแปลงกระแส CT2 ที่มีการอิ่มตัว (เส้นจุด) ความแตกต่างของสัญญาณกระแสที่วัดได้จากหม้อแปลงกระแสทั้งสองนั้นเป็นเหตุให้รีเลย์ป้องกันสั่งปลดอุปกรณ์ออกจากระบบทั้งที่ไม่ได้มีความผิดพลาดใด ๆ เกิดขึ้น การตัดสินใจที่ผิดพลาดดังกล่าวทำให้เกิดไฟฟ้าดับขึ้นโดยไม่จำเป็น



ภาพที่ 3-3 สัญญาณจากหม้อแปลงกระแสที่มีและไม่มีอาการอิ่มตัว

การแก้ไขปัญหการทำงานที่ผิดพลาดของรีเลย์ผลต่างอันเนื่องมาจากการผิดเพี้ยนของสัญญาณกระแสนั้นมีหลากหลายวิธี ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 แต่ละวิธีมีจุดเด่นและจุดด้อยต่างกันไป สำหรับวิธีการของงานวิจัยนี้จะใช้หลักการในการแก้ปัญหาที่ง่ายและไม่ซับซ้อนคือ “สัญญาณมีทั้งส่วนที่ดีและส่วนที่ไม่ดี จึงเลือกใช้แต่ส่วนที่ดีเท่านั้น”

3.2 การคัดเลือกสัญญาณที่มีคุณภาพดี

อัลกอริทึมของงานวิจัยนี้จะทำการคัดสรรแต่สัญญาณที่มีคุณภาพดีมาใช้งาน และทำการตัดส่วนของสัญญาณที่มีการบิดเบี้ยวหรือไม่แน่ใจว่ามีคุณภาพดีหรือไม่ทิ้งไป โดยใช้อาศัยคุณสมบัติสองประการของสัญญาณที่มีคุณภาพดีไม่มีการบิดเบี้ยวเป็นเกณฑ์ในการคัดเลือกสัญญาณ โดยสัญญาณที่มีคุณภาพดีจะมีคุณสมบัติดังนี้

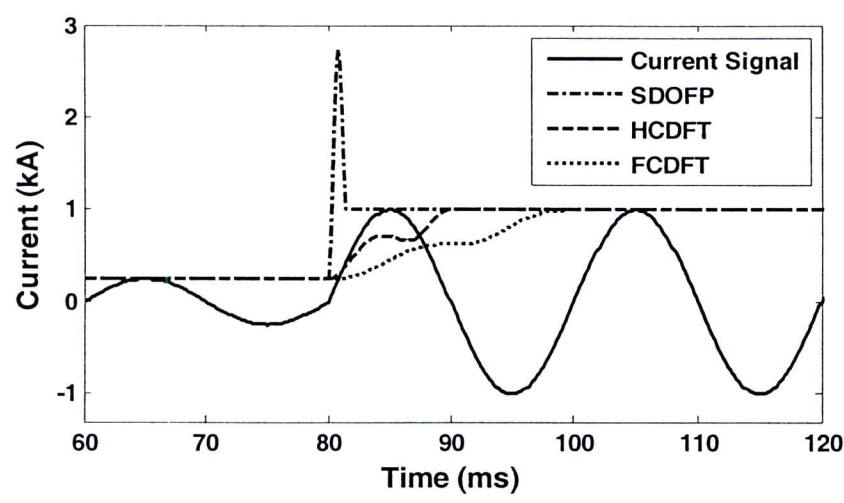
1. สัญญาณกระแสที่มีคุณภาพดี ในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ (สั้นกว่าหนึ่งในสิบส่วนของคาบ) ขนาดของสัญญาณจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก หรืออีกนัยหนึ่งคือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของขนาดจะต้องมีค่าที่ต่ำมาก
2. สัญญาณกระแสที่มีคุณภาพดีจะต้องมีความถี่เท่ากับความถี่มูลฐานของระบบไฟฟ้ากำลังเสมอ หากในระบบไฟฟ้ากำลังมีความถี่มูลฐานอยู่ที่ 50 Hz (คาบเวลาเป็น 20 มิลลิวินาที) มุมของสัญญาณกระแสที่ทำการตรวจวัดได้นั้นก็จะต้องมีอัตราการเปลี่ยนแปลงอยู่ที่ 360° ต่อ 20 มิลลิวินาทีเสมอ

3.3 การคำนวณหาขนาดและมุมของสัญญาณ

จะเห็นได้ว่าการตรวจสอบเงื่อนไขของสัญญาณว่ามีคุณภาพดีหรือไม่นั้น จำเป็นต้องทำการคำนวณหาปริมาณสองปริมาณคือ

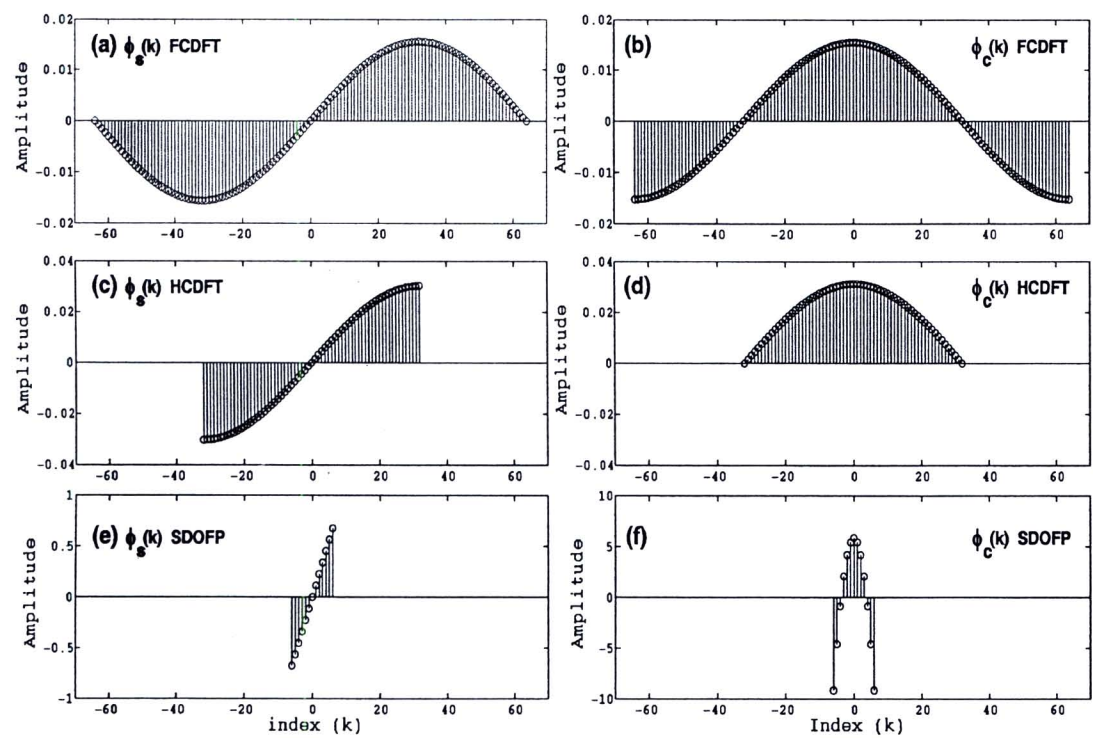
1. ต้องรู้ขนาดของสัญญาณในช่วงเวลาใด ๆ
2. ต้องรู้มุมหรือความถี่เชิงมุมของสัญญาณ ณ เวลาใด ๆ

วิธีในการคำนวณค่าของขนาดและมุมนั้นมีอยู่หลายวิธีการ เช่น วิธีการแปลงฟูริเยร์ไม่ต่อเนื่องแบบครึ่งคลื่น (Half Cycle Discrete Fourier Transform, HCDFT) วิธีการแปลงฟูริเยร์ไม่ต่อเนื่องแบบเต็มคลื่น (Full Cycle Discrete Fourier Transform, FCDFT) หรือ วิธีคู่ตัวกรองตั้งฉากแบบหน้าต่างแคบ (Short Data Window Orthogonal Filter Pair, SDOFP) เป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้จะเลือกประยุกต์ใช้ คู่ตัวกรองตั้งฉากแบบหน้าต่างแคบ (SDOFP) เพราะ SDOFP นั้นสามารถเข้าสู่ขนาดที่ถูกต้องได้เร็วกว่าวิธีการ FCDFT หรือ HCDFT ภาพที่ 3-4 แสดงสัญญาณกระแสที่มีการเปลี่ยนแปลงของขนาด จากที่ตอนเริ่มต้นสัญญาณจะมีขนาด 0.25 kA แต่เมื่อถึงเวลา 80 มิลลิวินาที ขนาดของสัญญาณกระแสได้เพิ่มขึ้นเป็น 1 kA ผลของการคำนวณหาขนาดด้วยวิธีการ HCDFT และ FCDFT นั้นจะต้องใช้เวลาถึง 10 และ 20 มิลลิวินาทีตามลำดับในการปรับค่าสัญญาณขาออกให้มีค่าเท่ากับค่าขนาดที่ถูกต้อง ในขณะที่วิธี SDOFP นั้นจะใช้เวลาเพียง 1.41 มิลลิวินาทีในการเข้าสู่ค่าตอบ แต่ค่าของขนาดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการ SDOFP นั้นมีข้อด้อยคือ ค่าสัญญาณขนาดของกระแสนั้นจะมีการพุ่งเกิน (Overshoot) ในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าขนาด ปัญหานี้จะถูกแก้ไขได้โดยอัลกอริทึมที่จะกล่าวถึงในหัวข้อ 3.4 และ 3.5



ภาพที่ 3-4 การเปรียบเทียบผลของการคำนวณหาขนาดของวิธี SDOFP HCDFT และ FCDFT

คู่ตัวกรองตั้งฉากแบบหน้าต่างแคบ (Short Data Window Orthogonal Filter Pair, SDOFP) ซึ่งนำมาประยุกต์ใช้ในการหาค่าขนาดและมุมนั้น ใช้หลักและวิธีการคล้ายกับการหาขนาดของสัญญาณด้วยวิธีการแปลงฟูริเยร์ไม่ต่อเนื่องแบบเต็มคลื่นหรือแบบครึ่งคลื่น (FCDFT และ HCDFT ตามลำดับ) จะต่างกันเพียงแค่ FCDFT หรือ HCDFT นั้นจะใช้ตัวกรองที่เป็นสัญญาณรูปไซน์และโคไซน์เต็มคลื่นหรือครึ่งคลื่นในการคำนวณ ดังแสดงในภาพที่ 3-5(a), (b), (c) และ (d)



ภาพที่ 3-5 คู่ตัวกรองตั้งฉากชนิดต่าง ๆ

สำหรับ SDOFP นั้นจะใช้ตัวกรองสองชุด โดยตัวกรองชุดแรก $\phi_s(k)$ จะเป็นบางส่วนของสัญญาณไซน์ ดังแสดงในภาพที่ 3-5(e) ส่วนตัวกรองที่สอง $\phi_c(k)$ จะเป็นสัญญาณบางส่วนของสัญญาณโคไซน์ ดังแสดงในภาพที่ 3-5(f)

3.3.1 คุณสมบัติของของตัวกรอง $\phi_s(k)$ และ $\phi_c(k)$ สำหรับ SDOFP [29]

1. $\phi_s(k)$ ต้องเป็นสัญญาณบางส่วนของสัญญาณไซน์และ $\phi_c(k)$ ต้องเป็นสัญญาณบางส่วนของสัญญาณโคไซน์
2. $\phi_s(k)$ และ $\phi_c(k)$ ต้องเป็นคู่ตั้งฉากกัน (Orthogonal Pair)
3. อัตราการขยายสัญญาณของกลุ่มตัวกรองตั้งฉากที่ความถี่เชิงมุมมูลฐาน (ω_0) จะต้องมีความเท่ากับหนึ่ง
4. เพื่อลดผลกระทบของสัญญาณกระแสดรบกวน ผลรวมของ $\phi_s(k)$ และ ผลรวมของ $\phi_c(k)$ จะต้องเป็นศูนย์

จากเงื่อนไขสี่ข้อข้างต้น หากหน้าต่างข้อมูล (Data Window) ที่มีคาบเวลาการสุ่มสัญญาณเป็น Δt และมีความยาวของหน้าต่างข้อมูลเท่ากับ L ซึ่งเป็นจำนวนเต็มที่เราสามารถสร้าง $\phi_s(k)$ และ $\phi_c(k)$ ได้ดังสมการที่ (3-1) และ (3-2) ตามลำดับ

$$\phi_s(k) = \frac{\sin(\omega_0 k \Delta t)}{\gamma_s} \quad (3-1)$$

$$\phi_c(k) = \frac{\cos(\omega_0 k \Delta t) - \frac{\sin(0.5 * \omega_0 L \Delta t)}{0.5 * \omega_0 L \Delta t}}{\gamma_c} \quad (3-2)$$

โดยที่ $k \in \left\{ \frac{(L-1)}{2} - (L-1), \frac{(L-1)}{2} - (L-2), \dots, \frac{(L-1)}{2} - (L-L) \right\}$ สำหรับค่า γ_s และ γ_c สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ (3-3) และ (3-4) ตามลำดับ ค่าทั้งสองนั้นเป็นค่าพลังงานของผลตอบสนองอิมพัลส์ (Impulse Response) ของตัวกรองไซน์และโคไซน์ที่ความถี่มูลฐาน เหตุผลที่ต้องมีการหารด้วยค่าคงที่ γ_s และ γ_c ในสมการที่ (3-1) และ (3-2) นั้น ก็เพื่อที่จะทำให้อัตราขยายสัญญาณที่ความถี่มูลฐานมีค่าเป็นหนึ่ง ส่วนพจน์ทางด้านขวาสุดของ $\phi_c(k)$ ในสมการที่ (3-2) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของไซน์นั้น มีไว้เพื่อให้ผลรวมของ $\phi_c(k)$ มีค่าเป็นศูนย์ ทำให้สามารถลดผลกระทบของสัญญาณกระแสดรบกวนที่จะทำให้ผลการคำนวณคลาดเคลื่อนได้

$$\gamma_s = \sum_{k=\frac{(L-1)}{2}}^{\frac{(L-1)}{2}} \left(\sin^2(\omega_0 k \Delta t) \right) \quad (3-3)$$

$$\gamma_c = \sum_{k=\frac{(1-L)}{2}}^{\frac{(L-1)}{2}} \left(\left(\cos(\omega_0 k \Delta t) - \frac{\sin(0.5\omega_0 L \Delta t)}{0.5\omega_0 L \Delta t} \right) \times \cos(\omega_0 k \Delta t) \right) \quad (3-4)$$

3.3.2 การคำนวณเพื่อหาขนาดและมุมของสัญญาณ

หลังจากที่ได้ตัวกรอง $\phi_s(k)$ และ $\phi_c(k)$ ซึ่งเป็นคู่ตัวกรองตั้งฉากแบบหน้าต่างแคบ (SDOFP) มาแล้วนั้น ในการคำนวณหาขนาดและมุมของสัญญาณกระแสทำได้โดยนำสัญญาณกระแส $i(n)$ ไปผ่านกระบวนการคอนโวลูชัน (Convolution) กับตัวกรอง $\phi_s(k)$ และ $\phi_c(k)$ ดังสมการที่ (3-5) และ (3-6) ผลลัพธ์ที่ได้จากสมการทั้งสองคือ ค่าขนาดจริง $a(n)$ และขนาดจินตภาพ $b(n)$ ของสัญญาณ $i(n)$ สำหรับขนาดของสัญญาณ $I_1(n)$ สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (3-7)

$$a(n) = i(n) * \phi_s(k) \quad (3-5)$$

$$b(n) = i(n) * \phi_c(k) \quad (3-6)$$

$$I_1(n) = \sqrt{a^2(n) + b^2(n)} \quad (3-7)$$

ในส่วนของการคำนวณหาค่ามุม (เทียบกับสัญญาณไซน์) ของสัญญาณนั้นจะใช้สมการที่ (3-8) ในการคำนวณ โดยที่ MOD_{360} คือฟังก์ชันการหาค่าโมดูลัสหลังการหาร (Modulus After Division) ด้วย 360 ส่วนของพจน์ขวาสุดของสมการที่ (3-8) นั้นมีหน้าที่ในการชดเชยการหน่วง (Delay) ของการกรองสัญญาณ

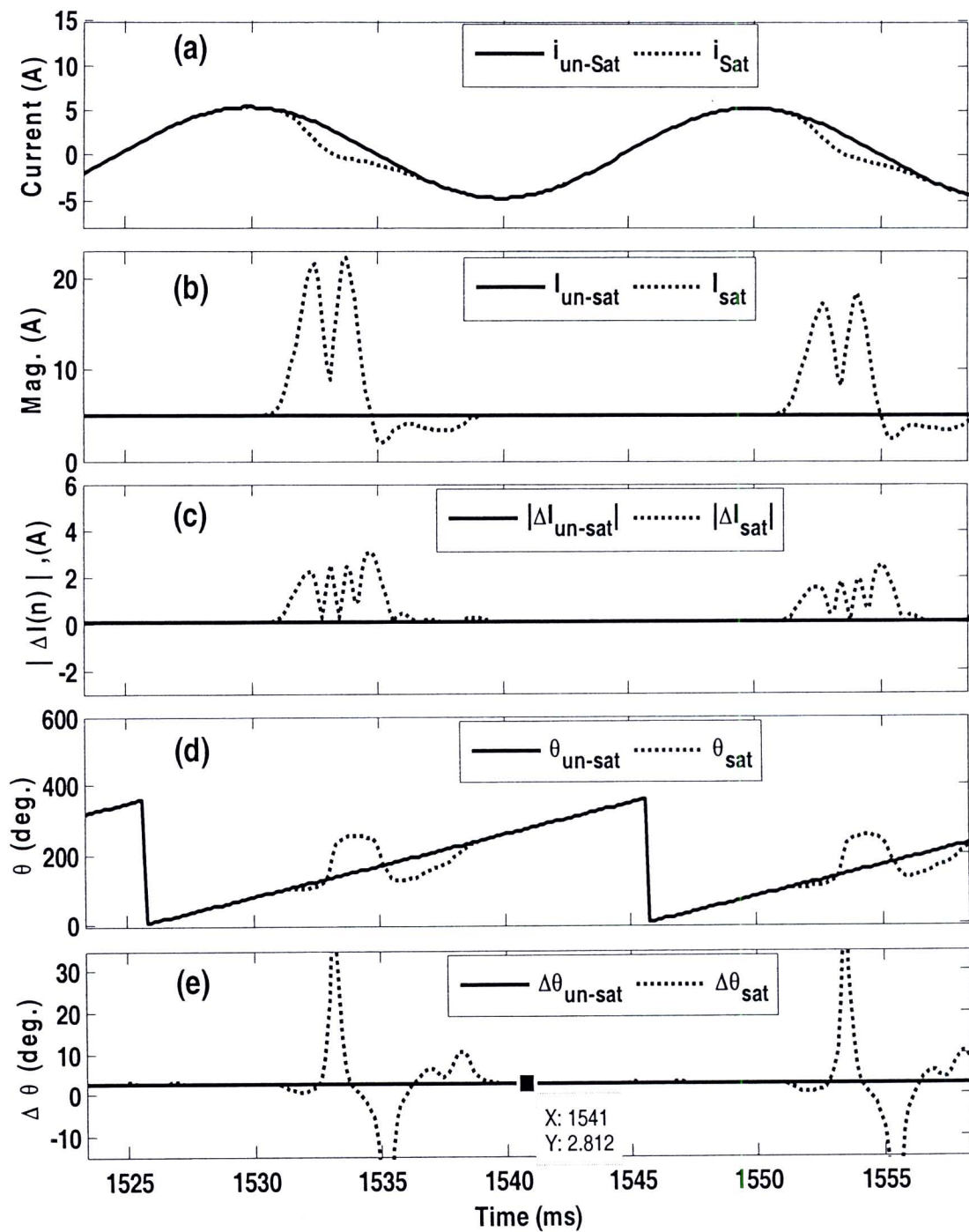
$$\theta(n) = \begin{cases} 90^\circ + \tan^{-1} \frac{a(n)}{b(n)} + \left(\frac{L}{2} \cdot \frac{360}{N} \right) & , b \geq 0 \\ \text{MOD}_{360} \left(270^\circ + \tan^{-1} \frac{a(n)}{b(n)} + \left(\frac{L}{2} \cdot \frac{360}{N} \right) \right) & , b < 0 \end{cases} \quad (3-8)$$

ในตอนนี้อัลกอริทึมมีข้อมูลทั้งขนาดและมุมของสัญญาณกระแส ข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในการตัดสินใจ สำหรับการคัดเลือกสัญญาณว่าส่วนใดที่มีคุณภาพดี ส่วนใดที่มีการผิดเพี้ยน

3.4 การบ่งชี้ถึงสัญญาณคุณภาพดี

ภาพที่ 3-6(a) แสดงกระแสด้านพหุคูณของหม้อแปลงกระแส $CT1_{un-sat}$ และ $CT2_{sat}$ (เส้นทึบ และเส้นจุดตามลำดับ) หม้อแปลงกระแสทั้งสองได้ทำการวัดกระแสด้านปฐมภูมิที่มีขนาดเท่ากัน แต่เนื่องจาก $CT2_{sat}$ มีพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กที่เล็กกว่าพื้นที่หน้าตัดของหม้อแปลง $CT1_{un-sat}$ มาก ส่งผลให้กระแสที่ฝั่งขดลวดพหุคูณของ $CT2_{sat}$ เกิดการผิดเพี้ยนอันเนื่องมาจากการอิ่มตัวของแกนหม้อแปลง จะสังเกตได้ว่าสัญญาณกระแสที่มีการผิดเพี้ยนนั้น ไม่ได้เกิดขึ้นตลอดช่วงเวลาของ

คาบสัญญาณกระแส แต่จะมีเพียงบางช่วงเท่านั้นที่มีความแตกต่างกัน (เกิดการผิดเพี้ยนที่ช่วงประมาณ 32-39 มิลลิวินาที และ 53-60 มิลลิวินาที) จากการนำเอาสัญญาณกระแสทั้งสองไปผ่านกระบวนการคำนวณหาค่าของขนาดและมุมของสัญญาณกระแส



ภาพที่ 3-6 ความแตกต่างระหว่างสัญญาณที่มีคุณภาพดีและสัญญาณที่มีการผิดเพี้ยน

ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อก่อนหน้านี้ว่า คุณสมบัติสองประการที่เป็นตัวบ่งชี้ว่าสัญญาณมีคุณภาพดีสามารถนำไปใช้ประมวลผลได้ คือ 1. มีขนาดคงที่ 2. มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของมุมเป็น 360° ต่อ

คาบ ผลการคำนวณค่าขนาดได้แสดงไว้ดังภาพที่ 3-6(b) ขนาดของสัญญาณกระแสที่มีคุณภาพดีจาก CT1_{un-sat} (เส้นทึบ) จะมีค่าคงที่อยู่ที่ 5 A เสมอ สำหรับขนาดของสัญญาณกระแสที่ได้จากหม้อแปลง CT2_{sat} จะมีขนาดเท่ากับ 5 A เช่นกัน เว้นแต่ช่วงที่สัญญาณเกิดการผิดเพี้ยน ขนาดของสัญญาณกระแสจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาดังกล่าว ในการตรวจสอบว่าขนาดของกระแสนั้นคงที่หรือไม่ ทำได้โดยการคำนวณหาค่าสัมบูรณ์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงของขนาดหรือ $|\Delta I(n)|$ ว่ามีค่าใกล้เคียงศูนย์หรือไม่ ดังแสดงในภาพที่ 3-6(c) ช่วงที่สัญญาณมีคุณภาพดี อัตราการเปลี่ยนแปลงของขนาดจะมีค่าต่ำมาก สำหรับผลการคำนวณค่ามุมของสัญญาณกระแสนั้นได้ถูกแสดงไว้ดังภาพที่ 3-6(d) ค่ามุมของสัญญาณกระแสที่มีคุณภาพดีจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงที่มีความชัน 360° ต่อคาบ ต่างจากค่ามุมของสัญญาณกระแสขณะเกิดการอิ่มตัวซึ่งจะไม่เป็นเส้นตรง

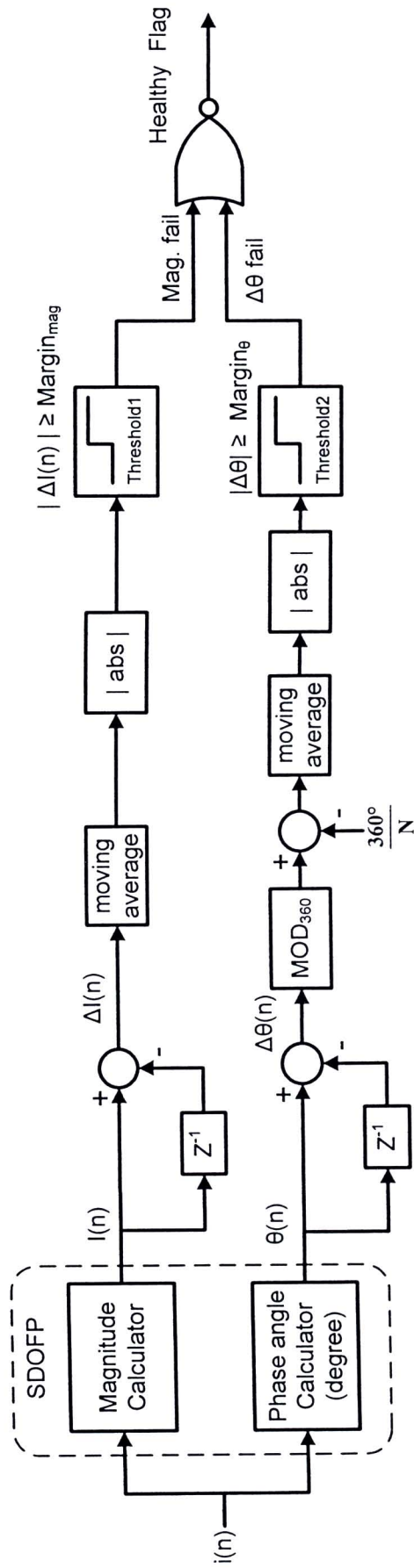
เพื่อที่จะทำการคัดสรรสัญญาณที่มีคุณภาพดีมาใช้ในการคำนวณ ฟังก์ชันไหลของสัญญาณดังแสดงในภาพที่ 3-7 จึงถูกนำมาใช้ โดยขนาด $I(n)$ และมุม $\theta(n)$ จะถูกคำนวณด้วยวิธีคู่ตัวกรองหน้าต่างแคบ (SDOFP) ฟังก์ชันด้านบนของภาพที่ 3-7 จะทำหน้าที่ตรวจสอบเงื่อนไขข้อที่ 1 คือ ตรวจสอบว่าขนาดของสัญญาณมีความคงที่หรือไม่ หลังจากที่ SDOFP ได้ส่งค่า $I(n)$ มาแล้ว ค่าดังกล่าวจะถูกส่งต่อไปยังส่วนของการหาค่าอัตราการเปลี่ยนแปลง $\Delta I(n)$ โดยใช้การคำนวณดังสมการที่ (3-10)

$$\Delta I(n) = I(n) - I(n - 1) \quad (3-10)$$

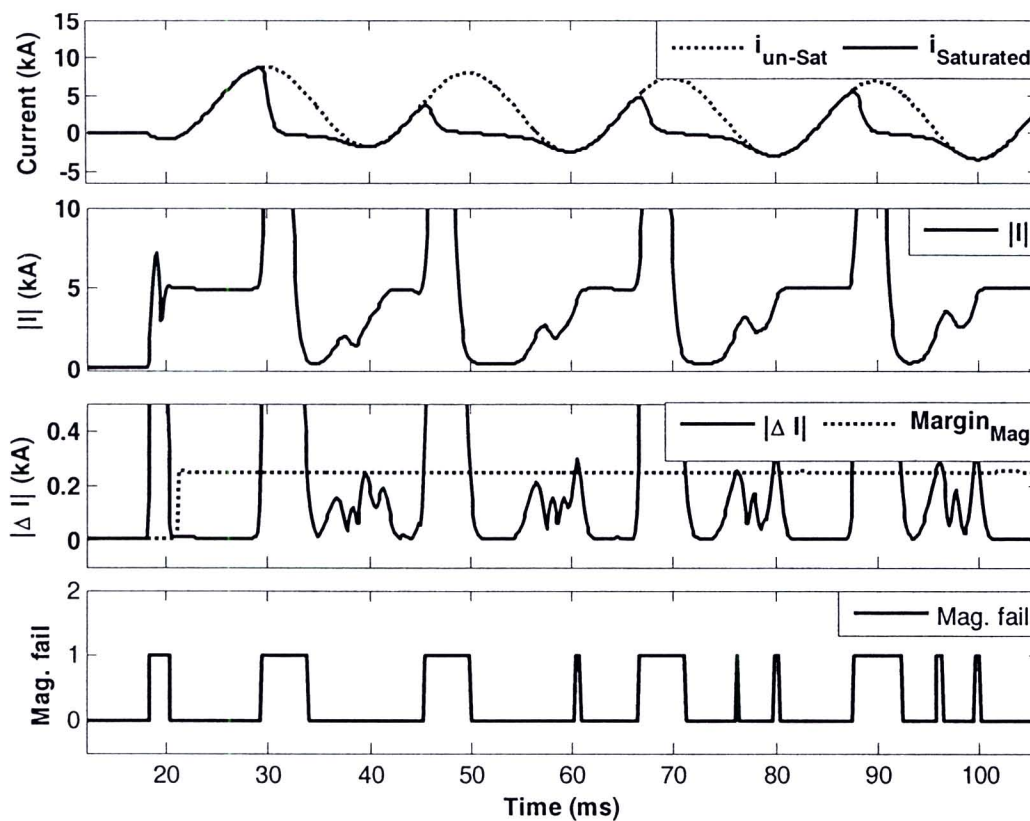
เมื่อได้ค่า $\Delta I(n)$ มาแล้วจึงนำค่าดังกล่าวไปผ่านกระบวนการกรองความถี่ต่ำผ่านแบบ Moving Average เพื่อให้สัญญาณมีความเรียบเพิ่มขึ้น [29] แล้วจึงทำการหาค่าสัมบูรณ์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงของขนาด หรือ $|\Delta I(n)|$ หากสัญญาณในขณะนั้นมีคุณภาพดี ค่า $|\Delta I(n)|$ จะต้องมิต่ำมากดังแสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบในภาพที่ 3-8 ในการตรวจสอบว่า $|\Delta I(n)|$ มีค่าต่ำหรือไม่ โดยค่าดังกล่าวจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่า $\text{Margin}_{\text{mag}}$ โดยที่ค่า $\text{Margin}_{\text{mag}}$ นี้เป็นค่าที่ได้มาจากการคำนวณดังสมการที่ (3-11) โดยที่ค่า $I_{\text{com}}(n-1)$ คือค่าของขนาดกระแสในรอบการคำนวณก่อนหน้าซึ่งได้รับการปรับปรุงให้ถูกต้องแล้ว ส่วนค่า k_m เป็นค่าคงที่ ตัวอย่างเช่น หากต้องการให้ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของขนาด มีค่าน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ของขนาดกระแสขณะนั้น จะต้องกำหนดให้ค่า k_m เป็น 0.05

$$\text{Margin}_{\text{mag}} = k_m \times I_{\text{com}}(n-1) \quad (3-11)$$

หากค่า $|\Delta I(n)|$ มีค่าต่ำกว่า $\text{Margin}_{\text{mag}}$ จะส่งผลให้ค่าสัญญาณบ่งชี้ Magnitude Fail (Mag. Fail) อยู่ในสถานะไม่ทำงาน (Non Active) ในทางกลับกัน หากค่า $|\Delta I(n)|$ มีค่าสูงกว่า $\text{Margin}_{\text{mag}}$ จะส่งผลให้ค่าสัญญาณบ่งชี้ Mag. Fail อยู่ในสถานะทำงาน (Active) ซึ่งหมายถึงสัญญาณมีคุณภาพไม่ดี



ภาพที่ 3-7 ฟังก์ชันการป้องกันของสัญญาณ

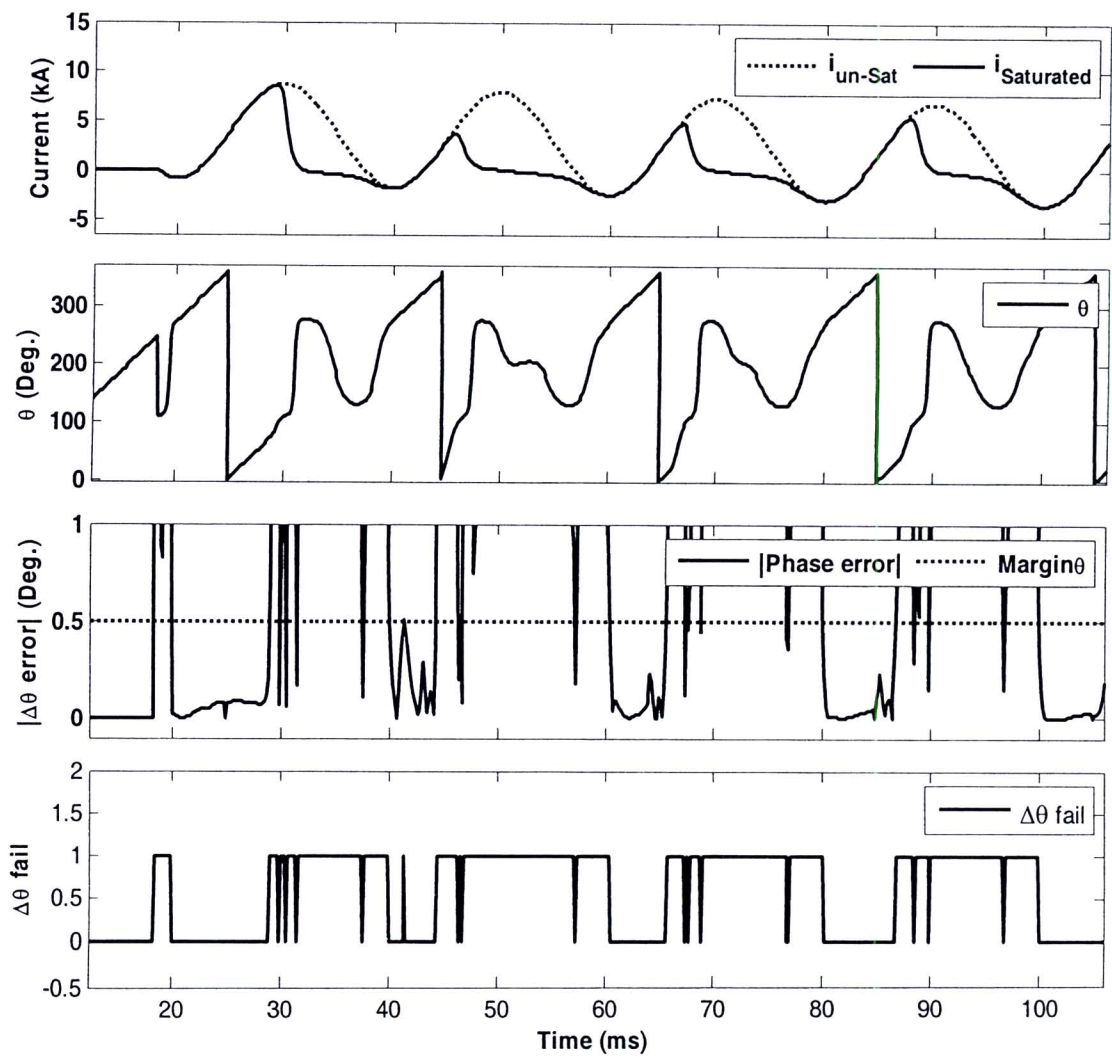


ภาพที่ 3-8 การตรวจสอบคุณสมบัติด้านขนาดของสัญญาณคุณภาพดี

ฝั่งส่วนด้านล่างของภาพที่ 3-7 จะทำหน้าที่ตรวจสอบเงื่อนไขข้อที่ 2 คือ ตรวจสอบว่าอัตรา การเปลี่ยนแปลงของมุมของสัญญาณมีค่าเท่ากับ 360° ต่อคาบหรือไม่ หลังจากที่ได้ส่งค่า $\theta(n)$ มาแล้ว ค่าดังกล่าวจะถูกส่งต่อไปยังส่วนของการหาค่าอัตราการเปลี่ยนแปลง $\Delta\theta(n)$ โดยใช้ การคำนวณดังสมการที่ (3-12)

$$\Delta\theta(n) = \theta(n) - \theta(n-1) \quad (3-12)$$

เมื่อได้ค่า $\Delta\theta(n)$ มาแล้ว อัลกอริทึมจะทำการตรวจสอบค่า $\Delta\theta(n)$ ว่ามีค่าเป็นลบหรือไม่ หากเป็นลบให้ทำการ บวกด้วยค่า 360° เช่นในกรณีที่ $\theta(n)$ และ $\theta(n-1)$ มีค่าเท่ากับ 2° และ 359° ตามลำดับ ส่งผลให้ $\Delta\theta(n)$ มีค่าเป็น -357° หลังจากทำการบวกด้วยค่า 360° จะได้ผลลัพธ์เป็น 3° ซึ่งการกระทำดังกล่าวข้างต้นคือการทำโมดูลัสหลังการหารด้วย 360 (Modulus After Division, MOD_{360}) หลังจากนั้นค่า อัตราการเปลี่ยนแปลงของมุมจึงถูกนำไปตรวจสอบว่ามีค่าเป็น 360° ต่อ คาบหรือไม่ หากค่าสัมบูรณ์ของผลต่างระหว่าง $\Delta\theta(n)$ กับค่า $360/N$ มีค่าน้อยกว่าค่า Margin_θ จะ ส่งผลให้ค่าสัญญาณบ่งชี้ $\Delta\theta_{\text{Fail}}$ อยู่ในสถานะไม่ทำงาน (Non Active) ดังแสดงตัวอย่างการ เปรียบเทียบในภาพที่ 3-9 ในทางกลับกัน หากค่า $\Delta\theta(n)$ ต่างจากค่า $360/N$ มากกว่าค่า Margin_θ จะ ส่งผลให้ค่าสัญญาณบ่งชี้ $\Delta\theta_{\text{Fail}}$ อยู่ในสถานะทำงาน (Active) ซึ่งหมายถึงสัญญาณมีคุณภาพไม่ดี



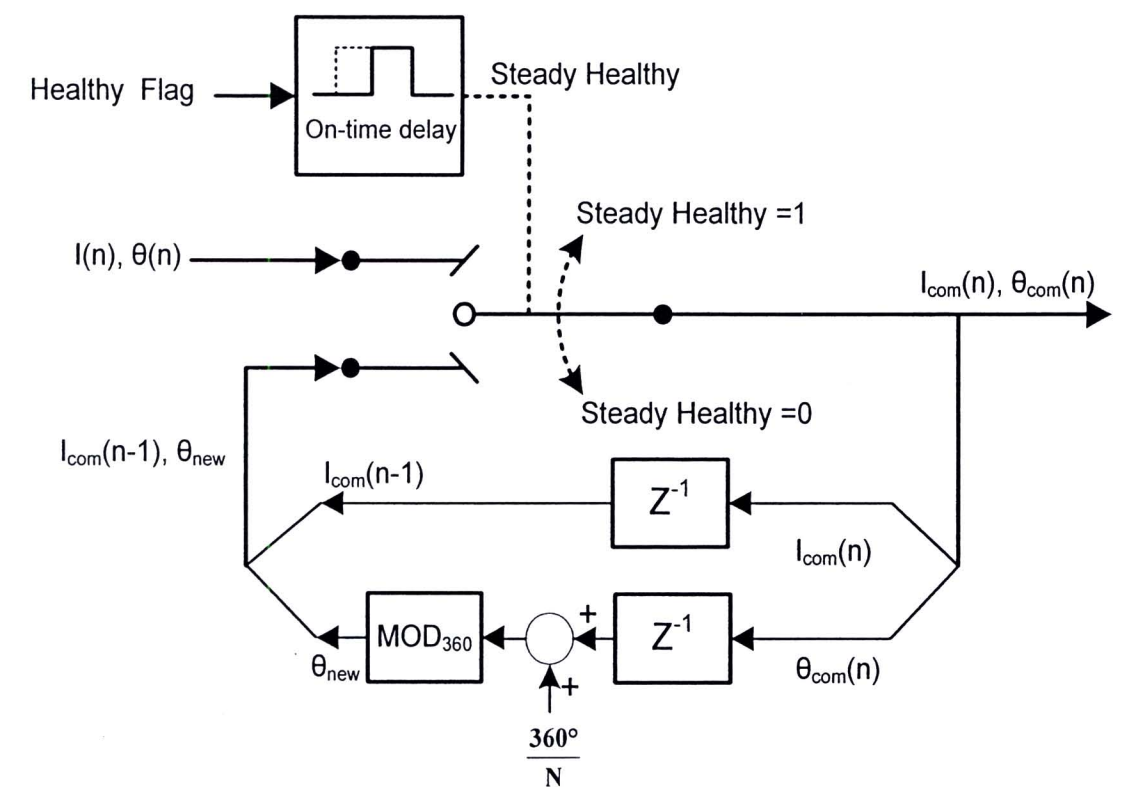
ภาพที่ 3-9 การตรวจสอบคุณสมบัติด้านมุมของสัญญาณคุณภาพดี

หากสัญญาณบ่งชี้ทั้ง Mag.fail และ $\Delta\theta Fail$ อยู่ในสถานะไม่ทำงาน จะส่งผลให้สัญญาณบ่งชี้ Healthy Flag อยู่ในสถานะทำงาน ซึ่งสัญญาณนี้จะเป็นตัวบ่งชี้ว่าสัญญาณในช่วงเวลานั้นเป็นสัญญาณที่มีคุณภาพดีหรือไม่ หาก Healthy Flag อยู่ในสถานะทำงาน หมายถึงสัญญาณในขณะนั้นมีคุณภาพดี สัญญาณบ่งชี้นี้จะถูกนำไปใช้ในการปรับแต่งสัญญาณกระแสให้มีคุณภาพดีซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

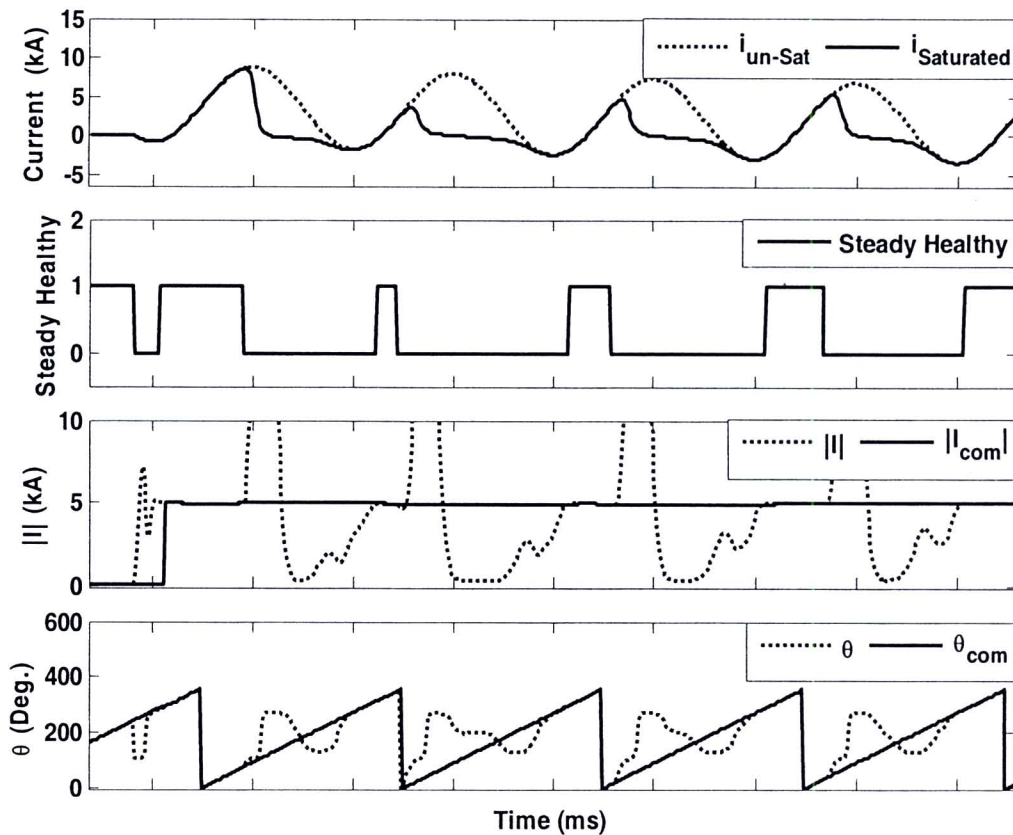
3.5 การคัดสรรสัญญาณคุณภาพดี

หลังจากที่ได้ทำการคำนวณหาสัญญาณ Healthy Flag ซึ่งใช้สำหรับบ่งชี้ว่าสัญญาณมีคุณภาพดีหรือไม่ สัญญาณดังกล่าว จะถูกส่งต่อไปยังกระบวนการตัดต่อสัญญาณซึ่งจะทำการคัดเอาส่วนของสัญญาณขนาดที่มีคุณภาพดีทิ้งไว้และตัดส่วนที่ไม่มั่นใจในคุณภาพออก โดยใช้ฟังก์การตัดต่อสัญญาณดังแสดงในภาพที่ 3-10

สัญญาณ Healthy Flag จะถูกตรวจสอบด้วย On-time Delay Module ซึ่งจะคอยตรวจสอบให้มั่นใจว่าสัญญาณ Healthy Flag อยู่ในสถานะทำงานอย่างต่อเนื่องหรือไม่ หากสัญญาณ Healthy Flag อยู่ในสถานะทำงานติดต่อกันมากกว่า 3 จุด จะส่งผลให้ค่าสัญญาณขาออก (Steady Healthy) อยู่ในสถานะทำงาน ในกรณีที่สัญญาณ Steady Healthy อยู่ในสถานะทำงาน ขนาดและมุมของสัญญาณกระแสขาออกที่ผ่านการปรับปรุง ($I_{com}(n)$ และ $\theta_{com}(n)$ ตามลำดับ) จะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับขนาดและมุมที่ได้จากการคำนวณของกระบวนการ SDOFP โดยตรง) $I(n)$ และ $\theta(n)$ ตามลำดับ) ดังแสดงในภาพที่ 3-10 ในทางตรงกันข้าม หากสัญญาณ Steady Healthy อยู่ในสถานะไม่ทำงานทำงาน ขนาดและมุมของกระแสขาออกที่ผ่านการปรับปรุง ($I_{com}(n)$) จะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับขนาดของกระแสที่มีการปรับปรุงแล้วในวงรอบการคำนวณก่อนหน้านี้ ($I_{com}(n-1)$) สำหรับค่ามุมของสัญญาณกระแสจะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับผลรวมระหว่าง ค่ามุมของสัญญาณก่อนหน้านี้ ($\theta_{com}(n-1)$) กับค่า $360/N$ โดย N เป็นความถี่ของการสุ่มต่อคาบ หลังจากที่ผ่านมากระบวนการคัดสรรแล้ว อัลกอริทึมจะได้ค่าของขนาดและมุมของสัญญาณกระแสที่มีความถูกต้องสูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 3-11



ภาพที่ 3-10 ฟังก์ชันการคัดเลือกและการตัดต่อสัญญาณ



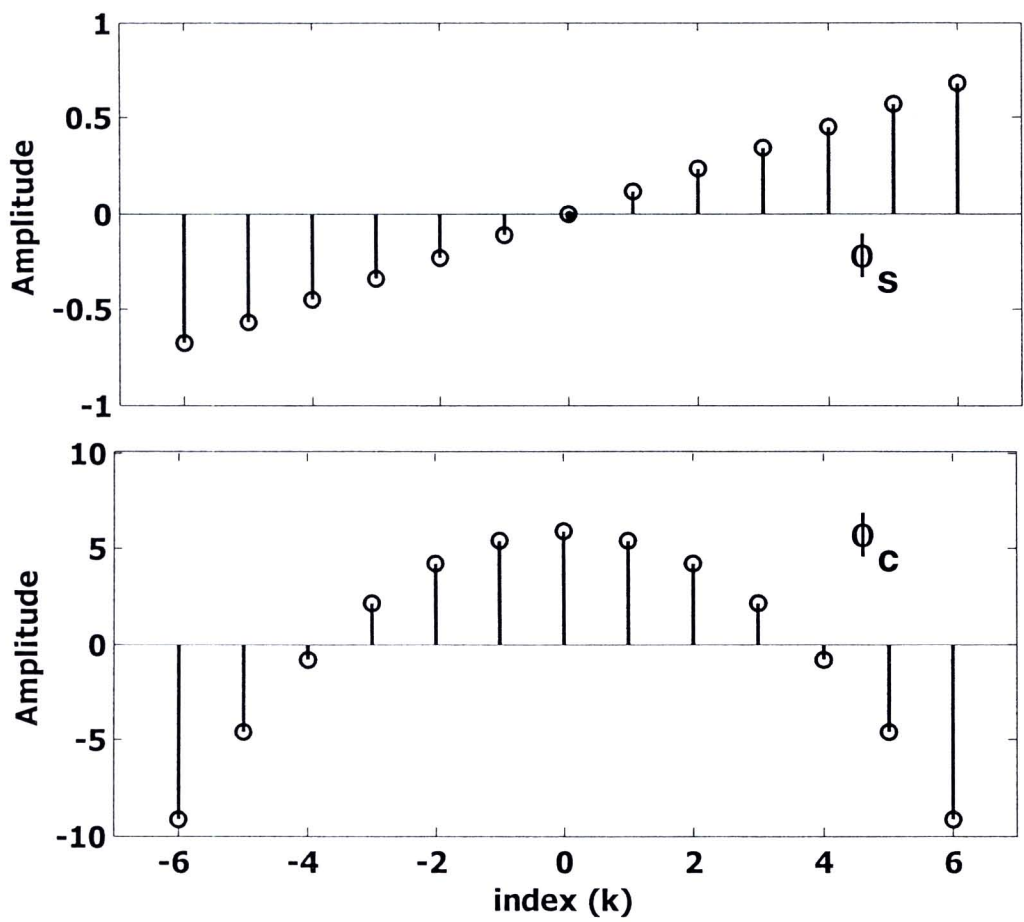
ภาพที่ 3-11 การปรับแต่งสัญญาณซึ่งเกิดการผิพเพี้ยนอันเนื่องมาจากการอิมิตัวของหม้อแปลง

3.6 การทดสอบเบื้องต้นในการคำนวณค่าขนาดและมุมของสัญญาณกระแส

หลังจากที่ได้ทำการออกแบบอัลกอริทึมในการคำนวณค่าของขนาดและมุมของสัญญาณกระแสแล้ว จะต้องทำการตรวจสอบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม โดยนำสัญญาณในหลากหลายกรณีมาใช้ในการทดสอบ ดังนี้

1. กรณีที่ขนาดของกระแสการะมีการเปลี่ยนแปลง
2. กรณีที่เกิดการอิมิตัวของหม้อแปลงไม่รุนแรง (สัดส่วนของ X/R เป็น 3)
3. กรณีที่เกิดการอิมิตัวของหม้อแปลงอย่างรุนแรง (สัดส่วนของ X/R เป็น 30)
4. กรณีที่มีฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างในแกนของหม้อแปลงกระแส
5. กรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของกระแสผิดปกติระหว่างกระบวนการตรวจจับการอิมิตัว
6. กรณีที่มีกระแสพุ่งเข้า (Inrush Current) ส่งผลให้แกนของหม้อแปลงกำลังเกิดการอิมิตัว

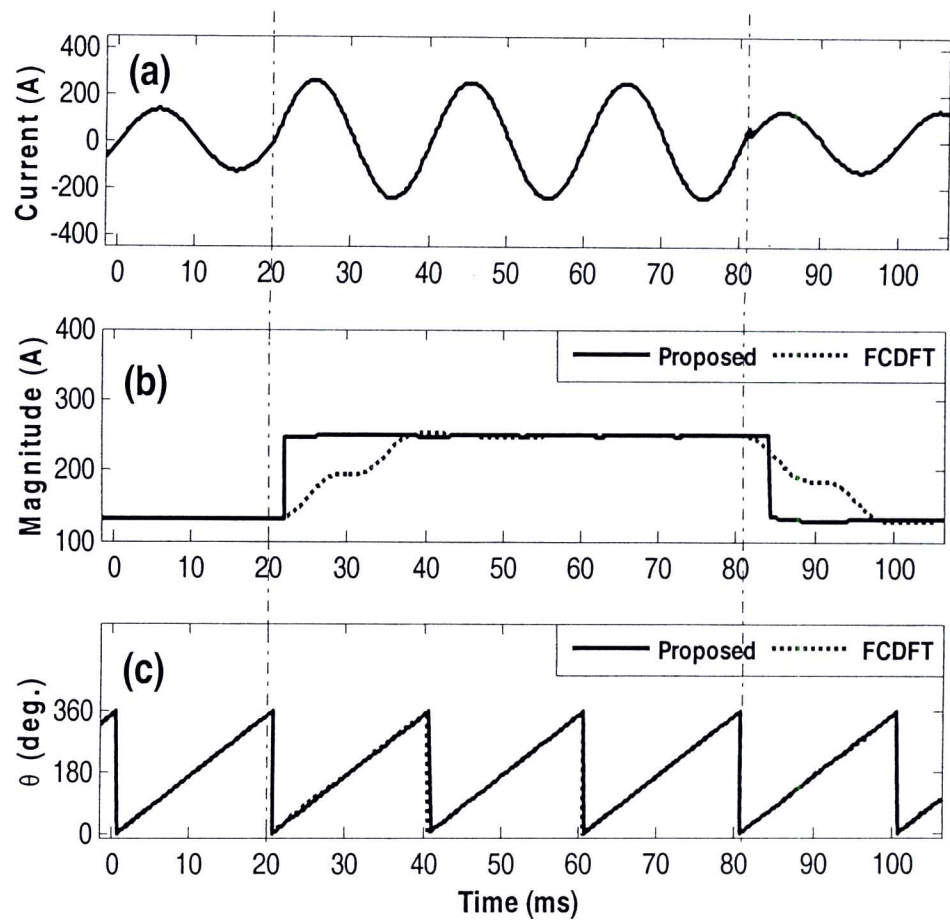
ในการทดสอบนี้ผู้วิจัยได้ใช้สัญญาณกระแสที่ได้จากโปรแกรมจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยระบบไฟฟ้ามีความถี่ 50 Hz มีการสุ่มสัญญาณที่มีความถี่ 6.4 kHz (128 จุดต่อคาบ) และในการคำนวณหาขนาดและมุมนั้นจะใช้หน้าต่างข้อมูลขนาด 11 จุด ใช้คู่ตัวกรองตั้งฉาก $\phi_s(k)$ และ $\phi_c(k)$ ดังแสดงในภาพที่ 3-12



ภาพที่ 3-12 ผลตอบสนองอิมพัลส์ของคู่ตัวกรองตั้งฉาก $\phi_s(k)$ และ $\phi_c(k)$

3.6.1 กรณีที่ขนาดของกระแสการมีการเปลี่ยนแปลง

ในการทดสอบการคำนวณหาค่าขนาดและมุมของสัญญาณในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของกระแสการนั้น มีวัตถุประสงค์ที่จะทดสอบความไวในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของขนาดสัญญาณ อัลกอริทึมที่ดีจะต้องสามารถปรับค่าสัญญาณขาออกให้มีค่าเท่ากับขนาดของสัญญาณ โดยใช้เวลาน้อยและมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ดังนั้นผลของขนาดและมุมที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีการที่งานวิจัยนี้นำเสนอจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณด้วยวิธีการแปลงฟูริเยร์ไม่ต่อเนื่องแบบเต็มคลื่น (FCDF) ซึ่งเป็นวิธีที่ให้ค่าของขนาดและมุมของสัญญาณในสถานะคงตัวได้ถูกต้องแม่นยำ ในตอนเริ่มการทดสอบ สัญญาณมีขนาดเท่ากับ 130.4 A แต่เมื่อเวลาผ่านไป 20 มิลลิวินาที ขนาดกระแสได้เพิ่มขึ้นเป็น 248.6 A และลดลงมาเป็น 130.4 A เหมือนเดิมที่เวลา 81 มิลลิวินาที ผลของการเปรียบเทียบของทั้งสองวิธีการได้ถูกแสดงไว้ในภาพที่ 3-13 โดยภาพที่ 3-13(a) นั้นแสดงรูปสัญญาณที่ใช้ในการทดสอบ ภาพที่ 3-13(b) แสดงค่าของขนาดที่คำนวณได้โดยวิธีการที่งานวิจัยนี้เสนอ (เส้นทึบ) เทียบกับค่าขนาดที่ได้จากวิธีการ FCDF

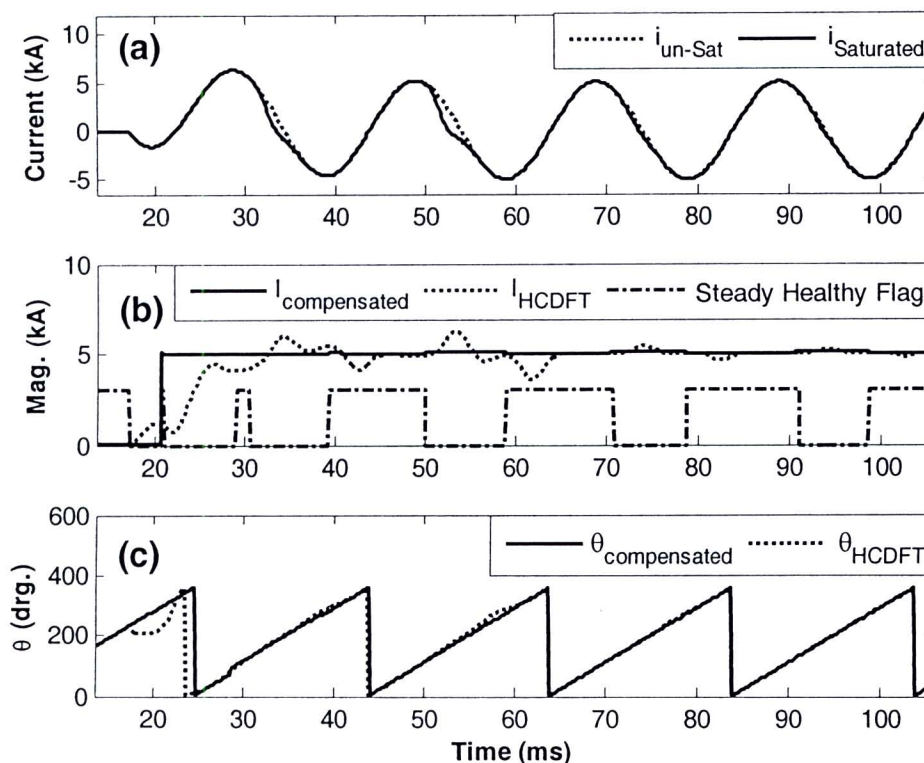


ภาพที่ 3-13 ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมในกรณีที่ขนาดกระแสการะมีการเปลี่ยนแปลง

จะเห็นได้ว่าผลที่ได้จากวิธีการของงานวิจัยนี้สามารถหาค่าขนาดที่ถูกต้องได้รวดเร็วกว่าอีกทั้งยังให้ค่าของขนาดที่มีความถูกต้อง สำหรับผลการคำนวณค่ามุมของสัญญาณนั้นพบว่าทั้งสองวิธีได้ให้คำตอบที่เหมือนกัน ค่ามุมที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอ (เส้นทึบ) และ ค่ามุมที่ได้จากวิธี FCDFD (เส้นจุด) เกือบจะซ้อนทับกันสนิทพอดี

3.6.2 กรณีที่เกิดการอิ่มตัวของหม้อแปลงไม่รุนแรง (สัดส่วนของ X/R มีค่าเท่ากับ 3)

ในการทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพในการคำนวณหาขนาดและมุมของสัญญาณในกรณีที่สัญญาณเกิดการบิดเบี้ยวเพียงเล็กน้อย โดยสัญญาณที่นำมาใช้ในการทดสอบนี้ เป็นสัญญาณกระแสในกรณีที่เกิดกระแสผิดพลาดขนาด 5 kA ในระบบที่สัดส่วนของ X/R คือ 3 การที่สัดส่วนของ X/R ไม่สูงมากนัก ทำให้องค์ประกอบของสัญญาณกระแสตรงปรากฏอยู่ในสัญญาณกระแสเพียงช่วงระยะเวลาสั้น ๆ เท่านั้น การอิ่มตัวของแกนหม้อแปลงจึงเกิดขึ้นไม่รุนแรง ภาพที่ 3-14(a) แสดงภาพกระแสผิดพลาด (เส้นทึบ) เทียบกับกระแสในกรณีที่ไม่มีกระแสผิดพลาด จะเห็นได้ว่าการบิดเบี้ยวเล็กน้อยในช่วงสองคาบแรก



ภาพที่ 3-14 ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสที่ได้จากหม้อแปลงกระแสกรณีที่มีการอิ่มตัวเล็กน้อย

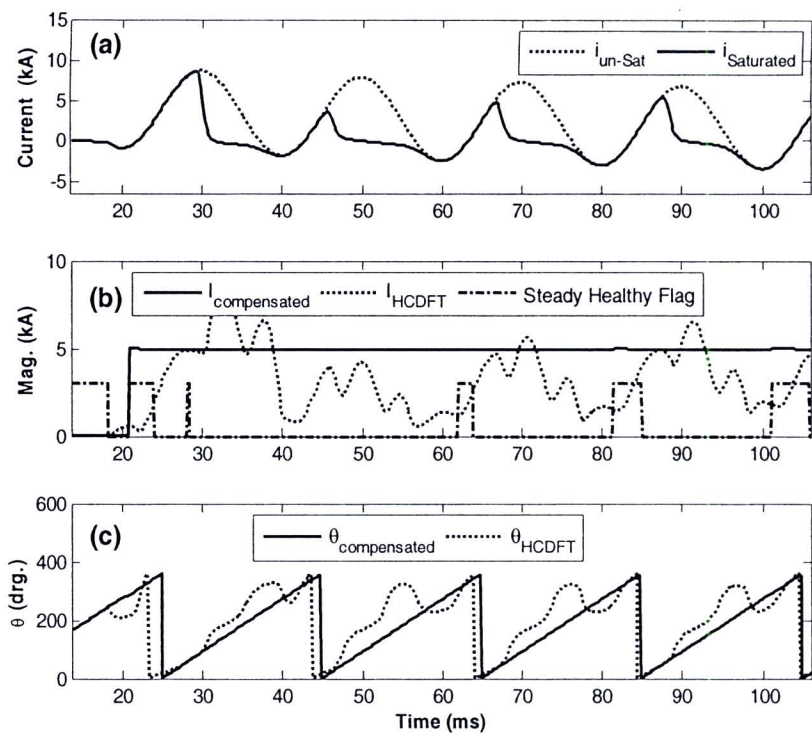
ภาพที่ 3-14(b) แสดงขนาดที่ได้จากการคำนวณของวิธีที่นำเสนอ (เส้นทึบ) เทียบกับขนาดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี HCDFT (เส้นจุด) จะเห็นได้ว่า ขนาดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีที่นำเสนอ นั้นสามารถเข้าสู่ค่าขนาด 5 kA ได้ภายใน 5 มิลลิวินาที ในขณะที่วิธี HCDFT ใช้เวลานานกว่า 15 มิลลิวินาที และมีการกระเพื่อมของสัญญาณสูง ที่เป็นเช่นนี้เพราะองค์ประกอบของสัญญาณ กระแสตรงและการผิดเฟสทำให้การคำนวณค่าขนาดมีความผิดพลาด นอกจากนี้ ภาพที่ 3-14(b) ยังแสดงสถานะของสัญญาณ Steady Healthy Flag (เส้นประ-จุด) ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณนี้จะอยู่ในสถานะทำงานเฉพาะในช่วงที่สัญญาณมีคุณภาพดีเท่านั้น

ภาพที่ 3-14(c) แสดงค่ามุมที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีที่นำเสนอ (เส้นทึบ) เทียบกับค่ามุมที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี HCDFT (เส้นจุด) ผลชี้ให้เห็นว่าวิธีการทำงานวิจัยนี้นำเสนอสามารถให้ค่ามุมที่ถูกต้องและแม่นยำกว่าวิธี HCDFT

3.6.3 กรณีที่เกิดการอิ่มตัวของหม้อแปลงอย่างรุนแรง (สัดส่วนของ X/R มีค่าเท่ากับ 30)

ในการทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพในการคำนวณหาขนาดและมุมของสัญญาณในกรณีที่สัญญาณเกิดการผิดเฟสอย่างรุนแรง โดยสัญญาณที่นำมาใช้ในการทดสอบนี้ เป็นสัญญาณกระแสผิดพ้องขนาด 5 kA ในระบบที่มีสัดส่วนของ X/R เป็น 30 การที่

สัดส่วนของ X/R มีค่าสูง ทำให้อำนาจประกอบของสัญญาณกระแสตรงปรากฏอยู่ในสัญญาณกระแส
ผิดพลาดเป็นระยะเวลานาน การอิ่มตัวของแกนหม้อแปลงจึงเกิดขึ้นอย่างรุนแรง ภาพที่ 3-15(a)
แสดงภาพกระแสผิดพลาดที่มีความผิดเพี้ยน (เส้นทึบ) เทียบกับกระแสในกรณีที่ไม่มี ความผิดเพี้ยน
จะเห็นได้ว่าการผิดเพี้ยนเกิดขึ้นอย่างรุนแรงและเกิดขึ้นเป็นระยะเวลานาน



ภาพที่ 3-15 ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสที่ได้จากหม้อแปลงกระแสกรณีที่มี
การอิ่มตัวอย่างรุนแรง

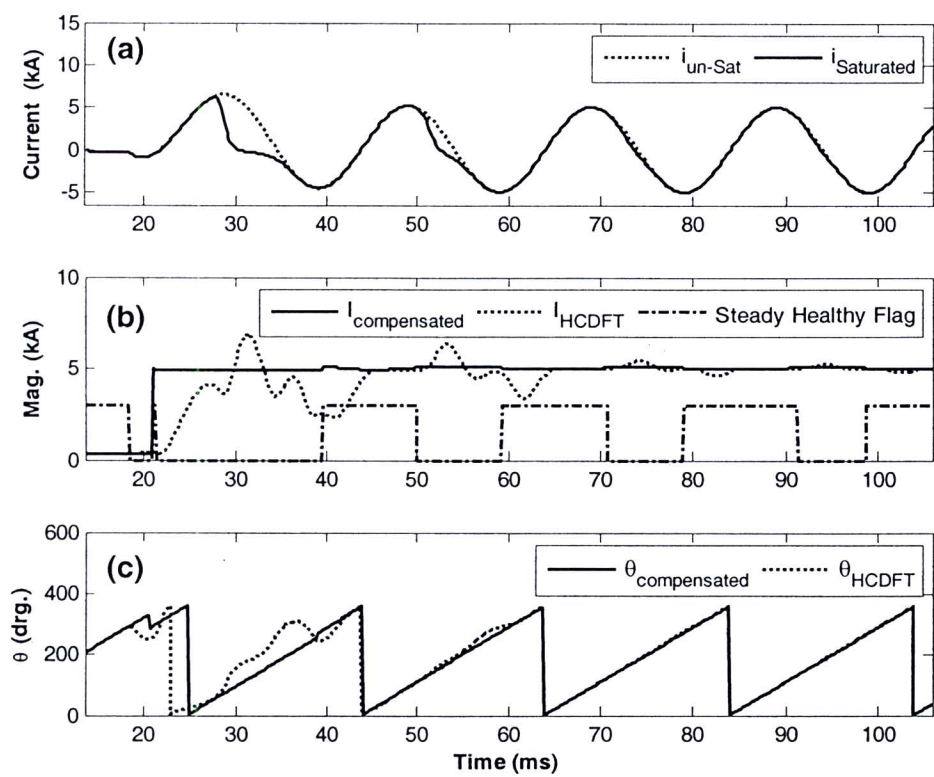
ภาพที่ 3-15(b) แสดงขนาดที่ได้จากการคำนวณของวิธีที่นำเสนอ (เส้นทึบ) เทียบกับขนาดที่
ได้จากการคำนวณด้วยวิธี HCDFE (เส้นจุด) จะเห็นได้ว่า ค่าขนาดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี
HCDFE นั้นมีการกระเพื่อมและมีความคลาดเคลื่อนอย่างรุนแรงจนไม่สามารถนำมาใช้งานได้เลย
ในขณะที่ขนาดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีที่นำเสนอ นั้นสามารถเข้าสู่ค่าขนาดที่ถูกต้อง (5 kA)
ได้ภายใน 5 มิลลิวินาที นอกจากนี้ภาพที่ 3-15(b) ยังแสดงสถานะของสัญญาณ Steady Healthy Flag
(เส้นประ-จุด) ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณนี้จะอยู่ในสถานะทำงานเฉพาะในช่วงที่สัญญาณมีคุณภาพดี
เท่านั้น

ภาพที่ 3-15(c) แสดงค่ามุมที่ได้จากการคำนวณของวิธีที่นำเสนอ (เส้นทึบ) เทียบกับค่ามุมที่
ได้จากการคำนวณด้วยวิธี HCDFE (เส้นจุด) ผลชี้ให้เห็นว่าวิธีการทำงานวิจัยนี้นำเสนอสามารถให้ค่า
มุมที่ถูกต้องและแม่นยำ ส่วนผลการคำนวณค่ามุมด้วยวิธี HCDFE นั้นมีความคลาดเคลื่อนสูงมาก

3.6.4 กรณีที่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างในแกนของหม้อแปลงกระแส

วิธีการปรับปรุงค่ากระแสที่ผิดเพี้ยนนั้นมีอยู่หลากหลายวิธี สำหรับวิธีการปรับปรุงค่ากระแสที่มีการใช้กราฟคุณสมบัติการกระตุ้นของหม้อแปลงในการปรับปรุงนั้นมีข้อด้อยตรงที่ หากหม้อแปลงมีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง จะทำให้การคำนวณปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กในแกนผิดพลาด ส่งผลให้ค่ากระแสที่คำนวณออกมาผิดพลาดตามไปด้วย ด้วยเหตุนี้จึงต้องทำการทดสอบในกรณีที่เส้นแรงแม่เหล็กตกค้างในแกนของหม้อแปลง เพื่อที่จะพิสูจน์ว่าเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างไม่ได้สร้างปัญหากับอัลกอริทึมที่งานวิจัยนี้นำเสนอ

ในการทดสอบ ได้ใช้กระแสผิดพร่องที่ได้จากการจำลอง โดยใช้แบบจำลองแบบเดียวกับที่ใช้ในการทดลองหัวข้อ 3.6.2 (กรณีเกิดการอิ่มตัวของหม้อแปลงไม่รุนแรง) แต่จะต่างกันตรงที่หม้อแปลงกระแสจะถูกกำหนดให้มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างอยู่ 80% เส้นแรงแม่เหล็กตกค้างดังกล่าวส่งผลให้ค่ากระแสที่วัดได้มีการผิดเพี้ยนที่สูงขึ้นกว่าปกติ ดังแสดงในภาพที่ 3-16(a) จากผลการทดสอบ อัลกอริทึมที่นำเสนอสามารถทำงานได้ดีเหมือนเดิมสำหรับการปรับปรุงค่าขนาดและมุมของสัญญาณ ดังแสดงในภาพที่ 3-16(b) และ ภาพที่ 3-16(c) ตามลำดับ ในขณะที่ผลที่ได้จากวิธี HCDFT ให้ผลการคำนวณที่มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงในช่วงที่เกิดการอิ่มตัวของหม้อแปลง



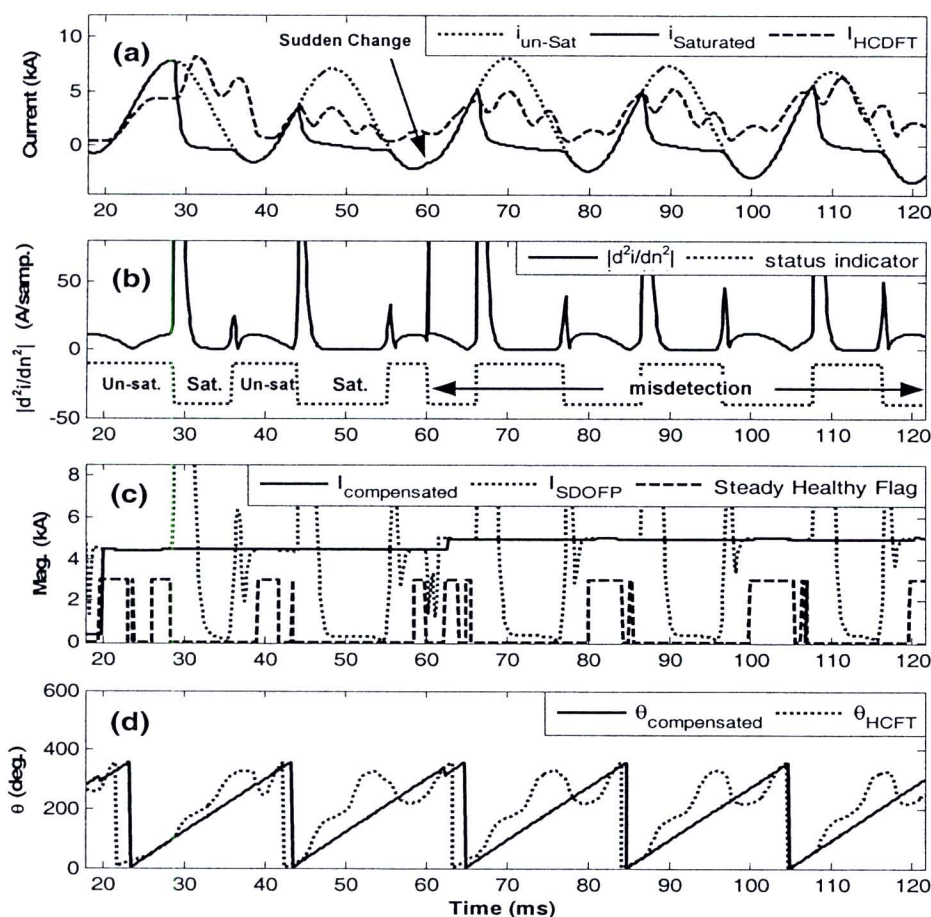
ภาพที่ 3-16 ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสที่ได้จากหม้อแปลงกระแสที่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง

3.6.5 กรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของกระแสผิดพลาดในระหว่างกระบวนการตรวจจับการล้มตัว

ในการแยกแยะสัญญาณที่มีคุณภาพดีและสัญญาณที่มีการผิดเพี้ยนนั้นมีอยู่หลายวิธีดังได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 บางวิธีการเลือกที่จะใช้การเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของสัญญาณกระแสเป็นตัวบ่งชี้ว่าหม้อแปลงกระแสกำลังจะเข้าหรือกำลังจะออกจากสถานะล้มตัว ในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วทำได้หลายวิธี เช่น การแปลงเวฟเลท การหาค่าอนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง สอง หรือ สาม เป็นต้น การตรวจจับด้วยวิธีนี้มีข้อด้อยตรงที่ การเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของสัญญาณกระแสนั้นไม่ได้เกิดจากการล้มตัวของหม้อแปลงเพียงอย่างเดียว ยังมีอีกหลายสาเหตุที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอย่างรวดเร็ว เช่น การเปลี่ยนชนิดของความผิดพลาด การตัดภาระของระบบ (Load Shedding) การตัดต่อวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ หรือการล้มตัวของหม้อแปลงกำลังขณะเกิดกระแสผิดพลาด เป็นต้น หากเหตุการณ์เหล่านี้เกิดขึ้นระหว่างที่มีความผิดพลาด จะทำให้ระบบตรวจจับการล้มตัวของหม้อแปลงทำงานผิดพลาด

ในการทดสอบจะใช้กระแสผิดพลาดดังแสดงในภาพที่ 3-17(a) ซึ่งได้จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ โดยกำหนดให้เหตุผิดพลาดชนิดระหว่างเฟสเกิดขึ้น หลังจากนั้นเหตุผิดพลาดดังกล่าวได้พัฒนากลายเป็นเหตุผิดพลาดชนิดสามเฟสที่เวลา 60 มิลลิวินาที ภาพที่ 3-17(b) แสดงผลการตรวจจับการล้มตัวของหม้อแปลงโดยใช้ค่าผลต่างอันดับที่สอง (เส้นทึบ) จะเห็นได้ว่าสัญญาณการตรวจจับด้วยวิธีนี้ (เส้นจุดในภาพที่ 3-17(b)) สามารถระบุสถานะการล้มตัวของแกนของหม้อแปลงกระแสได้ถูกต้องในช่วงแรก จนกระทั่งเกิดการเปลี่ยนชนิดของความผิดพลาด ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของกระแสผิดพลาด การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็ว และทำให้ค่าอนุพันธ์อันดับที่สองนั้นมีค่าสูงกว่าปกติ ระบบตรวจจับจึงเข้าใจผิดว่า หม้อแปลงกระแสกำลังเข้าสู่สถานะล้มตัว ส่งผลให้การตรวจจับการล้มตัวเกิดความผิดพลาดขึ้น และความผิดพลาดดังกล่าวส่งผลกระทบเป็นระยะเวลานานมาก

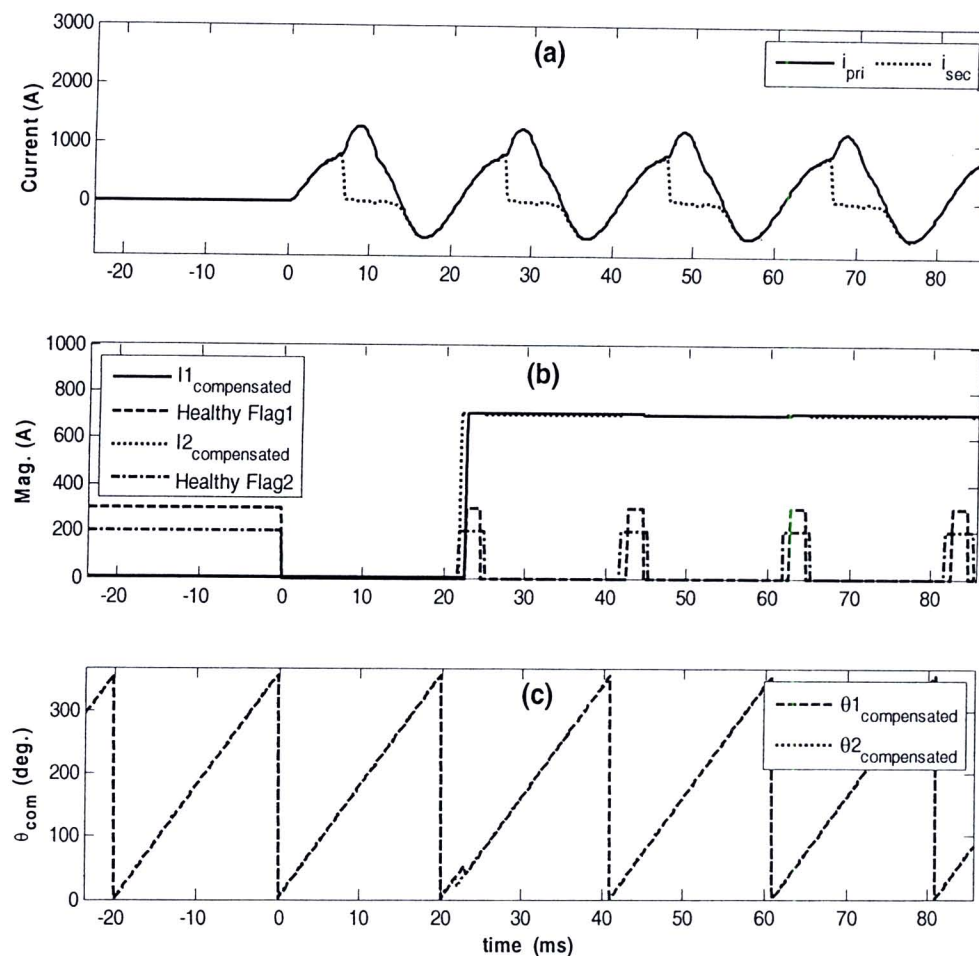
สำหรับการคำนวณค่าขนาดของกระแสผิดพลาดด้วยวิธีการที่งานวิจัยนี้นำเสนอสามารถทำงานได้ดีดังแสดงโดยเส้นทึบในภาพที่ 3-17(c) การเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของสัญญาณกระแสไม่ได้ทำให้การคำนวณผิดพลาด จะเห็นได้ว่า ค่าขนาดที่คำนวณมาได้จะมีค่าประมาณ 4.4 kA ในช่วงที่เกิดเหตุผิดพลาดชนิดระหว่างเฟส หลังจากที่มีความผิดพลาดได้เปลี่ยนเป็นชนิดสามเฟส ส่งผลให้ขนาดของกระแสเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 5 kA สำหรับค่ากระแสที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการ HCDFE นั้น (เส้นจุด) ไม่สามารถนำมาใช้ได้เนื่องจากมีค่าความผิดพลาดสูงมาก สำหรับผลการคำนวณค่ามุมที่ได้จากวิธีที่งานวิจัยนี้นำเสนอ (เส้นทึบในภาพที่ 3-17(d)) มีความถูกต้องกว่าค่ามุมที่ได้จากวิธี HCDFE (เส้นจุด)



ภาพที่ 3-17 ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของขนาดกระแสผิดพร่อง

3.6.6 กรณีที่กระแสพุ่งเข้า (Inrush Current) ส่งผลให้แกนของหม้อแปลงกำลังเกิดการอิ่มตัว

ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.4 กระแสพุ่งเข้าทำให้กระแสด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิมีรูปร่างที่แตกต่างกัน ส่งผลให้รีเลย์ทำงานผิดพลาด ปัญหาที่เกิดขึ้นนี้เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นกับแกนของหม้อแปลงกำลัง ไม่ได้เกิดจากการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแส แต่อย่างไรก็ดี อัลกอริธึมที่งานวิจัยนี้นำเสนอจะช่วยลดปัญหานี้ได้ ดังแสดงในภาพที่ 3-18(a) ซึ่งเป็นภาพสัญญาณกระแสด้านปฐมภูมิที่ทำการถ่ายโอนไปด้านทุติยภูมิแล้ว เทียบกับกระแสด้านทุติยภูมิ ที่สภาวะคงตัวกระแสทั้งสองจะเท่ากันพอดี และมีค่ายอด (Peak) อยู่ที่ 703 A จากการทดลองใช้อัลกอริธึมที่งานวิจัยนี้เสนอ คำนวณค่าขนาดและมุมพบว่า การอิ่มตัวของหม้อแปลงกำลังไม่ส่งผลกระทบต่อการคำนวณ เนื่องจากในช่วงที่แกนของหม้อแปลงกำลังเกิดการอิ่มตัวนั้น กระแสทั้งฝั่งปฐมภูมิ และทุติยภูมิจะไม่เป็นสัญญาณไซน์ชอยด์ที่ความถี่ 50 Hz สัญญาณในช่วงเวลาดังกล่าวจึงถูกตัดทิ้งไปจากการคำนวณค่าขนาดและมุม อัลกอริธึมจึงสามารถคำนวณค่าขนาดและมุมได้ถูกต้อง ดังแสดงในภาพที่ 3-18(b) และ (c)

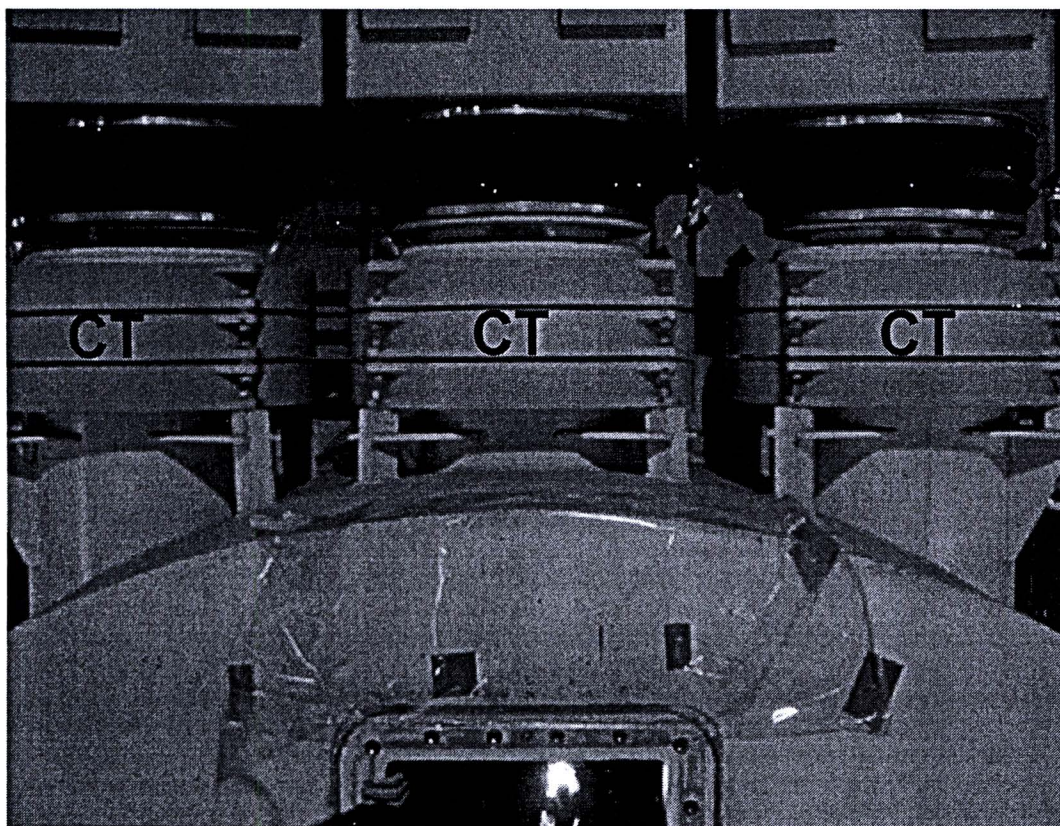


ภาพที่ 3-18 การคำนวณหาขนาดและมุมของสัญญาณกรณีที่เป็นกระแสพุ่งเข้าของหม้อแปลงกำลัง

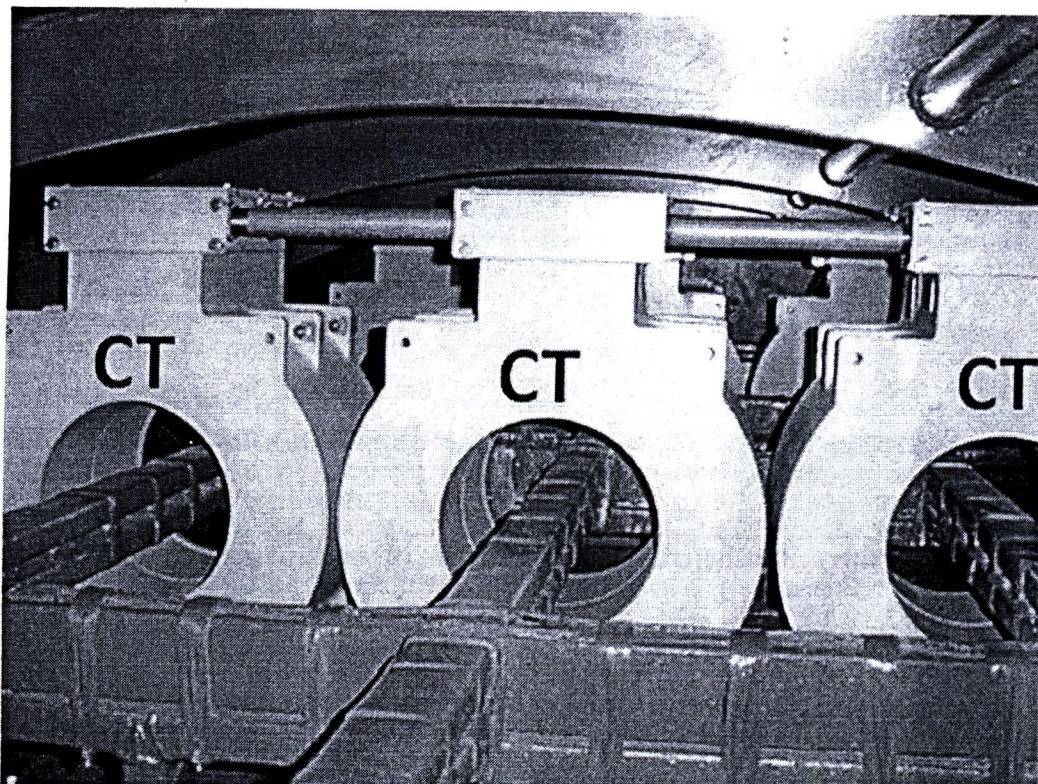
3.7 การประยุกต์ใช้อัลกอริทึมกับรีเลย์ผลต่างร้อยละ

ในระบบไฟฟ้ากำลังนั้นประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ทำงานร่วมกัน มีอุปกรณ์หลายตัวที่มีความสำคัญต่อระบบไฟฟ้าในระดับสูงมาก เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลงกำลัง สายส่ง หากอุปกรณ์เหล่านี้ไม่อยู่ในสภาพที่ดี ระบบไฟฟ้าจะไม่สามารถทำงานได้ แม้จะได้รับการบำรุงรักษาเป็นอย่างดี แต่เหตุผิดพร่องก็ยังคงอาจเกิดขึ้นได้ ระบบป้องกันจะต้องทำการปกป้องอุปกรณ์เหล่านี้ด้วยการตัดอุปกรณ์ออกจากระบบให้เร็วที่สุด เพื่อให้ความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับตัวอุปกรณ์มีน้อยที่สุด เพราะหากอุปกรณ์เสียหายในระดับที่ต้องสั่งซื้อมาติดตั้งใหม่ จะต้องรอการผลิตและติดตั้งเป็นเวลาหลายเดือนเพราะอุปกรณ์เหล่านี้เป็นอุปกรณ์ที่มีราคาสูงมาก ผู้ผลิตส่วนใหญ่จะไม่มีเก็บหม้อแปลงกำลังหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไว้คงคลัง แต่จะสร้างตามคำสั่งซื้อเท่านั้นซึ่งต้องใช้ระยะเวลาในการผลิต ระบบป้องกันที่สามารถกำจัดเหตุผิดพร่องได้แม่นยำและรวดเร็วที่สุดคือรีเลย์ผลต่าง รีเลย์ชนิดนี้จึงเหมาะสมในการป้องกันอุปกรณ์ที่มีความสำคัญเหล่านี้

รีเลย์ผลต่างนั้นแบ่งออกเป็นสองประเภทหลัก ๆ คือ รีเลย์ผลต่างแบบอิมพีแดนซ์สูง และ รีเลย์ผลต่างร้อยละ สำหรับรีเลย์ผลต่างอิมพีแดนซ์สูงนั้นมีเสถียรภาพที่สูง [30] การอิมตัวของ หม้อแปลงกระแสมีผลต่อการทำงานไม่มาก แต่การใช้งานของรีเลย์ชนิดนี้ก็มีข้อจำกัดคือ หม้อแปลง กระแสที่ใช้ทุกตัวต้องเหมือนกันทุกประการ เพราะฉะนั้น จะต้องใช้หม้อแปลงกระแสที่เป็นรุ่น เดียวกันและผลิตจากวงจรการผลิตเดียวกันเท่านั้น และแกนของหม้อแปลงต้องเป็นแกนชนิด พิเศษ (Class X ตามมาตรฐาน BS -3938 หรือ Type TPS ตามมาตรฐาน IEC 60044-6) [30] ด้วย เหตุผลเหล่านี้ รีเลย์ผลต่างอิมพีแดนซ์สูงจึงไม่เหมาะที่จะนำมาป้องกันอุปกรณ์ที่มีมากกว่าสอง ช่องทางไหลของกระแส ดังนั้น รีเลย์ผลต่างแบบอิมพีแดนซ์สูงจึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ป้องกัน หม้อแปลง บัสบาร์ที่มีโครงสร้างซับซ้อน [30] หรือในกรณีที่อุปกรณ์มีข้อจำกัดในพื้นที่การติดตั้ง ทำให้ไม่สามารถติดตั้งหม้อแปลงกระแสที่เป็นรุ่นเดียวกันได้ เช่นในกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า บางรุ่น ในภาพที่ 3-19 และภาพที่ 3-20 แสดงหม้อแปลงกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่ด้านขั้วต่อ มีการติดตั้งหม้อแปลงที่บุชชิ่ง แต่สำหรับด้านนิวทรัล (Neutral Side) ซึ่งอยู่ภายในตัวเครื่องกำเนิด ไฟฟ้านั้นมีข้อจำกัดด้านพื้นที่ จึงจำเป็นต้องใช้หม้อแปลงกระแสที่ต่างรุ่นกัน ด้วยเหตุผลดังกล่าว รีเลย์ผลต่างร้อยละจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมกว่า



ภาพที่ 3-19 หม้อแปลงกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้านขั้วต่อ (Terminal Side)



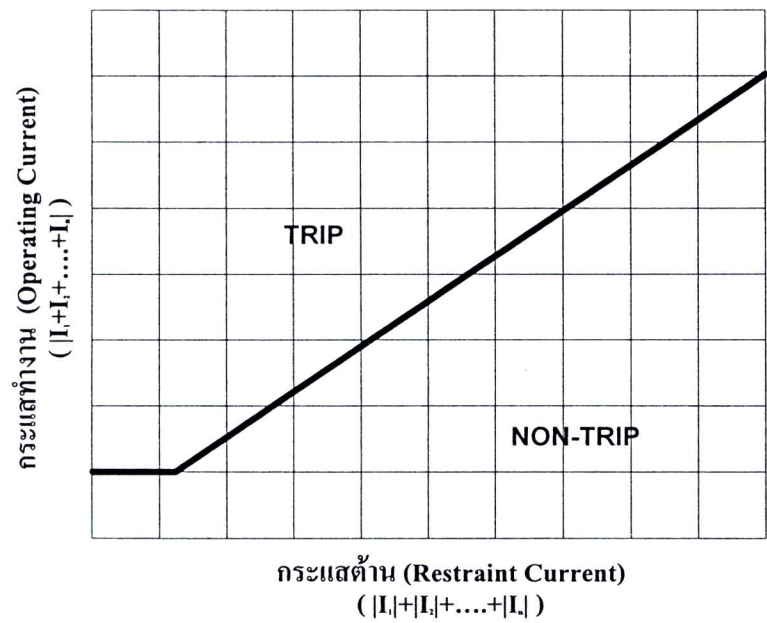
ภาพที่ 3-20 หม้อแปลงกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้านนิวทรัล (Neutral Side)

3.7.1 กระบวนการประเมินว่ามีความผิดปกติเกิดขึ้นหรือไม่

ในการประเมินสถานะของอุปกรณ์ว่ามีความผิดปกติเกิดขึ้นหรือไม่นั้น รีเลย์ผลต่างร้อยละจะใช้ปริมาณ 2 ปริมาณในการตัดสินใจ นั่นคือสัญญาณกระแสทำงาน (Operate Current, I_{op}) และกระแสด้าน (Restraint Current, I_{res}) โดยค่ากระแสทำงานคำนวณได้จากค่าสัมบูรณ์ของผลรวมกระแสทุกตัวที่ไหลเข้าเขตป้องกัน ($|I_1| + |I_2| + \dots + |I_n|$) ส่วนกระแสด้านคำนวณได้จากผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของกระแสทุกตัวที่ไหลเข้าเขตป้องกัน ($|I_1| + |I_2| + \dots + |I_n|$) ดังแสดงในภาพที่ 3-21 จะเห็นว่าในกราฟจะมีเส้นตัดสินใจเป็นเส้นตรงอยู่สองเส้น คือเส้นตรงแนวระนาบที่ระดับกระแสเริ่มทำงานหรือ I_{pickup} และเส้นตรงที่มีความชัน k หากพิกัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสทำงานและกระแสด้านอยู่ใต้เส้นตัดสินใจทั้งสอง รีเลย์ประเมินว่าขณะนั้นอุปกรณ์ที่ถูกป้องกันอยู่ในสภาวะปกติ ในทางกลับกันหากพิกัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสทำงานและกระแสด้านอยู่เหนือเส้นทั้งสอง รีเลย์จะประเมินว่าอุปกรณ์ที่รีเลย์ป้องกันอยู่นั้นมีความผิดปกติเกิดขึ้น ในการประเมินดังกล่าวสามารถทำได้โดยตรวจสอบเงื่อนไขสองข้อดังสมการที่ (3-13) และ (3-14) ว่าเป็นจริงหรือไม่ หากเงื่อนไขทั้งสองเป็นจริงแสดงว่ามีความผิดปกติ

$$I_{op} > k \times I_{res} \quad (3-13)$$

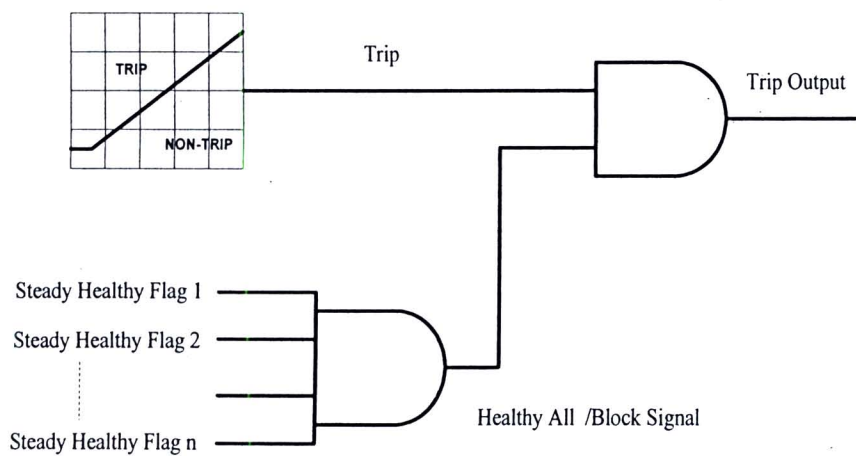
$$I_{op} > I_{pickup} \quad (3-14)$$



ภาพที่ 3-21 คุณสมบัติการทำงานของรีเลย์ผลต่างร้อยละ

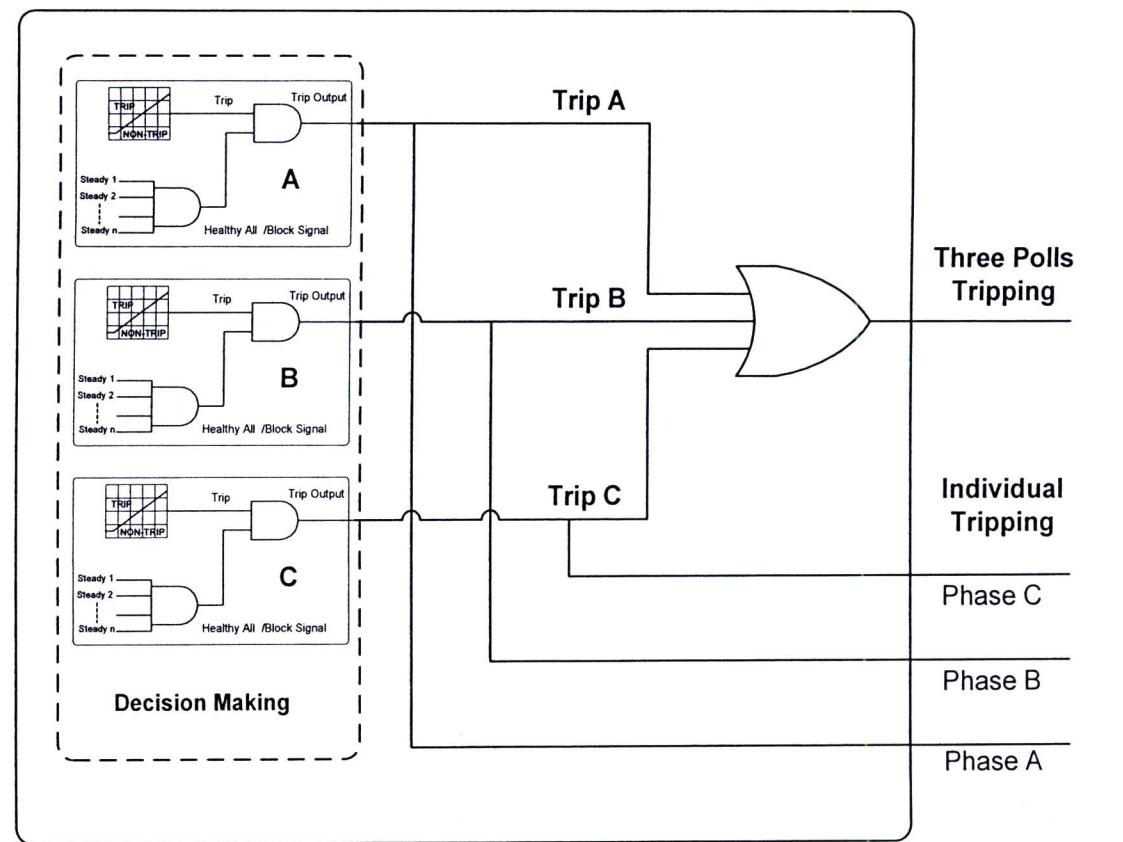
3.7.2 กระบวนการป้องกันการสั่งปลดวงจร (Trip Blocking)

ดังที่ได้เคยกล่าวไว้ในหัวข้อ 3.1 ว่า รีเลย์ป้องกันที่ดีจะสั่งปลดวงจรก็ต่อเมื่อมีความมั่นใจว่าเกิดเหตุผิดปกติขึ้นเท่านั้น ดังนั้นในช่วงเวลาที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัว เป็นช่วงเวลาที่ค่าขนาดของกระแสที่คำนวณมาได้มีความน่าเชื่อถือไม่มากนัก อัลกอริทึมจึงจะไม่สั่งปลดวงจรในช่วงเวลาดังกล่าว โดยสัญญาณการป้องกันการสั่งปลดวงจรสามารถคำนวณได้จากฟังก์ชันสัญญาณดังแสดงในภาพที่ 3-22 จะเห็นได้ว่าสัญญาณขาออกที่จะสั่งปลดวงจรได้นั้นจะอยู่ในสภาวะทำงานก็ต่อเมื่อมีสัญญาณ Trip ส่งมาจากกระบวนการประเมินว่ามีความผิดปกติ และหม้อแปลงทุกตัวอยู่ในสภาวะไม่อิ่มตัว



ภาพที่ 3-22 การป้องกันการสั่งปลดวงจร (Trip Blocking)

วิธีการประเมินว่ามีความผิดปกติเกิดขึ้นหรือไม่ ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อก่อนหน้านี้เป็นเพียงการตรวจสอบแบบหนึ่งเฟส ในการนำไปประยุกต์ใช้งาน จะต้องมีการตรวจสอบความผิดปกติจำนวนสามชุดเพื่อทำการป้องกันทั้งเฟส A เฟส B และเฟส C หากเกิดความผิดปกติขึ้นกับเฟสใดเฟสหนึ่งหรือสองเฟส เพื่อวิศวกรผู้ออกแบบระบบป้องกันจะสามารถเลือกได้ว่า จะให้ทำการตัดวงจรทั้งสามเฟส หรือจะเลือกตัดเฉพาะวงจรที่เกิดความผิดปกติ ฟังก์การทำงานในการสังัดวงจรจึงเป็นดังภาพที่ 3-23



ภาพที่ 3-23 ฟังก์การทำงานในการสังัดวงจรไปยังชุดควบคุมเซอร์กิตเบรกเกอร์

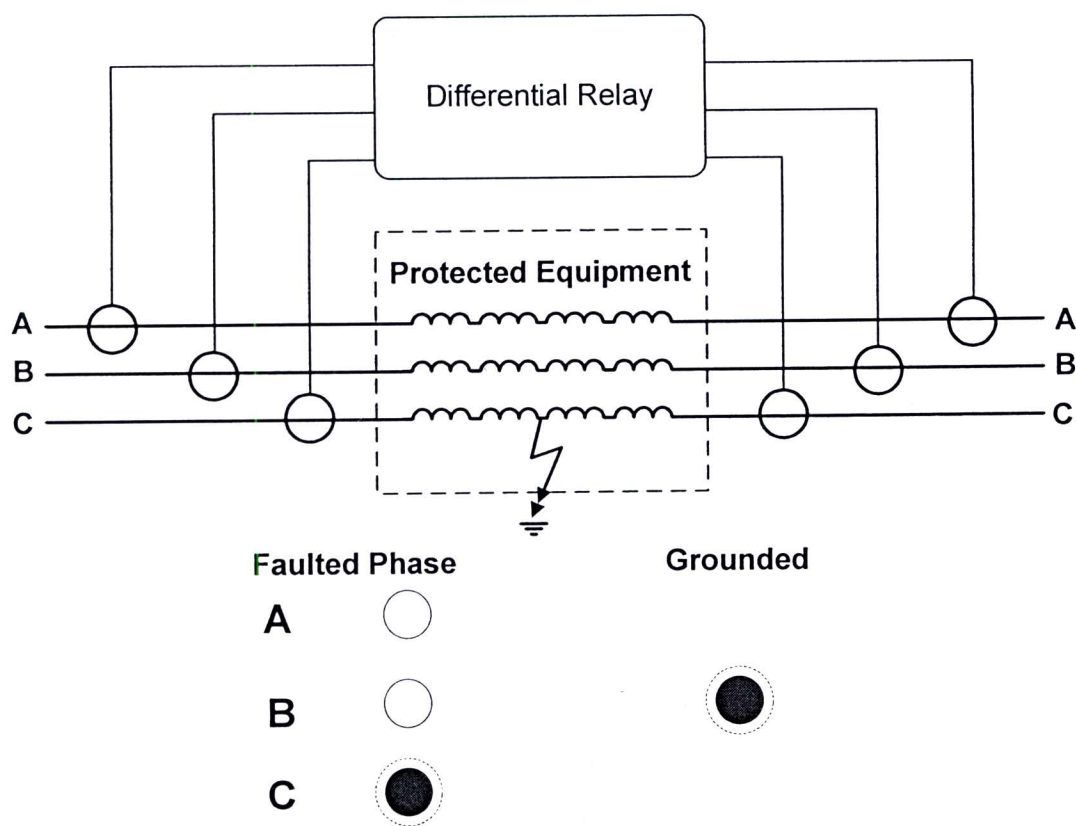
3.8 การจำแนกชนิดของเหตุผิดปกติ

นอกจากผลลัพธ์ต่างจะทำหน้าที่แยกความผิดปกติออกจากระบบด้วยการสั่งปลดวงจรแล้ว รีเลย์ยังมีหน้าที่เป็นเครื่องมือในการช่วยให้เจ้าหน้าที่สามารถแก้ไขความผิดปกติได้รวดเร็วขึ้น โดย รีเลย์จะต้องสามารถให้ข้อมูลว่า ความผิดปกติที่เกิดขึ้นนั้นเกิดขึ้นที่เฟสใด ชนิดใด มีกระแสไหลลงดินหรือไม่

3.8.1 ความผิดปกติชนิดหนึ่งเฟส (Single Line to Ground Fault)

หากความผิดปกติชนิดหนึ่งเฟสเกิดขึ้น จะส่งผลให้สัญญาณ Trip Output ของเฟสดังกล่าวอยู่ในสถานะทำงาน (Active) ดังตัวอย่างแสดงในภาพที่ 3-24 ความผิดปกติภายในเกิดขึ้นที่เฟส C

ส่งผลให้สัญญาณแจ้งเตือนเฟส C อยู่ในสถานะทำงาน เนื่องด้วยความผิดปกติชนิดหนึ่งเฟสจะมีกระแสไหลลงดินด้วย ส่งผลให้สัญญาณแจ้งเตือนกระแสไหลลงดินอยู่ในสถานะทำงาน โดยในการตรวจจับว่ามีกระแสไหลลงดินหรือไม่สามารถตรวจสอบได้จากค่ากระแส I_G ซึ่งมีค่าเท่ากับผลรวมแบบเวกเตอร์ของกระแสทำงาน (Operating Current) ของทุกเฟส ดังสมการที่ (3-15) หากค่า I_G มีค่าต่ำมากแสดงว่าไม่มีกระแสไหลลงดิน ในกรณีตัวอย่างมีกระแสผิดปกติเกิดขึ้นที่เฟส C เพียงเฟสเดียว ทำให้ I_{op_C} มีขนาดสูง ในขณะที่ I_{op_A} และ I_{op_B} มีค่าน้อยมาก ส่งผลให้ I_G มีขนาดที่สูง สัญญาณแจ้งเตือนกระแสไหลลงดินจึงมีสถานะทำงาน



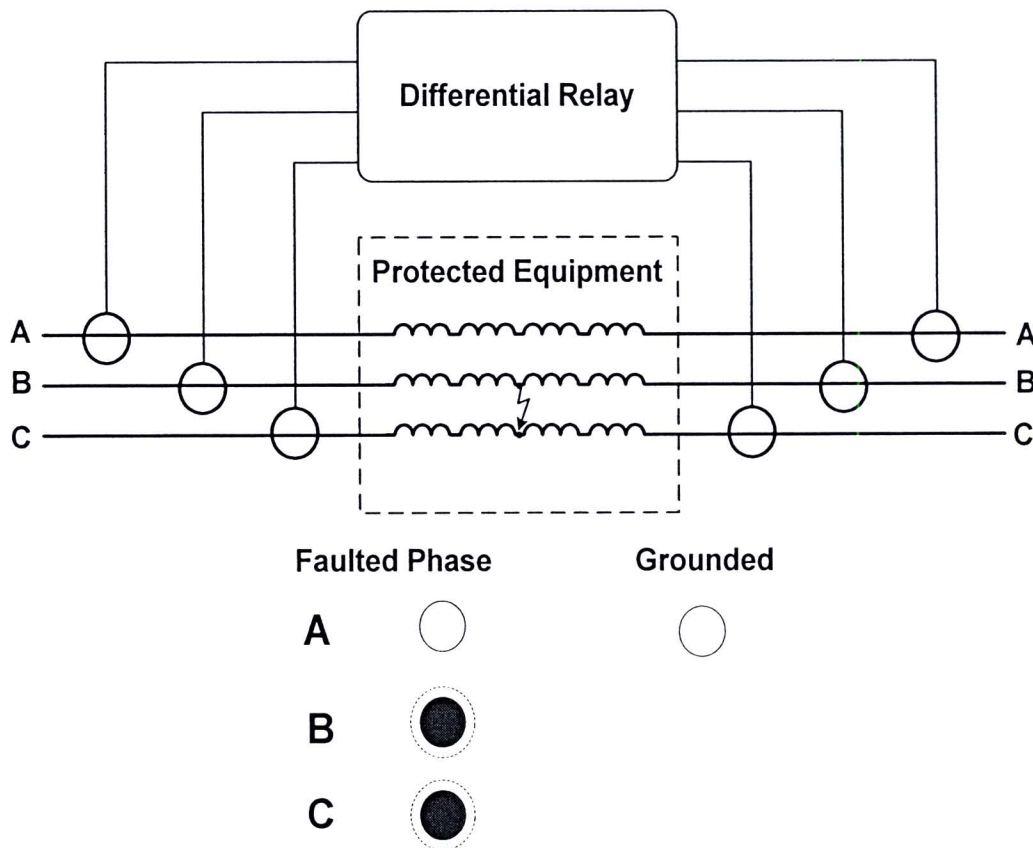
ภาพที่ 3-24 ความผิดปกติชนิดหนึ่งเฟส

$$I_G = I_{op_A} + I_{op_B} + I_{op_C} \tag{3-15}$$

3.8.2 ความผิดปกติชนิดระหว่างเฟสไม่ลงดิน (Un-grounded Line to Line Fault)

ในกรณีที่ความผิดปกติเป็นความผิดปกติชนิดระหว่างเฟส ค่าสัญญาณกระแสทำงาน (Operating Current) ของทั้งสองเฟสจะมีค่าสูงจนทำให้สัญญาณ Trip Output ของทั้งสองเฟสอยู่ในสถานะทำงาน (Active) ตัวอย่างดังแสดงในภาพที่ 3-25 เป็นความผิดปกติระหว่างเฟส B และเฟส C สัญญาณ Trip Output ของเฟส B และเฟส C ทำให้สัญญาณไฟแจ้งเตือนที่เฟส B และ C ทำงาน แต่สัญญาณเตือนกระแสไหลลงดินจะไม่ทำงาน ทั้งนี้เป็นเพราะกระแสทำงานของเฟส A (I_{op_A}) มี

ขนาดต่ำมาก ในขณะที่กระแสทำงานของเฟส B (I_{op_B}) จะมีขนาดเท่ากับกระแสทำงานของเฟส C (I_{op_C}) แต่มีทิศทางตรงข้ามกัน สิ่งเหล่านี้ส่งผลให้กระแสไหลลงดิน I_G ตามสมการที่ (3-15) มีค่าเป็นศูนย์



ภาพที่ 3-25 ความผิดปกติชนิดเฟสต่อเฟสไม่ลงดิน

3.8.3 ความผิดปกติชนิดระหว่างเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault)

ในกรณีที่เป็นการผิดปกติชนิดระหว่างเฟส ค่าสัญญาณกระแสทำงาน (Operating Current) ของทั้งสองเฟสจะมีค่าสูงจนทำให้สัญญาณ Trip Output ของเฟสทั้งสองจะอยู่ในสภาวะทำงาน (Active) ตัวอย่างดังแสดงในภาพที่ 3-26 เป็นความผิดปกติระหว่างเฟส B และเฟส C สัญญาณ Trip Output ของเฟส B และเฟส C ทำให้สัญญาณไฟแจ้งเตือนที่เฟส B และ C ในส่วนของสัญญาณเตือนกระแสไหลลงดินก็จะทำงานเช่นกัน ทั้งนี้เป็นเพราะกระแสทำงานของเฟส A (I_{op_A}) มีขนาดต่ำมาก ในขณะที่กระแสทำงานของเฟส B (I_{op_B}) จะไม่เท่ากับกระแสทำงานของเฟส C (I_{op_C}) ส่งผลให้เกิดกระแสไหลลงดิน I_G ตามสมการที่ (3-15) มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ สิ่งนี้เป็นตัวบ่งชี้ว่ามีกระแสไหลลงดิน