

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการจะสรรสร้างผลงานใด ๆ ขึ้นมา ผู้สร้างผลงานชิ้นนั้น ๆ จะต้องทำการเตรียมพร้อม เตรียมการรวบรวมข้อมูลต่าง ๆ เพื่อใช้ในการทำงาน ในงานวิจัยชิ้นนี้ก็เช่นกัน การเตรียมพร้อมและการวางแผนถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญ ในการที่จะสร้างองค์ความรู้ใหม่ได้นั้น ผู้สร้างองค์ความรู้จะต้องมีการลงทุน การลงทุนในที่นี้ไม่ใช่การลงทุนด้านเงินทองหรือทรัพย์สิน แต่ผู้สร้างองค์ความรู้ใหม่จะต้องมีองค์ความรู้ดั้งเดิมเป็นต้นทุน แล้วจึงต่อยอดให้เกิดความรู้ใหม่ ๆ แต่จะทราบได้อย่างไรว่าสิ่งใดคือสิ่งใหม่ และสิ่งที่คิดค้นขึ้นมานี้จะมีคุณค่ามากน้อยเพียงใด การเตรียมข้อมูลอย่างครบถ้วนจะช่วยตอบคำถามเหล่านี้ได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะต้องเตรียมความรู้พื้นฐานต่าง ๆ เช่น ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับรีเลย์ผลต่าง การทำงานของหม้อแปลงกระแสและรายงานถึงปัญหาในการใช้งานของหม้อแปลงกระแส การตรวจวัดสัญญาณ การกรองสัญญาณดิจิทัล การคำนวณเฟสเซอร์ การทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ และการป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง เป็นต้น

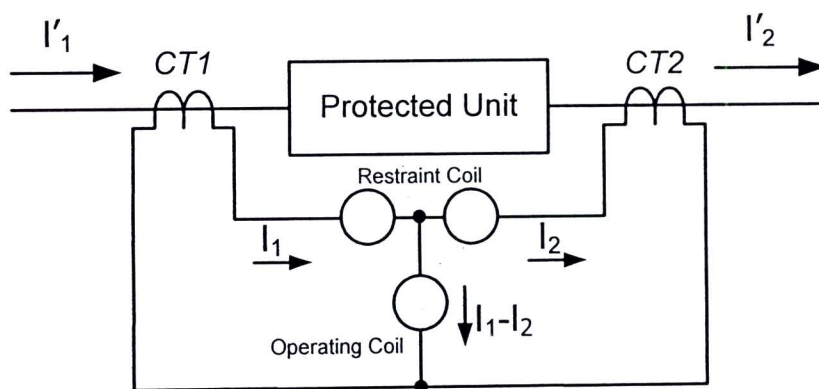
2.1 รีเลย์ป้องกันผลต่าง

รีเลย์ผลต่างเป็นอุปกรณ์ป้องกันที่มีความสามารถด้านการคัดสรรได้อย่างสมบูรณ์ (100% Selectivity) สามารถเลือกตอบสนองเฉพาะเหตุผิดปกติที่เกิดขึ้นในเขตป้องกันเท่านั้น โดยเขตป้องกันนี้จะกำหนดจากที่ตั้งของหม้อแปลงกระแส ด้วยความสามารถเหล่านี้ทำให้รีเลย์ชนิดนี้สามารถทำงานได้โดยไม่ต้องคำนึงถึงการเหลื่อมกันทางเวลาเมื่อทำงานร่วมกันกับรีเลย์ป้องกันชนิดอื่น ดังนั้นรีเลย์ผลต่างจึงสั่งปลดวงจรได้โดยไม่ต้องมีการหน่วงเวลา ทำให้ความเร็วในการตัดวงจรของรีเลย์ผลต่างมีความรวดเร็วสูง สามารถลดความเสียหายที่เกิดจากความผิดปกติได้ อีกทั้งมีความไวในการตรวจจับสูง (High Sensitivity) แม้ความผิดปกติเพียงเล็กน้อยก็สามารถตรวจพบได้ด้วยเหตุนี้จึงมีความนิยมที่จะใช้รีเลย์ผลต่างในการป้องกันอุปกรณ์ที่มีความสำคัญสูงต่อระบบไฟฟ้า เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลงกำลัง สายส่ง และบัสบาร์ รีเลย์ผลต่างแบ่งออกเป็นสองชนิดหลักคือ รีเลย์ผลต่างชนิดอิมพีแดนซ์สูง (High Impedance Differential Relay) และรีเลย์ผลต่างร้อยละ (Percentage Differential Delay) สำหรับรีเลย์ผลต่างแบบอิมพีแดนซ์สูงนั้นไม่เป็นที่นิยมมากนัก โดยเฉพาะในทวีปยุโรป การใช้รีเลย์ชนิดนี้จะต้องใช้หม้อแปลงกระแสชนิดพิเศษ (Class X ตามมาตรฐาน BS -3938 หรือ Type TPS ตามมาตรฐาน IEC 60044-6) [1] และเนื่องจากพัฒนาการ

ของรีเลย์เชิงเลข (Numerical Relay) ที่มีลักษณะการทำงานแบบเอนกประสงค์ และไม่นิยมให้มีการต่ออุปกรณ์ภายนอกรีเลย์เพิ่มเติม รีเลย์ผลต่างแบบอินพีแดนซ์สูงซึ่งต้องต่อตัวต้านทานเสริมเสถียรภาพ (Stabilize Resister) ภายนอก จึงไม่เป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบัน [2] ในงานวิจัยชิ้นนี้จึงมุ่งความสนใจเฉพาะรีเลย์ผลต่างร้อยละ เนื่องจากเป็นชนิดที่มีความนิยมสูง และการผิเคเพี้ยนของสัญญาณกระแสมีอิทธิพลต่อรีเลย์ชนิดนี้มาก

2.2 หลักการพื้นฐานของรีเลย์ป้องกันแบบกระแสผลต่างร้อยละ (Percentage Differential Relay) [1]

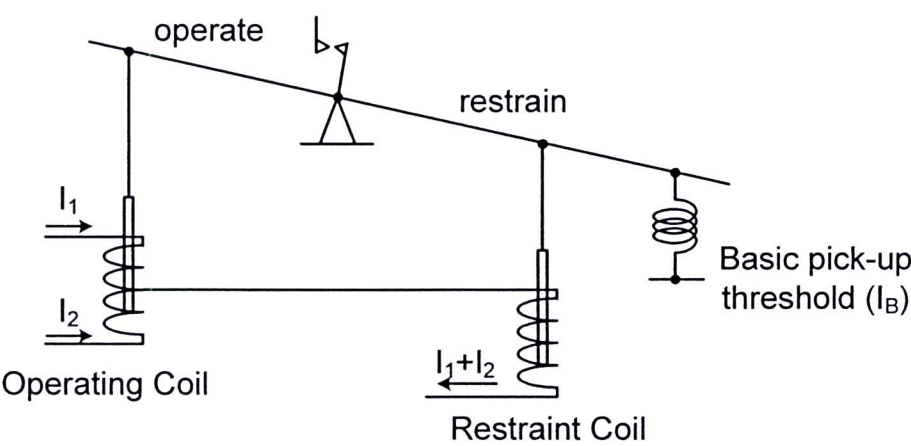
รีเลย์ผลต่างสามารถทำงานโดยการตรวจวัดสัญญาณกระแสที่ไหลเข้าและไหลออกจากเขตป้องกัน แล้วนำสัญญาณที่ตรวจวัดได้มาเปรียบเทียบกัน อาจจะใช้ค่าสัญญาณชั่วขณะ (Instantaneous Value) หรือเปรียบเทียบโดยใช้ค่าเฟสเซอร์ ในการเปรียบเทียบจะใช้หลักการตามกฎของเคียชโฮฟ (Kirchhoff's Law) ที่กล่าวไว้ว่า ผลรวมของกระแสที่ไหลเข้าหรือไหลออกจากโหนด (Node) จะต้องเป็นศูนย์ นั่นหมายความว่าหากไม่มีความผิดปกติใด ๆ เกิดขึ้นผลรวมของกระแสที่ไหลเข้าหรือไหลออกจากเขตป้องกันจะต้องมีค่าเป็นศูนย์ ดังแสดงในภาพที่ 2-1 หม้อแปลงกระแส CT1 และ CT2 ตรวจวัดกระแสที่ไหลเข้าและไหลออกจากอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน ในสภาวะปกติสัญญาณกระแส I'_1 จะต้องมีความเท่ากันกับ I'_2 ส่งผลให้สัญญาณขาออกของหม้อแปลงกระแส I_1 และ I_2 มีค่าเท่ากันด้วย สัญญาณกระแสทั้งสองนี้จะถูกใช้เป็นสัญญาณขาเข้าให้กับรีเลย์ผลต่าง ดังแสดงในภาพที่ 2-2



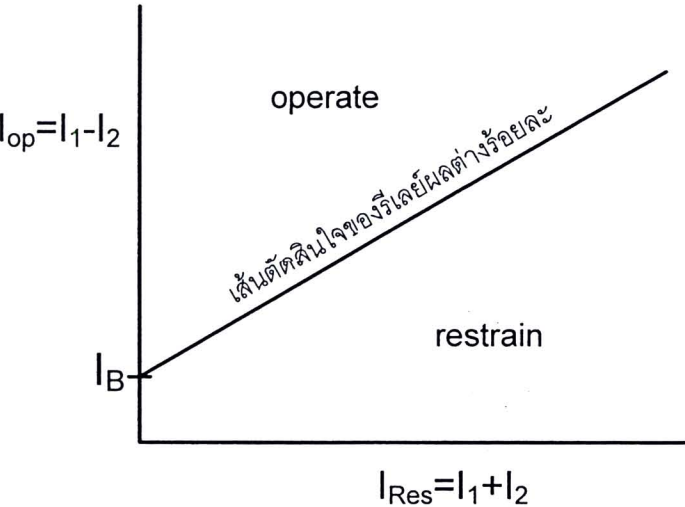
ภาพที่ 2-1 การติดตั้งหม้อแปลงกระแสสำหรับป้องกันอุปกรณ์

โดย I_1 และ I_2 จะถูกป้อนเข้าสู่ขดลวดทำงาน (Operating Coil) ในทิศทางที่ตรงข้ามกัน ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กที่ถูกสร้างขึ้นแปรผันตามค่าผลต่างของกระแสทั้งสอง ($I_1 - I_2$) หลังจากนั้นกระแสทั้งสองจึงรวมกันแล้วป้อนให้กับขดลวดต้านซึ่งแรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็กของขดลวดต้าน (Restraint Coil) จะแปรผันตามค่าผลรวมของกระแสทั้งสอง ($I_1 + I_2$) หากแรงที่เกิดจากขดลวดทำงานสามารถเอาชนะแรงร่วมระหว่างขดลวดต้านและสปริงเริ่มทำงาน (Pick-up Spring) จะส่งผล

ให้นำสัมผัสเลื่อนมาปิดวงจรเพื่อส่งสัญญาณปลดวงจร ซึ่งคุณสมบัติการทำงานดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2-3 โดยหากแรงจากขดลวดทำงานสามารถเอาชนะแรงจากขดลวดต้านได้ จุดตัดสินใจจะอยู่ในพื้นที่ทำงาน (Operate) ในทางกลับกันหากกระแสทำงานสร้างแรงสู้ฝ่ายต้านไม่ได้ จุดตัดสินใจจะอยู่ในพื้นที่ต้าน (Restraining) (ปัจจุบันรีเลย์เชิงเลขจะใช้ไมโครคอมพิวเตอร์คำนวณค่า I_1-I_2 และ I_1+I_2 ได้โดยตรง ไม่จำเป็นต้องใช้แรงแม่เหล็กในการประมวลผล)



ภาพที่ 2-2 หลักการทำงานของรีเลย์ผลต่างร้อยละ



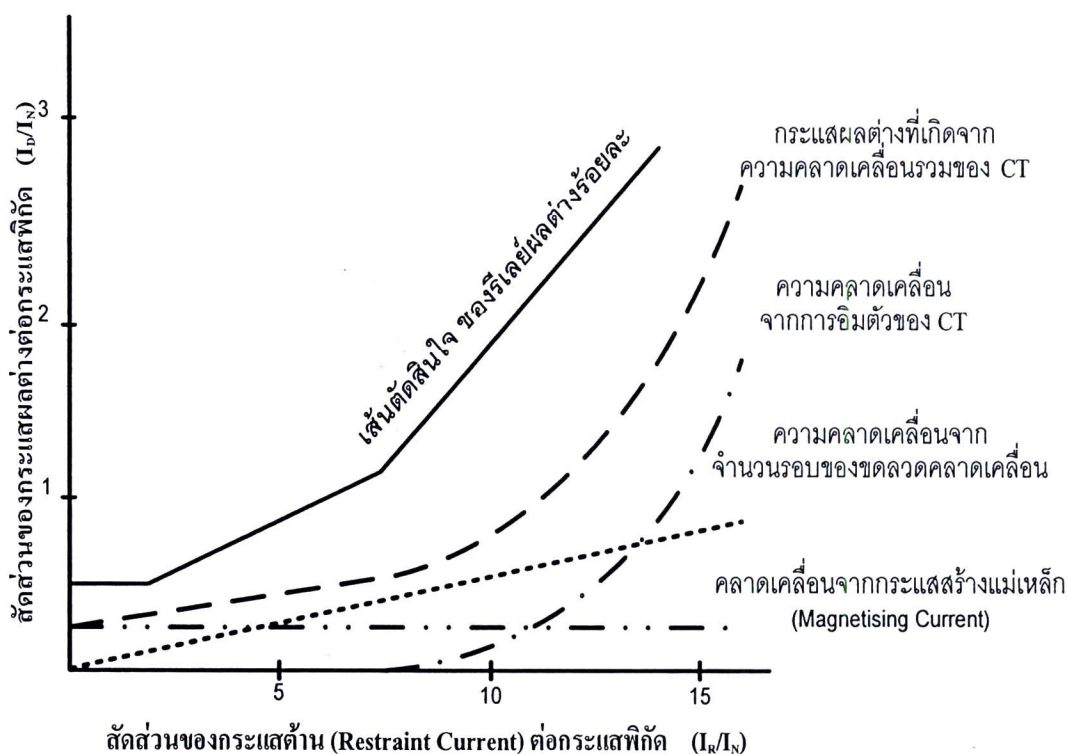
ภาพที่ 2-3 คุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ผลต่างร้อยละ

เนื่องจากการทำงานของรีเลย์ผลต่างจะนำผลรวมของกระแสจากทุกด้านมาเปรียบเทียบกับเส้นตัดสินใจของรีเลย์ (Relay Operating Characteristic) ในทางทฤษฎีเส้นตัดสินใจนี้ควรจะเป็นเส้นระนาบที่ระดับ 0 A หากผลรวมของกระแสมีค่ามากกว่า 0 A จะเป็นสิ่งบ่งชี้ว่าเกิดความผิดปกติแต่ในทางปฏิบัติ ผลต่างกระแสที่วัดได้อาจจะไม่ถูกต้อง เนื่องจากความคลาดเคลื่อนของหม้อแปลง

กระแส ส่งผลให้รีเลย์สั่งปลดวงจรทั้งที่ไม่มีความผิดปกติเกิดขึ้น สาเหตุของความคลาดเคลื่อนมีหลายสาเหตุ ดังนี้

1. ความคลาดเคลื่อนของการแปลงกระแส ที่เกิดจากกระแสสร้างแม่เหล็ก (Magnetizing Current)
2. กรณีที่กระแสไหลผ่านมีค่าสูงมาก ทำให้หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัว ส่งผลให้ผลต่างของกระแสมีค่าสูงขึ้น
3. การคลาดเคลื่อนของจำนวนรอบขดลวด จะทำให้กระแสที่วัดออกมาผิดพลาดเนื่องจากอัตราส่วนของขดลวด (Turn Ratio) ของหม้อแปลงคลาดเคลื่อน ความคลาดเคลื่อนนี้จะแปรผันตามขนาดของกระแสที่ไหลผ่านหม้อแปลงกระแส

ในภาพที่ 2-4 ได้แสดงผลต่างของกระแสที่วัดได้จากรีเลย์เทียบกับกระแสต้าน (Restraint Current) กรณีที่ไม่มีความผิดปกติเกิดภายในเขตป้องกัน ในทางทฤษฎี กระแสผลต่างจะต้องเป็นศูนย์ แต่ในทางปฏิบัติกระแสผลต่างจะเกิดขึ้นจากค่าความคลาดเคลื่อนของหม้อแปลงกระแส ซึ่งมีแนวโน้มที่จะมีค่าสูงขึ้นถ้ากระแสไหลผ่านมีค่าสูง (กระแสต้านมีค่าสูง) ด้วยเหตุนี้เส้นตัดสินใจแบบแนวระนาบที่ 0 A จึงใช้การไม่ได้ รีเลย์ผลต่างร้อยละถูกประดิษฐ์ขึ้นมาเพื่อรองรับปัญหานี้ เส้นตัดสินใจของรีเลย์ชนิดนี้จะเป็นดังแสดงในภาพที่ 2-4



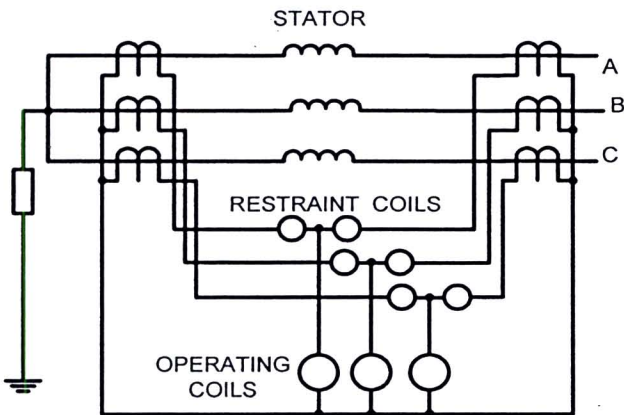
ภาพที่ 2-4 ความคลาดเคลื่อนของหม้อแปลงกระแสเทียบกับเส้นตัดสินใจของรีเลย์ผลต่าง

จะเห็นได้ว่าเส้นตัดสินใจของรีเลย์ชนิดนี้จะมีการปรับค่าให้สูงขึ้นเมื่อกระแสต้นมีค่าสูง อย่างไรก็ตามการลดผลกระทบจากการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสข้างต้นเป็นการแก้ปัญหาของการอิ่มตัวในกรณีที่เป็กระแสสลับขนาดสูง ในทางปฏิบัติพบว่าเป็นไปได้ที่หม้อแปลงกระแสจะเกิดการอิ่มตัวที่กระแสนาคต่ำ หากกระแสผิดพร่องมีองค์ประกอบของสัญญาณกระแสตรงผสมอยู่ด้วย งานวิจัยของวิทยานิพนธ์ชิ้นนี้จึงนำเสนอวิธีการที่จะสามารถแก้ปัญหาคการผิดเพี้ยนของสัญญาณกระแสที่เกิดจากทั้งกระแสสลับขนาดสูงและจากองค์ประกอบสัญญาณกระแสตรงได้

2.3 รีเลย์ผลต่างกับการป้องกันเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญที่สุดในระบบไฟฟ้ากำลัง เนื่องจากเป็นอุปกรณ์เดียวที่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ ดังนั้นหากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องใดเครื่องหนึ่งเกิดการชำรุดหรือถูกปลดออกจากระบบ ส่งผลให้เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าลดลง เครื่องกำเนิดไฟฟ้ายังเป็นอุปกรณ์ที่มีความซับซ้อนมาก ทำให้มีความจำเป็นต้องมีการป้องกันต่อความผิดปกติหลายชนิดที่อาจเกิดขึ้นกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้

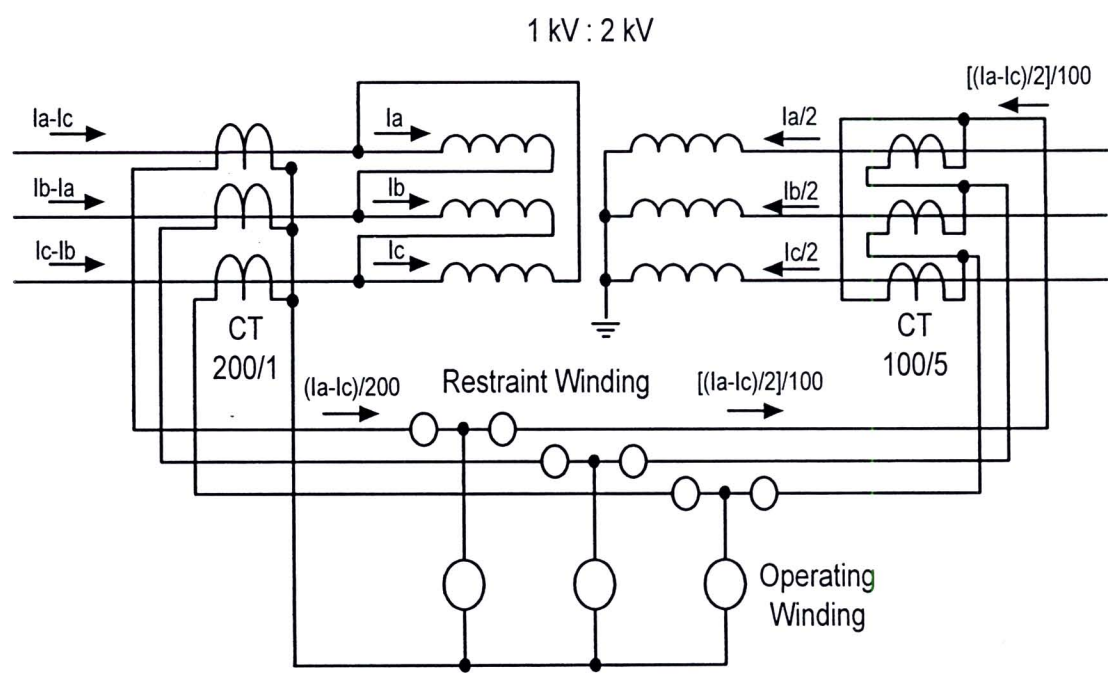
การป้องกันแบบผลต่างเป็นการป้องกันส่วนหนึ่งที่สำคัญสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในการทำงานนั้นรีเลย์จะใช้การตรวจจับกระแสที่ไหลผ่านชุดขดลวดตัวอยู่กับที่ (Stator Winding) โดยรับสัญญาณกระแสจากหม้อแปลงกระแสที่ต้นและปลายขดลวดดังแสดงในภาพที่ 2-5 หากไม่มีความผิดปกติใด ๆ เกิดขึ้นกับขดลวด กระแสที่ไหลเข้าขดลวดจะต้องมีขนาดและมุมที่เท่ากับกระแสที่ไหลออกจากขดลวด ส่งผลให้มีกระแสไหลผ่านเฉพาะขดลวดต้าน (Restraining Coil) ไม่มีกระแสไหลผ่านขดลวดทำงาน (Operating Coil) ดังนั้นรีเลย์จะไม่สั่งปลดวงจร ในทางกลับกัน หากเกิดความผิดปกติขึ้นกับขดลวด กระแสผิดพร่องจะทำให้กระแสที่ต้นและท้ายขดลวดมีค่าไม่เท่ากัน ความไม่สมดุลดังกล่าวจะทำให้มีกระแสไหลผ่านส่วนของขดลวดทำงาน (Operating Coil) รีเลย์จึงตรวจจับได้ว่ามีเหตุผิดปกติเกิดขึ้น



ภาพที่ 2-5 การป้องกันผลต่างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2.4 รีเลย์ป้องกันผลต่างกับการป้องกันหม้อแปลงกำลัง

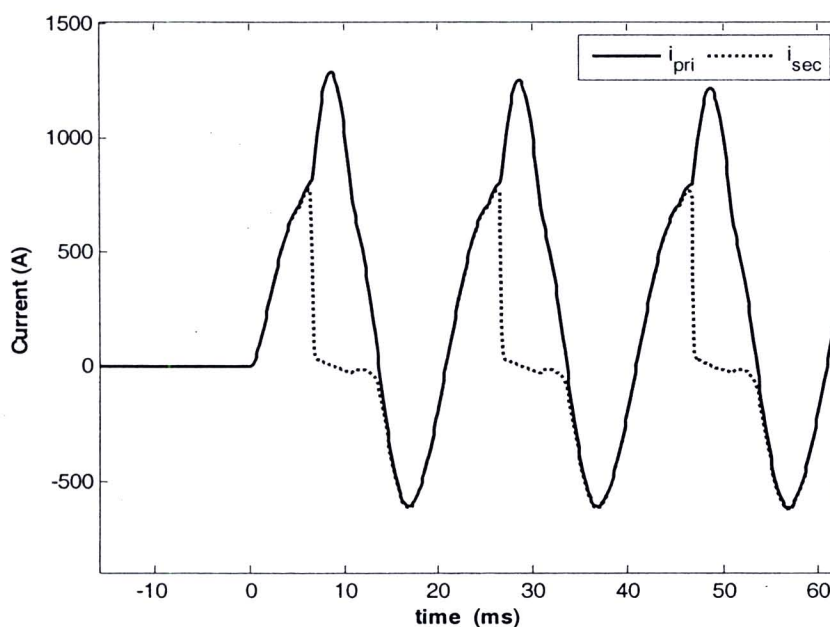
หม้อแปลงกำลังเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญมากเช่นกัน ระบบไฟฟ้ากำลังจะไม่สามารถทำงานได้หากไม่มีหม้อแปลงไฟฟ้า รีเลย์ผลต่างเป็นระบบการป้องกันส่วนหนึ่งที่คอยตรวจสอบว่ามีเหตุผิดปกติเกิดขึ้นกับขดลวดของหม้อแปลงหรือไม่ หลักการทำงานของรีเลย์ป้องกันผลต่างสำหรับหม้อแปลงจะคล้ายกับรีเลย์ป้องกันผลต่างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่จะต่างกันที่กระแสที่ด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิจะมีขนาดไม่เท่ากันเนื่องจากคุณสมบัติการแปลงกระแสและแรงดันของหม้อแปลง นอกจากนี้มุมของสัญญาณกระแสที่ด้านทุติยภูมิก็อาจไม่ตรงกับด้านปฐมภูมิ ขึ้นอยู่กับ การต่อกันของขดลวดว่าเป็นกลุ่มเวกเตอร์ (Vector Group) แบบใด ด้วยเหตุนี้ ก่อนที่จะป้อนสัญญาณจากหม้อแปลงกระแสเข้าขดลวดทำงาน (Operating Coil) หรือขดลวดต้าน (Restraint Coil) จะต้องปรับกระแสทั้งสองด้านให้ตรงกันทั้งขนาดและมุม ในการปรับค่ามุมของสัญญาณกระแสในด้านที่หม้อแปลงกำลังเป็นวาย จะใช้การต่อหม้อแปลงกระแสทั้งสามเฟสให้เป็นแบบเดลต้า เพื่อให้มุมของกระแสกลับมาตรงกันดังเดิมดังแสดงตัวอย่างในภาพที่ 2-6 สำหรับการปรับขนาดนั้นสามารถปรับโดยการเลือกอัตราการแปลง (Turn Ratio) ของหม้อแปลงกระแสให้เหมาะสม เพื่อให้สัญญาณกระแสขาออกของหม้อแปลงกระแสทั้งสองด้านมีค่าเท่ากัน ในภาพที่ 2-6 นั้นเป็นหม้อแปลง เดลต้า/วาย (1kV/2kV) หม้อแปลงกระแสฝั่ง 1kV ที่เฟสบนสุดนั้นทำการวัดกระแสซึ่งเป็นกระแสที่ไหลในขดลวด a หักล้างด้วยกระแสในขดลวด c หรือ $(I_a - I_c)$ ดังนั้นกระแสขาออกของหม้อแปลงกระแสจะมีค่าเป็น $(I_a - I_c)/200$



ภาพที่ 2-6 การป้องกันหม้อแปลงด้วยรีเลย์ผลต่าง

ส่วนด้านแรงดัน 2 kV นั้น ขดลวดเฟสบนสุดจะมีกระแสไหลผ่านขนาด $I_a/2$ A ดังนั้น กระแสที่ไหลออกจากหม้อแปลงกระแสจะมีค่าเป็น $(I_a/2)/100$ จะเห็นได้ว่ากระแสที่ได้จากหม้อแปลงกระแสเฟสบนสุดของด้านแรงดัน 2 kV นั้นไม่เท่ากับที่วัดได้จากด้าน 1 kV แต่หากนำหม้อแปลงกระแสด้านแรงดัน 2 kV มาต่อกันแบบเคลด้า ค่ากระแสที่ได้จากหม้อแปลงเฟสบนสุดจะมีค่าเป็น $(I_a - I_c)/2/100$ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับสัญญาณที่ได้จากหม้อแปลงกระแสจากด้านแรงดัน 1 kV จึงสามารถนำไปป้อนให้กับขดลวดด้านและขดลวดทำงานได้ แต่ในปัจจุบันการติดตั้งหม้อแปลงกระแสจะติดตั้งแบบวายทั้งสองด้าน เนื่องจากรีเลย์เชิงเลขสามารถคำนวณหาค่า $(I_a - I_c)$ ได้ภายในโดยไม่ต้องใช้การต่อขดลวดแบบเคลด้า เพียงวิศวกรระบบป้องกันป้อนข้อมูลให้กับรีเลย์ว่าหม้อแปลงกำลังมีกลุ่มเวกเตอร์แบบใด รีเลย์จะทำการปรับขนาดและมุมให้อัดโนมัลติ

นอกจากเรื่องความแตกต่างของหม้อแปลงกระแสด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิแล้ว ระบบป้องกันผลต่างของหม้อแปลงจะต้องคำนึงถึงผลกระทบของกระแสพุ่งเข้า (Inrush Current) ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในขณะที่ยกหม้อแปลงเข้าสู่ระบบ ในช่วงเวลาดังกล่าวแกนของหม้อแปลงกำลังอาจเกิดการอิ่มตัว ส่งผลให้กระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (Magnetizing Current) มีค่าสูงกว่าสภาวะปกติ ในขณะที่กระแสด้านทุติยภูมิจะมีค่าลดลง และมีรูปร่างที่แตกต่างจากกระแสปฐมภูมิดังแสดงในภาพที่ 2-7 จะเห็นได้ว่าที่เวลาประมาณ 6-14 มิลลิวินาที ขนาดของกระแสฝั่งปฐมภูมิจะสูงผิดปกติ ในขณะที่กระแสฝั่งทุติยภูมินั้นจะมีค่าต่ำกว่าปกติ แม้ความแตกต่างนี้จะเกิดขึ้นเพียงชั่วขณะ แต่ก็นานเพียงพอที่จะทำให้รีเลย์ผลต่างเข้าใจผิดว่ามีความผิดปกติเกิดขึ้น ดังนั้นรีเลย์ผลต่างจะต้องมีกระบวนการตรวจสอบว่ากระแสผลต่างที่เกิดขึ้น เป็นกระแสพุ่งเข้าหรือไม่

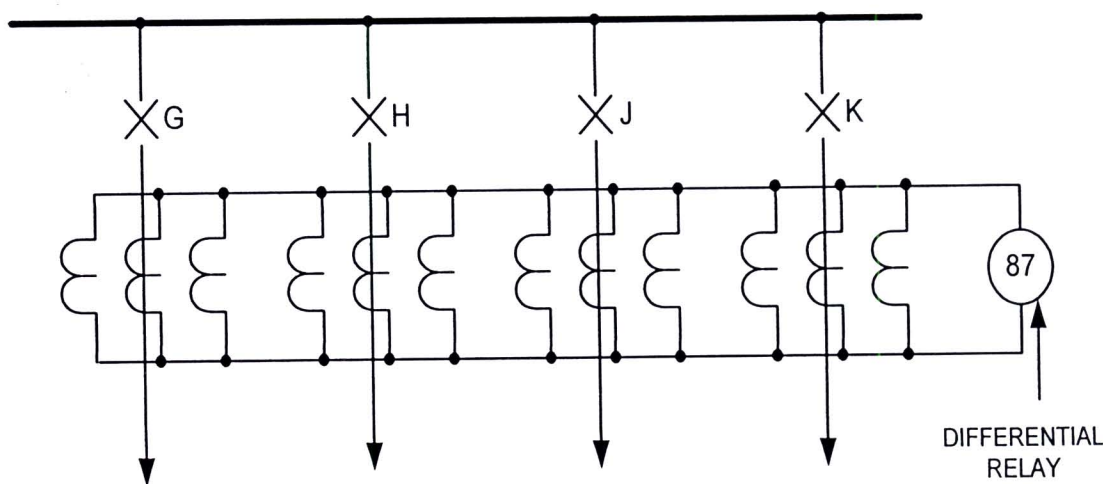


ภาพที่ 2-7 การต่างกันของกระแสพุ่งเข้าด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ

วิธีการที่นิยมใช้กันมากในการตรวจจับกระแสฟุ้งเข้าคือการตรวจจับว่ากระแสผลต่างมีฮาร์มอนิกส์ที่สองหรือไม่ หากมีแสดงว่าเป็นกระแสฟุ้งเข้า รีเลย์จะไม่สั่งปลดวงจร [1, 2] แต่สำหรับอัลกอริทึมของวิทยานิพนธ์นี้สามารถที่จะคำนวณค่าขนาดและมุมของสัญญาณโดยไม่นำกระแสช่วงที่หม้อแปลงกำลังเกิดการอิ่มตัวมาประมวลผล ทำให้กระแสฟุ้งเข้าไม่กระทบต่อการทำงานของรีเลย์ผลต่าง ดังจะกล่าวถึงในหัวข้อ 3.6.6

2.5 รีเลย์ป้องกันผลต่างกับการป้องกันบัสบาร์

บัสบาร์เป็นอุปกรณ์ที่ต้องมีการป้องกันเป็นอย่างดี เพราะหากบัสบาร์เกิดความเสียหายขึ้นจะทำให้ไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง การป้องกันแบบผลต่างสำหรับบัสบาร์นั้นไม่ได้ต่างจากการป้องกันผลต่างของอุปกรณ์อื่น ๆ มากนัก จะแตกต่างกันที่อุปกรณ์อื่น เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า มอเตอร์ หรือ หม้อแปลง จะมีเส้นทางไหลเข้าออกของกระแสเพียงสองเส้นทางต่อหนึ่งเฟส แต่บัสบาร์จะมีเส้นทางไหลเข้าออกของกระแสมากกว่า 2 เส้นทาง ดังแสดงในภาพที่ 2-8 ทำให้การคำนวณค่ากระแสทำงาน (Operating Current) และกระแสต้าน (Restraint Current) จะต้องใช้กระแสจากหลายช่องทางไหลมาคำนวณ และข้อควรคำนึงอีกสิ่งหนึ่งคือ การที่มีเส้นทางไหลเข้าออกของกระแสหลายทาง หากเกิดความผิดปกติภายนอกขึ้นกับกิ่ง (Branch) ใดกิ่งหนึ่งของบัสบาร์ กระแสจากกิ่งอื่น ๆ ทุกกิ่งจะไหลมารวมกันที่กิ่งที่มีความผิดปกติเพียงกิ่งเดียว ด้วยเหตุดังกล่าวอาจทำให้แกนหม้อแปลงกระแสของกิ่งที่มีความผิดปกติเกิดการอิ่มตัวได้ ซึ่งส่งผลให้เกิดกระแสผลต่างขึ้นทั้งที่ไม่ได้มีความผิดปกติเกิดขึ้นที่บัสบาร์ กระแสผลต่างจากการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสนี้อาจเป็นสาเหตุให้รีเลย์ทำงานผิดพลาด งานวิจัยของวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอวิธีการแก้ปัญหาผลกระทบของการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสเพื่อทำให้ระบบการป้องกันแบบผลต่างมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น

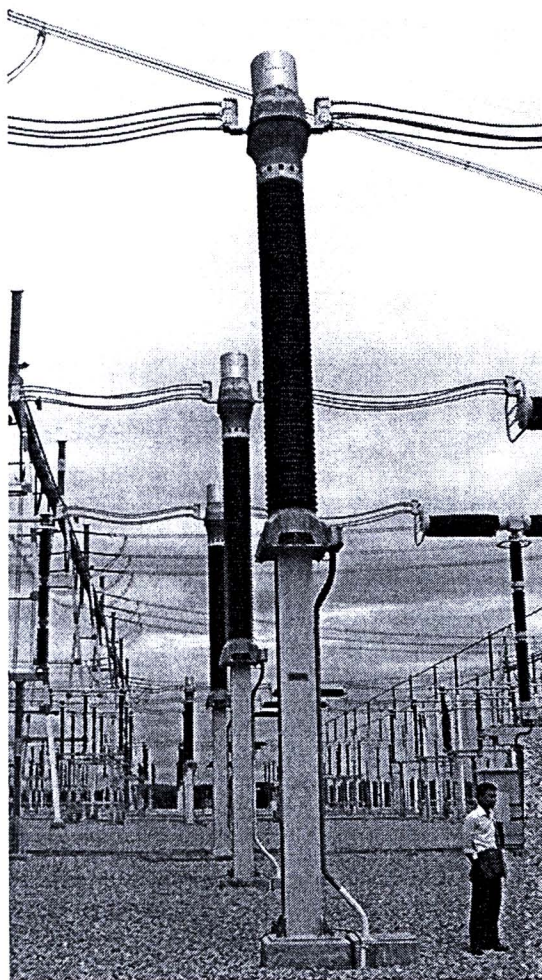


ภาพที่ 2-8 การป้องกันผลต่างของบัสบาร์



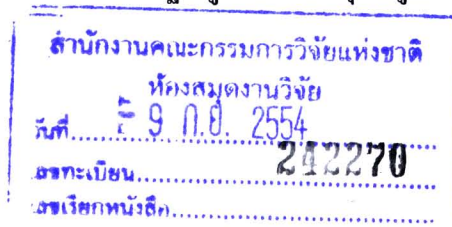
2.6 หม้อแปลงกระแส

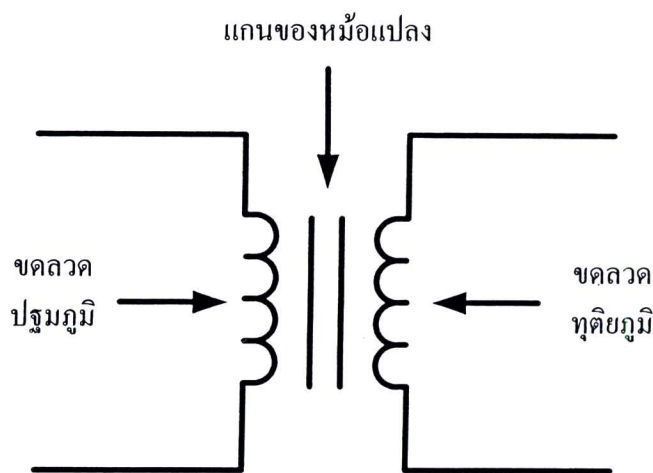
หม้อแปลงกระแสเป็นอุปกรณ์ที่มีบทบาทสำคัญต่อการป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง โดยเฉพาะการป้องกันแบบผลต่าง หม้อแปลงกระแสมีหน้าที่แปลงกระแสของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดสูง ให้มีขนาดลดลงมาในระดับที่รีเลย์สามารถตรวจวัดได้ อีกทั้งยังช่วยแยกวงจรของเครื่องมือวัดต่าง ๆ ไม่ให้มีการเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้าแรงสูง ทั้งนี้เพื่อสร้างความปลอดภัยต่อเครื่องมือวัดและผู้ปฏิบัติงาน ภาพที่ 2-9 แสดงภาพหม้อแปลงกระแสในสถานีไฟฟ้าแรงสูง



ภาพที่ 2-9 หม้อแปลงกระแสของสถานีไฟฟ้าแรงสูง

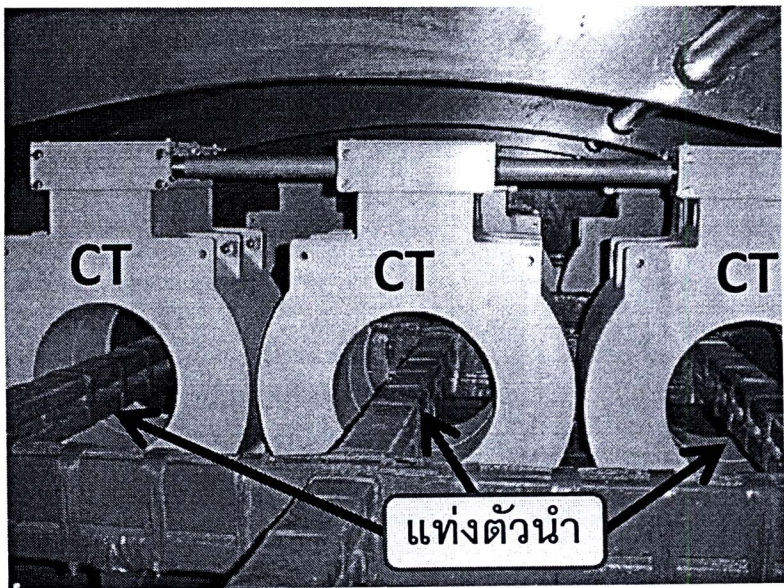
คุณภาพในการแปลงสัญญาณของหม้อแปลงกระแสเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของรีเลย์ป้องกัน หม้อแปลงกระแสที่นำมาใช้กับการป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังมีอยู่หลายรูปแบบ แม้จะมีรูปแบบโครงสร้างภายนอกที่แตกต่างกัน แต่องค์ประกอบหลักสามส่วนของหม้อแปลงกระแสที่จะต้องมีในทุกหม้อแปลง คือ ขดลวดปฐมภูมิ ขดลวดทุติยภูมิ และแกนของหม้อแปลง ดังแสดงในภาพที่ 2-10





ภาพที่ 2-10 โครงสร้างพื้นฐานของหม้อแปลง

ขดลวดปฐมภูมิมิมีหน้าที่นำกระแสที่ต้องการตรวจวัดเข้ามาที่หม้อแปลงกระแส กระแสที่ไหลผ่านขดลวดนี้จะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นมาในแกนของหม้อแปลง บ่อยครั้งที่ผู้ออกแบบมักใช้แท่งหรือลวดตัวนำของระบบเป็นขดลวดปฐมภูมิ หม้อแปลงบางรุ่นจึงไม่มีขดลวดปฐมภูมิบรรจุอยู่ในตัวถัง แต่จะมีช่องให้แท่งหรือลวดตัวนำของอุปกรณ์ไฟฟ้า สอดผ่านดังแสดงในภาพที่ 2-11

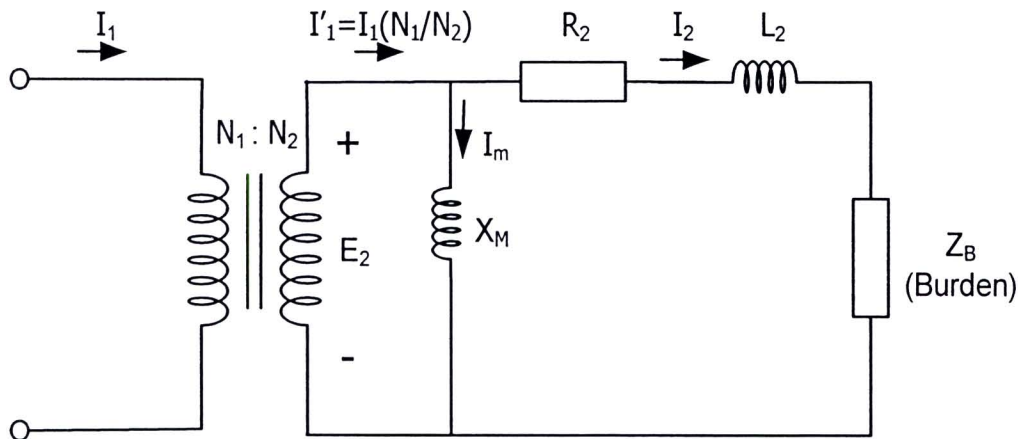


ภาพที่ 2-11 หม้อแปลงกระแสในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้แท่งตัวนำเป็นขดลวดปฐมภูมิ

ภาพที่ 2-12 แสดงวงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงกระแสที่ทำหน้าที่แปลงกระแสขาเข้า I_1 ให้เป็นกระแสขาออก I_2 เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากการไหลของกระแสในขดลวดปฐมภูมิจะไหลผ่านแกนของหม้อแปลง เนื่องจากกระแสที่ไหลในขดปฐมภูมินั้นเป็นสัญญาณกระแสสลับซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูด (Amplitude) ตลอดเวลา ส่งผลให้เส้นแรงแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลง



ตลอดเวลาเช่นกัน เส้นแรงแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลาจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดัน E_2 ขึ้นที่ขั้วของขดลวดทุติยภูมิซึ่งเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ โดยแรงดันดังกล่าวเป็นดังสมการที่ (2-1)



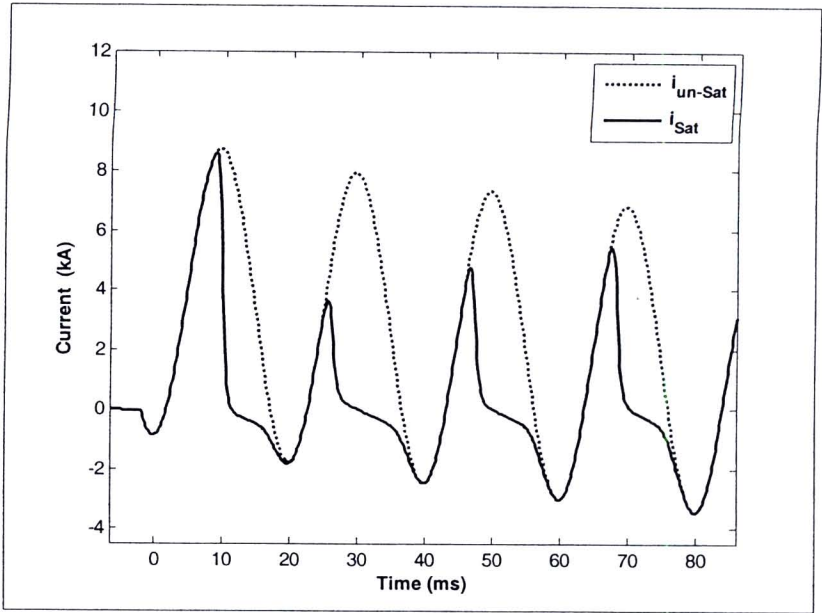
ภาพที่ 2-12 วงจรสมมูลของหม้อแปลงกระแส

$$E_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (2-1)$$

เมื่อมีแรงดัน E_2 เกิดขึ้นที่ขั้วของขดลวดทุติยภูมิ ทำให้เกิดการไหลของกระแส I_2 ขึ้นในขดลวดทุติยภูมิ (ที่ขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสจะต่อกับภาระ (Burden) หรือไม่ก็ถูกปิดวงจรไว้เสมอ ทำให้กระแสสามารถไหลครบวงจรได้) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ไหลในขดลวดปฐมภูมิ I_1 และกระแสในขดลวดทุติยภูมิ I'_1 จะเป็นดังสมการที่ (2-2) โดยที่ N_1 และ N_2 คือจำนวนรอบของขดลวดตัวนำปฐมภูมิและทุติยภูมิตามลำดับ

$$\frac{I_1}{I'_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (2-2)$$

ในกรณีที่หม้อแปลงกระแสอยู่ในสภาวะทำงานปกติ การแปลงกระแสจะทำให้ถูกต้องตรงตามสมการที่ (2-2) นั่นหมายความว่ากระแส I_1 มีรูปร่างอย่างไร กระแส I_2 ก็จะมีรูปร่างเหมือน I_1 ทุกประการ จะต่างกันแต่เพียง I_2 จะมีขนาดที่เล็กกว่าเท่านั้น (กรณีที่เป็นการแปลงกระแสลง) แต่ในกรณีที่หม้อแปลงกระแสอยู่ในสภาวะทำงานที่ไม่ปกติ เช่น เกิดการอิ่มตัวของแกน ส่งผลให้การแปลงกระแสเกิดการผิดเพี้ยน ดังแสดงในภาพที่ 2-13 ช่วงเวลา 9-20 มิลลิวินาที เกิดการอิ่มตัวของแกนหม้อแปลงกระแส ทำให้กระแส I_2 มีค่าน้อยกว่าที่ควรจะเป็น ดังนั้นในการเลือกใช้หม้อแปลงกระแสจึงต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับงาน ในการออกแบบระบบป้องกันจึงต้องเลือกใช้หม้อแปลงกระแสให้ตรงตามมาตรฐาน ซึ่งได้มีการกำหนดมาตรฐานคุณสมบัติและการใช้งานของหม้อแปลงกระแสขึ้นโดยหลายหน่วยงานเช่น IEC, BS (British Standard) และ ANSI/IEEE เป็นต้น



ภาพที่ 2-13 กระแสของขดลวดทุติยภูมิในกรณีที่มีและไม่มีกรอิมตัว
(เส้นทึบและเส้นจุดตามลำดับ)

2.7 ข้อกำหนดคุณสมบัติของหม้อแปลงกระแสในสภาวะคงตัว [1]

2.7.1 มาตรฐาน IEC 60044-1 (Class P)

มาตรฐาน IEC 60044-1 ได้ระบุถึงการประยุกต์ใช้หม้อแปลงกระแสกับการป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง โดยใช้สัญลักษณ์อักษร xxPxx ในการระบุขีดความสามารถของหม้อแปลง อักษรตัวแรกจะเป็นค่าความผิดพลาดสูงสุดในขณะหม้อแปลงกระแสอยู่ภายใต้สภาวะขีดสุดความแม่นยำ (Accuracy Limit) เช่น 5 หรือ 10% แล้วจึงตามด้วยอักษร P เพื่อบอกว่าเป็นหม้อแปลงกระแสสำหรับการป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง และหลังจากอักษร P จะตามด้วยค่าตัวคูณขีดสุดความแม่นยำ (Accuracy Limit Factor, ALF) เช่น 5P20 หมายถึงหม้อแปลงตัวนี้มีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5% ในขณะที่มีกระแสไหลผ่าน 20 เท่าของกระแสพิกัด สำหรับคุณสมบัติอื่นของหม้อแปลงกระแสตามมาตรฐาน IEC 60044-1 ได้แสดงไว้ดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 คุณสมบัติของหม้อแปลงกระแส Class P

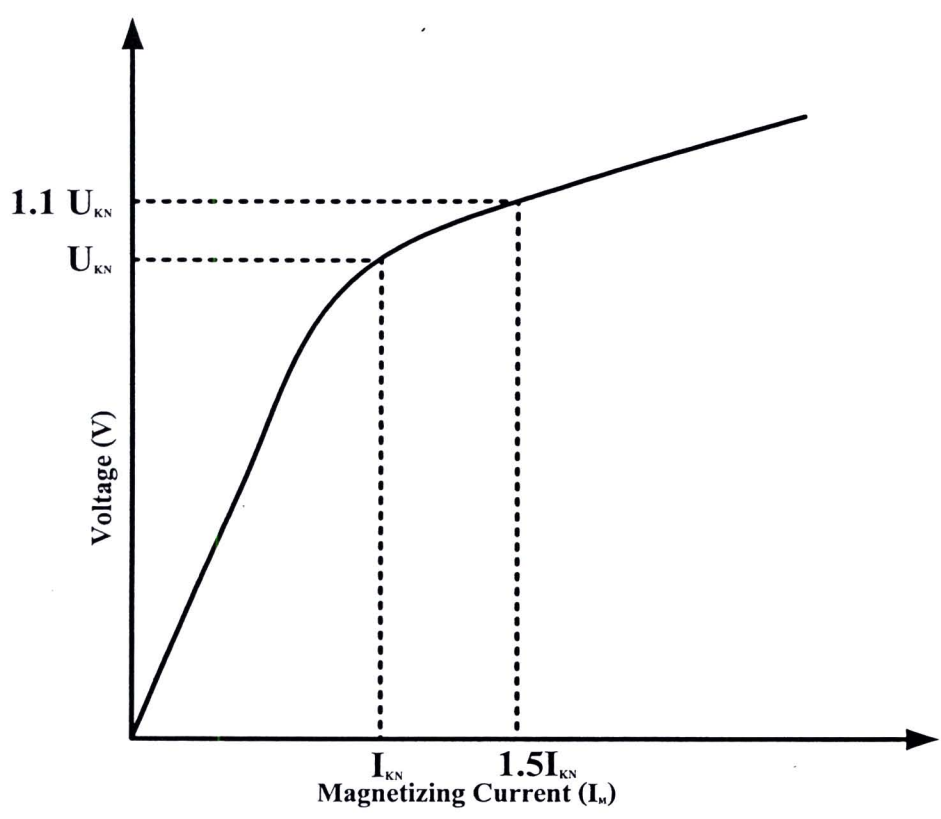
Accuracy Class	ค่าความคลาดเคลื่อนที่กระแสพิกัด I_N	ความคลาดเคลื่อนของมุมที่กระแสพิกัด I_N	ค่าความคลาดเคลื่อนที่สภาวะขีดสุดความแม่นยำ
5P	$\pm 1\%$	$\pm 1^\circ$	5%
10P	$\pm 3\%$	-	10%

2.7.2 มาตรฐาน BS 3938 (Class X)

มาตรฐานนี้เป็นมาตรฐานที่ใช้กับหม้อแปลงกระแสที่จะนำมาใช้กับการป้องกันกระแสผลต่างแบบอิมพีแดนซ์สูง (เป็นมาตรฐานที่ไม่นิยมนำมาใช้ในภาคพื้นยุโรป) มาตรฐานนี้จะระบุคุณสมบัติของหม้อแปลงกระแสต่าง ๆ ดังนี้

- กระแสฟลักต์ด้านปฐมภูมิ
- สัดส่วนการแปลง (Transformation Ratio)
- แรงดันฟลักต์ Knee Point U_{KN} (Rated Knee Point Voltage)
- กระแสกระตุ้น I_m ที่แรงดันฟลักต์ Knee Point U_{KN}
- ความต้านทานของขดลวดทุติยภูมิ
- ค่ากำลังปรากฏฟลักต์
- ค่าฟลักต์กระแสชั่วคราว
- ขั้นตอนในการทดสอบ
- ช่วงความถี่ที่ใช้งาน

โดยค่าแรงดันฟลักต์ Knee Point U_{KN} คือจุดที่เพิ่มกระแสกระตุ้นขึ้น 50% แล้วจะทำให้เกิดแรงดันที่ขั้วของขดลวดทุติยภูมิเพิ่มขึ้น 10% ดังแสดงในภาพที่ 2-14



ภาพที่ 2-14 นิยามของ Knee Point Voltage

2.7.3 มาตรฐาน ANSI/IEEE C57.13 (Class C)

หม้อแปลงกระแสที่ผ่านมาตรฐานนี้จะถูกทดสอบโดยการวัดกระแสขนาดตั้งแต่ 1-20 เท่าของกระแสฟลักซ์ (I_N) โดยใช้ภาระ (Burden) มาตรฐาน การแปลงกระแสจะต้องมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 10% โดยมาตรฐานนี้จะใช้สัญลักษณ์ Cxxx เป็นตัวบ่งชี้คุณสมบัติของหม้อแปลง โดย xxx หลังตัวอักษร C คือค่าแรงดันที่ขั้วของขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแส เช่น หม้อแปลงกระแส C200 หมายถึง แรงดันที่ขดลวดทุติยภูมิซึ่งต่อกับภาระมาตรฐาน (Burden) ซึ่งคือตัวต้านทานขนาด 2 โอห์ม และกระแสมีขนาด 20 เท่าของกระแสฟลักซ์ (หม้อแปลงกระแสในสหรัฐอเมริกาปกติจะเป็นชนิด 5A) ดังนั้นแรงดันที่ขั้วทุติยภูมิหรือแรงดันที่ตกคร่อมภาระนั้นคือ $U_B = 20 \times 5A \times 2\Omega = 200 V$

2.8 ข้อกำหนดคุณสมบัติของหม้อแปลงกระแสในสถานะชั่วคราว [1]

คุณสมบัติการตอบสนองในสถานะชั่วคราว (Transient Response) ของหม้อแปลงกระแสเป็นสิ่งที่ผู้ออกแบบระบบป้องกันจะต้องให้การใส่ใจ เนื่องจากกระแสผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นนั้นมีความเป็นไปได้สูงที่จะเป็นกระแสที่มีการยกตัวด้วยองค์ประกอบของสัญญาณกระแสตรง แม้การยกตัวของกระแสนี้จะเกิดเพียงชั่วคราว แต่หากหม้อแปลงกระแสไม่ได้ออกแบบมาเพื่อรองรับเหตุการณ์ดังกล่าว สัญญาณกระแสขาออกที่ได้จากขดลวดทุติยภูมิอาจเกิดการผิดเพี้ยน อันเนื่องมาจากการอิ่มตัวของแกนภายในหม้อแปลงกระแสได้ เพื่อความชัดเจนในวิธีการเลือกใช้หม้อแปลงกระแส มาตรฐาน IEC 60044-6 จึงได้แบ่งประเภทของหม้อแปลงกระแสตามชนิดของแกนออกเป็น 4 แบบ ซึ่งแกนของหม้อแปลงกระแสในแต่ละแบบจะมีคุณสมบัติการตอบสนองชั่วคราว (Transient Performance Requirement) แตกต่างกันไปเพื่อรองรับวัตถุประสงค์การใช้งานแบบต่าง ๆ

Class TPS แกนของหม้อแปลงจะทำมาจากเหล็กที่เป็นวงปิด และมีรีแอคแตนซ์รั่วไหลที่ต่ำมาก (Very Low Leakage Reactance) หม้อแปลงกระแสนชนิดนี้จะถูกออกแบบมาเพื่อใช้โดยเฉพาะกับระบบป้องกันผลต่างแบบอิมพีแดนซ์สูง

Class TPX หม้อแปลงกระแสนชนิดนี้จะมีแกนที่เป็นเหล็กวงปิด ไม่มีการต่อต้านการเกิดสนามแม่เหล็กตกค้าง (Remnant Flux) โครงสร้างของหม้อแปลงกระแสกลุ่มนี้จะคล้ายกับหม้อแปลงกระแส Class P ในมาตรฐาน IEC 60044-1 แต่ Class TPX จะมีส่วนของคุณสมบัติในการตอบสนองในสถานะชั่วคราวเพิ่มเข้ามา

Class TPY แกนเหล็กของหม้อแปลงกระแสจะมีช่องว่างอากาศ (Air Gap) ซึ่งจะช่วยลดการเกิดสนามแม่เหล็กตกค้าง โดยสนามแม่เหล็กตกค้างในแกนหม้อแปลงจะต้องมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำกว่า 10%

Class TPZ หม้อแปลงในกลุ่มนี้จะมีคุณสมบัติการกระตุ้นที่เป็นเชิงเส้นและมีสนามแม่เหล็กตกค้างน้อยมาก แต่หม้อแปลงกระแสนชนิดนี้จะแปลงกระแสได้ดีเฉพาะส่วนที่เป็นสัญญาณ

กระแสลัดเท่านั้น ส่วนการแปลงสัญญาณที่มีองค์ประกอบของสัญญาณกระแสตรงจะมีความคลาดเคลื่อนสูง ภาพรวมประสิทธิภาพของหม้อแปลงกระแสกลุ่มต่าง ๆ ในสถานะชั่วคราวตามมาตรฐาน IEC 60044-6 ได้แสดงไว้ดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 คุณสมบัติของหม้อแปลงกระแส ตามมาตรฐาน IEC 60044-6

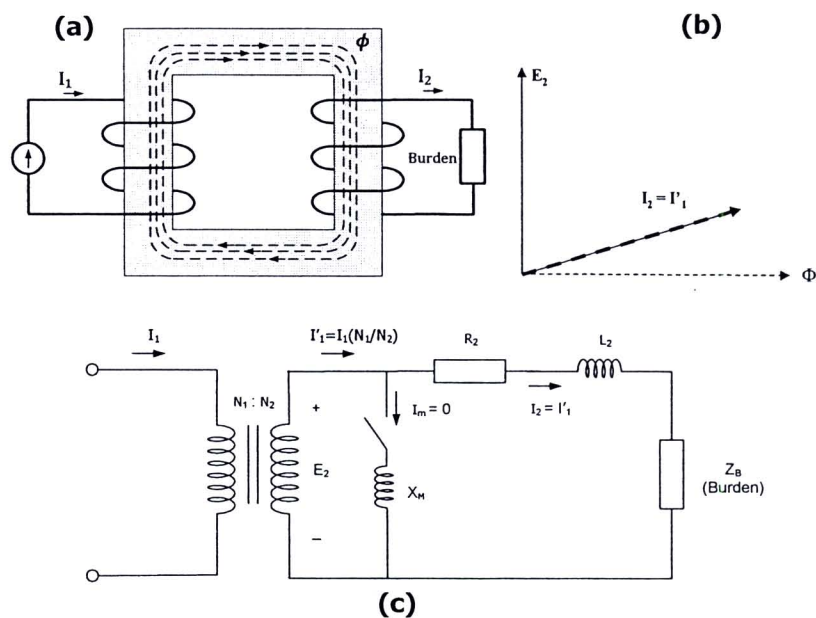
Accuracy Class	ค่าความคลาดเคลื่อนที่กระแสพิกัด I_N	ความคลาดเคลื่อนของมุมที่กระแสพิกัด I_N	ความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่สถานะชั้ตความแม่นยำ
TPX	$\pm 0.5\%$	$\pm 0.5^\circ$	10%
TPY	$\pm 1\%$	$\pm 1^\circ$	10%
TPZ	$\pm 1\%$	$\pm 3^\circ$	10% (เฉพาะ ac)

2.9 การอิ่มตัวของแกนหม้อแปลงกระแส

ดังที่ได้กล่าวข้างต้นว่าการทำงานของหม้อแปลงกระแสนั้น จะใช้การแปลงสัญญาณกระแสไฟฟ้าจากขดลวดปฐมภูมิให้เป็นสัญญาณแม่เหล็ก แล้วส่งสัญญาณแม่เหล็กดังกล่าวไปยังขดลวดทุติยภูมิโดยมีแกนของหม้อแปลงกระแสเป็นตัวกลาง เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กเดินทางไปถึงขดลวดทุติยภูมิ สัญญาณแม่เหล็กจะถูกแปลงให้เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าต่อไป หากเส้นแรงแม่เหล็กที่สร้างขึ้นมีบางส่วนที่ไม่สามารถเดินทางไปยังขดลวดทุติยภูมิได้ เช่น ในกรณีที่แกนของหม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัว จะส่งผลให้สัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ฝั่งทุติยภูมิมีขนาดและรูปร่างคลาดเคลื่อนไปจากสัญญาณกระแสไฟฟ้าฝั่งปฐมภูมิ การเข้าใจถึงกลไกการอิ่มตัวของแกนหม้อแปลงจึงเป็นสิ่งสำคัญต่องานวิจัยชิ้นนี้

2.9.1 หม้อแปลงอุดมคติ

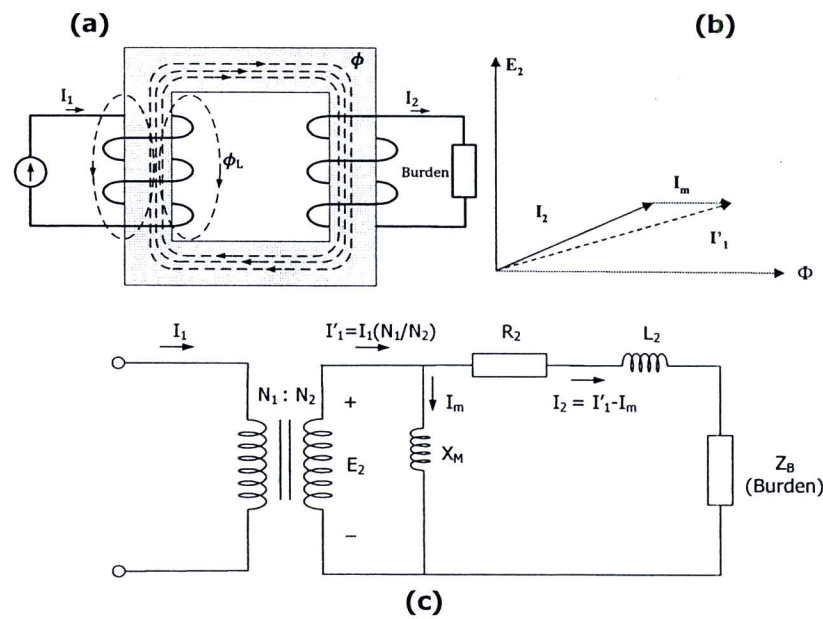
ในทางอุดมคติสนามแม่เหล็กทั้งหมดที่ถูกสร้างโดยขดลวดปฐมภูมิจะไหลอยู่ภายในแกนเหล็กเท่านั้นดังแสดงในภาพที่ 2-15(a) เนื่องจากแกนของหม้อแปลงกระแสมีค่าความซาบซึมได้ (Permeability) สูงเป็นอนันต์ ทำให้ไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล (Leakage Flux) ดังนั้นกระแสสร้างแม่เหล็ก (Magnetizing Current, I_m) จึงมีค่าเป็นศูนย์ ดังแสดงในวงจรสมมูลย์ในภาพที่ 2-15(c) จะเห็นได้ว่าค่ากระแส I_2 จะมีขนาดและมุมเท่ากับ I'_1 หรือ $I_1(N_1/N_2)$ เสมอ และสามารถวาดเฟสเซอร์ได้ดังในภาพที่ 2-15(b) ในกรณีนี้ค่าความคลาดเคลื่อนจะมีค่าเป็นศูนย์ทั้งในด้านของการคำนวณค่าขนาดและมุม



ภาพที่ 2-15 หม้อแปลงกระแสอุดมคติ

2.9.2 หม้อแปลงกระแสในสภาวะทำงานปกติ

ในความเป็นจริงนั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่ผลิตจากขดลวดปฐมภูมิจะมีบางส่วนที่ไหลผ่านอากาศ โดยไม่มีการล่อกับขดลวดทุติยภูมิดังแสดงในภาพที่ 2-16(a) สนามแม่เหล็กที่รั่วไหลนี้ส่งผลให้ค่ากระแสสร้างแม่เหล็ก (Magnetizing Current) มีขนาดใหญ่ขึ้นในขณะที่กระแสทุติยภูมิ I_2 มีขนาดที่เล็กลงดังแสดงในเฟสเซอร์ของภาพที่ 2-16(b) ปรากฏการณ์ดังกล่าวส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการแปลงสัญญาณกระแส

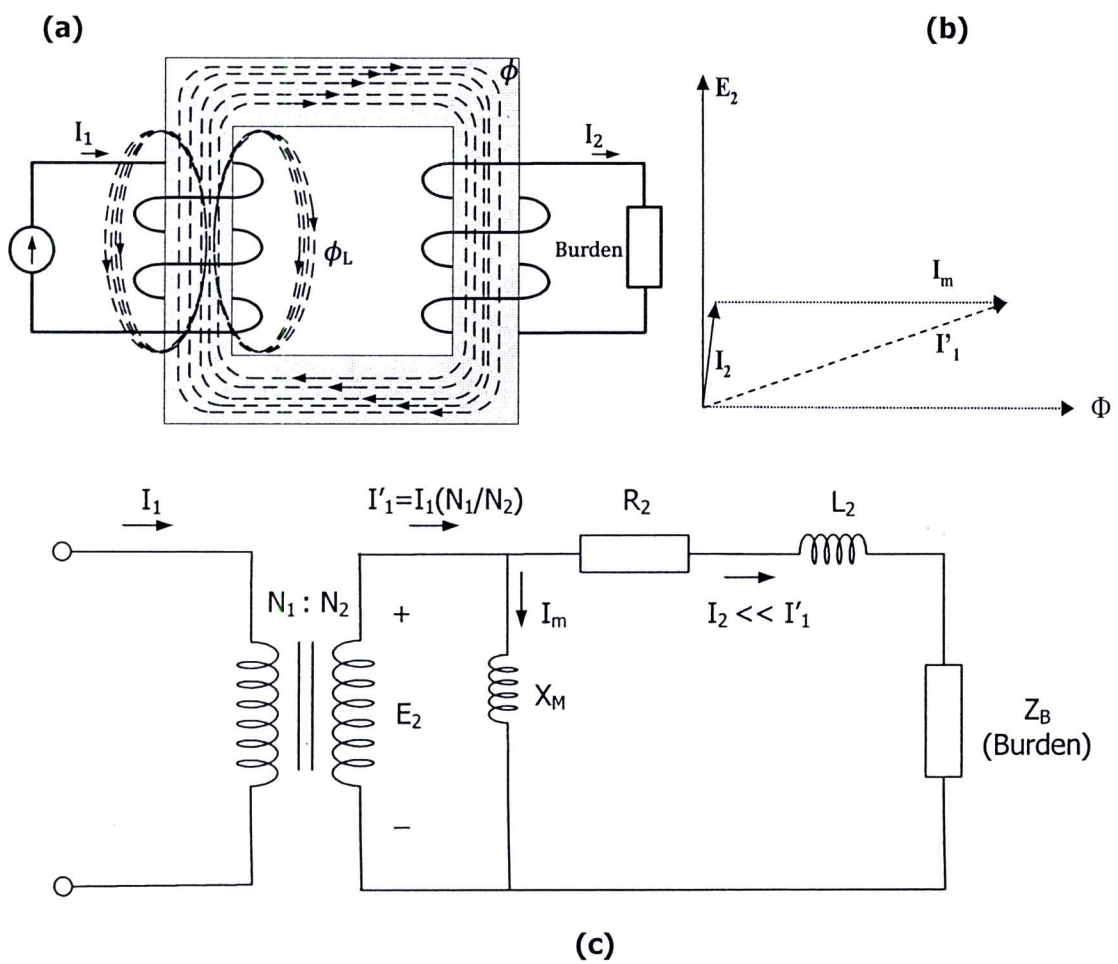


ภาพที่ 2-16 หม้อแปลงกระแสในสภาวะทำงานปกติ

2.9.3 หม้อแปลงกระแสในสภาวะอิ่มตัว

ในกรณีที่แกนของหม้อแปลงกระแสมีเส้นแรงแม่เหล็กไหลอยู่มากจนเกินขีดจำกัดที่แกนของหม้อแปลงกระแสจะรับได้ แกนเหล็กจะเข้าสู่สภาวะอิ่มตัวทำให้เกิดกระแสรั่วไหลเป็นปริมาณมากดังแสดงในภาพที่ 2-17(a) การที่มีเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลมากเป็นตัวบ่งชี้ว่า กระแสสร้างแม่เหล็ก I_m มีขนาดที่ใหญ่ขึ้น ในขณะที่กระแสทุติยภูมิ I_2 จะมีขนาดเล็กกว่ากระแสปฐมภูมิ I'_1 มาก การที่กระแสทั้งสองไม่เท่ากัน จะส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนที่สูงดังแสดงในเฟสเซอร์ของภาพที่ 2-17(b)

ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนี้จะส่งผลกระทบอย่างรุนแรงต่อระบบที่เกี่ยวข้องกับการตรวจวัดขนาดของกระแส เช่น รีเลย์ป้องกันกระแสเกิน รีเลย์ผลต่าง รีเลย์ระยะทาง เป็นต้น หากอุปกรณ์เหล่านี้ทำงานผิดพลาดอาจส่งผลกระทบที่ร้ายแรงต่อทั้งชีวิตและทรัพย์สิน จึงได้มีความพยายามเป็นอย่างมากที่จะลดผลกระทบของการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 2.11



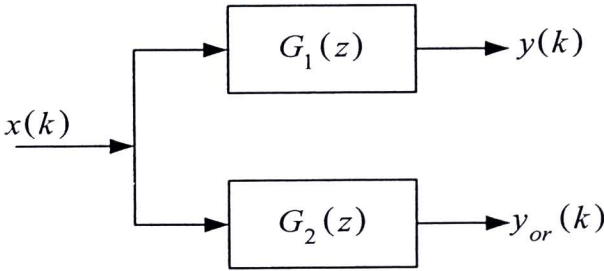
ภาพที่ 2-17 หม้อแปลงกระแสในสภาวะที่เกิดการอิ่มตัว

2.10 การประมวลผลสัญญาณเบื้องต้น

ในการทำงานของระบบป้องกันไฟฟ้ากำลังนั้นจะต้องมีการประมวลผลสัญญาณเพื่อใช้ในการคำนวณหาขนาดของสัญญาณต่าง ๆ เช่น ขนาดของแรงดันหรือกระแส วิธีการในการคำนวณหาขนาดของสัญญาณนั้นมีอยู่หลากหลายวิธี การใช้คู่ตัวกรองตั้งฉาก (Orthogonal Filter Pair) เป็นวิธีการหนึ่งที่มีความนิยม เนื่องจากคู่ตัวกรองตั้งฉากนั้นสามารถคำนวณได้ทั้งขนาดและมุมของสัญญาณ

2.10.1 คู่ตัวกรองตั้งฉาก (Orthogonal Filter Pair) [3]

คู่ตัวกรองตั้งฉากเป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สัญญาณที่มีคุณสมบัติตั้งฉากกัน (Orthogonal) มาประยุกต์ใช้ในการคำนวณหาขนาดและมุมของสัญญาณที่ป้อนเข้าสู่รีเลย์ป้องกัน ภาพที่ 2-18 แสดงผังของการประยุกต์ใช้คู่ตัวกรองตั้งฉาก โดย $G_1(z)$ และ $G_2(z)$ คือฟังก์ชันการถ่ายโอนในปริภูมิเวลาแบบไม่ต่อเนื่อง โดยสัญญาณขาออกจากตัวกรอง $y(k)$ และ $y_{or}(k)$ จะมีคุณสมบัติตั้งฉากซึ่งกันและกัน



ภาพที่ 2-18 คู่ตัวกรองตั้งฉาก

จากคุณสมบัติของตัวกรองตั้งฉากที่มีคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น ส่งผลให้กรณีที่มีสัญญาณขาเข้าเป็นไซน์ซอไซด์ ค่าสัญญาณขาออกก็ต้องเป็นสัญญาณไซน์ซอไซด์ที่มีค่าความถี่เท่ากับความถี่ของสัญญาณขาเข้าเสมอ ในกรณีที่สัญญาณขาเข้าเป็นไซน์ซอไซด์ ดังสมการที่ (2-3)

$$x(k) = A \sin (\omega kT + \phi)$$
 (2-3)

โดย k คืออันดับของการสุ่มสัญญาณ T คือคาบของการสุ่มสัญญาณ A คือขนาดของสัญญาณ ω คือค่าความถี่เชิงมุม และ ϕ คือค่ามุมของสัญญาณ เมื่อนำสัญญาณขาเข้าผ่านคู่ตัวกรองตั้งฉากแล้วจะได้สัญญาณขาออก $y(k)$ และ $y_{or}(k)$ ตามสมการที่ (2-4) และ (2-5) ตามลำดับ

$$y(k) = AG_1 \sin (\omega kT + \phi + \theta_1)$$
 (2-4)

$$y_{or}(k) = AG_2 \sin (\omega kT + \phi + \theta_2)$$
 (2-5)

โดยคำอธิบาย G_1 เป็นขนาดของค่า $G_1(e^{j\omega T})$ ที่ได้จากการแทนค่า z ด้วย $e^{j\omega T}$ ใน $G_1(z)$ และคำอธิบาย G_2 เป็นขนาดของค่า $G_2(e^{j\omega T})$ ที่ได้จากการแทนค่า z ด้วย $e^{j\omega T}$ ใน $G_2(z)$

สำหรับ θ_1 และ θ_2 คือค่าการเลื่อนกันเชิงมุมที่เกิดจากการกรองโดยใช้คู่ตัวกรองตั้งฉาก ดังแสดงในสมการที่ (2-7)

$$G_1 = |G_1(e^{j\omega T})|, \quad G_2 = |G_2(e^{j\omega T})| \quad (2-6)$$

$$\theta_1 = \angle G_1(e^{j\omega T}), \quad \theta_2 = \angle G_2(e^{j\omega T}) \quad (2-7)$$

จากสมการที่ (2-4) พบว่า $y(k)$ มีค่าความถี่เดียวกับ $x(k)$ แต่ค่าขนาดจะถูกขยายด้วย G_1 และค่าการเลื่อนกันเชิงมุมจะถูกเลื่อนไปด้วยค่าเท่ากับ θ_1 เช่นเดียวกับ $y_{or}(k)$ จะมีค่าความถี่เดียวกับ $x(k)$ แต่ค่าขนาดจะถูกขยายด้วย G_2 และค่าการเลื่อนกันเชิงมุมถูกเลื่อนไปด้วยค่าเท่ากับ θ_2 โดยค่า G_1 G_2 θ_1 และ θ_2 เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับค่าความถี่ของสัญญาณขาเข้า

คู่ตัวกรองตั้งฉากจะถูกออกแบบเพื่อให้ $y_{or}(k)$ และ $y(k)$ ตั้งฉากกันที่ความถี่มูลฐาน ω_0 ทำให้ $y_{or}(k)$ และ $y(k)$ มีค่าขนาดที่เท่ากันแต่มุมของ $y_{or}(k)$ จะนำหน้าหรือล่าหลังมุมของ $y(k)$ อยู่ 90° ดังนั้นหากสัญญาณขาเข้ามีความถี่เป็น ω_0 แล้ว G_1 และ G_2 จะมีค่าเป็น 1 และ $\theta_1 = \theta_2 \pm 90^\circ$

ในการออกแบบคู่ตัวกรองตั้งฉาก สามารถทำได้หลายวิธี ในที่นี้จะกล่าวถึงการออกแบบคู่ตัวกรองตั้งฉากแบบ FIR (Finite Impulse Response) ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ แบบหน้าต่างแคบ (Short Data Window) และแบบหน้าต่างกว้าง (Long Data Window) โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเฉพาะการออกแบบ FIR คู่ตัวกรองตั้งฉากชนิดหน้าต่างกว้างเท่านั้น สำหรับตัวกรองแบบหน้าต่างแคบจะกล่าวถึงในส่วนของการออกแบบอัลกอริทึม (บทที่ 3)

2.10.2 คู่ตัวกรองตั้งฉากหน้าต่างกว้าง (Long Data Window Orthogonal Filter Pairs) [3]

คู่ตัวกรองตั้งฉากหน้าต่างกว้างจะนำค่าชุดข้อมูลล่าสุดจำนวนหนึ่งคาบหรือครึ่งคาบมาใช้ในการคำนวณหาค่าสัญญาณตั้งฉาก ดังนั้นความเร็วในการตอบสนองของคู่ตัวกรองตั้งฉากแบบหน้าต่างกว้างจะช้ากว่าคู่ตัวกรองตั้งฉากที่มีหน้าต่างแคบ (ดังแสดงในหัวข้อ 3.3) แต่มีข้อดีคือการใช้คู่ตัวกรองตั้งฉากหน้าต่างกว้างจะมีความทนทานต่อค่าสัญญาณรบกวนที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ได้ดี โดยในที่นี้จะกล่าวถึงคู่ตัวกรองตั้งฉากหน้าต่างกว้างสองแบบคือ การแปลงฟูริเยร์แบบเต็มคลื่น (Full Cycle DFT, FCDFT) และ การแปลงฟูริเยร์แบบครึ่งคลื่น (Half Cycle DFT, HCDFT)

2.10.3 การแปลงฟูริเยร์แบบเต็มคลื่น (Full Cycle DFT) [3]

การแปลงฟูริเยร์แบบเต็มคลื่นจะใช้การเฉลี่ยแบบมีน้ำหนัก (Weighted Average) ของสัญญาณในช่วงหนึ่งคาบล่าสุดในการคำนวณหาสัญญาณขาออกที่มีคุณสมบัติตั้งฉากซึ่งกันและกัน โดยค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้เป็นค่าน้ำหนักคือค่าโคไซน์และค่าไซน์ โดยค่ามุมอยู่ในช่วง $0-360^\circ$ และทำการเพิ่มค่ามุมทีละ $360^\circ/N$ โดยค่า N คือจำนวนครั้งของการสุ่มต่อคาบของสัญญาณ ค่าสัญญาณขาออกจากการแปลงฟูริเยร์แบบเต็มคลื่นจะอยู่ในรูปของค่าสัญญาณขาเข้า $x(k)$ ดังที่ได้แสดงไว้ในสมการที่ (2-8) และ (2-9)

$$y(k) = \frac{2}{N} \left[\cos\left(\frac{2\pi}{N} 0\right) x(k) + \cos\left(\frac{2\pi}{N}\right) x(k-1) + \cos\left(\frac{2\pi}{N} 2\right) x(k-2) + \dots + \cos\left(2\pi - \frac{2\pi}{N}\right) x(k-N+1) \right] \quad (2-8)$$

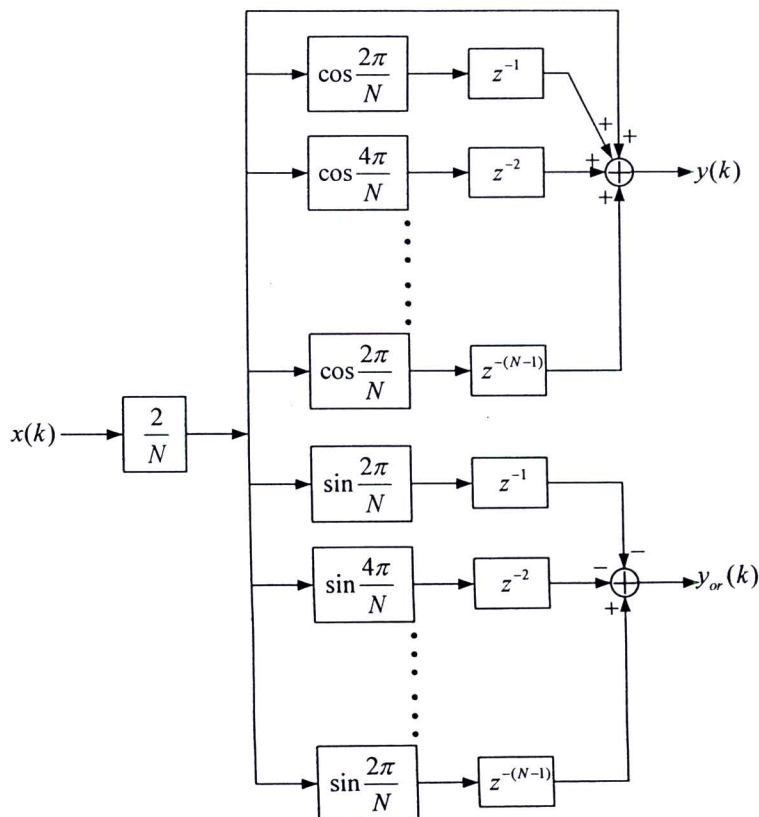
$$y_{or}(k) = -\frac{2}{N} \left[\sin\left(\frac{2\pi}{N} 0\right) x(k) + \sin\left(\frac{2\pi}{N}\right) x(k-1) + \sin\left(\frac{2\pi}{N} 2\right) x(k-2) + \dots + \sin\left(2\pi - \frac{2\pi}{N}\right) x(k-N+1) \right] \quad (2-9)$$

หากนำสมการที่ (2-8) และ (2-9) ไปทำการแปลง Z จะได้ฟังก์ชันการถ่ายโอนการแปลงฟูริเยร์แบบเต็มคลื่นดังสมการที่ (2-10) และ (2-11) ตามลำดับ

$$G_1(z) = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \cos\left(\frac{2\pi}{N} i\right) z^{-i} \quad (2-10)$$

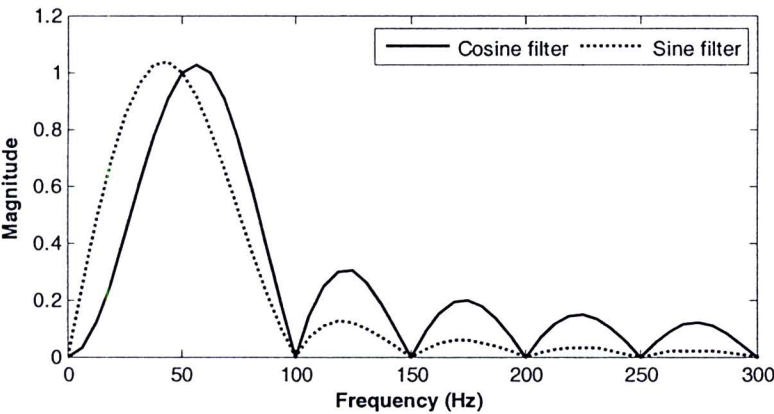
$$G_2(z) = -\frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \sin\left(\frac{2\pi}{N} i\right) z^{-i} \quad (2-11)$$

จากสมการที่ (2-10) และ (2-11) สามารถนำมาเขียนแผนผังได้ตามภาพที่ 2-19



ภาพที่ 2-19 บล็อกไดอะแกรมของการแปลงฟูริเยร์แบบเต็มคลื่น [3]

ผลตอบสนองทางขนาดของการแปลงฟูริเยร์แบบเต็มคลื่นดังในภาพที่ 2-20 แสดงให้เห็นว่า คู่ตัวกรองดังกล่าวสามารถกำจัดค่าคงที่ และองค์ประกอบฮาร์มอนิกที่เป็นค่าจำนวนเต็มได้ นอกจากนี้ยังสามารถลดผลที่เกิดจากองค์ประกอบของสัญญาณที่ความถี่อื่น ๆ ได้เป็นอย่างดี



ภาพที่ 2-20 ผลตอบสนองเชิงขนาดของการแปลงฟูริเยร์แบบเต็มคลื่น

2.10.4 การแปลงฟูริเยร์แบบครึ่งคลื่น (Half-Cycle DFT) [3]

การแปลงฟูริเยร์แบบครึ่งคลื่น ใช้การเฉลี่ยแบบมีน้ำหนัก (Weighted Average) ของสัญญาณในช่วงครึ่งคาบล่าสุดในการคำนวณ โดยค่าตัวคูณในการหาค่าน้ำหนักคือค่าของสัญญาณไซน์และโคไซน์ในช่วงมุม 0-180° ค่าสัญญาณขาออกจากการแปลงฟูริเยร์แบบครึ่งคลื่น จะเป็นฟังก์ชันของสัญญาณขาเข้า $x(k)$ ดังสมการที่ (2-15) และ (2-16)

$$y(k) = -\frac{4}{N} \left[\cos\left(\frac{2\pi}{N} 0\right) x(k) + \cos\left(\frac{2\pi}{N}\right) x(k-1) + \cos\left(\frac{2\pi}{N} 2\right) x(k-2) + \dots + \cos\left(\pi - \frac{2\pi}{N}\right) x\left(k - \frac{N}{2} + 1\right) \right] \tag{2-15}$$

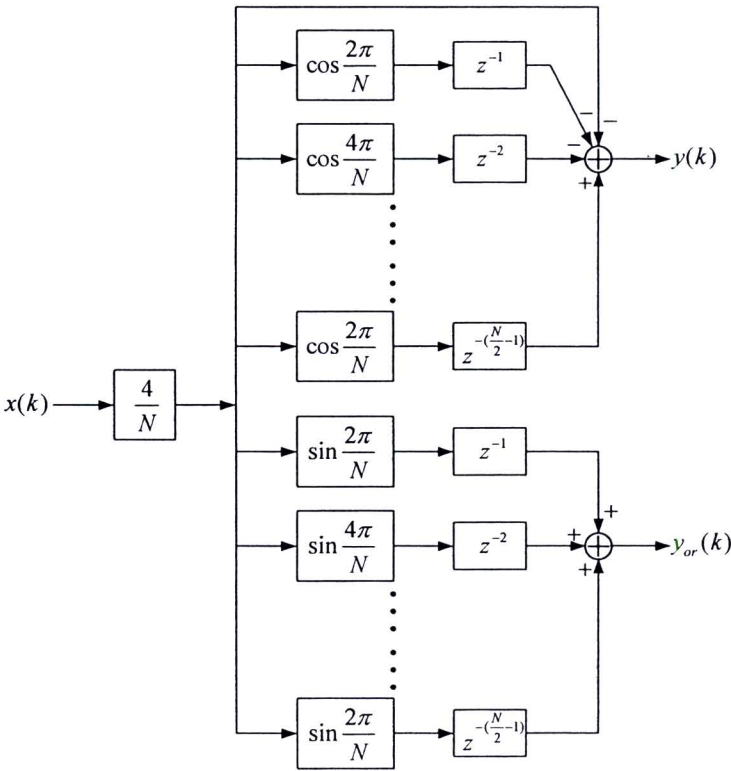
$$y_{or}(k) = \frac{4}{N} \left[\sin\left(\frac{2\pi}{N} 0\right) x(k) + \sin\left(\frac{2\pi}{N}\right) x(k-1) + \sin\left(\frac{2\pi}{N} 2\right) x(k-2) + \dots + \sin\left(\pi - \frac{2\pi}{N}\right) x\left(k - \frac{N}{2} + 1\right) \right] \tag{2-16}$$

ฟังก์ชันการถ่ายโอนแสดงได้ดังสมการที่ (2-17) และ (2-18)

$$G_1(z) = -\frac{4}{N} \sum_{i=0}^{N/2-1} \cos\left(\frac{2\pi}{N} i\right) z^{-i} \tag{2-17}$$

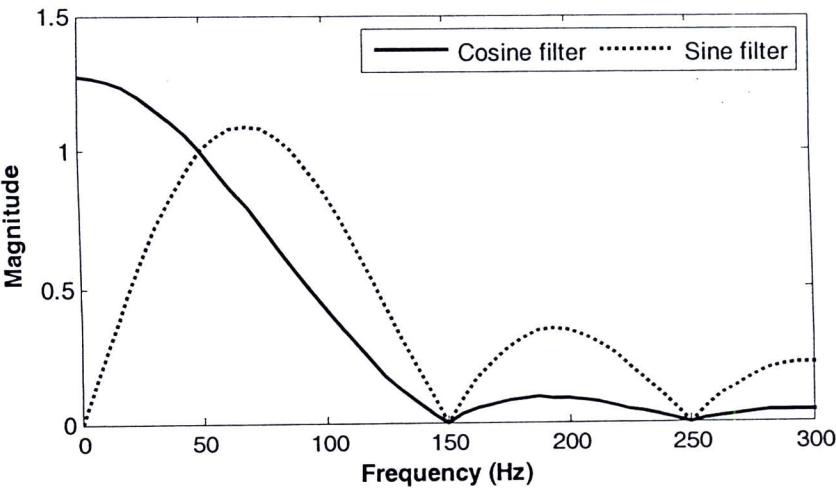
$$G_2(z) = \frac{4}{N} \sum_{i=0}^{N/2-1} \sin\left(\frac{2\pi}{N} i\right) z^{-i} \tag{2-18}$$

จากสมการที่ (2-17) และ (2-18) สามารถนำมาเขียนแผนผังแสดงความสัมพันธ์ของการแปลงฟูริเยร์แบบครึ่งคลื่น ดังภาพที่ 2-21



ภาพที่ 2-21 บล็อกไดอะแกรมของการแปลงฟูริเยร์แบบครึ่งคลื่น [3]

ผลตอบแทนทางขนาดของการแปลงฟูริเยร์แบบครึ่งคลื่น แสดงดังในภาพที่ 2-22 จากภาพจะเห็นได้ว่าการแปลงฟูริเยร์แบบครึ่งคลื่นสามารถจัดส่วนประกอบฮาร์มอนิกส์ ที่มีค่าจำนวนเต็มเป็น เลขคี่ของสัญญาณขาเข้าได้



ภาพที่ 2-22 ผลตอบแทนทางขนาดของการแปลงฟูริเยร์แบบครึ่งคลื่น [3]

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหาค่าผิดพลาดของสัญญาณกระแส

จากการสืบค้นข้อมูล ผู้วิจัยพบว่าปัญหาค่าผิดพลาดของแกนหม้อแปลงกระแสนั้นเป็นสาเหตุให้กระแสด้านทุติยภูมิมีความผิดเพี้ยนต่างจากรูปร่างของกระแสด้านปฐมภูมิ ขนาดของกระแสด้านทุติยภูมิจะมีขนาดต่ำกว่าที่ควรจะเป็น ส่งผลให้การทำงานของรีเลย์ป้องกันทำงานผิดพลาด ในกรณีที่เป็นรีเลย์กระแสเกินจะส่งผลให้การสั่งตัดวงจรช้ากว่าที่ควรจะเป็น [4] ในกรณีของรีเลย์ผลต่าง การอิมตัวของหม้อแปลงกระแสจะส่งผลให้เกิดกระแสผลต่างขึ้นทั้งที่ไม่มีความผิดพร่องใด ๆ เกิดขึ้นเลย การสั่งปลดวงจรที่ผิดพลาดส่งผลให้เกิดไฟฟ้าดับโดยไม่จำเป็น อีกทั้งยังเป็นสาเหตุให้ความมั่นคงของระบบไฟฟ้ากำลังลดลง มีนักวิจัยหลายท่านได้พยายามคิดค้นวิธีการแก้ปัญหาดังกล่าว [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28] ในการแก้ปัญหาก็จะแบ่งออกเป็นสองส่วนหลักคือ การตรวจจับการอิมตัวของแกนหม้อแปลงกระแสเพื่อตัดสินใจว่าสัญญาณส่วนไหนควรยกค่าไว้ ส่วนไหนควรทำการปรับปรุง ส่วนที่สองคือการปรับปรุงสัญญาณในส่วนที่เกิดการผิดเพี้ยนให้กลับมาถูกต้องดังเดิม

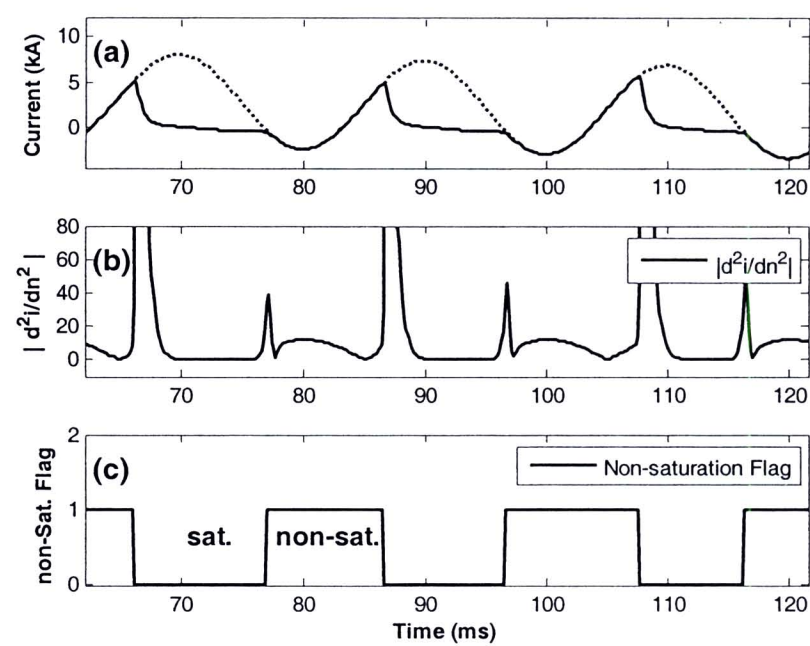
2.11.1 การตรวจจับการอิมตัวของหม้อแปลงกระแส

ในการตรวจจับการอิมตัวของหม้อแปลงกระแสนั้นสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งแบ่งออกได้เป็นหลายกลุ่ม เช่น กลุ่มวิธีการตรวจจับการอิมตัวแบบหาจุดเริ่มและจุดสิ้นสุด กลุ่มวิธีการตรวจจับการอิมตัวแบบจุดต่อจุด (Point by Point Detection) และกลุ่มวิธีการตรวจจับการอิมตัวโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม เป็นต้น

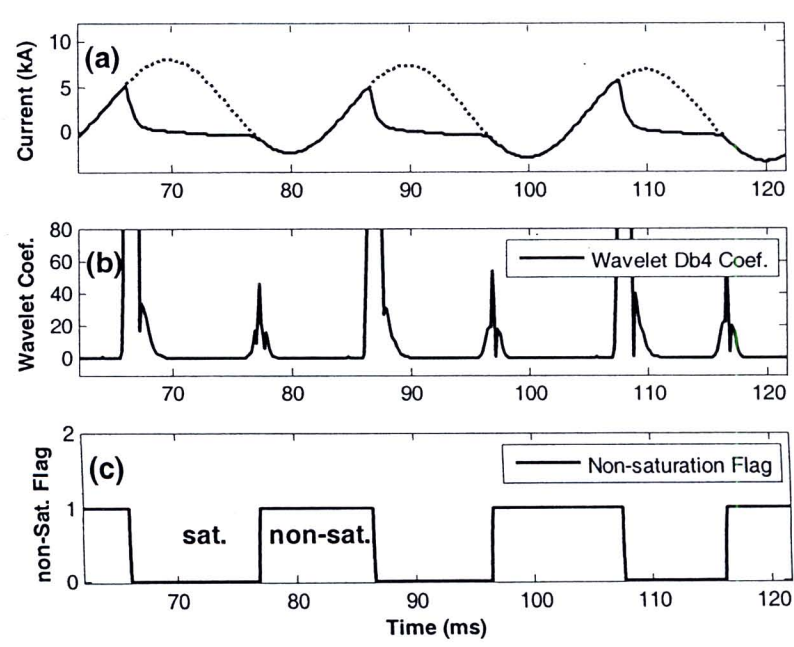
2.11.1.1 กลุ่มวิธีการตรวจจับการอิมตัวแบบหาจุดเริ่มและจุดสิ้นสุด

การทำงานของวิธีการตรวจจับประเภทนี้จะทำการตรวจจับการอิมตัว โดยใช้การเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดของสัญญาณกระแสเป็นตัวบ่งชี้ ทั้งนี้เป็นเพราะในจังหวะที่เริ่มเกิดการอิมตัวและจังหวะที่เริ่มออกจากสภาวะอิมตัว สัญญาณกระแสจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด โดยวิธีการนี้จะตั้งสมมติฐานว่าช่วงเวลาระหว่างจุดเริ่มเข้าสู่สภาวะการอิมตัวและจุดเริ่มออกจะเป็นช่วงเวลาที่มีการอิมตัวของแกนหม้อแปลงเสมอ ในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดทำได้หลายวิธี เช่น การคำนวณค่าอนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง สอง หรือสาม [9, 10, 11], [15], [21, 22, 23], [25] บางผลงานวิจัยใช้การแปลงเวฟเลขในการตรวจจับ [12] ดังแสดงในภาพที่ 2-23 และ ภาพที่ 2-24 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าอนุพันธ์อันดับที่สองดังแสดงในภาพที่ 2-23 (b) นั้นจะมีค่าที่สูงกว่าปกติในจังหวะที่เริ่มเกิดการอิมตัว (ที่ 67, 87 และ 107 มิลลิวินาที) เช่นเดียวกันกับจังหวะที่เริ่มออกจากสภาวะการอิมตัว (ที่ 78, 98 และ 118 มิลลิวินาที) ก็จะมีค่าอนุพันธ์อันดับที่สองสูงกว่าปกติเช่นกัน สำหรับการตรวจจับด้วยการแปลงเวฟเลขที่ใช้เวฟเลขแม่ชนิด Daubechies อันดับที่ 4 ดังแสดงในภาพที่ 2-24(b) ก็ให้ผลในทางที่สอดคล้องกันกับการใช้ค่าอนุพันธ์อันดับที่สอง ข้อดีของการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดคือ การเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดของสัญญาณกระแสนั้นมี

หลายสาเหตุไม่ใช่เฉพาะการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสเท่านั้น สาเหตุอื่น ๆ เช่น การปลดหรือต่อวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ การตอบสนองของระบบควบคุมต่อเหตุผิดปกติต่าง ๆ การปลดภาระ การเปลี่ยนชนิดของความผิดปกติ ล้วนเป็นสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดเช่นกัน สิ่งเหล่านี้ส่งผลให้การตรวจจับการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสทำงานผิดพลาด

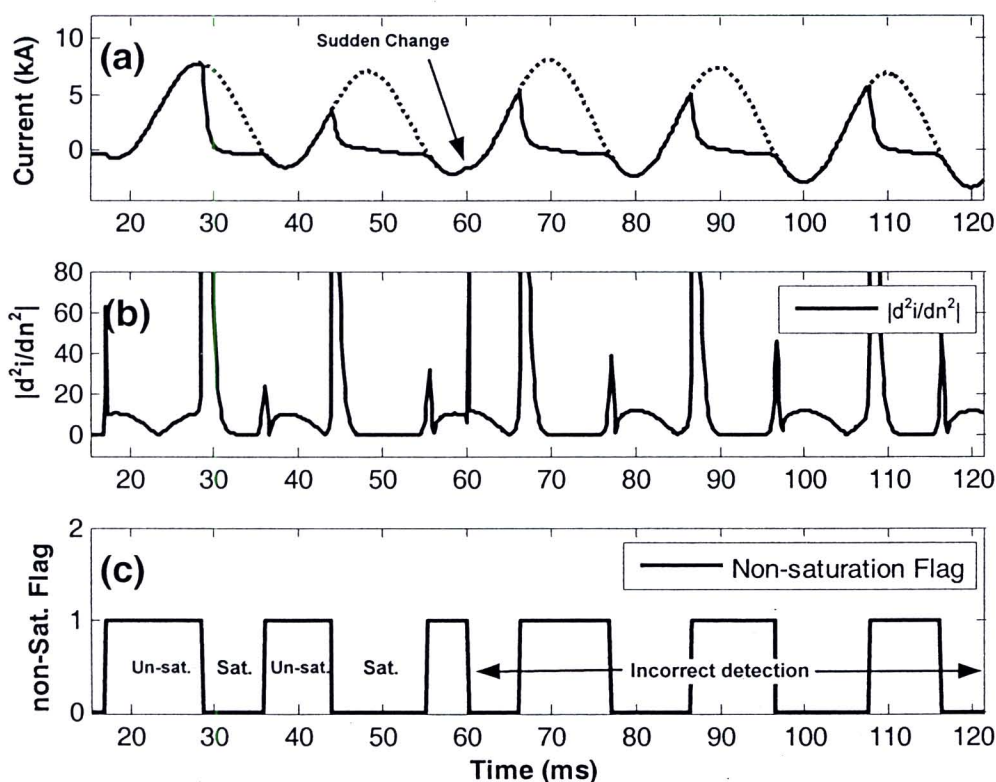


ภาพที่ 2-23 การตรวจจับการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสโดยใช้อนุพันธ์อันดับสอง



ภาพที่ 2-24 การตรวจจับการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสโดยใช้การแปลงเวฟเลต

ภาพที่ 2-25 แสดงตัวอย่างของการตรวจจับที่ผิดพลาด ภาพที่ 2-25(a) แสดงสัญญาณกระแสที่เกิดจากความผิดปกติระหว่างเฟสที่เวลาประมาณ 18 มิลลิวินาที ทำให้เกิดกระแสผิดปกติและเกิดการอิมิตัวของหม้อแปลง ผลของการคำนวณค่าอนุพันธ์อันดับที่สองนั้นแสดงไว้ดังภาพที่ 2-25(b) การตรวจจับการอิมิตัวของหม้อแปลงกระแสทำได้ถูกต้องในช่วงต้นดังแสดงในภาพที่ 2-25(c) หลังจากนั้นความผิดปกติได้พัฒนาจากที่เคยเป็นความผิดปกติระหว่างเฟสเปลี่ยนเป็นชนิดสามเฟสที่เวลาประมาณ 60 มิลลิวินาที ส่งผลให้ค่าอนุพันธ์อันดับสองมีค่าสูงในเวลาดังกล่าว ทำให้กระบวนการตรวจจับการอิมิตัวของหม้อแปลงกระแสทำงานผิดพลาด และความผิดพลาดนี้อาจส่งผลกระทบเป็นระยะเวลายาวนานมาก



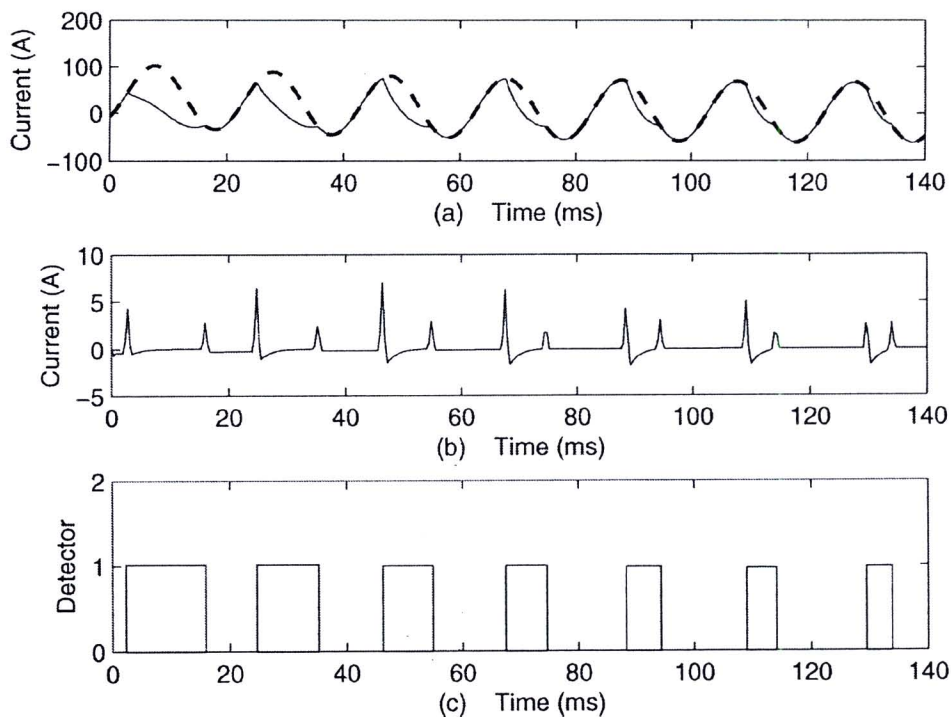
ภาพที่ 2-25 การตรวจจับการอิมิตัวที่ผิดพลาดเนื่องจากการเปลี่ยนชนิดของความผิดปกติ

2.11.1.2 กลุ่มวิธีการตรวจจับการอิมิตัวแบบจุดต่อจุด (Point by Point Detection)

การตรวจจับการอิมิตัวของหม้อแปลงกระแสในกลุ่มนี้จะทำการประมวลผลสัญญาณและแสดงสถานะของหม้อแปลงกระแสว่าอิมิตัวหรือไม่แบบจุดต่อจุด วิธีการหนึ่งที่น่ามาใช้คือการตรวจสอบว่าค่าขนาดของสัญญาณกระแสมีค่าแตกต่างจากขนาดของสัญญาณก่อนหน้านี้มากน้อยเพียงใด [19, 20] โดยการหาค่าแปรปรวน (Variance) ของสัญญาณ หากค่าแปรปรวนมีค่าสูงแสดงว่าสัญญาณกระแสอาจเกิดการอิมิตัว นอกจากนี้ยังใช้การตรวจสอบสัญญาณกระแสว่าเป็น

สัญญาณไซน์ที่มีความถี่มูลฐานหรือไม่ โดยการนำเอาสัญญาณกระแสไปผ่านกระบวนการอนุพันธ์อันดับที่สอง ผลลัพธ์ที่ได้จะต้องมีรูปร่างลักษณะเหมือนกับสัญญาณกระแสทุกประการเพียงแต่มีขนาดที่ไม่เท่ากันและมีมุมตรงข้ามกันพอดี หากเงื่อนไขดังกล่าวไม่เป็นจริง แสดงว่าขณะนั้นหม้อแปลงกระแสอาจอยู่ในสถานะอิ่มตัวได้ การประยุกต์ใช้วิธีการตรวจจับด้วยวิธีนี้ช่วยให้การทำงานของรีเลย์กระแสเกินทำงานได้แม่นยำมากขึ้น [19, 20]

การใช้วิธีการ Modified Morphological Lifting Scheme ก็เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจในการตรวจจับการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแส [13], [24] สัญญาณรายละเอียด (Detail Signal) ที่ได้จากกระบวนการดังกล่าวจะเป็นตัวบ่งชี้ว่าช่วงเวลาใดที่หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัว ในบทความ [13] กล่าวว่าในขณะที่เกิดการอิ่มตัว สัญญาณรายละเอียดจะมีค่าสูงกว่ามากเมื่อเทียบกับสัญญาณรายละเอียดช่วงที่ไม่มีการอิ่มตัว แต่จากการทดลองในกรณีที่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง 80% ส่งผลให้เกิดการอิ่มตัวอย่างรุนแรง ซึ่งการทดลองนี้ทำโดยผู้นำเสนอวิธีการนี้เอง ดังแสดงในภาพที่ 2-26



ภาพที่ 2-26 การตรวจจับการอิ่มตัวด้วย Modified Morphological Lifting Scheme

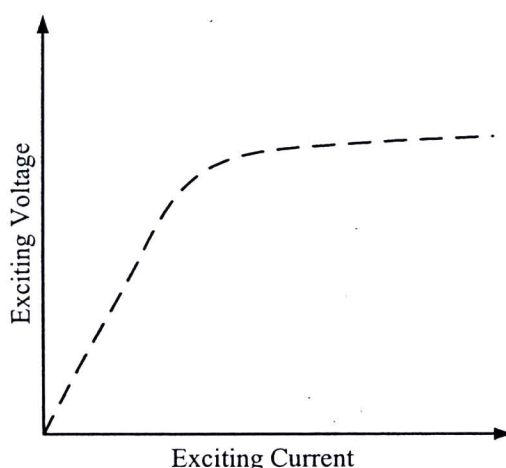
(a) สัญญาณกระแส (b) สัญญาณรายละเอียด (c) ผลการตรวจจับการอิ่มตัว [13]

ภาพที่ 2-26(b) บ่งชี้ว่าค่าสัญญาณรายละเอียดขณะเกิดการอิ่มตัวมีค่าเกือบเป็นศูนย์ ไม่ได้มีขนาดสูงกว่าช่วงสภาวะปกติดังที่ผู้นำเสนอวิธีการนี้กล่าวอ้าง ทำให้ตัวเปรียบเทียบ (Comparator) ทำงานได้ยาก ดังนั้นการตรวจจับด้วยวิธีการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของการอิ่มตัวโดยการตรวจจับค่ายอดน่าจะเป็นวิธีการที่เหมาะสมกว่า

มีนักวิจัยบางท่านได้เลือกใช้วิธีการเปรียบเทียบค่าผลต่างระหว่างค่าประสิทธิผล (RMS) ในห้วงเวลานั้นเทียบกับค่าประสิทธิผลที่ได้จากการคำนวณของสัญญาณช่วงครบหนึ่งคาบว่ามีความแตกต่างกันมากน้อยเพียงใด [14] หากต่างกันมากแสดงว่าเกิดการอิ่มตัว การตรวจจับด้วยวิธีการนี้ มีจุดด้อยตรงที่ต้องใช้ค่าประสิทธิผลซึ่งต้องใช้ค่าสัญญาณทั้งคาบ ทำให้ไม่เหมาะกับการควบคุมแบบเวลาจริง (Real-time)

บางงานวิจัยเลือกใช้การตรวจสอบค่าอิมพีแดนซ์ [26, 27] ในการตรวจจับการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสหากค่าอิมพีแดนซ์มีค่าสูงผิดปกติแสดงถึงหม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวแต่การประยุกต์ใช้วิธีการนี้ รีเลย์จะต้องมีชุดตรวจวัดแรงดันเพิ่มเข้ามาเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์

วิธีการตรวจจับการอิ่มตัวโดยการนำขนาดของกระแสมาเทียบกับคุณสมบัติการกระตุ้น (Excitation Curve, V-I Curve) ดังแสดงในภาพที่ 2-27 ซึ่งได้จากการนำเอาหม้อแปลงกระแสมาทำการทดสอบ เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการระบุการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแส วิธีการนี้มีข้อด้อยตรงที่คุณลักษณะการกระตุ้นนั้นเป็นผลการทดสอบในกรณีที่สัญญาณไม่มีองค์ประกอบของสัญญาณกระแสตรง และไม่มีเส้นแรงสนามแม่เหล็กตกค้าง (Remnant Flux) อยู่ภายในแกน ทำให้การระบุการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสมีความแม่นยำต่ำ



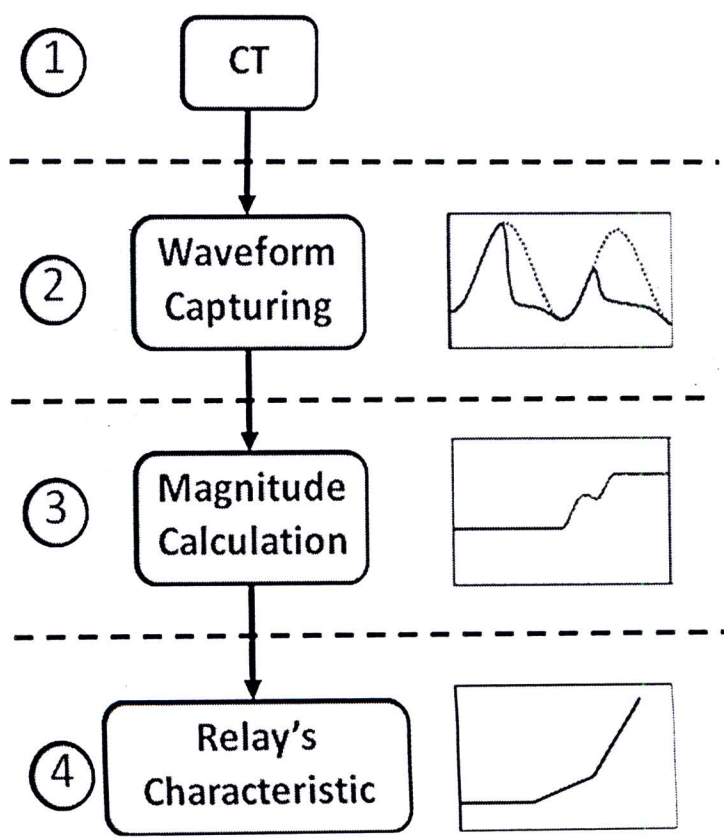
ภาพที่ 2-27 กราฟคุณสมบัติการกระตุ้น

อีกหนึ่งวิธีการที่ใช้ในการระบุจุดที่มีการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสคือการนำเอาโครงข่ายประสาทเทียมเข้ามาประยุกต์ใช้ ผู้นำเสนอวิธีการนี้กล่าวว่าวิธีการนี้มีจุดเด่นตรงที่สามารถทำงานได้โดยไม่ต้องทราบคุณสมบัติของหม้อแปลงกระแส ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องมีการทดสอบคุณลักษณะของหม้อแปลง ระบบการตรวจจับสามารถเรียนรู้จำได้ว่า ลักษณะรูปร่างของสัญญาณกระแสแบบใดคือสัญญาณขณะหม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัว ข้อด้อยของวิธีการตรวจจับด้วย

วิธีการนี้คือ ระบบตรวจจับการล้มตัวจะต้องผ่านการฝึกฝนด้วยสัญญาณกระแสหลายรูปแบบ และหากมีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ เกิดขึ้นกับระบบการตรวจวัดหลังจากที่มีการฝึกฝนแล้ว เช่น มีรีเลย์บางตัวซึ่งต่ออนุกรมอยู่กับหม้อแปลงกระแสถูกดึงออกไปซ่อมบำรุง หรือมีการเปลี่ยนแปลงนำอุปกรณ์ตัวใหม่เข้ามาทดแทน จะทำให้ภาระ (Burden) ของหม้อแปลงกระแสมีการเปลี่ยนแปลง กระบวนการ ฝึกฝนของโครงข่ายประสาทเทียมจะต้องเริ่มฝึกใหม่ทั้งหมด

2.12 การปรับปรุงสัญญาณกระแสให้กลับมีสภาพดีดังเดิม

หลังจากที่ได้ทำการตรวจจับการล้มตัวของหม้อแปลงกระแสแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการปรับปรุงสัญญาณที่ผิดเพี้ยนให้กลับมาเป็นสัญญาณที่มีคุณภาพดีดังเดิม โดยในการแก้ปัญหานั้นมีหลากหลายวิธีการ สามารถแบ่งกลุ่มวิธีการในการแก้ปัญหาได้สี่กลุ่มตามขั้นตอนที่เข้าไปแก้ปัญหา ดังแสดงในภาพที่ 2-28 คือ กลุ่มแรกจะมีการแก้ปัญหที่ตัวหม้อแปลงกระแส กลุ่มที่สองจะทำการแก้ปัญหที่ระดับรูปร่างของสัญญาณกระแส โดยทำการกู้ข้อมูลสัญญาณกระแสคืนมา กลุ่มที่สามจะแก้ปัญหในระดับการคำนวณค่าขนาดของสัญญาณกระแส กลุ่มสุดท้ายยกกลุ่มที่สี่จะแก้ปัญหของการล้มตัวของหม้อแปลงกระแสที่ระดับการตัดสินใจของรีเลย์ป้องกัน โดยการปรับปรุงคุณลักษณะของรีเลย์ให้มีเสถียรภาพขณะเกิดการล้มตัวของสัญญาณกระแส [6]



ภาพที่ 2-28 การแก้ไขปัญหการล้มตัวของหม้อแปลงกระแส

2.12.1 กลุ่มที่ 1 การแก้ปัญหาที่ตัวหม้อแปลงกระแส

ในยุคก่อนที่จะมีเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์หรือเทคโนโลยีไมโครคอมพิวเตอร์ มีการแก้ปัญหาคำถามของหม้อแปลงกระแสด้วยการออกแบบให้แกนของหม้อแปลงมีขนาดใหญ่ วิธีการนี้เป็นวิธีการที่ต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูง แม้จะสามารถช่วยลดความเสี่ยงการล้มตัว อันเนื่องมาจากสัญญาณกระแสขนาดสูงได้ แต่ก็ไม่สามารถแก้ปัญหาคำถามของหม้อแปลงกระแสอันเนื่องมาจากองค์ประกอบสัญญาณกระแสตรงได้ หลังจากที่เริ่มมีเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ ในปี ค.ศ. 1978 ได้มีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์กับการแก้ปัญหาคำถามของหม้อแปลงกระแส โดยการป้อนสัญญาณกระแสตรงเข้าไปที่ขดลวดทุติยภูมิเพื่อหักล้างกับเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากองค์ประกอบกระแสตรงในขดลวดปฐมภูมิ [5] การแก้ปัญหาคำถามด้วยวิธีการนี้มีจุดด้อยตรงที่ต้องใช้แหล่งจ่ายกระแสควบคุมซึ่งมีความซับซ้อนและความยุ่งยากในการติดตั้งสูง หลังจากที่เทคโนโลยีการประมวลผลสัญญาณเริ่มมีอิทธิพลต่อวงการวิศวกรรม วิธีการแก้ปัญหาคำถามของหม้อแปลงกระแสในกลุ่มที่สอง สาม และสี่ จึงเริ่มได้รับการคิดค้นขึ้น

2.12.2 กลุ่มที่ 2 การแก้ปัญหาคำถามที่ระดับรูปร่างของสัญญาณกระแส

การแก้ปัญหาคำถามของกลุ่มนี้มีอยู่หลายวิธี วิธีการแรกเป็นการนำเอาสัญญาณกระแสที่ผิดเพี้ยนมาทำการคำนวณหาค่าเส้นแรงแม่เหล็ก แล้วนำค่าเส้นแรงแม่เหล็กคำนวณย้อนกลับไปที่ค่ากระแสฟลักซ์ปฐมภูมิโดยใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสนามแม่เหล็กกับค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก [7, 8, 9, 10, 11], [22] วิธีการนี้ให้ประสิทธิภาพการกู้ข้อมูลในระดับที่ดีมาก แต่ในกระบวนการคำนวณหาค่ากระแสนั้นจำเป็นจะต้องทราบค่าภาระ (Burden) ของหม้อแปลงกระแสนั้นหมายความว่าหากภาระของหม้อแปลงกระแสมีการเปลี่ยนแปลง จะต้องมีการเปลี่ยนการตั้งค่าของรีเลย์ใหม่ทุกครั้ง และที่สำคัญจะต้องนำหม้อแปลงกระแสไปผ่านกระบวนการทดสอบเพื่อให้ได้มาซึ่งกราฟคุณสมบัติของหม้อแปลงกระแสที่ถูกต้องและแม่นยำ มิเช่นนั้นการกู้ข้อมูลสัญญาณกระแสจะเกิดความคลาดเคลื่อน

บางผลงานวิจัยใช้การกู้ข้อมูลสัญญาณกระแสด้วย Regression Technique [12] วิธีการนี้ไม่ต้องใช้กราฟคุณสมบัติของหม้อแปลงกระแส แต่จะต้องใช้กระบวนการคำนวณที่ยุ่งยากมาก มีการหาค่าส่วนกลับของเมทริกซ์ขนาด 6×6 ภาระการคำนวณที่หนักมากทำให้ไม่เหมาะกับงานของการป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง

การกู้ข้อมูลสัญญาณกระแสที่เกิดการล้มตัวโดยการใช้ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligent) เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่มีการนำเสนอ วิธีการนี้มีจุดเด่นที่ไม่จำเป็นต้องทราบกราฟคุณลักษณะของหม้อแปลงกระแส แต่ก็มีข้อด้อยเช่นเดียวกับกรณีของการใช้ปัญญาประดิษฐ์ในการตรวจจับการล้มตัวคือจะต้องทำการฝึกให้โครงข่ายประสาทเทียมใหม่ทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนแปลงของระบบที่ติดต่อกับหม้อแปลงกระแส และปัญหาคำถามสำคัญในการฝึกโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อกู้ข้อมูลสัญญาณ

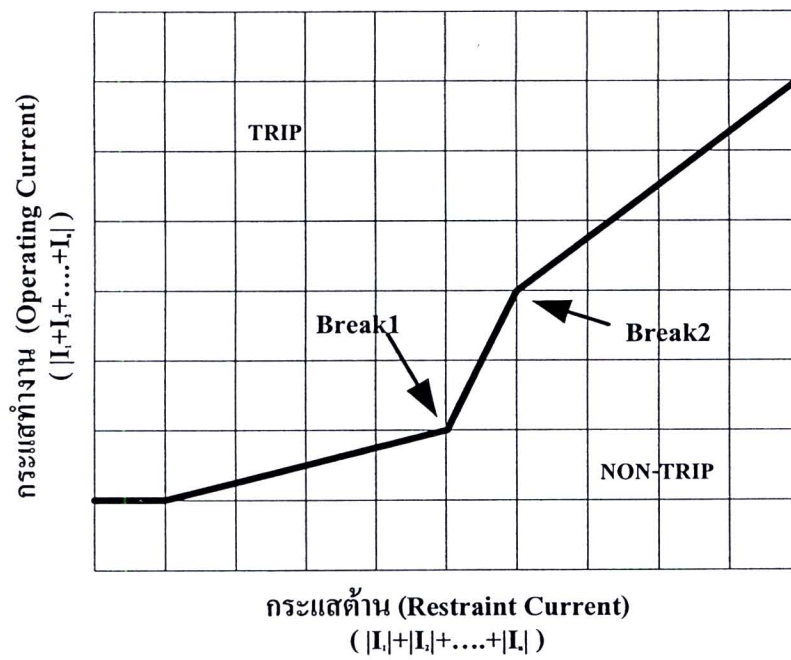
กระแสนั้น จะต้องใช้สัญญาณทดสอบทั้งกรณีที่เกิดและไม่เกิดอิมพัลส์ของหม้อแปลง ครอบคลุมในทุกกรณี ทั้งมีและไม่มีองค์ประกอบของสัญญาณกระแสตรง ทั้งมีและไม่มีสนามแม่เหล็กตกค้างในแกนของหม้อแปลง ซึ่งในทางปฏิบัติไม่สามารถทำได้ เนื่องจากไม่สามารถควบคุมปริมาณการตกค้างของสนามแม่เหล็กในแกนของหม้อแปลงได้ และไม่สามารถสร้างสัญญาณกระแสทดสอบที่มีขนาดสูงมากเพื่อใช้ในการทดสอบ ถึงแม้จะสร้างได้ก็ยากที่จะตรวจวัดสัญญาณกระแสที่ไม่มีการอิมพัลส์ได้ ด้วยเหตุผลเหล่านี้จึงเป็นเหตุให้ผู้ทดลองการกู้ข้อมูลสัญญาณกระแสทำได้เพียงแต่การจำลองทางคอมพิวเตอร์เท่านั้น ซึ่งในการจำลองจำเป็นต้องทราบแบบจำลองหรือกราฟคุณลักษณะของหม้อแปลง การที่ต้องใช้แบบจำลองของหม้อแปลงกระแสทำให้จุดเด่นของวิธีการนี้ถูกกลดทอนลงไป

2.12.3 กลุ่มที่ 3 การแก้ปัญหาที่ระดับค่าขนาดของสัญญาณกระแส

การกู้สัญญาณขนาดของกระแสนั้นถูกออกแบบมาเพื่อใช้สำหรับรีเลย์ป้องกันโดยเฉพาะ [19, 20] เนื่องจากรีเลย์ป้องกันหลายชนิดใช้ขนาดของสัญญาณกระแสในการประเมินสถานะว่าขณะนั้นมีความผิดปกติเกิดขึ้นหรือไม่ โดยในการกู้ข้อมูลนั้นจะใช้คุณสมบัติของสัญญาณกระแสที่ไม่มีการอิมพัลส์ ที่ในห้วงระยะเวลาสั้น ๆ ขนาดของกระแสคุณภาพดีจะมีค่าคงที่ ดังนั้นในช่วงเวลาที่สัญญาณกระแสเกิดการอิมพัลส์ ค่าขนาดของกระแสจะถูกค้ำค่าไว้ที่ขนาดของสัญญาณกระแสก่อนเกิดการอิมพัลส์ ข้อดีของการกู้ข้อมูลด้วยวิธีแบบนี้คือใช้กระบวนการการคำนวณที่ไม่ซับซ้อนทำให้เหมาะกับการทำงานแบบเวลาจริง (Real-time) ของรีเลย์ป้องกัน อัลกอริทึมที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ก็จัดอยู่ในกลุ่มวิธีการกู้ข้อมูลกลุ่มนี้เช่นกัน

2.12.4 กลุ่มที่ 4 การแก้ปัญหาที่ระดับการตัดสินใจของรีเลย์ป้องกัน

กลุ่มของการแก้ปัญหาของการอิมพัลส์ของหม้อแปลงกระแสนี้ถูกออกแบบมาเพื่อใช้กับรีเลย์ผลต่าง โดยในการทำงานจะไม่ได้ทำการแก้ไขหรือปรับปรุงสัญญาณกระแส แต่จะปรับปรุงที่กระบวนการการตัดสินใจของรีเลย์ให้มีเสถียรภาพต่อการอิมพัลส์ของสัญญาณกระแส ภาพที่ 2-29 แสดงวิธีการตั้งค่าการทำงานของรีเลย์ผลต่างร้อยละ โดยกำหนดให้ที่กระแสด้านมีค่าสูงกว่าจุด Break1 เส้นแบ่งการตัดสินใจจะมีระดับและความชันที่สูงขึ้น ส่งผลให้รีเลย์ผลต่างร้อยละมีเสถียรภาพสูงขึ้นในขณะที่หม้อแปลงกระแสมีการอิมพัลส์ แต่ในการกำหนดตำแหน่ง Break1 นั้น จำเป็นจะต้องทราบกราฟคุณลักษณะของหม้อแปลงกระแสซึ่งได้มาจากการทดสอบ และวิธีการดังกล่าวนี้ไม่สามารถแก้ปัญหาในกรณีการอิมพัลส์ของหม้อแปลงกระแสจากองค์ประกอบสัญญาณกระแสตรงได้ เนื่องจากกราฟคุณลักษณะนั้น เป็นการแสดงคุณลักษณะในกรณีที่กระแสน้ำเข้าเป็นสัญญาณกระแสสลับเท่านั้น



ภาพที่ 2-29 คุณลักษณะการตัดสินใจปลดวงจรของรีเลย์ผลต่างที่มีเสถียรภาพต่อการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสอันเนื่องมาจากองค์ประกอบกระแสสลับขนาดสูง