สำนักงานวิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

เทคนิคขั้นตอนวิธีตรวจจับการเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง

การเพิ่มความสามารถในการตรวจจับการเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงเข้ากับการป้องกันสายป้อนทั่วไป เป็นสิ่งที่ต้องพิจารณาอย่างยิ่ง การตรวจจับการลัดวงจรชนิดนี้จะแตกต่างจากการป้องกันระบบจำหน่ายทั่วไป และทำให้การออกแบบระบบป้องกันมีความซับซ้อนมากขึ้น ซึ่งเป็นสิ่งที่จะต้องมีการพิจารณาอย่างระมัดระวัง เนื่องจากการตรวจจับที่มีความไวต่อการเกิดลัดวงจรลักษณะนี้ จะมีผลกระทบต่อจำนวนและระยะเวลาการเกิดไฟฟ้าดับในสายป้อน ปัจจุบันมีการพัฒนาคิดค้นเทคนิควิธีการตรวจจับการลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงที่มีความสามารถในการแยกแยะและป้องกันอันตรายที่อาจเกิดจากการลัดวงจรลักษณะดังกล่าวได้

3.1 เงื่อนไขทางไฟฟ้าที่ใช้ในการตรวจรับรู้

เมื่อเกิดเหตุการณ์สายตัวนำขาดตก (downed conductor) สามารถเกิดเงื่อนไขทางไฟฟ้าได้ 8 กรณี ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ ได้ดังนี้

3.1.1 สายตัวนำขาด (Broken conductor)

เหตุการณ์ในกลุ่มนี้ จะหมายถึงตัวนำในสายป้อนตั้งแต่หนึ่งเส้นขึ้นไปมีการขาดหรือเปิดวงจรออก ซึ่งสามารถเป็นได้ทั้งเกิดสายขาดตามช่วงระยะระหว่างเสา ทั้งที่ขาดเพียงจุดเดียวหรือสองจุด ซึ่งปลายสายที่ขาดอาจมีการสัมผัสกับวัตถุต่าง ๆ เช่น พื้นดิน ต้นไม้ หรือวัตถุอื่นที่เป็นทางผ่านลงดิน เมื่อเกิดสายตัวนำขาด จะส่งผลให้เกิดเงื่อนไขทางไฟฟ้าได้ 4 รูปแบบ คือ

- เงื่อนไขที่ 1 ไม่เกิดการสัมผัสกับพื้น
- เงื่อนไขที่ 2 ปลายสายที่ขาดด้านโหลดมีการสัมผัสพื้นและไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลย้อนจากหม้อแปลงจำหน่าย
- เงื่อนไขที่ 3 ปลายสายที่ขาดด้านโหลดมีการสัมผัสพื้นและมีกระแสไฟฟ้าไหลย้อนจากหม้อแปลงจำหน่าย
- เงื่อนไขที่ 4 ปลายสายที่ขาดด้านแหล่งจ่ายมีการสัมผัสพื้นที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูง

3.1.2 สายตัวนำหย่อน (Sagging or fallen conductor)

เหตุการณ์ในกลุ่มนี้จะต่างกับเหตุการณ์ในกลุ่มแรก โดยกล่าวถึงสายตัวนำเปลือยเป็นส่วนใหญ่ซึ่งสายตัวนำไม่ขาด ดังนั้นกระแสในสายยังคงไหลได้อย่างต่อเนื่อง เหตุการณ์นี้อาจเกิดจากเสาบางต้นหัก คอนเสาหลุดออกจากเสาหรืออุปกรณ์ที่ใช้ยึดสาย เช่น ลูกถ้วยแตก ชำรุด

เป็นเหตุให้ตัวนำหย่อนลงมา ซึ่งอาจสัมผัสกับ พื้นดิน กิ่งไม้ พุ่มไม้ หรืออาจเป็นวัตถุอื่น เมื่อเกิดสายตัวนำหย่อนอาจเกิดเงื่อนไขทางไฟฟ้าได้ 2 รูปแบบ คือ

- เงื่อนไขที่ 5 ไม่เกิดการสัมผัสกับพื้นหรือพื้นมีอิมพีแดนซ์ค่าสูง
- เงื่อนไขที่ 6 มีการสัมผัสกับพื้นที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ

3.1.3 **สายตัวนำมีการสัมผัสกับวัตถุอื่น**

เหตุการณ์ในกลุ่มนี้ จะหมายถึงสายตัวนำเปลือย ซึ่งสายตัวนำไม่เสียหายและยังจ่ายพลังงานได้ปกติ แต่อาจเกิดการสัมผัสกับต้นไม้ ป้ายโฆษณา โคมไฟถนน หรือวัตถุใกล้เคียง เป็นต้น และอาจรวมถึงกรณีฉนวนหุ้มสายเสื่อมสภาพ ชำรุด (cracked insulator) ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ารั่วไหล โดยยังคงมีความสามารถในการจ่ายโหลดได้ เมื่อเกิดเหตุการณ์สายตัวนำมีการสัมผัสกับวัตถุอื่น อาจเกิดเงื่อนไขทางไฟฟ้าได้ 2 รูปแบบ คือ

- เงื่อนไขที่ 7 สายตัวนำสัมผัสกับวัตถุที่มีเส้นทางผ่านลงดินคั่นด้วยวัสดุคุณสมบัติเป็นฉนวน ซึ่งมีลักษณะเป็นการลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง เช่น สายตัวนำสัมผัสยาง ต้นไม้ อาคารก่อสร้าง เป็นต้น
- เงื่อนไขที่ 8 มีการสัมผัสกับวัตถุที่ค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ

3.2 วิธีการตรวจจับเหตุการณ์ลัดวงจร

3.2.1 กลุ่มเทคนิควิธีการตรวจจับ

จากการพิจารณาเงื่อนไขทางไฟฟ้าทั้ง 8 เงื่อนไขที่เกิดขึ้น [15] สามารถรวบรวมเทคนิควิธีการในการตรวจจับ โดยมีการจำแนกออกเป็น 5 กลุ่มใหญ่ ดังนี้

กลุ่มที่ 1 การตรวจจับเหตุการณ์ลัดวงจรลงดินด้วยการวัดค่าสัญญาณไฟฟ้าที่ความถี่กำลัง (50 เฮิรตซ์) วิธีการนี้จะเป็นการวัดค่าปริมาณต่างๆ ที่ความถี่กำลังทางด้านแหล่งจ่ายของตำแหน่งลัดวงจร โดยทำเพิ่มเติมจากการป้องกันกระแสเกินทั่วไปที่ใช้ในระบบจำหน่าย วิธีที่ง่ายที่สุดจะใช้เทคนิคการวัดกระแสกราวด์ เมื่อกระแสกราวด์เกินกว่าระดับที่ตั้งไว้จะสามารถรับรู้ได้ว่าเกิดลัดวงจรขึ้น และยังมีวิธีอื่นที่มีความไวในการตรวจจับมากกว่า แต่การวัดจะมีความซับซ้อนขึ้น เช่น วิธีการตรวจจับโดยอาศัยค่าอัตราส่วนของกระแสลำดับ (sequence current) หรือพิจารณาทั้งกระแสและแรงดันในรูปแบบของการวัดอิมพีแดนซ์หรือแอดมิตแตนซ์ เป็นต้น

กลุ่มที่ 2 การตรวจจับการหายไปของค่าศักย์ไฟฟ้า การตรวจจับวิธีนี้ จะใช้ตรวจจับสายตัวนำไฟฟ้าขาด โดยเมื่อเกิดสายตัวนำไฟฟ้าขาดแรงดันด้านโหลดจะหายไป เมื่อไม่มีการจ่ายพลังงานแก่ด้านโหลด จะมีการส่งสัญญาณจากด้านโหลดผ่านระบบสื่อสารกลับมายังสถานีย่อย

กลุ่มที่ 3 การตรวจจับองค์ประกอบของสัญญาณที่มีความถี่ที่มิใช่ความถี่มูลฐาน เมื่อเกิดการลัดวงจรที่เกิดจากตัวนำขาดตก (downed conductor) จะเกิดฮาร์มอนิกและสัญญาณรบกวนขึ้นในระบบ มีงานวิจัยหลายฉบับได้ทำการศึกษา ทดลองและมีการยืนยันถึงความเป็นไปได้ในการวัดปริมาณทางไฟฟ้าที่มิใช่ความถี่มูลฐานเพื่อตรวจจับการลัดวงจรลักษณะดังกล่าว

กลุ่มที่ 4 การตรวจจับโดยการวิเคราะห์ผลตอบสนองต่อการจ่ายสัญญาณเข้าระบบ วิธีการตรวจจับในกลุ่มนี้จะอาศัยการวัดผลตอบสนองของสายตัวนำ โดยใช้สัญญาณจากภายนอก เช่น ใช้การสะท้อนกลับของพัลส์ (pulse echo) ในการแยกแยะจุดปลายสายตัวนำซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดในตำแหน่งที่สายขาด หรืออีกวิธีคือ การจ่ายสัญญาณความถี่สูงเข้าไปและวัดผลตอบสนองของสาย ซึ่งเมื่อเลือกใช้สัญญาณที่เหมาะสมจะทำให้มีความไวต่อการตรวจจับการลัดวงจรมากกว่าการตรวจวัดด้วยความถี่มูลฐาน

กลุ่มที่ 5 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อเพิ่มระดับปริมาณกระแสไฟฟ้าลัดวงจรขณะสายตัวนำขาด วิธีการนี้จะทำให้การลัดวงจรที่ตรวจจับยากสามารถตรวจจับได้ง่ายขึ้นด้วยอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินทั่วไป เช่น เพิ่มแท่งโลหะสองถึงสามชุดเข้าที่ตัวนำนิวทรัลในแต่ละช่วงเสา ซึ่งแท่งโลหะดังกล่าวจะตั้งฉากกับสายนิวทรัล เมื่อเกิดสายตัวนำขาด ตัวนำจะตกลงสัมผัสแท่งโลหะส่งผลให้เกิด การลัดวงจรลงดินที่มีกระแสสูงและอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินสามารถทำงานได้

3.2.2 ความเป็นไปได้ในการตรวจจับ

เหตุการณ์สายตัวนำขาดอาจเป็นไปตามเงื่อนไขทางไฟฟ้าข้อใดข้อหนึ่งใน 8 ข้อที่กล่าวมาข้างต้น ในขณะที่วิธีการตรวจจับเหตุการณ์สายตัวนำขาดมีให้เลือกใช้ 5 กลุ่ม [15] แต่วิธีการตรวจจับเหตุการณ์สายตัวนำขาดในแต่ละกลุ่มมีความสามารถในการตรวจจับเงื่อนไขทางไฟฟ้าในแต่ละข้อที่แตกต่างกัน รายละเอียดแสดงในตารางที่ 3.1 ยกตัวอย่างเช่น วิธีการตรวจจับในกลุ่มที่ 2 เป็นวิธีการตรวจจับเหตุการณ์สายตัวนำขาดโดยตรวจสอบการหายไปของค่าศักย์ไฟฟ้า วิธีการตรวจจับในกลุ่มนี้สามารถใช้ตรวจหาเหตุการณ์สายตัวนำขาดตามเงื่อนไขทางไฟฟ้าข้อที่ 1 จนถึงข้อที่ 4 ได้เท่านั้น แต่ไม่สามารถใช้ในการตรวจหาเหตุการณ์สายตัวนำหย่อน และสายตัวนำมีการสัมผัสกับวัตถุอื่นตามเงื่อนไขทางไฟฟ้าข้อที่ 5 จนถึงข้อที่ 8 ได้ ส่วนการตรวจจับสายตัวนำหย่อนที่ไม่มีการสัมผัสสิ่งใดเลย จะมีเพียงวิธีในกลุ่มที่ 5 เท่านั้น ที่สามารถตรวจจับได้

ตารางที่ 3.1 ความเป็นไปได้ในการนำวิธีการตรวจจับเหตุการณ์สายตัวนำไฟฟ้าขาดในแต่ละกลุ่มตามเงื่อนไขทางไฟฟ้าที่แบ่งตามชนิดของการลัดวงจรกรณีที่ 1 ถึง 8

ชนิดของการลัดวงจร	วิธีการตรวจจับ				
	กลุ่มที่ 1	กลุ่มที่ 2	กลุ่มที่ 3	กลุ่มที่ 4	กลุ่มที่ 5
สายตัวนำขาด					
1.ไม่มีการสัมผัสพื้น	N	Y	N	Y	Y
2.มีการสัมผัสพื้นด้านโหลดไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลย้อนจากหม้อแปลง	N	Y	N	Y	Y
3.มีการสัมผัสพื้นด้านโหลดมีกระแสไฟฟ้าไหลย้อนจากหม้อแปลง	Y	Y	Y	Y	Y
4.มีการสัมผัสพื้นด้านแหล่งจ่าย	Y	Y	Y	Y	Y
สายตัวนำหย่อน					
5.ไม่มีการสัมผัสพื้น	N	N	N	N	Y
6.มีการสัมผัสพื้น	Y	N	Y	Y	Y
สายตัวนำมีการสัมผัสกับวัตถุอื่น					
7.มีอิมพีแดนซ์ค่าสูง	Y	N	Y	Y	N
8.มีอิมพีแดนซ์ค่าต่ำ	Y	N	Y	Y	N

หมายเหตุ กลุ่มที่ 1 การตรวจจับเหตุการณ์ลัดวงจรลงดินด้วยการวัดค่าที่ความถี่กำลัง

กลุ่มที่ 2 การตรวจจับการหายไปของค่าศักย์ไฟฟ้า

กลุ่มที่ 3 การตรวจจับองค์ประกอบของสัญญาณที่มีความถี่ที่มิใช่ความถี่มูลฐาน

กลุ่มที่ 4 การตรวจจับโดยการวิเคราะห์ผลตอบสนองจากการจ่ายสัญญาณเข้าระบบ

กลุ่มที่ 5 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อเพิ่มปริมาณกระแสไฟฟ้าลัดวงจรขณะสายตัวนำขาด

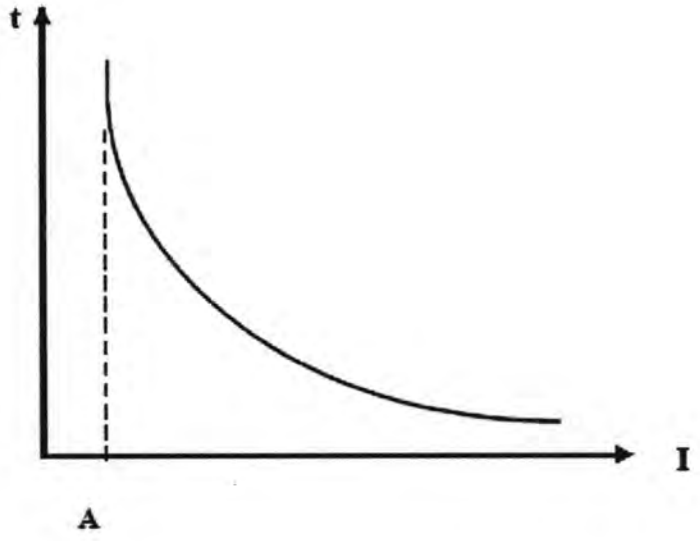
Y หมายถึง สามารถตรวจจับการลัดวงจรได้

N หมายถึง ไม่สามารถตรวจจับการลัดวงจรได้

3.3 ความไวในการตรวจจับ

ความไวในการตรวจจับของรีเลย์จะมีผลโดยตรงต่อความสามารถในการตรวจจับการเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง จากรูปที่ 3.1 ในสภาวะที่เกิดการลัดวงจรที่มีค่ากระแสไฟฟ้าสูง เช่น

ทางด้านขวาของจุด A จะสามารถตรวจจับกระแสไฟฟ้าลัดวงจรได้รวดเร็วกว่า แต่เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มีค่ากระแสไฟฟ้าต่ำ ดังลักษณะเช่น การลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง จะต้องใช้เวลาในการตรวจจับนานขึ้น ซึ่งจะมีข้อจำกัดเมื่อกระแสไฟฟ้าลัดวงจรมีค่าต่ำมาก เช่นที่จุด A หรือทางด้านซ้ายของจุด A ซึ่งจะเป็นกรณีที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูงมาก โดยอุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดิน (กราวด์รีเลย์) ที่มีคุณสมบัติดังรูปที่ 3.1 จะไม่สามารถตรวจจับกระแสไฟฟ้าที่จุด A ได้ (ใช้เวลาเป็นอนันต์)

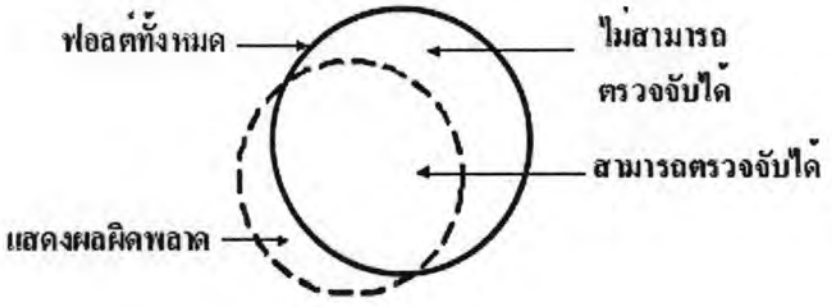


รูปที่ 3.1 คุณลักษณะของกระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลาการทำงานของรีเลย์

ในการปรับตั้งค่าการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดิน จะมีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถปรับตั้งให้มีค่าต่ำๆ ได้ โดยจะต้องคำนึงถึงกระแสโหลดเต็มพิกัดเป็นหลัก นั่นคือการปรับตั้งค่าการทำงานจะต้องมีค่าสูงกว่ากระแสโหลดเต็มพิกัดประมาณ 1.5 เท่า ซึ่งอาจทำให้รีเลย์มีความไวไม่เพียงพอที่จะตรวจจับ หรืออาจต้องใช้เวลานานเกินไป ซึ่งไม่เหมาะสมสำหรับกรณีของการลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง เนื่องจากพฤติกรรมของการเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงจะทำให้คุณลักษณะของกระแสไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่แน่นอน ซึ่งบางครั้งเมื่อเกิดสายตัวนำไฟฟ้าขาดจะเริ่มมีกระแสไฟฟ้าลัดวงจรค่าสูงก่อน แต่เมื่อเกิดอาร์กกับพื้นดิน ทำให้เกิดความร้อนแผ่ไปในพื้นดินบริเวณโดยรอบ เป็นผลให้ความชื้นถูกขจัดออกไปจนดินบริเวณนั้นแห้ง เป็นผลให้ความต้านทานดินบริเวณดังกล่าวเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรจึงมีค่าลดต่ำลง โดยหากเหตุการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นเป็นเวลานานอาจทำให้อุปกรณ์ตรวจจับไม่สามารถตอบสนองต่อการเกิดลัดวงจรลักษณะดังกล่าวได้

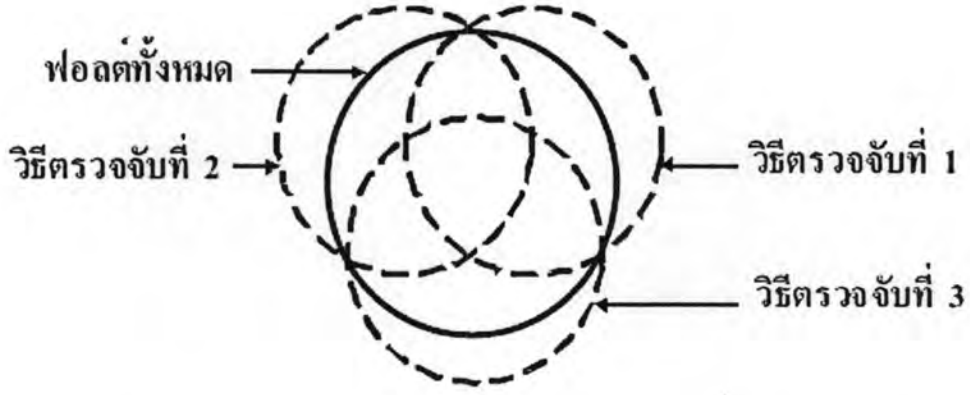
3.4 ความครอบคลุมในการตรวจจับ

เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 3.1 จะพบว่าวิธีการวัดเพียงชนิดใดชนิดหนึ่ง ไม่สามารถตรวจจับเงื่อนไขทางไฟฟ้าทั้งหมดได้ ในขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาเหตุการณ์ชนิดของสายตัวนำขาดทั้งหมดที่มีโอกาสเกิดขึ้น ความเป็นไปได้ของผลลัพธ์จากการตรวจจับโดยแต่ละวิธีแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบด้วยกันคือ กลุ่มเหตุการณ์ลัดวงจรที่ไม่สามารถตรวจจับได้ กลุ่มเหตุการณ์ลัดวงจรที่สามารถตรวจจับได้และกลุ่มเหตุการณ์ที่วิธีตรวจจับแสดงผลผิดพลาด ปรากฏความสัมพันธ์ตามรูปที่ 3.2 พื้นที่ในวงกลมเส้นทึบ แทนเงื่อนไขทางไฟฟ้าทั้งหมดที่สามารถเกิดขึ้นได้ ส่วนวงกลมเส้นประแทนวิธีการตรวจวัดที่ครอบคลุมอยู่ แต่ก็อาจจะมีส่วนที่อยู่นอกพื้นที่จากวงกลม 2 วงทับกันอยู่ซึ่งจะหมายถึงส่วนที่แสดงผลผิดพลาดและไม่สามารถตรวจจับได้



รูปที่ 3.2 วิธีการตรวจจับเพียงวิธีเดียวจะครอบคลุมการเกิดลัดวงจรบางกรณี

วิธีที่จะบรรลุถึงการตรวจจับเหตุการณ์สายตัวนำขาดตกพื้นให้มีประสิทธิภาพ ทำได้โดยการลดพื้นที่ของวงกลมเส้นประให้เล็กลงจนกระทั่งไม่เกิดการแสดงผลที่ผิดพลาด ส่วนอีกวิธีคือการนำเทคนิคการวัดที่มากกว่า 1 รูปแบบ มาใช้งานพร้อมๆ กัน ดังในรูปที่ 3.3 วิธีนี้จะสามารถครอบคลุมเงื่อนไขการเกิดลัดวงจรได้ทุกชนิด ซึ่งถ้าต้องการให้การตรวจจับมีความสมบูรณ์มากขึ้นจะต้องทำให้การทำงานที่ผิดพลาดเกิดขึ้นน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ในทางกลับกันถ้าเกิดเหตุการณ์สายตัวนำหย่อน (fallen conductor) ก็อาจให้แสดงผลเฉพาะสัญญาณเตือนที่ศูนย์ควบคุมเท่านั้นโดยไม่จำเป็นต้องมีการตัดวงจรที่สายป้อน



รูปที่ 3.3 วิธีการตรวจจับมากกว่า 1 รูปแบบ สามารถครอบคลุมการเกิดลัดวงจรได้ทั้งหมด

3.5 จุดมุ่งหมายของการตรวจจับการเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง

ในระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีการออกแบบระบบป้องกันกระแสเกิน เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับสายตัวนำ หรือบริภัณฑ์ไฟฟ้าต่างๆ จากการไหลของกระแสไฟฟ้าลัดวงจรค่าสูงที่อาจทำให้สายตัวนำหลอมละลาย เป็นต้น ดังนั้นระบบป้องกันกระแสเกินจึงมีบทบาทในการช่วยป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้าไม่ให้ได้รับความเสียหายจากกระแสไฟฟ้าลัดวงจรค่าสูงเป็นเวลานานเกินกว่าที่บริภัณฑ์ไฟฟ้าจะทนได้ ในทางกลับกันการเกิดเหตุการณ์สายตัวนำไฟฟ้าขาดตกลงพื้นบ่อยครั้งไม่ได้ทำให้บริภัณฑ์ไฟฟ้าได้รับความเสียหาย แต่เหตุการณ์ดังกล่าวจะก่อให้เกิดผลกระทบทางด้านความปลอดภัยต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชน ดังนั้นวัตถุประสงค์หลักของการตรวจจับการลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงก็คือ เพื่อความปลอดภัยต่อชีวิตและทรัพย์สินเป็นสำคัญ

3.6 เงื่อนไขที่บ่งบอกสภาวะที่ไม่ปลอดภัย

จุดมุ่งหมายของการตรวจจับเหตุการณ์ลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงคือ การตรวจจับและดำเนินการขจัดสภาวะที่ไม่ปลอดภัยต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชน นับว่าเป็นความท้าทายอย่างยิ่งในการที่จะหาวิธีตรวจจับสภาวะดังกล่าวได้อย่างเหมาะสม ทั้งนี้เพราะสภาวะปลอดภัยหรือไม่ปลอดภัยไม่สามารถกำหนดตามค่าเชิงปริมาณที่วัดได้ โดยสามารถทำได้เพียงการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้บ่งบอกสภาวะโดยประมาณ ยกตัวอย่างเช่น ค่าเชิงปริมาณทางไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้ขณะมีเหตุการณ์สายตัวนำตก เหตุการณ์ลัดวงจรที่สายตัวนำกับเหตุการณ์เกิดอาร์กผ่าน

T 144134008

ฉนวนลูกถ้วยที่สกปรก อาจต้องการให้มีการปลดวงจรทันทีที่มีเหตุการณ์ลัดวงจรจากสายตัวนำขาด แต่ถ้าเป็นกรณีการเกิดอาร์กผ่านลูกถ้วยสกปรก อาจยอมปล่อยให้เกิดเหตุการณ์ต่อไปได้ ตราบใดที่มั่นใจว่าเหตุการณ์ดังกล่าวไม่มีผลในเรื่องความปลอดภัยต่อประชาชน กล่าวโดยสรุปคือ เหตุการณ์ลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงบางรูปแบบยอมรับได้ ในขณะที่บางรูปแบบไม่สามารถยอมรับได้ กรอบแนวคิดในการพิจารณาว่าจะให้มีการป้องกันเพื่อตรวจจับเหตุการณ์สายตัวนำขาดหรือไม่ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น สายป้อนที่อยู่ในบริเวณใกล้ชุมชนที่มีผู้คนอยู่หนาแน่น อาจได้รับการพิจารณาเลือกให้มีการป้องกันเพื่อให้มั่นใจในความปลอดภัย ในทางกลับกันสายป้อนที่อยู่ในบริเวณห่างไกลชุมชนนั้นความจำเป็นของการมีระบบป้องกันตรวจจับการลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงอาจจะมีความสำคัญน้อยกว่า การเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงที่เกิดขึ้นจะยอมรับได้หรือไม่นั้นขึ้นอยู่กับสภาพความเป็นจริง ณ ตำแหน่งของจุดที่เกิดเหตุ ซึ่งอยู่ไกลจากสถานที่ติดตั้งของอุปกรณ์ตรวจจับที่สถานีย่อย ดังนั้นจึงเป็นการยากที่อุปกรณ์ตรวจจับจะสามารถแยกแยะความแตกต่างได้อย่างชัดเจน หลักเกณฑ์ในการพิจารณาว่ามีความปลอดภัยหรือไม่สามารถพิจารณาได้จาก

- ตัวนำตกลงบนพื้นหรือตกอยู่ใกล้พื้น
- ตัวนำตกลงบริเวณเขตชุมชนหรือบริเวณที่มีผู้คนอาศัยอยู่หรือไม่
- มีวัตถุใกล้เคียงที่จะทำให้ติดไฟลุกไหม้หรือไม่

ถึงแม้ว่าจะมีวิธีการต่างๆ ในการตรวจจับ แต่ก็ยังคงมีการเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงบางลักษณะที่ไม่สามารถตรวจจับได้

3.7 ตำแหน่งการเกิดลัดวงจร

เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงบนสายป้อนขึ้น การหาตำแหน่งการลัดวงจรทำได้ยากมากเนื่องจากมีลักษณะการสัมผัสลงดินแบบไม่ต่อเนื่อง โดยทั่วไปแล้วการลัดวงจรลักษณะนี้จะเกี่ยวข้องกับเหตุการณ์สายตัวนำขาด ซึ่งอาจขาดที่อุปกรณ์ยึดขั้วสาย ดังนั้นจึงต้องใช้เครื่องมือช่วยหาตำแหน่งการลัดวงจร เช่น อุปกรณ์หาสัญญาณรบกวนแบบคลื่นวิทยุ (RF direction finder) ซึ่งสามารถใช้หาตำแหน่งสัญญาณรบกวนคลื่นวิทยุ (RF noise) ที่เกิดเนื่องจากอาร์กได้

3.8 การจัดความสัมพันธ์ร่วมกับการป้องกันกระแสเกิน

ในการตรวจจับการลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงจะไม่เกิดปัญหากับการจัดลำดับความสัมพันธ์ร่วมกับการป้องกันกระแสเกิน เนื่องจากวัตถุประสงค์ของการป้องกันการลัดวงจรทั้งสองชนิดมีความแตกต่างกัน แต่อาจมีปัญหาคาบเกี่ยวกันในการทำงานกรณีสำหรับการลัดวงจรที่

เกิดจากตัวนำขาดตกที่มีลักษณะทำให้กระแสลัดวงจรมีค่าสูงได้ ในการใช้งานอุปกรณ์ตรวจจับการลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงร่วมกับอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกิน จะต้องมีช่วงเวลาที่รอให้อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินด้านปลายทาง (downstream) ทำงานก่อน เพื่อทำให้สัดส่วนการเกิดไฟฟ้าดับน้อยที่สุด แต่หากเลยช่วงเวลาการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินจะถือว่าอุปกรณ์ป้องกันดังกล่าวไม่รับรู้เหตุการณ์ที่เกิดขึ้น ซึ่งจะต้องเป็นหน้าที่ของอุปกรณ์ตรวจจับการลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงในการพิจารณาทำงานต่อไป

3.9 ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับการเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงและเหตุการณ์สายตัวนำขาด

3.9.1 ขั้นตอนวิธีการตรวจจับ

ในปัจจุบันได้มีการนำเสนอวิธีการต่างๆสำหรับจัดการกับปัญหาสายตัวนำในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าขาดตกพื้นที่ไม่สามารถตรวจจับได้ด้วยอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกิน ซึ่งเป็นปัญหาที่ยังคงต้องหาแนวทางแก้ไข เทคนิคบางวิธีต้องการเพียงการป้อนค่าอินพุตมาตรฐานทั่วไปทางไฟฟ้า เช่น การรับค่าแรงดันจากหม้อแปลงทดแรงดัน (VT) และรับค่ากระแสจากหม้อแปลงกระแส (CT) ให้กับรีเลย์ที่สถานีไฟฟ้าเท่านั้น แต่ก็มีบางวิธีที่ต้องใช้อุปกรณ์พิเศษเพิ่มเติมทั้งที่สถานีไฟฟ้าและที่ตำแหน่งต่างๆ ของสายป้อน หลายเทคนิควิธีได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในลักษณะของการทดลองใช้งานเชิงต้นแบบ และบางเทคนิควิธีได้มีการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ ในหัวข้อนี้ได้ทำการรวบรวมและนำเสนอเทคนิคต่าง ๆ ที่ใช้ในการตรวจจับการเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงและเหตุการณ์สายตัวนำไฟฟ้าขาดตกพื้นที่มีในปัจจุบัน

3.9.1.1 การตรวจจับโดยใช้ขนาดของกระแสฮาร์มอนิกที่สามและมุมเฟส

Hughes aircraft company [15] ได้ทำการวิจัยถึงความเป็นไปได้ในการนำกระแสเฟสฮาร์มอนิกที่สามมาใช้เป็นตัวชี้บอกเหตุการณ์การเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง ซึ่งได้รับการสนับสนุนจาก EPRI ในโครงการวิจัยหมายเลข 1285-2 โดยได้ทำการทดลองสร้างสถานการณ์สายตัวนำขาดตกลงบนพื้นในรูปแบบต่างๆ ภายในห้องปฏิบัติการ ดำเนินการในรูปแบบของระบบจำหน่ายที่สถานีต้นทางขดลวดทุติยภูมิต่อแบบวายมีจุดร่วมต่อลงดิน กับรูปแบบของระบบจำหน่ายที่สถานีต้นทางมีขดลวดทุติยภูมิต่อแบบเดลต้าซึ่งไม่มีการต่อลงดิน สำหรับการทดลองในทั้งสองรูปแบบดังกล่าวได้มีการเก็บบันทึกชุดข้อมูลรูปคลื่นแรงดันกับกระแสสำหรับกรณีสายตัวนำขาดตกลงบนพื้นในแต่ละรูปแบบ เมื่อได้ข้อมูลครบตามจำนวนสถานการณ์ที่ต้องการ จึงได้ดำเนินการวิเคราะห์เปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากสถานีไฟฟ้าทั้งสองแบบได้ข้อสรุปว่าพฤติกรรมของรูปคลื่นแรงดันกับกระแสไฟฟ้าค่อนข้างแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นอุปกรณ์ตรวจจับการ

ลัดวงจรที่จะนำมาใช้งานในระบบจำหน่ายที่มีเงื่อนไขการต่อลงดินแตกต่างกัน จะต้องมีวิธีขั้นตอนการตรวจจับแตกต่างกันด้วย ซึ่งได้มีการแยกแยะการตรวจจับในกรณีขดลวดทุติยภูมิของสถานีไฟฟ้ามีความแตกต่างกันแบ่งเป็น 2 กรณี คือ

ก. กรณีสถานีไฟฟ้าของระบบจำหน่ายมีขดลวดทุติยภูมิต่อแบบวายมีจุดร่วมต่อลงดินโดยตรง

อุปกรณ์ตรวจจับที่ออกแบบใช้กับระบบจำหน่ายที่มีจุดร่วมต่อลงดินโดยตรงมีวิธีการตรวจจับโดย กำหนดให้ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงค่าผลต่างของมุมเฟสกระแสฮาร์มอนิกที่สามแต่ละคู่เฟสทั้งสามเฟส ถ้าหากมีการตรวจพบว่ามุมเฟสกระแสฮาร์มอนิกที่สามของเฟสใดมีการเปลี่ยนแปลงค่ามุมเฟสอย่างทันทีทันใดเมื่อเทียบกับอีกสองเฟสที่เหลือ แสดงว่า ณ เวลานั้นได้มีเหตุการณ์ลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงเกิดขึ้นกับเฟสดังกล่าว แต่อาจมีสภาวะปกติบางเหตุการณ์ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงมุมเฟสกระแสฮาร์มอนิกที่สามดังนั้นเพื่อให้เกิดความแน่ชัดมากขึ้นการตัดสินใจว่าเป็นการลัดวงจรหรือไม่จะต้องมีการเพิ่มการตรวจวัดค่าขนาดมุมเฟสของกระแสความถี่มูลฐานด้วย โดยหากมุมเฟสของกระแสในเฟสใดเฟสหนึ่งเมื่อเทียบกับอีกสองเฟสที่เหลือมีการเปลี่ยนแปลงค่าผลต่างอย่างทันทีทันใด มากกว่า 15 องศา ซึ่งหากการเปลี่ยนแปลงค่ามุมดังกล่าวเกิดขึ้นที่เวลาเดียวกับกระแสโหลดในเฟสนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างน้อย 15 แอมแปร์ และเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสนี้เป็นไปอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน 5 วินาที เป็นอย่างน้อย จึงจะสรุปว่ามีการเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงเกิดขึ้น จากนั้นมีการพัฒนาออกแบบสร้างวงจรตรวจจับการเปลี่ยนค่ามุมเฟส (phase shift detectors) สำหรับใช้ในการตรวจจับเหตุการณ์ลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงที่เกิดจากสายตัวนำขาดตกลงบนพื้นตามเงื่อนไขที่ได้จากการวิเคราะห์ข้างต้น เมื่อสร้างเสร็จแล้วได้นำไปทดลองใช้งานโดยติดตั้งในห้องปฏิบัติการที่ได้จัดวางสายตัวนำและจำลองเหตุการณ์สายตัวนำขาดตกลงบนพื้น ผลการทดลองป้อนข้อมูลสัญญาณในห้องปฏิบัติการให้กับอุปกรณ์ตรวจจับมีความสามารถในการตรวจจับได้ ดังนั้นจึงได้นำไปทดลองติดตั้งในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า เพื่อประเมินผลการใช้งานในระยะยาว แต่ในระหว่างดำเนินการประเมินผลการใช้งานของอุปกรณ์ตรวจจับการลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงนั้นปรากฏว่ามีการแสดงผลผิดพลาด (false trips) 3 ครั้งต่อปีและในช่วงดำเนินการทดลองก็ไม่ปรากฏเหตุการณ์สายตัวนำขาดตกลงพื้น

ข. กรณีสถานีไฟฟ้าของระบบจำหน่ายมีขดลวดทุติยภูมิต่อแบบเดลต้า

กรณีนี้ปริมาณของฮาร์มอนิกที่สามในสภาวะปกติมีค่าค่อนข้างต่ำ ดังนั้นการวัดมุมเฟสของกระแสฮาร์มอนิกที่สามกระทำได้ค่อนข้างยาก อย่างไรก็ตามถ้าค่ากระแสฮาร์มอนิกมีการเพิ่มขนาดมากขึ้น อาจสามารถใช้เป็นตัวชี้บอกสภาวะผิดปกติได้ จึงทำการพัฒนาสร้างวงจร

ตรวจจับติดตามค่าขนาดของกระแสฮาร์มอนิกทั้งสามเฟส ถ้าวงจรตรวจจับพบการเพิ่มขึ้นของขนาดกระแสฮาร์มอนิกที่สามคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เกินค่าเกณฑ์ที่กำหนด และเกิดขึ้นพร้อม ๆ กับการเพิ่มขึ้นของกระแสความถี่มูลฐานไม่น้อยกว่า 15 แอมแปร์ ในเฟสใดเฟสหนึ่ง และเงื่อนไขทั้งสองนี้เกิดขึ้นเป็นเวลาอย่างน้อย 3 วินาที แสดงว่าขณะนั้นมีเหตุการณ์สายตัวนำขาดตกลงบนพื้น และมีการทดลองใช้ในห้องปฏิบัติการที่ได้จัดวางตัวนำสำหรับจำลองเหตุการณ์สายตัวนำขาดตกลงบนพื้นในลักษณะต่าง ๆ ผลการทดลองปรากฏว่าวงจรตรวจจับทำงานได้อย่างถูกต้อง จึงได้นำไปติดตั้งในระบบจำหน่ายเพื่อประเมินผลการใช้งาน โดยในช่วงเวลาที่ทำการประเมินผลไม่ปรากฏว่าวงจรตรวจจับมีการทำงานที่ผิดพลาดขณะไม่มีเหตุการณ์ลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงแต่ประการใด อย่างไรก็ตามในช่วงระยะเวลาทดลองใช้งานไม่ปรากฏเหตุการณ์สายตัวนำขาดตกลงพื้น

3.9.1.2 การตรวจจับโดยอาศัยองค์ประกอบฮาร์มอนิก

Power Technologies, Inc. (PTI) [20] ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมของกระแสฮาร์มอนิกเลขคี่ความถี่ต่ำ (odd harmonics) ในโครงการวิจัยของ EPRIหมายเลข 1285-1 ผลที่ได้จากการศึกษาพฤติกรรมของฮาร์มอนิก ทั้งในสภาวะที่เกิดลัดวงจรจากตัวนำขาดตกพื้นในห้องปฏิบัติการและในสภาวะปกตินำมาใช้เป็นฐานข้อมูลในการนำเสนอการตรวจจับ โดยติดตามตรวจวัดจากองค์ประกอบที่ไม่จัดอยู่ในรูปแบบซีเคว้นซ์ใดๆ ขององค์ประกอบสมมาตร (non- characteristic sequence components) ของฮาร์มอนิกที่หนึ่ง (ความถี่มูลฐาน) ที่สามและห้าภายใต้สภาวะสมดุล ฮาร์มอนิกที่หนึ่งคือ ปริมาณองค์ประกอบลำดับบวก, ฮาร์มอนิกที่สามคือ ปริมาณองค์ประกอบลำดับศูนย์และฮาร์มอนิกที่ห้าคือ ปริมาณองค์ประกอบลำดับลบ และได้มีการสรุปว่าองค์ประกอบลำดับที่ไม่มีคุณลักษณะเฉพาะของกระแสฮาร์มอนิกที่หนึ่ง, สามและห้าจะเป็นศูนย์เมื่ออยู่ในสภาวะสมดุล ซึ่งสามารถใช้ในการชี้บอกเหตุการณ์สายตัวนำตกหรือขาดได้ โดยมีการนำปริมาณกระแสฮาร์มอนิกของทั้งสามเฟสและนิวทรัลที่ความถี่ทั้ง 3 ค่า รวมเป็นสัญญาณเดียวป้อนให้กับรีเลย์ ซึ่งค่าสัญญาณนี้เรียกว่า ค่าสถิติ Z (Z statistic) คำนวณได้จากสมการที่ 3.1

$$Z = (X - Y)^T [P]^{-1} (X - Y) \qquad (3.1)$$

เมื่อ

X คือ เวคเตอร์ขนาด 12 x 1 ประกอบด้วยส่วนจริงและส่วนจินตภาพขององค์ประกอบฮาร์มอนิกเลขคี่ (1, 3, 5) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ไม่มีคุณลักษณะเฉพาะ

$[P]$ คือ เมตริกซ์โควาเรียนซ์ในเวคเตอร์ X

Y คือ ค่าเฉลี่ยจากตัวอย่างสุ่มของเวคเตอร์ X หลาย ๆ ค่าในเวลาก่อนหน้า

T คือ ทรานซ์โพสเมตริกซ์

เนื่องจากต้องคำนวณขนาดกระแสไฟฟ้าหลายค่าด้วยกัน ทำให้เป็นภาระต่อโปรแกรมอย่างมาก ดังนั้นเพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงและลดภาระการคำนวณดังกล่าว ขั้นตอนวิธีที่ทาง PTI พัฒนานำมาใช้ในการคำนวณหาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ทำการสุ่มตัวอย่างจาก 1 ลูกคลื่นความถี่ 60 เฮิรตซ์ ในทุกๆ 30 วินาที ผลลัพธ์ที่ได้ในช่วงแรกปรากฏว่าค่าสถิติ Z เป็นยอดแหลม เมื่อเป็นเช่นนี้ทำให้ต้องปรับตั้งค่าเกณฑ์กำหนดให้สูงขึ้น เพื่อหลีกเลี่ยงการทำงานที่ผิดพลาด แต่การตั้งค่าเกณฑ์กำหนดไว้สูงเกินไปมีผลทำให้อุปกรณ์ตรวจจับไม่สามารถตรวจพบการลัดวงจรที่ค่ากระแสต่ำ ๆ ได้ เพื่อเป็นการแก้ปัญหาดังกล่าว และจากการทดลองทราบว่าในกรณีเหตุการณ์ปกติค่าสถิติ Z มีค่าเป็นยอดแหลม (spike) เพียง 1 หรือ 2 คาบเวลาต่อเนื่องกันเท่านั้น จึงกำหนดค่าการประวิงเวลาไว้จำนวน 4 ตัวอย่าง นั่นคือถ้าอุปกรณ์ตรวจจับตรวจพบค่าสถิติ Z เกินเกณฑ์ที่กำหนดเกิน 4 ค่า ถือว่าเหตุการณ์ดังกล่าวเป็นสายตัวนำขาดตกลงบนพื้น PTI ได้พัฒนาสร้างต้นแบบอุปกรณ์ตรวจจับที่ใช้ขั้นตอนวิธีตรวจหาองค์ประกอบลำดับฮาร์มอนิกโดยใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ของ Intel หมายเลข 8086 เขียนโปรแกรมอ่านข้อมูลและประมวลผลรหัสใน PL/M-86 และ PASCAL 86 และได้เพิ่มการสุ่มตัวอย่างเป็น 1 ลูกคลื่นในทุกๆ 1 วินาที ผลการทดสอบสมรรถนะของอุปกรณ์ตรวจจับองค์ประกอบฮาร์มอนิก พบว่าขั้นตอนวิธีที่พัฒนาสามารถตรวจพบและชี้บอกการเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงได้เพียง 40 เปอร์เซ็นต์ของเหตุการณ์ทั้งหมด และมีข้อเสีย คือ ถ้ามีฟิวส์เฟสใดเฟสหนึ่งทำงาน อุปกรณ์ตรวจจับจะตัดสินใจว่าเกิดการลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงด้วย จึงเกิดการทำงานผิดพลาด สรุปโดยรวมประสิทธิภาพในการตรวจจับการลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงถือว่าไม่ดีนัก ดังนั้นจึงไม่มีการพัฒนาต่อไป

3.9.1.3 การตรวจจับจากเฟสเซอร์ของฮาร์มอนิกที่สาม

Nordon Research and Development (NRD) [15] ได้แนะนำเทคนิคการตรวจจับเหตุการณ์สายตัวนำขาดตกพื้น โดยใช้วิธีการวัดมุมเฟสของกระแสลัดวงจรฮาร์มอนิกที่สามและมีการพิจารณาร่วมกับแรงดันเฟสด้วย ซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจรจากเหตุการณ์สายตัวนำขาดตกพื้นจะมีกระแสฮาร์มอนิกที่สามเกิดขึ้นโดยมีความสัมพันธ์กับแรงดันของเฟสที่เกิดลัดวงจร

นั้นการแยกองค์ประกอบของกระแสฮาร์มอนิกที่สามออกจากสภาวะปกติของระบบ ทำได้โดยการคำนวณและบันทึกค่าเฉลี่ยของเฟสเซอร์ฮาร์มอนิกที่สาม จากนั้นทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเฟสเซอร์ฮาร์มอนิกที่สามค่าใหม่และนำค่าเฟสเซอร์ทั้งสองมาลบกันทางเวคเตอร์ ซึ่งจะทำการตรวจสอบมุมของเฟสเซอร์ที่ได้จากการลบกัน หากมีความสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้ทำการบันทึกไว้ รวมถึงขนาดของเฟสเซอร์นั้นมีค่าสูงกว่าระดับการทำงานที่ตั้งไว้ (threshold) ก็จะตัดสินใจว่าเกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบ ส่วนกรณีเกิดการเปลี่ยนแปลงของระบบปกติ เช่น การทำงานเปิด-ปิดของชุดตัวเก็บประจุที่ต่อขนานในระบบ การเปลี่ยนอัตราส่วนของอุปกรณ์ปรับแรงดัน อาจเป็นสาเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกระแสฮาร์มอนิกที่สามได้เช่นกัน ซึ่งทาง NRD กล่าวว่าการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้จะสร้างการเปลี่ยนแปลงของเฟสเซอร์ที่มีลักษณะแตกต่างกันกับการลัดวงจรที่เกิดจากเหตุการณ์สายตัวนำขาดตกพื้น

3.9.1.4 การตรวจจับโดยใช้การเปลี่ยนแปลงของระดับพลังงาน

ในปลายปี ค.ศ. 1970 คณะวิจัยแห่งมหาวิยาลัยเท็กซัสเอแอนด์เอ็ม (TAMU) [15] ได้เริ่มทำการวิจัยศึกษาเหตุการณ์ลัดวงจรที่เกิดจากสายตัวนำขาดตกพื้นโดยมีค่าอิมพีแดนซ์สูง โครงการวิจัยได้รับการสนับสนุนเงินทุนโดย EPRI หมายเลขโครงการ 1285-3 ซึ่งได้มีการพัฒนาขั้นตอนวิธีตรวจจับการเปลี่ยนแปลงพลังงานโดยใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ ด้วยวิธีการตรวจจับปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ความถี่ในช่วงที่กำหนด ขั้นตอนวิธีในการตรวจจับระดับพลังงานในตอนแรกใช้กับกระแสไฟฟ้าความถี่สูง (2 - 10 กิโลเฮิรตซ์) และในภายหลังได้ทำการวิเคราะห์ถึงความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้กับองค์ประกอบกระแสฮาร์มอนิกความถี่ต่ำ รวมถึงองค์ประกอบที่มิใช่ความถี่ฮาร์มอนิกด้วยจากการวิเคราะห์ในช่วงที่ทำการทดสอบการลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงจากสายตัวนำขาดตกพื้นในห้องปฏิบัติการ การทดสอบเหตุการณ์ปกติอื่น ๆ เช่น การทำงานของตัวเก็บประจุที่ต่อขนานในระบบ การทดสอบการเปลี่ยนอัตราส่วนของอุปกรณ์ปรับแรงดัน ได้ตั้งข้อสังเกตว่าอาร์กที่เกิดจากตัวนำขาดตกพื้นมีผลทำให้กระแสไฟฟ้าความถี่สูงมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะเดียวกันก็พบว่าเหตุการณ์ปกติอื่น ๆ ที่กล่าวข้างต้นก็สร้างระดับกระแสไฟฟ้าความถี่สูงที่มีลักษณะคล้ายกัน แต่จะเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาเพียงไม่กี่ลูกคลื่นเท่านั้น แสดงให้เห็นว่าเทคนิคการตรวจวัดการเพิ่มระดับของกระแสความถี่สูง สามารถใช้ชี้บอกว่ามีการเกิดลัดวงจรจากตัวนำขาดตกพื้นได้เป็นอย่างดี โดยต้องมีการตั้งช่วงเวลาการทำงานให้เหมาะสมเพื่อให้สามารถแยกแยะความแตกต่างระหว่างการลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงกับเหตุการณ์ทำงานปกติของระบบ ทั้งนี้เพื่อมิให้มีการสั่งปลดวงจรผิดพลาดเมื่อระบบมีสภาวะปกติ อุปกรณ์ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงพลังงานยังคงแสดงสถานะของระบบว่า "ปกติ" (normal) ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าว โดยทำการคำนวณและเก็บค่าระดับพลังงานเฉลี่ยในช่วงความถี่ที่ตั้งไว้ ค่าพลังงานจะถูกคำนวณจาก

ผลรวมของค่ากระแสไฟฟ้ายกกำลังสองในหนึ่งลูกคลื่นความถี่มูลฐาน ซึ่งค่าพลังงานค่าใหม่แต่ละค่าที่คำนวณได้จะนำมาเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของค่าเดิม ถ้าระดับพลังงานค่าใหม่มีปริมาณมากกว่าค่าพลังงานเฉลี่ยเดิมคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ไม่ถึงเกณฑ์ที่กำหนดก็จะยังคงถือว่าระบบอยู่ในสภาวะปกติ จากนั้นทำการคำนวณค่าเฉลี่ยพลังงานค่าใหม่ สำหรับนำมาใช้เปรียบเทียบค่าพลังงานในรอบการคำนวณครั้งต่อไป อย่างไรก็ตามถ้าค่าพลังงานในหนึ่งลูกคลื่นใหม่มีค่ามากกว่าค่าพลังงานเดิมเฉลี่ยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เกินเกณฑ์ที่กำหนด สถานะของระบบจะเปลี่ยนสภาวะเป็น "การถูกรบกวน" (disturbance) จากนั้นก็จะคำนวณค่าพลังงานใน 2 ถึง 3 ลูกคลื่นถัดไป เพื่อเปรียบเทียบว่ามีการเพิ่มขึ้นของค่าพลังงานเมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยในลักษณะเดียวกันต่อเนื่องหรือไม่ ถ้าตรวจพบว่าค่าพลังงานที่เพิ่มขึ้นนั้น มีช่วงสั้นมาก เช่น ประมาณ 1 หรือ 2 ลูกคลื่น สถานะของระบบจะเปลี่ยนกลับมาเป็น สภาวะปกติอีกครั้ง แต่ถ้าค่าพลังงานมีการเพิ่มขึ้นเป็นช่วงเวลาที่นานกว่าเกณฑ์ที่กำหนด สถานะของระบบจะเปลี่ยนเป็น "มีเหตุการณ์เกิดขึ้น" (event) และต้องติดตามการเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานอย่างต่อเนื่องอีก 2 ถึง 3 วินาที ซึ่งถ้าค่าพลังงานในช่วง 2 ถึง 3 วินาที ถัดไปมีการเพิ่มขึ้นของค่าพลังงานเทียบกับค่าเฉลี่ยเพียง 2 ถึง 3 ค่า หรืออาจไม่เพิ่มขึ้นเลย สถานะของระบบก็จะกลับมาเป็นสภาวะปกติอีกครั้ง แต่ถ้าในช่วง 2 ถึง 3 วินาที ถัดไปดังกล่าว มีการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานเพิ่มขึ้นติดต่อกันหลาย ๆ ลูกคลื่น สถานะของระบบจะถูกเปลี่ยนเป็น "สภาวะเกิดลัดวงจร" (fault) ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ในระยะเริ่มแรกขั้นตอนวิธีการตรวจจับพลังงานนำมาใช้กับกระแสไฟฟ้าความถี่สูงและได้มีการสร้างและนำอุปกรณ์ตรวจจับพลังงานความถี่สูงต้นแบบ (prototype high frequency energy detectors) หลายๆ ชุดไปติดตั้งในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า ระบบจำหน่ายที่ทำการทดลองติดตั้งเป็นระบบที่สถานีไฟฟ้าใช้หม้อแปลงแบบมีจุดร่วมต่อลงดิน จากการประเมินสมรรถนะของอุปกรณ์ตรวจจับพบว่า ในกรณีที่มีการจำลองเหตุการณ์สายตัวนำขาดตกลงบนพื้น อุปกรณ์ตรวจจับสามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการบันทึกรูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าจากการทดลองสายตัวนำขาดและตกลงบนพื้นในห้องปฏิบัติการ มาสร้างรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้าป้อนให้กับอุปกรณ์ตรวจจับโดยมีการตรวจวัดระดับพลังงานของฮาร์มอนิกเลขคี่ (3, 5, 7) ฮาร์มอนิกเลขคู่ (2, 4, 6) และความถี่ที่มิใช่ฮาร์มอนิก เช่น 30, 90 และ 170 เฮิรตซ์ เป็นต้น ในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า 1200 เฮิรตซ์ ผลการทดลองพบว่าอุปกรณ์ตรวจจับสามารถทำงานได้ดีโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อนำไปใช้กับสัญญาณฮาร์มอนิกเลขคู่ และสัญญาณความถี่ที่มิใช่ฮาร์มอนิก แต่การนำอุปกรณ์ตรวจจับไปใช้กับสัญญาณฮาร์มอนิกเลขคี่ได้พบปัญหาเกิดขึ้นมาก ทั้งนี้เพราะระดับความถี่ฮาร์มอนิกที่สูง แต่มีปริมาณคาดคะเนได้ยากกว่าระดับพลังงานที่ความถี่อื่นๆถึงแม้ว่าองค์ประกอบกระแสความถี่สูงสามารถใช้ชี้บอกเหตุการณ์การลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงได้

หลายกรณีแต่ก็มีปัญหาในทางปฏิบัติอยู่บ้าง กล่าวคือในระบบที่มีการติดตั้งตัวเก็บประจุระหว่างเฟสกับดิน องค์ประกอบกระแสความถี่สูงที่สร้างจากตัวเก็บประจุ ทำให้เทคนิคการตรวจจับวิธีดังกล่าวมีปัญหาได้ ในกรณีเช่นนี้จำเป็นที่จะต้องหลีกเลี่ยงโดยนำเทคนิคการตรวจวัดค่าระดับพลังงานที่ความถี่ต่ำมาประยุกต์ใช้แทน

3.9.1.5 **ขั้นตอนวิธีการตรวจจับโดยใช้หลักการแบบสุ่ม**

เมื่อเกิดลัดวงจรจากตัวนำขาดตกพื้น โดยทั่วไปจะมีอาร์กเกิดขึ้นด้วย [15] ซึ่งมีลักษณะการเกิดแบบไม่ต่อเนื่องและเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาสั้นๆ เช่น อาจจะเกิดอาร์กภายใน 1 ถึง 2 ลูกคลื่น หรืออาจมีอาร์กคงอยู่นานเป็นเวลาประมาณ 20 ถึง 30 ลูกคลื่น แล้วตามมาด้วยช่วงเวลาที่กระแสไฟฟ้าหยุดไหล และแม้กระทั่งช่วงเวลาขณะเกิดอาร์กค่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละลูกคลื่นก็เปลี่ยนแปลงอย่างมาก โดยการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีลักษณะแบบไม่แน่นอนเป็นผลให้ขั้นตอนการตรวจจับทำได้ยาก จึงได้มีการพัฒนาขั้นตอนวิธีการตรวจจับโดยใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ในการคำนวณจากการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณแบบทันทีทันใดเกินขอบเขตและช่วงเวลาที่กำหนด โดยคำนวณหาค่าเฉลี่ยพลังงานขณะระบบไฟฟ้าปกติ ต่อมาเมื่อตรวจสอบพบว่าค่าพลังงานในลูกคลื่นถัดไปเบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยเดิม คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เกินเกณฑ์ที่กำหนด สถานะของระบบจะเปลี่ยนเป็นสภาวะ "การถูกรบกวน"(disturbance) ต่อเนื่องจากจุดนี้เป็นต้นไป ขั้นตอนการตรวจจับแบบสุ่มจะไม่คำนวณหาค่าการเพิ่มขึ้นของพลังงานอย่างต่อเนื่องเหมือนในกรณีการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของพลังงาน แต่จะนับจำนวนครั้งของการเปลี่ยนแปลงจากการอาร์กที่มีค่าระดับพลังงานสูง ไปสู่ช่วงเวลาที่ไม่มีการอาร์ก (non-arcing) ระดับพลังงานต่ำ ภายในช่วงเวลาที่กำหนด หลังจากนับจำนวนลูกคลื่นต่างๆ เหล่านี้แล้ว จะตรวจดูจำนวนครั้งของการนับถ้ามีค่าเกินเกณฑ์ที่ตั้งไว้ก็จะมีการส่งสัญญาณแสดงสภาวะการเกิดลัดวงจร โดยมีการทดสอบการใช้งานของขั้นตอนวิธีตรวจจับแบบสุ่มด้วยการป้อนกระแสไฟฟ้าความถี่สูงระหว่าง 2 ถึง 6 กิโลเฮิรตซ์ การทดสอบดังกล่าวดำเนินการภายในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ซึ่งกระทำโดยการนำสัญญาณทางไฟฟ้าที่บันทึกได้จากการทดลองการเกิดลัดวงจรกรณีสายตัวนำขาดลงพื้นที่จัดขึ้นในห้องปฏิบัติการและนำสัญญาณทางไฟฟ้าที่บันทึกได้ขณะระบบไฟฟ้าอยู่ในสภาวะปกติ แต่มีเหตุการณ์การสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุ หรือมีเหตุการณ์การเปลี่ยนอัตราส่วนของชุดควบคุมแรงดันมาป้อนให้กับอุปกรณ์ตรวจจับที่ใช้ขั้นตอนวิธีแบบสุ่ม ผลการทดสอบพบว่าสามารถทำงานได้ยกเว้นกรณีการเกิดลัดวงจรที่มีค่าพลังงานต่ำในช่วงความถี่สูงจะไม่สามารถตรวจจับได้

3.9.1.6 การตรวจจับโดยการแยกปริมาณกระแสไฟฟ้าลัดวงจร

คณะผู้วิจัยแห่งมหาวิทยาลัยเท็กซัสเอแอนด์เอ็ม [15] ได้จัดทำข้อเสนอโดยการแยกแยะความแตกต่างระหว่างสัญญาณกระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าอย่างรวดเร็วกับสัญญาณกระแสโหลดที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าค่อนข้างช้า โดยได้วิเคราะห์เทคนิควิธีการแยกปริมาณกระแสไฟฟ้า 2 วิธี คือ การแยกปริมาณกระแสไฟฟ้าลัดวงจรออกจากผลรวมกระแสไฟฟ้าในสภาวะปกติ เทคนิคที่ใช้ทำโดยการสุ่มค่าสัญญาณตัวอย่างทีละค่าแทนการใช้ค่าอาร์เอ็มเอสของสัญญาณกระแส เทคนิควิธีแรกทำโดยนำค่าแต่ละจุดของลูกคลื่นที่ตรวจจับนำมาลบออกด้วยค่าแต่ละจุดของลูกคลื่นก่อนหน้า ผลลัพธ์ที่ได้ภายใต้เงื่อนไขสภาวะระบบไฟฟ้าปกติ ค่าในแต่ละจุดจะมีปริมาณค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้เพราะกระแสโหลดมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าน้อย แต่ถ้าหากผลลัพธ์ที่ได้จากการหักลบค่าในแต่ละจุดให้ปริมาณที่สูง แสดงว่าได้มีเหตุการณ์ผิดปกติเกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้าที่พิจารณา จึงต้องพิจารณาเพิ่มเติมโดยอาศัยช่วงเวลาในการแยกแยะ ถ้าค่ากระแสไฟฟ้าเปลี่ยนค่าจากระดับคงที่หนึ่งไปสู่อีกระดับหนึ่ง แสดงว่าไม่มีการลัดวงจรเกิดขึ้น แต่ถ้าผลลัพธ์มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นๆ ลงๆ มาก แสดงว่ามีการเกิดลัดวงจร เทคนิควิธีการที่สองกระทำโดยการพิจารณาค่าสเปคตรัมความถี่ที่คำนวณได้ของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าชั่วขณะในเวลาแต่ละช่วงและนำข้อมูลสเปคตรัมนี้มาใช้ในการคาดคะเนว่ารูปคลื่นกระแสไฟฟ้าในลูกคลื่นถัดไปจะมีค่าเป็นอย่างไร จากนั้นนำค่าที่คาดคะเนได้ไปเปรียบเทียบกับรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริง ถ้าผลการเปรียบเทียบได้ผลแตกต่างกันน้อยก็แสดงว่าระบบอยู่ในสภาวะปกติ แต่ถ้ามีค่าผลต่างค่อนข้างสูงอย่างเห็นได้ชัดและเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องกันช่วงระยะเวลาหนึ่งก็แสดงว่าเกิดลัดวงจรขึ้นในระบบ

3.9.1.7 การตรวจจับโดยวิเคราะห์รูปแบบการเกิดอาร์กแบบทันทีทันใด

กระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่เกิดจากตัวนำขาดตกพื้น จะมีพฤติกรรมขึ้นอยู่กับแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างสายตัวนำเทียบกับดิน [15] โดยบางครั้งทำให้กระแสไฟฟ้าลัดวงจรมีรูปคลื่นในลักษณะเกิดซ้ำ การไหลของกระแสไฟฟ้าจะเริ่มต้นเมื่อเกิดแรงดันเบรกดาวน์ขึ้นบริเวณช่องว่างของอากาศระหว่างสายตัวนำที่ขาดตกเทียบกับพื้นและยังคงมีกระแสไฟฟ้าไหลอย่างต่อเนื่องจนกระทั่ง แรงดันที่ตำแหน่งลัดวงจรไม่สามารถรักษาระดับที่ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลข้ามช่องว่างอากาศได้ ซึ่งปกติจะอยู่ในช่วงที่แรงดันมีค่าเข้าใกล้ศูนย์จึงทำให้รูปแบบที่เกิดขึ้นมีลักษณะเกิดซ้ำในอีกครึ่งไซเคิลลบของแรงดันเฟสเมื่อเริ่มเกิดอาร์ก โดยทั่วไปจะเกิดการสปาร์กหลายครั้งก่อนเกิดอาร์กขึ้น การสปาร์กนี้จะทำให้กระแสไฟฟ้ามีความถี่สูงขึ้น ซึ่งกระแสไฟฟ้าความถี่สูงที่เกิดขึ้นทันทีทันใดจะมีค่าลดลงเมื่อแรงดันมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ลำดับเหตุการณ์ดังกล่าวจะทำให้เกิดพฤติกรรมความถี่สูงขึ้นซึ่งจะสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเฟสจึงได้

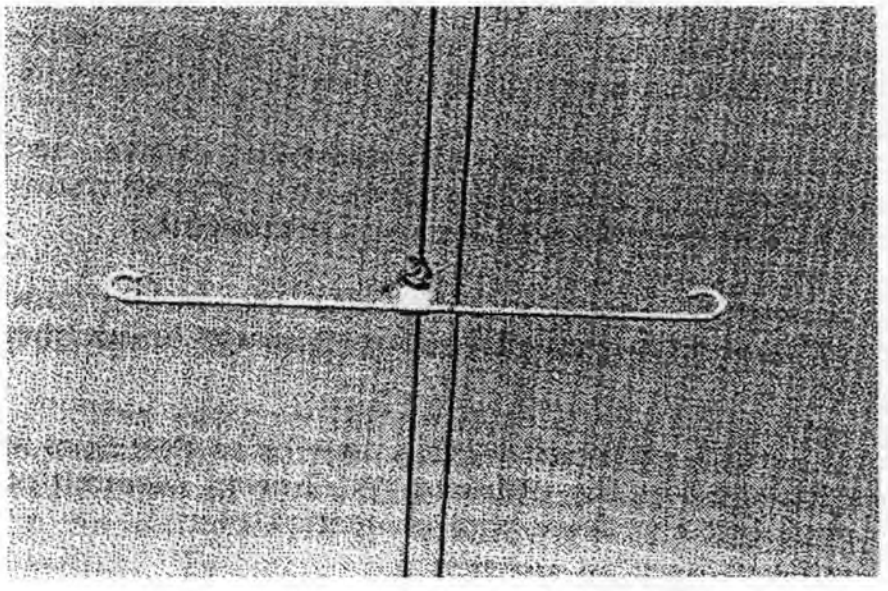
วิเคราะห์ว่าพฤติกรรมของแรงดันสามารถใช้ในการแยกแยะการลัดวงจรแบบมีอาร์กที่มีช่วงความถี่สูงออกจากเหตุการณ์อื่นๆ ได้

3.9.1.8 การตรวจจับเหตุการณ์สายตัวนำไฟฟ้าขาดโดยใช้เทคนิคเวฟเล็ตทรานส์ฟอร์ม

การนำวิธีการแปลงมอเล็ตเวฟเล็ต (Morlet wavelet transform) [17] มาใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณของการลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงที่เกิดขึ้นในโดเมนของเวลาและความถี่ที่มีอยู่ในเวฟเล็ต โดยสามารถดูข้อมูลของเวลา และความถี่ของรูปคลื่นได้ ซึ่งความแตกต่างระหว่างการแปลงเวฟเล็ต (WT) และการแปลงฟาสฟูเรียร์ (FFT) คือ การแปลงเวฟเล็ตมีความสามารถในการตรวจจับสัญญาณลัดวงจรที่แปรผันตามเวลาได้ดีกว่า ซึ่งจะถูกนำมาใช้ในการแยกแยะสัญญาณลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงออกจากเหตุการณ์การสวิตช์ปกติในระบบ และสามารถใช้ตรวจจับการลัดวงจรกรณีสายตัวนำขาดตกลงบนพื้นผิวลักษณะต่างๆ ได้

3.9.1.9 การตรวจจับเหตุการณ์สายตัวนำขาดด้วยวิธีทางกล [18]

การทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับเหตุการณ์สายตัวนำขาดโดยอาศัยแรงที่เกิดจากสายตัวนำขาดตกลงสัมผัสกับสายนิวทรัล โดยมีการ์ดเป็นก้านโลหะยื่นออกไปทั้งสองข้างวางอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมที่จะรองรับสายตัวนำที่ขาดลงมาสัมผัสกับก้านโลหะโดยมีสายต่อถึงดิน การ์ดนี้แขวนอยู่ใต้สายนิวทรัล และตั้งฉากกับตัวนำ เมื่อสายขาดทำให้การลัดวงจรที่เกิดขึ้นเป็นแบบอิมพีแดนซ์ค่าต่ำ กระแสไฟฟ้าลัดวงจรจึงมีค่าสูงพอที่จะทำให้อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินสามารถทำงานได้



รูปที่ 3.4 แท่งการ์ดถูกแขวนด้วย Hot Stick ติดตั้งอยู่กลางช่วงระหว่างเสา [18]

ก. ข้อดีของระบบ

สามารถทำให้ระบบป้องกันกระแสเกินตรวจจับเหตุการณ์สายขาดได้ ซึ่งเป็นการใช้ระบบป้องกันเดิมที่มีอยู่แล้วในการปลดวงจรเมื่อสายขาด นอกจากนี้สามารถรองรับการเกิดสายหย่อนซึ่งป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นในเขตชุมชนได้ด้วย

ข. ข้อเสียของระบบ

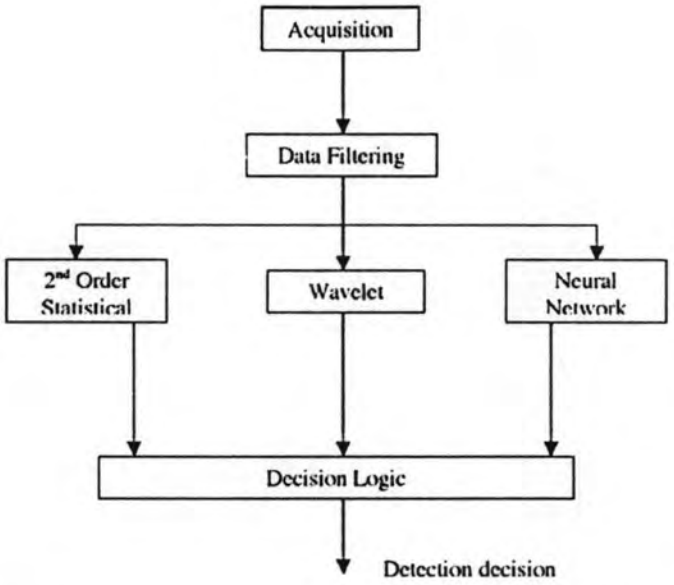
ถ้าการ์ดเอียงหรือโค้งงอ อาจทำให้สายนิวทรัลใกล้กับสายเฟสมากเกินไป สภาพอากาศหรือสิ่งแวดล้อมบางอย่าง เช่น ลมพัดแรง นกบินมาเกาะที่การ์ด อาจเป็นสาเหตุให้มีการเกิดลัดวงจรระหว่างก้านโลหะที่เอียงเข้าไปใกล้กับสายตัวนำเฟสได้ง่าย ทำให้เพิ่มโอกาสการเกิดลัดวงจรมากขึ้น นอกจากนี้ราคาของอุปกรณ์ต่อชุดค่อนข้างสูง รวมทั้งค่าใช้จ่ายในการติดตั้งก็สูงเช่นเดียวกัน เมื่อคำนึงถึงการติดตั้งอุปกรณ์ 1 ชุดต่อหนึ่งช่วงเสาแล้ว จะพบว่าค่าใช้จ่ายโดยรวมจะสูงมาก จึงไม่ค่อยเป็นที่นิยม

3.10 หลักการทำงานและรายละเอียดอุปกรณ์ ของรีเลย์ที่มีความสามารถตรวจจับการลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง ที่นำมาทดสอบติดตั้งใช้งานในระบบจำหน่ายของ กฟน.

การศึกษา วิเคราะห์และประเมินสมรรถนะของขั้นตอนวิธีตรวจจับการเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงในระบบจำหน่ายของ กฟน. โดยใช้รีเลย์ 3 ชนิดดังนี้

3.10.1 หลักการทำงานของรีเลย์ชนิด A

การทำงานของรีเลย์ชนิด A ประกอบด้วยหลักการทำงานพื้นฐานของขั้นตอนวิธีตรวจจับสามรูปแบบคือ wavelet, higher order statistics และ neural network ซึ่งแสดงรูปแบบการตรวจจับดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนวิธีการตรวจจับการเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงของรีเลย์ชนิด A

รีเลย์จะตรวจจับสัญญาณคือ กระแสเฟสทั้ง 3 เฟส และกระแสนิวทรัล มาทำการประมวลผลเพื่อตรวจจับกระแสลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงโดยสมการพื้นฐานจะพิจารณาในรูปของสมการที่ 3.2 และ 3.3 ดังนี้

$$H0 : r(t) = s(t) + n(t) \quad (3.2)$$

$$H1 : r(t) = s(t) + n(t) + f(t) \quad (3.3)$$

เมื่อ H0 = แทนสภาวะปกติ

H1 = แทนสภาวะเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง

r(t) = แทนฟังก์ชั่นของกระแสไฟฟ้า

n(t) = Gaussian noise

f(t) = high impedance fault signature

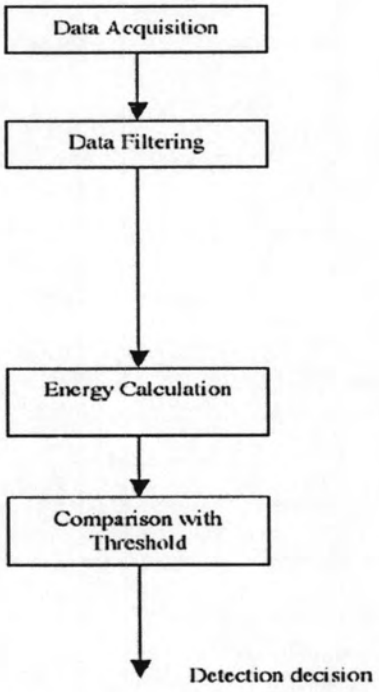
ขั้นตอนวิธีในการตรวจจับจะมีอยู่ 3 รูปแบบดังนี้คือ

(ก) การตรวจจับ ด้วย higher order statistics

การทำงานของขั้นตอนวิธีตรวจจับนี้แสดงในรูปที่ 3.6 โดยข้อมูลด้านภาครับสัญญาณอินพุตจะถูกกรองสัญญาณ (band-pass filter) และคำนวณออกมาในรูปแบบของพลังงาน (energy) เพื่อมาเปรียบเทียบกับค่าคงที่ซึ่งใช้เป็นเกณฑ์ในการตรวจจับ โดยถ้าค่าพลังงานที่คำนวณได้เกินเกณฑ์ที่กำหนดไว้ก็จะส่งสัญญาณไปสู่กระบวนการตัดสินใจว่าเกิดกระแสลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงหรือไม่แสดงในรูปของสมการดังนี้

$$C2(m,n) = E\{r(t)r(t+m)r(t+n)\} \quad (3.4)$$

$$C3(m,n) = E\{r(t)r(t+m)r(t+n)\ r(t+k)\} \quad (3.5)$$



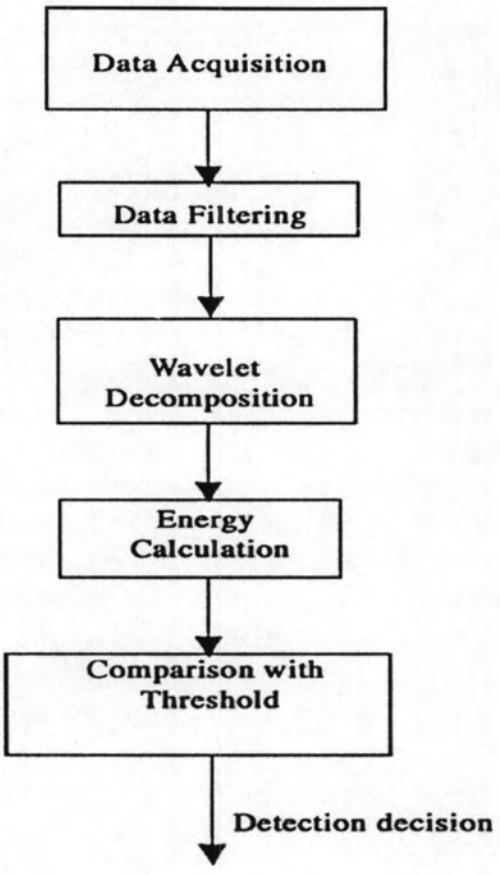
รูปที่ 3.6 higher order statistics

(ข) การตรวจจับด้วย Wavelet

การทำงานของขั้นตอนการตรวจจับนี้จะแสดงในรูปที่ 3.7 ภาครับสัญญาณอินพุตจะถูกกรองสัญญาณและผ่านกระบวนการแยกสัญญาณ high และ low pass ของ wavelet สัญญาณที่ได้เหล่านี้จะถูกนำไปคำนวณในรูปพลังงานและถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าคงที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการตรวจจับ โดยถ้าค่าพลังงานเกินเกณฑ์ที่กำหนดก็จะส่งสัญญาณไปกระบวนการตัดสินใจว่าเกิดการลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงหรือไม่สำหรับสมการของ wavelet สามารถแสดงได้ดังนี้

$$Cp,s = \int_{-\infty}^{\infty} r(t)\varphi\left(\frac{t-p}{s}\right)dt \quad (3.6)$$

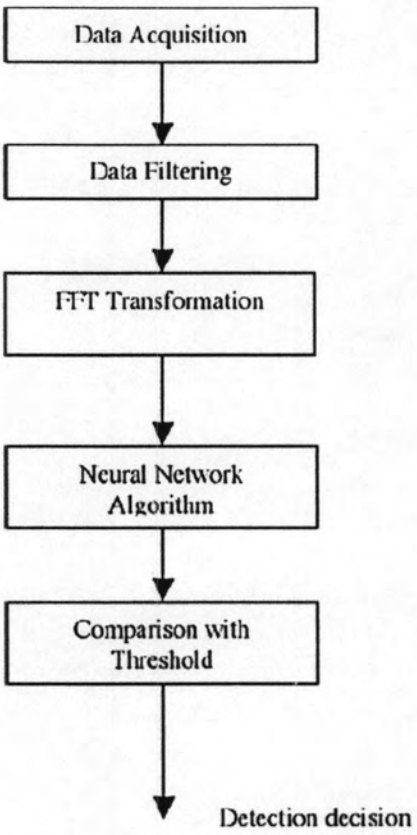
$$Cmn = \sum_k r(t)\varphi\left(\frac{k-m}{2^n}\right) \quad (3.7)$$



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการตรวจจับโดยใช้ wavelet

(ค) การตรวจจับด้วย neural network

การทำงานของขั้นตอนวิธีนี้แสดงในรูปที่ 3.8 ภาครับสัญญาณอินพุตจะถูกกรองสัญญาณและผ่านกระบวนการแยกสัญญาณ Fast Fourier Transform (FFT) สัญญาณที่ได้จะนำไปคำนวณในรูปแบบของ neural network และนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าคงที่ที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการตรวจจับ โดยถ้าค่าที่คำนวณได้เกินเกณฑ์ที่กำหนดก็จะส่งสัญญาณไปกระบวนการตัดสินใจว่าเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงหรือไม่

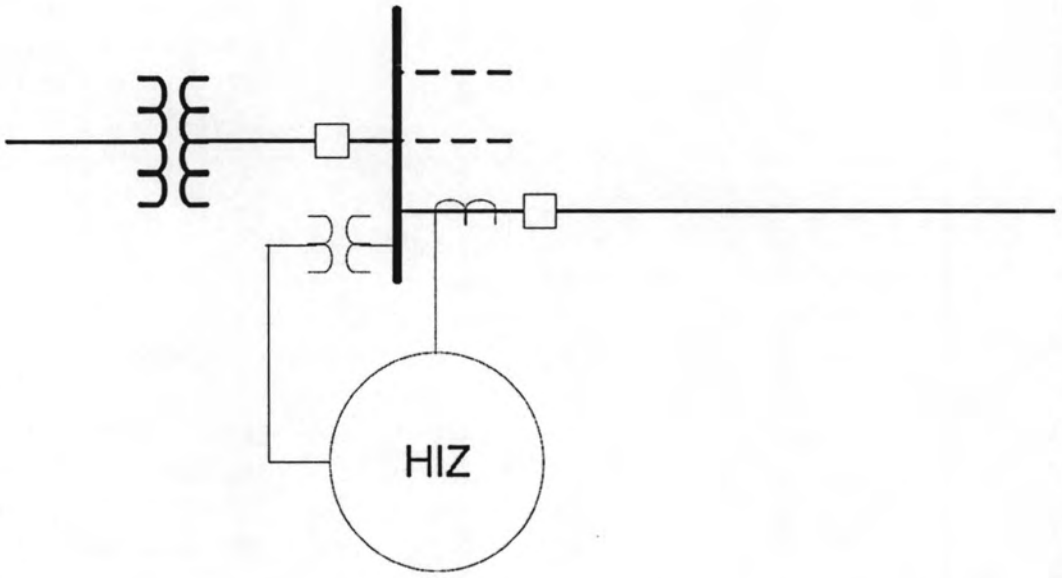


รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการตรวจจับโดยใช้ neural network

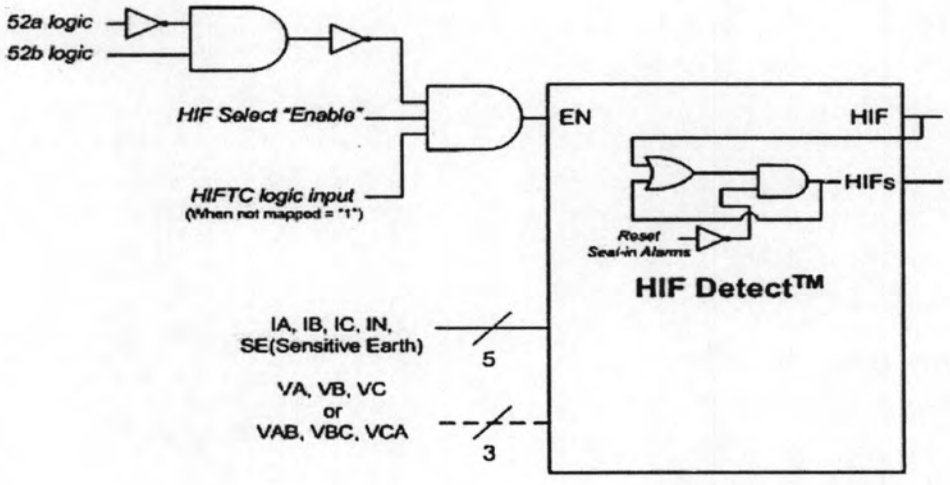
รายละเอียดการใช้งาน รีเลย์ชนิด A

1) การต่อใช้งาน

การติดตั้งรีเลย์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 3.9 ส่วนสัญญาณภาครับอินพุต แสดงดังรูปที่ 3.10 สำหรับรีเลย์ชนิด A นี้สามารถใช้งานได้โดยไม่ต้องต่อสัญญาณภาครับอินพุตจากแรงดันระบบ (voltage transformer)



รูปที่ 3.9 แสดงวงจรการต่อใช้งานของรีเลย์ชนิด A



รูปที่ 3.10 แสดงวงจรการต่อบล็อกไดอะแกรมภายในของรีเลย์ชนิด A

จากรูปที่ 3.10 สัญญาณ 52a, 52b logic คือสัญญาณที่มาจากหน้าสัมผัสของสวิตช์ที่บ่งบอกสถานะของเบรกเกอร์ว่าอยู่ในสถานะ "ปิด" หรือ "เปิด" โดยหากเบรกเกอร์อยู่ในสถานะ "เปิด" จะทำให้ฟังก์ชั่นการตรวจจับการเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงไม่ทำงาน โดยฟังก์ชั่นการตรวจจับกระแสไฟฟ้าลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงจะทำงานเมื่อสถานะของเบรกเกอร์อยู่ในสถานะ "ปิด" เท่านั้น สำหรับสัญญาณลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง select จะขึ้นอยู่

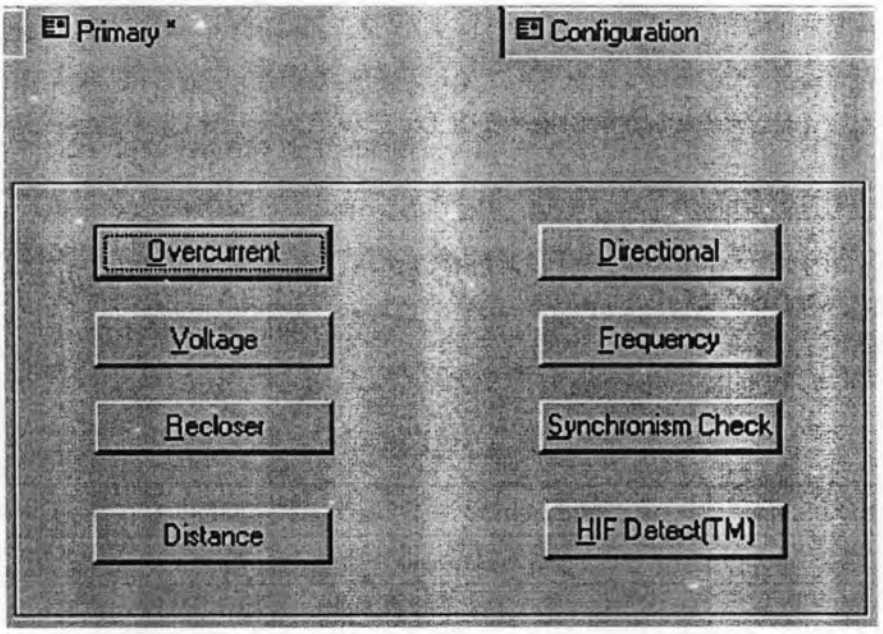
กับการตั้งค่าของโปรแกรมว่าจะให้ "disable" หรือ "enable" ส่วนสัญญาณ HIFTC logic input ปกติจะให้เป็น 1

2) **การตั้งค่าทำงาน** (setting)

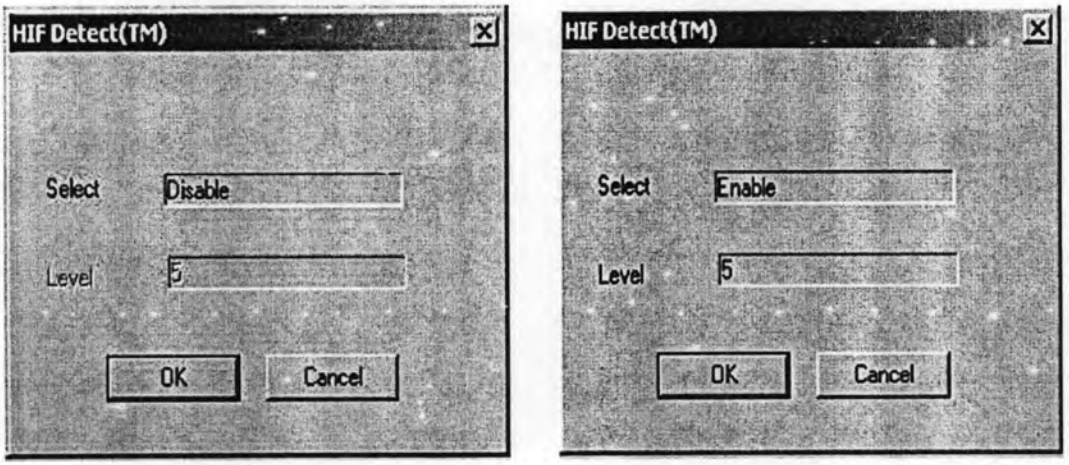
จากตารางที่ 3.2 ระดับในการตั้งค่าการทำงานมีอยู่ทั้งหมด 10 ระดับ (1 ถึง 10) โดยระดับหมายเลข 10 มีค่าความเชื่อมั่นสูงสุดแต่จะมีความไวในการตรวจจับต่ำสุด สำหรับค่าเริ่มต้นที่มากับเครื่องจะถูกตั้งค่าไว้ที่ระดับ 5

ตารางที่ 3.2 การตั้งค่าทำงานของรีเลย์ชนิด A

HIF Detect™ Setting	Setting Range	Setting Step Size	Setting default
Select	Disable or Enable	Not applicable	Disable
Level	1 - 10	1	5



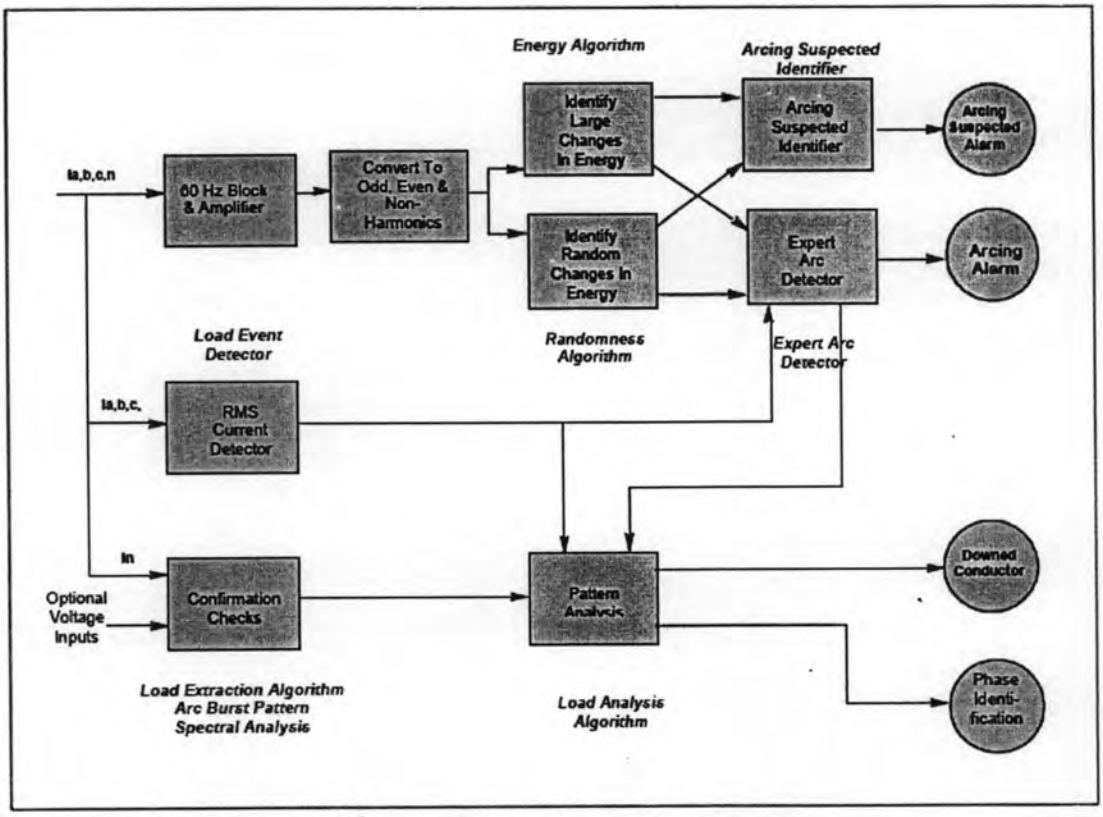
รูปที่ 3.11 หน้าต่างแสดงการเลือกใช้งานโหมดตรวจจับลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง



a) b)

รูปที่ 3.12 หน้าต่างการตั้งค่าการทำงานโหมดตรวจจับลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง

3.10.2 หลักการทำงานของรีเลย์ชนิด B [13]

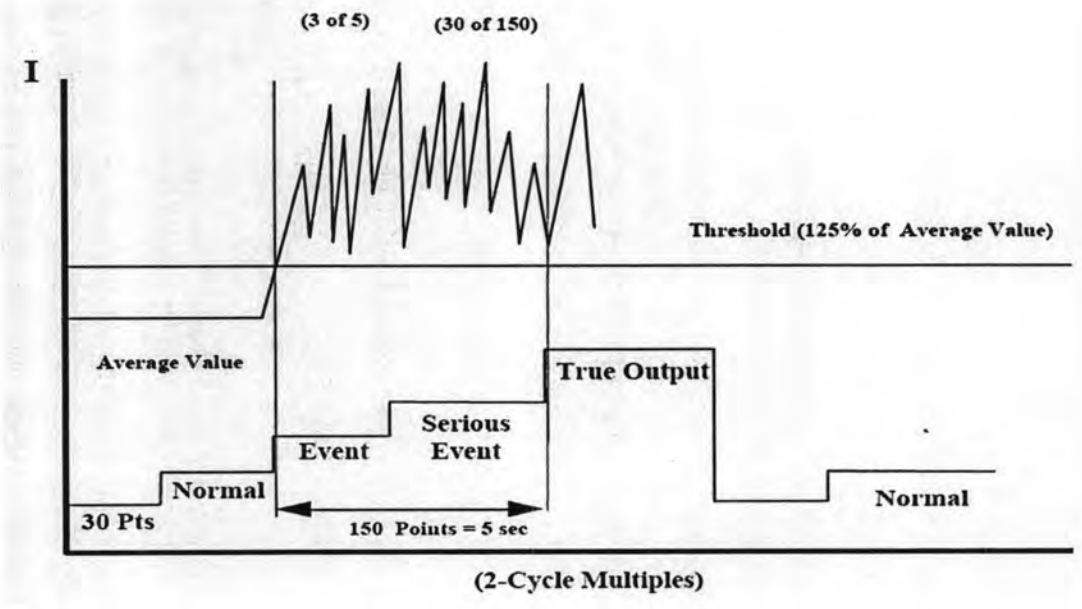


รูปที่ 3.13 หลักการทำงานของรีเลย์ชนิด B

จากรูปที่ 3.13 องค์ประกอบความถี่มูลฐานของกระแสเฟสและนิวทรัลจะถูกกรองออกไป จึงเหลือเพียงองค์ประกอบสัญญาณที่เป็นฮาร์มอนิกและมิใช่ฮาร์มอนิก (non – harmonic) โดยสัญญาณเหล่านี้มีขนาดค่อนข้างน้อยจึงต้องทำการขยายสัญญาณ จากนั้นทำการแยกกลุ่มของสัญญาณเป็น 3 กลุ่ม คือ ฮาร์มอนิกเลขคี่, ฮาร์มอนิกเลขคู่ และกลุ่มของสัญญาณที่มิใช่ฮาร์มอนิกในแต่ละเฟสและนิวทรัล ระบบจะทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ยในแต่ละกลุ่มสัญญาณเพื่อเป็นข้อมูลให้กับกระบวนการขั้นตอนวิธีวิเคราะห์แบบ energy และ randomness

3.10.2.1 Energy algorithm [13]

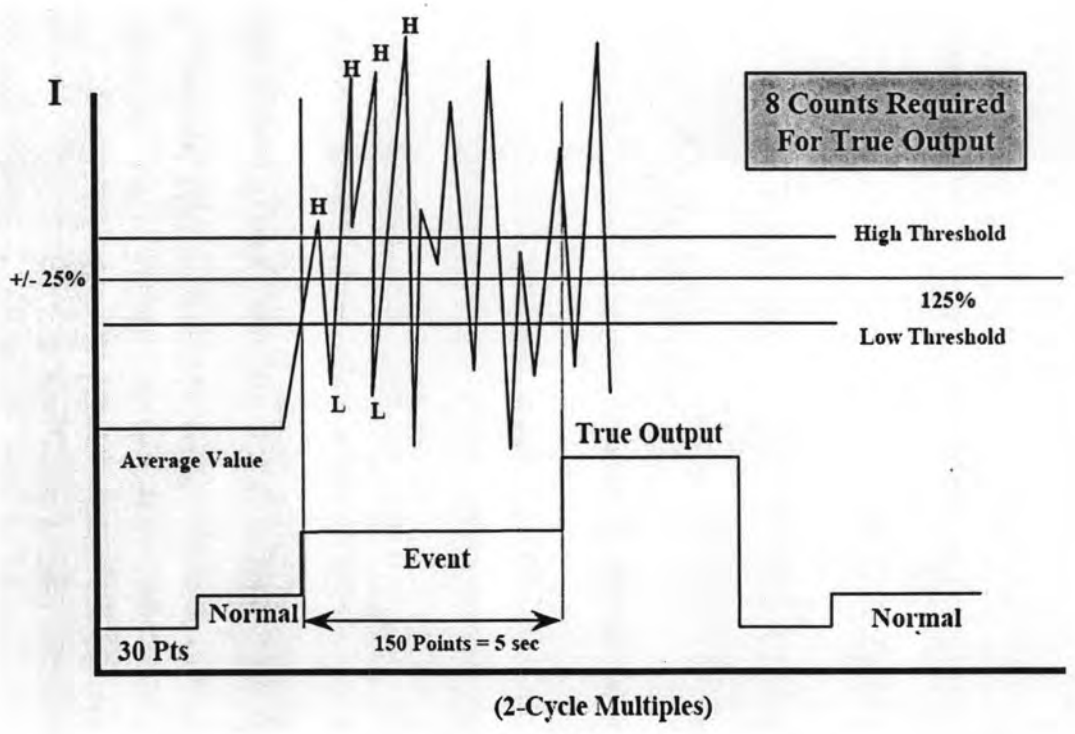
ทำการวิเคราะห์กลุ่มของสัญญาณที่มีการเพิ่มขึ้นแบบทันทีทันใดโดยระดับสัญญาณที่เพิ่มขึ้นดังกล่าวต้องคงอยู่นานพอตามเกณฑ์ที่กำหนด ขั้นตอนกระบวนการดังกล่าวนี้จะเริ่มต้นด้วยการหาค่าเฉลี่ยของกลุ่มสัญญาณทั้ง 3 กลุ่มที่เป็นสัญญาณอินพุต เพื่อนำมาเป็นเกณฑ์ในการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ โดยหากสัญญาณที่รับเข้ามามีค่าสูงเกินค่าเฉลี่ยที่คำนวณได้ประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ ทำให้มีการเปลี่ยนสภาวะจากปกติ (normal) ไปสู่สภาวะมีเหตุการณ์เกิดขึ้น (event) ในส่วนของการเปลี่ยนสภาวะจาก event ไปสู่ serious event นั้นจะใช้วิธีการนับจำนวนจุดของข้อมูลที่เกินเกณฑ์เฉลี่ย ในที่นี้กำหนดเงื่อนไขไว้ที่ 3 จุดจากช่วงข้อมูล 5 จุด ในส่วนของการเปลี่ยนสภาวะจาก serious event ไปสู่ true output จะต้องใช้จำนวนข้อมูล 30 จุดจากช่วงข้อมูลทั้งหมด 150 จุด โดยจุดของข้อมูลที่สนใจไม่จำเป็นจะต้องมีความต่อเนื่องกันแสดงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 Energy algorithm [13]

3.10.2.2 Randomness algorithm [13]

ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้จะรับสัญญาณอินพุตเดียวกันกับ energy algorithm แต่จะมีความแตกต่างกันตรงที่ energy algorithm จะพิจารณาสัญญาณที่เพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดและสัญญาณนั้นจะต้องคงอยู่นานพอเกินเกณฑ์ที่กำหนด ส่วน randomness algorithm จะตรวจจับการเพิ่มขึ้นของสัญญาณแบบทันทีทันใดเช่นกันแต่สัญญาณดังกล่าวนั้นไม่จำเป็นต้องคงอยู่สูงเกินเกณฑ์ที่กำหนดแต่จะต้องมีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอยู่ภายในขอบเขตที่พิจารณา วิธีการคือ สัญญาณที่รับเข้ามาจะถูกหาค่าเฉลี่ยเพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาโดยหากสัญญาณในช่วงเวลาถัดไปมีค่าสูงเกินเกณฑ์ที่คำนวณได้ประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ จะทำการเปลี่ยนสภาวะจากปกติ (normal) สู่สภาวะมีเหตุการณ์เกิดขึ้น (event) ภายในช่วงเวลาของสภาวะ event นี้จะมีการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่รับเข้ามา โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณจากสูงสู่ต่ำ (high to low) และการเปลี่ยนแปลงจากต่ำสู่สูง (low to high) โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะจาก event ไปสู่ true output ก็ต่อเมื่อสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงจากสูงไปต่ำและต่ำไปสูงเกินเกณฑ์ที่กำหนดคือ ประมาณ 8 ครั้ง จากนั้นจึงส่งสัญญาณต่อไปให้กับ expert arc detector



รูปที่ 3.15 Randomness algorithm [13]

3.10.2.3 Expert arc detector algorithm (EAD) [13]

การทำงานของ expert arc detector algorithm จะพิจารณาสัญญาณที่ส่งออกมาจาก energy และ randomness algorithm โดยมีหน้าที่เพิ่มระดับความเชื่อมั่นให้กับข้อมูลและคัดเลือกข้อมูลต่างๆ ที่รับเข้ามาให้เป็นตัวแทนในแต่ละเฟส เนื่องจากสัญญาณที่ส่งออกจาก energy และ randomness algorithm มีทั้งหมด 24 ข้อมูลแบ่งเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ จากสัญญาณฮาร์มอนิกอันดับคู่ ฮาร์มอนิกอันดับคี่และสัญญาณที่มิใช่ฮาร์มอนิก (non – harmonic) ของกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสและนิวทรัล โดย expert arc detector algorithm จะทำการนับจำนวนข้อมูลที่มีระดับความเชื่อมั่นว่ามีอาร์ก (belief – in – arcing) เนื่องจากข้อมูลทั้ง 24 ข้อมูลมีความเป็นอิสระกัน ดังนั้นจึงเป็นการเพิ่มความเชื่อมั่นได้ในการตัดสินใจว่ามีอาร์กโดยสามารถตั้งค่าความไวในการทำงานได้จากการเลือกระดับตั้งแต่ 1 – 10 ดังแสดงในตารางที่ 3.3 ซึ่งการตั้งค่าการทำงานในแต่ละระดับนั้นจะหมายถึง จำนวนที่ EAD ใช้ในการนับจำนวนครั้งที่มีการตัดสินใจว่ามีอาร์กเกิดขึ้นรวมถึงระดับค่าความเชื่อมั่นที่ใช้พิจารณา จากตารางที่ 3.3 พิจารณาได้ว่าการตั้งค่าทำงานที่ระดับ 1 มีความเชื่อมั่นสูงสุดแต่ความไวในการตรวจจับจะต่ำสุด ในขณะที่ระดับ 10 มีความไวในการตรวจจับสูงสุดแต่ความเชื่อมั่นต่ำสุด

ตารางที่ 3.3 การตั้งค่า arc sensitivity [13]

Setting	EAD Required	Arc confidence threshold (%)
1	5	95
2	5	88.3
3	4	81.7
4	4	75
5	3	68
6	3	61.7
7	3	55
8	3	48.3
9	2	41.7
10	2	35

การทำงานของ EAD จะต้องประสานการทำงานกับอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินด้วยเรียกช่วงเวลาดังกล่าวว่า oc coordination time โดยช่วงเวลานี้จะเริ่มต้นนับเมื่อมีการตรวจจับอาร์ก, มีการสูญเสียโหลดบางส่วน (loss of load) หรือมีการตรวจจับสภาวะกระแสเกิน ซึ่ง EAD จะทำการนับค่าระดับความเชื่อมั่นว่ามีอาร์กภายในช่วงเวลาดังกล่าว แต่จะยังไม่ส่งสัญญาณใดๆ ออกไปจนกระทั่งครบเวลา เพื่อเป็นการเพิ่มความถูกต้องในการตัดสินใจ

3.10.2.4 Load event detector algorithm [13]

ทำการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสไฟฟ้าอาร์เอ็มเอสในแต่ละเฟสและนิวทรัล โดยจะมีเหตุการณ์ที่ใช้ในการพิจารณาดังนี้

- สภาวะเกิดกระแสไฟฟ้าเกิน (overcurrent condition)
- เกิดการสูญเสียโหลดบางส่วน (loss of load)
- เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสสูง (high rate – of – change)
- มีเหตุการณ์เกิดขึ้นพร้อมกัน 3 เฟส (three – phase event)
- มีการเปิดวงจรโดยเซอร์คิตเบรกเกอร์ (breaker open condition)

ซึ่งหากมีการตรวจพบเหตุการณ์ตามเงื่อนไขดังกล่าวข้างต้น จะทำการบล็อกสัญญาณไม่ให้มีการส่งผลการตัดสินใจใดๆ ออกไปเนื่องจากเงื่อนไขดังกล่าวทั้งหมดไม่ได้เป็นคุณลักษณะของการเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง

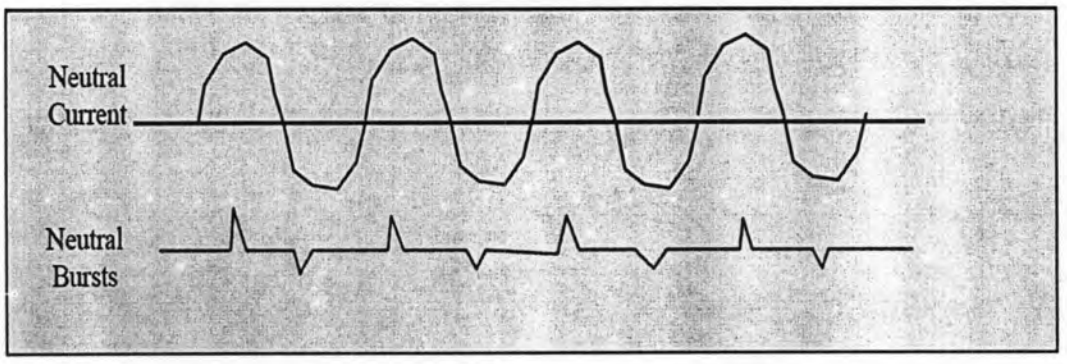
3.10.2.5 Load analysis algorithm [13]

มีหน้าที่ในการแยกแยะรูปแบบการเกิดอาร์กระหว่างอาร์กที่สายตัวนำขาดกับอาร์กที่สายตัวนำไม่ขาด โดยทำการพิจารณาลำดับการเกิดเหตุการณ์เช่น เหตุการณ์ดังกล่าวเริ่มต้นด้วยการตรวจจับพบการสูญเสียโหลดบางส่วน (loss of load) หรือกระแสเกินก่อนมีการตรวจจับอาร์กหรือไม่ ถ้าใช่ก็จะพิจารณาว่าเหตุการณ์ดังกล่าวเป็นกรณีเกิดอาร์กและสายตัวนำขาดตก (downed conductor) แต่ถ้ามีการตรวจจับอาร์กได้ก่อนโดยไม่มีการสูญเสียโหลดบางส่วนหรือกระแสเกินก็จะตัดสินใจว่าเหตุการณ์ดังกล่าวมีอาร์กแต่สายตัวนำไม่ขาด

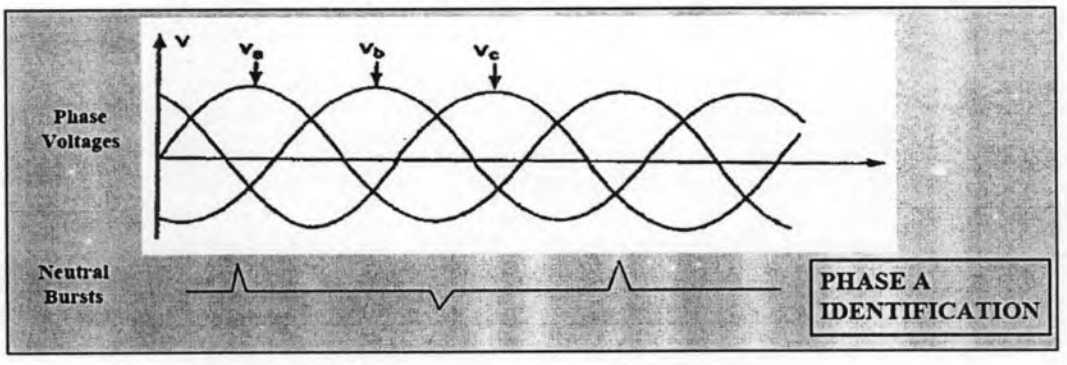
3.10.2.6 Load extraction algorithm & arc burst pattern analysis [13]

Load extraction algorithm มีหน้าที่พิจารณาปริมาณของโหลดในสภาวะปกติ (background load level) จากกระแสนิวทรัล หลังจากนั้นวิเคราะห์แยกองค์ประกอบของโหลดออกจากกระแสนิวทรัลที่วัดมาได้ทั้งหมด จึงเหลือเพียงองค์ประกอบของความผิดพร่อง (fault component) ซึ่งสัญญาณดังกล่าวจะส่งต่อให้กับ arc burst pattern analysis algorithm ซึ่งมีหน้าที่เตรียมข้อมูลเพื่อระบุหาเฟสที่เกิดการลัดวงจร โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของความผิดพร่อง (fault component) จากกระแสนิวทรัลที่วัดได้เทียบกับแรงดันเฟส

ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์จะถูกตรวจสอบโดย load analysis algorithm ตัวอย่างของสัญญาณที่ใช้พิจารณาในการทำงานของ load extraction algorithm และ arc burst pattern analysis แสดงดังรูปที่ 3.16 และ 3.17



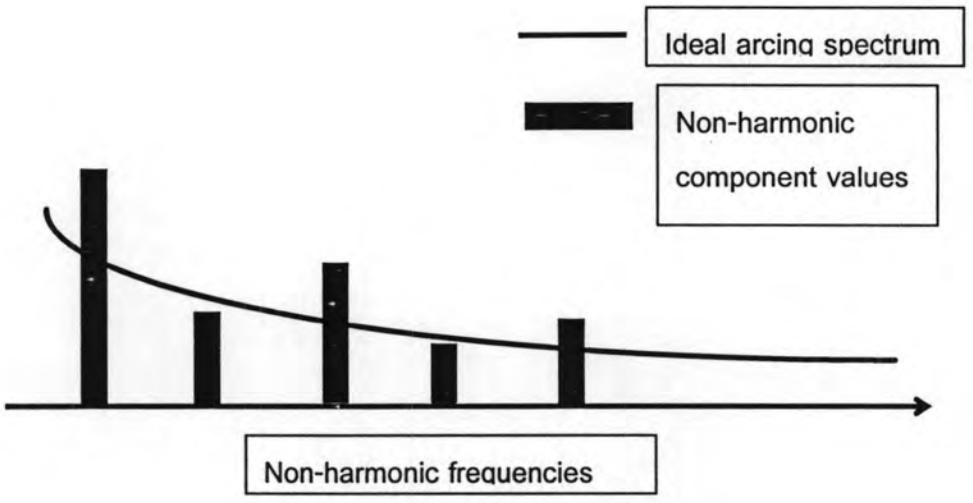
รูปที่ 3.16 Load extraction [13]



รูปที่ 3.17 Arc burst pattern [13]

3.10.2.7 Spectral analysis algorithm [13]

ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบที่มิใช่ฮาร์มอนิก (non – harmonic component) ของกระแสนิวทรัลที่ได้จากการวัด แล้วหาความสัมพันธ์เทียบกับองค์ประกอบที่มิใช่ฮาร์มอนิกของ ideal arcing spectrum หากมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันก็จะทำการเพิ่มระดับความเชื่อมั่นว่ามีอาร์กให้กับสัญญาณดังกล่าว (arc confidence level) แสดงดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 Spectrum Analysis [13]

3.10.2.8 Arcing suspected [13]

ทำการพิจารณาสัญญาณอาร์กที่เกิดขึ้นแบบไม่ต่อเนื่อง โดยทำการนับสัญญาณอาร์กภายในช่วงเวลาที่กำหนด ตัวอย่างเหตุการณ์กรณีดังกล่าว เช่น สายตัวนำแตะสัมผัสต้นไม้ ฉนวนไฟฟ้าเสื่อมสภาพหรือสกปรก โดยมีปัจจัยหลายอย่างที่เกี่ยวข้องกับลักษณะการเกิดอาร์กดังกล่าว เช่น การเคลื่อนตัวของต้นไม้ ความชื้นและความสกปรกของฉนวนไฟฟ้า เป็นต้น ทำให้พฤติกรรมการเกิดอาร์กแตกต่างกัน โดยสัญญาณส่งออกที่ได้จากขั้นตอนวิธีนี้ใช้เป็นสัญญาณเตือน (alarm) ผู้ปฏิบัติงานให้ทำการสำรวจหาจุดที่เกิดอาร์กในระบบ

3.10.2.9 ขั้นตอนการตัดสินใจและวิเคราะห์เหตุการณ์การลัดวงจร

เงื่อนไขการตัดสินใจของรีเลย์ชนิด B โดยมีการตัดสินใจที่สำคัญ 2 กรณี คือ มีอาร์กเกิดขึ้นแต่สายตัวนำไม่ขาด (arcing detected) กับมีอาร์กเกิดขึ้นและสายตัวนำขาด (down conductor) ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่3.4 เงื่อนไขในการตัดสินใจของรีเลย์ชนิด B [13]

Arcing	Loss of load	Overcurrent	Decision
N	N	N	Normal
N	N	Y	Overcurrent
N	Y	Y	Alarm-Overcurrent
Y	N	N	Alarm-Arcing
Y	N	Y	Trip-Down Wire
Y	Y	N	Trip-Down Wire
Y	Y	Y	Trip-Down Wire

เมื่อ

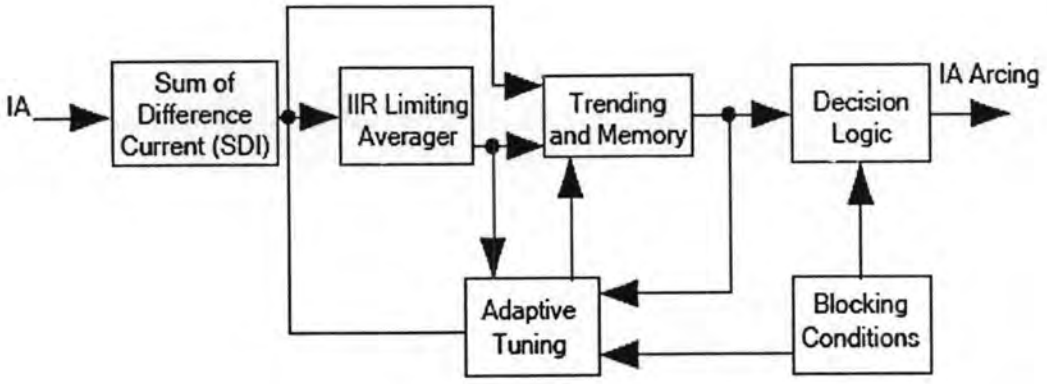
Y คือ มีการตรวจจับพบเหตุการณ์

N คือ ไม่มีเหตุการณ์

3.10.3 หลักการทำงานของรีเลย์ชนิด C [14]

การออกแบบอุปกรณ์ตรวจจับการเกิดกระแสลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง ขั้นตอนวิธีการที่ใช้สำหรับตรวจจับกระแสลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง แสดงได้ดังรูปที่ 3.19 สามารถแบ่งออกเป็นหัวข้อหลักๆ ได้ดังต่อไปนี้

- ขั้นตอนวิธีการที่ใช้สำหรับตรวจจับสัญญาณลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง โดยที่สามารถแยกความแตกต่างได้จากสัญญาณปกติที่มีอยู่ในระบบไฟฟ้า เช่น การตัดต่อสวิตช์ การเปลี่ยนแปลงของโหลด เป็นต้น
- ขั้นตอนวิธีการที่ใช้สำหรับสร้างสัญญาณอ้างอิงก่อนการเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง ซึ่งขั้นตอนวิธีการนี้จะสร้างสัญญาณอ้างอิงตลอดเวลาแม้กระทั่งช่วงเวลาที่เกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง ดังนั้นสัญญาณอ้างอิงที่ถูกสร้างขึ้นจะไม่เปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดเมื่อระบบไฟฟ้าเกิดการลัดวงจรเนื่องจากใช้หลักการเฉลี่ยค่าสัญญาณ (running average)
- ขั้นตอนวิธีการที่ใช้สำหรับปรับค่าสัญญาณที่แปรค่าได้ ขั้นตอนวิธีการนี้จะทำงานตลอดเวลาแม้กระทั่งช่วงที่ไม่ได้เกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง
- ขั้นตอนวิธีการที่ใช้สำหรับตัดสินใจ เพื่อแยกแยะการเกิดเหตุการณ์ลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงกับเหตุการณ์ปกติในระบบไฟฟ้า



รูปที่ 3.19 ขั้นตอนการทำงานของรีเลย์ชนิด C [14]

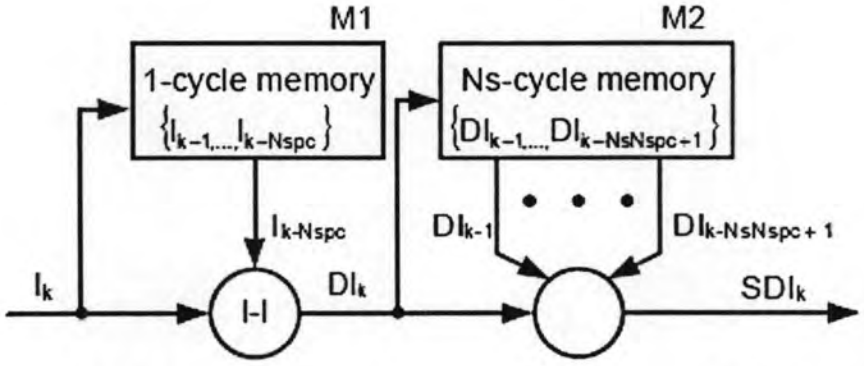
3.10.3.1 Sum of difference current (SDI) [14]

เนื่องจากปริมาณกระแสที่เกิดจากการลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงจะมีค่าน้อย ดังนั้นการตรวจจับสัญญาณลัดวงจรดังกล่าว จะไม่ใช้วิธีการตรวจจับจากขนาดของกระแสเพียงอย่างเดียว โดยปกติแล้วการตรวจจับสัญญาณลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงจะตรวจจับสัญญาณอื่นที่นอกเหนือจากความถี่มูลฐาน ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับสัญญาณที่เกิดจากการอาร์ก ระหว่างสายไฟฟ้ากับพื้นผิวที่สายไฟฟ้าสัมผัสทำให้เกิดกระแสไหลจากสายไฟฟ้าสู่ดินในลักษณะของความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นและเกิดองค์ประกอบของฮาร์มอนิกค่าสูง อย่างไรก็ตามโหลดที่มีพฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้นและสร้างสัญญาณฮาร์มอนิกติดตั้งอยู่ในระบบไฟฟ้า เช่น อินเวอร์เตอร์ เครื่องเชื่อมหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นต้น จะสร้างสัญญาณฮาร์มอนิกอันดับคี่ด้วย ดังนั้นอุปกรณ์ตรวจจับการเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง จะต้องมีความสามารถในการแยกแยะสัญญาณที่เกิดจากการลัดวงจรและสัญญาณที่เกิดจากโหลดได้

ในระยะเริ่มต้นของงานวิจัยเพื่อตรวจจับสัญญาณลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง จะใช้วิธีการตรวจจับจากกระแสไฟฟ้าช่วงความถี่มูลฐาน โดยพิจารณาองค์ประกอบของกระแสลำดับบวก ลบและศูนย์ สัญญาณฮาร์มอนิกอันดับ 3 และ 5 เฟสของฮาร์มอนิกอันดับ 3 การเปลี่ยนแปลงขนาดของฮาร์มอนิกอันดับ 3 และองค์ประกอบที่เกิดขึ้นจากความถี่สูงในช่วง 2 ถึง 10 กิโลเฮิรตซ์ แต่อย่างไรก็ตามแต่ละวิธีก็มีข้อจำกัดและยังไม่สามารถพัฒนาได้อย่างสมบูรณ์

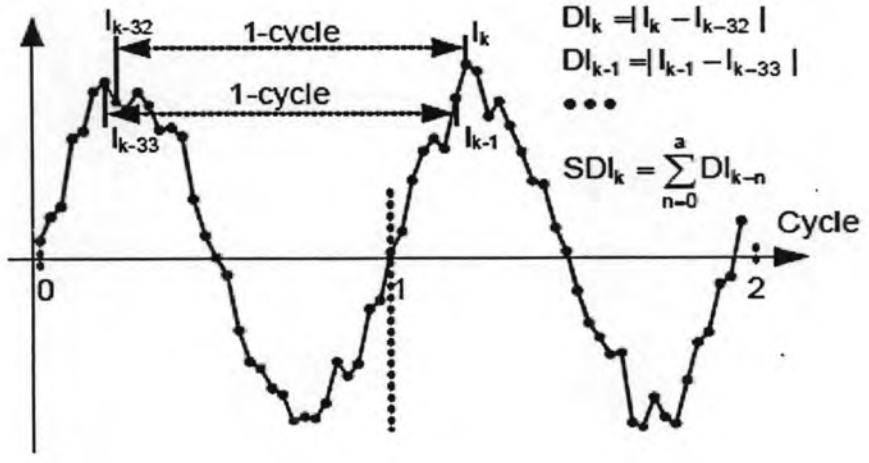
การทำงานของรีเลย์ชนิด C นี้จะเลือกวิธีการตรวจจับระดับสัญญาณ SDI ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.20 สัญญาณอินพุต คือกระแสไฟฟ้าลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง โดยชุดคำนวณสัญญาณ SDI จะมีการคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงของระบบไฟฟ้าตลอดเวลา สัญญาณป้อนเข้าจะได้จากการสุ่มค่าของกระแสไฟฟ้าแต่ละเฟส (I_k) อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณนี้จะใช้

วิธีการตรวจจับระดับความแตกต่างของสัญญาณกระแสไฟฟ้าแต่ละคาบของความถี่มูลฐาน โดยใช้วิธีการบวกสะสมค่าขนาดของความต่างกระแสไฟฟ้า



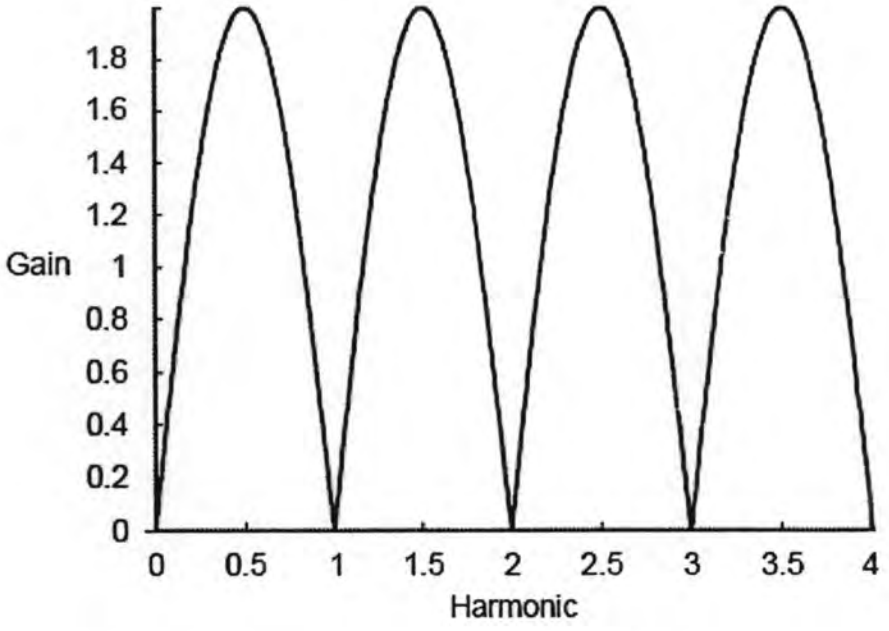
รูปที่ 3.20 การคำนวณหาค่าผลรวมความต่างของกระแสไฟฟ้า (SDI) [14]

รูปที่ 3.21 แสดงวิธีการคำนวณหาค่าความต่างของกระแสเพื่อใช้หาค่า SDI ในโดเมนเวลา ด้วยการสุ่มค่าจากสัญญาณกระแสไฟฟ้าจำนวน 32 ค่าต่อคาบของความถี่มูลฐาน ดังนั้นในกรณีที่กระแสไฟฟ้ามีเฉพาะองค์ประกอบของความถี่มูลฐานและมีขนาดคงที่ ค่าความต่างของกระแสระหว่างสองรูปคลื่นที่คำนวณได้จะมีค่าเป็นศูนย์ และเมื่อเกิดอาร์กขึ้นในระบบไฟฟ้าเนื่องจากการเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง จะเกิดความแตกต่างของสัญญาณขึ้นมาเมื่อเทียบสัญญาณแต่ละคาบความถี่มูลฐาน เนื่องจากการอาร์กจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลลงดินในลักษณะที่ไม่แน่นอน



รูปที่ 3.21 การคำนวณหาสัญญาณ SDI ในโดเมนเวลา [14]

รูปที่ 3.22 แสดงผลตอบสนองต่อความถี่ถึงฮาร์มอนิกอันดับที่4 กับความต่างของกระแสไฟฟ้าที่คำนวณได้ในหนึ่งคาบความถี่มูลฐาน โดยจะพบว่าค่าสัญญาณจะมีขนาดเป็นศูนย์ที่ทุกๆ ความถี่ฮาร์มอนิก และได้รวมถึงที่ความถี่มูลฐานและองค์ประกอบไฟตรง ดังนั้นผลที่ได้จากการคำนวณความต่างของกระแสในหนึ่งคาบความถี่มูลฐานจะมีค่าเป็นศูนย์ ทำให้ผลที่ได้จากการคำนวนค่าความต่างของกระแสจะมีเฉพาะองค์ประกอบของสัญญาณที่อยู่ระหว่างช่วงฮาร์มอนิก (non - harmonic component) ในช่วงการคำนวณ Ns คาบ



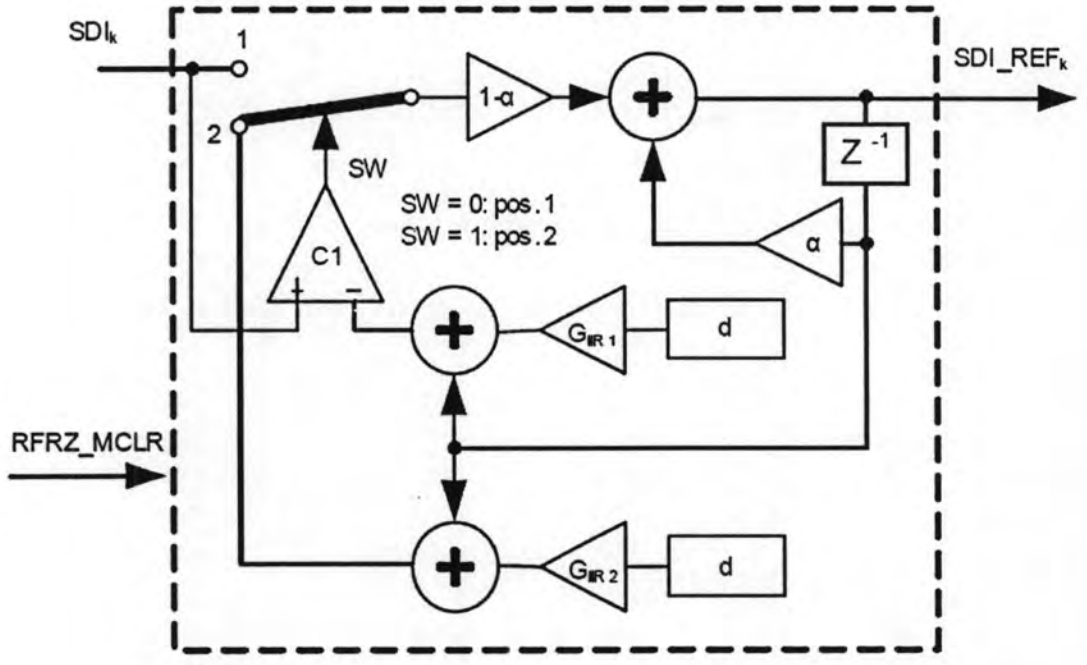
รูปที่ 3.22 ผลตอบสนองต่อความถี่ถึงฮาร์มอนิกอันดับที่ 4 [14]

3.10.3.2 ชุดคำนวณค่าเฉลี่ย (IIR limiting averager) [14]

เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงในระบบไฟฟ้า จะทำให้ค่าของสัญญาณ SDI ที่ได้จากการคำนวณมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าที่เพิ่มขึ้นนี้จะมีนัยสำคัญได้ก็ต่อเมื่อมีค่ามากกว่าค่าของ SDI ค่าก่อน ดังนั้นเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือได้ว่าสัญญาณที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นสัญญาณที่เกิดจากการลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง จึงต้องหาค่าอ้างอิงเพื่อใช้ในการตัดสินใจ ซึ่งชุดคำนวณค่าเฉลี่ยจะทำหน้าที่สร้างสัญญาณอ้างอิง

ในการคำนวณหาค่าเฉลี่ยจะใช้ตัวกรองแบบ IIR ที่ใช้ค่าคงที่ทางเวลาแบบคงตัว ซึ่งจะทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้หน่วยความจำเพื่อเก็บข้อมูลเป็นระยะเวลานานๆ และลดจำนวนครั้งในการคำนวณ แต่สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือต้องเลือกค่าคงที่ทางเวลาให้มี

ค่ามากพอที่จะทำให้สัญญาณอ้างอิงที่สร้างขึ้นมีเสถียรภาพระหว่างช่วงที่เกิดลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้า นั่นคือถ้าเลือกค่าคงที่ทางเวลาที่มีค่าน้อยจะทำให้สัญญาณอ้างอิงที่สร้างขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับสัญญาณของกระแสไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าที่ตรวจจับ ดังนั้นเพื่อป้องกันสัญญาณอ้างอิงที่เปลี่ยนแปลงเร็วเกินไปและยังคงให้สามารถตรวจจับความเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าได้ ค่าสัญญาณอินพุตของชุดคำนวณค่าเฉลี่ยจะถูกจำกัดเมื่อมีค่าสูงเกินค่าที่ตั้งไว้



รูปที่ 3.23 ชุดการทำงานของ IIR input limiting averager [14]

จากรูปที่ 3.23 เป็นขั้นตอนการคำนวณหาค่าสัญญาณอ้างอิง (SDI_REF_k) จะเกิดจากสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งตามสมการที่ (3.8)

$$SDI_REF_k = (1-\alpha).x_{in} + \alpha.SDI_REF_{k-1} \qquad (3.8)$$

โดยที่ α คือค่าคงที่ทางเวลา

x_{in} คือค่าที่ได้จากตัวเทียบค่า C1 จะมีสองค่าคือ 0 และ 1

สัญญาณที่เข้าขั้วบวกของตัวเทียบค่า C1 คือ SDI_k และสัญญาณที่เข้าขั้วลบของตัวเทียบค่า C1 คือ $G_{IIR1}d+SDI_REF_{k-1}$ โดยที่ตัวแปร d แทนตัวปรับค่าได้ซึ่งจะแทนด้วยค่าคงที่ โดยที่สัญญานส่งออกจากตัวเทียบค่า C1 มีค่าตามสมการที่ (3.9)

$$C1=\begin{cases}1 & , if\ SDI_k > G_{IIR1}d+SDI_REF_{k-1} \\ 0 & , otherwise\end{cases} \tag{3.9}$$

เมื่อสัญญาณส่งออกของตัวเทียบค่าเป็น 0 สวิตช์ SW จะอยู่ในตำแหน่ง 1 ซึ่งทำให้ x_{in} มีค่าเท่ากับ SDI_k และกรณีที่สัญญาณส่งออกของตัวเทียบค่ามีค่าเป็น 1 สวิตช์ SW จะอยู่ในตำแหน่ง 2 ซึ่งทำให้ x_{in} มีค่าเท่ากับ $G_{IIR1}d+SDI_REF_{k-1}$ ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่าสัญญาณอ้างอิง SDI_REF_k ได้จากสมการที่ (3.10) และ (3.11)

ถ้า $SDI_k < G_{IIR1}d+SDI_REF_{k-1}$ ดังนั้น

$$SDI_REF_k=(1-\alpha)\bullet SDI_k+\alpha\bullet SDI_REF_{k-1} \tag{3.10}$$

หรืออีกกรณี

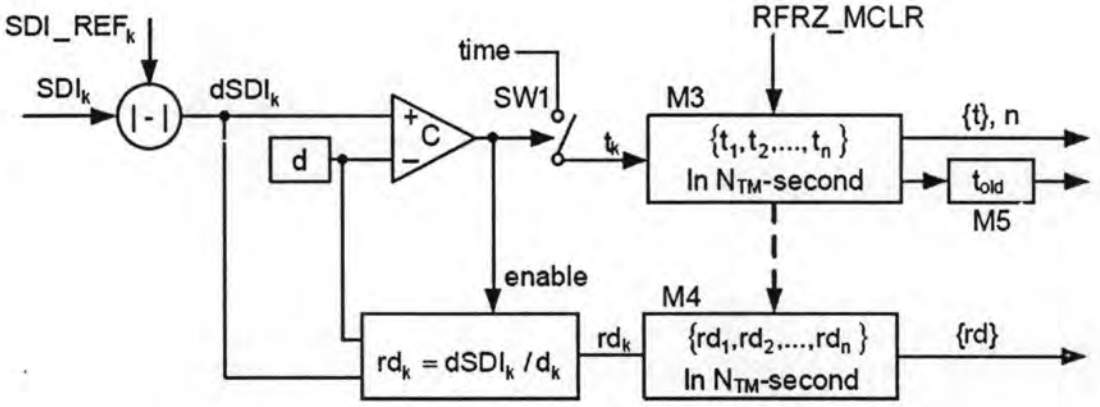
$$SDI_REF_k=(1-\alpha)\bullet G_{IIR2}\bullet d\ +\ SDI_REF_{k-1} \tag{3.11}$$

ในกรณีที่การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าไม่ได้มีสาเหตุมาจากการเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง จะทำให้ตัวสร้างสัญญาณ $RERZ_MCLR$ สร้างสัญญาณลอจิกเป็น 1 ป้อนเข้ามา มีผลให้ชุดคำนวณค่าเฉลี่ยสัญญาณอ้างอิงหยุดการคำนวณและคงค่าสัญญาณอ้างอิงเดิมไว้ โดยเงื่อนไขดังกล่าวนี้พิจารณาได้จากเฟสของกระแสไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงมากและแรงดันไฟฟ้าก็มีการเปลี่ยนแปลงด้วย

3.10.3.3 **ชุดจัดการหน่วยความจำและตรวจจับแนวโน้ม** (Trending and memory) [14]

เนื่องจากชุดคำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า SDI และชุดคำนวณหาค่าสัญญาณอ้างอิงเฉลี่ย มีการคำนวณและส่งค่าออกมาตลอดเวลา ดังนั้นเพื่อที่จะแยกแยะสัญญาณช่วงที่เกิดการลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงออกจากช่วงสภาวะปกตินั้น ชุดจัดการหน่วยความจำและตรวจจับแนวโน้มจะเลือกบันทึกสัญญาณเฉพาะช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงสอดคล้องกับพฤติกรรมการเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงในระบบไฟฟ้าและใช้เป็นเงื่อนไขให้ชุดตัดสินใจทำงาน ชุดจัดการหน่วยความจำและตรวจจับแนวโน้มจะให้ข้อมูลของสัญญาณ SDI ที่เบี่ยงเบนเกินกว่าค่าสัญญาณอ้างอิงเฉลี่ย รูปที่ 3.24 รายละเอียดของชุด

จัดการหน่วยความจำและตรวจจับแนวโน้ม ซึ่งสัญญาณอินพุตที่ป้อนเข้าตัวเปรียบเทียบ C จะมีการคำนวณอยู่ตลอดเวลาทุกครั้งที่มีการคำนวณค่า SDI ในส่วนบล็อกไดอะแกรมหลังจากตัวเปรียบเทียบ C จะทำงานก็ต่อเมื่อตัวเปรียบเทียบ C สร้างสัญญาณส่งออกเป็นลอจิก 1



รูปที่ 3.24 บล็อกไดอะแกรมของชุดจัดการหน่วยความจำและตรวจจับแนวโน้ม [14]

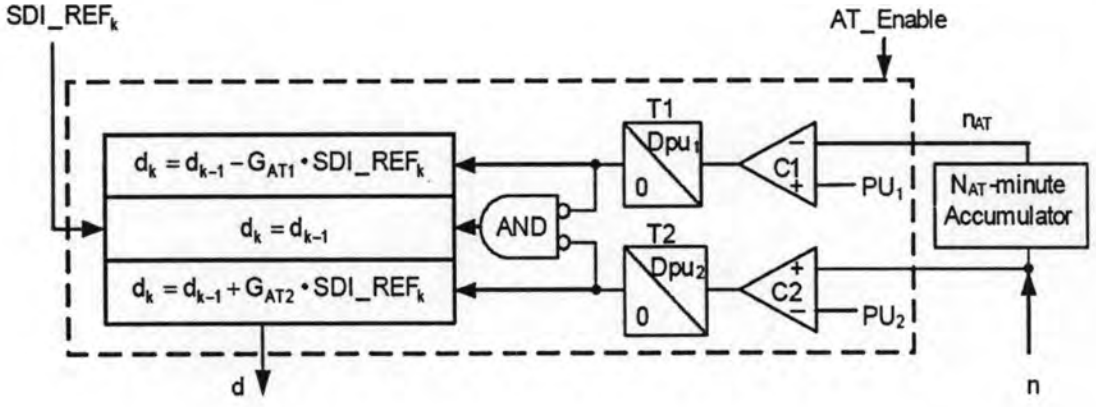
ขนาดของผลต่างระหว่างค่าของ SDI และ SDI_REF เรียกว่า dSDI จะถูกใช้เป็นสัญญาณอินพุตที่ขั้วบวกของตัวเปรียบเทียบ C ขณะที่สัญญาณอินพุตที่ขั้วลบจะได้จากตัวแปร d ที่ได้กล่าวถึงไปแล้วในหัวข้อของชุดคำนวณค่าเฉลี่ย เมื่อสัญญาณ dSDI มีค่าสูงกว่า d ตัวเปรียบเทียบจะสร้างสัญญาณส่งออกเป็นลอจิก 1 หากไม่ตรงตามเงื่อนไขนี้ตัวเปรียบเทียบจะสร้างสัญญาณส่งออกเป็นลอจิก 0 สัญญาณส่งออกที่เป็นลอจิก 1 จากตัวเปรียบเทียบจะทำให้สวิตช์ SW1 อยู่ในสถานะปิด ทำให้ขั้นตอนวิธีของ M3 บันทึกค่าสัญญาณลงในหน่วยความจำในช่วงที่สวิตช์ SW1 อยู่ในสถานะปิด ซึ่งหน่วยความจำที่ใช้บันทึกค่านี้จะต้องมีค่าเพียงพอที่จะสามารถบันทึกสัญญาณการเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงที่เกิดขึ้นจำนวนสูงสุดเท่ากับ t_k ภายในเวลา N_{TM} วินาที ในช่วงเวลาที่เริ่มต้นบันทึกสัญญาณถ้ากลุ่มของข้อมูล $\{t_1, t_2, ..., t_n\}$ ที่ถูกบันทึกไว้ก่อนหน้ามีค่าไม่เป็นศูนย์ จะทำให้ข้อมูลล่าสุด t_n ถูกย้ายไปสู่หน่วยความจำ $M5$ โดยกำหนดให้เป็น t_{old} แต่ถ้ากลุ่มข้อมูล $\{t_1, t_2, ..., t_n\}$ ก่อนหน้าไม่มีข้อมูลอยู่คือ เป็นศูนย์ หน่วยความจำ M5 จะยังคงเก็บข้อมูลเดิมไว้ให้เป็น t_{old}

สัญญาณส่งออกที่ได้จากชุดจัดการหน่วยความจำและตรวจจับแนวโน้มนั้นจะมี 3 สัญญาณคือ $\{t\}, n,$ $\{t_{old}\}$ และ $\{rd\}$ เพื่อใช้สำหรับเป็นข้อมูลให้ชุดตัดสินใจพิจารณาว่าสัญญาณที่เกิดขึ้นเป็นการเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงจริงหรือไม่ โดยที่ n จะ

แสดงถึงจำนวนที่ SDI มีค่าสูงกว่าค่าสัญญาณอ้างอิง SDI_REF บวกกับค่า d ของช่วงเวลา N_{TM} วินาที อย่างไรก็ตามในกรณีที่ไม่ได้เกิดการลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง $RFRZ_MCLR$ จะทำหน้าที่ลงสัญญาณ $\{t\}$ และ $\{rd\}$ ออกจากหน่วยความจำเช่นเดียวกับชุดคำนวณค่าเฉลี่ยแบบ IIR

3.10.3.4 Adaptive tuning [14]

วัตถุประสงค์หลักของขั้นตอนวิธีนี้คือ หาคุณลักษณะของโหลดที่เกิดขึ้นในสภาวะปกติ ซึ่งจะมีการปรับตัวและเรียนรู้สภาพโหลดในระบบไฟฟ้าที่จะส่งผลให้ระดับสัญญาณ SDI มีค่าสูงกว่าระดับของสัญญาณอ้างอิง ซึ่งค่าที่ได้นี้จะถูกนำไปใช้ในชุดคำนวณหาค่าเฉลี่ยและชุดจัดการหน่วยความจำและแนวโน้มที่อยู่ในรูปของตัวแปร d รูปที่ 3.25 แสดงรายละเอียดของ adaptive tuningประกอบด้วยสัญญาณอินพุตสองค่าคือ n และ n_{AT} โดยที่ n คือจำนวนครั้งที่สัญญาณ SDI มีค่าสูงเกินกว่าสัญญาณอ้างอิงรวมกับส่วนเพิ่ม d ที่เกิดขึ้นภายในเวลา N_{TM} วินาที ดังที่ได้กล่าวถึงแล้ว



รูปที่ 3.25 Adaptive tuning function [14]

ตัวสะสมค่าจะรวมค่า n ทั้งหมดที่เกิดขึ้นเป็นระยะเวลานาน N_{AT} นาที และสร้างสัญญาณส่งออก n_{AT} ซึ่งแสดงถึงจำนวนครั้งที่สัญญาณ SDI เบี่ยงเบนจากระดับสัญญาณอ้างอิงเฉลี่ยรวมกับส่วนเพิ่ม d ภายในระยะเวลา N_{AT} นาที

ตัวเปรียบเทียบค่าตัวที่หนึ่ง C1 จะเปรียบเทียบค่าของ n_{AT} กับค่าอ้างอิง PU_1 ถ้า n_{AT} มีค่าน้อยกว่า PU_1 สัญญาณส่งออกที่ได้จากตัวเปรียบเทียบค่า C1 จะมีค่าเป็นลอจิก 0 ถ้าสัญญาณส่งออกของตัวเปรียบเทียบค่านี้ให้ลอจิก 1 ต่อเนื่องเป็นระยะเวลา D_{PU1} นาที ตัวจับเวลา T_1 จะสร้างสัญญาณส่งออกเป็นลอจิก 1 เป็นผลทำให้ค่า d ในแถวบนสุดมีการคำนวณค่าใหม่และในเวลาเดียวกันนี้ตัวลอจิก AND จะสร้างสัญญาณส่งออกเป็นลอจิก 0 ใน

กรณีที่สัญญาณ SDI ไม่ได้เบี่ยงเบนเกินกว่าค่าเฉลี่ยอ้างอิงรวมกับส่วนเพิ่ม d เป็นระยะเวลามากกว่า PU_2 ซึ่งกำหนดไว้ที่ D_{PU1} ชุดการทำงานนี้จะมีการพิจารณาถึงค่าส่วนเพิ่ม d มีค่าสูงมากเกินไป และจะมีการคำนวณลดค่า d ลง G_{AT1} เปอร์เซ็นต์ของค่าเฉลี่ย ดังสมการที่ (3.12)

$$d_k = d_k - G_{AT1} \bullet SDI_REF_k \tag{3.12}$$

สำหรับตัวเปรียบเทียบชุดที่สอง C2 จะทำการเปรียบเทียบค่าของ n กับค่าอ้างอิง PU_2 ถ้า n มากกว่า PU_2 ตัวเปรียบเทียบ C2 จะสร้างสัญญาณส่งออกเป็นลอจิก 1 ถ้าไม่ตรงตามเงื่อนไขนี้สัญญาณส่งออกจะเป็นลอจิก 0 ในกรณีที่สัญญาณส่งออกเป็นลอจิก1 ต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน D_{PU2} วินาที ตัวจับเวลา T2 จะสร้างสัญญาณลอจิก 1 ซึ่งมีผลทำให้ค่า d ในแถวล่างสุดมีการคำนวณค่าใหม่และในเวลาเดียวกันนี้ตัวลอจิก AND จะสร้างสัญญาณส่งออกเป็นลอจิก 0 ในทางกลับกันถ้าสัญญาณ SDI เบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยอ้างอิงรวมกับส่วนเพิ่ม d เป็นระยะเวลา PU_2 ภายใน N_{TM} วินาที และสัญญาณ SDIนั้นมากกว่าค่าสุดท้ายเป็นระยะเวลา D_{PU2} วินาที ชุดการทำงานนี้จะพิจารณาค่า d มีค่าน้อยเกินไปและจะทำการคำนวณเพิ่มค่า d ขึ้น G_{AT2} เปอร์เซ็นของค่าเฉลี่ย ดังสมการที่ (3.13)

$$d_k = d_k + G_{AT2} \bullet SDI_REF_k \tag{3.13}$$

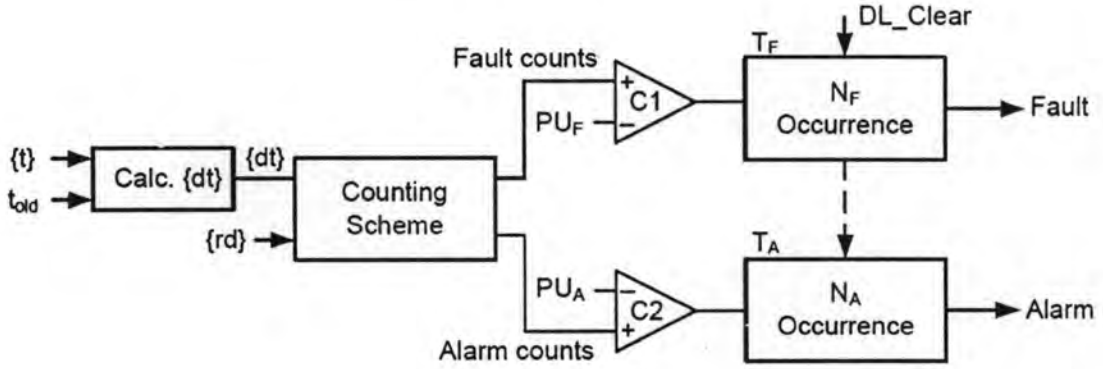
ถ้าสัญญาณส่งออกของชุดจับเวลา T1 และ T2 เป็นลอจิก 0 และลอจิก AND สร้างสัญญาณส่งออกเป็นลอจิก 1 จะทำให้มีการคำนวณค่า d ที่อยู่ในแถวกลาง ซึ่งค่า d ที่เกิดขึ้นใหม่จะไม่ต่างจากค่าเดิม

ชุดตัดสินใจ AT_Enable สำหรับการรับค่าอินพุต จะตรวจจับเมื่อค่า d มีการคำนวณใหม่ แล้วจึงยอมให้มีการรับค่าอินพุตได้ เนื่องจากโหลดที่ต่ออยู่ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า เช่น รถไฟฟ้า จะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นคาบเวลา หรือโหลดอื่นๆ เช่น มอเตอร์ ดังนั้นในทางอุดมคติแล้วกระบวนการปรับค่าควรมีการปรับค่าอย่างต่อเนื่องตราบเท่าที่การเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงยังไม่ปรากฏ และตัวปรับค่านี้ควรจะรักษาอยู่ในสถานะที่คงที่หลังจากที่เซอร์คิตเบรกเกอร์เริ่มปิดวงจรและเริ่มที่จะตรวจจับกระแสโหลดได้

3.10.3.5 **ชุดตัดสินใจ** (Decision logic) [14]

ชุดจัดการหน่วยความจำและชุดปรับแนวโน้มจะส่งข้อมูลออกมาตลอดเวลาสอดคล้องกับจำนวนครั้งที่สัญญาณ SDI เบี่ยงเบนจากสัญญาณอ้างอิงเฉลี่ย โดยที่ค่า

n แทนจำนวนครั้งที่สัญญาณ SDI เบี่ยงเบนจากสัญญาณอ้างอิงภายในระยะเวลา N_{TM} วินาที ขณะที่กลุ่มของอัตราส่วน $\{rd\}$ แสดงข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับจำนวนครั้งที่สัญญาณ SDI เกินค่าอ้างอิง โดยการทำงานของบล็อกแรกในรูปที่ 3.26 จะคำนวณกลุ่มของเวลาที่แตกต่าง $\{dt\}$ โดยใช้ข้อมูลจากกลุ่มข้อมูล $\{t\}$ และ t_{old} จากชุดจัดการหน่วยความจำและปรับแนวโน้ม โดยค่า $\{dt\}$ ที่ได้จะแสดงคุณลักษณะที่ไม่แน่นอนของสัญญาณการเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง

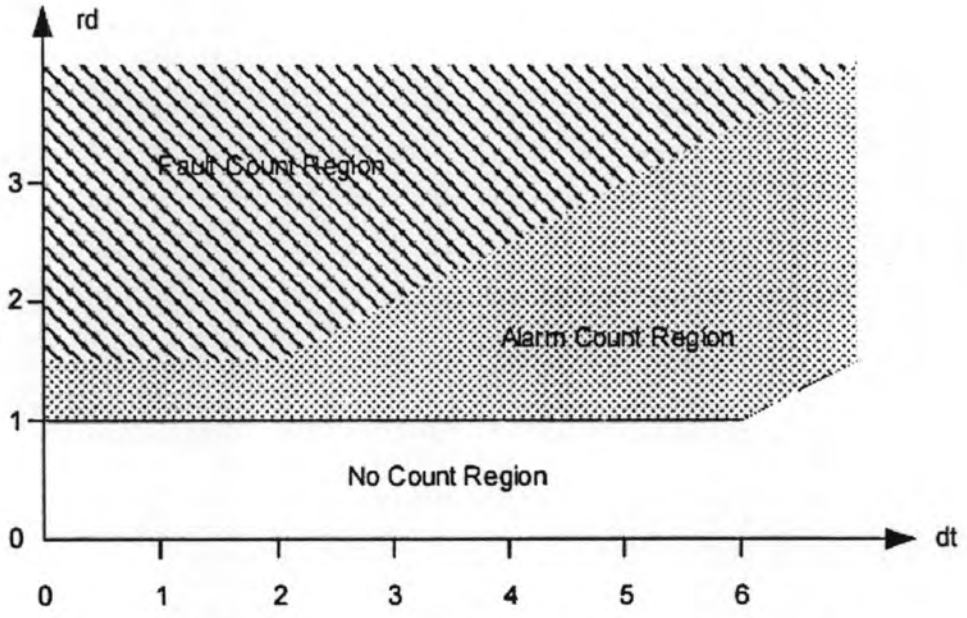


รูปที่ 3.26 ขั้นตอนการทำงานของชุดตัดสินใจ [14]

ชุดตัดสินใจจะมีการนับสัญญาณสองชุด เพื่อที่จะแยกการส่งสัญญาณแบบลัดวงจร (fault) และแบบเตือน (alarm) จากการเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง โดยที่ตัวนับ T_F ใช้สำหรับการตรวจจับการเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงในขณะที่ตัวนับ T_A ใช้สำหรับสัญญาณเตือนถึงการมีแนวโน้มว่าเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง รูปแบบของการนับจะเลือกที่จะนับหรือไม่นับ และจำนวนของค่าที่นับได้สำหรับการเกิดลัดวงจรหรือการเตือนแต่ละคู่ของข้อมูล $\{rd, dt\}$ ในช่วงระยะเวลา N_{TM} วินาที ถ้าจำนวนค่าที่นับได้มีค่าเกิน PU_F ซึ่งตัดสินใจโดยตัวเปรียบเทียบ C1 ตัวเปรียบเทียบจะสร้างสัญญาณส่งออกเป็นลอจิก 1 และตัวนับ T_F จะสะสมค่าลอจิก 1 ของสัญญาณส่งออกของตัวเปรียบเทียบ C1 ถ้ามีจำนวน N_F เกิดขึ้นภายในช่วงเวลาที่กำหนด ตัวนับ T_F จะสร้างสัญญาณส่งออกลอจิก 1 เพื่อแสดงให้เห็นว่าเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงในระบบไฟฟ้า และสำหรับชุดการทำงานที่แสดงสัญญาณเตือนลักษณะการทำงานก็จะคล้ายกันคือ คำนวณจากการใช้ตัวเปรียบเทียบ C2 และตัวนับ T_A

รูปที่ 3.27 แสดงระนาบ rd, dt ซึ่งในระนาบทั้งหมดได้ถูกแบ่งเป็น 3 ส่วนคือ ย่านการเกิด ลัดวงจร (fault) , ย่านการเตือน (alarm) และย่านที่ไม่มีการนับ โดยในแกนของ dt จะมีหน่วยเป็น $Ns-cycle$ ถ้าคู่ของ $\{rd, dt\}$ ตกอยู่ในระนาบที่ไม่มีการนับ ชุดตัดสินใจจะไม่ส่งสัญญาณออกแสดงถึงไม่มีการนับเกิดขึ้น ส่วนกรณีที่ $\{rd, dt\}$ ตกอยู่ในย่านการ

เตือน ชุดตัดสินใจจะแสดงสัญญาณส่งออกเฉพาะการเตือน และในกรณีสุดท้ายถ้าคู่ของ $\{rd, dt\}$ ตกอยู่ในช่วงการเกิดลัดวงจร ชุดตัดสินใจจะสร้างสัญญาณส่งออกทั้งการเกิดลัดวงจรและการเตือน



รูปที่ 3.27 ย่านการนับสำหรับการลัดวงจรและการเตือน [14]