

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการวิจัยเกี่ยวกับความผิดปกติเนื่องจากสายไฟฟ้าขาดแล้วสัมผัสพื้น โดยเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง ดังนั้นจึงมีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องอยู่หลายด้าน อาทิเช่น ด้านความรู้ทั่วไปของระบบไฟฟ้ากำลัง ด้านการเกิดความผิดปกติ ด้านการป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง ด้านประเภทการต่อภาระในระบบไฟฟ้า และด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ แต่จะขออธิบายถึงส่วนที่สำคัญและเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ โดยมีรายละเอียดพอที่จะอธิบายได้ดังนี้

2.1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้า (Electrical Distribution Systems)

ระบบไฟฟ้ากำลัง โดยทั่วไปแบ่งระดับออกได้ดังนี้

- ระบบผลิตไฟฟ้า

ระบบผลิตไฟฟ้าเป็นส่วนที่ผลิตไฟฟ้าให้แก่ระบบไฟฟ้ากำลัง โดยในระบบการผลิตไฟฟ้าส่วนใหญ่นั้นจะอาศัยพลังงานทางกลเพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเจนเนอเรเตอร์เป็นอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้ามากที่สุด พลังงานกลที่ใช้ผลิตไฟฟ้านั้น สามารถได้มาจากแหล่งพลังงานอื่นๆ เช่น พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานความร้อนเป็นต้นและอาจจะมีส่วนน้อยที่ใช้หลักการการเปลี่ยนแสงซึ่งเป็นพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง เช่น การใช้เซลล์แสงอาทิตย์ในการผลิตไฟฟ้า

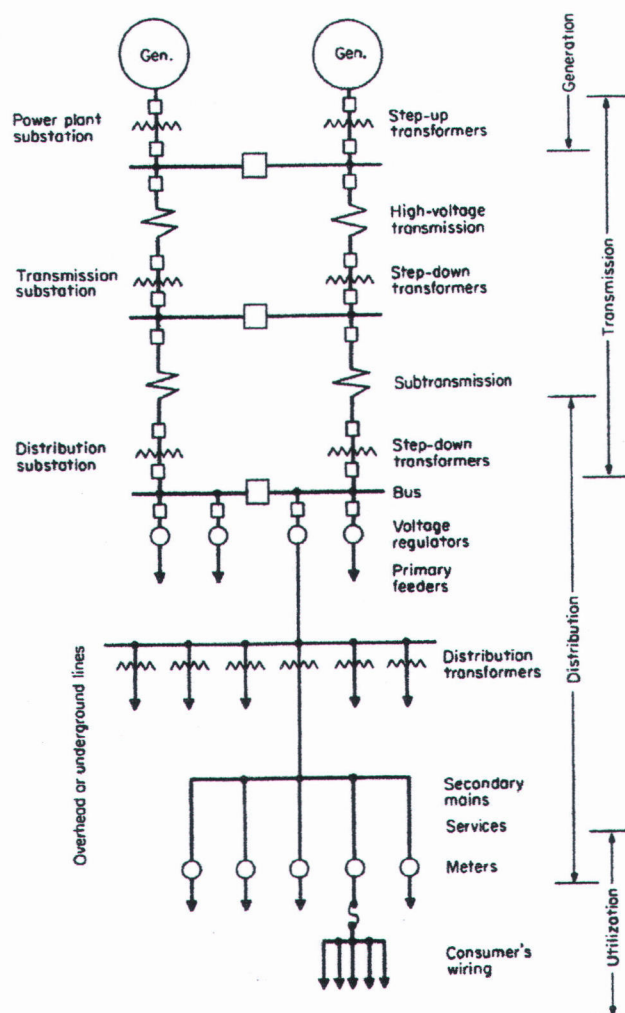
- ระบบส่งกำลังไฟฟ้า

เมื่อผลิตไฟฟ้าได้แล้ว จะต้องมียระบบที่ทำหน้าที่ส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งผลิตไปยังแหล่งการใช้พลังงาน ระบบดังกล่าวนี้เรียกว่า ระบบส่งกำลังไฟฟ้า โดยส่วนใหญ่แล้วระบบนี้จะใช้ระดับแรงดันที่สูงมากๆ เพื่อให้สามารถส่งกำลังไฟฟ้าไปได้ระยะทางไกลยิ่งขึ้น โดยให้ความสูญเสีย (Loss) ต่ำ

- ระบบจำหน่ายไฟฟ้า

ระบบนี้ทำหน้าที่ลดระดับแรงดันจากระบบส่งกำลังไฟฟ้า มาสู่ระดับจำหน่ายไฟฟ้า ระบบจำหน่ายไฟฟ้านั้นนับว่าเป็นระบบที่เข้าถึงประชาชนผู้ใช้ไฟฟ้ามากที่สุด กล่าวคือระบบไฟฟ้าที่ใช้ตามบ้านเรือนก็ล้วนเป็นระบบจำหน่ายไฟฟ้าทั้งสิ้น ทำให้เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นภายในระบบจำหน่ายไฟฟ้านี้ ย่อมส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งทางตรง และทางอ้อม

ตัวอย่างระบบไฟฟ้ากำลัง แสดงได้ในภาพที่ 2.1 ซึ่งครอบคลุมทั้งสามระบบไฟฟ้าหลัก คือ ระบบผลิตไฟฟ้า ระบบส่งกำลังไฟฟ้า และระบบจำหน่ายไฟฟ้า



ภาพที่ 2.1 ระบบไฟฟ้ากำลัง และส่วนประกอบของระบบไฟฟ้ากำลัง

ในที่นี้จะกล่าวถึงระบบจำหน่ายไฟฟ้า ระบบจำหน่ายไฟฟ้าเป็นระบบที่มีความสำคัญอย่างหนึ่งในระบบไฟฟ้ากำลัง เพราะเป็นระบบที่ลดทอนระดับแรงดันจากแรงดัน 115 kV ลงมาสู่ระดับแรงดันสูงปานกลาง ระบบดังกล่าวนี้เป็นระบบที่กระจายพลังงานไฟฟ้าเข้าสู่เมือง ชุมชน หรือพื้นที่ห่างไกล [2]

ในประเทศไทยระดับแรงดันของระบบจำหน่ายจะแบ่งตามผู้ให้บริการไฟฟ้า และพื้นที่ให้บริการ เช่น แรงดันระดับ 12 และ 24 kV เป็นแรงดันระบบจำหน่ายของการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) ซึ่งรับผิดชอบการจ่ายไฟฟ้าในพื้นที่ กรุงเทพมหานคร นนทบุรี และสมุทรปราการ

ส่วนแรงดัน 11, 22 และ 33 kV เป็นแรงดันระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ซึ่งพื้นที่รับผิดชอบการจ่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค คือ 73 จังหวัดทั่วประเทศ ยกเว้น กรุงเทพมหานคร นนทบุรี และสมุทรปราการ

2.2 การต่อโหลด 3 เฟส (Three Phase Load Connection)

พิจารณาเฉพาะแหล่งจ่ายที่ต่อแบบวาย (Wye) ต่อเข้ากับโหลดสามเฟส ซึ่งโหลดสามเฟสที่จะนำมาต่อมีสองชนิดคือ โหลดสามเฟสต่อแบบวาย (Y) กับ โหลดสามเฟสต่อแบบเดลต้า (Δ) [3]

การต่อโหลดแบบวาย (Wye Connection)

ถ้าเป็นโหลดสามเฟสต่อแบบ Y เมื่อต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟส จะได้ดังภาพที่ 2.2 ภาพที่ 2.2(a) เป็นการต่อแบบสามเฟส สี่สาย มีสายนิวทรัล ทำหน้าที่นำกระแสที่ไม่สมดุลของโหลดกลับเข้าสู่ระบบ ในกรณีที่โหลดทั้งสามไม่เท่ากัน ส่วนกรณีที่โหลดทั้งสามเท่ากัน ($Z_1 = Z_2 = Z_3$) สายนิวทรัลสามารถปลดออกได้ เนื่องจากไม่มีกระแสที่ไหลออกจากโหลดทั้งสาม การต่อโหลดที่ไม่ใช้สายนิวทรัลเรียกว่า ระบบสามเฟสสามสาย ซึ่งแสดงลักษณะการต่อดังภาพที่ 2.2(b) จากภาพจะเห็นว่า โหลดในแต่ละเฟส จะต่อขนานกับแหล่งกำเนิดแรงดันโดยตรง ดังนั้นแรงดันตกคร่อมที่โหลดแต่ละตัวจะมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} V_{an} &= E_{AN} \\ V_{bn} &= E_{BN} \\ V_{cn} &= E_{CN} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(1)$$

กระแสที่ไหลออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในแต่ละเฟสเรียกว่ากระแสเฟส (Phase Current) ซึ่งได้แก่ I_A, I_B และ I_C ส่วนกระแสที่ไหลผ่านสายตัวนำที่ต่อระหว่างขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับโหลดเรียกว่ากระแสสาย (Line Current) ซึ่งได้แก่ I_{Aa}, I_{Bb} และ I_{Cc} จากวงจรภาพที่ 2.2 จะเห็นว่ากระแสเฟสเป็นกระแสตัวเดียวกับกระแสสาย การคำนวณหาค่ากระแสสายและกระแสเฟส จึงทำได้เหมือนกับระบบหนึ่งเฟสนั่นคือ

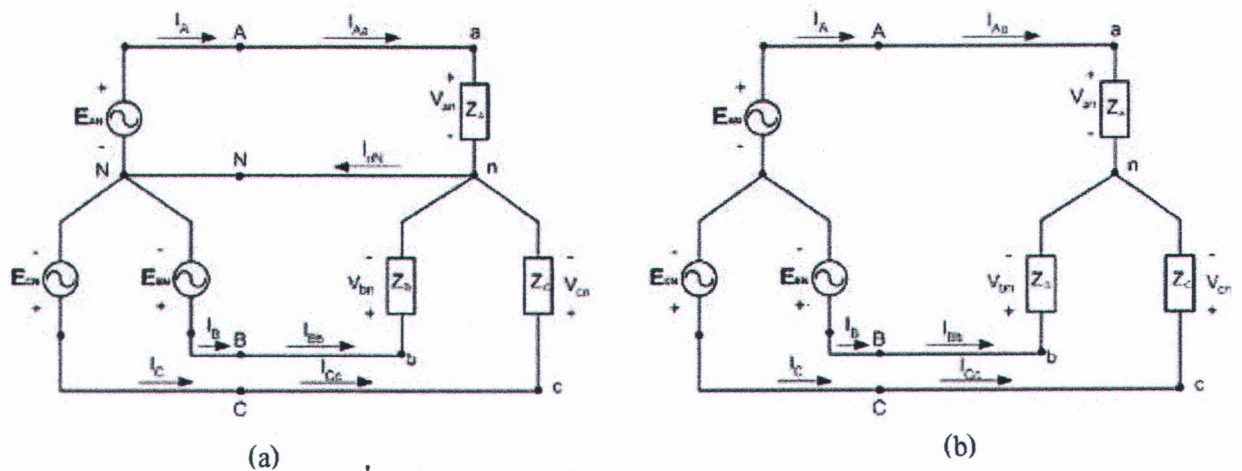
$$I_{Aa} = I_A = \frac{V_{an}}{Z_A} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$I_{Bb} = I_B = \frac{V_{bn}}{Z_B} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$I_{Cc} = I_C = \frac{V_{cn}}{Z_C} \quad \dots\dots\dots(4)$$

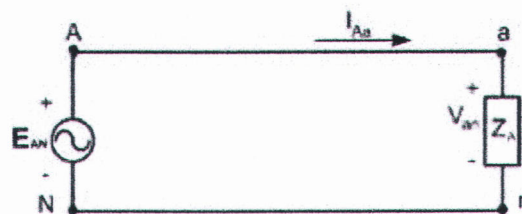
สำหรับกระแส I_{nN} จะเท่ากับผลรวมของกระแสสายทั้งสามเฟส ซึ่งเขียนสมการได้ว่า

$$I_{nN} = I_{Aa} + I_{Bb} + I_{Cc} \quad \dots\dots\dots(5)$$



ภาพที่ 2.2 แสดงการต่อโหลดสามเฟสแบบวาย

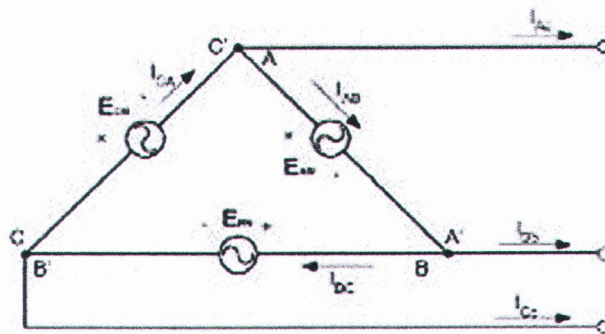
ในกรณีที่ระบบสามเฟสมีโหลดทั้งสามเฟสเท่ากันหรือสมดุล ($Z_A = Z_B = Z_C$) สมการที่ 5 จะให้ค่ากระแส I_{nN} เท่ากับศูนย์ ในสถานะเช่นนี้สายนิวทรัลสามารถปลดออกจากระบบได้ แต่ถ้าระบบสามเฟสมีโหลดทั้งสามเฟสไม่เท่ากันหรือไม่สมดุล ($Z_A \neq Z_B \neq Z_C$) ผลรวมของกระแสตามสมการที่ 5 จะไม่เท่ากับศูนย์ ทำให้สายนิวทรัลจะทำหน้าที่รักษาระดับของแรงดันเฟสให้สมดุลจากสมการที่ 2 ถึงสมการที่ 4 เมื่อโหลดทั้งสามเฟสสมดุล จะให้ค่ากระแสที่ไหลผ่านโหลดแต่ละเฟสเท่ากัน ส่วนมุมเฟสของกระแสแต่ละเฟสจะต่างกันเป็นมุม 120° ตามลำดับเฟส จากความจริงดังกล่าวถ้าทราบค่ากระแสที่ไหลผ่านโหลดตัวใดตัวหนึ่งพร้อมกับลำดับเฟสของวงจรก็จะสามารถหาค่ากระแสของโหลดที่เหลือทั้งสองได้ ดังนั้นการวิเคราะห์วงจรสามเฟส เมื่อโหลดสมดุลสามารถทำได้ด้วยการวิเคราะห์แบบหนึ่งเฟส โดยหาค่ากระแสในเฟสใดเฟสหนึ่ง จากนั้นใช้ความสัมพันธ์ของลำดับเฟสหาค่าของกระแสในเฟสที่เหลือ ภาพที่ 2.3 เป็นวงจรสมมูลหนึ่งเฟส ของวงจรสามเฟสเมื่อโหลดสมดุล



ภาพที่ 2.3 วงจรสมมูลหนึ่งเฟส กรณีที่โหลดทั้งสามเฟสเท่ากัน



การต่อโหลดแบบเดลต้า (Delta Connection)



ภาพที่ 2.4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟสที่มีการต่อแบบเดลต้า (Δ)

จากภาพที่ 2.4 จะได้กระแสเฟสคือ I_{AB} , I_{BC} และ I_{CA} ส่วนกระแสสาย I_{Aa} , I_{Bb} และ I_{Cc} การวัดแรงดันระหว่างสาย A กับสาย B จะเหมือนกับการวัดแรงดันเฟส นั่นคือการต่อแบบเดลต้า (Δ) จะให้แรงดันสายเท่ากับแรงดันเฟส ถ้าระบบมีลำดับเฟส ABC จะได้ว่า

$$E_{AB} = E_{AA'} = E_m \angle 0^\circ \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$E_{BC} = E_{BB'} = E_m \angle -120^\circ \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$E_{CA} = E_{CC'} = E_m \angle 120^\circ \quad \dots\dots\dots(8)$$

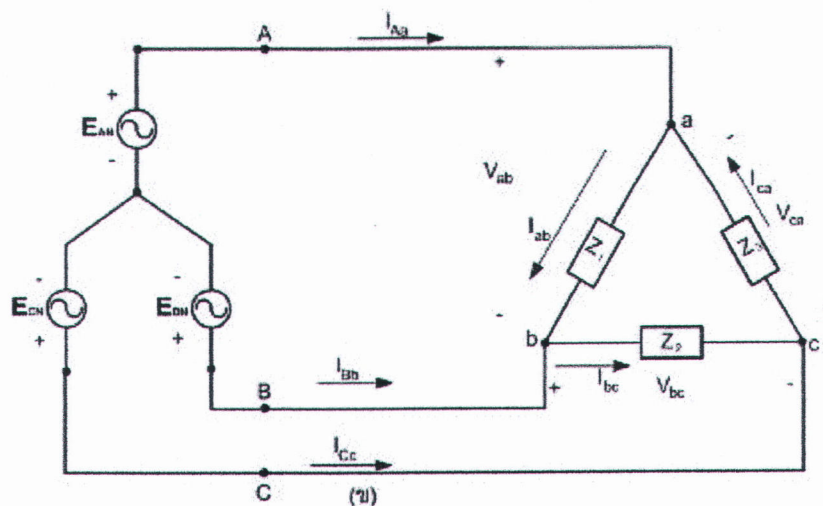
จากภาพที่ 2.4 ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อโหลด จะเห็นว่ากระแสสาย (I_{Aa} , I_{Bb} และ I_{Cc}) จะไม่เท่ากับกระแสเฟส (I_{AB} , I_{BC} และ I_{CA}) ในทางปฏิบัติการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟสแบบเดลต้า (Δ) มักไม่นิยมต่อใช้งานเนื่องจากเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อโหลดกระแสที่ไหลผ่านโหลดจะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กที่มีลักษณะบิดเบือนจากสภาพปกติ ทำให้การเกิดแรงดันเหนี่ยวนำในขดลวดแต่ละขดมีขนาดหรือเฟสไม่สมดุล ผลรวมของแรงดันเฟสทั้งสามจะไม่เท่ากับศูนย์ ซึ่งผลอันนี้จะทำให้เกิดกระแสหมุนเวียนภายในขดลวดทั้งสามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าร้อนและประสิทธิภาพการทำงานลดลง โหลดสามเฟสแบบเดลต้า (Δ) มีทั้งที่สมดุลและไม่สมดุลขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานภายในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยจะพิจารณาแบบเดลต้า (Δ) สมดุลคือ ($Z_1 = Z_2 = Z_3$) ซึ่งแสดงดังภาพที่ 2.4 ในการหาค่ากระแสสายจึงต้องอาศัยกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ เขียนสมการกระแสสายที่โนดทั้งสามของโหลด ซึ่งจะได้ว่า

$$I_{Aa} = I_{ab} - I_{ca} \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$I_{Bb} = I_{bc} - I_{ab} \quad \dots\dots\dots(10)$$

$$I_{Cc} = I_{ca} - I_{bc} \quad \dots\dots\dots(11)$$





ภาพที่ 2.5 แสดงการต่อโหลดสามเฟสแบบเดลต้า

ส่วนกระแสเฟสซึ่งไหลผ่านอิมพีแดนซ์ในแต่ละเฟส หาได้จากแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ตัวนั้นๆ หากด้วยอิมพีแดนซ์เช่น กระแสเฟส I_{ab} เป็นกระแสที่ไหลจากโนด a ไปยังโนด b มีอิมพีแดนซ์ Z_1 ต่ออยู่ระหว่างโนด a - b ดังนั้นสามารถหากระแสเฟส I_{ab} ได้

$$I_{ab} = \frac{V_{ab}}{Z_1} \quad \text{.....(12)}$$

ในทำนองเดียวกัน

$$I_{bc} = \frac{V_{bc}}{Z_2} \quad \text{.....(13)}$$

$$I_{ca} = \frac{V_{ca}}{Z_3} \quad \text{.....(14)}$$

ในกรณีที่โหลดสมดุลกระแสเฟสซึ่งไหลผ่านอิมพีแดนซ์ทั้งสามจะมีค่าเท่ากัน ส่วนมุมเฟสในแต่ละเฟสจะต่างกันเป็นมุม 120° ถ้ากำหนดให้กระแสเฟส $I_{ab} = I \angle \theta$ และระบบมีลำดับเฟสแบบ ABC จะทำให้ได้กระแสเฟส $I_{ca} = I \angle (\theta + 120^\circ)$ จากสมการที่ 9 จะได้กระแสสาย I_{Aa} เท่ากับ

$$\begin{aligned} I_{Aa} &= I_{ab} - I_{ca} \\ I_{Aa} &= I \cos \theta + jI \sin \theta - I \cos(\theta + 120^\circ) - jI \sin(\theta + 120^\circ) \\ &= -2I \sin(\theta + 60^\circ) \sin(-60^\circ) + j2I \cos(\theta + 60^\circ) \sin(-60^\circ) \\ &= \sqrt{3}I(\sin(\theta + 60^\circ) - j\cos(\theta + 60^\circ)) \\ &= \sqrt{3}I(\cos(\theta - 30^\circ) - j\sin(\theta - 30^\circ)) \\ &= \sqrt{3}I \angle (\theta - 30^\circ) \text{ A} \end{aligned} \quad \text{.....(15)}$$

$$|I_{Aa}| = \sqrt{3}I = \sqrt{3}|I_{ab}| \quad \text{.....(16)}$$

จากสมการที่ 16 ขนาดของกระแสสาย I_{Aa} จะเท่ากับ $\sqrt{3}$ ของกระแสเฟส ส่วนเฟสของกระแสสายจะล่าหลังเฟสของกระแสเฟสที่มีอักษรเฟสตัวแรกตรงกัน เป็นมุม 30° เช่นกระแสสาย I_{Aa} ล่าหลังกระแสเฟส I_{ab} กระแสสาย I_{Bb} ล่าหลังกระแสเฟส I_{bc} และกระแสสาย I_{Cc} ล่าหลังกระแสเฟส I_{ca} แต่ถ้าระบบมีลำดับเฟสแบบ $\overline{ACB}$ กระแสสายจะนำหน้ากระแสเฟสอยู่ 30° สรุปได้ว่าโหลดสามเฟสที่ต่อแบบเดลต้า (Δ) สมดุล จะมีกระแสสายเท่ากับ $\sqrt{3}$ ของกระแสเฟสและมุมเฟสจะเคลื่อนออกไป 30° ส่วนแรงดันสายจะเท่ากับแรงดันเฟส

2.3 ความผิดปกติในระบบจำหน่ายไฟฟ้า (Fault in distribution systems)

ความผิดปกติในระบบจำหน่ายนั้น อาจมีสาเหตุมาจากอุบัติเหตุ สัตว์เลื้อยคลาน การเสื่อมอายุของอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบ และภัยธรรมชาติ เป็นต้น สาเหตุข้างต้นนำมาสู่ประเภทของความผิดปกติชนิดต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า

ความผิดปกติในระบบจำหน่ายไฟฟ้า สามารถแบ่งได้เป็นประเภทดังนี้

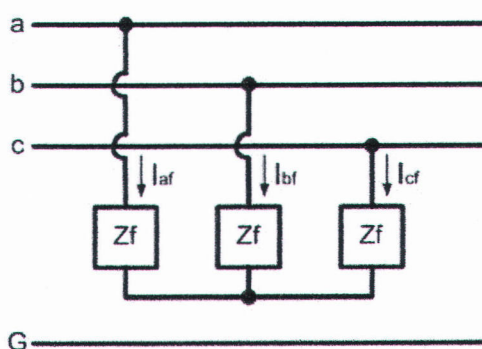
1. Three Phase Fault
2. Line to Line Fault
3. Double Line to Ground Fault
4. Single Line to Ground Fault
5. Open Conductor Fault
6. Down Conductor Fault

ความผิดปกติในแบบต่างๆนั้น เมื่อเกิดในระบบไฟฟ้าแล้ว จะส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าและอุปกรณ์ไฟฟ้า ในลักษณะที่ต่างกัน ดังตารางที่ 2.1 ซึ่งแสดงสาเหตุของการเกิดความผิดปกติ และผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า เมื่อเกิดความผิดปกติแบบต่างๆขึ้น

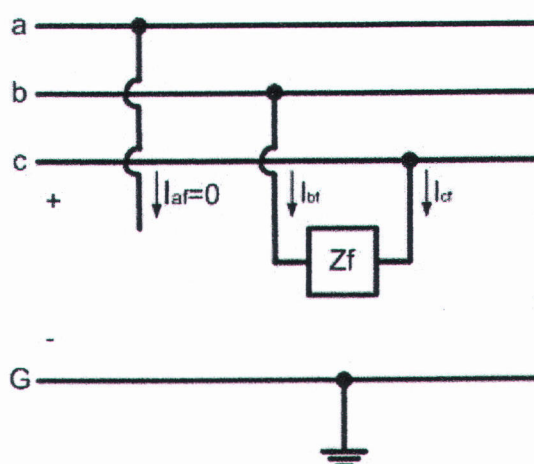
ตารางที่ 2.1 ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้า เมื่อเกิดความผิดปกติแบบต่างๆ

ประเภทความผิดปกติ	สาเหตุ	ผลกระทบ
Three Phase Fault	ภัยธรรมชาติ, ความประมาทของผู้ปฏิบัติงาน	กระแสสูงในเฟสที่เกิด ความผิดปกติ
Line to Line Fault	ฉนวนเสียหาย, ภัยธรรมชาติ, อุบัติเหตุ	กระแสสูง และระบบไฟฟ้า เสียสมดุล
Double Line to Ground Fault	ฉนวนเสื่อมสภาพ, อุบัติเหตุ	กระแสสูง และแรงดันลดลง ในเฟสที่เกิดความผิดปกติ
Single Line to Ground Fault	ฉนวนเสื่อมสภาพ, สัตว์, ต้นไม้	กระแสสูง และแรงดันลดลง ในเฟสที่เกิดความผิดปกติ
Open Conductor Fault	สายไฟฟ้าขาด, สายไฟฟ้าชำรุด	ระบบเสียสมดุล กระแสและ แรงดันจะลดลง
Down Conductor Fault	สายไฟฟ้าขาด, ต้นไม้	ระบบเสียสมดุล กระแสผิด ปรongจะขึ้นอยู่กับความ ต้านทานผิดปกติ

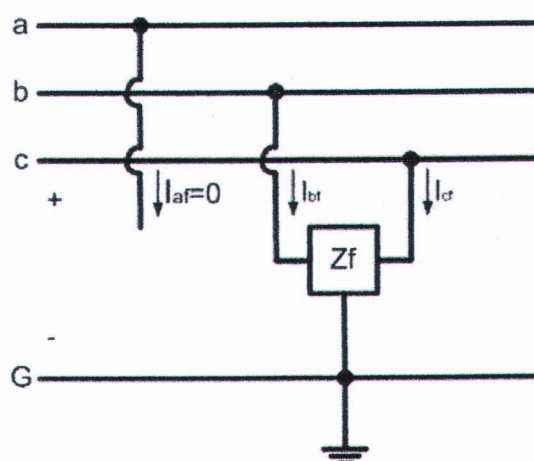
รูปแบบของความผิดปกติในลักษณะต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ได้ถูกแสดงใน
ภาพที่ 2.6 – 2.11



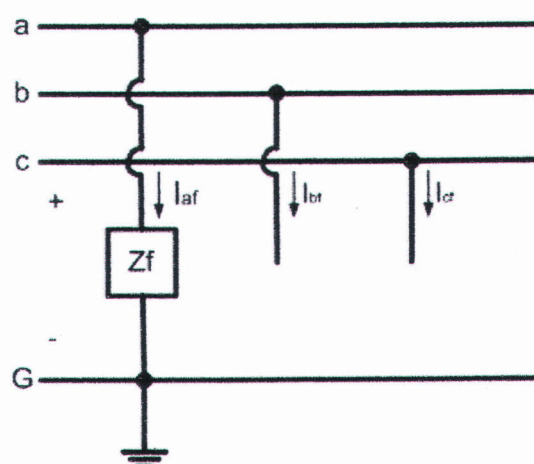
ภาพที่ 2.6 การเกิดความผิดปกติแบบ Three Phase Fault



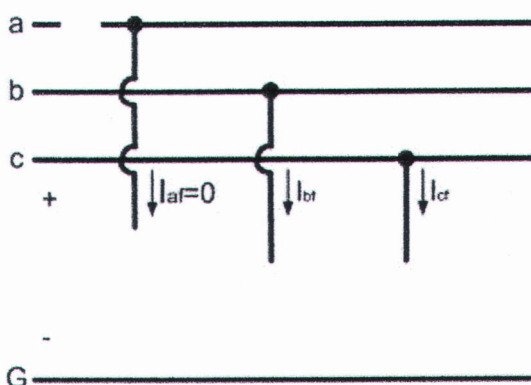
ภาพที่ 2.7 การเกิดความผิดปกติแบบ Line to Line Fault



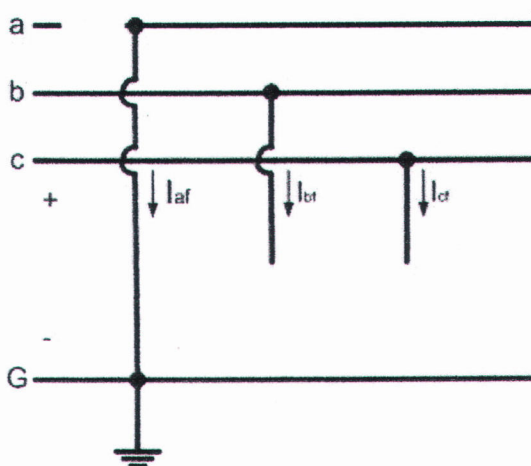
ภาพที่ 2.8 การเกิดความผิดปกติแบบ Double Line to Ground Fault



ภาพที่ 2.9 การเกิดความผิดปกติแบบ Single Line to Ground Fault



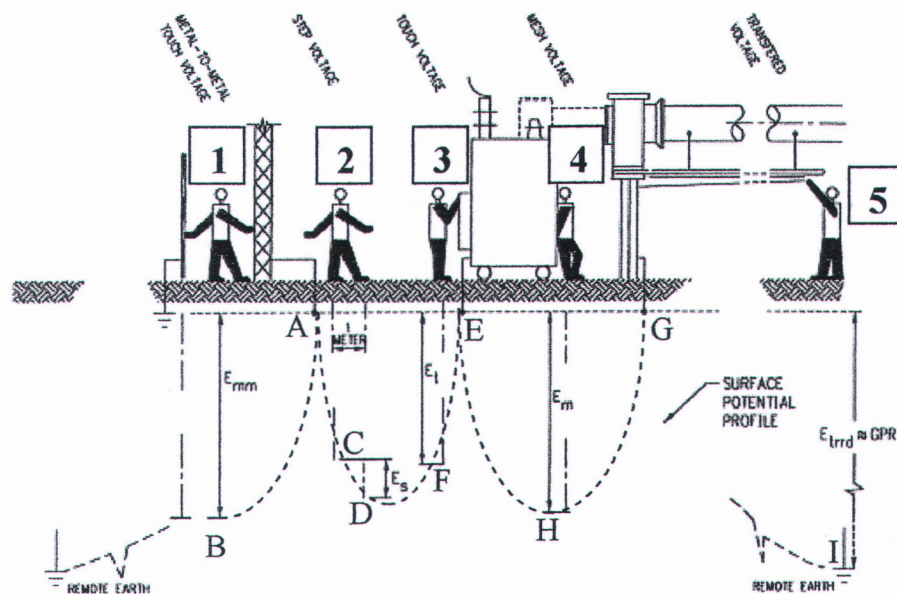
ภาพที่ 2.10 การเกิดความผิดปกติประเภท Open Conductor Fault



ภาพที่ 2.11 การเกิดความผิดปกติประเภท Down Conductor Fault

2.4 การเพิ่มขึ้นของศักย์ไฟฟ้าดิน (Ground Potential Rise)

การเพิ่มขึ้นของศักย์ไฟฟ้าดินมีสาเหตุมาจากความผิดปกติที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้า โรงไฟฟ้า หรือระบบส่งกำลังไฟฟ้า โดยเมื่อกระแสผิดปกติไหลผ่านอุปกรณ์ หรือ โครงสร้างของสถานีไฟฟ้าลงดิน ซึ่งดินจะมีค่าความต้านทานดินอยู่จำกัด กระแสที่ไหลลงดินจะสร้างศักย์ไฟฟ้าขึ้น โดยศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์กับระยะทางระหว่างจุดที่เกิดความผิดปกติลงดินกับจุดลงดินของระบบ ผลของศักย์ไฟฟ้าดินที่เพิ่มขึ้น สามารถเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันที่อันตราย แม้ว่าจะห่างจากจุดที่เกิดความผิดปกติจริงไปหลายร้อยเมตรก็ตาม มีหลายปัจจัยที่มีผลต่อระดับความรุนแรงของศักย์ไฟฟ้าดิน เช่น กระแสผิดปกติที่เกิดขึ้น ประเภทของดิน ความชื้นของดิน อุณหภูมิชั้นหินที่อยู่ใต้พื้นดิน และเวลาของความผิดปกติที่เกิดขึ้น เป็นต้น [4]



ภาพที่ 2.12 แสดงการเกิดสัคย์ไฟฟ้าในพื้นดิน

พิจารณาตำแหน่งของคนที่ยืนในภาพที่ 2.12 สามารถอธิบายอันตรายจากไฟฟ้าได้ดังนี้ [5]

คนในตำแหน่งที่ 1 ยืนในตำแหน่งที่มือข้างหนึ่งสัมผัสที่รั้วของสถานีไฟฟ้า ส่วนมืออีกข้างหนึ่งสัมผัสกับ โครงโลหะที่ต่อลงดินซึ่งมีศักดาไฟฟ้าเท่ากับที่จุด A ทำให้แรงดันสัมผัสเท่ากับ E_{mm}

คนในตำแหน่งที่ 2 การยืนในตำแหน่งนี้มีศักดาไฟฟ้าที่เท้าทั้งสองข้างไม่เท่ากัน คือมีสัคย์ไฟฟ้าที่จุด C และ D ทำให้เกิดแรงดันย่างก้าว (Step voltage) E_s แรงดันย่างก้าวที่มากที่สุดเกิดขึ้นเมื่อเท้าข้างหนึ่งอยู่เหนือกริดพอดี้ที่จุด A หรือที่จุด E แรงดันย่างก้าวที่พิจารณาในที่นี้คิดที่ระยะระหว่างเท้าทั้งสองข้าง 1 เมตร

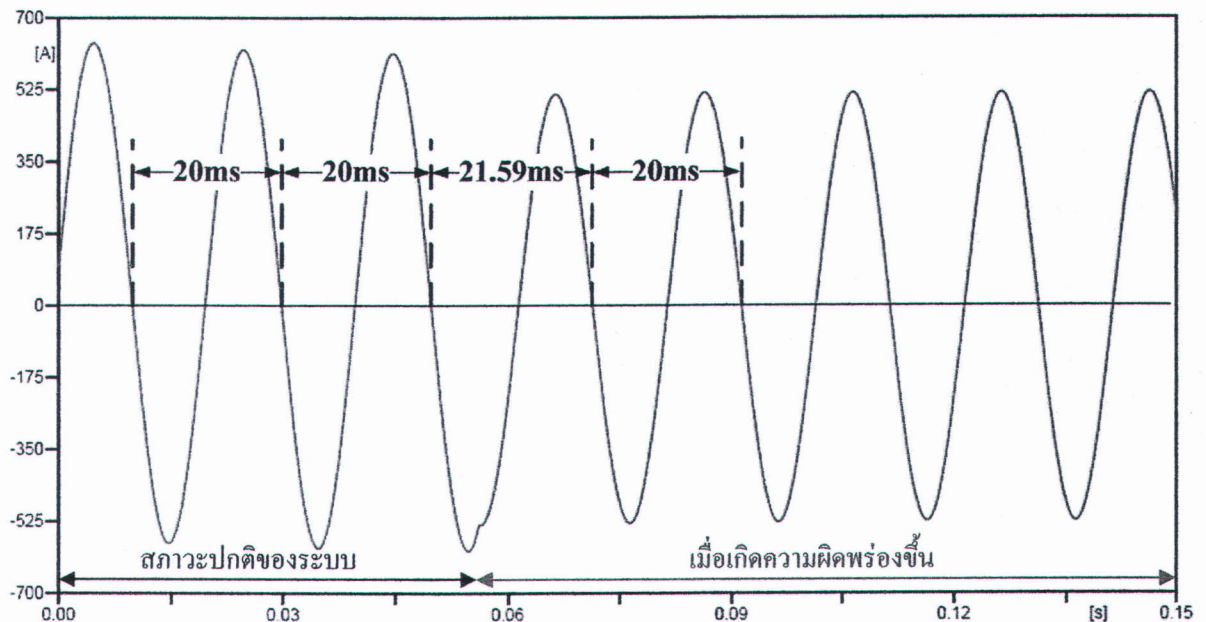
คนในตำแหน่งที่ 3 ยืนสัมผัสกับ โครงโลหะของอุปกรณ์ มือที่สัมผัสกับ โครงโลหะทำให้มีสัคย์ไฟฟ้าเท่ากับกริดที่จุด E ส่วนเท้ายืนบนพื้นดินซึ่งมีสัคย์ไฟฟ้าตามเส้นศักดาไฟฟ้าที่จุด F ความต่างสัคย์ไฟฟ้าระหว่างจุด E และ F คือแรงดันสัมผัส E_t

คนในตำแหน่งที่ 4 เหมือนกับคนในตำแหน่งยืนที่ 1 ต่างกันแต่เพียงคนยืนในตำแหน่งที่ 2 ยืนอยู่บนพื้นดินที่มีศักดาไฟฟ้าต่ำสุด คนยืนสัมผัสกับ โครงโลหะของอุปกรณ์ และมือสัมผัสกับ โครงโลหะ ทำให้มีสัคย์ไฟฟ้าเท่ากับกริดที่จุด E ความต่างสัคย์ระหว่างจุด E และ H คือ แรงดันสัมผัส E_m

คนในตำแหน่งที่ 5 ยืนในตำแหน่งที่มือสัมผัสกับ โครงโลหะที่ยื่นออกมาจากสถานีไฟฟ้า และโครงโลหะนี้ได้มีการต่อลงดินที่จุด G เนื่องจากยืนอยู่นอกสถานีไฟฟ้า เท้าของคนสัมผัสจึงอยู่ห่างไกลจากสถานีไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงดันสัมผัส E_{trgd} สูงเกือบเท่ากับแรงดันดินที่สูงขึ้น (GPR – Ground Potential Rise)

2.5 หลักการการเลื่อนเวลาของกระแส (Time shifting method on current wave)

สัญญาณใดๆที่มีความถี่หนึ่งจะมีคาบเวลาที่ค่าหนึ่ง ตัวอย่างเช่น ที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์ จะมีค่าคาบเวลาอยู่ที่ 20 มิลลิวินาที (ระยะเวลาจากขอบขาขึ้นถึงขอบขาขึ้นของสัญญาณ) หรือจะคิดเพียงครึ่งลูกคลื่น คาบเวลาจะอยู่ที่ 10 มิลลิวินาที (ระยะเวลาจากขอบขาขึ้นถึงขอบขาลงของสัญญาณ) แต่เมื่อเกิดความผิดปกติของสัญญาณ ระยะเวลาดังกล่าวอาจเกิดการเปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 2.13 สัญญาณของกระแสขณะเกิดความผิดปกติ เพื่อมาอธิบายถึงการเลื่อนของเวลา

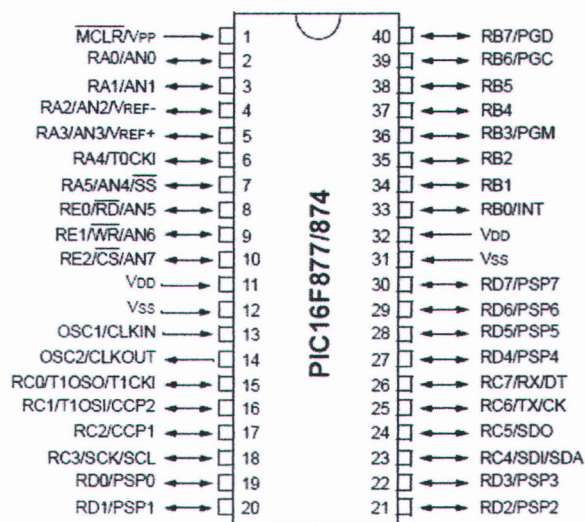
ในสภาวะปกติของระบบ 50 เฮิรตซ์ ระบบไฟฟ้าจะมีคาบเวลาของสัญญาณอยู่ที่ 20 มิลลิวินาที แต่เมื่อใดก็ตามที่เกิดความผิดปกติขึ้นภายในระบบ ระบบเองจะพยายามปรับสมดุลเพื่อให้เกิดเสถียรภาพขึ้นดังเดิม ผลของการปรับสัญญาณเข้าสมดุลดังกล่าวจะทำให้เกิดการเลื่อนเวลาของสัญญาณขึ้น และเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้แล้ว คาบเวลาของสัญญาณจะกลับมาสู่ค่าเดิมที่ 20 มิลลิวินาที

2.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์ และการประยุกต์ใช้งาน (Microcontroller and their application)

ไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถเขียนโปรแกรมการทำงาน หรือลักษณะพิเศษของตัวโปรแกรมการทำงานลงในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ แล้วให้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวประมวลผล และตัดสินใจตามโปรแกรมที่ออกแบบ หรือเขียนโดยผู้พัฒนา

มีการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ ได้ในหลายรูปแบบ อาทิเช่น ใช้เป็นเซ็นเซอร์ในการตรวจวัดทางอุตสาหกรรม หรือในอุตสาหกรรมหุ่นยนต์อัตโนมัติ, ใช้ในการประยุกต์ เพื่อแก้ไขปัญหาลักษณะด้าน

ในวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877 สำหรับประยุกต์ใช้งานในการตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นแบบสายจำหน่ายไฟฟ้าขาดแล้วสัมผัสพื้นด้านภาระไฟฟ้า แสดงดังภาพที่ 2.14 [6]



ภาพที่ 2.14 รูปแบบขาพอร์ตต่างๆของ PIC16F877

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- Ilyoul Lee [7] ได้จดสิทธิบัตรทรัพย์สินทางปัญญาชื่อ Apparatus for and Method of Detecting High Impedance Fault on Distribution Circuits with Delta Connected Loads ในปี ค.ศ. 1981 กล่าวถึงเทคนิคสำหรับการตรวจจับความผิดปกติแบบอิมพีแดนซ์สูงลงดินบนระบบจำหน่ายที่มีโหลดเป็นเดลต้า โดยเทคนิคนี้จะอาศัยการตรวจจับสถานะของส่วนประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ของกระแสสายทั้ง 3 เฟสในระบบจำหน่ายไฟฟ้า และสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นของขนาดกระแสเฟสใดเฟสหนึ่ง เพื่อบ่งบอกว่าเกิดความผิดปกติแบบอิมพีแดนซ์สูงลงดินจริงหรือเป็นการรบกวนในระบบไฟฟ้า

- Martin T. Bishop [8] ได้จดสิทธิบัตรทรัพย์สินทางปัญญาชื่อ Protective Relay Apparatus for Detecting High-Impedance Ground Faults ในปี ค.ศ. 1986 โดยกล่าวเกี่ยวกับรีเลย์ป้องกันที่ทำหน้าที่ตรวจจับความผิดปกติแบบเฟสลงดินผ่านอิมพีแดนซ์ค่าสูงในระบบจำหน่ายแบบ 3 เฟส 3 สาย โดยรีเลย์ดังกล่าวจะทำงาน เมื่ออัตราส่วนของกระแสลำดับลบกับกระแสลำดับบวกที่เกินกว่าค่าที่กำหนด ซึ่งใช้ในการตรวจจับเหตุการณ์สายไฟฟ้าขาด

- Majid Al-Dabbagh [9] ได้จดสิทธิบัตรทรัพย์สินทางปัญญาชื่อ High Impedance Fault Detector ในปี ค.ศ. 1997 โดยกล่าวถึงวิธีและอุปกรณ์ในการตรวจจับความผิดปกติของแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงลงดินและปรากฏการณ์การอาร์กต่างๆในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่งการตรวจจับทำได้โดยการแยกสัญญาณที่มีองค์ประกอบของความถี่ด้วยขนาดและรูปแบบของสัญญาณต่างๆ เช่นสัญญาณกระแสและแรงดันลำดับที่ศูนย์ (zero-sequence current and voltage) กระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 และ 8 เป็นต้น ถ้าขนาดและรูปแบบเกิดความแตกต่างไปจากเดิม ก็สามารถบอกได้ถึงโอกาสการเกิดอาร์กขึ้นในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

- Hart et al. [10] ได้จดสิทธิบัตรทรัพย์สินทางปัญญาชื่อ High Impedance Fault Detection ในปี ค.ศ. 2002 การตรวจจับความผิดปกติของแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงลงดินที่ถูกปรับปรุงนี้ จะประกอบด้วย ตัววิเคราะห์ที่ติดตั้ง ณ เซอร์กิตเบรกเกอร์ หรือสถานีไฟฟ้า โดยตัววิเคราะห์จะทำหน้าที่วิเคราะห์รูปคลื่นของกระแสไฟฟ้า หรือ/และแรงดันไฟฟ้า เพื่อตรวจจับความผิดปกติชนิดนี้ที่เกิดขึ้นภายในวงจรสายป้อน ทั้งแบบสายป้อนวงจรเดียว หรือสายป้อนแบบหลายวงจร ซึ่งสายป้อนแบบหลายวงจรจะมีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับระยะไกลในตำแหน่งของลูกค้าย อุปกรณ์ตรวจจับระยะไกลนี้จะตรวจจับแรงดันที่หายไป เมื่อเกิดความผิดปกติ แล้วมีการสื่อสารข้อมูลกลับไปยังตัววิเคราะห์ที่ติดตั้งในสถานีไฟฟ้า

- Craig G. Wester [11] นำเสนอการตรวจจับความผิดปกติของอิมพีแดนซ์ค่าสูงลงดิน ทั้งแบบตรวจจับทางกล และทางไฟฟ้า ในการตรวจจับความผิดปกติทางกลนั้นจะใช้หลักการทำให้เหตุการณ์ความผิดปกติที่เกิดจากอิมพีแดนซ์ค่าสูงนั้นกลายเป็นอิมพีแดนซ์ค่าต่ำ แล้วระบบตรวจจับที่ติดตั้งภายในสถานีไฟฟ้าสามารถตรวจจับความผิดปกติขึ้นได้ ส่วนการตรวจจับทางไฟฟ้านั้น วิธีแรกที่น่าสนใจคือการตรวจวัดกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 เทียบกับสัญญาณแรงดันพื้นฐาน ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นกว่าค่าที่ได้ศึกษาไว้จะ สามารถบอกได้ว่าเป็นความผิดปกติหรือไม่ เป็นต้น

- A. Lazkano et al. [12] ทำการศึกษาการตรวจจับความผิดปกติของแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงลงดินในระบบจำหน่ายของประเทศสเปน โดยมีจุดมุ่งหมายที่จะวิเคราะห์ความเสี่ยงของการผิดปกติดังกล่าว และการวิเคราะห์อาร์กแนวใหม่ ด้วยการประเมินจากกระแสฮาร์โมนิกลำดับต่ำ (low order harmonic current)

- Eilert BJERKAN et al. [13] นำเสนอการตรวจจับเหตุการณ์สายไฟฟ้าขาด หรือสายไฟฟ้าสัมผัสพื้น ด้วยวิธีการใช้อุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันติดตั้งเข้าไปในวงจรสายป้อน แล้วอาศัยการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ตรวจวัด ทำการส่ง-รับข้อมูลที่ได้ และทำการหาความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้