

## กรณีศึกษา - CASE STUDY

## ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อระบบป้องกันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

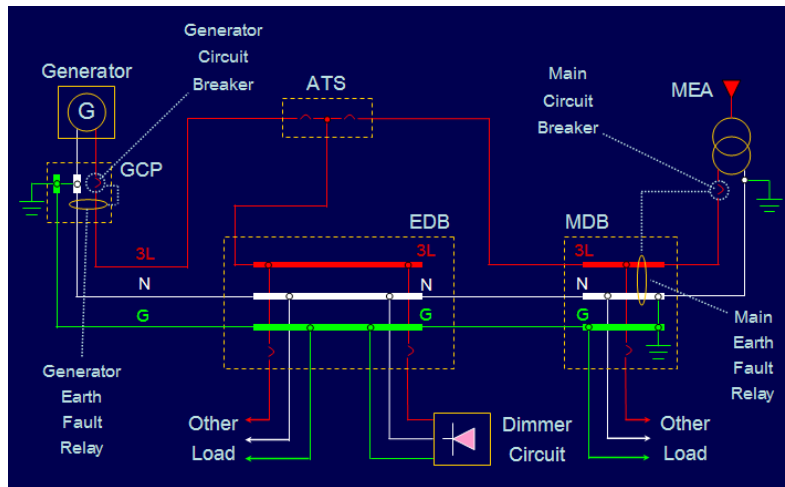
**HARMONICS IMPACT OVER PROTECTION SYSTEM OF POWER GENERATOR****ABSTRACT**

A THEATER ENCOUNTERED THE PROBLEM OF INCORRECT OPERATION OF POWER GENERATOR'S EARTH FAULT PROTECTION SYSTEM WHICH TRIPPED OUT CIRCUIT BREAKER WHEN DIMMER LOADS WERE FULLY USED. THIS THEATER UTILIZED A LOT OF DIMMERS AND INSTALLED A BACKUP POWER GENERATOR WITH EARTH FAULT PROTECTION SYSTEM. THE BACKUP GENERATOR WOULD SUPPLY POWER TO A CRITICAL LOAD VIA AN AUTOMATIC TRANSFER SWITCH (ATS) WHEN OUTAGE OCCURED. THE PROBLEM WAS CAUSED BY A HIGH DEGREE OF THIRD HARMONIC CURRENT PRODUCED BY DIMMERS AND INAPPROPRIATE INSTALLATION OF NEUTRAL AND GROUND SYSTEM. CONSEQUENTLY, CURRENT WOULD FLOW IN NEUTRAL AND GROUND SYSTEM EVEN IN NORMAL LOAD CONDITION CAUSING ERRORS TO CURRENT DETECTION OF EARTH FAULT PROTECTION SYSTEM. TO RESOLVE THE SITUATION, CHANGING EXISTING 3-POLE ATS TO 4-POLE TYPE WAS NEEDED IN ORDER TO CONTROL CURRENT IN NORMAL LOAD CONDITION (FUNDAMENTAL AND THIRD HARMONIC CURRENT) TO FLOW IN ONLY PHASE AND NEUTRAL CONDUCTOR AND NOT IN GROUND CONDUCTOR WHICH WOULD LEAD TO INCORRECT OPERATION OF EARTH FAULT PROTECTION SYSTEM.

**บทคัดย่อ**

โรงละครที่มีการติดตั้งอุปกรณ์หรี่ไฟจำนวนมาก รวมทั้งติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีระบบ Earth Fault Protection เพื่อสำรองจ่ายไฟให้กับโหลดสำคัญผ่าน Automatic Transfer Switch (ATS) ในกรณีที่ไฟจากการไฟฟ้าดับ ได้ประสบปัญหาหาระบบ Earth Fault Protection ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานผิดพลาดและสั่งปลดวงจร Circuit Breaker ในขณะที่มีการใช้งานอุปกรณ์หรี่ไฟจำนวนมาก สาเหตุของปัญหาเกิดจากกระแสฮาร์มอนิกที่ 3 ปริมาณมากซึ่งเกิดจากการทำงานของอุปกรณ์หรี่ไฟ และการติดตั้งระบบสายนิวทรัลและระบบสายดินที่ไม่เหมาะสม ทำให้มีกระแสไหลในสายนิวทรัลและสายดินในสถานะการจ่ายโหลดปกติ ส่งผลรบกวนต่อการตรวจจับกระแสลัดวงจรลงดินของ Earth Fault Relay ให้ทำงานผิดพลาด แนวทางการแก้ปัญหาสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนไปใช้ ATS ชนิด 4 Pole แทน ATS เดิม (ชนิด 3 Pole) เพื่อควบคุมให้กระแสในสถานะจ่ายโหลดปกติ (กระแส 50 Hz และกระแสฮาร์มอนิกที่ 3) ไหลแต่ในระบบสายตัวนำ 3 เฟสและสายนิวทรัลเท่านั้นโดยไม่ไหลในระบบสายดิน อันเป็นสาเหตุที่ทำให้ระบบ Earth Fault Protection ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานผิดพลาด

## 1. ข้อมูลเบื้องต้น



รูปที่ 1 ผังระบบไฟฟ้าภายในโรงละคร

โรงละครแห่งหนึ่งมีการติดตั้งอุปกรณ์หรี่ไฟ (Dimmer) เป็นจำนวนมากเพื่อใช้สำหรับควบคุมแสงไฟที่ส่องสว่างไปบนเวทีแสดง และโรงละครนี้ยังได้ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อทำหน้าที่สำรองจ่ายไฟในกรณีเกิดไฟฟ้าดับจากภายนอก โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้านี้จะไม่ต่อขนานกับระบบของการไฟฟ้า โหลดส่วนที่มีความสำคัญภายในโรงละครรวมทั้งวงจรของอุปกรณ์หรี่ไฟจะติดตั้งรวมอยู่ใน Emergency Distribution Board (EDB) โหลดเหล่านี้สามารถเลือกรับไฟจากการไฟฟ้าหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้อย่างใดอย่างหนึ่งผ่าน Automatic Transfer Switch (ATS) และที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีการติดตั้ง Earth Fault Relay อยู่ภายในตู้ Generator Control Panel (GCP) เพื่อตรวจ จับและป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากรณีที่เกิดลัดวงจรลงดิน รายละเอียดระบบไฟฟ้าในโรงละครแสดงในรูปที่ 1 (หมายเหตุ เส้นสีแดง 3L แทนสายตัวนำ 3 เฟส เส้นสีขาว N แทนสายนิวทรัล และเส้นสีเขียว G แทนสายดิน)

## 2. ปัญหาและผลกระทบ

ในช่วงที่โรงละครรับไฟจากการไฟฟ้า ระบบทุกอย่างทำงานเป็นปกติไม่เกิดปัญหาใดๆ แต่ในช่วงที่เปลี่ยนไปรับไฟจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและหากขณะนั้นมีการใช้งานอุปกรณ์ประเภท Dimmer เป็นจำนวนมาก จะเกิดปัญหาระบบป้องกันการลัดวงจรลงดิน (Earth Fault Protection) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานผิดพลาดโดยสั่งปลดวงจร Circuit Breaker ที่ตู้ GCP ทั้งที่ไม่ได้เกิดเหตุการณ์ลัดวงจรลงดินแต่อย่างใด ส่งผลอาจส่งผลให้เกิดไฟฟ้าดับในขณะที่มีการแสดงได้

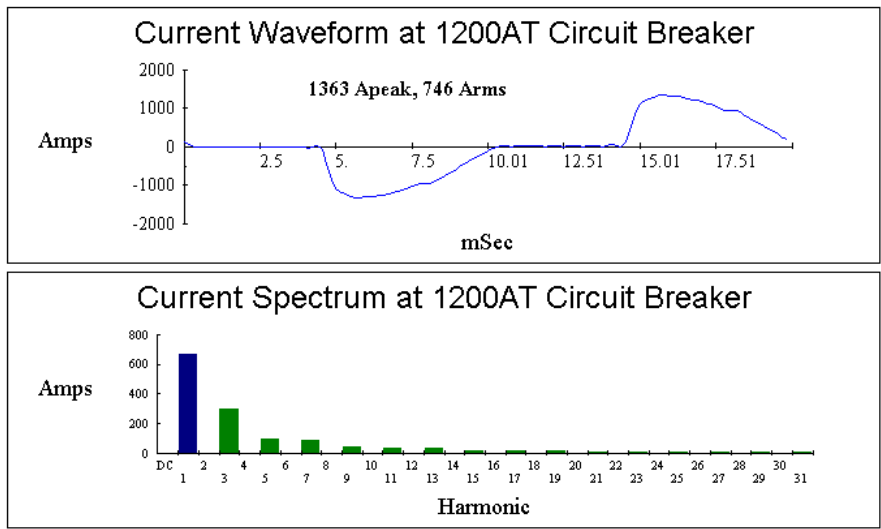
## 3. มูลค่าความเสียหาย

ความเสียหายที่เกิดจาก Circuit Breaker ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าปลดวงจรนั้นประเมินเป็นมูลค่าได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากไม่ได้เกิดความเสียหายขึ้นกับอุปกรณ์หรือสินค้าแต่อย่างใด แต่เป็นความเสียหายในแง่ภาพลักษณ์การให้บริการของโรงละคร โดยเฉพาะหากเกิดไฟฟ้าดับในระหว่างการแสดง แต่หากจะประมาณ

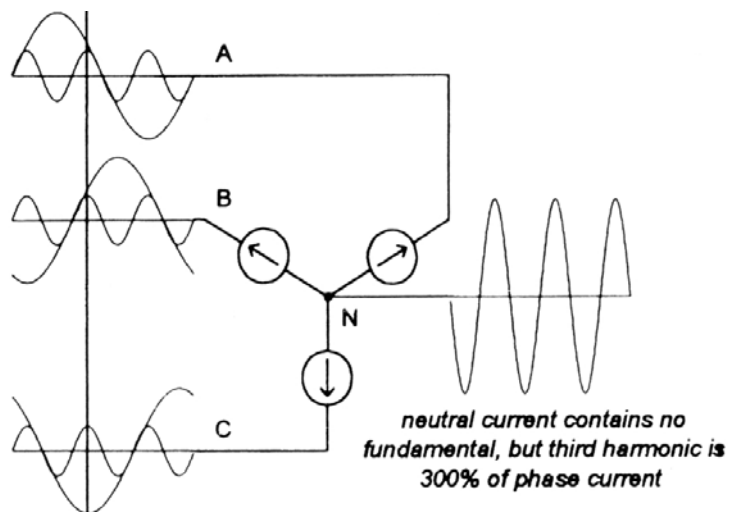
มูลค่าความเสียหายจากการเสียโอกาสในการแสดงไปหนึ่งรอบหากเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับขึ้น และต้องชดเชยให้กับผู้ชมโดยให้เข้าชมการแสดงใหม่ในรอบอื่นๆ กรณีนี้จะประเมินค่าเสียหายได้จาก มูลค่าบัตรเข้าชมการแสดง \* จำนวนที่นั่งต่อรอบ = 1,000 \* 1,000 = 1,000,000 บาท ต่อเหตุการณ์ไฟฟ้าดับ

**4. สาเหตุของปัญหา**

Dimmer เป็นอุปกรณ์ที่สร้างกระแสฮาร์มอนิกที่ 3 เป็นปริมาณมาก พิจารณาได้จากผลการวัดกระแสของวงจรที่จ่ายไฟให้กับชุด Dimmer ดังแสดงในรูปที่ 2 เนื่องจากธรรมชาติของกระแสฮาร์มอนิกที่ 3 มีลักษณะเป็น Zero Sequence คือกระแสฮาร์มอนิกที่ 3 ซึ่งไหลในแต่ละเฟสของระบบไฟฟ้า 3 เฟสจะมีเฟสตรงกัน และจะไม่หักล้างกันเมื่อไหลมารวมกันที่จุดนิวทรัลเหมือนกระแสไหลคั่วทั่วไปที่มีความถี่ 50 Hz แต่จะรวมและเสริมกันทำให้มีปริมาณกระแสไหลในสายนิวทรัลเพิ่มขึ้นมาก (พิจารณารูปที่ 3)

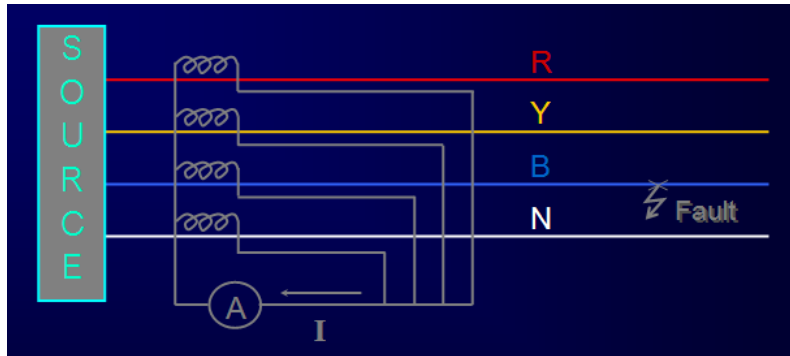


รูปที่ 2 รูปคลื่นและ Harmonic Spectrum ของกระแสไหลคั่วในวงจรที่จ่ายไฟให้ชุด Dimmer



รูปที่ 3 การรวมกันของกระแสฮาร์มอนิกที่ 3 ในสายนิวทรัล

สำหรับหลักการทำงานของ Earth Fault Relay ซึ่งทำหน้าที่ตรวจจับการเกิดลัดวงจรลงดิน (Earth Fault) นั้น ใช้วิธีตรวจสอบผลรวมของกระแสในสายเฟสทั้ง 3 เส้นและสายนิวทรัลดังแสดงในรูปที่ 4 ในสถานะปกติกระแส I ซึ่งเป็นผลรวมของกระแสที่ไหลในสายเฟสทั้งสามเส้นและสายนิวทรัลจะมีค่าเป็นศูนย์ แต่เมื่อเกิด Earth Fault กระแส I จะมีค่าไม่เป็นศูนย์ทำให้รีเลย์สามารถตรวจจับการเกิด Earth Fault ได้



รูปที่ 4 Diagram แสดงการทำงานของ Earth Fault Relay

อย่างไรก็ตามระบบไฟฟ้าแรงต่ำภายในอาคารแห่งนี้มีการเชื่อมต่อ Neutral Bus และ Ground Bus ที่ตู้ MDB (Main Distribution Board) เข้าด้วยกัน นอกจากนั้นที่จุดนิวทรัลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก็ต่อลงดินด้วยเช่นกัน ซึ่งในกรณีนี้แม้ในสถานะการจ่ายไฟปกติซึ่งโหลดในแต่ละเฟสมีความไม่สมดุลกัน ก็จะมีกระแสไหลทั้งในสายนิวทรัลและสายดินด้วย แต่มีปริมาณไม่มากนัก ดังนั้น Earth Fault Relay จึงต้องตั้งค่าในการทำงานเมื่อเกิดความแตกต่างของกระแสในระดับหนึ่ง เพื่อป้องกันการดำเนินงานผิดพลาดในสถานะการจ่ายโหลดปกติที่มีความไม่สมดุล โดยทั่วไปจะตั้งให้ Relay ทำงานเมื่อมองเห็นความแตกต่างของกระแสประมาณ 20 - 30% ของกระแส Full Load ซึ่งในกรณีนี้ตั้งค่าไว้ที่ 600 A

## 5. การวิเคราะห์ปัญหา

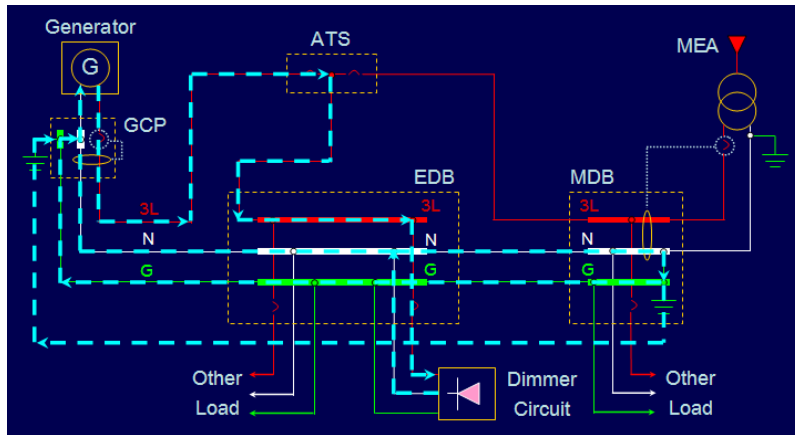
การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาที่ทำให้ Earth Fault Relay สั่งปลดวงจร Circuit Breaker นั้นจำเป็นต้องพิจารณาการไหลของกระแสในแต่ละกรณี โดยแยกเป็นกรณีต่างๆคือ การไหลของกระแสโหลดปกติ (50 Hz) การไหลของกระแสลัดวงจรเมื่อเกิด Earth Fault และการไหลของกระแสฮาร์โมนิกที่ 3 ซึ่งเกิดจาก Dimmer

### 5.1 การไหลของกระแสโหลดปกติ (50 Hz)

ถ้ากระแสโหลดปกติ (50 Hz) มีความสมดุลกันในแต่ละเฟส จะไม่มีกระแสไหลกลับในสายนิวทรัลและในสายดิน (รวมทั้ง Earth Loop) แต่หากกระแสโหลดปกติไม่สมดุล จะมีกระแสไหลกลับโดยแบ่งไหลทั้งในสายนิวทรัลและในสายดิน (รวมทั้ง Earth Loop) ดังแสดงในรูปที่ 5

กระแสที่ไหลในสายดินจะทำให้ Earth Fault Relay ตรวจจับได้ว่าผลรวมของกระแสไม่เป็นศูนย์คล้ายเกิด Earth Fault อย่างไรก็ตาม Earth Fault Relay ตั้งค่าการทำงานไว้ที่ 600 A นั่นคือผลรวมของกระแสในทั้ง 3 เฟสและนิวทรัลต้องมีค่าเกินกว่า 600 A รีเลย์จึงจะสั่งปลดวงจร ดังนั้นในกรณีการจ่ายโหลดปกติที่

ความไม่สมดุลของกระแสไหลดมีค่าไม่สูงนัก Earth Fault Relay จะไม่สั่งปลดวงจรเนื่องจากความแตกต่างของกระแสที่ Relay ตรวจจับได้มีค่าไม่เกินค่า Setting นั้นเอง

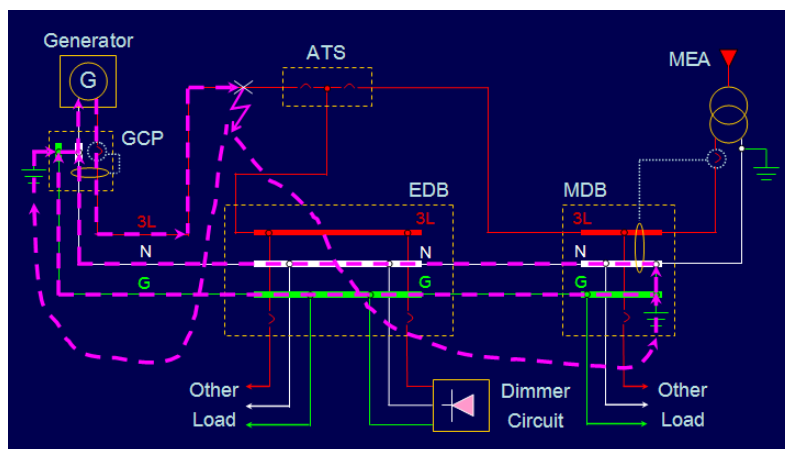


รูปที่ 5 Diagram แสดงการไหลของกระแสไหลของกระแสไหลปกติ (50 Hz)

### 5.2 การไหลของกระแสลัดวงจรในขณะที่เกิด Earth Fault

เมื่อเกิด Earth Fault ขึ้นกระแสลัดวงจรจะไหลกลับมายังจุดนิวทรัลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผ่านเส้นทางต่างๆ โดยเส้นทางที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำที่สุดจะมีกระแสไหลผ่านมากที่สุด ดังนั้นกระแสลัดวงจรส่วนมากจะไหลกลับไปที่จุดต่อลงดินของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ตู้ GCP (Generator Control Panel) เนื่องจากมีอิมพีแดนซ์ต่ำที่สุด แต่อาจมีกระแสลัดวงจรส่วนน้อยไหลกลับสู่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผ่านจุดต่อลงดินที่ตู้ MDB ด้วย

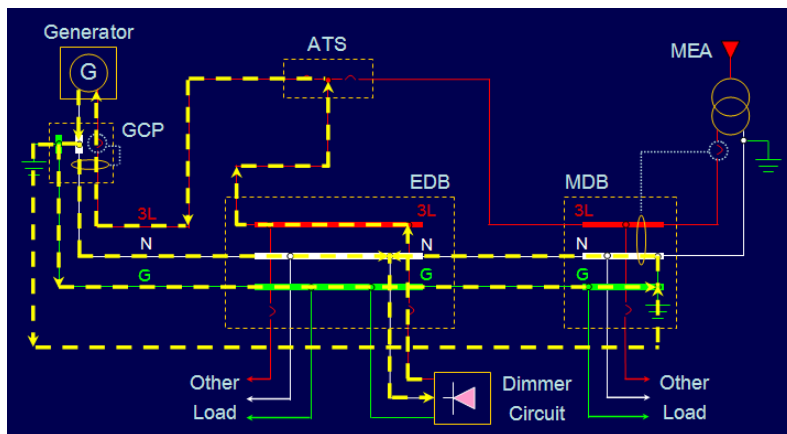
ทั้งนี้เนื่องจากกระแสลัดวงจรส่วนใหญ่ไหลผ่านดินมาขึ้นที่จุดต่อลงดินของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยตรง จึงมีกระแสไหลในสายนิวทรัลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทำให้ Earth Fault Relay สามารถตรวจจับความแตกต่างของกระแสปริมาณมากได้ และมีค่าเกินกว่าค่า Setting จึงสั่งปลดวงจรเซอร์กิตเบรกเกอร์เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งเป็นการทำงานที่ถูกต้องของ Earth Fault Relay ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 Diagram แสดงการไหลของกระแสลัดวงจรในขณะที่เกิด Earth Fault

### 5.3 การไหลของกระแสฮาร์โมนิกที่ 3 ซึ่งเกิดจาก Dimmer

เมื่อคำนึงถึงการไหลของกระแสฮาร์โมนิก จะพิจารณาโหลดที่สร้างฮาร์โมนิก (Dimmer) เป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์โมนิก โดย Dimmer จะสร้างกระแสฮาร์โมนิกที่ 3 ซึ่งมีลักษณะเป็น Zero Sequence เป็นปริมาณมาก กระแสนี้จะไหลย้อนไปตามสายเฟสกลับไปยังเส้นทางที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำที่สุดซึ่งก็คือเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสฮาร์โมนิกที่ 3 จะไม่หักล้างกันที่จุดนิวทรัลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่จะรวมกันและมีขนาดเพิ่มขึ้นเป็น 3 เท่า และกระแสฮาร์โมนิกนี้จะไหลกลับไปยังแหล่งกำเนิด (ในที่นี้คือ Dimmer) โดยแบ่งไหลผ่านสายนิวทรัลและสายดิน (รวมทั้ง Earth Loop) ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 Diagram แสดงการไหลของกระแสฮาร์โมนิกที่ 3 ซึ่งเกิดจาก Dimmer

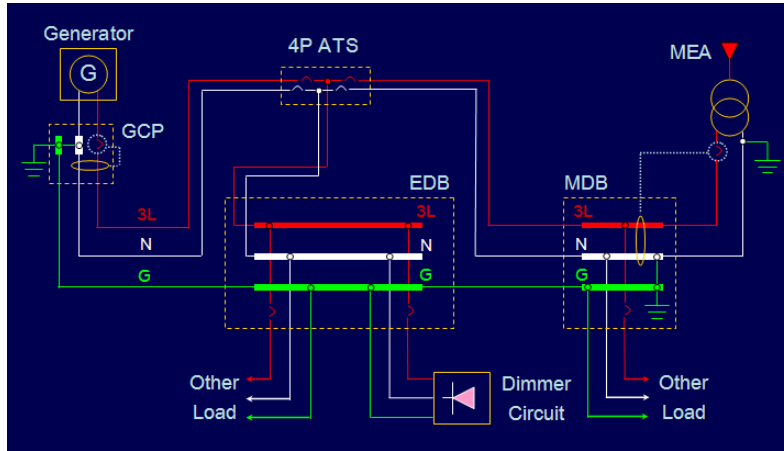
ปริมาณกระแสที่ไหลผ่านสายดิน (รวมทั้ง Earth Loop) จะเพิ่มขึ้นมาก จนทำให้ Earth Fault Relay มองเห็นความแตกต่างของกระแสเกินกว่าค่า Setting จึงเข้าใจผิดพลาดว่าเป็น Earth Fault และสั่งปลดเซอร์กิตเบรกเกอร์ปลดวงจร

## 6. แนวทางการแก้ปัญหา

แนวทางการแก้ปัญหาที่ Earth Fault Relay ทำงานผิดพลาดเนื่องจากมีกระแสฮาร์โมนิกที่ 3 ไหลในระบบ ทำได้โดยการบล็อกเส้นทางกรไหลของกระแสในสายดินและ Earth Loop โดยเปลี่ยนไปใช้ ATS ชนิด 4 Pole แทน ATS เดิมที่เป็นชนิด 3 Pole เพื่อควบคุมให้กระแสไหลปกติ (50 Hz) และกระแสฮาร์โมนิกที่ 3 ไหลสู่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผ่านสายนิวทรัลที่เชื่อมต่อระหว่างตู้ GCP และตู้ EDB เท่านั้นและไม่ไหลผ่านจุดต่อลงดินของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ที่ตู้ GCP) จะมีเพียงแต่กระแสลัดวงจรขณะเกิด Earth Fault เท่านั้นที่ไหลกลับสู่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผ่านจุดต่อลงดินของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและจะไม่ไหลผ่านสายนิวทรัลที่เชื่อมต่อระหว่างตู้ GCP และตู้ EDB

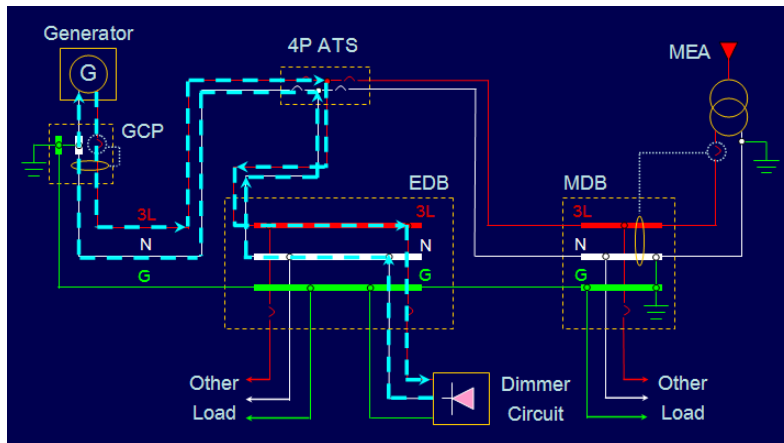
การเปลี่ยนไปใช้ ATS ชนิด 4 Pole เป็นการเพิ่มสวิตช์เข้าไปอีกตัวหนึ่งเพื่อแยกระบบสายนิวทรัลออกจากกันระหว่างด้านที่รับไฟจากการไฟฟ้า และด้านที่รับไฟจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า นอกเหนือจากระบบเดิมที่มีสวิตช์เพียง 3 ตัวสำหรับแยกสายเฟสทั้ง 3 ออกจากกัน นอกจากนั้นยังต้องปลดสายดินที่เชื่อมต่อ

ระหว่างตู้ GCP และตู้ EDB ออกจากกันด้วยเพื่อป้องกันการไหลของกระแสในสายดินในกรณีกระแสไหลค  
ปกติ (50 Hz) และกระแสฮาร์โมนิกที่ 3 (ดังแสดงในรูปที่ 8)



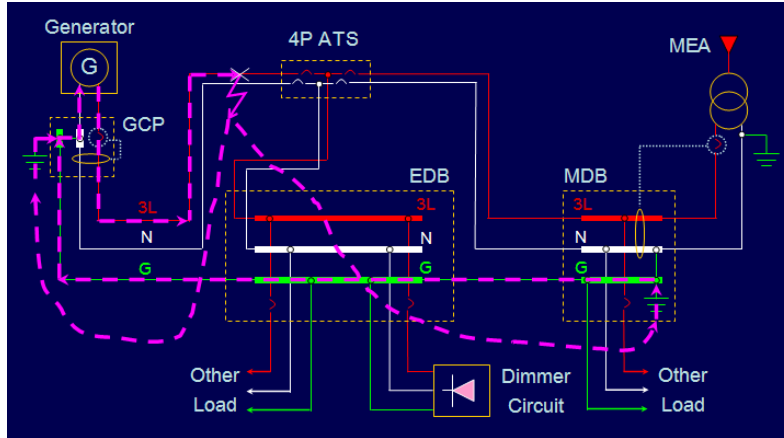
รูปที่ 8 ผังระบบไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนมาใช้ ATS ชนิด 4 Pole

ในกรณีกระแสไหลคปกติ (50 Hz) ATS ชนิด 4 Pole สามารถบล็อกการไหลของกระแสไหลคที่ไหล  
กลับไปยังเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผ่านสายดินและ Earth Loop ได้ (ดังแสดงในรูปที่ 9) ทำให้สามารถตั้งค่าการ  
ทำงานของ Earth Fault Relay ให้ตรวจจับการเกิด Earth Fault ได้ไวยิ่งขึ้น โดยกระแสไหลคปกติจะไม่ส่งผล  
รบกวนการทำงานของ Earth Fault Relay



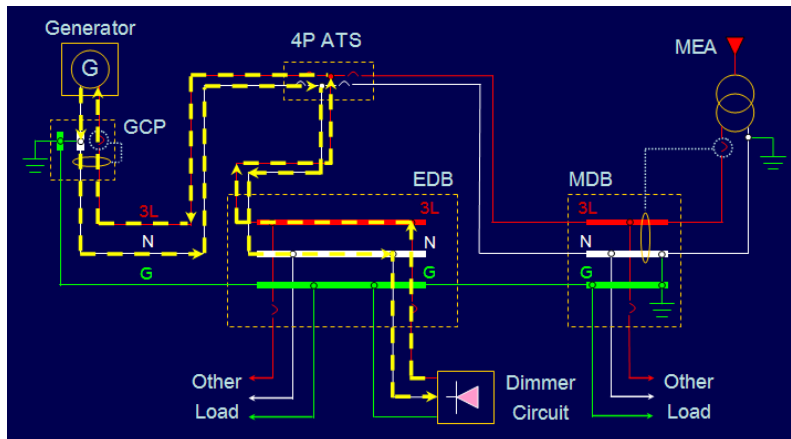
รูปที่ 9 การไหลของกระแสไหลคปกติ (50 Hz) ในระบบที่ใช้ ATS ชนิด 4 Pole

ในกรณีกระแสลัดวงจรเมื่อเกิด Earth Fault นั้น ATS ชนิด 4 Pole จะบล็อกการไหลของกระแส Earth  
Fault ที่อาจไหลกลับมายังเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผ่านสายนิวทรัล ทำให้กระแส Earth Fault ทั้งหมดไหลกลับ  
มายังเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จุดต่อลงดินของของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเท่านั้น (ดังแสดงในรูปที่ 10) นั่นคือ Earth  
Fault Relay จะมองเห็นความแตกต่างของกระแสจำนวนมาก และสั่งปลดวงจรอย่างรวดเร็วเมื่อเกิด Earth  
Fault



รูปที่ 10 การไหลของกระแสลัดวงจรขณะเกิด Earth Fault ในระบบที่ใช้ ATS ชนิด 4 Pole

และในกรณีกระแสฮาร์มอนิก ATS ชนิด 4 Pole จะบล็อกไม่ให้กระแสฮาร์มอนิกที่ 3 ไหลในสายดินและ Earth Loop ได้ แต่จะจำกัดให้กระแสเหล่านี้ไหลในสายเฟสและสายนิวทรัลเท่านั้น (ดังแสดงในรูปที่ 11) ส่งผลให้ไม่ว่าจะมีกระแสฮาร์มอนิกที่ 3 ไหลในระบบมากเท่าใด ก็จะไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของ Earth Fault Relay ได้ เนื่องจาก Earth Fault Relay ยังคงมองไม่เห็นความแตกต่างของกระแสตัวเอง



รูปที่ 11 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ 3 ซึ่งเกิดจาก Dimmer ในระบบที่ใช้ ATS ชนิด 4 Pole

### 7. ค่าใช้จ่ายในการแก้ปัญหา

ATS ชนิด 4 Pole พร้อมอุปกรณ์ประกอบ พิกัดกระแส 1,200 A มีราคาประมาณ 200,000 บาท ซึ่งราคาสูงกว่า ATS ชนิด 3 Pole ที่พิกัดกระแสเดียวกันประมาณ 30,000 บาท ทั้งนี้ราคาดังกล่าวยังไม่รวมค่าใช้จ่ายในการเดินสายและแก้ไขระบบไฟฟ้าส่วนที่เกี่ยวข้อง

### 8. สรุป

ปัญหา Earth Fault Relay ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าส่งปลดวงจรผิดพลาดในขณะที่มีการใช้งาน Dimmer เป็นจำนวนมากนั้น มีสาเหตุมาจากกระแสฮาร์มอนิกที่ 3 ปริมาณมากซึ่งเกิดจากการทำงานของ Dimmer โดย

กระแสเหล่านี้จะไม่หักล้างกันในสายนิวทรัลเหมือนกรณีกระแสไหลค 50 Hz ทั่วไปแต่จะรวมและเสริมกันที่จุดนิวทรัล ประกอบการเชื่อมต่อของระบบสายนิวทรัลและระบบสายดินที่ไม่เหมาะสม ทำให้มีกระแสไหลในสายนิวทรัลและสายดิน (รวมทั้ง Ground Loop) เพิ่มขึ้นมากแม้ในภาวะโหลดปกติที่ไม่ได้เกิด Earth Fault จนทำให้ค่าความแตกต่างของกระแสที่ Earth Fault Relay ตรวจจับได้มีค่าเกินกว่าค่า Setting ของตัวรีเลย์ จึงทำให้เข้าใจผิดพลาดว่าเกิด Earth Fault และสั่งปลดวงจร การแก้ปัญหาสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนไปใช้ ATS ชนิด 4 Pole แทน ATS เดิมที่เป็นชนิด 3 Pole เพื่อควบคุมให้กระแสในสภาวะจ่ายโหลดปกติไหลแต่ในระบบสายตัวนำ 3 เฟสและสายนิวทรัลเท่านั้นโดยไม่ไหลในระบบสายดิน อันเป็นสาเหตุที่ทำให้ระบบ Earth Fault Protection ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานผิดพลาด