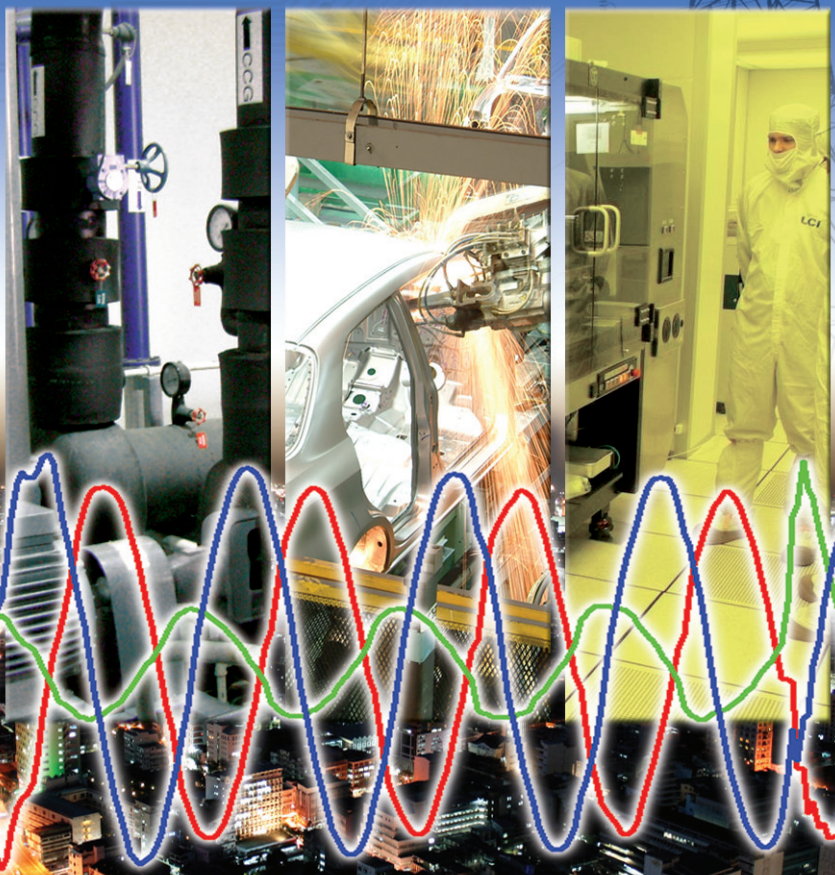
คู่มือแรงดันตกชั่วขณะ

สาเหตุและวิธีป้องกันแก้ไข



คำนำ

ท่านเคยประสบกับปัญหาต่อไปนี้หรือไม่ “ท่านสังเกตเห็นแสงสว่างจากหลอดไฟฟ้าเกิดการกะพริบแวบหนึ่ง ขณะเดียวกันเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าของท่านเกิดหยุดการทำงานหรือชำรุดเสียหาย” หรือ “อุปกรณ์ปลดวงจรในโรงงานหรืออาคารของท่านเกิดปลดวงจรออก แต่กลับตรวจสอบไม่พบการเกิดลัดวงจรหรือการใช้โหลดเกิน” หรือ “เกิดไฟฟ้าดับภายในโรงงานหรืออาคารของท่าน แต่เมื่อสอบถามจากเจ้าหน้าที่การไฟฟ้ากลับได้รับคำตอบว่า ไม่มีเหตุการณ์ไฟฟ้าดับในระบบของการไฟฟ้า” หากท่านเคยประสบกับปัญหาเหล่านี้ แสดงว่าท่านอาจได้รับผลกระทบจากเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะ

แรงดันตกชั่วขณะ เป็นปัญหาคุณภาพไฟฟ้าซึ่งปัจจุบันส่งผลกระทบกับผู้ใช้ไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก อย่างไรก็ตามปัญหาแรงดันตกชั่วขณะสามารถป้องกันหรือแก้ไขได้หากผู้ใช้ไฟฟ้ามีความรู้ความเข้าใจที่เพียงพอ ด้วยเหตุนี้การไฟฟ้านครหลวงจึงได้จัดทำหนังสือ “คู่มือแรงดันตกชั่วขณะ สาเหตุและวิธีป้องกันแก้ไข” เพื่อเสริมสร้างความรู้ความเข้าใจให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าถึงสาเหตุและผลกระทบของแรงดันตกชั่วขณะ พร้อมแนะนำวิธีการตรวจสอบและวิเคราะห์เพื่อการป้องกันและแก้ไขปัญหาอย่างมีประสิทธิภาพ

การไฟฟ้านครหลวงหวังเป็นอย่างยิ่งว่า ความรู้ที่ท่านได้รับจากหนังสือฉบับนี้จะสามารถนำไปช่วยปรับปรุงและเสริมประสิทธิภาพการใช้ไฟฟ้าภายในระบบไฟฟ้าของท่านต่อไป

การไฟฟ้านครหลวง

สารบัญ

1. แรงดันตกชั่วขณะคืออะไร 3

2. แรงดันตกชั่วขณะเกิดขึ้นได้อย่างไร 4

3. เปรียบเทียบแรงดันตกชั่วขณะและไฟฟ้าดับ 6

4. ผลกระทบของแรงดันตกชั่วขณะต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า 9

5. การตรวจสอบการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ 11

6. การวิเคราะห์ปัญหาแรงดันตกชั่วขณะ 13

7. อุปกรณ์สำหรับแก้ปัญหาแรงดันตกชั่วขณะ 16

8. การเลือกใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ทนทานต่อแรงดันตกชั่วขณะ 20

9. กรณีศึกษาการแก้ปัญหาแรงดันตกชั่วขณะ 23

   - รีเลย์ป้องกันแรงดันตกในโรงงานรถยนต์ทำงานผิดพลาด 23

   - เซอร์กิตเบรกเกอร์ในโรงงานอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำปลดวงจร 29

   - เครื่องอัดอากาศในโรงงานแก้วหยุดการทำงาน 36

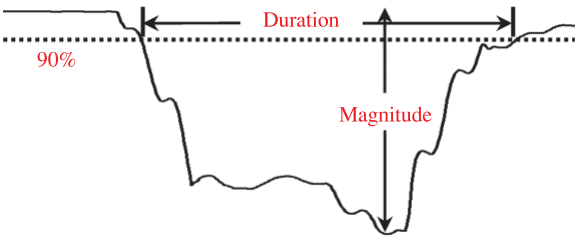
   - อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ในโรงพิมพ์ชำรุดเสียหาย 43

1. แรงดันตกชั่วขณะคืออะไร

แรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Dip) คือเหตุการณ์ที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงอย่างทันทีทันใดตั้งแต่ร้อยละ 10 ขึ้นไปในช่วงเวลาสั้นๆ ตั้งแต่ครึ่งไซเคิล (10 มิลลิวินาที) จนถึงไม่กี่วินาที มีสาเหตุหลักมาจากการเกิดลัดวงจรในระบบไฟฟ้า หรือการสตาร์ทมอเตอร์ขนาดใหญ่

รูปที่ 1.1 รูปคลื่นของเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะ

ความรุนแรงของแรงดันตกชั่วขณะจะขึ้นอยู่กับขนาด (Magnitude) และระยะเวลา (Duration) ของแต่ละเหตุการณ์ พิจารณาได้จากรูปที่ 1.2 โดยผลกระทบต่ออุปกรณ์และระบบไฟฟ้าจะเพิ่มมากขึ้นหากขนาดและระยะเวลาของเหตุการณ์มีค่ามากขึ้น

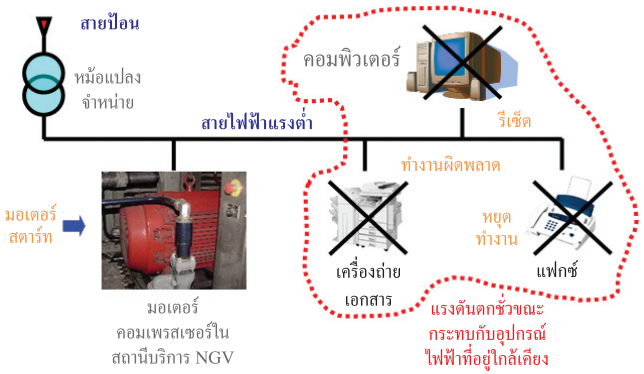


รูปที่ 1.2 การเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดัน RMS ขณะเกิดแรงดันตกชั่วขณะ

หมายเหตุ แรงดันตกชั่วขณะแตกต่างจากไฟกะพริบ (Flicker) โดยไฟกะพริบคือภาวะที่ระดับแสงสว่างเกิดการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างต่อเนื่อง มีสาเหตุมาจากการเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องของแรงดันไฟฟ้าที่เรียกว่าแรงดันกระเพื่อม (Voltage Fluctuation)

2. แรงดันตกชั่วขณะเกิดขึ้นได้อย่างไร

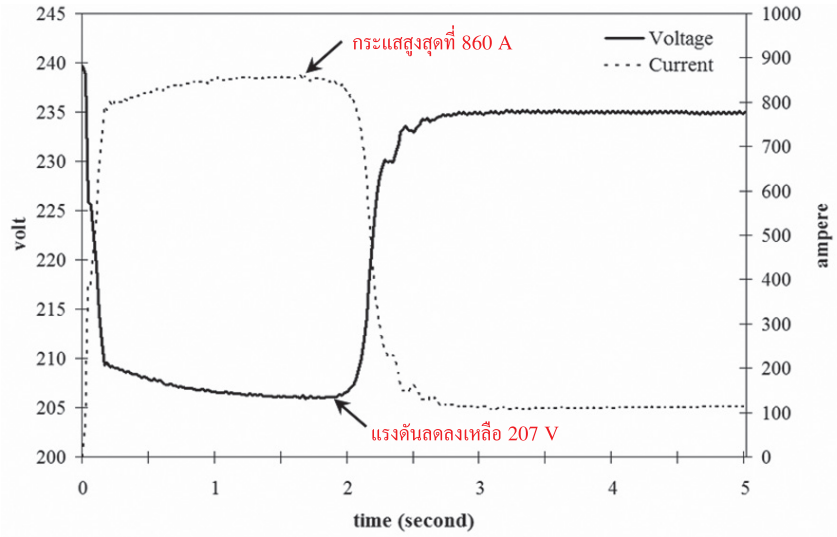
แรงดันตกชั่วขณะเกิดขึ้นจากการที่มีกระแสปริมาณสูงผิดปกติไหลในระบบไฟฟ้าในช่วงเวลาสั้นๆ กระแสเหล่านี้ได้แก่ กระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้า หรือกระแสสตาร์ทของมอเตอร์ขนาดใหญ่ กระแสเหล่านี้เมื่อไหลผ่านอิมพีแดนซ์ของระบบ เช่น อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง และอิมพีแดนซ์ของสายตัวนำ จะทำให้แรงดันตกคร่อมในอุปกรณ์เหล่านี้มีค่าเพิ่มสูงขึ้นมาก ส่งผลให้แรงดันปลายทางที่จ่ายให้โหลดมีค่าลดต่ำลงกว่าระดับปกติในช่วงเวลาสั้นๆที่กระแสเหล่านี้ไหลอยู่ในระบบไฟฟ้า



รูปที่ 2.1 ผลกระทบจากการสตาร์ทมอเตอร์ขนาดใหญ่ที่ติดตั้งระบบไฟฟ้าแรงต่ำ

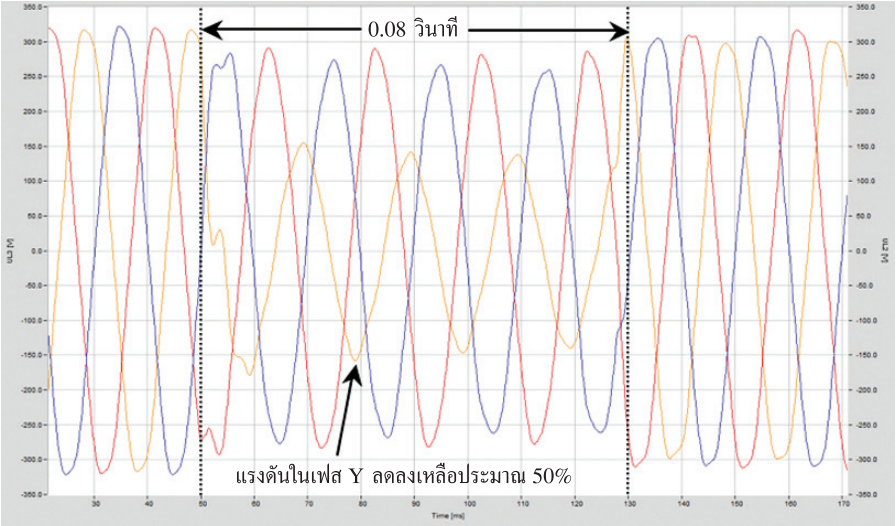
แรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากการสตาร์ทมอเตอร์ขนาดใหญ่ - โดยธรรมชาติกระแสขณะสตาร์ทของมอเตอร์อาจมีค่าสูงเป็น 6 - 8 เท่าของกระแสพิกัด และหากเป็นมอเตอร์ขนาดใหญ่กระแสสตาร์ทก็จะยิ่งมีปริมาณสูง กระแสสตาร์ทมอเตอร์นี้จะคงอยู่เป็นเวลาประมาณ 2 - 3 วินาทีก่อนจะสลายตัวไป โดยทั่วไปแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากการสตาร์ทมอเตอร์จะมีขนาดไม่มากนักแต่จะมีระยะเวลาค่อนข้างนาน หากเปรียบเทียบกับแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากการลัดวงจรในระบบไฟฟ้า ตัวอย่าง

เหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะจากการสตาร์ทมอเตอร์ขนาดใหญ่ในระบบไฟฟ้าแรงต่ำ แสดงในรูปที่ 2.1 และ 2.2



รูปที่ 2.2 ค่า RMS ของแรงดันและกระแสขณะสตาร์ทมอเตอร์

แรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากการลัดวงจรในระบบไฟฟ้า - กระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้าอาจมีปริมาณสูงเป็นหลายสิบเท่าของกระแสโหลดปกติ และไหลอยู่ในระบบไฟฟ้าเป็นเวลาสั้นมากๆก่อนที่ เซอร์กิตเบรกเกอร์หรือฟิวส์จะตัดตอนส่วนที่เกิดการลัดวงจรออกไป ขนาดของแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากการลัดวงจรอาจมีค่าแตกต่างกันไปตั้งแต่ 10% ขึ้นไปจนถึง 100% ขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่เกิดลัดวงจรและตำแหน่งที่ทำการตรวจสอบ ส่วนระยะเวลาทั่วไปมีค่าระหว่าง 0.01 - 1.0 วินาที ขึ้นอยู่กับชนิดของระบบป้องกันในระบบไฟฟ้าที่เกิดลัดวงจร แต่โดยส่วนมากแล้วจะมีระยะเวลาไม่เกิน 0.1 วินาที ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันตกชั่วขณะในระบบไฟฟ้าแรงต่ำอันมีสาเหตุมาจากการเกิดลัดวงจรในระบบไฟฟ้าแรงสูงแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 รูปคลื่นแรงดันตกชั่วขณะจากการเกิดลัดวงจรในระบบไฟฟ้า

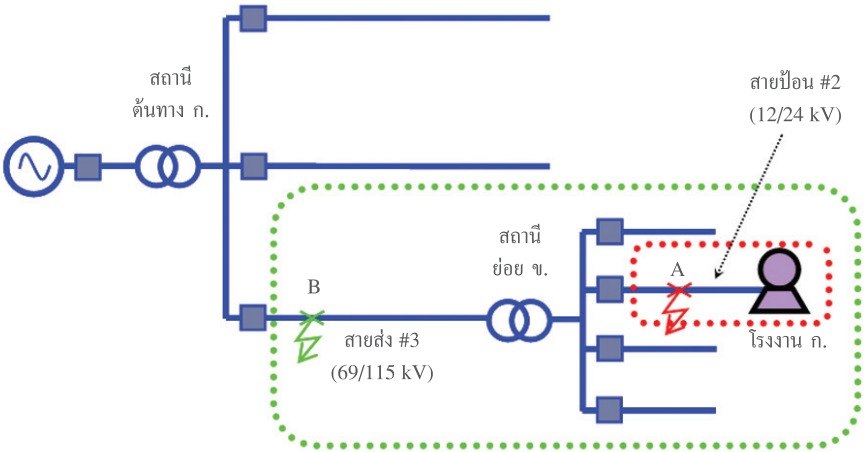
3. เปรียบเทียบแรงดันตกชั่วขณะและไฟฟ้าดับ

เหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะและไฟฟ้าดับต่างก็มีสาเหตุมาจากการเกิดลัดวงจรในระบบไฟฟ้าเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามเหตุการณ์สองประเภทนี้มีความแตกต่างกันในแง่ลักษณะการเกิด ความรุนแรง และความบ่อยครั้งของเหตุการณ์

เหตุการณ์ไฟฟ้าดับมีสาเหตุมาจากการเกิดลัดวงจรในวงจรที่จ่ายไฟให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าโดยตรง พิจารณารูปที่ 3.1 จะเกิดไฟฟ้าดับที่โรงงาน ก. ก็ต่อเมื่อเกิดการลัดวงจรในสายป้อน #2 (จุด A) ซึ่งจ่ายไฟให้โรงงานโดยตรง หรือเกิดการลัดวงจรในสายส่ง #3 (จุด B) ที่จ่ายไฟให้กับสถานีย่อย ข. ซึ่งจ่ายไฟให้กับโรงงานอีกที

หากเกิดลัดวงจรที่จุด A จะทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ของสายป้อน #2 ในสถานีย่อย ข. ปลดวงจร ส่งผลให้ผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งหมดที่รับไฟจากสายป้อน #2 ประสบกับเหตุการณ์ไฟฟ้าดับ และหากเกิดลัดวงจรที่จุด B จะทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ของ

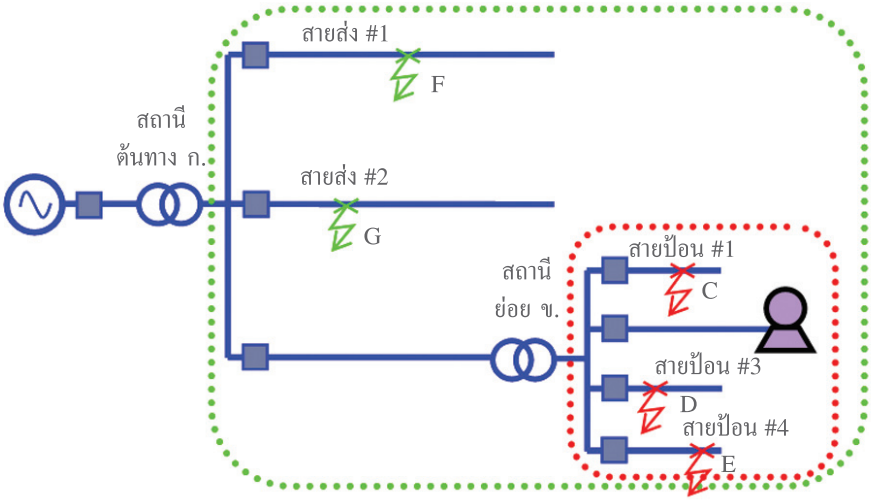
สายส่ง #3 ในสถานีต้นทาง ก. ปลดวงจร ส่งผลให้ผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งหมดที่รับไฟจากสายส่ง #3 ประสบกับเหตุการณ์ไฟฟ้าดับ รวมทั้งผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งหมดที่รับไฟจากสถานีย่อย ข.



รูปที่ 3.1 ตำแหน่งการเกิดลัดวงจรและเหตุการณ์ไฟฟ้าดับ

เหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะมีสาเหตุมาจากการเกิดลัดวงจรในวงจรข้างเคียงซึ่งรับไฟมาจากแหล่งจ่ายไฟเดียวกันกับวงจรที่จ่ายไฟให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าโดยตรง พิจารณารูปที่ 3.2 จะเกิดแรงดันตกชั่วขณะที่โรงงาน ก. หากเกิดการลัดวงจรในสายป้อน #1 (จุด C) หรือสายป้อน #3 (จุด D) หรือสายป้อน #4 (จุด E) ซึ่งเป็นสายป้อนข้างเคียงกับสายป้อน #2 ซึ่งจ่ายไฟให้โรงงาน หรือเกิดการลัดวงจรในสายส่ง #1 (จุด F) หรือสายส่ง #2 (จุด G) ซึ่งเป็นสายส่งข้างเคียงกับสายส่ง #3 ซึ่งจ่ายไฟให้โรงงาน

ไม่ว่าจะเกิดการลัดวงจรในสายป้อนเส้นใดของสถานีย่อย ข. จะทำให้เกิดแรงดันตกชั่วขณะกระทบกับผู้ใช้ไฟฟ้าทุกรายที่รับไฟจากสถานีย่อย ข. และไม่ว่าจะเกิดการลัดวงจรในสายส่งเส้นใดของสถานีต้นทาง ก. จะทำให้เกิดแรงดันตกชั่วขณะกระทบกับผู้ใช้ไฟฟ้าทุกรายที่รับไฟจากสถานีต้นทาง ก.



รูปที่ 3.2 ตำแหน่งการเกิดลัดวงจรและเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะ

จากการเปรียบเทียบตำแหน่งการเกิดลัดวงจรในระบบไฟฟ้าพบว่า ไฟฟ้าดับจะเกิดขึ้นเมื่อเกิดการลัดวงจรในวงจรที่จ่ายไฟให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าโดยตรงเท่านั้น แต่แรงดันตกชั่วขณะเกิดขึ้นจากการเกิดลัดวงจรในวงจรข้างเคียงซึ่งมีจำนวนวงจรมากกว่า หากประมาณว่าโอกาสเกิดลัดวงจรในแต่ละสายป้อน/สายส่งมีค่าเท่าๆกัน ผู้ใช้ไฟฟ้าจึงมีโอกาสประสบกับเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะบ่อยครั้งกว่าไฟฟ้าดับ

อย่างไรก็ตามความรุนแรงของเหตุการณ์ไฟฟ้าดับจะมีมากกว่าแรงดันตกชั่วขณะ เนื่องแรงดันตกชั่วขณะเกิดขึ้นในเวลาสั้นมากๆ ส่วนมากไม่เกิน 0.1 วินาที และส่วนมากแล้วแรงดันไม่ได้ลดลงเป็นศูนย์ ต่างจากเหตุการณ์ไฟฟ้าดับซึ่งเกิดขึ้นเป็นเวลานานกว่า ส่วนมากเป็นเวลา 3 วินาทีหรือมากกว่า และเมื่อเกิดขึ้นแรงดันจะลดลงเป็นศูนย์ หากพิจารณาถึงผลกระทบแล้วไฟฟ้าดับแต่ละเหตุการณ์จะส่งผลกระทบกับการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้ามากกว่าแรงดันตกชั่วขณะ

4. ผลกระทบของแรงดันตกชั่วขณะต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า

ไม่ใช่อุปกรณ์ไฟฟ้าทุกประเภทที่จะอ่อนไหวต่อแรงดันตกชั่วขณะ อุปกรณ์ไฟฟ้าหลายประเภทไม่ได้รับผลกระทบเสียหายจากแรงดันตกชั่วขณะ เช่น ระบบแสงสว่าง เครื่องทำน้ำร้อน หรือปั๊มป์สูบน้ำ อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ไฟฟ้าบางประเภทมีความอ่อนไหวต่อแรงดันตกชั่วขณะเป็นพิเศษ อุปกรณ์เหล่านี้ได้แก่

มอเตอร์ไฟฟ้า : โดยปกติแล้วตัวมอเตอร์ไฟฟ้าเองไม่ได้อ่อนไหวต่อแรงดันตกชั่วขณะ หากเกิดแรงดันตกชั่วขณะขึ้นอาจส่งผลให้มอเตอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงบิดหรือความเร็วรอบไปบ้างในช่วงเวลาสั้นๆ แต่ไม่ส่งผลเสียหายหรือทำให้มอเตอร์หยุดการทำงานแต่อย่างใด อย่างไรก็ตามหากมอเตอร์นี้ไปขับเคลื่อนโหลดทางกลที่อ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงแรงบิดหรือความเร็วรอบ เช่น เครื่องม้วนด้ายในโรงงานสิ่งทอ แรงดันตกชั่วขณะอาจส่งผลทำให้ด้ายขาด สร้างความเสียหายต่อสินค้า และทำให้ต้องเริ่มกระบวนการผลิตใหม่

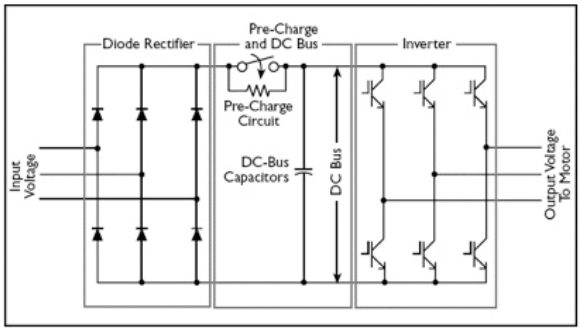
รูปที่ 4.1 มอเตอร์ไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนกระบวนการผลิตในโรงงานสิ่งทอ

ระบบที่ควบคุมด้วยไมโครโปรเซสเซอร์ : เนื่องจากไมโครโปรเซสเซอร์เป็นอุปกรณ์ที่อ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นแรงดันตกชั่วขณะจึงอาจ

ส่งผลทำให้ไมโครโปรเซสเซอร์เกิดการรีเซต ส่งผลให้กระบวนการผลิตที่ใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ควบคุมเกิดการหยุดชะงัก หรือได้รับความเสียหาย

รูปที่ 4.2 เครื่องจักรที่ควบคุมด้วยไมโครโปรเซสเซอร์

อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ : ในโรงงานอุตสาหกรรมสมัยใหม่มอเตอร์ไฟฟ้าส่วนมากนิยมขับเคลื่อนผ่านอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบ (Adjustable Speed Drive, ASD) เนื่องจากการประหยัดพลังงานและความสามารถในการควบคุมที่ดีกว่า อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์กลับมีความอ่อนไหวต่อแรงดันตกชั่วขณะมากเป็นพิเศษ เนื่องจากเมื่อเกิดแรงดันตกชั่วขณะขึ้นจะทำให้เกิดกระแสกระชากปริมาณสูงไหลภายในอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบ ดังนั้นระบบควบคุมของอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบจึงต้องสั่งหยุดการทำงานทันทีเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากภาวะกระแสเกิน ส่งผลให้กระบวนการผลิตที่ใช้อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ต้องหยุดชะงักหรือได้รับความเสียหายตามไปด้วย



รูปที่ 4.3 โครงสร้างของอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์

5. การตรวจสอบการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ

หากเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าขัดข้องขึ้นภายในระบบของผู้ใช้ไฟฟ้า สามารถตรวจสอบว่าเหตุการณ์ดังกล่าวมีสาเหตุมาจากการเกิดไฟฟ้าดับหรือแรงดันตกชั่วขณะในระบบของการไฟฟ้าหรือไม่ การตรวจสอบมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 : บันทึกวันเวลาที่เกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าขัดข้อง

ขั้นตอนที่ 2 : ตรวจสอบกับการไฟฟ้าว่าเกิดการลัดวงจรในระบบของการไฟฟ้าในช่วงเวลาเดียวกันกับที่เกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าขัดข้องหรือไม่

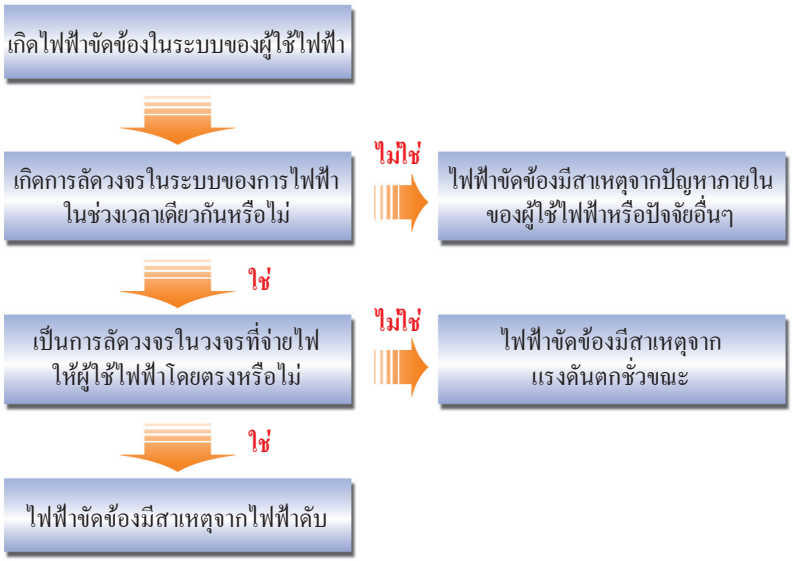
ขั้นตอนที่ 3 : ถ้าตรวจสอบพบ และเป็นการลัดวงจรในวงจรที่จ่ายไฟให้ผู้ใช้ไฟฟ้าโดยตรง แสดงว่าเหตุการณ์ไฟฟ้าขัดข้องนั้นมีสาเหตุมาจากเหตุการณ์ไฟฟ้าดับในระบบของการไฟฟ้า

ขั้นตอนที่ 4 : ถ้าตรวจสอบพบ แต่เป็นการลัดวงจรในวงจรข้างเคียง แสดงว่าเหตุการณ์ไฟฟ้าขัดข้องนั้นมีสาเหตุมาจากเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะในระบบของการไฟฟ้า

ขั้นตอนที่ 5 : ถ้าตรวจสอบไม่พบ เหตุการณ์ไฟฟ้าขัดข้องนั้นอาจมีสาเหตุมาจากปัญหาภายในระบบของผู้ใช้ไฟฟ้าเอง หรือปัจจัยอื่นๆ

ตารางที่ 5.1 ตัวอย่างการบันทึกเหตุการณ์ไฟฟ้าขัดข้องในรอบเวลา 1 ปี

ลำดับ	วัน	เวลา	ผลกระทบในระบบของผู้ใช้ไฟฟ้า	การจัดวงจรในระบบของการไฟฟ้า	เป็นวงจรที่จ่ายไฟให้โดยตรงหรือไม่
1	12 ม.ค. 51	10:32	เครื่องจักร A หยุดทำงาน	สายป้อน RD 412	ไม่ใช่
2	30 ม.ค. 51	09:55	Main CB ปลดวงจร	สายป้อน RD 411	ใช่
3	15 ก.พ. 51	14:03	เครื่องจักร B หยุดทำงาน	สายป้อน RD 415	ไม่ใช่
4	4 มี.ค. 51	17:45	Branch CB ปลดวงจร	สายส่ง RDT 697	ไม่ใช่
5	25 มี.ค. 51	08:25	เครื่องจักร C หยุดทำงาน	ไม่มีเหตุการณ์	-
6	8 เม.ย. 51	13:43	Main CB ปลดวงจร	สายป้อน RD 412	ไม่ใช่
7	20 เม.ย. 51	11:12	เครื่องจักร B หยุดทำงาน	สายป้อน RD 414	ไม่ใช่
8	11 พ.ค. 51	21:36	Main CB ปลดวงจร	สายส่ง RDT 695	ใช่
9	19 พ.ค. 51	05:45	Main CB ปลดวงจร	สายป้อน RD 411	ใช่
10	30 พ.ค. 51	15:32	Main CB ปลดวงจร	สายป้อน RD 412	ไม่ใช่
11	13 มิ.ย. 51	21:56	เครื่องจักร A หยุดทำงาน	สายป้อน RD 412	ไม่ใช่
12	25 มิ.ย. 51	23.11	เครื่องจักร C หยุดทำงาน	สายป้อน RD 414	ไม่ใช่
13	9 ก.ค. 51	12:43	เครื่องจักร B หยุดทำงาน	สายป้อน RD 415	ไม่ใช่
14	27 ก.ค. 51	03:53	เครื่องจักร B หยุดทำงาน	สายป้อน RD 414	ไม่ใช่
15	3 ส.ค. 51	10:24	เครื่องจักร A หยุดทำงาน	ไม่มีเหตุการณ์	-
16	22 ส.ค. 51	13:32	Branch CB ปลดวงจร	สายส่ง RDT 697	ไม่ใช่
17	10 ก.ย. 51	06:22	Main CB ปลดวงจร	สายป้อน RD 412	ไม่ใช่
18	29 ก.ย. 51	14:51	เครื่องจักร B หยุดทำงาน	สายป้อน RD 414	ไม่ใช่
19	5 ต.ค. 51	09:44	Main CB ปลดวงจร	สายป้อน RD 411	ใช่
20	15 ต.ค. 51	20:23	เครื่องจักร B หยุดทำงาน	สายป้อน RD 415	ไม่ใช่
21	20 พ.ย. 51	11:56	เครื่องจักร A หยุดทำงาน	สายป้อน RD 412	ไม่ใช่
22	23 ธ.ค. 51	00:12	Main CB ปลดวงจร	สายป้อน RD 412	ไม่ใช่

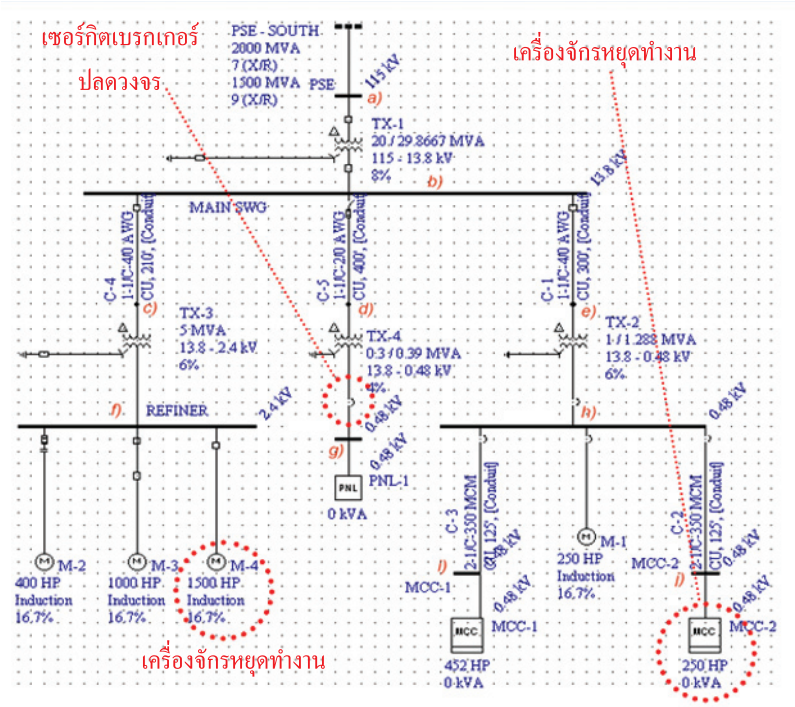


รูปที่ 5.1 Flow Chart การตรวจสอบการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ

6. การวิเคราะห์ปัญหาแรงดันตกชั่วขณะ

หากตรวจสอบพบว่าปัญหาไฟฟ้าขัดข้องภายในระบบของผู้ใช้ไฟฟ้ามีสาเหตุมาจากแรงดันตกชั่วขณะ การแก้ไขปัญหาต้องเริ่มจากการวิเคราะห์หาส่วนของระบบหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีความอ่อนไหวต่อแรงดันตกชั่วขณะ การวิเคราะห์ปัญหาอาจแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 : การแยกแยะอุปกรณ์หรือระบบย่อยที่ได้รับผลกระทบจากแรงดันตกชั่วขณะออกจากส่วนอื่นๆ คือการตรวจสอบเพื่อแยกแยะว่าเมื่อเกิดแรงดันตกชั่วขณะขึ้นอุปกรณ์หรือระบบไฟฟ้าย่อยส่วนใดที่ได้รับผลกระทบ เพื่อให้สามารถเข้าไปแก้ปัญหาได้ตรงจุด ดังแสดงในรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 การแยกแยะส่วนของระบบไฟฟ้าที่ได้รับผลกระทบ

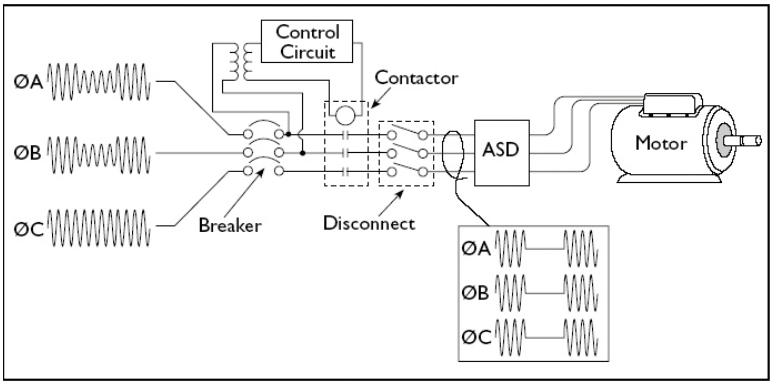
ขั้นตอนที่ 2 : การตรวจสอบความถูกต้องเหมาะสมในการทำงานของอุปกรณ์ปลดวงจรและอุปกรณ์ป้องกัน เนื่องจากอุปกรณ์ปลดวงจร และอุปกรณ์ป้องกัน เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ และรีเลย์ตรวจสอบแรงดัน (แสดงในรูปที่ 6.2) ไม่ควรสั่งปลดวงจรไฟฟ้าเมื่อเกิดแรงดันตกชั่วขณะขึ้น เนื่องจากไม่ใช่อุปกรณ์ไฟฟ้าทุกประเภทที่มีความอ่อนไหวต่อแรงดันตกชั่วขณะ อุปกรณ์หลายประเภทสามารถทำงานต่อไปได้โดยไม่เกิดปัญหาเมื่อเกิดแรงดันตกชั่วขณะ แต่หากเซอร์กิตเบรกเกอร์ปลดวงจรออกไปเนื่องจากแรงดันตกชั่วขณะ จะส่งผลให้อุปกรณ์ไฟฟ้าทุกตัวที่ต่ออยู่หลังเซอร์กิตเบรกเกอร์ประสบกับเหตุการณ์ไฟฟ้าดับซึ่งส่งผลกระทบรุนแรงกว่ามาก

เซอร์กิตเบรกเกอร์หลักด้านแรงต่ำ

รีเลย์ตรวจสอบแรงดัน

รูปที่ 6.2 เซอร์กิตเบรกเกอร์และรีเลย์ตรวจสอบแรงดัน

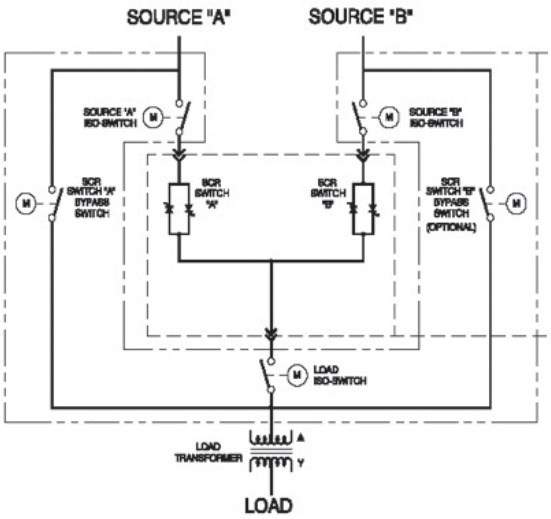
ขั้นตอนที่ 3 : การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของส่วนต่างๆภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าหรือกระบวนการผลิต อุปกรณ์ไฟฟ้าแต่ละประเภทอาจมีส่วนประกอบภายในที่มีความอ่อนไหวต่อแรงดันตกชั่วขณะแตกต่างกันไป โดยทั่วไปอาจแบ่งได้เป็น 3 ส่วนคือ ภาคควบคุม ภาคกำลัง และโหลดทางกล ซึ่งการแก้ปัญหาในแต่ละส่วนจะใช้วิธีการและเงินลงทุนแตกต่างกันไป จึงจำเป็นจะต้องตรวจสอบให้ได้ว่าส่วนประกอบใดที่อ่อนไหวต่อแรงดันตกชั่วขณะ เพื่อให้การแก้ปัญหาสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความคุ้มค่ามากที่สุด รูปที่ 6.3 แสดงให้เห็นว่า Control Circuit ที่มีความอ่อนไหวต่อแรงดันตกชั่วขณะ ในขณะที่เกิดเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะจะทำให้หน้า Contactor เปิดวงจรออก ส่งผลให้ภาคกำลังอันได้แก่ ASD และ Motor ไม่มีแรงดันไฟฟ้าไปจ่ายในช่วงสั้นๆ ซึ่งส่งผลกระทบต่อการทำงานรุนแรงกว่ามาก

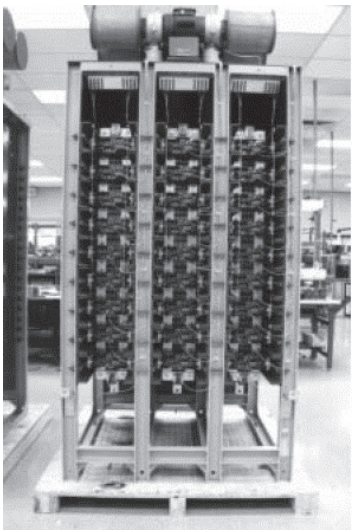


รูปที่ 6.3 ภาคควบคุมที่อ่อนไหวส่งผลกระทบต่อภาคกำลังของอุปกรณ์

7. อุปกรณ์สำหรับแก้ปัญหาแรงดันตกชั่วขณะ

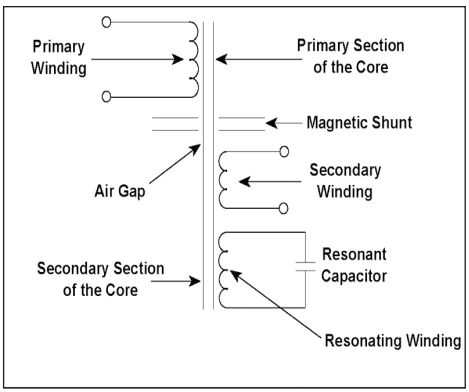
อุปกรณ์สำหรับแก้ไขหรือบรรเทาปัญหาแรงดันตกชั่วขณะมีหลายประเภทซึ่งแต่ละประเภทก็มี ข้อดี ข้อด้อย ลักษณะการใช้งาน และราคาแตกต่างกันไปดังนี้





รูปที่ 7.1 ตัวอย่างและโครงสร้างของ Static Transfer Switch

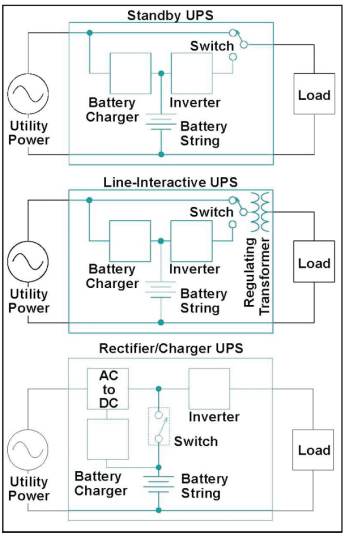
Static Transfer Switch (STS) - STS มีหลักการทำงานคล้าย Automatic Transfer Switch (ATS) คือจะต้องทำงานร่วมกับแหล่งจ่ายไฟ 2 แหล่ง ในภาวะปกติโหลดจะรับไฟจากแหล่งจ่ายไฟหลัก เมื่อแหล่งจ่ายไฟหลักเกิดขัดข้องจึงจะสวิตช์ย้ายโหลดไปรับไฟจากแหล่งจ่ายไฟสำรองแทน STS แตกต่างจาก ATS ตรงที่อุปกรณ์สวิตช์ของ STS ใช้ Solid State Switch แทน Mechanic Switch เนื่องจาก Solid State Switch มีความเร็วในการทำงานมากกว่า Mechanic Switch มาก โดยทั่วไป STS สามารถสวิตช์ย้ายโหลดจากแหล่งจ่ายไฟหลักไปยังแหล่งจ่ายไฟสำรองภายในเวลาไม่เกิน 5 มิลลิวินาที จึงสามารถใช้แก้ปัญหาแรงดันตกชั่วขณะได้ อย่างไรก็ตาม STS มีข้อจำกัดในการใช้งานคือจะต้องใช้กับระบบที่มีแหล่งจ่ายไฟ 2 แหล่ง และราคาที่ค่อนข้างสูงมากโดยเฉพาะชนิดที่ใช้ในระบบแรงสูง



รูปที่ 7.2 ตัวอย่างและโครงสร้างของ Constant Voltage Transformer

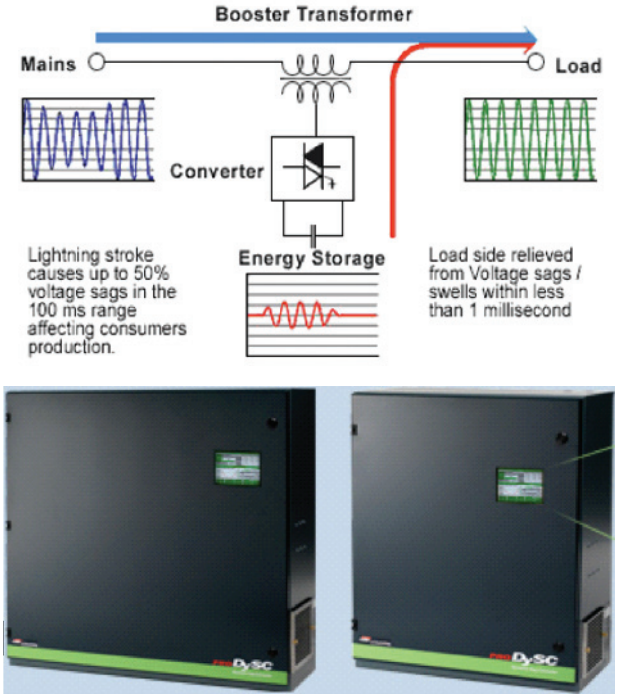
Constant Voltage Transformer (CVT) - เป็นหม้อแปลงแรงดันชนิดหนึ่งที่ออกแบบมาให้ทำงานในจุดอิ่มตัวของแกนเหล็ก ทำให้แม้แรงดันด้าน Input ของ CVT จะเปลี่ยนแปลงไปค่อนข้างมาก แต่แรงดัน Output จะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวจึงสามารถนำมาใช้บรรเทาปัญหาแรงดันตกชั่วขณะได้ CVT มีข้อจำกัดในการใช้งานตรงที่ปัญหาความร้อนและกำลังไฟฟ้าสูญเสีย เนื่องจาก CVT ออกแบบให้ทำงานในจุดอิ่มตัวของแกนเหล็กจึงมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียใน CVT สูงมาก ส่งผลให้เกิดความร้อนในการทำงานสูง และทำให้ไม่สามารถผลิต CVT ขนาดใหญ่ได้



รูปที่ 7.3 ตัวอย่างและโครงสร้างของ Uninterruptible Power Supply

Uninterruptible Power Supply (UPS) - มีหลายประเภทไม่ว่าจะเป็น Standby UPS, Line Interactive UPS และ Online UPS ซึ่งมีคุณสมบัติและราคาแตกต่างกันไป โดย UPS สามารถนำมาใช้แก้ปัญหาแรงดันตกชั่วขณะได้เช่นเดียวกัน จุดเด่นของ UPS คือสามารถใช้แก้ปัญหาได้ทั้งไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะ แต่จุดด้อยที่สำคัญของ UPS คือมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาระยะยาวสูง เนื่องจากใช้แบตเตอรี ซึ่งมีอายุการใช้งานสั้นเป็นอุปกรณ์สำรองพลังงาน และใช้เนื้อที่ในการติดตั้งมาก

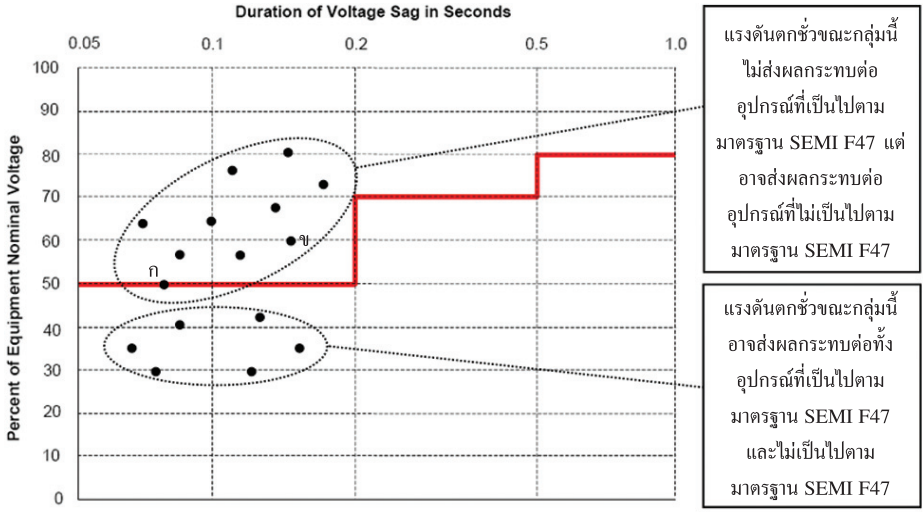


รูปที่ 7.4 ตัวอย่างและโครงสร้างของ Voltage Sag Compensator

Voltage Sag Compensator - เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ตรวจสอบและจ่ายแรงดันไฟฟ้าชดเชยให้กับโหลดเมื่อเกิดแรงดันตกชั่วขณะ เพื่อให้โหลดได้รับแรงดันไฟฟ้าตามปกติในขณะเกิดแรงดันตกชั่วขณะ โดยทั่วไป Voltage Sag Compensator ใช้ Capacitor เป็นอุปกรณ์สำรองพลังงาน ข้อด้อยของ Voltage Sag Compensator คือสามารถแก้เฉพาะปัญหาแรงดันตกชั่วขณะ แต่ไม่สามารถแก้ปัญหาไฟฟ้าดับได้ เนื่องจาก Capacitor ภายใน Voltage Sag Compensator ออกแบบมาให้สำรองพลังงานในช่วงเวลาสั้นๆเท่านั้น จุดเด่นของ Voltage Sag Compensator คือไม่ต้องการการบำรุงรักษามากและใช้เนื้อที่ในการติดตั้งน้อย

8. การเลือกใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ทนทานต่อแรงดันตกชั่วขณะ

การเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีความทนทานต่อแรงดันตกชั่วขณะ เป็นการป้องกันก่อนที่จะเกิดปัญหาขึ้นและอาจเป็นการแก้ปัญหาที่มีค่าใช้จ่ายรวมต่ำสุด โดยปัจจุบันได้มีการกำหนดมาตรฐาน SEMI F47 Specification ที่กำหนดความสามารถในการทนทานต่อแรงดันตกชั่วขณะของอุปกรณ์ไฟฟ้า (Ride-through Capability) อุปกรณ์ที่เป็นไปตามมาตรฐาน SEMI F47 จะมีความสามารถในการทำงานต่อไปได้เมื่อเกิดแรงดันตกชั่วขณะได้ดีกว่าอุปกรณ์ทั่วไป

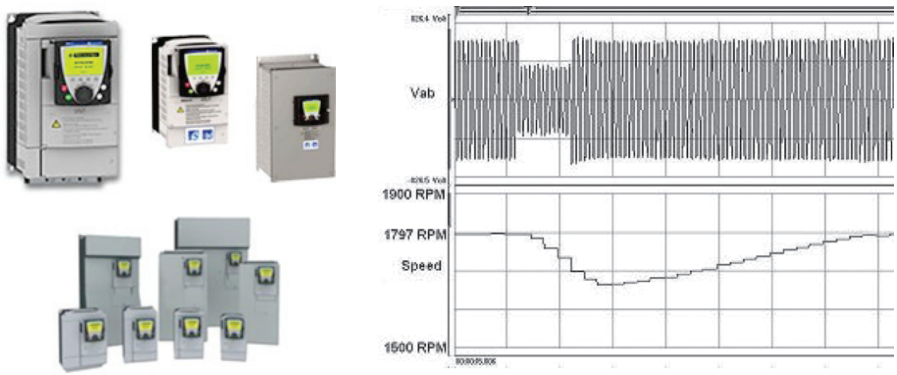


รูปที่ 8.1 กราฟความทนทานต่อแรงดันตกชั่วขณะของอุปกรณ์ที่เป็นไปตามมาตรฐาน SEMI F47 Specification

กราฟในรูปที่ 8.1 แสดงคุณสมบัติความทนทานต่อแรงดันตกชั่วขณะของอุปกรณ์ที่เป็นไปตามมาตรฐาน SEMI F47 โดยหากเกิดเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะที่อยู่บนหรือเหนือเส้นสีแดง เช่น เหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะ ก. ที่มีขนาด 50%

(เหลือแรงดัน 50%) และมีระยะเวลา 0.08 วินาที หรือเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะ ข. ที่มีขนาด 40% (เหลือแรงดัน 60%) และมีระยะเวลา 0.16 วินาที เหตุการณ์เหล่านี้จะไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ที่เป็นไปตามมาตรฐาน SEMI F47 อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ที่เป็นไปตามมาตรฐาน SEMI F47 อาจยังคงได้รับผลกระทบจากเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะที่อยู่ใต้เส้นสีแดงลงไป

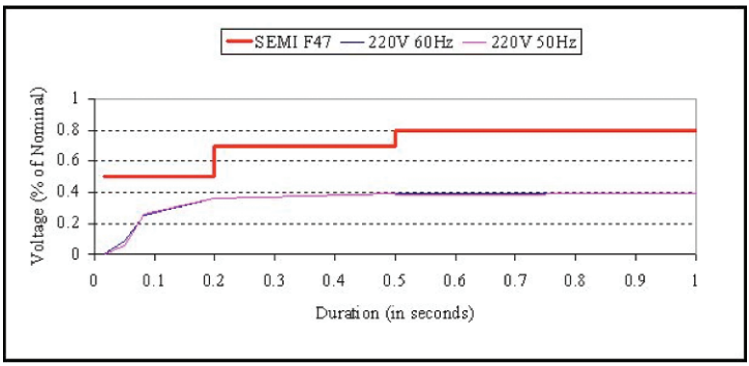
หมายเหตุ คุณสมบัติความทนทานต่อแรงดันตกชั่วขณะตามมาตรฐาน SEMI F47 เป็นคุณสมบัติขั้นต่ำของอุปกรณ์ ซึ่งหมายความว่าอุปกรณ์ที่เป็นไปตามมาตรฐาน SEMI F47 อาจมีความทนทานต่อแรงดันตกชั่วขณะสูงกว่าข้อกำหนดตามมาตรฐานก็เป็นได้



รูปที่ 8.2 ตัวอย่างอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์
ที่มีคุณสมบัติความทนทานต่อแรงดันตกชั่วขณะตามมาตรฐาน SEMI F47

อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ในรูปที่ 8.2 ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐาน SEMI F47 เมื่อทดสอบป้อนแรงดันตกชั่วขณะที่มีขนาด 50% และมีระยะเวลา 0.2 วินาที ผลปรากฏว่ามอเตอร์ไฟฟ้าที่ต่อกับอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบฯ มีความเร็วรอบตกลงเล็กน้อยจากเดิม 1797 rpm เหลือ 1665 rpm (ลดลง 7.3%) เป็น

ระยะเวลาสั้นๆเพียง 1.2 วินาที โดยที่มอเตอร์ยังคงสามารถทำงานต่อไปได้และไม่ทำให้กระบวนการทำงานหยุดชะงัก

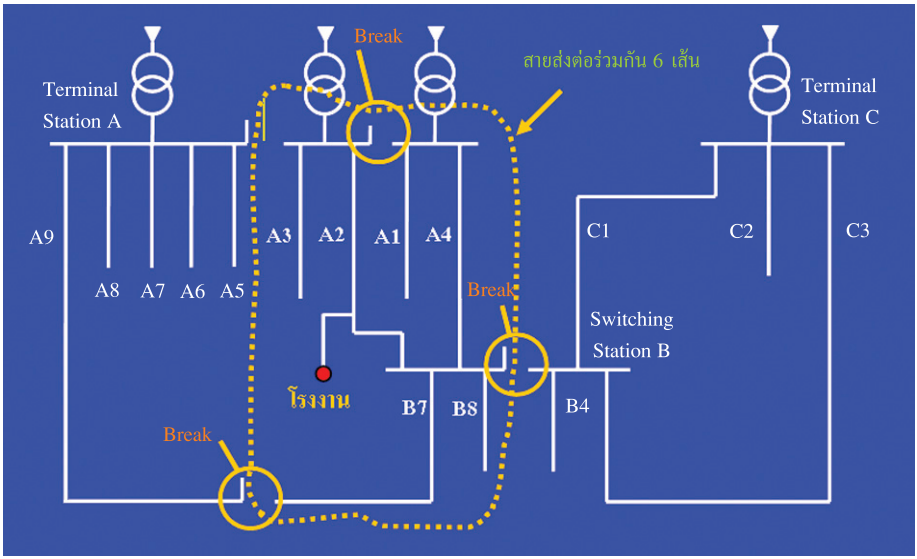


รูปที่ 8.3 ตัวอย่าง Magnetic Contactor
ที่มีคุณสมบัติความทนทานต่อแรงดันตกชั่วขณะสูงกว่ามาตรฐาน SEMI F47

สำหรับ Magnetic Contactor ในรูปที่ 8.3 สามารถทำงานต่อไปได้โดยไม่ปลดวงจรออก เมื่อเกิดเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะที่อยู่เหนือเส้นกราฟสีม่วง (สำหรับระบบ 50 Hz) เนื่องจากเส้นกราฟสีม่วงอยู่ใต้เส้นกราฟสีแดงซึ่งเป็นข้อกำหนดตามมาตรฐาน SEMI F47 ดังนั้น Magnetic Contactor นี้จึงมีคุณสมบัติความทนทานต่อแรงดันตกชั่วขณะสูงกว่ามาตรฐาน SEMI F47

9. กรณีศึกษาการแก้ปัญหาแรงดันตกชั่วขณะ

กรณีศึกษาที่ 1 รีเลย์ป้องกันแรงดันตกในโรงงานรถยนต์ทำงานผิดพลาด

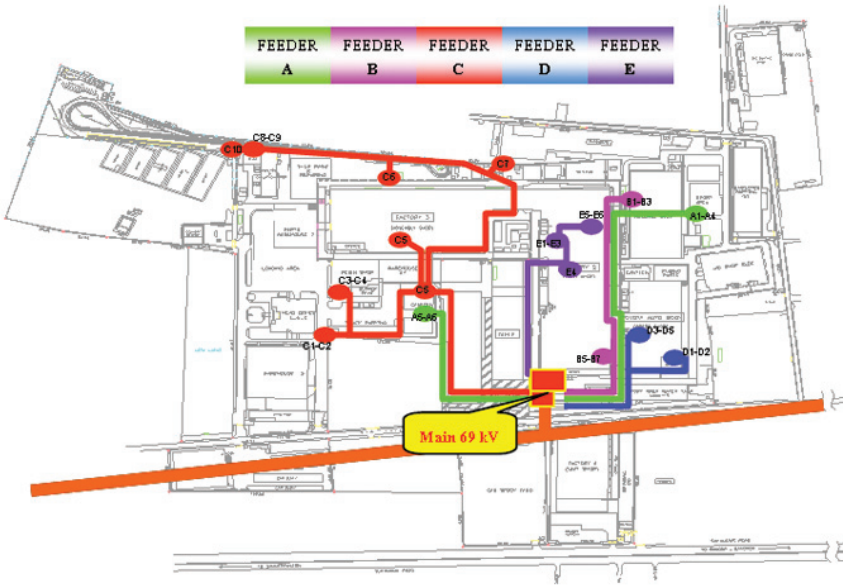


รูปที่ 9.1.1 แผนผังระบบสายส่ง 69 kV ที่จ่ายไฟให้กับโรงงานและสายส่งข้างเคียง

โรงงานผลิตรถยนต์แห่งหนึ่งเชื่อมต่อกับระบบของการไฟฟ้านครหลวงที่ระดับแรงดัน 69 kV โดยรับไฟจากสายส่ง A2 ซึ่งจ่ายไฟมาจาก Terminal Station A และมีสายส่งข้างเคียงซึ่งต่อเชื่อมถึงกันอยู่ 5 เส้นคือ สายส่ง A1, A3, A4, B7 และ B8 ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 9.1.1 ภายในโรงงานมีการติดตั้งหม้อแปลงกำลังพิกัด 69/12 kV จำนวน 3 ลูกใน Substation เพื่อจ่ายไฟไปยังส่วนต่างๆของโรงงานผ่านสายป้อน (Feeder) 12 kV จำนวน 5 สายป้อน ดังแสดงในรูปที่ 9.1.2

เมื่อเกิดเหตุการณ์ลัดวงจรในสายส่ง A1, A3, A4, B7 หรือ B8 รวมถึงสายส่งในระดับแรงดัน 230 kV ที่จ่ายไฟให้กับ Terminal Station A และ Terminal

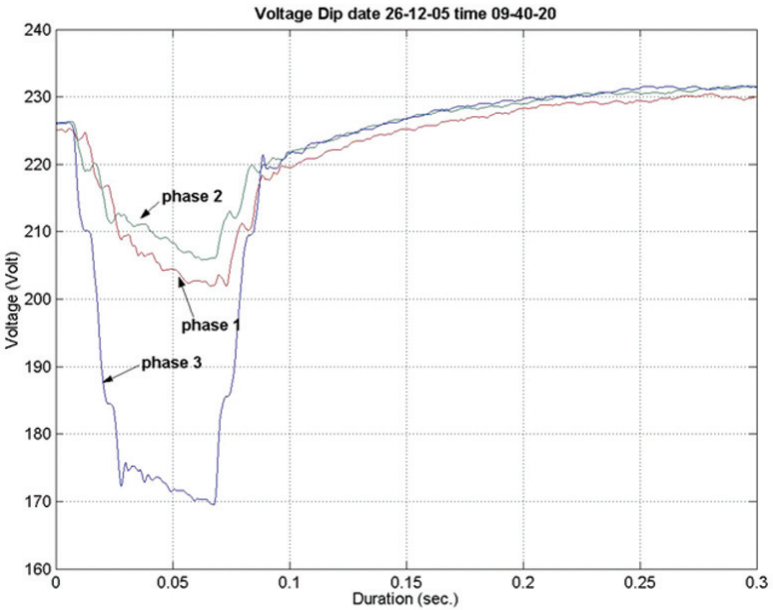
Station C จะทำให้เกิดเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะกระทบกับกระบวนการผลิตของโรงงาน โดยส่งผลให้เซอร์กิตเบรกเกอร์หลักด้านแรงต่ำภายในโรงงานปลดวงจร ทำให้กระบวนการผลิตหยุดชะงักและรถยนต์ที่อยู่ระหว่างการผลิตได้รับความเสียหาย ตัวอย่างเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะที่ส่งผลให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ด้านแรงต่ำภายในโรงงานปลดวงจรแสดงในรูปที่ 9.1.3



รูปที่ 9.1.2 แผนผังระบบสายป้อน 12 kV และหม้อแปลงจำหน่ายภายในโรงงาน

เหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะที่เกิดขึ้นและส่งผลให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ด้านแรงต่ำปลดวงจร จะทำให้โครงตัวถังรถยนต์ที่อยู่ระหว่างการชุบเคลือบกันสนิมค้างอยู่ในสายการผลิต ซึ่งหากทำการแก้ไขล่าช้าอาจก่อให้เกิดสนิมขึ้นกับชิ้นงานจนไม่สามารถใช้ผลิตต่อไปได้ นอกจากนี้โรงงานแห่งนี้สามารถผลิตรถยนต์ออกจากสายการผลิตได้เฉลี่ยนาทีละ 1 คัน หากเซอร์กิตเบรกเกอร์เกิดปลดวงจรไปพนักงาน

ต้องเข้าไปเคลียร์สายการผลิตและใช้เวลาอีกประมาณ 10 - 15 นาทีกว่าจะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เข้ามาเพื่อเริ่มการผลิตใหม่ได้ นั่นคือแรงดันตกชั่วขณะแต่ละเหตุการณ์ส่งผลให้โรงงานสูญเสียโอกาสการผลิตรถยนต์ไป 10 - 15 คัน คิดเป็นมูลค่าความเสียหายหลักหลายแสนบาทต่อเหตุการณ์แต่ละครั้ง

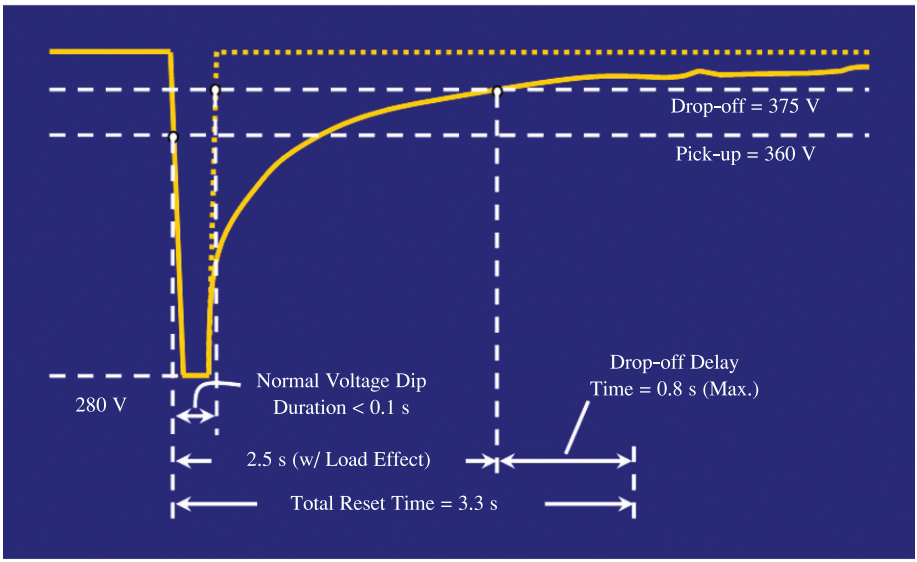


รูปที่ 9.1.3 แรงดันตกชั่วขณะที่ส่งผลให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ด้านแรงต่ำปลดวงจร

ภายในโรงงานมีการติดตั้งใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้าแรงต่ำขนาดใหญ่จำนวนมาก และที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ด้านแรงต่ำได้ติดตั้งรีเลย์ป้องกันแรงดันต่ำเกิน (Undervoltage Protection Relay) เพื่อทำหน้าที่สั่งปลดวงจรออกเมื่อเกิดภาวะแรงดันต่ำเกิน เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดกับมอเตอร์ ในส่วนของตัวรีเลย์ป้องกันแรงดันต่ำเกินมีลูกบิด (Knob) สำหรับปรับตั้งค่า Pick-up Voltage, Drop-off Voltage และ Time Delay โดยโรงงานได้ตั้งค่าการทำงานดังนี้

Pick-up Voltage = 360 V_{L-L} Drop-off Voltage = 375 V_{L-L} Time Delay = 3.0 sec

ความหมายของค่า Pick-up Voltage คือระดับแรงดันไฟฟ้าที่รีเลย์พิจารณาว่าเริ่มเกิดเหตุการณ์แรงดันต่ำเกิน ค่า Drop-off Voltage คือระดับแรงดันที่รีเลย์พิจารณาว่าแรงดันไฟฟ้าได้กลับเข้าสู่ภาวะปกติแล้ว ส่วนค่า Time Delay คือค่าหน่วงเวลาการทำงานของรีเลย์ โดยรีเลย์จะพิจารณาว่าเกิดเหตุการณ์แรงดันต่ำเกินขึ้นและสั่งปลดวงจรก็ต่อเมื่อ ระยะเวลาตั้งแต่ที่แรงดันเริ่มมีค่าต่ำกว่า Pick-up Voltage จนถึงเวลาที่แรงดันมีค่ากลับมาสูงกว่า Drop-off Voltage มีค่ามากกว่าค่า Time Delay นั่นคือหากภาวะแรงดันต่ำเกินเกิดขึ้นในเวลาน้อยกว่าค่า Time Delay แล้วรีเลย์จะยังไม่สั่งปลดวงจร แต่หากภาวะแรงดันต่ำเกินขึ้นต่อเนื่องเป็นเวลามากกว่าค่า Time Delay รีเลย์จึงจะสั่งปลดวงจร



รูปที่ 9.1.4 ผลของแรงดันตกชั่วขณะและโหลดมอเตอร์ต่อการทำงานของรีเลย์ป้องกันแรงดันต่ำเกิน

จากการตั้งค่า Time Delay ของรีเลย์เป็นเวลา 3 วินาทีข้างต้น เหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะซึ่งทั่วไปแล้วเกิดขึ้นเป็นเป็นเวลาสั้นกว่า 0.1 วินาที (พิจารณารูปที่ 9.1.3) ไม่ควรเป็นเหตุทำให้รีเลย์สั่งปลดวงจรได้ อย่างไรก็ตามในขณะเกิดเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะโหลดมอเตอร์จะเกิดการดึงกระแสกระชาก (Inrush Current) ซึ่งมีปริมาณสูงกว่ากระแสปกติ กระแสกระชากนี้อาจคงอยู่ได้เป็นเวลาหลายวินาทีก่อนที่จะค่อยๆสลายตัวไป เป็นเหตุให้แรงดันในระบบไฟฟ้าแรงต่ำมีค่าลดต่ำลงเนื่องจากแรงดันตก (Voltage Drop) ที่มีค่าเพิ่มสูงขึ้นอันเป็นผลจากกระแสกระชากที่ไหลผ่านอิมพีแดนซ์ของระบบ (System Impedance) นั่นเอง ด้วยผลของโหลดมอเตอร์ดังกล่าวระยะเวลาของเหตุการณ์แรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าแรงต่ำภายในโรงงานจึงอาจยาวนานกว่าระยะเวลาของเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะที่เกิดขึ้นจริงในระบบไฟฟ้าภายนอก และอาจยาวนานกว่าค่า Time Delay ของรีเลย์ด้วย จนเป็นเหตุให้รีเลย์สั่งปลดวงจรเซอร์กิตเบรกเกอร์

กราฟแสดงการวิเคราะห์แรงดันในระบบไฟฟ้าแรงต่ำที่มีการใช้งานโหลดมอเตอร์จำนวนมากในขณะเกิดแรงดันตกชั่วขณะจากภายนอกแสดงในรูปที่ 9.1.4 ซึ่งจะเห็นว่าแรงดันตกชั่วขณะจากภายนอกมีขนาดแรงดัน Line to Line ลดลงเหลือ 280 V และเกิดขึ้นเป็นเวลาสั้นกว่า 0.1 วินาที (เส้นประสีเหลือง) แต่ด้วยผลของโหลดมอเตอร์ทำให้แรงดันจริงในระบบไฟฟ้าแรงต่ำมีค่าเปลี่ยนแปลงกลับมาสู่ระดับปกติเป็นเวลาช้ากว่ามาก (เส้นทึบสีเหลือง) กว่าที่แรงดันไฟฟ้าจะกลับมามีค่าเกินกว่า Pick-up Voltage ต้องใช้เวลาถึง 2.5 วินาที นอกจากนี้ถึงแม้แรงดันจะกลับมามีค่าเกินกว่า Pick-up Voltage แล้วแต่รีเลย์จะยังคงไม่หยุดนับช่วงเวลาที่เกิดแรงดันต่ำเกิน เนื่องจากตัวรีเลย์เองต้องใช้เวลาในการทำงานภายในระยะหนึ่งก่อนที่จะสั่งหยุดนับ ช่วงเวลานี้เรียกว่า Drop-off Delay Time ซึ่งใช้เวลาไปอีก 0.8 วินาที ส่งผลให้เวลารวมที่รีเลย์นับว่าเป็นช่วงเวลาที่เกิดแรงดันต่ำเกินมีค่า 3.3 วินาที ซึ่ง

เป็นระยะเวลานานกว่าค่า Time Delay ของตัวรีเลย์ที่ได้ปรับตั้งค่าไว้ จึงเป็นเหตุให้รีเลย์สั่งปลดวงจรเซอร์กิตเบรกเกอร์

นอกจากนั้นการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบรีเลย์พบว่า Pick-up Voltage และ Drop-off Voltage ที่ได้จากการทดสอบมีค่าไม่ตรงกับค่าที่ได้ปรับตั้งไว้บนตัวรีเลย์ ดังแสดงในตารางที่ 9.1.1 ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความไม่เที่ยงตรงของลูกบิดปรับค่าบนตัวรีเลย์เอง โดย Pick-up Voltage และ Drop-off Voltage จริงที่ได้จากการทดสอบซึ่งมีค่าสูงกว่าระดับแรงดันที่ต้องการให้ทำงานนั้น จะส่งผลทำให้ช่วงเวลาที่รีเลย์มองเห็นว่าเกิดแรงดันต่ำเกินยาวนานออกไปอีก ซึ่งจะทำให้ความเสี่ยงที่รีเลย์จะสั่งปลดวงจรเซอร์กิตเบรกเกอร์เนื่องจากแรงดันตกชั่วขณะเพิ่มมากขึ้นไปด้วย

ตารางที่ 9.1.1 เปรียบเทียบค่าที่ปรับตั้งไว้บนตัวรีเลย์กับค่าที่ได้จากการทดสอบ

ตัวแปร	ค่าที่ปรับตั้งไว้บนตัวรีเลย์	ค่าที่ได้จากการทดสอบ
Pick-up Voltage	360 V	368.9 V
Drop-off Voltage	375 V	382.8 V

เนื่องจากปัญหาที่รีเลย์สั่งปลดวงจรจากแรงดันตกชั่วขณะมีสาเหตุมาจากหลายปัจจัย ดังนั้นการแก้ปัญหาจึงต้องดำเนินการแยกทีละประเด็นดังนี้

- ประเด็นความไม่เที่ยงตรงของลูกบิดปรับตั้งค่าบนตัวรีเลย์ ที่ทำให้ค่า Pick-up Voltage และ Drop-off Voltage จริงที่ได้จากการทดสอบมีค่าสูงกว่าค่าที่ปรับตั้งไว้บนตัวรีเลย์ ประเด็นนี้ควรแก้ไขโดยใช้วิธีปรับตั้งค่าการทำงานของรีเลย์โดยอ้างอิงจากเครื่องทดสอบรีเลย์ เนื่องจากมีความเที่ยงตรงและความเชื่อถือได้มากกว่าค่าที่อ่านได้จากลูกบิดบนตัวรีเลย์

ตารางที่ 9.1.2 การปรับตั้งค่าการทำงานของรีเลย์ป้องกันแรงดันต่ำเกิน

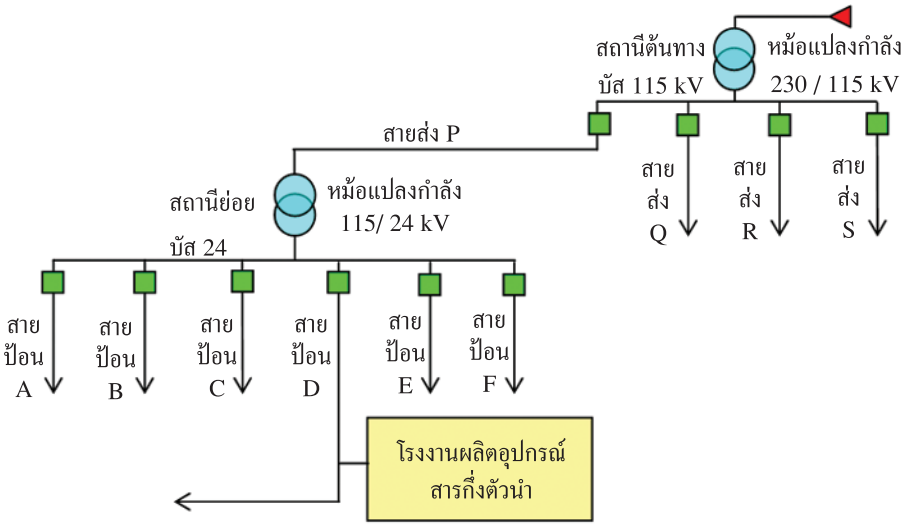
ตัวแปร	ค่าเดิมที่ปรับตั้งไว้บนตัวรีเลย์	ค่าจริงที่ได้จากการทดสอบ	ค่าจริงจากการทดสอบที่จะปรับตั้งใหม่เพื่อบรรเทาปัญหา
Pick-up Voltage	360 V	368.9 V	360 V (90% of Nominal Voltage, 400 V)
Drop-off Voltage	375 V	382.8 V	370.8 V (103% of Pick-up Voltage)

- ประเด็นเรื่องความเหมาะสมของค่า Pick-up Voltage และ Drop-off Voltage นั้น จากการตั้งค่าการทำงานเดิมที่ต้องการให้ Pick-up Voltage มีค่า 360 V และ Drop-off Voltage มีค่า 375 V พบว่า Drop-off Voltage มีค่าสูงกว่า Pick-up Voltage อยู่ 15 V หรือ 4.17% แต่ทั้งนี้หาก Drop-off Voltage มีค่าสูงกว่า Pick-up Voltage มากเกินไปจะส่งผลให้ระยะเวลาที่รีเลย์พิจารณาว่าเกิดภาวะแรงดันต่ำเกินยาวนานขึ้นด้วย ดังนั้นการบรรเทาปัญหาจึงอาจทำได้โดยปรับลดค่า Drop-off Voltage ลง เช่นปรับลด Drop-off Voltage ให้มีค่าเหลือ 103% ของ Pick-up Voltage อย่างไรก็ตามไม่ควรปรับลดค่า Drop-off Voltage จนใกล้เคียงกับ Pick-up Voltage มากเกินไป เนื่องจากอาจทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ต้องสับปลดวงจรบ่อยครั้งในสภาวะที่แรงดันไฟฟ้าไม่เสถียร ค่า Pick-up Voltage และ Drop-off Voltage ที่ปรับตั้งใหม่เพื่อบรรเทาปัญหาแสดงในตารางที่ 9.1.2

กรณีศึกษาที่ 2 เซอร์กิตเบรกเกอร์ในโรงงานอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำปลดวงจร

โรงงานผลิตอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) แห่งหนึ่งรับไฟจากการไฟฟ้านครหลวงในระบบสายป้อนที่ระดับแรงดัน 24 kV ได้ประสบปัญหาไฟฟ้าขัดข้องจากระบบไฟฟ้าภายนอก ส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตของโรงงาน

โรงงานแห่งนี้รับไฟจากสายป้อน D โดยมีสายป้อนข้างเคียงที่รับไฟจากหม้อแปลงกำลังในสถานีย่อยลูกเดียวกันอีก 5 สายป้อนคือ A, B, C, E และ F และสถานีย่อยที่จ่ายไฟให้โรงงานรับไฟจากสายส่ง P ซึ่งมีสายส่งข้างเคียงที่รับไฟจากหม้อแปลงในสถานีต้นทางลูกเดียวกันอีก 3 สายส่งคือ Q, R และ S ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 9.2.1 และข้อมูลเหตุการณ์ไฟฟ้าขัดข้องภายในโรงงานเปรียบเทียบกับการเกิดลัดวงจรในระบบของการไฟฟ้าในรอบระยะเวลา 3 เดือนแสดงในตารางที่ 9.2.1



รูปที่ 9.2.1 แผนผังระบบสายป้อนและสายส่งที่จ่ายไฟให้กับโรงงาน

เมื่อเกิดเหตุการณ์ลัดวงจรในระบบของการไฟฟ้านครหลวงจะส่งผลกระทบทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์หลัก (Main Circuit Breaker) ด้านแรงต่ำของโรงงานปลดวงจร ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าทั้งหมดภายในโรงงานไม่มีไฟฟ้าจ่ายนั่นคือเกิดไฟฟ้าดับทั้งโรงงาน ส่งผลให้กระบวนการผลิตต้องหยุดชะงักลงรวมถึงสินค้าบางส่วนที่อยู่ระหว่างการผลิตได้รับความเสียหาย หลังเกิดเหตุเจ้าหน้าที่ของโรงงานต้อง

ล้างสินค้าที่ค้างอยู่ในกระบวนการผลิตเดิม เพื่อเริ่มต้นกระบวนการผลิตใหม่ซึ่งอาจใช้เวลานานถึงครึ่งชั่วโมง

ตารางที่ 9.2.1 เหตุการณ์ไฟฟ้าขัดข้องในโรงงานกับการลัดวงจรในระบบภายนอก

ลำดับ	วันเวลาที่เกิดเหตุการณ์	ผลกระทบต่อโรงงาน	เหตุการณ์ลัดวงจรเกิดใน
1	3 ต.ค. 48 เวลา 13:35	เซอร์กิตเบรกเกอร์ปลดวงจร	สายป้อน A
2	12 ต.ค. 48 เวลา 23:41	เซอร์กิตเบรกเกอร์ปลดวงจร	สายป้อน E
3	24 ต.ค. 48 เวลา 09:28	เซอร์กิตเบรกเกอร์ปลดวงจร	สายป้อน D
4	31 ต.ค. 48 เวลา 11:08	เซอร์กิตเบรกเกอร์ปลดวงจร	สายป้อน F
5	5 พ.ย. 48 เวลา 06:26	เซอร์กิตเบรกเกอร์ปลดวงจร	สายป้อน C
6	14 พ.ย. 48 เวลา 15:01	เซอร์กิตเบรกเกอร์ปลดวงจร	สายส่ง R
7	22 พ.ย. 48 เวลา 03:48	เซอร์กิตเบรกเกอร์ปลดวงจร	สายป้อน A
8	1 ธ.ค. 48 เวลา 19:51	เซอร์กิตเบรกเกอร์ปลดวงจร	สายป้อน B
9	9 ธ.ค. 48 เวลา 21:41	เซอร์กิตเบรกเกอร์ปลดวงจร	สายป้อน C
10	21 ธ.ค. 48 เวลา 05:30	เซอร์กิตเบรกเกอร์ปลดวงจร	สายส่ง S

เมื่อเซอร์กิตเบรกเกอร์ด้านแรงต่ำปลดวงจรเนื่องจากการเกิดลัดวงจรในระบบไฟฟ้าภายนอก โรงงานจะได้รับความเสียหายต่อกระบวนการผลิตคิดเป็นมูลค่านาทีละ 3,000 บาท โดยปกติเมื่อเซอร์กิตเบรกเกอร์ปลดวงจรแต่ละครั้งจะต้องใช้เวลาในการล้างสายการผลิตเป็นเวลาประมาณ 30 นาที จึงจะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เข้ามาเพื่อเริ่มการผลิตใหม่ได้ ดังนั้นผลกระทบจากระบบไฟฟ้าภายนอกที่ทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ด้านแรงต่ำปลดวงจรคิดเป็นมูลค่าความเสียหายครั้งละประมาณ 90,000 บาท

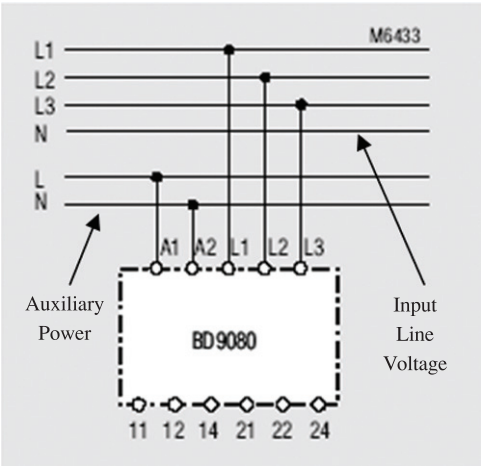
พิจารณาจากข้อมูลในตารางที่ 9.2.1 พบว่าเหตุการณ์ไฟฟ้าขัดข้องในโรงงานจำนวนทั้งสิ้น 10 ครั้ง มีเพียงครั้งเดียวที่เป็นเหตุการณ์ไฟฟ้าดับ คือเหตุการณ์

ลัดวงจรในสายป้อน D ซึ่งเป็นสายป้อนที่จ่ายไฟให้กับโรงงานโดยตรง เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นในสายป้อน D เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่อยู่ในสถานีย่อยจะปลดวงจรออกเพื่อป้องกันความเสียหายต่อสายป้อนและอุปกรณ์จ่ายไฟในสถานีย่อยเนื่องจากภาวะกระแสเกิน ส่งผลให้เกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับกับผู้ใช้ไฟฟ้าทุกรายที่รับไฟจากสายป้อน D อย่างไรก็ตามเหตุการณ์ไฟฟ้าขัดข้องภายในโรงงานอีก 9 เหตุการณ์ไม่ได้เป็นเหตุการณ์ไฟฟ้าดับจากระบบไฟฟ้าภายนอก เนื่องจากไม่ได้เกิดการลัดวงจรในสายป้อนหรือสายส่งที่จ่ายไฟให้กับโรงงานโดยตรง (สายป้อน D และสายส่ง P) แต่เป็นเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะ ซึ่งมีสาเหตุมาจากการเกิดลัดวงจรในระบบไฟฟ้าข้างเคียงกับวงจรที่จ่ายไฟให้กับโรงงานโดยตรง

จากการตรวจสอบข้อมูลข้างต้นสรุปได้ว่า ปัญหาส่วนใหญ่ที่โรงงานได้รับ (90%) เป็นเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะ ซึ่งในขณะที่เกิดเหตุการณ์ดังกล่าวนั้น แรงดันไฟฟ้าไม่ได้ลดลงเป็นศูนย์และเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นมากๆเท่านั้น แต่เหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะส่งผลให้ Main Circuit Breaker ของโรงงานปลดวงจร ส่งผลให้อุปกรณ์ไฟฟ้าภายในโรงงานประสบกับเหตุการณ์ไฟฟ้าดับซึ่งมีความรุนแรงของปัญหามากกว่ามาก เนื่องจากไม่มีแรงดันไฟฟ้าไปจ่ายให้อุปกรณ์ไฟฟ้าและเกิดขึ้นเป็นเวลานานกว่า จนกว่าเจ้าหน้าที่ของโรงงานจะไปสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เข้ามาใหม่ซึ่งอาจใช้เวลาหลายนาที

Main Circuit Breaker ของโรงงานมีการติดตั้งรีเลย์ป้องกันแรงดันต่ำเกิน (Undervoltage Relay) เพื่อทำหน้าที่สั่งปลดวงจร Main Circuit Breaker เมื่อเกิดภาวะที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าต่ำเกินมาตรฐาน (Undervoltage) เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ประเภทมอเตอร์ไฟฟ้า อย่างไรก็ตามภาวะที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่ามาตรฐานในช่วงเวลาสั้นมากๆ (เช่น เหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะ) นั้นไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อมอเตอร์ ดังนั้นเพื่อป้องกันไม่ให้เซอร์กิตเบรกเกอร์

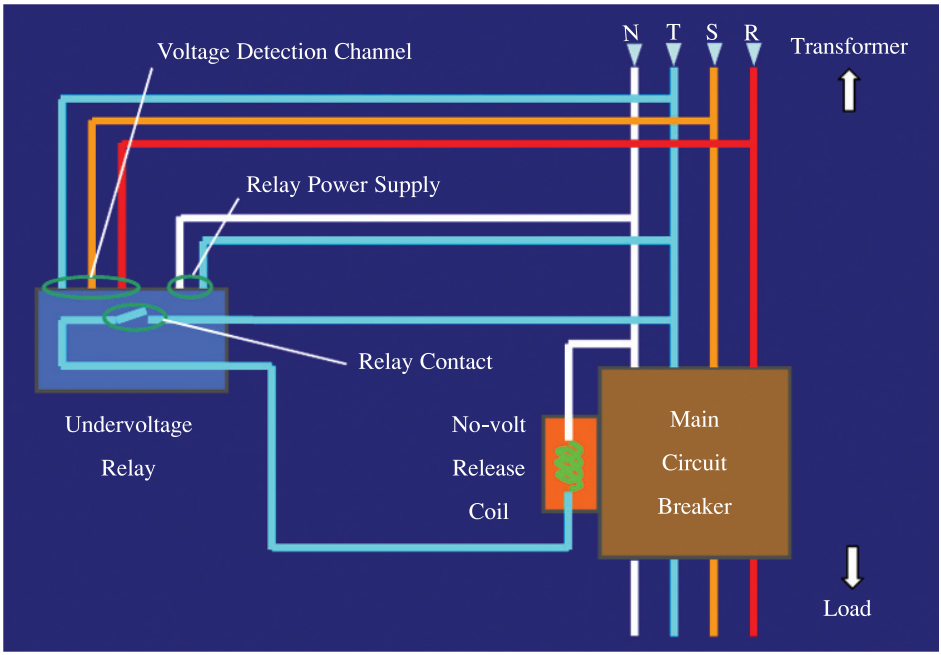
ปลดวงจรบ่อยครั้งเกินจำเป็น Undervoltage Relay จึงได้ตั้งค่าหน่วงเวลาการทำงานไว้ 3 วินาที และตั้งค่า Undervoltage Trip ไว้ที่ 90% ซึ่งหมายความว่า Undervoltage Relay จะสั่งปลดวงจรเซอร์กิตเบรกเกอร์ก็ต่อเมื่อเกิดเหตุการณ์ที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่า 90% ของระดับแรงดันปกติต่อเนื่องกันเป็นเวลานานกว่า 3 วินาที



รูปที่ 9.2.2 Connection Diagram ของ Undervoltage Relay

จากการตั้งค่าการทำงานของ Undervoltage Relay ข้างต้น เหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะซึ่งเกิดขึ้นเป็นเวลาสั้นกว่า 0.1 วินาที ไม่ควรเป็นเหตุทำให้ Undervoltage Relay สั่งปลดวงจรเซอร์กิตเบรกเกอร์ได้ อย่างไรก็ตามหากพิจารณา Connection Diagram ของ Undervoltage Relay ในรูปที่ 9.2.2 จะพบว่ามีช่องเชื่อมต่อสายสัญญาณอยู่ 2 กลุ่มคือ กลุ่มของช่อง Input Line Voltage (L1-L2-L3) ซึ่งใช้เชื่อมต่อกับแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสที่ต้องการตรวจสอบ และกลุ่มของช่อง Auxiliary Power (A1-A2) ซึ่งเป็นช่องจ่ายไฟเลี้ยงให้กับการทำงานของรีเลย์ จากการทดสอบ

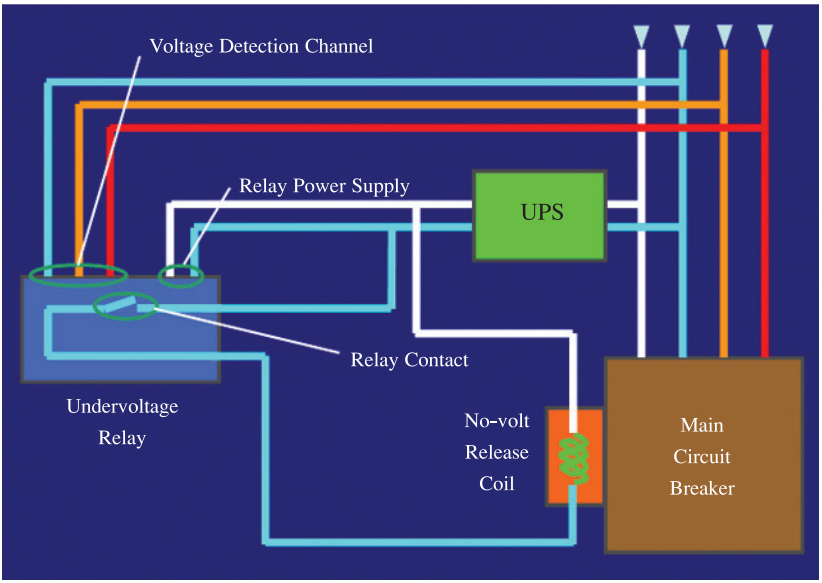
พบว่าแรงดันไฟฟ้าใน Input Line Voltage แม้มีค่าต่ำกว่า 90% หากเกิดขึ้นเป็นเวลาสั้นกว่า 3 วินาทีแล้ว Undervoltage Relay จะยังคงไม่สั่งปลดวงจรเซอร์กิตเบรกเกอร์ แต่หากแรงดันไฟฟ้าใน Auxiliary Power ของรีเลย์มีค่าต่ำกว่า 90% รีเลย์จะสั่งปลดวงจรทันทีโดยไม่รอหน่วงเวลา



รูปที่ 9.2.3 No-volt Release Coil และ Undervoltage Relay

นอกจากนั้น No-volt Release Coil ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ซึ่งเป็นกลไกควบคุมการปลดสับวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ก็เป็นส่วนที่ได้รับผลกระทบจากแรงดันตกชั่วขณะเช่นกัน พิจารณา Connection Diagram ของ No-volt Release Coil และ Undervoltage Relay ในรูปที่ 9.2.3 ในภาวะปกติที่ไม่เกิดเหตุการณ์แรงดันไฟฟ้าผิดปกติ จะมีแรงดันไฟฟ้าปกติผ่าน No-volt Release Coil ทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์

อยู่ในสถานะ Close แต่หากเกิดเหตุการณ์ Undervoltage ขึ้น Undervoltage Relay จะเปิด Relay Contact ออก ส่งผลให้ไม่มีแรงดันไฟฟ้าจ่ายไปยัง No-volt Release Coil ทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ปลดวงจร อย่างไรก็ตามเมื่อเกิดแรงดันตกชั่วขณะ แม้ Relay Contact ของ Undervoltage Relay จะไม่ได้เปิดออก แต่แรงดันตกชั่วขณะจะส่งผลให้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ไปจ่ายให้ No-volt Release Coil มีค่าลดต่ำกว่าระดับปกติซึ่งอาจเป็นเหตุให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ปลดวงจรได้เช่นกัน



รูปที่ 9.2.4 การติดตั้ง UPS ให้กับ No-volt Release Coil และ Undervoltage Relay

ปัญหาที่ Main Circuit Breaker ปลดวงจรเนื่องจากแรงดันตกชั่วขณะมีสาเหตุมาจากการที่ Undervoltage Relay และ No-volt Release Coil มีความอ่อนไหวต่อระดับแรงดันไฟเลี้ยงที่เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นการแก้ปัญหาสามารถทำได้โดยการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมแรงดันเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟเลี้ยงที่จ่ายให้กับ Undervoltage Relay

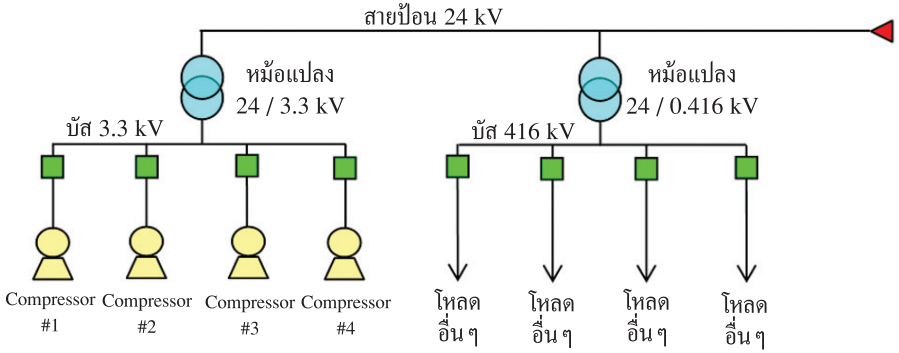
และ No-volt Release Coil ให้อยู่ในระดับคงที่ แม้ว่าแรงดันจากระบบไฟฟ้าภายนอกจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไป ในกรณีนี้สามารถแก้ปัญหาโดยการติดตั้ง UPS (Uninterruptible Power Supply) ขนาดเล็กเพื่อจ่ายไฟให้กับ Auxiliary Power ของ Undervoltage Relay และ No-volt Release Coil ดังแสดงในรูปที่ 9.2.4

ในสภาวะปกติ Undervoltage Relay ตรวจไม่พบแรงดันไฟฟ้าผิดปกติจึงไม่สั่งเปิดหน้า Relay Contact ทำให้มีแรงดันไฟฟ้าครบวงจรผ่าน No-volt Release Coil ส่งผลให้ Main Circuit Breaker อยู่ในสถานะ Close ซึ่งเป็นการทำงานที่ถูกต้องในสภาวะปกติ แต่ในสภาวะที่เกิด Undervoltage นั้น Undervoltage Relay ตรวจพบแรงดันไฟฟ้าผิดปกติจึงสั่งเปิดหน้า Relay Contact ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ไปจ่ายให้ No-volt Release Coil หายไป ส่งผลให้ Main Circuit Breaker ปลดวงจรออกซึ่งเป็นการทำงานที่ถูกต้องในสภาวะที่เกิด Undervoltage และสุดท้ายในกรณีที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะ Undervoltage Relay ซึ่งไฟเลี้ยงได้รับการสำรองไฟจาก UPS จะไม่สั่งเปิดหน้า Relay Contact และ No-volt Release Coil ซึ่งได้รับการสำรองไฟจาก UPS เช่นกัน จะไม่ได้รับผลกระทบจากแรงดันตกชั่วขณะจากภายนอก จึงไม่ทำให้ Main Circuit Breaker ปลดวงจร นั่นคือระบบสามารถจ่ายไฟต่อไปได้แม้จะเกิดเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะขึ้น

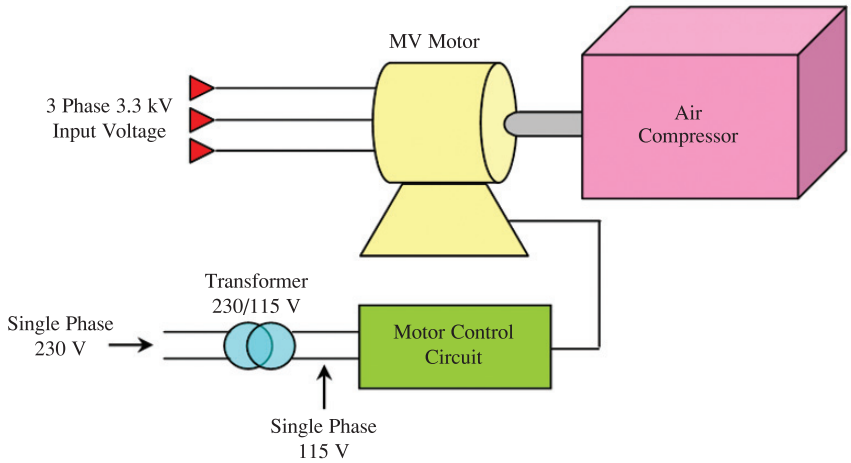
กรณีศึกษาที่ 3 เครื่องอัดอากาศในโรงงานแก้วหยุดการทำงาน

โรงงานผลิตขวดแก้วแห่งหนึ่งรับไฟจากการไฟฟ้านครหลวงในระบบสายป้อนระดับแรงดัน 24 kV ได้รับผลกระทบจากเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิต โดยโรงงานมีการติดตั้งเครื่องอัดอากาศ (Air Compressor) ขนาดใหญ่สำหรับสร้างแรงดันลมเพื่อใช้เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนกระบวนการผลิตขวดแก้ว เครื่องอัดอากาศนี้ขับเคลื่อนโดยมอเตอร์แรงกลาง (Medium Voltage Motor)

ชนิด 3 เฟส พิกัดแรงดัน 3.3 kV ขนาด 1200 kVA จำนวน 4 ชุด มอเตอร์แรงกลางนี้ควบคุมการทำงานโดยชุดวงจรควบคุมซึ่งใช้ไฟเลี้ยง 115 V หนึ่งเฟส และมีพิกัดโหลดประมาณ 500 VA รายละเอียดระบบจ่ายไฟของชุดมอเตอร์แรงกลางและเครื่องอัดอากาศแสดงในรูปที่ 9.3.1 และ 9.3.2



รูปที่ 9.3.1 แผนผังระบบจ่ายไฟภายในโรงงานผลิตขวดแก้ว



รูปที่ 9.3.2 แผนผังการเชื่อมต่อของมอเตอร์แรงกลางและเครื่องอัดอากาศ

เมื่อเกิดเหตุการณ์ลัดวงจรในระบบไฟฟ้าข้างเคียงกับสายป้อนที่จ่ายไฟให้โรงงาน จะก่อให้เกิดเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Dip) ซึ่งเป็นสภาวะที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงต่ำกว่าระดับปกติในช่วงเวลาสั้นๆ โดยทั่วไปน้อยกว่า 0.1 วินาที ส่งผลให้มอเตอร์แรงกลางที่ใช้ขับเคลื่อนเครื่องอัดอากาศหยุดการทำงาน และทำให้แรงดันลมที่ใช้ในกระบวนการผลิตขวดแก้วหายไปเป็นเหตุให้กระบวนการผลิตต้องหยุดชะงักลง

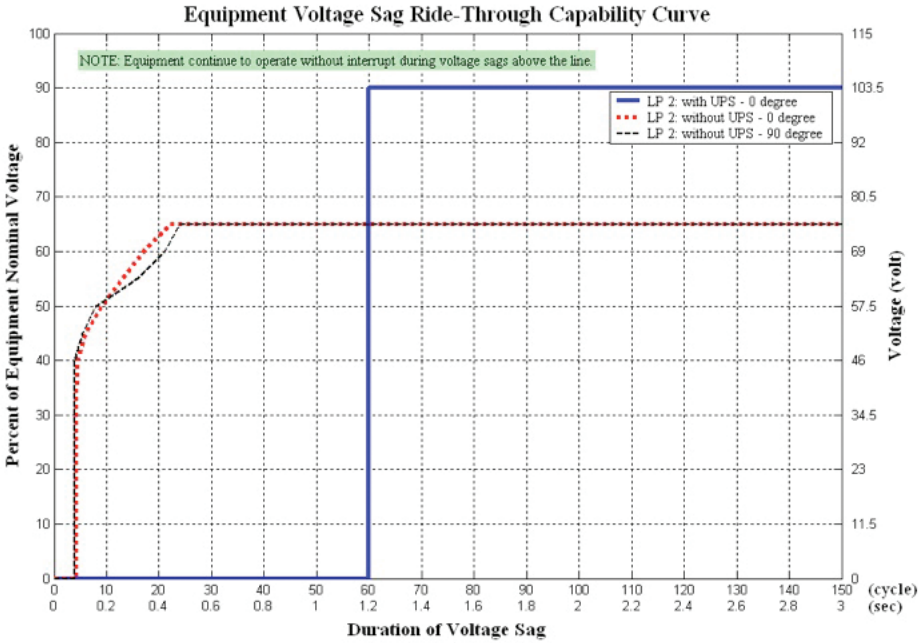
เหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะที่เกิดขึ้นและส่งผลกระทบให้เครื่องอัดอากาศหยุดทำงาน จะทำให้ขวดแก้วที่อยู่ระหว่างการผลิตโดยใช้แรงดันลมเป่าขึ้นรูปแต่ยังไม่เสร็จสมบูรณ์เกิดความเสียหาย ต้องรื้อขวดแก้วที่เสียหายออกจากสายการผลิตและนำมาหลอมใหม่ ทำให้เกิดความสูญเสียทั้งขวดแก้วที่อยู่ระหว่างการผลิต ค่าเชื้อเพลิงที่ต้องใช้ในการหลอมแก้วใหม่ คิดเป็นมูลค่าความเสียหายต่อเหตุการณ์ได้ประมาณ 40,000 บาท ไม่นับรวมค่าเสียโอกาสในการผลิตซึ่งมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับความเร่งด่วนในการส่งมอบสินค้า

จากการสอบถามไปยังผู้ผลิตเครื่องอัดอากาศได้รับข้อมูลว่ามอเตอร์แรงกลางนั้นมีความทนทานต่อแรงดันตกชั่วขณะค่อนข้างมาก ในขณะเกิดแรงดันตกชั่วขณะโดยทั่วไปแล้วมอเตอร์สามารถทำงานต่อไปได้โดยไม่ได้รับความเสียหายใดๆ เพียงแต่อาจมีการเปลี่ยนแปลงแรงบิดหรือความเร็วรอบบ้างเล็กน้อย ซึ่งส่งผลทำให้แรงดันลมที่ใช้ในกระบวนการผลิตลดลงเล็กน้อยในช่วงเวลาสั้นๆเช่นกัน และจากการตรวจสอบร่วมกับเจ้าหน้าที่ของโรงงานพบว่าแรงดันลมที่เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยในช่วงเวลาสั้นมากๆนั้นจะไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตแต่อย่างใด ดังนั้นจึงสันนิษฐานได้ว่าปัญหาดังกล่าวมีสาเหตุมาจากภาคควบคุมของมอเตอร์ซึ่งมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้ามากเกินไป เมื่อเกิดแรงดันตกชั่วขณะขึ้นภาคควบคุมของมอเตอร์จึงสั่งหยุดการทำงานของมอเตอร์ แม้ตัวมอเตอร์และ

โหลดในกระบวนการผลิตเองจะมีความทนทานต่อแรงดันตกชั่วขณะ แต่หากภาคควบคุมสั่งหยุดการทำงานแล้วจะทำให้ระบบทุกอย่างหยุดทำงานเช่นกัน

การไฟฟ้านครหลวงได้ทำการทดสอบความอ่อนไหวต่อเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะของวงจรภาคควบคุมมอเตอร์โดยใช้เครื่องกำเนิดแรงดันตกชั่วขณะ (Sag Generator) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สามารถสร้างแรงดันตกชั่วขณะโดยสามารถกำหนดขนาด (Magnitude) ระยะเวลา (Duration) และมุมเฟสที่เกิด (Phase) ของแต่ละเหตุการณ์ได้ดังแสดงในรูปที่ 9.3.3 การทดสอบทำโดยป้อนแรงดันตกชั่วขณะไปยังวงจรจ่ายไฟของภาคควบคุมมอเตอร์ โดยค่อยๆปรับขนาด และระยะเวลาของแรงดันตกชั่วขณะในทั้งกรณีมุมเฟสเป็น 0 และ 90 องศา จากนั้นตรวจสอบดูว่ามีการสั่งหยุดการทำงานจากภาคควบคุมของมอเตอร์หรือไม่ นำผลการทดสอบมาพล็อตเป็นกราฟแสดงความอ่อนไหวต่อแรงดันตกชั่วขณะดังแสดงในรูปที่ 9.3.4

รูปที่ 9.3.3 เครื่องกำเนิดแรงดันตกชั่วขณะ (Sag Generator)



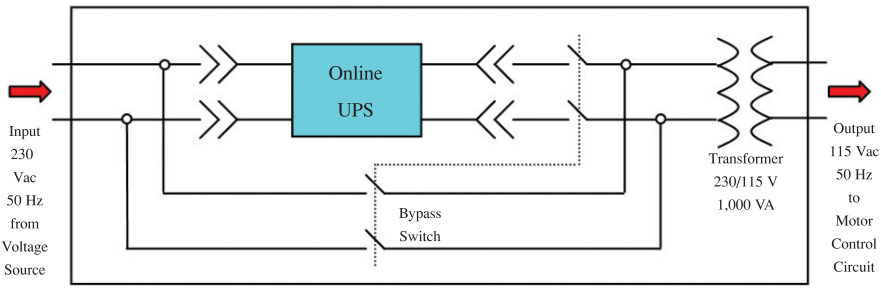
รูปที่ 9.3.4 กราฟแสดงความอ่อนไหวของภาคควบคุมมอเตอร์ต่อแรงดันตกชั่วขณะ

ผลการทดสอบกรณีมุมเฟสเป็น 0 องศาแสดงในเส้นประสีแดง และกรณีมุมเฟสเป็น 90 องศาแสดงในเส้นประสีดำ ทั้งนี้พบว่าผลการทดสอบทั้งสองกรณีมีความแตกต่างกันเล็กน้อยเท่านั้น จึงสรุปได้ว่ามุมเฟสของแรงดันตกชั่วขณะไม่ได้มีนัยสำคัญต่อความอ่อนไหวของภาคควบคุมมอเตอร์ แต่หากพิจารณาถึงผลของขนาดและระยะเวลาของแรงดันตกชั่วขณะแล้วจะพบว่า หากแรงดันตกชั่วขณะเกิดขึ้นเป็นเวลาน้อยกว่า 4 Cycle (0.08 วินาที) ไม่ว่าแรงดันตกชั่วขณะจะมีขนาดเท่าใดหรือแม้แต่แรงดันลดลงเป็นศูนย์ ภาคควบคุมของมอเตอร์ยังสามารถทำงานต่อไปได้โดยไม่สั่งหยุดการทำงาน แต่ถ้าระยะเวลาการเกิดแรงดันตกชั่วขณะเพิ่มขึ้น ขนาดของแรงดันตกชั่วขณะที่ทำให้ภาคควบคุมสั่งหยุดการทำงานจะมีค่าลดลงเช่น เหตุการณ์

แรงดันตกชั่วขณะระยะเวลา 10 Cycle (0.2 วินาที) และมีขนาด 50% (เหลือแรงดัน 50%) จะส่งผลให้ภาคควบคุมสั่งหยุดการทำงานของมอเตอร์ และหากแรงดันตกชั่วขณะเกิดขึ้นเป็นเวลานานกว่า 23 Cycle (0.46 วินาที) และมีขนาดมากกว่า 35% (เหลือแรงดันน้อยกว่า 65%) จะส่งผลให้ภาคควบคุมสั่งหยุดการทำงานทุกครั้ง

ในระบบของการไฟฟ้านครหลวง แรงดันตกชั่วขณะส่วนใหญ่มีระยะเวลาไม่เกิน 0.1 วินาที แต่อาจมีบางเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเป็นเวลานานกว่านี้ นอกจากนั้นหากแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดขึ้นมีขนาดเกินกว่าที่ภาคควบคุมมอเตอร์สามารถทนรับได้ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะที่อยู่ใต้เส้นกราฟความอ่อนไหวของภาคควบคุมมอเตอร์ (เส้นประสีแดงและดำ) จะส่งผลทำให้ภาคควบคุมมอเตอร์สั่งหยุดการทำงาน และทำให้กระบวนการผลิตต้องหยุดชะงัก

เนื่องจากกรณีนี้ปัญหาเกิดจากการที่ภาคควบคุมมอเตอร์มีความอ่อนไหวต่อแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดขึ้นในวงจรไฟเลี้ยงมากเกินไป ทั้งที่ตัวมอเตอร์หรือโหลดในกระบวนการผลิตเองสามารถทนต่อแรงดันตกชั่วขณะได้ ดังนั้นการแก้ปัญหาจึงต้องเพิ่มความทนทานต่อแรงดันตกชั่วขณะให้กับภาคควบคุมมอเตอร์โดยการติดตั้งอุปกรณ์ที่สามารถควบคุมแรงดันในวงจรไฟเลี้ยงของภาคควบคุมมอเตอร์ให้อยู่ในระดับคงที่ขณะเกิดแรงดันตกชั่วขณะ



รูปที่ 9.3.5 อุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟเลี้ยงให้กับภาคควบคุมมอเตอร์

รูปที่ 9.3.5 แสดงอุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟเลี้ยงให้กับภาคควบคุมมอเตอร์ ซึ่งประกอบไปด้วย Online UPS ชนิดทั่วไปในท้องตลาดพิกัด Input 230 Vac, Output 230 Vac, 1,000 VA ทำหน้าที่สำรองและควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า หม้อแปลงพิกัด 230/115 V ขนาด 1,000 VA ทำหน้าที่แปลงแรงดันให้เหมาะสมกับระดับที่ภาคควบคุมมอเตอร์ต้องการ และ Bypass Switch ทำหน้าที่ Bypass จ่ายไฟให้โหลดกรณี UPS ชำรุด โดยอุปกรณ์ดังกล่าวออกแบบมาให้สามารถรักษาระดับแรงดันที่จ่ายให้กับภาคควบคุมให้คงที่ที่ 115 V ในขณะเกิดแรงดันตกชั่วขณะ เพื่อให้ภาคควบคุมไม่สั่งหยุดการทำงานของมอเตอร์ส่งผลให้กระบวนการผลิตโดยรวมสามารถดำเนินการต่อไปได้ในขณะเกิดแรงดันตกชั่วขณะ

อย่างไรก็ตามการควบคุมแรงดัน Output ให้คงที่ในขณะที่แรงดัน Input มีค่าลดลงต่ำกว่าปกติจะต้องมีระยะเวลาไม่เกิน 3 วินาที เพื่อให้ภาคควบคุมสามารถสั่งหยุดการทำงานของมอเตอร์และปลดวงจรตัวมอเตอร์ออกจากระบบไฟฟ้าเมื่อเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับ (โดยเฉพาะกรณีไฟฟ้าดับชั่วครู่ 3 วินาที) เนื่องจากในขณะเกิดไฟฟ้าดับความเฉื่อยของตัวมอเตอร์และโหลดจะเปลี่ยนสภาพการทำงานของมอเตอร์ให้กลายเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและจ่ายแรงดันไฟฟ้าย้อนออกมา หากตัวมอเตอร์ไม่ปลดวงจรออกจากระบบไฟฟ้าหลังไฟฟ้าดับ เมื่อเวลาผ่านไป 3 วินาทีจะมีแรงดันไฟฟ้าจากการไฟฟ้าจ่ายมาที่ตัวมอเตอร์ ซึ่งหากแรงดันที่จ่ายจากการไฟฟ้าและแรงดันที่เกิดจากตัวมอเตอร์เองมีมุมเฟสต่างกันจะทำให้เกิดกระแสกระชากสร้างความเสียหายต่อมอเตอร์ได้

ดังนั้นเพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าวจึงต้องปรับตั้งค่าการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟเลี้ยงให้จ่ายแรงดัน Output ในระดับคงที่เมื่อแรงดัน Input มีค่าต่ำกว่าระดับปกติ (ต่ำกว่า 90% ของแรงดันปกติ) ในช่วงเวลาไม่เกิน 1.2 วินาที แต่หากแรงดัน Input ยังคงมีค่าต่ำกว่าระดับปกติเป็นเวลานานกว่า 1.2 วินาที อุปกรณ์

ควบคุมแรงดันไฟเลี้ยงจะต้องตัดแรงดัน Output ออก จากการปรับตั้งค่าการทำงานข้างต้น หากเกิดเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะซึ่งมีระยะเวลาสั้นกว่า 1.2 วินาที ภาคควบคุมมอเตอร์ก็ยังคงได้รับแรงดันไฟเลี้ยงระดับปกติและคงที่จึงไม่สั่งหยุดการทำงานของมอเตอร์ แต่หากเป็นเหตุการณ์ไฟฟ้าดับซึ่งเกิดขึ้นเป็นเวลา 3 วินาทีหรือมากกว่า แรงดันไฟเลี้ยงที่จ่ายให้ภาคควบคุมมอเตอร์จะถูกตัดออกไปทำให้ภาคควบคุมมอเตอร์สั่งหยุดการทำงานและปลดตัวมอเตอร์ออกจากระบบไฟฟ้าอันเป็นการป้องกันมิให้ตัวมอเตอร์ชำรุดเสียหายจากกระแสกระชาก

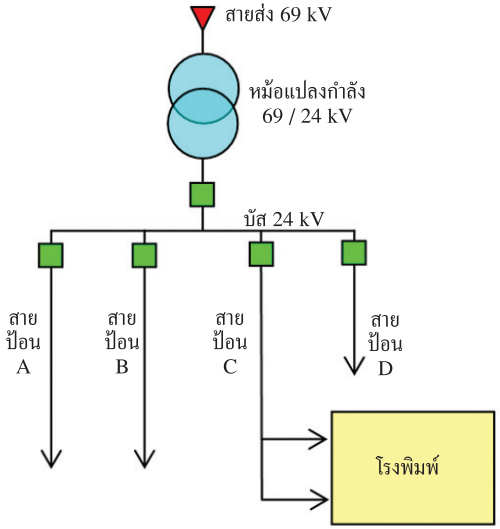
หลังจากติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟเลี้ยงให้กับภาคควบคุมมอเตอร์แล้ว ทำการทดสอบความอ่อนไหวต่อแรงดันตกชั่วขณะอีกครั้ง ได้ผลทดสอบตามเส้นกราฟสีน้ำเงินในรูปที่ 9.3.4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไม่ว่าแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเพียงใดในระยะเวลาไม่เกิน 1.2 วินาที ภาคควบคุมมอเตอร์จะยังคงไม่สั่งหยุดการทำงาน แต่หากแรงดันมีค่าต่ำกว่า 90% เป็นเวลานานกว่า 1.2 วินาที ภาคควบคุมมอเตอร์จะต้องสั่งหยุดการทำงานและปลดมอเตอร์ออกจากระบบไฟฟ้า

กรณีศึกษาที่ 4 อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ในโรงพิมพ์ชำรุดเสียหาย

โรงพิมพ์แห่งหนึ่งซึ่งรับไฟจากการไฟฟ้านครหลวงในระบบสายป้อนที่ระดับแรงดัน 24 kV ได้ประสบปัญหาไฟฟ้าขัดข้องจากระบบไฟฟ้าภายนอก ส่งผลกระทบต่อกระบวนการพิมพ์ของโรงพิมพ์ โรงพิมพ์แห่งนี้รับไฟจากสายป้อน C โดยมีสายป้อนข้างเคียงที่รับไฟจากหม้อแปลงกำลังในสถานีย่อยลูกเดียวกันอีก 3 สายป้อนคือ A, B และ D ดังแสดงในรูปที่ 9.4.1

สถิติเหตุการณ์ไฟฟ้าขัดข้องภายในโรงพิมพ์เปรียบเทียบกับสถิติการเกิดลัดวงจรในสายป้อนของการไฟฟ้านครหลวงแสดงในตารางที่ 9.4.1 จากข้อมูลในตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเหตุการณ์ไฟฟ้าขัดข้องภายในโรงพิมพ์ไม่ได้เป็นผลมา

จากเหตุการณ์ไฟฟ้าดับ เพราะในเวลาดังกล่าวไม่ได้เกิดเหตุการณ์ลัดวงจรในสายป้อนที่จ่ายไฟให้กับโรงพิมพ์โดยตรง (สายป้อน C) แต่เหตุการณ์ไฟฟ้าขัดข้องภายในโรงพิมพ์สอดคล้องกับเหตุการณ์ลัดวงจรในสายป้อนข้างเคียง



รูปที่ 9.4.1 สถานีย่อยและระบบสายป้อน 24 kV ที่จ่ายไฟให้กับโรงพิมพ์

จากการสอบถามเจ้าหน้าที่ของโรงพิมพ์พบว่า ปัญหาไฟฟ้าดับภายในโรงพิมพ์เกิดขึ้นน้อยครั้งมาก แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นบ่อยครั้งคือเหตุการณ์ในลักษณะไฟกะพริบ สังเกตได้จากหลอดแสงสว่างไม่ดับแต่เกิดการกะพริบในช่วงเวลาสั้นๆ ซึ่งเมื่อเกิดขึ้นจะทำให้แท่นพิมพ์หยุดทำงานส่งผลให้หนังสือพิมพ์ที่อยู่ระหว่างการพิมพ์เสียหาย และในบางครั้งส่งผลทำให้อุปกรณ์ในแท่นพิมพ์ชำรุดเสียหายด้วย ซึ่งในกรณีนี้จะส่งผลกระทบกับโรงพิมพ์เป็นอย่างมากเนื่องจากทำให้กระบวนการพิมพ์ต้องหยุดชะงักเป็นเวลานาน

ตารางที่ 9.4.1 สถิติไฟฟ้าขัดข้องในโรงพิมพ์กับการลัดวงจรในระบบภายนอก

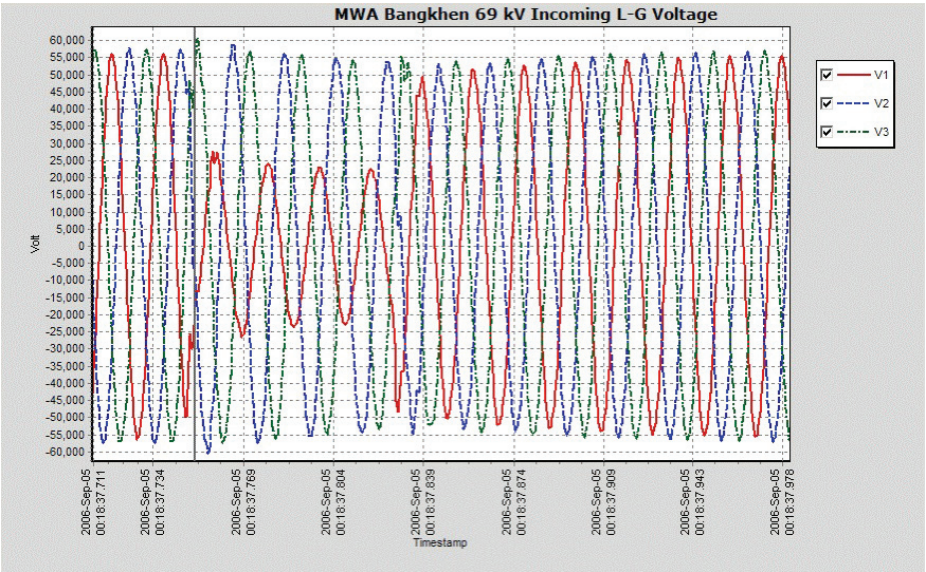
ลำดับ	วันเวลาที่เกิดเหตุการณ์	ผลกระทบต่อโรงพิมพ์	เหตุการณ์ลัดวงจรในสายป้อน
1	13 มี.ค. 48 เวลา 23:40	แท่นพิมพ์หยุดทำงาน	สายป้อน A
2	29 มี.ค. 48 เวลา 05:34	แท่นพิมพ์หยุดทำงาน	สายป้อน B
3	21 เม.ย. 48 เวลา 02:18	แท่นพิมพ์ชำรุดเสียหาย	สายป้อน A
4	17 พ.ค. 48 เวลา 00:38	แท่นพิมพ์หยุดทำงาน	สายป้อน D
5	1 มิ.ย. 48 เวลา 04:21	แท่นพิมพ์หยุดทำงาน	สายป้อน B
6	30 มิ.ย. 48 เวลา 03:01	แท่นพิมพ์หยุดทำงาน	สายป้อน A

เจ้าหน้าที่ของโรงพิมพ์ให้ข้อมูลเพิ่มเติมว่า ส่วนที่ชำรุดเสียหายภายในแท่นพิมพ์เกิดขึ้นที่ Thyristor ซึ่งอยู่ภายในชุดขับเคลื่อนมอเตอร์แท่นพิมพ์แบบ DC Drive ซึ่งเป็นภาคกำลังของอุปกรณ์ สำหรับส่วนระบบควบคุมแท่นพิมพ์ เจ้าหน้าที่ได้ปรับตั้งค่าการทำงานให้ระบบควบคุมหยุดการทำงานของแท่นพิมพ์ หากตรวจสอบพบว่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้แท่นพิมพ์มีค่าเกินกว่า ±10% ของระดับแรงดันพิกัดโดยให้รอหน่วงเวลาไว้ 100 มิลลิวินาที

ในกรณีที่เหตุการณ์ไฟฟ้าขัดข้องทำให้แท่นพิมพ์หยุดทำงานแต่ไม่ชำรุดเสียหายนั้น ผลกระทบจะมีไม่มากคือทำให้หนังสือพิมพ์ที่อยู่ระหว่างการพิมพ์บางส่วนเสียหาย และใช้เวลาในการ Restore ระบบกลับมาประมาณ 10 นาที แต่หากเป็นกรณีที่เหตุการณ์ไฟฟ้าขัดข้องทำให้แท่นพิมพ์ชำรุดเสียหายจะก่อให้เกิดความเสียหายต่อโรงพิมพ์เป็นอย่างมาก เพราะนอกจากจะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมแท่นพิมพ์ที่ชำรุดแล้ว ยังมีความเสี่ยงที่จะไม่สามารถพิมพ์หนังสือพิมพ์ได้ทันซึ่งเป็นสิ่งที่โรงพิมพ์ยอมรับไม่ได้

หากปัญหาไฟฟ้าขัดข้องที่เกิดขึ้นไม่ได้สร้างความเสียหายให้กับแท่นพิมพ์ เพียงแต่ทำให้แท่นพิมพ์หยุดทำงาน กรณีนี้ความเสียหายจะมีไม่มากนัก คือจะมีหนังสือพิมพ์บางส่วนที่อยู่ระหว่างการพิมพ์เสียหายซึ่งคิดเป็นมูลค่าประมาณ 2,000 บาทต่อเหตุการณ์ แต่หากเหตุการณ์ไฟฟ้าขัดข้องทำให้แท่นพิมพ์ชำรุดเสียหาย กรณีนี้มูลค่าความเสียหายจะเพิ่มเป็นประมาณ 50,000 บาทต่อเหตุการณ์ ซึ่งยังไม่รวมความเสียหายที่เกิดจากการพิมพ์หนังสือส่งไม่ทันตามกำหนด

ปัญหาไฟฟ้าขัดข้องภายในโรงพิมพ์ที่มีลักษณะคล้ายไฟกะพริบแท้จริงแล้วคือเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะ ซึ่งมีสาเหตุมาจากการเกิดลัดวงจรในระบบไฟฟ้าข้างเคียง ในกรณีนี้คือการเกิดลัดวงจรในสายป้อน A, B หรือ D ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโรงพิมพ์มีค่าลดลงต่ำกว่าระดับปกติในช่วงเวลาสั้นๆ (ทั่วไปน้อยกว่า 0.1 วินาที)



รูปที่ 9.4.2 แรงดันตกชั่วขณะในสายส่ง 69 kV ที่ส่งผลให้แท่นพิมพ์ชำรุดเสียหาย

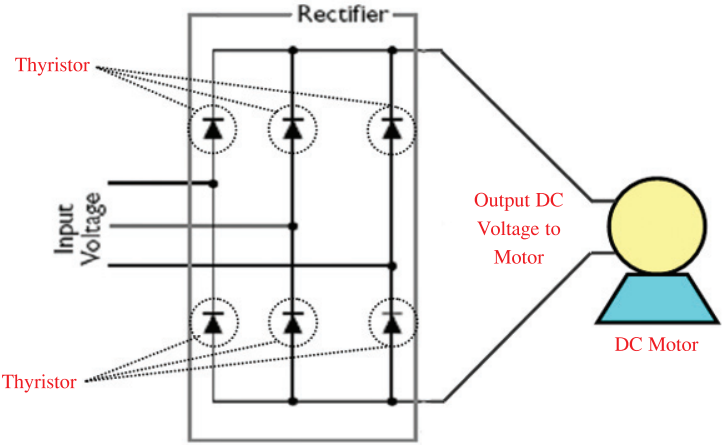
เหตุที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงต่ำกว่าปกติในช่วงที่เกิดลัดวงจรเป็นเพราะกระแสลัดวงจรซึ่งมีขนาดสูงกว่ากระแสโหลดปกติมากเมื่อไหลผ่านอิมพีแดนซ์ระบบ (ได้แก่ อิมพีแดนซ์ของบัสบาร์ หม้อแปลงกำลัง และสายส่ง) ทำให้เกิดแรงดันตก (Voltage Drop) ในอิมพีแดนซ์ระบบเป็นปริมาณสูงกว่าปกติ ส่งผลให้แรงดันที่เหลือไปจ่ายโหลดมีค่าลดต่ำกว่าปกติเช่นกัน สำหรับช่วงเวลาของเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะก็คือช่วงเวลาทั้งหมดที่อุปกรณ์ป้องกันในสถานีย่อยอันได้แก่ Circuit Breaker และ Protection Relay ใช้ในการทำงานเพื่อปลดวงจรออกหลังเกิดเหตุการณ์ลัดวงจรซึ่งทั่วไปมีค่าไม่เกิน 0.1 วินาที ตัวอย่างรูปคลื่นของเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะ (ในระบบสายส่ง 69 kV ซึ่งจ่ายไฟให้สถานีไฟฟ้าย่อยซึ่งจ่ายไฟให้กับโรงพิมพ์อีกที) ที่ส่งผลให้แท่นพิมพ์ชำรุดเสียหายแสดงในรูปที่ 9.4.2

พิจารณาจากวงจรของชุด DC Drive และ DC Motor ดังแสดงในรูปที่ 9.4.3 เมื่อเกิดเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะขึ้นจะทำให้แรงดัน DC Output Voltage ที่จ่ายให้กับ DC Motor มีค่าลดต่ำลง ต่อมาเมื่อเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะผ่านไปและแรงดัน Input Voltage ที่จ่ายให้กับชุด Rectifier กลับเข้าสู่ภาวะปกติ จะทำให้เกิดความแตกต่างของแรงดันตกคร่อมตัว Thyristor ซึ่งจะมีค่ามากน้อยเท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับความรุนแรงของเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะ หากเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะรุนแรงมาก (แรงดันลดลงไปมาก) แรงดันที่ตกคร่อมตัว Thyristor ก็จะมีค่าสูง แรงดันที่ตกคร่อม Thyristor นี้จะทำให้เกิดกระแส Inrush ปริมาณมากไหลผ่าน Thyristor

เนื่องจากการตั้งค่าการทำงานเดิมของระบบควบคุมแท่นพิมพ์ ระบบควบคุมต้องรอหน่วงเวลาเป็นเวลา 100 มิลลิวินาทีหลังเกิดเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะก่อนที่จะปลดวงจรของแท่นพิมพ์ออกได้ จึงทำให้มีกระแส Inrush ไหลผ่าน

Thyristor เป็นเวลาถึง 100 มิลลิวินาที ซึ่งหากกระแส Inrush นี้มีปริมาณสูงพอก็เป็นเหตุทำให้ Thyristor เกิดการชำรุดเสียหายเนื่องจากกระแสเกินได้

ในกรณีแท่นพิมพ์นี้ หากต้องการแก้ปัญหาให้ได้โดยสมบูรณ์ นั่นคือเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะต้องไม่ส่งผลกระทบทำให้แท่นพิมพ์ชำรุดเสียหายหรือแม้แต่หยุดการทำงาน จำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag Compensator) หรือ UPS (Uninterruptible Power Supply) ให้กับชุดแท่นพิมพ์ทั้งหมด เพื่อให้แท่นพิมพ์ได้รับแรงดันไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่องตลอดเวลา แต่วิธีการนี้ต้องใช้เงินลงทุนสูงมากเนื่องจากอุปกรณ์แก้ปัญหาเหล่านี้มีราคาแพง



รูปที่ 9.4.3 Circuit Diagram ของ DC Drive และ DC Motor

อย่างไรก็ตามสำหรับกระบวนการทำงานของโรงพิมพ์ ผลกระทบที่เกิดจากการที่แท่นพิมพ์ต้องหยุดการทำงานโดยยังไม่ชำรุดเสียหาย มีน้อยกว่าผลกระทบจากที่แท่นพิมพ์ต้องชำรุดเสียหายเนื่องจากปลดตัวเองออกช้าเกินไปเมื่อเกิดเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะ ทั้งนี้เนื่องจากกรณีที่แท่นพิมพ์หยุดการทำงานโดยไม่ชำรุดเสียหาย

เจ้าหน้าที่ของโรงพิมพ์สามารถ Restore ระบบกลับมาได้ภายในเวลา 10 นาทีซึ่งส่งผลกระทบต่อการกระบวนการพิมพ์เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ดังนั้นในกรณีนี้จึงสามารถแก้ปัญหาโดยปรับตั้งค่าการทำงานของโปรแกรมควบคุมแท่นพิมพ์ให้สั่งหยุดการทำงานของแท่นพิมพ์โดยทันทีหากแรงดันเปลี่ยนแปลงมีค่าเกินกว่า ±10% โดยไม่มีการหน่วงเวลา เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดกับ Thyristor ภายในชุดแท่นพิมพ์ อันเป็นแนวทางในการแก้ปัญหาที่ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายแต่อย่างใดแต่สามารถลดความเสี่ยงที่แท่นพิมพ์จะชำรุดเสียหายลงได้มาก

สอบถามเพิ่มเติมติดต่อ :
กองพัฒนาระบบไฟฟ้า
ฝ่ายวิจัยและพัฒนา
การไฟฟ้านครหลวง
โทรศัพท์ : 0-2348-5565

การไฟฟ้านครหลวง
www.mea.or.th