

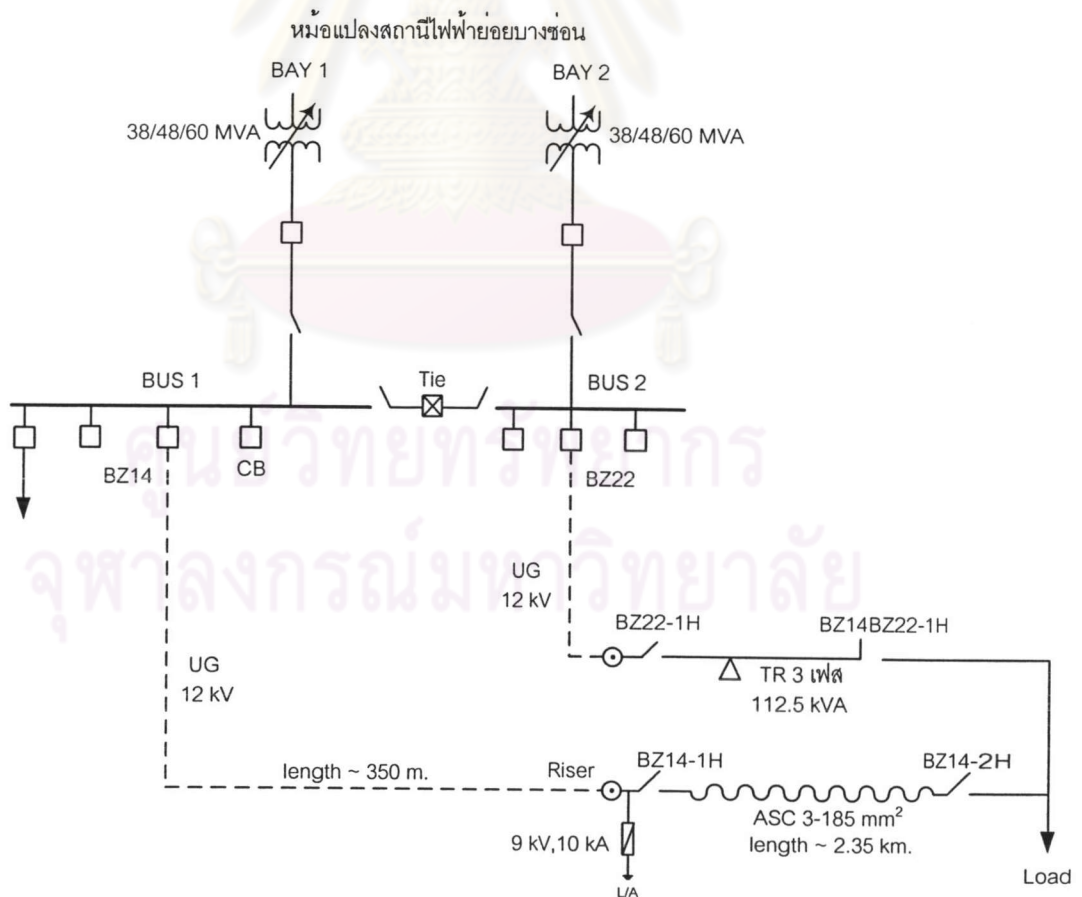
บทที่ 4

แรงดันเกินจากการสับ-ปลดสวิตช์ใบมีดในสายป้อน

4.1 ปัญหา

จากข้อมูลแบบสอบถาม และรายงานการปฏิบัติงานของการไฟฟ้านครหลวงในหลายเขตพบว่าบ่อยครั้งมีการระเบิดของกับดักฟ้าผ่าที่ติดตั้งบนเสาโรเซอร์ (riser pole) ขณะทำการสับและปลดสวิตช์ใบมีดเพื่อดับไฟในบริเวณที่ปฏิบัติงานและจ่ายไฟกลับคืนภายหลังปฏิบัติงานเสร็จ ซึ่งเป็นปัญหาที่หลายฝ่ายได้ให้ความสนใจเป็นพิเศษ เนื่องจากเกิดขึ้นเกือบทุกครั้งที่ปฏิบัติงาน ณ จุดเดิม และยังพบปัญหาลักษณะเดียวกันนี้หลายจุดในระบบ ทำให้บางกรณีก็ยังไม่สามารถเปลี่ยนกับดักฟ้าผ่าที่เกิดระเบิดขึ้นได้ ดังเช่นตัวอย่างกรณีปัญหาที่นำมาศึกษาในบทนี้

4.1.1 โครงสร้างของระบบ

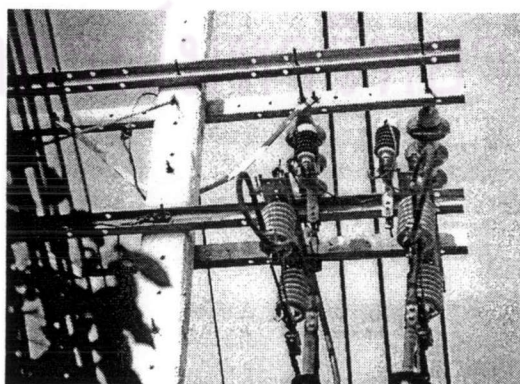


รูปที่ 4.1 แผนภาพเส้นเดียวของบริเวณที่ปฏิบัติงาน

กรณีศึกษานี้เป็นระบบจำหน่ายพิกัดแรงดัน 12 kV ซึ่งจ่ายไฟจากสถานีไฟฟ้าย่อยที่ประกอบด้วยหม้อแปลง 2 ชุด จ่ายไฟให้กับสายป้อนต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ในรูปแสดงสายป้อน BZ14 ที่รับไฟจากหม้อแปลงเบย์ที่ 1 ผ่านเซอร์กิตเบรกเกอร์ BZ14 และสายเคเบิลใต้ดินที่มียาวประมาณ 350 เมตร ซึ่งต่อกับสวิตช์ใบมีด BZ14-1H ที่เสาโรเซอร์ที่เป็นจุดเชื่อมต่อกับสายป้อนอากาศชนิด spaced aerial cable โดยปกติสายป้อน BZ14 จะมีลักษณะเป็นสายเรเดียล (radial line) ซึ่งสามารถเชื่อมต่อกับสายป้อนเรเดียล BZ22 ที่รับไฟมาจากเบย์ที่ 2 ได้ขณะเกิดเหตุฉุกเฉิน หรือหากต้องการดับไฟในสายป้อน BZ14 โดยการสับสวิตช์ใบมีด BZ14BZ22-1H เพื่อให้กระทบกับผู้ใช้ไฟน้อยที่สุด และมีการติดตั้งกับดักฟ้าผ่าชนิดโพลีเมอร์เพื่อป้องกันความเสียหายของสายเคเบิลใต้ดินจากแรงดันเกินเลิฟไว้บนเสาโรเซอร์ด้านที่สวิตช์ใบมีด BZ14-1H ต่อกับสายเคเบิลใต้ดิน ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3 ซึ่งแสดงภาพถ่ายบริเวณเสาโรเซอร์ที่เกิดเหตุการณ์



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายเสาโรเซอร์ที่มีสวิตช์ใบมีด BZ14-1H ติดตั้งอยู่



รูปที่ 4.3 สวิตช์ใบมีด BZ14-1H และกับดักฟ้าผ่า เฟส Y และ B บนเสาโรเซอร์

4.1.2 ขั้นตอนและเหตุการณ์ขณะปฏิบัติงาน

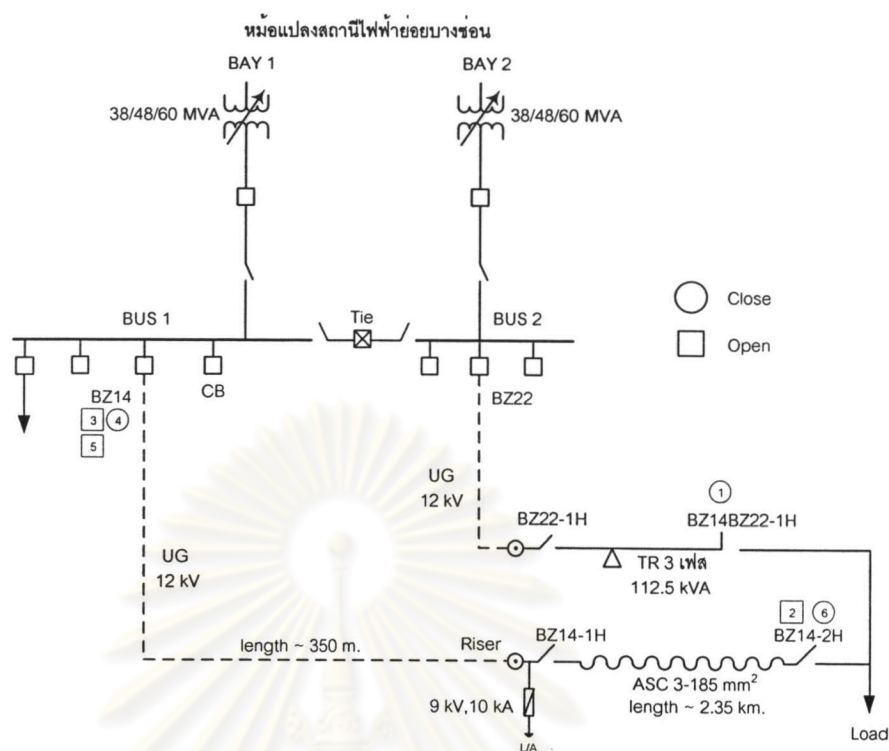
กรณีศึกษานี้กับดักฟ้าผ่าเกิดการระเบิดขึ้นทุกครั้งขณะปฏิบัติงานทั้งหมด 4 ครั้ง โดยมีลำดับขั้นตอน และเหตุการณ์ต่างๆ ขณะปฏิบัติงานดังนี้

การปฏิบัติงานครั้งที่ 1

ผู้ปฏิบัติงานทำการดับไฟบริเวณเสาโรเซอร์ที่มีสวิตช์ใบมีด BZ14-1H ติดตั้งอยู่เพื่อเปลี่ยนกับดักฟ้าผ่าของเดิมที่ชำรุด โดยมีขั้นตอนการปฏิบัติงานและเหตุการณ์ต่างๆ ประกอบลำดับหมายเลขในแผนภาพรูปที่ 4.4 ดังนี้

- 1) ผู้ปฏิบัติงานสับสวิตช์ใบมีด BZ14BZ22-1H ที่ละเฟส เพื่อถ่ายโหลดระหว่างสายป้อน BZ14 และสายป้อน BZ22
- 2) ผู้ปฏิบัติงานปลดสวิตช์ใบมีด BZ14-2H ที่ละเฟส เพื่อให้โหลดหลังสวิตช์ใบมีด BZ14-2H รับไฟจากสายป้อน BZ22 เพียงแหล่งเดียว
- 3) ปลดเซอร์กิตเบรกเกอร์ BZ14 (พร้อมกันทั้ง 3 เฟส) ที่สถานีไฟฟ้าย่อยเพื่อดับไฟบริเวณสายเคเบิลใต้ดินที่เชื่อมต่อกับสวิตช์ใบมีด BZ14-1H ที่เสาโรเซอร์ รวมถึงสายป้อนอากาศระหว่างสวิตช์ใบมีด BZ14-1H และ BZ14-2H จากนั้นจึงทำการเปลี่ยนกับดักฟ้าผ่าทั้ง 3 เฟส
- 4) สับเซอร์กิตเบรกเกอร์ BZ14 เพื่อจ่ายไฟทดสอบสายเคเบิลใต้ดิน
- 5) ปลดเซอร์กิตเบรกเกอร์ BZ14 ออกจากหลังการทดสอบสายเคเบิลใต้ดิน ประมาณ 10 นาที
- 6) ผู้ปฏิบัติงานสับสวิตช์ใบมีดที่เสา BZ14-2H ที่ละเฟส เพื่อรับไฟจากสายป้อน BZ22 มายังสวิตช์ใบมีด BZ14-1H และสายเคเบิลใต้ดิน โดยหลังจากสับสวิตช์ใบมีด BZ14-2H ครบทั้ง 3 เฟส ประมาณ 1 นาที พบว่ากับดักฟ้าผ่าเฟส B ที่เพิ่งติดตั้งบนเสาโรเซอร์ในสายป้อน BZ14 เกิดระเบิดขึ้น และมีการทริปของเซอร์กิตเบรกเกอร์ BZ22 แต่สามารถสับกลับคืนได้ภายหลัง

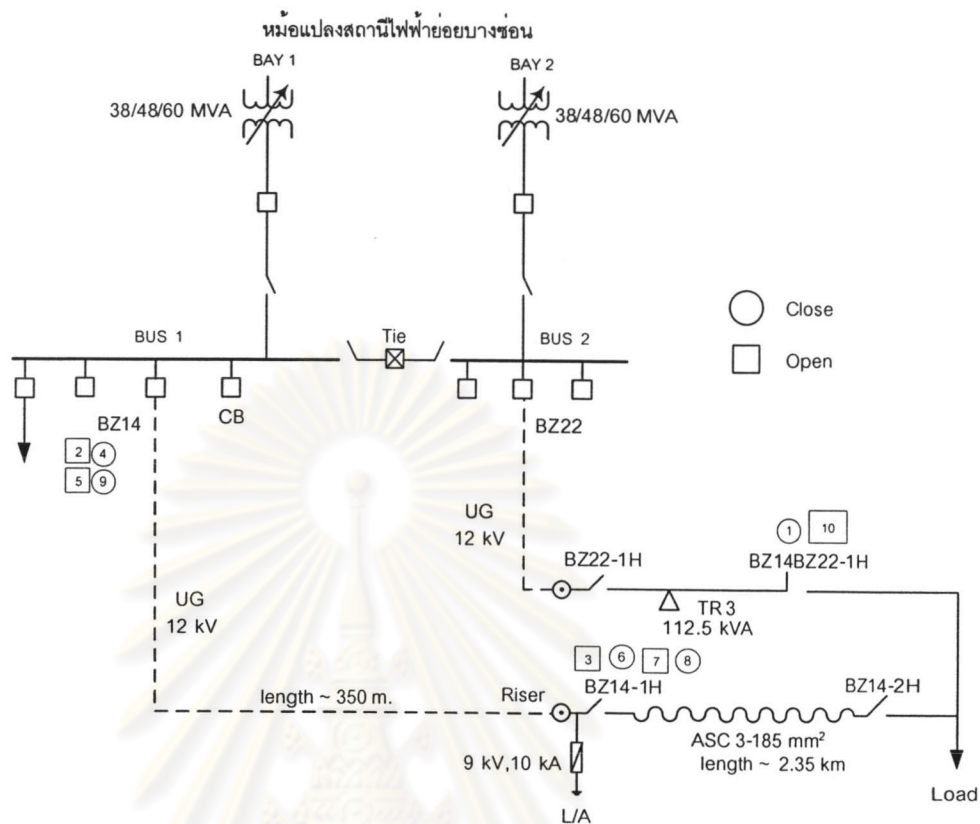
หลังจากกับดักฟ้าผ่าระเบิด จึงทำการปลดสวิตช์ใบมีด BZ14-2H และตัดสายไฟของกับดักฟ้าผ่าออกทั้ง 3 เฟส เพื่อปลดกับดักฟ้าผ่าจากออกระบบ จากนั้นจึงทำการจ่ายไฟเข้าระบบตามขั้นตอนปกติ



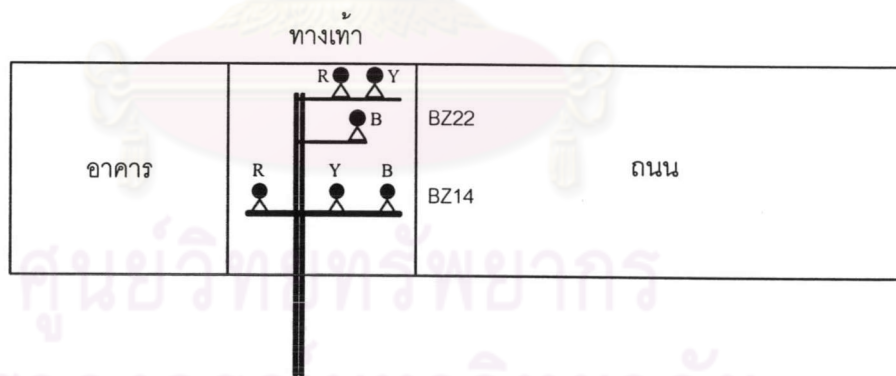
รูปที่ 4.4 แผนภาพเส้นเดียวแสดงลำดับขั้นตอนการปฏิบัติงานในครั้งที่ 1

การปฏิบัติงานครั้งที่ 2 และ 3

ผู้ปฏิบัติงานได้เปลี่ยนกับดักฟ้าผ่าที่ชำรุดอีกเป็นครั้งที่ 2 และ 3 แต่มีการเปลี่ยนแปลงการปฏิบัติงานจากเดิมในขั้นตอนการดับไฟโดยทำการปลดเซอร์กิตเบรกเกอร์ BZ14 และสวิตช์ใบมีด BZ14-1H แทน ตามแผนภาพประกอบในรูปที่ 4.5 ซึ่งทำให้ยังมีการจ่ายไฟจากสายป้อน BZ22 ผ่านสวิตช์ใบมีด BZ14-2H มาถึงด้านหนึ่งของสวิตช์ใบมีด BZ14-1H ที่เสาโรเซอร์ จากนั้นจึงทำการเปลี่ยนกับดักฟ้าผ่าจนครบทั้ง 3 เฟสแล้วจึงสับเซอร์กิตเบรกเกอร์ BZ14 เพื่อทดสอบสายเคเบิลได้ดินเป็นเวลาประมาณ 10 นาที แล้วปลดออก และเข้าสู่ขั้นตอนการจ่ายไฟกลับคืน โดยเริ่มจากสับสวิตช์ใบมีด BZ14-1H เฟส Y, B และ R ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งพบว่าหลังจากสับเข้าจนครบทั้ง 3 เฟสแล้วประมาณ 1 นาที กับดักฟ้าผ่าเฟส B บนเสาโรเซอร์ก็เกิดระเบิดขึ้นอีกครั้ง ผู้ปฏิบัติงานจึงปลดสวิตช์ใบมีด BZ14-1H ออกที่ละเฟสจนครบทั้ง 3 เฟส แล้วตัดสายไฟของกับดักฟ้าผ่าออกเพื่อจ่ายไฟเข้าสู่ระบบตามปกติ



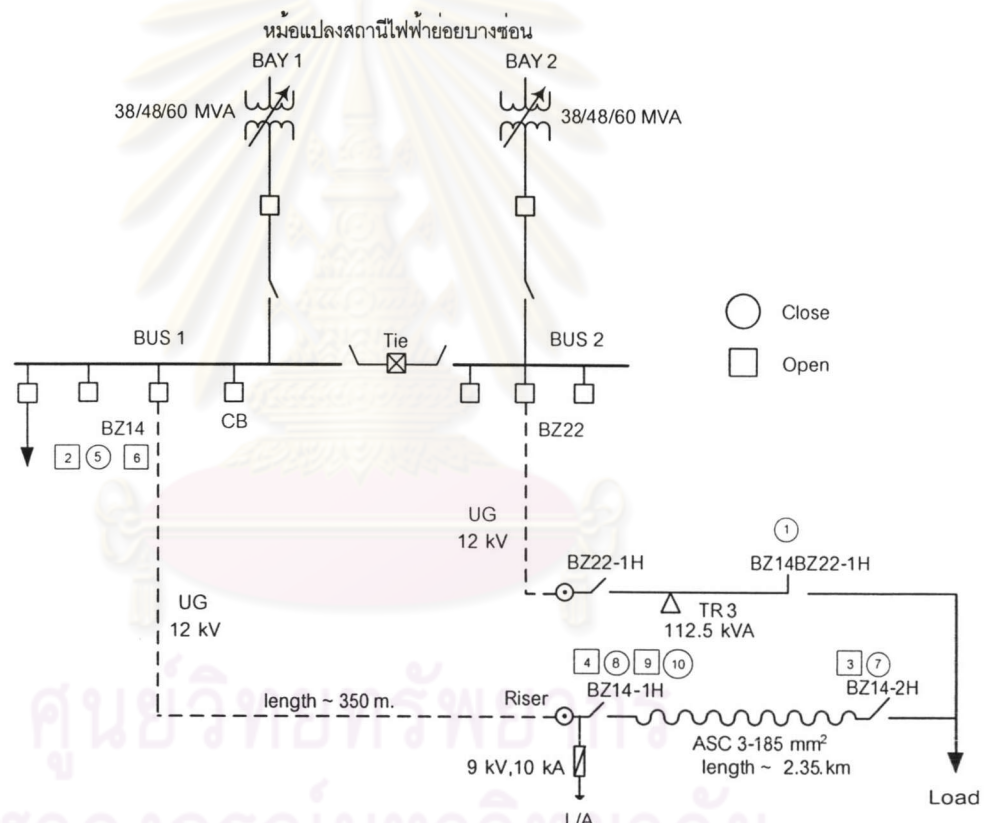
รูปที่ 4.5 แผนภาพเส้นเดียวแสดงลำดับขั้นตอนการปฏิบัติงานในครั้งที่ 2 และ 3



รูปที่ 4.6 ตำแหน่งเฟสของวงจรสายป้อน

การปฏิบัติงานครั้งที่ 4

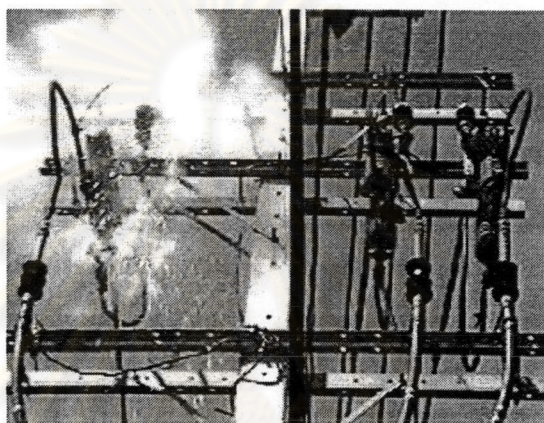
ผู้ปฏิบัติงานทำการเปลี่ยนกับดักฟ้าผ่าที่ชำรุดอีกครั้ง เป็นครั้งที่ 4 โดยมีขั้นตอนการปฏิบัติงานคล้ายกับครั้งที่ 1 แต่มีการปลดสวิตช์ไบเมต BZ14-1H ออกด้วยขณะดับไฟ ตามแผนภาพประกอบในรูปที่ 4.7 ซึ่งพบว่ายังคงเกิดปัญหาในลักษณะเดิมคือ หลังจากสับเซอร์กิตเบรกเกอร์ BZ14 เพื่อทดสอบสายเคเบิลใต้ดิน ประมาณ 10 นาที แล้วปลดออก จากนั้นก็สับสวิตช์ไบเมต BZ14-2H เข้าทั้ง 3 เฟส แล้วจึงสับสวิตช์ไบเมต BZ14-1H เฟส Y, B และ R ตามลำดับ หลังจากสับครบทั้ง 3 เฟส ประมาณ 20 วินาที ก็กับดักฟ้าผ่าเฟส R ได้เกิดระเบิดขึ้น



รูปที่ 4.7 แผนภาพเส้นเดียวแสดงลำดับขั้นตอนการปฏิบัติงานในครั้งที่ 4

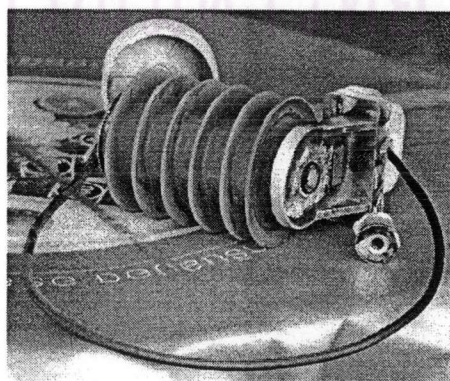
4.1.3 ความเสียหายของกั๊บดักฟ้าผ่า

ผลจากการปฏิบัติงานทั้ง 4 ครั้งพบว่า ภายหลังจากเปลี่ยนกั๊บดักฟ้าผ่าเสร็จเรียบร้อยแล้ว ขณะทำการสับสวิตช์ใบมีด BZ14-2H หรือ BZ14-1H ทีละเฟส เพื่อเตรียมจ่ายไฟให้กับ สายบ่อน BZ14 ตามปกติ หลังจากสับสวิตช์ใบมีดเฟสสุดท้ายเป็นเวลาไม่ถึง 1 นาที ปรากฏว่ากั๊บดักฟ้าผ่าชนิดโพลีเมอร์ที่ติดตั้งบนเสาไรเซอร์ในเฟสที่สับสวิตช์ใบมีดเข้าเป็น เฟสสุดท้ายเกิดระเบิดขึ้น รูปที่ 4.8 แสดงภาพตัวอย่างที่บันทึกได้ขณะที่กั๊บดักฟ้าผ่าเฟส R ระเบิดขณะปฏิบัติงานในครั้งที่ 4



รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายขณะกั๊บดักฟ้าผ่าเฟส R ระเบิดในการปฏิบัติงานครั้งที่ 4

ความเสียหายของกั๊บดักฟ้าผ่ามีลักษณะของการระเบิดด้วยความร้อนสูงจาก ภายใน แรงระเบิดทำให้ส่วนฝาครอบด้านบนและขั้วต่อสายลงดินของกั๊บดักฟ้าผ่ากระเด็น หลุดออกมา และส่วนโลหะตัวนำบางส่วนบริเวณขั้วต่อสายของกั๊บดักฟ้าผ่ามีร่องรอยการ หลอมจากความร้อนสูงทำให้มีคราบเขม่าจากการเผาไหม้เป็นจำนวนมาก ในบางครั้ง ความรุนแรงจากการระเบิดยังทำให้เปลือกโพลีเมอร์ฉีกแตกออกด้วย สำหรับรูปที่ 4.9 แสดงภาพถ่ายของกั๊บดักฟ้าผ่าที่ได้รับความเสียหายในการปฏิบัติงานครั้งที่ 4



รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายกั๊บดักฟ้าผ่าเฟส R ที่เกิดระเบิดในการปฏิบัติงานครั้งที่ 4

4.2 การทดสอบภาคสนาม

กรณีศึกษานี้ได้รับความอนุเคราะห์จากการไฟฟ้านครหลวง ในการใช้สถานที่และอำนวยความสะดวกขณะทำการทดสอบภาคสนาม โดยทำการติดตั้งเครื่องมือวัดรูปคลื่นแรงดันที่จุดติดตั้งกับดักฟ้าผ่าทั้ง 3 เฟส บนเสาโรเตอร์ เพื่อตรวจวัดแรงดันเกินที่อาจเกิดขึ้นขณะทำการสับ-ปลดสวิตช์ไบเมิดในลักษณะการปฏิบัติงานจริง

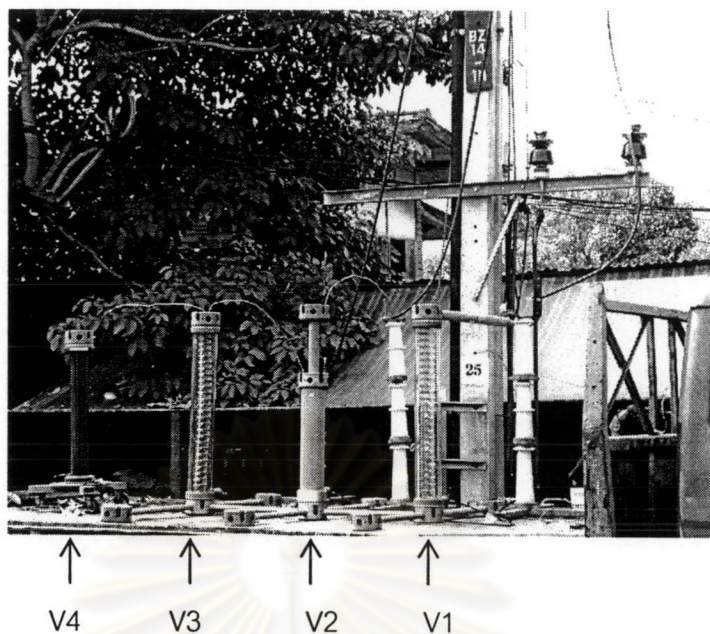
4.2.1 การวัดรูปคลื่นแรงดัน

เนื่องจากรูปคลื่นแรงดันเกินขณะสับ-ปลดสวิตช์อาจมีขนาด และความถี่สูงจากเรโซแนนซ์ปนอยู่ด้วยจึงไม่สามารถใช้ออสซิลโลสโคปวัดรูปคลื่นได้โดยตรง หรือใช้การลดทอนขนาดแรงดันด้วยหม้อแปลงแรงดัน (voltage transformer) ที่มีผลตอบสนองได้ดีในช่วงความถี่ต่ำเท่านั้น ดังนั้นจึงเลือกใช้อุปกรณ์แบ่งแรงดันชนิดตัวเก็บประจุ (capacitor voltage divider) ซึ่งมีความสามารถในการวัดรูปคลื่นความถี่สูง จำนวน 3 ชุด ติดตั้งบริเวณเสาโรเตอร์ เพื่อวัดแรงดันที่จุดติดตั้งกับดักฟ้าผ่าพร้อมกันทั้งสามเฟส และใช้อุปกรณ์แบ่งแรงดันชนิดตัวต้านทานอีก 1 ชุด วัดแรงดันกระแสตรงที่อาจตกค้างในสายเคเบิลใต้ดิน โดยอุปกรณ์แบ่งแรงดันทั้ง 4 ชุดมีอัตราส่วนการลดทอนแรงดัน (ratio) ตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 อัตราการลดทอนแรงดันของอุปกรณ์แบ่งแรงดันทั้ง 4 ชุด

voltage divider	phase	ratio
v1 (C-divider)	Y	4,491.5 : 1
v2 (C-divider)	R	6,558.5 : 1
v3 (C-divider)	B	6,253.0 : 1
v4 (R-divider)	B	1,190.0 : 1

เนื่องจากในบริเวณที่ปฏิบัติงานมีเนื้อที่จำกัดจึงติดตั้งอุปกรณ์แบ่งแรงดัน (voltage divider) ไว้บนท้ายของรถบรรทุก ดังแสดงในรูปที่ 4.10 สำหรับรูปที่ 4.11 แสดงการต่อสายแรงสูงเข้าอุปกรณ์แบ่งแรงดัน เพื่อความปลอดภัยในการทดสอบจึงมีการติดตั้งอาร์มและลูกถ้วยเพิ่มเติม เพื่อรองรับสายแรงสูงที่ต่อเข้าอุปกรณ์แบ่งแรงดัน โดยต่อสายมาจากขั้วต่อสายของสวิตช์ไบเมิด BZ14-1H ด้านสายเคเบิลใต้ดินซึ่งเป็นจุดเดียวกับที่ใช้ติดตั้งกับดักฟ้าผ่าด้วย



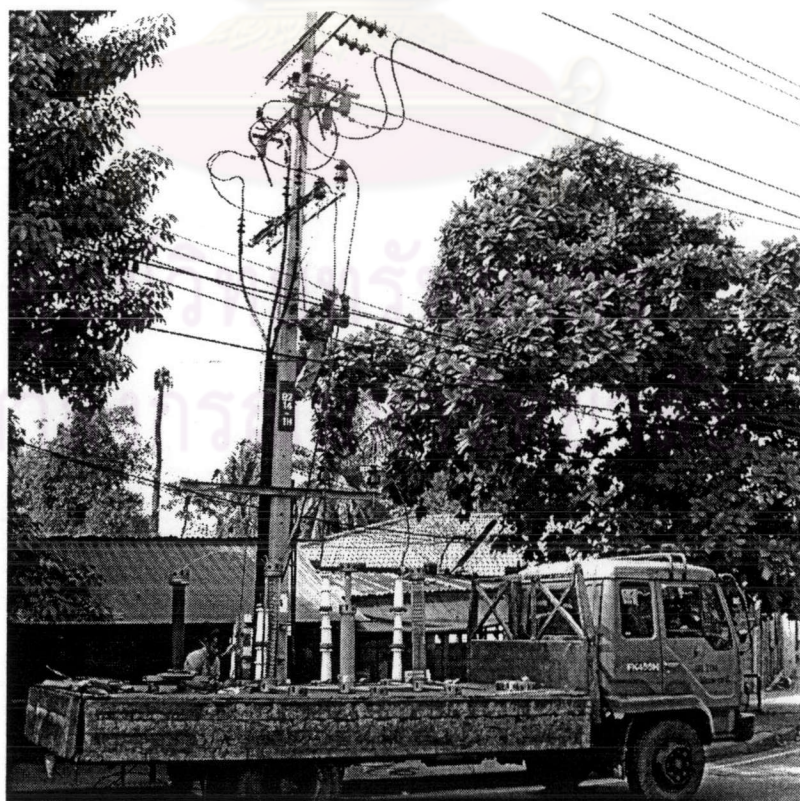
รูปที่ 4.10 อุปกรณ์แบ่งแรงดัน (voltage divider) ทั้ง 4 ตัวถูกนำมาติดตั้งบนรถบรรทุก

เมื่อ V1 คืออุปกรณ์แบ่งแรงดันที่ตรวจวัดแรงดันเฟส R

V2 คืออุปกรณ์แบ่งแรงดันที่ตรวจวัดแรงดันเฟส Y

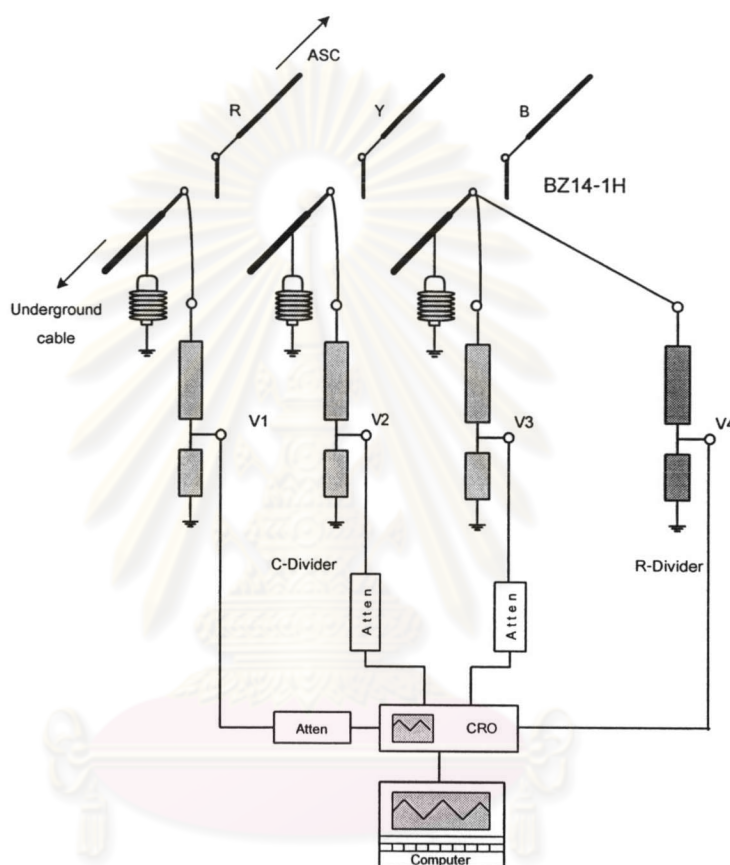
V3 คืออุปกรณ์แบ่งแรงดันที่ตรวจวัดแรงดันเฟส B

V4 คืออุปกรณ์แบ่งแรงดันที่ตรวจวัดแรงดันกระแสตรงในเฟส B

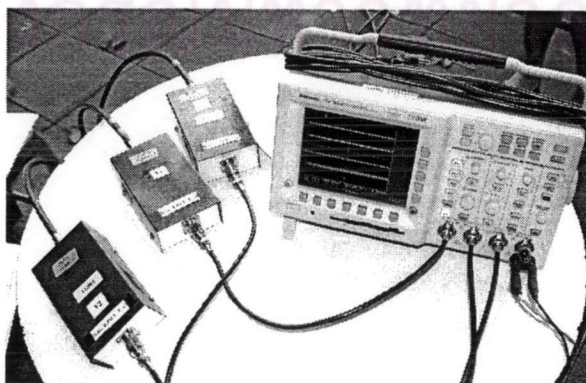


รูปที่ 4.11 การต่อสายแรงสูงเข้าอุปกรณ์แบ่งแรงดัน

สำหรับส่วนการแสดงผลและจัดเก็บข้อมูลรูปคลื่นนั้นจะให้ฮอสซิลโลสโคปเป็นอุปกรณ์ในการแสดงผลรูปคลื่นของแรงดันในเฟสต่างๆ ที่ถูกลดทอนจากชุดอุปกรณ์แบ่งแรงดัน และส่งสัญญาณผ่านตัวลดทอนมายังฮอสซิลโลสโคปซึ่งสามารถเชื่อมต่อไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อจัดเก็บรูปคลื่นแรงดัน ในรูปที่ 4.12 แสดงวงจรการตรวจวัดรูปคลื่นแรงดันในเฟสต่างๆ และรูปที่ 4.13 แสดงดิจิทัลออสซิลโลสโคปและชุดตัวลดทอนสัญญาณที่ใช้



รูปที่ 4.12 วงจรการตรวจวัดรูปคลื่นแรงดันในเฟสต่างๆ



รูปที่ 4.13 ดิจิตอลออสซิลโลสโคปที่ใช้วัดและบันทึกที่รูปคลื่นแรงดัน

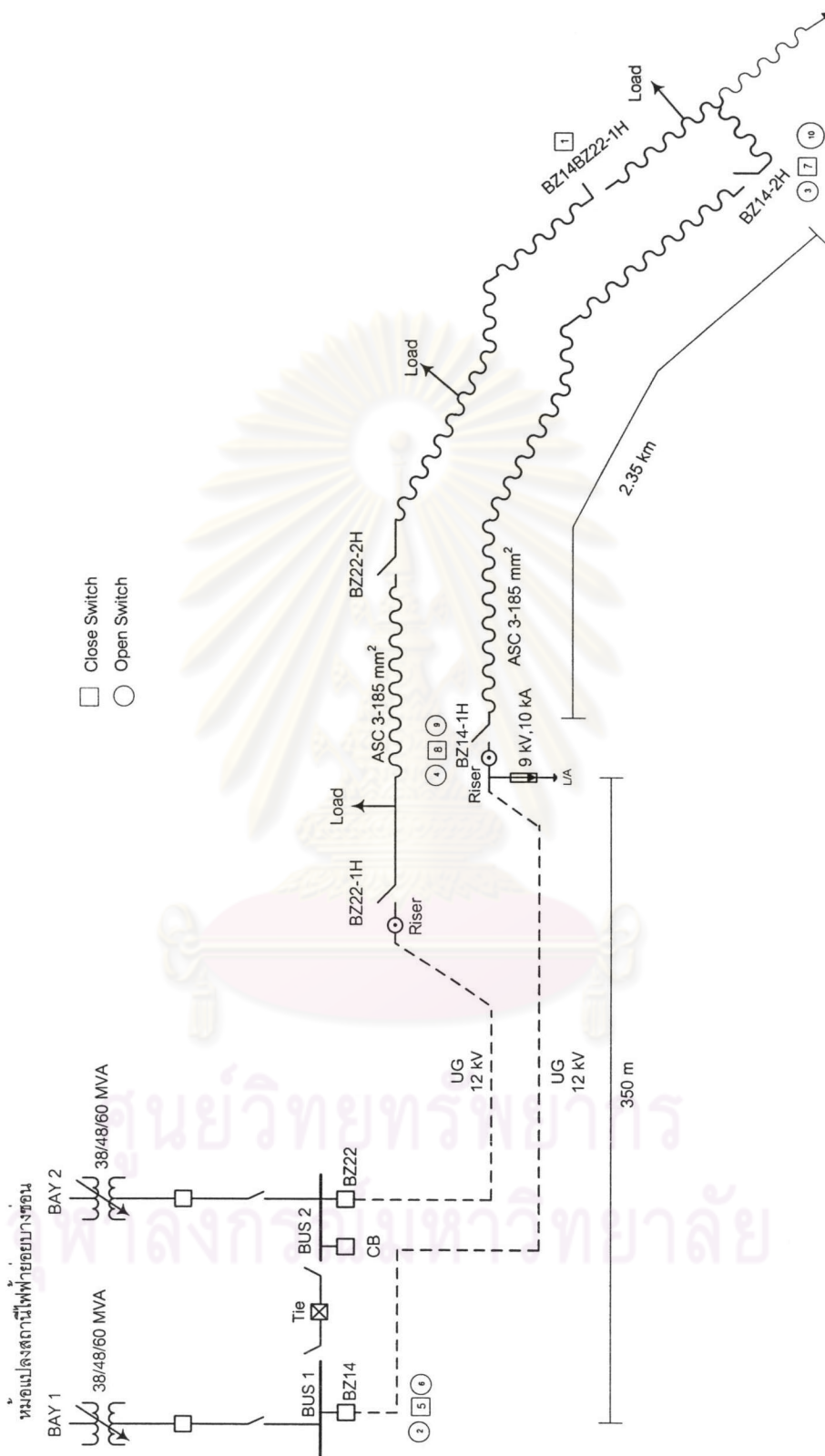
4.2.2 ลำดับขั้นตอนในการปฏิบัติงานทดสอบภาคสนาม

ในเบื้องต้นต้องการรูปลักษณ์แรงดันที่จุดติดตั้งกับดักฟ้าผ่าเมื่อทำการสับ-ปลดสวิตช์ในลักษณะเช่นเดียวกับการปฏิบัติงานในครั้งที่ 4 แต่ไม่มีการติดตั้งกับดักฟ้าผ่าเพื่อบันทึกรูปลักษณ์แรงดันเกินจากปรากฏการณ์ที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างสับ-ปลดสวิตช์ จากนั้นค่อยติดตั้งกับดักฟ้าผ่าบันทึกผลรูปลักษณ์แรงดันในกรณีติดตั้งกับดักฟ้าผ่า โดยมีสมมุติฐานเบื้องต้นว่าแรงดันเกินอาจเกิดขึ้นขณะสับสวิตช์ใบมีด BZ14-1H เพื่อจ่ายไฟให้กับสายเคเบิลใต้ดิน (line energization) และขนาดของแรงดันเกินอาจมีค่าสูงขึ้นกรณีมีแรงดันคงค้าง (trapped charge) ในสายหลังจากขั้นตอนสับ-ปลดเซอร์กิตเบรกเกอร์ จ่ายไฟทดสอบสายเคเบิลใต้ดิน ทำให้การทดสอบกรณีติดตั้งกับดักฟ้าผ่าจึงตัดขั้นตอนการจ่ายไฟทดสอบสายเคเบิลใต้ดินออกเพื่อลดผลความรุนแรงที่อาจเกิดขึ้น ดังนั้นสามารถสรุปขั้นตอนการปฏิบัติงานทดสอบภาคสนามทั้งสองกรณีได้ดังนี้

4.2.2-1 ลำดับขั้นตอนการสับ-ปลดสวิตช์ กรณีไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า ตามตารางที่ 4.2 ประกอบแผนภาพในรูปที่ 4.14

ตารางที่ 4.2 ลำดับขั้นตอนการสับ-ปลดสวิตช์ กรณีไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า

ลำดับที่	การปฏิบัติงาน	หมายเลขของสวิตช์	วัตถุประสงค์
1	สับ	BZ14BZ22-1H	ถ่ายโอนโหลดจากสายป้อน BZ14 ให้กับ สายป้อน BZ22
2	ปลด	BZ14 (C.B.)	ตัดไฟที่จ่ายให้กับสายป้อน BZ14 จากสถานีไฟฟ้าย่อยบางซวน
3	ปลด	BZ14-2H	ตัดไฟสายป้อน BZ14
4	ปลด	BZ14-1H	ตัดวงจรสายเคเบิลใต้ดินของสายป้อน BZ14 ออกจากสายอากาศ
-	ติดตั้งเครื่องมือวัด	เสาริเซอร์ (BZ14-1H)	ติดตั้งเครื่องมือวัดต่างๆ
5	สับ	BZ14 (C.B.)	ทดสอบสายเคเบิลใต้ดินเป็นเวลาประมาณ 10 นาที
6	ปลด	BZ14 (C.B.)	ตัดไฟออกจากสายเคเบิลใต้ดินภายหลังการทดสอบสาย
7	สับ	BZ14-2H	จ่ายไฟให้สายป้อน BZ14 จากสายป้อน BZ22
8	สับ	BZ14-1H	จ่ายไฟให้สายเคเบิลใต้ดินของสายป้อน BZ14 จากสายอากาศ
9	ปลด	BZ14-1H	ตัดวงจรสายเคเบิลใต้ดินของสายป้อน BZ14 ออกจากสายอากาศ
10	ปลด	BZ14-2H	ตัดไฟสายป้อน BZ14



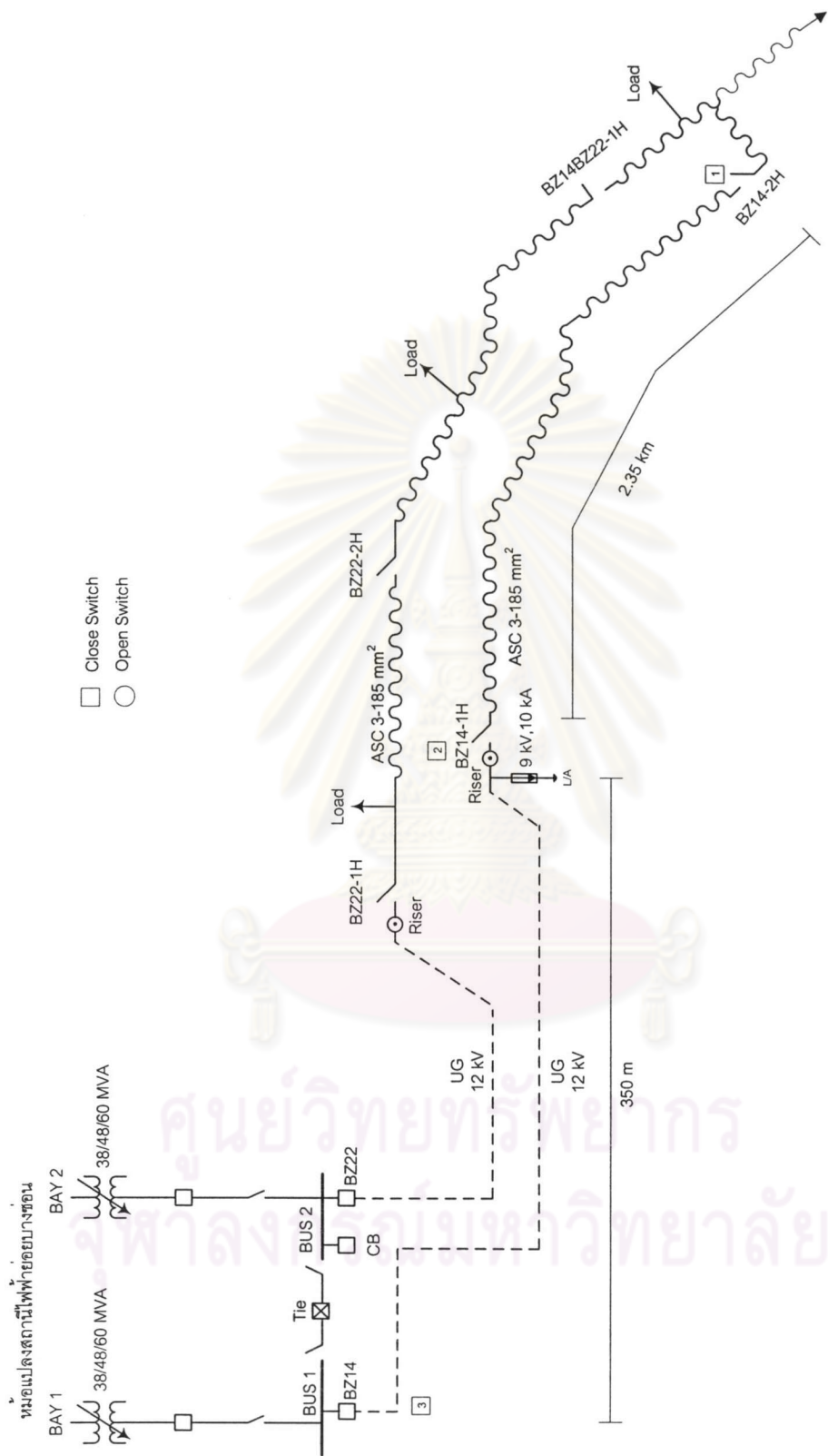
รูปที่ 4.14 แสดงแผนภาพและลำดับขั้นตอนในการสับ-ปลดสวิตช์
กรณีไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า

4.2.2-2 ลำดับขั้นตอนการสับ-ปลดสวิตช์ กรณีติดตั้งกับดักฟ้าผ่า ตามตารางที่
4.3 ประกอบแผนภาพในรูปที่ 4.15

ตารางที่ 4.3 ลำดับขั้นตอนการสับ-ปลดสวิตช์ กรณีติดตั้งกับดักฟ้าผ่า

ลำดับที่	การปฏิบัติงาน	หมายเลขของสวิตช์	วัตถุประสงค์
-	ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า	เสาไรเซอร์ (BZ14-1H)	(ปฏิบัติงานต่อเนื่องจากกรณีติดตั้งกับดักฟ้าผ่า)
1	สับ	BZ14-2H	จ่ายไฟให้สายบ่อน BZ14 จากสายบ่อน BZ22
2	สับ	BZ14-1H	จ่ายไฟให้สายเคเบิลใต้ดินของสายบ่อน BZ14 จากสายอากาศ
3	สับ	BZ14 (CB)	จ่ายไฟจากสถานีไฟฟ้าย่อยบางซอนให้กับ สายบ่อน BZ14 (กรณีกับดักฟ้าผ่าไม่เกิดการระเบิดขึ้น)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



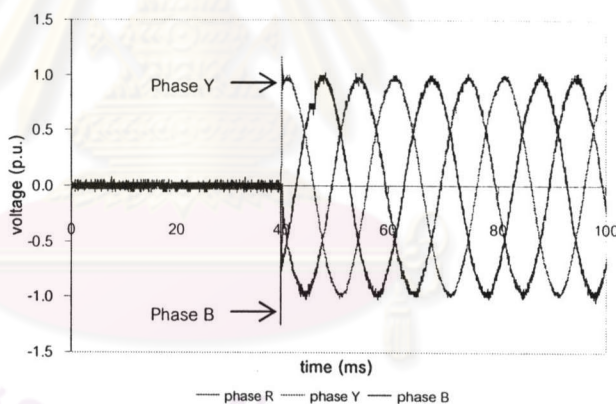
รูปที่ 4.15 แสดงแผนภาพและลำดับขั้นตอนในการสับ-ปลดสวิตช์
กรณีติดตั้งกับดักฟ้าผ่า

4.2.3 ผลการวัดรูปคลื่นแรงดัน

4.2.3-1 กรณีไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า

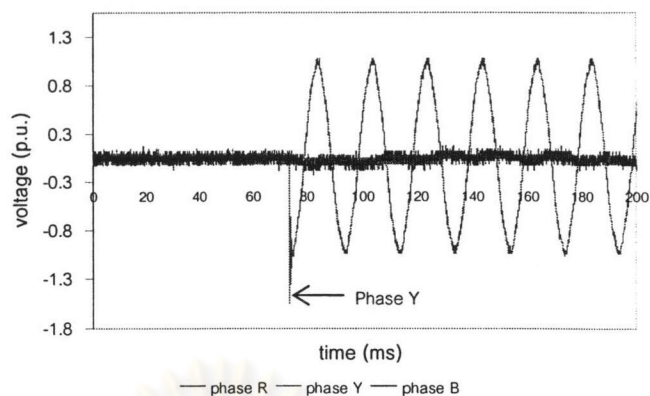
ทำการตรวจวัดและบันทึกรูปคลื่นของแรงดันในสองเหตุการณ์ซึ่งคาดว่าจะเกิดแรงดันเกินขึ้นคือ ขณะการสับ-ปลดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ BZ14 จ่ายไฟให้กับสายเคเบิลใต้ดินเพื่อทำการทดสอบสายในขั้นตอนการปฏิบัติงานที่ 5, 6 และขณะทำการสับ-ปลดสวิตช์ไบเม็ต BZ14-1H (ทีละเฟส) ในขั้นตอนการปฏิบัติงานที่ 8, 9 ซึ่งให้ผลการวัดรูปคลื่นแรงดันเรียงตามลำดับดังต่อไปนี้

- รูปคลื่นของแรงดันที่จุดติดตั้งกับดักฟ้าผ่าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์ BZ14 ในขั้นตอนที่ 5 แสดงในรูปที่ 4.16 ซึ่งเป็นการสับที่มุมประมาณ 64.8° ของเฟส Y พบว่ามีแรงดันเกินสวิตช์ซึ่งในเฟส Y และ B เกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาสั้นๆ เท่านั้น โดยมีขนาดแรงดันสูงสุดประมาณ 1.165 p.u. และ 1.25 p.u. ตามลำดับ

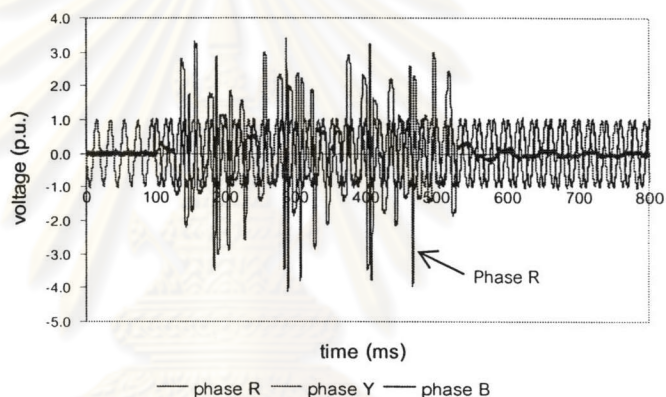


รูปที่ 4.16 รูปคลื่นแรงดันที่จุดติดตั้งกับดักฟ้าผ่าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์ BZ14

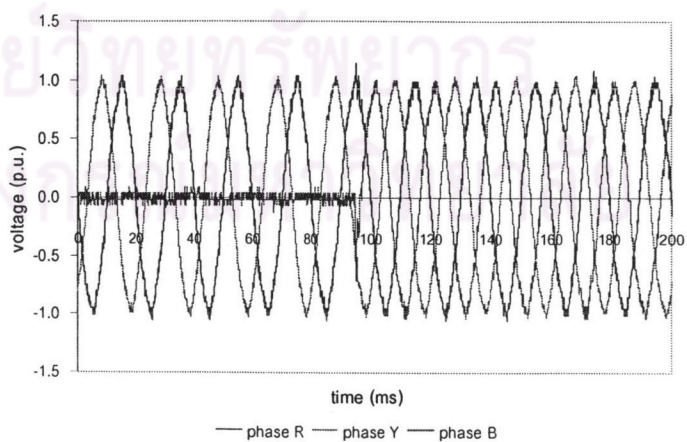
- รูปคลื่นแรงดันที่จุดติดตั้งกับดักฟ้าผ่าขณะปลดเซอร์กิตเบรกเกอร์ในขั้นตอนที่ 6 ไม่สามารถบันทึกได้ เนื่องจากไม่มีแรงดันเกินเกิดขึ้น จึงไม่มีการทริกให้ออสซิลโลสโคปจับสัญญาณ แต่จากการทดลองพบว่าหลังจากปลดเซอร์กิตเบรกเกอร์ออกแรงดันที่ค้างค้างภายในสายเคเบิลใต้ดินลดลงเป็นศูนย์อย่างรวดเร็ว
- รูปคลื่นแรงดันที่จุดติดตั้งกับดักฟ้าผ่าขณะสับสวิตช์ไบเม็ต BZ14-1H ในขั้นตอนที่ 8 แสดงในรูปที่ 4.17, 4.18 และ 4.19 เรียงตามลำดับเฟสที่สับ คือ Y, B และ R



รูปที่ 4.17 รูปคลื่นแรงดันที่จุดติดตั้งกับดักฟ้าผ่า
ขณะสับสวิตช์ใบมีด BZ14-1H เฟส Y



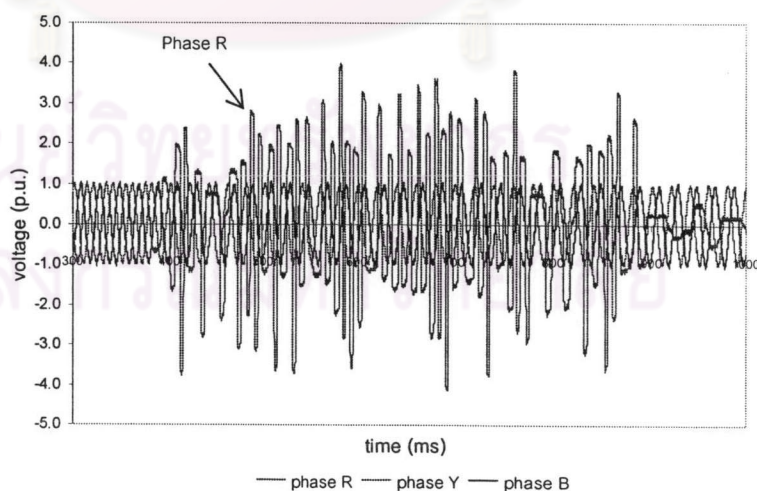
รูปที่ 4.18 รูปคลื่นแรงดันที่จุดติดตั้งกับดักฟ้าผ่า
ขณะสับสวิตช์ใบมีด BZ14-1H เฟส B



รูปที่ 4.19 รูปคลื่นแรงดันที่จุดติดตั้งกับดักฟ้าผ่า
ขณะสับสวิตช์ใบมีด BZ14-1H เฟส R

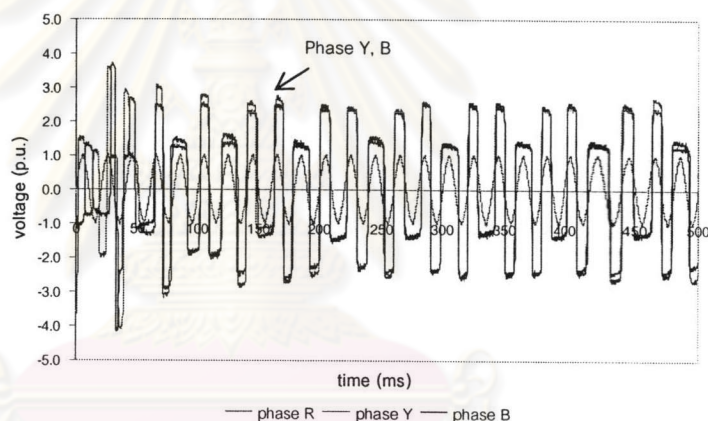
จากรูปที่ 4.17 ขณะสับสวิตช์โหม่งเฟส Y ที่มีมุมประมาณ 255.6° พบว่าเกิดแรงดันเกินสวิตช์ซึ่งในเฟส Y ช่วงสั้นๆ โดยมีขนาดสูงสุดประมาณ 1.50 p.u. ในรูปที่ 4.18 แสดงรูปคลื่นแรงดันขณะสับสวิตช์โหม่งเฟส B ที่มีมุมประมาณ 27° พบว่าหลังจากสับเฟส B ประมาณ 1 ไมโครวินาที เกิดแรงดันเกินชั่วคราว (temporary overvoltage) ขึ้นที่เฟส R เป็นระยะเวลาประมาณ 400 ms แล้วหายไป แรงดันเกินที่เกิดขึ้นมีขนาดสูงมาก โดยมีขนาดสูงสุดถึง 4.14 p.u. และมีลักษณะของรูปคลื่นไม่เป็นฟังก์ชันคาบเวลาและยังผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์มาก สำหรับรูปที่ 4.19 แสดงรูปคลื่นแรงดันขณะสับสวิตช์โหม่งเฟส R ซึ่งเป็นเฟสสุดท้าย ผลปรากฏว่าไม่พบแรงดันเกินชั่วคราวเกิดขึ้น

- 4) ภายหลังจากสับสวิตช์โหม่ง BZ14-1H ครบทั้งสามเฟส จึงทำการทดสอบโดยปลดสวิตช์โหม่งเฟส R, B และ Y ออกทีละเฟสตามลำดับ โดยทำการบันทึกรูปคลื่นแรงดันที่จุดติดตั้งกับดักฟ้าผ่าขณะทำการปลดสวิตช์โหม่งแต่ละเฟส พบว่าทันทีที่ปลดสวิตช์โหม่งเฟส R ที่มีมุมประมาณ 225° เกิดแรงดันเกินชั่วคราวขึ้นที่เฟส R มีขนาดสูงสุดถึง 4.14 p.u. ซึ่งใกล้เคียงกับกรณีสับสวิตช์โหม่งเฟส B แต่ในกรณีนี้เกิดขึ้นนานประมาณ 500 ms แล้วก็หายไป ซึ่งลักษณะของรูปคลื่นแรงดันเกินก็ไม่เป็นฟังก์ชันคาบเวลาและผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์มากเช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 รูปคลื่นแรงดันที่จุดติดตั้งกับดักฟ้าผ่า
ขณะปลดสวิตช์โหม่ง BZ14-1H เฟส R

หลังจากนั้นจึงปลดสวิตช์ไบมีดเฟส B ออก ก็พบว่าเกิดแรงดันเกินชั่วคราวขึ้นในเฟส R และ B ที่สวิตช์เปิดออก ดังแสดงในรูปที่ 4.21 โดยมีลักษณะของรูปคลื่นแตกต่างกันในช่วง 3-4 ไมโครวินาที หลังจากนั้นจะมีรูปคลื่นที่คล้ายคลึงกัน จากการพิจารณาจึงพบว่ารูปคลื่นมีลักษณะเป็นฟังก์ชันคาบเวลาแต่มีความถี่เป็น $1/3$ ของความถี่มูลฐาน 50 Hz (3^{rd} Sub-harmonic) มีขนาดแรงดันเกินสูงสุดในช่วงแรกประมาณ 4.09 p.u. และ 4.17 p.u. ในเฟส R และเฟส B ตามลำดับ และลดลงในช่วงสภาวะคงตัวซึ่งมีขนาดแรงดันเกินสูงสุดประมาณ 2.69 p.u. ใกล้เคียงกันทั้งสองเฟส โดยแรงดันเกินนี้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งปลดสวิตช์ไบมีดเฟส Y ออกในเฟสสุดท้ายจนครบทั้งสามเฟส ก็จะไม่ปรากฏแรงดันเกินและแรงดันคงค้างในสายเคเบิลใต้ดิน



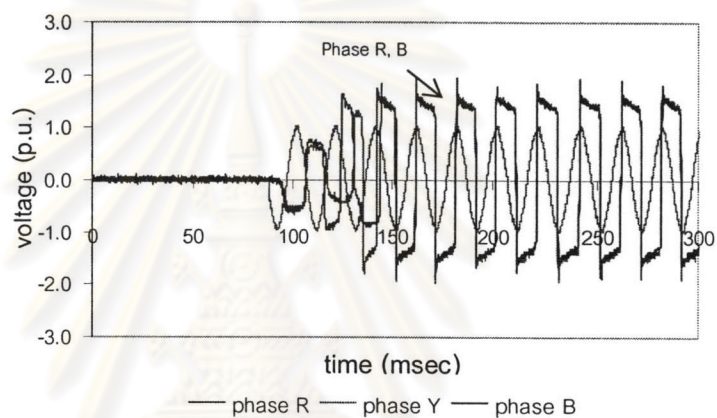
รูปที่ 4.21 รูปคลื่นแรงดันที่จุดติดตั้งกับดักฟ้าผ่า

ขณะปลดสวิตช์ไบมีด BZ14-1H เฟส B

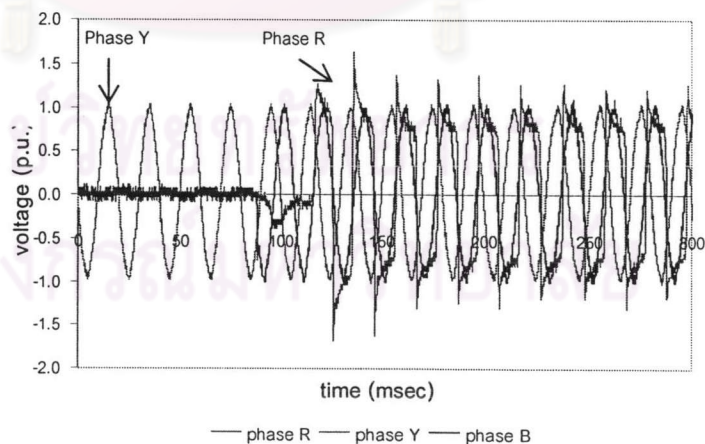
4.2.3-2 กรณีติดตั้งกับดักฟ้าผ่า

เนื่องจากกรณีนี้ได้ตัดขั้นตอนของการสับ-ปลดเซอร์กิตเบรกเกอร์ BZ14 เพื่อทดสอบสายออกไป จึงสามารถวัดรูปคลื่นแรงดันได้เฉพาะในขั้นตอนของการสับสวิตช์ไบมีด BZ14-1H เท่านั้น (ขั้นตอนที่ 2) ซึ่งมีผลการวัดรูปคลื่นแรงดันดังนี้

- 1) หลังการสับสวิตช์ไบมิต BZ14-2H ครบทุกเฟส (ขั้นตอนที่ 1) จึงทำการสับสวิตช์ไบมิต BZ14-1H เฟส Y, B และ R เข้าที่ละเฟส ตามลำดับ ในรูปที่ 4.22 แสดงรูปคลื่นแรงดันตกคร่อมกับดักฟ้าผ่าขณะสับสวิตช์ไบมิตเฟส Y ที่มุมประมาณ 192.6° พบว่าแรงดันที่เฟส Y มีขนาดเท่ากับแรงดันของระบบปกติ แต่หลังจากสับประมาณ 1 ไมโครวินาที เกิดแรงดันเกินขึ้นที่เฟส R และ B มีลักษณะเป็นรูปคลื่นตัด โดยคาดว่าเกิดจากการทำงานของกับดักฟ้าผ่าซึ่งจำกัดขนาดของแรงดันเกินไว้ที่ประมาณ 1.50 p.u. และสามารถเกิดได้อย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน

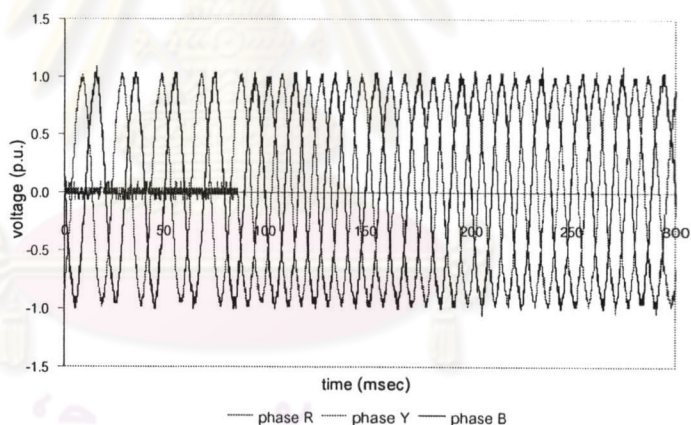


รูปที่ 4.22 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมกับดักฟ้าผ่า
ขณะสับสวิตช์ไบมิต BZ14-1H เฟส Y



รูปที่ 4.23 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมกับดักฟ้าผ่า
ขณะสับสวิตช์ไบมิต BZ14-1H เฟส B

- 2) รูปที่ 4.23 แสดงรูปคลื่นแรงดันตกคร่อมกับดักฟ้าผ่าขณะสับสวิตช์โบริมิตเฟส B จากรูปไม่พบแรงดันเกินในเฟส R และ B ที่เกิดขึ้นก่อนหน้านี้ (ดูรูปที่ 4.22) แสดงว่าแรงดันเกินเกิดขึ้นชั่วคราวแล้วหายไป แต่หลังจากสับสวิตช์โบริมิตเฟส B เข้าพบว่าเกิดแรงดันเกินขึ้นที่เฟส R อีกครั้ง และยังคงมีลักษณะเป็นรูปคลื่นตัด ซึ่งคาดว่าเกิดเนื่องจากการทำงานของกับดักฟ้าผ่าเฟส R โดยคงขนาดแรงดันไว้ที่ประมาณ 1.0 p.u.
- 3) สวิตช์โบริมิตเฟส R ถูกสับเข้าเป็นลำดับสุดท้ายดังแสดงในรูปที่ 4.24 ซึ่งพบว่าการสับสวิตช์แรงดันเกินเฟส R แรงดันเกินที่เกิดขึ้นก่อนหน้านี้ได้หายไปเช่นกัน (ดูรูปที่ 4.23) และขณะสับก็ไม่พบแรงดันเกินเกิดขึ้น แม้แต่แรงดันเกินสวิตช์ซึ่งเนื่องจากสับที่มุมประมาณ 180° ซึ่งแรงดันเฟส R มีขนาดใกล้เคียงศูนย์ แต่หลังจากสับสวิตช์โบริมิตเฟส R แล้วประมาณ 10 วินาที กับดักฟ้าผ่าเฟส R ก็เกิดการระเบิดขึ้น



รูปที่ 4.24 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมกับดักฟ้าผ่า

ขณะสับสวิตช์โบริมิต BZ14-1H เฟส R

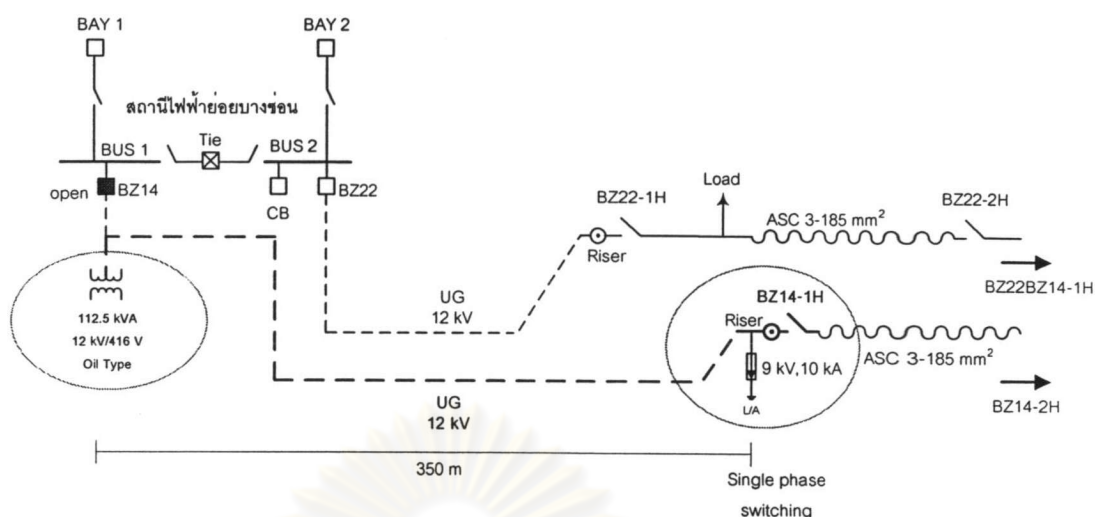
4.2.4 วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบภาคสนาม

จากผลการวัดรูปคลื่นแรงดันในการทดสอบภาคสนามพบว่า ผลจากการสับเซอร์กิตเบรกเกอร์จ่ายไฟให้กับสายเคเบิลใต้ดินทำให้เกิดแรงดันเกินสวิตชิงในช่วงเวลาสั้นๆ เท่านั้น และมีขนาดแรงดันเกินน้อยกว่า 2.0 p.u. ซึ่งไม่เพียงพอที่จะทำให้กับดักฟ้าผ่าทำงานและได้รับความเสียหาย นอกจากนั้นหลังจากปลดเซอร์กิตเบรกเกอร์ก็ไม่พบแรงดันคงค้างในสายเคเบิลใต้ดินอีกด้วย ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าการสับ-ปลดเซอร์กิตเบรกเกอร์เพื่อจ่ายไฟทดสอบสายเคเบิลใต้ดินไม่เกี่ยวข้องกับการระเบิดของกับดักฟ้าผ่า

ในขั้นตอนการสับ-ปลดสวิตช์ใบมีด BZ14-1H ที่ละเฟส อาจทำให้เกิดแรงดันเกินชั่วคราวที่มีขนาดสูง และมีรูปคลื่นผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ความถี่มูลฐาน ซึ่งเป็นลักษณะแรงดันเกินของปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ จากการสอบถามข้อมูลเพิ่มเติมภายหลังพบว่าระบบการจ่ายไฟให้กับสถานีไฟฟ้าย่อยมีการต่อหม้อแปลง station service ที่ต้นทางของสายเคเบิลใต้ดินในสายป้อน BZ14 ดังแสดงในรูปที่ 4.25 และ 4.26 ซึ่งอาจเป็นเหตุทำให้เกิดปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าของสายเคเบิลใต้ดินกับความเหนี่ยวนำไม่เป็นเชิงเส้นของแกนเหล็กหม้อแปลงขณะทำการสับหรือปลดสวิตช์ใบมีด BZ14-1H ในลักษณะไม่พร้อมกันทั้งสามเฟส ในสถานะที่หม้อแปลงไม่มีโหลดหรือน้อย จึงทำให้เกิดแรงดันเกินดังกล่าว เป็นผลให้กับกับดักฟ้าผ่าทำงานและจำกัดขนาดของแรงดันเกินไว้ ถ้าแรงดันเกินมีขนาดสูงมากและเกิดขึ้นต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน อาจทำให้กับดักฟ้าผ่าได้รับความเสียหาย โดยเฉพาะในเฟสที่สับเข้าเป็นลำดับสุดท้าย หรือปลดออกเฟสแรกมีโอกาสได้รับความเสียหาย และเกิดการระเบิดสูง ซึ่งจะนำมาศึกษาโดยการจำลองผลด้วยโปรแกรม EMTP ในลำดับต่อไป



รูปที่ 4.25 หม้อแปลง station service ขนาด 112.5 kVA ของสถานีไฟฟ้าย่อย ซึ่งรับไฟจ่ายสายป้อน BZ14 โดยต่ออยู่ที่ต้นทางของสายเคเบิลใต้ดิน

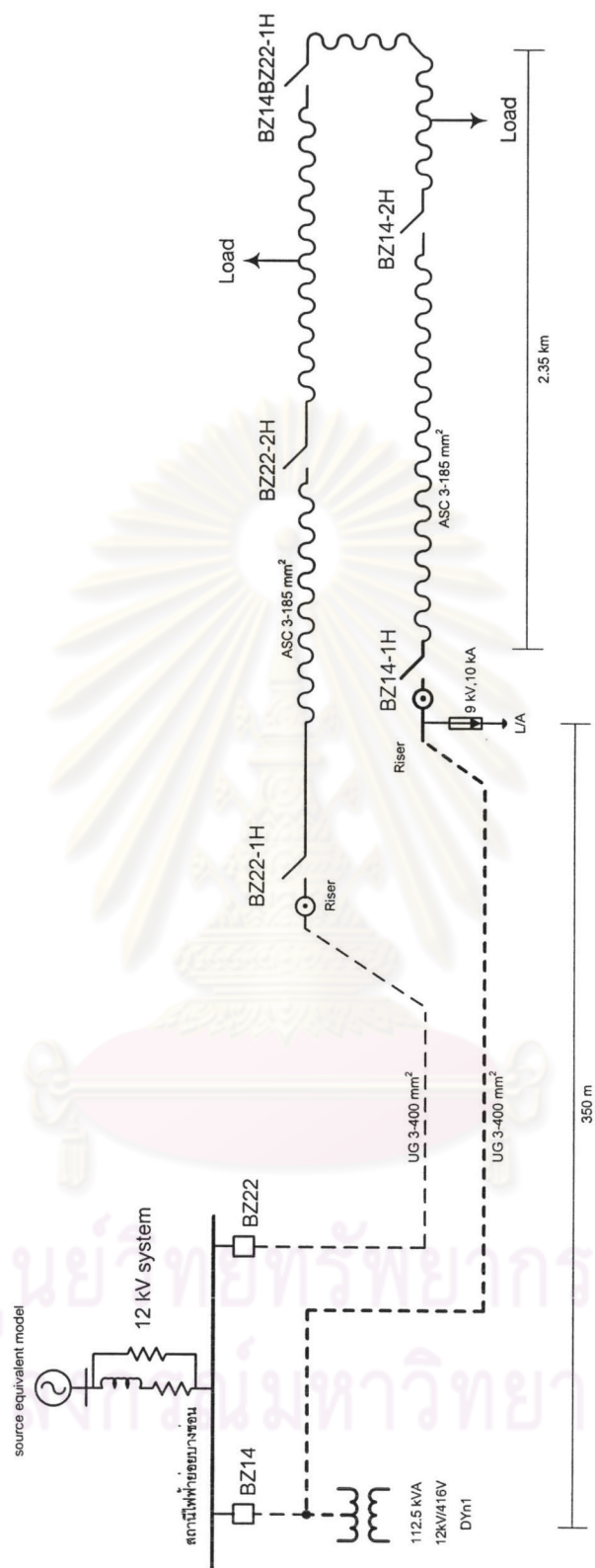


รูปที่ 4.26 แสดงตำแหน่งที่หม้อแปลง station service ติดตั้งอยู่บริเวณต้นทางของสายเคเบิลใต้ดิน BZ14 ซึ่งอาจเกิดปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ขึ้น

4.3 การจำลองด้วยโปรแกรม EMTP

ทำการศึกษากรณีปัญหานี้โดยการสร้างแบบจำลองของระบบตามแผนภาพเส้นเดียวในรูปที่ 4.27 ด้วยโปรแกรม EMTP (Electromagnetic Transients Program) และจำลองเหตุการณ์เหมือนกับการทดสอบภาคสนาม เพื่อยืนยันสาเหตุของแรงดันเกินชั่วคราวที่เกิดขึ้นขณะสับ-ปลด สวิตช์ไบมิดในสายป้อน นอกจากนั้นยังสามารถปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อลักษณะการเกิด ขนาด และรูปคลื่นของปรากฏการณ์แรงดันเกินที่เกิดขึ้น อีกทั้งยังนำไปใช้ศึกษาหาวิธีแก้ไข หรือลดทอนปัญหา และทำการทดสอบในแบบจำลองก่อนนำไปใช้จริงในทางปฏิบัติ

อนึ่ง ผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์อาจมีความคลาดเคลื่อนจากผลการวัดภาคสนามอยู่บ้าง เนื่องจากผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองในระบบ เช่น คุณลักษณะการอิ่มตัวของหม้อแปลง ความยาวสายเคเบิลใต้ดิน เป็นต้น ยิ่งไปกว่านั้นปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ยังไวต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์เป็นอย่างมาก ซึ่งอาจทำให้รูปคลื่นแรงดันมีขนาด คุณลักษณะ และระยะเวลาในการเกิดแตกต่างจากผลการวัดไปบ้าง

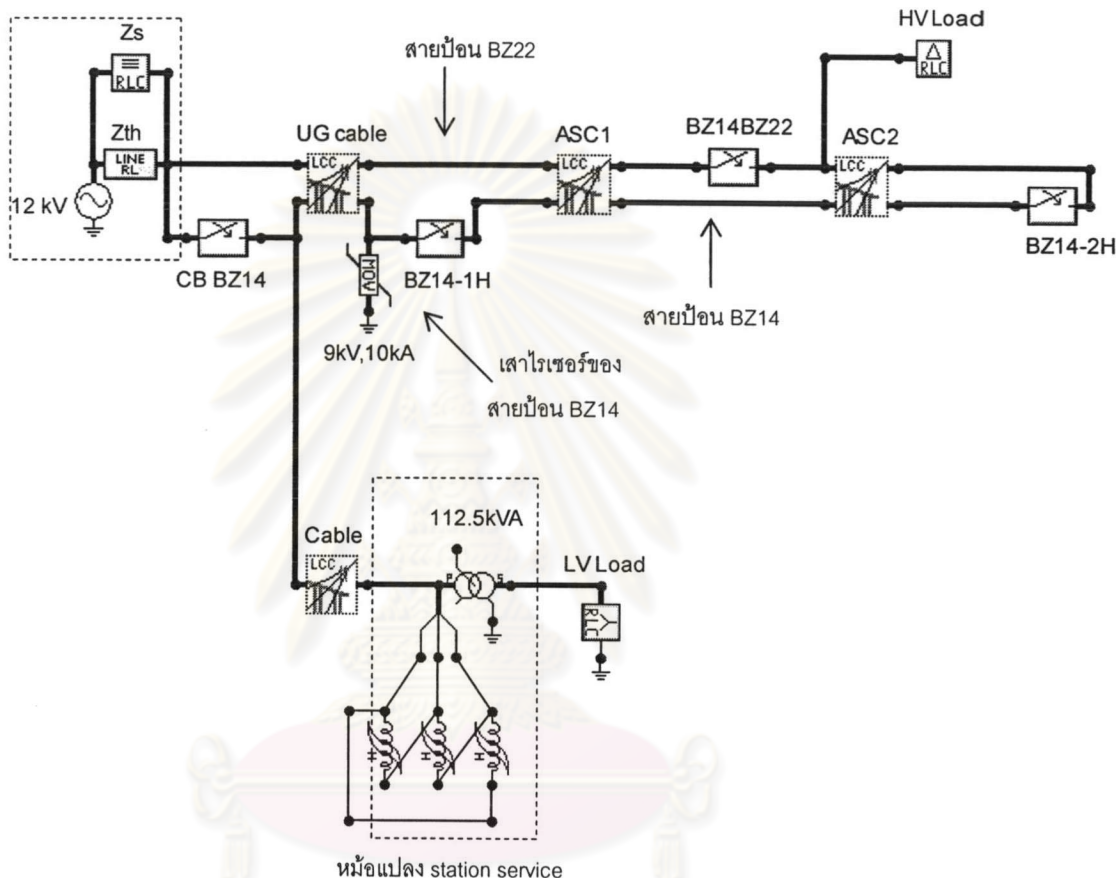


รูปที่ 4.27 แผนภาพเส้นเดี่ยวที่ใช้สร้างแบบจำลองในโปรแกรม EMTP

4.3.1 แบบจำลองของกรณีศึกษา

จากแผนภาพเส้นเดียวของกรณีศึกษา (ดูรูปที่ 4.27) สามารถสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม ATP/EMTP ได้ดังรูปที่ 4.28 โดยหลักการจำลองขององค์ประกอบต่างๆ ในวงจรแสดงตามลำดับได้ดังนี้

วงจรสมมูลของแหล่งจ่าย



รูปที่ 4.28 แบบจำลองโปรแกรม ATP/EMTP ของกรณีศึกษา

4.3.1-1 วงจรสมมูลของแหล่งจ่าย

แบบจำลองกำหนดสายป้อนทั้งสองรับไฟมาจากบัสเดียวกัน ซึ่งสามารถจำลองอย่างง่ายด้วยแหล่งจ่ายแรงดันอุดมคติ 3 เฟส ที่มีขนาดค่ายอดแรงดันเฟสเท่ากับ 9,797.96 โวลต์ ($12 \text{ kV}_{\text{rms}}$ L-L) กับอิมพีแดนซ์ลัดวงจรที่ต่อขนานกับอิมพีแดนซ์เสิร์จรวมของสายเคเบิลใต้ดินในสายป้อนอื่นที่ต่ออยู่ในบัสเดียวกัน [22] ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

- 1) อิมพีแดนซ์ลัดวงจร ที่ระดับแรงดัน 12 kV, 100 MVA (Z_{th})

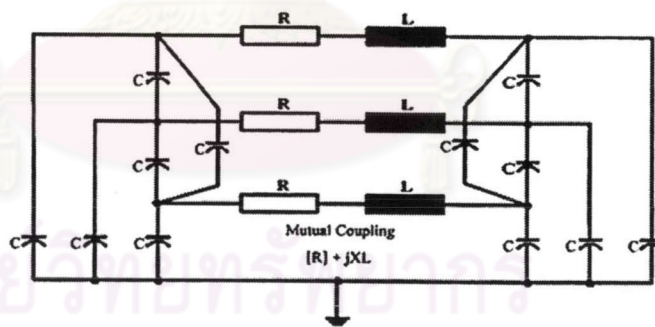
$$R_{1,2} = 0.059616 \ \Omega \text{ และ } L_{1,2} = 1.655435 \text{ mH}$$

$$R_0 = 0.0072 \ \Omega \text{ และ } L_0 = 1.53782 \text{ mH}$$

- 2) อิมพีแดนซ์เสิร์จรวม (Z_s) ของสายเคเบิลใต้ดินอื่นที่ต่ออยู่ที่บัสเดียวกัน จำนวน 4 สาย มีค่าประมาณ 6.57 Ω ($Z_s = 26.29 \ \Omega/\text{เส้น}$)

4.3.1-2 สายเคเบิลใต้ดิน และสายป้อนเหนือศีรษะ

วงจรประกอบด้วยสายเคเบิลใต้ดินชนิดขนาด 70 และ 400 mm² [23, 24] และสายป้อนเหนือศีรษะขนาด 185 mm² ซึ่งการศึกษาแรงดันเกินชั่วคราวที่มีความถี่ไม่สูงมาก และสายป้อนมีความยาวไม่เกิน 10 km สามารถแทนสายเคเบิลใต้ดิน หรือสายป้อนเหนือศีรษะได้ด้วยแบบจำลองสายส่งชนิด PI ดังแสดงในรูปที่ 4.29 และคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายด้วยการใช้ส่วนโปรแกรมย่อย (Line & Cable Constants, LCC) ของโปรแกรม ATP/EMTP [25, 26, 27] โดยป้อนข้อมูลขนาด โครงสร้างการจัดวาง และค่าคงที่ต่างๆ ของสาย สำหรับข้อมูลสายชนิดต่างๆ แสดงอยู่ในภาคผนวก ก.2 และ ก.3

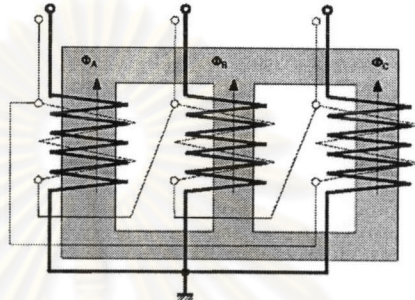


รูปที่ 4.29 แบบจำลองสายส่งชนิด PI

4.3.1-3 หม้อแปลงจำหน่าย

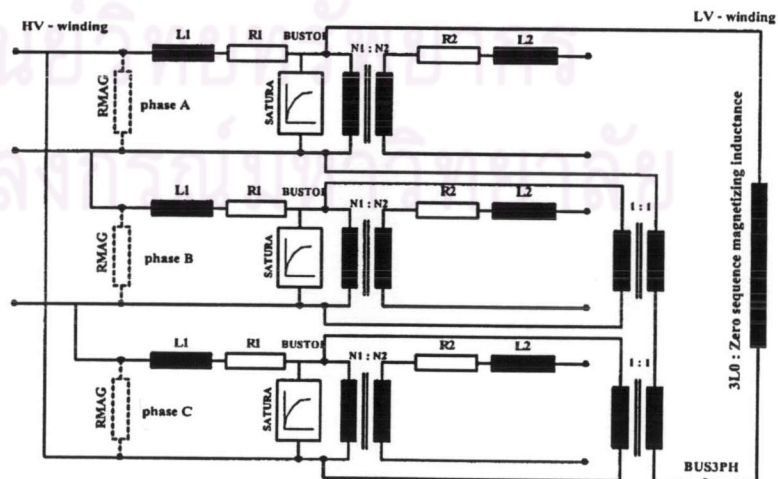
แบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้ศึกษาปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ต้องแสดงคุณลักษณะการทำงานของหม้อแปลงในสภาวะอิมิตัวแบบไม่สมดุล จึงให้ความสำคัญกับคุณลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้น โครงสร้างของแกนเหล็ก และกำลังสูญเสียของแบบจำลองหม้อแปลง ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ สามารถคำนวณได้จากผลการทดสอบลัดวงจร (SC.) และเปิดวงจร (OC.) ของหม้อแปลง

หม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า 3 เฟส ที่ใช้ส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างของแกนเหล็กแบบแกน 3 ขา (core type) ดังแสดงในรูปที่ 4.30 โดยฟลักซ์แม่เหล็กลำดับศูนย์ขณะทำงานอยู่ในสภาวะไม่สมดุลจะถูกผลักดันให้วิ่งผ่านอากาศและตัวถังภายนอกของขดลวด ซึ่งมีค่าความต้านทานต่อฟลักซ์แม่เหล็กในวงจร (homopolar reluctance) สูง ซึ่งจะแตกต่างกับแกนเหล็กชนิดอื่นๆ การศึกษาเฟอร์โรเรโซแนนซ์จึงต้องให้ความสำคัญกับองค์ประกอบนี้ด้วย



รูปที่ 4.30 โครงสร้างของหม้อแปลง 3 เฟส ชนิดแกนเหล็ก 3 ขา

เนื่องจากฟลักซ์ลำดับศูนย์จะวิ่งผ่านอากาศเป็นส่วนใหญ่ทำให้คุณลักษณะทางแม่เหล็กลำดับศูนย์จึงมีเส้นกราฟใกล้เคียงกับเส้นตรง ซึ่งอาจประมาณด้วยความเหนี่ยวนำแม่เหล็กลำดับศูนย์แบบเชิงเส้น (L_0) ที่สามารถคำนวณได้จากผลการทดสอบลำดับศูนย์ของหม้อแปลง ดังนั้นแบบจำลองของหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า 3 เฟส ที่มีการต่อขดลวดแบบ Dy จะมีส่วนประกอบต่างๆ ดังตัวอย่างใน รูปที่ 4.31 [25, 27, 28]

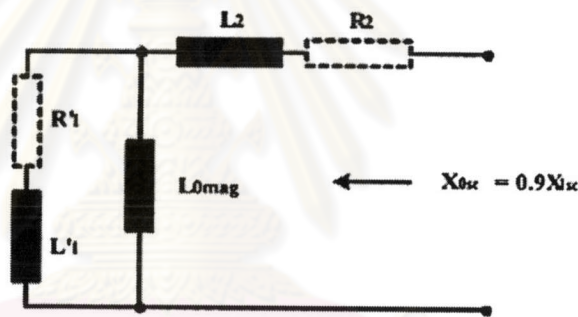


รูปที่ 4.31 แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ชนิดแกนเหล็ก 3 ขาที่มีการต่อขดลวดแบบ Dyn11

ค่า L_0 สามารถคำนวณได้จากผลการประมาณสัดส่วนของค่ารีแอกแตนซ์ความเหนี่ยวนำลัดวงจรลำดับศูนย์ (X_{0sc}) ต่อค่ารีแอกแตนซ์ความเหนี่ยวนำลัดวงจรลำดับบวก (X_{1sc}) มีค่าเท่ากับ 0.9 ตามสมการที่ 4.1 โดยพิจารณาว่า X_{0sc} มีค่าน้อยกว่า X_{1sc} เนื่องจากกระแสลำดับศูนย์สามารถไหลอยู่ในวงปิดของขดลวดเตลต้าและฟลักซ์แม่เหล็กวิ่งผ่านอากาศและตัวถังภายนอกแกนเหล็กได้

$$\frac{X_{0sc}}{X_{1sc}} = 0.9 \leq 1.0 \quad (4.1)$$

ดังนั้นค่าของความเหนี่ยวนำแม่เหล็กลำดับศูนย์ (L_0) ทางด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลงในรูปที่ 4.32 สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 4.2 และ 4.3 ถ้ากำหนดให้ความต้านทานขดลวดน้อยกว่าความเหนี่ยวนำมาก ($R \ll X$)



รูปที่ 4.32 วงจรสมมูลลัดวงจรลำดับศูนย์ด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลง

$$X_{0mag} = \frac{X_1' \times (X_{osc} - X_2)}{(X_1' + X_2 - X_{osc})} \quad (4.2)$$

$$L_0 = \frac{X_{0mag}}{2\pi f} \quad (4.3)$$

- เมื่อ X_{0mag} คือ รีแอกแตนซ์ลำดับศูนย์ด้านแรงดันต่ำ (Ω)
 X_1' คือ รีแอกแตนซ์ด้านแรงสูงที่ถ่ายโอนมาด้านแรงต่ำ (Ω)
 X_2 คือ รีแอกแตนซ์ด้านแรงต่ำ (Ω)
 X_{0sc} คือ รีแอกแตนซ์ลัดวงจรลำดับศูนย์ด้านแรงต่ำ (Ω)
 L_0 คือ ความเหนี่ยวนำลำดับศูนย์ด้านแรงต่ำ (H)
 f คือ ความถี่แรงดันระบบ (Hz)

สำหรับค่าความต้านทานต่อฟลักซ์แม่เหล็กลำดับศูนย์ (R_0 , zero-sequence reluctance) คำนวณได้ตามสมการที่ 4.4

$$R_0 = \frac{V_{\text{rated}}^2}{3L_0} \quad (4.4)$$

เมื่อ R_0	คือ ความต้านทานฟลักซ์แม่เหล็กลำดับศูนย์ (kV^2/H)
L_0	คือ ความเหนี่ยวนำแม่เหล็กลำดับศูนย์ (H)
V_{rated}	คือ แรงดันเฟสพิกัด (kV)

สำหรับการจำลองแกนเหล็กหม้อแปลงจะแทนด้วยองค์ประกอบสองส่วน คือ คุณลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นฮิสเทอรีซิส (hysteresis) และกำลังสูญเสียจากกระแสไหลวน (eddy current loss) โดยกำหนดให้กำลังอัตราส่วนของกำลังสูญเสียฮิสเทอรีซิสต่อกำลังสูญเสียจากกระแสไหลวนมีค่าเท่ากับ 2/3 สำหรับแกนเหล็กชนิด grain-oriented steel [26] และประมาณคุณลักษณะไม่เชิงเส้นตามการอิมิตัวของแกนเหล็กชนิด M-4 โดยกำหนดให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุด (B_{max}) ที่ใช้เท่ากับ 1.7 เทสลา และมีการปรับเปลี่ยนแบบจำลองบ้างเพื่อให้ผลเทียบเคียงได้กับกรณีศึกษาจริงมากที่สุด

ดังนั้นหม้อแปลง station service ขนาดพิกัด 112.5 kVA, 12kV/416V ในกรณีศึกษานี้จะแทนด้วยแบบจำลองในรูปที่ 4.31 โดยเลือกใช้แบบจำลองหม้อแปลงทั่วไป (SatTrafo) ของโปรแกรม ATP/EMTP และใช้ตัวเหนี่ยวนำไม่เป็นเชิงเส้นชนิดฮิสเทอรีซิส (hysteresis) ต่อภายนอกแทนคุณลักษณะแกนเหล็ก และกำลังสูญเสียฮิสเทอรีซิสของหม้อแปลง ในส่วนของกำลังสูญเสียจากกระแสไหลวนจะแทนด้วยความต้านทานค่าคงที่ภายในแบบจำลองหม้อแปลง (SatTrafo) สำหรับข้อมูลและคุณลักษณะต่างๆ ของหม้อแปลงแสดงอยู่ในภาคผนวก ก.4

4.3.1-4 กั๊บดักฟ้าผ่า

กั๊บดักฟ้าผ่าชนิดออกไซด์โลหะ (metal oxide) สามารถแทนด้วยตัวต้านทานไม่เชิงเส้นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล โดยกั๊บดักฟ้าผ่าที่ใช้เป็นแบบติดตั้งที่ไรเซอร์ (PVR) ชนิดโพลีเมอร์ ขนาดพิคัด 9 kV, 10 kA สำหรับข้อมูลต่างๆ และกราฟคุณลักษณะไม่เชิงเส้นของกั๊บดักฟ้าผ่าแสดงอยู่ในภาคผนวก ก.5

4.3.1-5 โหลด

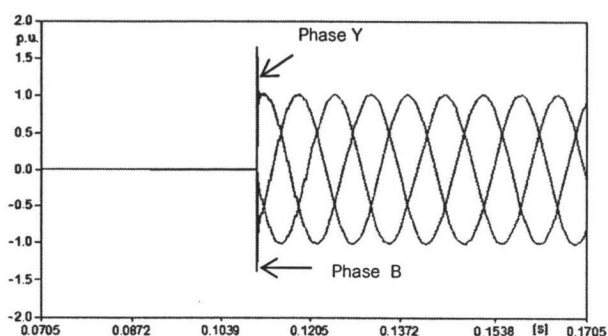
โหลดด้านแรงสูงของวงจรสายป้อนแทนด้วยโหลดเชิงเส้นแบบก้อน (lumped Load) 3 เฟส ต่อแบบเดลต้า ซึ่งเทียบเคียงได้กับโหลดแรงต่ำที่ต่อกับหม้อแปลงจำหน่ายแบบ Dy ในสายป้อน และประมาณขนาดของโหลดในวงจรเท่ากับ 6.6 MW, 1.32 Mvar ที่แรงดันพิคัด 12 kV สำหรับโหลดด้านแรงต่ำของหม้อแปลงจะแทนด้วยโหลดเชิงเส้นแบบก้อน 3 เฟส เช่นเดียวกัน แต่มีการต่อเป็นแบบวายลงดิน

4.3.2 ผลการจำลองกรณีไม่ติดตั้งกั๊บดักฟ้าผ่า

การจำลองกรณีศึกษาด้วยโปรแกรม EMTP ในขั้นต้นจะจำลองการสับ-ปลดสวิตช์กรณีไม่ติดตั้งกั๊บดักฟ้าผ่า ตามขั้นตอนเดียวกับการทดสอบภาคสนาม เพื่อเป็นการยืนยันผลการวัดรูปคลื่นภาคสนาม และทดสอบแบบจำลองที่ใช้ โดยผลการจำลองที่ได้แสดงตามลำดับการปฏิบัติงานและการสับ-ปลดสวิตช์ดังต่อไปนี้

4.3.2-1 สับเซอร์กิตเบรกเกอร์ BZ14 (ทดสอบสายเคเบิลใต้ดิน)

การสับเซอร์กิตเบรกเกอร์ BZ14 เพื่อจ่ายไฟให้กับสายเคเบิลใต้ดิน จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับการสับสวิตช์เพื่อจ่ายไฟให้กับชุดตัวเก็บประจุ 3 เฟส ซึ่งต่อแบบวายและจุดนิวทรัลต่อลงดิน แรงดันที่ขั้วของสายเคเบิลใต้ดินขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์จะเกิดแรงดันเกินสวิตช์ขึ้น โดยค่ายอดของแรงดันจะขึ้นอยู่กับมุมในการสับ และแรงดันคงค้างภายในสาย ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.33 ซึ่งเกิดแรงดันเกินสวิตช์ในเฟส Y และ B มีค่ายอดแรงดันสูงสุดประมาณ 1.59 และ 1.33 p.u. ตามลำดับ

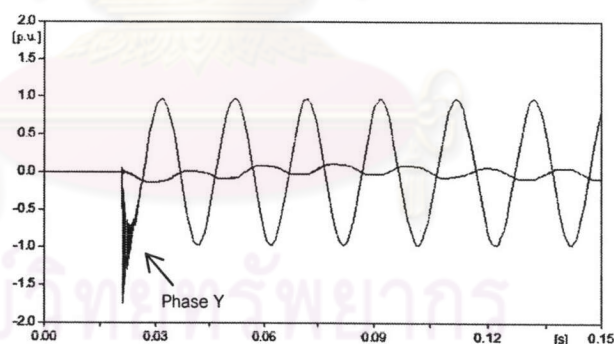


รูปที่ 4.33 รูปคลื่นแรงดันขณะสับ C.B. BZ14 ที่มุม 64.8° ของเฟส Y

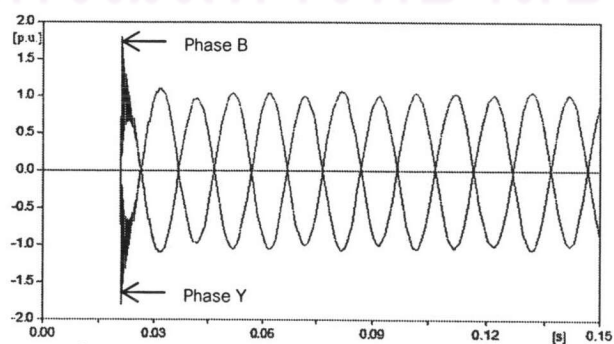
4.3.2-2 สับสวิตช์ไบมีด BZ14-1H เฟส Y, B และ R ตามลำดับ

(เซอร์กิตเบรกเกอร์ BZ14 เปิดวงจร, open)

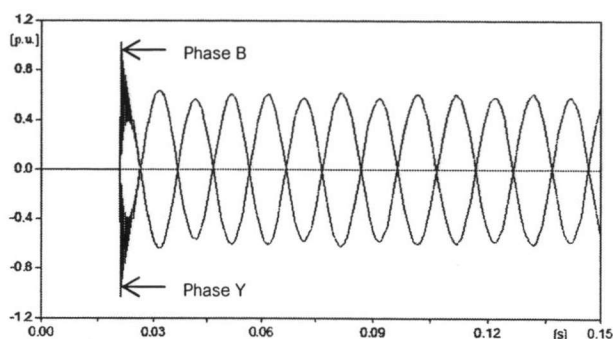
ขณะสับสวิตช์ไบมีดเฟส Y ที่มุมประมาณ 255.6° จะเกิดแรงดันเกินสวิตช์ที่สายเคเบิลใต้ดินเฟส Y มีขนาดค่ายอด 1.72 p.u. ดังรูปที่ 4.34 สำหรับรูปที่ 4.35 แสดงแรงดันตกคร่อมขดลวดหม้อแปลงซึ่งเกิดแรงดันเกินสวิตช์ที่เฟส Y และ B มีขนาดค่ายอด 1.79 p.u. และรูปที่ 4.36 แสดงแรงดันเฟสด้านแรงต่ำพบว่า มีรูปร่างเหมือนกับแรงดันตกคร่อมขดลวดด้านแรงสูงแต่มีการลดทอนขนาดตามอัตราส่วนการแปลง (transformation ratio) ทำให้มีค่ายอด 1.04 p.u.



รูปที่ 4.34 แรงดันเฟสที่หัวของสายเคเบิลใต้ดิน

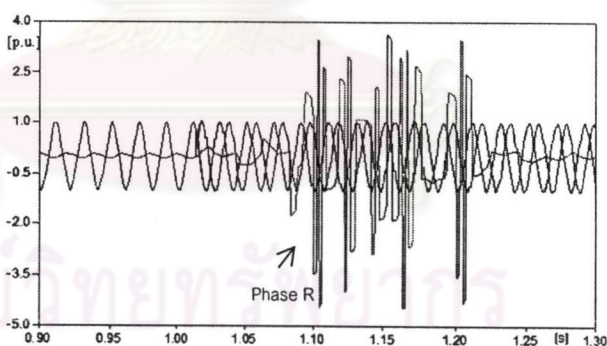


รูปที่ 4.35 แรงดันตกคร่อมขดลวดของหม้อแปลง

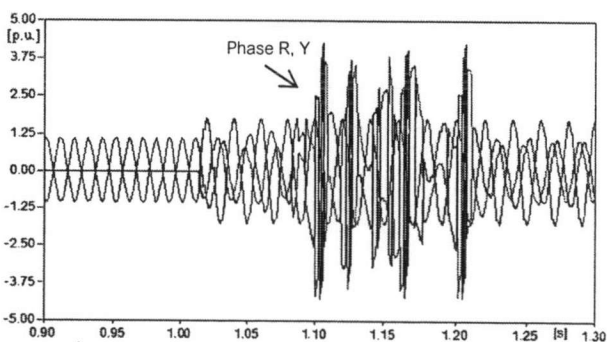


รูปที่ 4.36 แรงดันเฟสด้านแรงต่ำของหม้อแปลง

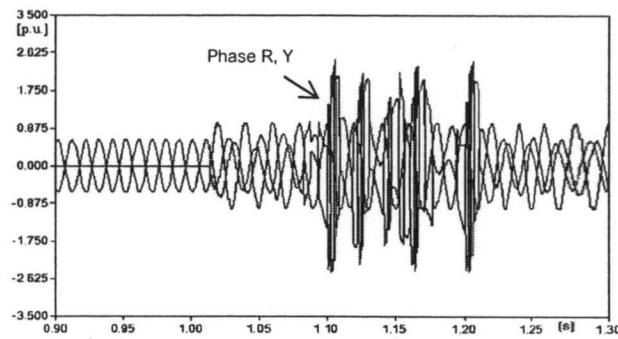
เมื่อสับสวิตช์โหม่งเฟส B ที่มุมประมาณ 27° เป็นลำดับต่อมาพบว่าเกิดแรงดันเกินชั่วคราวขนาดค่ายอด 4.45 p.u. ที่ขั้วของสายเคเบิลใต้ดินเฟส R เนื่องจากปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ ซึ่งเกิดขึ้นในลักษณะรูปคลื่นแบบสับสน (chaotic mode) ไม่เป็นฟังก์ชันคาบเวลา โดยเกิดขึ้นเพียงชั่วครู่แล้วก็หายไป ดังรูปที่ 4.37 ขณะเดียวกันขดลวดของหม้อแปลง เฟส Y และ R ก็เกิดแรงดันเกินชั่วคราวขนาด 4.30 p.u. 4.19 p.u. ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.38 แรงดันเกินตกคร่อมขดลวดนี้ยังส่งผ่านไปด้านแรงต่ำทำให้เกิดแรงดันเกินด้วยเช่นกัน ในรูปที่ 4.39 แต่มีขนาดค่ายอดเป็น 2.48 และ 2.42 p.u. ในเฟส Y และ R ตามลำดับ



รูปที่ 4.37 แรงดันเฟสที่ขั้วของสายเคเบิลใต้ดิน

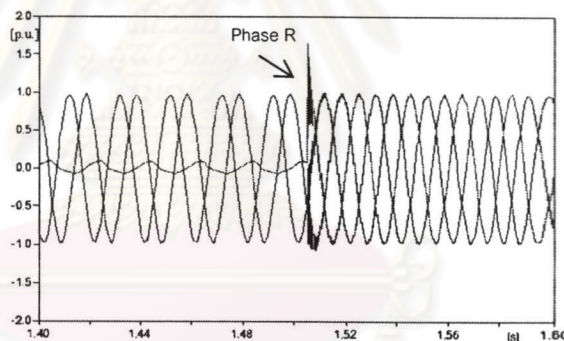


รูปที่ 4.38 แรงดันตกคร่อมขดลวดของหม้อแปลง



รูปที่ 4.39 แรงดันเฟสด้านแรงต่ำของหม้อแปลง

จากนั้นจึงสับสวิตช์ไบมิตเฟส R เป็นลำดับสุดท้าย ไม่ปรากฏแรงดันเกินชั่วคราวเกิดขึ้น แต่อาจเกิดแรงดันเกินสวิตช์ซึ่งมีขนาดขึ้นอยู่กับมุมในการสับ ดังรูปที่ 4.40 แสดงรูปคลื่นแรงดันที่หัวของสายเคเบิลใต้ดินขณะสับสวิตช์ไบมิต BZ14-1H เฟส R ที่มุมประมาณ 90° พบว่าเกิดแรงดันเกินสวิตช์ซึ่งขึ้นที่เฟส R โดยมีขนาดค่ายอดประมาณ 1.64 p.u.

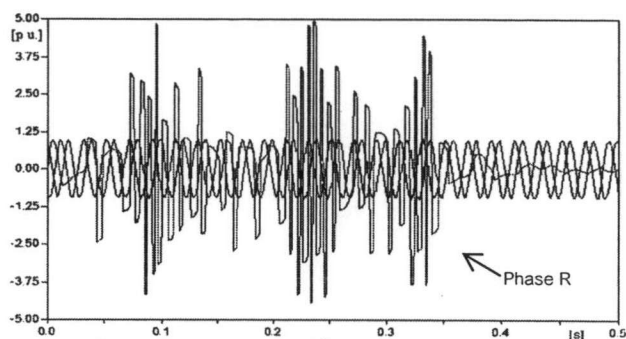


รูปที่ 4.40 รูปคลื่นแรงดันขณะสับสวิตช์ไบมิต BZ14-1H เฟส R

4.3.2-3 ปลดสวิตช์ไบมิต BZ14-1H เฟส R, B และ Y ตามลำดับ

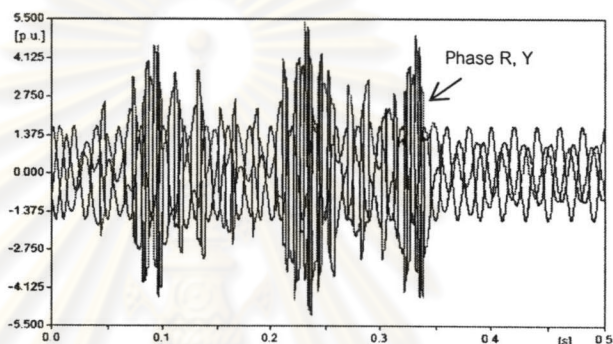
(เซอร์กิตเบรกเกอร์ BZ14 เปิดวงจร, open)

ผลการจำลองกรณีปลดสวิตช์ไบมิตก็ให้ผลเช่นเดียวกับผลทดสอบภาคสนาม โดยขณะปลดสวิตช์ไบมิตเฟส R เป็นเฟสแรกที่มีมุมประมาณ 180° พบว่าเกิดแรงดันเกินจากเฟอร์โรเรโซแนนซ์ชั่วคราวหนึ่งแล้วก็หายไป โดยมีลักษณะรูปคลื่นแบบสับสน (chaotic mode) และสามารถส่งผ่านแรงดันเกินไปด้านแรงต่ำได้เช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.41 - 4.43



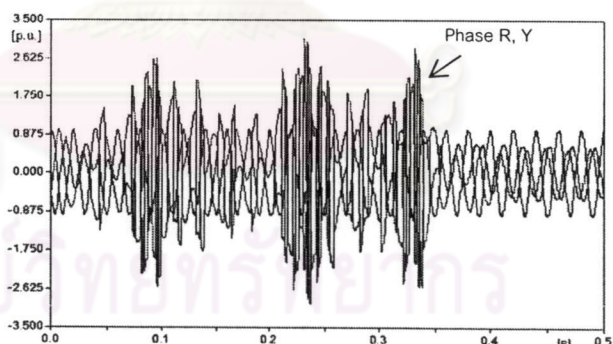
รูปที่ 4.41 แรงดันเฟสที่หัวของสายเคเบิลใต้ดิน

(ค่ายอดแรงดันเฟส R : 4.83 p.u.)



รูปที่ 4.42 แรงดันตกคร่อมขดลวดของหม้อแปลง

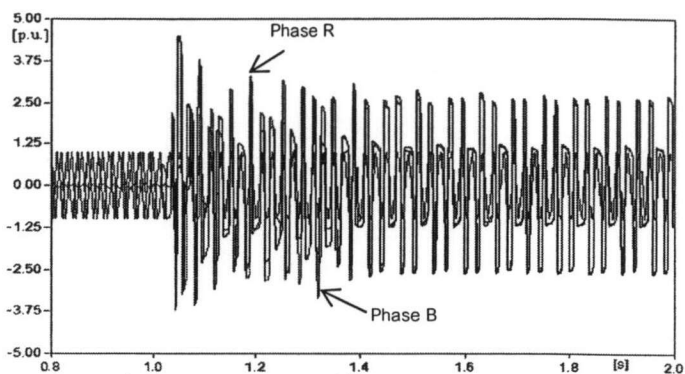
(ค่ายอดแรงดันเฟส R และ Y : 5.35, 5.18 p.u.)



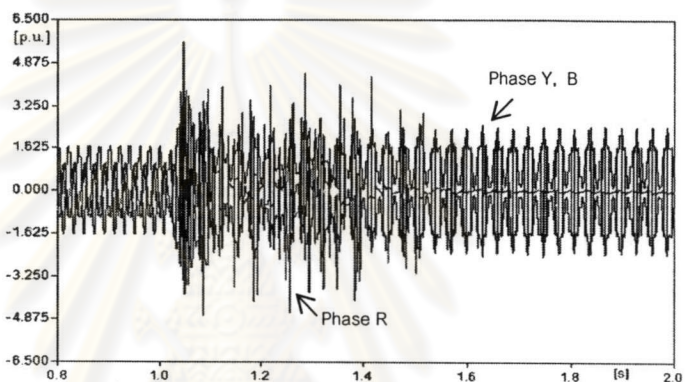
รูปที่ 4.43 แรงดันเฟสด้านแรงต่ำของหม้อแปลง

(ค่ายอดแรงดันเฟส R และ Y : 3.09, 2.99 p.u.)

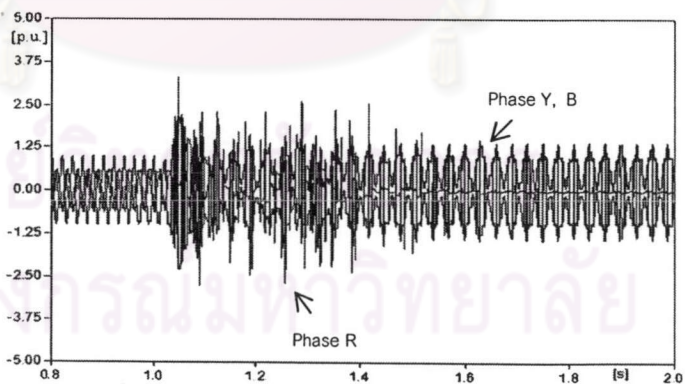
จากนั้นถ้าปลดสวิตช์ไบมีดเฟส B เป็นลำดับต่อมา เช่น มุม 40° พบว่าเกิดแรงดันชั่วคราวที่หัวของสายเคเบิลใต้ดินในเฟส B และ R ดังแสดงในรูปที่ 4.44 - 4.46 โดยรูปคลื่นแรงดันมีรูปแบบสับสน (chaotic mode) ในช่วงแรกและเปลี่ยนเป็นรูปแบบ 3^{rd} Sub-harmonic ในสภาวะคงตัว แรงดันตกคร่อมขดลวดของหม้อแปลง และแรงดันด้านแรงต่ำก็มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.44 แรงดันเฟสที่หัวของสายเคเบิลใต้ดิน
(ค่ายอดแรงดันเฟส R, B : 4.83, 4.39 p.u.)



รูปที่ 4.45 แรงดันตกคร่อมขดลวดของหม้อแปลง
(ค่ายอดแรงดันเฟส R, B และ Y : 5.65, 3.57, 3.72 p.u.)



รูปที่ 4.46 แรงดันเฟสด้านแรงต่ำของหม้อแปลง
(ค่ายอดแรงดันเฟส R, B และ Y : 3.26, 2.06, 2.15 p.u.)

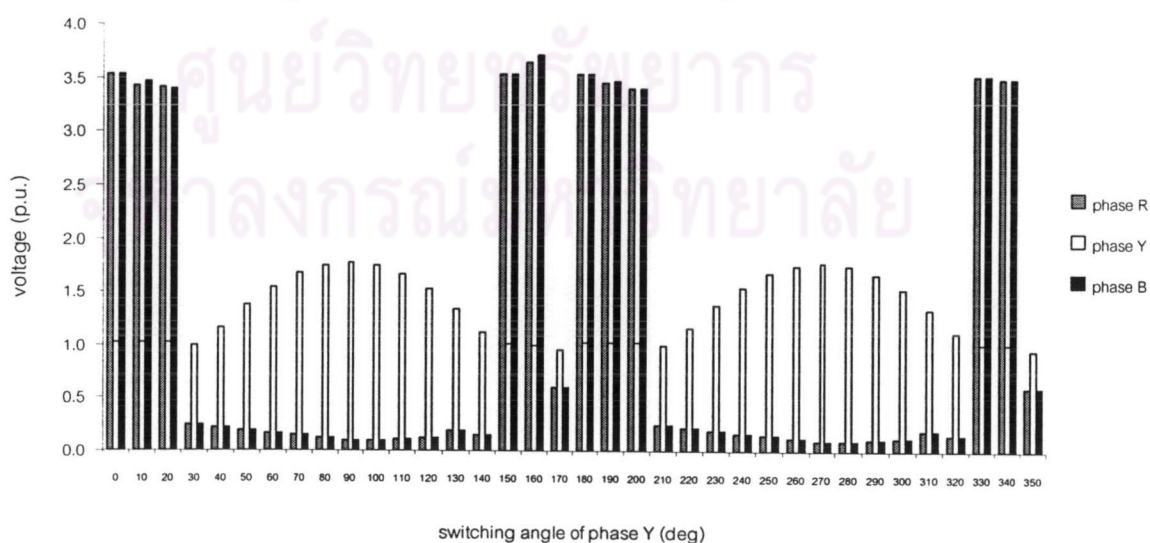
4.3.3 ผลของปัจจัยต่างๆ

พิกัดแรงดันของระบบ ความยาวสายเคเบิลใต้ดิน ขนาดและคุณลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นของหม้อแปลง มุมในการสับ-ปลดสวิตช์ แรงดันคงค้างในสายเคเบิลใต้ดิน พลักซ์คงค้างในแกนเหล็ก ขนาดและคุณลักษณะของโหลดในระบบ ทั้งหมดนี้ล้วนเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเกิด รูปแบบ และขนาดของแรงดันเกินจากปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ภายในระบบที่มีโครงสร้าง และสภาวะเหมาะสม สำหรับการปฏิบัติงานในสภาวะจริง ปัจจัยที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้นยกเว้น มุมในการสับ-ปลดสวิตช์ แรงดันและพลักซ์คงค้าง เป็นปัจจัยคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงจากผลของการปฏิบัติงานสับ-ปลดสวิตช์ ดังนั้นการศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ จึงพิจารณาเฉพาะปัจจัยที่เป็นผลโดยตรงขณะปฏิบัติงานดังนี้

4.3.3-1 มุมในการสับ-ปลดสวิตช์

การศึกษาจะทำการเปลี่ยนมุมในการสับ-ปลดสวิตช์ไบมิด BZ14-1H ที่ละ 10° โดยใช้การปรับเปลี่ยนเวลาในการสับสวิตช์ของแบบจำลอง [29] ตั้งแต่ 0° – 360° ตามลำดับขั้นตอนการสับ-ปลดสวิตช์ขณะปฏิบัติงานจริง โดยกำหนดให้ปัจจัยอื่นๆ คงที่ เช่น แรงดันคงค้างในสายเคเบิลใต้ดินเท่ากับศูนย์ พลักซ์คงค้างในแกนเหล็กเป็นศูนย์ และโหลดในระบบคงที่ เป็นต้น ผลการจำลองการสับ-ปลดสวิตช์ไบมิดที่มุมต่างๆ ของกรณีศึกษา นี้ แสดงตามลำดับได้ดังนี้

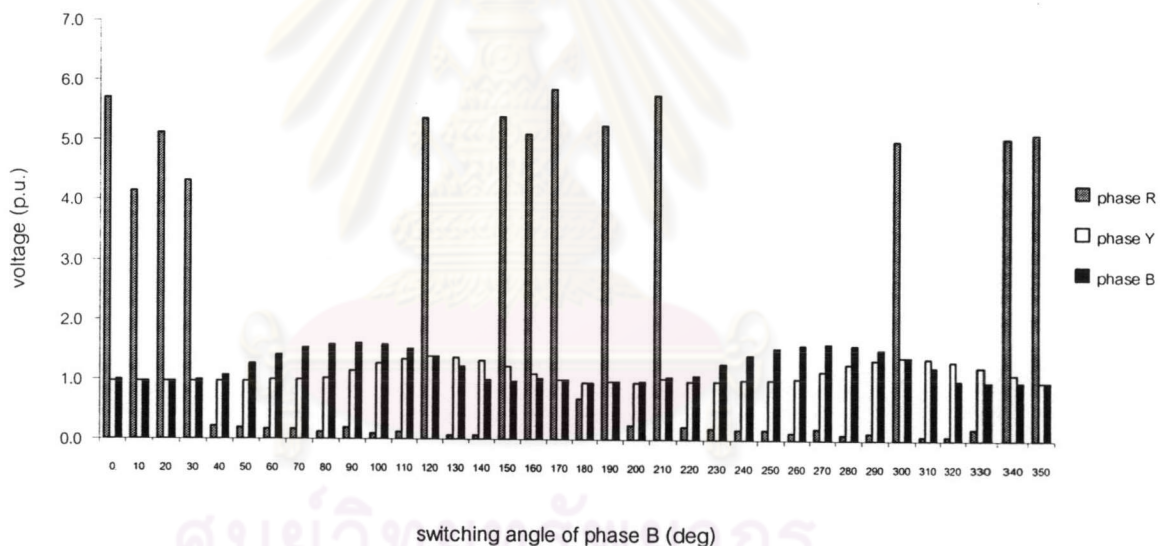
- 1) สับสวิตช์ไบมิด BZ14-1H เฟส Y, B และ R ตามลำดับ (ในขณะที่ C.B. BZ14 เปิดวงจรอยู่)



รูปที่ 4.47 ผลของมุมในการสับสวิตช์ไบมิด BZ14-1H เฟส Y

จากรูปที่ 4.47 ผลการจำลองขณะสับสวิตช์โหมดเฟส Y ซึ่งเป็นเฟสแรกที่มีมุมต่างๆ พบว่าเกิดแรงดันเกินสวิตช์ในเฟส Y ซึ่งมีขนาดค่ายอดสูงสุดที่มุม 90° และ 270° หรือสับสวิตช์ที่ยอดของแรงดันเฟส Y สำหรับเฟส R และ B นั้นเกิดแรงดันเกินชั่วคราวจากเฟอร์โรเรโซแนนซ์ แต่ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ในทุกๆ มุมสับ โดยแรงดันเกินเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องที่ขั้วของสายเคเบิลใต้ดิน และมีค่ายอดของแรงดันสูงสุดใกล้เคียงกันในทุกๆ มุมสับที่เกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์

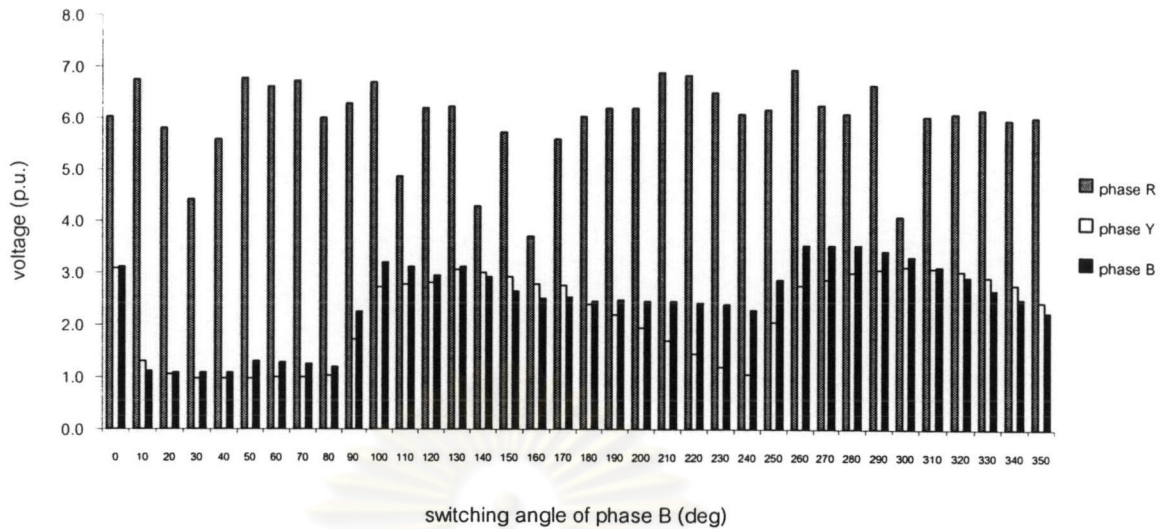
ในกรณีที่สับสวิตช์โหมดเฟส Y แล้วไม่เกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์ เช่น มุม 90° พบว่าหลังจากสับสวิตช์โหมดเฟส B ต่อไป อาจเกิดแรงดันเกินขึ้นที่เฟส R ชั่วครู่แล้วก็หายไป โดยสามารถเกิดขึ้นในหลายๆ มุมที่สับเฟส B ดังแสดงในรูปที่ 4.48 แต่พบว่ากรณีสับสวิตช์โหมดเฟส Y แล้วเกิดแรงดันเกินขึ้น เช่น มุม 0° จะเกิดแรงดันเกินชั่วคราวที่เฟส R อย่างรุนแรง ในทุกๆ มุมที่สับสวิตช์โหมดเฟส B ดังรูปที่ 4.49



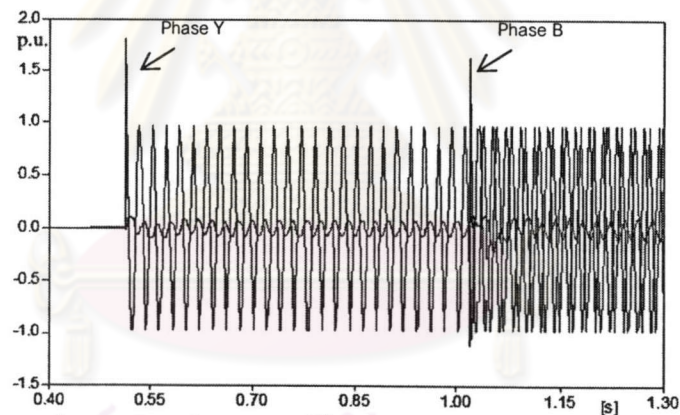
รูปที่ 4.48 ตัวอย่างผลของมุมในการสับสวิตช์โหมด BZ14-1H เฟส B

(กรณีสับสวิตช์โหมดเฟส Y ที่มุม 90°)

ดังนั้นการสับสวิตช์โหมด BZ14-1H มีโอกาสและความเสี่ยงสูงที่จะเกิดปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์และเกิดแรงดันเกิน โดยเฉพาะถ้าเกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์หลังจากสับเฟสแรก (Y) การสับสวิตช์เฟสที่สอง (B) ก็เกิดขึ้นด้วยเช่นกัน แต่ก็มีบางกรณีที่ไม่เกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์ขึ้นเลย เช่น สับเฟส Y ที่มุม 90° และเฟส B ที่มุม 90° ดังแสดงในรูปที่ 4.50



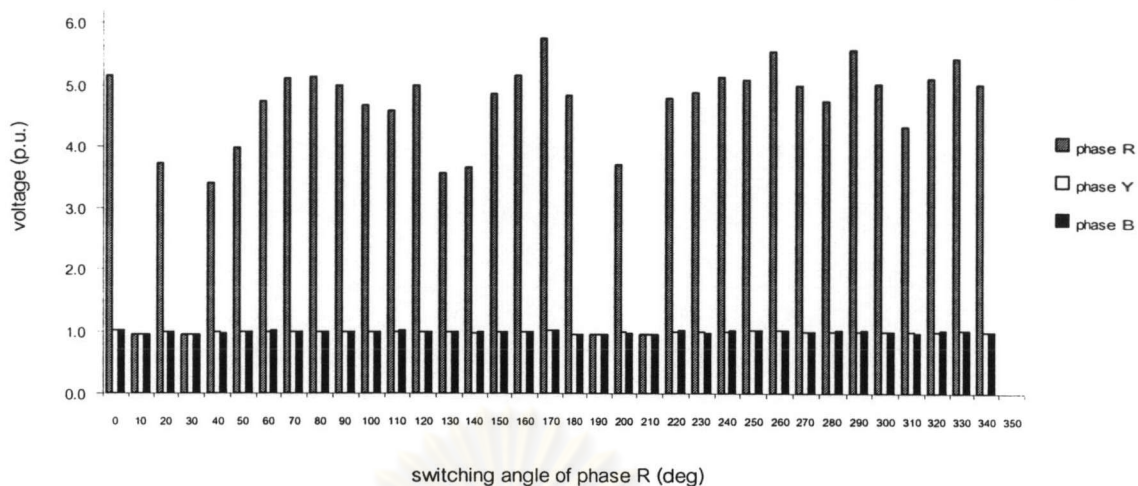
รูปที่ 4.49 ตัวอย่างผลของมุมในการสับสวิตช์ไบมิต BZ14-1H เฟส B
(กรณีสับสวิตช์ไบมิตเฟส Y ที่มุม 0°)



รูปที่ 4.50 รูปคลื่นแรงดันที่หัวของสายเคเบิลใต้ดินขณะสับ
สวิตช์ไบมิต BZ14-1H เฟส Y และ B ที่มุม 90° ตามลำดับ

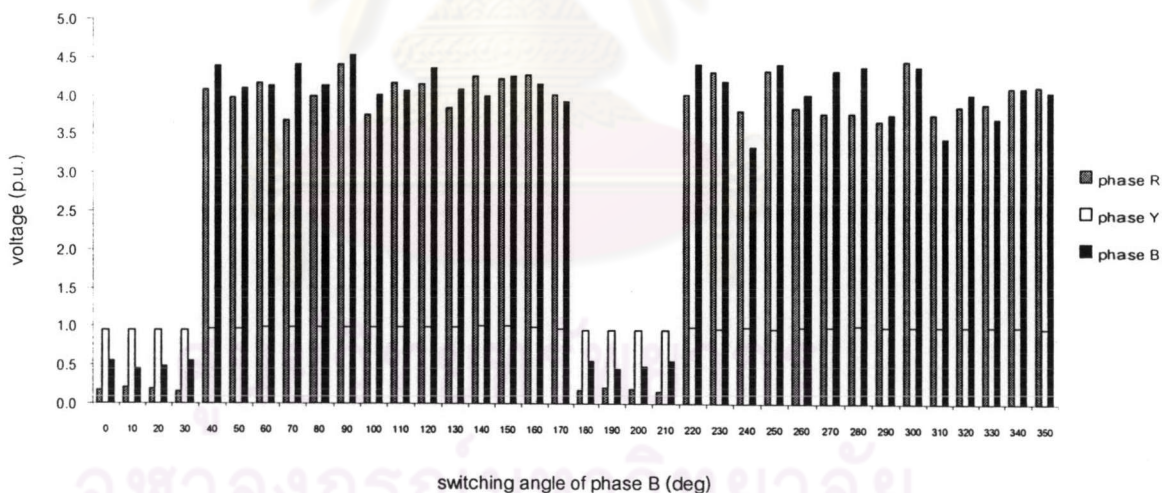
- 2) ปลดสวิตช์ไบมิต BZ14-1H เฟส R, B และ Y ตามลำดับ
(ในขณะที่ C.B. BZ14 เปิดวงจรอยู่)

การจำลองการปลดสวิตช์ไบมิตที่มุมต่างๆ เริ่มจากการปลดเฟส R ดังแสดงในรูปที่ 4.51 พบว่าแรงดันเกินจากเฟอร์โรเรโซแนนซ์สามารถเกิดขึ้นได้ที่เฟส R ในเกือบทุกๆ มุมที่ปลด แต่จะเกิดขึ้นเพียงชั่วครู่แล้วหายไป และมีโอกาสเกิดน้อยบริเวณจุดที่แรงดันเฟส R มีค่าใกล้ศูนย์



รูปที่ 4.51 ผลของมุมในการปลดสวิตช์ไบมิด BZ14-1H เฟส R

จากนั้นจึงปลดสวิตช์ไบมิดเฟส B เป็นลำดับต่อมา ผลการจำลองในรูปที่ 4.52 พบว่ามีโอกาสสูงมากที่จะเกิดปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์และแรงดันเกินต่อเนื่องในเฟส R และ B ซึ่งจะไม่เกิดเฉพาะมุม 0° – 30° และ 180° – 210° เท่านั้น เพราะฉะนั้นในขั้นตอนการปลดสวิตช์ไบมิดจึงมีโอกาส และความเสี่ยงที่จะเกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์และแรงดันเกินชั่วคราวมากกว่าขณะทำการสับสวิตช์ไบมิด

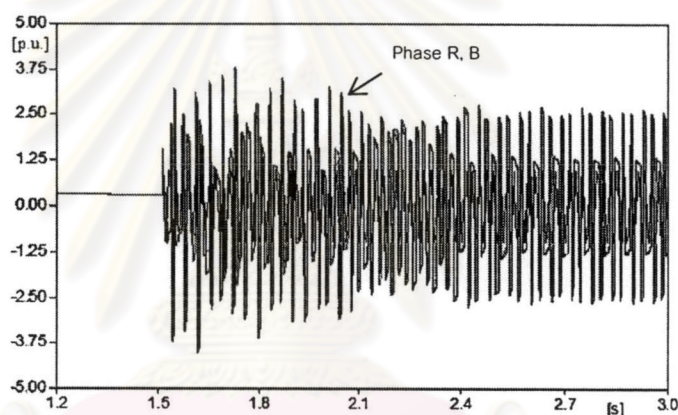


รูปที่ 4.52 ตัวอย่างผลของมุมในการปลดสวิตช์ไบมิด BZ14-1H เฟส B
(กรณีปลดสวิตช์ไบมิดเฟส R ที่มุม 0°)

จากผลการจำลองคาดว่าวงจรมีพารามิเตอร์ที่ทำให้เกิดจุดทำงานขึ้น 3 จุด คือ จุดที่เกิดแรงดันเกินทั้ง V_C และ V_L ดังแสดงในรูปที่ 4.37-4.46 (จุดที่ 3 ในรูปที่ 2.4) และจุดที่ไม่เกิดแรงดันเกิน ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.36 และ 4.50 (จุดที่ 1) และเกิดแรงดันเกินแบบไม่มีเสถียรภาพชั่วคราวเนื่องจากการทำงานผ่านจุดที่ 2 ซึ่งไม่มีเสถียรภาพ

4.3.3-2 แรงดันคงค้างและฟลักซ์คงค้าง

แรงดันคงค้างในสายเคเบิลใต้ดินและฟลักซ์คงค้างในแกนเหล็กของหม้อแปลง มีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ขณะสับสวิตช์ไบมิตเพื่อจ่ายไฟ ซึ่งพบว่าในสภาวะที่แรงดันและฟลักซ์คงค้างมีขนาดแตกต่างกัน อาจทำให้มีลักษณะการเกิดและรูปคลื่นของแรงดันเกินจากเฟอร์โรเรโซแนนซ์ต่างกันด้วย เช่น กรณีสับสวิตช์ไบมิต BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 90° เข้าเป็นเฟสแรก ในสภาวะที่กำหนดให้แรงดันและฟลักซ์คงค้างมีค่าเป็นศูนย์ จะไม่เกิดแรงดันเกินเฟอร์โรเรโซแนนซ์ดังรูปที่ 4.34 ข้างต้น แต่ที่มุมในการสับเดียวกันนี้อาจเกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์และแรงดันเกินชั่วคราวขึ้นในเฟส R และ B ได้ ถ้ามีขนาดของแรงดันและฟลักซ์คงค้างอยู่ในระดับที่เหมาะสมดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.53

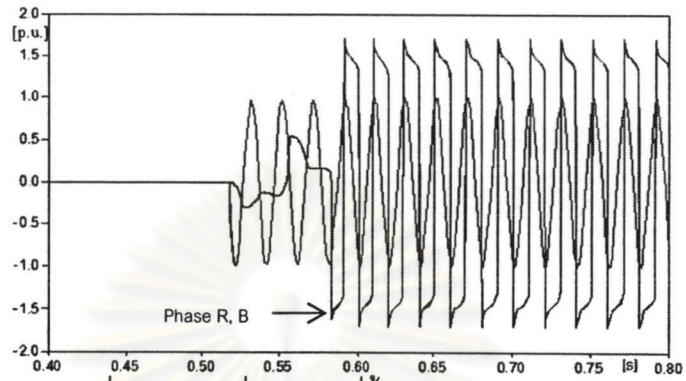


รูปที่ 4.53 แรงดันที่ชั่วของสายเคเบิลใต้ดินขณะสับสวิตช์ไบมิต BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 90° ในสภาวะที่มีแรงดันคงค้างในสาย 0.30 p.u. และมีฟลักซ์คงค้างในแกนเหล็ก 5.57, 8.94 และ -14.13 V.s ในเฟส R, Y และ B ตามลำดับ

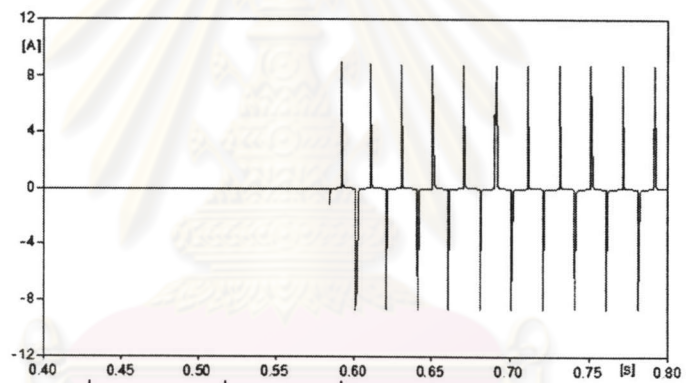
4.3.4 ผลการจำลองกรณีติดตั้งกับดักฟ้าผ่า

การจำลองกรณีติดตั้งกับดักฟ้าผ่าในสภาวะเดียวกันกับการทดสอบภาคสนาม ผลที่ได้มีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน โดยขณะสับสวิตช์ไบมิต BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 192.6° พบว่าเกิดแรงดันเกินอย่างต่อเนื่องในเฟส R และ B มีลักษณะแรงดันเป็นรูปคลื่นตัดและมีขนาดค่ายอดของแรงดันคงที่เฉลี่ยประมาณ 1.55 p.u. ดังแสดงในรูปที่ 4.54 ซึ่งเป็นผลจากการทำงานของกับดักฟ้าผ่า รูปที่ 4.55 แสดงกระแสที่ไหลผ่านกับดักฟ้าผ่าในเฟส R ขณะเกิดแรงดันเกิน มีค่ายอดของกระแสประมาณ 8.75 A เป็นไปตามกราฟคุณลักษณะ V-I ของกับดักฟ้าผ่าชนิดโรเซอร์ ขนาด 9 kV, 10 kA

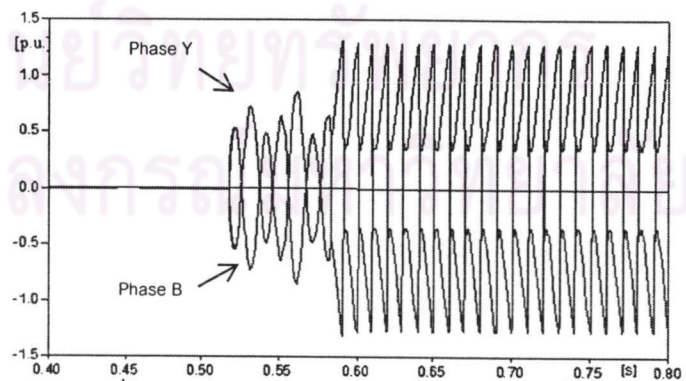
สำหรับแรงดันทางด้านแรงต่ำพบว่าเกิดแรงดันเกินต่อเนื่องและมีขนาดค่ายอด
คงที่ประมาณ 1.28 p.u. ซึ่งเป็นผลจากการทำงานของกับดักฟ้าด้านแรงสูงเช่นกัน ดัง
แสดงในรูปที่ 4.56



รูปที่ 4.54 รูปคลื่นแรงดันที่หัวของสายเคเบิลใต้ดิน

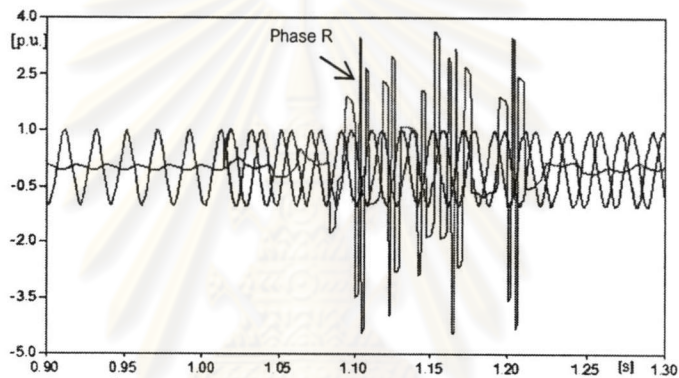


รูปที่ 4.55 รูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านกับดักฟ้าผ่าเฟส R

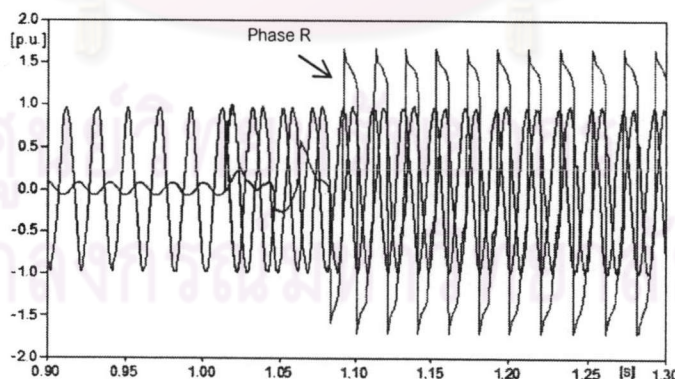


รูปที่ 4.56 รูปคลื่นแรงดันเกินในเฟส Y และ B ด้านแรงต่ำของหม้อแปลง

จากการจำลองยังพบว่ากับดักฟ้าผ่าที่เพิ่มเข้าไปในวงจรมีผลทำให้รูปแบบของแรงดันเกินที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงจากแบบสับสน (chaotic) หรือ sub-harmonic มาเป็นแบบความถี่มูลฐาน (fundamental) ซึ่งมีลักษณะเป็นฟังก์ชันคาบเวลาที่ความถี่มูลฐาน และมีเสถียรภาพของสภาวะแรงดันเกิน โดยสามารถเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน ดังเช่นตัวอย่างในรูปที่ 4.57 เป็นการสับสวิตช์โหม่งเฟส B ที่มุม 27° หลังจากสับเฟส Y ก่อนหน้าที่มุม 255.6° ในสภาวะที่ไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า จะเกิดแรงดันเกินที่เฟส R เพียงชั่วคราวแล้วก็หายไปและมีรูปแบบสับสน (chaotic) แต่ถ้าติดตั้งกับดักฟ้าผ่าที่ขั้วของสายเคเบิลใต้ดินทั้งสามเฟสจะเห็นว่าในกรณีเดียวกัน แรงดันเกินสามารถเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องที่ความถี่มูลฐานและมีขนาดคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.58



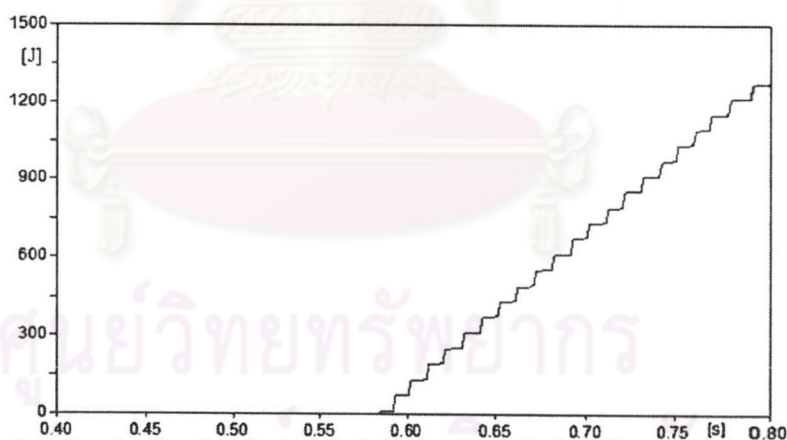
รูปที่ 4.57 รูปคลื่นแรงดันขณะสับสวิตช์โหม่ง BZ14-1H เฟส B ที่มุม 27°
(กรณีไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า)



รูปที่ 4.58 รูปคลื่นแรงดันขณะสับสวิตช์โหม่ง BZ14-1H เฟส B ที่มุม 27°
(กรณีติดตั้งกับดักฟ้าผ่า)

กับดักฟ้าผ่าขณะได้รับแรงดันเกินชั่วคราวต่อเนื่องที่มีขนาดสูงเกินกว่าพิกัด MCOV (Maximum Continuous Operating Voltage) จะทำให้เกิดการนำกระแสความต้านทาน (resistive current) โดยมีขนาดมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันเกินที่ตกคร่อมระหว่างขั้วของกับดักฟ้าผ่าขณะนั้น เป็นผลให้เกิดความร้อนขึ้นภายใน ถ้าแรงดันเกินมีขนาดสูง หรือเกิดขึ้นเป็นระยะเวลาสั้น อาจทำให้กับดักฟ้าผ่าไม่สามารถระบายความร้อนได้ทันเมื่อเทียบกับปริมาณพลังงานที่เกิดขึ้นจนเริ่มเกิดการสูญเสียประสิทธิภาพทางความร้อน และมีความร้อนสะสมภายในเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ยิ่งกับดักฟ้าผ่ามีอุณหภูมิสูงมาก ความต้านทานภายในก็ลดลงด้วยเช่นกัน และกับดักฟ้าผ่าก็จะนำกระแสมากขึ้นอีก จนถึงจุดที่สูญเสียประสิทธิภาพและเกิดความเสียหายในที่สุด

แรงดันเกินต่อเนื่องในตัวอย่างข้างต้น (ดูรูปที่ 4.54) ทำให้กับดักฟ้าผ่าในเฟส R และ B ได้รับพลังงานเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.59 โดยพลังงานมีค่าสูงด้วยอัตราประมาณ 5.77 kJ/s กับดักฟ้าผ่าชนิดโรเซอร์ที่ใช้มีขนาด 9 kV, 7.65 kV MCOV และมีความสามารถในการรองรับพลังงานได้สูงสุด 3.4 kJ/kV ดังนั้นหากแรงดันเกินเกิดขึ้นเป็นระยะเวลาสั้นจนทำให้กับดักฟ้าผ่าไม่สามารถระบายความร้อนได้ทันก็อาจทำให้กับดักฟ้าผ่าสูญเสียสภาพและได้รับความเสียหาย



รูปที่ 4.59 พลังงานที่กับดักฟ้าผ่าเฟส R ได้รับขณะเกิดแรงดันเกินชั่วคราว

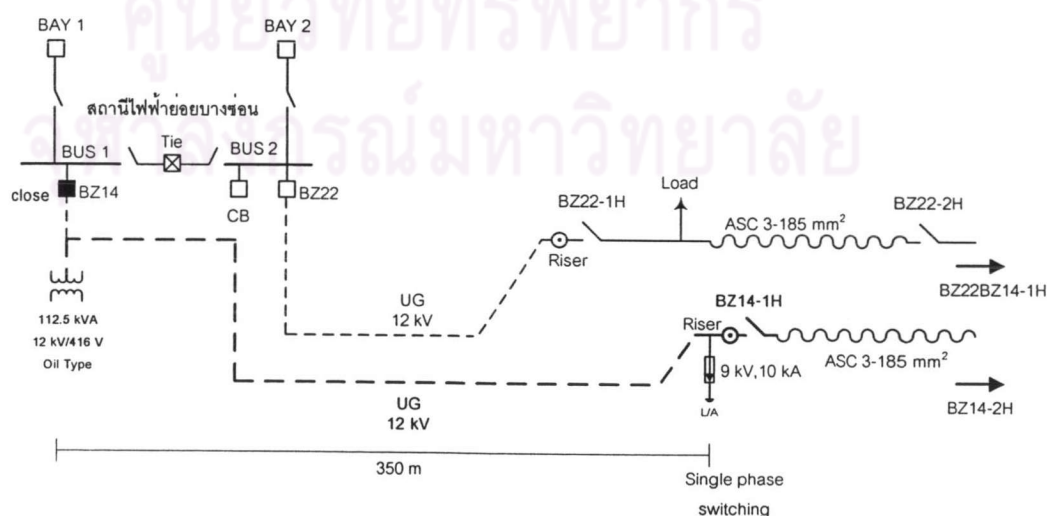
จากผลการจำลองต่างๆ ข้างต้น กับดักฟ้าผ่าอาจได้รับความเสียหายจากแรงดันเกินที่เกิดขึ้น แต่อาจจะไม่เกิดการระเบิดขึ้นทันที เนื่องจากผลของการเปลี่ยนแปลงสภาพของกับดักฟ้าผ่าส่งผลทำให้สภาวะของเฟอร์โรเวโรไซด์สูญเสียประสิทธิภาพและมีการเปลี่ยนแปลงจุดทำงานไปยังจุดที่ไม่เกิดแรงดันเกิน ดังจะเห็นได้จากผลการทดสอบภาคสนามรูปที่ 4.22 – 4.24

แรงดันเกินจากปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์เป็นแหล่งจ่ายแรงดันชนิดอิมพีแดนซ์สูง (weakness source) ซึ่งไม่สามารถจ่ายกระแสได้มาก [20, 21] จึงเป็นอีกเหตุผลหนึ่งที่ทำให้กับดักฟ้าผ่าไม่เกิดระเบิดขึ้นทันทีขณะรับแรงดันเกินจากเฟอร์โรเรโซแนนซ์เป็นระยะเวลาจนถึงแม้จะสูญเสียสภาพไปแล้ว จนกว่าจะมีการสับสวิตช์ในเฟสนั้นโดยตรงเข้ากับแหล่งจ่ายไฟซึ่งเป็นแหล่งจ่ายแรงดันอิมพีแดนซ์ต่ำ (stiff source) ผลของสภาพความต้านทานที่ลดลงไปมากทำให้กับดักฟ้าผ่านำกระแสค่าสูงอย่างรวดเร็วและเกิดการระเบิดขึ้นได้ในที่สุด ซึ่งเป็นเหตุผลที่สามารถอธิบายผลจากการทดสอบภาคสนามได้ว่าทำไมกับดักฟ้าผ่าเฟส R จึงเกิดระเบิดขึ้นภายหลังการสับสวิตช์ใบมีด BZ14-1H เฟส R ในลำดับสุดท้ายเสมอ ทั้งนี้ระยะเวลาที่กับดักฟ้าผ่าจะเกิดการระเบิดขึ้นอยู่กับสภาพความเสียหายของกับดักฟ้าผ่า และปัจจัยอื่นๆ เช่น มุมในการสับ-ปลดสวิตช์ แรงดันและฟลักซ์คงค้างในสภาวะเริ่มต้นที่เป็นตัวกำหนดลักษณะการเกิดของแรงดันเกิน รวมทั้งระยะเวลาในการสับ-ปลดสวิตช์แต่ละเฟสซึ่งมีผลกับระดับความเสียหายที่เกิดขึ้นกับกับดักฟ้าผ่า เป็นต้น

4.4 การแก้ปัญหา

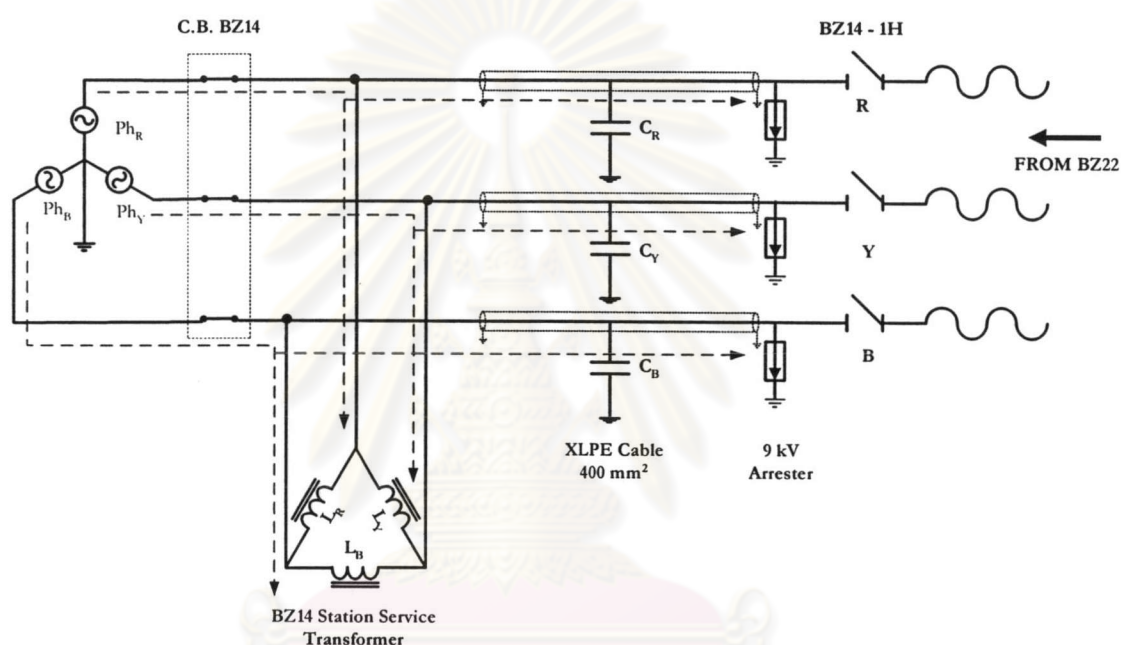
วิธีการแก้ปัญหา และหลีกเลี่ยงการเกิดแรงดันเกินจากปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ของกรณีศึกษานี้สามารถทำได้ตามวิธีต่างๆ ในหัวข้อที่ 2.4 แต่วิธีที่สามารถทำได้ง่ายในทางปฏิบัติและเสียค่าใช้จ่ายในการลงทุนเพิ่มเติมไม่มากนัก คือ การเปลี่ยนแปลงลำดับการสับ-ปลดสวิตช์ และการต่อโหลดความต้านทานด้านแรงต่ำ

4.4.1 การเปลี่ยนแปลงลำดับการสับ-ปลดสวิตช์



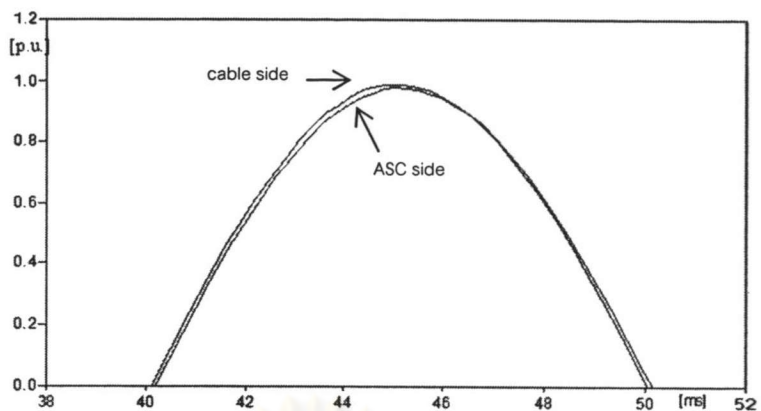
รูปที่ 4.60 แผนภาพเส้นเดียวของกรณีปัญหา

จากแผนภาพเส้นเดียวของระบบรูปที่ 4.60 ในกรณีที่ต้องการปลดสวิตช์ใบมีด BZ14-1H เพื่อดับไฟเพื่อปฏิบัติงานที่เสาโรเซอร์ของสายป้อน BZ14 โดยมีการสับขนสวิตช์กับสายป้อนอื่นเพื่อถ่ายโอนโหลดก่อนการปฏิบัติงาน การดับไฟในบริเวณดังกล่าวโดยไม่ให้เกิดปรากฏการณ์เฟร์โรเรโซแนนซ์สามารถทำได้ด้วยการปลดสวิตช์ใบมีด BZ14-1H ก่อนการปลดเซอร์กิตเบรกเกอร์ BZ14 เนื่องจากขณะปลดสวิตช์ใบมีด หม้อแปลง station service ยังคงรับไฟจากบัส 1 ผ่านเซอร์กิตเบรกเกอร์ BZ14 ทำให้ทั้งหม้อแปลงและสายเคเบิลใต้ดินมีแรงดันเท่ากับแรงดันของระบบทั้ง 3 เฟส ดังรูปที่ 4.61

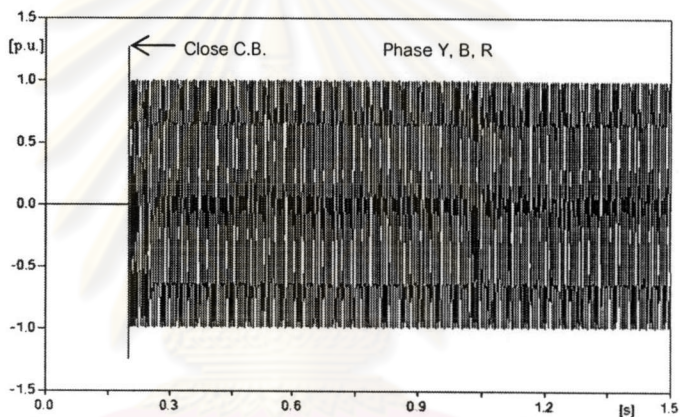


รูปที่ 4.61 C.B. BZ14 อยู่ในตำแหน่งปิดวงจร ขณะสับ-ปลดสวิตช์ใบมีด BZ14-1H

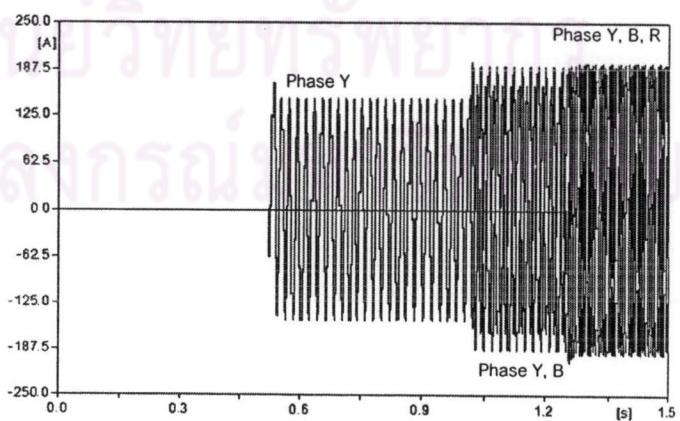
สำหรับกรณีการสับสวิตช์เพื่อจ่ายไฟกลับคืนนั้น ต้องสับเซอร์กิตเบรกเกอร์ BZ14 เพื่อจ่ายไฟให้กับหม้อแปลงครบทั้ง 3 เฟสก่อนแล้วจึงสับสวิตช์ใบมีด BZ14-1H ในลำดับต่อมาดังรูปที่ 4.61 เช่นกัน เป็นผลให้ขณะสับสวิตช์ใบมีดก็จะไม่เกิดเฟร์โรเรโซแนนซ์ ในรูปที่ 4.62 แสดงรูปคลื่นแรงดันไซเคิลบวกของเฟส R ระหว่างสวิตช์ใบมีด BZ14-1H เฟส R ด้านสายเคเบิลใต้ดิน และสาย ASC ภายหลังจากสับเซอร์กิตเบรกเกอร์ BZ14 แล้ว โดยแรงดันเฟส R ด้านสายเคเบิลใต้ดินมีขนาดสูงกว่าและมีเฟสนำแรงดันด้านสาย ASC เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทำให้ขณะสับสวิตช์ใบมีด BZ14-1H อาจเกิดแรงดันเกินสวิตช์ และมีการกระชากของกระแสจ่ายโหลดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังแสดงผลการจำลองขณะสับสวิตช์ใบมีด BZ14-1H ในรูปที่ 4.63 และ 4.64



รูปที่ 4.62 รูปคลื่นแรงดันไซเคิลบวกของเฟส R ระหว่างหน้าสัมผัสของ สวิตช์ไวมิด BZ14-1H เฟส R ภายหลังจากการสับ C.B. BZ14

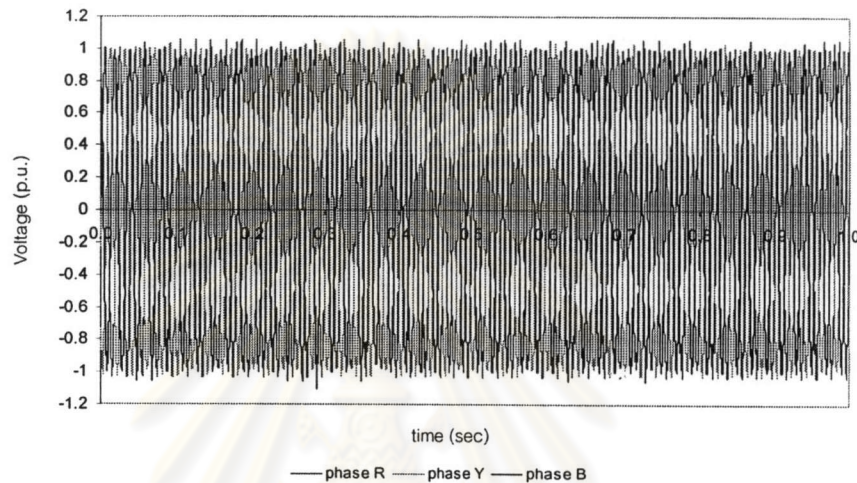


รูปที่ 4.63 รูปคลื่นแรงดันขณะสับสวิตช์ไวมิด BZ14-1H ขณะมีการสับ C.B. BZ14 เข้าไปก่อน



รูปที่ 4.64 รูปคลื่นกระแสไหลดที่ไหลผ่านสวิตช์ไวมิด BZ14-1H ขณะทำการสับสวิตซ์ที่ละเฟส

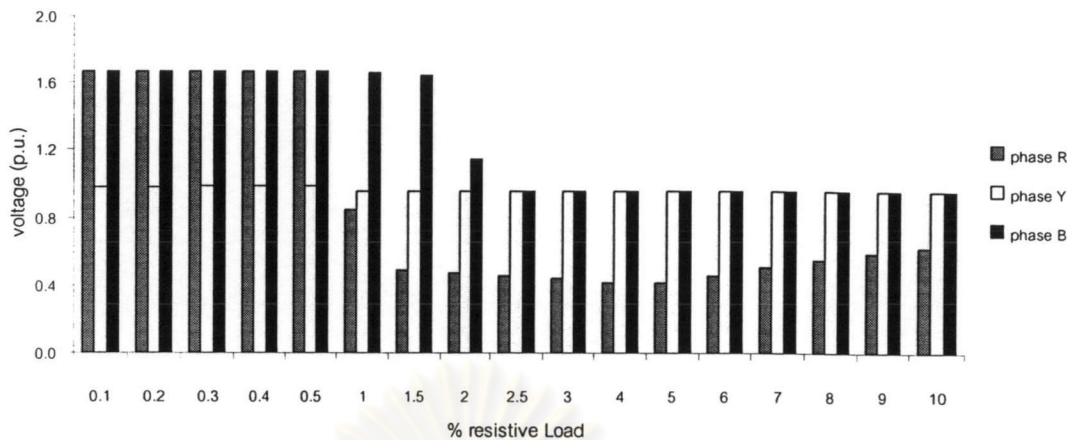
สำหรับรูปที่ 4.65 แสดงผลรูปคลื่นแรงดันตกคร่อมกับดักฟ้าผ่าขณะทำการทดสอบภาคสนาม ระหว่างการสับสวิตช์ใบมีด BZ14-1H เฟส Y, B และ R ตามลำดับ เพื่อจ่ายไฟกลับคืนภายหลังจากการดับไฟเพื่อเปลี่ยนกับดักฟ้าผ่าที่ต้นโรเซอร์ โดยทำการสับเซอร์กิตเบรกเกอร์ BZ14 เข้าไปก่อน ซึ่งจะเห็นว่าไม่เกิดแรงดันเกินขึ้นจากเฟอร์โรเรโซแนนซ์



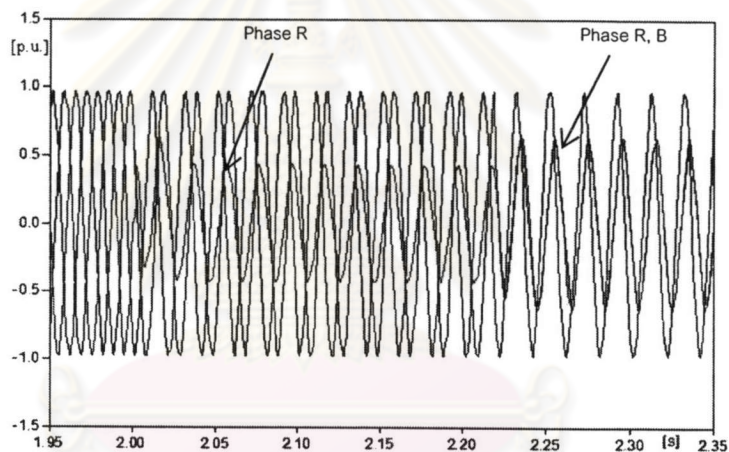
รูปที่ 4.65 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมกับดักฟ้าผ่า
ขณะสับสวิตช์ใบมีด BZ14-1H เฟส Y,B และ R ตามลำดับ

4.4.2 การต่อโหลดความต้านทานด้านแรงต่ำ

การแก้ปัญหายังสามารถทำได้ด้วยการใช้วิธีต่อโหลดความต้านทานไว้ด้านแรงต่ำของหม้อแปลง รูปที่ 4.66 แสดงผลการจำลองเพื่อใช้พิจารณาขนาดของแรงดันที่เกิดขึ้นขณะต่อโหลดความต้านทานค่าต่างๆ กรณีปลดสวิตช์ใบมีดเฟส R และ B ที่มุม 0° และ 90° ตามลำดับ และติดตั้งกับดักฟ้าผ่า กรณีนี้พบว่าถ้าใส่โหลดความต้านทานเพียง 2.5% ของพิกัดกำลังไฟฟ้าหม้อแปลง ก็จะไม่เกิดแรงดันเกิน แต่โดยปกติแนะนำให้ต่อโหลดความต้านทานขนาดไม่ต่ำกว่า 5% หรือประมาณ 10% ของพิกัดกำลังไฟฟ้าหม้อแปลง ซึ่งจะไม่เกิดแรงดันเกินจากปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ในทุกๆ กรณี รูปที่ 4.67 แสดงผลการต่อโหลดความต้านทานขนาดประมาณ 10% ของพิกัดกำลังไฟฟ้าหม้อแปลง



รูปที่ 4.66 ขนาดของแรงดันตกคร่อมกับดักฟ้าผ่าสูงสุดขณะปลดสวิตช์ใบมีด BZ14-1 H เฟส R และ B ที่มีมุม 0° และ 90° ตามลำดับ เมื่อต่อโหลดด้านแรงต่ำที่ขนาดต่างๆ กัน



รูปที่ 4.67 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมกับดักฟ้าผ่าขณะปลดสวิตช์ใบมีด BZ14-1H เฟส R และ B ที่มีมุม 0° และ 90° ตามลำดับ เมื่อต่อโหลดด้านแรงต่ำขนาด 10%

จากผลการศึกษาดังกล่าวกรณีปัญหาข้างต้น ทำให้ทราบถึงต้นเหตุของปรากฏการณ์แรงดันเกินที่เกิดขึ้นขณะทำการสับ-ปลดสวิตช์ใบมีด และวิธีการแก้ไขปัญหาและคาดว่ากรณีปัญหาในลักษณะเดียวกันที่เกิดขึ้นในเขตอื่นๆ ก็อาจเกิดขึ้นจากสาเหตุเดียวกันนี้ เนื่องจากพบว่าหม้อแปลง station service ในทุกสถานีไฟฟ้าย่อยจะติดตั้งอยู่ที่ต้นทางของสายเคเบิลใต้ดินของสายป้อนรหัส 14 และ 24 เช่นกัน ดังจะเห็นได้จากข้อความเสียหายของกับดักฟ้าผ่าขณะปฏิบัติงานในสายป้อนในตารางที่ 4.4 จึงอาจนำวิธีการแก้ไขปัญหาที่ได้กรณีศึกษานี้ไปประยุกต์ใช้กับกรณีปัญหาอื่นๆ ได้

ตารางที่ 4.4 รายงานความเสียหายของกับดักฟ้าผ่าขณะปฏิบัติงานในสายป้อน

ลำดับที่	จุดที่เกิด	ตำแหน่งสวิตช์	ชนิด L/A	พิกัด	การทำงาน	เฟสที่เกิด	ความถี่
1*	เสาโรเซอร์	BZ14-1H	polymer	10kA, 9kV	สับ	R	ทุกครั้ง
2	เสาโรเซอร์	SA424-1H	polymer	10kA, 21kV	สับ	R	บางครั้ง
3	เสาโรเซอร์	SA414-1H	polymer	10kA, 21kV	สับ	R, B	บางครั้ง
4	เสาโรเซอร์	SA424-1H	polymer	10kA, 21kV	สับ	R	บางครั้ง
5	เสาโรเซอร์	YNW424-1H	polymer	10kA, 21kV	สับ	B	บางครั้ง
6	เสาโรเซอร์	PK14-1H	polymer	10kA, 9kV	สับ	R	บางครั้ง
7	เสาโรเซอร์	SA424-1H	polymer	10kA, 21kV	สับ	Y	บ่อยครั้ง
9	เสาโรเซอร์	SA414-1H	polymer	10kA, 21kV	สับ	B	บ่อยครั้ง

* เหตุการณ์ปัญหาที่นำมาเป็นกรณีศึกษาตัวอย่างในวิทยานิพนธ์นี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย