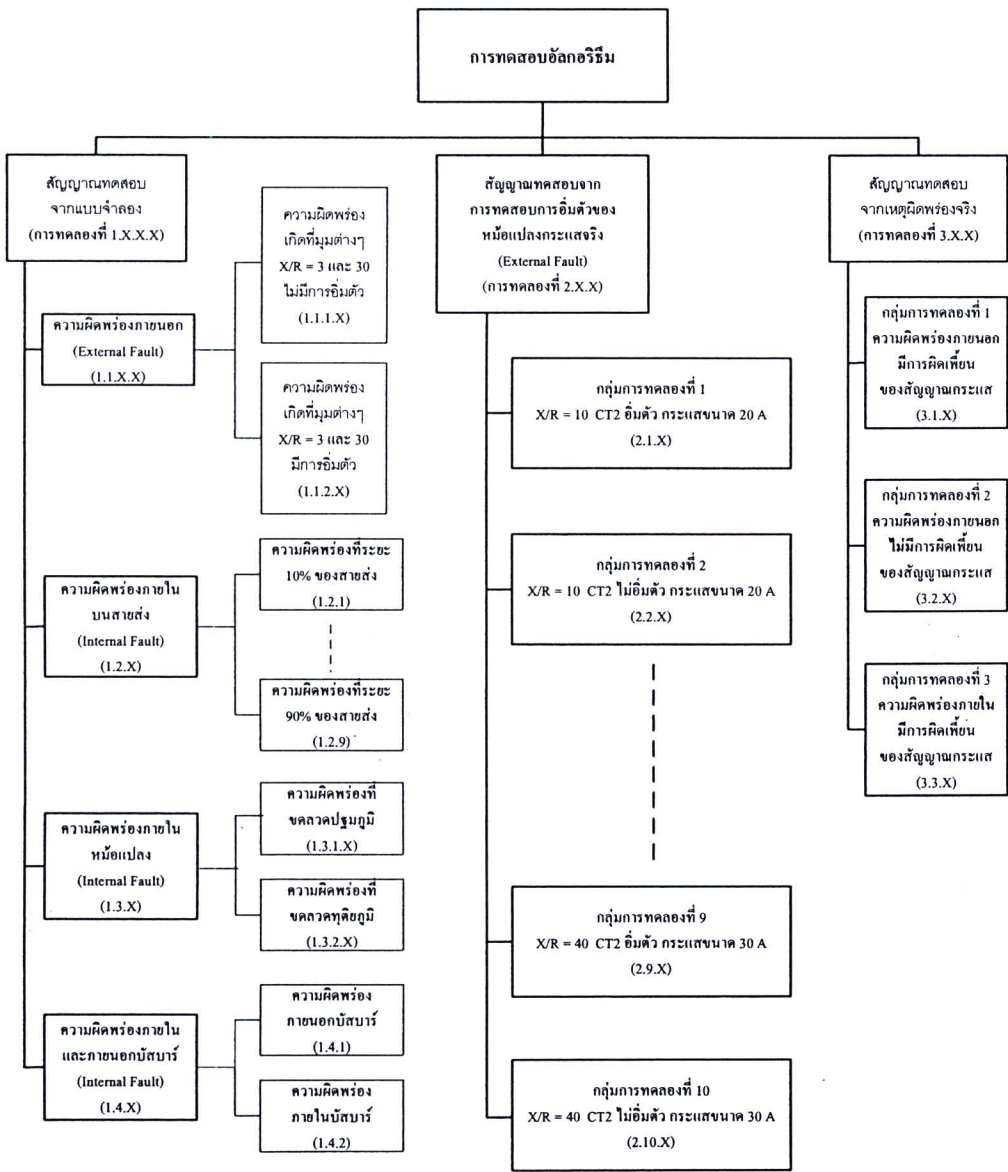


บทที่ 4

การทดสอบอัลกอริธึมสำหรับผลลัพธ์ต่าง

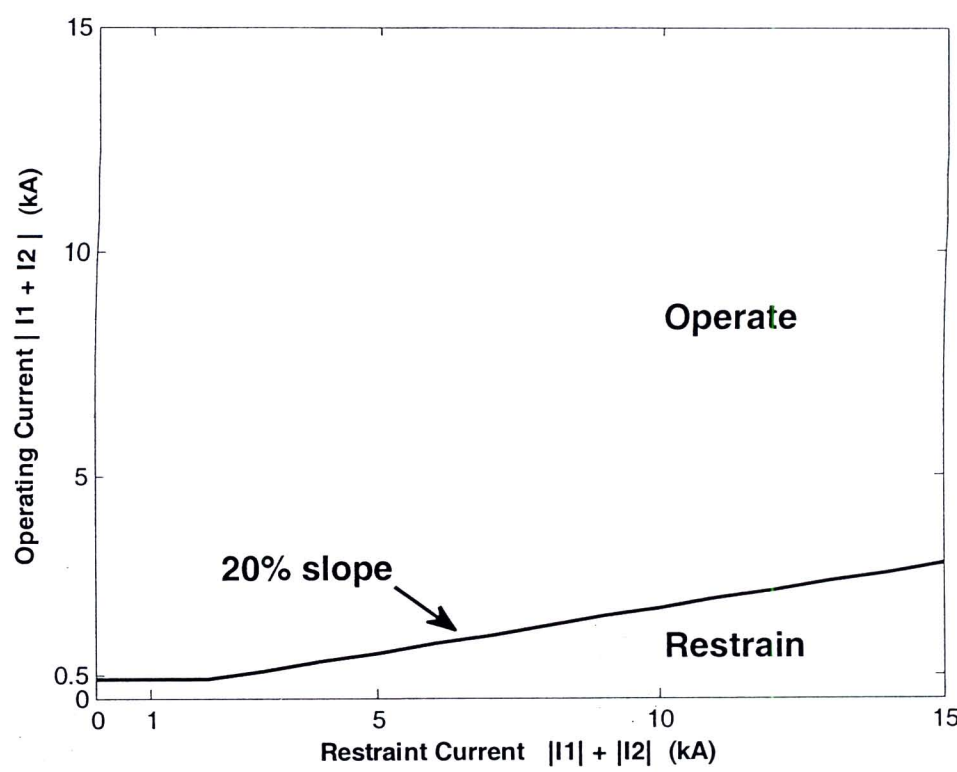
เมื่อได้ทำการออกแบบอัลกอริธึมสำหรับผลลัพธ์ต่างที่มีความคงทนต่อการผิดพลาดของสัญญาณกระแสดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 แล้ว ในขั้นตอนต่อไปคือการทดสอบอัลกอริธึมว่า จะสามารถทำงานได้ถูกต้องหรือไม่ ในการออกแบบการทดสอบจะต้องทำการทดลอง ในหลากหลายกรณีดังแสดงในภาพที่ 4-1



ภาพที่ 4-1 ฟังก์ชันการทดสอบการทำงานของอัลกอริธึม

โดยในการทดสอบจะแบ่งเป็นสามกลุ่มการทดสอบหลัก เพื่อที่จะพิสูจน์ว่าอัลกอริทึมที่ออกแบบมานั้นมีความทนทานต่อการรบกวนของสัญญาณกระแสเล็กน้อยเพียงใด และสามารถตรวจจับความ ผิดพร่องได้หรือไม่ ในกลุ่มแรกจะเป็นการทดสอบโดยใช้สัญญาณจากการจำลองระบบไฟฟ้าด้วยคอมพิวเตอร์ กลุ่มการทดสอบที่สองจะเป็นการทดสอบโดยใช้สัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยใช้หม้อแปลงกระแสจริง ส่วนในกลุ่มการทดสอบสุดท้ายจะเป็นการทดสอบอัลกอริทึมโดยใช้สัญญาณที่เป็นสัญญาณกระแสขณะเกิดเหตุผิดปกติจริงซึ่งบันทึกไว้โดยรีเลย์ป้องกันผลต่าง

การทดสอบแต่ละหัวข้อจะทำการทดสอบอัลกอริทึมของงานวิจัยนี้ โดยรีเลย์มีการสุ่มสัญญาณที่มีความถี่ 6.4 kHz (128 จุดต่อคาบ) และได้รับการตั้งค่าการทำงานดังแสดงในภาพที่ 4-2



ภาพที่ 4-2 คุณลักษณะของรีเลย์ผลต่างที่ทำการทดสอบ

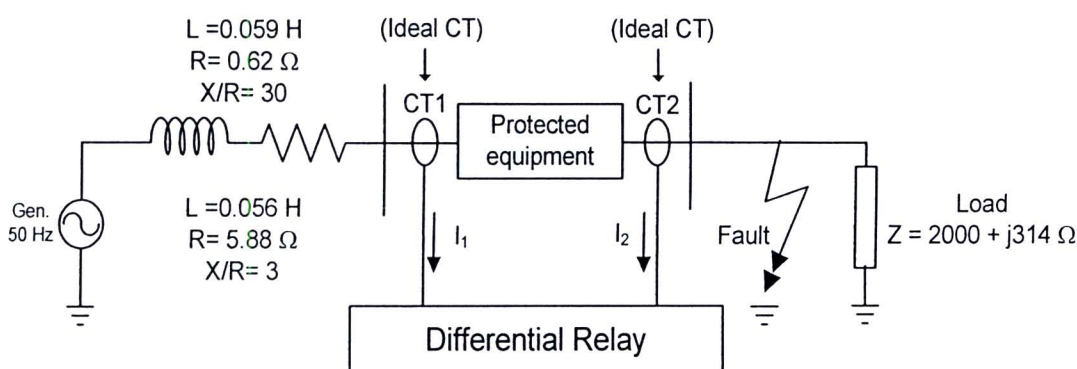
4.1 การทดสอบโดยใช้สัญญาณจากแบบจำลอง

ในการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของอัลกอริทึม จำเป็นต้องนำสัญญาณในหลากหลายสถานการณ์มาทำการทดสอบ แบบจำลองสำหรับทดสอบการป้องกัน สายส่ง หม้อแปลง บัสบาร์ จึงถูกนำมาใช้ในการสร้างสัญญาณทดสอบ แล้วจึงป้อนสัญญาณดังกล่าวให้กับอัลกอริทึมของรีเลย์

ผลต่าง เพื่อทดสอบว่ามีความทนทานต่อการผิดพลาดของสัญญาณกระแสและมีประสิทธิภาพในการตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นภายในเขตป้องกันได้หรือไม่

4.1.1 การทดสอบการทำงานในกรณีที่เกิดความผิดปกติภายนอก หม้อแปลงกระแส CT1 และ CT2 ไม่มีการอิ่มตัว

การทดสอบการทำงานของอัลกอริทึมในหัวข้อนี้จะเป็นการทดสอบในกรณีที่ตำแหน่งของเหตุผิดปกติอยู่ภายนอกเขตป้องกัน (External Fault) ซึ่งรีเลย์จะต้องไม่สั่งตัดวงจร ในหัวข้อการทดสอบนี้ได้ออกแบบการทดสอบโดยใช้ระบบไฟฟ้าดังแสดงในภาพที่ 4-3 ในแบบจำลองจะมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอุดมคติที่มีแรงดัน 115 kV (RMS) ในแต่ละเฟสจะส่งจ่ายไฟฟ้าผ่านตัวเหนี่ยวนำ L ตัวต้านทาน R ซึ่งต่ออนุกรมอยู่กับอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน (Protected Equipment) ซึ่งได้กำหนดค่าของอิมพีแดนซ์ให้มีค่าเป็นศูนย์ แล้วส่งกำลังไฟฟ้าต่อไปที่ภาระซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์ $2000 + j314 \Omega$

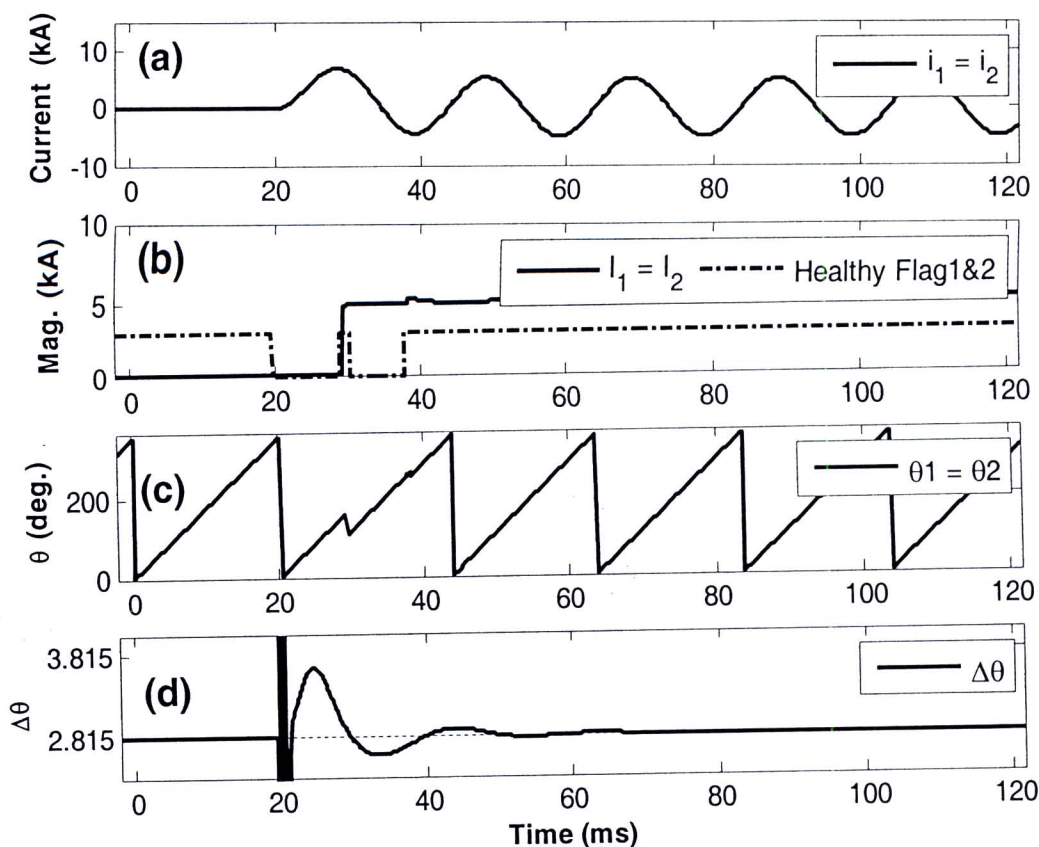


ภาพที่ 4-3 แบบจำลองระบบไฟฟ้าสำหรับการทดสอบอัลกอริทึม

ในกรณีที่ต้องการให้ค่าอัตราส่วน X/R ขณะเกิดความผิดปกติมีค่าเป็น 30 จะกำหนดตัวเหนี่ยวนำ L มีค่าเป็น 59 mH และค่าความต้านทาน R เป็น 0.62Ω ในกรณีที่ต้องการให้ค่าอัตราส่วน X/R ขณะเกิดความผิดปกติมีค่าเป็น 3 จะกำหนดตัวเหนี่ยวนำ L มีค่าเป็น 56 mH และค่าความต้านทาน R เป็น 5.88Ω ทั้งนี้เพื่อควบคุมให้กระแสผิดปกติของทั้งสองกรณีให้มีขนาดที่เท่ากันคือ 5 kA (Peak) ในการทดลองจะกำหนดให้ความผิดปกติที่เกิดขึ้นเป็นความผิดปกติชนิดหนึ่งเฟส (ในหัวข้อการทดสอบนี้จะให้หม้อแปลงกระแส CT1 และหม้อแปลงกระแส CT2 ให้เป็นหม้อแปลงกระแส อุดมคติ ไม่มีการอิ่มตัวของแกน) ในการทดลองจะทำการควบคุมให้มุมขณะเกิดเหตุผิดปกติมีค่าเป็น $0^\circ 30^\circ 60^\circ 90^\circ 120^\circ 150^\circ 180^\circ 210^\circ 240^\circ 270^\circ$ และ 330°

4.1.1.1 การทดลองกรณีค่าอัตราส่วน X/R เป็น 3 และ 30 หม้อแปลงกระแสไม่มีการอิ่มตัว จุดเริ่มเกิดความผิดปกติอยู่ที่มุม 270°

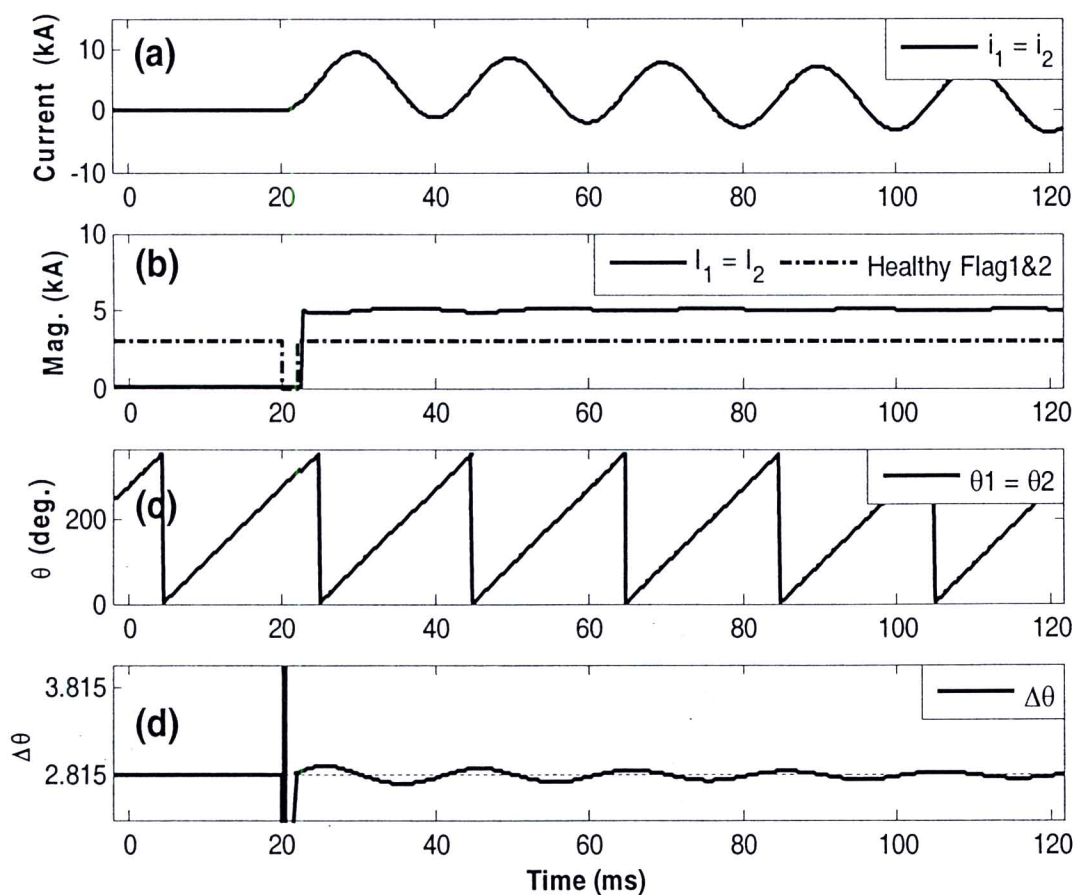
จากการทดลองการเกิดเหตุผิดปกติพร้อมที่มุม 270° กระแสผิดปกติจะมีองค์ประกอบสัญญาณกระแสตรงสูงกว่าที่มุมอื่น ๆ (ในการทดลองควบคุมให้กระแสก่อนเหตุผิดปกติมีขนาดต่ำมาก) หากระบบมีอัตราส่วน X/R สูง ($X/R = 30$) จะส่งผลให้องค์ประกอบสัญญาณกระแสตรงมีอัตราการลดลงที่ช้ากว่ากรณีที่อัตราส่วน X/R ต่ำ ($X/R = 3$) ดังแสดงในภาพที่ 4-4(a) และภาพที่ 4-5(a) ตามลำดับ สำหรับการคำนวณค่าของขนาด (ภาพที่ 4-4(b)) และมุม (ภาพที่ 4-4(c)) ของสัญญาณกระแสนั้นสามารถทำได้อย่างถูกต้อง (กระแสผิดปกติมีขนาด 5 kA) โดยกรณีที่อัตราส่วน X/R เป็น 3 และ 30 สามารถเข้าสู่ค่าของขนาดที่ถูกต้องได้ภายใน 10 และ 2.5 มิลลิวินาทีตามลำดับ ค่าของขนาดและมุมดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในการตัดสินใจของรีเลย์ผลต่าง ภาพที่ 4-6 และภาพที่ 4-7 แสดงผลการทำงานของรีเลย์ผลต่างในการที่อัตราส่วน X/R เป็น 3 และ 30 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าของกระแสทำงาน (Operating Current) นั้นมีค่าเป็นศูนย์ ทั้งนี้เนื่องจากกระแสที่ได้จาก CT1 และ CT2 มีค่าที่เท่ากันเสมอ



ภาพที่ 4-4 ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมในกรณีที่ $X/R = 3$ และมุมเริ่มผิดปกติพร้อมเป็น 270°

ภาพที่ 4-4(b) แสดงผลการคำนวณค่าขนาดของสัญญาณกระแสในกรณีที่อัตราส่วน X/R เป็น 3 และมุมเริ่มเกิดความผิดปกติคือ 270° (ที่เวลาประมาณ 20 มิลลิวินาที) จะเห็นได้ว่า ในช่วงต้นของกระแสผิดปกติ อัลกอริทึมยังตรวจไม่พบสัญญาณคุณภาพดี ทั้งนี้เป็นเพราะอิทธิพล

ขององค์ประกอบกระแสตรงที่มีการลดลงแบบเอ็กโพเนนเชียลส่งผลให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของมุมหรือ $\Delta\theta$ ที่ควรจะเป็น $360/N$ หรือ 2.815° ต่อหนึ่งช่วงการสุมคลาดเคลื่อนไป ซึ่งความคลาดเคลื่อนดังกล่าวจะแปรผันตามค่าความชันของสัญญาณเอ็กโพเนนเชียลและความชันสัญญาณกระแสสลับดังแสดงในภาพที่ 4-4(d) อย่างไรก็ตามความคลาดเคลื่อนของมุมนี้จะมีค่าเป็นศูนย์ ในช่วงเวลาที่สัญญาณกระแสมีความชันเป็นศูนย์ ทำให้อัลกอริทึมสามารถตรวจจับสัญญาณคุณภาพดีได้ ดังจะเห็นว่าในภาพที่ 4-4(b) สัญญาณ Healthy Flag อยู่ในสถานะทำงานในช่วงดังกล่าว สำหรับผลของการคำนวณค่ามุมของสัญญาณกระแสทำได้ถูกต้อง จากการคำนวณพบว่าความผิดพลาดทำให้มุมของกระแสผิดพลาดถึงมุมของกระแสภาระไป 62.13° ซึ่งสอดคล้องกับผลการคำนวณค่ามุมซึ่งแสดงไว้ในภาพที่ 4-4(c) ที่เวลาประมาณ 30 มิลลิวินาที

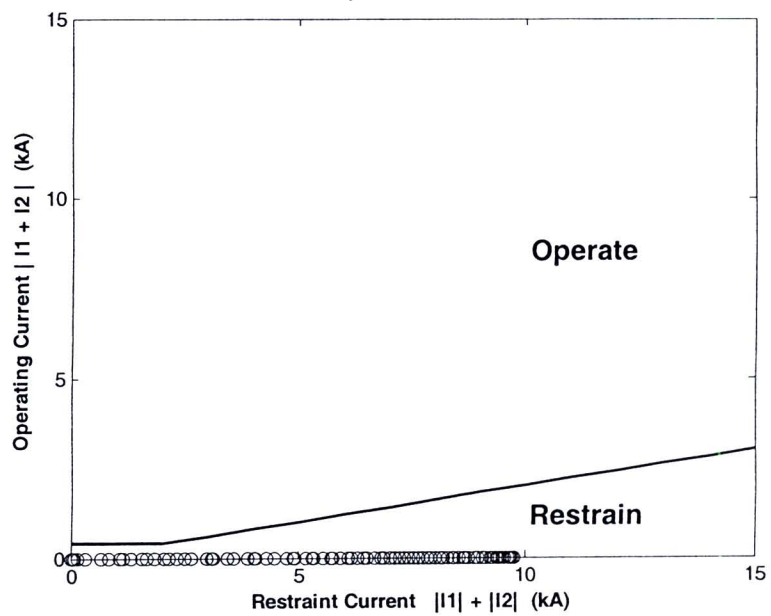


ภาพที่ 4-5 ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมในกรณีที่ $X/R = 30$ และมุมเริ่มผิดพลาดเป็น 270°

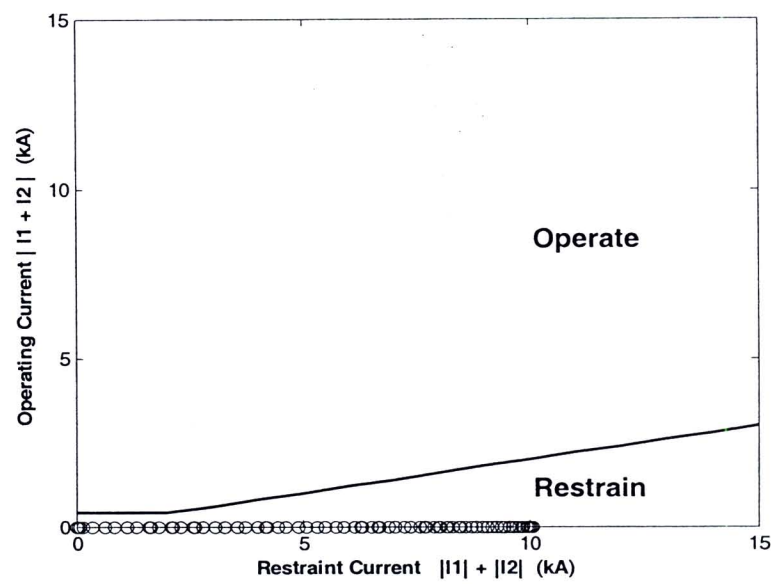
สำหรับกรณีที่อัตราส่วน X/R มีค่าเป็น 30 ดังแสดงในภาพที่ 4-5 นั้น ผลของสัญญาณเอ็กโพเนนเชียลส่งผลกระทบต่อการตรวจจับสัญญาณคุณภาพดีน้อยมากดังจะเห็นได้ว่าในช่วงเริ่มต้นของกระแสผิดพลาด ค่า $\Delta\theta$ จะมีค่าเกือบจะเท่ากับ 2.815° ดังแสดงในภาพที่ 4-5(d) ทั้งนี้

เนื่องจากความชันของสัญญาณเอ็กโพเนนเชียลมีค่าต่ำมากทำให้ความคลาดเคลื่อนของมูมมีน้อยตามไปด้วย สำหรับผลของการคำนวณค่ามูมของสัญญาณกระแสทำได้ถูกต้อง

ภาพที่ 4-6 และ ภาพที่ 4-7 แสดงผลการตัดสินใจของรีเลย์ในกรณีที่อัตราส่วน X/R มีค่าเป็น 3 และ 30 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าจุดตัดสินใจจะอยู่ใต้เส้นตัดสินใจเสมอ ทั้งนี้เพราะกระแสทำงาน (Operating Current) มีค่าเป็นศูนย์ ในขณะที่กระแสต้าน (Restraining Current) จะอยู่ในช่วงประมาณ 0-10 kA (สองเท่าของกระแสผิดพลาด)



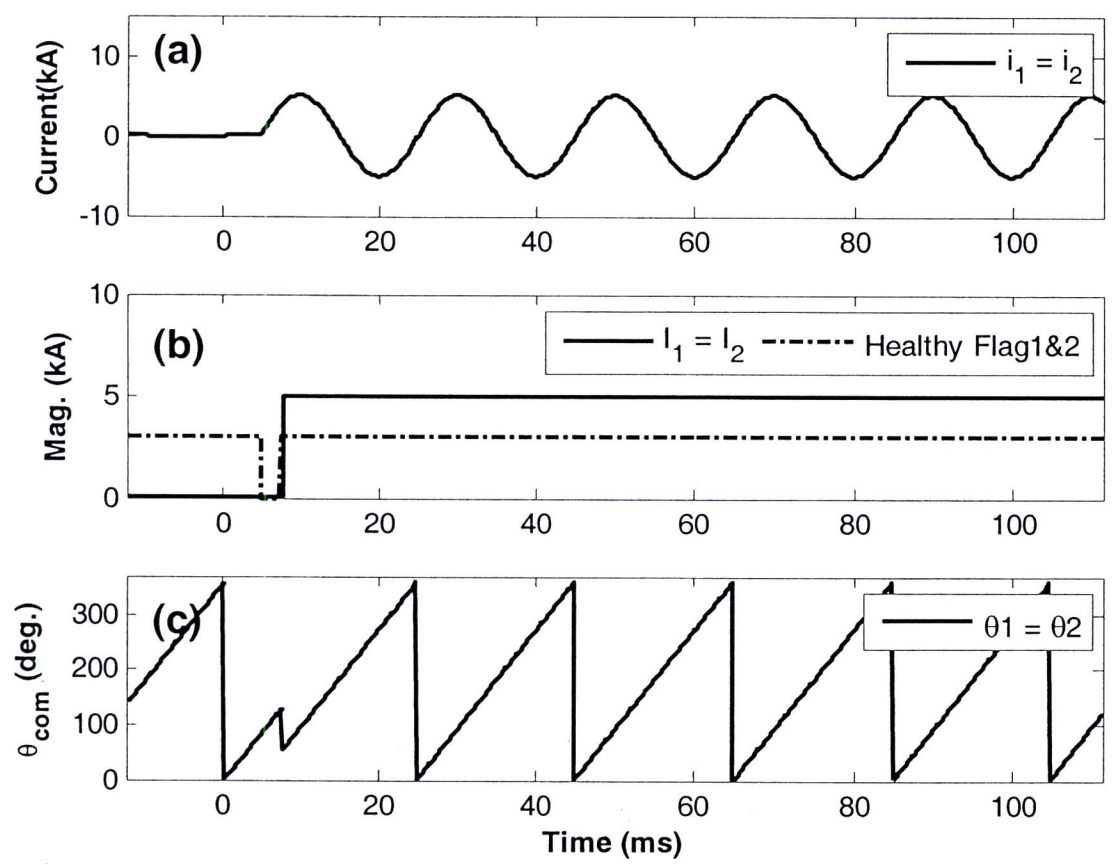
ภาพที่ 4-6 ผลการทำงานของรีเลย์ผลต่างในกรณีที่อัตราส่วน X/R= 3 และมูมเริ่มผิดพลาดเป็น 270°



ภาพที่ 4-7 ผลการทำงานของรีเลย์ผลต่างกรณีที่อัตราส่วน X/R=30 และมูมเริ่มผิดพลาดเป็น 270°

4.1.1.2 การทดลองกรณีจุดเริ่มเกิดความผิดปกติอยู่ที่มุม 0° หม้อแปลงกระแสไม่มีการอิ่มตัว ค่าอัตราส่วน X/R เป็น 30

ในการทดลองกำหนดให้เกิดเหตุผิดปกติที่มุม 0° จะเกิดองค์ประกอบสัญญาณกระแสตรงน้อยมาดั่งแสดงในภาพที่ 4-8(a) ค่าอัตราส่วน X/R ไม่ส่งผลต่อรูปร่างของกระแสผิดปกติ ไม่ว่าค่า X/R จะเป็น 3 หรือ 30 ก็จะทำให้ค่ากระแสผิดปกติที่ไม่ต่างกัน ผลการคำนวณหาค่าขนาดนั้นทำได้อย่างถูกต้อง โดยมีขนาดคงที่ที่ 5 kA ตลอดทั้งขนาดสัญญาณ I_1 และ I_2 สำหรับรายละเอียดผลการทดลองกรณีจุดเริ่มเกิดความผิดปกติที่มุมอื่น ๆ นั้นได้แสดงไว้ดังตารางที่ 4-1



ภาพที่ 4-8 ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมในกรณี $X/R = 30$ และมุมเริ่มผิดปกติเป็น 0°

ตารางที่ 4-1 การทดสอบในกรณีเกิดความผิดปกติภายนอก ไม่มีการอิมตัวของหม้อแปลงกระแส

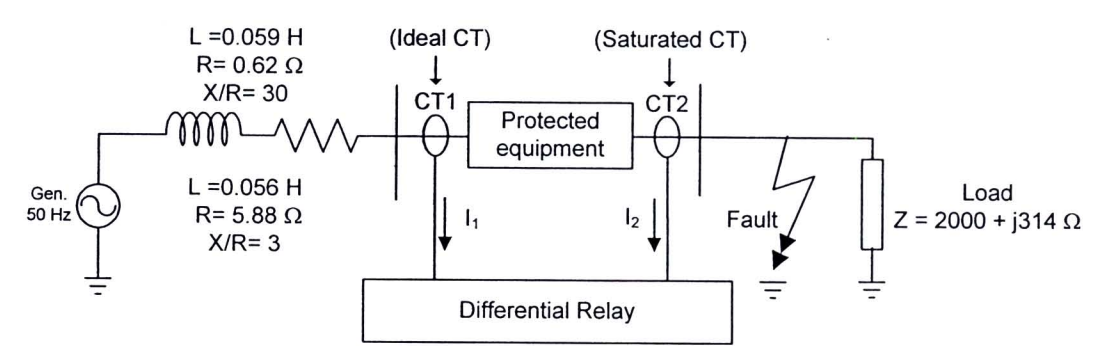
การทดลองที่	ชนิดของความผิดปกติ	การอิมตัวของ CT2	มุมเริ่มเกิดเหตุผิดปกติ	X/R	ผลการทำงาน	
					รีเลย์แบบดั้งเดิม	รีเลย์ของงานวิจัยนี้
1.1.1.1	ภายนอก	ไม่อิมตัว	330	3	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)
1.1.1.2	ภายนอก	ไม่อิมตัว	330	30	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)
1.1.1.3	ภายนอก	ไม่อิมตัว	300	3	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)
1.1.1.4	ภายนอก	ไม่อิมตัว	300	30	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)
1.1.1.5	ภายนอก	ไม่อิมตัว	270	3	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)
1.1.1.6	ภายนอก	ไม่อิมตัว	270	30	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)
1.1.1.7	ภายนอก	ไม่อิมตัว	240	3	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)
1.1.1.8	ภายนอก	ไม่อิมตัว	240	30	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)
1.1.1.9	ภายนอก	ไม่อิมตัว	210	3	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)
1.1.1.10	ภายนอก	ไม่อิมตัว	210	30	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)
1.1.1.11	ภายนอก	ไม่อิมตัว	180	3	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)

ตารางที่ 4-1 (ต่อ)

การทดลองที่	ชนิดของความผิดปกติ	การอึดตัวของ CT2	มุมเริ่มเกิดเหตุผิดปกติ	X/R	ผลการทำงาน	
					รีเลย์แบบดั้งเดิม	รีเลย์ของงานวิจัยนี้
1.1.1.12	ภายนอก	ไม่อึดตัว	150	3	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)
1.1.1.13	ภายนอก	ไม่อึดตัว	150	30	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)
1.1.1.14	ภายนอก	ไม่อึดตัว	120	3	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)
1.1.1.15	ภายนอก	ไม่อึดตัว	120	30	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)
1.1.1.16	ภายนอก	ไม่อึดตัว	90	3	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)
1.1.1.17	ภายนอก	ไม่อึดตัว	90	30	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)
1.1.1.18	ภายนอก	ไม่อึดตัว	60	3	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)
1.1.1.19	ภายนอก	ไม่อึดตัว	60	30	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)
1.1.1.20	ภายนอก	ไม่อึดตัว	30	3	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)
1.1.1.21	ภายนอก	ไม่อึดตัว	30	30	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)
1.1.1.22	ภายนอก	ไม่อึดตัว	0	30	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)

4.1.2 การทดสอบการทำงานในกรณีที่เกิดความผิดปกติภายนอก โดยที่ CT2 มีโอกาสที่จะเกิดการอิ่มตัวขึ้นได้

ในการทดลองนี้จะทำการทดสอบอัลกอริทึม โดยใช้สัญญาณของกระแสผิดปกติภายนอก ในการทดสอบหัวข้อนี้จะกำหนดให้หม้อแปลงกระแส CT2 มีโอกาสที่จะเกิดการอิ่มตัวได้



ภาพที่ 4-9 แบบจำลองระบบไฟฟ้าสำหรับการทดสอบอัลกอริทึม

ในการทดสอบจะจำลองหม้อแปลงกระแส CT2 ให้มีคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Intensity, H) และความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (Flux Density, B) เป็นดังแสดงในภาพที่ 4-10 อีกทั้งยังมีคุณสมบัติอื่น ๆ ดังนี้

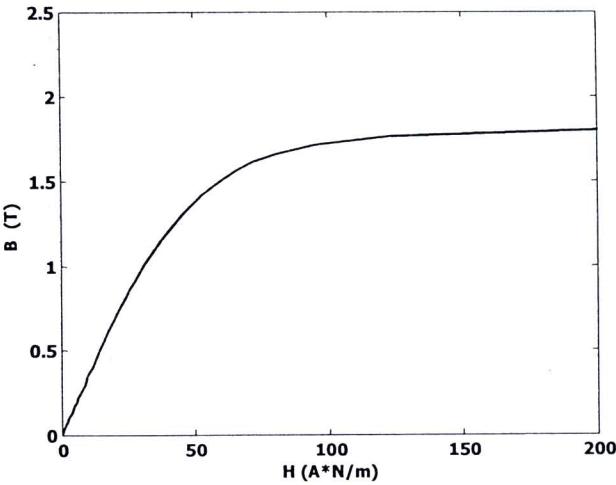
- Ratio = 400/5

พื้นที่หน้าตัด = 26 ตารางเซนติเมตร
- Secondary Resistance = 0.005 mΩ

Secondary Inductance = 0.8 mH
- Burden Resistance = 4 Ω

Burden Inductance = 0.08 mH
- ความยาวทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็ก 63.8 เซนติเมตร

ไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง และ
- ในการทดลองจะควบคุมให้ค่าอัตราส่วน X/R ของระบบไฟฟ้ากำลังมีค่าเป็น 3 และ 30



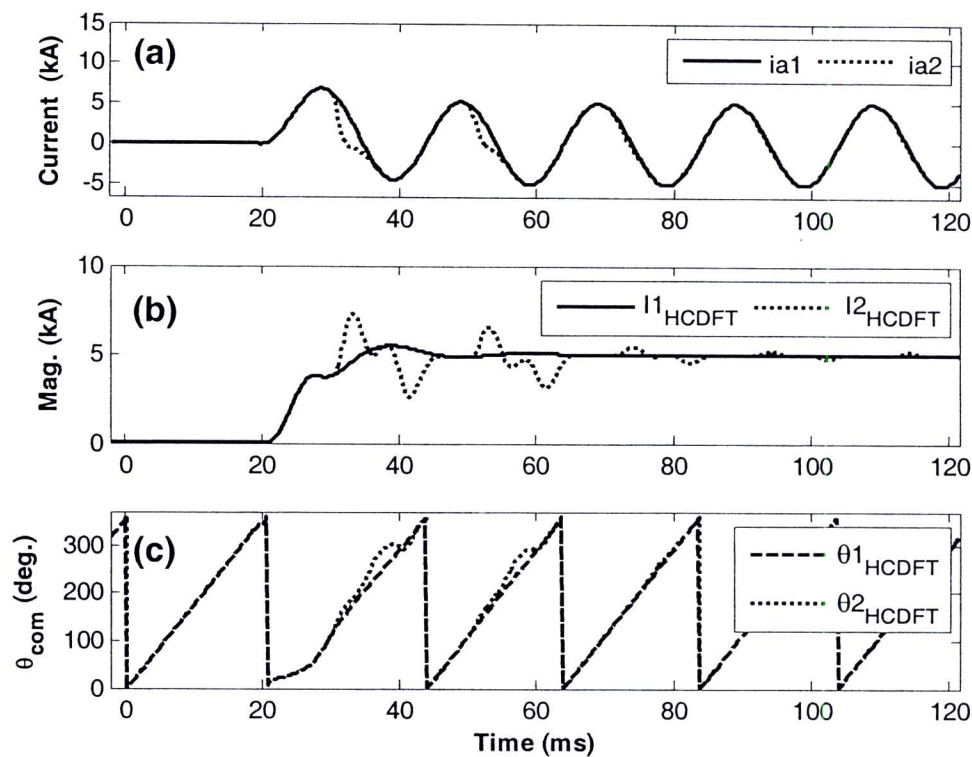
ภาพที่ 4-10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็ก และความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก



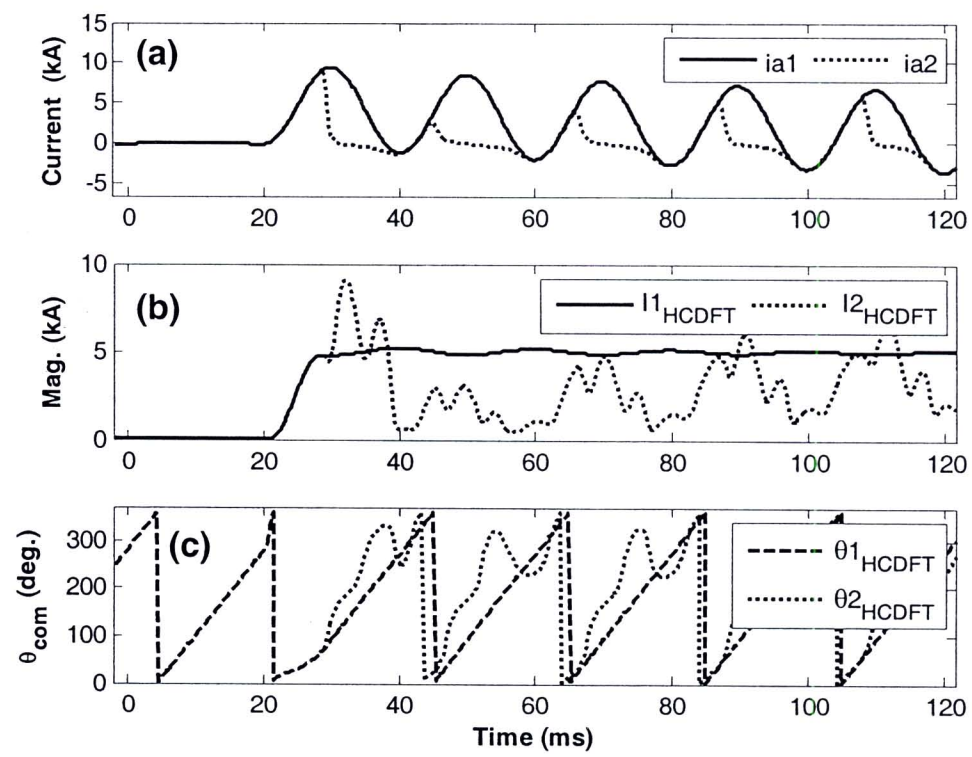
4.1.2.1 การทดลองกรณีที่ค่าอัตราส่วน X/R เป็น 3 และ 30 ตามลำดับ หม้อแปลงกระแส CT2 มีการอิ่มตัว จุดเริ่มเกิดความผิดพร่องอยู่ที่มุม 270° โดยใช้การคำนวณค่าขนาดและมุมแบบ HCDFT

สำหรับการทดลองนี้จะใช้แบบจำลองเหมือนกับการทดลองในหัวข้อ 4.1.1 ทุกประการ จะต่างกันแต่เพียง CT2 นั้นมีโอกาสที่จะเกิดการอิ่มตัวได้ การเกิดการอิ่มตัวของหม้อแปลงนั้นทำให้สัญญาณกระแสที่วัดได้จาก CT1 และ CT2 นั้นมีขนาดไม่เท่ากันในบางช่วงเวลา ดังแสดงในภาพที่ 4-11(a) และ ภาพที่ 4-12(a) การอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแส CT2 จะยังไม่เกิดในทันทีที่เกิดความผิดพร่องขึ้น แต่จะต้องใช้ระยะเวลาครู่หนึ่งแกนของหม้อแปลงกระแสจึงจะเริ่มเกิดการอิ่มตัว ในกรณีที่ค่าสัดส่วน X/R มีค่าเป็น 3 สัญญาณกระแสจะเกิดการผิดเพี้ยนหลังจากที่เกิดความผิดพร่องขึ้นแล้วประมาณ 10 มิลลิวินาที ในขณะที่กรณีของค่าสัดส่วน X/R มีค่าเป็น 30 หม้อแปลงกระแส CT2 จะเกิดการอิ่มตัวเร็วกว่า คือประมาณ 8 มิลลิวินาที หลังจากที่เกิดความผิดพร่องได้เกิดขึ้น และการผิดเพี้ยนของสัญญาณกระแสสำหรับกรณีที่ค่าอัตรา X/R สูง จะมีความผิดเพี้ยนที่รุนแรงกว่า เมื่อเทียบกับกรณีที่ค่าอัตรา X/R มีค่าต่ำ หากอัลกอริทึมในการคำนวณขนาดนั้นเป็นแบบดั้งเดิมซึ่งใช้การแปลงฟูริเยร์ไม่ต่อเนื่องแบบครึ่งคลื่น (Half Cycle Discrete Fourier Transform, HCDFT) ผลการคำนวณขนาดของสัญญาณจะมีค่าความผิดพลาดที่สูง อีกทั้งค่าที่คำนวณได้ก็จะมีกระแสเฟืองสูง ดังแสดงใน ภาพที่ 4-11(b) และ ภาพที่ 4-12(b) โดยเฉพาะค่าขนาดกระแสผิดพร่องในกรณีอัตรา X/R มีค่าเป็น 30 นั้นมีความคลาดเคลื่อนสูงมาก

ภาพที่ 4-11(b) บ่งชี้ว่าการคำนวณค่าขนาดของสัญญาณกระแสด้วยวิธีการแปลงฟูริเยร์ไม่ต่อเนื่องแบบครึ่งคลื่น (HCDFT) นั้นมีความอ่อนไหวต่อสัญญาณที่ไม่ใช่สัญญาณไซนัสชอยด์ที่มีความถี่ 50 Hz แม้สัญญาณกระแสที่ได้จากการตรวจวัดของหม้อแปลงกระแสจาก CT1 จะไม่มีการอิ่มตัว โดยจะเห็นว่าในช่วงเวลาที่มีสัญญาณกระแสตรงที่มีลักษณะเป็นเอ็กโพเนนเชียลผสมอยู่ ผลลัพธ์ของการคำนวณค่าของขนาดสัญญาณกระแสซึ่งควรที่จะเป็นค่าคงที่ขนาด 5 kA กลับมีการกระแสเฟืองที่ค่อนข้างสูง และมุมของสัญญาณที่ควรจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงที่มีความชัน 2.815° ต่อหนึ่งช่วงการสุ่ม แต่ผลการคำนวณกลับกลายเป็นเส้นโค้งในช่วง 20-30 มิลลิวินาที ดังแสดงในภาพที่ 4-11(c) สำหรับการคำนวณค่าขนาดและมุมของสัญญาณกระแสที่ได้จากหม้อแปลงกระแส CT2 ก็มีความผิดพลาดเช่นกัน สำหรับช่วงที่หม้อแปลงกระแสมีการอิ่มตัวนั้นจะมีความคลาดเคลื่อนของการคำนวณค่าขนาดและมุมสูงมากแต่ยังพอคาดเดาจากการมองได้ว่าขนาดของกระแสที่ถูกต้องน่าจะเป็น 5 kA แต่สำหรับกรณีที่อัตราส่วน X/R เป็น 30 นั้น CT2 เกิดการอิ่มตัวอย่างรุนแรง การคำนวณค่าขนาดและมุมมีการผิดเพี้ยนอย่างรุนแรงจนไม่สามารถคาดเดาด้วยสายตาได้ว่ากระแสผิดพร่องมีขนาดและมุมเท่าใด ดังแสดงในภาพที่ 4-12(b) และภาพที่ 4-12(c) ตามลำดับ

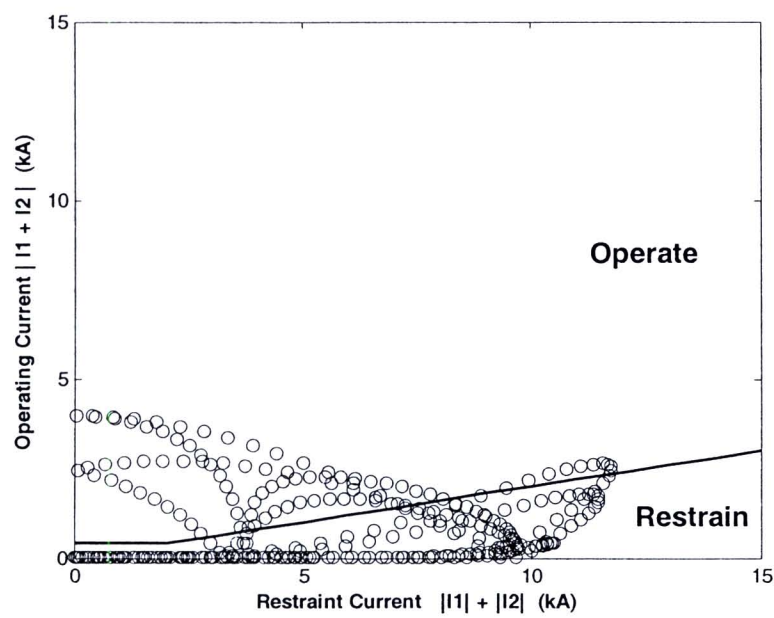


ภาพที่ 4-11 การคำนวณค่าขนาดและมุมด้วยวิธี HCDFT ในกรณีที่ $X/R = 3$

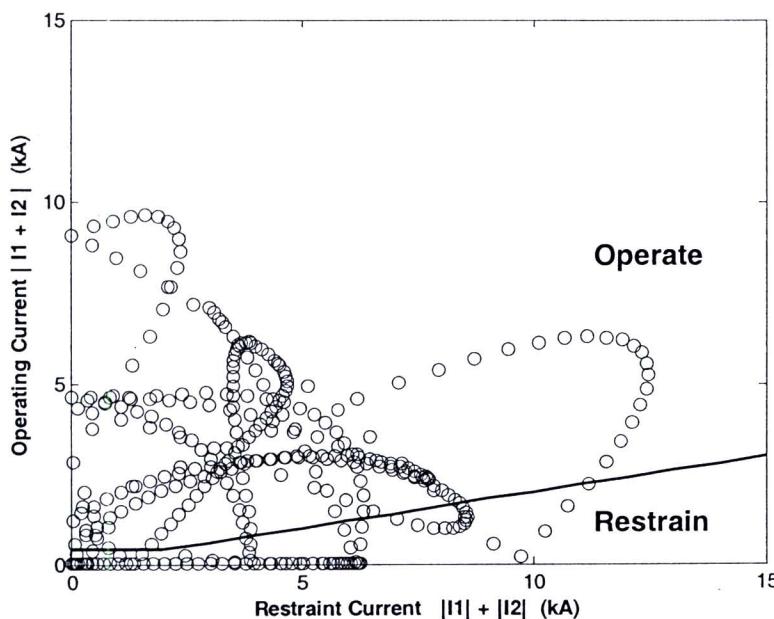


ภาพที่ 4-12 การคำนวณค่าขนาดและมุมด้วยวิธี HCDFT ในกรณีที่ $X/R = 30$

เนื่องจากผลการคำนวณขนาดและมุมเกิดความผิดพลาดอย่างสิ้นเชิงดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ความผิดพลาดดังกล่าวจะส่งผลให้กระแสทำงาน (Operating Current) มีค่าสูงเนื่องจากผล การคำนวณขนาดของกระแสจาก CT1 และ CT2 นั้นไม่เท่ากัน ส่งผลให้จุดตัดสินใจอยู่ในตำแหน่ง ที่สูงกว่าเส้นตัดสินใจ และทิศทางการวิ่งของจุดตัดสินใจจะมีทิศทางที่ไม่แน่นอนเนื่องจากผล การคำนวณของมุนนั้นมีการผิดพลาดสูงดังแสดงในภาพที่ 4-13 และ ภาพที่ 4-14



ภาพที่ 4-13 การตัดสินใจตัดวงจรของรีเลย์ผลต่างที่คำนวณด้วยวิธี HCDFT ในกรณี X/R =3

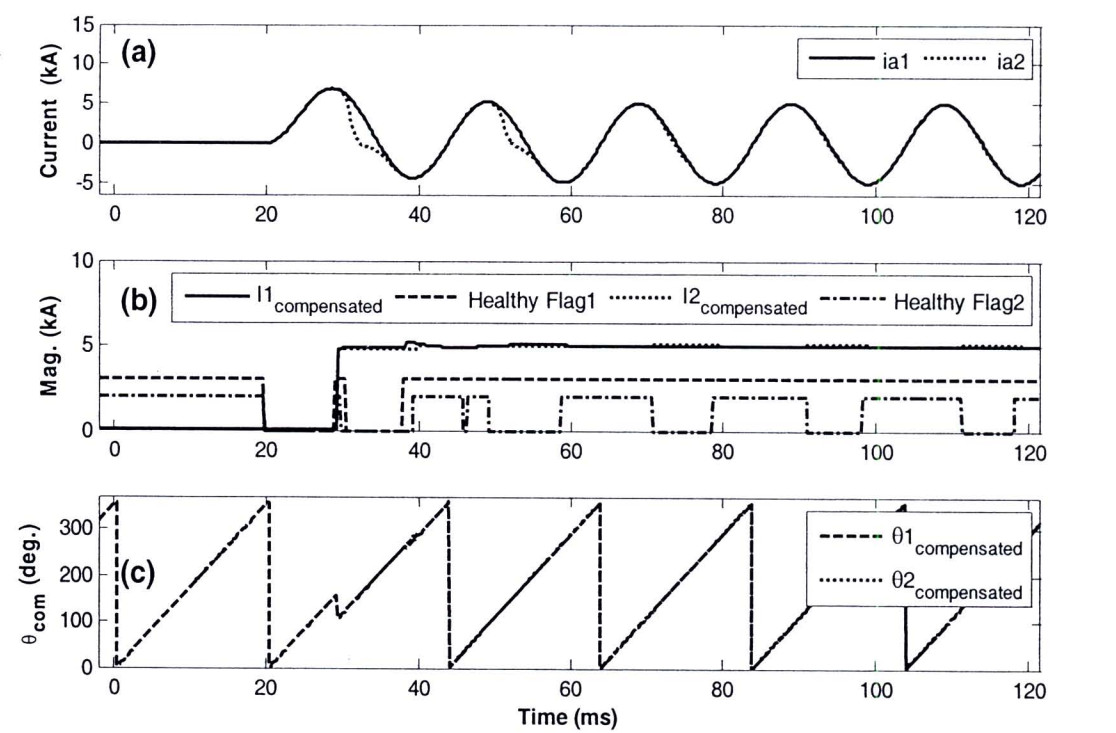


ภาพที่ 4-14 การตัดสินใจตัดวงจรของรีเลย์ผลต่างที่คำนวณด้วยวิธี HCDFT ในกรณี X/R =30

4.1.2.2 การทดลองกรณีที่ค่าอัตราส่วน X/R เป็น 3 และ 30 ตามลำดับ หม้อแปลงกระแส CT2 มีการอิ่มตัว จุดเริ่มเกิดความผิดปรongอยู่ที่มุม 270° โดยใช้อัลกอริธึมที่งานวิจัยนี้นำเสนอ

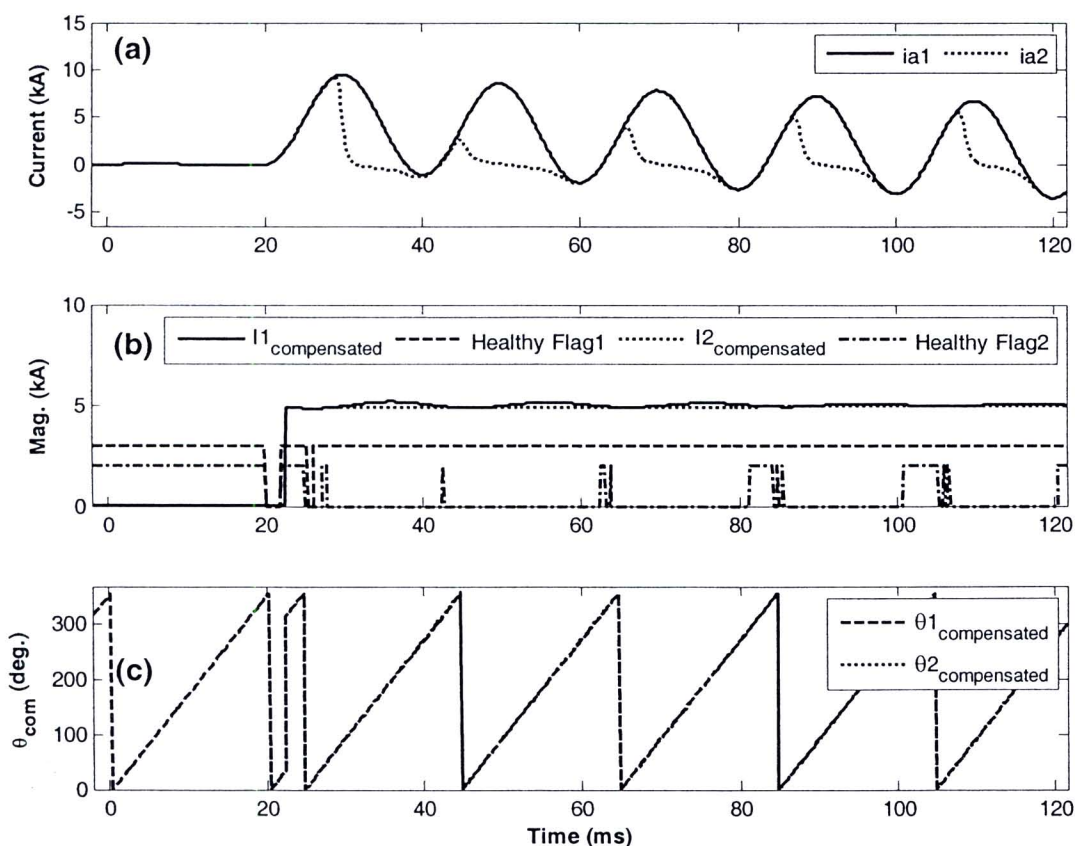
สำหรับการคำนวณค่าขนาดและมุมด้วยอัลกอริธึมที่งานวิจัยนี้เสนอนั้น สามารถทำได้ อย่างถูกต้อง แม้จะมีการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสอย่างรุนแรง ผลของการคำนวณค่าขนาดของ สัญญาณกระแสก็ยังคงอยู่ที่ 5 kA เหมือนดังที่ควรจะเป็น ดังแสดงในภาพที่ 4-15(b) การกระเพื่อม ของสัญญาณขนาดมีเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการคำนวณด้วยวิธีแบบดั้งเดิม (HCDFE)

ภาพที่ 4-15 เป็นผลของการคำนวณค่าขนาดและมุมด้วยวิธีของงานวิจัยนี้ ในกรณีที่ X/R = 3 โดยสัญญาณ Healthy Flag2 ในภาพที่ 4-15(b) เป็นตัวบ่งชี้ว่าสัญญาณกระแสจากหม้อแปลงกระแส CT2 ช่วงใดที่สามารถนำไปใช้ในการตัดสินใจของรีเลย์ได้ โดยจะเห็นว่าสัญญาณ Healthy Flag2 นี้ จะอยู่ในสภาวะทำงานเฉพาะช่วงที่สัญญาณกระแส CT2 ไม่มีการอิ่มตัวเท่านั้น สำหรับสัญญาณ Healthy Flag1 ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้คุณภาพของสัญญาณกระแสที่ได้จากหม้อแปลงกระแส CT1 ว่า ช่วงเวลาใดมีคุณภาพดี เนื่องจากอิทธิพลของสัญญาณเอ็กโพเนนเชียลดังที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อ ก่อนหน้า สัญญาณ Healthy Flag1 จะเริ่มอยู่ในสภาวะทำงานในจังหวะที่ความชันของสัญญาณ กระแสเป็นศูนย์ หลังจากผ่านคาบสัญญาณแรกไป สัญญาณ Healthy Flag1 นั้นจะอยู่ในสภาวะ ทำงานเสมอ เนื่องจากสัญญาณจากหม้อแปลงกระแส CT1 ไม่มีการผิดเพี้ยน



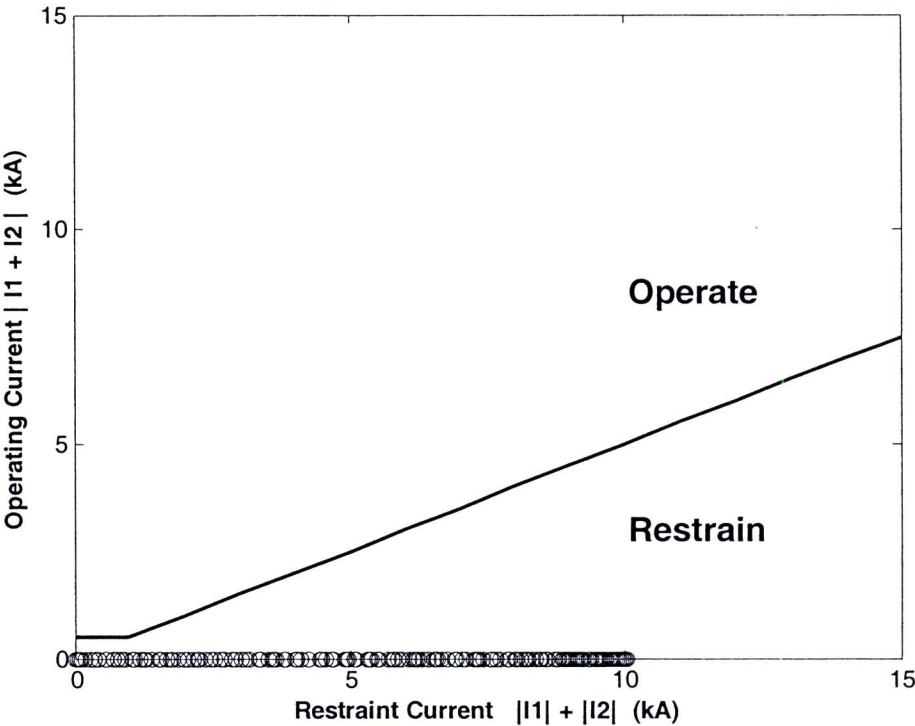
ภาพที่ 4-15 การคำนวณค่าขนาดและมุมด้วยวิธีของงานวิจัยนี้ ในกรณีที่ X/R = 3

ภาพที่ 4-16 เป็นผลของการคำนวณค่าขนาดและมุมด้วยวิธีของงานวิจัยนี้ ในกรณีที่อัตราส่วน $X/R = 30$ โดยสัญญาณ Healthy Flag2 ในภาพที่ 4-15(b) เป็นตัวบ่งชี้ว่าสัญญาณกระแสจากหม้อแปลงกระแส CT2 ช่วงใดที่สามารถนำไปใช้ในการตัดสินใจของรีเลย์ได้ โดยจะเห็นว่าสัญญาณ Healthy Flag2 นี้จะอยู่ในสถานะทำงานในช่วงที่แคบกว่ากรณีที่อัตราส่วน $X/R = 3$ เนื่องจากสัญญาณกระแสที่ได้จากหม้อแปลงกระแส CT2 นั้นมีการผิดเพี้ยนที่รุนแรงกว่ามาก อย่างไรก็ตาม อัลกอริทึมก็ยังสามารถตรวจจับสัญญาณคุณภาพดีได้ในทุก ๆ คาบของสัญญาณกระแส สำหรับผลการคำนวณค่าขนาดและมุมของสัญญาณกระแสทั้งจากหม้อแปลงกระแส CT1 และ CT2 นั้นทำได้ถูกต้องดังแสดงในภาพที่ 4-16(b) และภาพที่ 4-16(c)

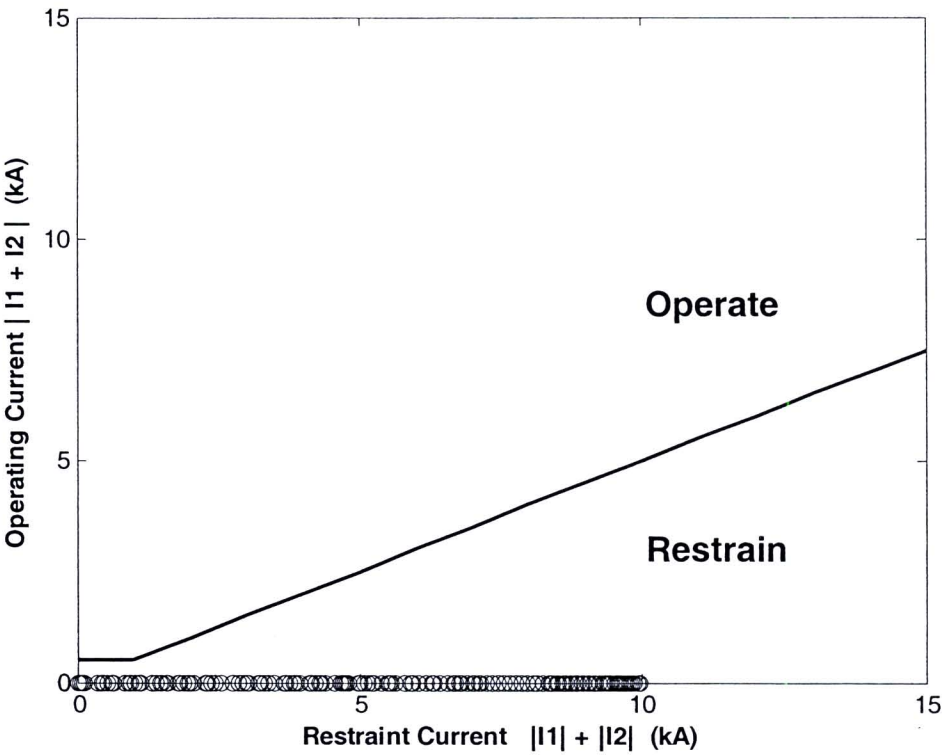


ภาพที่ 4-16 การคำนวณค่าขนาดและมุมด้วยวิธีของงานวิจัยนี้ ในกรณีที่ $X/R = 30$

ผลการตัดสินใจของรีเลย์ผลต่างในกรณีที่อัตราส่วน X/R เป็น 3 และ 30 นั้นทำได้ถูกต้องเช่นกัน คือ ไม่มีการสั่งเปิดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ เนื่องจากค่าของกระแสทำงาน (Operating Current) มีค่าต่ำมาก จุดตัดสินใจจึงอยู่ต่ำกว่าเส้นตัดสินใจเสมอ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4-17 และภาพที่ 4-18 ตามลำดับ สำหรับผลการทดลองของการเกิดความผิดพลาดที่มุมอื่น ๆ นั้นได้แสดงไว้ในตารางที่ 4-2



ภาพที่ 4-17 การตัดสินใจตัดวงจรของรีเลย์ผลต่างที่คำนวณด้วยวิธีของงานวิจัยนี้ในกรณีที่ $X/R = 3$



ภาพที่ 4-18 การตัดสินใจตัดวงจรของรีเลย์ผลต่างที่คำนวณด้วยวิธีของงานวิจัยนี้ในกรณีที่ $X/R=30$

ตารางที่ 4-2 การทดสอบในกรณีเกิดความผิดปกติภายนอกและมีการอึดตัวของหม้อแปลงกระแส

การทดลองที่	ชนิดของความผิดปกติ	การอึดตัวของ CT2	มุมเริ่มเกิดเหตุผิดปกติ	X/R	ผลการทำงาน	
					รีเลย์ดั้งเดิม (HCDFE)	รีเลย์ของงานวิจัยนี้
1.1.2.1	ภายนอก	มีการอึดตัว	330	3	ผิดปกติ (สั่งตัดวงจร)	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)
1.1.2.2	ภายนอก	มีการอึดตัว	330	30	ผิดปกติ (สั่งตัดวงจร)	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)
1.1.2.3	ภายนอก	มีการอึดตัว	300	3	ผิดปกติ (สั่งตัดวงจร)	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)
1.1.2.4	ภายนอก	มีการอึดตัว	300	30	ผิดปกติ (สั่งตัดวงจร)	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)
1.1.2.5	ภายนอก	มีการอึดตัว	270	3	ผิดปกติ (สั่งตัดวงจร)	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)
1.1.2.6	ภายนอก	มีการอึดตัว	270	30	ผิดปกติ (สั่งตัดวงจร)	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)
1.1.2.7	ภายนอก	มีการอึดตัว	240	3	ผิดปกติ (สั่งตัดวงจร)	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)
1.1.2.8	ภายนอก	มีการอึดตัว	240	30	ผิดปกติ (สั่งตัดวงจร)	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)
1.1.2.9	ภายนอก	ไม่มีการอึดตัว	210	3	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)
1.1.2.10	ภายนอก	มีการอึดตัว	210	30	ผิดปกติ (สั่งตัดวงจร)	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)
1.1.2.11	ภายนอก	ไม่มีการอึดตัว	180	30	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)

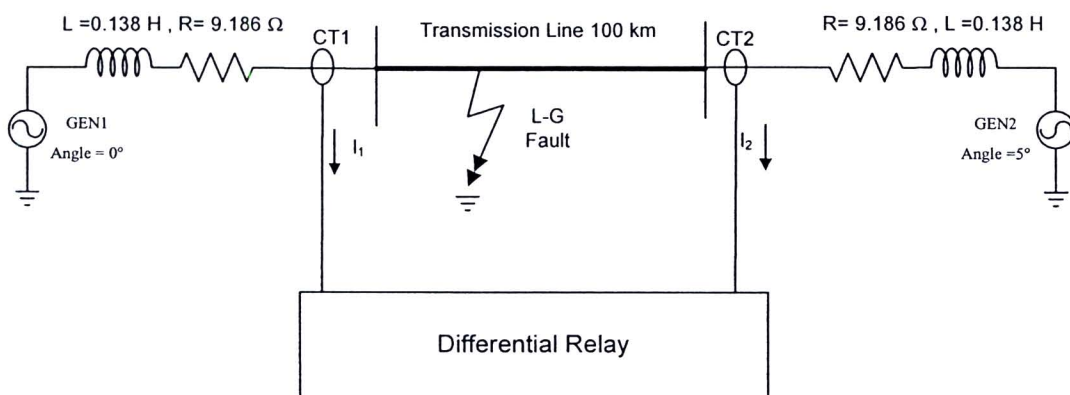
ตารางที่ 4-2 (ต่อ)

การทดลอง ที่	ชนิดของ ความ ผิดปกติ	การอิมตัว ของ CT2	มุมเริ่มเกิด เหตุ ผิดปกติ	X/R	ผลการทำงาน	
					รีเลย์ดั้งเดิม (HCDFT)	รีเลย์ของ งานวิจัยนี้
1.1.2.12	ภายนอก	มีการอิมตัว	150	3	ผิดปกติ (สั่งตัดวงจร)	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)
1.1.2.13	ภายนอก	มีการอิมตัว	150	30	ผิดปกติ (สั่งตัดวงจร)	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)
1.1.2.14	ภายนอก	มีการอิมตัว	120	3	ผิดปกติ (สั่งตัดวงจร)	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)
1.1.2.15	ภายนอก	มีการอิมตัว	120	30	ผิดปกติ (สั่งตัดวงจร)	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)
1.1.2.16	ภายนอก	มีการอิมตัว	90	3	ผิดปกติ (สั่งตัดวงจร)	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)
1.1.2.17	ภายนอก	มีการอิมตัว	90	30	ผิดปกติ (สั่งตัดวงจร)	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)
1.1.2.18	ภายนอก	มีการอิมตัว	60	3	ผิดปกติ (สั่งตัดวงจร)	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)
1.1.2.19	ภายนอก	มีการอิมตัว	60	30	ผิดปกติ (สั่งตัดวงจร)	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)
1.1.2.20	ภายนอก	ไม่มีการ อิมตัว	30	3	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)
1.1.2.21	ภายนอก	มีการอิมตัว	30	30	ผิดปกติ (สั่งตัดวงจร)	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)
1.1.2.22	ภายนอก	ไม่มีการ อิมตัว	0	30	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)	ถูกต้อง (ไม่ตัดวงจร)

4.1.3 การทดสอบการทำงานในกรณีของการเกิดเหตุผิดปกติภายในที่สายส่ง

ในหัวข้อการทดสอบนี้จะทำการทดสอบอัลกอริทึมโดยใช้สัญญาณกระแสที่ได้จากแบบจำลองคอมพิวเตอร์ที่กำหนดให้เกิดเหตุผิดปกติชนิดหนึ่งเฟสลงดินที่สายส่งไฟฟ้าแรงสูง ดังแสดงในภาพที่ 4-19 ซึ่งประกอบด้วยสายส่งยาว 100 km ที่ปลายทั้งสองด้านของสายส่งจะต่ออยู่กับเครื่อง

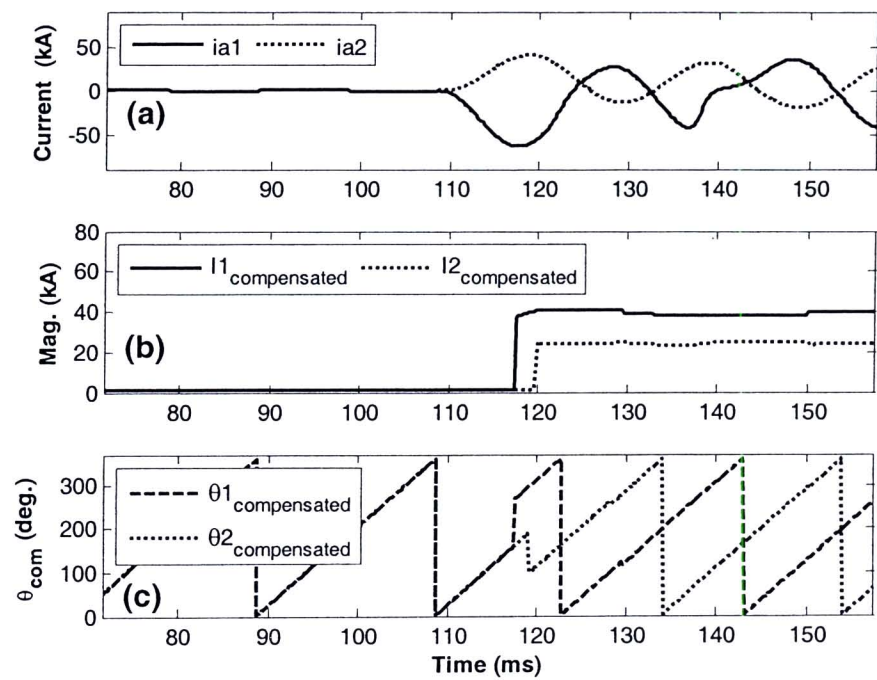
กำเนิดไฟฟ้าที่มีค่าความเหนี่ยวนำและค่าความต้านทานเป็น 0.138H และ $9.186\ \Omega$ ตามลำดับ โดยกำหนดให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองตัวมีแรงดัน 230kV และแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า GEN2 มีมุมนำหน้า GEN1 อยู่ 5° กำหนดให้ความผิดพลาดที่เกิดที่ระยะ 10 20 30 40 50 60 70 80 และ 90 กิโลเมตรจากทางซ้าย แล้วนำสัญญาณกระแสที่ได้จากการตรวจวัดโดยหม้อแปลงกระแส CT1 และ CT2 ป้อนให้กับรีเลย์ผลต่างซึ่งใช้อัลกอริทึมของงานวิจัยนี้เพื่อตรวจสอบว่าอัลกอริทึมทำงานได้ถูกต้องหรือไม่ โดยในการทดลองจะกำหนดให้ทั้ง CT1 และ CT2 สามารถมีการอิ่มตัวได้



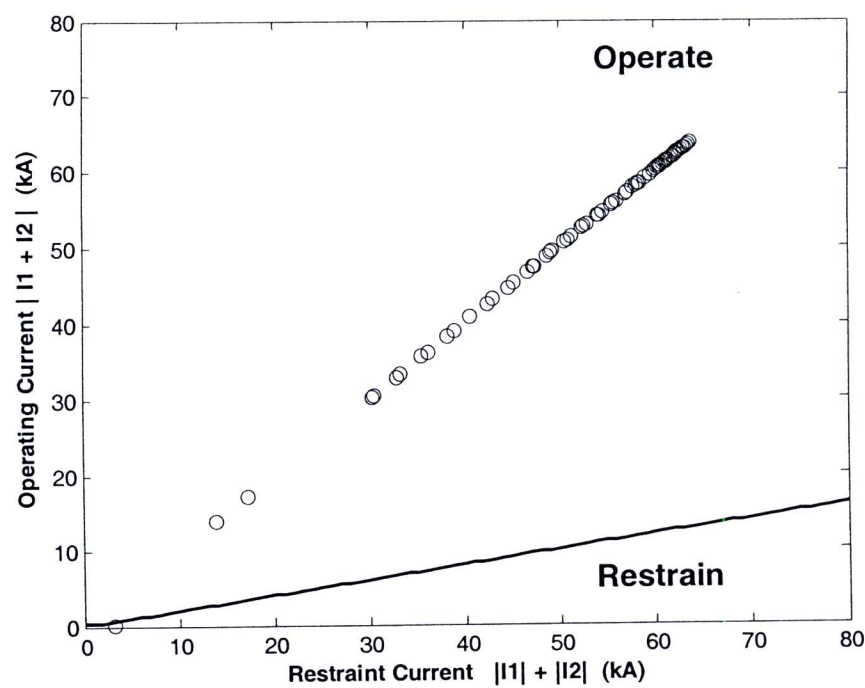
ภาพที่ 4-19 แบบจำลองของระบบที่เกิดเหตุผิดพลาดที่สายส่ง

4.1.3.1 เหตุผิดพลาดเกิดขึ้นบนสายส่งที่ระยะ 20 กิโลเมตร

ในการทดลองนี้กำหนดให้ความผิดพลาดเกิดขึ้นที่ระยะ 20 กิโลเมตรจากทางซ้ายส่งผลให้เกิดกระแสผิดพลาดขึ้นดังแสดงในภาพที่ 4-20(a) จะเห็นได้ว่ากระแสที่ตรวจวัดได้จากหม้อแปลงกระแส CT1 นั้นจะมีขนาดที่สูงกว่าสัญญาณกระแสที่ตรวจวัดได้จากหม้อแปลงกระแส CT2 ทั้งนี้เป็นเพราะความผิดพลาดนั้นอยู่ใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า GEN1 มากกว่า GEN2 กระแสที่สูงดังกล่าวส่งผลให้แกนของหม้อแปลงกระแส CT1 เกิดการอิ่มตัว ผลของการคำนวณหาค่าขนาดของสัญญาณกระแสทั้งสองนั้นทำได้ถูกต้องดังแสดงในภาพที่ 4-20(b) โดยสัญญาณกระแสที่ตรวจวัดได้จาก CT1 นั้นมีขนาดประมาณ 40 kA ในขณะที่ สัญญาณกระแสที่ตรวจวัดได้จาก CT2 นั้นมีขนาดประมาณ 25 kA มุมของสัญญาณกระแสที่ตรวจวัดได้จากหม้อแปลงกระแส CT1 ล้าหลัง CT2 อยู่ประมาณ 160° ดังที่ได้แสดงไว้ในภาพที่ 4-20(c) อัลกอริทึมของรีเลย์ผลต่างที่งานวิจัยนี้นำเสนอสามารถตรวจจับเหตุผิดพลาดได้ถูกต้องดังแสดงผลการตรวจจับเหตุผิดพลาดไว้ดังภาพที่ 4-21 โดยจุดตัดสินใจที่เกิดขึ้นนั้นจะเรียงตัวกันเป็นเส้นตรงที่มีความชันประมาณ 100% โดยระยะเวลาที่ใช้ในการตรวจจับเหตุผิดพลาดซึ่งเริ่มนับจากจุดเริ่มเกิดเหตุผิดพลาด ใช้เวลา 9.7 มิลลิวินาที



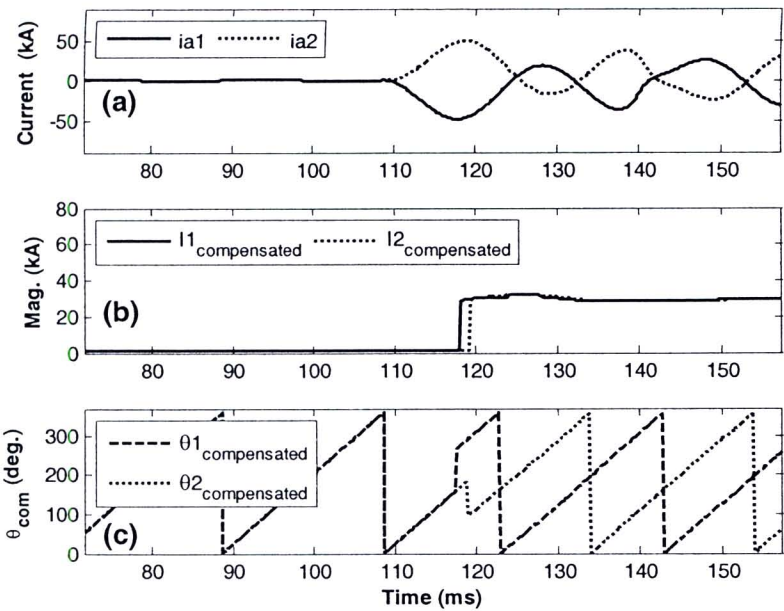
ภาพที่ 4-20 การคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสผิดพลาดบนสายส่งที่ระยะ 20 km



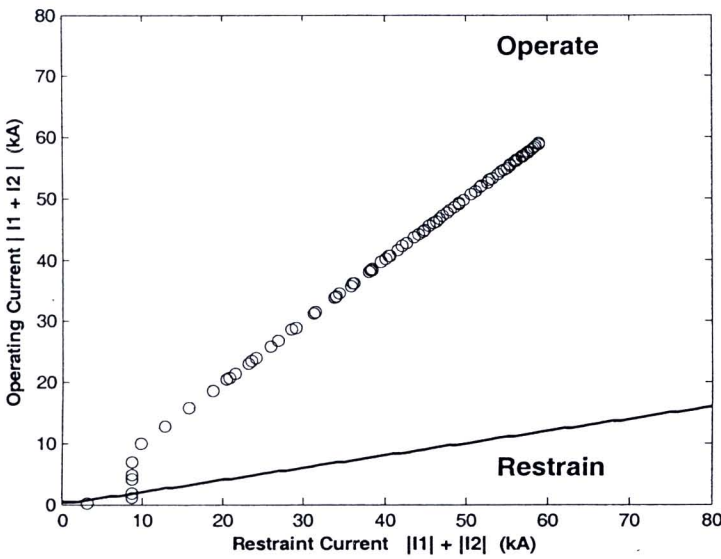
ภาพที่ 4-21 การตัดสินใจของรีเลย์กรณีที่เกิดความผิดพลาดบนสายส่งที่ระยะ 20 km

4.1.3.2 การทดสอบอัลกอริทึมของรีเลย์ในกรณีที่เหตุผิดปกติเกิดขึ้นบนสายส่งที่ระยะ 50 กิโลเมตร

สำหรับการทดลองนี้กำหนดให้ความผิดปกติเกิดขึ้นที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสายส่งพอดี ส่งผลให้สัญญาณกระแสที่ตรวจวัดได้จากหม้อแปลงกระแส CT1 และCT2 นั้นมีขนาดเท่ากันพอดี แต่มีทิศทางตรงข้ามกันดังแสดงในภาพที่ 4-22 และการตัดสินใจสั่งปลดวงจรนั้นทำได้ถูกต้อง ดังแสดงในภาพที่ 4-23 อัลกอริทึมใช้เวลาในการตรวจจับ 9.4 มิลลิวินาทีในการตัดสินใจ



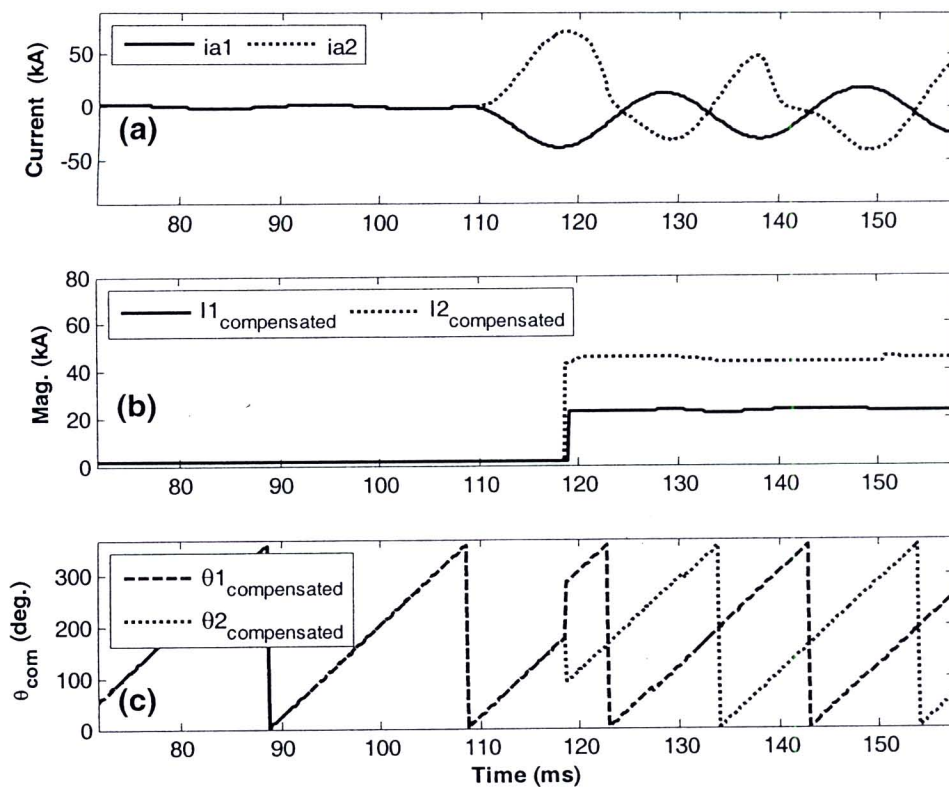
ภาพที่ 4-22 การคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสผิดปกติบนสายส่งที่ระยะ 50 km



ภาพที่ 4-23 การตัดสินใจของรีเลย์กรณีที่เกิดความผิดปกติบนสายส่งที่ระยะ 50 km

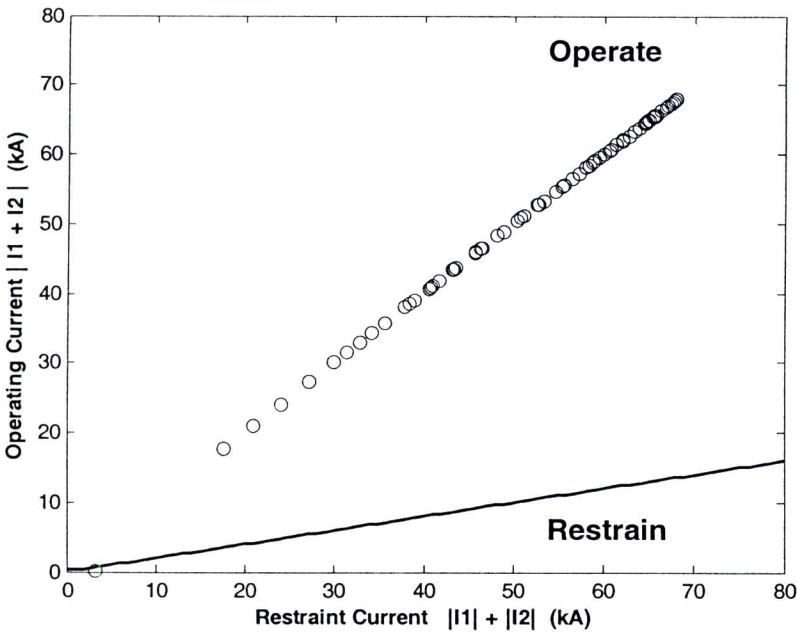
4.1.3.3 การทดสอบอัลกอริทึมของรีเลย์ในกรณีที่เหตุผิดปกติเกิดขึ้นบนสายส่งที่ระยะ 90 กิโลเมตร

ในการทดลองนี้กำหนดให้ความผิดปกติเกิดขึ้นที่ระยะ 90 กิโลเมตรจากทางซ้าย ส่งผลให้เกิดกระแสผิดปกติขึ้นดังแสดงในภาพที่ 4-24(a) จะเห็นได้ว่ากระแสที่ตรวจวัดได้จาก CT2 นั้นจะมีขนาดที่สูงกว่าสัญญาณกระแสที่ตรวจวัดได้จาก CT1 ทั้งนี้เป็นเพราะความผิดปกตินั้นอยู่ใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า GEN2 มากกว่า กระแสที่สูงดังกล่าวส่งผลให้แกนของหม้อแปลงกระแส CT2 เกิดการอิ่มตัว ผลของการคำนวณหาขนาดของสัญญาณกระแสทั้งสองนั้นทำได้อย่างถูกต้องโดยกระแสที่วัดได้จากหม้อแปลงกระแส CT1 และ CT2 มีขนาด 23 kA และ 44 kA ตามลำดับดังแสดงในภาพที่ 4-24(b) และมุมของสัญญาณกระแสที่ตรวจวัดได้จาก CT1 และ CT2 นั้นจะมีมุมต่างกันประมาณ 160° ดังที่ได้แสดงไว้ในภาพที่ 4-24(c)



ภาพที่ 4-24 การคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสผิดปกติบนสายส่งที่ระยะ 90 km

อัลกอริทึมของรีเลย์ผลต่างที่งานวิจัยนี้นำเสนอสามารถตรวจจับเหตุผิดปกติได้ถูกต้องโดยจุดตัดสินใจนั้นอยู่ในตำแหน่งที่อยู่เหนือเส้นตัดสินใจ โดยแต่ละจุดจะเรียงตัวกันเป็นเส้นตรงที่มีความชันเกือบ 100% ดังแสดงผลการตรวจจับเหตุผิดปกติไว้ในภาพที่ 4-25 โดยระยะเวลาที่ใช้ในการตรวจจับเหตุผิดปกติ 9.1 มิลลิวินาที



ภาพที่ 4-25 การตัดสินใจตัดวงจรของรีเลย์ผลต่างในกรณีที่เกิดความผิดปกติบนสายส่ง
ที่ระยะ 90 km

สำหรับผลการทดลองในกรณีที่ความผิดปกติเกิดที่จุดอื่น ๆ นั้น ได้รวบรวมรายละเอียดและ
ผลการทดลองได้แสดงไว้โดยตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 รายละเอียดและผลการทดลองของเหตุผิดปกติบนสายส่ง

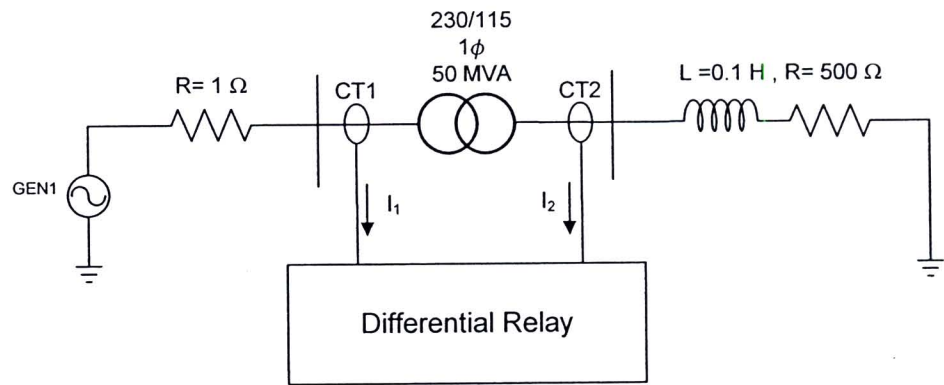
การทดลองที่	ตำแหน่ง	การอิ่มตัวของ	ผลการทำงาน	เวลาที่ใช้ในการ ตัดสินใจ
1.2.1	10 km	มีการอิ่มตัว ที่ CT1	ถูกต้อง (สั่งตัดวงจร)	9.1 ms
1.2.2	20 km	มีการอิ่มตัว ที่ CT1	ถูกต้อง (สั่งตัดวงจร)	9.7 ms
1.2.3	30 km	มีการอิ่มตัว ที่ CT1 CT2	ถูกต้อง (สั่งตัดวงจร)	9.5 ms
1.2.4	40 km	มีการอิ่มตัว ที่ CT1 CT2	ถูกต้อง (สั่งตัดวงจร)	9.8 ms
1.2.5	50 km	มีการอิ่มตัว ที่ CT1 CT2	ถูกต้อง (สั่งตัดวงจร)	9.4 ms

ตารางที่ 4-3 (ต่อ)

การทดลองที่	ตำแหน่ง	การอิ่มตัวของ CT	ผลการทำงาน	เวลาที่ใช้ในการตัดสินใจ
1.2.7	70 km	มีการอิ่มตัวที่ CT1 CT2	ถูกต้อง (สั่งตัดวงจร)	9.1 ms
1.2.8	80 km	มีการอิ่มตัวที่ CT2	ถูกต้อง (สั่งตัดวงจร)	8.8 ms
1.2.9	90 km	มีการอิ่มตัวที่ CT2	ถูกต้อง (สั่งตัดวงจร)	9.1 ms

4.1.4 การทดสอบการทำงานในกรณีของการเกิดเหตุผิดปกติที่หม้อแปลง

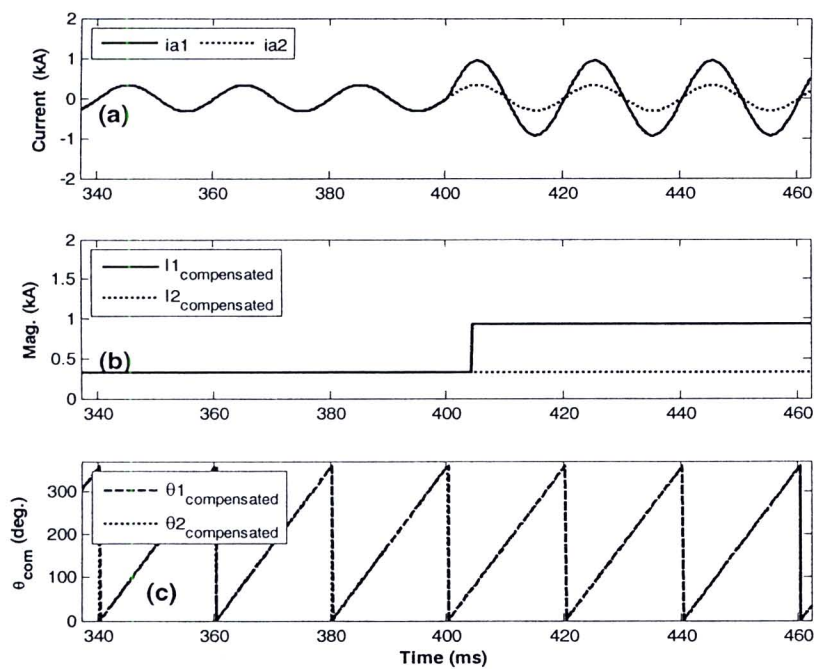
หัวข้อการทดสอบนี้จะทำการทดสอบในกรณีที่เกิดเหตุผิดปกติขึ้นภายในหม้อแปลงชนิดหนึ่งเฟส โดยสัญญาณที่ใช้ในการทดสอบนี้ได้มาจากการจำลองด้วยแบบจำลองดังแสดงใน**Error! Reference source not found.** ซึ่งประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอุดมคติขนาด 230 kV ส่งผ่านกระแสไฟฟ้าผ่านตัวต้านทานขนาด 1 Ω ไปยังหม้อแปลง 230/115 kV ที่ขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงนั้นต่ออยู่กับภาระซึ่งเป็นตัวเหนี่ยวนำและตัวต้านทานขนาด 0.1H และ 500 Ω ตามลำดับ ในแบบจำลองจะกำหนดให้ความผิดปกติของชนิดหนึ่งเฟสลงดินผ่านตัวต้านทาน 0.1Ω เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของขดลวด ปฐมภูมิและทุติยภูมิ โดยความผิดปกติเกิดที่ตำแหน่ง 1%, 3%, 5%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 95% และ 99% ของขดลวดด้านปฐมภูมิ และด้านทุติยภูมิ (ปลายขดลวดที่ตำแหน่ง 100% ของขดลวดหม้อแปลงจะต่ออยู่กับสายเฟส ส่วนปลายขดลวดตำแหน่ง 0% ต่ออยู่กับสายดิน) โดยรายละเอียดและผลการทดลองของความผิดปกติที่ขดลวดปฐมภูมิและขดลวด ทุติยภูมิได้แสดงไว้ดังตารางที่ 4-4 และตารางที่ 4-5 ตามลำดับ



ภาพที่ 4-26 แบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบกรณีเกิดเหตุผิดปกติในหม้อแปลง

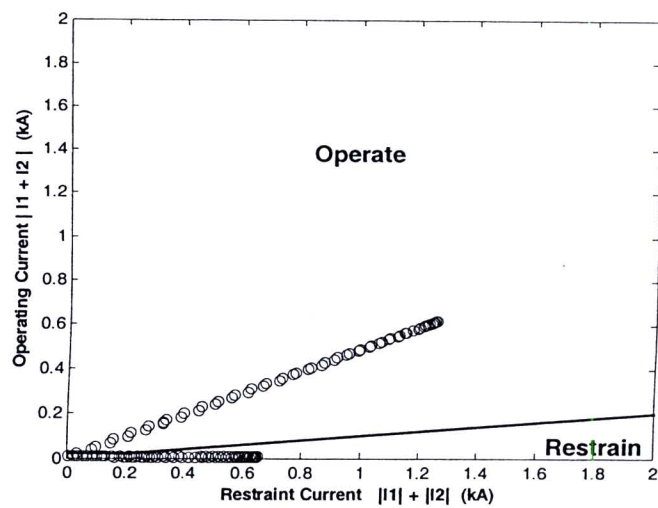
4.1.4.1 การทดสอบอัลกอริทึมของรีเลย์ในกรณีที่เหตุผิดปกติเกิดขึ้นที่ 1% ของขดลวดปฐมภูมิ

ในการทดสอบหัวข้อนี้จะทำการทดสอบในกรณีที่ความผิดปกติเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 1% ของขดลวดปฐมภูมิ นั้นหมายความว่าขณะเกิดความผิดปกติ แรงดัน 230 kV ที่จ่ายมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นจะต่ออยู่กับขดลวดปฐมภูมิเพียงแค่ 99% เท่านั้น ส่วนปลายทั้งสองข้างของขดลวดที่เหลืออีก 1% จะถูกลัดวงจรผ่านทางดิน ภาพที่ 4-27 แสดงผลรูปร่างของกระแส (สัญญาณกระแสด้านปฐมภูมิที่แสดง เป็นสัญญาณกระแสที่ถ่ายโอนมายังด้านทุติยภูมิแล้ว)



ภาพที่ 4-27 การคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสผิดปกติที่ขดลวดปฐมภูมิตำแหน่ง 1%

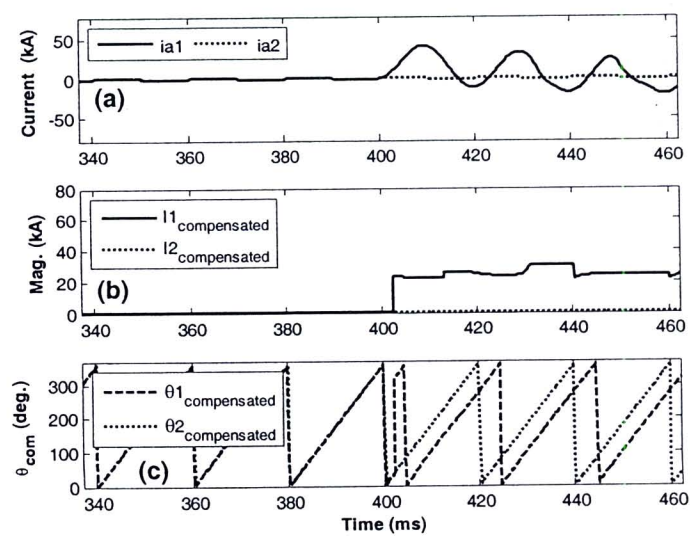
สัญญาณกระแสที่ตรวจวัดได้จากหม้อแปลงกระแส CT1 และ CT2 ดังแสดงในภาพที่ 4-27(a) ในช่วงแรก กระแสทั้งสองจะมีขนาดเท่ากันพอดี แต่หลังจากที่ความผิดปกติเกิดขึ้นที่เวลา 400 มิลลิวินาที ส่งผลให้กระแสด้านปฐมภูมิต่ำลงขึ้น ในทางตรงกันข้าม กระแสด้านทุติยภูมิจะมีขนาดลดลงเล็กน้อย เนื่องจากเกิดแรงดันตกขณะเกิดความผิดปกติ ผลต่างของกระแสทั้งสองส่งผลให้กระแสดำเนินการมีค่าสูงขึ้น จากเดิมก่อนการเกิดความผิดปกติจุดตัดสินใจจะวิ่งเป็นเส้นตรงแนวระนาบดังแสดงในภาพที่ 4-28 แต่หลังจากที่ความผิดปกติเกิดขึ้น จุดตัดสินใจจะวิ่งเป็นเส้นตรงที่มีความชันประมาณ 50% ซึ่งอยู่สูงกว่าเส้นตัดสินใจของรีเลย์ผลต่างซึ่งตั้งไว้ที่ 10% ส่งผลให้รีเลย์สั่งปลดวงจร ซึ่งเป็นการตัดสินใจที่ถูกต้อง โดยในการตัดสินใจของรีเลย์ใช้เวลา 4.5 มิลลิวินาที



ภาพที่ 4-28 การตัดสินใจตัดวงจรของรีเลย์ผลต่างในกรณีที่เกิดความผิดปกติที่ขดลวดปฐมภูมิที่ตำแหน่ง 1%

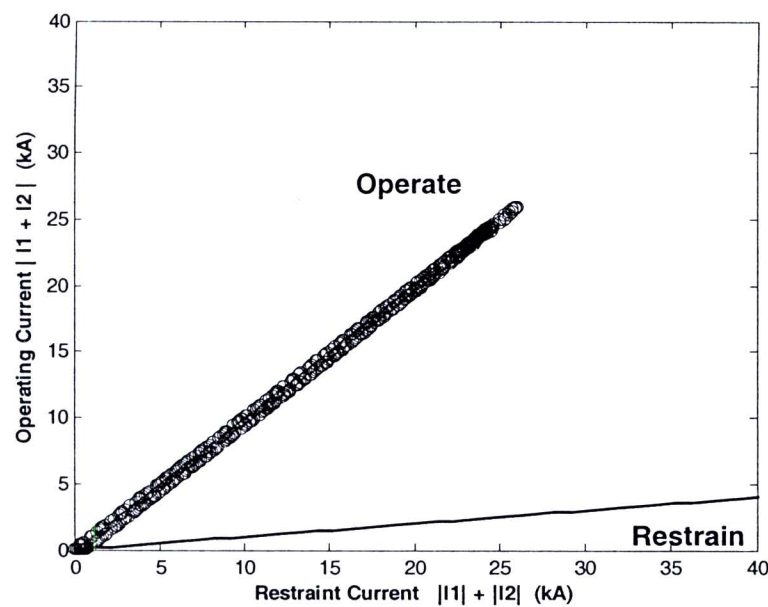
4.1.4.2 การทดสอบอัลกอริทึมของรีเลย์ในกรณีที่เหตุผิดปกติเกิดที่ 50% ของขดลวดปฐมภูมิ

การทดสอบอัลกอริทึมในกรณีนี้กำหนดให้เหตุผิดปกติเกิดขึ้นที่ตำแหน่งตรงกลางขดลวดด้านปฐมภูมิพอดี ผลของการคำนวณขนาดและมุมได้แสดงไว้ในภาพที่ 4-29 (สัญญาณกระแสด้านปฐมภูมิที่แสดงเป็นสัญญาณที่ถ่ายโอนมายังด้านทุติยภูมิแล้ว) จะเห็นได้ว่ากระแสที่ตรวจวัดได้จากหม้อแปลงกระแส CT1 นั้นมีการผิดเพี้ยนเกิดขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากกระแสผิดปกติมีองค์ประกอบของสัญญาณกระแสดรกรวมอยู่ด้วยดังแสดงในภาพที่ 4-29(a) ส่งผลให้เกิดการอ้อมตัวขึ้นในคาบที่สองหลังจากที่เริ่มเกิดความผิดปกติ



ภาพที่ 4-29 การคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสผิดปกติที่ขดลวดปฐมภูมิตำแหน่ง 50%

สำหรับการตัดสินใจตัดวงจรของรีเลย์ผลต่างนั้นทำได้ถูกต้อง คือสั่งปลดวงจร เพราะค่าสัญญาณกระแสผลต่างที่คำนวณได้นั้นอยู่ในตำแหน่งที่เหนือกว่าเส้นตัดสินใจที่ได้ตั้งค่าไว้ที่ 10% ส่งผลให้รีเลย์ประเมินว่าเกิดความผิดปกติภายในขึ้นดังแสดงในภาพที่ 4-30



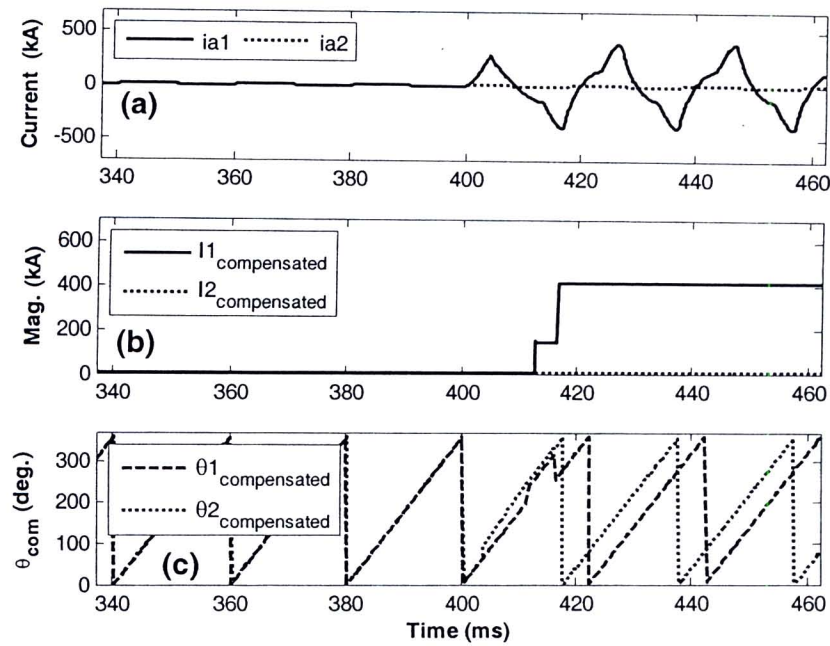
ภาพที่ 4-30 การตัดสินใจตัดวงจรในกรณีความผิดปกติที่เกิดขึ้นที่ขดลวดปฐมภูมิที่ตำแหน่ง 50%

4.1.4.3 การทดสอบอัลกอริทึมของรีเลย์ในกรณีที่เหตุผิดปกติที่เกิดขึ้นที่ 90% ของขดลวดปฐมภูมิ

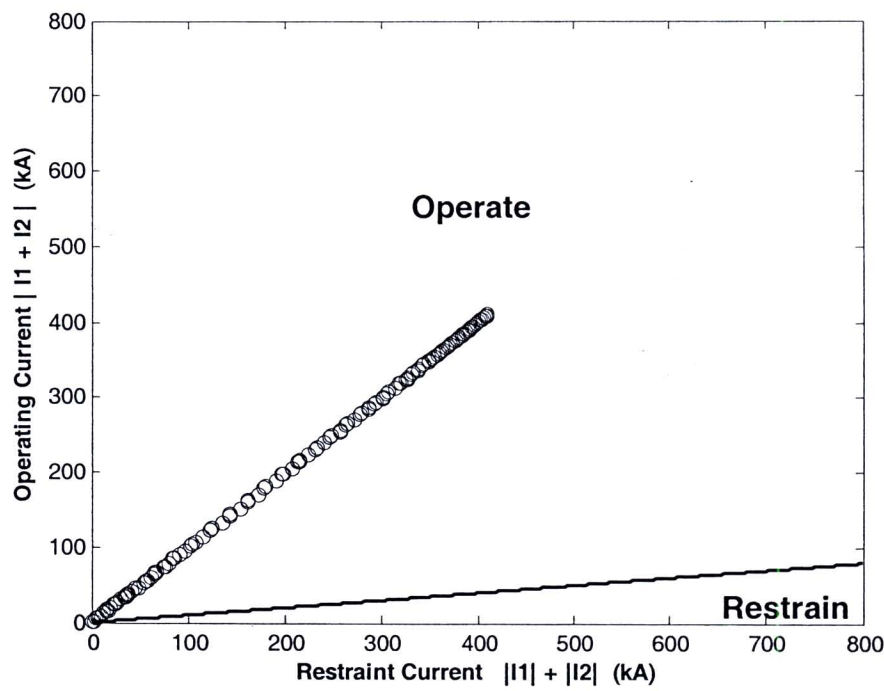
ในการทดลองนี้ เหตุผิดปกติที่เกิดขึ้นที่ขดลวดปฐมภูมิตำแหน่ง 90% ส่งผลให้เกิดกระแสลัดวงจรที่สูงมาก ส่งผลให้หม้อแปลงกระแส CT1 เกิดการอิ่มตัวอย่างรุนแรง การอิ่มตัวของกรณีนี้จะแตกต่างจากการอิ่มตัวในหัวข้อการทดลองก่อนหน้านี้ การอิ่มตัวในการทดลองก่อนหน้านี้เป็นการอิ่มตัวที่เกิดจากองค์ประกอบสัญญาณกระแสตรงซึ่งการอิ่มตัวของหม้อแปลงจะเกิดเพียงหนึ่งครั้งต่อคาบ แต่สำหรับกรณีนี้การอิ่มตัวเกิดจากกระแสผิดปกติที่มีขนาดที่สูงมาก ทำให้หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวทั้งสองขั้ว ส่งผลให้องค์ประกอบสัญญาณคุณภาพดีเกิดขึ้นน้อยมากดังแสดงในภาพที่ 4-31(a) ในทางปฏิบัติเหตุการณ์เช่นนี้จะเกิดขึ้นได้ยาก เนื่องจากวิศวกรผู้ออกแบบระบบป้องกันจะเลือกหม้อแปลงกระแสที่มีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะรองรับกระแสผิดปกติสูงสุดได้ ดังนั้นการอิ่มตัวแบบสองขั้วจึงมีโอกาสดังกล่าวเกิดขึ้นได้น้อย

แม้หม้อแปลงกระแสจะเกิดการอิ่มตัวอย่างรุนแรง อัลกอริทึมที่งานวิจัยนี้นำเสนอก็ยังสามารถคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสผิดปกติได้ถูกต้องดังแสดงในภาพที่ 4-31(b) และภาพที่ 4-31(c) ตามลำดับ ส่งผลให้รีเลย์ตัดสินใจสั่งปลดวงจร ซึ่งเป็นการตัดสินใจที่ถูกต้องดังแสดงในภาพที่ 4-32

สำหรับการทดลองในหัวข้ออื่น ๆ ที่ทำการทดลองในกรณีที่ความผิดพลาดที่ขดลวดด้านปฐมภูมินั้นได้แสดงรายละเอียดและผลการทดลองไว้ในตารางที่ 4-4



ภาพที่ 4-31 การคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสผิดพลาดที่ขดลวดปฐมภูมิตำแหน่ง 90%



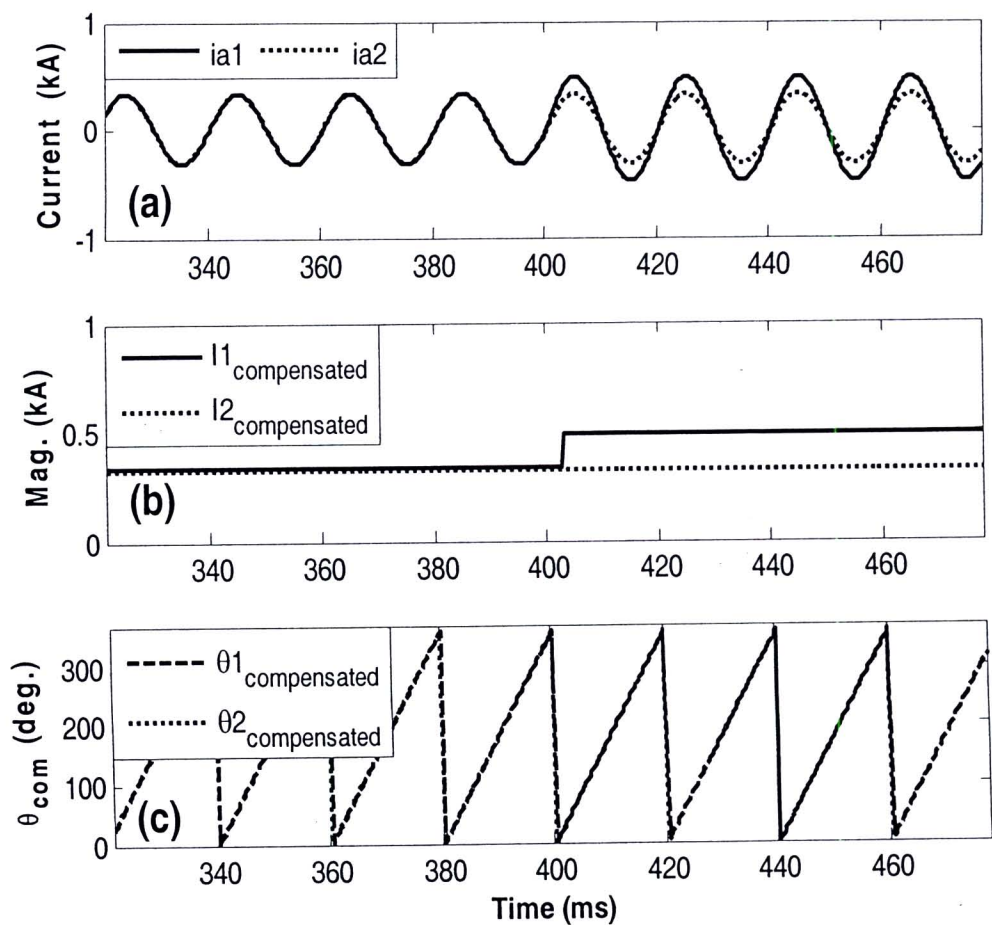
ภาพที่ 4-32 การตัดสินใจตัดวงจรของรีเลย์ผลต่างในกรณีที่เกิดความผิดพลาดที่ขดลวดปฐมภูมิที่ตำแหน่ง 90%

ตารางที่ 4-4 รายละเอียดและผลการทดลองของเหตุผิดพลาดที่หม้อแปลงขนาดปฐมภูมิ

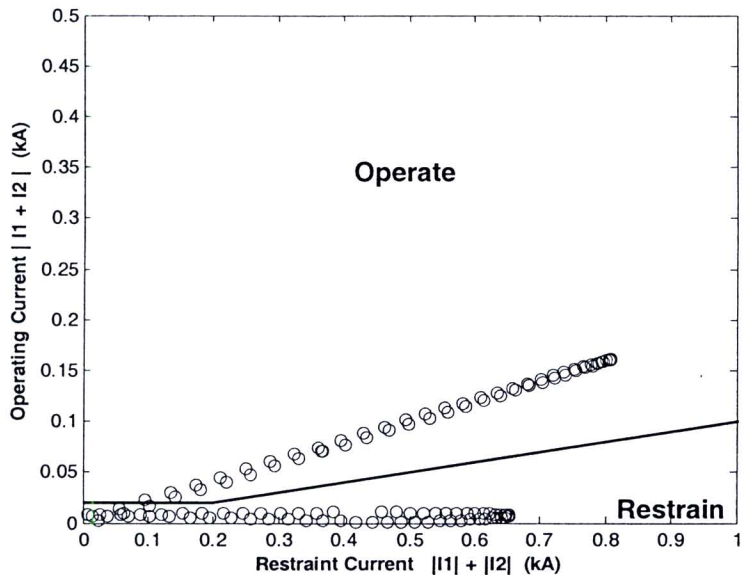
การทดลองที่	ตำแหน่งบน ขดลวด	การอิ่มตัว ของ CT	ผลการทำงาน	เวลาที่ใช้ในการ ตัดสับ
1.3.1.1	1 %	ไม่เกิดการอิ่มตัว	ถูกต้อง (สั่งตัดวงจร)	4.5 ms
1.3.1.2	3 %	ไม่เกิดการอิ่มตัว	ถูกต้อง (สั่งตัดวงจร)	6.7 ms
1.3.1.3	5 %	ไม่เกิดการอิ่มตัว	ถูกต้อง (สั่งตัดวงจร)	7.5 ms
1.3.1.4	10 %	ไม่เกิดการอิ่มตัว	ถูกต้อง (สั่งตัดวงจร)	2.5 ms
1.3.1.5	20 %	ไม่เกิดการอิ่มตัว	ถูกต้อง (สั่งตัดวงจร)	2.7 ms
1.3.1.6	30 %	ไม่เกิดการอิ่มตัว	ถูกต้อง (สั่งตัดวงจร)	4.5 ms
1.3.1.7	40 %	ไม่เกิดการอิ่มตัว	ถูกต้อง (สั่งตัดวงจร)	4.5 ms
1.3.1.8	50 %	มีการอิ่มตัว ของ CT	ถูกต้อง (สั่งตัดวงจร)	2.5 ms
1.3.1.9	60%	มีการอิ่มตัว ของ CT	ถูกต้อง (สั่งตัดวงจร)	2.7 ms
1.3.1.10	70 %	มีการอิ่มตัว ของ CT	ถูกต้อง (สั่งตัดวงจร)	2.3 ms
1.3.1.11	80 %	มีการอิ่มตัว ของ CT	ถูกต้อง (สั่งตัดวงจร)	2.3 ms
1.3.1.12	90 %	มีการอิ่มตัว จากกระแส AC อย่างรุนแรง	ถูกต้อง (สั่งตัดวงจร)	12.8ms

4.1.4.4 การทดสอบอัลกอริธึมของรีเลย์ในกรณีที่เหตุผิดปกติเกิดขึ้นที่ 1% ของขดลวดทุติยภูมิ

ในการทดสอบนี้จะกำหนดให้เหตุผิดปกติเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 1% ของขดลวดทุติยภูมิ ความผิดปกติดังกล่าวส่งผลให้เกิดกระแสผิดปกติดังแสดงในภาพที่ 4-33(a) ส่วนภาพที่ 4-33(b) แสดงขนาดของสัญญาณกระแสจาก CT1 และ CT2 โดยขนาดของสัญญาณกระแสจากหม้อแปลงกระแส CT1 ในช่วงก่อนเกิดความผิดปกติจะมีขนาด 330 A ในขณะที่สัญญาณกระแสจากหม้อแปลงกระแส CT2 มีขนาด 323 A หลังจากเกิดความผิดปกติขึ้นกระแสจาก CT1 เพิ่มขึ้นเป็น 484 A ในขณะที่ขนาดของกระแสจาก CT2 มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ความแตกต่างของกระแสทั้งสองส่งผลให้กระแสทำงาน (Operating Current) มีขนาดที่สูงขึ้น ก่อนที่จะเกิดความผิดปกติจุดตัดสินใจดังแสดงในภาพที่ 4-34 นั้นจะวิ่งอยู่ในแนวระนาบ แต่หลังจากเกิดความผิดปกติแล้วจุดตัดสินใจจะวิ่งเป็นเส้นตรงที่มีความชันประมาณ 20% ซึ่งอยู่สูงกว่าเส้นตัดสินใจ รีเลย์จึงมีคำสั่งให้ปลดหม้อแปลงออกจากระบบ



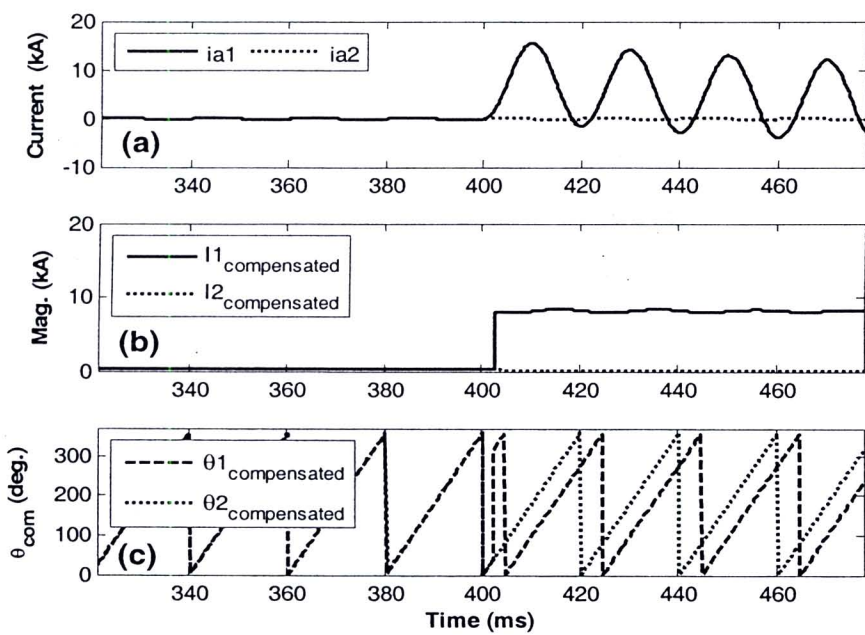
ภาพที่ 4-33 การคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสผิดปกติที่ขดลวดทุติยภูมิตำแหน่ง 1%



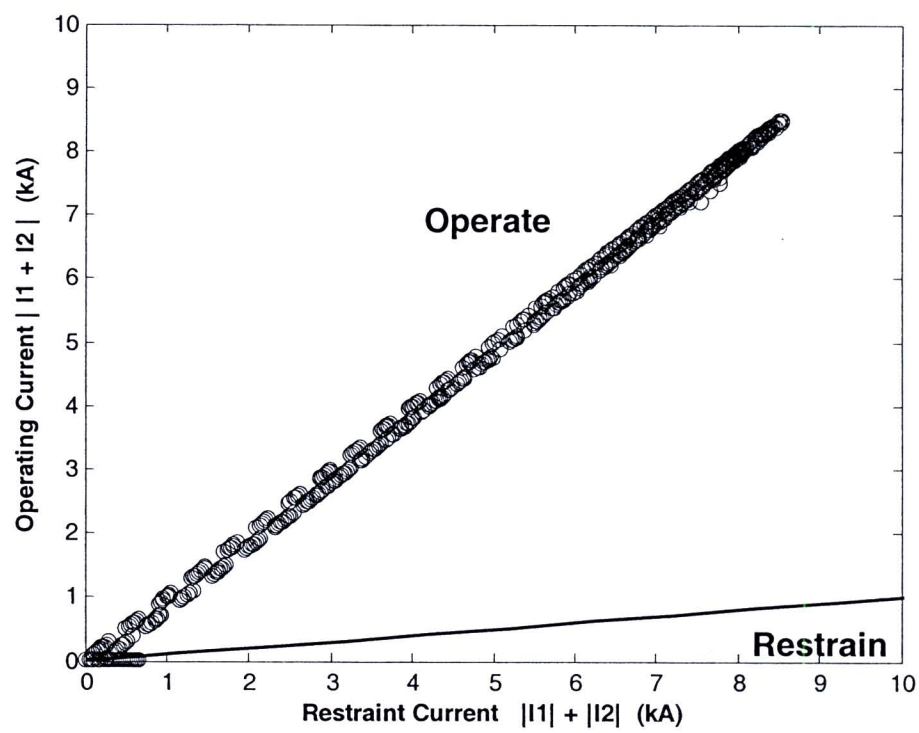
ภาพที่ 4-34 การตัดสินใจของรีเลย์ผลต่างในกรณีเกิดความผิดพลาดที่ขดลวดทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 1%

4.1.4.5 การทดสอบอัลกอริทึมของรีเลย์ในกรณีที่เหตุผิดพลาดเกิดที่ 50% ของขดลวดทุติยภูมิ

ในการทดสอบนี้จะกำหนดให้เหตุผิดพลาดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 50% ของขดลวดทุติยภูมิ ความผิดพลาดดังกล่าวส่งผลให้เกิดกระแสผิดพลาดดังแสดงในภาพที่ 4-35 การคำนวณค่าขนาดและมุมของสัญญาณทำได้ถูกต้อง และสามารถตรวจจับความผิดพลาดได้ดังแสดงในภาพที่ 4-36



ภาพที่ 4-35 การคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสผิดพลาดที่ขดลวดทุติยภูมิตำแหน่ง 50%



ภาพที่ 4-36 การตัดสินใจของรีเลย์ผลต่างในกรณีเกิดความผิดปกติที่ขดลวดทุติยภูมิ
ที่ตำแหน่ง 50%

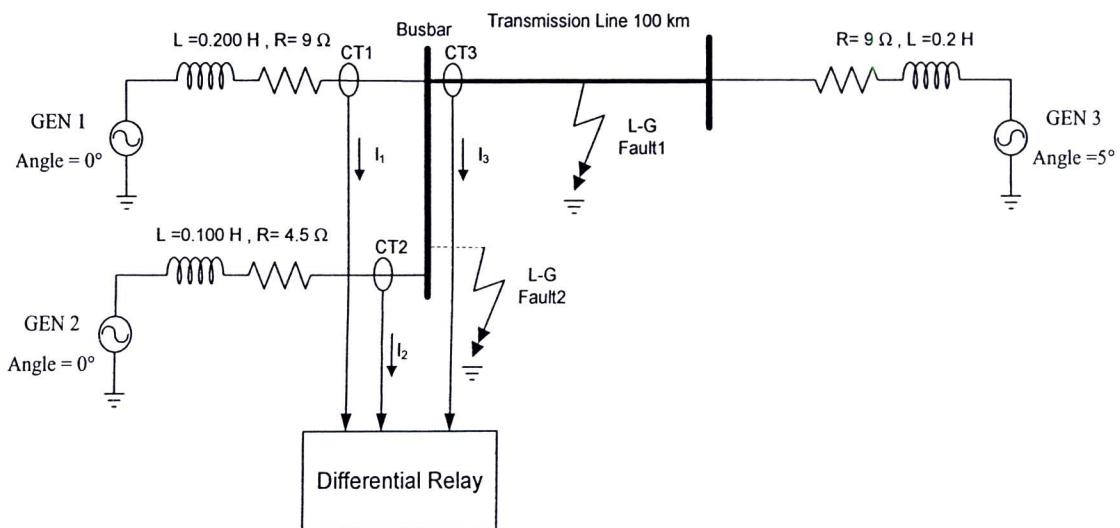
สำหรับการทดลองในหัวข้ออื่น ๆ ที่ทำการทดลองในกรณีที่เกิดความผิดปกติที่ขดลวดด้าน
ทุติยภูมินั้นได้แสดงรายละเอียดและผลการทดลองไว้ในตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 รายละเอียดและผลการทดลองของเหตุผิดพร่องที่หม้อแปลงขดทุติยภูมิ

การทดลองที่	ตำแหน่งบน ขดลวด	การอิ่มตัว ของ CT	ผลการทำงาน	เวลาที่ใช้ในการ ตัดสินใจ
1.3.2.1	1 %	ไม่เกิดการอิ่มตัว	ถูกต้อง (สั่งตัดวงจร)	3.1 ms
1.3.2.2	3 %	ไม่เกิดการอิ่มตัว	ถูกต้อง (สั่งตัดวงจร)	5.5 ms
1.3.2.3	5 %	ไม่เกิดการอิ่มตัว	ถูกต้อง (สั่งตัดวงจร)	6.6 ms
1.3.2.4	10 %	ไม่เกิดการอิ่มตัว	ถูกต้อง (สั่งตัดวงจร)	8.4 ms
1.3.2.5	20 %	ไม่เกิดการอิ่มตัว	ถูกต้อง (สั่งตัดวงจร)	2.5 ms
1.3.2.6	30 %	ไม่เกิดการอิ่มตัว	ถูกต้อง (สั่งตัดวงจร)	2.8 ms
1.3.2.7	40 %	ไม่เกิดการอิ่มตัว	ถูกต้อง (สั่งตัดวงจร)	2.8 ms
1.3.2.8	50 %	ไม่เกิดการอิ่มตัว	ถูกต้อง (สั่งตัดวงจร)	2.8 ms
1.3.2.9	60%	ไม่เกิดการอิ่มตัว	ถูกต้อง (สั่งตัดวงจร)	2.8 ms
1.3.2.10	70 %	ไม่เกิดการอิ่มตัว	ถูกต้อง (สั่งตัดวงจร)	2.8 ms
1.3.2.11	80 %	ไม่เกิดการอิ่มตัว	ถูกต้อง (สั่งตัดวงจร)	2.8 ms
1.3.2.12	90 %	ไม่เกิดการอิ่มตัว	ถูกต้อง (สั่งตัดวงจร)	2.8 ms

4.1.5 การทดสอบการทำงานในกรณีของการเกิดเหตุผิดปกติที่บัสบาร์ (Busbar)

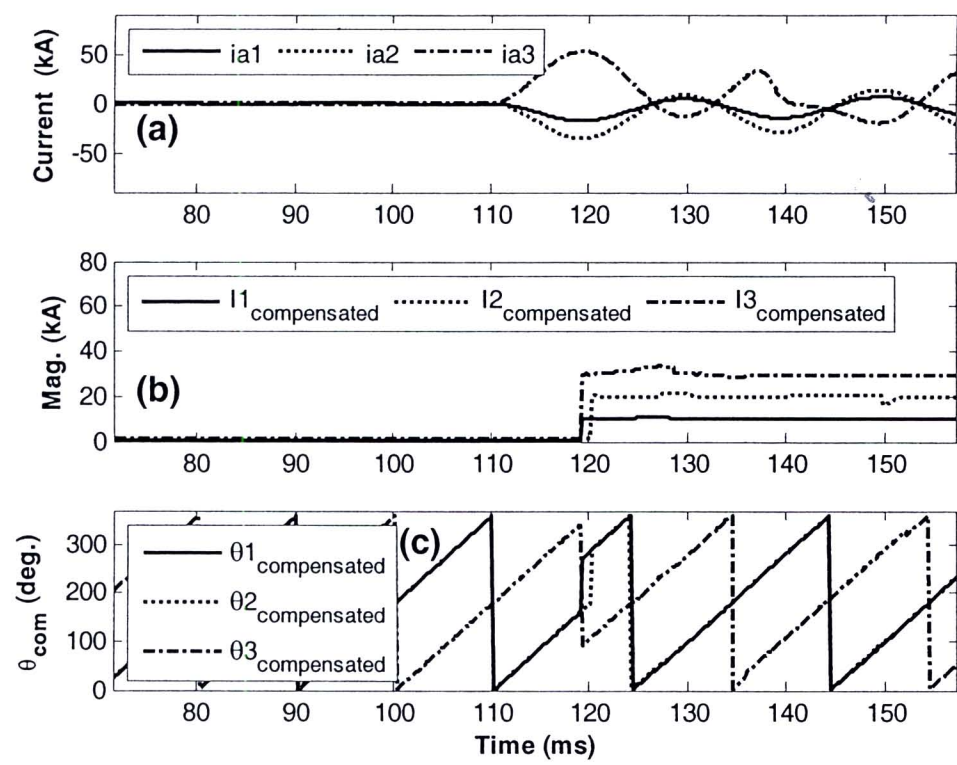
ในการทดสอบหัวข้อนี้จะใช้แบบจำลองดังแสดงในภาพที่ 4-37 เพื่อทดสอบการทำงานของอัลกอริทึมในกรณีที่น่าไปประยุกต์ใช้กับการป้องกันบัสบาร์ โดยในแบบจำลองจะประกอบด้วยบัสบาร์ซึ่งต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองตัวและสายส่งหนึ่งเส้น ค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า GEN1 จะมีค่าเป็น 2 เท่าของอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า GEN2 หม้อแปลงกระแส CT1 CT2 และ CT3 จะป้อนสัญญาณกระแส I_1 , I_2 และ I_3 ตามลำดับเข้าสู่รีเลย์ผลต่างที่ทำหน้าที่ป้องกันบัสบาร์ ในการทดลองที่หนึ่งจะจำลองให้เกิดเหตุผิดปกติภายนอกชนิดหนึ่งเฟส โดยเกิดขึ้นที่กลางสายส่ง ส่วนการทดลองที่สองจะกำหนดให้เกิดความผิดปกติชนิดหนึ่งเฟสเช่นกันแต่ความผิดปกติเกิดที่บัสบาร์



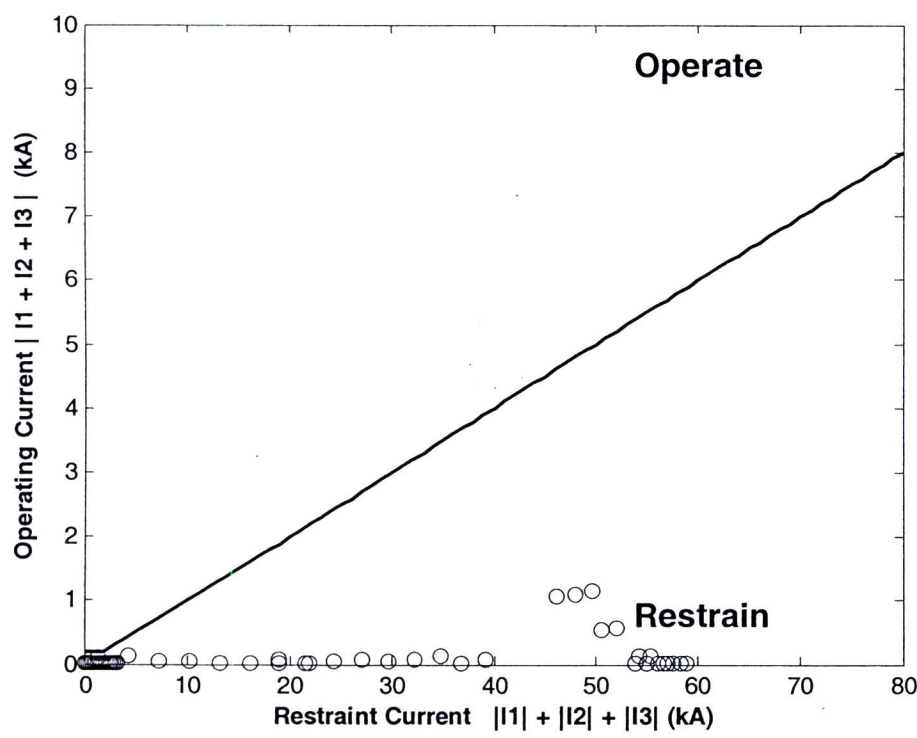
ภาพที่ 4-37 แบบจำลองสำหรับทดสอบในกรณีของการป้องกันบัสบาร์

4.1.5.1 การทดสอบในกรณีที่เกิดความผิดปกติภายนอกบัสบาร์ (เกิดที่สายส่ง)

ในการทดลองนี้กำหนดให้เกิดความผิดปกติชนิดหนึ่งเฟสที่กลางสายส่ง เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า GEN 1 นั้นมีค่าอิมพีแดนซ์ที่สูงกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้า GEN 2 อยู่สองเท่า ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านหม้อแปลงกระแส CT1 นั้นมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของกระแสที่ไหลผ่านหม้อแปลงกระแส CT2 และกระแส I_3 จะมีค่าเท่ากับผลรวมของกระแส I_1 และ I_2 ส่งผลให้มีการอิมตัวของแกนหม้อแปลง ดังแสดงในภาพที่ 4-38(a) ในส่วนของการคำนวณหาค่าขนาดและมุมของสัญญาณกระแสทั้งสามนั้นสามารถทำได้อย่างถูกต้องดังแสดงในภาพที่ 4-38(b) อีกทั้งอัลกอริทึมการตรวจจับความผิดปกติได้ถูกต้องคือ รีเลย์ได้ประเมินว่ากระแสผิดปกติที่เกิดขึ้นเกิดจากความผิดปกติภายนอกจึงไม่สั่งปลดบัสบาร์ออกจากระบบ ดังแสดงในภาพที่ 4-39



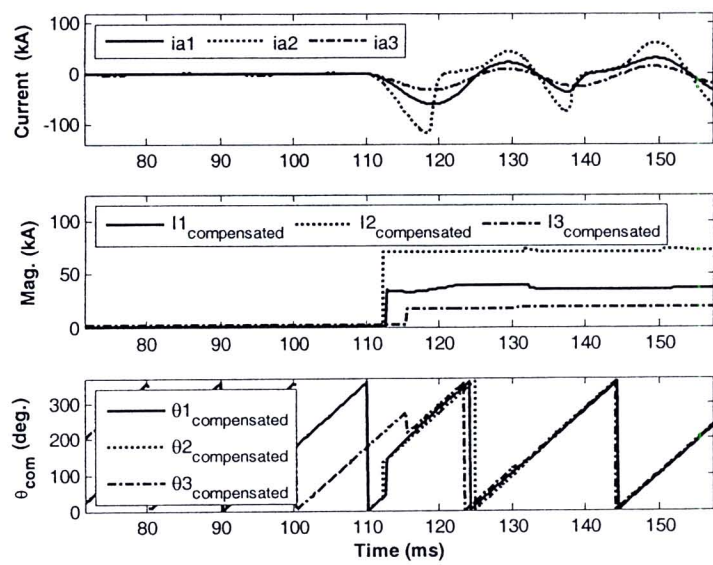
ภาพที่ 4-38 การคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสผิดพ้องภายนอกบัสบาร์



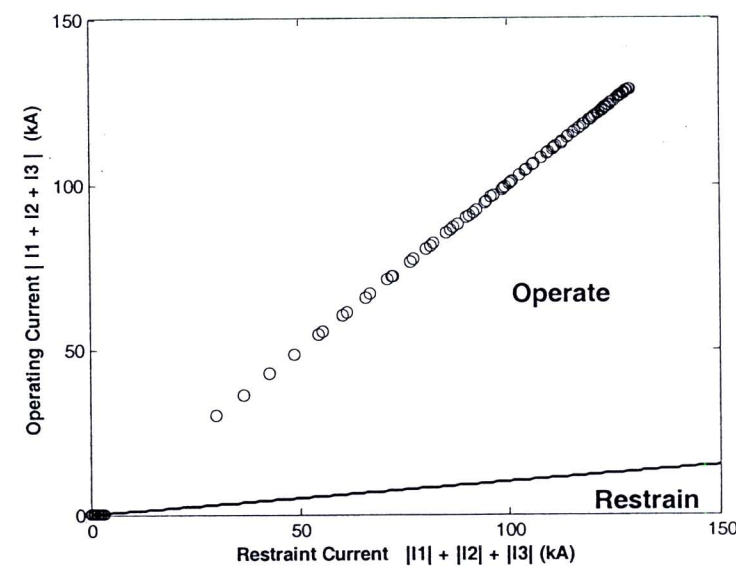
ภาพที่ 4-39 การตัดสินใจของรีเลย์ผลต่างกรณีที่เกิดความผิดพ้องภายนอกบัสบาร์

4.1.5.2 การทดสอบในกรณีที่เกิดความผิดปกติภายในบัสบาร์

ในการทดสอบหัวข้อนี้ความผิดปกติที่เกิดขึ้นที่บัสบาร์ กระแสที่วัดได้จาก CT2 นั้นยังคงมีขนาดเป็นสองเท่าของกระแสที่วัดได้จาก CT1 เช่นเดียวกับหัวข้อการทดสอบก่อนหน้านี้ แต่กระแสที่วัดได้จาก CT3 นั้นจะไม่ใช้ค่าผลรวมของกระแสที่วัดได้จาก CT1 และ CT2 ดังแสดงในภาพที่ 4-40 ส่งผลให้ผลรวมของกระแสทั้งสามสัญญาณไม่เท่ากับศูนย์ ดังนั้นรีเลย์จึงประเมินว่าเกิดความผิดปกติภายในเขตป้องกัน และสั่งปลดบัสบาร์ออกจากระบบไฟฟ้ากำลัง ดังแสดงในภาพที่ 4-41 โดยรีเลย์ใช้เวลา 5.6 มิลลิวินาทีหลังจากที่เริ่มเกิดเหตุผิดปกติในการตัดสินใจ



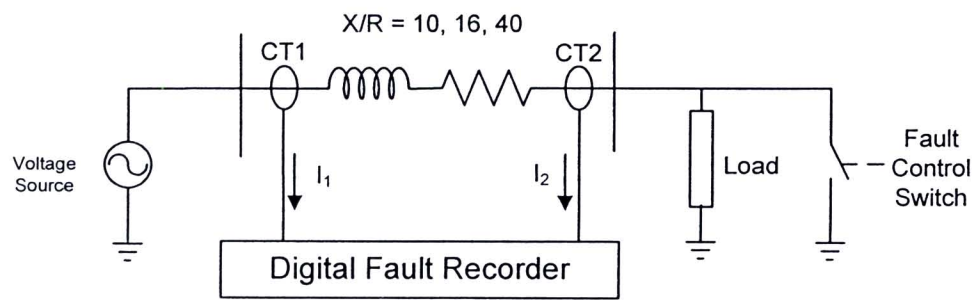
ภาพที่ 4-40 การคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสผิดปกติภายในที่บัสบาร์



ภาพที่ 4-41 การตัดสินใจของรีเลย์ผลต่างกรณีที่เกิดความผิดปกติภายในที่บัสบาร์

4.2 การทดสอบอัลกอริธึมโดยใช้สัญญาณจากการทดสอบหม้อแปลงกระแสจริง

ในการทดสอบหัวข้อนี้จะทำการทดสอบอัลกอริธึมโดยใช้สัญญาณที่ได้จากการทดลองกับหม้อแปลงกระแสจริง โดยสัญญาณที่นำมาใช้นั้นได้มาจากการนำเอาหม้อแปลงกระแสที่มีอัตรา
การแปลงกระแส 60/60 มีภาระ (Burden) 1 Ω มาทำการตรวจวัดกระแสผิดพลาดที่สร้างขึ้นจากชุด
จำลองระบบไฟฟ้ากำลังแบบแอนะล็อกดังแสดงในภาพที่ 4-42 และมีการปรับค่าตัวต้านทานและ
ตัวเหนี่ยวนำเพื่อให้อัตราส่วน X/R ขณะเกิดความผิดพลาดมีค่าเป็น 10, 16 หรือ 40 ขณะทำ
การทดลองมีการบันทึกสัญญาณไว้ด้วยเครื่องบันทึกสัญญาณผิดพลาดดิจิทัล (Digital Fault
Recorder) โดยในการทดลองจะแบ่งการทดลองออกเป็นหลายกลุ่มดังแสดงในตารางที่ 4-6



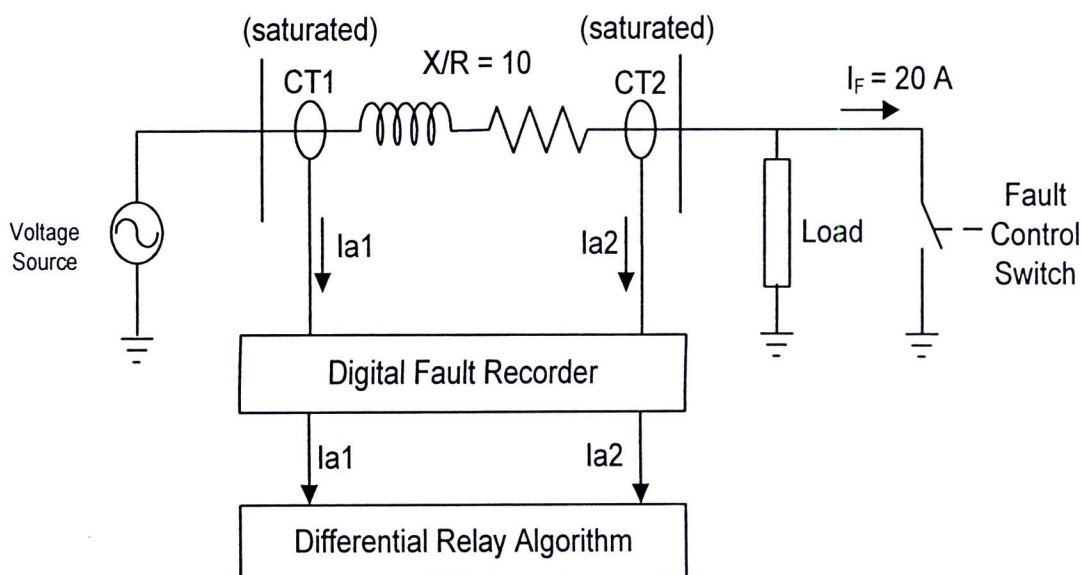
ภาพที่ 4-42 ผังการต่ออุปกรณ์ของชุดทดลองระบบไฟฟ้ากำลังแบบแอนะล็อก

ตารางที่ 4-6 รายละเอียดของสัญญาณที่นำมาทดสอบกรณีมีการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสจริง

กลุ่มการทดลองที่	อัตราส่วน X/R	ขนาดของ กระแส	การอิ่มตัวของ CT1	การอิ่มตัวของ CT2	จำนวนสัญญาณ
1	10	20	มีการอิ่มตัว	มีการอิ่มตัว	50
2	10	20	มีการอิ่มตัว	ไม่มีการอิ่มตัว	100
3	10	30	มีการอิ่มตัว	มีการอิ่มตัว	50
4	10	30	มีการอิ่มตัว	ไม่มีการอิ่มตัว	100
5	16	35	มีการอิ่มตัว	ไม่มีการอิ่มตัว	100
6	40	35	มีการอิ่มตัว	ไม่มีการอิ่มตัว	100
7	40	20	มีการอิ่มตัว	มีการอิ่มตัว	50
8	40	20	มีการอิ่มตัว	ไม่มีการอิ่มตัว	100
9	40	30	มีการอิ่มตัว	มีการอิ่มตัว	50
10	40	30	มีการอิ่มตัว	ไม่มีการอิ่มตัว	100
				รวม	800

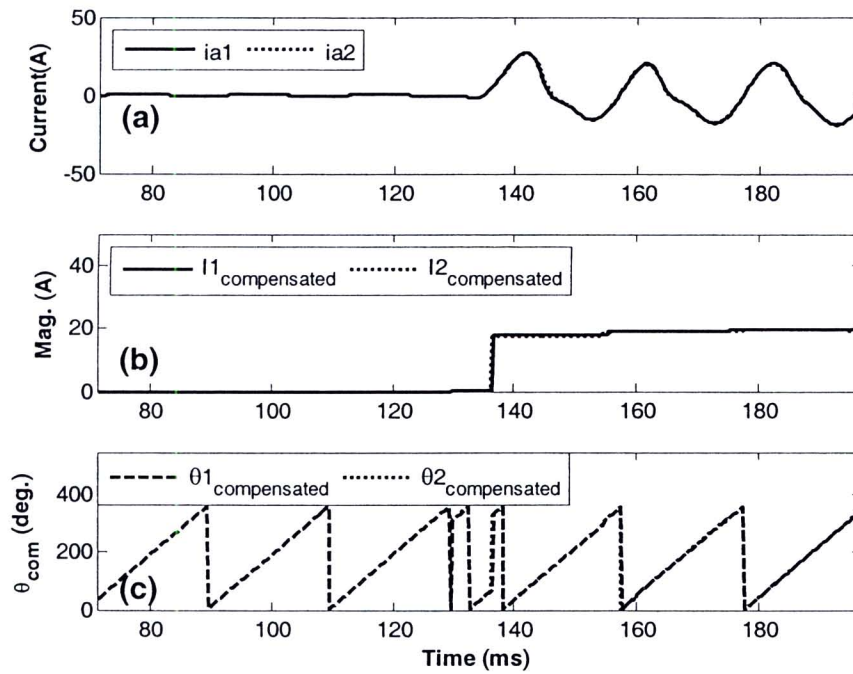
4.2.1 การทดลองกลุ่มที่ 1 อัตราส่วน $X/R = 10$ กระแสผิดพลาด 20 A มีการเชื่อมต่อทั้ง CT1 และ CT2

ในการทดลองกลุ่มที่ 1 จะนำสัญญาณกระแสผิดพลาดที่บันทึกไว้ป้อนให้กับอัลกอริทึมสัญญาณดังกล่าวได้มาจากชุดทดลองแอนะล็อกที่มีหน้าที่สร้างกระแสผิดพลาดขนาดประมาณ 20 A จากระบบที่มีสัดส่วนส่วน X/R เป็น 10 ดังแสดงในภาพที่ 4-43 โดยสุ่มมุมที่เริ่มเกิดการผิดพลาดเป็นจำนวน 50 ครั้ง แล้วป้อนกระแสดังกล่าวเข้าไปที่ขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงกระแส CT1 และ CT2 ซึ่งหม้อแปลงทั้งสองตัวจะมีการเชื่อมต่อเกิดขึ้น สัญญาณกระแสจากหม้อแปลงกระแสจะได้รับการบันทึกโดยเครื่องบันทึกสัญญาณผิดพลาดดิจิทัล (Digital Fault Recorder) แล้วสัญญาณดังกล่าวจะถูกป้อนให้กับอัลกอริทึมที่งานวิจัยนี้นำเสนอ เพื่อที่จะตรวจสอบว่าอัลกอริทึมที่ออกแบบมานั้นมีความทนทานต่อการผิดพลาดของสัญญาณกระแสหรือไม่

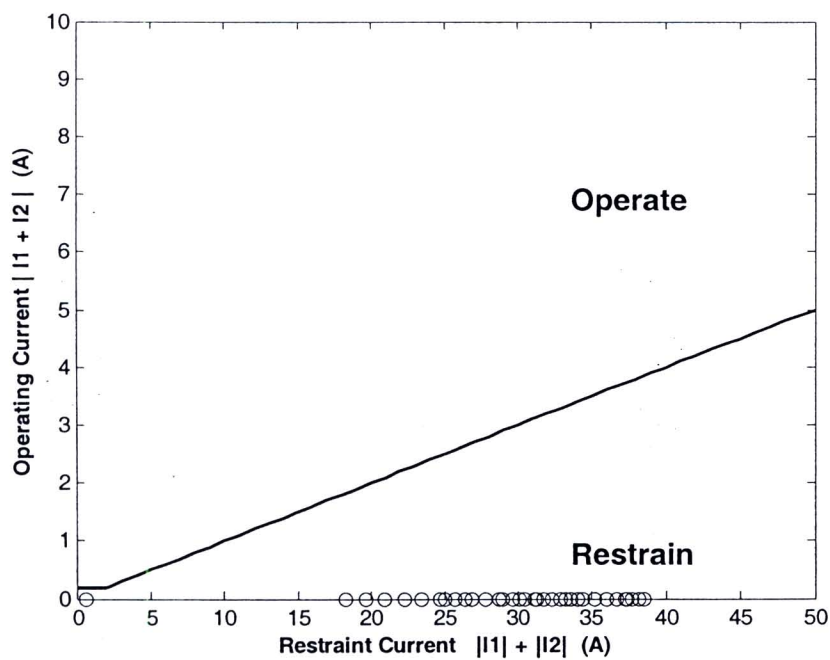


ภาพที่ 4-43 ผังการต่ออุปกรณ์ของกลุ่มการทดลองที่ 1

ภาพที่ 4-44(a) แสดงสัญญาณกระแสที่ได้จากหม้อแปลงกระแส CT1 และ CT2 จะเห็นได้ว่ากระแสทั้งสองมีการผิดพลาดอันเนื่องมาจากการเชื่อมต่อของหม้อแปลงกระแส แต่เนื่องจากหม้อแปลงกระแสทั้งสองตัวมีขนาดที่เท่ากัน กระแสทั้งสองจึงผิดพลาดในลักษณะที่เหมือนกัน ภาพที่ 4-44(b) แสดงผลของการคำนวณหาขนาดของสัญญาณกระแส แม้สัญญาณกระแสจะเกิดการผิดพลาด แต่อัลกอริทึมก็ยังสามารถคำนวณค่าของขนาดได้อย่างถูกต้อง (20A) ขนาดและมุมของกระแสทั้งสองมีขนาดเท่ากันตลอด ด้วยเหตุนี้กระแสทำงานซึ่งคำนวณจากค่ากระแสผลต่างจึงมีค่าเป็นศูนย์ ส่งผลให้จุดตัดสินใจอยู่ใต้เส้นตัดสินใจเสมอ รีเลย์จึงไม่สั่งปลดวงจรซึ่งเป็นการตัดสินใจที่ถูกต้องดังแสดงในภาพที่ 4-45



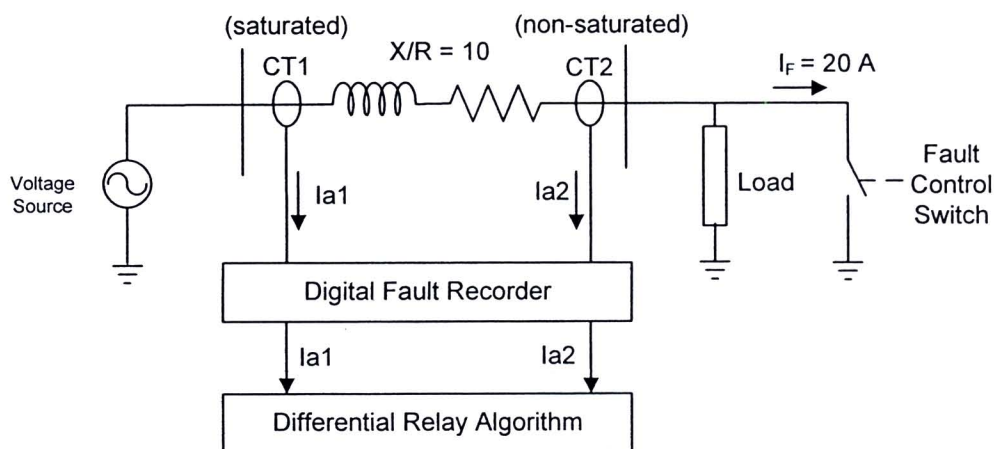
ภาพที่ 4-44 การคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสผิดพลาดในกรณีที่อัตราส่วน X/R มีค่าเป็น 10 กระแสผิดพลาด 20 A มีการอิมตัวทั้ง CT1 และ CT2



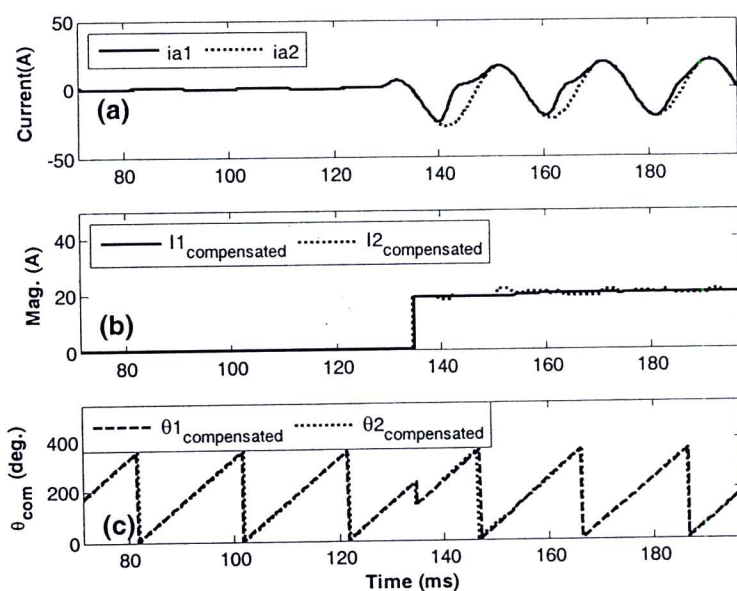
ภาพที่ 4-45 การตัดสินใจของรีเลย์ในกรณีที่อัตราส่วน X/R มีค่าเป็น 10 กระแสผิดพลาด 20 A มีการอิมตัวทั้ง CT1 และ CT2

4.2.2 การทดลองกลุ่มที่ 2 อัตราส่วน $X/R = 10$ กระแสผิดพลาด 20 A มีการอิ่มตัวที่ CT1 แต่ CT2 ไม่มีการอิ่มตัว

ในการทดลองนี้จะทำการทดลองเช่นเดียวกับหัวข้อ 4.2.1 คือ กระแสผิดพลาดมีขนาดประมาณ 20 A ระบบมีสัดส่วน X/R เป็น 10 แต่จะมีสิ่งที่ต่างกันคือหม้อแปลงกระแส CT2 จะรองรับกระแสนัดสูงได้ดีกว่าหม้อแปลงกระแส CT1 ทำให้หม้อแปลงกระแส CT2 ไม่เกิดการอิ่มตัวดังแสดงในภาพที่ 4-46

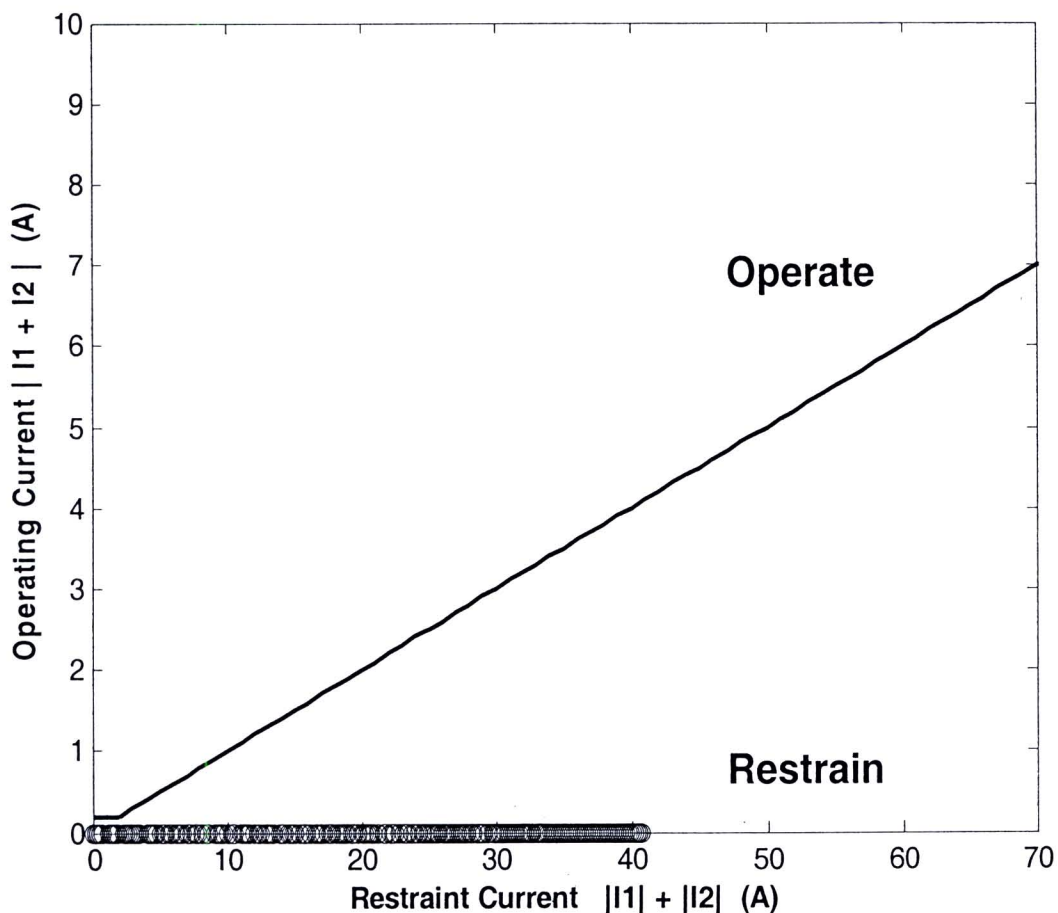


ภาพที่ 4-46 ฟังก์ชันต่ออุปกรณ์ของกลุ่มการทดลองที่ 2



ภาพที่ 4-47 การคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสผิดพลาดในกรณีที่อัตราส่วน X/R มีค่าเป็น 10 กระแสผิดพลาด 20 A มีการอิ่มตัวที่ CT1 แต่ CT2 ไม่มีการอิ่มตัว

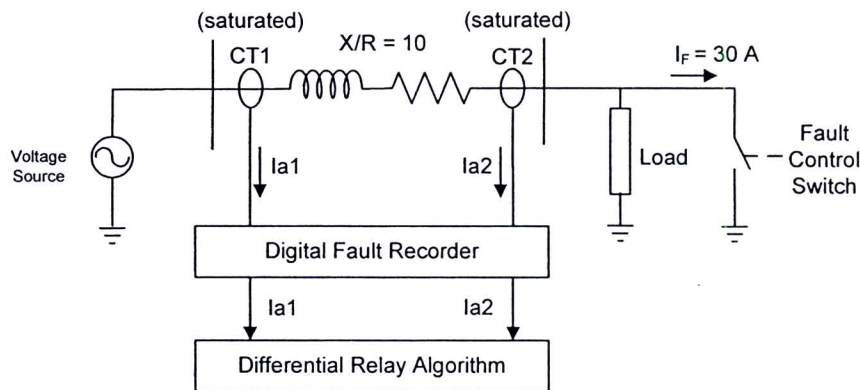
เนื่องด้วยผลของการคำนวณหาขนาดและมุมของสัญญาณกระแสที่ได้จากหม้อแปลงกระแส CT1 และ CT2 มีขนาดใกล้เคียงกันมากแม้สัญญาณขาเข้าจะมีรูปร่างแตกต่างกันเนื่องจากการอิ่มตัวของหม้อแปลง ดังแสดงในภาพที่ 4-47(b) ส่งผลให้กระแสผลต่างมีค่าที่ต่ำมาก กระแสทำงานจึงมีค่าน้อย และจุดตัดคสโนจะวางตัวอยู่ในแนวระนาบที่ระดับต่ำกว่าเส้นตัดคสโนใจ และเนื่องจากจุดตัดคสโนใจอยู่ในตำแหน่งที่อยู่ใต้เส้นตัดคสโนใจดังแสดงในภาพที่ 4-48 อัลกอริธึมของรีเลย์จึงไม่สั่งปลดวงจรซึ่งเป็นการตัดคสโนใจที่ถูกต้อง เพราะความผิดพลาดดังกล่าวเป็นเหตุผิดพลาดภายนอก



ภาพที่ 4-48 การตัดคสโนใจของรีเลย์ในกรณีที่อัตราส่วน X/R มีค่าเป็น 10 กระแสผิดพลาด 20 A มีการอิ่มตัวที่ CT1 แต่ CT2 ไม่มีการอิ่มตัว

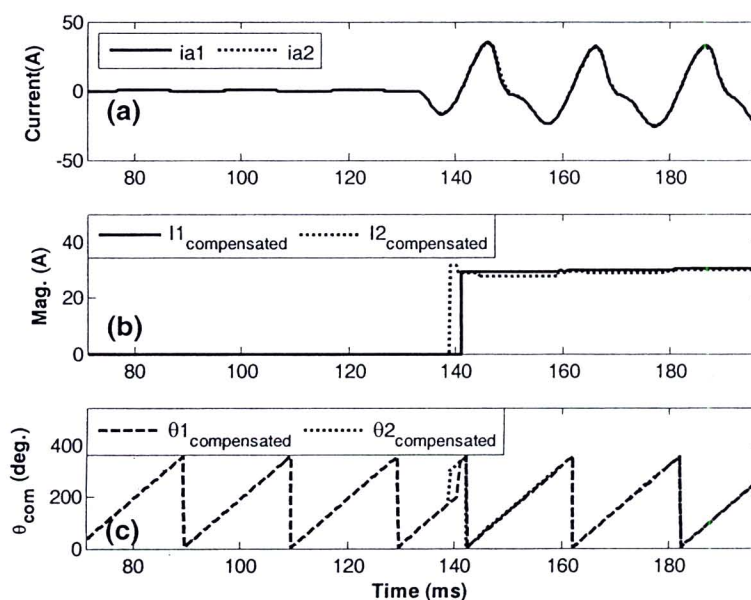
4.2.3 การทดลองกลุ่มที่ 3 อัตราส่วน $X/R = 10$ กระแสผิดพลาด 30 A มีการอิ่มตัวทั้ง CT1 และ CT2

ในการทดลองนี้จะนำสัญญาณกระแสจากหม้อแปลงกระแส CT1 และ CT2 ในกรณีที่เกิดความผิดพลาดภายนอกเขตป้องกัน โดยขณะเกิดความผิดพลาด อัตราส่วน X/R เป็น 10 กระแสผิดพลาดมีขนาดสูงขึ้นเป็น 30 A ดังแสดงในภาพที่ 4-49



ภาพที่ 4-49 ฟังก์ชันต่ออุปกรณ์ของกลุ่มการทดลองที่ 3

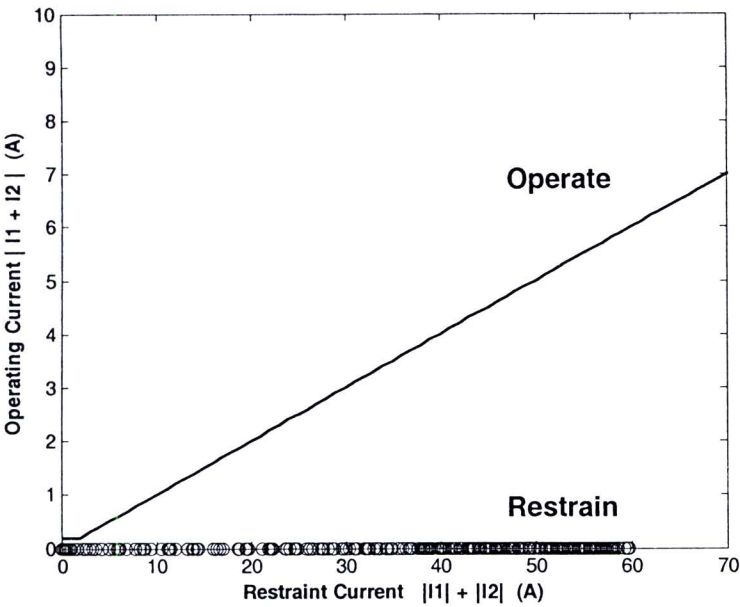
กระแสผิดพลาดมีขนาดสูงขึ้นเป็น 30 A จะส่งผลให้เกิดการอิ่มตัวที่รุนแรงขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีที่กระแสผิดพลาดมีขนาด 10 A ภาพที่ 4-50(a) แสดงสัญญาณกระแสที่ได้จากหม้อแปลงกระแส CT1 และ CT2 ซึ่งทั้งสองสัญญาณเกิดการอิ่มตัวเหมือนกัน



ภาพที่ 4-50 การคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสผิดพลาดในกรณีที่อัตราส่วน X/R มีค่าเป็น 10 กระแสผิดพลาด 30 A มีการอิ่มตัวทั้ง CT1 และ CT2

ค่าของขนาดที่คำนวณมาได้ดังแสดงในภาพที่ 4-50(b) นั้นมีขนาดที่ใกล้เคียงกันมาก เช่นเดียวกับการคำนวณหาค่ามุมของสัญญาณทั้งสองที่ให้คำตอบในส่วนของมุมเกือบเท่ากันพอดี ดังแสดงในภาพที่ 4-50(c) ในช่วงเวลาประมาณ 138-140 มิลลิวินาที ขนาดของกระแสจาก CT2 มีความแตกต่างกัน แต่ช่วงเวลาดังกล่าวเป็นช่วงเวลาที่กระแสจาก CT1 มีคุณภาพไม่ดี กระแสทำงานจากเหตุการณ์ดังกล่าวจึงถูกดันไว้ด้วยสัญญาณด้านการตัดวงจร (Block Signal) ดังที่ได้

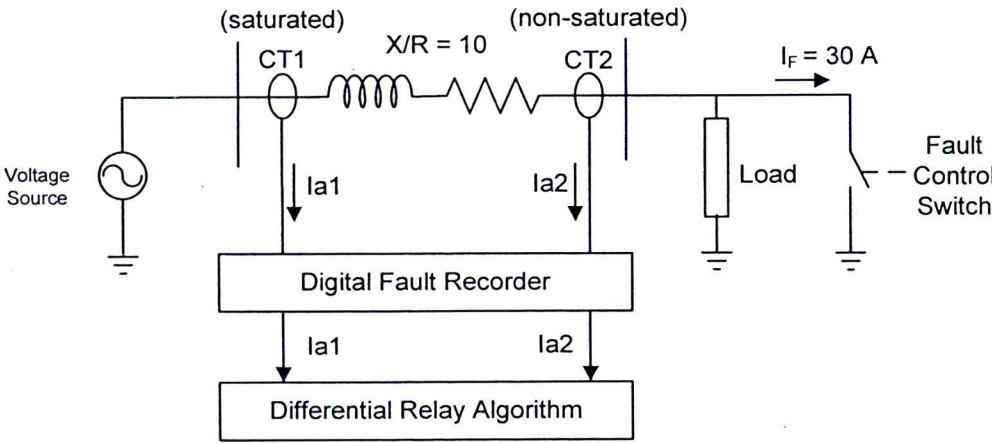
กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 3.7.2 ในส่วนของการตัดสินใจของรีเลย์นั้นทำได้อย่างถูกต้อง คือไม่สั่งปลดวงจร เนื่องจากไม่มีจุดตัดสินใจโดยขึ้นอยู่กับเส้นตัดสินใจดังแสดงในภาพที่ 4-51



ภาพที่ 4-51 การตัดสินใจของรีเลย์ในกรณีที่อัตราส่วน X/R มีค่าเป็น 10 กระแสผิดพลาด 30 A มีการอิ่มตัวทั้ง CT1 และ CT2

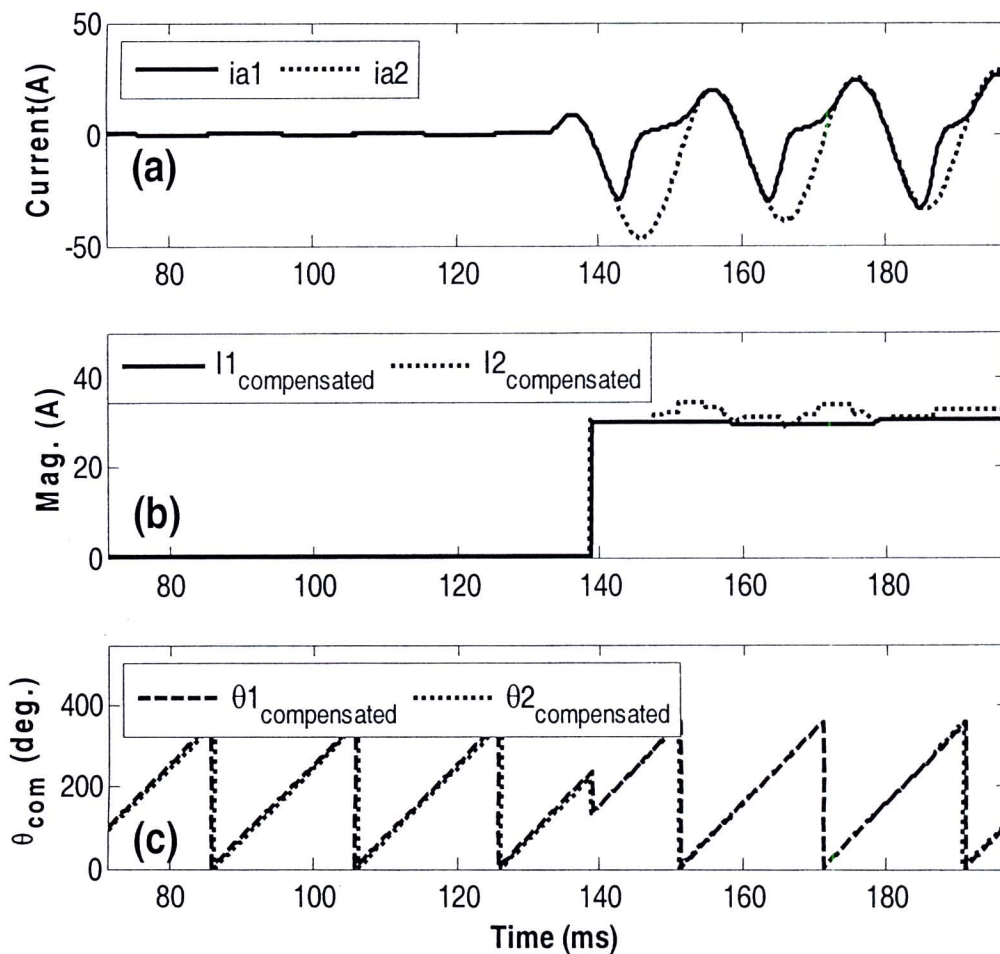
4.2.4 การทดลองกลุ่มที่ 4 อัตราส่วน $X/R = 10$ กระแสผิดพลาด 30 A มีการอิ่มตัวที่ CT1 แต่ CT2 ไม่มีการอิ่มตัว

ในการทดลองนี้จะนำสัญญาณกระแสจากหม้อแปลงกระแส CT1 และ CT2 ในกรณีที่เกิดความผิดพลาดภายนอกเขตป้องกัน โดยขณะเกิดความผิดพลาด อัตราส่วน X/R เป็น 10 กระแสผิดพลาดมีขนาด 30 A โดย CT2 จะไม่มีการอิ่มตัวดังแสดงในภาพที่ 4-52

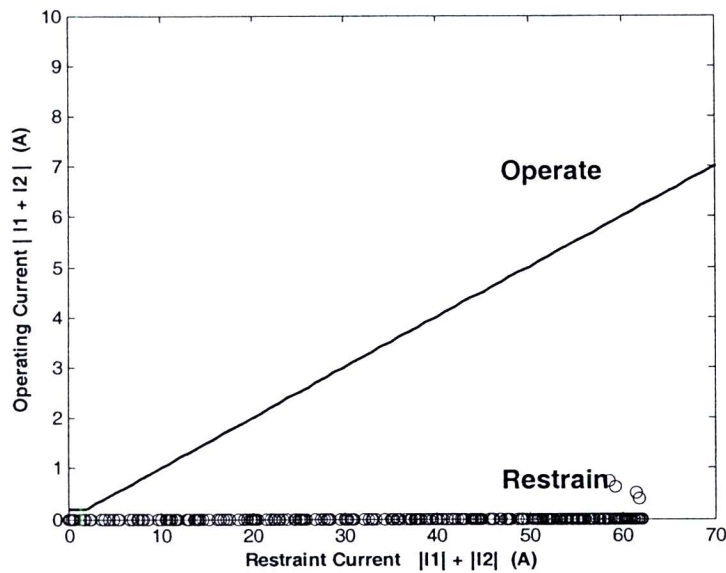


ภาพที่ 4-52 ฟังก์ชันการต่ออุปกรณ์ของกลุ่มการทดลองที่ 4

กระแสฟิดพ่วงมีขนาด 30 A จะส่งผลให้เกิดการอิ่มตัวที่รุนแรงขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีที่กระแสฟิดพ่วงมีขนาด 10 A ภาพที่ 4-53(a) แสดงสัญญาณกระแสที่ได้จากหม้อแปลงกระแส CT1 ซึ่งเกิดการอิ่มตัว แต่สัญญาณกระแสที่ได้จากหม้อแปลงกระแส CT2 นั้นไม่มีการอิ่มตัว แม้กระแสทั้งสองจะมีรูปร่างที่แตกต่างกัน แต่ค่าของขนาดกระแสที่คำนวณได้ดังแสดงในภาพที่ 4-53(b) นั้นมีขนาดที่ใกล้เคียงกันมาก เช่นเดียวกับการคำนวณหาค่ามุมของสัญญาณทั้งสองที่ให้คำตอบในส่วนของมุมเกือบเท่ากันพอดี ในช่วงเวลาประมาณ 150-158 มิลลิวินาที ขนาดของกระแสจาก CT2 มีความแตกต่างอยู่บ้างแต่ช่วงเวลาดังกล่าวเป็นช่วงเวลาที่กระแสจาก CT1 มีคุณภาพไม่ดี กระแสทำงานจากเหตุการณ์ดังกล่าวจึงถูกตัดทิ้งด้วยสัญญาณด้านการตัดวงจร (Block Signal) ดังนั้นการตัดสินใจของรีเลย์จึงทำได้ถูกต้องคือไม่ส่งปลดวงจร เพราะจุดตัดสินใจทุกจุดจะเกิดขึ้นบนเส้นแนวระนาบซึ่งอยู่ต่ำกว่าเส้นตัดสินใจดังแสดงในภาพที่ 4-54



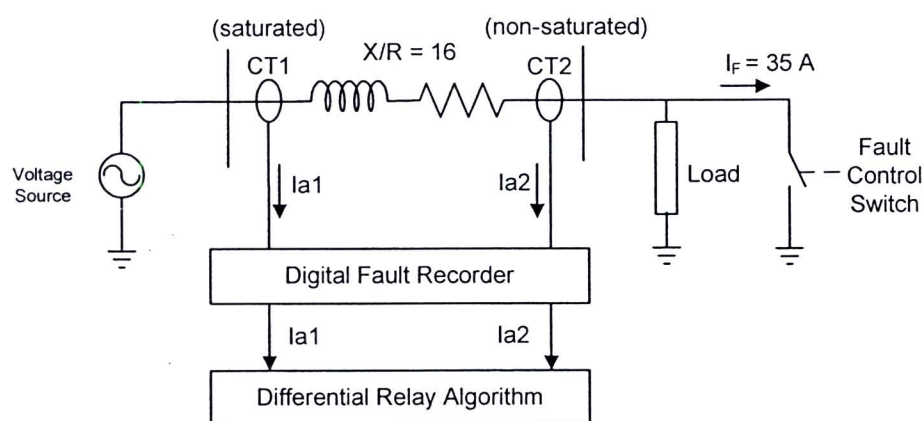
ภาพที่ 4-53 การคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสฟิดพ่วงในกรณีที่อัตราส่วน X/R มีค่าเป็น 10 กระแสฟิดพ่วง 30 A มีการอิ่มตัวที่ CT1 แต่ CT2 ไม่มีการอิ่มตัว



ภาพที่ 4-54 การตัดสินใจของรีเลย์ในกรณีที่อัตราส่วน X/R มีค่าเป็น 10 กระแสผิดพลาด 30 A มีการอิ่มตัวที่ CT1 แต่ CT2 ไม่มีการอิ่มตัว

4.2.5 การทดลองกลุ่มที่ 5 อัตราส่วน $X/R = 16$ กระแสผิดพลาด 35 A มีการอิ่มตัวที่ CT1 แต่ CT2 ไม่มีการอิ่มตัว

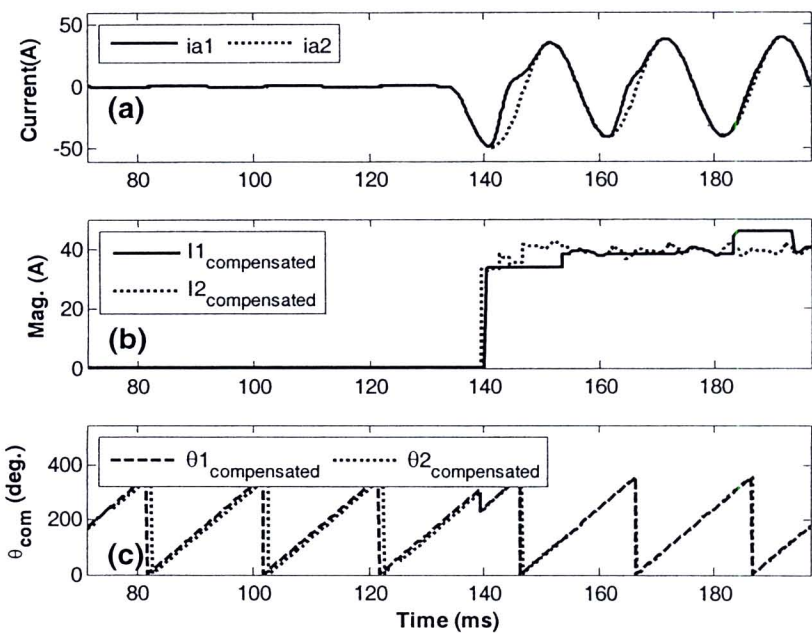
ในการทดลองนี้มีการควบคุมให้อัตราส่วน X/R มีค่าเป็น 16 และขนาดของกระแสผิดพลาดมีค่าเป็น 35 A โดย CT2 จะไม่มีการอิ่มตัวดังแสดงในภาพที่ 4-55



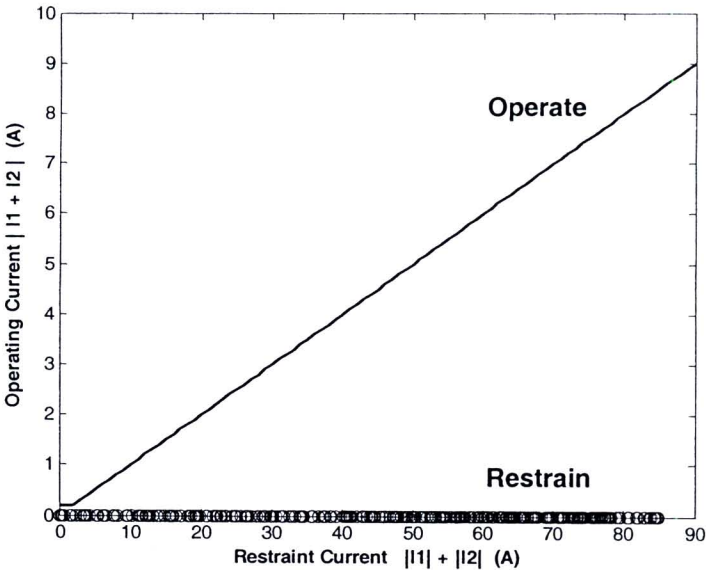
ภาพที่ 4-55 ฟังก์ชันการต่ออุปกรณ์ของกลุ่มการทดลองที่ 5

ในภาพที่ 4-56(a) แสดงสัญญาณกระแสที่ตรวจวัดได้จากหม้อแปลงกระแส CT1 และ CT2 ผลการคำนวณหาค่าขนาดและมุมของกระแสนั้นได้แสดงไว้ในภาพที่ 4-56(b) และภาพที่ 4-56(c) ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ามีบางช่วงที่ขนาดของกระแสนี้ค่าไม่เท่ากัน เช่นช่วงเวลาประมาณ 145-150 มิลลิวินาที แต่ความแตกต่างของขนาดดังกล่าวไม่ได้ส่งผลต่อการตัดสินใจตัดวงจรของรีเลย์

เนื่องจากช่วงเวลาดังกล่าวสัญญาณกระแสจากหม้อแปลงกระแส CT1 ไม่ได้อยู่ในสภาพที่ดี กระแสทำงานในช่วงเวลาดังกล่าวจะถูกต้านไว้ ส่งผลให้ไม่มีการส่งปลดวงจรดังแสดงในภาพที่ 4-57



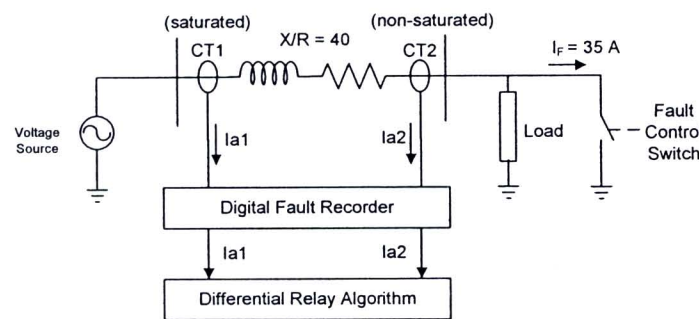
ภาพที่ 4-56 การคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสผิดพ้องในกรณีที่อัตราส่วน X/R มีค่าเป็น 16 กระแสผิดพ้อง 5 A มีการอิ่มตัวที่ CT1 แต่ CT2 ไม่มีการอิ่มตัว



ภาพที่ 4-57 การตัดสินใจของรีเลย์ในกรณีที่อัตราส่วน X/R มีค่าเป็น 16 กระแสผิดพ้อง 5 A มีการอิ่มตัวที่ CT1 แต่ CT2 ไม่มีการอิ่มตัว

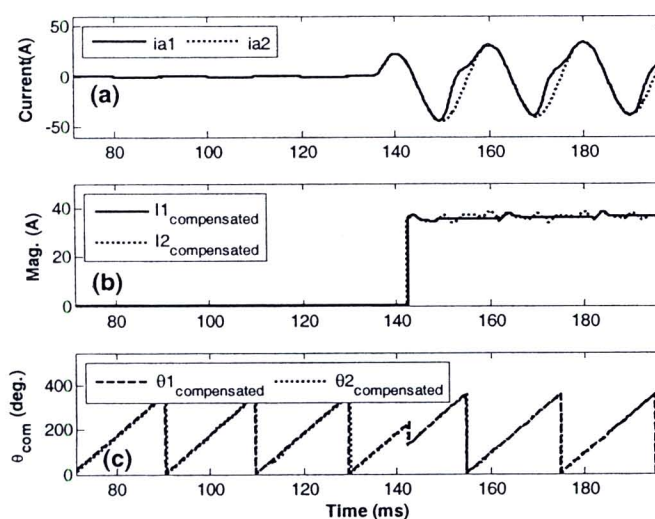
4.2.6 การทดลองกลุ่มที่ 6 อัตราส่วน $X/R = 40$ กระแสผิดพลาด 35 A มีการอิ่มตัวที่ CT1 แต่ CT2 ไม่มีการอิ่มตัว

การทดสอบในหัวข้อนี้จะเป็นการทดสอบในกรณีที่อัตราส่วน X/R มีค่าเป็น 40 ซึ่งเป็นค่าที่สูง ดังแสดงในภาพที่ 4-58 ส่งผลให้องค์ประกอบสัญญาณกระแสตรงจะคงตัวอยู่นาน อีกทั้งกระแสผิดพลาดยังมีขนาดสูงถึง 35 A จึงทำให้เกิดการอิ่มตัวของแกนหม้อแปลงที่รุนแรงกว่ากรณีที่ค่าอัตราส่วน X/R ต่ำ หรือ ค่ากระแสผิดพลาดต่ำ ดังแสดงในภาพที่ 4-59(a)

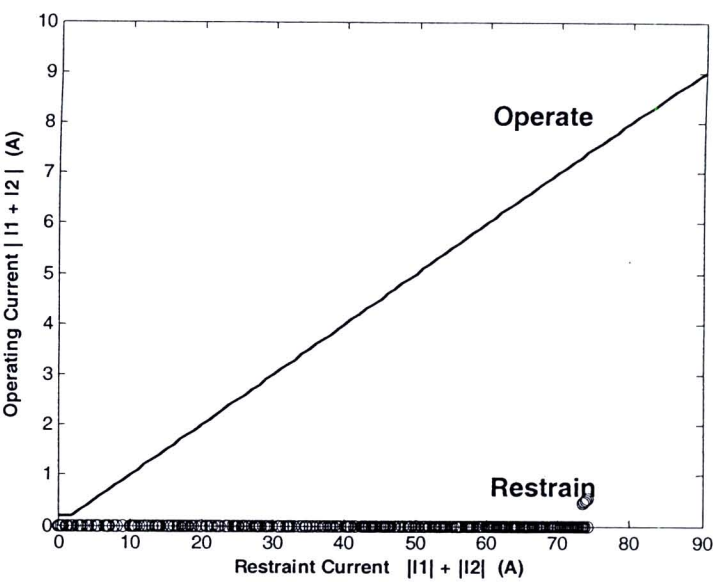


ภาพที่ 4-58 ผังการต่ออุปกรณ์ของกลุ่มการทดลองที่ 6

ภาพที่ 4-59(b) แสดงผลของการคำนวณค่าขนาด จะเห็นได้ว่าผลการคำนวณขนาดกระแสที่ได้จากหม้อแปลง CT1 ซึ่งเกิดการอิ่มตัวเทียบกับขนาดกระแสที่ได้จากการคำนวณของกระแส CT2 ที่ไม่มีการอิ่มตัวแล้ว มีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก อัลกอริทึมจึงไม่ส่งปลดวงจร ดังจะเห็นได้จากภาพที่ 4-60 จุดตัดสินใจทุกจุดจะอยู่ภายใต้เส้นตัดสินใจ ซึ่งเป็นสิ่งที่บ่งชี้ว่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนั้นเป็นความผิดพลาดภายนอก



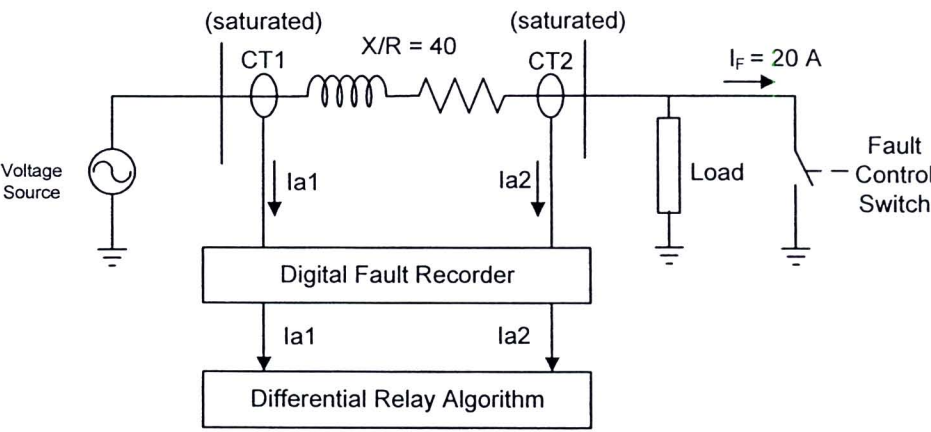
ภาพที่ 4-59 การคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสผิดพลาดในกรณีที่อัตราส่วน X/R มีค่าเป็น 40 กระแสผิดพลาด 35 A มีการอิ่มตัวทั้ง CT1 แต่ CT2 ไม่มีการอิ่มตัว



ภาพที่ 4-60 การตัดสินใจของรีเลย์ในกรณีที่อัตราส่วน X/R มีค่าเป็น 40 กระแสผิดพลาด 35 A มีการล้มตัวทั้ง CT1 แต่ CT2 ไม่มีการล้มตัว

4.2.7 การทดลองกลุ่มที่ 7 อัตราส่วน $X/R = 40$ กระแสผิดพลาด 20 A มีการล้มตัวทั้ง CT1 และ CT2

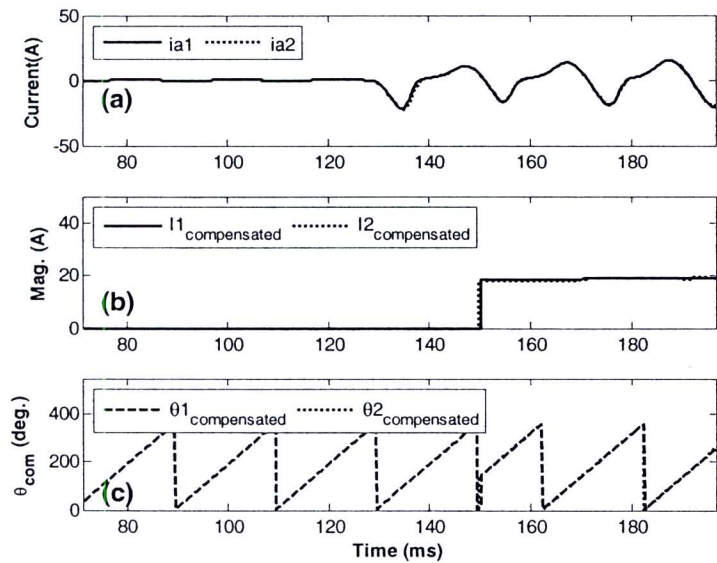
การทดสอบในหัวข้อนี้จะเป็นการทดสอบในกรณีที่อัตราส่วน X/R มีค่าเป็น 40 ซึ่งเป็นค่าที่สูง ค่ากระแสผิดพลาดมีค่าเป็น 20 A ดังแสดงในภาพที่ 4-61



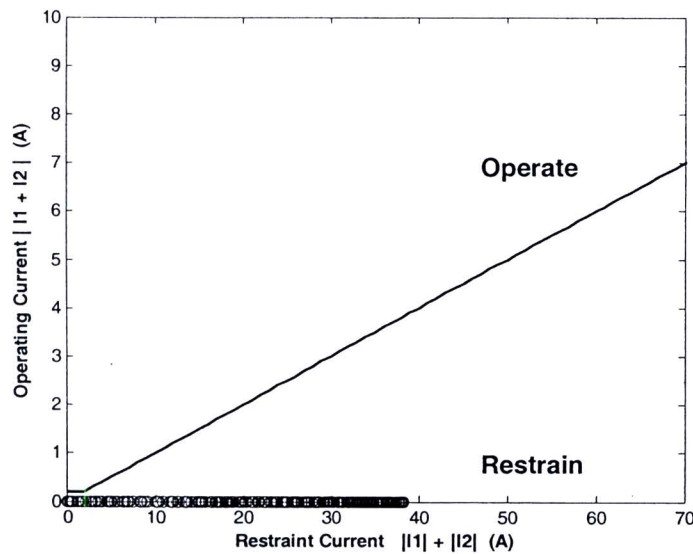
ภาพที่ 4-61 ผังการต่ออุปกรณ์ของกลุ่มการทดลองที่ 7

การที่ระบบมีสัดส่วน X/R สูง ส่งผลให้องค์ประกอบสัญญาณกระแสตรงจะคงตัวอยู่นานจะเกิดการล้มตัวของแกนหม้อแปลงที่รุนแรงกว่ากรณีที่ค่าอัตราส่วน X/R ต่ำ ทั้งหม้อแปลงกระแส CT1 และ CT2 เกิดการล้มตัวอย่างรุนแรงในลักษณะเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 4-62(a) ผลของการคำนวณค่าขนาดทำได้ถูกต้องดังแสดงในภาพที่ 4-62(b) แต่ในการตรวจจับสัญญาณคุณภาพดี

นั้นไม่สามารถทำได้ในคาบแรกของกระแสผิดพ้อง เนื่องจากข้อมูลสัญญาณคุณภาพดีในคาบแรก นั้นมีน้อยเพราะเกิดการอ้อมตัวที่รุนแรง แต่อย่างไรก็ดีอัลกอริธึมสามารถตรวจจับสัญญาณคุณภาพดี ได้หลังจากที่หม้อแปลงกระแสออกจากสภาวะอ้อมตัว จากภาพจะเห็นได้ว่าอัลกอริธึมใช้เวลาใน การตัดสินใจประมาณ 20 มิลลิวินาที สำหรับการตัดสินใจตัดวงจรของรีเลย์นั้นทำได้ถูกต้อง คือไม่ส่งปลดวงจรเพราะจุดตัดสินใจทุกจุดอยู่ภายใต้เส้นตัดสินใจดังแสดงในภาพที่ 4-63



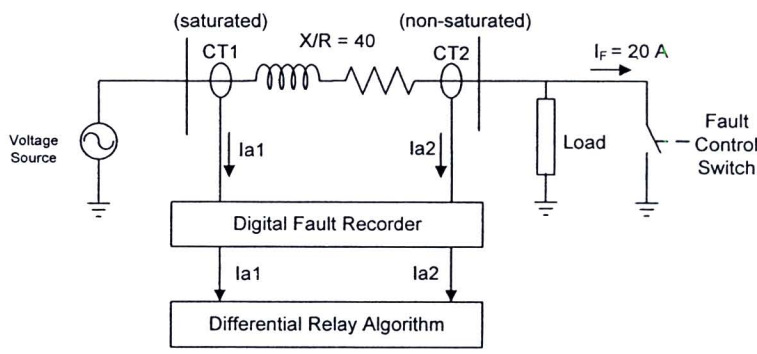
ภาพที่ 4-62 การคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสผิดพ้องในกรณีที่อัตราส่วน X/R มีค่าเป็น 40 กระแสผิดพ้อง 20 A มีการอ้อมตัวทั้ง CT1 และ CT2



ภาพที่ 4-63 การตัดสินใจของรีเลย์ในกรณีที่อัตราส่วน X/R มีค่าเป็น 40 กระแสผิดพ้อง 20 A มีการอ้อมตัวทั้ง CT1 และ CT2

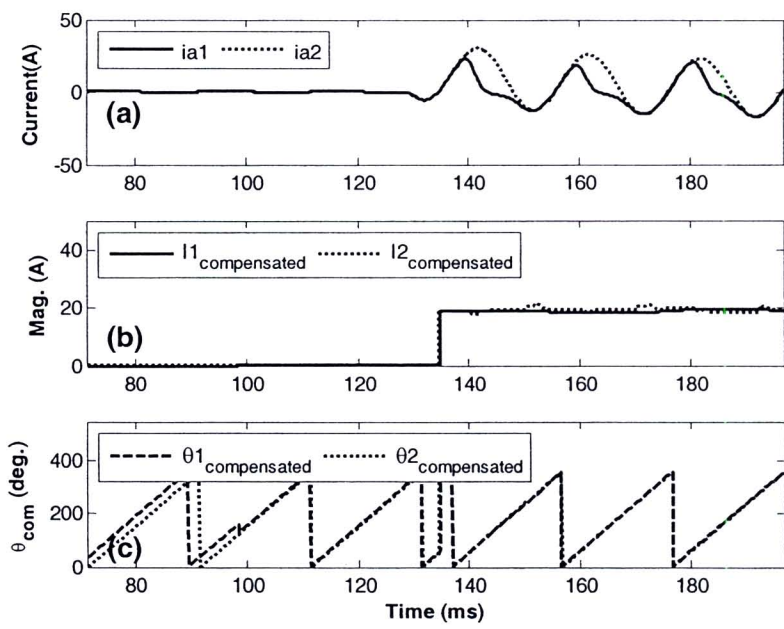
4.2.8 การทดลองกลุ่มที่ 8 อัตราส่วน $X/R = 40$ กระแสผิดพลาด 20 A มีการอิ่มตัวที่ CT1 แต่ CT2 ไม่มีการอิ่มตัว

การทดลองในกลุ่มนี้จะทำการทดลองเหมือนกับการทดลองในกลุ่มที่ 7 จะต่างกันแต่เพียง หม้อแปลงกระแส CT2 นั้นจะไม่มีการอิ่มตัว ดังแสดงในภาพที่ 4-64

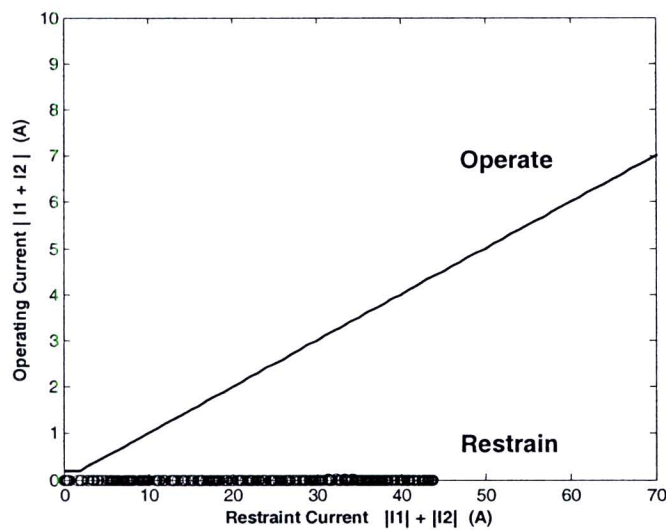


ภาพที่ 4-64 ฟังก์ชันการต่ออุปกรณ์ของกลุ่มการทดลองที่ 8

ผลการคำนวณค่าขนาดของกระแสนั้นทำได้ถูกต้อง โดยขนาดของกระแสทั้งสองนั้นอยู่ที่ประมาณ 20 A การเท่ากันของทั้งขนาดและมุมของกระแสนั้นส่งผลให้ค่ากระแสผลต่างมีค่าต่ำมาก อัลกอริทึมในการประเมินสถานะของรีเลย์จึงทราบได้ว่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเป็นความผิดพลาดภายนอก ดังแสดงในภาพที่ 4-66 ซึ่งจุดตัดสินใจนั้นจะวางตัวอยู่ในแนวระนาบที่ต่ำกว่าเส้นตัดสินใจเสมอ



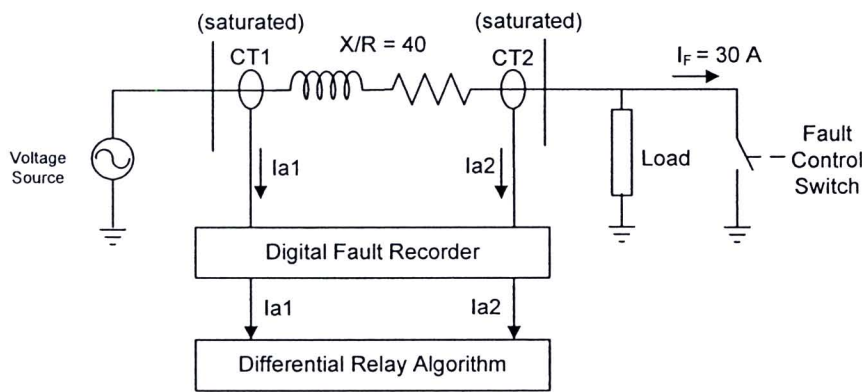
ภาพที่ 4-65 การคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสผิดพลาดในกรณีที่อัตราส่วน X/R มีค่าเป็น 40 กระแสผิดพลาด 20 A มีการอิ่มตัวที่ CT1 แต่ CT2 ไม่มีการอิ่มตัว



ภาพที่ 4-66 การตัดสินใจของรีเลย์ในกรณีที่อัตราส่วน X/R มีค่าเป็น 40 กระแสผิดพลาด 20 A มีการอิ่มตัวที่ CT1 แต่ CT2 ไม่มีการอิ่มตัว

4.2.9 การทดลองกลุ่มที่ 9 อัตราส่วน $X/R = 40$ กระแสผิดพลาด 30 A มีการอิ่มตัวทั้ง CT1 และ CT2

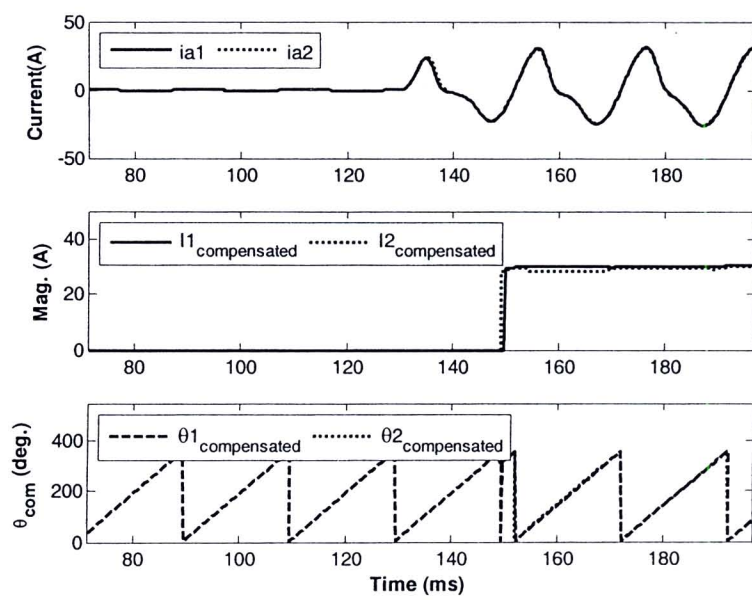
ในการทดลองนี้จะทำการทดลองในกรณีที่กระแสผิดพลาดขนาด 30 A เกิดขึ้นในระบบที่มีอัตราส่วน X/R เป็น 40 (มีค่า สูง) ดังแสดงในภาพที่ 4-67



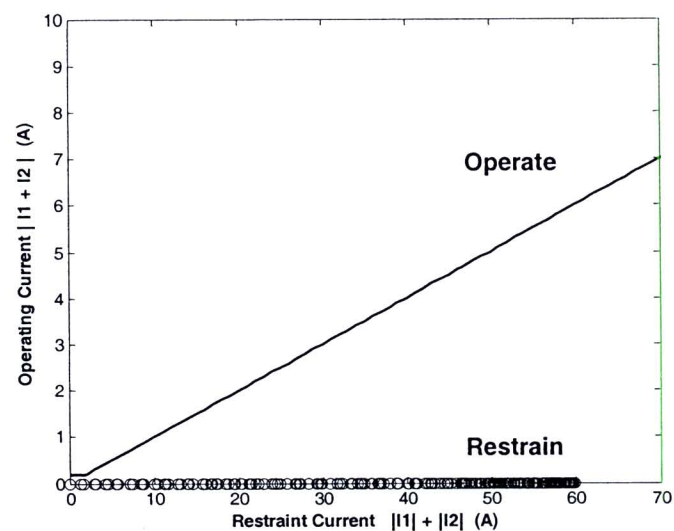
ภาพที่ 4-67 ฟังก์ชันต่ออุปกรณ์ของกลุ่มการทดลองที่ 9

การที่อัตราส่วน X/R มีค่าสูง ส่งผลให้องค์ประกอบสัญญาณกระแสตรงคงตัวอยู่นาน ประกอบกับมีกระแสผิดพลาดขนาดสูง หม้อแปลงกระแสจึงมีการอิ่มตัวที่รุนแรงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4-68(a) สัญญาณทั้งจากหม้อแปลงกระแส CT1 และ CT2 เกิดการอิ่มตัว อย่างไรก็ตาม อัลกอริทึมสามารถที่จะหาขนาดของหม้อแปลงกระแสได้ถูกต้องดังแสดงในภาพที่ 4-68(b) โดยขนาดกระแสผิดพลาดที่คำนวณได้จะอยู่ที่ประมาณ 30 A ในส่วนของการคำนวณหาค่ามุมของสัญญาณนั้นทำได้ถูกต้องเช่นกันดังแสดงในภาพที่ 4-68(c) แต่ในมุมมองของความเร็ว

ในการ ลู่เข้าสู่ค่าขนาดนั้นต้องใช้เวลาประมาณ 18 มิลลิวินาที ทั้งนี้เป็นเพราะกระแสผิดพ้องในช่วง ครึ่งคาบแรกนั้นมีการอึดตัวอย่างรุนแรง ทำให้การปรับค่าขนาดของกระแสจะต้องรอการเกิดขึ้น ใหม่ของสัญญาณคุณภาพดี สำหรับการตัดสินใจของรีเลย์ทำได้ถูกต้อง คือ ไม่สั่งปลดวงจรดังแสดง ในภาพที่ 4-69



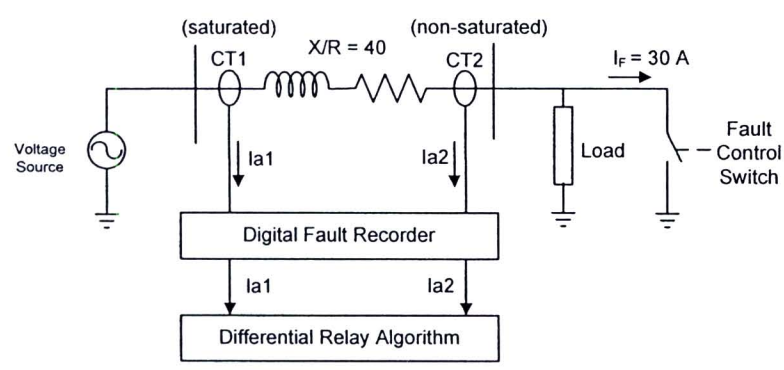
ภาพที่ 4-68 การคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสผิดพ้องในกรณีที่มีอัตราส่วน X/R มีค่าเป็น 40 กระแสผิดพ้อง 30 A มีการอึดตัวทั้ง CT1 และ CT2



ภาพที่ 4-69 การตัดสินใจของรีเลย์ในกรณีที่มีอัตราส่วน X/R มีค่าเป็น 40 กระแสผิดพ้อง 30 A มีการอึดตัวทั้ง CT1 และ CT2

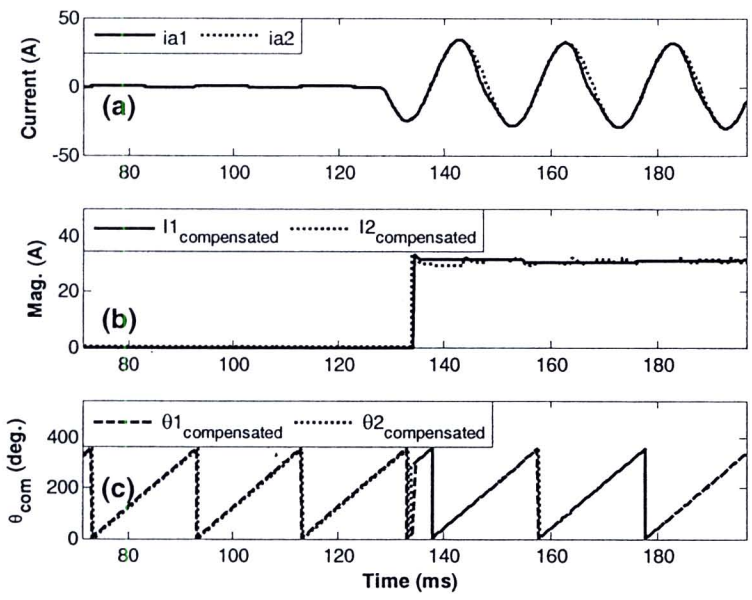
4.2.10 การทดลองกลุ่มที่ 10 อัตราส่วน $X/R = 40$ กระแสผิดพลาด 30 A มีการอิ่มตัวที่ CT1 แต่ CT2 ไม่มีการอิ่มตัว

การทดลองในกลุ่มนี้จะทำการทดลองเหมือนกับการทดลองในกลุ่มที่ 9 จะต่างกันแต่เพียงหม้อแปลงกระแส CT2 นั้นจะไม่มีการอิ่มตัว ดังแสดงในภาพที่ 4-70

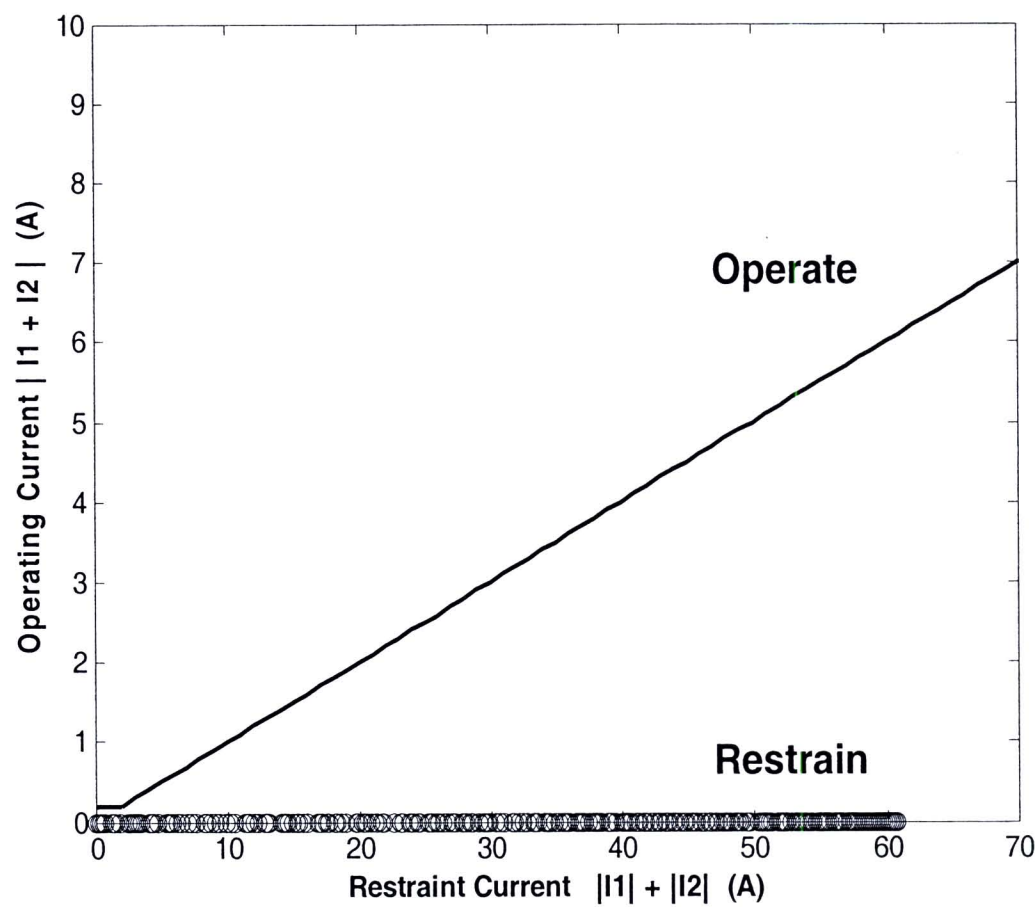


ภาพที่ 4-70 ผังการต่ออุปกรณ์ของกลุ่มการทดลองที่ 10

ผลการคำนวณค่าของกระแสนั้นทำได้ถูกต้อง โดยขนาดของกระแสทั้งสองนั้นอยู่ที่ประมาณ 30 A ดังแสดงในภาพที่ 4-71 การเท่ากันของทั้งขนาดและมุมของกระแสนั้นส่งผลให้ค่ากระแสผลต่างมีค่าต่ำมาก อัลกอริทึมในการประเมินสถานะของรีเลย์จึงทราบได้ว่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเป็นความผิดพลาดภายนอก ดังแสดงในภาพที่ 4-72 ซึ่งจุดตัดสินใจนั้นจะวางตัวอยู่ในแนวระนาบที่ต่ำกว่าเส้นตัดสินใจเสมอ



ภาพที่ 4-71 การคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสผิดพลาดในกรณีที่อัตราส่วน X/R มีค่าเป็น 40 กระแสผิดพลาด 30 A มีการอิ่มตัวที่ CT1 แต่ CT2 ไม่มีการอิ่มตัว



ภาพที่ 4-72 การตัดสินใจของรีเลย์ในกรณีที่อัตราส่วน X/R มีค่าเป็น 40 กระแสผิดพลาด 30 A มีการล้มตัวที่ CT1 แต่ CT2 ไม่มีการล้มตัว

4.3 การทดสอบอัลกอริทึมโดยใช้สัญญาณจากสัญญาณที่ได้จากการบันทึกของรีเลย์ป้องกันขณะเกิดเหตุผิดพลาดจริง

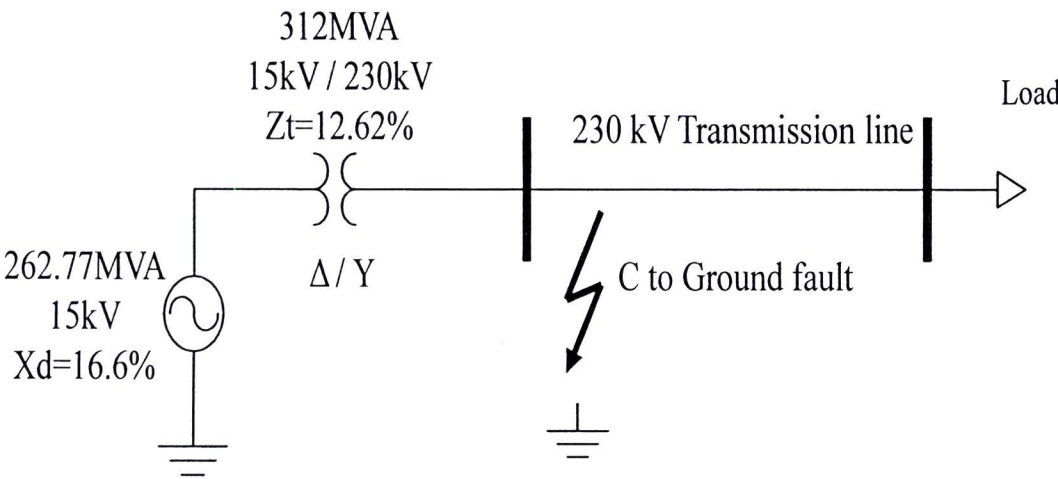
รีเลย์ป้องกันสมัยใหม่มีการนำเอาเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์เข้ามาประยุกต์ใช้ ส่งผลให้รีเลย์มีขีดความสามารถที่เพิ่มขึ้น ความสามารถอย่างหนึ่งที่เป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์เหตุการณ์และการพัฒนาระบบป้องกันไฟฟ้ากำลังคือการที่รีเลย์สามารถบันทึกรูปร่างของสัญญาณในช่วงเวลา ก่อนและหลังเกิดความผิดพลาดได้ ในการตรวจสอบการทำงานของอัลกอริทึมจึงได้ประยุกต์นำเอาสัญญาณดังกล่าวจำนวน 31 สัญญาณ มาป้อนเป็นสัญญาณขาเข้าให้กับอัลกอริทึมที่มีเสถียรภาพต่อการผิดเพี้ยนของสัญญาณกระแส โดยสัญญาณที่นำมาทดสอบนั้นมาจากรีเลย์ป้องกันของมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1 MW 1 ตัว และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 262.77 MW จำนวน 5 ตัว (บางตัวถูกปลดออกจากระบบมากกว่าหนึ่งครั้ง) โดยสัญญาณที่ได้จากการบันทึกของรีเลย์ป้องกันสามารถแบ่งออกเป็นสามกลุ่มกรณีคือ

กลุ่มกรณีที่ 1 สัญญาณจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 262.77 MW ในกรณีที่ความผิดปกติไม่ได้เกิดขึ้น แต่สัญญาณกระแสมีความผิดปกติ (จำนวน 10 สัญญาณ)

กลุ่มกรณีที่ 2 สัญญาณจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 262.77 MW ในกรณีที่เกิดความผิดปกติภายนอก สัญญาณกระแสไม่มีความผิดปกติ (จำนวน 20 สัญญาณ)

กลุ่มกรณีที่ 3 สัญญาณจากมอเตอร์ขนาด 1 MW ในกรณีที่เกิดความผิดปกติภายใน หม้อแปลงกระแสมีการล้มตัวอย่างรุนแรง

สำหรับกลุ่มกรณีที่ 1 และกลุ่มกรณีที่ 2 นั้นเป็นสัญญาณที่ได้มาจากรีเลย์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งถูกส่งปลดออกจากระบบด้วยเหตุผิดปกติภายนอก เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหล่านี้ติดตั้งอยู่ในโรงงานผลิตไฟฟ้าแห่งหนึ่งของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย โดยความผิดปกติที่เกิดขึ้นนั้นไม่ได้เกิดขึ้นที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่เกิดขึ้นที่สายส่ง โดยสาเหตุเกิดจากการเผาไหม้ในใกล้แนวสายส่งทำให้เกิดควัน และนำมาซึ่งการเกิดลัดวงจรที่สายส่งเฟส C ลงดิน ดังแสดงในภาพที่ 4-73



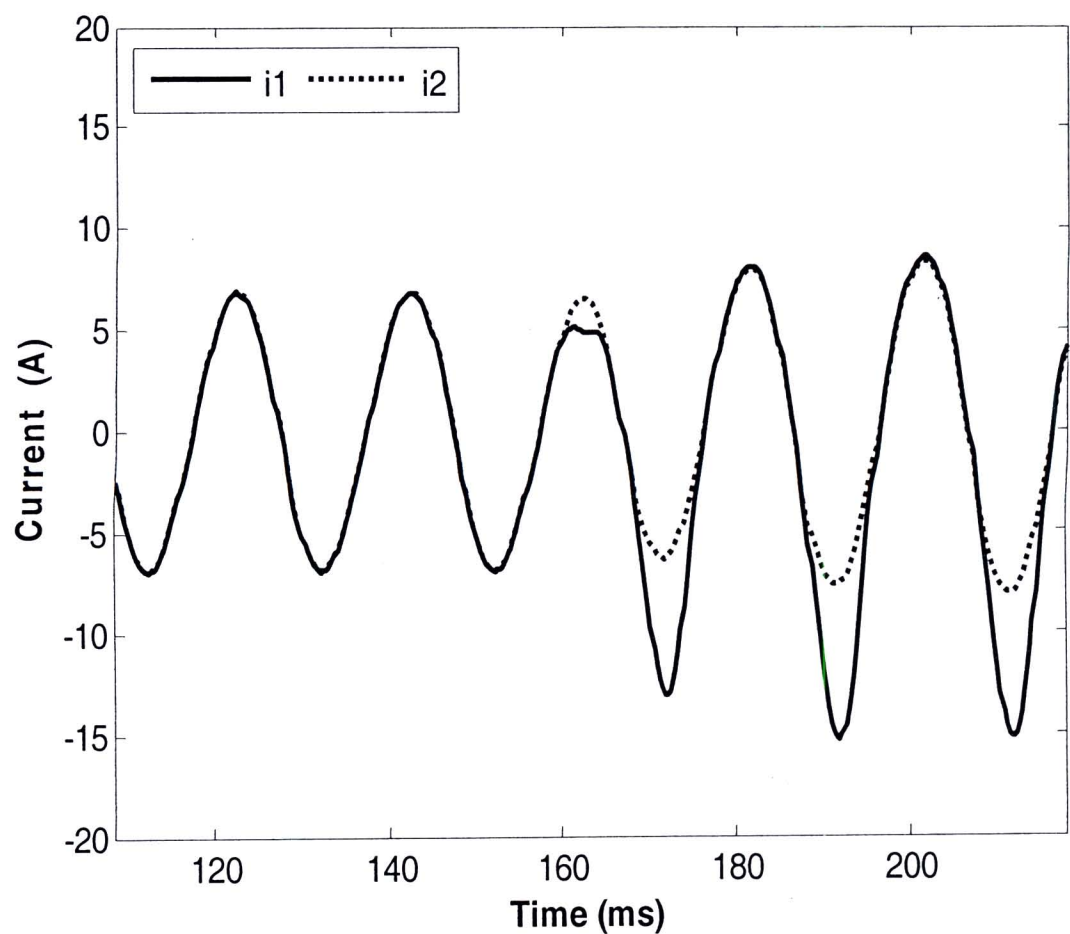
ภาพที่ 4-73 การเกิดความผิดปกติบนสายส่ง

กระแสผิดปกติดังกล่าวไหลผ่านหม้อแปลง Δ (15 kV) / Y (230kV) จึงทำให้กระแสนาตรงสูงไปปรากฏที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เฟส A และเฟส C สำหรับเฟส B นั้นไม่ได้รับผลกระทบใด ๆ จากความผิดปกติดังกล่าว อย่างไรก็ตามความผิดปกตินั้นเกิดขึ้นกับสายส่งไม่ได้เกิดขึ้นกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า รีเลย์ผลต่างที่ป้องกันเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่ควรจะสั่งปลดวงจร

4.3.1 กลุ่มกรณีที่ 1 สัญญาณจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 262.77 MW ในกรณีที่ความผิดปกติไม่ได้เกิดขึ้น แต่สัญญาณกระแสมีความผิดปกติ (จำนวน 10 สัญญาณทดสอบ)

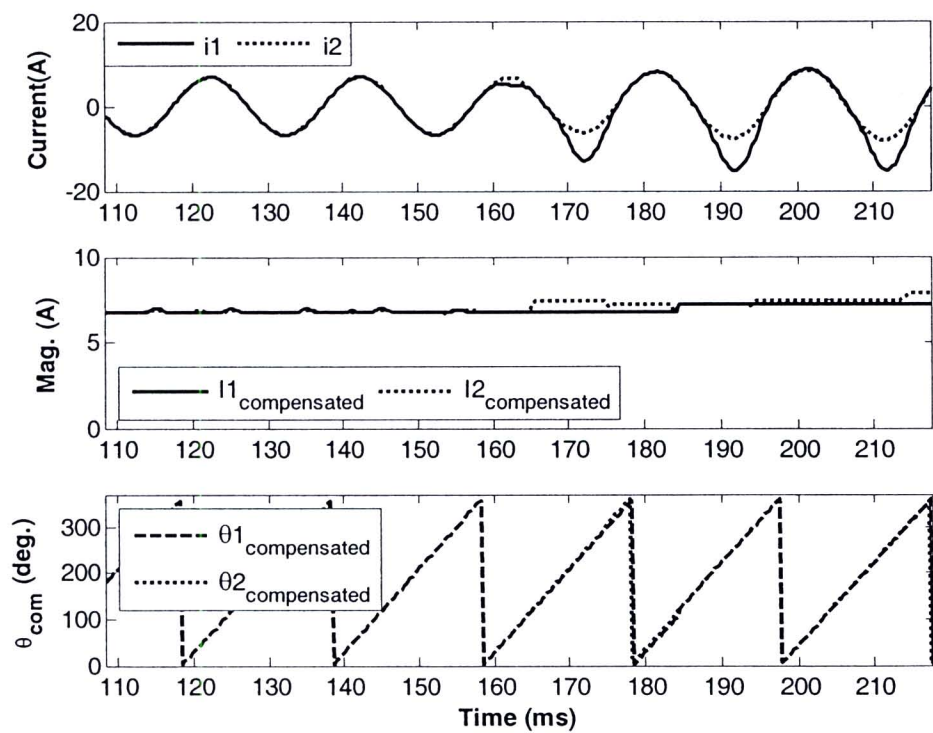
ในกรณีศึกษาที่ รีเลย์ผลต่างได้มีการสั่งปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งที่ไม่ได้มีความผิดปกติใด ๆ เกิดขึ้นกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากการตรวจสอบบันทึกการทำงานของรีเลย์ มีการแจ้งว่าสั่งปลดวงจรด้วยความผิดปกติบนเฟส B ทั้งที่ไม่มีความผิดปกติใดในขณะนั้นที่มีความเกี่ยวข้องกับ

เฟส B ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อนำสัญญาณของเฟส B มาตรวจสอบพบว่าสัญญาณกระแสที่ได้จากการตรวจวัดของหม้อแปลงกระแสเกิดการผิดเพี้ยนดังแสดงในภาพที่ 4-74 ซึ่งความผิดเพี้ยนนี้เกิดจากสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสในเฟสข้างเคียงเข้ามารบกวน [31] ส่งผลให้รีเลย์ผลต่างเข้าใจผิดว่ามีความผิดปกติเกิดขึ้น จึงสั่งปลดวงจรซึ่งเป็นการตัดสินใจที่ผิดพลาด ส่งผลให้เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังลดลง อีกทั้งโรงไฟฟ้ายังต้องเสียค่าใช้จ่ายมากกว่า 3 ล้านบาทต่อครั้งในการสั่งปลดวงจรดังกล่าว

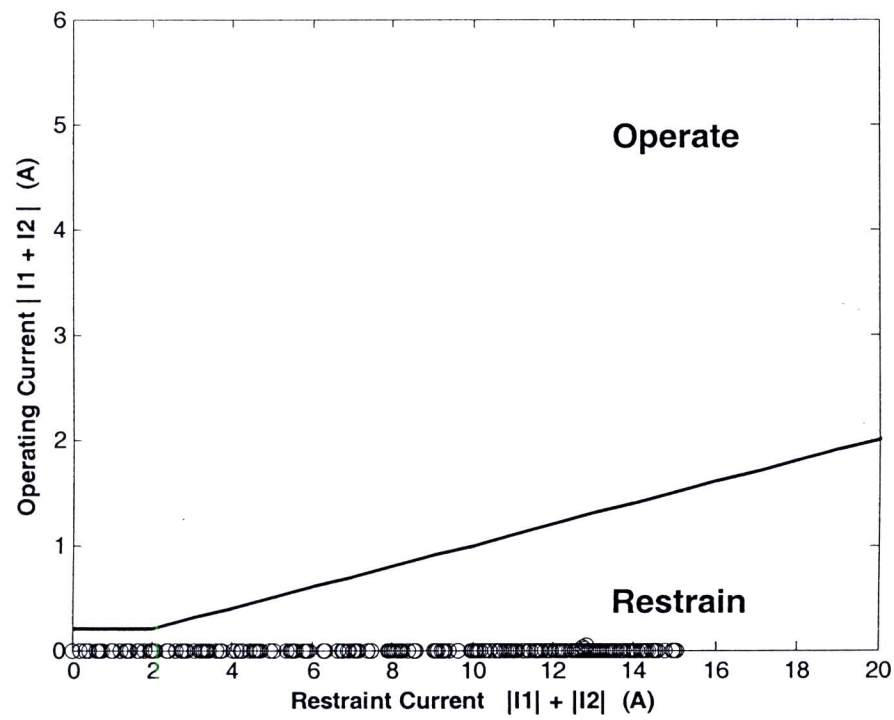


ภาพที่ 4-74 สัญญาณกระแสที่มีความผิดเพี้ยน

จากผลการทดสอบพบว่าอัลกอริทึมที่มีเสถียรภาพต่อการผิดเพี้ยนของสัญญาณกระแสซึ่งนำเสนอโดยงานวิจัยชิ้นนี้สามารถตัดสินใจได้ถูกต้อง คือจะไม่สั่งปลดวงจร เนื่องจากในช่วงสัญญาณมีความผิดเพี้ยนนั้น สัญญาณกระแสจะไม่ใช่สัญญาณรูปไซน์ชอยด์ที่มีความถี่ 50 Hz อัลกอริทึมจึงไม่สั่งปลดวงจรในช่วงเวลาดังกล่าว ดังแสดงในภาพที่ 4-75 และภาพที่ 4-76 สำหรับผลการทดสอบของสัญญาณทดสอบที่ 2 ถึง 10 นั้นจะแสดงไว้ในภาคผนวก ก



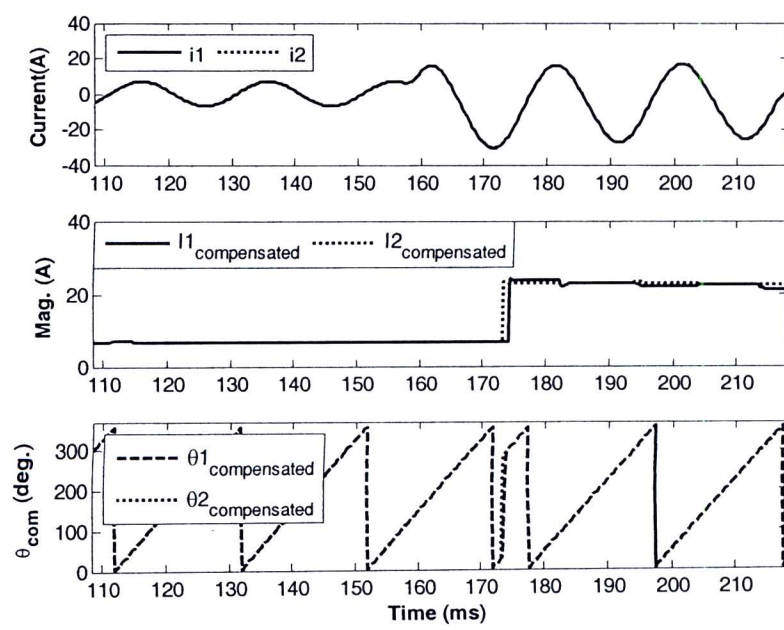
ภาพที่ 4-75 การคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสที่เกิดความผิดเพี้ยน (สัญญาณทดสอบที่ 1)



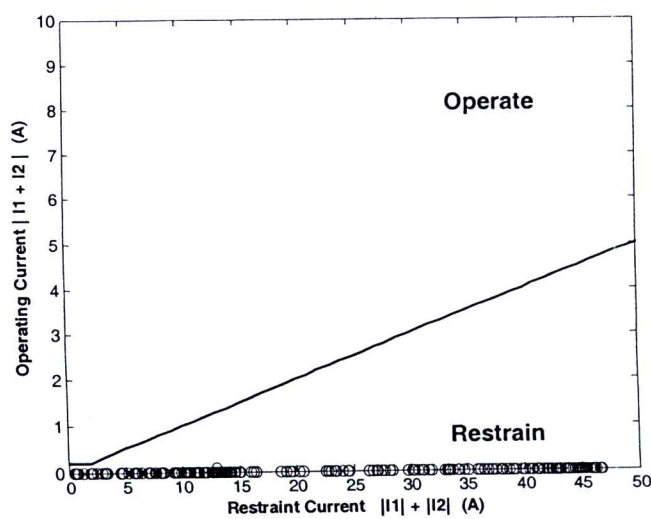
ภาพที่ 4-76 การตัดสินใจของรีเลย์ผลต่างกรณีสัญญาณกระแสเกิดความผิดเพี้ยน (สัญญาณทดสอบที่ 1)

4.3.2 กลุ่มกรณีที่ 2 สัญญาณจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 262.77 MW ในกรณีที่เกิดความผิดปกติภายนอก สัญญาณกระแสไม่มีความผิดปกติ (จำนวน 20 สัญญาณ)

สัญญาณที่ใช้ในการทดสอบนี้เป็นสัญญาณที่ได้จากกรณีที่เกิดความผิดปกติที่สายส่งดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ดังนั้นรีเลย์ผลต่างจะต้องไม่สั่งปลดวงจร ภาพที่ 4-77 และ ภาพที่ 4-78 แสดงผลการคำนวณค่าขนาดของสัญญาณกระแสทดสอบ และแสดงผลการตัดสินใจของรีเลย์ ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่ารีเลย์ผลต่างที่ใช้อัลกอริทึมที่งานวิจัยนี้นำเสนอสามารถตัดสินใจได้ถูกต้อง สำหรับผลการทดสอบสัญญาณหมายเลข 2 ถึง 20 นั้นจะแสดงไว้ในภาคผนวก ข



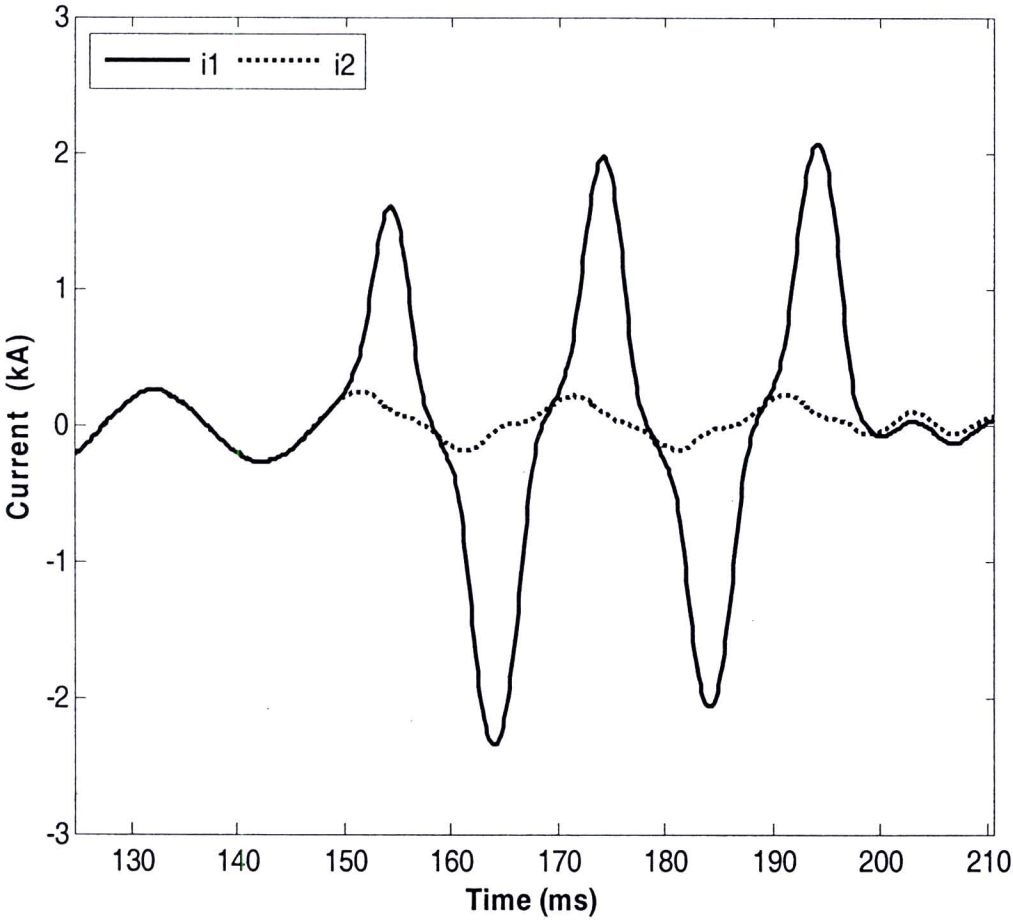
ภาพที่ 4-77 การคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสกรณีเกิดความผิดปกติภายนอก (สัญญาณที่ 1)



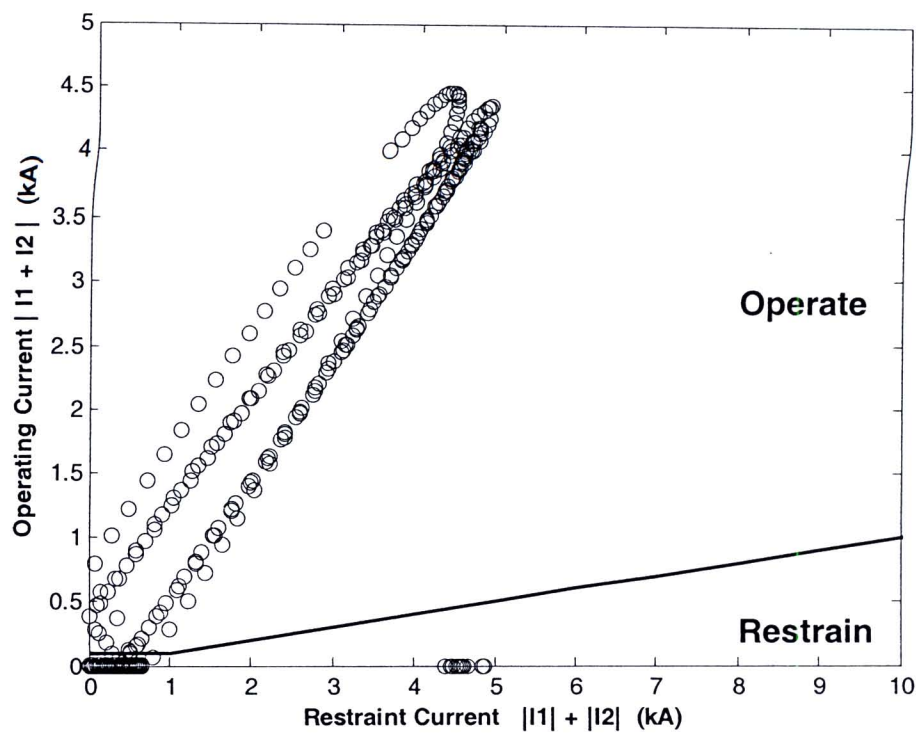
ภาพที่ 4-78 การตัดสินใจของรีเลย์ผลต่างกรณีเกิดความผิดปกติภายนอก (สัญญาณที่ 1)

4.3.3 กลุ่มกรณีที่ 3 สัญญาณจากมอเตอร์ขนาด 1 MW ในกรณีที่เกิดความผิดปกติภายใน สัญญาณกระแสมีการอิมตัวอย่างรุนแรง

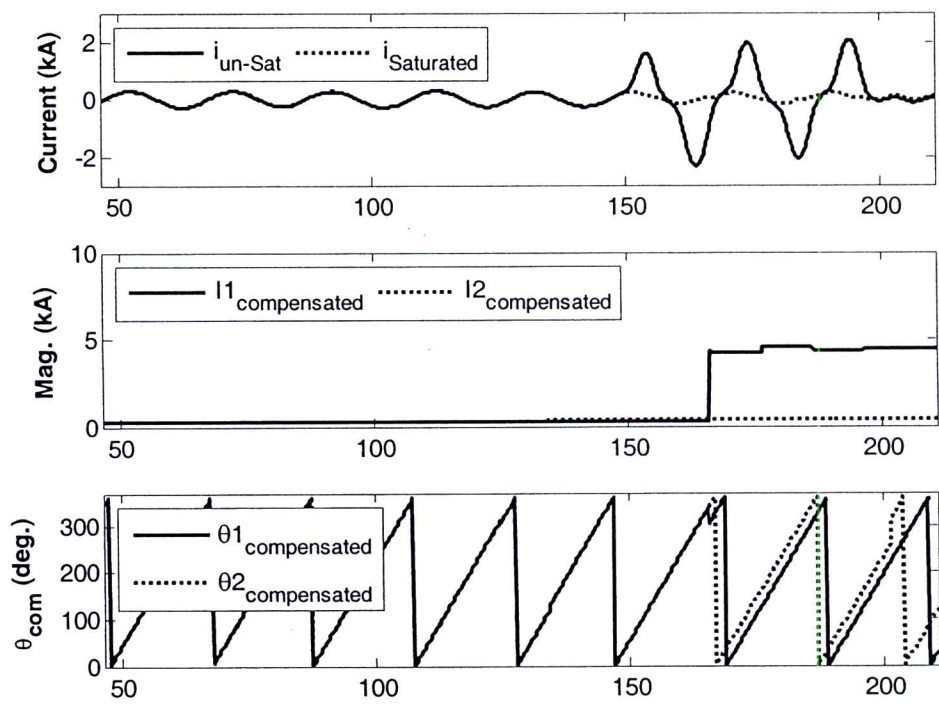
ในการทดสอบนี้ได้นำสัญญาณกระแสผิดปกติที่ได้จากรีเลย์ป้องกันผลต่างของมอเตอร์ขนาด 1 MW ซึ่งเกิดความผิดปกติที่เฟส A ลงดิน รีเลย์ที่ป้องกันมอเตอร์สามารถตัดสินใจถูกต้องคือสั่งปลดวงจร แต่การรายงานผลของขนาดกระแสผิดปกติคลาดเคลื่อนเนื่องจากหม้อแปลงกระแสมีการอิมตัวอย่างรุนแรงดังแสดงในภาพที่ 4-79 ในความเป็นจริงกระแสผิดปกติควรเป็น 4.4 kA แต่รีเลย์รายงานผลว่ากระแสผิดปกติมีขนาดเพียง 1.84 kA เนื่องจากการคำนวณขนาดของกระแสโดยรีเลย์ทั่วไปนั้นจะไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบของการอิมตัวของสัญญาณกระแส ผลที่ผิดพลาดจะส่งผลให้การประเมินอายุการใช้งานของมอเตอร์ผิดพลาดได้ แต่สำหรับอัลกอริทึมที่งานวิจัยนี้นำเสนอ นอกจากจะตัดสินใจปลดวงจรดังแสดงในภาพที่ 4-80 แล้วยังสามารถคำนวณขนาดของกระแสผิดปกติได้แม่นยำกว่าดังแสดงไว้ในภาพที่ 4-81



ภาพที่ 4-79 สัญญาณกระแสผิดปกติของมอเตอร์ที่มีการผิดเพี้ยนอันเนื่องมาจากการอิมตัวของหม้อแปลงกระแส



ภาพที่ 4-80 การตัดสินใจของรีเลย์ผลต่างกรณีที่เกิดความผิดปกติภายในมอเตอร์



ภาพที่ 4-81 การคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสกรณีที่เกิดความผิดปกติภายในมอเตอร์