การศึกษาแรงดันเกินเนื่องจากการเปิด–ปิด สวิตช์ในสายป้อน โดยใช้โปรแกรมภาวะชั่วครู่

A Study of the Overvoltage Caused by Feeder Switching Using Transient Programs

คำนำ

บ่อยครั้ง การเชื่อมต่อระหว่างหม้อแปลงกับสายป้อน, สายส่งเหนือคินกับสายเคเบิ้ลใต้คิน หรือการเชื่อมต่อในส่วนอื่นๆที่เหมาะสม จะมีการเปิค – ปิค สวิตช์เป็นแบบเฟสเดียวในระบบสาม เฟส ซึ่งจะไม่นิยมใช้เบรกเกอร์ระหว่างการเชื่อมต่อนี้ เนื่องจากเป็นการประหยัดในทาง เศรษฐศาสตร์ ภายใต้สภาพการณ์นี้เมื่อมีการจ่ายไฟเกิคขึ้นอาจจะเกิดความรุนแรงของแรงคันเกิน เกิดขึ้นได้

โดยทั่วไปแรงดันเกินจะมีหลายสาเหตุ จึงจำเป็นต้องรวบรวมข้อมูลเบื้องด้น เพื่อใช้ในการ วิเคราะห์หาสาเหตุที่ถูกต้องเสียก่อน การเปิด-ปิด สวิตช์ก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดแรงดันเกิน จากสภาวะชั่วครู่ หรือจากปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนช์ เมื่อระบบมีหม้อแปลงต่อใช้งานร่วม ด้วย ซึ่งผลของแรงดันเกินนี้จำเป็นจะต้องให้ความสำคัญ เนื่องจากจะส่งผลให้เกิดความตึงเครียด บนฉนวน, อุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า เช่น เครื่องล่อฟ้า และความเสียหายอื่นๆ ตามมา

โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองปรากฎการณ์ภาวะชั่วครู่ทางแม่เหล็กไฟฟ้ารวมทั้งธรรมชาติ ทางกล ในปัจจุบันมีมากมายหลายโปรแกรม ATP/EMTP (Alternative Transients Program / electromagnetic transient Program) และ PSCAD/EMTDC (Power Systems Computer Aided Design / electromagnetic transient and d.c.) เป็นโปรแกรมหนึ่งที่สามารถเลียนแบบได้ เนื่องจาก ทั้ง 2 โปรแกรมมีอุปกรณ์ที่ใช้สนับสนุนแบบจำลองในระบบไฟฟ้ากำลังที่ซับซ้อน และระบบ ควบคุมได้ตามต้องการ โดยมีความสามารถในการจำลองครอบคลุมอย่างมีประสิทธิภาพ และมี ลักษณะเฉพาะสำคัญในกระบวนการคำนวณของภาวะชั่วครู่ จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ใน การศึกษาและวิเคราะห์แรงคันเกินเนื่องจากการเปิด–ปิด สวิตช์ในสายป้อน

วัตถุประสงค์

 สึกษาสาเหตุปัญหาแรงดันเกินที่ส่งผลให้เครื่องล่อฟ้าได้รับความเสียหายในระบบของ การไฟฟ้านครหลวงจากกรณีสึกษา

 วิเคราะห์ และหาวิธีที่ไม่ส่งผลให้เกิดปัญหา แรงดันเกินที่ส่งผลให้เครื่องล่อฟ้าได้รับ ความเสียหายในระบบของการไฟฟ้านครหลวงจากกรณีศึกษา โดยสามารถนำไปปฏิบัติงานได้จริง และเสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด

การตรวจเอกสาร

<u>ภาวะชั่วครู่ในระบบไฟฟ้ากำลัง</u>

ในระบบไฟฟ้ากำลังจะมีการรบกวนหลายชนิดที่ส่งผลให้เกิดภาวะชั่วครู่ ตัวอย่างเช่น ปรากฎการณ์ฟ้าผ่าอาจจะสร้างแรงคันเกินภาวะชั่วครู่ หรือในขบวนการทำงานปกติเช่นการปิดของ เบรกเกอร์ และการสวิตซิ่งของอุปกรณ์ก็เป็นสาเหตุให้เกิดภาวะชั่วครู่ทางไฟฟ้า หรือในสภาวะ ผิดปกติ เช่น การเกิดความผิดพร่องทางไฟฟ้าก็เป็นสาเหตุให้เกิดภาวะชั่วครู่ ปรากฎการณ์ทาง กายภาพเหล่านี้ที่พัวพันอยู่กับภาวะชั่วครู่ในระบบไฟฟ้ากำลังสามารถแยกประเภทออกได้ 2 ประเภท คือ

 การทำปฏิกิริยากันระหว่างพลังงานแม่เหล็กที่เก็บในตัวเหนี่ยวนำ และ พลังงานทาง ไฟฟ้าที่เก็บในตัวเก็บประจุ

 การทำปฏิกิริยากันระหว่างพลังงานในเครื่องกลที่เก็บในส่วนที่หมุน และพลังงานไฟฟ้า ที่เก็บในวงจร

ประเภทแรกจะประกอบด้วยภาวะชั่วครู่ทางไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว หรือภาวะแม่เหล็กไฟฟ้า ส่วนประเภทที่สองจะประกอบด้วยภาวะชั่วครู่ทางเครื่องกลไฟฟ้า ซึ่งภาวะชั่วครู่ในธรรมชาติของ ระบบไฟฟ้ากำลังส่วนมาก จะทำให้เกิดการสั่น เพราะฉะนั้นคุณลักษณะจึงขึ้นอยู่กับความถี่ของการ สั่น โดยคุณลักษณะของฐานความถี่ในการสั่นของภาวะชั่วครู่ในระบบไฟฟ้ากำลังสามารถแยก ประเภทได้ดังภาพที่ 1 โดยจุดที่เราสนใจในส่วนนี้จะกล่าวถึงภาวะชั่วครู่ทางไฟฟ้าเท่านั้น



<u>ภาพที่ 1</u> การแบ่งประเภทภาวะชั่วครู่ในระบบไฟฟ้ากำลัง ที่มา: Meliopoulos (1988)

ภาวะชั่วครู่ทางไฟฟ้าจะส่งผลให้เกิดแรงดันผิดปกติ (แรงดันเกิน) และกระแสไฟฟ้า ผิดปกติ(กระแสเกิน) ซึ่งอาจจะส่งผลให้เกิดความเสียหายเนื่องจากการกระจายตัวของความร้อนมาก เกินปกติ ส่วนแรงดันเกินอาจจะส่งผลให้เกิดการวาบไฟตามผิวของอุปกรณ์ โดยการปล่อยไฟฟ้า ผ่านอากาศ หรือเกิดความเสียหายต่อวัตถุที่ใช้ทำเป็นฉนวน โดยการปล่อยไฟฟ้าผ่านของแข็ง หรือ วัสดุที่มีฉนวนเป็นของเหลว, อุปกรณ์เกิดไฟดับ และผลสุดท้ายความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า กำลังจะลดน้อยลง ตามปกติการวาบไฟตามผิว จะเป็นสาเหตุให้เกิดไฟดับชั่วกราว เนื่องจากการดัด ชั่วกราวของอุปกรณ์ที่มีการเกิดการวาบไฟตามผิวขึ้น ภายหลังจากการทำงานของการปิดซ้ำจะทำ ให้เกิดความเสียหายต่อวัตถุที่ใช้ทำเป็นฉนวน ซึ่งจะนำความเสียหายอย่างถาวรต่ออุปกรณ์ในสายส่ง และเกิดไฟดับอย่างถาวร จึงต้องมีการซ่อมแซมอุปกรณ์ หรือนำอุปกรณ์เข้าไปแทนที่ ก่อนที่จะทำ การเชื่อมต่อระบบ ซึ่งเราจะเห็นอย่างชัดเจนถึงภาวะชั่วครู่ทางไฟฟ้านั้นจะส่งผลกระทบต่อการวัด ความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้ากำลัง ภาวะชั่วครู่ทางไฟฟ้าสามารถทำการศึกษาได้หลายวิธี สำหรับในระบบไฟฟ้ากำลัง ภาวะ ชั่วครู่ทางไฟฟ้าสามารถใช้วิธีดังต่อไปนี้

1) วิธีทางภาพเขียน (Graphical methods)

2) วิธีเกี่ยวกับการวิเคราะห์ (Analytical methods)

3) วิธีเกี่ยวกับตัวเลข (Numerical methods)

 วิธีการวิเคราะห์ภาวะชั่วครู่โดยใช้วงจรข่ายเชื่อมโยงกับคอมพิวเตอร์ (Using a transient network analyzer: TNA)

การวิเคราะห์ภาวะชั่วครู่โดยใช้วงจรข่ายเชื่อมโยงกับคอมพิวเตอร์ (TNA) คือการลดขนาด ส่วนประกอบของระบบไฟฟ้ากำลังให้มีขนาดเล็กลงเชื่อมต่อระหว่างกันให้ตรงกับระบบที่ ทำการศึกษา โดยทั่วไปการเชื่อมต่อจะเป็นไปโดยอัตโนมัติดำเนินการโดยอาศัยดิจิตอล กอมพิวเตอร์ นอกจากนี้ ดิจิตอลกอมพิวเตอร์สามารถที่จะกระตุ้นระบบได้ตามที่ต้องการและ สามารถที่จะบันทึกแรงดันและกระแส ภาวะชั่วครู่ เพื่อทำการวางแผน หรือวิเคราะห์ได้

ส่วนวิธีที่ 1, 2 และ3 เป็นวิธีการจำลอง ซึ่งวิธีเหล่านี้สามารถทำการแก้ไขปัญหาที่บรรยาย โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ทำการศึกษาซึ่งจะมีความแตกต่างกันตามวิธีการ แก้ปัญหา เหมือนกับชื่อที่เป็นตัวบอก คือ ทางภาพเขียน, ทางการวิเกราะห์ และทางตัวเลข ตามลำดับ

1. <u>แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ภาวะชั่วครู</u>่

กุญแจอย่างหนึ่งในการวิเคราะห์ภาวะชั่วครู่ในระบบไฟฟ้ากำลังคือการเลือกแบบจำลอง แทนระบบทางกายภาพ โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต้องมีความถูกต้องสามารถแทน ปรากฏการณ์ทางกายภาพที่ทำการศึกษา ในเวลาเดียวกันต้องเหมาะในทางปฏิบัติด้วย ซึ่งควรจะ เป็นสิ่งที่ง่ายๆเท่าที่เป็นไปได้ ในส่วนนี้จะพยายามทำให้เกิดความเข้าใจอย่างลึกซึ้งเข้าไปใน แบบจำลองต่างๆของส่วนประกอบต่างๆในระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับ การวิเคราะห์ภาวะชั่วครู่ และ เป็นแนวทางสำหรับการเลือกของแบบจำลองที่เหมาะสมกับการใช้โดยเฉพาะต่อไป 1.1 การจำลองตัวแปรแบบเป็นก้อน เป็นการแทนวงจรอย่างง่ายที่สุดในองค์ประกอบของ ระบบไฟฟ้ากำลัง คือการแทนวงจรโดยวิธีตัวแปรแบบเป็นก้อน ซึ่งในส่วนนี้ ความต้านทานจะถูก แทนด้วยการต้านทานทางอุดมคติ, ตัวเหนี่ยวนำจะถูกแทนด้วยความเหนี่ยวนำทางอุดมคติ และตัว เก็บประจุจะถูกแทนด้วยความจุไฟฟ้าทางอุดมคติ โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในทางอุดมคติ ขององค์ประกอบ R, L และ C จะถูกสรุปไว้ในภาพที่ 2 (a)

 1.2 การจำลองตัวแปรแบบกระจาย เป็นการประยุกต์ใช้ องค์ประกอบระบบไฟฟ้ากำลัง จำนวนมาก ซึ่งจำเป็นต้องถูกแทนเป็นตัวแปรแบบกระจาย โดยตัวแปรแบบกระจายที่ถูกแทนทาง คณิตศาสตร์จะอยู่ในรูปสมการพาร์เซียลดิฟเฟอรเรนเซียล โดยจะพิจารณาสายส่งเป็นแบบเฟส เดียวกับตัวแปรดังต่อไปนี้

- L: ความเหนี่ยวนำอนุกรมต่อหน่วยความยาว
- C: ความจุไฟฟ้าต่อหน่วยความยาว
- R: การต้านทานอนุกรมต่อหน่วยความยาว
- G: ความนำขนานต่อหน่วยความยาว

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสายส่งที่ได้คือ

$$\frac{\partial v(y,t)}{\partial y} = L \frac{\partial i(y,t)}{\partial t} + ri(y,t)$$
(1)
$$\frac{\partial i(y,t)}{\partial y} = C \frac{\partial v(y,t)}{\partial t} + gv(y,t)$$
(2)

การประมาณอย่างแรกสำหรับสายส่งกำลัง, ความนำขนานและการต้านทานอนุกรมจะไม่ นำมาคิดเนื่องจากมีขนาดเล็ก นอกจากนี้ ตัวแปร L และ C จะสมมุติให้มีค่าคงที่ อิสระกับความถึ่ ซึ่งการประมาณเหล่านี้จะนำไปสู่การจำลองตัวแปรแบบกระจายทางอุดมคติของสายส่งคังภาพที่ 2 (b)



<u>ภาพที่ 2</u> แบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับการวิเคราะห์ภาวะชั่วครู่ (a) การจำลองตัวแปรแบบเป็นก้อน (b) การจำลองตัวแปรแบบกระจาย ที่มา: Meliopoulos (1988)

สรุปแบบจำลองของส่วนประกอบระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับการวิเคราะห์ภาวะชั่วครู่จะ อาศัยตัวแปรแบบเป็นก้อน หรือตัวแปรแบบกระจาย ซึ่งการเลือกแบบจำลองขึ้นอยู่กับระบบทาง กายภาพ และปรากฏการณ์ภาวะชั่วครู่ที่ทำการศึกษา

2. <u>ภาวะชั่วครู่บนสายส่งเหนือดิน</u>

สายส่ง คือ ส่วนหนึ่งของระบบไฟฟ้ากำลัง และจะใช้ในการคำนวณปรากฎการณ์ชั่วครู่ โดยในการแทนวงจรนั้น จำเป็นต้องนำส่วนอื่นที่เหลืออยู่ในระบบมารวมด้วย นอกจากนี้ยังต้อง เพิ่มรายละเอียดอื่นอีก เช่น พิจารณาสภาวะของการปฏิบัติงานภายใต้การทำงานของสายส่งด้วย

2.1 วงจรที่ใช้แทนแหล่งกำเนิด ในระบบไฟฟ้ากำลัง สายส่งจะถูกจ่ายไฟจากแหล่งกำเนิด ตามองค์ประกอบ และลักษณะซึ่งอาจมีความแตกต่างกันไปในหลายรูปแบบ โดยสามารถแบ่งออก ได้เป็นสองกรณีใหญ่ๆที่สำคัญ คือ กรณีแรก สายส่งที่รับไฟมาจากบัสบาร์ที่ต่อเข้ากับเครื่องกำเนิด หรือหม้อแปลง ในสภาพการณ์นี้วงจรแหล่งกำเนิดจะแทนด้วยแรงดันต่อกับความเหนี่ยวนำ กรณีที่ สอง สายส่งที่รับไฟมาจากบัสบาร์ที่ต่ออยู่กับสายส่ง และสายเคเบิ้ล โดยที่ไม่มีเครื่องกำเนิด หรือ หม้อแปลงต่อโดยตรงอยู่ โดยเริ่มแรกแหล่งกำเนิดจะแทนวงจรเป็นแรงดันต่อเข้ากับความต้านทาน ซึ่งก่านี้สามารถจะหาได้โดยการรวมเสร็จอิมพีแดนช์ที่ต่อแบบขนานในวงจรทั้งหมด ที่ต่ออยู่ที่บัส บาร์แหล่งกำเนิดนั้น ซึ่งยิ่งมีวงจรมากขึ้นค่าความต้านทานก็จะยิ่งมีค่าน้อยลงและมีแนวโน้มเท่ากับ ศูนย์ การแทนวงจรในลักษณะนี้จะถูกต้องเฉพาะในช่วงเวลาที่ใช้ในการสะท้อนกลับของรูปคลื่น จากปลายอีกด้านหนึ่งของสายส่ง และถ้าปลายสายส่งอีกด้านหนึ่งนั้นต่ออยู่กับวงจรที่มีรูปแบบ แตกต่างกัน ก็จะทำให้มีผลโดยตรงต่อขนาดและรูปร่างของรูปคลื่นที่ส่งไป

ผลกระทบที่เกิดขึ้นทันทีของแหล่งกำเนิด สามารถดูได้จากขนาดแรงดันที่เริ่มจ่ายไฟ ผ่านสายส่ง และค่าสัมประสิทธิ์จากการสะท้อนกลับ ซึ่งจะเห็นได้จากคลื่นที่สะท้อนกลับมาถึงที่ บัสบาร์ของแหล่งกำเนิดจากการเปิดปลายสายของสายส่งหลังจากเบรกเกอร์ทำการปิดวงจร โดย ตารางที่ 1 จะแสดงค่าขนาดแรงดันในช่วงเริ่มต้น, ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายส่ง จำนวน 4 สาย ที่เชื่อมต่อกับบัสบาร์แหล่งกำเนิด และแรงดันสูงสุดที่ปลายสายรับ เมื่อสายส่งมี ความยาว 160 กิโลเมตร จากการจ่ายไฟของแหล่งกำเนิด โดยจะเห็นว่าเมื่อจำนวนของสายส่ง เพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับจะยิ่งมีค่าน้อยลง และมีแนวโน้มถึงค่า - 1.0 ซึ่งจะตรงกับ ค่าแหล่ง กำเนิดอิมพีแดนซ์ที่เท่ากับศูนย์ หรือแหล่งกำเนิดบัสอนันต์

Number of	Initial step of voltage	Reflection	Maximum receiving	
Source lines	Applied to the line (p.u.)	Coefficient (Kr)	End voltage (p.u.)	
1	0.5	0	1.11	
2	0.66	-0.33	1.35	
3	0.75	-0.50	1.51	
4	0.8	-0.6	1.60	

d		1 1	ח ו		. 9	
ตารางท่	1	การจาย	ไฟจาห	อแหลงศ	ำเนดส	ำยสง
1110111	<u> </u>	1710 010			, 10, 50, 10, 01	10014

ที่มา: Bickford *et al.* (1980)

ตารางที่ 1 อาศัยพื้นฐานจากการสมมุติให้สายส่งทั้งหมครวมถึงสายส่งที่ถูกจ่ายไฟอยู่ ในขณะนั้นมีค่าเสริ์จอิมพีแคนช์เคียวกัน โดยไม่มีแรงคันสะท้อนกลับมาจากปลายสายอีกค้านหนึ่ง ของสายส่งในระหว่างเวลาที่ทำการพิจารณา โดยขนาดของการสะท้อนของกลื่นจะขึ้นอยู่กับ ระยะทางของปลายอีกค้านหนึ่ง แต่โดยทั่วไปผลกระทบของการสะท้อนกลับนี้จะเป็นสาเหตุให้ เกิดการเพิ่มขึ้นของแรงคันที่ปลายสายอีกค้านให้มีค่าสูงขึ้น และอาจมีค่ามากกว่าในตารางที่ 1 ที่ให้ ไว้ก็ได้

เมื่อสายส่งถูกจ่ายไฟจากแหล่งกำเนิดที่มีความเหนี่ยวนำรูปแบบของคลื่นแรงคันที่ต้น ทาง และที่ปลายสายอีกด้านหนึ่งสายส่ง จะมีความแตกต่างกันกับการจ่ายไฟจากแหล่งกำเนิดที่มี สายส่ง ต่ออยู่แทนที่จะเป็นแหล่งกำเนิดโดยตรง ตามลักษณะภาพที่ 3



<u>ภาพที่ 3</u> ภาวะชั่วกรู่จากการจ่ายไฟสายส่ง ที่มา: Bickford *et al.* (1980)

โดยในกรณีของแหล่งกำเนิดต่อผ่านสายส่ง แรงดันในช่วงเริ่มต้นที่จ่ายไฟให้สายส่ง จะมีรูปกลื่นเป็นแบบขั้น ซึ่งมีขนาดแรงดันขึ้นอยู่กับจำนวนของสายส่งที่แหล่งกำเนิดดังตารางที่ 1 ส่วนในกรณีของแหล่งกำเนิดที่มีความเหนี่ยวนำ แรงดันที่จ่ายไฟให้กับสายส่ง จะเพิ่มขึ้นอย่างเอ็ก โปเนนเซียล และมีค่าเวลาคงที่คือ L / Zo ซึ่งกำหนดโดยความเหนี่ยวนำ L ของแหล่งกำเนิด และ เสริ์จอิมพีแดนซ์ Zo ของสายส่ง นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของแหล่งกำเนิดที่มี ความเหนี่ยวนำจะมีค่าไม่เป็นลบเหมือนกับในกรณีของแหล่งกำเนิดที่มีสายส่งด้วย แต่จะเป็นไป ตามสมการดังนี้

$$Kr = \frac{(\rho L - Zo)}{(\rho L + Zo)}$$
(3)

โดยค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับจะแปรตามกับเวลา เริ่มแรกแหล่งกำเนิด แบบความเหนี่ยวนำจะเปรียบเสมือนกับการเปิดวงจรอยู่ (Kr = +1) ในช่วงเริ่มแรก และเมื่อเวลา ผ่านไปจนสิ้นสุดจะเปรียบเสมือนกับการปิดวงจร (Kr = -1)โดยค่าของ Kr จะเปลี่ยนแปลงแบบเอ็ก โปเนนเชียล ที่ผ่านมาเป็นการพิจารณาวงจรสมมูลของแหล่งกำเนิดอย่างง่าย โดยทั่วไป แหล่งกำเนิดส่วนมากจะเป็นแหล่งกำเนิดแบบผสม ซึ่งประกอบด้วยสายส่ง, เครื่องกำเนิด และหม้อ แปลง โดยมีการเชื่อมต่อกันอยู่อย่างหนาแน่นในระบบไฟฟ้าที่มีความซับซ้อน ในสภาพการณ์ เหล่านี้ ขนาดของแรงดันเกินที่เกิดขึ้นจากการจ่ายไฟจะขึ้นอยู่กับก่ากวามยาวของสายส่ง, ก่ากวาม เหนี่ยวนำของเครื่องกำเนิด และหม้อแปลง ที่อยู่ในส่วนประกอบของแหล่งกำเนิด

ตัวอย่างง่ายๆของแหล่งกำเนิดผสมอาจจะเห็นได้จาก สถานีไฟฟ้าที่สร้างอยู่ที่ปลาย สายของสายส่ง โดยในการแทนวงจรสมมูลทั้งหมดนั้นจะไม่ใช่ปัญหาใหญ่ เมื่อแหล่งกำเนิดอยู่ใน ระบบขนาดใหญ่ แต่จะมีความลำบากจากการเก็บข้อมูล และรวมถึงเวลาที่ใช้ในกระบวนการ คำนวณมากกว่า ในกรณีนี้จึงใช้วงจรสมมูลแบบง่ายๆเป็นการสมมูลแบบส่วนประกอบเป็นก้อน ซึ่ง จะให้ผลค่อนข้างดีกว่าการสมมูลแบบส่วนประกอบกระจาย เช่น วงจรสมมูล โดย Battisson, Bickford *et al.* 1970 ดังภาพที่ 4 จะประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำ L ที่หาได้จากก่ากวามผิดพร่อง 3 เฟสที่บัสบาร์แหล่งกำเนิด ก่าตัวต้านทาน R ที่ขนานรวมกับเสริ์จอิมพีแดนช์ของสายส่ง และตัวเก็บ ประจุ C ที่หาจากก่าความถี่ธรรมชาดิของแหล่งกำเนิด ทำให้ได้วงจรสมมูลขึ้น ซึ่งจะเท่ากับทำให้ เรารู้ผลของการตอบสนองในระบบของแหล่งกำเนิดโดยสามารถดูได้จากบัสบาร์ของสายส่งที่ถูก จ่ายไฟ



<u>ภาพที่ 4</u> วงจรสมมูลของแหล่งกำเนิด ที่มา: Bickford *et al.* (1980)

2.2 ผลกระทบของความเหนี่ยวนำแหล่งกำเนิด และความจุไฟฟ้า เมื่อสายส่ง ถูกจ่ายไฟ ้จากแหล่งกำเนิดที่มีความเหนี่ยวนำ รูปคลื่นและขนาดของแรงคันชั่วครู่ที่เกิดขึ้นบนสายส่ง จะ ขึ้นอยู่กับเหตุการณ์ 3 อย่าง โดยภาพที่ 3 จะแสดงแรงคันที่ต้นทาง และที่ปลายสายอีกด้านหนึ่งที่ ้เกิดขึ้นบนสายส่งจากการจ่ายไฟที่ค่ายอดแหล่งกำเนิดแรงดัน จากแหล่งกำเนิดที่มีความเหนี่ยวนำ เมื่อทำการพิจารณารูปคลื่นจะมีลักษณะคล้ายกันกับการจ่ายไฟจากแหล่งกำเนิดบัสอนันต์ และเมื่อ ้สายส่งถูกจ่ายไฟ แรงคันที่ต้นทางจะไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงคันแบบเป็นขั้นในช่วง ้ เริ่มต้น เหมือนในกรณีของแหล่งกำเนิดบัสอนันต์ แต่แรงคันจะเพิ่มขึ้นอย่างเอ็กโปเนนเชียลที่ ้ความถี่กำลัง จากค่าเวลาคงที่ ที่กำหนคโคยความเหนี่ยวนำของแหล่งกำเนิค และเสริ์จอิมพีแคนช์ ้งองสายส่ง การเพิ่มขึ้นแบบเอ็กโปเนนเชียลนี้จะเกิดขึ้นที่ปลายสายอีกด้านหนึ่งของสายส่ง จากการ ้สะท้อนกลับหลายครั้งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบเอ็กโปเนนเชียล ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนจาก ฐปกลื่นทั้งสอง โดยช่วงเวลาที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบเอ็กโปเนนเชียลนี้ จะถูกกำหนดโดย เหตุการณ์ 2 อย่าง คือเวลาของการแพร่บนสายส่งของก่ายอดแรงคัน 'A' ในรูปกลื่นที่ต้นทางจาก การสะท้อนกลับครั้งแรกจากปลายสายอีกค้านหนึ่งมาถึงที่ต้นทาง ซึ่งจะมีผลกระทบต่อ ้แหล่งกำเนิดที่มีความเหนี่ยวนำ โดยก่ายอดแรงดันนี้จะสะท้อนกลับไปที่ปลายสายอีกด้านหนึ่ง และ ปรากฏเป็นค่ายอดแรงดัน 'B' ในรูปคลื่นของปลายสายอีกด้านหนึ่ง ต่อจากนั้นจะมีการสะท้อนกลับ หลายครั้งเกิดขึ้น ค่ายอดแรงดันที่ปรากฏในรูปคลื่นระหว่างช่วงเวลานี้จะเท่ากับเวลาของการแพร่ ้สองครั้งในสายส่ง และในช่วงระหว่างเวลานี้จะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงแบบเอ็กโปเนนเชียลที่มีค่า มากเกิดขึ้น ทั้งหมดนี้จะเพิ่มแรงคัน บนความถี่กำลังซึ่งจะขึ้นอยู่กับตัวแปรของเวลาทั้ง 3 เหตุการณ์ ้โดยรูปคลื่นในภาพที่ 3 จะคำนวณโดยไม่คิดการสูญเสีย และในทางปฏิบัติการสูญเสียของระบบ ้จะเป็นตัวอธิบายถึงช่วงเวลาสุดท้ายของสภาวะชั่วกรู่นั้น จะก่อยๆลดลงจนหายไป และจะมีแต่ก่า แรงดัน และความถี่กำลังเท่านั้น

สำหรับช่วงเวลาที่ค่ายอดแรงดัน 'A' และ 'B' ที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับเสริ้จอิมพีแดนซ์ ของสายส่ง และความเหนี่ยวนำแหล่งกำเนิด โดย สายส่งทีสร้างขึ้นนั้นจะให้ค่าเสริ้จอิมพีแดนซ์ที่ ดงที่แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงตามความยาวของสายส่ง ส่วนความเหนี่ยวนำแหล่งกำเนิดจะทำให้เกิด ค่าเวลาคงที่แบบเอ็กโปเนนเซียลเกิดขึ้น และส่งผลทำให้รูปคลื่นของปลายสายที่ต้นทางและปลาย สายอีกด้านหนึ่ง ทำให้เกิดขนาดของแรงดันชั่วครู่เปลี่ยนแปลงตามดังภาพที่ 5



<u>ภาพที่ 5</u> แรงดันชั่วครู่จากผลของความเหนี่ยวนำแหล่งกำเนิดและความยาวของสายส่ง ในการจ่ายไฟที่ปลายสายของสายส่ง ที่มา: Bickford *et al.* (1980)

ภาพที่ 5 จะแสดงขนาดของแรงดันเกินที่ปลายสายอีกด้านหนึ่งของสายส่ง โดยจะ ขึ้นอยู่กับความยาวของการจ่ายไฟในสายส่ง และค่าของความเหนี่ยวนำแหล่งกำเนิด โดยค่าแรงดัน สูงสุดที่ปลายสายอีกด้านหนึ่งที่เกิดขึ้นในภาพที่ 6 จะแสดงการจ่ายไฟของสายส่งที่มีความยาวสูง ถึง 482.8 กิโลเมตร และความเหนี่ยวนำของแหล่งกำเนิดถึง 1.0 H ซึ่งจะมีลักษณะเหมือนกับ ความผิดพร่อง 3 เฟสที่บัสบาร์แหล่งกำเนิดขนาด 510 MVA ที่ 400 kV. หรือ 1,790 MVA ที่ 750 kV. โดยการจ่ายไฟสามเฟสของสายส่งนี้ จะสมมุติให้เกิดขึ้นแบบทันทีที่เวลาเดียวกันโดยการปิด พร้อมกันของเบรกเกอร์ทั้งสามขั้ว



<u>ภาพที่ 6</u> การเปลี่ยนแปลงแรงคันสูงสุดที่ปลายสายกับผลของความเหนี่ยวนำแหล่งกำเนิด เมื่อมีการปิดของเบรกเกอร์พร้อมกัน ที่มา: Bickford *et al.* (1980)

เมื่อทำการพิจารณาแรงดันเกินในภาพที่ 6 จะมีบริเวณ 2 บริเวณที่ความเหนี่ยวนำ แหล่ง กำเนิดมีข้อแตกต่างกัน เมื่อพิจารณาความยาวของสายส่งทั้งหมดยกเว้นความยาวที่ยาวที่สุด จะมีค่ายอดแรงดันของแรงดันเกินสูงสุดเกิดขึ้นในช่วงความเหนี่ยวนำแหล่งกำเนิดระหว่าง 0 ถึง 0.25 H ต่อจากนั้นแรงดันเกินจะมีแนวโน้มที่จะลดลง เมื่อความเหนี่ยวนำแหล่งกำเนิดเพิ่มขึ้น และ จะเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามความเหนี่ยวนำแหล่งกำเนิดที่เพิ่มขึ้น โดยค่ายอดแรงดันเริ่มต้นที่ เกิดขึ้นของ แรงดันเกินจะมีลักษณะไม่เหมือนกับความเหนี่ยวนำแหล่งกำเนิด และการเปลี่ยนแปลง จะไม่ขึ้นอยู่กับความยาวของสายส่งที่จ่ายไฟโดยตรง เมื่อความเหนี่ยวนำแหล่งกำเนิดเริ่มเพิ่มขึ้นค่าของแรงคันเกิน สูงสุดจะขึ้นอยู่กับความ ยาวของสายส่งที่จ่ายไฟ โดยความต่อเนื่องของการเพิ่มขึ้นในแรงคันเกินจะมีสาเหตุมาจากสภาวะ นั้นกำลังเข้าใกล้เรโซแนนซ์ที่ความถี่กำลัง เช่นในกรณีของสายส่งยาวที่สุด 482.8 กิโลเมตร เมื่อ พิจารณาเทียบเป็นค่าความจุไฟฟ้าแบบขนานซึ่งมีจำนวนมากในสายส่ง เป็นสาเหตุให้เกิดสภาวะเร โซแนนซ์ขึ้นได้ เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้ามีค่าเข้าใกล้กับค่าความเหนี่ยวนำของแหล่งกำเนิดที่มีค่าต่ำ ซึ่งจะทำให้เกิดความไม่แน่นอนของค่ายอดแรงคันที่แตกต่างกันเกิดขึ้นในกรณีนี้

การแทรกค่าระหว่างเส้นโค้งแรงดันเกินในภาพที่ 6 นั้นทำได้ยากแต่สามารถทำให้มี ความชัดเจนของตำแหน่งแรงดันเกินได้ โดยเขียนให้อยู่ในรูปของคอนทัวส์แรงดันเกิน บนแกนของ ความยาวสายส่ง และความเหนี่ยวนำของแหล่งกำเนิด ในภาพที่ 7



<u>ภาพที่ 7</u> คอนทัวส์แรงคันที่ปลายสายสูงสุด เมื่อมีการปิดพร้อมกันทั้ง 3 เฟส ที่มา: Bickford *et al.* (1980)

เมื่อความเหนี่ยวนำแหล่งกำเนิด และความยาวสายส่ง มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้แรงดันเกิน มีขนาดใหญ่ ซึ่งจะทำความเข้าใจได้ยากในทางปฏิบัติ เพราะว่าในทางปฏิบัติของสายส่ง จะมีการ ชดเชยตัวเหนี่ยวนำแบบขนาน สภาวะนี้อาจจะพิจารณาจากสายส่งที่ถูกจ่ายไฟผ่านทางสายส่งที่สอง จากแหล่งกำเนิด ในระยะไกล หรือจากสถานีที่มีหม้อแปลง เมื่อสายส่งมีความยาวและสถานีอยู่ในระยะทางที่ไกล และได้รับอิทธิพลการจ่ายไฟจากเบรกเกอร์จะทำให้เกิดแรงดันเกินขึ้นที่ปลายสายอีกด้านหนึ่งของ สายส่งที่จ่ายไฟ และเมื่อนำค่าของความเหนี่ยวนำแหล่งกำเนิด หรือหม้อแปลงสถานีมาแทนใน วงจรดังภาพที่ 8 โดยกำหนดให้สายส่งที่ถูกจ่ายไฟมีความยาว 160 กิโลเมตร ผลกระทบที่เกิดขึ้น ของสายส่งในด้านของแหล่งกำเนิดบนเบรกเกอร์นั้น จะทำให้เกิดการลดลงของแรงดันเกินมีค่า น้อยลง ในช่วงที่ความเหนี่ยวนำแหล่งกำเนิดมีค่าต่ำได้





เมื่อพิจารณาคอนทัวส์แรงคันเกินในภาพที่ 9 สามารถทำให้ทราบค่าความเหนี่ยวนำ แหล่งกำเนิดที่มีขนาดมากนั้น จะมีแนวโน้มที่จะให้ค่าสูงขึ้นในบริเวณนี้ของความเหนี่ยวนำ แหล่งกำเนิด และเมื่อสายส่งมีความยาวมากขึ้น และไม่มีการชดเชยโดยการต่อตัวเหนี่ยวนำแบบ ขนาน จะทำให้เข้าใกล้สภาวะเรโซแนนซ์ที่ความถี่กำลังมากขึ้น เมื่อเกิดการรบกวนจากเบรกเกอร์ ของแหล่งกำเนิดในสายส่งขึ้น



<u>ภาพที่ 9</u> คอนทัวส์แรงคันเกินจากการจ่ายไฟให้สายส่งยาว 160 กิโลเมตร จากความเหนี่ยวนำที่ จุดปลายของสายส่ง ที่มา: Bickford *et al.* (1980)

ภาพที่ 10 จะแสดงกอนทัวส์แรงดันเกินจากผลกระทบของสถานีไฟฟ้าที่อยู่ใน ระยะทาง 40 กิโลเมตร จากเบรกเกอร์ที่จ่ายไฟสายส่ง เมื่อแหล่งกำเนิดเป็นความเหนี่ยวนำบริสุทธิ์ ยกเว้นสายส่งที่มีความยาวมาก โดยคอนทัวส์แรงดันเกินจะมีลักษณะของก่ายอดแรงดันในช่วง เริ่มต้นของแรงดันเกินสูงในบริเวณที่มีก่าความเหนี่ยวนำแหล่งกำเนิดต่ำ และจะมีก่าลดลง ก่อนที่ แรงดันเกินจะเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่อความเหนี่ยวนำแหล่งกำเนิดเพิ่มขึ้น



<u>ภาพที่ 10</u> คอนทัวส์แรงคันเกินจากการจ่ายไฟให้สายส่งยาว 40 กิโลเมตร จากความเหนี่ยวนำ ที่จุดปลายของสายส่ง ที่มา: Bickford *et al.* (1980)

2.3 วงจรสมมูลหนึ่งเฟส แรงคันเกินที่เกิดจากการปิดไม่พร้อมกันของเบรกเกอร์สาม เฟสที่จ่ายไฟสายส่งเหนือดิน จะไม่สามารถแทนในวงจรหนึ่งเฟส เพื่อใช้ในการกำหนดแรงคันเกิน ได้อย่างถูกต้อง แต่ก็สามารถยอมรับค่าที่ประมาณได้ ถ้าไม่สนใจการเพิ่มขึ้นของแรงคันเกิน เนื่องจากการปิดไม่พร้อมกันของสามเฟส ก็สามารถใช้วงจรสมมูลหนึ่งเฟสแสดงแทนได้ ในการ พิจารณาค่าที่จะใช้ในการเลือกตัวแปรสายส่งในวงจรสมมูลหนึ่งเฟสเทียบเท่ากับสายส่ง 3 เฟส ต้องเลือกจากเมตริกซ์เสริ์จอิมพีแดนช์ แบบ 3 เฟส แล้วใช้เทอมของตัวมันเอง (เทอมเส้นทะแยงมุม) ให้ตรงกับเฟสที่เลือก และใช้เป็นเสริ์จอิมพีแคนช์ของสายส่งหนึ่งเฟส แรงคันเกินที่คำนวณเมื่อสาย ส่งนี้ถูกจ่ายไฟจะตรงกับการปิดใน 1 เฟส ของ สายส่ง 3 เฟส ซึ่งจะทำให้ทราบค่าแรงคันเกินที่ เกิดขึ้น และการปิดพร้อมกันของสามเฟส จากการใช้วงจรสมมูลหนึ่งเฟส แต่ในบางครั้ง เสริ์จอิมพี แคนช์ของสายส่งหนึ่งเฟสจะเท่ากับเฟสลำดับบวกของเสริ์จอิมพีแคนช์ในสายส่ง 3 เฟส จาก เมตริกซ์เสริ์จอิมพีแดนช์ของสายส่ง โดยในการคำนวณอาจจะใช้การสมมูลวงจรหนึ่งเฟสจากการใช้ค่าความต้านทาน อนุกรม และเมตริกซ์ความเหนี่ยวนำ และเมตริกซ์ความจุไฟฟ้าแบบขนาน มาใช้แทนซึ่งจะให้ผล ก่อนข้างคีกว่าเมตริกซ์เสริ์จอิมพีแคนช์ เมื่อเฟส และปริมาณตามลำคับตรงกัน

2.4 การปิดไม่พร้อมกันของสามเฟส ในทางปฏิบัติแรงดันเกินที่เกิดจากการจ่ายไฟสายส่ง จะเพิ่มขึ้นจากผลกระทบของความเหนี่ยวนำร่วม ระหว่างสามเฟส จากการปิดไม่พร้อมกันของเบรก เกอร์ในระบบสามเฟส โดยก่าของแรงดันสูงสุดที่ปลายสายอีกด้านหนึ่งจะขึ้นอยู่กับช่วงเวลา ระหว่างการปิดของแต่ละเฟส ซึ่งเวลาทั้งหมดที่ใช้ระหว่างเฟสแรก และเฟสสุดท้ายที่ปิด จะขึ้นอยู่ กับชนิดของเบรกเกอร์ โดยปกติการจ่ายไฟที่ทำให้เกิดแรงดันเกินจะถูกสมมุติให้มีการปิดของเวลา ทั้งสามเฟสอยู่ในช่วงระยะเวลา 5 ms. ในเบรกเกอร์ชนิดหัวความดัน แต่ถ้าใช้เบรกเกอร์ชนิดที่มี แขนหมุนในอากาศที่กวามกดดันบรรยากาศทำการปิดจะมีเวลาที่มากกว่านี้

แหล่งกำเนิดที่เชื่อมต่อโดยตรงกับสายส่งที่ไม่มีประจุ เมื่อทำการปิดลงบนคลื่นที่จุด ใดๆบนเฟส จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาดแรงดันในขั้นตอนการปล่อยแรงดันที่ด้นทาง และจะเชื่อมต่อกับเสริจที่เคลื่อนที่บนสายส่ง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความยาวของสายส่ง และแหล่งกำเนิด ดังภาพประกอบ เมื่อทำการสวิตช์แหล่งกำเนิดอิมพีแดนช์ที่มีค่าเท่ากับศูนย์ และไม่สนใจคลื่นที่ สะท้อนกลับจากปลายสายอีกด้านหนึ่ง โดยมีขั้นตอนของการปิดในเฟสแต่ละอันคือ เฟสสีแดงจะ ถูกปิดที่ค่าขอดแรงดัน ในเวลาต่อมาเฟสสีน้ำเงินถูกปิดที่เวลา 1.67 ms. และเฟสสีเหลืองถูกปิดที่ เวลา 3.33 ms. หลังจากเฟสสีน้ำเงินทำการปิด โดยมีองก์ประกอบของตัวนำในแนวดิ่งตามลำดับที่ ปิดนี้กือ ข้างล่าง ตรงกลาง และบนสุด จะได้แรงดันที่ต้นทางนี้ดังในภาพที่ 11 (Battisson *et al.* 1970) จากการสวิตชิ่งรูปคลื่นโลไซน์ขูซอยดอล ของแหล่งกำเนิดแรงดัน ส่วนในภาพที่ 12 จะ แสดงแรงดันที่ปลายสายอีกด้านหนึ่งของสายส่งที่ได้จากภาพที่ 11 ซึ่งจะเห็นว่าการเชื่อมติดกัน ระหว่างเฟสจะทำให้เกิดแรงดันสูงสุดถึง 2.5 p.u. ซึ่งกามรุนแรงที่เกิดขึ้นนี้ไม่จำเป็นที่จะทำให้ เกิดแรงดันสูงสุด แต่จะขึ้นอยู่กับระบบด้วย ดังนั้นจึงด้องมีการพิจารณาต่อจุดที่เบรกเกอร์ควรจะ ปิด แต่ถ้าไม่สนใจต่อผลกระทบของกวามยาวสายส่งที่สอิงมีกรพิจารณาต่อจุดที่เบรกเกอร์ควรจะ เล็กน้อยนี้ จะส่งผลให้เกิดการสะท้อนของเสริจที่เสริมซึ่งกันและกัน ซึ่งสามารถเป็นสาเหตุให้เกิด แรงดันเกินสูงขึ้นได้



<u>ภาพที่ 11</u> แรงดันต้นทางเมื่อไม่มีการใส่ความต้านทานในเบรกเกอร์ (a) เฟสแดง (b) เฟสน้ำเงิน (c) เฟสเหลือง ที่มา: Bickford *et al.* (1980)



<u>ภาพที่ 12</u> แรงคันที่ปลายสายเมื่อไม่มีการใส่ความต้านทานในเบรกเกอร์ (a) เฟสแดง (b) เฟสน้ำเงิน (c) เฟสเหลือง ที่มา: Bickford *et al.* (1980)

การวิเคราะห์เพื่อกำหนดความแน่นอนของถำดับการปิดที่ทำให้เกิดแรงดันสูงสุดที่ ปลายสายอีกด้านหนึ่งมีความถำบากมาก จึงจำเป็นที่จะต้องพิจารณาถำดับ และการประมาณ แรงคันเกินของการจ่ายไฟในแต่ละครั้ง นอกจากนี้แรงดันเกินสูงสุดอาจจะเกิดขึ้นจากความ แตกต่างของถำดับการปิด, ชนิดของแหล่งกำเนิด, ความยาวของสายส่ง, ค่าความต้านทานที่ใส่ไว้ ในเบรกเกอร์ และ แรงคันที่เหลืออยู่ในระบบบนสายส่ง โดยภาพที่ 13 จะแสดงผลกระทบของ การปิดไม่พร้อมกันของแรงดันเกินสูงสุดที่ปลายสายอีกด้านหนึ่ง ซึ่งสามารถเปรียบเทียบกับภาพที่ 6 ที่อยู่ในระบบเดียวกันและมีการปิดพร้อมกัน เมื่อทำการเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของแรงดันเกิน เนื่องจากการปิดไม่พร้อมกันจะเห็นว่าแรงดันเกินจะมีก่าไม่กงที่แต่จะมีก่าเปลี่ยนแปลงอย่างมาก หลายช่วงตลอด เวลากับก่าของแหล่งกำเนิดที่มีความเหนี่ยวนำ สถานการณ์นี้จึงเหมาะที่จะสรุปเป็น กอนทัวส์ ดังภาพที่ 14 ซึ่งแสดงการเพิ่มขึ้นของแรงดันเกินเนื่องจากการปิดไม่พร้อมกันเป็นอัตรา ร้อยละกับแรงดันเกินเนื่องจากการปิดพร้อมกัน



<u>ภาพที่ 13</u> แรงคันสูงสุดที่ปลายสาย

(a) เมื่อเบรกเกอร์มีการปิดพร้อมกัน

(b) เมื่อเบรกเกอร์ปิดไม่พร้อมกันภายใน 5 ms.

(c) เมื่อเบรกเกอร์ปิดไม่พร้อมกันภายใน 10 ms.

ที่มา: Bickford *et al.* (1980)



<u>ภาพที่ 14</u> เปอร์เซนต์คอนทัวส์แรงคันเกินที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการปิคไม่พร้อมกันภายใน 5 ms. ที่มา: Bickford *et al*. (1980)

2.5 ผลกระทบของการสลับตำแหน่ง และวงจรใกล้เกียง แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดจากการ เปิดเฟสของสายส่งเหนือดิน เมื่อถูกจ่ายไฟแบบต่อเนื่องกันดังภาพที่ 9 และ10 ขนาดของการ เหนี่ยวนำแรงดันจะขึ้นอยู่กับค่าของความเหนี่ยวนำร่วมในเมตริกซ์เสริ์จอิมพีแดนช์ของสายส่ง และความห่างขององก์ประกอบในตัวนำของสายส่ง โดยสายส่งส่วนมากจะมีค่าเฉลี่ยของความ เหนี่ยวนำร่วมในเสริ์จอิมพีแดนช์เฉลี่ยอยู่ในช่วง 15% ถึง 30% ของค่าเฉลี่ยเสริ์จอิมพีแดนช์ใน ตัวเอง และถ้าในกรณีที่ค่าความเหนี่ยวนำร่วมของเสริ์จอิมพีแดนช์มีการเปลี่ยนแปลงเป็น 20% ถึง 30% ของเสริ์จอิมพีแดนช์ในตัวมันเอง จะทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นประมาณ 10% ของแรงดันสูงสุดที่ ปลายสายอีกด้านหนึ่งเมื่อสายส่งถูกจ่ายไฟ การเพิ่มของแรงดันนี้จะขึ้นอยู่กับสภาวะสวิตชิ่ง และ อาจจะมีค่ามากกว่านี้ถ้าอยู่ภายใต้สภาวะอื่นๆ

ค่าเฉลี่ยของเสริ้จอิมพีแคนซ์ที่สมมูลจากการสลับคำแหน่งตัวนำในระบบสามเฟสของ สายส่ง กับสายส่งที่ไม่ได้ทำการสลับคำแหน่ง เทอมของความเหนี่ยวนำร่วมของเมตริกซ์เสริ้จอิมพี แคนซ์จะมีค่าไม่เท่ากันทั้งหมด ดังนั้นจึงส่งผลให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นในเฟสซึ่งจะขึ้นอยู่กับ ตำแหน่งบนเสา และความสัมพันธ์ของแต่ละเฟส หรือเฟสที่ถูกจ่ายไฟ โดยผลกระทบของการ จ่ายไฟในการสลับตำแหน่งของตัวนำ รูปคลื่นแรงดันที่ปลายสายอีกด้านหนึ่งจะมีความสัมพันธ์ ก่อนข้างน้อย โดยขนาดของแรงดันจะมีการเปลี่ยนแปลงเพียง ± 2% หรืออาจจะเกิดขึ้นถึง 6% ก็ได้ ในบางครั้งตำแหน่งของการจ่ายไฟสายส่งวงจรหนึ่ง อาจจะอยู่ใกล้กับสายส่งอีกวงจร หนึ่ง เช่น การจ่ายไฟในวงจรที่มีสองวงจรซ้อนกันบนเสาเดียวกัน ถ้าวงจรที่สองไม่มีการจ่ายไฟ จะต้องนำผลกระทบของวงจรที่สองมารวมด้วย โดยการพิจารณาตัวนำบนเสาทั้งหมดเป็นเมตริกซ์ เสริ์จอิมพีแคนช์ขนาด 6 x 6 ซึ่งสายส่งจะมีหกโหมด ส่วนสายส่งวงจรเดียวจะมีสามโหมดเกิดขึ้น แต่ถ้าวงจรที่สองมีการจ่ายไฟจะส่งผลให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นบนตัวนำของวงจรแรก ซึ่งจะต้อง นำผลกระทบของตัวนำบนวงจรแรกมารวมด้วยเมื่อทำการคำนวณการจ่ายไฟชั่วครู่

2.6 แรงดันที่เหลือในระบบ การเกิดความผิดพร่องระหว่างเฟสในสายส่งโดยไม่นับรวม ความผิดพร่องสามเฟส หรือสายส่งที่ขาดการเชื่อมต่อ สามารถส่งผลให้เฟสที่เหลืออยู่ประจุแรงดัน ถึงค่ายอดแรงดันเฟสเทียบนิวทรัลของระบบได้ เมื่อแหล่งกำเนิดและสายส่งกลับคืนสู่สภาพเดิม อาจจะเกิดแรงดันเกินเกิดขึ้น เมื่อเฟสหนึ่งเฟสใด หรือมากกว่าของแหล่งกำเนิดแรงดัน อยู่ที่ค่ายอด แรงดัน และมีแรงดันที่เหลือในระบบ ในลักษณะขั้วตรงกันข้ามกับเฟสที่ตรงกันบนสายส่ง จะทำ ให้เกิดแรงดันเกินขึ้นที่ปลายสายอีกด้านหนึ่งของสายส่งโดยจะเสริมกัน ดังรูปคลื่นของภาพที่ 15 และ 16 ซึ่งมี แรงดันที่เหลือในระบบ อยู่ที่ 0.5 p.u. และสามารถนำมาเปรียบเทียบกับรูปคลื่นใน ภาพที่ 11 และ 12 ในระบบเดียวกันซึ่งไม่มี แรงดันที่เหลือในระบบได้



<u>ภาพที่ 15</u> แรงดันที่ต้นทางกับแรงดันที่เหลือในระบบเมื่อไม่มีการใส่ความต้านทานในเบรกเกอร์ (a) เฟสแดง (b) เฟสน้ำเงิน (c) เฟสเหลือง ที่มา: Bickford *et al.* (1980)



<u>ภาพที่ 16</u> แรงดันที่ปลายสายกับแรงดันที่เหลือในระบบเมื่อไม่มีการใส่ความต้านทานในเบรกเกอร์ (a) เฟสแดง (b) เฟสน้ำเงิน (c) เฟสเหลือง ที่มา: Bickford *et al.* (1980)

งนาดของแรงดันเกิน ที่เกิดจากการปิดกลับจะขึ้นอยู่กับขนาดของประจุแรงดัน และ จุดที่ปิดกลับบนกลื่นของแหล่งกำเนิดแรงดันบนสายส่ง โดยแรงดันเกินสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อเบรก เกอร์ปิดกลับในขณะที่แหล่งกำเนิดแรงดันอยู่ที่ก่ายอดแรงดัน และสายส่งมีประจุอยู่ 1.0 p.u. ใน ลักษณะขั้วตรงกันข้ามจะทำให้เกิดแรงดันเกินสูงสุดเกิดขึ้น

ในทางปฏิบัติสายส่ง อาจจะยังมีประจุเหลืออยู่ถึงค่ายอดแรงดันเป็นเวลาหลายวินาที หลังจากที่เกิดการตัดของกระแส ซึ่งจะใช้เวลานาน จึงมีการใช้การปิดกลับแบบอัตโนมัติด้วย กวามเร็วสูง โดยสายส่ง จะมีการปล่อยประจุผ่านทางการรั่วที่ตกคร่อมฉนวน แต่อัตราของการ ปล่อยประจุที่เกิดขึ้นจะถูกควบคุมโดยสภาพอากาศ ซึ่งปกติเวลาจะอยู่ที่ประมาณ 2 – 5 นาที จึงจะมี การปล่อยประจุอย่างสมบูรณ์ แต่ถ้าสภาพอากาศมีความแห้งมากอาจจะเพิ่มถึง 15 นาที หรือ มากกว่านี้ Beehler (1964) ได้ทำการทดสอบทางภาคสนามในการวัด แรงคันที่เหลือในระบบ ซึ่งจะ มีค่าลดลงตามสภาวะอากาศต่างๆ เวลาของการปล่อยประจุในสายส่งสามารถแก้ไขให้มีค่าน้อยลงได้ ถ้าเบรกเกอร์ที่เปิด มีการใส่ความด้านทาน หรือมีตัวเหนี่ยวนำแบบขนาน หรือหม้อแปลงแรงคันเชื่อมต่ออยู่ที่สายส่ง

ผลกระทบของเบรกเกอร์ที่เปิดโดยมีความต้ำนทานเพื่อลดผลของเวลาการปล่อยประจุ แรงดันบนสายส่ง จะขึ้นอยู่กับก่าความด้ำนทาน, ความยาวของสายส่ง และเวลาที่ใส่ความด้ำนทาน อยู่ในวงจร โดยความต้านทานและเวลาที่อยู่ในวงจรของการออกแบบเบรกเกอร์ที่ใช้ในการเปิด ส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 10 – 1000 โอห์ม และหน้าสัมผัสของความต้านทานที่ใช้หยุดประจุแรงคัน จะแยกออกที่เวลาประมาณ 30 ถึง 60 ms. หลังจากการหยุดของหน้าสัมผัสหลัก และอาจจะแนบอยู่ ในวงจรเป็นเวลานาน เนื่องจากความโค้งของหน้าสัมผัสเป็นเวลา 120 - 150 ms. โดยก่าเวลาคงที่ ของการปล่อยประจุสามารถคำนวณได้จากก่าความด้านทาน และความจุไฟฟ้าที่ขนานในสายส่ง ตัวอย่างเช่น สายส่งมีความยาว 432 กิโลเมตร มีความจุไฟฟ้าที่ขนานขนาด 5.0 μF. และมีความ ด้านทานสวิตซิ่งขนาด 25,000 โอห์ม ก่าเวลาดงที่ของการปล่อยประจุคือ 25 x 5 = 125 ms. โดยถ้าความด้านทานอยู่ในวงจรเป็นเวลานานเท่ากับ 30 ms. แรงดันที่เหลือในระบบ จะลดลง ประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ของก่าเริ่มด้น แต่ถ้าส่วนโค้งของหน้าสัมผัสอยู่ในวงจรเป็นเวลา 120 ms. การลดลงจะเหลือประมาณ 38% ของก่าเริ่มด้น และถ้าไม่มีความด้านทานอยู่ในวงจร ประจุจะ ดำเนินด่อไปและจะก่อยๆลดลง แต่จะเป็นไปในอัตราที่ช้ากว่ามาก

เมื่อสายส่งมีการชดเชยด้วยตัวเหนี่ยวนำแบบขนาน ประจุแรงดันจะปล่อยประจุผ่าน ตัวเหนี่ยวนำในลักษณะที่สั่น โดยความถี่ของการสั่นจะถูกกำหนดโดยความเหนี่ยวนำของตัว เหนี่ยวนำ และความจุไฟฟ้าในสายส่ง และการสั่นจะลดลงในอัตราก่อนข้างช้าซึ่งจะขึ้นอยู่กับการ สูญเสียในสายส่ง และตัวเหนี่ยวนำ โดยการสั่นที่ความถี่ต่ำบ่อยครั้งจะมีก่าเดียวกันกับความถี่ของ แหล่งกำเนิดได้ และโดยทั่วๆไปความแตกต่างของความถี่ของแรงดันบนด้านใดด้านหนึ่งของเบรก เกอร์จะยังมีอยู่ เพราะฉะนั้นจึงมีความเป็นไปได้ของการปิดกลับที่แหล่งกำเนิดบนสายส่ง จะมีเฟส ตรงกันข้ามกับแรงดันที่เหลือในระบบ

หม้อแปลงแรงคันที่เชื่อมต่อที่สายส่ง จะมีการสูญเสียสูงกว่าตัวเหนี่ยวนำแบบขนาน ซึ่งจะมีประสิทธิภาพ ในการลดแรงคันที่เหลือในระบบได้ โดย Cahill (1964) พบว่าในทางปฏิบัติ จะไม่มีประจุเหลืออยู่บนสายส่งหลังจากเวลา 0.4 s เช่นเดียวกันกับการทดสอบทางภาคสนามของ หม้อแปลงอัตโนมัติที่จะมีการปล่อยประจุสายส่งอย่างรวดเร็ว และประจุจะหมดไปในเวลา 0.25 s 2.7 การชดเชยกวามเหนี่ยวนำ ในทางปฏิบัติของสายส่งแรงดันสูงในสถานะอยู่ตัวจำเป็น ที่จะต้องมีการชดเชยประจุกวามเหนี่ยวนำ โวลต์ แอมแพร์ ที่ผลิตจากตัวเหนี่ยวนำแบบขนาน ซึ่ง ในทางปฏิบัติชุดตัวเหนี่ยวนำแรงดันสูงเหล่านี้จะทำการเชื่อมต่ออยู่ที่สายส่ง ก่อนข้างดีกว่าการต่อที่ ขดลวดตติยภูมิของหม้อแปลง โดยเมื่อเชื่อมต่อตัวเหนี่ยวนำที่สายส่งและได้รับการจ่ายไฟทันที จะ ส่งผลให้เกิดการลดลงของแรงดันเกินที่เกิดขึ้นจากการจ่ายไฟ ซึ่งจะมีประโยชน์มากในกรณีที่สาย ส่งมีกวามยาว และถูกจ่ายไฟจากแหล่งกำเนิดที่มีกวามเหนี่ยวนำที่มีก่ามาก เพราะว่าในกรณีนี้ กวามถึ่ของแหล่งกำเนิด และสายส่ง อาจจะเข้าใกล้ก่ากวามถี่กำลัง และภายใต้สภาวะนี้ ถ้าเบรก เกอร์มีการใส่กวามต้านทานไปจึงไม่มีผลในการกำจัดขนาดของแรงดันเกินที่เกิดขึ้น ซึ่งการลดลง ของแรงดันเกินที่พบส่วนมาก จะเชื่อมต่อตัวเหนี่ยวนำอยู่ที่ปลายสายอีกด้านหนึ่งของสายส่ง มากกว่าเชื่อมต่อตัวเหนี่ยวนำเดียวกันอยู่ที่ต้นทาง

ขนาดของแรงดันเกินสูงสุดในภาพที่ 6 จะมีค่าลดลงมาก ถ้าสายส่งถูกจ่ายไฟและมี การต่อตัวเหนี่ยวนำแบบขนาน ชดเชยอยู่ที่ปลายสายรับ ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนในภาพที่ 17 โดย มีสภาวะของการชดเชยที่ 50% และจะเห็นว่าแรงดันเกินเหล่านี้จะอยู่ในช่วงเริ่มต้นของแรงดันเกิน ที่ก่ากวามเหนี่ยวนำแหล่งกำเนิด 0 - 0.25 H โดยขนาดของแรงดันเกินที่จะลดลงจะขึ้นอยู่กับความ เหนี่ยวนำแหล่งกำเนิด และความยาวสายส่ง และแรงดันจะมีขนาดมากขึ้นเมื่อก่าความเหนี่ยวนำ แหล่งกำเนิด และความยาวสายส่ง และแรงดันจะมีขนาดมากขึ้นเมื่อก่าความเหนี่ยวนำ สูงสุด กับความยาวสายส่ง โดยความเหนี่ยวนำแหล่งกำเนิดมีการชดเชย 50% ที่ก่าความเหนี่ยวนำ แตกต่างกัน



<u>ภาพที่ 17</u> การเปลี่ยนแปลงแรงคันสูงสุดที่ปลายสายกับความเหนี่ยวนำแหล่งกำเนิดและความยาว ของสายส่ง โดยมีรีแอกเตอร์ขนานชดเชย 50% เชื่อมต่ออยู่ที่ปลายสาย (a) 160.93 กิโลเมตร (b) 321.9 กิโลเมตร (c) 386.24 กิโลเมตร ที่มา: Bickford *et al.* (1980)



<u>ภาพที่ 18</u> เปอร์เซนต์แรงคันสูงสุดเมื่อไม่มีรีแอกเตอร์ขนานชดเชย 50% เชื่อมต่ออยู่ที่ปลายสาย ที่มา: Bickford *et al.* (1980)

ในภาพที่ 18 จะแสดงแรงคันเกินสูงสุดมีค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ ที่เกิดขึ้นเมื่อไม่มีการใช้ การชดเชยตัวเหนี่ยวนำแบบขนาน ซึ่งจะเห็นว่าการเพิ่มของแรงคันเกินจะเกิดขึ้นเมื่อความเหนี่ยวนำ ของแหล่งกำเนิดมีก่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือเป็นบัสอนันต์ หรืออาจจะพิจารณาในกรณีนี้ให้มีก่าของ ความเหนี่ยวนำอยู่ในช่วง 0 – 0.1 H ก็ได้

2.8 หม้อแปลงที่ปลายสายส่ง บ่อยครั้งเพื่อเป็นการประหยัดการลงทุนของชุดสวิตช์เกียร์ จะมีการใช้สายป้อนที่ประกอบด้วยสายส่งเหนือดิน เชื่อมต่อกับหม้อแปลงและพิจารณาให้เป็นชุด อุปกรณ์เดียวกัน ซึ่งจะไม่มีการใช้เบรกเกอร์ระหว่างสายส่งกับหม้อแปลง ลักษณะการจัดการนี้จะ ถูกใช้ทั้งในระบบจำหน่าย และสายส่ง หรือในส่วนที่เหมาะสม ภายใต้สภาพการณ์นี้บางครั้งอาจจะ เกิดความรุนแรงของแรงดันเกินที่ปลายสายสายส่งขึ้นเมื่อสายส่งมีการจ่ายไฟ โดยปรากฏการณ์ พื้นฐานนี้อธิบายๆไว้โดย Csuros et al. Bickford (1971)

การจ่ายไฟของสายส่ง เหนือดินจากแหล่งกำเนิดอิมพีแดนซ์เท่ากับศูนย์ ส่งผลให้เกิด การสร้างแรงดันจตุรัสที่ปลายสายเปิดของสายส่ง เนื่องจากการสะท้อนกลับที่ปลายสายส่งจากเสริ์ จแรงดันเมื่อเริ่มจ่ายไฟ เมื่อไม่กิดการสูญเสียของสายส่ง ขนาดของกลิ่นจัตุรัสนี้จะเกิดขึ้น 2 ครั้ง ในการจ่ายไฟ และความถิ่ของกลิ่นที่ได้จะเป็น T/ 4 เมื่อ T กือเวลาการแพร่ของสายส่ง โดยที่จุด ปลายของสายส่งจะเกิดการสั่น ซึ่งเกิดขึ้นจากวงจรที่ประกอบขึ้นด้วยความเหนี่ยวนำ และ ความจุ ใฟฟ้าอนุกรมกัน โดยในวงจรจะถูกกระดุ้นจากแรงดันกลิ่นจตุรัส และเนื่องจากมีการสั่นมาก แรงดันตกกร่อมในองก์ประกอบของกวามเหนี่ยวนำอาจจะเกินแรงดันคลื่นจตุรัส และจะเกิดขึ้นใน ด้านขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง นั่นก็อจะตกกร่อมกวามจุไฟฟ้า โดยจะขึ้นอยู่กับกวามยาวของ สายส่ง ถ้าสายส่งมีระยะทางที่สั้น ความถี่ของสายส่งอาจจะสูงกว่ากวามถี่ของหม้อแปลง ซึ่งใน กรณีของแรงดันที่สร้างขึ้นตกกร่อมตัวเก็บประจุอาจจะไม่ได้รับก่าสูงสุดก่อนที่จะสะท้อนกลิ่นใน ลักษณะขั้วตรงกันข้ามจากปลายสายของแหล่งกำเนิด ถ้าความยาวสายส่ง มีความถิ่จนเท่ากับ กวามถิ่หม้อแปลง จะทำให้เกิดสภาวะเรโซแนนซ์เกิดขึ้น แรงดันเกินจำนวนมากจะตกกร่อมความจุ ไฟฟ้ากางด้านขดลวดทุติยภูมิจองหม้อแปลง การประเมินแรงคันเกินอาจจะเริ่มต้นทำบนพื้นฐานของการแทนด้วยวงจรแบบหนึ่ง เฟส โดยหม้อแปลงจะถูกแทนด้วยความเหนี่ยวนำให้มีค่าเท่ากับความเหนี่ยวนำรั่วของหม้อแปลง และตัวเก็บประจุจะได้จากค่าทางด้านขดลวดทุติยภูมิโดยเป็นความจุไฟฟ้าแบบขนานของหม้อ แปลง หรือค่าความจุไฟฟ้าของสายเคเบิ้ลใดๆที่เชื่อมต่อทางด้านขดลวดทุติยภูมิ ผลที่ได้รับ สามารถดูได้ในภาพที่ 19 (a) และ (b) ซึ่งแรงดันชั่วครู่ที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมต่อของหม้อแปลงที่ สายส่ง ดังภาพ (a) และแรงดันทางด้านขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงดังภาพ (b)



<u>ภาพที่ 19</u> การจ่ายไฟของหม้อแปลงในสายป้อน (a) แรงคันที่จุคเชื่อมต่อของสายส่งกับหม้อแปลง (b) แรงคันที่หม้อแปลงทางค้านทุติยภูมิ ที่มา: Bickford *et al.* (1980)

สำหรับการประเมินให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นจำเป็นที่จะต้องแทนเป็นวงจรแบบ 3 เฟส และจะต้องรวมผลกระทบของการเชื่อมติดภายในของหม้อแปลงด้วย โดย White (1961) และ Csuros *et al.* (1971) ได้ทำการทดสอบทางภาคสนาม ซึ่งผลที่ได้จะทำให้เกิดการสั่นของแรงดัน โดยขนาดแรงดันจะไปปรากฏบนเฟสที่สอง และเฟสที่สาม หลังจากเฟสแรกทำการปิด แต่อย่างไร ก็ตาม Csuros *et al.* (1971) ได้กำหนดการสั่นของแรงดันเนื่องจากการปิดของเฟสที่สอง และเฟส ที่สามจะมีค่าน้อยกว่าการปิดของเฟสแรกที่ก่ายอดแรงดัน ในภาวะนี้จะพิจารณากล้ายกับในกรณี ของสายเคเบิ้ลใต้ดินที่ปลายสายมีการเชื่อมต่อกับหม้อแปลง, สายส่งเหนือดิน หรือตัวกำจัดความผิด พร่องด้วยตัวเหนี่ยวนำ (Heaton and Reid, 1966) 2.9 แรงดันเกินที่มีสาเหตุโดยความผิดพร่อง ในสายส่งแรงดันสูง ความผิดพร่องหนึ่งเฟส ลงดินจะมีสัดส่วนสูงมากในบรรดาความผิดพร่องทั้งหมด โดยเป็นที่รู้จักกันดีว่าการเกิดขึ้นของ ความผิดพร่องนั้นจะเพิ่มแรงดันของเฟสที่ไม่เกิดความผิดพร่องให้มากยิ่งขึ้น ซึ่งจะเหมือนกับการ เกิดขึ้นในกรณีของสองเฟสลงดิน Kimbark และ Legate (1968) ได้พิจารณาแรงดันเกินชั่วครู่ของ เฟสที่เพิ่มขึ้น มีค่าอยู่ในระดับ 2.0 p.u. ถึงแม้ว่าในระบบแรงดันที่ต่ำจะไม่มีสัญญาณบอกเหตุที่ อันตรายมาก แต่แรงดันเกินจะมีความสำคัญมากในระบบสายส่งที่มีขนาด 1000 โวลล์ หรือมากกว่า เพื่อป้องกันแรงดันเกินให้มีระดับต่ำกว่าระบบ โดยแรงดันเกินนี้จะมีสาเหตุจากการแพร่ในขั้นตอน การเปลี่ยนของแรงดันเนื่องจากความผิดพร่อง ซึ่งจะเป็นคลื่นเดินทางตามระบบสายส่ง และเกิด การสะท้อนกลับต่อมาภายหลังแบบไม่ต่อเนื่องขึ้นในระบบ

วิธีที่จะบรรยายให้เข้าใจได้ง่ายและใช้ในการคำนวณสภาวะชั่วครู่นั้น จะใช้เทคนิค ในช่วงที่ระบบมีสภาวะเริ่มต้นที่ค่าก่อนเกิดความผิดพร่อง และใช้การสวิตชิ่งโดยเชื่อมต่อความผิด พร่องไปยังพื้นดิน ซึ่งผลที่ได้จะเป็นดังภาพที่ 20 โดยแสดงแรงดันของเฟสเพิ่มขึ้นที่จุดความผิด พร่อง เนื่องจากการเกิดความผิดพร่องหนึ่งเฟสลงดิน



<u>ภาพที่ 20</u> แรงคันชั่วครู่ของเฟส Y และเฟส Bเนื่องจากเกิคความผิคพร่องเฟสเคียวลงคินที่เฟส R (a) แรงคันเฟส Y ที่จุคเกิคความผิคพร่อง (b) แรงคันเฟส B ที่จุคเกิคความผิคพร่อง ที่มา: Bickford *et al.* (1980)

3. <u>ภาวะชั่วครู่ในระบบสายเคเบิ้ล</u>

วงจรสายเกเบิ้ลใต้ดินถูกใช้อย่างกว้างขวางในการส่งกำลังไฟฟ้าเข้าไปสู่บริเวณที่มี ประชากรอยู่อย่างหนาแน่น และเนื่องจากบริเวณนี้มีความต้องการปริมาณกำลังไฟฟ้าเป็นปริมาณ มาก จึงมีการนำวงจรสายเกเบิ้ลที่ค่อนข้างยาวที่แรงดันสูงมาใช้ โดยปกติระบบสายเกเบิ้ลจะ ประกอบด้วยกลุ่มของสายเกเบิ้ลเฟสเดียวที่มีองก์ประกอบแบบมีแกนร่วมของตัวนำหลัก,ฉนวน, เปลือกหุ้มสายภายนอก และชั้นของฉนวน โดยการใช้สายเฟสเดียว 3 ชุด เพื่อส่งในระบบ 3 เฟส ฝังในดิน และจะมีองก์ประกอบหลากหลายตามรูปแบบวงจร 3 เฟส โดยเปลือกหุ้มสายจะถูก เชื่อมต่อโดยตรงที่ปลายสายของระบบ และบางจุดในระหว่างสายด้วยโดยจะเชื่อมต่อลงคินที่จุด เดียว หรือหลายจุดก็ได้ ถึงแม้ว่าระบบสายเกเบิ้ลอาจจะได้รับการเชื่อมต่อกันอย่างสมดุลแบบ 3 เฟส แต่แรงดัน และกระแส จะมีก่าไม่เป็นศูนย์ เนื่องจากรูปแบบการจัดวางสาย และก่าความเหนี่ยวนำ ร่วม โดยก่ากระแสที่ไหลที่เปลือกหุ้มสายนี้ จะทำให้เกิดความสูญเสียและทำให้อุณหภูมิของดิน บริเวณรอบๆสายสูงขึ้น ซึ่งอาจจะทำให้น้อยลงได้โดยการทำครอสบอนด์ (crossbond) ซึ่งจะทำให้ ก่าความเหนี่ยวนำร่วมมีก่าเท่ากันทุกเฟส

แรงคันเกินชั่วครู่ที่เกิดขึ้นในสายเกเบิ้ลจะเกิดขึ้นเมื่อเกิดการรบกวนทันที เช่น การสวิตชิ่ง หรือ ความผิดพร่อง ซึ่งจะส่งผลให้เกิดความเครียดชั่วกรู่บนฉนวนหลักของสายเกเบิ้ล นั่นคือ ระหว่างตัวนำ และเปลือกหุ้มสาย ซึ่งอาจจะคำนวณโดยให้มีความถูกต้องพอสมควร โดยใช้จำลอง ของสายส่งที่มีแกนร่วม (coaxial) ซึ่งวิธีนี้จะไม่พิจารณาผลของคินโดยรอบจึงไม่สามารถนำมาทำ การคำนวณแรงคันชั่วครู่ซึ่งเกิดขึ้นที่ฉนวนภายนอกระหว่างเปลือกหุ้มสาย และคินได้

3.1 ความแตกต่างระหว่างระบบสายส่ง และระบบสายเคเบิ้ล ระบบสายเคเบิ้ลจะมีความ แตกต่างทางกายภาพจากระบบสายส่งเหนือดินด้วยกันสองอย่าง อย่างแรก คือความใกล้ชิด และการ เชื่อมต่อระหว่างตัวนำ และเปลือกหุ้มสายของสายเคเบิ้ล และอย่างที่สอง คือจะมีคุณสมบัติที่ดีใน การปรากฎของทางเดินความนำดินระหว่างตัวนำใกล้ชิดของระบบสายเคเบิ้ล โดยผลกระทบของ ความแตกต่างเหล่านี้สามารถตรวจสอบได้จากโหมดการแพร่ของทั้งสองระบบ โดยวงจรเดี่ยว 3 เฟสของสายส่งเหนือดินจะมีสามโหมดของการแพร่ตรงกับไอเกนเวคเตอร์(eigenvectors) ขนาด 3x3 P เมตริกซ์ ส่วนในกรณีของวงจรสายเกเบิ้ลนั้นจะตรงกับหกโหมดที่ 6x6 P เมตริกซ์ ที่เกิด จากเปลือกหุ้มสายที่แยกออกมาจากตัวนำ 3.2 แรงคันเกินชั่วครู่บนเปลือกหุ้มสายของสายเกเบิ้ล ในสภาพการทำงานจริงของระบบ สายเกเบิ้ล แรงคันบนเปลือกหุ้มสายของระบบสายเกเบิ้ลจะมีก่าไม่เป็นศูนย์ตลอดความยาวของสาย เกเบิ้ล แม้ว่าเปลือกหุ้มสายอาจจะมีการต่อลงคิน 1 จุด หรือมากกว่าก็ตาม แรงคันเกินชั่วครู่ที่ เกิดขึ้นบนเปลือกหุ้มสาย จะทำให้เกิดความเครียดต่อฉนวนภายนอกของสายเกเบิ้ล จึงมีความสำคัญ ที่ต้องนำไปพิจารณาในการออกแบบสายเกเบิ้ล

3.2.1 สายเคเบิ้ลใต้น้ำ โดยปกติสายเคเบิ้ลใต้น้ำจะถูกวางให้มีความยาวแบบ ต่อเนื่อง และจะมีเกราะที่เป็นเส้นลวดเหล็กซึ่งปกติจะเชื่อมต่อร่วมกับเปลือกหุ้มสายที่ปลายแต่ละอันของ สายเคเบิ้ลลงดิน โดยเกราะเส้นลวดที่จุดเชื่อมกับทะเลบางครั้งอาจมีเสริ์จแรงดัน เนื่องจากการ สวิตชิ่ง หรือจากฟ้าผ่า เข้าไปในสายเคเบิ้ลที่ปลายสายจากฝั่ง และจะเริ่มต้นแพร่จากการที่มีแกน ร่วมระหว่างแกนตัวนำ และเปลือกหุ้มสาย

แรงดันบนเปลือกหุ้มสายชั่วครู่ จะมีรูปแบบของคลื่นที่เปลี่ยนแปลงตามระยะ ต่างๆ ของสายเคเบิ้ลใต้น้ำครึ่งหนึ่งที่ไม่จำกัดความยาว โดย Wedepohl และ Wilcox (1973b) ได้ทำ การจำลองและสรุปผลดังภาพที่ 21 ซึ่งแสดงผลการตอบสนองของเปลือกหุ้มสายสายเคเบิ้ลกับ แรงดันแบบขั้นที่ใช้ระหว่างแกนตัวนำ และเปลือกหุ้มสาย โดยเปลือกหุ้มสาย และเกราะจะทำการ เชื่อมต่อเข้าไว้ด้วยกันที่ปลายสายต้นทาง โดยการสมมุตินี้จะไม่คิดการการซึมผ่านของกระแสที่ ใหลออกไปในทะเลรอบๆ ซึ่งผลที่ได้ของแรงดันบนเปลือกหุ้มสายจะอยู่บนฐานของขนาดแรงคัน ที่จ่ายแรงดันแบบขั้น โดยแกนตัวนำ และความต้านทานของเกราะในทางปฏิบัติจะมีค่าน้อยกว่า ความด้านทานแบบตะกั่วของเปลือกหุ้มสายมาก ซึ่งในการสมมุตินี้สามารถตั้งค่าให้เป็นสูนย์ และ เมื่อไม่คิดผลกระทบของปรากฏการณ์ทางผิวที่เปลือกหุ้มสาย จะทำให้ง่ายขึ้นในการแสดงแรงคัน บนเปลือกหุ้มสาย การสมมุตินี้สามารถนำมาเขียนเป็นรูปคลื่นดังภาพที่ 22 และเมื่อทำการ เปรียบเทียบ กับภาพที่ 21 จะมีก่าสูงกว่าแรงดันบนเปลือกหุ้มสายประมาณ 30%



<u>ภาพที่ 21</u> การตอบสนองของเปลือกหุ้มสายในสายเคเบิ้ลใต้น้ำ ที่มา: Bickford *et al.* (1980)



<u>ภาพที่ 22</u> การตอบสนองของเปลือกหุ้มสายในสายเคเบิ้ลใต้น้ำที่ทำการแก้ไข ที่มา: Bickford *et al.* (1980)

3.2.2 การฝัง ระบบสายเคเบิ้ล โดย Wedepohl และ Wilcox (1973b) ได้พิจารณา ระบบเคเบิ้ลที่มี 3 สาย ที่มีการจัดวางแบบแบนราบ และฝังในดินแทน ในวงจร 3 เฟสงอง กระแสสลับ หรือแบบ 2 ขั้วของแรงดันสูงกระแสตรงที่ประกอบด้วยระบบสายส่ง กับตัวนำนิวทรัล โดยสายเคเบิ้ลจะถูกฝังที่ความลึก 16 cm. ในดินที่ค่าความต้านทานดินจำเพาะ 20 โอห์มเมตร และ แยกห่างกัน 30 cm. ระหว่างสายเคเบิ้ล โดยเปลือกหุ้มสายทั้งสามของสายเคเบิ้ลจะถูกเชื่อมต่อเข้า ด้วยกันลงดินที่ปลายสาย และทำการป้อนแรงดันแบบขั้นเข้าไประหว่างแกนตัวนำและเปลือกหุ้ม สายของสายเคเบิ้ลที่กลางสาย โดยสมมติสายเคเบิ้ลมีความยาวเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวที่ไม่จำกัด จะได้สภาวะชั่วครู่ที่เปลือกหุ้มสายที่จุด x กิโลเมตร ตามความยาวสายเคเบิ้ลที่กลางสาย ดังภาพที่ 23 (a) และ(b) สำหรับเปลือกหุ้มสายแบบตะกั่ว และเปลือกหุ้มสายแบบอะลูมิเนียมตามลำดับ โดยในระบบสายเคเบิ้ลที่มีความยาวแน่นอนจะให้ผลตอบสนองชั่วครู่ที่กลางสายตามเปลือกหุ้มสาย ของสายเคเบิ้ล ดังภาพที่ 24 ซึ่งจะแสดงความยาวของสายเคเบิ้ลที่ (i) 16 กิโลเมตร, (ii) 32 กิโลเมตร และ (iii) 64 กิโลเมตร โดยจะเลือกที่จุดกึ่งกลางของสายเคเบิ้ลเพราะว่าแรงคันสูงสุด บนเปลือกหุ้มสายจะอยู่ในบริเวณใกล้เกียงนี้ เป็นจุดที่อยู่ใกลจากระบบดิน จะได้ผลที่สมมุติบน เปลือกหุ้มสายสายเคเบิ้ลที่เชื่อมต่อเข้าด้วยกันลงคินที่ปลายสาย ในขณะที่แกนตัวนำทั้งสามจะถูก เปิดวงจรที่ปลายสายอีกด้านหนึ่ง โดยมีรายละเอียดค่าต่างๆของสายเคเบิ้ลในตารางที่ 2











(a)





ที่มา: Bickford *et al*. (1980)

ลักษณะเฉพาะของสายเคบิ้ล					
เส้นผ่าศูนย์กลางของแกนทองแคง	2.54 cm.				
เส้นผ่าศูนย์กลางของฉนวนหลัก	4.56 cm.				
เส้นผ่าศูนย์กลางของเปลือกหุ้มสาย	5.08 cm.				
เส้นผ่าศูนย์กลางของฉนวนภายนอก	5.59 cm.				
ค่าความต้านทานกระแสตรงของแกนทองแคง	0.034 Ω/km.				
ค่าความต้านทานกระแสตรงของเปลือกหุ้มสายตะกั่ว	0.436 Ω/km.				
ค่าความต้านทานกระแสตรงของเปลือกหุ้มสายอะลูมิเนียม	0.087 Ω/km.				
เสริ์จอิมพีแคนช์ระหว่างแกนกับเปลือกหุ้มสาย	19.4 Ω				
เสริ์จอิมพีแคนช์ระหว่างเปลือกหุ้มสายกับคิน	4.6 Ω				

ที่มา: Bickford *et al*. (1980)

3.3 การครอสบอนด์ ระบบสายเคเบิ้ล การกำจัด หรือลดผลของกระแสที่เปลือกหุ้มสาย ภายใต้สถานะอยู่ตัว ระบบสายเคเบิ้ลที่มีการใช้แรงดันสูงส่วนมากจะทำการครอสบอนด์ โดยทั่วๆ ไประบบจะมีจุดของการครอสบอนด์จำนวนมาก และที่จุดเหล่านี้แต่ละอันของการครอส บอนด์จะทำให้เกิดการปรับเปลี่ยนของอิมพีแดนช์ การปรับเปลี่ยนเหล่านี้จะเป็นจุดของการ สะท้อนกลับของเสริ์จ ซึ่งเกิดจากการสวิตชิ่ง หรือเกิดจากการรบกวนในระบบแบบอื่นๆ ส่งผลให้ เกิดแรงดันเกินชั่วครู่ ซึ่งจะใช้เป็นตัวต้านและป้องกันฉนวนหลักโดยเฉพาะอย่างยิ่งระหว่างเปลือก หุ้มสายของสายเกเบิ้ล และดิน

3.3.1 การครอสบอนด์ ในระบบสายเคเบิ้ลที่สั้น การครอสบอนด์ ระบบสายเคเบิ้ล จะทำขึ้นโดยแบ่งเป็นส่วนหลักจำนวนมากดังภาพที่ 25 แต่ละส่วนจะประกอบด้วยสามส่วนย่อย แต่ละส่วนข่อยแต่ละส่วนจะให้เป็นเนื้อเดียวกัน แต่ในส่วนหลักอาจจะไม่เป็นเนื้อเดียวกันก็ได้ สำหรับการครอสบอนด์ ในระบบสายเคเบิ้ลที่สั้น จะมีส่วนหลักน้อย โดย Wedepohl และ Indulger (1975) แนะนำการปรับเปลี่ยนเมตริกซ์โดยการการแปลงระหว่างจำนวนกระแส และ แรงดันบนเปลือกหุ้มสายที่มีการเชื่อมต่อของแต่ละส่วนย่อยนี้ โดยเมตริกซ์นี้จะประกอบด้วยสูนย์ หรือ หนึ่ง เพื่อแปลงแรงดัน และกระแสที่ปลายของหนึ่งส่วนย่อยเข้าไปที่การเริ่มของส่วนย่อย
ต่อไป สิ่งนี้สามารถใช้ร่วมกับการข้ายของเมตริกซ์ส่วนย่อยที่จะให้ผลของกระแส และแรงคัน เชื่อมต่อกันได้ โดย Wedepohl และ Indulger จะใช้วิธีนี้ในระบบสายเกเบิ้ลที่มีหนึ่ง หรือสองส่วน หลัก ระบบที่นำมาพิจารฉานี้จะมีองก์ประกอบแบนราบ และประกอบด้วยส่วนย่อยที่มีความยาว 0.457 กิโลเมตร เปลือกหุ้มสายที่ เชื่อมต่อเข้าด้วยกันที่ปลายแต่ละอันของสายเกเบิ้ล จะผ่านความ ด้านดินที่มีก่า 0.1 โอห์ม ดังภาพที่ 25 สำหรับระบบหนึ่งส่วนหลักนี้จะทำการป้อนแรงดันแบบขั้น ระหว่างแกนตัวนำของสายเกเบิ้ลกังภาพที่ 25 สำหรับระบบหนึ่งส่วนหลักนี้จะทำการป้อนแรงดันแบบขั้น ระหว่างแกนตัวนำของสายเกเบิ้ลภายนอก (สายเกเบิ้ลที่1) และดิน โดยสายเกเบิ้ลอื่นๆทั้งหมดจะ ถูกเปิดวงจรที่ปลายสาย แรงดันชั่วกรู่บนเปลือกหุ้มสายทั้งสามก่อนจุดแรกของการ ครอสบอนด์ ในภาพที่ 26 จะเห็นแรงดันที่เริ่มสร้างขึ้นหลังจากประมาณ 3 µs. ซึ่งเวลาการส่งผ่านของเสร็จ แกนร่วมจะตกกร่อมส่วนย่อย ค่ายอดแรงดันเริ่มต้นของเปลือกหุ้มสายและแกนตัวนำดังตารางที่ 3 การกำนวณนี้จะใช้วิธีง่ายๆที่ให้ไว้โดย Ball et al (1965) วิธีการนี้จะไม่รวมถึงผลกระทบของ ความเหนี่ยวนำร่วมของเสริ์จอิมพีแดนช์ระหว่างเปลือกหุ้มสาย และไม่พิจารฉาดูรายละเอียดการ ขึ้นอยู่กับกวามถิ่ของตัวแปรระบบ และผลกระทบของปรากฏกาณ์ทางผิว ที่ผิวตัวนำ โดยแรงดันที่

Calculated using:-				
	Simplified Method (p.u.)	Fourier transform method (p.u.)		
Core 1	0.99	1.00		
Sheath 1	-0.28	-0.34		
Core 2	-0.14	-0.17		
Sheath 2	0.01	0		
Core 3	0.15	0.17		
Sheath 3	0.29	0.34		

<u>ตารางที่ 3</u> ค่ายอดแรงดันชั่วครู่เริ่มต้นที่งุดแรกของการครอสบอนด์

ที่มา: Bickford *et al*. (1980)



<u>ภาพที่ 25</u> ส่วนย่อยหลักของการครอสบอนค์ระบบสายเคเบิ้ล ที่มา: Bickford *et al.* (1980)



<u>ภาพที่ 26</u> แรงคันเปลือกหุ้มสายที่จุดเชื่อมต่อแรกของการครอสบอนค์ในสายเกเบิ้ล ที่ประกอบค้วย 1 ส่วนหลัก ที่มา: Bickford *et al.* (1980)



<u>ภาพที่ 27</u> แรงดันบนแกนตัวนำที่ปลายสายอีกด้านของการครอสบอนด์สายเคเบิ้ลที่ประกอบด้วย 1 ส่วนหลัก ที่มา: Bickford *et al.* (1980)

สำหรับสายเคเบิ้ลที่การแบ่งเป็นสองส่วนหลักที่มีความยาวทั้งหมด 2.742 กิโลเมตร ค่าแรงคันสูงสุดบนแกนตัวนำจะเพิ่มมากขึ้นคังภาพที่ 28 ส่วนในตารางที่ 4 จะแสดง แรงคันบนแกนตัวนำ และเปลือกหุ้มสายที่มีการ ครอสบอนด์ จำนวน 4 จุด การเปรียบเทียบของ แรงคันที่จุดแรกของการ ครอสบอนด์ ในตารางที่ 3 ของแรงคันบนแกนตัวนำที่เพิ่มขึ้นกับส่วน หลักสองส่วนจะมีความแตกต่างกันกับแรงคันบนเปลือกหุ้มสาย

Crossbonded point	1	2	3	4
Core 1 (p.u.)	1.38	1.60	1.95	2.00
Sheath 1 (p.u.)	0.29	0.26	0.19	0.09
Core 2 (p.u.)	0.53	0.24	0.24	0.34
Sheath 2 (p.u.)	0.32	0.27	0.24	0.24
Core 3 (p.u.)	0.30	0.34	0.34	0.40
Sheath 3 (p.u.)	0.29	0.32	0.16	0.20

<u>ตารางที่ 4</u> แรงคันเกินสูงสุดที่จุดครอสบอนค์ในระบบที่มีสองส่วนหลัก

ที่มา: Bickford *et al*. (1980)



<u>ภาพที่ 28</u> แรงดันบนแกนตัวนำที่ปลายสายอีกด้านของการครอสบอนด์สายเคเบิ้ลที่ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ที่มา: Bickford *et al.* (1980)

3.3.2 การครอสบอนด์ ในระบบสายเคเบิ้ลที่ยาว หลักการของวิธีที่บรรยายในส่วน ก่อนหน้านี้ สามารถใช้กับระบบที่มีจำนวนของส่วนหลักมากได้ โดยกระบวนการคำนวณจะเป็น สัดส่วนโดยตรงกับจำนวน ซึ่งถ้าแต่ละส่วนมีจำนวนมากก็จะต้องใช้เวลามาก และจะเป็นตัว ขัดขวางกระบวนการคำนวณ ความลำบากนี้สามารถถูกกำจัดได้โดยการย้ายเมตริกซ์ของส่วนหลัก โดยวิธีการเฉพาะ ซึ่งกระบวนการคำนวณจะไม่ขึ้นอยู่กับจำนวนของส่วน และการใช้ประโยชน์ จากวิธีนี้อาจจะใช้จากข้อเท็จจริงของแรงคันเกินที่คิดว่าเลวร้ายที่สุด ซึ่งมีแนวโน้มจะเกิดขึ้นใกล้จุด การจ่ายไฟ หรือใกล้ปลายสายของระบบ ซึ่งแรงคันเกินสูงสุดบนแกนตัวนำนี้มีแนวโน้มจะมีก่า มากที่ปลายสายอีกค้านหนึ่งของระบบ กระบวนการกำนวณนี้สามารถจำกัดได้ โดยการกำนวณ การตอบสนองในจุดที่มีความสำคัญเท่านั้น

Dang (1972) แสดงวิธีทำให้ง่ายขึ้นในการมอง โดยนำเอาประโยชน์จากสาย ส่งระยะสั้น มาพิจารณา และแทนเป็นตัวแปรแบบเป็นก้อน เนื่องจากความยาวของส่วนย่อยจะสั้น กว่าความยาวคลื่นของส่วนประกอบฮาร์มอนิกสูงที่ใช้ในการแทนรูปแบบของคลื่นชั่วครู่ จากการ รวมกันของสามส่วนย่อย Dang ได้แสดงส่วนหลักแต่ละอันที่สามารถถูกประมาณโดยการสมมูล แต่ละส่วนให้เป็นเนื้อเดียวกัน โดยปัญหาของการการต่อของแต่ละส่วนหลักจำนวนมากนั้นจะไม่ ขึ้นอยู่กับจำนวนของส่วนมารวมกัน ซึ่งเป็นวิธีที่ค่อนข้างง่ายๆ มาใช้ในการคำนวณ และผลในการ พิจารณาจะถูกบันทึกลงในคอมพิวเตอร์ โดยจะมีสองไอเกนแวลยู (eigenvalues) เป็นเนื้อเดียวกันที่ เกิดขึ้นจากเมตริกซ์ ZY และเมื่อทำการตรวจสอบอย่างละเอียดจะยังคงเหลือสองรากสมการที่ได้มา จากสมาการกำลังสอง โดยผลที่ได้จากการเปรียบเทียบของทั้งสองวิธีที่ถูกจำลองดังภาพที่ 29 ซึ่งจะ แสดงแรงดันบนแกนตัวนำที่ปลายสายอีกด้นหนึ่งของสายเคเบิ้ลประกอบด้วย 20 ส่วนหลัก



<u>ภาพที่ 29</u> การเปรียบเทียบแรงคันบนแกนตัวนำที่ปลายสายเมื่อมีการครอสบอนค์เคเบิ้ลที่มี 20 ส่วนหลัก ที่มา: Bickford *et al.* (1980)

<u>เฟอร์โรเรโซแนนช์</u>

องค์ประกอบของวงจรเฟอร์ โรเร โซแนนซ์จะมีการอ้างถึงหลากหลายรูปแบบ ซึ่งโดย ส่วนมากจะอ้างถึงเฟอร์ โรเร โซแนนซ์ในสภาวะวงจรไฟฟ้าในรูปแบบของความเหนี่ยวนำที่ทำให้ เกิดการสั่นซึ่งออกมาจากบริเวณการอิ่มตัวแม่เหล็ก และจะเกิดการสั่นขึ้นเมื่อทำปฏิกิริยากับการ รวมกันของความจุไฟฟ้าเฉพาะแห่ง หรือบางครั้งอาจจะอ้างถึงในเทอมที่อยู่ในระบบ กับหม้อแปลง ที่กำลังเข้าใกล้การอิ่มตัว โดยมีแรงคันเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดขึ้นจาก X_L และ X_C ที่อนุกรมกัน และส่งผล ให้ค่าอิมพีแดนซ์เป็นศูนย์ โดยกระแสจะเพิ่มขึ้น และแรงคันตกคร่อมองก์ประกอบสูงขึ้น แม้ว่า หม้อแปลงนั้นจะไม่เคยเข้าไปถึงจุดอิ่มตัวก็ตาม

ความเกี่ยวพันของเฟอร์ โรเร โซแนนช์ ส่วนมาก ปกติจะเกี่ยวข้องกับค่ายอดแรงคันสูงที่ สัมพันธ์กับเฟสอื่นๆและคิน และความผิดปกติของรูปคลื่นแรงคัน (ขนาด, มุมเฟส และฮาร์มอนิก)

<u>วงจรไฟฟ้าเฟอร์โรเรโซแนนซ์</u>

ก่อนที่จะเริ่มเข้าสู่ทฤษฎีของเฟอร์ โรเร โซแนนซ์ จะต้องทำความเข้าใจบางส่วนของ องก์ประกอบวงจรที่เป็นตัวอย่างทำให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดเฟอร์ โรเร โซแนนซ์ โดยหัวข้อย่อย ที่นำเสนอข้างถ่างนี้ไม่ใช่การค้นคว้าทั้งหมด แต่เป็นการแนะนำคร่าวๆเท่านั้น โดยวงจรเฟอร์ โรเร โซแนนซ์จะพัวพันอยู่กับความจุไฟฟ้า, แกนเหล็กหม้อแปลง และ สภาวะโหลดน้อยมากในวงจร ข่าย นอกจากพื้นฐานข้อมูลนี้ ยังมีวงจรที่เป็นไปได้อีกมากที่เกี่ยวข้อง โดยพื้นฐานอย่างง่ายอย่าง หนึ่งคือการ มองเป็นการเชื่อมต่อแบบอนุกรมของ ความจุไฟฟ้า และความเหนี่ยวนำที่อิ่มตัว กับ พื้นฐานภาระองก์ประกอบความด้านทานที่มีค่าน้อยมาก โดยหม้อแปลงจะมีค่า X_L ซึ่งสามารถ เป็นได้สองสถานะ คือก่า X_{MSAT} หรือ X_{MUNSAT} อย่างใดอย่างหนึ่ง หรือบางก่าในระหว่างการ นำไปสู่สถานะของระบบซึ่งเป็นไปได้หลากหลายดังรูปภาพที่จะตามมาภายหลัง โดยการจำลองที่ ทำให้ง่ายของหม้อแปลงที่ใช้สำหรับการรวบรัด จะแสดงเป็นหม้อแปลงทางด้านทุติยภูมิขณะไม่มี โหลด กับแกนเหล็กที่จำลองอย่างง่ายๆเป็น X_M และในการจำลองที่สมบูรณ์มากกว่านี้จะกล่าว ภายหลังต่อมา 1.1 การสวิตซิ่งเฟสเดียวของหม้อแปลงที่มีชุดขดลวดแบบเดลตาและแบบวายไม่ต่อลงดิน รวมถึงวงจรอย่างใดอย่างหนึ่งของหม้อแปลง 3 เฟสที่ไม่ต่อลงดิน (แบบวายไม่ต่อลงดิน, เดลตา, หรือหม้อแปลงหนึ่งเฟสที่มีการเชื่อมต่อแบบเฟส-เฟส) เป็นสเหตุที่จะทำให้เกิดการสร้างการ อนุกรมของ L และ C ในวงจรข่าย โดยแรงดันระบบที่เกิดขึ้นเมื่อมองผ่านเข้าไปในส่วนที่ทำ แม่เหล็กของหม้อแปลงเข้าไปถึงเฟสกับดินของความจุไฟฟ้าเฟสอื่นๆในกรณีแต่ละอัน โดยวงจร สมมูลจะมีการเชื่อมต่อแบบอนุกรมของความเหนี่ยวนำ และความจุไฟฟ้า

ในวงจรเหล่านี้ระบบไฟฟ้ากำลังจะกำหนดแรงดันที่ตกกร่อมวงจรทั้งหมด แต่ไม่ สามารถกำหนดแรงดันที่จุดกึ่งกลางในวงจรได้ดังนั้นแรงดันขณะเปิดเฟสนั่นกือตกกร่อม X_c หรือ แรงดันตกกร่อมหม้อแปลงอาจจะมีก่าสูง ซึ่งจะสร้างแรงดันเทียบกับดินสูง และอาจจะเกิดกวาม เสี่ยงต่อเกรื่องล่อฟ้า และ โหลดที่เชื่อมต่ออื่นๆ



(b)

<u>ภาพที่ 30</u> การจ่ายไฟเฟสเดียวให้หม้อแปลงที่เชื่อมต่อแบบเคลตา-วายไม่ลงคิน (a) ชุดขคลวดแบบเคลตาของหม้อแปลง เมื่อมีการจ่ายไฟหนึ่งเฟส (b) วงจรสมมูลตาข่าย

(b) วงจรสมมูลต

ที่มา: Horak (2004)





- (a) ชุดขคลวดแบบเคลตาของหม้อแปลงเมื่อมีการจ่ายไฟ 2 เฟส
- (b) วงจรสมมูลตาข่าย

ที่มา: John (2004)



<u>ภาพที่ 32</u> การจ่ายไฟเฟสเดียวให้หม้อแปลงที่เชื่อมต่อแบบวายไม่ลงคิน

(a) ชุดขดลวดแบบวายไม่ต่อลงดินของหม้อแปลง เมื่อมีการจ่ายไฟหนึ่งเฟส

(b) วงจรสมมูลตาข่าย

ที่มา: Horak (2004)

1.2 การสวิตซิ่งเฟสเดียวของหม้อแปลงที่มีชุดขดลวดแบบวายต่อลงดิน กับชุดตัวเก็บประจุ
 ไม่ต่อลงดิน องค์ประกอบนี้คล้ายกับตัวอย่างก่อนหน้ายกเว้นแรงดันระบบที่ต้องมองผ่านชุดตัวเก็บ
 ประจุที่ใช้แก้ตัวประกอบกำลังทั้งชุดไม่ต่อลงดิน เข้าไปในส่วนกระตุ้นของหม้อแปลงที่ต่อลงดิน
 โดยค่า X_c ในที่นี้โดยทั่วไปจะอธิบายให้มีค่าขนาดต่ำมากกว่าในตัวอย่างก่อนหน้า



<u>ภาพที่ 33</u> การจ่ายไฟเฟสเดียวให้หม้อแปลงที่เชื่อมต่อแบบวายลงดิน กับชุดตัวเก็บประจุ (a) ชุดขดลวดแบบวายลงดินของหม้อแปลงกับชุดตัวเก็บประจุที่ไม่ต่อลงดิน เมื่อมีการจ่ายไฟหนึ่งเฟส (b) วงจรสมมูลตาข่าย

ที่มา: Horak (2004)



<u>ภาพที่ 34</u> การจ่ายไฟ 2 เฟส ให้หม้อแปลงที่เชื่อมต่อแบบวายลงดิน กับชุดตัวเก็บประจุ (a) ชุดขดลวดแบบวายต่อลงดินของหม้อแปลงกับชุดตัวเก็บประจุไม่ต่อลงดิน เมื่อมีการจ่ายไฟสองเฟส (b) วงจรสมมูลตาข่าย ที่มา: Horak (2004) 1.3 การเชื่อมต่อร่วมจากการดับไฟสาขส่งที่มีหม้อแปลงเชื่อมต่อ จากประสบการณ์ของ วิศวกรระบบไฟฟ้ากำลังส่วนมาก การเชื่อมต่อระหว่างสองสาขส่งจะถูกกล่าวถึงในเทอมของการ เชื่อมต่อลำดับศูนย์ นั่นคือ กระแสลำดับศูนย์บนสาขส่งหนึ่งสามารถเหนี่ยวนำแรงดันลำดับศูนย์บน สาขส่งใกล้เกียงได้ ซึ่งจะคล้ายกัน แต่การเชื่อมต่อจะอ่อนลงกว่าระหว่างสองสาขส่งที่มี เมื่อสภาวะ ปกติจะแสดงแต่แรงดัน และกระแสลำดับบวกเท่านั้น โดยการเชื่อมต่อนี้สามารถเป็นได้ทั้งกวามจุ ไฟฟ้า และความเหนี่ยวนำ สมมุติให้สาขส่ง X (เฟส A, B, C) และสายส่ง Y (เฟส A', B' และ C') อยู่ บนเสาร่วมกัน การเชื่อมต่อบางที่จะกระทบโดยตรงต่อเฟส A, A ' และที่อยู่ใกล้ชิดร่วมด้วยคือ A-B' และ A- C' เมื่อมีระยะทางที่ยาวออกไป ดังนั้นการเปิดเฟส A กวามจุไฟฟ้าจะเชื่อมติดถึง A', B' และC' ที่ใกล้ชิด เพราะฉะนั้นเฟส A จึงจ่ายไฟบางส่วนถึงศักย์ของ A' ซึ่งเหมือนกับการเชื่อมต่อ แม่เหลีกที่อ่อนลงในหนึ่งเฟส ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ดี ในเรื่องของการเชื่อมต่อนี้ส่วนมากจะมีการ พิจารณาในการศึกษาของระบบไฟฟ้ากำลังน้อย แต่มันอาจจะเพียงพอที่จะสร้างสภาวะเฟอร์โรเร โซแนนซ์ระหว่างกวามจุไฟฟ้าที่เชื่อมต่อเฟสกับดิน และการดับไฟหม้อแปลงเพื่อแยกส่วนออกจาก สายส่ง

เมื่อพิจารณาวงจรที่แสดงข้างล่าง โดยสมมุติให้มีการดับไฟโหลดบนสายส่ง อิมพีแดนช์แม่เหล็กของหม้อแปลงแรงคัน หรือหม้อแปลงกำลังที่เชื่อมต่อสายส่งที่จ่ายไฟทั้งความจุ ไฟฟ้า และความเหนี่ยวนำไปยังสายส่งที่ดับไฟ จะทำให้หม้อแปลง และสายส่งเกิดการสูญเสียด่ำ เมื่อเป็นเช่นนั้นวงจรจะเริ่มสั่น และอาจจะเกิดขึ้นได้จากการนำเข้าโดยผ่านความผิดพร่องในการ จ่ายไฟสายส่งโดยจะเหนี่ยวนำแรงคันลำคับศูนย์มากบนสายส่งขนาน และจะสนับสนุนให้สามารถ เกิดเรโซแนนซ์ขึ้น โดยข้อจำกัดส่วนใหญ่จะอยู่ที่ความสูญเสียของหม้อแปลง และสายส่ง



<u>ภาพที่ 35</u> การเชื่อมต่อร่วมจากการดับไฟสายส่ง ที่มา: Horak (2004) 1.4 ความจุไฟฟ้าที่หน้าสัมผัสเบรกเกอร์ที่จ่ายให้บัส กับหม้อแปลงแรงคัน เบรกเกอร์ สามารถจ่ายไฟบางส่วนให้บัสที่ไม่มีกระแสไฟฟ้าผ่านทางความจุไฟฟ้าที่ตกคร่อมหน้าสัมผัสที่เปิด โดยเฉพาะเบรกเกอร์ที่แบ่งออกเป็นส่วนหลายอันจะมีชั้นตัวเก็บประจุอยู่รอบ ซึ่งจะมีจุดร่วมกัน น้อย แต่สามารถระงับโดยการผลิตและติดตั้งให้อยู่บนฐานของอุปกรณ์ โดยวงจรจะมีองก์ประกอบ สำหรับเฟอร์โรเรโซแนนช์ แบบอนุกรม L-C ในวงจรข่ายที่สร้างขึ้นระหว่างระบบไฟฟ้ากำลังกือ เบรกเกอร์ และบัส, ความจุไฟฟ้า, และ หม้อแปลงแรงคันบนบัส โดยชั้นตัวเก็บประจุที่อยู่ภายนอก เบรกเกอร์ จะมีความจุไฟฟ้าตกคร่อมหน้าสัมผัสขณะเปิดอยู่ประมาณ 50 pf ซึ่งจะมีค่าประมาณ 50 MΩ ที่ 60 Hz ดังนั้นสภาวะเฟอร์โรเรโซแนนช์ที่เป็นไปได้จะด้องการ การรวมกันของเบรกเกอร์ หลายตัวที่ขนานกัน ก่อนที่กระแสจะมากพอและสามารถดึงมาเพื่อสนับสนุนให้เกิดเฟอร์โรเร โซแนนช์ สำหรับเบรกเกอร์ที่แบ่งออกเป็นส่วนหลายอันความจุไฟฟ้าจะอยู่ที่ประมาณ 1000 pf



<u>ภาพที่ 36</u> เบรกเกอร์กับชั้นตัวเก็บประจุที่จ่ายให้หม้อแปลงแรงคัน ที่มา: Horak (2004)

1.5 แหล่งกำเนิดแบบเดลตาที่ง่ายให้หม้อแปลงแบบวาย/วายลงดินทั้ง 2 ด้าน กับความผิด พร่องภายนอกแบบหนึ่งเฟสลงดิน ในกรณีนี้จะต่างไปจากตัวอย่างอื่นๆ ซึ่งต้องประยุกต์แรงดันสูง ที่ง่ายให้กับ L- C ที่เชื่อมต่อแบบขนาน ดังนั้นแรงดันที่ตกคร่อมองก์ประกอบ L และ C จะถูก กำหนดโดยแหล่งกำเนิด และขณะเดียวกันกระแสในองก์ประกอบนี้จะมีอิสระสามารถที่จะ เปลี่ยนแปลงจากที่แหล่งกำเนิดมากกว่าแรงดันตกกร่อมองก์ประกอบ ทางหนึ่งของการประยุกต์ที่ เกิดขึ้นนี้จะให้โหลดมีอยู่จริง ถูกจ่ายโดยหม้อแปลงแบบเดลตา/วายลงดิน (โดยแหล่งกำเนิดการ ใฟฟ้าที่มีชุดขดลวดแบบเดลตา) ซึ่งได้มาจากเครื่องกำเนิด และเปลี่ยนเป็นเกรื่องกำเนิดในระบบ จำหน่าย เมื่อเกิดความผิดพร่องหนึ่งเฟสลงดินในระบบการไฟฟ้า การไฟฟ้าจะแยกออกมา เกรื่อง กำเนิดในระบบจำหน่ายจะไม่สามารถป้อนความผิดพร่องหนึ่งเฟสลงดินให้ กับองก์ประกอบของ หม้อแปลงนี้ แผนการป้องกันอย่างหนึ่งที่การไฟฟ้ายอมรับคือให้เกรื่องกำเนิดในระบบจำหน่ายต้อง ต่อชุดขดลวดแบบวาย/วายลงดินทั้ง 2 ด้าน และเชื่อมต่อหม้อแปลงแรงคันด้วยการกำนวณแบบ 3Vo ด้วยรีเลย์ หรือต่อชุดขดลวดแบบวายลงดิน / เดลตาแบบเปิด และเชื่อมต่อ VT กับองก์ประกอบ 59 N ที่คอยตรวจสอบแรงดันเดลตาแบบเปิด ระหว่างความผิดพร่องหนึ่งเฟสลงดิน โดย VT หนึ่ง จะมองเห็นเป็น 0โวลต์ และสองส่วนที่เหลือจะเห็นแรงคันเป็น 1.732 ต่อหน่วยของเฟสกับดิน ด้วย เหตุนี้แรงดันจะถูกยกขึ้นซึ่งง่ายต่อการมองเห็นการอิ่มตัวของ VT และการเรโซแนนช์ต่อมา แต่ถ้า ใช้ VT บนฐานของพิกัดแรงดันเฟสถึงดินมากกว่าพิกัดแรงดันเฟสกับเฟส VT จะทำให้เกิดการ อิ่มตัวทุกความผิดพร่องหนึ่งเฟสลงดิน ดังนั้นความเสี่ยงของเฟอร์โรเรโซแนนช์จะมีลำดับของ ขนาดสูง ซึ่งกล้ายการอิ่มตัวและจะเรโซแนนช์ต่อมาซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ระหว่างสายไฟถึงนิวทรัล ใดๆที่เชื่อมต่อกับหม้อแปลงกำลังบนสายส่ง

ถ้า VT เกิดการอิ่มตัว อาจจะทำให้เข้าสู่เฟอร์ โรเร โซแนนช์ แรงดันทางด้านทุติยภูมิจะ ถูกทำให้บิดเบี้ยว ผลของแรงดันมูลฐานที่ออกมาจะลดลงอย่างมาก และมีการเลื่อนเฟสดังนั้นจะทำ ให้การวัด 3Vo ลดลง และจะเกิดการทำงานผิดพลาดของรีเลย์ภายหลัง ซึ่งจะเกิดการตัดเป็นผล ตามมา

ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปขององค์ประกอบนี้จะเชื่อมต่อ VT ทางค้านทุติยภูมิเป็นเคลตา แบบเปิดและเชื่อมต่อความด้านทานตกคร่อมเคลตาแบบเปิด เพื่อให้ภาระในระบบลคลง การให้ ภาระในวงจรเฟอร์โรเรโซแนนซ์จะเป็นทางที่ดีที่ใช้หน่วงเฟอร์โรเรโซแนนซ์ ซึ่งในหัวข้อเรื่อง ภาระนี้จะกล่าวครอบคลุมมากขึ้นในส่วนต่อมา



<u>ภาพที่ 37</u> แหล่งกำเนิดแบบเดลตาที่จ่ายให้กับความผิดพร่องหนึ่งเฟสลงดินและหม้อแปลง แบบวายลงดิน ที่มา: Horak (2004) 1.6 หม้อแปลงแรงคันผ่านตัวเก็บประจุ CVT คือระบบการแบ่งแรงคันตัวเก็บประจุ โดยมี การเชื่อมต่อหม้อแปลงที่แท็บตรงกลางระหว่างความจุไฟฟ้า และที่มากกว่านั้น จะมีการเพิ่มความ เหนี่ยวนำเข้าไปอนุกรม กับหม้อแปลงเพื่อที่จะควบคุมปรับความจุไฟฟ้า และชดเชยเฟสที่เลื่อน ซึ่ง วงจรที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นการนำมาซึ่งให้เกิดเฟอร์ โรเรโซแนนช์

ผู้ผลิต CVT ทั้งหมดจะทราบลักษณะเฟอร์โรเรโซแนนช์ของอุปกรณ์ของเขาและจะ ทำการติดตั้งวงจรลดผลกระทบเฟอร์โรเรโซแนนช์ที่เหมาะสม โดยวิธีแรกจะลดผลกระทบโดยเก็บ ภาระบางส่วนไว้ตลอดเวลาบน CVT วิธีที่สองจะติดตั้งโหลดแบบอนุกรม กับวงจรที่ใช้ปรับความถี่ มูลฐาน เพื่อเป็นวงจรยับยั้งความถิ่มูลฐานจากโหลด และผ่านความถื่อื่นๆไปสู่โหลด วิธีที่สามจะ เพิ่มความไวแรงดันของโหลด ถ้าแรงดันเพิ่มเหนือกว่ามาตรฐานจะส่งผลทำให้รีแอกเตอร์อิ่มตัวเพิ่ม โหลดมากขึ้น วิธีที่สี่จะเพิ่มกับดักเสริ์จเพื่อตัดยอดแรงดันที่สูงผิดปกติที่สัมพันธ์กับเฟอร์โรเร โซแนนซ์ ซึ่งการรวมเข้าด้วยกันของสิ่งเหล่านี้จะใช้อยู่ใน CVT

โดยเทคนิคลดผลกระทบเหล่านี้ที่สร้างเข้าไปใน CVT สามารถลอดได้ตามความ ด้องการของผู้ใช้ในส่วนที่สัมพันธ์กับเฟอร์โรเรโซแนนช์ใน CVT แต่ผู้ใช้ต้องทราบว่าวงจรเหล่านี้ จะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของ CVT โดยเฉพาะเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของขนาด แรงดัน และมุมเฟส โดยหัวข้อการวิเคราะห์พฤติกรรมภาวะชั่วครู่ของ CVT ในบทความมีมาก แต่ ไม่ได้ถูกครอบคลุมในที่นี้ทั้งหมด



<u>ภาพที่ 38</u> CVT กับวงจรที่ใช้ลดผลกระทบเฟอร์โรเรโซแนนช์ ที่มา: Horak (2004)

1.7 การเชื่อมต่อแม่เหล็กในเฟสของหม้อแปลง 3 เฟส อย่างหนึ่งที่ใช้ในการป้องกันวงจร เฟอร์โรเรโซแนนช์จากการเพิ่มขึ้นคือการรักษาระบบสามเฟสให้เป็นอิสระหลีกเลี่ยงการเชื่อมต่อ ระหว่างเฟสซึ่งจะทำให้เกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ นั่นหมายถึงโหลดทั้งหมดต้องได้รับการเชื่อมต่อ แบบเฟสกับนิวทรัลจะดีกว่าแบบเฟสกับเฟส โดยอาจจะต้องทำให้ดูเหมือนเป็นชุดสามเฟส แบบ วาย/วายลงดินทั้ง 2 ด้าน แต่นั่นอาจจะไม่ใช่กรณีนี้กรณีเดียว เมื่อเฟสของหม้อแปลงมีการใช้แกน เหล็กร่วมกัน โดยเมื่อทำการจ่ายไฟเฟสหนึ่งสามารถเชื่อมต่อเข้าไปในเฟสที่ไม่ได้รับการง่ายไฟ และกระตุ้นมันได้โดยความจุไฟฟ้าบนเฟสเหล่านั้น สภาวะเรโซแนนซ์กีสามารถเกิดขึ้นได้

เมื่อพิจารณาการออกแบบหม้อแปลงแบบ 4 แกนเหล็ก 5 ขา คังภาพข้างล่าง และ ้สมมุติให้เฟส \mathbf{A}_{p} เท่านั้นที่ถูกกระตุ้น ส่วนทางด้านทุติยภูมิไม่มีการเชื่อมต่อทั้งหมด โดย \mathbf{B}_{p} และ \mathbf{C}_{p} ้จะมีการเชื่อมต่อความจุไฟฟ้าบางส่วน แต่ไม่เชื่อมต่อกับโหลด ซึ่งที่ขคลวด A, จะเห็นฟลักช์ใน แกนเหล็ก 1 และ 2 ในตอนแรก จะไม่มีการไหลของกระแสใน $\mathbf{B}_{\mathbf{p}}$ แต่จะได้รับฟลักช์ประมาณ ้ครึ่งหนึ่งจากแรงเคลื่อนกลับ A_p (นั่นคือฟลักช์กระตุ้น) ซึ่งจะไหลในแกนเหล็ก 1 และ 2 โดยฟลักช์ ในแกนเหล็ก 2 จะเหนี่ยวนำแรงคันประมาณ 0.5 ต่อหน่วยบน ${
m B}_{
m p}$ และแรงคัน ${
m V}_{
m B}$ ที่เกิดขึ้นนี้จะทำ ให้กระแสถูกขับเข้าไปในความจุไฟฟ้าที่เชื่อมติดบน \mathbf{B}_{p} โดยกระแสบน \mathbf{B}_{p} จะไปลดฟลักซ์ในแกน เหล็ก 2 จึงเท่ากับเป็นการเพิ่มกระแสกระต้นให้มากขึ้นบนเฟส A ดังนั้นทำให้ผลของกระแสใน หม้อแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างเฟส $\mathbf{A}_{\mathbf{p}}$ และ $\mathbf{B}_{\mathbf{p}}$ เป็น 1:1 เมื่อกระแสใน $\mathbf{A}_{\mathbf{p}}$ เพิ่มขึ้น จะทำให้ฟลักช์ใน แกนเหล็ก 1 เพิ่มขึ้นและถ้ากระแสทั้งหมดบน A, มีมากกว่ากระแสกระตุ้นปกติ แกนเหล็ก 1 จะถูก ขับให้เข้าไปสู่การอิ่มตัว ดังนั้นการไหลของกระแสกระตุ้นใน ${f A}_p$ จะมีมาก ซึ่งจะทำให้ฟลักซ์ใน ${f B}_p$ ้เพิ่มขึ้นเพราะเป็นสัคส่วนโคยตรงกัน และแรงคัน V_B ก็จะเพิ่มมากขึ้น ซึ่งในขณะนี้การแปลง แรงคันระหว่าง A_p และ B_p เป็น 1:1 ซึ่งจะคล้ายกับการแปลงกระแสผ่านระหว่างเฟส C และเฟส A และแกนเหล็ก 4 จะทำงานในความอิ่มตัวอีกด้วย นอกจากนั้นแกนเหล็ก 3 จะขึ้นอยู่กับขนาดของ \mathbf{X}_{c} บนเฟส B และ C ซึ่งบางส่วนอาจจะกำลังทำงานเข้าไปสู่การอิ่มตัว โดยการอิ่มตัวของแกน เหล็กที่เกิดขึ้นนี้เนื่องมา จากหม้อแปลงถูกออกแบบเพื่อย้ายกระแสจากปฐมภูมิถึงทุติยภูมิ บนขา ์ แกนเหล็กร่วมกัน แต่ไม่ได้มาจากขดลวดปฐมภูมิถึงปฐมภูมิ และเมื่อทำการพิจารณาวงจรสมมูลที่ เกิดการรวมกันของ L- C จำนวนมากจึงสามารถเป็นสาเหตุให้เกิดเรโซแนนช์



<u>ภาพที่ 39</u> การเชื่อมต่อแม่เหล็กระหว่างเฟสของหม้อแปลง 3 เฟส

(a) หม้อแปลงแบบ 4 แกนเหล็ก 5 ขา

(b) วงจรสมมูลจากการกระตุ้นเฟส A โดยมีภาระเป็นเฟส B และ C กับ ${
m X_c}$

ที่มา: Horak (2004)

การออกแบบหม้อแปลงแกนเหล็กเดี่ยว 3 ขา (เคลตา/วายลงคิน) และการออกแบบ หม้อแปลงแกนเหล็กเดี่ยว 4 ขา(วาย/วายลงคินทั้ง 2 ค้าน) มีความสามารถคล้ายกับการเชื่อมต่อ แม่เหล็กที่จ่ายไฟเฟสกับเฟสอื่นๆ ซึ่งจะมีการวิเคราะห์ความสมคุลของฟลักช์ซับซ้อนอย่างมาก



<u>ภาพที่ 40</u> แบบหม้อแปลงกับการเชื่อมต่อของขดลวด

(a) หม้อแปลงแบบ 3 ขา สำหรับใช้แบบเคลตา / วายลงคิน

(b) หม้อแปลงแบบ 4 ขา แบบวาย / วายลงคินทั้ง 2 ด้าน

ที่มา: Horak (2004)

2. การวิเคราะห์พื้นฐานของวงจรเฟอร์โรเรโซแนนช์

พื้นฐานวงจรเฟอร์ โรเร โซแนนช์แบบอนุกรมจะถูกแสดงในรูปข้างล่างโดยจะรวมการ เชื่อมต่อแบบอนุกรมของแหล่งกำเนิดแรงดัน, ความด้านทานวงจรที่ก่อนข้างน้อย, การทำให้อิ่มตัว ของตัวเหนี่ยวนำในแกนแม่เหล็ก ซึ่งจะประกอบด้วย การไม่อิ่มตัว $L_{M,US}$ และจะกลายเป็น $L_{M,S}$ เหนือกว่าการอิ่มตัว, ความเหนี่ยวนำรั่ว L_L และ ความจุไฟฟ้า C โดยตัวเหนี่ยวนำในวงจรที่ใช้แทน เป็นตัวอย่างจะเป็นหม้อแปลงกำลัง หรือหม้อแปลงแรงดัน ที่มีแรงดันต่อเนื่องที่ 5% หรือบางที 15% หรือสูงกว่าแล้วแต่การประยุกต์ใช้ VT ซึ่งจะเหนือกว่าแรงดันทำงานที่ระบุ โดยจะขึ้นอยู่กับ การซื้อและการใช้ ดังนั้นตัวเหนี่ยวนำจะก่อนข้างใกล้เข้าสู่การอิ่มตัว และเมื่อพิจารณาหม้อแปลง ทางด้านทุติยภูมิจณะไม่มีโหลด หรือทางด้านปฐมภูมิที่ไม่มีโหลดแบบจนาน ถ้านำแรงดัน และ กระแสความถิ่มูลฐาน ในวงจรแปลงเป็นอิมพีแดนซ์พื้นฐานที่คิดขึ้นจะได้เป็น $X_{L,Total}$ โดยจะอ้าง เป็น X_M เพื่อความสั้นกระทัดรัด และ X_C ซึ่งต่อมาจะได้ผลเป็นพื้นฐานวงจรระดับสูง



<u>ภาพที่ 41</u> วงจรพื้นฐานสำหรับการวิเคราะห์เฟอร์โรเรโซแนนช์ ที่มา: Horak (2004)

การวิเคราะห์ทางตัวเลขโดยการใช้ซอฟแวร์เฉพาะจุดประสงค์ หรือซอฟแวร์ชนิดที่ไม่เป็น ทางการค้า ATP/ EMTP เป็นวิธีที่ต้องการการจำลองจริงๆ ให้เฟอร์โรเรโซแนนซ์ แต่อย่างไรก็ตาม อาจจะมีบางอย่างที่ไม่ทราบในการทำให้อิ่มตัวบางส่วนของแกนเหล็กที่มีการพันขดลวดหลายเฟส ในหม้อแปลง เช่น การตอบสนองของเหล็กในเส้นโค้ง B- H ที่ไม่เป็นรูปแบบเดียวกันในพื้นที่แกน เหล็กขนาดใหญ่, ชุดขดลวดหลายขด และความจุไฟฟ้าที่กระจาย เพื่อให้ได้ความแน่นอนในการ จำลองว่าอะไรจะเกิดขึ้นในระหว่างเกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์ โดยความไม่เป็นเชิงเส้นของโหลดน้อย นั้นอาจจะแสดงความซับซ้อนในการวิเคราะห์ที่มากขึ้นด้วย

โดยในที่นี้จะไม่เจาะลึกถึงการจำลองทางตัวเลข แต่จะครอบคลุมหลักการสองหลักการที่ ทำให้เข้าใจง่ายขึ้นของวงจรเฟอร์โรเรโซแนนช์ คือ

 การวิเคราะห์วงจรเชิงเส้นด้วยความถิ่มูลฐาน วิธีนี้จะใช้ในวิศวกรส่วนมากในอดีตที่ ผ่านมาในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยวิธีการมอง X_M ในเทอมของผลค่าความถิ่มูลฐานที่เปลี่ยน กับ ขนาดแรงดันความถิ่มูลฐาน

2) การวิเคราะห์สถานะ X_M คู่ มีน้อยมากในบทความที่จะนิยามตามการวิเคราะห์นี้ แต่ก็มี การใช้ หรือยังอ้างไม่ตรงกับหัวข้อโดยบทความต่างๆจะศึกษาอย่างละเอียดลึกลงเข้าไปมากในการ วิเคราะห์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ ซึ่งในวิธีนี้จะให้หม้อแปลงไม่อิ่มตัว ซึ่งจะมีค่า X_M สูงมาก จะยอมให้ V_{DC} ประจุแรงคันที่เหลืออยู่ในระบบความจุไฟฟ้า และผลสุดท้ายจะนำไปสู่การอิ่มตัวของหม้อ แปลง หรือถ้าหม้อแปลงถูกทำให้อิ่มตัว X_M จะมีค่าต่ำมากและ ความจุไฟฟ้า จะมีการปล่อยประจุ อย่างเร็วและจะมีการประจุกระแสใหม่ ในลักษณะขั้วตรงกันข้าม ภายหลังที่กลับคืนมาที่สถานะ หม้อแปลงไม่อิ่มตัว

ก่อนที่จะกล่าวถึงหลักการทั้ง 2 หลักการพื้นฐานที่อ้างถึงข้างบนจะอธิบายถึงพื้นฐาน บางส่วนขององก์ประกอบเบื้องต้นของวงจรเฟอร์โรเรโซแนนช์ ได้แก่ 1) การจำลองหม้อแปลง การวัดทั่วไปที่ใช้วัดการกระตุ้น คือการวัดความหนาแน่นฟลักซ์ กับ ความแรงสนามแม่เหล็ก (B vs.H) แต่อย่างไรก็ตามการนำข้อมูลมาใช้ประโยชน์สำหรับ การศึกษาระบบไฟฟ้ากำลังส่วนมาก ความต้องการอย่างหนึ่งที่ต้องมีคือการกระตุ้นในเทอมของ V และ I ซึ่งต่อมามีการลด V และ I ลงอย่างมากเหลือแต่ที่ระบบความลี่มูลฐาน โดยวิธีที่น่าสนใจของ การแปลงระหว่างเส้นโค้ง B-H และ V vs. I แสดงเป็นกราฟที่เกิดขึ้นจริงและมีความชัดเจน โดย เริ่มแรกให้ใช้แรงดัน v(t) แล้วลากตามรอยขึ้นไปให้พบและตรงกับระดับฟลักซ์ Φ (t) เมื่อแรงดัน เป็นอนุพันธุ์กับฟลักซ์ (v = df / dt) โดยต้องไม่มีแรงดัน หรือมีออฟเซ็ทฟลักซ์จาก 0 และแรงดันที่ เข้ามาเป็นคลื่นไซน์ที่ไม่มีความถี่อื่น โดยฟลักซ์จะมีมุมเฟสเลื่อน 90° ซ้ำคลื่นไซน์แรงดัน ต่อจากนั้น ก็ลากตามรอยข้ามไปพบให้ตรงกับ B ต่อมา H ซึ่งจะสัมพันธ์กับกระแส สุดท้ายจะ สามารถเขียนเป็นเส้นโค้งกระแสที่ด้านแรงดันเป็น I vs.V โดยความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นโค้ง B-H และ ฮีสเตอริซีส จะทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของกระแสกระตุ้น



<u>ภาพที่ 42</u> เส้นโค้งกระตุ้นเหล็ก DC / AC และ B-H ที่มา: Horak (2004)

จากตัวอย่างข้างบนจะเห็นสิ่งที่เกิดขึ้นมีข้อผิดพลาดซึ่งจะทำการแนะนำต่อไป โดยการ จำลองแกนเหล็กง่ายๆจะสมมูลเป็น X_M ผลของอิมพีแดนช์แกนเหล็กจะมีความซับซ้อน และมี ปริมาณฮาร์มอนิกสูง อย่างไรก็ตาม เพื่อทำให้ง่ายขึ้นกับเนื้อหาจะแทนหม้อแปลงเป็นเส้นโค้ง แรงคัน กับกระแสกระตุ้น โดยประมาณเป็นเส้นโค้งกระตุ้น AC ที่แสดงคังภาพข้างล่าง



<u>ภาพที่ 43</u> เส้นโค้งกระตุ้น AC ของหม้อแปลง $V_{\rm RMS}$ กับ $I_{\rm RMS}$ ที่มา: Horak (2004)

รายละเอียดความสูญเสียบางส่วนของเส้นโค้งกระแสกระตุ้น RMS

 1.1) เนื่องจากกราฟอยู่ในเทอมของปริมาณ RMS และแรงคันเป็นอนุพันธุ์ของฟลักซ์ ก่อนข้างคีกว่าการวัคโดยตรงจากฟลักซ์, ปริมาณฮาร์มอนิก, ความสัมพันธ์ของการเลื่อนเฟส, และ ขนาคความสูญเสียของกระแส กับ แรงคันทันที

 1.2) ผลกระทบความสูญเสียในฮีสเตอริซีส อาจจะต้องพยายามแบ่งให้มีจำนวนน้อย มากเพื่อจะนำไปสู่หม้อแปลงที่จำลองให้มีระดับสูง แต่ถ้าให้ครบสมบูรณ์ การจำลองจะต้องการ รายละเอียคลักษณะอื่นๆของหม้อแปลง เช่น

1.2.1) ผลกระทบของกระแสใหลวนที่โหลค ซึ่งอาจจะยากมากที่จะแยกความ สูญเสียของกระแสใหลวนออกจากการความสูญเสียฮีสเตอริซีส

1.2.2) การใหลเวียนของกระแสตัวเก็บประจุระหว่างขคลวคกับขคลวค และขค ลวคกับดิน

1.2.3) การเชื่อมต่อแม่เหล็กระหว่างเฟส และขาหลายอันของหม้อแปลง, การ อิ่มตัวที่เกิดขึ้นได้ในแต่ละอันของระดับกระแสที่แตกต่าง เนื่องจากกระแสในชุดขดลวดใกล้เคียง

โดยส่วนมากบทความเรื่องการวิเคราะห์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ จะไม่สนใจความจุไฟฟ้า ของหม้อแปลงระหว่างเฟสกับดิน และจากชุดขดลวดกับขดลวด แต่บางกรณีความจุไฟฟ้าที่หม้อ แปลงจะมีความสำคัญในการวิเคราะห์ แต่ตัวอย่างความจุไฟฟ้าในหม้อแปลงนั้นหายาก ซึ่งผู้ผลิต หม้อแปลง เมื่อทดสอบกระแสกระตุ้นจะไม่พยายามที่จะแยกกระแสไหลของตัวเก็บประจุเข้าไปใน ขดลวดที่กระตุ้นจากกระแสกระตุ้นตัวเหนี่ยวนำ โดยแหล่งข้อมูลที่ดีที่สุดคือข้อมูลที่ได้จากการ ทดสอบวัตถุที่ใช้ทำเป็นฉนวนของหม้อแปลง

ตัวอย่างการจำลองของหม้อแปลงหนึ่งเฟสที่รวมความจุไฟฟ้าเข้าไปด้วยดังแสดงใน ภาพข้างล่าง



<u>ภาพที่ 44</u> แบบจำลองหม้อแปลงหนึ่งเฟสที่รวมความจุไฟฟ้า ที่มา: Horak (2004)

2) ความจุไฟฟ้าในสายส่ง โดยบทความบางบทความจะคำนวณลำดับส่วนประกอบของ ความจุไฟฟ้าในสายส่ง แต่อย่างไรก็ตามสิ่งหนึ่งที่ควรจะทราบคือลักษณะการเชื่อมติดของลำดับ ส่วนประกอบความจุไฟฟ้า โดยลำดับบวกของความจุไฟฟ้าแบบขนานในระบบจะเป็นตัวเก็บประจุ ที่สมดุลกันบนเฟสแต่ละอัน โดยลำดับบวกของความจุไฟฟ้าแบบขนานที่โหลดจะรวมความจุไฟฟ้า ระหว่างเฟสกับดิน และเฟสกับเฟส ($X_{c1} = X_{c,LG} + X_{C,LL,WYE-EQ}$) ส่วนอิมพีแดนช์แบบเดลตาระหว่าง เฟสกับเฟส ถ้ามีความสมดุลอย่างสมบูรณ์สามารถแทนเป็นการสมมูลแบบโหลดวาย เมื่อ $X_{c,LN}$ =(1/3) $X_{c,LL}$ และให้นิวทรัลของการสมมูลแบบวายนี้มีศักย์ลงดิน ดังนั้นถ้ากำหนดความจุไฟฟ้า ระหว่างเฟสกับเฟส ในระบบอิมพีแดนช์ที่สมดุล ความต้องการอย่างหนึ่งที่จะปฏิบัติในการคำนวณ คือให้ $X_{c,LL} = 3(X_{c1} - X_{c0})$ โดยในสายเกเบิ้ล $X_{c1} = X_{c0}$ ดังนั้นการคำนวณนี้จะได้ $X_{c,LL} = 0$

สำหรับการประยุกต์ใช้ในงานจริง ความจุไฟฟ้าระหว่างเฟสกับเฟส และเฟสกับคินจะมี ค่าไม่เท่ากันในเฟสแต่ละอัน โดยส่วนประกอบลำคับอิมพีแคนช์จะสมมุติอิมพีแคนช์เฟสเป็น สัคส่วนเท่ากัน เช่น Zan = Zbn = Zcn. ซึ่งในการกำนวณลำคับส่วนประกอบส่วนมาก จะ พบว่าระยะห่างระหว่างตัวนำ และดิน ไม่มีผล เมื่อใช้ RMS- like ดังนั้นจึงสามารถสร้างใหม่โดย ประมาณเฉพาะส่วนของความจุไฟฟ้าระหว่างเฟสและดิน จาก X_{c1} และ X_{c0}



<u>ภาพที่ 45</u> ความจุไฟฟ้าในสายส่ง ที่มา: Horak (2004)

2.1 การวิเคราะห์วงจรเชิงเส้นด้วยความถิ่มูลฐาน มีบทความทางเทคนิคจำนวนมากที่เขียน มานานหลายปี ได้ใช้วงจรเชิงเส้นความถิ่มูลฐานเพื่อวิเคราะห์วงจรเฟอร์โรเรโซแนนซ์ ซึ่งไม่ให้ ข้อมูลครบทั้งหมดของบทความ แต่จะใช้สำหรับเพื่อให้เป็นกรอบแนวคิดที่ใช้ในการทำงาน และ สรุปบางส่วนของจุดสำคัญเท่านั้น บทความจะมีแนวโน้มเข้าสู่หาค่า X_c สูงที่สุดที่สามารถยอมให้ $X_{M,US}$ โดยจะจำกัด V_{Xfmr} และ V_c ที่เจาะจงค่าบางส่วนสูงสุด ถ้าหม้อแปลง X_M ยังคงอยู่ในบริเวณ เชิงเส้น $X_{M,US}$ และมีองค์ประกอบความต้านทานน้อย, แรงดัน V_{Xfmr} และ V_c จะเป็นการคำนวณ อย่างง่ายโดยการใช้ทฤษฎีวงจรเชิงเส้น ในวิธีการเหล่านี้ส่วนใหญ่จะใช้อัตราส่วนน้อยที่สุดสำหรับ X_c / X_M เลือกเป็นแนวทาง โดยทั่วไปแนวทางสำหรับช่วง X_c / X_M น้อยที่สุดจะขึ้นอยู่กับระบบ และ องค์ประกอบของหม้อแปลง โดย Ralph Hopkinson ได้ทำตารางอัตราส่วนแนะนำการเชื่อมต่อของ ขดลวดด้านปฐมภูมิ/ด้านทุติยภูมิ กับ X_c / X_M น้อยที่สุด

การเชื่อมต่อของขคลวด	อัตราส่วน	หมายเหตุ
เคลตา / วายลงคิน	40	หม้อแปลงแบบ 1 เฟส 3 เครื่อง
	30	แกนเหล็กมี 5 ขา
เคลตา/ เคลตา	30	-
วายไม่ลงดิน/ เดลตา	30	-
วาย/ วายลงดินทั้ง 2 ด้าน	0	หม้อแปลงแบบ 1 เฟส 3 เครื่อง
	0.1	หม้อแปลงแบบ 1 เฟส 3 เครื่อง มีสายป้อนเหนือดิน
	1	แกนเหลี้กมี 5 ขา

<u>ิตารางที่ 5</u> การเชื่อมต่อของขดลวดด้านปฐมภูมิ/ด้านทุติยภูมิ กับ $\mathbf{X}_{ ext{C}}/\mathbf{X}_{ ext{M}}$ น้อยที่สุด

ที่มา: Horak (2004)

บทความส่วนใหญ่จะมีส่วนสนับสนุนการวิเคราะห์จากการทคสอบของหม้อแปลง ตามจริงอย่างใดอย่างหนึ่ง หรือการย่อขนาดระบบบนวงจรข่ายเพื่อวิเคราะห์ภาวะชั่วครู่ (TNA) รวมถึง Hopkinson รายงานเหล่านี้โดยทั่วไปจะทำงานโดยการเอาหม้อแปลงตามจริง และมีการ เชื่อมต่อความจุไฟฟ้าหลายแบบ หรือสายเคเบิ้ลที่ยาวและเปิดเฟส โดยทั่วไปจะไม่รายงานรูปคลื่น อย่างจำเพาะเจาะจงที่ได้รับแต่รายงานอย่างง่ายๆถึงยอดสูงที่สุดของแรงคันที่วัดและในกรณีจำนวน มากจะทำให้หม้อแปลงกำลังเข้าไปในสภาวะเฟอร์โรเรโซแนนช์ บนข้อจำกัด X_M / X_c ที่จัดเตรียม ไว้โดยเฝ้าดูเพื่อค้นหาความจริงในการวิเคราะห์วงจรเชิงเส้น แต่ทำให้ขึ้นอยู่กับมันและใช้การ จำลองที่เกี่ยวกับตัวเลขอย่างเล็กน้อย

ก่อนการคำเนินการ ควรจะยอมรับว่าการวิเคราะห์วงจรเชิงเส้นมีข้อจำกัด ซึ่งค้านหนึ่ง ก็จะมีการสนับสนุนที่ได้จากการเปรียบเทียบจากข้อมูลการทดสอบทางภาคสนามโดยใช้พื้นฐาน แนวคิดจากสัญชาตญาณ และให้ปรากฏเป็นผลสำเร็จโดยการใช้เครื่องมือน้อยที่สุด ส่วนค้านหนึ่ง ของวิธีการจะใช้วิธีการที่ง่ายขึ้นมากๆเกินปกติของบริเวณที่ซับซ้อนที่ไม่เป็นเชิงเส้นเป็นจุคทำงาน อีกด้วย ได้มีการเปลี่ยนการออกแบบหม้อแปลงในเรื่องการเชื่อมติดมามากกว่า 10 ปี ตั้งแต่เริ่มการ ทดสอบจนสำเร็จโดยหม้อแปลงสมัยใหม่จะมีความสูญเสียต่ำกว่า และ มีค่าความจุไฟฟ้า สูงกว่า การออกแบบเก่า ย้อนกลับมาที่เส้นโค้งกระตุ้น AC ในภาพที่ 43 เมื่อสมมุติให้ไม่มีเส้นโค้งในแผนภูมิ ของ กระแส และแรงคัน RMS แต่ให้อยู่ในเทอมของกระแส และแรงคันความถิ่มูลฐานถ้าให้มีความ ถูกต้องโดยประมาณ เราสามารถไม่คิดส่วนประกอบความถิ่สูง และความถูกต้องในธรรมชาติของ ความไม่เป็นเชิงเส้นของสิ่งที่เกิดขึ้น โดยประมาณค่าของ X_M ง่ายๆ เพื่อให้จุดV/I บนกราฟ และถ้า หม้อแปลงสามารถจำลองง่ายๆให้เป็น X_M ที่เข้าไปสู่การอิ่มตัว และเมื่อไม่คิดความต้านทานบน ระบบ และรายละเอียดเนื้อหาแทบมองไม่เห็น เช่นความถ้าหลังฟลักซ์ฮีสเตอริซีส, ผลกระทบโหลด ฮีสเตอริซีส, การเชื่อมข้ามเฟสในแถนเหล็ก, การเชื่อมข้ามเฟสผ่านความจุไฟฟ้าภายนอก, และสิ่ง อื่นๆดังนั้นแรงดันที่ตกคร่อมในวงจรอย่างง่ายจะเป็นดังภาพที่ 41

ถ้า X_c มีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับ X_m ค่า I และ V_m จะมีค่าต่ำ V_c จะมีค่าประมาณเท่ากับ E แต่ความยากลำบากจะเกิดขึ้น ถ้า X_c มีค่าต่ำเพียงพอ และหม้อแปลงเข้าไปสู่การอิ่มตัว ดังนั้น X_m จะมีค่าต่ำมาก ซึ่งจะทำให้มีสถานะสลับกัน โดยวงจรสามารถทำงานในขณะที่ I มีค่าสูง V_m มีค่าต่ำ และ V_c สูง โหมดการทำงานที่สลับกันนี้จะผลิตฮาร์มอนิกมาก ซึ่งในเวลานี้จะตกอยู่นอกขอบจาก บริเวณเชิงเส้น และจากการวิเคราะห์ด้วยวงจรเฟสเซอร์ โดยพื้นฐานแนวคิดของเฟอร์ โรเร โซแนนซ์ ที่ได้มาจากการใช้การวิเคราะห์วงจรเชิงเส้นของสถานการณ์ในโหมดการทำงานต่างๆจะอยู่ในภาพ ที่ 46 – 49

ในภาพที่ 46 ค่า X_c จะมีค่ามากกว่า $X_{M,US}$ ในสภาวะนี้ แรงคัน E ที่ใช้ ไม่มีอะไร ผิดปกติถึงแม้ว่าแกนเหล็กจะถูกส่งเข้าไปสู่การอิ่มตัวโดยจะมีจุดทำงาน 1 จุดคือ I_{EXC} เมื่อ ($jX_M - jX_c$)* I = E. สิ่งนี้คือพื้นฐานความปลอดภัยในการออกแบบเพื่อที่จะป้องกันเฟอร์โรเรโซแนนซ์ แต่อย่างไรก็ตามจุดทำงานในบริเวณนี้จะไม่ได้ป้องกันแรงคันเกินที่เกิดขึ้นในวงจรเนื่องจาก L-C ทั้งหมดในวงจรข่ายที่มีอยู่เดิม แต่อย่างไรก็ตามแรงคันที่เพิ่มขึ้นนี้จะถูกจำกัดโดยการเลือกค่า X_c ให้ มีค่าสูง ซึ่งในบทความจำนวนมากจะทำอยู่ในเทอมของ X_c / X_M ที่มีอัตราส่วนสูง ซึ่งจะจำกัดการ ใหลของกระแส ดังนั้นจึงจำกัดแรงคันที่เพิ่มขึ้นด้วย



<u>ภาพที่ 46</u> เส้นโค้ง X_C > X_{M, US} ที่มา: Horak (2004)

ในภาพที่ 46 สามารถที่จะมองกราฟเป็นแบบ 3 มิติได้ ถ้าหากรวมความต้านทานเข้า ไปในวงจรด้วย โดยในภาพที่ 46 กระแสจะนำหน้าหรือถ้าหลังเป็นมุม 90° อย่างใดอย่างหนึ่ง โดย ส่วนประกอบความต้านทานจะต้องการแรงดัน และกระแส ซึ่งจะมีทิศทางเพิ่มขึ้นออกมาจากแนว ระนาบที่กำลังนำหน้า หรือถ้าหลังบนองศาของมุมนั้นๆ

ส่วนในภาพที่ 47 ค่า X_M และ X_C จะมีค่าประมาณเท่ากัน โดยถ้ากระแสขยายเพียงพอ (jX_M – jX_C)* I = E หม้อแปลงจะเข้าใกล้การอิ่มตัว แรงดันตกคร่อม X_C เมื่อเทียบกับดินที่เกิดขึ้นจะ มีค่าเหนือกว่าแรงดันระบบ ปัญหาก็จะเริ่มเกิดขึ้น แต่สภาวะเฟอร์ โรเร โซแนนช์ที่อ้างถึงนี้อาจจะไม่ เกิดขึ้นก็ได้



<u>ภาพที่ 47</u> เส้นโด้ง $X_{C} = X_{M, US}$ ที่มา: Horak (2004) ในภาพที่ 48 ผลของเฟอร์ โรเร โซแนนซ์จะเริ่มออกมาให้เห็น ซึ่งขณะนี้จะมีจุดสามจุด บนเส้นโด้ง เมื่อ ($jX_m - jX_c$)*I = E โดยจุด 2 ที่มองเห็นจะเป็นจุดที่ไม่มีเสถียรภาพจากการมอง ซึ่ง ถ้า E เพิ่มขึ้น กระแสต้องตกลงเพื่อให้ไปถึงจุดการทำงานใหม่ ดังนั้นที่จุด 1 และ 3 จึงเป็นสภาวะ การทำงานที่เสถียรภาพที่เกิดขึ้นได้ และกระแสที่จุด 1 และ 3 จะมีขนาดกลับเฟสกัน 180° ซึ่งกัน และกัน โดยจะมีความแตกต่างในเรื่องของขนาดอย่างมาก ซึ่งจุดที่ 3 นี้จะมีแรงดันเทียบกับดิน ขนาดสูงมาก โดยเมื่อพิจารณาจุดที่ 3 ในสถานการณ์เริ่มแรก แรงดัน E จะลดลงอย่างมาก ตำแหน่งเรโซแนนซ์ ยังคงถูกรักษาไว้ และในขณะที่แรงดันลดลงจะง่ายต่อการย้ายจากจุดทำงานที่ 3ไปทางขวามือใกล้กับจุดตัดของเส้นโค้ง V_c และ V_{MS} แต่จะไม่มีผลต่อการทำงานจากการเปลี่ยน แปลงตลอดเมื่อเกินจุดตัดเข้าไปสู่จุดเริ่มต้น แม้ว่า E จะเข้าใกล้ 0 โดยในที่นี้จะทำให้ง่ายต่อการมอง วงจร เนื่องจากยังขาดองก์ประกอบของการะความด้านทาน



<u>ภาพที่ 48</u> เส้นโค้ง $X_{M,S} < X_C < X_{M,US}$ ที่มา: Horak (2004)

บริเวณการทำงานสุดท้ายที่จะพิจารณาคือการการลดลงอย่างต่อเนื่องของ X_c ที่เกิดขึ้น จนกระทั่งมุมอิมพีแดนช์พบสภาวะของ $\angle \theta_{M} > \angle \theta_{C}$ ซึ่งบางทีในการแทนสภาวะนี้เกิดจากความจุ ไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับตัวเก็บประจุกำลังขนาดใหญ่ ซึ่งยากที่จะสร้าง V_c ดังนั้นแรงดันระบบทั้งหมด จะมาตกคร่อม V_M โดยจะมีหนึ่งจุดตัดเท่านั้นที่เกิดขึ้นที่จุดเริ่มต้นบนเส้น V_c กับ V_M และมีจุด เดียวที่ทำงานดังแสดงในภาพที่ 49



<u>ภาพที่ 49</u> เส้นโค้ง $X_{M,S} > X_{C}$ ที่มา: Horak (2004)

เหตุผลที่สองที่นำภาพที่ 49 มาเพื่อที่จะให้เห็นถึงอิมพีแคนช์ ที่จะส่อให้เห็นการไหล ของกระแสฮาร์มอนิก โดยเฟอร์โรเรโซแนนช์จะก่อให้เกิดระดับการไหลของกระแสฮาร์มอนิกสูง ซึ่งระบบจะแสดงก่า X_c ที่ลดลง โดยจะทำให้ X_{Ms} เพิ่มขึ้นและเป็นการเพิ่มความถี่ฮาร์มอนิก

2.1.1 การนำองค์ประกอบความต้านทานมารวม การจำลองที่ต้องการความละเอียด มากต้องรวมผลกระทบการหน่วงขององค์ประกอบความต้านทานด้วย สำหรับตัวอย่าง เมื่อพิจารณา วงจรข้างล่างเปรียบเทียบกับวงจรที่ผ่านมาในภาพที่ 30 – 34 หรือ 41 เส้นอิมพีแดนซ์จะ ประกอบด้วยความต้านทาน R_L จากโหลดของหม้อแปลงทางด้านทุติยภูมิซึ่งอาจจะมีค่าไม่น้อย ดังนั้น R_{Load,SEC} ที่แสดงจะนำมาอ้างอยู่ในด้านปฐมภูมิ และขนานกับ X_M และโหลดที่ยังคงอยู่ใดๆ ขณะเปิดเฟสวงจรจะแทนโดย R_{Load.Open} ซึ่งจะขนานกับความจุไฟฟ้ากับเฟสถึงดิน

องค์ประกอบความต้านทานที่ไม่ได้ปรับใส่ไว้ในวงจรก่อนหน้าจะต้องเปลี่ยน การวิเคราะห์แรงดันอย่างง่ายด้วย โดยการวิเคราะห์จะต้องการความซับซ้อนของตัวเลขทาง คณิตศาสตร์ และเนื่องจากเป็นมุมมองแบบสามมิติที่นำเข้ามาจากการกระทำของแรงคันและกระแส จึงทำให้เข้าใจธรรมชาติของภาพที่เขียนเป็นความสูญเสียได้ง่าย



<u>ภาพที่ 50</u> วงจรจำลองเฟอร์โรเรโซแนนช์กับองค์ประกอบความต้านทาน ที่มา: Horak (2004)

ความด้านทานจะทำหน้าที่ลดแรงดันที่เพิ่ม ที่ตกคร่อมความเหนี่ยวนำ และ ความจุไฟฟ้า ของ L- C ในวงจรข่าย โดยสายส่งแบบอนุกรม และความต้านทานหม้อแปลงจะลด แรงดันตกคร่อมองก์ประกอบตัวเหนี่ยวนำ และกระแสรอบๆ โหลดความต้านทานที่ขนานกับตัวเก็บ ประจุ หรือหม้อแปลง จะมองเป็น R_{Load} ขนาน กับ X_M หรือ X_C หรือเป็นลำดับของ |X_M | หรือ |X_C การเกิดของวงจรเร โซแนนซ์จะน้อยมาก โดยเป็นที่ยอมรับร่วมกันในรายงานการวิเคราะห์ ถ้าโหลด หม้อแปลงมีเปอร์เซ็นต์ MVA ของหม้อแปลงน้อย เฟอร์โรเร โซแนนซ์จะถูกกำจัด

การวิเคราะห์วงจรเชิงเส้นที่ผ่านมาสามารถที่จะพบได้ในหลายบทความ โดย สามารถใช้เซลตารางของไมโครซอฟเอกเซลล์คำนวนการประมาณการจำลองการกระตุ้น อิมพีแคนช์ที่คล้ายกับที่แสดงในภาพที่ 43 แต่จะทำอยู่ในเทอมของส่วนประกอบความถิ่มูลฐาน ซึ่ง ในเซลตารางคำนวณผู้ใช้จะต้องกำหนดอิมพีแดนช์จากองค์ประกอบในภาพที่อยู่ข้างบน , แรงคัน และกระแสในวงจรบ่ายในช่วงของ I_{Transformer} ที่คำนวณ เซลตารางจะกำหนดแรงคันมูลฐานที่ได้ผล มาจากการออกแบบ โดยผู้ใช้สามารถเปรียบเทียบแรงคันระบบจริงที่เห็น ได้มากกว่าหนึ่ง I_{Transformer} ให้ตรงเท่ากับแรงคันระบบ E เพื่อทำให้เห็นถึงวงจรนั่นสามารถเกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์ได้



<u>ภาพที่ 51</u>การวิเคราะห์วงจรเชิงเส้นด้วยใช้เซลตารางของไมโครซอฟเอกเซลล์ ที่มา: Horak (2004)

2.2 การวิเคราะห์สถานะ X_M คู่ การวิเคราะห์วงจรเชิงเส้นด้วยความถิ่มูลฐานที่ผ่านมาจะ ทำให้เข้าใจแนวคิดลักษณะบางส่วนของเฟอร์โรเรโซแนนช์ แต่ก็ยังขาดข้อมูลหลายอย่างของ รายละเอียดบางส่วนในสิ่งที่เกิดขึ้นระหว่างสภาวะเฟอร์โรเรโซแนนช์ ของความเป็นจริง โดย เมื่อก่อนได้มีการทำความเข้าใจกับรูปร่างในสิ่งที่เกิดขึ้นของเฟอร์โรเรโซแนนช์ แต่ก็มีความลำบาก และน่าสงสัย กับโครงงานการวิเคราะห์วงจรเชิงเส้นที่เข้าไปในบริเวณการอิ่มตัวของหม้อแปลง

สภาวะเฟอร์โรเรโซแนนซ์สามารถจะมองเป็นวงจรที่ดีขึ้นได้โดยมองให้เป็นการ เปลี่ยนกลับไปกลับมาระหว่างการสลับสองสถานะเป็น X_M สองก่าคือ X_{M, S} และX_{M, US} ก่อนข้าง ดีกว่าเป็นการวิเคราะห์วงจรเชิงเส้นด้วยความถิ่มูลฐาน นั่นคือเป็นการประมาณก่านอกช่วงที่รู้ก่า ของสถานะการไม่อิ่มตัวเชิงเส้น กับก่า X_M เดี่ยว โดยในสถานะที่ 1 ตัวเก็บประจุจะประจุแรงดัน ซึ่ง จะมีผลต่อแรงดันตกคร่อมหม้อแปลง โดยแรงดันตัวเก็บประจุจะเพิ่มแรงดันที่มีอยู่ในระบบ และ อิมพีแคนซ์ X_M ของหม้อแปลงที่ไม่อิ่มตัวจะมีก่าสูงมากพอที่จะพิจารณาเป็นการเปิดวงจรที่จะประจุ แรงดันที่เหลือแบบอนุกรมกับความจุไฟฟ้า โดยตัวเ ก็บประจุจะให้ผลของก่ากระแสตรง และผล สุดท้ายจะทำให้หม้อแปลงอิ่มตัว ซึ่งในเวลานั้นหม้อแปลงจะถูกทำให้อิ่มตัวภายใต้รูปคลื่นแรงดันที่ ให้และจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ใต้รูปแบบของคลื่นแรงดัน ส่วนในสถานะที่ 2 หม้อแปลงจะไปถึงการ อิ่มตัว ตัวเก็บประจุจะมีการปล่อยประจุ และต่อมาจะมีการประจุใหม่ในสถานะแรงดันตรงกันข้าม เมื่อเวลาหม้อแปลงกลับไปสู่สถานะที่ 1

ก่อนที่จะข้ามไปที่ตัวอย่างสภาวะเฟอร์โรเรโซแนนช์จะทบทวนสมการสั้นๆที่ เกี่ยวข้องกับกระแส และแรงคันใน ความจุไฟฟ้าบริสุทธิ์ที่เตรียมไว้ข้างล่าง โดยจะเป็นสมการที่ สัมพันธ์กับ ฟลักช์, กระแส, และแรงคัน คือ

$$\mathbf{v}(t) = \mathbf{d}/\mathbf{dt} \ \mathbf{\Phi}(t) = \mathbf{L} \ \mathbf{d}/\mathbf{dt} \ \mathbf{i}(t)$$
(5)

$$\boldsymbol{\varphi}(t) = \int \mathbf{v}(t) \, dt + \boldsymbol{\varphi}_0 = \mathrm{Li}(t) \tag{6}$$

$$i(t) = 1/L \int v(t) dt + i_0$$
 (7)

เครื่องหมายลบ อาจจะเกิดขึ้นในฟอร์มบางฟอร์มของสมการข้างบนเมื่อต้องการ ชี้ให้เห็นถึงกระแสเหนี่ยวนำที่จะต้านการสะสมของฟลักช์ตามกฎของ Lenz .ซึ่งจะคล้ายกับการ สะสมของสมการความจุไฟฟ้าบริสุทธิ์

$$i(t) = d/dt Qc(t) = C d/dt v(t)$$
(8)

Qc (t) =
$$\int i (t) dt + Q_{C,0} = Cv (t)$$
 (9)

$$V(t) = 1/C \int i(t) dt + V_0$$
 (10)

เมื่อหม้อแปลงอิ่มตัวแรงคันที่เหลือจะปล่อยประจุ และจะสร้างกระแสความถี่สูง รูปคลื่นของการปล่อยประจุจะขึ้นอยู่กับความถี่เรโซแนนช์ของวงจรระหว่างกระบวนการการปล่อย ประจุ

$$\mathbf{\Theta} = 2\pi \mathbf{f} \tag{11}$$

$$X_{L} = \Theta L$$
(12)

$$XC = 1/\Theta C$$
(13)

$$f_{\text{resonance},(XL=XC)} = 1/2\pi \sqrt{(LC)} = 60 \sqrt{((X_{C,60 \text{ Hz}})/(X_{L,60 \text{ Hz}}))}$$
(14)

เมื่อผู้ผลิตออกแบบหม้อแปลงจะอินทิเกรตแรงคันที่มากกว่า 1/2 ไซเคิล ในสมการที่ 6 กับ ฟลักช์เริ่มต้นที่ 0 และมุมบางส่วนของแรงคันเกินต่อเนื่องที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ โดยจะกำหนด ยอดฟลักช์ที่แกนเหล็กสนับสนุน และผู้ออกแบบจะทำการเลือกเหล็ก และกำหนดลักษณะ B-H โดยใช้ B ที่กำลังเข้าใกล้การอิ่มตัวซึ่งแกนเหล็กจำเป็นต้องมากพอเพื่อต้องการให้ได้ฟลักช์ตามที่ กำหนด โดยสมการดังต่อไปนี้จะเป็นตัวกำหนดความต้องการกระแสกระตุ้นของหม้อแปลง

$$\Phi = N_{\text{Turns}} * B * \text{Area}_{\text{Cross section}}$$
(15)

$$B = \mu H (\mu \text{ at stell peak flux})$$
(16)

$$H = I_{EXC} * N T_{urms} / \text{ core length}$$
(17)

เพื่อให้ผู้ผลิตหม้อแปลงมีตัวแปรที่ใช้ ในการออกแบบหม้อแปลงน้อย สิ่งหนึ่งที่ ทราบในการออกแบบหม้อแปลงที่เห็นในสมการ 16 -17 จะใช้เป็นตัวตัดสินใจ คือแรงดันที่เป็น สาเหตุให้เกิดการอิ่มตัว โดยในสมการที่ 6 ฟลักช์ที่เกิดขึ้นจะมาจากการอินทิเกรตแรงดัน ซึ่งหม้อ แปลงจะถูกออกแบบให้รับแรงดันคลื่นไซน์ปกติ สำหรับคลื่นแรงดันใดๆที่ใช้กับหม้อแปลง รวมทั้งการสมมุติการเริ่มต้นของฟลักช์ ϕ_0 ซึ่งสามารถที่จะกำหนดได้ ถ้าคลื่นสามารถทำให้แกน เหล็กเข้าไปสู่การอิ่มตัวโดยการเทียบกับพื้นที่ใต้เส้นโค้งของแรงดันคลื่นไซน์ของพิกัดหม้อแปลง สิ่งนี้สามารถทำให้มองเห็นเป็นการประยุกต์อย่างง่ายสำหรับการสังเกตุการอิ่มตัว เมื่อระดับการ อิ่มตัวนี้ถูกเข้าถึง เพียงชั่วครู่ก็อาจจะมีความเสี่ยงต่อการเริ่มด้นสภาวะเฟอร์โรเรโซแนนซ์ และ ดำเนินต่อไปไม่จำกัด

โดยรายละเอียดของสิ่งที่เกิดขึ้นในวงจรสถานะกู่ $X_{Microresonant}$ จะสามารถทำให้เข้าใจ ใด้โดยการทบทวนตัวอย่างฟอร์มรูปคลื่นสักเล็กน้อย โดยสมมุติวงจรที่แสดงในภาพที่ 41 และ สมมุติฟลักซ์อย่างง่ายที่สัมพันธ์กับกระแสกระคุ้นที่เกิดขึ้นในภาพที่ 46 ลากตามรอยแรงคันระบบ e(t), แรงคันตัวเก็บประจุ $V_c(t)$, ฟลักซ์ $\phi(t)$, และกระแส i(t) ที่แสดงในภาพที่ 52 โดยสมมุติให้ที่ เวลา t_0 ไม่มีฟลักซ์ในหม้อแปลง และก่อนเวลา t_1 นั้น X_M มีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับ X_c ซึ่งแรงคัน ระบบทั้งหมดจะตกคร่อมหม้อแปลง และก่อนเวลา t_1 นั้น X_M มีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับ X_c ซึ่งแรงคัน ระบบทั้งหมดจะตกคร่อมหม้อแปลง และก่อนเวลา t_1 นั้น X_M มีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับ X_c ซึ่งแรงคัน ถึงที่เวลา t1 หม้อแปลงจะเข้าไปสู่การอิ่มตัว ที่จุดนี้กระแสกระตุ้น และฟลักซ์หม้อแปลงเพิ่มขึ้นจนกระทั่ง ถึงที่เวลา t1 หม้อแปลงจะเข้าไปสู่การอิ่มตัว ที่จุดนี้กระแสกระตุ้นจะก่อนข้างมาก ทำให้ X_M มีค่า น้อยลง ดังนั้นตัวเก็บประจุจะเริ่มประจุเร็วขึ้น ซึ่งที่เวลาระหว่างตรงกลาง t1 และ t2 แรงคันตัวเก็บ ประจุจะไปถึงแรงคันระบบเนื่องจากในตอนนี้แรงคันตกคร่อมหม้อแปลงมีค่าเป็น 0 โวลต์ แต่ความ เหนี่ยวนำรั่วในสายส่ง และหม้อแปลงจะเป็นตัวบังกับกระแสให้ดำเนินค่อไปแล้วจะลดลงที่ละน้อย จนกระทั่งถึงเวลา t_2 เมื่อกระแสมีค่าต่ำลงเพียงพอจะทำให้หม้อแปลงออกมาจากการกระคุ้น ดังนั้น กระแสแรกจะถูกสร้างเป็นรูปร่างเดือยแหลม และอาจเกิดขึ้นได้ที่เวลา t_2 ของแรงคันตัวเก็บประจุ ในตัวอย่างนี้จะมีค่ายอดแรงคันเท่ากับแรงดันระบบ 0.75 เท่า

เมื่อหม้อแปลงเข้าไปสู่การอิ่มตัว วงจร L-C-R ที่อยู่ในระบบจะมีผลกระทบอย่างมาก บนรูปคลื่นเฟอร์ โรเร โซแนนซ์ เมื่อคลื่นไซน์ลดลงครึ่งหนึ่งร่วมกับการปล่อยประจุ จะทำให้เกิด การแกว่งอย่างมากต่อมา และจะเกิดการประจุกวามจุไฟฟ้าขึ้นใหม่ ซึ่งสามารถเห็นได้จากกวาม แตกต่างของรูปคลื่นที่ส่งผลออกมา โดยถ้าความถี่เร โซแนนซ์ (f_{Resonance})เป็นสภาวะที่มีการอิ่มตัวต่ำ มาก จะทำให้การปล่อยกวามจุไฟฟ้าเป็นไปอย่างช้า เปรียบเทียบกับรูปคลื่นที่เหมือนกัน ถ้า กวามถี่เร โซแนนซ์เป็นสภาวะที่มีการอิ่มตัวสูงมากจะทำให้การปล่อยความจุไฟฟ้าเป็นไปอย่าง รวดเร็ว และถ้าความต้านทานมีค่าสูงมากจะ ไปเหนี่ยวรั้งพลังงานของตัวเก็บประจุในการ เปลี่ยนแปลงแต่ละครั้งทีละน้อย ซึ่งจะเป็นการหน่วงเร โซแนนช์

ในครึ่งรอบถัคไป แรงดันตกคร่อมหม้อแปลงจะไม่เท่ากับ e (t) แต่จะเป็น e(t) + $V_c(t)$ ดังนั้น กระแสกระตุ้น และ ฟลักซ์หม้อแปลงจะถูกสร้างที่อัตราสูงมาก แต่กระแสกระตุ้นจะ ตรงกันข้ามทั้งหมด โดยที่เวลา t, หม้อแปลงจะเข้าไปสู่การอิ่มตัวอีกครั้งกับฟลักซ์ในทิศทาง ตรงกันข้ามเมื่อเปรียบเทียบกับเวลา t, และเนื่องจากแรงดันตกคร่อมหม้อแปลงประกอบด้วยแรงดัน ตัวเก็บประจุซึ่งกระแสที่เกิดขึ้นจะแหลมและใหญ่มากกว่าที่เวลา t1 โดยการประจุ, การปล่อย และ การอัดประจุใหม่จะดำเนินต่อเนื่องอีกครั้งหนึ่ง ต่อมาเมื่อมาถึงที่เวลา t_4 ซึ่งเป็นจุดที่น่าสนใจ แรงดันตัวเก็บประจุ V_c (t) จะถูกดึงให้มามีเฟสเดียวกับ e (t) ซึ่งเป็นสภาวะที่น่าสนใจมาก ถ้า แรงดันระบบถูกลดที่จุดนี้ แรงดันตกคร่อมหม้อแปลงจะเพิ่มขึ้น เมื่อ V_{xfmr} (t) = e(t) - V_c (t) และ เมื่อทำการสำรวจรูปกลิ่นที่เห็น สภาวะเรโซแนนซ์สามารถดำเนินต่อไปอย่างไม่มีกำหนด ถึงแม้ว่า e (t) ถูกลดให้มีก่าขนาดที่ต่ำลงจนไม่สามารถทำให้หม้อแปลงเข้าไปในสภาวะเริ่มต้นการอิ่มตัว



<u>ภาพที่ 52</u> แรงดันตัวเก็บประจุเมื่อเกิดสภาวะเฟอร์ โรเร โซแนนช์ ที่มา: Horak (2004)

จากตัวอย่างก่อนหน้านี้ไม่ได้แสดงก่า V_{xtm} (t) แต่สามารถดูแรงดัน V_{xtm} (t) ได้โดย ลบ V_c(t) ออกจาก e(t) ส่วนตัวอย่างถัดไปจะแสดงกรณีต่างๆของ V_{xtm} (t) ในสภาวะสถานะอยู่ ตัวและแสดงแรงดันฮาร์มอนิกย่อยที่ถูกทำให้เป็นรูปร่างขึ้นอย่างไร โดยการอินทิเกรตแรงดันตก กร่อมหม้อแปลงที่กำหนดขึ้นเมื่อแกนเหล็กเข้าไปสู่การอิ่มตัว ซึ่งเป็นไปได้ที่เวลานี้จะมีความถึ่ ระบบเกินกว่าหนึ่งไซเดิล โดยฮีสเตอริซีสจะมีบทบาทเป็นสาเหตุให้เกิดการสั่นของฮาร์มอนิกย่อย ถ้าเวลานี้เกินกว่าหนึ่งไซเดิล วงจรเฟอร์โรเรโซแนนซ์จะสั่นที่ความถิ่มูลฐาน และให้ความถิ่ระบบ ย่อยอีกหลายอัน โดยภาพข้างล่างจะแสดงแรงดันตกคร่อมหม้อแปลงเป็นสองกรณีที่เป็นสัดส่วนรับ กันของหม้อแปลงที่กำลังเข้าไปสู่การอิ่มตัวที่ประมาณจุดเดียวกันในรูปกลื่นแรงดันบนแต่ละไซเกิล



<u>ภาพที่ 53</u> แรงคันหม้อแปลงเมื่อเกิคสภาวะเฟอร์ โรเร โซแนนช์ ที่มา: Horak (2004)

ชุคความด้านทานขคลวค, ความสูญเสียของกระแสไหลวน และ ความสูญเสีย ในฮีสเตอริซีส ของหม้อแปลงที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นตัวหน่วงให้ออกจากการสั่นของ LC ซึ่งผลกระทบ นี้ถูกเขียนลงในบทความหลายบทความ โดยจะมีเหตุผลสนับสนุนถึงปัจจัยอันตรายในการกำหนด วิธีการป้องกันเฟอร์โรเรโซแนนซ์ ซึ่งสามารถดูได้ในหัวข้อการป้องกันเฟอร์โรเรโซแนนซ์

เฟอร์ โรเร โซแนนซ์จะเกี่ยวข้องกับค่าคงที่เวลาหลายค่าจากหม้อแปลงที่กำลังเข้าไปสู่ การอิ่มตัวที่จุดต่างๆบนรูปแบบคลื่นแรงดันที่ใช้ ความแตกต่างของค่าเวลาคงที่การปล่อยความจุ ไฟฟ้าและ ผลกระทบของฮีสเตอริซีส จะยอมให้กระแสบางส่วนใหลกลับโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลง ใน ฟลักซ์แกนเหล็ก ซึ่งส่วนประกอบเหล่านี้จะสร้างรูปคลื่นที่ไม่เป็นระเบียบมากดังแสดงใน ตัวอย่าง และจะมีทั้งส่วนประกอบความถี่สูง และเหตุการณ์แบบสุ่ม หรือบางทีอาจจะมีการ เคลื่อนย้ายส่วนประกอบแบบสุ่มระหว่างเฟสเดียวกัน หรือต่างเฟสกัน 180° ออกมาจากเฟสที่เห็น ในภาพที่ 52และค่ายอคแรงดันอาจจะเข้าใกล้ค่ายอคแรงดันระบบ หรืออาจจะมีค่าถึง 2 - 4 เท่าของ แรงดันระบบ ซึ่งโดยทั่วไปอย่างน้อยที่สุดบางส่วนอาจมองเป็นรูปคลื่นที่ไม่เป็นระเบียบ



<u>ภาพที่ 54</u> แรงคันที่ไม่คงที่ของเฟอร์โรเรโซแนนช์ ที่มา: Horak (2004)

3. การแบ่งหมวดหมู่ของโหมดเฟอร์โรเรโซแนนช์

จากประสบการณ์ในรูปคลื่นที่ปรากฏบนระบบไฟฟ้ากำลัง และจากการทดลองในการลด แบบจำลองระบบ ร่วมกับการจำลองทางตัวเลข ทำให้สามารถแบ่งหมวดหมู่ของสถานะเฟอร์โรเร โซแนนซ์ได้เป็นสี่ชนิดที่แตกต่างกัน

การแบ่งหมวดหมู่นี้จะแบ่งให้ตรงกับสถานะที่ไม่เปลี่ยนแปลง นั่นคือ แต่ก่อนจะแบ่งใน สถานะภาวะชั่วครู่ตลอด ซึ่งมีความยากสำหรับวงจรเฟอร์โรเรโซแนนช์ ที่จะแยกสถานะภาวะชั่วครู่ ปกติออกจากสถานะเฟอร์โรเรโซแนนช์ชั่วครู่ แต่อย่างไรก็ตาม สิ่งนี้ไม่ได้หมายความว่า ปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนช์ชั่วครู่จะไม่แสดงความเสี่ยงต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า โดยอันตรายจาก แรงดันเกินชั่วครู่สามารถเกิดขึ้นหลายช่วงคาบเวลาของระบบหลังจากเกิดเหตุการณ์ขึ้น เช่นการจ่าย หม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด และจะคงอยู่ในระบบไฟฟ้ากำลังหลายไซเคิล

ชนิดความแตกต่างของเฟอร์โรเรโซแนนช์สามารถแบ่งได้เป็น 4 โหมดคือ

- 1) โหมดมูลฐาน (fundamental mode)
- 2) โหมดฮาร์มอนิกย่อย (subharmonic mode)
- 3) โหมดกาบเวลาแบบกรึ่ง (quasi-periodic mode)
- 4) โหมดใม่มีระเบียบ (chaotic mode)

การจำแนกชนิดของเฟอร์ โรเร โซแนนช์สามารถจำแนกได้ดังนี้

1) โดยสเปกตรัมของกระแส และแรงคันเป็นสัญญาณอันใดอันหนึ่ง

 2) โดยรูปภาพสโตรโบสโคบิค(stroboscobic) ที่ได้จากการวัดค่ากระแส I และ แรงดัน V ในจุดที่จ่ายของระบบ โดยเขียนในแนวระนาบ V กับ ค่า I อย่างฉับพลันที่แยกออกมาทันทีจาก คาบเวลาของระบบ

3.1 โหมคมูลฐาน แรงคันและกระแสจะมีเวลาเป็นกาบเวลา T เท่ากับกาบเวลาของระบบ ซึ่งสามารถบรรจุอัตราการเปลี่ยนแปลงของฮาร์มอนิก โดยสัญญาณสเปกตรัมจะเป็นสเปกตรัมที่ไม่ ต่อเนื่องกันเกิดขึ้นจากกวามถี่มูลฐาน f₀ ของระบบไฟฟ้ากำลัง และของฮาร์มอนิก (2f₀, 3f₀ . . .) ส่วนรูปภาพสโตรโบสโกพิกจะถูกลดให้จุดเกลื่อนไกลออกไปจากจุดที่ใช้แทนสถานะปกติ ดังภาพ ที่ 55



<u>ภาพที่ 55</u> ลักษณะของเฟอร์โรเรโซแนนช์ชนิคโหมคมูลฐาน ที่มา: Ferracci (1998)

3.2 โหมดฮาร์มอนิกย่อย จะมีสัญญาณเวลาเป็นคาบเวลา nT คือเป็นผลคูณของคาบเวลา กับแหล่งกำเนิด สถานะนี้จะทำให้รู้ว่าเป็น n ฮาร์มอนิกย่อย หรือ 1/n ฮาร์มอนิก โดยสถานะของ ฮาร์มอนิกย่อย เฟอร์โรเรโซแนนช์ตามปกติจะมีลำดับเป็นเลขกี่ และมีสเปกตรัมแสดงความถี่มูล ฐานเท่ากับ f₀ / n (เมื่อ f₀ เป็นความถี่แหล่งกำเนิด และ n เป็นจำนวนเต็ม) และของฮาร์มอนิก (ความถี่ f₀ จะเป็นส่วนหนึ่งของสเปกตรัม) ส่วนการเขียนสโตรโบสโกพิกจะแสดงเป็นจำนวน n จุด ดังภาพที่ 56



<u>ภาพที่ 56</u> ลักษณะของเฟอร์โรเรโซแนนช์ชนิดโหมดฮาร์มอนิกย่อย ที่มา: Ferracci (1998)

3.3 โหมดคาบเวลาแบบครึ่ง โหมดนี้เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าคาบเวลาไม่แท้ (pseudo-periodic) คือจะไม่เป็นเวลาที่แน่นอน สเปคตรัมจะเป็นสเปคตรัมที่ไม่ต่อเนื่องกันซึ่งความถี่จะถูก แสดงในรูปแบบของ nf₁ + mf₂ (เมื่อ n และ m จำนวนเต็ม และ f₁ / f₂ เป็นจำนวนเลขจริงที่ไม่ลงตัว) ส่วนรูปภาพสโตร โบสโคพิค จะแสดงเป็นเส้นโค้งแบบปิด ดังรูปภาพที่ 57



<u>ภาพที่ 57</u> ลักษณะของเฟอร์โรเรโซแนนช์ชนิคโหมคคาบเวลาแบบครึ่ง ที่มา: Ferracci (1998)

3.4 โหมคไม่มีระเบียบ จะมีสเปคตรัมแบบต่อเนื่อง นั่นคือแถบสเปคตรัมจะไม่สามารถ แยกความถี่ใดๆ ได้ ส่วนรูปภาพ สโตรโบสโคพิก ที่เกิดขึ้นจะแสดงเป็นจุดที่แยกออกมาเต็มพื้นที่ อาศัยอยู่ในแนวระนาบ V กับ I ดังภาพที่ 58



<u>ภาพที่ 58</u> ลักษณะของเฟอร์โรเรโซแนนช์ชนิคโหมคไม่มีระเบียบ ที่มา: Ferracci (1998)

สรุปเฟอร์ โรเร โซแนนช์

- 1) เฟอร์ โรเร โซแนนช์คือปรากฏการณ์ที่ซับซ้อนจะมีหลายสถานะที่จ่ายให้วงจร
- 2) การปรากฏของสถานะในโหมดต่างๆจะมีความไวมากต่อค่าตัวแปรระบบ
- 3) การปรากฏของสถานะ โหมดไม่มีระเบียบจะมีความไวมากต่อสภาวะเริ่มต้น

 การเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยในก่าตัวแปรระบบ หรือภาวะชั่วกรู่ อาจจะเป็นสาเหตุให้ เกิดการกระ โดดข้ามทันทีระหว่างกวามแตกต่างของสถานะที่ไม่เปลี่ยนแปลง และสถานะเริ่มต้น เป็นหนึ่งในสี่ชนิดของเฟอร์ โรเร โซแนนช์ โดยโหมดส่วนมากที่พบปกติจะเป็นโหมดมูลฐาน และ โหมดฮาร์มอนิกย่อย

5) ฮาร์มอนิกในอัตราที่ผิดปกติของแรงคันเกิน หรือ กระแส อันใดอันหนึ่งที่มีการสั่นคงที่ หรือเป็นภาวะชั่วครู่ บ่อยครั้งจะมีสาเหตุมาจากเฟอร์โรเรโซแนนช์ และจะส่งผลแสดงความเสี่ยงต่อ อุปกรณ์ไฟฟ้าบ่อยครั้ง

 สถานะเฟอร์ โรเร โซแนนช์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงจะมีความต่อเนื่องได้จากพลังงานที่ สนับสนุนโดยแรงคันในระบบไฟฟ้ากำลัง
<u>โปรแกรมการจำลองภาวะชั่วครู่</u>

โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองปรากฏการณ์ภาวะชั่วครู่ทางแม่เหล็กไฟฟ้ารวมทั้งธรรมชาติ ทางกล ในปัจจุบันมีมากมายหลายโปรแกรม ATP/EMTP และ PSCAD / EMTDC เป็นโปรแกรม หนึ่งที่สามารถเลียนแบบได้ เนื่องจากทั้ง 2 โปรแกรมมีอุปกรณ์ที่ใช้สนับสนุนแบบจำลองในระบบ ไฟฟ้ากำลังที่ซับซ้อน และระบบควบคุมได้ตามต้องการ โดยมีความสามารถในการจำลอง กรอบคลุมอย่างมีประสิทธิภาพ และมีลักษณะเฉพาะสำคัญในกระบวนการคำนวณของภาวะชั่วครู่ จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการศึกษาและวิเคราะห์แรงดันเกินเนื่องจากการเปิด–ปิด สวิตช์ ในสายป้อน

1. อัลเตอร์เนทีฟทรานเซียนต์โปรแกรม (ATP/ EMTP Program)

ATP คือระบบโปรแกรมสากลสำหรับการจำลองทางคิจิตอลของปรากฎการณ์ภาวะชั่วครู่ ทางแม่เหล็กไฟฟ้ารวมทั้งธรรมชาติทางกล โดยโปรแกรมคิจิตอลนี้สามารถเลียนแบบระบบวงจร ข่ายที่ซับซ้อน และระบบควบคุมของโครงสร้างได้ตามต้องการ โดยมีความสามารถในการจำลอง ครอบคลุมอย่างมีประสิทธิภาพ และมีลักษณะเฉพาะสำคัญในกระบวนการคำนวณของภาวะชั่วครู่

ATP ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องผ่านการช่วยเหลือระหว่างประเทศโดยดอกเตอร์สก็อต เมเยอร์ (Dr. W. Scott Meyer) และ ดอกเตอร์ซู หวย หลิว (Dr. Tsu- huei Liu) ร่วมเป็นประธาน ในกลุ่ม ผู้ใช้ EMTP ในแคนาดาและสหรัฐอเมริกา โดย ATP เกิดขึ้นในตอนเช้าของปี ค.ศ.1984 เมื่อดอก เตอร์ เมเยอร์ และดอกเตอร์หลิว ไม่เห็นด้วยในความคิดเห็นที่จะให้ ATP เป็นโปรแกรมในเชิงธุรกิจ ทางการค้า ของ โบโนวิลเพาเวอร์แอดมินิสเตรชัน (Bonneville Power Administration EMTP: BPA) โดยเดอะอีเอ็มทีพีดีวีลอปเมนท์โดออดิเนชันกรุ๊ป (the EMTP Development Coordination Group: DCG) และเดอะ อิเล็คตริคเพาเวอร์รีเซิร์ชอินสะทิทิว (the Electric Power Research Institute: EPRI) จึงทำให้ ดอกเตอร์หลิว ลาออกจากการเป็นประธาน DCG และ ดอกเตอร์ เมเยอร์ ใช้เวลาส่วนตัว เริ่มสร้างโปรแกรมใหม่จากการสำเนาข้อมูลจาก BPA EMTP ที่อยู่ในเทอม สาธารณะ ด้วยความต้องการในการพัฒนา ATP รวมทั้งความจริงใจในการจัดสรร และไม่เข้าร่วม ในเชิงพาณิชย์ ของ EMTP แต่ ATP ก็ไม่ได้เป็นโปรแกรมที่ให้ใช้งานทั่วไปจะต้องได้รับการขอ อนุญาตอย่างถูกต้องก่อนที่จะได้รับโปรแกรม ATP 1.1 หลักการทำงาน

 1.1.1 ใช้หลักการพื้นฐานการอินทริเกรทแบบสี่เหลี่ยมคางหมู(Trapezoidal rule of integration) เพื่อหาคำตอบในสมการดิพเฟอเรลเชียล (differential) ของ ส่วนประกอบระบบใน เทอมเวลา

 1.1.2 สามารถกำหนดสภาวะเริ่มต้นที่ไม่เป็นศูนย์อย่างใดอย่างหนึ่งโดยอัตโนมัติใน สถานะคงตัว และ การแก้ปัญหาเฟสเซอร์ โดยสามารถเข้าถึงผู้ใช้ในส่วนประกอบอย่างง่าย

1.1.3 มีความสามารถในการติดต่อชิ้นส่วนของโปรแกรมการวิเคราะห์ภาวะชั่วครู่ของ ระบบควบคุม (Transient Analysis of Control Systems: TACS) และ ภาษาการจำลอง ทำให้ สามารถจำลองระบบควบคุม และส่วนประกอบในลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น เช่น การอาร์ค และโค โรนา

 1.1.4 ยอมรับการรบกวนแบบสมมาตร และ ไม่สมมาตร ของความผิดพร่อง, คลื่น ฟ้าผ่า, การสวิตชิ่งแบบต่างๆรวมถึงการเปลี่ยนแปลงของส่วนที่ทำหน้าที่ปิดเปิด

1.1.5 คำนวณการตอบสนองความถี่ของเฟสเซอร์ระบบวงจรข่าย โดยใช้ลักษณะการ ตรวจสอบความถื่อย่างละเอียด

1.1.6 การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในเทอมความถี่โดยการใช้การตรวจสอบความถี่ฮาร์มอ
นิกอย่างละเอียด โดยวิธีการป้อนกระแสฮาร์มอนิก

1.1.7 สามารถเลียนแบบระบบพลวัตโดยการใช้ TACS และแบบจำลองระบบ ควบคุมที่จำลองโดยปราศจากวงจรข่ายไฟฟ้าใดๆ

1.2 ส่วนประกอบ

1.2.1 การเชื่อมต่อ และ ไม่เชื่อมต่อแบบเชิงเส้นของส่วนประกอบ R, L, C แบบเป็น ก้อน

1.2.2 สายส่ง และสายเคเบิ้ล ที่กระจาย ของตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับความถึ่

1.2.3 ความด้านทาน และความเหนี่ยวนำ ที่ไม่เป็นเชิงเส้น, ฮิสเตอร์รีติค ตัวเหนี่ยวนำ, ตัวด้านทานที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา, อุปกรณ์ TACS หรือ แบบจำลองที่ใช้ควบคุมความด้านทาน

 1.2.4 ส่วนประกอบที่ไม่เป็นเชิงเส้น: หม้อแปลงไฟฟ้า รวมถึงการทำให้อิ่มตัว และฮิ สเตอร์รีซิส, เครื่องล่อฟ้า (แบบไม่มีช่องว่าง และแบบมีช่องว่าง), การอาร์ค 1.2.5 สวิตช์ปกติ, สวิตช์ที่ ขึ้นอยู่กับ เวลา, สวิตช์ที่ขึ้นอยู่กับแรงคัน และ สวิตช์สถิติที่
ใช้ในการศึกษามอนติการ์ โล(Monte - Carlo)

1.2.6 ส่วนที่ทำหน้าที่ปิดเปิด (ไดโอด, ไทริสเตอร์, ไตรแอก) และอุปกรณ์ TACS หรือ แบบจำลองที่ใช้กวบคุมสวิตช์.

 1.2.7 การวิเคราะห์แหล่งกำเนิด: แบบขั้น (step), แบบลาด (ramp), แบบรูปคลื่นไซน์ นูซอยดอล(sinusoidal), แบบเอคโปเนนเซียล (exponential surge functions) และ อุปกรณ์ TACS หรือกำหนดแบบจำลองแหล่งกำเนิด

1.2.8 การหมุนของเครื่องกล: เครื่องกลซิงโครนัสแบบ 3 เฟส และแบบจำลอง เครื่องกลที่เป็นสากล (universal machine model)

1.2.9 ผู้ใช้สามารถกำหนดส่วนประกอบทางไฟฟ้ารวมถึงการทำปฏิกิริยากันของ แบบจำลอง

1.3 การรวมกันของชิ้นส่วนการจำลอง

แบบจำลองใน ATP มีจุดประสงค์ทั่วไปเพื่อการสนับสนุนภาษาคำอธิบายโดย ครอบคลุมเตรียมเครื่องมือการจำลองสำหรับการแทนวงจร และการศึกษาของระบบในเทอมตัว แปรเวลา

 1.3.1 คำอริบายของแบบจำลองแต่ละอันสามารถใช้ในรูปแบบอย่างอิสระ, คำค้นที่ใช้ หาประโยคของเนื้อข้อความภายในซึ่งเป็นการหาเอกสารด้วยตัวเองอย่างมาก

 1.3.2 แบบจำลอง และส่วนประกอบวงจรใน ATP ยอมให้ผู้ใช้สามารถกำหนด คำอธิบายควบคุมตามต้องการ, ภายใต้เงื่อนใจการติดต่ออย่างง่ายสำหรับการเชื่อมต่อโปรแกรมอื่น หรือจำลองถึง ATP

1.3.3 จุดประสงค์ทั่วไปเพื่อเป็นเครื่องมือที่สามารถควบคุมคอมพิวเตอร์, แบบจำลอง สามารถใช้สำหรับขบวนการจำลองผลลัพธ์ในเทอมความถี่ หรือในเทอมเวลาอย่างใดอย่างหนึ่ง

TACS คือชิ้นส่วนการจำลองสำหรับการวิเคราะห์ในเทอมเวลาของระบบควบคุม ถูก พัฒนามาจากการจำลองของชุดควบคุมในการเปลี่ยนแรงดันของระบบส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง (High Voltage Direct Current: HVDC) สำหรับ TACS จะใช้การแทนเป็นแผนภาพบล็อคใน ระบบควบคุม โดย TACS สามารถใช้กับการจำลองดังต่อไปนี้

- ก. ชุดควบคุมในการเปลี่ยนแรงคันของ HVDC (HVDC converter controls)
- ง. ระบบที่ถูกกระตุ้นจากเครื่องกลซิงโครนัส
- ค. อิเลคโทรนิคกำลัง และตัวขับ
- ง. การอาร์คทางใฟฟ้า (เบรกเกอร์ และการอาร์คของความผิดพร่อง)

ส่วนติดต่อระหว่างวงจรข่ายไฟฟ้า และ TACS จะถูกสร้างขึ้น โดยการแลกเปลี่ยนเป็น สัญญาณเช่นเดียวกันกับแรงคันปม (node voltage), สวิตช์กระแส, สวิตช์สถานะ, ความด้านทานที่ เปลี่ยนแปลงตามเวลา (time- varying resistance), แหล่งกำเนิดแรงคัน และกระแส



<u>ภาพที่ 59</u> โครงสร้างของโปรแกรม ATP/EMTP ที่มา: http://www.emtp.org/about.html

1.4 ส่วนสนับสนุนงาน

1.4.1 การคำนวณตัวแปรไฟฟ้าของสายส่งเหนือดิน และสายเคเบิ้ลโดยการใช้ชิ้นส่วน โปรแกรมไลน์คอนสะเทิน(LINE CONSTANTS), เคเบิ้ลคอนสะเทิน (CABLE CONSTANTS) และเคเบิ้ลพารามิเตอร์ (CABLE PARAMETERS)

 1.4.2 ข้อมูลที่นำเข้าในการสร้างการจำลองสายส่งที่ขึ้นอยู่กับความถี่(การจำลองสาย ส่งแบบ Semlyen, เจ มาร์ติ (J. Marti) และ โนดา (Noda)

1.4.3 การคำนวณของข้อมูลแบบจำลองสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้า (XFORMER, BCTRAN)

1.4.4 การอิ่มตัว(Saturation) และ การแปลงเส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิส (hysteresis)1.4.5 ข้อมูลที่เขียนแยกเป็นส่วน (Data modularization)

1.5 ความต้องการอุปกรณ์

ผู้ใช้ส่วนมากรวมถึงผู้พัฒนาโปรแกรมจะใช้พื้นฐานด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์อินเทล 486 หรือเพนเที่ยม บนระบบปฏิบัติการไมโครซอฟวินโดวส์ (MS- Windows) เวอร์ชัน 3.x/ 95/ 98/ NT โดยมืองค์ประกอบของเครื่องคอมพิวเตอร์มาตรฐานต่ำสุด คือ แรม(RAM) 16 MB, ฮาร์ดดิสค์ (hard disk) 20 MB ที่ว่างอิสระ และ VGA กราฟฟิกเพียงพอที่จะดำเนินการ ATP ภายใต้ไมโคร ซอฟดอสของไมโครซอฟวินโดวส์ (MS- DOS/ MS- Windows) โดย ATP เหมาะที่จะใช้สำหรับ คอมพิวเตอร์ และระบบการปฏิบัติอื่นๆ เช่นกัน ปัจจุบันเวอร์ชัน ATP เหมาะที่จะใช้กับ

1.5.1 MS- DOS, MS- Windows 3.x/ 95/ 98/ NT/ 2000TM

ก. 32-bit, GNU-Mingw32 และ Watcom ATP สำหรับ Windows 95/98/NT

ข. 32-bit, Salford ATP ทำงานภายใต้ MS-DOS,

MS-Windows 3.x/95/98(เวอร์ชันนี้ต้องการ Salford's DOS extender DBOS/486

1.5.2 ลินุกซ์ (Linux)

ก. GNU เวอร์ชันของ ATP

1.6 ความสามารถของโปรแกรม

ตารางที่ 6 แสดงข้อจำกัดสูงสุดสำหรับโปรแกรม EEUG มาตรฐานที่ใช้ในระบบได้ ดังต่อไปนี้

Busses	6,000
Branches	10,000
Switches	1,200
Sources	900
Nonlinear elements	2,250
Synchronous machines	90

<u>ตารางที่ 6</u> ความสามารถของโปรแกรม ATP/EMTP

ที่มา: http://www.emtp.org/about.html

1.7 การประยุกต์ใช้งานทั่วไป

ATP - EMTP ถูกใช้อย่างกว้างขวางสำหรับการสวิตช์ และการวิเคราะห์คลื่นฟ้าผ่า, การประสานสัมพันธ์ของวัตถุที่ใช้ทำเป็นฉนวน และการศึกษาการสั่นแรงบิดภายในที่เกิดขึ้น, การ จำลองรีเลย์ป้องกัน, การศึกษาฮาร์มอนิก และคุณภาพไฟฟ้า, HVDC และการจำลอง FACTS โดย การศึกษา EMTP โดยทั่วไปจะใช้ในการศึกษาต่อไปนี้

- 1.7.1 ศึกษาแรงดันเกินฟ้าผ่า
- 1.7.2 ภาวะชั่วครู่จากการสวิตชิ่ง และความผิดพร่อง
- 1.7.3 ศึกษาแรงดันเกินทางสถิติแบบมีหลักเกณฑ์
- 1.7.4 ภาวะชั่วครู่ที่เร็วมากในระบบ GIS และระบบดิน
- 1.7.5 การจำลองเครื่องกล
- 1.7.6 ภาวะชั่วครู่คงตัว
- 1.7.7 การสตาร์ทมอเตอร์

- 1.7.8 การสั่นทางไฟฟ้าของแรงบิคภายในที่เกิดขึ้นจากเพลา
- 1.7.9 หม้อแปลงไฟฟ้า และการสวิตชิ่งรีแอกเตอร์ หรือตัวเก็บประจุแบบขนาน
- 1.7.10 เฟอร์โรเรโซแนนซ์
- 1.7.11 การประยุกต์ใช้ทางอิเล็กโทรนิคกำลัง
- 1.7.12 การทำงานของเบรกเกอร์ (การอาร์คทางไฟฟ้า)และการสับกระแส
- 1.7.13 อุปกรณ์: การจำลอง FACTS, STATCOM, SVC, UPFC,
- 1.7.14 การวิเคราะห์ฮาร์มอนิก
- 1.7.15 ภาวะรีโซแนนช์
- 1.7.16 การทคสอบอุปกรณ์ป้องกัน



<u>ภาพที่ 60</u> ตัวอย่างการเชื่อมต่อวงจรในโปรแกรม ATP/EMTP ที่มา: http://www.emtp.org/about.html



<u>ภาพที่ 61</u> ตัวอย่างแรงดันและกระแสในโปรแกรม ATP/EMTP ที่มา: http://www.emtp.org/about.html

2. <u>พีเอสแคท/อีเอ็มทีพี โปรแกรม (PSCAD/ EMTDC Program)</u>

EMTDC (electromagnetic transient and d.c.) คือตัวจำลองภาวะชั่วครู่ซึ่งค่อยๆปรากฎ ขึ้นเมื่อกลางปี 1970 เกิดจากแรงผลักดันดั้งเดิมของ ดอกเตอร์เฮอร์มัน ดอมเมล (Dr. Hermann Dommel) จากผลงานอันยอดเยี่ยมของเขาในเดือนเมษายน ปี ค.ศ. 1969 ที่ลงตีพิมพ์ในบทความของ IEEE จากการจัดประชุมเรื่องเครื่องมือ และระบบไฟฟ้ากำลังไฟฟ้า โดย EMTDC มีการพัฒนา ตลอดเวลาไม่ขึ้นอยู่กับ EMTP ได้สำเร็จ ซึ่งก็มีการแตกสาขาออกมาเป็นจำนวนมากมาย

PSCAD (Power Systems Computer Aided Design) คือส่วนติดต่อผู้ใช้ทางกราฟฟิกที่ ทรงพลังซึ่งเกิดจากการทำงานร่วมกันกับ EMTDC ที่แยกกันอยู่ โดยจุดประสงค์ทั่วไปของ โปรแกรมที่อยู่ในเทอมเวลาจะใช้สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังที่เลียนแบบภาวะชั่วครู่ และหน่วย ควบคุม สัมพันธ์กับการเตรียมอุปกรณ์, แก้ไขการเปลี่ยนแปลงและความถูกต้องสำหรับการจำลอง ของอุปกรณ์ หรือระบบไฟฟ้า

PSCAD / EMTDC จะทำการแทนวงจร และหาคำตอบสมการคิพเฟอเรลเซียล ของระบบ ไฟฟ้ากำลังทั้งหมด และหน่วยควบคุมในเทอมเวลาจากภาวะชั่วครู่ทางแม่เหล็กไฟฟ้า และทางกล ซึ่งการจำลองของเครื่องมือนี้จะแตกต่างจากเครื่องมือจำลองการไหลเวียนของโหลดและภาวะชั่วครู่ กงตัว (transient stability) ซึ่งใช้สมการสถานะคงตัว (steady state equations) แทนในวงจรไฟฟ้า (ภาวะทางแม่เหล็กไฟฟ้า) และจะหาคำตอบสมการคิพเฟอเรลเซียลของพลวัตทางกลจาก เครื่องจักรกล (ความเฉื่อยของการหมุน)

PSCAD / EMTDC จะรวมแบบการจำลองของส่วนประกอบทางกายภาพต่างๆบรรจุใน จิ้นส่วนซึ่งมีความสามารถใช้งานได้ดี เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า, สายส่ง, สวิตช์, เครื่องล่อฟ้า, ระบบ ควบคุม และเครื่องจักรไฟฟ้า และออกแบบเพื่อแก้ไขปัญหาของระบบที่ประกอบค้วยการเชื่อมต่อ ระหว่างความด้านทาน, ความจุไฟฟ้า, ความเหนี่ยวนำ, วงจรเฟสเดียว หรือวงจรหลายเฟส, สายส่ง จำหน่าย และส่วนประกอบอื่นๆ โดย PSCAD ประกอบค้วยซอฟแวร์ที่ทำให้ผู้ใช้สามารถเข้าไปใน วงจรโดยผ่านทางภาพ, สร้างส่วนประกอบที่เคยชินขึ้นใหม่, แก้ไขสายส่ง และตัวแปรสายเคเบิ้ล โดยทำปฏิกิริยากับการจำลอง EMTDC ชั่วขณะในความก้าวหน้า และส่งผลลัพธ์การประมวลของ การจำลอง ซึ่งสามารถทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์ได้ แบบการจำลองของสายส่ง และหม้อแปลงไฟฟ้าได้มีการปรับปรุงมานานหลายปี ซึ่งจะ เป็นแบบการจำลองที่มีความถูกต้องโดยถูกพัฒนาเพื่อจำลองการผิดเพื้ยนของรูปคลื่นในสายส่ง และการทำให้อิ่มตัวในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยโปรแกรมยังบรรจุแบบการจำลองที่เกิดขึ้นภายในของ เครื่องกลซิงโครนัส กับระบบเครื่องจักรกล

PSCAD จะประกอบด้วยโปรแกรม 6 โปรแกรมที่มีการประสานจำนวนข้อมูลเอกสาร ขนาดใหญ่ซึ่งจะถูกจัดการโดยโปรแกรมที่เรียกว่าไฟล์แมนนิจเจอะ (Filemanager) โดยภายใน โปรแกรมจะมีการเตรียมการเรียก 5 โปรแกรมอื่นๆ และดำเนินการดูแลในส่วนที่รับผิดชอบที่ เกี่ยวข้อง กับระบบ โดยจุดเริ่มแรกสำหรับการศึกษาใดๆ EMTDC จะทำการสร้างกราฟฟิลที่วาด เป็นรูปของวงจรและดำเนินการแก้ไขโดยการใช้ ดราฟ โปรแกรม (Draft program) ซึ่งจะจัดเตรียม ให้ผู้ใช้สามารถใช้พื้นที่ผ้าใบ และทำการเลือกอุปกรณ์ในที่เก็บของส่วนประกอบ โดยอุปกรณ์ที่เก็บ จะเตรียมไอคอนส่วนประกอบทั้งหมด ซึ่งสามารถถูกลากมาไว้ที่พื้นที่ผ้าใบ และเชื่อมต่อกับ ส่วนประกอบอื่นๆโดยไอคอนบัสเวิร์ค(buswork) โดยไอคอนส่วนประกอบแต่ละอันจะเป็นฟอร์ม ที่สามารถเข้าไปในดัวแปรส่วนประกอบ , ผู้ใช้สามารถสร้างไอคอนส่วนประกอบ หรือฟอร์มที่จะ เข้าไป และรหัสภาษาฟอร์แทรน (FORTRAN code) ในวงจร โดยส่วนประกอบทั่วไปจะเป็นหม้อ แปลงไฟฟ้าที่มีการพันหลายจดลวด, กลุ่มหกพัลล์(six pulse group), บล็อคหน่วยควบคุม, ดัวกรอง, เครื่องกลซิงโครนัส, เบรกเกอร์, โลจิกการจับเวลา (timing logic) และ อื่นๆ

ผลลัพธ์ที่ได้จากฉบับร่างจะเป็นส่วนหนึ่งของแฟ้มที่ถูกใช้ใน EMTDC ซึ่ง EMTDC จะ ถูกเรียกจาก PSCAD ขณะเปิดโปรแกรม โดยจะยอมให้ทำปฏิกิริยากับการจำลองชั่วขณะใน กวามก้าวหน้า ซึ่งขณะเปิดโปรแกรมผู้ใช้สามารถที่จะสร้างปุ่ม, สไลด์, หมุน และเขียนกราฟ ได้เมื่อ มีการเชื่อมต่อกับตัวแปรที่ใช้เป็นตัวนำเข้า หรือผลที่ออกมาจากการจำลอง โดยเมื่อจบการจำลอง ขณะโปรแกรมทำงานจะทำการกัดลอกวิวัฒนาการเวลาของตัวแปรที่เจาะจงเข้าไปในแฟ้มข้อมูล โดยในสถานะที่เสร็จสิ้นสมบูรณ์ของระบบที่จบจากการจำลองยังสามารถเข้าไปในแฟ้มภาพที่เกิด จากการจับภาพหน้าจอ ซึ่งต่อมาสามารถใช้เป็นจุดเริ่มสำหรับการจำลองในอนาคต แฟ้มข้อมูล ผลลัพธ์ที่ออกมาจาก EMTDC สามารถถูกเขียน และเปลี่ยนแปลงให้เหมาะสมโดยโปรแกรมยูนิ พล๊อต (Uniplot) หรือ มัลติพล๊อต (Multiplot) โดยผลลัพท์ที่ออกมายังสามารถถูกประมวลผลโดย ชุดโปรแกรมอื่นๆ เช่น แมทแล็บ (Matlab) หรือโปรแกรมที่ผู้ใช้เขียนขึ้นได้ตามต้องการ ฉบับร่างสามารถบันทึกคำอธิบาย และสามารถแจกจ่ายให้ผู้ใช้ PSCAD อื่นๆ โดยใน รูปภาพ 62 จะเป็นผังการทำงานเพื่อทำให้ง่ายต่อการอธิบายของกลุ่ม PSCAD / EMTDC ซึ่งจะไม่ แสดงการทำงานของแฟ้มในส่วนติดต่อระบบ, แฟ้มที่ใช้ติดตั้ง และแฟ้มอื่นๆ



<u>ภาพที่ 62</u> โครงสร้างการทำงานของโปรแกรม PSCAD/EMTDC ที่มา: Watson *et al* (2003)

การศึกษาโดยทั่วที่ใช้ศึกษาในโปรแกรม PSCAD/EMTDC

 สึกษาแรงดันเกินในระบบไฟฟ้ากำลังเนื่องจากความผิดพลาดพร่อง หรือการทำงานของ เบรกเกอร์ และสามารถแทนความไม่เป็นเชิงเส้นของหม้อแปลงไฟฟ้า เช่น การอิ่มตัวที่เป็นปัจจัย อันตราย ความสะควกในการดำเนินงานซ้ำหลายครั้งที่มีการดำเนินงานเป็นร้อยครั้งของการ จำลองเพื่อศึกษากรณีเลวร้ายที่สุดเมื่อต้องการจุดบนคลื่นของความผิดพลาดหลายจุด,ชนิดของ กวามผิดพร่อง หรือตำแหน่งของความผิดพร่อง

สึกษาแรงดันเกินในระบบไฟฟ้ากำลังเนื่องจากฟ้าผ่าโดยการจำลองนี้ต้องดำเนินการกับ
เวลาในแต่ละขั้นที่น้อยมาก เป็นนาโนวินาที

4) ศึกษาฮาร์มอนิกที่สร้าง โดยสะเตติควาร์คอมเพนเซท (static var compensate: SVC), การเชื่อมต่อของ HVDC (HVDC link), สะเตทคอม (STATCOM), อุปกรณ์ขับเครื่องกล, รายละเอียดแบบจำลองสำหรับไทริสเตอร์, จีทีโอ (GTO),ไอจีบีที (IGBT),ไดโอด (diodes) ได้ตาม ต้องการ หรือรายละเอียดจำลองที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมทั้งที่เป็นอนาล็อก (analogue (และ ดิจิตอล (digital)

5) ศึกษาพลังงานสูงสุดในเครื่องล่อฟ้าที่เกิดจากการรบกวน

ปรับ และออกแบบระบบควบกุมเพื่อใช้ในทางปฏิบัติสูงที่สุด

7) ความสะควกในการปรับโดยอัตโนมัติ หรือปรับค่าเวลาคงที่ ให้ทำงานซ้ำหลายครั้ง

8) ศึกษาผลกระทบของ ซับ-ซิงโครนัส รีโซแนนช์ (Sub - Synchronous Resonance: SSR) ของเครื่องกล และระบบกังหันที่ทำปฏิกิริยากับการชดเชยอนุกรมกับสายส่ง หรืออุปกรณ์ อิเล็กโทร นิคกำลัง และแก้ไขระบบควบคุม SSR เพื่อศึกษาวิธีลดผลกระทบที่เป็นไปได้

9) การจำลองของ STATCOM หรือ ตัวเปลี่ยนแหล่งกำเนิดแรงคัน และรายละเอียคจำลอง ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับหน่วยควบคุมของ STATCOM

10) ศึกษาการทำปฏิกิริยากันระหว่าง SVC, HVDC และอุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้นอื่นๆ

11) ศึกษาความไม่แน่นอนเนื่องจากฮาร์มอนิกรีโซแนนช์ (harmonic resonances) และ ชุด ควบคุม

12) ศึกษาผลกระทบพัลซ์ (pulse) ของเครื่องยนต์ดีเซล และกังหันลมบนวงจรข่ายไฟฟ้า

13) การประสานสัมพันธ์ของวัตถุที่ใช้ทำเป็นฉนวน

14) ตัวเปลี่ยนแปลงความเร็วชนิดต่างๆรวมถึงไซโคลคอนเวอร์เตอร์(cycloconverters) และการขนส่ง

15) ระบบอุตสาหกรรมรวมถึงการควบคุมการชดเชย, เตาไฟฟ้า (electric furnaces), ตัว กรอง (filters) อื่นๆ

การนำโปรแกรม ATP และ PSCAD มาใช้ในกรณีศึกษาของการไฟฟ้านครหลวง

การไฟฟ้านครหลวงได้มีโครงงานวิจัยการศึกษาแรงคันเกิน เนื่องจากการปิด-เปิดสวิตซ์ใน สายป้อน โดยมีการแต่งตั้ง คณะกรรมการตรวจจ้างโครงการ, คณะวิจัย และผู้แทนแต่ละเขตให้ ข้อมูลปัญหาแรงคันเกิน เนื่องจากได้รับผลกระทบปัญหาแรงคันเกินที่เกิดขึ้นบ่อยครั้ง โดยปัญหา ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นภายในระบบจากการปฏิบัติงานปิด-เปิดสวิตซ์ทีละเฟสของอุปกรณ์ตัดตอน สวิตซ์ใบมีคที่ใช้โหลดบัสเตอร์ (Loadbuster) หรือฟิวส์ชนิดขาดตก (Dropout fuse) ทั้งในระบบสาย เกเบิ้ลอากาศและสายเกเบิ้ลใต้ดิน โดยมีปัญหาแรงคันเกินจำนวนมากที่เกิดขึ้น เช่น การปฏิบัติงาน ถ่ายโหลดเพื่อคับไฟติดตั้งสายป้อนใหม่, การปิค-เปิดสวิตซ์เพื่อคับไฟบริเวณที่ปฏิบัติงาน, การ ปฏิบัติงานเพื่อเปลี่ยนฟิวส์ชนิดขาดตกจากการเกิดความผิดพร่อง, การจ่ายไฟให้ระบบหลังจากดับ ไฟเพื่อปฏิบัติงานกับอุปกรณ์ต่างๆในระบบ 12 kV เป็น 24 kV, การจ่ายไฟหลังจากการปฏิบัติงาน ภายในสถานีไฟฟ้า, การจ่ายไฟหลังจากปฏิบัติงานสับเปลี่ยนสายป้อน และการเปิดสายป้อนเพื่อง่าย โหลดคืนหลังการปฏิบัติงาน เป็นต้น ซึ่งความเสียหายที่เกิดขึ้นจะสามารถสรุปเป็นสาเหตุใหญ่ได้ เป็น 2 ประเด็นหลัก คือ

- 1) ความเสียหายที่เกิดกับเครื่องล่อฟ้า
- 2) ความเสียหายที่เกิดกับผู้ใช้ในด้านแรงต่ำ

โปรแกรม ATP และ PSCAD เป็นโปรแกรมที่มีความสามารถในการประยุกต์ใช้งาน สามารถจำถองระบบไฟฟ้าได้ทั้งกระแสตรงและกระแสสลับ มีอุปกรณ์ที่ใช้สนับสนุนแบบจำลอง ในระบบไฟฟ้ากำลังที่ซับซ้อน และระบบควบคุมได้ตามด้องการ โดยมีความสามารถในการจำลอง กรอบกลุมอย่างมีประสิทธิภาพ และมีลักษณะเฉพาะสำคัญในกระบวนการคำนวณของภาวะชั่วครู่ จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการศึกษาและวิเคราะห์แรงดันเกินเนื่องจากการเปิด–ปิด สวิตซ์ ในสายป้อน แต่ความแตกต่างระหว่าง 2 โปรแกรมที่เห็นได้อย่างชัดเจนคือ การเป็นโปรแกรมเชิง พาณิชย์ และไม่เป็นเชิงพาณิช ซึ่งโปรแกรม ATP จะเป็นโปรแกรมไม่เป็นเชิงพาณิชย์ แต่ ATP ก็ ไม่ได้เป็นโปรแกรมที่ให้ใช้งานทั่วไปจะต้องได้รับการขออนุญาตอย่างถูกต้องก่อนที่จะได้รับ โปรแกรม ATP มาใช้งาน แต่นี่ก็ไม่ใช้ปัญหาใหญ่จึงทำให้เกิดการแพร่หลายในการใช้งานของ บุคคลทั่วไปซึ่งสามารถนำมาใช้กับงานส่วนตัวได้ ส่วนโปรแกรม PSCAD จะเป็นโปรแกรมเชิง พาณิชย์จึงเหมาะสมกับองค์กร หรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าโดยตรง โดย มีส่วนสนับของการใช้งานที่มากกว่าสามารถนำโปรแกรมแม็ทแล็ปมาร่วมในการวิเคราะห์ หรือ โปรแกรมที่ผู้ใช้เขียนขึ้นเองได้ และมีความสะดวกในการทำงานซ้ำหลายครั้งจากการดำเนินงาน เป็นร้อยครั้งของการจำลองเพื่อศึกษากรณีเลวร้ายที่สุด และอื่นๆ จึงมีความเหมาะสมที่จะนำ โปรแกรมทั้ง 2 มาร่วมกันวิเคราะห์ เนื่องจากแบบจำลองในการป้อนข้อมูลตัวแปรมีความแตกต่าง กัน

จากตัวอย่างกรณีเกิดปัญหาที่กล่าวมาจะนำกรณีศึกษาของการปลดสายป้อนเพื่อจ่ายโหลด คืน มาวิเคราะห์ซึ่งมีเหตุการณ์เกิดขึ้นระหว่างการเปิดสายป้อนเพื่อสับถ่ายโหลดคืนหลังจากการ ปฏิบัติงานส่งผลให้เครื่องล่อฟ้าระเบิด ขณะสวิตช์ใบมีดสับชนออก โดยสามารถแบ่งเป็นการ ทดสอบได้จำนวน 3 ครั้งดังนี้

1. <u>การทดลองเปิด-ปิดสวิตช์เพื่อสึกษาปัญหาแรงดันเกินส่งผลให้เครื่องล่อฟ้าเสียหาย ครั้งที่ 1</u>

เป็นการทดลองเมื่อวันที่ 13 ธันวากม 2546 โดยก่อนหน้านี้ได้เกิดปัญหาขึ้นหลายครั้ง ทางการไฟฟ้านกรหลวง จึงได้ทำการทดลองปิดสวิตช์กรั้งนี้เพื่อศึกษาปัญหาแรงดันเกินที่ทำให้ เครื่องล่อฟ้าเกิดกวามเสียหาย เมื่อปิดสวิตช์ใบมิด BZ14-1H ในสภาพอากาศปกติ โดยมี รายละเอียด แผนผังวงจรเดี่ยว, อุปกรณ์ที่อยู่ในระบบ, ลำดับเหตุการณ์ และกวามเสียหายที่เกิดดังนี้

 1.1 แผนผังวงจรเดี่ยว จะประกอบด้วยส่วนที่สำคัญคือแหล่งกำเนิดจำนวน 2 สายป้อน, หม้อแปลงไฟฟ้าจำนวน 3 เครื่อง, สายเคเบิ้ลใต้ดินจำนวน 2 วงจร, สวิตช์ใบมีดแบบ 1 เฟส ที่ เกี่ยวข้องจำนวน 5 จุดจุดละ 3 ชุด, สายเคเบิ้ลอากาศจำนวน 2 วงจร และเครื่องล่อฟ้า โดยมีการ เชื่อมต่อดังภาพข้างล่าง



<u>ภาพที่ 63</u> แผนผังวงจรเดี่ยวการเกิดเหตุการณ์กรณีศึกษาการปลดสายป้อนเพื่อจ่ายโหลดคืน ที่มา: การไฟฟ้านครหลวง (2547)

 1.2 รายละเอียดข้อมูลอุปกรณ์ ในระบบของการเกิดเหตุการณ์กรณีศึกษาจากการปลดสาย ป้อนเพื่อจ่ายโหลดคืนจะมีรายละเอียดอุปกรณ์ดังตารางข้างล่าง

<u>ตารางที่ 7</u> รายละเอียดข้อมูลอุปกรณ์กรณีศึกษาการปลดสายป้อนเพื่อง่ายโหลดคืน

ที่	อุปกรณ์	เฟส	รายละเอียดข้อมูลอุปกรณ์
1	หม้อแปลง	3	38/48/60 MVA
2	หม้อแปลง	3	112.5 kVA
3	สายเคเบิ้ลใต้ดิน	3	3*400 mm²,24 kV, ยาวประมาณ 350 เมตร จำนวน 2 วงจร
4	สายเคเบิ้ลอากาศ	3	3*185 mm²,24 kV, ยาวประมาณ 2,400 เมตร จำนวน 2 วงจร
5	เครื่องถ่อฟ้า	3	9 kV, 10 kA, Polymer
6	สวิตช์ใบมีด	1	24 kV, 600 A 3 ชุด

ที่มา: การไฟฟ้านครหลวง (2547)

 1.3 ลำดับขั้นตอนการทำงาน ปิด-เปิดสวิตช์ในสายป้อน การเกิดเหตุการณ์กรณีศึกษาเพื่อ จ่ายโหลดกืนจะมีรายละเอียดลำดับขั้นตอนการทำงานดังตารางข้างล่าง

-72	ลักษณะ	หมายเลข	or coloridor		
ท	การปฏิบัติงาน	อุปกรณ์	วตถุบระสงค		
1	Tie	D714D700 111	ให้ Bay 2 กับ Bay 1 ร่วมจ่ายโหลดสายป้อนจาก		
1	BZ14BZ22-1H	BZ14BZ22-1H	BZ14BZ22-1H ถึง BZ1H-2H		
2	เปิด	BZ14 (CB)	ดับไฟสายป้อนช่วง BZ14 ถึง BZ14-2H		
2	uil o	D714 01	ให้ Bay 2 ง่ายโหลดสายป้อนจาก BZ14BZ22-1H		
3	1 1 1 1 1 1	BZ14-2H	ถึง BZ14H-2H แทน Bay 1 ทั้งหมด		
			ต่อกราวค์สาย ASC ระหว่าง BZ14-1H ถึง BZ14-2H		
4	4 เปิด	BZ14-1H	เปลี่ยนเครื่องล่อฟ้าที่ชำรุด ตำแหน่งไรเซอร์ (Riser		
			BZ14-1H จำนวน3 ตัว พิกัดแรงดัน 9 kV		
_	สือ	D714 111	กราวด์เคเบิล และเปลี่ยนเครื่องล่อฟ้าชุดใหม่บริเวณ		
3	ገፅ	BZ14-1H	ไรเซอร์		
((a)	D714 111	แยกวงจรระหว่างสายเคเบิ้ลใต้ดินกับสายเคเบิ้ล		
6	የጠል	BZ14-1H	อากาศ		
7	ปิด	BZ14 (CB)	ทคสอบสายเคเบิ้ล 10 นาที		
8	เปิด	BZ14 (CB)	ทคสอบสายเคเบิ้ล 10 นาที		
0	สือ	D714 011	จ่ายไฟจาก Bay 2 ให้แก่สายป้อนในช่วง		
9	שע עע	BZ14-2H	BZ14-2H ถึง BZ14-1H		
10		D714 111	จ่ายไฟจาก Bay 2 ให้แก่สายป้อนในช่วง BZ14 ถึง		
10	лы т-р-к	BZ14-1H	BZ14-1H		

<u>ตารางที่ 8</u> ลำดับขั้นตอนการทดลองปลดสายป้อนเพื่อง่ายโหลดคืนครั้งที่ 1

ที่มา: การไฟฟ้านครหลวง (2547)

1.4 ปัญหาที่เกิดจากการปฏิบัติงาน จะส่งผลทำให้เครื่องล่อฟ้าเฟส R เกิดความเสียหาย ในช่วงการปฏิบัติงานขั้นตอนที่ 10 เมื่อมีลำดับขั้นตอนการปิดสวิตช์ใบมีด BZ14-1H ลำดับ Y-B-R และได้ทำการแก้ไขปัญหาเบื้องต้นโดยการปลดเครื่องล่อฟ้าทั้ง 3 เฟส ที่ตำแหน่งติดตั้งไรเซอร์ ของ สวิตช์ใบมีด BZ14-1H ออกจากสายป้อน

2. <u>การทดลองเปิด-ปิดสวิตช์เพื่อศึกษาปัญหาแรงดันเกินส่งผลให้เครื่องล่อฟ้าเสียหาย ครั้งที่ 2</u>

เป็นการทคลองในวันที่ 9 ตุลาคม 2547 โดยคณะวิจัยและการไฟฟ้านครหลวง เพื่อวัดผล รูปคลื่นขณะทำการสับสวิตช์ใบมีด BZ14-1H ซึ่งมีรายละเอียดของแผนผังวงจรเดี่ยว, ลำดับ ขั้นตอนการปฏิบัติงาน, ความเสียที่เกิดขึ้น และตัวอย่างรูปคลื่นแรงคันดังนี้

2.1 แผนผังวงจรเดี่ยว การทดลองปลดสายป้อนเพื่อจ่ายโหลดคืนครั้งที่ 2 จะมีส่วนที่ เพิ่มเติมขึ้นมา คือมีการติดตั้งชุดตัวแบ่งแรงดันความจุไฟฟ้าเพื่อวัดผลแรงดันที่เครื่องล่อฟ้าได้รับ ดังภาพข้างล่าง



<u>ภาพที่ 64</u> แผนผังวงเดี่ยวการทดลองปลดสายป้อนเพื่อง่ายโหลดคืนครั้งที่ 2

2.2 ลำคับขั้นตอนการ ปิด-เปิดสวิตช์ในสายป้อน ของการทดลองปลดสายป้อนเพื่อง่าย โหลดกืนครั้งที่ 2 จะมีลำคับขั้นตอนแบ่งเป็น 2 กรณี

2.2.1 กรณีไม่ติดตั้งเครื่องล่อฟ้า จะมีลำดับขั้นตอนปฏิบัติงานตามตารางข้างล่าง

		я У						י ע			
a	~	0	1	9/	4 1	~	4 0	1 0		aa	
ตารางท	9	กาดบบบเตอบการทดกองบ	<u> </u>	ปอบ	เพอจา	ยโหลด	າຄາເຄາ	ังท	2	กรถเท	1
FI TO INFI	_	el IND ORNORI I STILLEONT	Tenuer IO	DOR		0 81161	пына	111	4	119 99 11	T

-12	ลักษณะ	หมายเลข	en colou do co
ท	การปฏิบัติงาน	อุปกรณ์	วตถุบระสงค
1	Tie	D714D700 111	ให้ Bay 2 กับ Bay 1 ร่วมง่ายโหลดสายป้อนจาก
I	BZ14BZ22-1H	BZ14BZ22-1H	BZ14BZ22-1H ถึง BZ1H-2H
2	เปิด	BZ14 (CB)	ดับไฟสายป้อนช่วง BZ14 ถึง BZ14-2H
2	d	D714 311	ให้ Bay 2 ง่ายโหลดสายป้อนจาก BZ14BZ22-1H
3	เปล	BZ14-2H	ถึง BZ14H-2H แทน Bay 1 ทั้งหมด
4	เปิด	BZ14-1H	ดับไฟสายป้อนช่วง BZ14-2H ถึง BZ14-1H
E	ວຕາວດັ	NÊLOOL D714 11	เพื่อไม่ให้มีไฟในขณะเชื่อมต่อสายเข้าตัวแบ่ง
3	113 1 181	חזו זמו 1714-1H	แรงคันความจุไฟฟ้า
(ตัวแบ่งแรงคัน	เพื่อวัจสะไอลี่น
0	919191N	ความจุไฟฟ้า	រណត រសរំ ការលេក
7	ปลด	กราวด์	เพื่อวัดรูปกลื่น
8	ปิด-เปิด	BZ14 (CB)	ชาร์จสายเกเบิ้ลใต้ดิน
9	ปิด	BZ14-2H	จ่ายไฟย้อนเข้ามาเพื่อทคลองปิค
10	ปิด Y-B-R	BZ14-1H	ทคลองปิดเพื่อดูรูปกลื่น
11	ปิด-เปิด	BZ14 (CB)	ชาร์จสายเกเบิ้ลใต้ดิน
12	เปิด	BZ14-2H	
13	เปิด	BZ14-1H	

ที่มา: การไฟฟ้านครหลวง (2547)

<u>5</u> 2	ลักษณะ	หมายเลข	
VI	การปฏิบัติงาน	อุปกรณ์	าดเป็กวรยาเม
1	กราวด์	ນรີເວ໙ BZ14-1H	เพื่อไม่ให้มีไฟในขณะติดตั้งเกรื่องถ่อฟ้า
2	ติดตั้ง	เครื่องถ่อฟ้า	เพื่อวัดรูปคลื่น
3	ปลด	กราวด์	เพื่อวัดรูปคลื่น
4	ปิด	BZ14-2H	จ่ายไฟย้อนเข้ามาเพื่อทคลองปิค
5	ปิด Y-B-R	BZ14-1H	ทคลองปิคเพื่อดูรูปคลื่น
6	ปิด-เปิด	BZ14 (CB)	ชาร์จสายเคเบิ้ลใต้ดิน
7	เปิด	BZ14-2H	
8	เปิด	BZ14-1H	
0			ไม่ให้มีไฟในขณะปลดการเชื่อมต่อสายเข้าตัวแบ่ง
9	113 1.161	ມງໄງເພ BS14-1H	แรงคันความจุไฟฟ้า
10	ปลด	กราวด์	
11	ปิด	BZ14-2H	
12	ปิด	BZ14-1H	
13	ปิด	BZ14 (CB)	
14	เปิด	BZ14BZ22-1H	

,	ע			ע <u>א</u> י	
<u>ตารางที่ 10</u>	ลำดับขั้นตอนกา	รทคลองปลคสายเ	ไอนเพื่อจ่าย <i>์</i>	โหลดคืนครั้งที่ 2	กรณีที่ 2

2.2.2 กรณีติดตั้งเครื่องล่อฟ้า จะมีลำดับขั้นตอนปฏิบัติงานตามตารางข้างล่าง

ที่มา: การไฟฟ้านครหลวง (2547)

2.3 จากการทดลองในครั้งนี้หลังจากปิดสวิตช์ใบมีด BZ14-1H เฟส R เฟสสุดท้ายในช่วง ขั้นตอนที่ 5 ประมาณ 7 วินาที เครื่องล่อฟ้าเฟส R ระเบิคเมื่อปลดเครื่องล่อฟ้าทั้ง 3 เฟส ลงมาพบว่า เครื่องล่อฟ้าเฟส B มีอุณหภูมิสูง ส่วนเครื่องล่อฟ้าเฟส Y มีอุณหภูมิปกติ



<u>ภาพที่ 65</u> การระเบิดของเครื่องล่อฟ้าเฟส R หลังทำการปิดสวิตช์ใบมีดครบทั้ง 3 เฟส ที่มา: การไฟฟ้านครหลวง (2547)



<u>ภาพที่ 66</u> ความเสียหายของเครื่องล่อฟ้าเฟส R เมื่อทำการปิคสวิตช์ใบมีคครบทั้ง 3 เฟส ที่มา: การไฟฟ้านครหลวง (2547)



2.4 ตัวอย่างแรงคันจากการทดลองปลดสายป้อนเพื่อจ่ายโหลดคืนครั้งที่ 2

<u>ภาพที่ 67</u> แรงคันขณะปิคสวิตช์ใบมีคเฟส Y ด้วยเครื่องวัด เมื่อไม่ติดตั้งเครื่องล่อฟ้า ที่มา: คณะวิจัยการไฟฟ้านครหลวง (2547)



<u>ภาพที่ 68</u> แรงคันขณะปิคสวิตช์ใบมีดเฟส Y ด้วยไมโครซอฟเอ็กเซลล์ เมื่อไม่ติดตั้งเครื่องล่อฟ้า ที่มา: คณะวิจัยการไฟฟ้านครหลวง (2547)



<u>ภาพที่ 69</u> แรงคันขณะปีคสวิตช์ใบมีคเฟส B หลังจากการปีคเฟส Y ด้วยเครื่องวัด ที่มา: คณะวิจัยการไฟฟ้านครหลวง (2547)



<u>ภาพที่ 70</u> แรงคันขณะปิคสวิตช์ใบมีคเฟส B หลังจากการปิคเฟส Y ด้วยไมโครซอฟเอ็กเซลล์ ที่มา: คณะวิจัยการไฟฟ้านครหลวง (2547)

3. <u>การทดลองเปิด-ปิดสวิตช์เพื่อสึกษาปัญหาแรงดันเกินส่งผลให้เครื่องล่อฟ้าเสียหาย ครั้งที่ 3</u>

เป็นการทดลองในวันที่ 20 พฤศจิกายน 2547 โดยคณะวิจัยและการไฟฟ้านครหลวง เพื่อ ทดลองการแก้ไขปัญหาแรงคันเกิน โดยมีการวัดผลรูปคลื่นขณะทำการสับสวิตช์ใบมีด BZ14-1H ซึ่งมีรายละเอียดของแผนผังวงจรเดี่ยว, ลำคับขั้นตอนการปฏิบัติงาน, ความเสียที่เกิดขึ้น และ ตัวอย่างรูปคลื่นแรงคันคังนี้

3.1 แผนผังวงจรเดี่ยว การทดลองปลดสายป้อนเพื่อจ่ายโหลดคืนครั้งที่ 3 จะมีรายละเอียด แผนผังวงจรเดี่ยวเหมือนรูปภาพที่ 64

3.2 ลำดับขั้นตอนการ ปีด-เปิดสวิตช์ในสายป้อน ของการทดลองปลดสายป้อนเพื่อง่าย โหลดคืนครั้งที่ 2 จะมีลำดับขั้นตอนแบ่งเป็น 2 กรณี

3.2.1 กรณีไม่ติดตั้งเกรื่องล่อฟ้า จะมีลำคับขั้นตอนปฏิบัติงานตามตารางข้างล่าง

<u>з</u> р	ลักษณะ	หมายเลข	or colour de c
'n	การปฏิบัติงาน	อุปกรณ์	าตกำบระบงค
1	Tie	D714D722 111	ให้ Bay 2 กับ Bay 1 ร่วมจ่ายโหลดสายป้อน
1	BZ14BZ22-1H	BZ14BZ22-1H	ຈາກBZ14BZ22-1H ຄົ້ง BZ1H-2H
2	(a)	D714 011	ให้ Bay2 จ่ายโหลดสายป้อนจาก BZ14BZ22-
2	เปิด	BZ14-2H	1H ถึง BZ14H-2H แทน Bay 1 ทั้งหมด
3	เปิด	BZ14 (CB)	ดับไฟสายป้อนช่วง BZ14 ถึง BZ14-2H
4	เปิด	BZ14-1H	ดับไฟสายป้อนช่วง BZ14-2H ถึง BZ14-1H
5	ລະາວດໍ	NE1221 D714 111	เพื่อไม่ให้มีไฟในขณะเชื่อมต่อสายเข้าตัวแบ่ง
3	ואנין כוז	Пэтіт В714-1Н	แรงคันความจุไฟฟ้า
6	สื่อสา	ตัวแบ่งแรงคันความจุ	เพื่อวัดรงไดลิ่ม
0	VIVIVIN	ไฟฟ้า	<u>เพถางเว็บนยุ</u> ษ
7	ปลด	กราวด์	เพื่อวัดรูปคลื่น
8	ปิด	BZ14-2H	จ่ายไฟย้อนเข้ามาเพื่อทคลองปิด
9	ปิด	BZ14 (CB)	
10	ปิด Y-B-R	BZ14-1H	ทคลองปิดเพื่อดูรูปคลื่น
11	เปิด	BZ14-2H	
12	เปิด	BZ14 (CB)	
13	เปิด	BZ14-1H	

<u>ตารางที่ 11</u> ลำคับขั้นตอนการทคลองปลคสายป้อนเพื่อจ่ายโหลคคืนครั้งที่ 3 กรณีที่ 1

ที่มา: การไฟฟ้านครหลวง (2547)

3.2.2 กรณีติดตั้งเครื่องล่อฟ้า จะมีลำดับขั้นตอนปฏิบัติงานตามตารางข้างล่าง

-42	ลักษณะ	หมายเลข	or coloridad
٧I	การปฏิบัติงาน	อุปกรณ์	าตถุบระสงค
1	กราวด์	ນรີເວ໙ BZ14-1H	เพื่อไม่ให้มีไฟในขณะติดตั้งเกรื่องถ่อฟ้า
2	ติดตั้ง	เครื่องถ่อฟ้า	เพื่อวัดรูปกลื่น
3	ปลด	กราวด์	เพื่อวัดรูปกลื่น
4	ปิด	BZ14-2H	จ่ายไฟย้อนเข้ามาเพื่อทคลองปิด
5	ปิด	BZ14 (CB)	
6	ปิด Y-B-R	BZ14-1H	ทคลองปีคเพื่อดูรูปคลื่น
7	เปิด	BZ14-2H	
8	เปิด	BZ14 (CB)	
9	เปิด	BZ14-1H	
10	ອະາວດໍ	191001 D714 111	ไม่ให้มีไฟในขณะปลดการเชื่อมต่อสายเข้าตัวแบ่ง
10	נוז נוז	חזו זמ BV14-1H	แรงดันความจุไฟฟ้า
11	ปลด	กราวด์	
12	ปิด	BZ14-2H	
13	ปิด	BZ14 (CB)	
14	ปิด	BZ14-1H	
15	เปิด	BZ14BZ22-1H	รื้อถอนอุปกรณ์

<u>ตารางที่ 12</u> ลำคับขั้นตอนการทคลองปลคสายป้อนเพื่อจ่ายโหลคคืนครั้งที่ 3 กรณีที่ 2

ที่มา: การไฟฟ้านครหลวง (2547)

3.3 จากการทดลองในครั้งนี้ ไม่ส่งผลทำให้เครื่องล่อฟ้าเกิดความเสียหายในช่วงการ ปฏิบัติงาน เมื่อมีลำดับขั้นตอนการปิดสวิตช์ใบมีด BZ14-1H ลำดับ Y-B-R



3.4 ตัวอย่างแรงคันจากการทคลองปลคสายป้อนเพื่อจ่ายโหลคคืนครั้งที่ 3

<u>ภาพที่ 71</u> แรงดันขณะปิดเบรกเกอร์ BZ14 ด้วยเครื่องวัด Tektronix ที่มา: คณะวิจัยการไฟฟ้านครหลวง (2547)



<u>ภาพที่ 72</u> แรงคันขณะปิคเบรกเกอร์ BZ14 ด้วยไมโครซอฟเอ็กเซลล์ ที่มา: ข้อมูลคณะวิจัยการไฟฟ้านครหลวง (2547)

อุปกรณ์และวิธีการ

<u>อุปกรณ์</u>

- 1 เครื่องกอมพิวเตอร์ส่วนบุกกล (Intel Celeron 1.7 GHz, Ram 128 MB)
- 2 ระบบปฏิบัติการไมโครซอฟท์วินโควส์ XP
- 3 โปรแกรมจำลองภาวะชั่วครู่
 - 3.1 โปรแกรม ATP/EMTP (ATPDRAW v.3.8p4 และ PLOTXY rel June 2005)
 - 3.2 โปรแกรม PSCAD/EMTDC v.4.1

<u>วิชีการ</u>

การใช้โปรแกรม ATP ร่วมกับ โปรแกรม PSCAD ศึกษาแรงคันเกินเนื่องจากการเปิด–ปิด สวิตช์ในสายป้อน เพื่อใช้ในกรณีศึกษาของการไฟฟ้านครหลวง จำเป็นต้องรวบรวมข้อมูล รายละเอียด ของสายส่งเหนือดิน, สายเคเบิ้ลใต้ดิน,ระบบแรงคัน, ลำดับขั้นตอนการทำงาน และ ความเสียหายที่เกิดขึ้น โดยความเสียหายที่เกิดขึ้นในการศึกษานี้ จะเกิดกับเครื่องล่อฟ้าได้รับความ เสียทุกครั้งที่มีการปิด–เปิด สวิตช์ในสายป้อน เนื่องจากการจ่ายโหลดคืนในระบบ

การวิเคราะห์ปัญหาแรงดันเกินที่เกิดขึ้นเนื่องจากการปิด-เปิดสวิตช์ในสายป้อน จากการ รวบรวมข้อมูลและผลกระทบ สามารถแบ่งการวิเคราะห์ปัญหาแรงดันเกินได้เป็น 2 ประเภท คือการ วิเคราะห์ปัญหาแรงดันเกินเนื่องจากภาวะชั่วครู่ และ การวิเคราะห์ปัญหาแรงดันเกินเนื่องจาก เฟอร์โรเรโซแนนซ์ โดยจะเป็นการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ATP ร่วมกับ PSCAD เพื่อศึกษาแรงดัน เกินและพลังงานที่เครื่องล่อฟ้าได้รับจนได้รับความเสียหาย รวมถึงการสำรวจทางเลือกในการระงับ ผลปัญหาเครื่องล่อฟ้าได้รับความเสียหาย โดยพิจารณาแนวทางที่สามารถทำได้และใช้เงินลงทุน น้อย

ผลการวิจัย

1. การวิเคราะห์แรงดันเกินเนื่องจากภาวะชั่วครู่

การสร้างแบบจำลองการปิด–เปิด สวิตช์ในสายป้อนในระบบ 2 สายป้อน โดยใช้โปรแกรม ATP จะทำการจำลองจากระบบจำหน่ายโดยมีการต่อวงจรตามแผนภาพวงจรเดี่ยว และมี รายละเอียดการสร้างแบบจำลองดังภาพข้างล่าง



<u>ภาพที่ 73</u> แผนภาพวงจรเดี่ยวที่ใช้จำลองในกรณีศึกษา

 1.1 การจำลองแหล่งกำเนิดแรงคัน แหล่งกำเนิดใน ATP สามารถแบ่งความแตกต่างได้ 2 กลุ่มคือ กลุ่มของแหล่งกำเนิดสถิต (static sources) และกลุ่มของแหล่งกำเนิดพลวัต (dynamic sources) กลุ่มของแหล่งกำเนิดสถิตจะประกอบด้วย ฟังก์ชันที่ได้จากการทดลองหรือจาก ประสบการณ์ (empirical functions) กำหนดโดยจุดต่อจุด type- 1, ฟังก์ชันที่เกี่ยวกับการวิเคราะห์ (analytical functions) และฟังก์ชันควบคุม TAGS (TAGS-controlled functions) กลุ่มของ แหล่งกำเนิดพลวัตประกอบด้วย แบบจำลองเครื่องกลพลวัตที่กำลังหมุน

กฎของแหล่งกำเนิดในโปรแกรม ATP เมื่อมีแหล่งกำเนิดหลายแหล่งและทำงานใน เวลาเดียวกัน คือ 1.1.1 เมื่อมีแหล่งกำเนิดแรงดันหลายแหล่งทำงานบนจุดเดียวกัน อิทธิพลของ แหล่งกำเนิดนั้นทั้งหมดจะได้รับการเพิ่มขึ้น

 1.1.2 เมื่อมีแหล่งกำเนิดกระแสหลายแหล่งทำงานบนจุดเดียวกัน อิทธิพลของ แหล่งกำเนิดนั้นทั้งหมดจะได้รับการเพิ่มขึ้น

 1.1.3 ถ้าทั้งแหล่งกำเนิดกระแส และแหล่งกำเนิดแรงดันทำงานบนจุดเดียวกัน อิทธิพลแหล่งกำเนิดแรงดันเท่านั้นที่ต้องพิจารณา ส่วนอิทธิพลของแหล่งกำเนิดกระแสไม่ต้อง นำมาพิจารณา

มาตรฐานแรงคันการจ่ายไฟปกติในระบบ 12 kV ของการไฟฟ้านกรหลวงจะจ่ายไฟที่ ระดับแรงคันไฟฟ้าต่ำสุด 10.9 kV และสูงสุด 11.8 kV เพราะฉะนั้นแรงคันที่ใช้ในการจำลองจึงใช้ แรงคันที่สูงที่สุดในสภาวะปกติ เนื่องจากเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นอยู่ใกล้สถานีไฟฟ้า และเป็นสภาวะที่ จะทำให้เกิดแรงคันเกินสูงสุดในขณะปฏิบัติงานปกติ โดยจะต้องทำการแปลงแรงคันให้เป็นค่ายอด แรงคันสูงสุดระหว่างเฟสกับดิน เพื่อใช้ในการจำลองของโปรแกรม ATP จะได้แรงคันในการ จำลองเท่ากับ 11.8*($\sqrt{2} / \sqrt{3}$) =9.634659 kV พร้อมกับใส่ก่าลำคับส่วนประกอบของสถานีไฟฟ้า จะได้แบบจำลองแหล่งกำเนิดแรงคันดังภาพข้างล่าง

omponent: Ac3ph.s Attributes	sup			
DATA	VALUE	NODE	PHASE NA	ИЕ
Amp.	9634.659655	AC3	ABC	
f	50			
pha	0			
A1	0		U	
Tstart	0		᠃ᡌᢓᢇᢩ᠆᠍	-
Tstop	10			
Order: 0 Co <u>m</u> ment: BZ22			Label: U	
Type of source			_	
C Current				li <u>d</u> e
Voltage				ock.
0-		<u>o</u> k	<u>C</u> ancel	<u>H</u> elp
		(h)		

<u>ภาพที่ 74</u> แบบจำลองแหล่งกำเนิดแรงดัน ด้วยโปรแกรม ATP (a) แบบจำลองแหล่งกำเนิด (b) ข้อมูลภายในแบบจำลองแหล่งกำเนิดแรงดัน

JATA	VALUE	_	NODE	PHASE	NAME
3_1	0.059		IN1	ABC	
1	0.001655		OUT1	ABC	
2_1	0				
3_2	0.059				
2	0.001655				
2_2	0				
3_3	0.059				
3	0.001655	-			
Order: 0				Label:	
Co <u>m</u> ment:					
Output					Hide
0 - No	-				🗖 Lock

(c)

<u>ภาพที่ 74</u> (ต่อ)

(c) ข้อมูลภายในแบบจำลองของความด้านทานและความเหนี่ยวนำภายในสถานีไฟฟ้า

 1.2 การจำลองสายส่ง โดยทั่วไปในการจำลองภาวะชั่วครู่ทางแม่เหล็กไฟฟ้า จะมีการ แทนวงจรของสายส่งหลักๆอยู่ด้วยกัน 2 วิธี โดยวิธีแรกเป็นวิธีที่กุ้นเคยและใช้กันส่วนมากคือแบบ พาย (PI) ส่วนวิธีที่สองจะใช้การแทนสายส่งด้วยวิธีแบบกระจาย ซึ่งทั้ง 2 วิธีเป็นวิธีที่เหมาะ สำหรับการตอบสนองภาวะชั่วครู่สายส่งที่เลียนแบบโดยการใช้คอมพิวเตอร์

แบบการจำลองแบบกระจายจะกระทำบนหลักการของคลื่นเดินทาง โดยแรงคันที่ถูก รบกวนจะเดินทางตามตัวนำที่ความเร็วการแพร่ของสายส่งซึ่งใกล้ความเร็วแสง จนกระทั่งถูก สะท้อนที่ปลายสายอีกข้างหนึ่งของสายส่ง หรืออีกในความหมายหนึ่ง สายส่ง หรือสายป้อน เป็น ฟังก์ชันหน่วงเวลา โดยแรงคันหรือกระแสที่เข้าไปในสายป้อนที่ปลายสายข้างหนึ่งอาจจะไป ปรากฏที่ปลายสายอื่นๆ ซึ่งบางทีอาจจะทำให้เกิดการผิดเพี้ยนเล็กน้อยหลังจากที่เวลาผ่านไป แต่ก็ ต้องมีการพิจารณาและจัดการรวมการเชื่อมต่อร่วมกันของตัวนำอื่นๆ ซึ่งจะทำให้กลิ่นเหล่านี้ลด น้อยลงเช่นเดียวกับการการเดินทางตามสายส่ง

แบบจำลองสายส่งในโปรแกรม ATP จะมีการจำลองแบ่งเป็น 5 แบบ คือ

1) แบบพาย (PI) เป็นการสมมูลย์แบบนอร์มินอลพาย (Norminal PI) เหมาะที่จะใช้ กับสายส่งระยะสั้น

2) แบบเบอร์เจอร์รอน (Bergeron) เป็นแบบตัวแปรคงที่ ใช้หลักการของคลื่นเดินทาง

แบบเจมาร์ติ (JMarti) เป็นแบบการจำลองตัวแปรขึ้นอยู่กับความถี่ กับการแปลงให้
อยู่ในรูปเมตริกช์คงที่

4) แบบโนคา (Noda) เป็นแบบการจำลองตัวแปรขึ้นอยู่กับความถี่ แต่ไม่สนับสนุนใน เคเบิ้ลกอนสแท็น (CABLE CONSTANT) ของโปรแกรม ATP

5) แบบ Semlyen เป็นแบบการจำลองตัวแปรขึ้นอยู่กับความถื่อย่างง่าย แต่ ไม่ สนับสนุนในเกเบิ้ลพารามิเตอร์ ของโปรแกรม ATP

โดยในโปรแกรม ATP จะเลือกการจำลองแบบพาย ส่วนโปรแกรม PSCAD จะเลือก การจำลองแบบเบอร์เจอร์รอน เนื่องจากการจำลองสายส่งแบบพายในโปรแกรม PSCAD จะมีความ ้ย่งยาก ซึ่งจะต้องให้ค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถิ่มูลฐานที่ถูกต้อง ไม่สามารถนำองค์ประกอบของตัวนำ ้และ โครงสร้างเสามาจำลองและ ไม่เหมาะกับตัวนำจำนวนมากที่มีการเชื่อมต่อร่วมกัน โดยการ ้จำลองแบบเบอร์เจอร์รอน จะแทนส่วนประกอบของ L และC ในแบบการจำลองแบบพาย อยู่ใน ้ลักษณะแบบกระจายซึ่งไม่ใช้ตัวแปรแบบเป็นก้อนเหมือนกับแบบการจำลองพาย โดยจะเทียบเท่า ้ได้กับการใช้แบบการจำลองแบบพายจำนวนมากไม่มีที่สิ้นสุด ยกเว้นความต้านทานจะถูกแทนแบบ ้เป็นก้อน ซึ่งแบบการจำลองนี้สามารถแทนความถี่มูลฐานถูกต้อง และสามารถแทนอิมพีแคนซ์ที่ ้ความถี่อื่นๆ ได้อีกด้วย ยกเว้นเรื่องการสูญเสียซึ่งจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง โดยในการวิเคราะห์นี้มี ้ความยาวของสายส่งที่สั้นจึงไม่มีผลกระทบมาก แต่ต้องระมัคระวังเรื่องเวลาในระหว่างการคำนวน แต่ละขั้น เนื่องจากการจำลองแบบเบอร์เจอร์รอนจะอาศัยทฤษฎีกลื่นเดินทาง และจะมีข้อจำกัดอยู่ที่ ้ความยาวของสายส่งที่สั้นที่สุดที่สามารถใช้ได้ นั่นคือเวลาการเดินทางจำเป็นต้อง≥ เวลาในแต่ละ ขั้น (time step) เช่นเวลาในแต่ละขั้นที่ 50 μs จะใช้กับความยาวนี้ที่ประมาณ 15 km ส่วนสายส่งที่ ้สั้นกว่านี้ การจำลองแบบพายจะเหมาะสมมากกว่าแบบการจำลองนี้ ดังนั้นเวลาการเดินทางของ ้ความยาวสายป้อนที่ใช้ในการวิเคราะห์คือสายเคเบิ้ลใต้ดิน ซึ่งมีความยาวประมาณ 350 เมตร ้ จำนวน 2 วงจร และสายเคเบิ้ลอากาศมีความยาวประมาณ 2,400 เมตร จำนวน 2 วงจร จะได้เวลาใน แต่ขั้นของการคำนวณมากที่สุดคือ 5,500 / $3 ext{x} 10^{8}$ = 18.3333 $\mu ext{s}$ เพื่อให้เห็นผลของการสะท้อนของ คลื่นที่ปลายสายเคเบิ้ลใต้ดิน

1.2.1 การจำลองสายเกเบิ้ลใต้คิน จะใช้การจำลองเป็นชนิคระบบแกนเกเบิ้ลเคี่ยว3 เฟส 2 วงจรในเคเบิลพารามิเตอร์ ของโปรแกรม ATP โคยมีองค์ประกอบและข้อมูลคังภาพข้างล่าง



<u>ภาพที่ 75</u> แบบจำลองสายเคเบิ้ลใต้ดิน ด้วยโปรแกรม ATP

- (a) แบบจำลองสายเคเบิ้ลใต้ดิน (b) องค์ประกอบของสายเคเบิ้ลใต้ดิน
- (c) การกำหนดค่าการจำลอง

Cable <u>n</u> umber: 1	€ <u>P</u> as	te <u>C</u> opy	
	CORE	SHEATH	B5 [m] 0 019724
Rin [m]	E	0.017195	
Rout [m]	0.011695	0.017424	☑ <u>O</u> n <u>G</u> round
Rho (ohm*m)	1.7241E-8	1.7E-8	Sheath
mu	1	1	
mu (ins)	1	1	 🗖 <u>O</u> n 🗖 <u>G</u> round
eps (ins)	2.3	2.3	Position Vertical [m] 0.9182133
			Horizontal [m] -0.2635734

<u>ภาพที่ 75</u> (ต่อ)

(d) การกำหนดค่าองค์ประกอบสายเคเบิ้ลใต้ดิน

1.2.2 การจำลองสายส่งเหนือคิน จะใช้การจำลองเป็นชนิดระบบแกนเคเบิ้ลเคี่ยว3 เฟส 2 วงจรในเคเบิลพารามิเตอร์ ของโปรแกรม ATP โดยมีองค์ประกอบและข้อมูลดังภาพข้างล่าง



<u>ภาพที่ 76</u> แบบจำลองของสายส่งเหนือดิน ด้วยโปรแกรม ATP (a) แบบจำลอง (b) องค์ประกอบของสายส่งเหนือดินในแบบจำลอง (c) ข้อมูลการจำลองของสายส่งเหนือดิน

1		copy	Total radius
	CORE		<u>B</u> 3 [m] 0.00985
Rin [m]	0		
Rout [m]	0.00775		🔽 🖸 n 🗖 Ground
Rho (ohm*m)	2.8264E-8		Sheath
mu	1		
mu (ins)	1		
eps (ins)	2.3		Position Vertical [m] 9.77

(d)

<u>ภาพที่ 76</u> (ต่อ)

(d) ข้อมูลองค์ประกอบสายส่งเหนือคิน

1.3 การจำลองสวิตช์และเบรกเกอร์ สวิตช์ใน ATP จะมีอยู่ด้วยกัน 3 กลุ่มใหญ่คือ

 1.3.1 สวิตช์สเตติสติกอล (Statistical switches) การ์ดสวิตช์จะต้องการตัวแปร เกี่ยวกับสถิติเพิ่มเติม เพื่อเจาะจงพฤติกรรมของ สวิตช์ ซึ่งสวิตช์เหล่านี้จะมีการปิดอยู่ด้วยกัน 2 ประเภท คือ แบบสถิติ (STATISTIC) และแบบเป็นระบบ (SYSTEMATIC)

 1.3.2 สวิตช์ควบคุม TACS (TACS - controlled switches) การ์คสวิตช์จะต้องการ ตรรกะควบคุม TACS เพิ่มเติม เพื่อกำหนดพฤติกรรมของสวิตช์ ซึ่งสวิตช์เหล่านี้จะมีการปีดอยู่ ด้วยกัน 3 ประเภท คือ แบบ type- 11, แบบ type- 12 และแบบ type- 13

1.3.3 สวิตช์สแตนด์อโลน (Stand- alone switches) การ์ดสวิตช์เพียงอย่างเดียว เพียง พอที่จะกำหนดพฤติกรรมของสวิตช์ ซึ่งสวิตช์เหล่านี้จะมีการปิดอยู่ด้วยกัน 3 ประเภท คือ แบบ กวบกุมด้วยเวลา (Time- controlled switch)การปิดจะถูกกวบกุมด้วยเวลา แต่การเปิดจะขึ้นอยู่กับ กระแส, แบบกวบกุมด้วยแรงดัน (Voltage- controlled หรือ flashover- controlled) การปิดจะขึ้นอยู่ กับแรงดัน แต่การเปิดจะขึ้นอยู่กับกระแส และแบบที่ใช้ในการวัด (Measuring switch) จะมีการปิด อยู่ตลอดเวลา โดยในที่นี้จะกล่าวเพียงสวิตช์แต่สวิตช์แบบกวบกุมด้วยเวลาเท่านั้น

สวิตช์นี้บ่อยครั้งจะเริ่มเหมือนขั้วของเบรกเกอร์ คือมีการเปิดในสภาวะเริ่มแรก นอกจาก T_{close} < 0 โดยการปิดและการเปิดของสวิตช์จะถูกควบคุมด้วยเวลา และกระแส ซึ่งสวิตช์ จะทำการปิดที่ t = T_{close} และจะพยายามเปิดอีกครั้งที่ t \geq T_{open} เมื่อไรก็ตามที่พบสภาวะกระแส โดยขึ้นอยู่กับค่าของ I_e (ขอบกระแส) โดยสภาวะการเปิดที่พิเศษนี้ จะมีค่าเป็นไปได้คือ I_e = 0 และ I_e \neq 0

ก. I_E = 0 (ไม่มีขอบกระแส) สวิตช์จะทำการเปิดที่ t ≥ T_{OPEN} ทันทีที่กระแส
สวิตช์ i_{switten} ผ่านศูนย์ จนเปลี่ยนสัญญาณ หลังจากที่เปิดสำเร็จ สวิตช์จะเปิดค้าง ซึ่งสวิตช์นี้ไม่
สามารถจำถองการรีสไตท์ได้ในสวิตช์ชนิดนี้



<u>ภาพที่ 77</u> สภาวะการเปิดของสวิตช์ เมื่อ $I_e = 0$ ที่มา: EMTP User Group (1992)

บ. I_e≠ 0 (มีการตั้งค่าขอบกระแส) สวิตช์จะทำการเปิดที่ t ≥ T_{OPEN} ทันทีที่
ขนาดของกระแสสวิตช์ i_{switten} < I_e หลังจากที่เปิดสำเร็จ สวิตช์จะเปิดก้าง



<u>ภาพที่ 78</u> สภาวะการเปิดของสวิตช์ เมื่อ I_e \neq 0 ที่มา: EMTP User Group (1992)

 1.4 การจำลองหม้อแปลง หม้อแปลงในกรณีศึกษาจะแบ่งการจำลอง เป็น 2 คุณลักษณะ โดยคุณลักษณะแรกจะทำการจำลองหม้อแปลงโดยไม่ใส่คุณลักษณะการอิ่มตัวเพื่อใช้วิเคราะห์ สภาวะชั่วครู่ และอย่างที่ 2 จะเพิ่มคุณลักษณะการอิ่มตัวในหม้อแปลงเพื่อใช้วิเคราะห์เฟอร์โรเร โซแนนซ์ โดยใช้หม้อแปลง 3 เฟสที่สนับสนุนการอิ่มตัว

หม้อแปลงที่สนับสนุนการอิ่มตัวในโปรแกรม ATP แบบ 3 เฟสมีการจำลองเป็น 2 ลักษณะคือ แบบแกนล้อมขดลวด 3 ขา หรือแบบขดลวดล้อมแกน 5 ขา(3- leg shell- type or 5leg core- type transformers) และแบบขดลวดล้อมแกน 3 ขา (3- leg core- type transformer) โดย หม้อแปลง 3 เฟสแบบแกนล้อมขดลวด 3 ขา หรือแบบขดลวดล้อมแกน 5 ขา จะเป็นหม้อแปลง แบบความด้านทานแม่เหล็กขั้วเหมือนต่ำ (low homopolar reluctance) แกนเหล็กจะเป็นเส้นทาง สำหรับกลับคืนของฟลั๊กลำดับศูนย์ ซึ่งเหมาะที่จะสมมุติให้ความเหนี่ยวนำแม่เหล็กของ 3 เฟสเป็น อิสระ โดยตัวแปรลำดับศูนย์จะเหมือนกันกับตัวแปรลำดับบวก ด้วยเหตุผลนี้จึงต้องการเส้นโด้ง การอิ่มตัวของขาเพียงหนึ่งแกนเท่านั้น และมีความเหมาะสมที่จะจำลองหม้อแปลงชนิดนี้โดยใช้ การแยกออก 3 ส่วนเหมือนกับหม้อแปลงเฟสเดียว


<u>ภาพที่ 79</u> แบบจำลองหม้อแปลง 3 เฟสแบบความต้านทานแม่เหล็กขั้วเหมือนต่ำเชื่อมต่อ แบบเคลตา-วายลงคิน ที่มา: EMTP User Group (1992)

หม้อแปลง 3 เฟสที่สนับสนุนการอิ่มตัวแบบขดลวดล้อมแกน 3 ขา จะมีค่าความ ด้านทานแม่เหล็กขั้วเหมือนสูง เนื่องจากฟลั๊คลำดับศูนย์จะถูกบังคับให้กับคืนผ่านอากาศ และตัวถัง ภายนอกการพันขดลวด เนื่องจากมีช่องว่างอากาศ โดยเส้นโค้งคุณสมบัติแม่เหล็กลำดับศูนย์ เกือบจะเป็นเชิงเส้น ไม่เหมือนกับเส้นโค้งคุณสมบัติแม่เหล็กลำดับบวกที่ไม่เป็นเชิงเส้นอย่างมาก ดังนั้นจึงสามารถประมาณเส้นโค้งคุณสมบัติแม่เหล็กลำดับศูนย์เป็นความเหนี่ยวนำแม่เหล็กแบบ เชิงเส้น คุณลักษณะการจำลองของหม้อแปลงชนิดนี้ตรงกับหม้อแปลงในกรณีศึกษา โดยมี แบบจำลอง และรายละเอียดข้อมูลการจำลองหม้อแปลง ดังรูปข้างล่าง



<u>ภาพที่ 80</u> แบบจำลองหม้อแปลง 3 เฟสแบบความต้านทานแม่เหล็กขั้วเหมือนสูงเชื่อมต่อ แบบวาย-วาย

ຄື່ມາ: EMTP User Group (1992)

Component: GenTra	ifo.sup			X
Attributes Characte	eristic			
lo= 0.1493409	Fo= 31.2	Rm= 661200	R0= 964500	I 3-leg core
Vrp= 12	Rp= 19.456746	Lp= 127.41963	^A .↓ C	
Secondary Vrs= 0.24	Rs= 0.0233826	Ls= 0.1531300;	^C ii) <u>I</u> , A B ^{XII} Y	•
				🦵 3-wind.
Group No: 0			La <u>b</u> el:	
Co <u>m</u> ment:				
Output				∏ Hi <u>d</u> e
0 - No	•			∟ Lock
-0-		<u>o</u> K	<u>C</u> ancel	Help

<u>ภาพที่ 81</u> การจำลองหม้อแปลง 3 เฟสแบบขคลวคล้อมแกน 3 ขา 2 ขคลวค

[A]rms	U (V)rms	Add
00057700	2608.695652	Dalaha
0.00657799	5217.391304	
0.030647435	10/3/ 78261	- <u>S</u> ort
0.050000420	10956.52174	
	11217.3913	- 1
).081552131	11478.26087	Move
).105546846	12000	↓
).849999052	12521.73913	1 —
le \$Include: C:\EEUG01\ATPI Save Copy	RAW\ust Browse In Include charac	teristic

<u>ภาพที่ 82</u> การจำลองกุณลักษณะการอิ่มตัว(I,V) ในแบบจำลองหม้อแปลง เพื่อใช้วิเคราะห์ เฟอร์ โรเร โซแนนช์



<u>ภาพที่ 83</u> เส้นโค้งคุณลักษณะการอิ่มตัว (I,V) เพื่อใช้วิเคราะห์เฟอร์โรเรโซแนนซ์

1.5 การจำลองเครื่องล่อฟ้า แบบจำลองของเครื่องล่อฟ้าใน ATP เป็นแบบซิงค์ ออกไซด์ (zinc- oxide surge arrester ;ZnO) แต่ก็มีการประยุกต์จำนวนหนึ่งในการแทนแบบจำลองให้เครื่อง ล่อฟ้าแบบซิลิคอนคาร์ใบค์ silicon carbide (SiC) arresters, อย่างจริงจัง แต่ไม่ได้รับการยอมรับ เนื่องจากมีการทำโดยการประมาณ ไม่มีพลวัดของช่องว่างที่เตรียมไว้ ดังนั้นความเป็นไปได้ของ การใช้นั้นจะไม่กล่าวถึง แต่ในส่วนประกอบสำคัญนั้นจะแทนบล็อคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีความ ถูกต้องมากในเทอมของเอคโปเนนเทียล สองส่วนที่จัดเตรียมไว้พอดี โดยไม่สนใจพลวัตทั้งหมด ของช่องว่าง ซึ่งในส่วนของการจำลองช่องว่างที่จำลองหลังจากการวาบไฟตามผิว ซึ่งในด้นฉบับ ของ EMTP มีการจำลองเครื่องล่อฟ้าแบบซิลิคอนการ์ไบด์ (type 94 branches) ยังคงมีอยู่ แต่สิ่งที่ ได้จากข้อมูลนั้นมีความซับซ้อน และไม่มีเอกสารสนับสนุนเพียงพอ ดังนั้น การสนับสนุนของ แบบจำลองนี้จึงถูกยกเลิก

สมการการบังคับพื้นฐานสำหรับเครื่องล่อฟ้าแบบซิงค์ออกไซด์ (zinc- oxide surge arrester ;ZnO) ที่จำลองคือ ความต้านทานแบบไม่เป็นเชิงเส้นอย่างมากแบบเอคโปเนนเทียลคือ

$$i = p(v/V_{ref})^{q}$$
(18)

เมื่อ i คือกระแสเครื่องล่อฟ้า, v คือแรงคันเครื่องล่อฟ้า p, V_{ref} และ q คือค่าคงที่ได้ จากอุปกรณ์ โดยส่วนมากแรงคันอ้างอิง V_{ref} จะให้เป็นสองเท่าของแรงคันที่กำหนด แต่ในทฤษฎี การเลือกแรงคันอ้างอิงนี้ไม่มีกฎเกณฑ์แน่นอนเนื่องจากเป็นตัวแปรพิเศษ อย่างไรก็ตาม การเลือก แรงคันอ้างอิงที่ดีจะทำให้สมการเป็นปกติ ซึ่งจะป้องกันการไหลเกินอย่างมากในช่วงเอคโปเนน เทียล เนื่องจากคุณลักษณะของ ZnO ไม่เป็นเชิงเส้นอย่างยิ่ง กระแสเพียงเล็กน้อยสามารถที่จะดึง แรงคันให้ต่ำกว่าแรงคันที่กำหนดได้ เช่น 0.5³⁰ = 9E-10 คังนั้น เพื่อหลีกเลี่ยงความเป็นไปได้ของ การไหลต่ำมากในช่วงเอคโปเนนเทียล และเพื่อเร่งการแก้ปัญหาทางตัวเลข แบบจำลองเชิงเส้นที่ ถูกใช้อย่างแท้จริงจะใช้กับแรงคันต่ำ และกระแสต่ำ ซึ่งจะเรียกบริเวณนี้เป็นบริเวณของกระแสการ รั่ว แต่สิ่งนี้จะถูกซ่อนไว้ โดยผู้ใช้สามารถนำสัญญาณออกมาได้ คุณลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้น V- I ของเครื่องล่อฟ้าสามารถถูกประมาณโดยส่วน เอคโปเนนเทียล จำนวนตามที่ต้องการ โดยสามารถแทนในเครื่องล่อฟ้าแบบมีช่องว่าง และไม่มี ช่องว่าง ซึ่งความแตกต่างนี้จะถูกทำผ่านการระบุของ VFLASH โดยช่องว่างของเครื่องล่อฟ้าจะ ต้องการ การระบุของ 2 คุณลักษณะ (I, V) ก่อน และหลังจากการวาบไฟตามผิว ในขณะที่เครื่องล่อ ฟ้าแบบไม่มีช่องว่างต้องการเฉพาะคุณลักษณะ (I, V) ก่อนการวาบไฟตามผิว โดยผู้ใช้สามารถ ระบุ(I, V) คำนวณเอคโปเนนเทียลที่เหมาะสม ซึ่งคุณลักษณะนี้จะผ่านอย่างอัติโนมัติทางส่วน สนับสนุนงาน ARRDAT ที่แยกออกมา

Component: Mov Attributes Chara	_ 3.sup acteristic				×
DATA	VALUE		DDE	PHASE	NAME
Vref	14843.30271	Fr	om	ABC	
Vflash	-1	To)	ABC	
Vzero	0			•	
COL	1				
SER	1				
ErrLim	0.01				
<u>G</u> roup No: 0				La <u>b</u> el: MOVS	KV
Co <u>m</u> ment:					
Output	Energy 💌				□ Hi<u>d</u>e □ Lock
-mov-	_	<u>0</u> K		<u>C</u> ancel	<u>H</u> elp

<u>ภาพที่ 84</u> การจำลองเครื่องล่อฟ้า

I [A]	U [V]	▲ <u>A</u> dd
0004115	14552.57	
1.07	15158.92	<u> </u>
5.07	15/84.84	<u>S</u> ort
5.30	10037.8	
506	18268.95	<u>+</u>
1110	19266.5	Move
9990	24195.6	+
<		• <u> </u>
-ile		
\$Incl <u>u</u> de:	Browse Include characte	eristic
1	1 1	

<u>ภาพที่ 85</u> คุณลักษณะ (I,V) ในการจำลองเครื่องล่อฟ้า



<u>ภาพที่ 86</u> เส้นโค้งคุณลักษณะ(I,V) ในการจำลองเครื่องล่อฟ้า

จากเนื้อหาที่กล่าวมาสามารถสร้างแบบจำลอง, ผลการจำลอง เพื่อใช้วิเคราะห์แรงคันเกิน เนื่องจากสภาวะชั่วครู่ โดยทำการปิดสวิตช์ BZ14-1H ที่ก่ายอคคลื่นในแต่ละเฟสเพื่อวิเคราะห์ดู พลังงานที่เกิดขึ้นของเครื่องล่อฟ้าด้วยคปรแกรม ATP ร่วมกับโปรแกรม PSCAD ได้ดังภาพข้างล่าง



<u>ภาพที่ 87</u> การจำลองเพื่อวิเคราะห์แรงดันเกินเนื่องจากสภาวะชั่วครู่ โดยทำการปิดสวิตช์ BZ14-1H ที่ค่ายอดกลื่นทีละเฟสด้วยโปรแกรม ATP

ATP Settings	X
Simulation Output Switch/U	IM Format Record Variables
delta T: 1E-5 Imax: 1 Xopt: 0 Copt: 0	Simulation type ⓒ Time domain ⓒ Frequency scan ⓒ <u>H</u> armonic (HFS) ☐ Power Frequency
<u>O</u> K <u>H</u> elp	

<u>ภาพที่ 88</u> การตั้งค่าการจำลองในโปรแกรม ATP เพื่อวิเคราะห์แรงคันเกินเนื่องจากสภาวะชั่วครู่

ATP Settings	×
Simulation Output Sw	itch/UM Format Record Variables
Model: Check_V1 Check_V2 Check_V3 SW_B SW_R SW_R SW_Y	V ariable: SwB Count
▲dd Record: Check, V1.tipA AS tripA Check, V2.tipB AS tripB Check, V3.tipC AS tripC SW_R.SwR AS SwR SW_Y.SwY AS SwY	Alias=
<u> </u>	p

<u>ภาพที่ 89</u> การบันทึกข้อมูลการจำลองในโปรแกรม ATP เพื่อวิเคราะห์แรงคันเกิน เนื่องจากสภาวะชั่วครู่

MODEL: SW_Y	1				X
DATA	VALUE		NODE	PHASE	NAME
Step	5.55E-5		SwY	1	
Shift	0.111666667				
Group No: C				La <u>b</u> el: Y	
- Models					
Models					∏ Hi <u>d</u> e
Model <u>f</u> ile:	C:\EEUG01\ATPDraw\}	fod': <u>Brow</u> se	Use As:	SW_Y	📕 🗖 Lock
MOD		<u>0</u> K		<u>C</u> ancel	<u>H</u> elp

<u>ภาพที่ 90</u> แบบจำลองการควบคุมการเปิด-ปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ในโปรแกรม ATP เพื่อ วิเคราะห์แรงดันเกินเนื่องจากสภาวะชั่วครู่



<u>ภาพที่ 91</u> การเขียนโปรแกรมควบคุมการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ในแบบจำลอง ด้วย โปรแกรม ATP

MODEL: CHECK_V3				×
DATA V check 2	'ALUE 4451.98948	NODE InC tripC	PHASE C 1	NAME
Group No: 0			La <u>b</u> el:	
Models Model file: C:\EEUG01	\ATPDraw\Mod\i Brows	se Use As:	Check_V3	Г Hi <u>d</u> e Г Lock
	<u> </u>		<u>C</u> ancel	<u>H</u> elp

<u>ภาพที่ 92</u> การป้อนค่าในแบบจำลองตรวจสอบแรงคันที่มากกว่าแรงคันในระบบ 1.5 p.u. เฟส B



<u>ภาพที่ 93</u> การเขียนโปรแกรมควบคุมการตรวจสอบแรงคันเกินที่มากกว่าแรงคันในระบบ 1.5 p.u. เฟส B

TACS: DIV2			×
Attributes			
1			
	NODE	PHASE	NAME
	IN_1	С	
	IN_2	1	
	I OUT	1	
Course Nava 0	,		
Group No: Jo		La <u>b</u> el:	
Comment:			
			∏ Hi <u>d</u> e
			-
			Lock
×			
	OK	Cancel	Help
ا تقار_ ا			

<u>ภาพที่ 94</u> แบบจำลองการหารแรงคันเพื่อวัคผลแรงคันในระบบให้เป็นเปอร์ยูนิต

TACS: DC_01					×
Attributes					
DATA	VALUE	Г	NODE	PHASE	NAME
Ampl.	9634.659655	1	SOURCE	1	
T_sta	0	1			_
T_sto	10	1			
		-			
Group No: 0				La <u>b</u> el:	
Comment					
Comment: J					
					∏ Hi <u>d</u> e
					F Lock
					L Foor
		<u>0</u> K	1	Cancel	Help
_					

<u>ภาพที่ 95</u> การป้อนค่าในแบบจำลองแหล่งกำเนิดกระแสตรงเพื่อเป็นตัวหารแรงดันในการวัดผล แรงดันในระบบให้เป็นเปอร์ยูนิต



<u>ภาพที่ 96</u> แรงคันจากการจำลองด้วยโปรแกรม ATP เพื่อวิเคราะห์แรงคันเกินเนื่องจากสภาวะชั่วครู่



<u>ภาพที่ 97</u> ผลการบันทึกข้อมูการจำลองด้วยโปรแกรม ATP เพื่อวิเคราะห์แรงดันเกิน เนื่องจากสภาวะชั่วครู่



<u>ภาพที่ 98</u> พลังงานในเครื่องล่อฟ้าจากการจำลองด้วยโปรแกรม ATP เพื่อวิเคราะห์แรงดันเกิน เนื่องจากสภาวะชั่วครู่



<u>ภาพที่ 99</u> การจำลองเพื่อวิเคราะห์แรงคันเกินเนื่องจากสภาวะชั่วครู่ โดยทำการปิดสวิตช์ BZ14-1H ที่ค่ายอดคลื่นทีละเฟสด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 100</u> แรงดันจากการจำลองด้วยโปรแกรม PSCAD เพื่อวิเคราะห์แรงดันเกิน เนื่องจากสภาวะชั่วครู่



<u>ภาพที่ 101</u> พลังงานในเครื่องล่อฟ้าจากการจำลองด้วยโปรแกรม PSCAD เพื่อวิเคราะห์แรงดันเกิน เนื่องจากสภาวะชั่วครู่

จากผลการจำลองพบว่าแรงคันเกินและพลังงานที่เกิดขึ้นในช่วงสภาวะชั่วครู่ด้วยโปรแกรม ATP และโปรแกรม PSCAD มีค่าน้อยและเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาไม่นานจึงไม่ใช่สาเหตุที่ทำให้ เครื่องล่อฟ้าเกิดความเสียได้เนื่องจากพลังงานที่เครื่องล่อฟ้าได้รับน้อยกว่า 4.7 kJ/kV ของแรงคัน เกินสูงสุดต่อเนื่องตามภาพผนวก ข ข้อมูลเครื่องล่อฟ้าภาพผนวกที่ ข1 จึงต้องทำการวิเคราะห์ แรงคันเกินเนื่องจากเฟอร์โรเรโซแนนช์เพื่อศึกษาพลังงานที่เครื่องล่อฟ้าได้รับ

2. การวิเคราะห์แรงดันเกินเนื่องจากเฟอร์โรเรโซแนนช์

การวิเคราะห์แรงคันเกินเนื่องจากภาวะชั่วครู่พบว่าพลังงานที่เกิดขึ้นภายในเครื่องล่อฟ้าไม่ สามารถทำให้เครื่องล่อฟ้าได้รับความเสียหาย จึงจำเป็นต้องเพิ่มคุณลักษณะการอิ่มตัวของหม้อ แปลงเพิ่มในแบบจำลองหม้อแปลงของโปรแกรม ATP และโปรแกรม PSCAD โดยยังมีลักษณะ การต่อวงจรในระบบจำหน่ายคงเดิม มีลำดับขั้นตอนการเปิด-ปิดสวิตช์ ในกรณีที่ 2 ครั้งที่ 2 และผล การวัดทางภาคสนามเมื่อทำการเปิด-ปิดสวิตช์ขณะมีเครื่องล่อฟ้าอยู่ในระบบส่งผลให้เกิดความ เสียหายต่อเครื่องล่อฟ้า เฟส R มาเป็นกรณีศึกษาในการจำลองดังภาพ, ตารางและผลการวัดทาง ภาคสนามข้างล่าง

. д	ลักษณะ	หมายเลข	o montorio de la compañía de la comp
νı	การปฏิบัติงาน	อุปกรณ์	าดยำกวรยุงผ
1	Tie	D714D700 111	ให้ Bay 2 กับ Bay 1 ร่วมง่ายโหลดสายป้อนจาก
1	BZ14BZ22-1H	BZ14BZ22-1H	BZ14BZ22-1H ถึง BZ1H-2H
2	(a)	D714 011	ให้ Bay 2 จ่ายโหลดสายป้อนจาก BZ14BZ22-1H ถึง
2	เปิด	BZ14-2H	BZ14H-2H แทน Bay 1 ทั้งหมด
3	เปิด	BZ14 (CB)	คับไฟสายป้อนช่วง BZ14 ถึง BZ14-2H
4	เปิด	BZ14-1H	แยกวงจรสายเคเบิ้ลใต้ดินออกจากสายเคเบิ้ลอากาศ
5	ปิด	BZ14-2H	จ่ายไฟย้อนเข้ามาเพื่อทคลองปิด
6	สือหาก	D714 111	ทคลองปิคเกิคเฟอร์โรเรโซแนน์ เครื่องล่อฟ้าเฟส R
0	ШүГҮ-В-К	BZ14-1H	ได้รับความเสียหาย
7	เปิด	BZ14-2H	ดับไฟสายป้อนเพื่อถอดเครื่องถ่อฟ้า
8	เปิด	BZ14-1H	แยกวงจรสายเคเบิ้ลใต้ดินออกจากสายเคเบิ้ลอากาศ
11	ปิด	BZ14-2H	จ่ายไฟย้อนให้สายเคเบิ้ลอากาศ
12	ปิด	BZ14-1H	จ่ายไฟย้อนให้สายเคเบิ้ลใต้คิน
13	ปิด	BZ14 (CB)	จ่ายไฟคืนให้สายป้อนที่ 1
14	เปิด	BZ14BZ22-1H	แยกการจ่ายโหลดจากสายป้อนทั้ง 2

<u>ตารางที่ 13</u> ลำดับขั้นตอนการการทดลองปลดสายป้อนเพื่อง่ายโหลดคืนในกรณีศึกษา

ที่มา: การไฟฟ้านครหลวง (2547)



(a)







(c)

<u>ภาพที่ 102</u> แรงคันขณะปีคสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y จากการวัคทางภาคสนาม

(a) แรงคันขณะปิคสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 192.6 °

(b) แรงคันขณะปิคสวิตช์ BZ14-1H เฟส B ที่มุม 199.8 °

```
(c) แรงคันขณะปิคสวิตช์ BZ14-1H เฟส R ที่มุม 180 °
```

```
ที่มา: การไฟฟ้านครหลวง (2547)
```

โดยเมื่อเพิ่มคุณลักษณะการอิ่มตัวของหม้อแปลง และมุมการปิดสวิตช์ BZ14-1H ทั้ง 3 เฟส โดยใช้โปรแกรม ATP ร่วมกับโปรแกรม PSCAD ได้ผลการจำลองดังภาพข้างล่าง



<u>ภาพที่ 103</u> การจำลองเพื่อวิเคราะห์แรงคันเกินเนื่องจากเฟอร์ โรเร โซแนนช์ ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 104</u> แรงคันจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 192.6 ° ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 106</u> แรงคันจากการปิคสวิตช์ BZ14-1H เฟส B ที่มุม 199.8 ° ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 107</u> พลังงานในเครื่องล่อฟ้าจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส B ที่มุม 199.8 ° ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 108</u> แรงคันจากการปิคสวิตช์ BZ14-1H เฟส R ที่มุม 180 ° ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 109</u> พลังงานในเครื่องล่อฟ้าจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส R ที่มุม 180° ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 110</u> การจำลองเพื่อวิเคราะห์แรงดันเกินเนื่องจากเฟอร์ โรเร โซแนนช์ ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 111</u> แรงคันจากการปิคสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 192.6 ° ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 112</u> พลังงานในเครื่องล่อฟ้าจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 192.6 ° ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 113</u> แรงคันจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส B ที่มุม 199.8 ° ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 114</u> พลังงานในเครื่องล่อฟ้าจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส B ที่มุม 199.8 ° ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 115</u> แรงดันจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส R ที่มุม 180 ° ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 116</u> พลังงานในเครื่องล่อฟ้าจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส R ที่มุม 180° ด้วยโปรแกรม PSCAD

จากผลการจำลองในกรณีศึกษาพบว่าการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y และ B ทำให้เครื่อง ล่อฟ้าเฟส R ได้รับแรงดันเกิน และพลังงานในเครื่องล่อฟ้าที่สูงอย่างต่อเนื่อง ทั้ง 2 ครั้ง ส่งผลให้ เครื่องล่อฟ้าเฟส R ได้รับความเสียหาย เนื่องจากได้รับพลังงานเกินกว่าตามที่ผู้ผลิตระบุ จึงต้องทำ การสำรวจทางเลือกในการระงับผลเฟอร์ โรเรโซแนนซ์

3. การสำรวจทางเลือกในการระงับผลเฟอร์โรเรโซแนนซ์

หลักในการระงับผลเพื่อไม่ให้เกิดปัญหาแรงคันเกินเฟอร์โรเรโซแนนซ์ คือการสร้าง สภาวะที่ไม่เหมาะสมให้เกิดการสร้างวงจรเฟอร์โรเรโซแนนซ์ขึ้น โดยจากกรณีศึกษาสามารแยก ปัจจัยต่างๆที่ส่งผลให้เกิดแรงคันเกินเฟอร์โรเรโซแนนช์ เพื่อใช้ในการพิจารณาการสำรวจทางเลือก ได้ดังตารางข้างล่าง

	ปัจจัยต่างๆที่ส่งผลให้เกิดแรงดันเกินเฟอร์ โรเร โซแนนช์		ะที่อยู่ใน
ที่			ะบบ
		มี	ไม่มี
1	สวิตช์		
	1.1 การเปิด-ปิดโดยใช้อุปกรณ์แบบ 1 เฟส	Х	
	1.2 มุมเฟสในการสวิตช์	Х	
	1.3 ตำแหน่งการสวิตช์ (บริเวณสายเคเบิ้ลใต้ดินและหม้อแปลง)	Х	
	1.4 ขั้นตอนการสวิตช์	Х	
2	ระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบ		
	2.1 ระดับแรงดันสูง	Х	
	2.2 ระดับแรงดันต่ำ		Х
3	สายส่ง		
	3.1 ชนิดของสายส่ง (สายเกเบิ้ลใต้ดินและสายเกเบิ้ลอากาศ)	Х	
	3.2 ขนาดของสายส่ง (400 ตร.ม)	Х	
	3.3 ความยาวของสายส่งในระบบ(เคเบิ้ลใต้ดิน 350 เมตร, เคเบิ้ล		
	อากาศ 2,400 เมตร จำนวนอย่างละ 2 วงจร)	Х	
4	ติดตั้งเกรื่องล่อฟ้า		
	4.1 ระดับแรงดันสูง	Х	
	4.2 ระดับแรงดันต่ำ		Х

<u>ตารางที่ 14</u> ปัจจัยต่างๆที่ส่งผลให้เกิดแรงคันเกินเฟอร์ โรเร โซแนนช์

<u>ตารางที่ 14</u> (ต่อ)

ู่นี้ม	ปัจจัยต่างๆที่ส่งผลให้เกิดแรงดับเกิบเฟอร์โรเรโซแบบช์	ลักษณะที่อยู่ในระบบ	
••			ไม่มี
5	ติดตั้งชุดตัวเก็บประจุ		
	5.1 ระดับแรงดันสูง		Х
	5.2 ระดับแรงดันต่ำ		Х
6	หม้อแปลง		
	6.1 ขนาคหม้อแปลงไฟฟ้า (112.5 kVA)	Х	
	6.2 โหลดของหม้อแปลงน้อย	Х	
	6.3 การเชื่อมต่อขคลวคหม้อแปลงทางค้านปฐมภูมิแบบไม่ลงคิน	Х	
	6.4 การจ่ายไฟให้หม้อแปลงไฟฟ้าหลายเครื่อง		Х

เมื่อพิจารณาข้อมูลในระบบที่ทำการศึกษา และปัจจัยต่างๆที่ส่งผลให้เกิดแรงดันเกิน เฟอร์โรเรโซแนนซ์ พบว่าองก์ประกอบหลักของการเกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์จะ ด้องมืองก์ประกอบ หลักใหญ่ๆ ด้วยกัน คือความไม่เป็นเชิงเส้นของก่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าบนแกนเหล็กของหม้อ แปลงและการอิ่มตัว ความเป็นเชิงเส้นของก่าความจุไฟฟ้าที่เหมาะสม และการใช้อุปกรณ์ปัด-เปิด ที่กระทำบนพื้นฐานเฟสเดียวในระบบ 3 เฟส ซึ่งสามารถหาวิธีการระงับผลจากปัจจัยทั้ง 3 องก์ประกอบได้คือ การปรับเปลี่ยนที่หม้อแปลง, การปรับเปลี่ยนที่สายส่ง และการปรับเปลี่ยนที่ ขั้นตอนลำดับการสวิตช์

3.1 การปรับเปลี่ยนที่หม้อแปลง หม้อแปลงบริการที่จ่ายไฟให้ภายในสถานีไฟฟ้า เมื่อ พิจารณาการเชื่อมต่อของหม้อแปลงกับสายเคเบิ้ลใต้ดินและสายเคเบิ้ลอากาศ ร่วมกับการปิดสวิตช์ BZ14-1H ทีละเฟส โดยไม่มีการจ่ายไฟจากเบรกเกอร์ BZ14 จึงทำให้หม้อแปลงได้รับการจ่ายไฟ จากสายป้อนชุดที่ 1 ทีละเฟส ส่งผลให้เกิดการสร้างวงจร LC และกระตุ้นให้เกิด ปรากฏการณ์ เฟอร์ โร เรโซแนนซ์ขึ้นในระบบได้ ดังนั้นจึงสามารถสร้างทางเลือกได้ 2 วิธี คือ วิธีการแรกทำการ แยกหม้อแปลงออกจากการเชื่อมต่อสายเคเบิ้ลใต้ดินและสายเคเบิ้ลอากาศออกจากกันผ่านเบรก เกอร์ที่ต่อโดยเฉพาะต่างหาก (CB15) และวิธีที่ 2 โดยทำการต่อโหลดให้หม้อแปลงเพิ่มทางด้าน ทุติยภูมิ โดยทั้ง 2 วิธีมีลำดับขั้นตอนและมุมการปิดสวิตช์ คงเดิม 3.1.1 การแยกหม้อแปลงออกจากการเชื่อมต่อสายเกเบิ้ลใต้ดินและสายเกเบิ้ลอากาศ ออกจากกันผ่านเบรกเกอร์ที่ต่อโดยเฉพาะ โดยให้หม้อแปลงได้รับการจ่ายไฟผ่านเบรกเกอร์ CB15 จะได้แบบจำลองและผลการจำลองดังภาพข้างล่าง



<u>ภาพที่ 117</u> การจำลองกรณีการแยกหม้อแปลงออกจากการเชื่อมต่อสายเกเบิ้ลใต้ดินและ สายเกเบิ้ลอากาศออกจากกันผ่านเบรกเกอร์ที่ต่อโดยเฉพาะ ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 118</u> แรงคันจากการปิคสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 192.6° ผ่านเบรกเกอร์ ที่ต่อโดยเฉพาะ ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 119</u> พลังงานในเครื่องล่อฟ้าจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 192.6° ผ่านเบรกเกอร์ที่ต่อโดยเฉพาะ ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 120</u> แรงคันจากการปิคสวิตช์ BZ14-1H เฟส B ที่มุม 199.8 ° ผ่านเบรกเกอร์ที่ต่อ โดยเฉพาะ ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 121</u> พลังงานในเครื่องล่อฟ้าจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส B ที่มุม 199.8 ° ผ่านเบรกเกอร์ที่ต่อโดยเฉพาะ ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 122</u> แรงคันจากการปิคสวิตช์ BZ14-1H เฟส R ที่มุม 180 ° ผ่านเบรกเกอร์ที่ต่อ โดยเฉพาะ ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 123</u> พลังงานในเครื่องล่อฟ้าจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส R ที่มุม 180 ° ผ่านเบรกเกอร์ที่ต่อโดยเฉพาะ ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 124</u> การจำลองกรณีการแยกหม้อแปลงออกจากการเชื่อมต่อสายเกเบิ้ลใต้ดินและ สายเกเบิ้ลอากาศออกจากกันผ่านเบรกเกอร์ที่ต่อโดยเฉพาะ ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 125</u> แรงคันจากการปิคสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 192.6 ° ผ่านเบรกเกอร์ที่ต่อ โดยเฉพาะ ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 126</u> พลังงานในเครื่องล่อฟ้าจากการปิคสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 192.6° ผ่านเบรกเกอร์ที่ต่อโดยเฉพาะ ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 127</u> แรงคันจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส B ที่มุม 199.8 ° ผ่านเบรกเกอร์ที่ต่อ โดยเฉพาะ ด้วยโปรแกรม PSCAD

139



<u>ภาพที่ 128</u> พลังงานในเครื่องล่อฟ้าจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส B ที่มุม 199.8 ° ผ่านเบรกเกอร์ที่ต่อโดยเฉพาะ ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 129</u> แรงคันจากการปิคสวิตช์ BZ14-1H เฟส R ที่มุม 180° ผ่านเบรกเกอร์ที่ต่อ โดยเฉพาะ ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 130</u> พลังงานในเครื่องล่อฟ้าจากการปิคสวิตช์ BZ14-1H เฟส R ที่มุม 180° ผ่านเบรกเกอร์ที่ต่อโดยเฉพาะ ด้วยโปรแกรม PSCAD

3.1.2 การต่อโหลดให้หม้อแปลงเพิ่มทางด้านทุติยภูมิ ขณะทำการเปิด – ปิด สวิตช์ โดยทำการเปลี่ยนแปลงก่าความด้านทานของโหลดให้มีก่าเท่ากันทั้ง 3 เฟส เพื่อหาก่าความด้านทาน ที่เหมาะสมที่ไม่ทำให้เกิดปัญหาเฟอร์โรเรโซแนนช์ตั้งแต่ 0 – 1000 โอห์ม โดยมีแบบจำลองและ ผลการจำลองดังภาพข้างล่าง



<u>ภาพที่ 131</u> การจำลองกรณีต่อโหลดความด้านทานให้หม้อแปลงเพิ่มทางด้านทุติยภูมิ ด้วยโปรแกรม ATP

ATP Settings
Simulation Output Switch/UM Format Record Variables
delta T: 0.0001 Simulation type Imax: 1 Imax: Time domain Xopt: 0 Imax: Imax:

<u>ภาพที่ 132</u> การตั้งค่าการจำลองกรณีต่อโหลดความต้านทานให้หม้อแปลงเพิ่มทางค้านทุติยภูมิ ด้วยโปรแกรม ATP

ATP Settings	×
Simulation Output Switch/	JM Format Record Variables
Modet Check_V1 Check_V2 Check_V3 RES	Variable: Res1 Res2 Res3 Count
	Alias=

<u>ภาพที่ 133</u> การบันทึกข้อมูลค่าการจำลองกรณีต่อโหลดความด้านทานให้หม้อแปลงเพิ่ม ทางด้านทุติยภูมิ ด้วยโปรแกรม ATP

ATP Setting	gs	×
Simulation	Output Switch/UM Format Record Variables	
SPARAMET	FER settings	١٢
NAME	VALUE	
	~	
, Numberof <u>s</u> i	imulations: 1000	
<u>0</u> K	Help	

<u>ภาพที่ 134</u> การตั้งก่าจำนวนการเปลี่ยนแปลงกวามต้านทานในการจำลองกรณีต่อโหลด กวามต้านทานให้หม้อแปลงเพิ่มทางด้านทุติยภูมิ ด้วยโปรแกรม ATP

MODEL: RES					X
DATA	VALUE		NODE	PHASE	NAME
Inl	1		Res1	1	×X0230
			Res2	1	XX0222
			Res3	1	XX0224
Group No: 0 Comment: Models Model <u>fi</u> le: C:\El	EUG01\ATPDraw\Mod\	Ĩ <u>Brow</u> se	<u>а</u> Цse As:	Label:	☐ Hide ☐ Lock
-%-		<u>0</u> K		Cancel	<u>H</u> elp

<u>ภาพที่ 135</u> การตั้งค่าเริ่มต้นแบบจำลองความต้านทานกรณีต่อโหลดความต้านทานให้ หม้อแปลงเพิ่มทางด้านทุติยภูมิ ด้วยโปรแกรม ATP

<pre>File Edit Character Help MODEL RES DATA InI OUTPUT Res1 Res2 Res3 VAR Res1 Res2 Res3 Count Reset DELAY CELLS DFIT: 10 INIT Reset:=0 deposit(voltbc[9], atp(voltbc[9])+1) voltbc[9] is counter ENDINIT EXEC IF t=0 THEN Count := atp(voltbc[9]) - 1 ENDIF IF Reset:=1 Res1 := InI + Count Res2 := Res1 Res3 := Res1 Res3 := Res1 writel('====================================</pre>	• Help Viewer	×
<pre>MODEL RES DATA InI OUTPUT Res1 Res2 Res3 VAR Res1 Res2 Res3 Count Reset DELAY CELLS DFLT: 10 INIT Reset:=0 deposit(voltbc[9], atp(voltbc[9])+1) voltbc[9] is counter ENDINIT EXEC IF t=0 THEN Count := atp(voltbc[9]) - 1 ENDIF IF Reset=0 THEN D0 Reset:=1 Res1 := InI + Count Res2 := Res1 Res3 := Res1 writel('=========') writel('=======') writel('RESISTANCE Phase R (OHM) :', Res1) writel('RESISTANCE Phase B (OHM) :', Res3) writel('RESISTANCE Phase B (OHM) :', Res3) writel('=======') ENDIF ENDI</pre>	File Edit Character Help	
<pre>Reset:=1 Res1 := InI + Count Res2 := Res1 Res3 := Res1 writel('====================================</pre>	<pre>MODEL RES DATA InI OUTPUT Res1</pre>	
ENDMODEL	<pre>Reset:=1 Res1 := InI + Count Res2 := Res1 Res3 := Res1 write1('</pre>	

- <u>ภาพที่ 136</u> การเขียนโปรแกรมควบคุมการเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางด้านทุติยภูมิ ของแบบจำลองความต้านทาน
- <u>ตารางที่ 15</u> ผลการจำลองเปลี่ยนค่าโหลดความด้านทานทางด้านทุติยภูมิที่ไม่ส่งผลให้เกิด เฟอร์โรเรโซแนนช์ ตั้งแต่ 1 – 1000 โอห์ม ด้วยโปรแกรม ATP

เฟส	โหลดความต้านทานทางด้านทุติยภูมิ ที่ไม่ส่งผลให้เกิด เฟอร์ โรเร โซแนนช์ ตั้งแต่ 1 – 1000 โอห์ม
Y	1-317, 366-448, 450
(ມຸນ192.6 ໍ)	
В	1 1000
(มุม199.8 °)	1 - 1000
R	1 1000
(มุม180 °)	1 - 1000


<u>ภาพที่ 137</u> ผลการบันทึกข้อมูลการตรวจสอบแรงดันเกินเนื่องจากเฟอร์โรเรโซแนนช์ เมื่อเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางด้านทุติยภูมิ ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 138</u> แรงคันจากการปิคสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 192.6 ° เมื่อมีโหลดความต้านทาน ทางค้านทุติยภูมิ 317 โอห์มไม่ส่งผลให้เกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 139</u> พลังงานในเครื่องล่อฟ้าจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 192.6° เมื่อมีโหลด ความต้านทานทางด้านทุติยภูมิ 317 โอห์มไม่ส่งผลให้เกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 140</u> แรงดันจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 192.6 ° เมื่อมีโหลดความต้านทาน ทางด้านทุติยภูมิ 318 โอห์ม ส่งผลให้เกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 141</u> พลังงานในเครื่องล่อฟ้าจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 192.6 ° เมื่อมีโหลด ความต้านทานทางด้านทุติยภูมิ 318 โอห์ม ส่งผลให้เกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ ด้วย โปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 142</u> แรงดันจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส B ที่มุม 199.8 ° เมื่อมีโหลดความด้านทาน ทางด้านทุติยภูมิ 318 โอห์มไม่ส่งผลให้เกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 143</u> พลังงานในเครื่องล่อฟ้าจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส B ที่มุม 199.8 ° เมื่อมีโหลด ความต้านทานทางด้านทุติยภูมิ 318 โอห์ม ไม่ส่งผลให้เกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ ด้วย โปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 144</u> แรงดันจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส R ที่มุม 180° เมื่อมีโหลดความด้านทาน ทางด้านทุติยภูมิ 318 โอห์มไม่ส่งผลให้เกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 145</u> พลังงานในเครื่องล่อฟ้าจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส R ที่มุม 180 ° เมื่อมีโหลด ความต้านทานทางค้านทุติยภูมิ 318 โอห์ม ไม่ส่งผลให้เกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ ด้วย โปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 146</u> การจำลองกรณีต่อโหลดความต้านทานให้หม้อแปลงเพิ่มทางด้านทุติยภูมิ ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 147</u> ชุดควบคุมการเปลี่ยนความด้านทานทางด้านทุติยภูมิ, บันทึกข้อมูล และตรวจสอบ แรงดันเกินเฟอร์ โรเร โซแนนช์ด้วยโปรแกรม PSCAD

Duration of run (sec) Solution time step (uS) Channel plot step (uS)	1.2 5 50	
Startup method:	Input file:	
Standard 🗾 💌		Browse
Save channels to disk?	Output file:	
No 💌	connect_load_Y.out	
Timed snapshot(s):	Snapshot file:	Time
None 🗾	noname.snp	0.3
Multiple run:	Output file:	# runs
None 🗾 💌	mrun	10
✓ Remove time offset when Send only the output cha Start simulation manually	n starting from snapshot. annels that are in use. to allow use of integrated d	lebugger.

<u>ภาพที่ 148</u> การตั้งก่าการจำลองกรณีต่อโหลดกวามต้านทานให้หม้อแปลงเพิ่มทางด้านทุติยภูมิ ด้วยโปรแกรม PSCAD

V1 Variation Type	Sequential	I/O Type	Real	
V2 Variation Type	Sequential -	I/O Type	Real	
V3 Variation Type	Sequential 👻	I/O Type	Real	-
V4 Variation Type	Sequential 👻	I/O Type	Real	-
V5 Variation Type	Sequential 👻	I/O Type	Real	-
V6 Variation Type	Sequential 👻	I/O Type	Real	-
This Multiple Ru	n Enabled or Disabled?	Label for Variat Label for Variat Label for Variat	ole 1: Resistanc ole 2: Var # 2 ole 3: Var # 3	e
C Enabled		Label for Variat	ole 4: Var#4	
		Label for Variat	ole 5: Var # 5	
Label for Variable 6: Var # 6 # of Std Dev's for defining min, max using the Normal Dist. (1-10): 2.0				

<u>ภาพที่ 149</u> การตั้งค่าจำนวนตัวแปรการจำลองกรณีต่อโหลดความต้านทานทางด้านทุติยภูมิ ให้หม้อแปลงเพิ่ม ด้วยโปรแกรม PSCAD

[mrun] Multiple Ru	ın Component		×
Real Variable 1 C	onfig		•
Number of Runs fr Start of Range for Increment for Each End of Range for \	or Variable 1 Variable 1 1 Run /ariable 1		10 1 1
	1 2 3 4 5	6 7 8 9 10	
OK	C	ancel	Help

<u>ภาพที่ 150</u> การตั้งค่าจำนวนช่วงและการเพิ่มความต้านทานในแต่ละครั้งกรณีต่อโหลด ความต้านทานให้หม้อแปลงเพิ่มทางด้านทุติยภูมิ ด้วยโปรแกรม PSCAD

Recording Data Config		<u> </u>
Number of Channels to Record for Each Run Base Output File Name	mrunout.out	3 🔻
Do you want to Identify the Optimal Run? No No		
Select Channel for Basis of Optimal Run		1 💌
ເ Min ເ Max		
Number of Divisions for Prob. Density Output Plots:		0

<u>ภาพที่ 151</u> การตั้งค่าจำนวนการบันทึกและผลลัพธ์ในการจำลองกรณีต่อโหลดความต้านทานให้ หม้อแปลงเพิ่มทางด้านทุติยภูมิ ด้วยโปรแกรม PSCAD

mrun] Multiple Run Component					
Recording Channels Info	Recording Channels Information				
Ch. 1 I/O Type	Ch. 2 I/O Type-	C	h. 3 I/O Type		
C Boolean	C Boolean	0	" Boolean		
C Integer	C Integer	0	1 Integer		
Real	Real	6	🕅 Real		
Ch. 4 I/O Type	Ch. 5 I/O Type-	C	h. 6 I/O Type		
C Boolean	C Boolean	0) Boolean		
C Integer	$m{c}$ Integer	() ()) Integer		
🖲 Real	🕫 Real	0	Real		
Auto Processing of Ch. 12		Label for Output			
Auto Processing of Ch. 22	Maximum([X]) ▼	Label for Output	2: TT : X		
Auto Processing of Ch. 2?	Maximum([X])		2. TripY		
Auto Processing of Ch. 3?	Maximum(X)	Label for Output	3: TripB		
Auto Processing of Ch. 4?	Maximum(X) 💌	Label for Output	4: Out # 4		
Auto Processing of Ch. 5?	Maximum(X) 💌	Label for Output	5: Out # 5		
Auto Processing of Ch. 6?	Maximum(X) 💌	Label for Output	6: Out # 6		
ОК	Cancel		Help		

<u>ภาพที่ 152</u> การตั้งค่าข้อมูลในการบันทึกกรณีต่อโหลดความต้านทานให้หม้อแปลงเพิ่ม ทางด้านทุติยภูมิ ด้วยโปรแกรม PSCAD

[compare] Single Input	Level Comp	arator 🗙
Configuration		T
Threshold Input Value		1.5
Low output level		0
High output level		1
Fortran Comment		Step_Xfer_Functi
		1
ок	Cancel	Help

<u>ภาพที่ 153</u> การตั้งค่าชุดการตรวจสอบแรงดันเกินที่มากกว่าแรงดันในระบบ 1.5 p.u.กรณีต่อโหลด ความต้านทานให้หม้อแปลงเพิ่มทางด้านทุติยภูมิ ด้วยโปรแกรม PSCAD

<u>ตารางที่ 16</u> ผลการจำลองเปลี่ยนค่าโหลดความด้านทานทางด้านทุติยภูมิที่ไม่ส่งผลให้เกิด เฟอร์โรเรโซแนนช์ ตั้งแต่ 1 – 1000 โอห์ม ด้วยโปรแกรม PSCAD

เฟส	โหลดความต้านทานทางด้านทุติยภูมิ ที่ไม่ส่งผลให้เกิด เฟอร์โรเรโซแนนช์ ตั้งแต่ 1 – 1000 โอห์ม	
Y	1 - 265	
(ມຸມ192.6 °)		
В	1 627	
(มุม199.8 °)	1 - 627	
R	1 1000	
(มุม180 °)	1 - 1000	

🖡 mrun	out.out - Notepad				×
File Edit	Format View Help	1			
Multiple	Run Output File				^
Run #	Resistance	TripR	TripY	TripB	
257	257.0000000	.000000000	.000000000	.000000000	
258	258.0000000	.000000000	.000000000	.000000000	=
259	259.0000000	.000000000	.000000000	.000000000	-
260	260.0000000	.000000000	.000000000	.000000000	
261	261.0000000	.000000000	.000000000	.000000000	
262	262.0000000	.000000000	.000000000	.000000000	
263	263.0000000	.000000000	.000000000	.000000000	
264	264.0000000	.000000000	.000000000	.000000000	
265	265.0000000	.000000000	.000000000	.000000000	
266	266.0000000	1.000000000	.000000000	1.000000000	
267	267.0000000	1.000000000	.000000000	1.000000000	
268	268.0000000	1.000000000	.000000000	1.000000000	
269	269.0000000	1.000000000	.000000000	1.000000000	
270	270.0000000	1.000000000	.000000000	1.000000000	×
<				>	:

<u>ภาพที่ 154</u> ผลการบันทึกข้อมูลการตรวจสอบแรงดันเกินเนื่องจากเฟอร์ โรเร โซแนนช์จากการปิด สวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 192.6 ° เมื่อเปลี่ยนแปลงความด้านทานทางด้านทุติยภูมิ ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 155</u> แรงดันจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 192.6 ° เมื่อมีโหลดความต้านทาน ทางด้านทุติยภูมิ 265 โอห์ม ไม่ส่งผลให้เกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 156</u> พลังงานในเครื่องล่อฟ้าจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 192.6° เมื่อมีโหลด ความด้านทานทางด้านทุติยภูมิ 265 โอห์ม ไม่ส่งผลให้เกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ ด้วย โปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 157</u> แรงคันจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 192.6 ° เมื่อมีโหลดความต้านทาน ทางค้านทุติยภูมิ 266 โอห์ม ส่งผลให้เกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 158</u> พลังงานในเครื่องล่อฟ้าจากการปิคสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 192.6° เมื่อมีโหลด ความด้านทานทางด้านทุติยภูมิ 266 โอห์ม ส่งผลให้เกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ ด้วย โปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 159</u> สถานะการทริปแรงดันเกินที่มากกว่า 1.5 p.u. และสถานะการปิดสวิตช์ BZ14-1H เมื่อมีโหลดความต้านทานทางด้านทุติยภูมิ 266 โอห์ม และเกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ ด้วยโปรแกรม PSCAD

🖪 mrune	out.out - Notepad				×
File Edit	Format View Help				
Multip	Multiple Run Output File				^
Run #	Resistance	TripR	TripY	TripB	
623	623.0000000	.000000000	.000000000	.000000000	
624	624.0000000	.000000000	.000000000	.000000000	
625	625.0000000	.000000000	.000000000	.000000000	
626	626.0000000	.000000000	.000000000	.000000000	
627	627.0000000	.000000000	.000000000	.000000000	
628	628.0000000	1.000000000	.000000000	.000000000	
629	629.0000000	1.000000000	.000000000	.000000000	
630	630.0000000	1.000000000	.000000000	.000000000	
631	631.0000000	1.000000000	.000000000	.000000000	
632	632.0000000	1.000000000	.000000000	.000000000	
633	633.0000000	1.000000000	.000000000	.000000000	
634	634.0000000	1.000000000	.000000000	.000000000	
635	635.0000000	1.000000000	.000000000	.000000000	
636	636.0000000	1.000000000	.000000000	.000000000	~
<					

<u>ภาพที่ 160</u> ผลการบันทึกข้อมูลการตรวจสอบแรงดันเกินเนื่องจากเฟอร์ โรเร โซแนนช์จากการปิด สวิตช์ BZ14-1H เฟส B ที่มุม 199.8 ° เมื่อเปลี่ยนแปลงความด้านทานทางด้านทุติยภูมิ ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 161</u> แรงคันจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส B ที่มุม 199.8 ° เมื่อมีโหลดความต้านทาน ทางค้านทุติยภูมิ 627 โอห์ม ไม่ส่งผลให้เกิดเฟอร์ โรเร โซแนนช์ ค้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 162</u> พลังงานในเครื่องล่อฟ้าจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส B ที่มุม 199.8° เมื่อมีโหลด ความต้านทานทางด้านทุติยภูมิ 627 โอห์ม ไม่ส่งผลให้เกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ ด้วย โปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 163</u> แรงดันจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส B ที่มุม 199.8 ° เมื่อมีโหลดความต้านทาน ทางด้านทุติยภูมิ 628 โอห์ม ส่งผลให้เกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 164</u> พลังงานในเครื่องล่อฟ้าจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส B ที่มุม 199.8° เมื่อมีโหลด ความต้านทานทางด้านทุติยภูมิ 628โอห์ม ส่งผลให้เกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ ด้วย โปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 165</u> สถานะการทริปแรงดันเกินที่มากกว่า 1.5 p.u. และสถานะการปิดสวิตช์ BZ14-1H เมื่อมีโหลดความด้านทานทางด้านทุติยภูมิ 628 โอห์ม เมื่อเกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ ด้วยโปรแกรม PSCAD

🛤 mruno	ut.out - Notepad			- OX
File Edit	Format View Help			
Multiple	Multiple Run Output File			
Run #	Resistance	TripR	TripY	TripB
987	987.0000000	.000000000	.000000000	.000000000
988	988.0000000	.000000000	.000000000	.000000000 🔤
989	989.0000000	.000000000	.000000000	.000000000
990	990.0000000	.000000000	.000000000	.000000000
991	991.0000000	.000000000	.000000000	.000000000 📃
992	992.0000000	.000000000	.000000000	.000000000
993	993.0000000	.000000000	.000000000	.000000000
994	994.0000000	.000000000	.000000000	.000000000
995	995.0000000	.000000000	.000000000	.000000000
996	996.0000000	.000000000	.000000000	.000000000
997	997.0000000	.000000000	.000000000	.000000000
998	998.0000000	.000000000	.000000000	.000000000
999	999.0000000	.000000000	.000000000	.000000000
1000	1000.000000	.000000000	.000000000	.000000000 🔽
<				

<u>ภาพที่ 166</u> ผลการบันทึกข้อมูลการตรวจสอบแรงดันเกินเนื่องจากเฟอร์ โรเร โซแนนช์จากการปิด สวิตช์ BZ14-1H เฟส R ที่มุม 180 ° เมื่อเปลี่ยนแปลงความด้านทานทางด้านทุติยภูมิ ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 167</u> แรงดันจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส R ที่มุม 180° เมื่อมีโหลดความต้านทาน ทางด้านทุติยภูมิ 1,000 โอห์ม ไม่ส่งผลให้เกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์ ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 168</u> พลังงานในเครื่องล่อฟ้าจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส R ที่มุม 180 ° เมื่อมีโหลด ความต้านทานทางด้านทุติยภูมิ 1,000 โอห์ม ส่งผลให้เกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ ด้วย โปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 169</u> สถานะการทริปแรงดันเกินที่มากกว่า 1.5 p.u.และสถานะการปิดสวิตช์ BZ14-1H เมื่อมี โหลดความต้านทานทางด้านทุติยภูมิ 1,000 โอห์ม ที่ไม่ส่งผลให้เกิดเฟอร์โรเรโซ แนนช์ด้วยโปรแกรม PSCAD

จากผลการจำลองทั้ง 2 วิธี ได้แก่ วิธีการแยกหม้อแปลงออกจากการเชื่อมต่อ สายเคเบิ้ลใต้ดินและสายเคเบิ้ลอากาศผ่านเบรกเกอร์ CB15 ที่ต่อโดยเฉพาะต่างหาก และวิธีการต่อ โหลดให้หม้อแปลงเพิ่มขณะทำการเปิด – ปิด สวิตช์ทีละเฟสของสวิตช์ BZ14-1H เมื่อมีลำดับ ขั้นตอนการเปิด - ปิดสวิตช์คงเดิม ด้วยโปรแกรม ATP และ โปรแกรม PSCAD ไม่ส่งผลให้ เกิดปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ เมื่อเลือกโหลดความด้านทานที่เหมาะสม โดยความด้านทาน ในที่นี้เลือกความด้านทานที่ 200 โอห์ม 1,000 วัตต์ เนื่องจากค่าความด้านทานดังกล่าวไม่ส่งผลให้ เกิดปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์, พลังงานในโหลดความด้านทานไม่สูงมาก และพลังงานใน เครื่องล่อฟ้าที่ได้รับที่เกิดขึ้นน้อย แต่ทั้ง 2 วิธีต้องเสียค่าใช้จ่ายและมีความยุ่งยากในการปฏิบัติงาน จริง



<u>ภาพที่ 170</u> แรงดันจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 192.6 ° เมื่อมีโหลดความด้านทาน ทางด้านทุติยภูมิ 200 โอห์ม ไม่ส่งผลให้เกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 171</u> พลังงานในโหลดความด้านทานทางด้านทุติยภูมิ 200 โอห์ม จากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 192.6° ไม่ส่งผลให้เกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ ด้วย โปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 172</u> พลังงานในเครื่องล่อฟ้าจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 192.6° เมื่อมีโหลด ความต้านทานทางค้านทุติยภูมิ 200 โอห์ม ไม่ส่งผลให้เกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ ค้วย โปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 173</u> แรงดันจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส B ที่มุม 199.8 ° เมื่อมีโหลดความต้านทาน ทางด้านทุติยภูมิ 200 โอห์ม ไม่ส่งผลให้เกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 174</u> พลังงานในโหลดความด้านทานทางด้านทุติยภูมิ 200 โอห์ม จากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส B ที่มุม 199.8 ° ไม่ส่งผลให้เกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 175</u> พลังงานในเครื่องล่อฟ้าจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส B ที่มุม 199.8° เมื่อมีโหลด ความต้านทานทางด้านทุติยภูมิ 200 โอห์มไม่ส่งผลให้เกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ ด้วย โปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 176</u> แรงคันจากการปิคสวิตช์ BZ14-1H เฟส R ที่มุม 180° เมื่อมีโหลดความต้านทาน ทางค้านทุติยภูมิ 200 โอห์ม ไม่ส่งผลให้เกิดเฟอร์ โรเรโซแนนช์ ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 177</u> พลังงานในโหลดความต้านทาน 200 โอห์ม จากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส R ที่มุม 180 ° ไม่ส่งผลให้เกิดเฟอร์ โรเร โซแนนซ์ ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 178</u> พลังงานในเครื่องล่อฟ้าจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส R ที่มุม 180 ° เมื่อมีโหลด ความต้านทานทางด้านทุติยภูมิ 200 โอห์มไม่ส่งผลให้เกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ ด้วย โปรแกรม ATP

3.2 การปรับเปลี่ยนที่สายส่ง เป็นการปรับเปลี่ยนสายเคเบิ้ลใต้คิน, สายส่งเหนือคิน โดยทำ การเพิ่มหรือลดขนาดความยาวของสายส่งให้เหมาะสม โดยต้องมีความยาวของสายส่งเท่าเดิมพบว่า เมื่อลดความยาวสายเคเบิ้ลใต้คินให้น้อยลงไม่สามารถลดปัญหาแรงคันเกินเฟอร์ โรเร โซแนนท์ได้ จึงต้องจำลองโดยการเปลี่ยนสายเคเบิ้ลใต้คินเป็นสายเคเบิ้ลอากาศแทนสามารถทำการจำลองและมี ผลการจำลองดังภาพข้างล่าง



<u>ภาพที่ 179</u> การจำลองกรณึเปลี่ยนสายเคเบิ้ลใต้ดินเป็นสายเคเบิ้ลอากาศด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 180</u> แรงคันจากการปิคสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 192.6 ° เมื่อเปลี่ยนสายเคเบิ้ลใต้คิน เป็นสายเคเบิ้ลอากาศ ไม่ทำให้เกิคเฟอร์โรเรโซแนนช์ ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 181</u> พลังงานในเครื่องล่อฟ้าจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 192.6° เมื่อเปลี่ยน สายเคเบิ้ลใต้ดินเป็นสายเคเบิ้ลอากาศ ไม่ทำให้เกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 182</u> แรงคันจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส B ที่มุม 199.8 ° เมื่อเปลี่ยนสายเคเบิ้ลใต้คิน เป็นสายเคเบิ้ลอากาศ ไม่ทำให้เกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 183</u> พลังงานในเครื่องล่อฟ้าจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส B ที่มุม 199.8° เมื่อเปลี่ยน สายเคเบิ้ลใต้ดินเป็นสายเคเบิ้ลอากาศ ไม่ทำให้เกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 184</u> แรงคันจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส R ที่มุม 180 ° เมื่อเปลี่ยนสายเคเบิ้ลใต้คินเป็น สายเคเบิ้ลอากาศ ไม่ทำให้เกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 185</u> พลังงานในเครื่องล่อฟ้าจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส R ที่มุม 180° เมื่อเปลี่ยนสาย เคเบิ้ลใต้ดินเป็นสายเกเบิ้ลอากาศ ไม่ทำให้เกิดเฟอร์ โรเร โซแนนช์ ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 186</u> การจำลองกรณีเปลี่ยนสายเคเบิ้ลใต้ดินเป็นสายเคเบิ้ลอากาศด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 187</u> แรงคันจากการปิคสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 192.6 ° เมื่อเปลี่ยนสายเคเบิ้ลใต้คิน เป็นสายเคเบิ้ลอากาศ ไม่ทำให้เกิคเฟอร์โรเรโซแนนช์ ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 18</u>8 พลังงานในเครื่องล่อฟ้าจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 192.6° เมื่อเปลี่ยน สายเคเบิ้ลใต้คินเป็นสายเคเบิ้ลอากาศ ไม่ทำให้เกิคเฟอร์ โรเร โซแนนช์ ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 189</u> แรงคันจากการปิคสวิตช์ BZ14-1H เฟส B ที่มุม 199.8 ° เมื่อเปลี่ยนสายเคเบิ้ลใต้คิน เป็นสายเคเบิ้ลอากาศ ไม่ทำให้เกิคเฟอร์โรเรโซแนนช์ ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 190</u> พลังงานในเครื่องล่อฟ้าจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส B ที่มุม 199.8° เมื่อเปลี่ยน สายเคเบิ้ลใต้ดินเป็นสายเคเบิ้ลอากาศ ไม่ทำให้เกิดเฟอร์ โรเร โซแนนช์ ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 191</u> แรงคันจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส R ที่มุม 180 ° เมื่อเปลี่ยนสายเคเบิ้ลใต้คินเป็น สายเกเบิ้ลอากาศ ไม่ส่งผลให้เกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 192</u> พลังงานในเครื่องล่อฟ้าจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส R ที่มุม 180° เมื่อเปลี่ยนสาย เคเบิ้ลใต้ดินเป็นสายเคเบิ้ลอากาศ ไม่ทำให้เกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ ด้วยโปรแกรม PSCAD

จากผลการจำลองการเปลี่ยนสายเคเบิ้ลใต้ดินเป็นสายส่งเหนือดิน ด้วยโปรแกรม ATP และโปรแกรม PSCAD สามารลดปัญหาเฟอร์โรเรโซแนนช์ได้ แต่จะมีความยุ่งยากและเสีย ค่าใช้จ่ายในการลงทุนสูงเมื่อจะทำการปรับเปลี่ยนเนื่องจากบริเวณดังกล่าวเป็นเขตชุมชนจึงไม่มี ความเหมาะสมในการปรับเปลี่ยน

3.3 การปรับเปลี่ยนที่ขั้นตอนลำดับการสวิตช์ เป็นวิธีการที่เหมาะสมที่สุดเนื่อง จากไม่เสีย ก่าใช้จ่าย และไม่ยุ่งยากในการปฏิบัติงาน โดยเมื่อพิจารฉาปัญหาการเกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์ขึ้นเกิด จากการปิดสวิตช์ BZ14-1H ทีละเฟส จ่ายไฟให้หม้อแปลงบริการจึงง่ายต่อการสร้างวงจรเร โซแนนซ์ ดังนั้นจึงสามารถสร้างทางเลือกได้ 2 วิธี โดยวิธีการแรกคือการให้หม้อแปลงไม่ได้รับการ จ่ายไฟทีละเฟสจากสวิตช์ BZ14-1H โดยการปิดสวิตช์ BZ14-1H ให้ครบทั้ง 3 เฟส และไม่มีการ จ่ายไฟทีละเฟสจากสวิตช์ BZ14-2H และเบรกเกอร์ BZ14 แล้วจ่ายไฟทีละเฟสจากสวิตช์ BZ14-2H แทน ส่วนวิธีการที่ 2 คือการให้หม้อแปลงบริการไม่ได้รับการจ่ายไฟทีละเฟสจากจากสวิตช์ BZ14-1H และ BZ14-2H แต่จะทำการจ่ายไฟจากเบรกเกอร์ BZ14 แทน แล้วปิดสวิตช์ BZ14-2H และ สวิตช์ BZ14-1H ตามถำดับแทน 3.3.1 การให้หม้อแปลงไม่ได้รับการจ่ายไฟทีละเฟสจากสวิตช์ BZ14-1H โดยทำการ ปิดสวิตช์ BZ14-1H ให้ครบทั้ง 3 เฟส แล้วจ่ายไฟจากการปิดสวิตช์ BZ14-2H แทนโดยมีขั้นตอน การเปิด – ปิดสวิตช์ตัวอื่นตามตารางที่ 17 เพื่อทำการพิจารณาโอกาสเกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ เปรียบเทียบมุมที่ปิดสวิตช์ของสวิตช์ BZ14-1H กับ สวิตช์ BZ14-2H ตั้งแต่มุม 1-360 ° ดังมีผลการ จำลองตามภาพข้างล่าง

<u>ตารางที่ 17</u> ลำดับขั้นตอนการจ่ายไฟหรือปิดสวิตช์ในสายป้อน หลังการปฏิบัติงานในช่วง สายป้อนชุดที่ 2 เพื่อพิจารณาโอกาสเกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ ของสวิตช์ BZ14-1H กับ สวิตช์ BZ14-2H ตั้งแต่มุม 1-360°

-1	ถำดับขั้นตอน	ลำดับขั้นตอน	
ท	เปิด – ปิดสวิตช์แบบเดิม	เปิด – ปิดสวิตช์แบบใหม่	
1	เชื่อมต่อสายป้อน Bay 1 และ Bay 2 ด้วยสวิตช์ BZ14BZ22-1H		
2	เปิดเบรกเกอร์ BZ14		
3	เปิดสวิตช์ BZ14-2H (R-B-Y)		
4	เปิดสวิตช์ BZ14-1H (R-B-Y)		
5	ปฏิบัติงาน		
6	ปิคสวิตช์ BZ14-2H (Y-B-R)	ปิคสวิตช์ BZ14-1H (Y-B-R)	
7	ปิดสวิตช์ BZ14-1H (Y-B-R) ปิดสวิตช์ BZ14-2H (Y-B-R)		
8	ปิดเบรกเกอร์ BZ14		
9	แยกสายป้อน Bay 1 และ Bay 2	: ด้วยสวิตช์ BZ14BZ22-1H (R-B-Y)	



<u>ภาพที่ 193</u> การจำลองกรณีพิจารณาโอกาสเกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ของสวิตช์ BZ14-1H ตั้งแต่มุม 1-360 ° ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 194</u> การจำลองกรณีพิจารณาโอกาสเกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ของสวิตช์ BZ14-2H ตั้งแต่มุม 1-360 ° ด้วยโปรแกรม ATP

ATP Settings	X
Simulation Output Switch/L	JM Format Record Variables
<u>d</u> elta T: 1E-5 Imax: 1.2 ⊻opt: 0 <u>C</u> opt: 0	Simulation type Firequency scan Harmonic (HFS)
<u>OK</u> <u>H</u> elp	

<u>ภาพที่ 195</u> การตั้งค่าการจำลองการพิจารณาโอกาสเกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ของสวิตช์ ตั้งแต่มุม 1-360 ° ด้วยโปรแกรม ATP

ATP Settings			×	
Simulation Output Switch/L	JM Format	Record	Variables	
Model: Check_V1 Check_V2 Check_V3 SW_Y	Variable: tripA		_	
▲ Add ▲ Bernove Alias= Record: Check_V1.tripA AS tripA Check_V2.tripB AS tripB Check_V3.tripC AS tripC SW_Y.SwY AS SwY				
<u>OK</u> <u>H</u> elp				

<u>ภาพที่ 196</u> การบันทึกข้อมูลการจำลองการพิจารณาโอกาสเกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ของสวิตช์ ตั้งแต่ มุม 1-360 ° ด้วยโปรแกรม ATP

ATP Setting	s	×		
Simulation	Dutput Switch/UM Format Reco	rd Variables		
☐ \$PARAMET	ER settings			
NAME	VALUE	^		
		I D		
	•			
I				
Number of simulations: 360				
	3			
<u> </u>	Help			

<u>ภาพที่ 197</u> การตั้งค่าจำนวนการเปลี่ยนมุมปิคสวิตช์ ตั้งแต่มุม 1-360 ° ด้วยโปรแกรม ATP

🖺 Programmer's File Editor - [MODELS.1]					
🛐 File Edit Options Template Execute Macro Window Help 🗕 🗗 🗙					
ANGLE AT : 29. 🔨					
SWITCHING TIME AT : .2082765					
FOUND OVERVOLTAGE PHASE B > VREF: 1.66036648 👘					
TIME : .2715					
FOUND OVERVOLTAGE PHASE R > VREF: 1.54103904					
TIME : .2718					
ANGLE AT : 30.					
SWITCHING TIME AT : .208332					
ANGLE AT : 31.					
SWITCHING TIME AT : .2083875					
ANGLE AT : 32.					
SWITCHING TIME AT : .208443					
FOUND OVERVOLTAGE PHASE B > VREF: 1.64374798					
TIME : .3119					
FOUND OVERVOLTAGE PHASE R > VREF: 1.53049548					
TIME : .3132					
Ln 239 Col 32 1968 WR Rec Off No Wrap DOS INS					

<u>ภาพที่ 198</u> ผลการบันทึกข้อมูลมุมปิคสวิตช์ ตั้งแต่มุม 1-360 ° เพื่อตรวจสอบแรงคันเกินเนื่องจาก เฟอร์ โรเร โซแนนช์ ด้วยโปรแกรม ATP

เฟส -	มุมปิดสวิตช์ ที่ไม่เกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ (องศา)			
	สวิตช์ BZ14-1H	สวิตช์ BZ14-2H		
Y	30,31,34-142,145,146,205,210,211,	17,19-22,24,61-114,136,149,156,157,		
	214-323,325,326	159,160,162,199-202,241-294,334-337		
5 ວນ	228 มุม	127 มุม		

<u>ตารางที่ 18</u> ผลการจำลองมุมปิดสวิตช์ BZ14-1H และ สวิตช์ BZ14-2H ตั้งแต่มุม 1-360 ° เพื่อตรวจสอบแรงคันเกินเฟอร์ โรเร โซแนนซ์ ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 199</u> แรงคันจากการปิคสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 31 ° ไม่ส่งผลให้เกิดเฟอร์ โร เรโซแนนซ์ ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 200</u> แรงคันจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 32 ° ไม่ส่งผลให้เกิดเฟอร์โร เรโซแนนซ์ ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 201</u> แรงคันจากการปิดสวิตช์ BZ14-2H เฟส Y ที่มุม 17 ° ไม่ส่งผลให้เกิดเฟอร์โร เรโซแนนซ์ ด้วยโปรแกรม ATP


<u>ภาพที่ 202</u> แรงคันจากการปิดสวิตช์ BZ14-2H เฟส Y ที่มุม 18 ° ส่งผลให้เกิดเฟอร์ โรเร โซแนนช์ ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 203</u> การจำลองกรณีพิจารณาโอกาสเกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ ของสวิตช์ BZ14-1H และ สวิตช์ BZ14-2H ตั้งแต่มุม 1-360 ° ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 204</u> ชุดควบคุมการเปลี่ยนมุมปิดสวิตช์ ตั้งแต่มุม 1-360 ° ของสวิตช์ BZ14-1H และสวิตช์ BZ14-2H , บันทึกข้อมูล และตรวจสอบแรงดันเกินเฟอร์ โรเร โซแนนช์ ด้วยโปรแกรม PSCAD

Start of Range for	Variable 1		0 206722222
Increment for Eac	h Run		5.55556E-05
End of Range for	Variable 1		0.2266666667
	1	6	
	2	7	
	3	8	
	4	9	
	5	J10	

<u>ภาพที่ 205</u> การตั้งก่าจำนวนช่วงเวลาและการเพิ่มเวลาในการปีคสวิตช์ BZ14-1H และสวิตช์ BZ14-2H ในแต่ละมุม ตั้งแต่มุม 1-360 ° ด้วยโปรแกรม PSCAD

เฟส	มุมปิคสวิตช์ ที่ไม่เกิ	มุมปิดสวิตช์ ที่ไม่เกิดเฟอร์ โรเร โซแนนช์ (องศา)				
	สวิตช์ BZ14-1H	สวิตช์ BZ14-2H				
Y	35-143,215-323	7-11,13-174,186-191,193-348,350-354				
รวม	218 มุม	334 มุม				

<u>ตารางที่ 19</u> ผลการจำลองมุมปิดสวิตช์ BZ14-1H และ สวิตช์ BZ14-2H ตั้งแต่มุม 1-360 ° เพื่อตรวจสอบแรงดันเกินเฟอร์โรเรโซแนนช์ ด้วยโปรแกรม PSCAD

🖡 mrunout.out.vary_BZ14-1H_Y.txt - Notepad					
File Edit	Format View Helj	p			
Multi	ple Run Output Fi	le			^
Run #		R	Y	В	
29	.2082777788	1.000000000	.000000000	1.000000000	
30	.2083333344	1.000000000	.000000000	1.000000000	
31	.2083888900	1.000000000	.000000000	1.000000000	
32	.2084444456	1.000000000	.000000000	1.000000000	
33	.2085000012	1.000000000	.000000000	1.000000000	
34	.2085555568	1.000000000	.000000000	1.000000000	
35	.2086111124	.000000000	.000000000	.000000000	
36	.2086666680	.000000000	.000000000	.000000000	
37	.2087222236	.000000000	.000000000	.000000000	
38	.2087777792	.000000000	.000000000	.000000000	
39	.2088333348	.000000000	.000000000	.000000000	
40	.2088888904	.000000000	.000000000	.000000000	
41	.2089444460	.000000000	.000000000	.000000000	
42	.2090000016	.000000000	.000000000	.000000000	
					~
<					> .::

<u>ภาพที่ 206</u> ผลการบันทึกข้อมูลการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ตั้งแต่มุม 1-360 ° ตรวจสอบ แรงดันเกินเนื่องจากเฟอร์โรเรโซแนนช์ ด้วยโปรแกรม PSCAD







<u>ภาพที่ 208</u> แรงคันจากการปิคสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 35 ° ไม่ส่งผลให้เกิดเฟอร์โร เรโซแนนซ์ ด้วยโปรแกรม PSCAD

🗖 mrunout.out.vary_BZ14-2H_Y.txt - Notepad					
File Edit	Format View Help)			
Multiple Run Output File					
Run #		R	Y	В	
188	.2171111192	.000000000	.000000000	.000000000	
189	.2171666748	.000000000	.000000000	.000000000	
190	.2172222304	.000000000	.000000000	.000000000	
191	.2172777860	.000000000	.000000000	.000000000	
192	.2173333416	1.000000000	.000000000	1.000000000	
193	.2173888972	.000000000	.000000000	.000000000	
194	.2174444528	.000000000	.000000000	.000000000	
195	.2175000084	.000000000	.000000000	.000000000	
196	.2175555640	.000000000	.000000000	.000000000	
197	.2176111196	.000000000	.000000000	.000000000	
198	.2176666752	.000000000	.000000000	.000000000	
199	.2177222308	.000000000	.000000000	.000000000	
200	.2177777864	.000000000	.000000000	.000000000	
201	.2178333420	.000000000	.000000000	.000000000	
202	.2178888976	.000000000	.000000000	.000000000	
203	.2179444532	.000000000	.000000000	.000000000	*
<				J	> :

<u>ภาพที่ 209</u> ผลการบันทึกข้อมูลการปิดสวิตช์ BZ14-2H เฟส Y ตั้งแต่มุม 1-360 ° ตรวจสอบ แรงดันเกินเนื่องจากเฟอร์โรเรโซแนนช์ ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 210</u> แรงคันจากการปิคสวิตช์ BZ14-2H เฟส Y ที่มุม 192 ° ส่งผลให้เกิดเฟอร์ โรเรโซแนนช์ ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 211</u> แรงคันจากการปิคสวิตช์ BZ14-2H เฟส Y ที่มุม 193 ° ไม่ส่งผลให้เกิดเฟอร์โร เรโซแนนซ์ ด้วยโปรแกรม PSCAD

จากการพิจารณาโอกาสเกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์ ที่มุมการปิดสวิตซ์ BZ14-1H เฟส Y และสวิตซ์ BZ14-2H เฟส Y ตั้งแต่มุม 1-360 ° ด้วยโปรแกรม ATP และโปรแกรม PSCAD พบว่าเมื่อทำการปิดสวิตซ์ BZ14-2H แทนการปิดสวิตซ์ BZ14-1H เกิดปัญหาแรงดันเกินเฟอร์โรเร โซแนนซ์ ด้วยเหมือนกัน จึงไม่มีความเหมาะสมที่จะใช้การปิดสวิตซ์ BZ14-2H แทนสวิตซ์ BZ14-1H เนื่องจากการปิดสวิตซ์ดังกล่าวยังส่งผลให้เกิดปัญหาแรงดันเกินเฟอร์โรเรโซแนนซ์ และการปิด สวิตซ์ BZ14-1H และสวิตซ์ BZ14-2H ไม่สามารถกำหนดมุมในการปิดสวิตซ์ได้

3.3.2 การให้หม้อแปลงบริการไม่ได้รับการกระตุ้นทีละเฟสจากสวิตช์ BZ14-1H โดย การจ่ายไฟให้หม้อแปลงบริการก่อนจากเบรกเกอร์ BZ14 แล้วทำการปิดสวิตช์ BZ14-1H ทีละเฟส โดยมีขั้นตอนการเปิด – ปิดสวิตช์ตัวอื่นตามตารางที่ 20 และได้ผลการจำลองดังภาพข้างล่าง

<u>ตารางที่ 20</u> ลำคับขั้นตอนการปรับเปลี่ยนการเปิด – ปิดสวิตช์ในสายป้อนโดยการปิดเบรกเกอร์ BZ14 ก่อนการปิดสวิตช์ BZ14-1H

ที่	ถำดับขั้นตอนเปิด – ปิดสวิตช์แบบเดิม	ลำดับขั้นตอนเปิด – ปิดสวิตช์แบบใหม่			
1	เชื่อมต่อสายป้อน Bay 1 และ Bay 2 ด้วยสวิตช์ BZ14BZ22-1H				
2	เปิดเบรกเกอร์ BZ14				
3	เปิดสวิตช์ BZ14-2H (R-B-Y)				
4	เปิดสวิตช์ BZ14-1H (R-B-Y)				
5	ปฏิบัติงาน				
6	ปิดสวิตช์ BZ14-2H (Y-B-R)				
7	ปิดสวิตช์ BZ14-1H (Y-B-R)	ปิดเบรกเกอร์ BZ14			
8	ปิดเบรกเกอร์ BZ14	ปิดสวิตช์ BZ14-1H (Y-B-R)			
9	แยกสายป้อน Bay 1 และ Bay 2 ด้วยสวิตช์ BZ14BZ22-1H (R-B-Y)				



<u>ภาพที่ 212</u> การจำลองกรณีปิดเบรกเกอร์ BZ14 ก่อนการปิดสวิตช์ BZ14-1H ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 213</u> แรงคันจากการปิดเบรกเกอร์ BZ14 ก่อนการปิดสวิตช์ BZ14-1H ทั้ง 3 เฟส ไม่ส่งผลให้ เกิดเฟอร์ โรเร โซแนนซ์ ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 214</u> พลังงานในเครื่องล่อฟ้าจากการปิดเบรกเกอร์ BZ14 ก่อนการปิดสวิตช์ BZ14-1H ทั้ง 3 เฟส ไม่ส่งผลให้เกิดเฟอร์ โรเรโซแนนช์ ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 215</u> การจำลองกรณีปิดเบรกเกอร์ BZ14 ก่อนการปิดสวิตช์ BZ14-1H ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 216</u> แรงคันจากการปิดเบรกเกอร์ BZ14 ก่อนการปิดสวิตช์ BZ14-1H ทั้ง 3 เฟส ไม่ส่งผลให้ เกิดเฟอร์ โรเร โซแนนซ์ ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 217</u> พลังงานในเครื่องล่อฟ้าจากการปิดเบรกเกอร์ก่อนการปิดสวิตช์ BZ14-1H ทั้ง 3 เฟส ไม่ส่งผลให้เกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ ด้วยโปรแกรม PSCAD

จากผลการจำลองปิดเบรกเกอร์ BZ14 เพื่อให้หม้อแปลงได้รับการจ่ายไฟพร้อม กันทั้ง 3 เฟส ก่อนสวิตช์ BZ14-1H จะปิดทีละเฟส ด้วยโปรแกรม ATP และโปรแกรม PSCAD ไม่ ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ ขณะมีเครื่องล่อฟ้าอยู่ในระบบที่มุมการปิดเดียวกัน กับที่เกิดปัญหา แต่จากการศึกษาเพียงการจ่ายไฟที่มุมการปิดของแต่ละเฟสที่ได้รับผลกระทบนั้นยัง ไม่เพียงพอยังขาดรายละเอียดบางส่วน ในการจ่ายไฟทรือดับไฟในทางปฏิบัติจริง เช่นผลของการ เลื่อนเฟสจากแรงดันทั้ง 2 ขั้วเมื่อทำการปิดสวิตช์ BZ14-1H หรือ ผลของมุมในการปิดสวิตช์ BZ14-1H ตั้งแต่มุมที่ 1-360 องศา เมื่อปิดเบรกเกอร์ BZ14 ก่อนการปิดสวิตช์ BZ14-1H หรือผล ของความสัมพันธ์ในการเปลี่ยนแปลงกวามยาวสายป้อนของสายเคเบิ้ลใต้ดินและสายเกเบิ้ลอากาศ กับแรงดันและพลังงานในเครื่องล่อฟ้า และผลของการดับไฟสายป้อนโดยสวิตช์ BZ14-1H ก่อน การปฏิบัติงานในช่วงสายป้อนที่ 2 ที่ไม่ส่งผลให้เกิดการเรโซแนนซ์ ซึ่งสามารถทำการศึกษาการ จำลองได้ดังนี้

ก. ผลของการเลื่อนเฟสจากแรงดันทั้ง 2 ขั้วเมื่อทำการปิดสวิตช์ BZ14-1H ซึ่ง ผู้ปฏิบัติงานอาจจะได้รับอันตรายได้ เมื่อแรงดันทั้ง 2 ด้านมีการเลื่อนเฟส จึงทำการศึกษาผลของ การเลื่อนเฟส โดยให้แหล่งกำเนิดด้าน BZ22 มีการเลื่อนเฟสแบ่งเป็น การเลื่อนเฟสกือ 5,10,15,20,25,30,90,120 และ 180 องศา ด้วยโปรแกรม ATP สามารถสร้างแบบจำลองและผลการ จำลองดังภาพข้างล่าง



<u>ภาพที่ 218</u> การจำลองการศึกษาผลการเลื่อนเฟสกรณีปิดเบรกเกอร์ BZ14 ก่อนการปิดสวิตช์ BZ14-1H ด้วยโปรแกรม ATP

<u>ตารางที่ 21</u> ผลการศึกษาการเลื่อนเฟสกรณีปิดเบรกเกอร์ BZ14 ก่อนการปิดสวิตช์ BZ14-1H ด้วย โปรแกรม ATP

การเลื่อนเฟส (องศา)	แรงคันสูงสุดเมื่อปิคสวิตช์ BZ14-1H (เปอร์ยูนิต)						
	ขั้วสวิตช์ด้านแหล่งกำเนิด BZ14			ขั้วสวิตช์	ขั้วสวิตช์ด้านแหล่งกำเนิด BZ22		
	เฟส R1	เฟส Y1	เฟส B1	เฟส R2	เฟส Y2	เฟส B2	
5	1.0102	1.0107	1.0257	1.0039	1.0635	1.0237	
10	1.0102	1.0124	1.0257	1.0054	1.0609	1.0534	
15	1.0102	1.0178	1.0257	1.0043	1.0618	1.0806	
20	1.0123	1.0226	1.0257	1.0277	1.0226	1.0990	
25	1.0158	1.0271	1.0257	1.0034	1.0276	1.1082	
30	1.0192	1.0311	1.0257	1.0040	1.0311	1.1144	
90	1.0471	1.0207	1.0257	1.0040	1.0269	<u>1.3923</u>	
120	1.0465	1.0107	1.0257	1.0252	1.0256	1.4863	
180	1.0509	1.0107	1.0431	1.0352	1.0270	1.5040	



<u>ภาพที่ 219</u> แรงดันจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 192.6 ° หลังปิดเบรกเกอร์ BZ14 เมื่อ แหล่งกำเนิดแรงดันด้าน BZ22 มีการเลื่อนเฟส 5 ° ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 220</u> แรงดันจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 192.6 ° หลังปิดเบรกเกอร์ BZ14 เมื่อ แหล่งกำเนิดแรงดันด้าน BZ22 มีการเลื่อนเฟส 10 ° ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 221</u> แรงดันจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 192.6 ° หลังปิดเบรกเกอร์ BZ14 เมื่อ แหล่งกำเนิดแรงดันด้าน BZ22 มีการเลื่อนเฟส 15 ° ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 222</u> แรงดันจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 192.6 ° หลังปิดเบรกเกอร์ BZ14 เมื่อ แหล่งกำเนิดแรงดันด้าน BZ22 มีการเลื่อนเฟส 20 ° ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 223</u> แรงดันจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 192.6 ° หลังปิดเบรกเกอร์ BZ14 เมื่อ แหล่งกำเนิดแรงดันด้าน BZ22 มีการเลื่อนเฟส 25 ° ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 224</u> แรงดันจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 192.6 ° หลังปิดเบรกเกอร์ BZ14 เมื่อ แหล่งกำเนิดแรงดันด้าน BZ22 มีการเลื่อนเฟส 30 ° ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 225</u> แรงดันจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 192.6 ° หลังปิดเบรกเกอร์ BZ14 เมื่อ แหล่งกำเนิดแรงดันด้าน BZ22 มีการเลื่อนเฟส 90 ° ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 226</u> แรงดันจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 192.6 ° หลังปิดเบรกเกอร์ BZ14 เมื่อ แหล่งกำเนิดแรงดันด้าน BZ22 มีการเลื่อนเฟส 120 ° ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 227</u> แรงดันจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 192.6 ° หลังปิดเบรกเกอร์ BZ14 เมื่อ แหล่งกำเนิดแรงดันด้าน BZ22 มีการเลื่อนเฟส 180 ° ด้วยโปรแกรม ATP

จากตารางสรุปผลการเลื่อนเฟสแหล่งกำเนิดแรงดัน BZ22 โดยให้ แหล่งกำเนิดแรงดัน BZ14 ไม่มีการเลื่อนเฟส พบว่าจะเกิดปัญหาแรงดันเกินเกิดขึ้นที่ขั้วทางด้าน แหล่งกำเนิดแรงดัน BZ22 เฟส B เมื่อทำการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y โดยแรงดันที่เกิดขึ้นจะมีก่า มากเมื่อมีการเลื่อนเฟสมาก และแหล่งกำเนิดแรงดัน BZ22 ที่มีการเลื่อนเฟส มุมเฟสที่มีการเลื่อนจะ ลู่เข้าสู่มุมเฟสแหล่งกำเนิดแรงดัน BZ14 ที่ไม่มีการเลื่อนเฟสจึงส่งผลให้เกิดแรงดันเกินเกิดขึ้น ทางด้านแหล่งกำเนิดแรงดัน BZ22

เมื่อพิจารณาผลการเลื่อนเฟสของแรงคันที่อาจจะส่งผลกระทบต่อผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งผู้ปฏิบัติงานอาจจะได้รับผลกระทบได้เมื่อมีการเลื่อนเฟสมากกว่า 90° แต่โอกาสการเกิดการ เลื่อนเฟสของแหล่งกำเนิดแรงคันมีน้อยนอกจากจะเกิดความผิดพร่องขึ้นในระบบ, มีโหลดความ เหนี่ยวนำในระบบมาก หรือมีความยาวของสายป้อนที่ยาว จึงอาจจะส่งผลกระทบดังกล่าว แต่ถึง อย่างนั้นก็ตามการปฏิบัติงานก็ต้องระมัดระวังเป็นกรณีพิเศษ ในการปิดสวิตช์ BZ14-1H ทั้ง 3 เฟส พลของมุมในการปิดสวิตช์ BZ14-1H ตั้งแต่มุมที่ 1-360 องศา เมื่อปิดเบรก เกอร์ BZ14 ก่อนการปิดสวิตช์ BZ14-1H เนื่องจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H ไม่สามารถควบคุมมุม การปิดได้ และมุมแต่ละมุมสามารถส่งผลให้เกิดแรงดันเกินเฟอร์ โรเร โซแนนช์หรือไม่เกิดก็ได้ จึง ด้องทำการศึกษาแรงดันเกินที่เกิดขึ้นในระบบ และพลังงานในเครื่องล่อฟ้า ต่อมุมที่ทำการปิด สวิตช์ BZ14-1H ตั้งแต่มุมที่ 1-360° ซึ่งในการวิเคราะห์นี้จะแบ่งเป็นการวิเคราะห์ 2 กรณี คือการ วิเคราะห์มุมในการปิดสวิตช์ของสวิตช์ BZ14-1H เมื่อไม่มีการปิดของเบรกเกอร์ BZ14 และการ วิเคราะห์มุมในการปิดสวิตช์ของสวิตช์ BZ14-1H เมื่อมีการปิดของเบรกเกอร์ BZ14 ก่อนการปิด สวิตช์ BZ14-1H โดยสามารถสร้างแบบจำลองและผลการจำลองด้วยโปรแกรม PSCAD ได้ดังภาพ ข้างล่าง



<u>ภาพที่ 228</u> แบบจำลองการศึกษาการวิเคราะห์มุมในการปิดสวิตช์ของสวิตช์ BZ14-1H เมื่อไม่มี การปิดของเบรกเกอร์ BZ14 ตั้งแต่มุมที่ 1-360° ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 229</u> ชุคควบคุมการเปลี่ยนมุมปิคสวิตช์ ตั้งแต่มุม 1-360 ° ของสวิตช์ BZ14-1H, บันทึก ข้อมูล และตรวจสอบแรงคันเกินเฟอร์ โรเร โซแนนซ์ ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 230</u> ผลของแรงดัน และพลังงานในเครื่องล่อฟ้า ต่อมุมในการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ตั้งแต่มุมที่ 1-360° ในเวลา 1 วินาที เมื่อไม่มีการปิดของเบรกเกอร์ BZ14 ส่งผลให้เกิด เฟอร์ โรเร โซแนนช์ ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 231</u> ผลของแรงดัน และพลังงานในเครื่องล่อฟ้า ต่อมุมในการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ตั้งแต่มุมที่ 1-360° ในเวลา 1 วินาที เมื่อมีการปิดของเบรกเกอร์ BZ14 ไม่ส่งผลให้เกิด เฟอร์ โรเรเร โซแนนช์ ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 232</u> ผลของแรงดัน และพลังงานในเครื่องล่อฟ้า ต่อมุมในการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส B ตั้งแต่มุมที่ 1-360° ในเวลา 1 วินาที เมื่อไม่มีการปิดของเบรกเกอร์ BZ14 ส่งผลให้ เกิดเฟอร์ โรเรเร โซแนนช์ ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 233</u> ผลของแรงดัน และพลังงานในเครื่องล่อฟ้า ต่อมุมในการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส B ตั้งแต่มุมที่ 1-360° ในเวลา 1 วินาที เมื่อมีการปิดของเบรกเกอร์ BZ14 ไม่ส่งผลให้เกิด เฟอร์ โรเรเร โซแนนช์ ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 234</u> ผลของแรงคัน และพลังงานในเครื่องล่อฟ้า ต่อมุมในการปิคสวิตช์ BZ14-1H เฟส R ตั้งแต่มุมที่ 1-360° ในเวลา 1 วินาที เมื่อไม่มีการปิคของเบรกเกอร์ BZ14 ไม่ส่งผลให้ เกิดเฟอร์ โรเรเร โซแนนช์ ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 235</u> ผลของแรงคัน และพลังงานในเครื่องล่อฟ้า ต่อมุมในการปิคสวิตช์ BZ14-1H เฟส R ตั้งแต่มุมที่ 1-360° ในเวลา 1 วินาที เมื่อมีการปิดของเบรกเกอร์ BZ14 ไม่ส่งผลให้ เกิดเฟอร์ โรเรเร โซแนนช์ ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 236</u> แรงคันเกินเฟอร์ โรเร โซแนนช์ เมื่อปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 144° เมื่อไม่มีการ ปิดของเบรกเกอร์ BZ14 และไม่มีเครื่องล่อฟ้าอยู่ในระบบ ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 237</u> แรงคันเกินเฟอร์ โรเร โซแนนช์ เมื่อปิคสวิตช์ BZ14-1H เฟส B ที่มุม 144° เมื่อไม่มีการ ปิคของเบรกเกอร์ BZ14 และไม่มีเครื่องล่อฟ้าอยู่ในระบบ ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 238</u> แรงดันเกินชั่วครู่ เมื่อปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส R ที่มุม 91 ° โดยไม่มีการปิดของ เบรกเกอร์ BZ14 และไม่มีเครื่องล่อฟ้าอยู่ในระบบ ด้วยโปรแกรม PSCAD

จากผลการจำลองพบว่า การวิเคราะห์มุมในการปิดสวิตช์ BZ14-1H เมื่อไม่ มีการปิดของเบรกเกอร์ BZ14 ตั้งแต่มุมที่ 1-360° สามารถส่งผลให้เกิดแรงดันเกินเฟอร์โรเร โซแนนซ์ได้ในบางมุม ดังนั้นจึงไม่มีความเหมาะสมในการเลือกใช้วิธีนี้ในการปิดสวิตช์ เนื่องจาก ไม่สามารถควบคุมการปิดสวิตช์ในมุมที่ไม่ทำให้เกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์ได้ ส่วนการวิเคราะห์มุม ในการปิดสวิตช์ BZ14-1H เมื่อมีการปิดของเบรกเกอร์ BZ14 ก่อนการปิดสวิตช์ BZ14-1H ตั้งแต่ มุมที่1-360° ไม่สามารถส่งผลกระทบให้เกิดแรงดันเกินเฟอร์โรเรโซแนนซ์ได้ทุกมุม จึงมีความ เหมาะสมในการใช้วิธีการปิดสวิตช์

ค. ผลของความสัมพันธ์ในการเปลี่ยนแปลงความยาวสายป้อนของสายเคเบิ้ล ใต้ดินและสายเคเบิ้ลอากาศ กับแรงดันและพลังงานในเครื่องล่อฟ้า จากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y, B และ R ที่มุม 192.6°, 199.8° และ 180° ตามลำดับในเหตุการณ์ที่นำมาเป็นกรณีศึกษา สามารถนำมาวิเคราะห์เป็นปัญหาแรงดันที่สัมพันธ์กับความยาวของสายป้อนที่เปลี่ยนแปลง เมื่อ สายป้อนประกอบด้วยสายเคเบิ้ลใต้ดินและสายเคเบิ้ลอากาศให้เป็นคอนทัวส์แรงดันและพลังงาน ในเครื่องล่อฟ้า เมื่อมีมุมปิดสวิตช์เดียวกัน เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลของความยาวสายป้อนที่ เปลี่ยนแปลงต่อแรงดันและพลังงานที่เกิดขึ้น โดยใช้โปรแกรม PSCAD ดังภาพข้างล่าง



<u>ภาพที่ 239</u> คอนทัวส์แรงคันที่ตกคร่อมเครื่องล่อฟ้า เฟส Y เมื่อปีคสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 192.6° ในเวลา 1 วินาที ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 240</u> คอนทัวส์แรงคันที่ตกคร่อมเครื่องล่อฟ้า เฟส B เมื่อปีคสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 192.6° ในเวลา 1 วินาที ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 241</u> คอนทัวส์แรงคันที่ตกคร่อมเครื่องล่อฟ้า เฟส R เมื่อปีคสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 192.6° ในเวลา 1 วินาที ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 242</u> คอนทัวส์พลังงานในเครื่องล่อฟ้า เฟส Y เมื่อปิคสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 192.6° ในเวลา 1 วินาที ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 243</u> คอนทัวส์พลังงานในเครื่องล่อฟ้า เฟส B เมื่อปิคสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 192.6° ในเวลา 1 วินาที ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 244</u> คอนทัวส์พลังงานในเครื่องล่อฟ้า เฟส R เมื่อปิคสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 192.6° ในเวลา 1 วินาที ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 245</u> คอนทัวส์แรงคันที่ตกคร่อมเครื่องล่อฟ้า เฟส Y เมื่อปิคสวิตช์ BZ14-1H เฟส B ที่มุม 199.8° ในเวลา 1 วินาที ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 246</u> คอนทัวส์แรงคันที่ตกคร่อมเครื่องล่อฟ้า เฟส B เมื่อปีคสวิตช์ BZ14-1H เฟส B ที่มุม 199.8° ในเวลา 1 วินาที ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 247</u> คอนทัวส์แรงคันที่ตกคร่อมเครื่องล่อฟ้า เฟส R เมื่อปีคสวิตช์ BZ14-1H เฟส B ที่มุม 199.8° ในเวลา 1 วินาที ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 248</u> คอนทัวส์พลังงานในเครื่องล่อฟ้า เฟส Y เมื่อปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส B ที่มุม 199.8° ในเวลา 1 วินาที ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 249</u> คอนทัวส์พลังงานในเครื่องล่อฟ้า เฟส B เมื่อปิคสวิตช์ BZ14-1H เฟส B ที่มุม 199.8° ในเวลา 1 วินาที ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 250</u> คอนทัวส์พลังงานในเครื่องล่อฟ้า เฟส R เมื่อปิคสวิตช์ BZ14-1H เฟส B ที่มุม 199.8° ในเวลา 1 วินาที ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 251</u> คอนทัวส์แรงคันที่ตกคร่อมเครื่องล่อฟ้า เฟส Y เมื่อปิคสวิตช์ BZ14-1H เฟส R ที่มุม 180° ในเวลา 1 วินาที ด้วยโปรแกรม PSCAD


<u>ภาพที่ 252</u> คอนทัวส์แรงคันที่ตกคร่อมเครื่องล่อฟ้า เฟส B เมื่อปีคสวิตช์ BZ14-1H เฟส R ที่มุม 180° ในเวลา 1 วินาที ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 253</u> คอนทัวส์แรงคันที่ตกคร่อมเครื่องล่อฟ้า เฟส R เมื่อปีคสวิตช์ BZ14-1H เฟส R ที่มุม 180° ในเวลา 1 วินาที ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 254</u> คอนทัวส์พลังงานในเครื่องล่อฟ้า เฟส Y เมื่อปิคสวิตช์ BZ14-1H เฟส R ที่มุม180° ใน เวลา 1 วินาที ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 255</u> คอนทัวส์พลังงานในเครื่องล่อฟ้า เฟส B เมื่อปิคสวิตช์ BZ14-1H เฟส R ที่มุม 180° ใน เวลา 1 วินาที ด้วยโปรแกรม PSCAD



<u>ภาพที่ 256</u> คอนทัวส์พลังงานในเครื่องล่อฟ้า เฟส R เมื่อปิคสวิตช์ BZ14-1H เฟส R ที่มุม 180° ใน เวลา 1 วินาที ด้วยโปรแกรม PSCAD

จากผลการศึกษาคอนทัวส์แรงคันและพลังงานในเครื่องล่อฟ้า สามารถทำ ให้ทราบความสัมพันธ์ของความยาวสายป้อนที่ส่งผลให้เกิดแรงคันและพลังงานในเครื่องล่อฟ้า ใน มุมปิดสวิตช์ของกรณีศึกษาเป็นเวลา 1 วินาที โดยผลของคอนทัวส์แรงคันและพลังงานในเครื่องล่อ ฟ้า สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับความยาวของสายป้อนที่มีความหลากหลาย ทำให้ทราบถึงผลที่ เกิดขึ้นของแรงคันหรือพลังงานในเฟสต่างๆ

ง. ผลของการคับไฟสายป้อนโคยสวิตช์ BZ14-1H ก่อนการปฏิบัติงานในช่วง สายป้อนที่ 2 ที่ไม่ส่งผลให้เกิดการเรโซแนนซ์ จากการศึกษาที่ผ่านมาสามารถสรุปการจ่ายไฟสาย ้ ป้อน หรือการปิดของสวิตช์ BZ14-1H หลังการปฏิบัติงานในสายป้อนชดที่ 2 เสร็จสิ้น เพื่อง่ายไฟ ้ คืนให้ระบบ ที่ไม่ส่งผลให้เกิด ปรากฏการณ์ เฟอร์โรเรโซแนนช์นั้น ต้องทำให้หม้อแปลงไม่ได้รับ การกระตุ้นหรือจ่ายไฟทีละเฟสจากสวิตช์ BZ14-1H โดยใช้วิธีการปิดของเบรกเกอร์ BZ14 เพื่อให้ หม้อแปลงได้รับการจ่ายไฟ 3 เฟส พร้อมกันก่อนการปิดสวิตช์ BZ14-1H ซึ่งสามารถทำการปิดได้ ทุกมุมการปิดตั้งแต่มุมที่ 1-360 องศา แต่เนื่องจากปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์สามารถเกิดได้ จากการจ่ายไฟ (ปิค)หรือคับไฟสายป้อน (เปิค) จากสวิตช์ที่กระทำบนพื้นฐานเฟสเคียวบนระบบ 3 เฟส ซึ่งการวิเคราะห์ที่ผ่านจะมุ่งเน้นที่การปิคหรือการจ่ายไฟสายป้อนของสวิตช์ เนื่องจากเครื่อง ้ล่อฟ้าได้รับความเสียหายจากการทดสอบทางภาคสนามในกรณีนี้ แต่ในการศึกษานี้จะทำการ ้วิเคราะห์การดับไฟสายป้อน (เปิด) ก่อนการปฏิบัติงานในสายป้อนชุดที่ 2 ของสวิตช์ BZ14-2H ที่ ้ไม่ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์เฟอร์ โรเร โซแนนช์ โดยสามารถแบ่งการวิเคราะห์ได้เป็น 2 กรณี คือ การเปิดเบรกเกอร์ BZ14 ก่อนการเปิดสวิตช์ BZ14-2H เมื่อสวิตช์ BZ14-1H มีการปิดอยู่ในระบบ ้เป็นลำดับขั้นตอนการเปิด – ปิคสวิตช์แบบเดิม ซึ่งมีโอกาสเสี่ยงการเกิดเรโซแนนช์ เนื่องจากหม้อ แปลงยังคงได้รับการกระตุ้นจากการดับไฟทีละเฟสจากสวิตช์ BZ14-2H โดยการวิเคราะห์การปิด สวิตช์ BZ14-1H และกรณีที่ 2 คือการเปิดสวิตช์ BZ14-2H ก่อนการเปิดเบรกเกอร์ BZ14 ดังมี แบบจำลองดังภาพที่ 191 และมีรายละเอียดลำดับขั้นตอนการเปิด – ปิดสวิตช์ในสายป้อนดังตาราง ข้างล่าง

<u>ตารางที่ 22</u> ลำดับขั้นตอนการดับไฟหรือเปิดสวิตช์ในสายป้อน ก่อนการปฏิบัติงานในช่วง สายป้อนชุดที่ 2 เพื่อพิจารณาโอกาสเกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ ตั้งแต่มุม 1-360°

ที่	ถำดับขั้นตอนเปิด – ปิดสวิตช์แบบเดิม	ลำคับขั้นตอนเปิด – ปิคสวิตช์แบบใหม่					
1	เชื่อมต่อสายป้อน Bay 1 และ Bay 2 ด้วยสวิตช์ BZ14BZ22-1H						
2	เปิดเบรกเกอร์ BZ14	เปิดสวิตช์ BZ14-2H (R-B-Y)					
3	เปิดสวิตช์ BZ14-2H (R-B-Y)	เปิดเบรกเกอร์ BZ14					
4	เปิดสวิตช์ BZ14-1H (R-B-Y)						
5	ปฏิบัติงาน						
6	ปิคสวิตช์ BZ14-2H (Y-B-R)						
7	ปิดเบรกเกอร์ BZ14						
8	ปิดสวิตช์ BZ14-1H (Y-B-R)						
9	แยกสายป้อน Bay 1 และ Bay 2 ค้วยสวิตช์ BZ14BZ22-1H (R-B-Y)						

<u>ตารางที่ 23</u> ผลการจำลองมุมเปิดสวิตช์ BZ14-2H ก่อนและหลังเปิดเบรกเกอร์ ตั้งแต่มุมที่ 1-360 ° เพื่อตรวจสอบแรงคันเกินเฟอร์โรเรโซแนนช์ ด้วยโปรแกรม ATP

เฟส	มุมปิดสวิตช์ ที่ส่งผลให้เกิดเฟอร์ โรเร โซแนนช์				
	ลำดับขั้นตอนเปิดเบรกเกอร์ BZ14	ถำดับขั้นตอนเปิดสวิตช์ BZ14-2H			
	ก่อนเปิดสวิตช์ BZ14-2H	ก่อนเปิดเบรกเกอร์ BZ14			
R	32-34,37-39,41-57,71-239,242-	0			
	322,328-336,338,340-342	0			
В	1-360	0			
Y	0	0			



<u>ภาพที่ 257</u> แรงดันจากการเปิดเบรกเกอร์ BZ14 ก่อนเปิดสวิตช์ BZ14-2H เฟส R ที่มุม 31 ° ไม่ส่งผลให้เกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 258</u> แรงดันจากการเปิดเบรกเกอร์ BZ14 ก่อนเปิดสวิตช์ BZ14-2H เฟส R ที่มุม 32 ° ส่งผล ให้เกิดเฟอร์ โรเร โซแนนช์ ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 259</u> แรงคันจากการเปิดเบรกเกอร์ BZ14 ก่อนเปิดสวิตช์ BZ14-2H เฟส B ที่มุม 31 ° ส่งผล ให้เกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 260</u> แรงคันจากการเปิดเบรกเกอร์ BZ14 ก่อนเปิดสวิตช์ BZ14-2H เฟส Y ที่มุม 90 ° ไม่ส่งผลให้เกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 261</u> แรงคันจากการเปิดสวิตช์ BZ14-2H เฟส R ก่อนเปิดเบรกเกอร์ BZ14 ที่มุม 32 ° ไม่ส่งผลให้เกิดเฟอร์ โรเร โซแนนช์ ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 262</u> แรงดันจากการเปิดสวิตช์ BZ14-2H เฟส B ก่อนเปิดเบรกเกอร์ BZ14 ที่มุม 31 ° ไม่ส่งผลให้เกิดเฟอร์ โรเร โซแนนช์ ด้วยโปรแกรม ATP



<u>ภาพที่ 263</u> แรงคันจากการเปิดสวิตช์ BZ14-2H เฟส Y ก่อนเปิดเบรกเกอร์ BZ14 ที่มุม 90 ° ไม่ส่งผลให้เกิดเฟอร์ โรเร โซแนนช์ ด้วยโปรแกรม ATP

จากผลการจำลองการคับไฟหรือเปิดสวิตช์ในสายป้อนในกรณีที่ 1 คือการ

เปิดเบรกเกอร์ BZ14 ก่อนเปิดสวิตช์ BZ14-2H จะส่งผลให้เกิดปรากฎการณ์เฟอร์ โรเรโซแนนซ์ขึ้น ในระบบ แต่ในกรณีที่ 2 คือการเปิดสวิตช์ BZ14-2H ก่อนเปิดเบรกเกอร์ BZ14 จะไม่ส่งผลให้เกิด เฟอร์ โรเรโซแนนซ์ ทั้ง 3 เฟส และไม่ขึ้นอยู่กับมุมในการเปิดสวิตช์ BZ14-2H ตั้งแต่มุมที่ 1-360 องศา เมื่อทำการเปิดสวิตช์ BZ14-2H เปิดเบรกเกอร์ BZ14 ทำให้หม้อแปลงไม่ได้รับการจ่ายไฟทั้ง 3 เฟส จึงสามารถเปิดสวิตช์ BZ14-1H ได้ทุกกรณี

วิจารณ์

จากผลการศึกษาแรงดันเกินเนื่องจากการเปิด–ปิด สวิตช์ในสายป้อนโดยใช้โปรแกรม ATP/EMTP ร่วมกับ โปรแกรม PSCAD/EMTDC สร้างแบบจำลองเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น สามารถทำ การวิเคราะห์หาสาเหตุที่ทำให้เครื่องล่อฟ้าเสียหายและหาวิธีการสำรวจทางเลือกที่เหมาะสมได้ ซึ่งแต่ละ โปรแกรมอาจจะมีความต้องการในการนำเข้าข้อมูลที่แตกต่างกัน แต่ผลลัพธ์ที่ออกมา สามารถใช้ตัดสินใจกับปัญหาที่เกิดขึ้นร่วมกันได้ดี โดยในการจำลองกรณีศึกษานี้สามารถแบ่งการ วิเคราะห์ได้เป็น 2 กรณี คือการวิเคราะห์แรงคันเกินเนื่องจากสภาวะชั่วครู่ และการวิเคราะห์แรงคัน เกินเนื่องจากเฟอร์โรเรโซแนนช์

1. การวิเคราะห์แรงดันเกินเนื่องจากสภาวะชั่วครู่

จากผลการจำลองพบว่าแรงคันเกินชั่วครู่มีค่าสูงประมาณ 1.5 – 1.6 p.u. เมื่อทำการปิด สวิตช์ BZ14-1H เฟส Y, B และเฟส R ที่ค่ายอดกลื่นที่เวลาต่างกัน ได้ผลลัพธ์ของพลังงานที่เกิดขึ้น ในช่วงสภาวะชั่วครู่ มีค่าน้อยประมาณ 8 - 10 J เนื่องจากแรงคันเกินที่เกิดขึ้นมีช่วงระยะเวลาไม่ นาน จึงไม่ใช่สาเหตุที่ทำให้เครื่องล่อฟ้าเกิดความเสียหายได้ เพราะพลังงานที่เครื่องล่อฟ้าได้รับ น้อยกว่า 4.7 kJ/kV ของแรงคันเกินสูงสุดต่อเนื่อง ตามที่ผู้ผลิตระบุ ตามภาพผนวกที่ ข1

2. การวิเคราะห์แรงดันเกินเนื่องจากเฟอร์โรเรโซแนนช์

จากผลการจำลองในกรณีศึกษาพบว่าการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุ่ม 192.6 ° เกิด แรงดันเกินเฟอร์ โรเร โซแนนช์ที่เฟส B และ เฟส R โดยแรงดันที่เครื่องล่อฟ้าเฟส B และ เฟส R ได้รับประมาณ 1.5 p.u. เนื่องจากแรงดันที่เกิดขึ้นจะถูกจำกัดโดยเครื่องล่อฟ้า แต่แรงดันเกินที่ เกิดขึ้นจริงขณะไม่มีเครื่องล่อฟ้าอยู่ในระบบอาจจะสูงขึ้นถึง 4 p.u. และด้วยสาเหตุนี้ทำให้เครื่องล่อ ฟ้าเฟส B และ เฟส R ได้รับพลังงานที่สูงประมาณ 5 – 7 kJ และเมื่อทำการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส B ที่มุ่ม 199.8 ° แรงดันเฟส Y และ B อยู่ในแรงดันที่พิกัดประมาณ 1 p.u. ทำให้เครื่องล่อฟ้าเฟส Y และ B ได้รับพลังงานที่น้อย ซึ่งเครื่องล่อฟ้าสามารถระบายความร้อนที่เกิดขึ้นได้ ส่วนแรงดัน เฟส R เกิดแรงดันเกินเฟอร์ โรเร โซแนนช์ ทำให้เครื่องล่อฟ้าเฟส R ได้รับแรงดันเกินและพลังงานที่สูง อย่างต่อเนื่อง จำนวน 2 ครั้งที่ผ่านมาทำให้พลังงานในเครื่องล่อฟ้ามีการสะสมพลังงานความร้อน เพิ่มขึ้น และเมื่อทำการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส R ที่มุ่ม 180° แรงดันทั้ง 3 เฟสกลับเข้าสู่สภาวะ ปกติประมาณ 1 p.u. แต่ผลของการได้รับแรงดันเกินและพลังงานที่สูงอย่างต่อเนื่อง จำนวน 2 ครั้ง ที่ผ่านมาของเครื่องล่อฟ้า R จึงทำให้เครื่องล่อฟ้าเฟส R ได้รับความเสียหาย เนื่องจากได้รับ พลังงานเกินกว่าตามที่ผู้ผลิตระบุ

จากการวิเคราะห์หาสาเหตุกวามเสียหายของเครื่องล่อฟ้าจากแรงดันเกินเนื่องจากสภาวะชั่ว กรู่ และเนื่องจากเฟอร์ โรเร โซแนนซ์ ทำให้สามารถสรุปสาเหตุที่ทำให้เครื่องล่อฟ้าเสียหายได้ซึ่ง เกิดจากแรงดันเกินเฟอร์ โรเร โซแนนซ์ จึงด้องทำการสำรวจทางเลือกในการระงับผลเฟอร์ โรเร โซแนนซ์เพื่อไม่ให้เครื่องล่อฟ้าเกิดกวามเสียหาย โดยหลักในการระงับผลเพื่อไม่ให้เกิดปัญหา แรงดันเกินเฟอร์ โรเร โซแนนซ์ คือการสร้างสภาวะที่ไม่เหมาะสมให้เกิดการสร้างวงจรเฟอร์ โรเร โซแนนซ์ขึ้น โดยเมื่อพิจารณาข้อมูลในระบบที่ทำการศึกษา และปัจจัยต่างๆที่ส่งผลให้เกิดแรงดัน เกินเฟอร์ โรเร โซแนนซ์ จากตารางที่ 14 พบว่าองก์ประกอบหลักของการเกิดเฟอร์ โรเร โซแนนซ์จะ ด้องมืองก์ประกอบหลักใหญ่ๆ ด้วยกัน คือกวามไม่เป็นเชิงเส้นของก่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าบนแกน เหล็กของหม้อแปลงและการอิ่มตัว ความเป็นเชิงเส้นของก่าความจุไฟฟ้าที่เหมาะสม และการใช้ อุปกรณ์ปัด-เปิดที่กระทำบนพื้นฐานเฟสเดียวในระบบ 3 เฟส จึงสามารถสรุปหาวิธีการระงับผลจาก ปัจจัยทั้ง 3 องก์ประกอบได้คือ การปรับเปลี่ยนที่หม้อแปลง, การปรับเปลี่ยนที่สายส่ง และการ

2.1 การปรับเปลี่ยนที่หม้อแปลง สามารถสร้างทางเลือกได้ 2 วิธี คือ

2.1.1 แขกหม้อแปลงออกจากการเชื่อมต่อของสาขป้อนทั้ง 2 จากสาขเคเบิ้ลใต้คิน และสาขเคเบิ้ลอากาศผ่านเบรกเกอร์ที่ต่อโดยเฉพาะต่างหาก (CB15) ซึ่งจากผลการจำลองพบว่าไม่ เกิดแรงดันเกินเฟอร์โรเรโซแนนซ์ เนื่องจากวงจรที่จะทำให้เกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์ไม่ครบ องก์ประกอบขาดความไม่เป็นเชิงเส้นของค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าบนแกนเหล็กของหม้อแปลงและ การอิ่มตัว มีแต่ความเหนี่ยวนำไฟฟ้าและค่าความจุไฟฟ้าของสายป้อน จึงส่งผลทำให้แรงคันที่ เกิดขึ้นมีการสั่นเล็กน้อยประมาณ 1.1 p.u. และพลังงานที่เกิดขึ้นไม่มากประมาณ 20 J เมื่อมีการปิด สวิตช์ BZ14-1H เฟส Y, B และเฟส R ที่มุม 192.6°, 199.8° และ 180° ตามลำคับ แต่วิธีการนี้ค้อง เสียค่าใช้จ่ายในการเพิ่มเบรกเกอร์ จำนวน 1 ชุด และทำการรี้อถอนและติดตั้งสายใหม่ จึงไม่มีความ เหมาะสม 2.1.2 การต่อโหลดให้หม้อแปลงเพิ่มขณะทำการเปิด-ปิดสวิตช์คงเดิม โดยทำการ เปลี่ยนแปลงก่ากวามด้านทานของโหลดทางด้านทุติยภูมิให้มีก่าเท่ากันทั้ง 3 เฟส เพื่อหาก่ากวาม ด้านทานที่เหมาะสมที่ไม่ทำให้เกิดปัญหาเฟอร์โรเรโซแนนช์ตั้งแต่ 0 – 1000 โอห์ม เนื่องจากกวาม ด้านทานจะทำหน้าที่ลดแรงดันที่ตกกร่อมกวามเหนี่ยวนำ โดยจะมองเป็น R_{Load} ขนาน กับ X_M จึง ทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ได้น้อย จากผลการจำลองพบว่าก่ากวามด้านทานที่เหมาะสมอยู่ที่ 200 โอห์ม 1,000 วัตต์ ซึ่งก่ากวามด้านทานดังกล่าวไม่ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ ขณะทำการปิดสวิตช์ทีละเฟสและ พลังงานในโหลดความด้านทานไม่สูงมาก โดยมีพลังงานใน เกรื่องล่อฟ้าที่ได้รับน้อย เมื่อมีการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y, B และเฟส R ที่มุม 192.6 ° 199.8 ° และ 180° ตามลำดับ แต่วิชีการนี้ด้องเสียก่าใช้จ่ายในการลงทุนสร้างโหลดกวามด้านทานมากและ มีกวามยุ่งยากในการกวบกุมการนำเข้าและเอาออกจากระบบจึงไม่มีกวามเหมาะสม

2.2. การปรับเปลี่ยนที่สายป้อน

โดยทำการเพิ่มหรือลดขนาดกวามยาวของสายป้อนให้เหมาะสม โดยต้องมีกวามยาว ของสายป้อนเท่าเดิมพบว่า เมื่อลดกวามยาวสายเกเบิ้ลใต้ดินให้น้อยลงในการจำลองไม่สามารถลด ปัญหาแรงดันเกินเฟอร์โรเรโซแนนท์ได้ จึงต้องทำการเปลี่ยนสายเกเบิ้ลใต้ดินเป็นสายเกเบิ้ลอากาศ แทน ซึ่งจากการจำลองพบว่าไม่ส่งผลให้เกิดแรงดันเกินเฟอร์โรเรโซแนนซ์ได้ แต่แรงดันที่เกิดขึ้น เมื่อปัดสวิตซ์ BZ14-1H เฟส Y จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงดันในเฟส B และ เฟส R ประมาณ 1.2 – 1.5 p.u. และเมื่อทำการปัดสวิตซ์เฟส B แรงดันเฟส B จะกลับเข้าสู่สภาวะปกติแต่แรงดันเฟส R จะเกิดการเหนี่ยวนำด้วยแต่เป็นแรงดันที่เกิดขึ้นน้อยประมาณ 0.6 – 0.9 p.u. และเมื่อปัดครบทั้ง 3 เฟส แรงดันจะกลับเข้าสู่สภาวะปกติ โดยมีพลังงานในเครื่องล่อฟ้าที่เกิดขึ้น ประมาณ 10 – 50 J เมื่อ มีการปิดสวิตซ์ BZ14-1H เฟส Y, B และเฟส R ที่มุม 192.6 °, 199.8 ° และ 180° ตามลำดับ แต่ วิธีการปรับเปลี่ยนที่สายป้อนดังกล่าวต้องเสียก่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนสายเกเบิ้ลใต้ดินเป็นสายเกเบิ้ล

2.3 การปรับเปลี่ยนที่ขั้นตอนลำคับการสวิตช์

เป็นวิธีการที่เหมาะสมที่สุดเนื่อง จากไม่เสียค่าใช้จ่าย และไม่ยุ่งยากในการปฏิบัติงาน จริง โดยเมื่อพิจารณาปัญหาการเกิดแรงดันเกินเฟอร์โรเรโซแนนซ์เกิดจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H ทีละเฟส จ่ายไฟให้หม้อแปลงจึงง่ายต่อการสร้างวงจรเรโซแนนซ์จากค่าของความเหนี่ยวนำไฟฟ้า และการอิ่มตัวของหม้อแปลงกับค่าของความความจุไฟฟ้าของสายเกเบิ้ลใต้ดินในช่วงนั้น ดังนั้นจึง สามารถสร้างทางเลือกได้ 2 วิธี คือ

2.3.1 การให้หม้อแปลงไม่ได้รับการจ่ายไฟทีละเฟสจากสวิตช์ BZ14-1H เพื่อไม่ให้ ้วงจรเรโซแนนช์เกิดกับค่าความจุไฟฟ้าของสายเคเบิ้ลใต้ดินในช่วงนั้น แต่จะทำการลดค่าความจุ ้ไฟฟ้า หรือ Xc ให้มีค่าน้อยลงโคยการปิคสวิตช์ BZ14-1H ให้ครบทั้ง 3 เฟสก่อน เพื่อเพิ่มความยาว ของสายป้อนในช่วงสายเคเบิ้ลอากาศ โดยไม่มีการจ่ายไฟจากการเปิดสวิตช์ BZ14-2H และเบรก เกอร์ BZ14 และเมื่อปิคสวิตช์ BZ14-1H ให้ครบทั้ง 3 เฟสแล้ว ทำการจ่ายไฟจากการปิคสวิตช์ BZ14-2H แทน ซึ่งวิธีการนี้เป็นการเพิ่มความชั้นของเส้นความจุไฟฟ้าให้มีความชั้นเพิ่มขึ้น ซึ่งจาก ผลการจำลองจะทำการปิดสวิตช์ BZ14-2H เฟส Y ตั้งแต่มุมที่ 1 - 360 องศา เพื่อพิจารณาโอกาส เกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์ โดยไม่จำเป็นต้องวิเคราะห์การปิดสวิตช์ของสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y เนื่องจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 192.6 ° ดังกล่าวเกิดแรงดันเกินเฟอร์ โรเร โซแนนช์ ้จึงไม่มีความเหมาะสมที่จะทำการปิดสวิตช์ BZ14-1H ด้วยลำดับขั้นตอนการปิดสวิตช์เหมือนเดิม แต่จะทำการจำลองการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ตั้งแต่มุมที่ 1 - 360 องศา ด้วยเพื่อใช้ในการ ้เปรียบเทียบจำนวนมุมที่ไม่ทำให้เกิดแรงดันเกินเฟอร์โรเรโซแนนช์ และใช้ในการวิเคราะห์เส้น ความจุไฟฟ้า โดยจากการจำลองพบว่าในโปรแกรม ATP การปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y มีจำนวน มุมที่ไม่ทำให้เกิดการเร โซแนนซ์จำนวน 228 มุม แต่การปิดสวิตช์ BZ14-2H เฟส Y จำนวนมุมที่ไม่ ทำให้การเรโซแนนซ์มีจำนวน 127 มุม จึงสามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มความยาวของสายป้อนในช่วง ้สายเคเบิ้ลอากาศให้กับวงจรเป็นการเพิ่มโอกาสเกิดการเรโซแนนซ์ขึ้น เนื่องจากเส้นความจุไฟฟ้าที่ . เปลี่ยนเป็นเส้นความจุไฟฟ้าที่มีความชันเพิ่มขึ้นเกิดจุดตัดกันกับเส้นความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของหม้อ แปลงเข้าใกล้บริเวณการอิ่มตัว จึงทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ได้ง่าย แต่ในโปรแกรม PSCAD การ ปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y มีจำนวนมุมที่ไม่ทำให้เกิดการเรโซแนนช์จำนวน 218 มุม แต่การปิด ้สวิตช์ BZ14-2H เฟส Y จำนวนมุมที่ไม่ทำให้เกิดการเรโซแนนช์จำนวน 334 มุม จึงสามารถสรุปได้ ้ว่าการเพิ่มความยาวของสายป้อนในช่วงสายเคเบิ้ลอากาศให้กับวงจร ทำให้โอกาสเกิดการเร ้โซแนนช์น้อยลง เนื่องจากเส้นความจุไฟฟ้าได้เปลี่ยนเป็นเส้นความจุไฟฟ้าที่ชันเพิ่มขึ้นจุดตัดของ

เส้นทั้ง 2 ออกห่างจากบริเวณการอิ่มตัวของกวามเหนี่ยวนำไฟฟ้าในหม้อแปลงจึงทำให้เกิดการเร โซแนนช์น้อยลง โดยผลของความแตกต่างของมุมที่ไม่ทำให้เกิดการเรโซแนนช์ทั้ง 2 โปรแกรมนั้น เกิดขึ้นเนื่องจากโครงสร้างแบบจำลองหม้อแปลงและความต้องการข้อมูลในการป้อนค่าเพื่อสร้าง แบบจำลองของแต่ละ โปรแกรมมีกวามแตกต่างกัน พร้อมกับหม้อแปลงเครื่องดังกล่าวเป็นหม้อ แปลงที่สร้างขึ้นมาเป็นขนาดพิเศษไม่ใช่หม้อแปลงขนาดมาตรฐานที่ผู้ผลิตขาย จึงทำให้การหา ข้อมูลในเชิงลึกเช่น กระแสลัดวงจรขณะปิดวงจรที่พิกัดในการจำลองของโปรแกรม ATP หรือ ขนาดกวามกว้าง กวามยาว และกวามหนาของแกนเหล็กแบบ 3 ขา ในการจำลองของโปรแกรม PSCAD ทำได้ยาก เนื่องจากหม้อแปลงเครื่องดังกล่าวถูกสร้างมามากกว่า 10 ปี แต่ถึงอย่างไรก็ตาม การจำลองที่ได้เหมือนกันคือ การปิดสวิตช์ BZ14-2H เฟส Y ที่มุม 1 - 360 องศา ในโปรแกรม ATP และโปรแกรม PSCAD มีโอกาสเกิดแรงดันเกินเฟอร์โรเรโซแนนช์ด้วยเหมือนกัน จึงทำให้วิธีการนี้ ไม่มีกวามเหมาะสมเนื่องจากยังไม่มีอุปกรณ์ที่สามารถกวบกุมมุมการปิดสวิตช์ได้ และเนื่องจากการ ปิดสวิตช์ BZ14-2H เฟส Y เกิดแรงดันเกินเฟอร์โรเรโซแนนช์ จึงไม่จำเป็นที่จะทำการวิเคราะห์การ ปิดของสวิตช์ BZ14 - 2H เฟส B และ เฟส R ด่อมา

2.3.2 การให้หม้อแปลงไม่ได้รับการกระตุ้นทีละเฟสจากการปิดสวิตช์ BZ14-1H โดย การจ่ายไฟให้หม้อแปลงพร้อมกันทั้ง 3 เฟส ก่อนจากเบรกเกอร์ BZ14 แล้วทำการปิดสวิตช์ BZ14-1H ทีละเฟสเหมือนเดิม โดยมีขั้นตอนการเปิด – ปิดสวิตช์ตัวอื่นตามตารางที่ 20 จากผลการจำลอง พบว่าการจำลองปิดเบรกเกอร์ BZ14 ก่อนการปิดสวิตช์ BZ14-1H ปิดทีละเฟสนั้นไม่ส่งผลให้ เกิดปรากฏการณ์เฟอร์ โรเร โซแนนซ์ ขณะมีเกรื่องล่อฟ้าอยู่ในระบบที่มุมการปิดเดียวกันกับที่เกิด ปัญหา จึงมีความเหมาะสมที่จะใช้วิธีการนี้ในจ่ายไฟ แต่จากการศึกษาเพียงการจ่ายไฟที่มุมการปิด ของแต่ละเฟสที่ได้รับผลกระทบนั้นยังไม่เพียงพอยังขาดรายละเอียดบางส่วน ในการจ่ายไฟที่มุมการปิด ของแต่ละเฟสที่ได้รับผลกระทบนั้นยังไม่เพียงพอยังขาดรายละเอียดบางส่วน ในการจ่ายไฟที่มุมการปิด ของแต่ละเฟสที่ได้รับผลกระทบนั้นยังไม่เพียงพอยังขาดรายละเอียดบางส่วน ในการจ่ายไฟหรือดับ ไฟในทางปฏิบัติจริง เช่นผลของการเลื่อนเฟสจากแรงดันทั้ง 2 ขั้วเมื่อทำการปิดสวิตช์ BZ14-1H หรือ ผลของมุมในการปิดสวิตช์ BZ14-1H ตั้งแต่มุมที่ 1-360 องศา เมื่อปิดเบรกเกอร์ BZ14 ก่อน การปิดสวิตช์ BZ14-1H หรือผลของความสัมพันธ์ในการเปลี่ยนแปลงความยาวสายป้อนของสาย เลเบิ้ลใต้ดินและสายเกเบิ้ลอากาศ กับแรงดันและพลังงานในเกรื่องล่อฟ้า และผลของการดับไฟสาย ป้อนโดยสวิตช์ BZ14-1H ก่อนการปฏิบัติงานในช่วงสายป้อนที่ 2 ที่ไม่ส่งผลให้เกิดการเร โซแนนช์ สามารถทำการศึกษาและวิจารณ์ผลการจำลองได้ดังนี้ ก. ผลของการเลื่อนเฟสจากแรงคันทั้ง 2 ขั้ว กรณีปีดเบรกเกอร์ BZ14 ก่อนจาก
ตารางที่ 21 สรุปผลของการเลื่อนเฟสแหล่งกำเนิดแรงคัน BZ22 โดยให้แหล่งกำเนิดแรงคัน BZ14
ใม่มีการเลื่อนเฟส ในมุมที่เกิดปัญหาพบว่าจะเกิดปัญหาแรงคันเกินเกิดขึ้นที่ขั้วทางด้าน
แหล่งกำเนิดแรงคัน BZ22 เฟส B มากที่สุด เมื่อทำการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y โดยแรงคันที่
เกิดขึ้นจะมีค่ามากเมื่อมีการเลื่อนเฟสมากซึ่งอาจจะสูงถึง 1.5040 เปอร์ยูนิต เมื่อมีการเลื่อนเฟส 180
องสา ดังนั้นผู้ปัดสวิตช์ต้องระมัดระวังการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y อย่าให้ส่วนหนึ่งส่วนใด
สัมผัสกับขั้วสวิตช์ BZ14-1H ทางด้านแหล่งกำเนิดแรงดัน BZ22 เฟส B โดยมุมเฟสที่มีการเลื่อน
เฟสของแหล่งกำเนิดแรงดัน BZ22 จะกลับเข้าสู่มุมเฟสของแหล่งกำเนิดแรงดัน BZ14 ที่ไม่มีการ
เลื่อนเฟสจึงส่งผลให้เกิดแรงดัน BZ22 จะกลับเข้าสู่มุมเฟสของแหล่งกำเนิดแรงดัน BZ14 ที่ไม่มีการ
เลื่อนเฟสจึงส่งผลให้เกิดแรงดัน BZ22 จะกลับเข้าสู่มุมเฟสของแหล่งกำเนิดแรงดัน BZ14 ที่ไม่มีการ
เลื่อนเฟสจึงส่งผลให้เกิดแรงดัน BZ22 จะกลับเข้าสู่มุมเปลของแหล่งกำเนิดแรงดัน BZ14 ที่ไม่มีการ
เลื่อนเฟสจึงส่งผลให้เกิดแรงคันเกินเกิดขึ้นทางด้านแหล่งกำเนิดกรงดัน BZ22 ดังกล่าว ส่วน
แรงดันเฟส Y และ เฟส R มีค่าไม่สูงมากอยู่ในช่วง 1 - 1.1 เปอร์ยูนิต โดยผลของการเลื่อนเฟสใน
แรงดันเฟส Y และ เฟส R มีค่าไม่สูงมากอยู่ในช่วง 1 - 1.1 เปอร์ยูนิต โดยผลของแหล่งกำเนิดแรงค้นมี
โอกาสเกิดขึ้นได้น้อยมากนอกจากจะเกิดความผิดพร่องขึ้นในระบบ, มีโหลดความเหนี่ยวนำใน
ระบบมาก หรือมีความยาวของสายป้อนที่ยาว จึงอาจจะส่งผลกระทบดังกล่าว แต่ถึงอย่างนั้นก็ตามผู้

 พลของมุมในการปิดสวิตช์ BZ14-1H ตั้งแต่มุมที่ 1-360 องสา สามารถ พิจารณาได้ 2 กรณีคือ การปิดสวิตช์ BZ14-1H ก่อนการปิดเบรกเกอร์ BZ14 และการปิดเบรก เกอร์ BZ14 ก่อนการปิดสวิตช์ BZ14-1H โดยจากผลการจำลองพบว่าการปิดสวิตช์ BZ14-1H ก่อนการปิดของเบรกเกอร์ BZ14 ตั้งแต่มุมที่ 1-360° จะทำให้หม้อแปลงได้รับการจ่ายไฟจากสาย ป้อนชุดที่ 1 จากแหล่งกำเนิด BZ22 สามารถส่งผลให้เกิดแรงดันเกินเฟอร์โรเรโซแนนซ์ได้ในบาง มุม จากกราฟแรงดันและพลังงานกับมุมที่ปิดของสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ตามภาพที่ 230 สามารถ พิจารณามุมที่ทำให้เกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์ได้อยู่ในช่วงมุมที่ 1 – 35 องสา, 143 – 215 องสา และ 323 – 360 องสา ในเฟส R และ เฟส B อยู่ในช่วง 3.1 - 4 p.u. และมีพลังงานในเครื่องล่อฟ้าเฟส ดังกล่าวอยู่ในช่วง 6.8 - 7 kJ ส่วนเฟส Y จะมีแรงดันเกิดขึ้นอยู่ในช่วง 0.99 – 1.15 p.u. และมี พลังงานในเครื่องล่อฟ้า 1.78 J แต่ในช่วงมุมที่ 36 – 142 องสา และ 216 – 321 องสาไม่ส่งผลให้เกิด การเรโซแนนซ์ ดังนั้นวิธีการนี้จึงไม่มีความเหมาะสมในการเลือกใช้ เนื่องจากไม่สามารถลวบคุม การปิดสวิตช์ BZ14-1H ตั้งแต่มุมที่ 1-360° ตามภาพที่ 231, 233 และ 235 ไม่มีการเกิด แรงดันเกินเฟอร์โรเรโซแนนซ์ทุกมุม จึงมีความเหมาะสมในการใช้วิธีการปิดสวิตช์แบบนี้

 ผลของความสัมพันธ์ในการเปลี่ยนแปลงความยาวสายป้อนของสายเคเบิ้ล ใต้ดินและสายเคเบิ้ลอากาศ กับแรงดันและพลังงานในเครื่องล่อฟ้า ซึ่งสามารถนำมาเขียนเป็น ้คอนทัวส์แรงคันและพลังงานในเครื่องล่อฟ้าที่มมปิดสวิตช์ในกรณีศึกษา โคยสามารถนำมาศึกษา ้ผลกระทบของแรงดันในแต่ละเฟสหรือพลังงานในเครื่องล่อฟ้าที่เกิดขึ้น เมื่อความยาวสายป้อนมี การเปลี่ยนแปลงที่มุมการปิดสวิตช์เดียวกันในเวลา 1 วินาที เช่น ระบบในกรณีศึกษามีความยาวสาย เคเบิ้ลใต้ดิน 0.35 กิโลเมตร, ความยาวสายเคเบิ้ลอากาศ 2.4 กิโลเมตร ดังนั้นเมื่อทำการปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 192.6° และเมื่อทำการลากเส้นตามความยาวของสายป้อนในคอนทัวส์ แรงคันเฟส Y ตามภาพที่ 239 จะทำให้ได้แรงคันเกินสูงสุดเท่ากับ 1.0275 p.u. โดยจะมีแรงคันเฟส B ในคอนทัวส์แรงคันเฟส B ตามภาพที่ 240 เท่ากับ 3.9288 p.u. และแรงคันเฟส R ในคอนทัวส์ แรงคันเฟส R ตามภาพที่ 241 เท่ากับ 3.9419 p.u. ส่วนพลังงานในเครื่องล่อฟ้าเฟส Y.เฟส B และ เฟส R จะได้เท่ากับ 1.78215 J. 6.95 kJ และ 6.96 kJ ตามภาพที่ 242. 243 และ244 ตามลำคับ ในช่วงเวลา 1 วินาที และเมื่อทำการปิดสวิตช์เฟส B ที่มุม 199.8° สามารถหาแรงคันและพลังงาน ในเครื่องล่อฟ้าของเฟสต่างๆตามภาพกอนทัวส์แรงคันหรือพลังงานที่มุมการปิดของสวิตช์นั้น และ ้สามารถหาผลของแรงคันและพลังงานที่ความยาวของสายป้อนต่างๆได้ โดยวิธีการลากเส้นให้ตรง ้กับความยาวที่ต้องการ ซึ่งวิธีการนี้สามารถนำไปใช้กับระบบที่มีคุณลักษณะเดียวกันแต่มีความยาว ้สายป้อนที่แตกต่างกันเพื่อใช้พิจารณาผลของแรงคันและพลังงาน เพื่อนำไปส่วิธีการแก้ไขต่อไป

จากผลการทำแผนภาพคอนทัวส์แรงคันและพลังงานในเครื่องล่อฟ้าทำให้

สามารถทราบใด้ว่า ระบบในกรณีศึกษาเมื่อมีมุมปิดสวิตช์ BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 192.6° และมี สายเกเบิ้ลใต้ดินเป็นองก์ประกอบจะส่งผลให้เกิดแรงดันเกินเฟอร์โรเรโซแนนช์ทุกความยาวที่ทำ การจำลองคือที่ความยาว 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4 และ 0.5 กิโลเมตร ในเฟส B และ เฟส R จึงส่งผลให้เกิดแรงดันและพลังงานในเครื่องล่อฟ้าที่มาก เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้า หรือ Xc ในสายเคเบิ้ลใต้ดินมีน้อยลง เนื่องจากสายเกเบิ้ลใต้ดินมีเปลือกหุ้มสายที่เป็นทองแดงกอร์ปกับมี แกนตัวนำเป็นทองแดง เมื่อมีการจ่ายไฟเกิดขึ้นในระบบจะส่งผลให้เกิดตัวเก็บประจุเป็นจำนวน มากในแต่ละเฟสตลอดความยาวสายรวมกับตัวเก็บประจุร่วมในแต่ละเฟสจึงส่งผลให้ค่าความจุ ไฟฟ้าน้อยลงทำให้เส้นความจุไฟฟ้าแบบเชิงเส้นมีความชันมากขึ้นเกิดจุดตัดกับเส้นความเหนี่ยวนำ ใฟฟ้าแบบไม่เป็นเชิงเส้นของหม้อแปลงในบริเวณการอิ่มตัวจึงส่งผลให้เกิดการเรโซแนนซ์ แต่เมื่อ ทำการเปลี่ยนสายเคเบิ้ลใต้ดินเป็นสายเคเบิ้ลอากาศจากการจำลองในหัวข้อ 2.2 การปรับเปลี่ยนที่ สายป้อนค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่ามากทำให้เส้นความจุไฟฟ้าแบบเชิงเส้นมีความชันมากขึ้นเกิดจุดตัด กับเส้นความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของหม้อแปลงนอกบริเวณการอิ่มตัวจึงส่งผลให้ไม่เกิดการเรโซแนนซ์ แต่เกิดการเหนี่ยวนำระหว่างเฟสอื่นที่ไม่ได้มีการจ่ายไฟแทน เป็นผลมาจากตัวเก็บประจุร่วม ระหว่างเฟสของสายเคเบิ้ลอากาศ โดยไม่มีผลกระทบของตัวเก็บประจุจากแกนตัวนำและเปลือก หุ้มสายเหมือนสายเคเบิ้ลใต้ดิน ซึ่งแรงดันและพลังงานในเครื่องล่อฟ้าที่เกิดขึ้นประมาณ 10-50 J ไม่สามารถส่งผลกระทบให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องล่อฟ้าได้ ดังนั้นในการศึกษาเรื่องคอนทัวส์ แรงดันและพลังงานจึงไม่ทำการศึกษาที่ความยาวสายเคเบิ้ลใต้ดินที่ 0 กิโลเมตร เนื่องจากการเขียน เส้นคอนทัวส์ในโปรแกรมระหว่างเส้นเป็นแบบเชิงเส้นเหมาะจะใช้กับหาค่าแรงดันหรือพลังงานที่ มีการเพิ่มหรือลดลงแบบเชิงเส้นจากการคำนวณของตัวเหนี่ยวนำ, ตัวเก็บประจุ และตัวด้านทานที่ เป็นแบบเชิงเส้น แต่แรงดันเกินเฟอร์โรเรโซแนนช์มีตัวเหนี่ยวนำงองหม้อแปลงเป็นแบบไม่เป็น เชิงเส้น เมื่อค่าความจุไฟฟ้ามีก่าไม่เหมาะสมแรงดันเกินเฟอร์โรเรโซแนนช์จะไม่เกิดขึ้นจะเป็น แรงดันปกติ แต่เมื่อมีค่าความจุไฟฟ้าที่เหมาะสมจะทำให้เกิดแรงดันหรือพลังงานที่มากขึ้นแบบไม่ เป็นเชิงเส้นหรือค่อยๆเพิ่มขึ้น

ง. ผลของเปิดสวิตช์หรือดับไฟสายป้อนโดยสวิตช์ BZ14-1H ที่ไม่ส่งผลให้เกิด การเรโซแนนช์ เนื่องจากการวิเคราะห์ที่ผ่านมาจะมุ่งเน้นที่การปิดหรือการจ่ายไฟสายป้อนโดย สวิตช์ BZ14-1H แต่เนื่องจากปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนช์สามารถเกิดได้จากการจ่ายไฟ (ปิด) หรือดับไฟสายป้อน (เปิด) จากสวิตช์ที่กระทำบนพื้นฐานเฟสเดียวบนระบบ 3 เฟส ดังนั้นจึงต้องทำ การวิเคราะห์ ซึ่งสามารถแบ่งการวิเคราะห์ได้เป็น 2 กรณี คือการเปิดเบรกเกอร์ BZ14 ก่อนเปิด สวิตช์ BZ14-2H ตั้งแต่มุมที่ 1-360 องสา จะส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนช์ขึ้นใน ระบบ เนื่องจากวิธีการนี้หม้อแปลงยังคงได้รับการกระตุ้นจากการดับไฟทีละเฟสจากสวิตช์ BZ14-2H และมีการปิดสวิตช์ BZ14-1H อยู่ในระบบ ตามตารางที่ 23 แต่ในกรณีที่ 2 คือการเปิดสวิตช์ BZ14-2H ก่อนเปิดเบรกเกอร์ BZ14 ตั้งแต่มุมที่ 1-360 องสา จะไม่ส่งผลให้เกิดเฟอร์โรเรโซแนนช์ เมื่อเปิดทีละเฟสจนครบ 3 เฟส โดยหม้อแปลงยังคงไดรับการจ่ายไฟทั้ง 3 เฟสจากเบรกเกอร์ BZ14 และเมื่อเปิดทีละเฟสจนครบ 3 เฟส โดยหม้อแปลงยังคงไดรับการจ่ายไฟทั้ง 3 เฟสจากเบรกเกอร์ BZ14 เมื่อเปิดทีละเฟสจนครบ 3 เฟส โดยหม้อแปลงยังคงไดรับการจายไฟทั้ง 3 เฟสจากเบรกเสอร์ BZ14 เละเมื่อเปิดเบรกเกอร์ BZ14 จะเป็นการดับไฟหม้อแปลงพร้อมกัน 3 เฟส จึงไม่ส่งผลให้เกิดการเร โซแนนช์ เมื่อหม้อแปลงไม่ได้รับการจ่ายไฟ จึงสามารถเปิดสวิตช์ BZ14-1H ได้ทุกกรณี

สรุป

้จากผลการศึกษาแรงคันเกินเนื่องจากการเปิด–ปิด สวิตช์ในสายป้อน โดยใช้โปรแกรม ATP/EMTP ร่วมกับ โปรแกรม PSCAD/EMTDC สร้างแบบจำลอง และจำลองเหตุการณ์ที่เกิด ปัญหากับเครื่องล่อฟ้าที่ได้รับความเสียหาย สามารถทำการวิเคราะห์หาสาเหตุ, วิธีการลด ้ผลกระทบ และทางเลือกที่เหมาะสมใด้ง่าย ซึ่งปัญหาดังกล่าวเกิดจากสภาวะเฟอร์ โรเรโซแนนซ์ เนื่องจากการคับไฟหรือจ่ายไฟทีละเฟสจากสายป้อนในระบบ 3 เฟสให้หม้อแปลง ทำให้เกิดการ สร้างวงจรเฟอร์ โรเร โซแนนซ์ขึ้นในระบบ ส่งผลให้เกิดแรงคันเกินและพลังงานในเครื่องล่อฟ้า ตามมาเป็นจำนวนมากกว่าที่ผู้ผลิตระบุจนทำให้เครื่องล่อฟ้าได้รับความเสียหาย ซึ่งปัญหาดังกล่าว ้สามารถแก้ไขได้หลายวิธี แต่วิธีการที่เหมาะสมที่สุดโดยไม่เสียค่าใช้จ่ายคือวิธีการทำให้หม้อแปลง ใด้รับการคับไฟหรือง่ายไฟพร้อมกัน 3 เฟสจากสายป้อนชุดที่ 2 ผ่านเบรกเกอร์ BZ14 ก่อนทำการ ดับไฟจากสวิตช์ BZ14-2H หรือจ่ายไฟจากสวิตช์ BZ14-1H โดยไม่มีผลเรื่องมุมในการเปิดหรือปิด ้สวิตช์ที่จะทำให้เกิดแรงคันเกินเฟอร์ โรเร โซแนนช์ โคยมีถำคับขั้นตอนการเปิด–ปิด สวิตช์ในสาย ้ ป้อน ตามตารางที่ 24 แต่เนื่องจากการเปิด–ปิด สวิตช์ในสายป้อนจะมีแรงคันที่ขั้วสวิตช์ทั้ง 2 ด้าน ดังนั้นผู้เปิดหรือปิดสวิตช์ต้องปฏิบัติงานอย่างระมัดระวังเป็นพิเศษ และวิธีการดังกล่าวไม่สามารถ ้เป็นแบบมาตรฐานที่ใช้ในการแก้ไขปัญหาแรงดันเกินเฟอร์โรเรโซแนนช์ทุกระบบจำหน่ายที่เกิด ้ ปัญหา แต่เป็นการแก้ไขปัญหาเฉพาะแห่งในระบบจำหน่ายที่ทำการศึกษาเท่านั้น ซึ่งอาจจะไม่ สามารถใช้ได้กับระบบจำหน่ายอื่นๆ

ในระบบจำหน่ายอื่นๆที่มีปัจจัยเสี่ยงต่อการเกิดปัญหาแรงคันเกินเฟอร์โรเรโซแนช์ตาม ตารางที่ 14 ควรทำการจำลองระบบด้วยโปรแกรมภาวะชั่วครู่ เช่นโปรแกรม ATP/EMTP หรือ โปรแกรม PSCAD/EMTDC หรือทั้งกู่ เพื่อช่วยในการตัดสินใจการตรวจสอบขนาดแรงดัน และ พลังงานในเครื่องล่อฟ้า ขณะมีการเปิด-ปิดสวิตช์ในระบบ จะทำให้ทราบถึงขนาดแรงดัน และ พลังงานที่เกิดขึ้น ส่งผลให้สามารถหาวิธีการแก้ไขที่ถูกต้องนำไปสู่การลดปัญหาความเสียหายของ อุปกรณ์ในระบบตามมา

โดยในระบบที่นำมาจำลองในกรณีศึกษาจะเป็นแบบอย่างของการทำคอนทัวส์แรงดันเกิน และพลังงานในเครื่องล่อฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวของสายป้อนให้มีความหลากหลายมา จำลองแล้วนำค่าของขนาดแรงดัน และพลังงานที่เกิดขึ้นในเฟสต่างๆ มาทำเป็นคอนทัวส์แรงดัน เกิน หรือพลังงานในเครื่องล่อฟ้าที่มุมปิดสวิตช์ในแต่ละเฟสเพียงมุมเดียวเท่านั้น ดังภาพที่ 239-256 ซึ่งจะทำให้ทราบถึงผลที่เกิดขึ้นของแรงคันหรือพลังงานในมุมปิคสวิตช์ที่เฟสต่างๆเพียงมุมเดียว แต่เราสามารถทำการจำลองเพิ่มมุมในการปิคสวิตช์เพิ่มได้อีกจำนวน 359 มุม หรือมุมในการเปิด สวิตช์ตั้งแต่มุมที่ 1-360 องศา ทั้ง 3 เฟส ก็จะสามารถพิจารณาผลของมุมในการปิดและเปิดสวิตช์ไป ประยุกต์ใช้กับระบบจำหน่ายอื่นที่มืองก์ประกอบเดียวกัน แต่มีความยาวของสายป้อนแตกต่างได้ หรือทำให้ทราบผลของมุมการปิดหรือเปิดสวิตช์ที่มีผลต่อขนาดของแรงดันและพลังงานได้ดี

การประยุกต์ใช้กอนทัวส์แรงคันเกินและพลังงานในเกรื่องล่อฟ้าของกรณีศึกษาจะแสดง เป็นรูปภาพแบบ 3 มิติ ประกอบด้วยแกน x และ แกน y เป็นขนาดความยาวของสายป้อนคือ สาย เกเบิ้ลใต้ดินและสายเคเบิ้ลอากาศ ซึ่งสามารถเพิ่มหรือลดขนาดความยาวของสายป้อนที่เหมาะสม โดยมีค่าความความยาวของสายป้อนในระบบที่ทำการศึกษาเป็นค่ากลาง เมื่อทำการจำลองด้วย โปรแกรมภาวะชั่วครู่จะได้ขนาดของแรงดันและพลังงานในเครื่องล่อฟ้าเป็นค่าตัวแปลในแกน z ซึ่งการประยุกต์ใช้นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบอื่นๆได้ เช่นในระบบที่ไม่มีสายเคเบิ้ลใต้ดิน แต่มีสายเคเบิ้ลอากาศกับชุดตัวเก็บประจุจะได้ตัวแปลในคอนทัวส์แบบใหม่ที่มีตัวแปลในแกน x และ แกน y เป็นสายเคเบิ้ลอากาศกับชุดตัวเก็บประจุในระบบทำให้ทราบผลของขนาดแรงคันและ พลังงานต่อการเปลี่ยแปลงของความสายเคเบิ้ลอากาศกับชุดตัวเก็บประจุในระบบแทน

<u>ตารางที่ 24</u> สรุปลำดับขั้นตอนการดับไฟและจ่ายไฟสายป้อน เพื่อใช้ปฏิบัติงานในช่วงสายป้อน ชุดที่ 2 ที่ไม่ส่งผลให้เกิดแรงดันเกินเฟอร์โรเรโซแนนซ์

นึม.	ลำดับขั้นตอนการดับไฟและจ่ายไฟสายป้อน
1	เชื่อมต่อสายป้อนชุคที่ 1 และชุคที่ 2 ด้วยสวิตช์ BZ14BZ22-1H
2	เปิดสวิตช์ BZ14-2H (R-B-Y)
3	เปิดเบรกเกอร์ BZ14
4	เปิดสวิตช์ BZ14-1H (R-B-Y)
5	ปฏิบัติงาน
6	ปิดสวิตช์ BZ14-2H (Y-B-R)
7	ปิดเบรกเกอร์ BZ14
8	ปิดสวิตช์ BZ14-1H (Y-B-R)
9	แยกสายป้อนชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ด้วยสวิตช์ BZ14BZ22-1H (R-B-Y)

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- Bickford, J.P., Mullineux, N. and Reed, J.R. 1980. Computation of Power System Transients. 2nd ed. A.Wheaton & Co., Ltd., England.
- Bohmann, L.J., McDanie, J. and Stanek, E.K. 1993. Lightning Arrester Failure and Ferroresonance on A Distribution Systems. pp. 157-159. IEEE transactions on Industry Application, Vol.29 No.6
- Canadian/ American EMTP User Group. 1992. **ATP Rule Book**. Canadian/ American EMTP User Group, Oregon, USA.
- Ceraolo, M. 1998. PlotXY. University of Pisa, Italy.
- Ferracci, P. 1998. n° **190 Ferrorasonance**. ECT190, First Issed March 1998. Cahier Technique Schneider, Germany.
- Greenwood, A. 1991. Electrical Transients in Power Systems. 2nd ed. JOHN WILEY & SON, INC., New York.

Hoidalen, H.K. 2002. ATPDraw version 3.5 User's Manual. Trondheim, Norway.

- Horak, J. 2004. A Review of Ferroresonance. pp. 1–29. Protective Relay Engineers, 57th. IEEE CNF, Annual Conference
- Meliopoulos, S.1988. Power System Grounding and Transients. Vol.10. MARCE DEKKER, INC., New York.
- Watson, N. and Arrillaga, J. 2003. Power Systems Electromagnetic Transients Simulation. MPG Books Limited, Bodmin, Cornwall, England.

Woodford, D. 2001. Introduction to PSCAD V3. Manitoba HVDC Research centre Inc, Canada.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

แบบจำลองกรณีศึกษาด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC



RLC

<u>ภาพผนวกที่ ก1</u> แบบจำลองแหล่งกำเนิดแรงคัน ด้วยโปรแกรม PSCAD

(a) แบบจำลองแหล่งกำเนิด (b) การกำหนดค่าแรงดันในแบบจำลอง
 (c) การกำหนดค่าความต้านทานและความเหนี่ยวนำภายในสถานีไฟฟ้า



<u>ภาพผนวกที่ ก2</u> แบบจำลองสายเคเบิ้ลใต้คิน ด้วยโปรแกรม PSCAD (a) แบบจำลอง (b) การกำหนดค่าความถี่และความยาวเคเบิ้ลใต้ดิน



<u>ภาพผนวกที่ ก2</u> (ต่อ)

(c) การกำหนดค่าองก์ประกอบ (d) รายละเอียดข้อมูลสายเกเบิ้ลใต้ดิน



<u>ภาพผนวกที่ ก3</u> แบบจำลองสายเคเบิ้ลอากาศ ด้วยโปรแกรม PSCAD (a) แบบจำลอง (b) การกำหนดค่าความถี่, ความยาวและจำนวนสายเคเบิ้ลอากาศ

General Line Geometry Data Input

	Tower: S	AC	Tower Ce	entre 0 [m]			
	Conducto	ors: SAC	-	\rightarrow	Ground_	Wires: 1/2"Hig	ghStrengthStee
Cond. #	Connection Phasing #	X (from tower centre)	Y (at tower)	GW. #	Connection Phasing #	X (from tower centre)	Y (at tower)
1	1	-0.481 [m]	9.77 [m]	1	Eliminated	-0.591 [m]	10.005 [m]
2	2	-0.591 [m]	9.579 [m]	2	Eliminated	0.591 [m]	10.005 [m]
3	3	-0.701 [m]	9.77 [m]			7	
4	4	0.701 [m]	9.77 [m]	Mid-Spar	n Sag: 🗸 🦳		
5	5	0.591 [m]	9.579 [m]	0.3 [m]	for Conductor	s	
6	6	0.481 [m]	9.77 [m]	0.3 [m]	for Ground Wi	ires	
				7777		7777777	

(c)

```
Line Summary:
  Line Name = TLine
   Line Length = 2.4
  Steady State Frequency = 50.0
  Number of Conductors = 6
This should be in a section called TLINE-INPUT-DATA
Line Constants Ground Data:
  GroundResistivity = 100.0
  GroundPermeability = 1.0
  EarthImpedanceFormula = 0
This should be in a section called TLINE-INPUT-DATA
Line Constants Tower:
   Name = SAC
   Circuit = 1
      Transposed = 0
      Conductors = 6
      Conductor Phase Information = 1 2 3 4 5 6
      Radius = 0.00775
      DCResistance = 0.03206
      ShuntConductance = 1.0e-011
      P1 = -0.481 \ 9.77
      P2 = -0.591 \ 9.579
      P3 = -0.701 \ 9.77
      P4 = 0.701 \ 9.77
      P5 = 0.591 \ 9.579
      P6 = 0.481 \ 9.77
     Sag = 0.3
   GroundWires = 2
     Eliminate Ground Wires = 1
      Radius = 0.00315
     DCResistance = 2.8645
      P1 = -0.591 \ 10.005
      P2 = 0.591 \ 10.005
     Sag = 0.3
This should be in a section called TLINE-INPUT-DATA
Bergeron Line Model Options:
  Interpolate Travel Times = 1
   Infinite Line Length = 0
  High Frequency Approximation = 0
```

(d)

<u>ภาพผนวกที่ ก3</u> (ต่อ)

(c) การกำหนดค่าองค์ประกอบ (d) รายละเอียดข้อมูลสายเคเบิ้ลอากาศ





<u>ภาพผนวกที่ ก4</u> แบบจำลองหม้อแปลง ด้วยโปรแกรม PSCAD

- (a) แบบจำลอง (b) การกำหนดค่าตัวแปรหม้อแปลง
- (c) การกำหนดคุณลักษณะการอิ่มตัวของหม้อแปลง



1	``
- (-	a 1
_ <u>(</u>	u)

[arrester] Arrester	[× [arr	ester] Arı	rester		>
Configuration	•	Γ	V Charact	eristic		•
Arrester Name	MOV9	X1	0.00	0000042 [kA]	Y1	1.436566667 (p.u
Arrester Voltage Rating	9.0 [KV]	X	0.00	000029 [kA]	Y2	1.553925556 [p.u
# of Parallel Arrester Stacks	1	X	0.0	000415 [kA]	Y3	1.616952222 [p.u
Enable Non-linear Characteristic	1	XZ	0.0	0107 [kA]	Y4	1.684324444 [p.u
-I-V Characteristic		×5	0.0	0507 [kA]	Y5	1.753871111 [p.u
C Default		×e	0.0	5 [kA]	Y6	1.873404444 [p.u
 User defined (table) 		×ī	0.5	06 (kA)	Y7	2.029883333 [p.u
C User defined (external data file)	XE	1.1	1 [kA]	Y8	2.140722222 [p.u
		X9	9.9	3 [kA]	Y9	2.6884 [p.u.]
		X1	0 19.3	2 [kA]	Y10	2.914425556 [p.u
		X1	1 61.6	6 [kA]	Y11	3.781581111 [p.u
		Fi	e name	dat	afile	
			athname	, to the datafile	is given as	
			🖲 relative	pathname		
			🗅 absolut	te pathname		
OK Cancel	Help		ОK		Cancel	Help
(b)					(c)	

<u>ภาพผนวกที่ ก5</u> แบบจำลองเครื่องล่อฟ้า ด้วยโปรแกรม PSCAD

- (a) แบบจำลอง (b) การกำหนดค่าขนาดเครื่องล่อฟ้า
- (c) การกำหนดคุณลักษณะ I, V ของเครื่องล่อฟ้า

ภาคผนวก ข

ข้อมูลเครื่องล่อฟ้า

Energy Handling Capacity Type PDV and PVR Distribution Class Arresters

The MOV blocks used in distribution class arresters are subjected to direct lightning strokes. It is therefore important to verify that they will withstand the type of surge duty they will see in the field. During the process of handling a lightning strike, the arrester must be able to absorb the surge, dissipate the energy, and remain thermally stable.

None of the current standards (ANSI or IEC) clearly define how to establish the energy handling capacity of an arrester. Instead, they call for the following operating duty tests for demonstrating the repetitive energy handling capability of the design.

- a. Low-current, long-duration test per ANSI standards C62.11, clause #8.10.2.2, using a 250A X 2000 micro-second wave shape for 10kA heavy cluty and 75A X 2000 micro-second for 5kA normal duty Distribution Class arresters.
- Long duration current impulse withstand test per IEC standards 60099-4, clause #7.4.2 using the line discharge parameters specified by IEC.

During these tests, the arrester blocks are subjected to repetitive energy discharges as defined in the standard. However, that does not quantify the actual energy handling capacity of the arrester.

Hubbell Power Systems/Ohio Brass Company manufacture their own blocks and perform the following tests (in addition to complying with the above requirements of ANSI and IEC standards).

- i) Each MOV block receives an 8/20 high current lightning surge that subjects the block to its rated routine test energy, which are 225 Joules/cc for 10kA heavy duty blocks and 195 Joules/cc for 5kA normal duty blocks. These are the energy levels for running the routine production test in our MOV plant on 100% basis. Actual energy handling capacity is much above this level.
- ii) In addition to the routine test as outlined in paragraph (i) above, we perform a sampling Q.A. test (high current, short duration). Random samples of blocks from each batch of heavy duty arrester blocks are subjected to a two shot series of 100kA high current impulses. Similarly, random samples of blocks from each batch of normal duty arrester blocks are subjected to a two shot series of 65kA high current impulses. These tests determine a conservative value for the ultimate energy handling capacity of the blocks. Based on the Q.A test data on file, these ultimate values are 500 Joules/cc for 10kA heavy duty blocks and 530 Joules/cc for 5kA normal duty blocks.

Translating the Q.A. data into kJ/kV, we confirm the following ultimate Energy Handling Capacities:

PDV-100 Type arresters	 (10kA heavy duty)	 5.20 kJ/kV of MCOV
PVR Type arresters	 (10kA heavy duty)	 4.70 kJ/kV of MCOV
PDV-65 Type arresters	 (5kA normal duty)	 3.20 kJ/kV of MCOV

NOTE: Because Hubbel has a policy of continuous product improvement, we reasive the right to change design and specifications without notice.

FURDELL POWER SYSTENS, INC. 573-682-6521 Fax 573-682-8714 http://www.hubbellpowersystems.com ANDERSON® CENCE* FARGO* HUBBELL* Crack Contracts

UNITED STATES • 210 N. Allen • Cantrale, Mo 65240 • Phone: 573-682-6521 • Fax: 573-682-6714 • e-mail: hpsiterature@hps.hubbel.com CANADA • 670 Brock Road South • Pickering, Omario L1W 12B • Phone: 905-639-1138 • Fax: 905-631-6353 • e-mail: htohps@hubbelionline.com MEXICO • Av. Coyoacan No. 1051 • Col. Del Vale • 03100 Mexico, D.F. • Phone: 52-55-9151-9999 • Fax: 52-55-9151-9999 • e-mail: hteat@hubbelicom.mx

Copyright 2004 Hubbell Power Systems

Bulletin EU1511

<u>ภาพผนวกที่ ข1</u> ความสามารถในการควบคุมพลังงานของเครื่องล่อฟ้าในกรณีศึกษา







OHIO BRASS – AIKEN, SC

APRIL 2005

<u>ภาพผนวกที่ ข2</u> เส้นโค้งความสามารถในการทำงานบนแรงคันเกินชั่วคราวของเครื่องล่อฟ้า