

บทที่ 2

ปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์

2.1 บทนำทั่วไป

คำว่า “เฟอร์โรเรโซแนนซ์” ปรากฏในบทความวิจัยครั้งแรกในปี 1920 [1, 2] ที่ใช้อ้างอิงถึงปรากฏการณ์เรโซแนนซ์แบบไม่เชิงเส้น (nonlinear resonance) ของวงจรที่ประกอบไปด้วยตัวเหนี่ยวนำไม่เป็นเชิงเส้น (แกนเหล็กที่สามารถอิ่มตัวได้) ตัวเก็บประจุ แหล่งจ่ายแรงดัน (รูปคลื่นไซน์) และวงจรมีกำลังสูญเสียต่ำ ในระบบไฟฟ้ามีตัวเหนี่ยวนำแบบไม่เชิงเส้นเป็นองค์ประกอบพื้นฐานของหม้อแปลงกำลัง หม้อแปลงแรงดัน หรือตัวเหนี่ยวนำชนิดต่างๆ ซึ่งอาจเกิดปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ได้กับความจุไฟฟ้าของสายจำหน่ายเหนือศีรษะ (overhead line) ชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้า หรือสายเคเบิลใต้ดินซึ่งนิยมใช้มากขึ้นในปัจจุบัน ผลของการเรโซแนนซ์พลวัตแบบไม่เป็นเชิงเส้นทำให้เกิดแรงดันและกระแสเกินกว่าปกติ รูปคลื่นแรงดันผิดเพี้ยนหรือมีองค์ประกอบของฮาร์มอนิกสูง และอาจมีลักษณะการแกว่งไม่เป็นฟังก์ชันคาบเวลา (non-periodic function) แรงดันและกระแสเกินที่มีขนาดสูงนี้เป็นสาเหตุทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบได้รับความเสียหายหรือทำงานผิดพลาด ซึ่งส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือและความมั่นคงของระบบ นอกจากนี้ผลของฮาร์มอนิกยังส่งผลกระทบต่อคุณภาพของกำลังไฟฟ้าอีกด้วย

สำหรับในระบบจำหน่ายไฟฟ้าปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์เริ่มเกิดขึ้นและเป็นที่รู้จักในปี ค.ศ. 1956 ในระบบสายจำหน่ายเหนือศีรษะ โดยเกิดขึ้นจากการสับ-ปลดสวิตช์ชนิดสับ-ปลดที่ละเฟส เช่น สวิตช์ใบมีด (disconnecting switch) และฟิวส์ชนิดขาดตก (drop-out fuse) หรืออาจเกิดขึ้นจากการขาดตกของฟิวส์และสายจำหน่ายแรงสูง จากนั้นเมื่อมีการพัฒนามาใช้สายเคเบิลใต้ดินมากขึ้นก็ยิ่งพบว่ามียางานการเกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์ ที่ทำให้ความเสียหายของกับดักฟ้าผ่าและหม้อแปลงจำหน่ายเพิ่มมากขึ้น ด้วยเหตุนี้ทำให้มีการศึกษาวิจัยในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ต่อเนื่องมาไม่น้อยกว่า 80 ปี แต่เนื่องจากคุณลักษณะพลวัตที่ไม่เป็นเชิงเส้นของปรากฏการณ์จึงทำให้ยากต่อการเข้าใจ และทำนายปรากฏการณ์ที่อาจเกิดขึ้นในระบบจริง แม้แต่ในปัจจุบันที่สามารถสร้างแบบจำลองและคำนวณได้ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ก็ตาม จึงทำให้งานวิจัยส่วนใหญ่ยังไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์และหาแก้ปัญหานี้ได้อย่างชัดเจน

ในประเทศไทยนั้นเฟอร์โรเรโซแนนซ์เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบ่อยครั้งแต่มีการศึกษาวิจัยเพื่อนำความรู้มาแก้ปัญหา ออกแบบ และจัดการระบบอยู่น้อย เฟอร์โรเรโซแนนซ์จึงยังสร้างปัญหาและความเสียหายให้กับอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

2.2 ปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์

เฟอร์โรเรโซแนนซ์เป็นปรากฏการณ์เรโซแนนซ์แบบอนุกรมชนิดไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear series resonance) ระหว่างตัวเหนี่ยวนำ (L) ที่มีคุณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้น ตามคุณลักษณะการอิ่มตัวของวัสดุที่ใช้เป็นแกนเหล็ก กับตัวเก็บประจุ (C) ปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์แตกต่างกับเรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นในวงจรที่ประกอบด้วยองค์ประกอบเชิงเส้น โดยผลของเรโซแนนซ์เชิงเส้นนั้นทำให้เกิดแรงดัน และกระแสรูปคลื่นไซน์มีขนาดสูงที่ความถี่เรโซแนนซ์ หรือเกิดการขยายขนาดของแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกในลำดับที่ใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์ในระบบไฟฟ้ากำลัง สำหรับเฟอร์โรเรโซแนนซ์ก็อาจทำให้เกิดแรงดัน และกระแสสูงได้เช่นเดียวกัน แต่มีลักษณะของรูปคลื่นผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ และอาจมีลักษณะไม่เป็นฟังก์ชันคาบเวลา หรือมีรูปแบบสับสน (chaotic) และสามารถคงอยู่ได้เป็นระยะเวลาานาน ดังนั้นเมื่อเกิดปรากฏการณ์นี้ขึ้นจึงมีผลกระทบอย่างมากกับระบบไฟฟ้า และทำความเสียหายกับอุปกรณ์ต่างๆ เนื่องจากมีขนาดของแรงดัน และกระแสเกินชั่วคราวสูง อีกทั้งยังมีฮาร์มอนิกปนอยู่มาก

2.2.1 การเกิดปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์

ปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์มักเกิดขึ้นในวงจรที่ประกอบไปด้วย [1, 2]

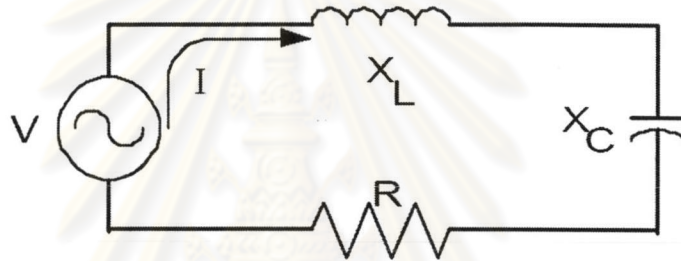
- 1) ตัวเหนี่ยวนำที่มีคุณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear inductance) และมีคุณลักษณะที่สามารถอิ่มตัวได้ (saturable)
- 2) ตัวเก็บประจุ (capacitor)
- 3) แหล่งจ่ายแรงดัน โดยทั่วไปจะเป็นแรงดันกระแสสลับรูปคลื่นไซน์ (voltage source)
- 4) มีความสูญเสียทางไฟฟ้าต่ำ (low losses)

ปัจจัยที่มีผลต่อคุณลักษณะต่างๆ ของปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์สามารถสรุปดังนี้

- 1) ระดับของฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง (residual flux) ในแกนเหล็กของหม้อแปลง
- 2) ประจุไฟฟ้าคงค้าง (trapped charge) ในอุปกรณ์ที่มีคุณลักษณะเช่นเดียวกับตัวเก็บประจุ ที่อยู่ในวงจร เช่น สายเคเบิลใต้ดิน หรือชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้า
- 3) มุมเฟส หรือค่าของแรงดันระบบขณะที่ทำการสับ-ปลดสวิตช์ และลักษณะการสับ-ปลดสวิตช์ตัดต่อวงจร

- 4) ความยาวของสายเคเบิล หรือค่าความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์
- 5) ขนาด ชนิด และคุณลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นของแกนเหล็ก หรือลักษณะการต่อขดลวดของหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า
- 6) ขนาด และประเภทของโหลดที่หม้อแปลงจ่ายพลังงานให้
- 7) ขนาดแรงดันของระบบ

การอธิบายปรากฏการณ์เฟอริโรเรโซแนนซ์สามารถพิจารณาขั้นต้นด้วยวงจรอนุกรมเชิงเส้นอย่างง่ายซึ่งมีองค์ประกอบของ ตัวต้านทาน (R) ตัวเก็บประจุ (C) และตัวเหนี่ยวนำ (L) และแหล่งจ่ายแรงดันรูปคลื่นไซน์ V ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 วงจรเชิงเส้นพื้นฐานที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์เฟอริโรเรโซแนนซ์ [3]

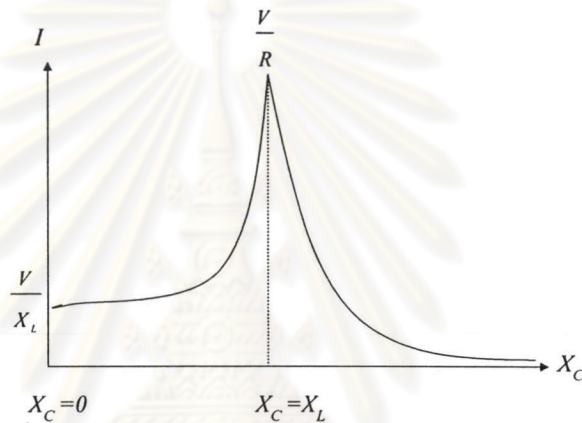
จากรูปที่ 2.1 ข้างต้น สามารถเขียนความสัมพันธ์ของแรงดันตามกฎเคอร์ชอฟฟ์ได้ตามสมการที่ 2.1

$$V = V_L + V_C + V_R = [R + j(X_L - X_C)]I \quad (2.1)$$

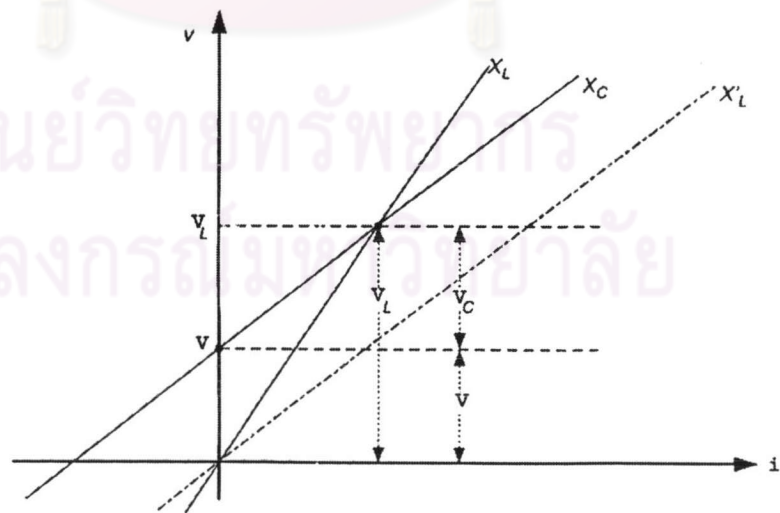
หากสมมติให้ค่ารีแอคแตนซ์ความเหนี่ยวนำ (X_L) และ ค่ารีแอคแตนซ์ความจุไฟฟ้า (X_C) ในสมการที่ 2.1 เป็นค่าคงที่สัมบูรณ์ หรือเป็นเชิงเส้น และมีค่าความต้านทาน (R) ในวงจรน้อยมาก ($R \ll X_L$, $R \ll X_C$) ขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจร จะมีค่าตามสมการที่ 2.2

$$I = \frac{V}{R + j(X_L - X_C)} \cong \frac{V}{j(X_L - X_C)} \quad (2.2)$$

ถ้าปรับเปลี่ยนค่า X_C หรือ X_L ในขณะที่ตัวใดตัวหนึ่งคงที่ จะพบว่าในกรณีที่ $|X_C| < |X_L|$ วงจรทำงานในสภาวะตามหลัง (lagging) คือ กระแส I มีมุมเฟสตามหลังแรงดัน V ประมาณ 90 องศา และ $|V_L| > |V_C|$ สำหรับกรณีที่ $|X_C| > |X_L|$ วงจรทำงานในสภาวะนำหน้า (leading) คือ กระแส I มีมุมเฟสนำหน้าแรงดัน V ประมาณ 90 องศาเช่นกัน และ $|V_L| < |V_C|$ แต่ถ้า $|X_C| = |X_L|$ จะทำให้กระแสไฟฟ้ามีค่าสูงมาก เนื่องจากรีแอกแตนซ์ในวงจรมีค่าเป็นศูนย์ทำให้กระแสถูกจำกัดด้วยความต้านทาน R ค่าน้อยในวงจรเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยที่กระแส I จะมีมุมเฟสตรงกันกับแรงดัน V (unity) และ $|V_L| = |V_C|$ แต่มีเฟสตรงข้ามกัน อีกทั้งยังมีขนาดสูงมากเนื่องจากกระแสมีค่าสูง

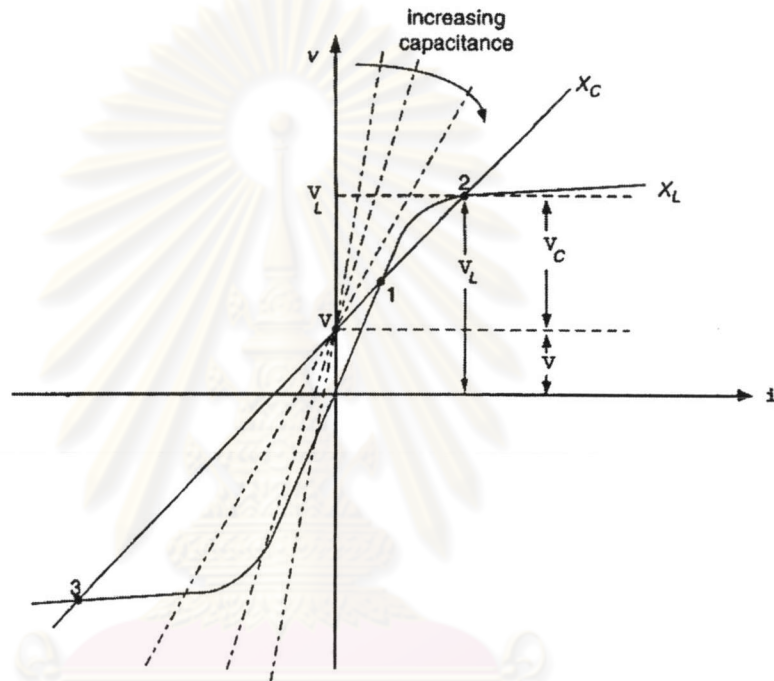


รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของขนาดกระแส (I) ในวงจรกับขนาดค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุ (C) [3]



รูปที่ 2.3 การหาผลลัพธ์ของวงจรเชิงเส้น LC ด้วยวิธีกราฟ [3]

รูปที่ 2.3 แสดงการหาผลลัพธ์ของสมการที่ 2.1 ด้วยวิธีการใช้กราฟ เมื่อไม่คิดผลของค่าความต้านทาน R หรือวงจรไม่มีกำลังสูญเสีย จุดทำงานของวงจรคือจุดตัดระหว่างเส้น X_L และ X_C ซึ่งให้ค่าแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ (V_L) ส่วนแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V_C) สามารถพิจารณาหาได้ดังแสดงในรูปที่ 2.3 จากรูปถ้าความเหนี่ยวนำมีค่าเปลี่ยนไปเป็น X_L' จะทำให้เกิดสถานะเรโซแนนซ์พอดีกับค่า X_C (เส้น $X_L' // X_C$) ซึ่งมีเพียงค่าเดียวเท่านั้น โดยเส้นทั้งสองนี้จะไปตัดกันที่จุดอนันต์ที่มีค่าแรงดันและกระแสสูงมาก



รูปที่ 2.4 การอธิบายพื้นฐานการเกิดเฟอโรเรโซแนนซ์ของวงจร LC ที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการกราฟ [4]

จากที่กล่าวมาข้างต้น ถ้านำหลักการพิจารณาแบบเชิงเส้นมาใช้กับวงจรที่มีค่าความเหนี่ยวนำ X_L เปลี่ยนแปลงได้ เช่น ความเหนี่ยวนำที่สามารถอิมิตัวได้ของแกนเหล็ก โดยผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการดังแสดงในรูปที่ 2.4 พบว่าจุดทำงานของวงจรสามารถมีได้หลายจุด แต่ไม่มีจุดทำงานที่จุดอนันต์ ซึ่งแตกต่างจากเรโซแนนซ์แบบเชิงเส้นที่สามารถเกิดขึ้นได้ โดยที่ค่าความจุไฟฟ้าต่ำๆ (เส้น X_C มีความชันสูง) วงจรจะมีจุดทำงานในสถานะคงตัวแบบนำหน้า (leading, คออดรันต์ 3) เพียงจุดเดียว ซึ่ง $|V_C| > |V_L|$ และ $|V_C| > |V|$ เป็นผลให้ตัวเก็บประจุ (C) เกิดแรงดันเกินขึ้นเมื่อเทียบกับขนาดของแหล่งจ่ายแรงดัน V แต่กรณีที่มีความจุไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น หรือเส้น X_C มีขนาดและความชันลดลงจะทำให้วงจรมีจุดตัดระหว่างเส้น X_L และ X_C หรือมีจุดทำงานได้ถึง 3 จุดด้วยกัน คือ [5]

จุดที่ 1 เป็นจุดทำงานของวงจรในสถานะตามหลัง (lagging, คอซอว์นธ์ 1) ซึ่ง $|V_L| > |V| > |V_C|$ และเป็นจุดที่มีเสถียรภาพ หรือเกิดขึ้นในสถานะคงตัว โดยสามารถพิจารณาได้อย่างง่าย เช่น ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงของกระแส I เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย พบว่า แรงดัน V_L จะเพิ่มสูงขึ้นมากกว่า V_C จึงทำให้วงจรอยู่ในสถานะไม่สมดุล (unbalance) คือ ผลรวมของแรงดัน $|V_L + V_C| = |\Delta V_L| + V > V$ ทำให้ระบบมีการปรับตัวเพื่อลด $|\Delta V_L|$ ลง เสมือนเป็นการเพิ่มกระแสคาร์ปาซิทีฟซึ่งมีเฟสตรงข้ามกับกระแส I ที่เพิ่มขึ้นและหักล้างกันจนกลับมาทำงานที่จุดเดิม

จุดที่ 2 เป็นจุดทำงานของวงจรในสถานะตามหลัง (lagging) เหมือนจุดที่ 1 แต่เป็นจุดทำงานที่ไม่มีเสถียรภาพ โดยพิจารณาในลักษณะเดียวกัน ซึ่งพบว่าเมื่อกระแส I เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ขนาดของแรงดัน V_C จะเพิ่มขึ้นมากกว่า V_L จึงทำงานวงจรอยู่ในสถานะไม่สมดุลเช่นกัน คือ $|V_L + V_C| = V - |\Delta V_C| < V$ ทำให้ระบบมีการปรับตัวเพื่อลด $|\Delta V_C|$ เสมือนเป็นการเพิ่มกระแสอินดักทีฟซึ่งมีเฟสตรงกันกับกระแส I ที่เพิ่มขึ้น จึงเป็นการเสริมกันและยังทำให้ไกลจากจุดที่ 2 เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนไปสู่จุดทำงานอื่นที่มีเสถียรภาพ ดังนั้นในสถานะคงตัววงจรจะไม่สามารถทำงานที่จุดนี้ได้ แต่อาจมีการวิ่งผ่านจุดนี้ขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงในสถานะชั่วคราว

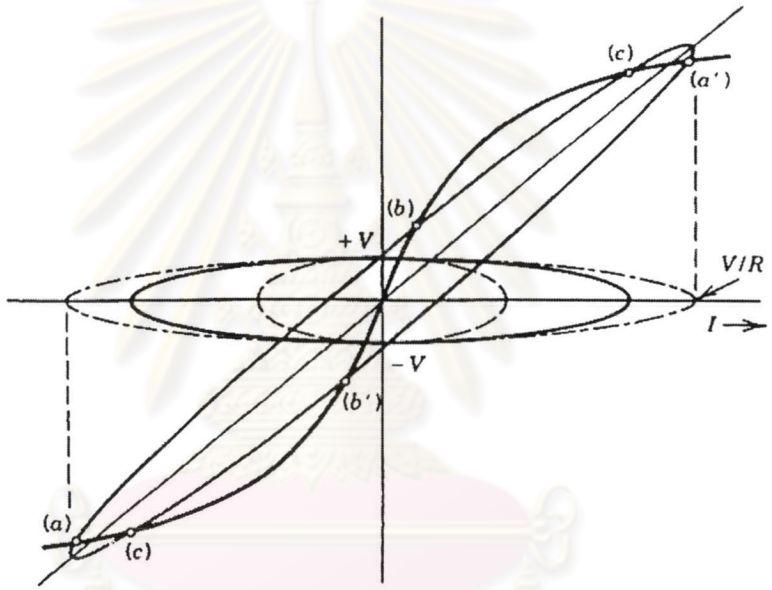
จุดที่ 3 เป็นจุดทำงานของวงจรในสถานะนำหน้า (leading, คอซอว์นธ์ที่ 3) ซึ่งตามคุณลักษณะความเหนี่ยวนำไม่เป็นเชิงเส้น จุดนี้จะเกิดขึ้นในบริเวณที่แกนเหล็กอิ่มตัว ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งทำให้กระแสมีค่าสูง และ $|V_C| > |V_L| > |V|$ หรือเกิดแรงดันเกินขึ้นที่ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งอาจมีค่าสูงมากกรณีจุดนี้อยู่ในบริเวณที่แกนเหล็กอิ่มตัวมาก หรือความจุไฟฟ้า (C) มีค่ามากนั่นเอง และสามารถเกิดขึ้นได้ในสถานะคงตัวเนื่องจากเป็นจุดทำงานที่มีเสถียรภาพเช่นเดียวกับจุดที่ 1

ในสถานะคงตัววงจรจะทำงานที่จุดเสถียรภาพคือจุดที่ 1 และ 3 เท่านั้น แต่จะเป็นจุดใดนั้นขึ้นอยู่กับค่าเริ่มต้นของระบบ เช่น ฟลักซ์แม่เหล็ก และแรงดันคงค้าง โดยในช่วงสถานะชั่วคราว หรือกรณีมีการกระโดดระหว่างผลลัพธ์ในจุดทำงานที่มีเสถียรภาพทั้งสองจุดนี้ ผลลัพธ์ของวงจรอาจวิ่งผ่านจุดที่ 2 ซึ่งเป็นจุดที่ไม่มีเสถียรภาพ

สำหรับความต้านทานอนุกรมต่างๆ ที่มีอยู่ในวงจรไฟฟ้า เช่น ความต้านทานของขดลวดตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า จะมีผลกับวงจรในการจำกัดขนาดแรงดันของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า ดังพิจารณาได้จากสมการที่ 2.3 และ 2.4 กรณีมีตัวต้านทานต่ออนุกรมเพิ่มในวงจรอนุกรม LC

$$V = \sqrt{(V_L + V_C)^2 + (IR)^2} \tag{2.3}$$

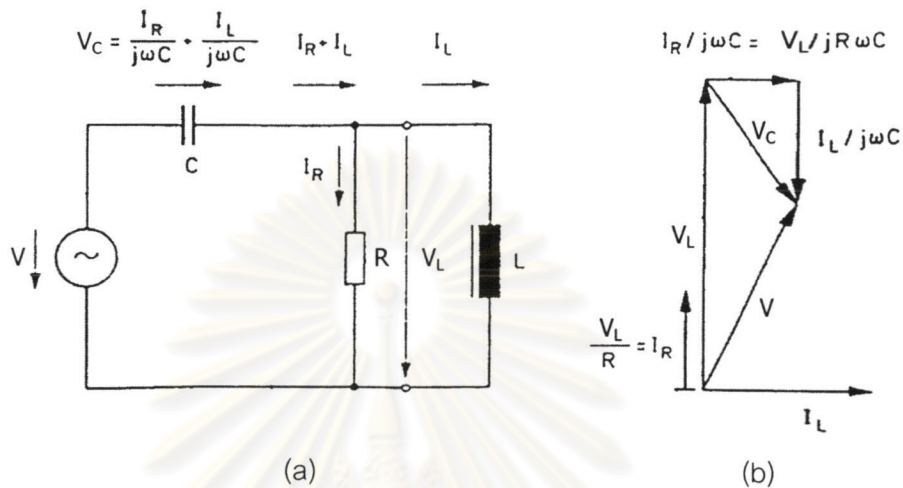
$$\text{หรือ } V_L = \omega f(I) = \sqrt{V^2 - (IR)^2} + \frac{I}{\omega C} \text{ เมื่อ } V_C = -\frac{I}{\omega C} \tag{2.4}$$



รูปที่ 2.5 ผลของความต้านทานอนุกรมในวงจร LC [5, 6]

สมการข้างต้นสามารถนำมาพิจารณาด้วยกราฟดังรูปที่ 2.5 โดยในพจน์แรกด้านขวาของสมการที่ 2.4 จะมีลักษณะกราฟเป็นรูปวงรีที่ค่าความต้านทานต่างๆ กันสามค่า และเมื่อรวมกับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ V_C รูปกราฟจะมีลักษณะเอียงขึ้น ซึ่งเห็นได้ว่าที่ค่าความต้านทานน้อย จุดทำงานของวงจรจะมีทั้งหมด 3 จุด คือ จุด (a) และ (b) เป็นจุดที่มีเสถียรภาพ และจุด (c) เป็นจุดที่ไม่มีเสถียรภาพ และเมื่อความต้านทานมีค่าสูงขึ้นจะเห็นว่าจุดทำงานสามารถเกิดขึ้นที่จุด (b) ได้เพียงจุดเดียวเท่านั้น ซึ่งเป็นจุดทำงานในสภาวะตามหลังและ $|V_L| > |V| > |V_C|$ แต่กรณีตัวเก็บประจุไฟฟ้า (C) มีค่าต่ำซึ่งมีจุดทำงานในสภาวะนำหน้าเพียงจุดเดียว โดย $|V_C| > |V_L|$ และ $|V_C| > |V|$ ผลของความต้านทานในวงจรจะช่วยจำกัดของขนาดแรงดัน V_C และ V_L ไว้

นอกจากนั้นกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก หรือผลของการต่อโหลดความต้านทาน ด้านแรงต่ำของหม้อแปลงสามารถแทนได้ด้วยตัวต้านทาน (R) ต่อขนานกับตัวเหนี่ยวนำ (L) ไม่เป็นเชิงเส้นของแกนเหล็กหม้อแปลงดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 วงจรสมมูล (a) และแผนภาพเฟสเซอร์ (b) ของการต่อโหลด ความต้านทานด้านแรงต่ำของหม้อแปลง

จากรูปที่ 2.6 สามารถเขียนความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของวงจรได้ตามสมการที่ 2.5 โดยแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำคำนวณตามสมการที่ 2.6

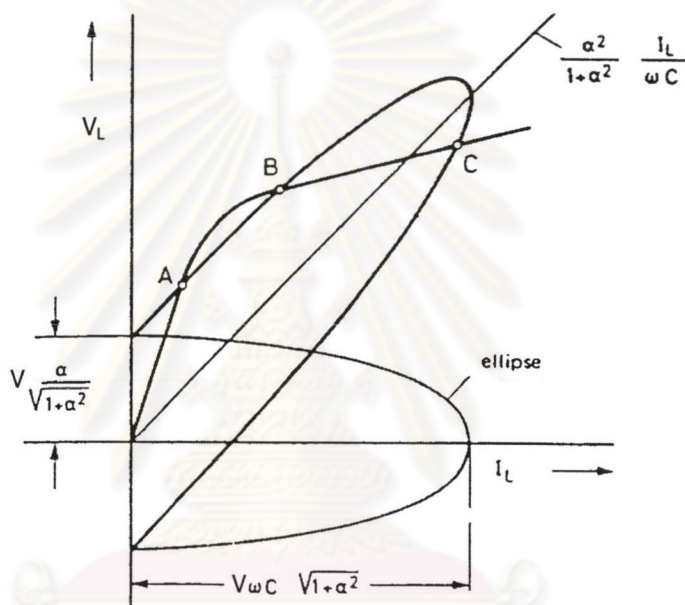
$$V^2 = \left(V_L - \frac{I_L}{\omega L}\right)^2 + \left(\frac{V_L}{R\omega C}\right)^2 = V_L^2 \left(\frac{1+\alpha^2}{\alpha^2}\right) - 2V_L \frac{I_L}{\omega C} + \left(\frac{I_L}{\omega C}\right)^2 \quad (2.5)$$

เมื่อ $\alpha = R\omega C$

$$V_L = \frac{\alpha^2}{1+\alpha^2} \frac{I_L}{\omega C} \pm \sqrt{\frac{\alpha^2 V^2}{1+\alpha^2} - \frac{\alpha^2}{(1+\alpha^2)^2} \left(\frac{I_L}{\omega C}\right)^2} \quad (2.6)$$

จากสมการที่ 2.6 ในพจน์ของรากที่สองสามารถแทนด้วยวงรีในระนาบของกระแสและแรงดัน โดยมีจุดตัดแกนแรงดัน และกระแสที่ $\pm V\omega C\sqrt{1+\alpha^2}$ และ $\pm V\alpha/\sqrt{1+\alpha^2}$ ตามลำดับ สำหรับพจน์ของ $\frac{\alpha^2}{1+\alpha^2} \frac{I_L}{\omega C}$ สามารถแทนด้วยเส้นตรง และเมื่อรวมทั้งสองพจน์ก็จะได้รูปวงรีเฉียงดังแสดงในรูปที่ 2.7

จากรูปที่ 2.7 จุด A, B และ C เป็นจุดตัดของกราฟกับคุณลักษณะกระแส และแรงดันของตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งจะเห็นว่าจุด A และ C เป็นจุดทำงานที่มีเสถียรภาพ โดยถ้าค่าความต้านทาน R มีค่าเป็นอนันต์ วงรีจะเปลี่ยนเป็นเส้นตรงสองเส้นที่มีความชันเท่ากับ $1/\omega C$ และมีจุดตัดแกนแรงดันที่จุด $\pm V$ ในทางกลับกันถ้าความต้านทาน R มีค่าลดลงหรือโหลดความต้านทานด้านแรงต่ำมีค่าสูงขึ้น ซึ่งทำให้วงรีมีขนาดเล็กลงและมีความชันลดลง จนทำให้วงรีมีจุดทำงานที่จุด A เพียงจุดเดียวเท่านั้น ดังนั้นเมื่อต่อโหลดด้านแรงต่ำ หรือหม้อแปลงกำลังสูญเสียในแกนเหล็กมากพอก็อาจทำให้ไม่เกิดเรโซแนนซ์ที่จุดทำงานอิมิตัวซึ่งมีขนาดของแรงดันและกระแสเกินสูงมาก



รูปที่ 2.7 การหาจุดทำงานโดยใช้วิธีกราฟ เมื่อมีโหลดความต้านทานหรือกำลังสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลง

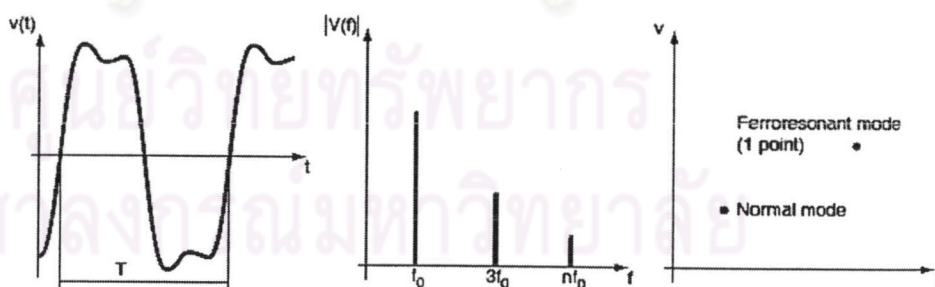
อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์หารูปคลื่นของปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ที่แท้จริงนั้นเป็นการหาผลตอบสนองของสมการอนุพันธ์ชนิดไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear differential equation) ที่มีลักษณะพลวัตของรูปคลื่นผลลัพธ์ขึ้นอยู่กับผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ และปัจจัยต่างๆ ในวงจร เช่น ฮิสเทอรีซิส (hysteresis) และกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก มุมในการสับ-ปลดสวิตช์ เป็นต้น ซึ่งมีความซับซ้อน และยากต่อการคำนวณหรือวิเคราะห์ด้วยวิธีแบบเชิงเส้น ในปัจจุบันสามารถทำการศึกษาคำนวณได้ด้วยวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) เช่น การคำนวณด้วยวิธี trapezoidal rule ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในโปรแกรม EMTP เป็นต้น

2.2.2 ชนิดของรูปแบบสภาวะเฟอร์โรเรโซแนนซ์

ผลการศึกษารูปคลื่นที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ในระบบไฟฟ้า และการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข (numerical method) พบว่ารูปแบบของเฟอร์โรเรโซแนนซ์ในสภาวะคงตัว (steady state) สามารถจำแนกได้โดยใช้การวิเคราะห์จากสเปกตรัมความถี่ของรูปคลื่นกระแสและแรงดันไฟฟ้า หรือจากภาพสโตรโบสโคปที่ได้จากพล็อตค่าสัญญาณของกระแสและแรงดันไฟฟ้าในจุดต่างๆ ที่ระยะเวลาห่างกันเท่ากับหนึ่งคาบเวลาแรงดันแหล่งจ่ายบนระนาบ V และ I สำหรับการคำนวณเชิงตัวเลขจะเรียกแผนภาพลักษณะนี้ว่า "poincare map" ซึ่งเป็นการพล็อตค่าของตัวแปรสถานะ \dot{x} และ x หรือ แรงดันไฟฟ้าและฟลักซ์ของตัวเหนี่ยวนำไม่เป็นเชิงเส้นในวงจร โดยรูปแบบสภาวะเฟอร์โรเรโซแนนซ์ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่างๆ ในวงจร และปัจจัยเริ่มต้น ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท ที่แตกต่างกันดังนี้ [1]

2.2.2-1 fundamental mode

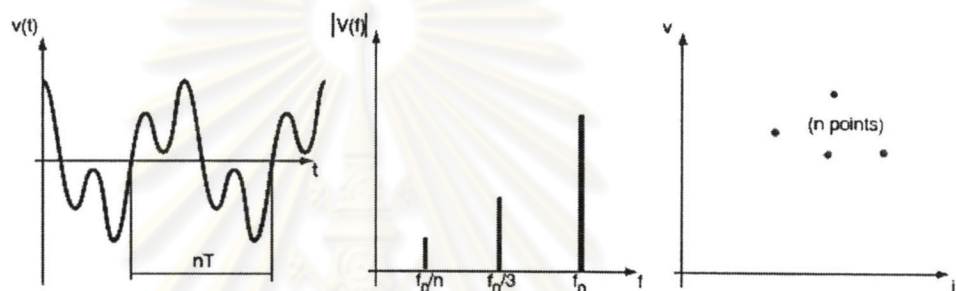
รูปคลื่นของแรงดัน และกระแสไฟฟ้ามีลักษณะเป็นฟังก์ชันที่มีคาบเวลา และมีค่าเท่ากับคาบเวลา T ของแรงดันระบบ แต่มีฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ เป็นองค์ประกอบ ทำให้มีสเปกตรัมไม่ต่อเนื่องซึ่งประกอบด้วยความถี่ของระบบ f_0 และฮาร์มอนิก ($2f_0, 3f_0, \dots$) สำหรับภาพสโตรโบสโคปจะแสดงเพียงจุดเดียวซึ่งเป็นจุดที่เกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์และอยู่ห่างจากจุดทำงานในสภาวะปกติ ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แผนภาพสเปกตรัมและสโตรโบสโคปของรูปแบบ fundamental mode

2.2.2-2 subharmonic mode

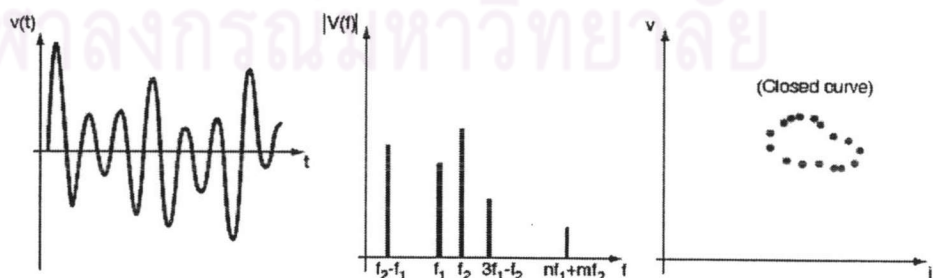
รูปคลื่นของแรงดัน และกระแสไฟฟ้ามีลักษณะเป็นฟังก์ชันคาบเวลา ที่มีคาบเวลาเท่ากับ n เท่าของคาบเวลา T ของแรงดันระบบ หรือเท่ากับ nT ซึ่งเรียกว่า subharmonic ลำดับที่ n หรือ ฮาร์มอนิก $1/n$ โดยปกติแล้ว n มักจะเป็นเลขจำนวนเต็มคี่ ดังนั้นสเปกตรัมจะประกอบด้วยความถี่มูลฐานเท่ากับ f_0/n (f_0 เป็นความถี่ของแหล่งจ่าย และ n เป็นจำนวนเต็ม) และฮาร์มอนิก ซึ่งมีความถี่ f_0 เป็นส่วนหนึ่งของสเปกตรัมด้วย สำหรับแผนภาพสโตรโบสโคปจะแสดงจุดทั้งหมด n จุด ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แผนภาพสเปกตรัมและสโตรโบสโคปของรูปแบบ subharmonic mode

2.2.2-3 quasi-periodic mode

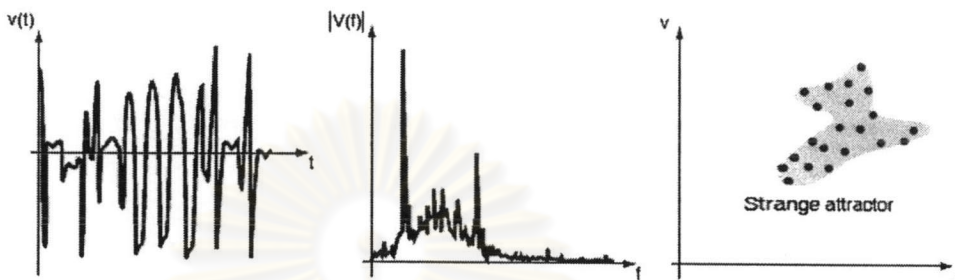
รูปคลื่นสัญญาณมีลักษณะไม่เป็นฟังก์ชันคาบเวลาที่เราเรียกว่า pseudo-periodic มีสเปกตรัมที่ไม่ต่อเนื่อง และมีการกระจายองค์ประกอบของความถี่ในรูปแบบ $nf_1 + mf_2$ โดยที่ n และ m เป็นจำนวนเต็ม, f_1/f_2 เป็นจำนวนจริงที่ไม่สามารถเขียนเป็นเศษส่วนได้ สำหรับภาพสโตรโบสโคปจะแสดงลักษณะเป็นเส้นวงปิด ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แผนภาพสเปกตรัมและสโตรโบสโคปของรูปแบบ quasi-periodic mode

2.2.2-4 chaotic mode

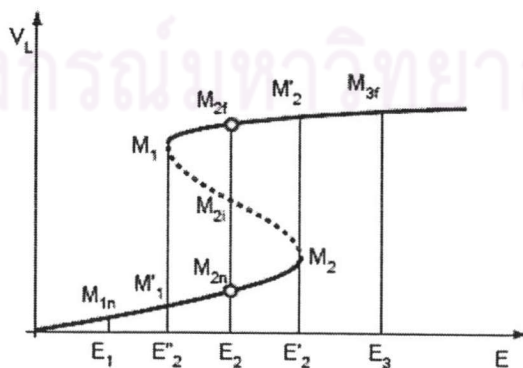
รูปคลื่นสัญญาณมีลักษณะไม่เป็นฟังก์ชันคาบเวลา แต่มีรูปแบบสเปกตรัมต่อเนื่อง โดยภาพสโตรโบสโคปประกอบไปด้วยจุดต่างๆ ที่แยกจากกันอย่างสมบูรณ์บนระนาบ V, I ซึ่งเรียกกันว่า strange attractor ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แผนภาพสเปกตรัมและสโตรโบสโคปของรูปแบบ chaotic mode

2.2.3 ความไวต่อพารามิเตอร์ในระบบ

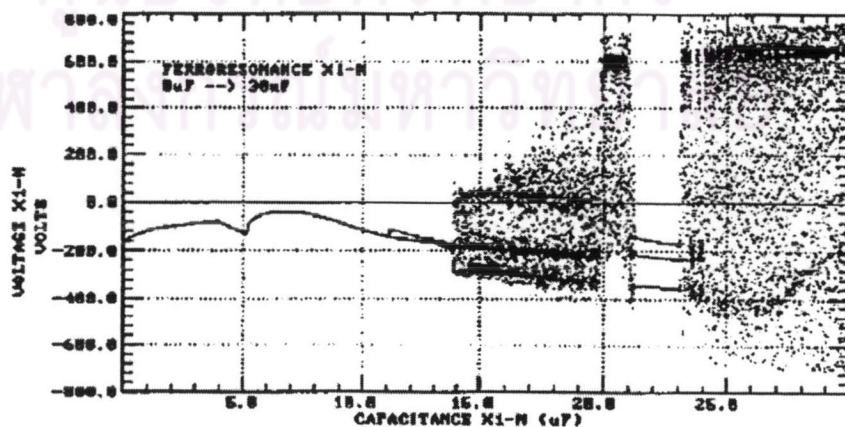
จากหัวข้อ 2.2.2 ปฏิกิริยาการเฟอโรโรเรแนนซ์มีลักษณะพลวัตที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและคงอยู่เป็นระยะเวลานาน มีผลตอบสนองได้หลายรูปแบบแม้ว่าจะเป็นระบบเดียวกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และสภาวะเริ่มต้นของระบบ สำหรับการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ส่งผลให้มีการกระโดดของสภาวะเฟอโรโรเรแนนซ์จากรูปแบบหนึ่งไปอีกรูปแบบหนึ่ง หรือเรียกว่า "bifurcations" รูปที่ 2.12 อธิบายความสัมพันธ์ของค่าแรงดันไฟฟ้า E ซึ่งเป็นขนาดแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของแหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์ กับค่าสูงสุดของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ V_L โดยทำการปรับเพิ่มค่า E เริ่มต้นจากศูนย์จนแสดงพฤติกรรมต่างๆ ของปรากฏการณ์เฟอโรโรเรแนนซ์ จากรูปสามารถอธิบายพฤติกรรมที่จุดต่างๆ ได้ดังนี้



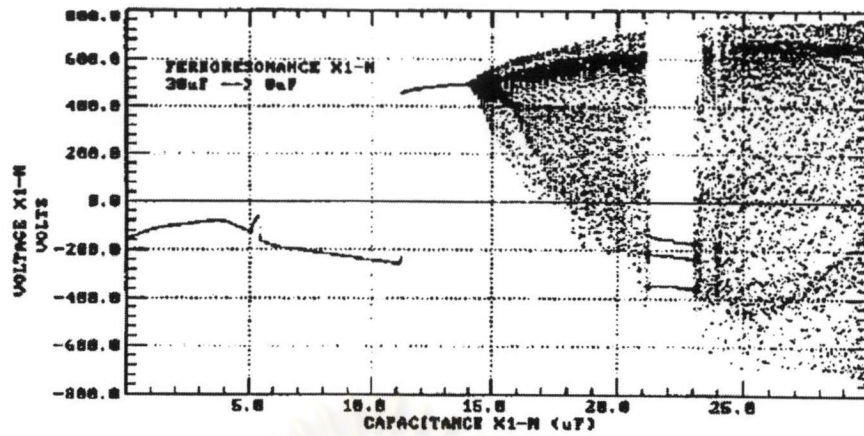
รูปที่ 2.12 กราฟแสดงความไวของพารามิเตอร์ E กับปรากฏการณ์ก้าวกระโดดของแรงดัน [1]

- 1) $E = E_1$ มีผลลัพธ์รูปแบบเดียวกับที่จุด M_{1n} และสอดคล้องกับสภาวะที่มีคุณสมบัติเป็นเชิงเส้น หรือมีจุดทำงานอยู่ที่จุดที่ 1 ในรูปที่ 2.4
- 2) $E = E_2$ มีผลลัพธ์ถึง 3 จุด คือ M_{2n} , M_{2i} และ M_{2f} โดยจุด M_{2n} และ M_{2f} เป็นจุดที่มีเสถียรภาพ ซึ่ง M_{2n} เกิดขึ้นในสภาวะปกติ แต่ M_{2f} เกิดขึ้นในสภาวะเฟอร์โรเรโซแนนซ์ ในส่วนของเส้นประเป็นบริเวณที่ไม่สามารถเกิดขึ้นจริงได้ในทางปฏิบัติ ซึ่งสัมพันธ์กับจุด M_{2i} ซึ่งเป็นจุดที่ไม่มีเสถียรภาพ (จุดที่ 2 ในรูปที่ 2.4)
- 3) $E = E'_2$ แรงดัน V_L มีการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดจากจุด M_2 ไปยังจุด M'_2 (ปรากฏการณ์ก้าวกระโดด) เรียกจุด M_2 นี้ว่า limit point
- 4) $E = E_3$ เป็นจุดที่อยู่ในสภาวะเฟอร์โรเรโซแนนซ์เพียงอย่างเดียว (M_{3f} หรือ จุดที่ 3 ในรูปที่ 2.4)
- 5) เมื่อค่า E ลดลงจาก E_3 ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนแปลงขึ้นที่จุด M_1 ซึ่งเป็น limit point ที่ 2 ไปยังจุด M'_1

ปรากฏการณ์ก้าวกระโดดเป็นคุณลักษณะที่สำคัญของปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ ซึ่งสามารถนำไปพิจารณาได้กับพารามิเตอร์ของระบบตัวอื่นๆ เช่น ค่า R หรือค่า C การเปลี่ยนแปลงค่าเหล่านี้เพียงเล็กน้อย หรือสภาวะชั่วคราวที่เกิดขึ้นเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการก้าวกระโดดระหว่างสองสภาวะที่มีเสถียรภาพ ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.13 และ 2.14 แสดงแผนภาพ bifurcation ของการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า (C) ในวงจรกับขนาดแรงดัน V_L ที่สุ่มมา 1 จุดต่อ 1 รอบ (cycle) หรือ poincare map ขณะทีค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ของวงจรคงที่ [7, 8]



รูปที่ 2.13 แผนภาพ bifurcation ขณะเพิ่มขนาดตัวเก็บประจุ (C) จาก 0 – 30 μF

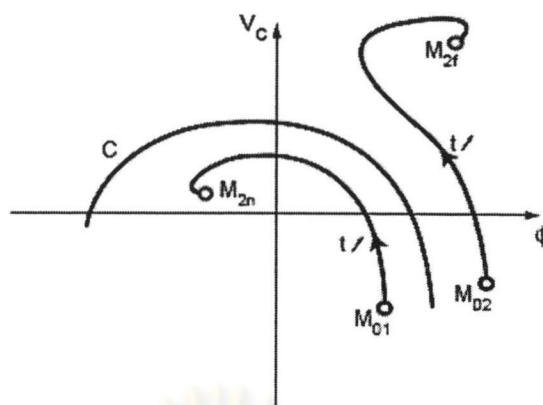


รูปที่ 2.14 แผนภาพ bifurcation ขณะลดขนาดตัวเก็บประจุ (C) จาก 30 – 0 μF

จากรูปที่ 2.13 และ 2.14 จะเห็นลักษณะการกระโดดและการเปลี่ยนรูปแบบของปรากฏเฟอร์โรเรโซแนนซ์ ขณะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดตัวเก็บประจุไฟฟ้าในวงจรให้เพิ่มขึ้น และลดลง ซึ่งมีลักษณะของฮิสเทอรีซิส (hysteresis) ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งอาจมีรูปแบบซ้ำรอยเดิม (periodic function) ทั้งชนิด fundamental และ subharmonic mode ซึ่งมีพลังงาน หรือความรุนแรงของแรงดัน และกระแสเกินต่ำ โดยแสดงผลเป็นเส้นตรงในแผนภาพ bifurcation หรืออาจมีรูปแบบสับสนไม่ซ้ำรอยเดิม (chaotic or non-periodic mode) ดังเห็นได้จากแผนภาพบริเวณที่แสดงเป็นจุดพรมัว ซึ่งผลตอบสนองรูปแบบนี้มักมีพลังงาน หรือความรุนแรงของแรงดัน และกระแสเกินสูง และสามารถเกิดขึ้นได้ในช่วงกว้างของค่าความจุไฟฟ้า (C)

2.2.4 ความไวต่อเงื่อนไขขณะเริ่มต้น [1]

กรณีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ มีค่าเหมาะสมทำให้วงจรมีจุดทำงาน 3 จุดนั้น ผลลัพธ์ของวงจรในสภาวะคงตัวสามารถเกิดขึ้นได้เพียง 2 จุด คือ จุด M_{2n} (จุดที่ 1 ในรูปที่ 2.4) ซึ่งไม่เกิดแรงดัน และกระแสเกินสูง และจุด M_{2r} (จุดที่ 3 ในรูปที่ 2.4) ซึ่งเกิดแรงดันและกระแสเกิน ขึ้นอยู่กับเงื่อนไข หรือสภาวะเริ่มต้น รูปที่ 2.15 แสดงเส้นทางเดินในสภาวะชั่วคราวของฟลักซ์แม่เหล็ก (ϕ) และแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V_C) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลาในสภาวะเงื่อนไขเริ่มต้นของวงจรแตกต่างกัน (M_{01} และ M_{02})



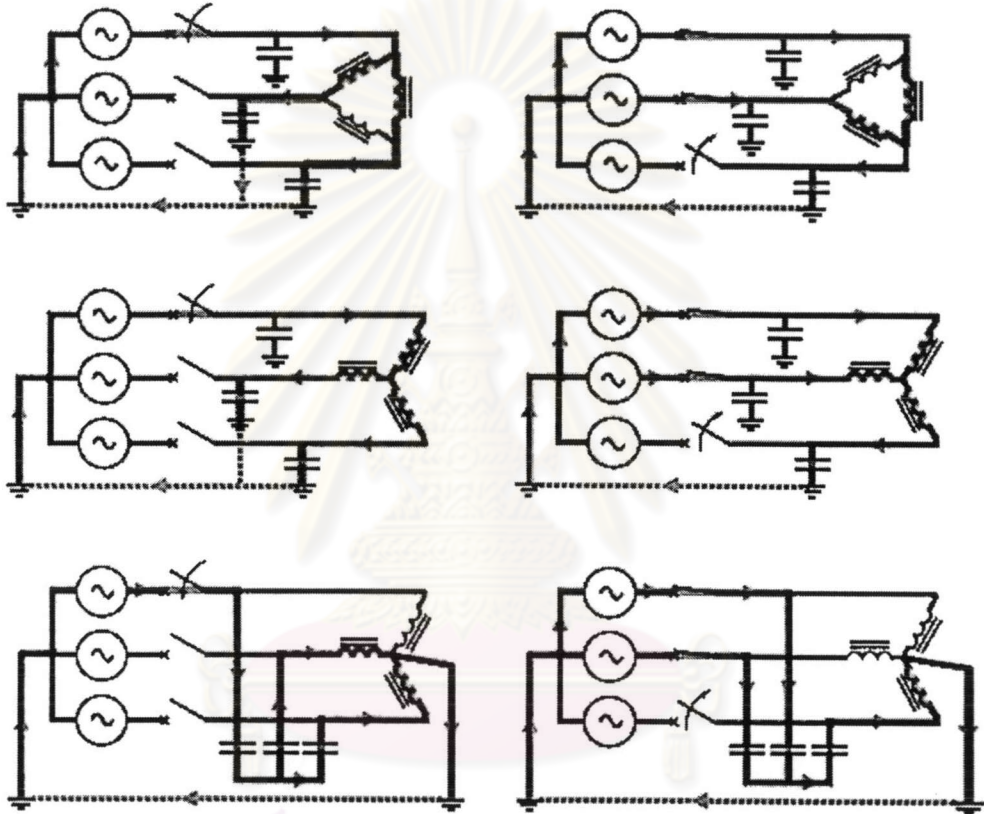
รูปที่ 2.15 เส้นทางคุณลักษณะของเฟอร์โรเรโซแนนซ์

ในรูปที่ 2.15 เส้นโค้ง C เป็นเส้นขอบเขตระหว่างเงื่อนไขเริ่มต้น M_{01} และ M_{02} ถ้าเงื่อนไขเริ่มต้น (พลักซ์แม่เหล็กคงค้าง, แรงดันระหว่างขั้วของตัวเก็บประจุ) อยู่ในด้านที่หนึ่ง (M_{01}) ของขอบเขต ผลลัพธ์ของวงจรในสภาวะคงตัวจะลู่เข้าสู่จุด M_{2n} แต่สำหรับกรณีเงื่อนไขเริ่มต้นอยู่อีกด้านหนึ่ง (M_{02}) ผลลัพธ์จะลู่เข้าสู่จุด M_{2f} ซึ่งเป็นจุดที่เกิดแรงดันเกินเฟอร์โรเรโซแนนซ์ สำหรับจุด M_{2f} หรือจุดทำงานที่ไม่มีเสถียรภาพนั้นจะอยู่บนเส้นขอบเขตระหว่างสองทางเดินนี้ โดยเงื่อนไขเริ่มต้นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญคือ มุมขณะทำการสับ-ปลดสวิตช์ ซึ่งมีอิทธิพลต่อสภาวะชั่วคราวเริ่มต้นที่เป็นตัวกำหนดลักษณะการเกิดของปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์

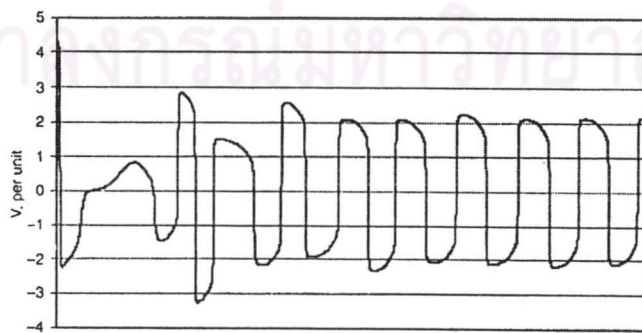
2.3 การเกิดปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า [1, 4, 9, 10]

เนื่องจากระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีองค์ประกอบ และโครงสร้างของระบบที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดวงจรเฟอร์โรเรโซแนนซ์ ยิ่งในปัจจุบันที่นิยมจ่ายไฟให้กับหม้อแปลงจำหน่ายผ่านทางสายเคเบิลใต้ดิน และหม้อแปลงจำหน่ายมีกำลังสูญเสียที่น้อยลง จึงทำให้ขณะที่มีการสับ-ปลดสวิตช์ชนิดไม่พร้อมกันทั้งสามเฟส เช่น สวิตช์ใบมีด พิวส์ชนิดขาดตก หรือการขาดของสายป้อนและการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันต่างๆ ในลักษณะไม่ครบทั้งสามเฟส สามารถเกิดวงจรเรโซแนนซ์ขึ้นระหว่างตัวเหนี่ยวนำไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรกระตุ้นสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงกับความจุไฟฟ้าของสายเคเบิลใต้ดิน หรือสายป้อนอากาศที่มีความยาว ผลของเฟอร์โรเรโซแนนซ์ทำให้เกิดแรงดันเกินขึ้นที่สายเคเบิลใต้ดินในเฟสที่เปิดวงจรอยู่ และขดลวดของหม้อแปลงในเฟสที่เกิดเรโซแนนซ์

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าสามเฟสสามารถเกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์ชนิดดับ-ปลดสวิตช์ได้หลายลักษณะ รูปที่ 2.16 แสดงแผนภาพสถานะที่อาจเกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์ในระบบจำหน่าย สำหรับลักษณะการเกิด รูปแบบและความรุนแรงขึ้นอยู่กับปัจจัย และพารามิเตอร์ต่างๆ ดังที่นำเสนอไว้ข้างต้น ในรูปที่ 2.17 และ 2.18 แสดงตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันของสายเคเบิลใต้ดินในเฟสที่เปิดวงจร เมื่อเกิดปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ในรูปแบบ fundamental mode ในสถานะคงตัว และ chaotic mode ซึ่งคาดว่าเป็นผลจากการทำงานที่จุด 3 และ 2 ในรูปที่ 2.4 ตามลำดับ

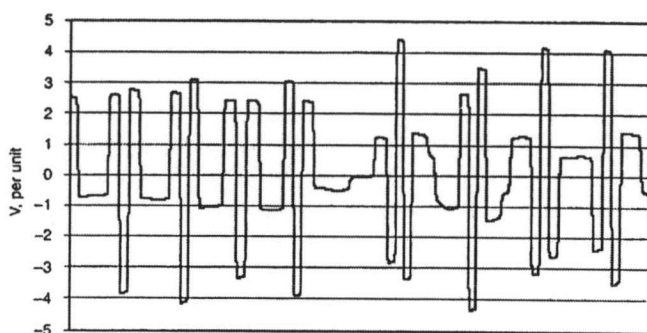


รูปที่ 2.16 แผนภาพสถานะที่อาจเกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า [1]



รูปที่ 2.17 รูปคลื่นแรงดันของสายเคเบิลใต้ดินในเฟสที่เปิดวงจร

ขณะเกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์ รูปแบบ fundamental mode ในสถานะคงตัว [4]



รูปที่ 2.18 รูปคลื่นแรงดันของสายเคเบิลใต้ดินในเฟสที่เปิดวงจร
ขณะเกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์ รูปแบบ chaotic mode [4]

2.4 ลักษณะบ่งชี้ขณะเกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์ [3, 4, 10, 11]

เฟอร์โรเรโซแนนซ์รูปแบบต่างๆ ที่เกิดขึ้น บางประเภทมีขนาดของแรงดัน และกระแสไฟฟ้าเกินที่สูงมาก และบางประเภทอาจมีขนาดของแรงดันไฟฟ้าใกล้เคียงกับสภาวะปกติ ตัวบ่งชี้ในขณะที่เกิดปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์นั้นสามารถสรุปจากเหตุการณ์จริงขณะปฏิบัติงานที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

2.4.1 หม้อแปลงไฟฟ้ามีเสียงดังขึ้น

เฟอร์โรเรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นในทุกรูปแบบ พบว่าแกนเหล็กของหม้อแปลงจะทำงานในบริเวณที่มีการอิ่มตัว ซึ่งมีความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กสูง จึงเป็นสาเหตุทำให้หม้อแปลงเกิดเสียงดังขึ้น เนื่องจากแผ่นเหล็กที่อัดเรียงกันเป็นแกนของหม้อแปลงนั้นเกิดการสั่น หรือขยับตัวในขณะที่แกนเหล็กอิ่มตัว บางกรณีอาจมีเสียงจากการสับัด หรือสั้นของสลัก และนอตที่ใช้ยึดตัวโครงสร้างต่างๆ ของหม้อแปลง

2.4.2 เกิดผลทางความร้อนขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้า

เนื่องจากผลการทำงานในจุดอิ่มตัวขณะเกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์ ทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กที่มีความหนาแน่นสูงพยายามที่จะไปในส่วนต่างๆ ที่เป็นโลหะของหม้อแปลง เช่น ตัวถัง ซึ่งไม่ได้ออกแบบมาเพื่อให้รองรับฟลักซ์แม่เหล็ก ผลของกระแสไหลวนที่เกิดจาก ฟลักซ์แม่เหล็กทำให้ความร้อนในส่วนต่างๆ ของตัวหม้อแปลงสูงขึ้น ยิ่งถ้าหากทำงานในจุดที่อิ่มตัวมาก ก็อาจสร้างความเสียหายให้กับโครงสร้างของเนื้อฉนวน ขดลวด และอุปกรณ์ต่างๆ ภายในตัวหม้อแปลงได้หากเกิดความร้อนเกิน ในบางครั้งอาจสังเกตเห็นการโป่งพองของสีเคลือบตัวถังของหม้อแปลงด้วย

2.4.3 กับดักฟ้าผ่า หรืออุปกรณ์ป้องกันลัดวงจรได้รับความเสียหาย

ผลจากเฟอร์โรเรโซแนนซ์อาจทำให้เกิดแรงดันเกินชั่วคราวที่มีค่าสูงกว่าพิกัด MCOV ของกับดักฟ้าผ่า และเกิดขึ้นเป็นเวลานาน ส่งผลให้กับดักฟ้าผ่าทำงาน ซึ่งความร้อนภายในของกับดักฟ้าผ่าที่สูงขึ้นจนอาจทำให้กับดักฟ้าผ่าสูญเสียเสถียรภาพทางความร้อน และสร้างความเสียหาย หรือทำให้กับดักฟ้าผ่าเกิดระเบิดขึ้น กรณีเช่นนี้อาจเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ป้องกันลัดวงจรทางด้านแรงดันต่ำด้วย

2.4.4 เกิดการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้า

ปรากฏการณ์นี้อาจทำให้แรงดันไฟฟ้ากระเพื่อม โดยสังเกตได้จากการที่หลอดไฟฟ้า หรือหลอดภาพของจอโทรทัศน์ มีการกระพริบของแสง และอาจทำความเสียหายกับอุปกรณ์นั้นๆ ได้ ถ้าทำการวัดรูปคลื่นของแรงดัน หรือกระแสไฟฟ้า จะพบว่ามีการผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสูง และเกิดเป็นเวลานาน

2.4.5 อื่นๆ

เกิดความเสียหายขึ้นกับอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ เช่น ชุดตัวเก็บประจุ, หม้อแปลงแรงดัน เป็นต้น เนื่องจากผลทางความร้อน หรือเกิดการเบรกดาว์นของฉนวน และมีการทริปของอุปกรณ์ป้องกันต่างๆ เช่น ฟิวส์, เซอร์คิตเบรกเกอร์ เป็นต้น

2.5 วิธีการแก้ไขและลดทอนปัญหา

เนื่องจากปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าสามเฟสจะเกิดขึ้นในกรณีที่มีการสับหรือปลดสวิตช์ไม่พร้อมกัน โดยมีปัจจัยและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสม จึงมีวิธีการแก้ไขและลดทอนปัญหาด้วยวิธีต่างๆ ที่สามารถนำไปใช้ได้ทางปฏิบัติดังนี้ [1]

2.5.1 หลีกเลี่ยงการทำให้เกิดโครงสร้างของวงจรเฟอร์โรเรโซแนนซ์

- 1) ปรับเปลี่ยนลำดับขั้นตอนการสับ-ปลดสวิตช์ เป็นวิธีที่ง่าย และไม่ต้องเสียค่าใช้จ่าย แต่ไม่สามารถใช้ได้กับทุกกรณี โดยการพิจารณาจะต้องอยู่บนพื้นฐานความปลอดภัยของบุคคลในการปฏิบัติงาน เสถียรภาพและความมั่นคงของระบบจำหน่ายไฟฟ้าเป็นสำคัญ
- 2) เปลี่ยนจากการใช้สวิตช์ชนิดสับ-ปลดทีละเฟส เช่น สวิตช์ใบมีด หรือฟิวส์ชนิดขาดตก มาใช้สวิตช์ชนิดสับ-ปลดพร้อมกันทั้งสามเฟสแทน ในวงจรที่มีความสำคัญและมีความเสี่ยงสูงที่จะเกิดปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์

- 3) ติดตั้งเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงสูงเพื่อปลดหม้อแปลงออกจากวงจรสายเคเบิลใต้ดิน หรือสายอากาศก่อนปฏิบัติงาน และสับกลับภายหลังการปฏิบัติงานเสร็จหรือปลดหม้อแปลงออกหลังพบว่าเกิดความผิดปกติและทำให้พิวส์ขาดตกไม่ครบเฟส
- 4) ปรับเปลี่ยนโครงสร้างของระบบไฟฟ้า เช่น ย้ายตำแหน่งการติดตั้งของหม้อแปลง จำกัดความยาวของสาย เป็นต้น แต่วิธีนี้อาจต้องเสียค่าใช้จ่ายในการลงทุนสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ

2.5.2 การควบคุมหรือหน่วงวงจรด้วยตัวต้านทาน

เนื่องจากความต้านทานในวงจรสามารถควบคุมไม่ให้วงจรเรโซแนนซ์ระหว่างตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำไม่เป็นเชิงเส้นทำงานในจุดที่เกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์และมีแรงดันเกินสูง (ดูรูปที่ 2.5) ด้วยการต่อโหลดความต้านทาน (external resistive load) ทางด้านแรงต่ำของหม้อแปลง ขนาดไม่ต่ำกว่า 5% ของพิกัดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลง โดยส่วนใหญ่จะแนะนำให้ใช้ขนาดประมาณ 10% สำหรับในทางปฏิบัติอาจทำการต่อโหลดเข้ากับหม้อแปลงก่อนการปฏิบัติงาน และปลดออกภายหลังปฏิบัติงานเสร็จ