บทที่ 4

การคำนวณการกระจายแรงดันเสิร์จภายในขดลวดหม้อแปลง ด้วยโปรแกรม EMTP

4.1 โปรแกรม EMTP[12]

การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง นอกจากในสถานะอยู่ตัว ซึ่งได้แก่ การวิเคราะห์โหลดโฟลว์ (Load Flow) และการคำนวณกระแสลัดวงจร ยังมีการวิเคราะห์ในสภาวะทรานเซียนต์ที่สามารถแบ่งออกได้ตามช่วงเวลาที่พิจารณา ได้แก่ ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Transients) ที่มีช่วงเวลาเป็นไมโครวินาที ถึงวินาที และทรานเซียนต์กลไฟฟ้า (Electromechanical Transients) ที่นำมาพิจารณาในการศึกษาเสถียรภาพ (Stability Studies) ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ซึ่งจะมีช่วงเวลาเป็นมิลลิวินาที และวินาที Electro-Magnetic Transients Program หรือที่เรียกกันย่อ ๆ ว่า EMTP เป็นโปรแกรมที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาเพื่อช่วยในการคำนวณระบบไฟฟ้าในสภาวะทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้า ในตัวโปรแกรม EMTP ประกอบไปด้วย ตัวต้านทาน R, ตัวเหนี่ยวนำ L, ตัวเก็บประจุ C และ อุปกรณ์ต่าง ๆ สำหรับจำลองระบบไฟฟ้า และ ส่วนประกอบต่าง ๆ รวมทั้งวงจรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์ระบบควบคุมโดยผ่านองค์ประกอบสำหรับการวิเคราะห์ระบบควบคุม ได้แก่ TACS (Transient Analysis of Control System) และ ภาษา MODELS และ ยังสามารถวิเคราะห์ระบบเครื่องกลไฟฟ้า เช่น มอเตอร์, เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ได้อีกด้วยจึงเป็นโปรแกรมที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง

การวิเคราะห์สภาวะทรานเซียนต์ของ EMTP นั้นทำในโดเมนเวลา ทำให้สามารถนำผลการวิเคราะห์ช่วงเวลาที่ผ่าน ๆ ไปแล้ว มาใช้ในการคำนวณค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ต้องการได้ โดยอาจนำมาคำนวณผ่าน TACS หรือ MODELS ก็ได้ นอกจากนี้ การวิเคราะห์ในโดเมนเวลา ยังสามารถดำเนินการกับอุปกรณ์ไม่เชิงเส้นได้ง่ายเมื่อเทียบกับวิธีการวิเคราะห์ในโดเมนความถี่อีกด้วย

ในการจำลองระบบไฟฟ้าด้วย EMTP อาจทำโดยสร้างองค์ประกอบจำลองจากแบบโดยประมาณ ไปจนถึงแบบที่ละเอียดถูกต้องดังตัวอย่างเช่น แหล่งจ่ายพลังงานขนาดใหญ่ซึ่งมีเครื่องไฟฟ้าหลาย ๆ เครื่อง อาจสร้างองค์ประกอบจำลองโดยประมาณเป็นแหล่งจ่ายแรงดันอนุกรมกับอิมพีแดนซ์เท่านั้น การเลือกใช้องค์ประกอบจำลองจะขึ้นอยู่กับชนิดของงาน การวิเคราะห์และที่ตั้งขององค์ประกอบ ซึ่งอาจอยู่ในโซนที่มีความสำคัญต่อการวิเคราะห์มากน้อยไม่เท่ากัน เช่น โหลดทางด้านแรงต่ำอาจมีความสำคัญไม่มากนักในการวิเคราะห์ทางด้านแรงสูง จึงใช้วงจรสมมูลแบบ

ง่าย ๆ ได้ เช่น เป็นค่าอิมพีแดนซ์ตัวเดียว หลังจากสร้างองค์ประกอบจำลองต่าง ๆ เรียบร้อยแล้ว ก็สามารถนำมาประกอบเข้าด้วยกันเป็นระบบไฟฟ้าเพื่อนำมาวิเคราะห์ได้ ซึ่งในการวิเคราะห์อาจมีความจำเป็นที่จะต้องนำระบบควบคุม เข้ามาควบคุมระบบไฟฟ้าให้ทำงานได้ตามต้องการ

แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะกล่าวถึงองค์ประกอบที่นำมาใช้ในแบบจำลองเท่านั้น คือองค์ประกอบเชิงเส้นแบบก้อน

4.2 **องค์ประกอบเชิงเส้นแบบก้อน** (Lumped Linear Element)

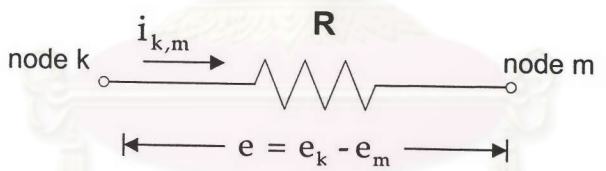
ได้แก่ ตัวต้านทาน (R) ตัวเหนี่ยวนำ (L) และ ตัวเก็บประจุ (C)

4.2.1 **ตัวต้านทาน**

สมการแสดงความสัมพันธ์ของกระแส และแรงดันของตัวต้านทาน ที่ต่อระหว่างปม k และ m คือ

$$i_{k,m} = \frac{1}{R}\left[e_k(t) - e_m(t)\right] \qquad (4.1)$$

และสามารถแทนตัวต้านทานด้วยวงจรสมมูล ดังรูปที่ 4.1

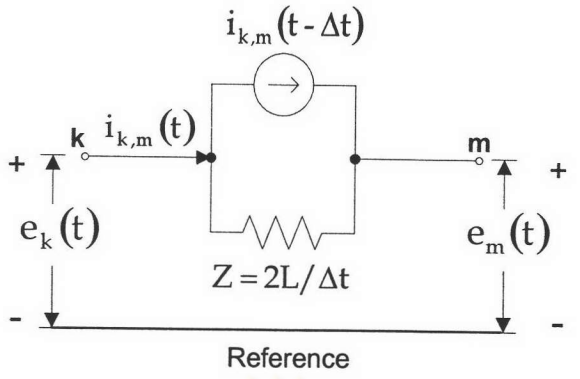


รูปที่ 4.1 วงจรสมมูลของตัวต้านทาน

4.2.2 **ตัวเหนี่ยวนำ**

สมการแสดงความสัมพันธ์ของกระแส และแรงดันของตัวเหนี่ยวนำ ที่ต่อระหว่างปม k และ m ดังในรูปที่ 4.2 ก) คือ

ก)



ข)

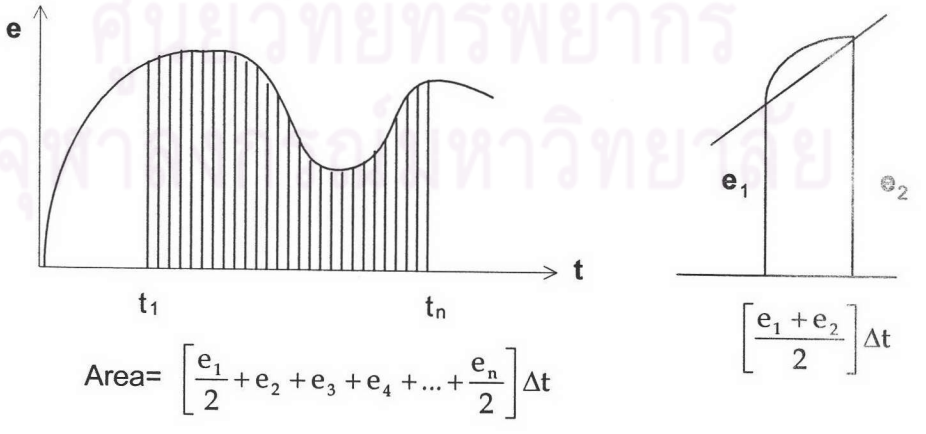
รูปที่ 4.2 ก) ตัวเหนี่ยวนำ ข) วงจรสมมูลของตัวเหนี่ยวนำ

$$e_k - e_m = L\left(\frac{di}{dt}\right) \qquad (4.2)$$

ทำการอินทิเกรท สมการ (4.2) จะได้สมการ (4.3) ซึ่งเป็นการอินทิเกรทจากภาวะที่รู้ค่า $(t-\Delta t)$ ไปยังภาวะไม่รู้ค่า t

$$i_{k,m}(t) = i_{k,m}(t-\Delta t) + \frac{1}{L}\int_{t-\Delta t}^{t}(e_k - e_m)\,dt \qquad (4.3)$$

ใช้กฎอินทิเกรทสี่เหลี่ยมคางหมู ตามรูปที่ 4.3 ได้สมการ (4.4)



รูปที่ 4.3 การอินทิเกรทแบบสี่เหลี่ยมคางหมู

$$i_{k,m}(t) = (\Delta t / 2L)(e_k(t) - e_m(t)) + I_{k,m}(t - \Delta t) \quad (4.4)$$

โดยที่

$$I_{k,m}(t - \Delta t) = i_{k,m}(t - \Delta t) + (\Delta t / 2L)(e_k(t - \Delta t) - e_m(t - \Delta t)) \quad (4.5)$$

จากสมการ (4.4) และ (4.5) เขียนวงจรสมมูลของตัวเหนี่ยวนำได้ดังรูปที่ 4.2 ข)

4.2.3 ตัวเก็บประจุ

สมการแสดงความสัมพันธ์ของกระแส และแรงดันของตัวเก็บประจุ ที่ต่อระหว่างปม k และ m ดังในรูปที่ 4.4 ก) คือ

$$i_{k,m} = C\left(\frac{d(e_k - e_m)}{dt}\right) \quad (4.6)$$

$$e_k(t) - e_m(t) = e_k(t - \Delta t) - e_m(t - \Delta t) + \frac{1}{C}\int_{t-\Delta t}^{t} i_{k,m}(t) \quad (4.7)$$

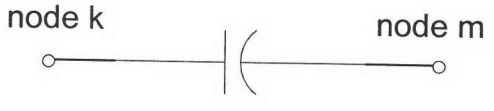
ใช้กฎการอินทิเกรทแบบสี่เหลี่ยมคางหมู จะได้สมการ (4.8)

$$i_{k,m}(t) = (2C / \Delta t)(e_k(t) - e_m(t)) + I_{k,m}(t - \Delta t) \quad (4.8)$$

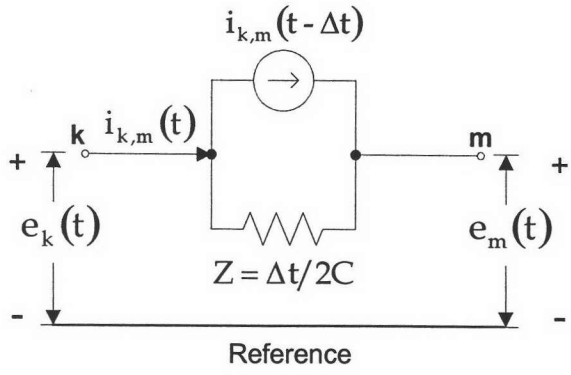
โดยที่

$$I_{k,m}(t - \Delta t) = -i_{k,m}(t - \Delta t) - (2C / \Delta t)(e_k(t - \Delta t) - e_m(t - \Delta t)) \quad (4.9)$$

จากสมการ (4.8) และ (4.9) เขียนวงจรสมมูลของตัวเก็บประจุ ได้ดังรูปที่ 4.4 ข)



ก)



ข)

รูปที่ 4.4 ก) ตัวเก็บประจุ ข) วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุ

4.3 แหล่งจ่าย

แหล่งจ่ายในโปรแกรม EMTP ประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายหลายชนิดด้วยกัน ทั้งกระแสสลับ กระแสตรงและแหล่งจ่ายที่มีรูปคลื่นที่เป็นฟังก์ชันต่างๆ เช่น แหล่งจ่ายคลื่นชัน แหล่งจ่ายเสิร์จ เป็นต้น โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้เฉพาะแหล่งจ่ายแรงดันเสิร์จ

4.3.1 แหล่งจ่ายแรงดันเสิร์จ

แหล่งจ่ายแรงดันเสิร์จหรือ แหล่งจ่ายดับเบิลเอ็กซ์โปแนนเชียล แหล่งจ่ายนี้จะสามารถใช้ในการจำลองรูปคลื่นฟ้าผ่าได้ โดยมีความสัมพันธ์อยู่ในรูปของสมการ[13]

$$U = \mathrm{Amp} \times (\exp^{At} - \exp^{Bt})$$

เมื่อ

Amp เป็นค่าคงที่ของแรงดันซึ่งค่านี้จะไม่ใช่เป็นค่าสูงสุดของรูปคลื่น (วิธีการหาดูได้จากภาคผนวก ก)

A สัมประสิทธิ์ความชันของหลังคลื่น

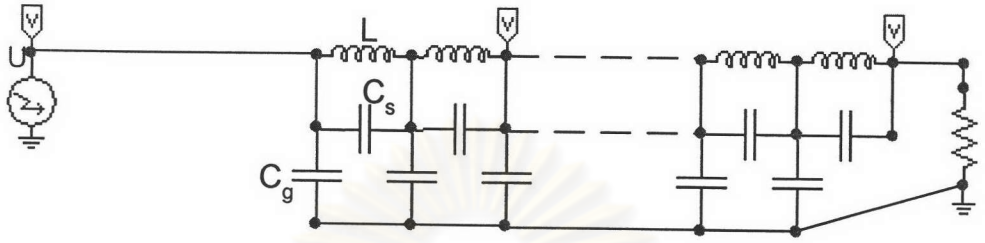
B สัมประสิทธิ์ความชันของหน้าคลื่น

4.4 แบบจำลองขดลวดหม้อแปลง

เป็นการจำลองขดลวดหม้อแปลงทางด้านแรงดันสูงที่มีการพันขดลวดเป็นแบบดิสก์และแบบอินเตอร์ลีฟโดยจะพิจารณาองค์ประกอบเป็นแบบก้อน (Lump) และใช้โปรแกรม EMTP ทำการคำนวณ แบ่งแบบจำลองได้เป็น 2 กรณีดังนี้

4.4.1 กรณีละเลยผลของความเหนี่ยวนำร่วม

จะเป็นการจำลองลักษณะทางกายภาพของขดลวดหม้อแปลง ทางด้านขดลวดแรงดันสูง กรณีที่ขดลวดพันแบบดิสก์ตามรูปที่ 2.14 จะแทนขดลวดในแต่ละดิสก์ด้วยความเหนี่ยวนำ ซึ่งเป็นค่าความเหนี่ยวนำตัวเอง (L) ของแต่ละดิสก์ตามจำนวนดิสก์ โดยที่พิจารณาว่าขดลวดมีการพันกัน



รูปที่ 4.5 แบบจำลองขดลวดหม้อแปลงกรณีละเลย
ผลของความเหนี่ยวนำร่วม (แบบจำลองที่ 1)

อย่างสม่ำเสมอ ทำให้ความเหนี่ยวนำตัวเองของขดลวดแต่ละดิสก์มีค่าเท่ากันทุกๆดิสก์ C_s เป็นค่าความจุไฟฟ้าระหว่างดิสก์และระหว่างขดลวดในแต่ละรอบของขดลวดในแต่ละดิสก์ C_gจากสูตรการคำนวณในบทที่3เป็นความจุไฟฟ้าเทียบกราวด์ โดยความจุไฟฟ้าเทียบกราวด์ที่ได้นี้เป็นค่าความจุไฟฟ้าเทียบกราวด์รวมของขดลวดทางด้านแรงดันสูง ดังนั้นจะต้องแบ่งค่าความจุไฟฟ้า C_g ที่คำนาณได้ออกเป็นส่วนๆ ตามจำนวนดิสก์ของขดลวดแรงดันสูง เพื่อนำมาเป็นข้อมูลแทนในแบบจำลองโดยไม่คิดผลของความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างดิสก์ แสดงแบบจำลองได้ตามรูปที่ 4.5 จากแบบจำลองจะเห็นได้ว่ามีตัวต้านทานอยู่ภายในแบบจำลองด้วย ตัวต้านทานนี้จะไม่ใช่ค่าพารา-มิเตอร์ของขดลวดที่ใช้ในแบบจำลอง แต่เป็นเพียงตัวต้านทานใช้เพื่อให้โปรแกรม EMTP สามารถทำงาน(Run)ได้ ในกรณีจำลองขดลวดนิวตรอลต่อลงกราวด์

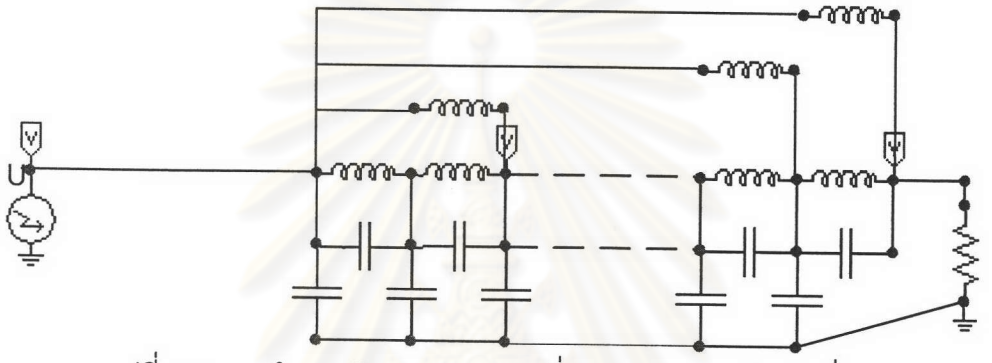
ส่วนกรณีที่ขดลวดทางด้านแรงดันสูงพันเป็นแบบอินเตอร์ลีฟแสดงในรูปที่ 3.8 แบบจำลองของขดลวดแบบนี้ จะพิจารณาได้เช่นเดียวกับแบบจำลองของขดลวดที่พันเป็นแบบดิสก์ ดังในแบบจำลองรูปที่ 4.5 แต่จะมีความแตกต่างกันตรงที่การแทนพารามิเตอร์ของขดลวด กล่าวคือ ความเหนี่ยวนำตัวเอง ความจุไฟฟ้าอนุกรม ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ของขดลวดอินเตอร์ลีฟแต่ละตัวภายในแบบจำลองจะเป็นค่าที่คำนวณต่อ 1 องค์ประกอบซึ่งภายใน 1 องค์ประกอบของขดลวดอินเตอร์ลีฟประกอบด้วยขดลวดหลายๆ ส่วน(sections) เช่น รูปที่ 3.8 ขดลวด1องค์ประกอบจะประกอบด้วยขดลวด 2 ส่วน รูปที่ 3.9 1องค์ประกอบจะประกอบด้วยขดลวด 4ส่วน เป็นต้น ในวิทยานิพนธ์นี้จะจำลองขดลวดแบบอินเตอร์ลีฟ ที่ประกอบด้วยขดลวด2 ส่วน ต่อ 1 องค์ประกอบ ดังนั้นในกรณีขดลวดอินเตอร์ลีฟประกอบด้วย2ส่วนต่อองค์ประกอบ ตำแหน่งของการจำลองแรง-

ดันบนขดลวดแบบอินเตอร์ลีฟ 1 องค์ประกอบจะมีระยะหรือตำแหน่งประมาณเท่ากับตำแหน่งของขดลวดแบบดิสก์ที่ตำแหน่งดิสก์ที่ 2

4.4.2 กรณีพิจารณาผลของความเหนี่ยวนำร่วม

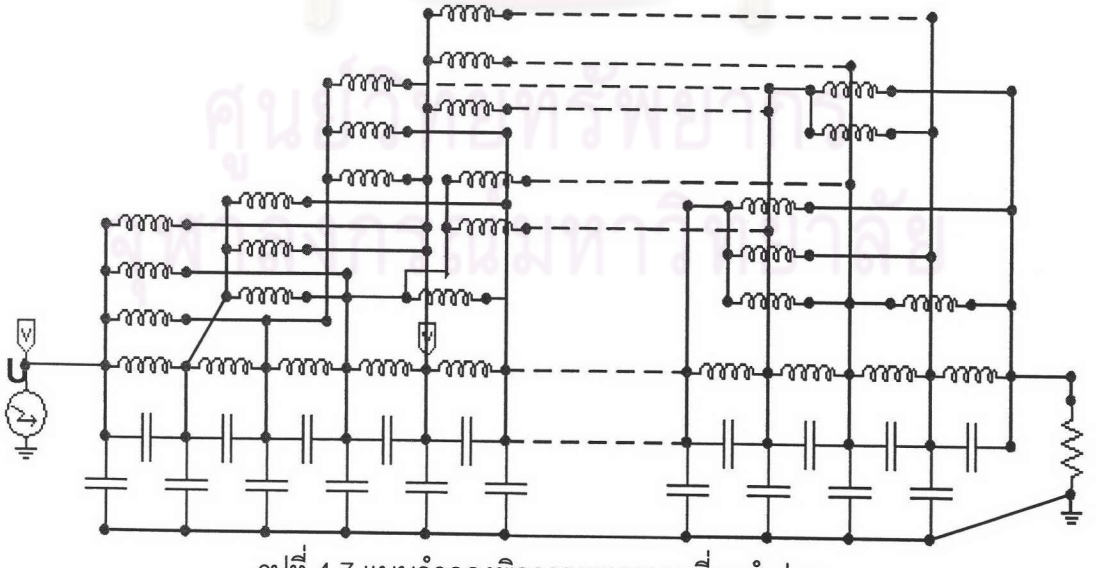
แบ่งการจำลองในกรณีนี้ออกเป็น 2 แบบได้แก่

1) แบบจำลองที่พิจารณาความเหนี่ยวนำร่วมของขดลวดเฉพาะดิสก์แรกคือขดดิสก์ด้านที่ได้รับแรงดันเสิร์จฟ้าผ่ากับดิสก์อื่นๆทั้งหมดของขดลวด แสดงแบบจำลองที่ใช้ในโปรแกรม EMTP ได้ตามรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แบบจำลองพิจารณาความเหนี่ยวนำร่วม(แบบจำลองที่ 2)

2) แบบจำลองที่พิจารณาความเหนี่ยวนำร่วมของขดลวดดิสก์ โดยพิจารณาว่าขดลวดในแต่ละดิสก์จะสร้างสนามแม่เหล็กไปเกี่ยวคล้องกับขดลวดดิสก์อื่นๆที่อยู่ใกล้เคียงซึ่งกันและกันจำนวน 3ดิสก์แสดงแบบจำลองได้ตามรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แบบจำลองพิจารณาความเหนี่ยวนำร่วม

(แบบจำลองที่ 3)