

บทที่ 4

แบบจำลองระบบไฟฟ้าของโปรแกรม EMTP

บทนำ

ระบบวงจรไฟฟ้าเป็นส่วนที่มีองค์ประกอบสำคัญอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งอาจสร้างแบบจำลองจากแบบโดยประมาณ ไปจนถึงแบบที่ละเอียดถูกต้องสูง ตัวอย่างเช่น แหล่งจ่ายพลังงานขนาดใหญ่ซึ่งมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลายๆ เครื่อง อาจสร้างแบบจำลองโดยประมาณเป็นแหล่งจ่ายแรงดันอนุกรมกับอิมพีแดนซ์ เท่านั้น การเลือกใช้แบบจำลองจะขึ้นอยู่กับชนิดของงาน การวิเคราะห์ และที่ตั้งขององค์ประกอบ ซึ่งอาจอยู่ในโซนที่มีความสำคัญต่อการวิเคราะห์มากน้อยไม่เท่ากัน เช่น โหลดทางด้านผู้ใช้ หรือ ทางด้านแรงต่ำ อาจมีความสำคัญไม่มากนัก ในการวิเคราะห์ทางด้านแรงสูงจึงใช้วงจรสมมูล แบบง่ายๆ ได้ เช่น เป็นค่าอิมพีแดนซ์ตัวเดียว [1]

นอกจากนี้ อาจต้องพิจารณาถึงความถี่ และช่วงเวลาของการเกิดทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้าด้วย

ในโปรแกรม EMTP มีแบบจำลองที่ครอบคลุมถึงอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบไฟฟ้าเกือบทั้งหมด แต่ในวิทยานิพนธ์นี้ จะกล่าวถึงเฉพาะแบบจำลอง ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เท่านั้น สำหรับรายละเอียดที่มากกว่านี้ อ่านเพิ่มเติมได้ใน [1]-[3]

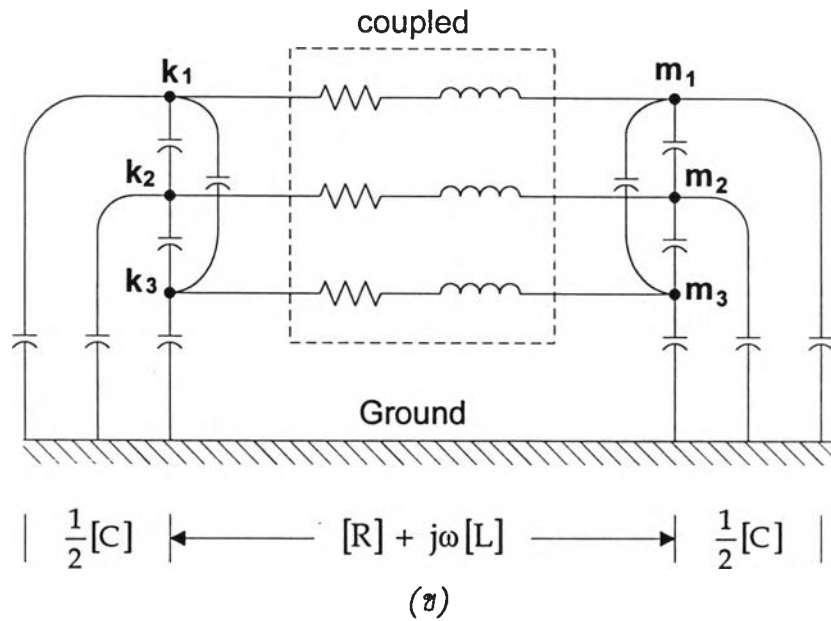
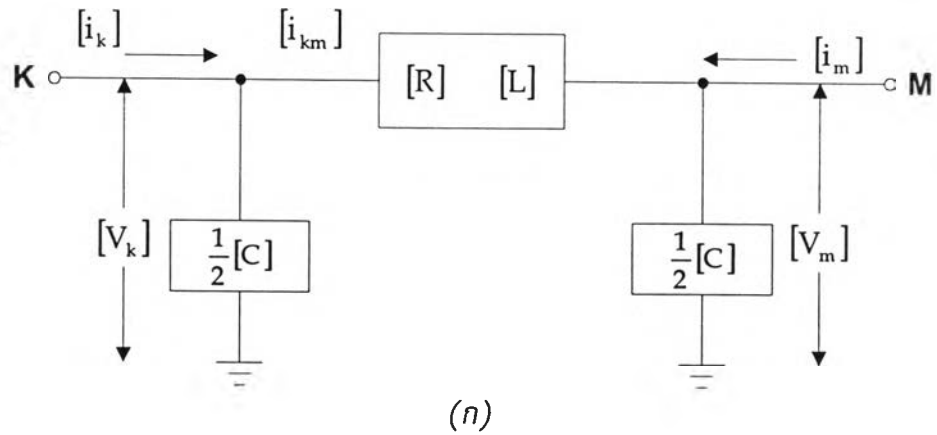
แบบจำลองที่จะกล่าวถึงมีดังนี้

4.1 สายส่ง

จะเป็นพารามิเตอร์แบบกระจาย (Distributed Lumped Parameter) มีแบบจำลองแยกได้เป็น 3 ประเภทคือ

4.1.1 วงจรสมมูลชนิดพายน์ (Nominal Pi-Circuit)

วงจรสมมูลพายน์ของสายส่ง แสดงดังรูปที่ 4.1 (ก) และ 4.1 (ข)



รูปที่ 4.1 (n) แบบแทนแบบจำลอง (ข) วงจรสมมูลชนิดพายน์

กำหนดให้ $[R] + j\omega [L]$ เป็นเมตริกซ์ของความต้านทาน และความเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกัน $\left[\frac{C}{2} \right]$ เป็นเมตริกซ์ของความจุไฟฟ้า ต่อที่ปลายทั้งสองข้างของสายส่ง

จากรูป 4.1 (n) สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ของแรงดัน และกระแส ดังนี้

$$[V_k] - [V_m] = [L] \left[\frac{di_{km}}{dt} \right] + [R][i_{km}] \tag{4.1}$$

$$[i_k] = \frac{1}{2}[C] \left[\frac{dV_k}{dt} \right] + [i_{km}] \quad (4.2)$$

$$[i_m] = \frac{1}{2}[C] \left[\frac{dV_m}{dt} \right] - [i_{km}] \quad (4.3)$$

วงจรสมมูลพายน้ประกอบด้วยพารามิเตอร์มีตัวด้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ และต่อขนานกับตัวเก็บประจุ ดังสมการ (4.4) และ (4.5) ตามลำดับ

$$[R] + j\omega [L] = \begin{vmatrix} R_{11} + j\omega L_{11} & R_{12} + j\omega L_{12} & R_{13} + j\omega L_{13} \\ R_{21} + j\omega L_{21} & R_{22} + j\omega L_{22} & R_{23} + j\omega L_{23} \\ R_{31} + j\omega L_{31} & R_{32} + j\omega L_{32} & R_{33} + j\omega L_{33} \end{vmatrix} \quad (4.4)$$

$$[C] = \begin{vmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{vmatrix} \quad (4.5)$$

เมื่อพิจารณาเมตริกซ์ $[R] + j\omega [L]$ จะได้

$R_{ii} + j\omega L_{ii}$ (Diagonal Element) เท่ากับ Self Impedance ของ Branch i

$R_{ii} + j\omega L_{ii}$ (Off Diagonal Element) เท่ากับ Mutual Impedance ระหว่าง Branch i, k และ พิจารณาเมตริกซ์ $[C]$ จะได้

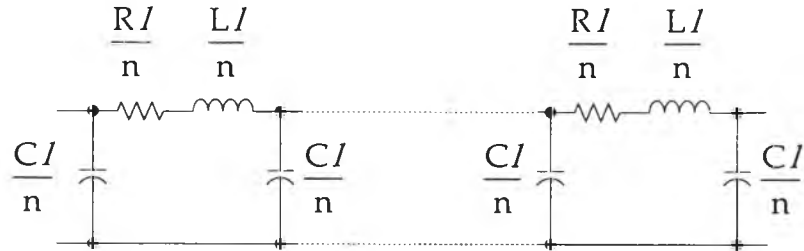
C_{ii} เท่ากับ ผลรวมของความจุไฟฟ้าที่ต่อกับปม i

C_{ik} เท่ากับ ค่าลบของความจุไฟฟ้าที่ต่อระหว่างปม i และ k

วงจรสมมูลพายน้ นิยมใช้ในการวิเคราะห์สายส่งที่มีความยาวไม่มาก (ไม่เกิน 95 กม.) โดยถ้าสายมีความยาวมากกว่านี้ จะต้องทำการต่อวงจรแบบคาสเคดกันจนได้ความยาวเท่ากับความยาวของสายส่งในวงจรนั้น ในแบบจำลองนี้ ค่าความต้านทาน ค่าเหนี่ยวนำ และ ค่าประจุ จะเป็นค่าที่ความยาวของสายส่ง / กิโลเมตร และมี n เป็นจำนวนวงจรสมมูล ดังแสดงในรูปที่ 4.2

วงจรสมมูลชนิดนี้ ให้ค่าที่ถูกต้องสูงในการวิเคราะห์แบบสถานะอยู่ตัว จึงเป็นที่นิยมในการวิเคราะห์ ระบบในสถานะอยู่ตัว นอกจากนี้ยังสามารถใช้วิเคราะห์ในภาวะชั่วคราวได้ด้วย แต่ต้องแบ่งเป็นจำนวนวงจรสมมูลย่อยๆ ให้มากพอ นั่นคือ วงจรที่นำมาต่อคาสเคดกันยิ่งมาก (ค่า n มาก และ ความยาวในแต่ละช่วงสั้น) ก็ยิ่งมีความถูกต้องมากขึ้น

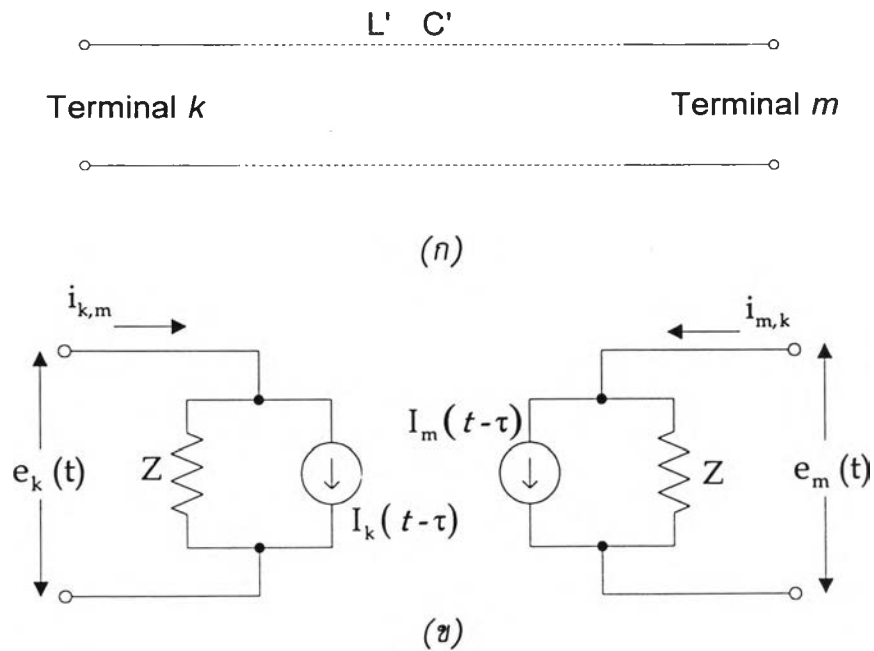
อย่างไรก็ตามค่าที่ได้นั้นก็ยังมีผลผิดพลาดอยู่มาก เมื่อเทียบกับแบบจำลองแบบอื่น ฉะนั้นจึงไม่เป็นที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ในภาวะชั่วคราว นอกเสียจากจะพิจารณาในช่วงความยาวของสายสั้นๆ



รูปที่ 4.2 วงจรสมมูลพายน้ จำนวน n ยูนิต

4.1.2 สายส่งที่พารามิเตอร์ของสายมีค่าคงที่ (Constant Parameter Line)

แบบจำลองชนิดนี้ จะใช้หลักของคลื่นเดินทางที่ไม่คิดกำลังสูญเสีย ในการสร้างแบบจำลองขึ้นมา มีวงจรสมมูล ดังแสดงใน รูปที่ 4.3 (ก) และ (ข)



รูปที่ 4.3 (ก) แบบแทนแบบจำลอง
(ข) วงจรสมมูลสายส่งแบบไม่คิดกำลังสูญเสีย

จากรูปที่ 4.3 (ก) พิจารณาสายส่งที่ไม่มีกำลังสูญเสียด้วยค่าเหนี่ยวนำ (L') และ ค่าประจุ (C') มีหน่วยเป็น เฮนรีต่อเมตร และ ฟารัดต่อเมตร ตามลำดับ ณ จุด x ใดๆ ตามความยาว จะเขียนสมการความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และ แรงดันได้ดังสมการที่ (4.6) และ (4.7)

$$-\Delta e = L' \Delta x \left(\frac{\partial i}{\partial t} \right) \quad (4.6)$$

$$-\Delta i = C' \Delta x \left(\frac{\partial e}{\partial t} \right) \quad (4.7)$$

$$-\left(\frac{\partial e}{\partial x} \right) = L' \left(\frac{\partial i}{\partial t} \right) \quad (4.8)$$

$$-\left(\frac{\partial i}{\partial x} \right) = C' \left(\frac{\partial e}{\partial t} \right) \quad (4.9)$$

หาคำตอบโดยใช้ วิธี D'Alembert จะได้

$$i(x,t) = f_1(x-vt) + f_2(x+vt) \quad (4.10)$$

$$e(x,t) = Zf_1(x-vt) - Zf_2(x+vt) \quad (4.11)$$

โดยที่ $f_1(x-vt)$ เป็นฟังก์ชันในการเคลื่อนที่ของคลื่นที่ความเร็ว (v) ไปในทิศทางข้างหน้า และในทางกลับกัน $f_2(x+vt)$ จะเคลื่อนที่ในทิศทางกลับหลัง ค่า Z ในสมการที่ (4.11) คือ อิมพีแดนซ์เลิร์จ และ v คือ ความเร็วของเฟส

$$Z = \sqrt{L'/C'} \quad : \quad v = 1/\sqrt{L'C'}$$

คูณสมการที่ (4.10) ด้วย Z แล้วบวกเข้า และลบออกจาก สมการที่ (4.11) จะได้

$$e(x,t) + Zi(x,t) = 2Zf_1(x-vt) \quad (4.12 ก.)$$

$$e(x,t) - Zi(x,t) = -2Zf_2(x+vt) \quad (4.12 ข.)$$

จากสมการที่ (4.11) และ (4.12) ฟังก์ชัน $(e + Zi)$ และ $(e - Zi)$ จะคงที่เมื่อฟังก์ชัน $(x - vt)$ และ $(x + vt)$ คงที่ตามลำดับ ซึ่งเรียกได้ว่าเป็นคุณสมบัติของสมการอนุพันธ์ จากสมการที่ (4.12) แสดงให้เห็นว่า ถ้าให้ผู้สังเกตเดินทางในทิศทางไปข้างหน้าด้วยความเร็ว v จะทำให้เห็นได้ว่าฟังก์ชัน $(x - vt)$ และ $(e + Zi)$ จะคงที่ (วิธีของ Bergeron) เวลาในการเดินทางจากปม m ไปยังปม k เท่ากับ

$$\tau = d / v = d \sqrt{L' C'}$$

d คือ ความยาวของสายส่งระยะระหว่างปม m ไปยังปม k

เมื่อฟังก์ชัน $(e + Zi)$ ที่ปม m ณ เวลา $t - \tau$ จะเท่ากับ ปม k ณ เวลา t จะได้สมการ

$$e_m(t - \tau) + Zi_{m,k}(t - \tau) = e_k(t) + Z(-i_{k,m}(t)) \quad (4.13)$$

จากสมการที่ (4.13) หา $i_{k,m}(t)$ โดยการย้ายตัวแปร จะได้สมการที่ (4.14) และ (4.15) และวงจรสมมูล แสดงในรูปที่ 4.3 (ข)

$$i_{k,m}(t) = (1/Z)e_k(t) + I_k(t - \tau) \quad (4.14)$$

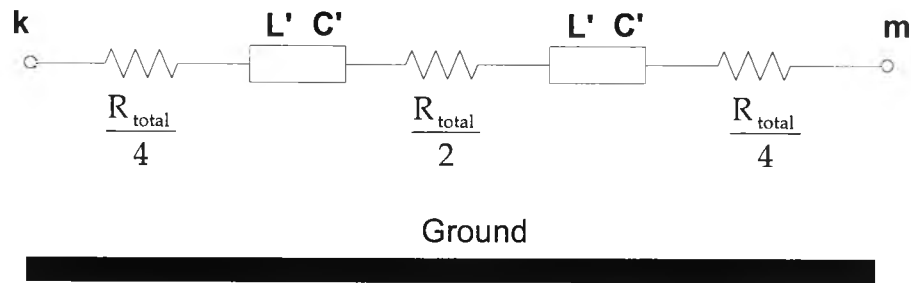
$$i_{m,k}(t) = (1/Z)e_m(t) + I_m(t - \tau) \quad (4.15)$$

แหล่งจ่ายกระแส I_k และ I_m สามารถหาได้ ณ เวลา t จากเวลาในอดีตที่ผ่านมา $t - \tau$ ดังสมการที่ (4.16) และ (4.17)

$$I_k(t - \tau) = -(1/Z)e_m(t - \tau) - i_{m,k}(t - \tau) \quad (4.16)$$

$$I_m(t - \tau) = -(1/Z)e_k(t - \tau) - i_{k,m}(t - \tau) \quad (4.17)$$

จากที่กล่าวมานั้นเป็นกรณีที่ไม่คิดกำลังสูญเสียในสายส่ง แต่ในความเป็นจริงมีความจำเป็นต้องคิดถึงกำลังสูญเสียในสายด้วย ทางผู้พัฒนาโปรแกรม EMTP จึงได้พัฒนาแบบจำลอง ที่รวมความต้านทานของสายเข้าไปด้วย เรียกว่า แบบจำลองชนิดความต้านทานแบบก้อน (Lumped Resistance Line) โดยจะต่อ $R_{\text{total}} / 4$ เข้าที่ปลายทั้งสองของสายส่ง ในขณะที่ $R_{\text{total}} / 2$ จะนำมาวางตรงกลางของสาย ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การต่อความต้านทานของสายส่งเมื่อคิดถึงกำลังสูญเสีย

โดยที่ $R_{total} = R' \cdot \text{Length}$

เมื่อ R' คือ ความต้านทานต่อหน่วยความยาว : $\Omega / \text{หน่วยความยาว}$

แบบจำลองนี้มีความถูกต้องมากที่สุดแบบจำลองหนึ่ง แต่มีข้อจำกัด คือค่า R_{total} จะต้องมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ อิมพีแดนซ์เสิร์จ ($\sqrt{L'/C'}$)

4.1.3 สายส่งที่มีพารามิเตอร์ขึ้นกับความถี่ (Frequency Dependent Line)

สายส่งที่มีพารามิเตอร์ขึ้นกับความถี่ หรือ สายส่งแบบ Marti (Marti's model) นี้ ได้รับการพัฒนาขึ้นมาโดย Prof. Jose. R. Marti แห่งมหาวิทยาลัย บริติชโคลัมเบีย ประเทศแคนาดา โดยใช้หลักการของคลื่นเดินทางเหมือนในข้อ 4.1.2 ดังนั้นวงจรสมมูลยังคงคล้ายกับในข้อที่ 4.1.2 แต่ที่ต่างกันคือ ค่าพารามิเตอร์ของสายจะถูกพิจารณาเป็นฟังก์ชันของความถี่ เนื่องจากผลจาก ปรากฏการณ์ทางผิว (ไม่มีผลมากที่ความถี่ต่ำกว่า 2-3 kHz) และ ระบบกระแสกลับทางดิน (มีผลในทุกช่วงความถี่) นั่นคือ $R' = R'(\omega)$, $L' = L'(\omega)$, $G' = G'(\omega)$ และ $C' = C'(\omega)$ (ในทางปฏิบัติโดยทั่วไป G' และ C' จะคงที่) ทำให้สมการของ อิมพีแดนซ์ (รวมถึง ฟังก์ชันของการกระจาย) เปลี่ยนไปเป็น

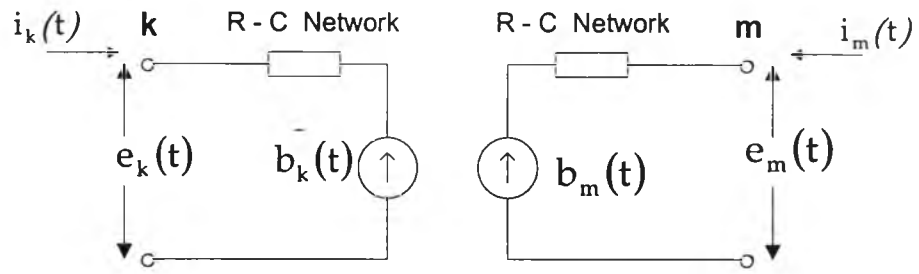
$$Z_{char} = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} \quad (4.18)$$

โดยที่ Z_{char} คือ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic Impedance)

และฟังก์ชันของการกระจายในทิศทางไปข้างหน้า จะอยู่ในรูปของ $e^{-\gamma z}$ โดยที่ γ คือค่าคงตัวของการกระจาย มีค่าเป็น

$$\gamma = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')} \quad (4.19)$$

วงจรแบบนี้เรียกว่าสายส่งแบบคลื่นเดินทางที่มีพารามิเตอร์ขึ้นกับความถี่ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ละเอียด ฉะนั้นจึงใช้เวลาคำนวณในการสร้างแบบจำลองมากกว่าประเภทที่สอง และมีวงจรสมมูลดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยแหล่งจ่ายกระแส $b_k(t)$ และ $b_m(t)$ จะมีค่าขึ้นอยู่กับกระแส และแรงดันของปลายอีกด้านหนึ่งสายส่ง ที่ทราบค่าอยู่แล้วก่อนเวลา t



รูปที่ 4.5 แบบจำลองของสายส่งที่มีพารามิเตอร์ขึ้นกับความถี่

4.2 องค์ประกอบเชิงเส้นแบบก้อน (Lumped Linear Element)

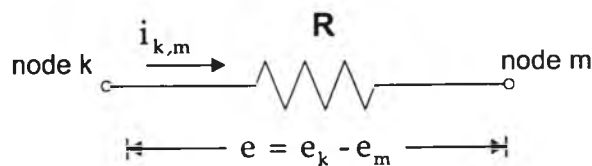
ได้แก่ ตัวต้านทาน (R) ตัวเหนี่ยวนำ (L) และ ตัวเก็บประจุ (C)

4.2.1 ตัวต้านทาน

สมการแสดงความสัมพันธ์ของกระแส และแรงดันของตัวต้านทาน ที่ต่อระหว่างปม k และ m คือ

$$i_{k,m} = \frac{1}{R} [V_k(t) - V_m(t)] \tag{4.20}$$

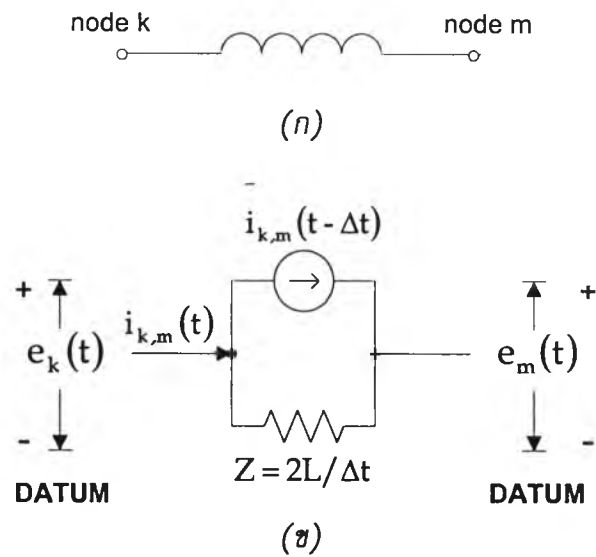
และสามารถแทนตัวต้านทานด้วยวงจรสมมูล ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 วงจรสมมูลของตัวต้านทาน

4.2.2 ตัวเหนี่ยวนำ

สมการแสดงความสัมพันธ์ของกระแส และแรงดันของตัวเหนี่ยวนำ ที่ต่อระหว่างปม k และ m ดังในรูป 4.7 (ก) คือ



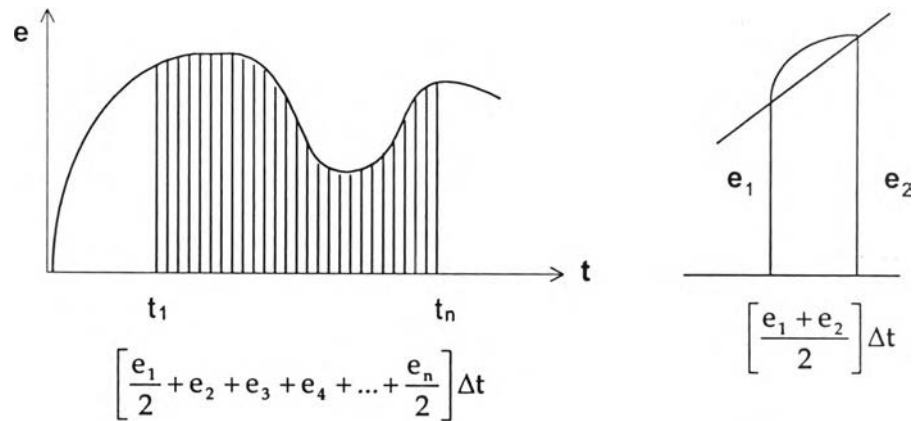
รูปที่ 4.7 (ก) ตัวเหนี่ยวนำ (ข) วงจรสมมูลของตัวเหนี่ยวนำ

$$e_k - e_m = L \left(\frac{di}{dt} \right) \quad (4.21)$$

ทำการอินทิเกรต สมการที่ (4.21) จะได้สมการที่ (4.22) ซึ่งเป็นการอินทิเกรตจากภาวะที่รู้ค่า $(t - \Delta t)$ ไปยังภาวะไม่รู้ค่า t

$$i_{k,m}(t) = i_{k,m}(t - \Delta t) + \frac{1}{L} \int_{t-\Delta t}^t (e_k - e_m) dt \quad (4.22)$$

ใช้กฎอินทิเกรตสี่เหลี่ยมคางหมู ตามรูปที่ 4.8 ได้สมการที่ (4.23)



รูปที่ 4.8 การอินทิเกรตแบบสี่เหลี่ยมคางหมู

$$i_{k,m}(t) = (\Delta t / 2L)(e_k(t) - e_m(t)) + I_{k,m}(t - \Delta t) \quad (4.23)$$

โดยที่

$$I_{k,m}(t - \Delta t) = i_{k,m}(t - \Delta t) + (\Delta t / 2L)(e_k(t - \Delta t) - e_m(t - \Delta t)) \quad (4.24)$$

จากสมการที่ (4.23) และ (4.24) เขียนวงจรมูลของตัวเหนี่ยวนำได้ดังรูปที่ 4.7 (ข)

4.2.3 ตัวเก็บประจุ

สมการแสดงความสัมพันธ์ของกระแส และแรงดันของตัวเก็บประจุ ที่ต่อระหว่างปม k และ m ดังในรูป 4.9 (ก) คือ

$$i_{k,m} = C \left(\frac{d(e_k - e_m)}{dt} \right) \quad (4.25)$$

$$e_k(t) - e_m(t) = e_k(t - \Delta t) - e_m(t - \Delta t) + \frac{1}{C} \int_{t-\Delta t}^t i_{k,m}(t) \quad (4.26)$$

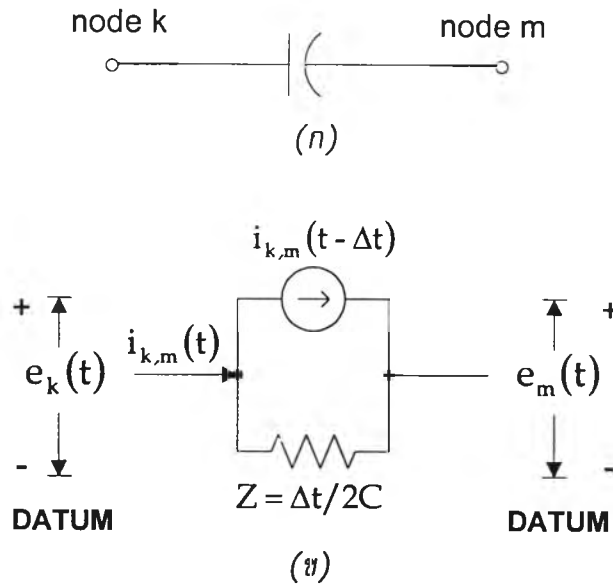
ใช้กฎการอินทิเกรตแบบสี่เหลี่ยมคางหมู จะได้สมการที่ (4.27)

$$i_{k,m}(t) = (2C / \Delta t)(e_k(t) - e_m(t)) + I_{k,m}(t - \Delta t) \quad (4.27)$$

โดยที่

$$I_{k,m}(t - \Delta t) = -i_{k,m}(t - \Delta t) - (2C / \Delta t)(e_k(t - \Delta t) - e_m(t - \Delta t)) \quad (4.28)$$

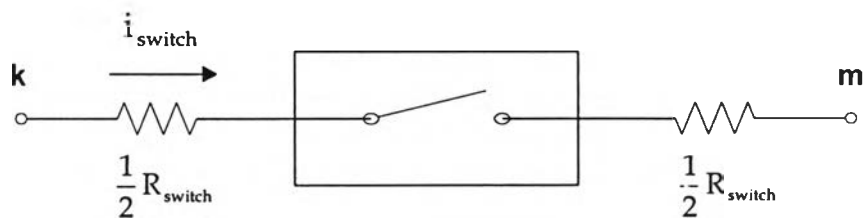
จากสมการที่ (4.27) และ (4.28) เขียนวงจรสมมูลของตัวเก็บประจุ ได้ดังรูปที่ 4.9 (ข)



รูปที่ 4.9 (ก) ตัวเก็บประจุ (ข) วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุ

4.3 สวิตช์ที่ควบคุมด้วยเวลา (Time Controlled Switch)

สวิตช์ชนิดนี้จะใช้เป็นตัวแทนของ เซอร์กิตเบรกเกอร์ หรือ สวิตช์อื่นๆ ที่ควบคุมการเปิด-ปิดด้วย เวลา รูปที่ 4.10 แสดงวงจรสมมูลของสวิตช์



รูปที่ 4.10 วงจรสมมูลของสวิตช์

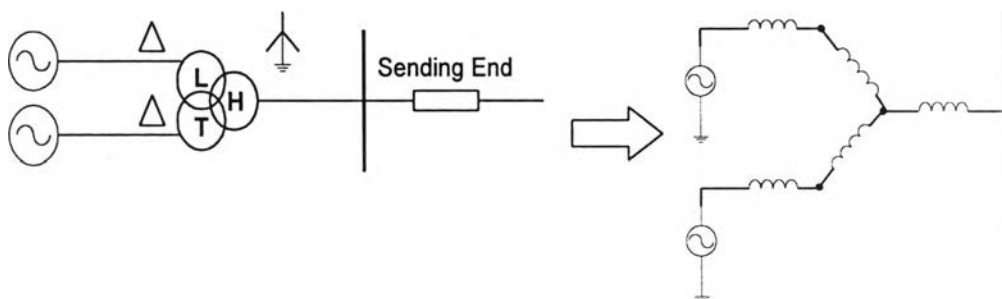
สวิตช์จะทำการปิด หรือ เปิดวงจร เมื่อ i_{switch} มีค่าเป็นศูนย์ หรือ Δi_{switch} มีค่าน้อยกว่าค่าที่กำหนด

4.4 หม้อแปลง

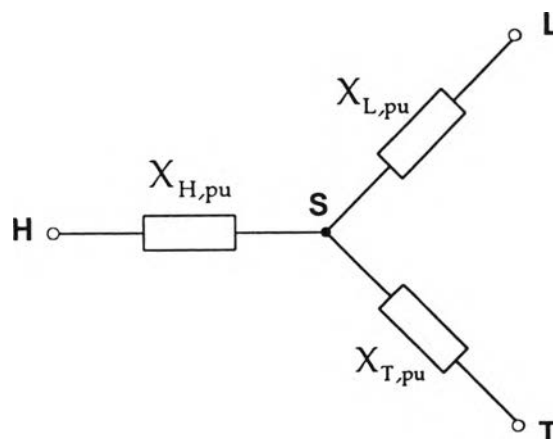
หม้อแปลงเป็นองค์ประกอบไฟฟ้าที่ใช้กันอยู่ทั่วไป ในระบบไฟฟ้า และมีอยู่มากมายหลายชนิด ดังนั้นในตัวโปรแกรม จึงมีแบบจำลองหลายแบบให้เลือกใช้ เพื่อความเหมาะสมในการแทนหม้อแปลงที่ใช้จริงในระบบไฟฟ้า แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะบางแบบจำลองเท่านั้น

4.4.1 หม้อแปลงที่แทนด้วยวงจรสมมูลของเทวินิน

ในบางกรณี หม้อแปลงอาจถูกแทนด้วยวงจรสมมูลของเทวินินได้ เช่น การเกิดความผิดพลาดขึ้นที่ด้านแรงสูงของหม้อแปลงเพิ่มแรงดัน ในกรณีเช่นนี้โดยทั่วไป จะแทนวงจรช่ายที่อยู่หลังหม้อแปลง และตัวหม้อแปลงเอง ด้วย แหล่งกำเนิดแรงดันที่อยู่หลังวงจร R-L ดังแสดงในรูป 4.11 และในรูปที่ 4.12 แสดงวงจรของหม้อแปลงแบบววาย



รูปที่ 4.11 แผนภาพเส้นเดียว และวงจรสมมูล ของวงจรตัวอย่าง



รูปที่ 4.12 วงจรแบบววาย

เมื่อ X_d คือ รีแอกแตนซ์ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

X_L , X_H และ X_T คือ รีแอกแตนซ์ของขดลวดหม้อแปลง ของชุด ปฐมภูมิ, ทติยภูมิ และ ตติยภูมิ ตามลำดับ หาได้จาก

$$X_{H,pu} = \frac{1}{2} \left(\frac{X_{HL,pu}}{S_{HL}} + \frac{X_{HT,pu}}{S_{HT}} - \frac{X_{LT,pu}}{S_{LT}} \right) \cdot S_{base} \quad (4.29 ก.)$$

$$X_{L,pu} = \frac{1}{2} \left(\frac{X_{LT,pu}}{S_{LT}} + \frac{X_{HL,pu}}{S_{HL}} - \frac{X_{HT,pu}}{S_{HT}} \right) \cdot S_{base} \quad (4.29 ข.)$$

$$X_{T,pu} = \frac{1}{2} \left(\frac{X_{HT,pu}}{S_{HT}} + \frac{X_{LT,pu}}{S_{LT}} - \frac{X_{HL,pu}}{S_{HL}} \right) \cdot S_{base} \quad (4.29 ค.)$$

โดยที่ X_{HL} , X_{HT} และ X_{LT} คือ รีแอกแตนซ์วงจรลัด ของหม้อแปลง

S_{HL} , S_{HT} และ S_{LT} คือ กำลังพิกัดของขดลวด H-L, H-T และ L-T ตามลำดับ โดยที่ค่าทั้งสามเป็นค่าต่อหน่วย

สมมติ ค่า $X_{HL} = 0.117 \text{ pu.}$, $X_T = 0.115 \text{ pu.}$ และ $X_{LT} = 0.241 \text{ pu.}$

จะได้

$X_{H,pu} = -0.0045 \text{ pu.}$, $X_{L,pu} = 0.1215 \text{ pu.}$ และ $X_{T,pu} = 0.1195 \text{ pu.}$

4.1.3 เมตริกซ์ความเหนี่ยวนำแทนหม้อแปลงเฟสเดียว ชนิด 2 และ 3 ขดลวด

หม้อแปลงอาจแทนด้วย วงจร R-L ได้ถ้ามีการคิดถึงผลของ กระแสกระตุ้น

4.4.2.1 หม้อแปลงชนิด 2 ขดลวด

เมื่อทราบค่าของ รีแอกแตนซ์วงจรลัด ความสูญเสียวงจรลัด และ กระแสกระตุ้นของหม้อแปลง จะสามารถหาค่าของอิมพีแดนซ์วงจรลัด (Z) และ รีแอกแตนซ์ทำแม่เหล็ก (X_m) ได้ หรือในกรณีที่ทราบค่า Z_{pu} , กำลังสูญเสียขณะมีโหลด (P_{loss}) และกำลังพิกัด (S_{rating}) สามารถหา อิมพีแดนซ์วงจรลัดได้จาก

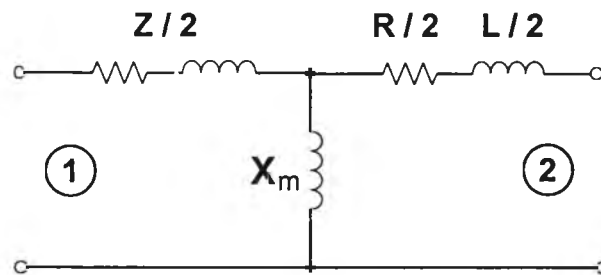
$$R_{pu} = P_{loss} / S_{rating} \quad (4.30 ก.)$$

$$X_{pu} = \sqrt{Z_{pu}^2 - R_{pu}^2} \quad (4.30 \text{ ข.})$$

ในบางครั้งไม่มีข้อมูลการกระจายของกำลังสูญเสียขณะมีโหลด ในแต่ละขดลวด ฉะนั้นเพื่อความง่ายต่อการวิเคราะห์จึงกำหนดให้

$$R_{1,pu} = R_{2,pu} = \frac{1}{2} R_{pu} \quad (4.30 \text{ ค.})$$

ลักษณะของวงจรแสดงด้วย วงจรลักษณะที่ ซึ่งเป็นที่นิยมใช้แสดงถึงวงจรของหม้อแปลง แสดงโดยรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 วงจรลักษณะที่

จากวงจรลักษณะที่สามารถหาความสัมพันธ์ของ แรงดันกับกระแสได้ โดยอาศัยอิมพีแดนซ์เมตริกซ์

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} \\ X_{21} & X_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (4.31 \text{ ก.})$$

สำหรับการวิเคราะห์ในสถานะอยู่ตัว หรือ (4.31 ข.) ในกรณีของภาวะชั่วคราว

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = [R] \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} + [L] \begin{bmatrix} di_1 / dt \\ di_2 / dt \end{bmatrix} \quad (4.31 \text{ ข.})$$

เมตริกซ์ $[R]$ เหมือนกับสมการที่ (4.31 ก.) ในขณะที่ เมตริกซ์ $[L] = \frac{1}{\omega} [X]$

เพื่อให้เห็นภาพได้ชัดเจนขึ้น จะทำการแทนค่าของตัวแปรต่างๆ ในอิมพีแดนซ์ เมตริกซ์ โดยสมมติให้ รีแอกแตนซ์วงจรลัดเป็น 10%, ความสูญเสียวงจรลัดมีค่า 0.5% และ กระแสกระตุ้น 1% โดยมี แรงดัน (V_{rating}) และกำลังพิกัด (S_{rating}) ของหม้อแปลงเป็นค่าฐาน

จะได้ว่า $Z = 0.005 + j0.10$ pu. และ กำหนดให้ $X_m = j99.95$ (มีแต่ค่าจินตภาพ เพราะไม่คิดความสูญเสียเนื่องจากกระตุ้น) เพื่อให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้า มีค่าเท่ากับ 100 PU. เมื่อมองจากด้านหนึ่งในขณะที่อีกด้านหนึ่งเป็นวงจรเปิด เนื่องจากต้องการค่ากระแสกระตุ้นเป็น 0.01 PU. และแทนค่าลงในสมการ ที่ (4.31 ก.)

$$\begin{bmatrix} V_{1,pu} \\ V_{2,pu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0025 & 0 \\ 0 & 0.0025 \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} 100 & 99.95 \\ 99.95 & 100 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{1,pu} \\ I_{2,pu} \end{bmatrix} \quad (4.31 ค.)$$

แต่โดยทั่วไปในโปรแกรม EMTP จะนิยมใช้ค่าจริงมากกว่าค่าต่อหน่วย ในกรณีนั้น จะต้องทำการเปลี่ยนค่า อิมพีแดนซ์เมตริกซ์ ที่เป็นค่าต่อหน่วยให้เป็นค่าจริงเสียก่อน

$$[Z] = \frac{1}{S_{rating}} \begin{bmatrix} 0.0025 V_1^2 & 0 \\ 0 & 0.0025 V_2^2 \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} 100 V_1^2 & 99.95 V_1 V_2 \\ 99.95 V_1 V_2 & 100 V_2^2 \end{bmatrix} \Omega \quad (4.32)$$

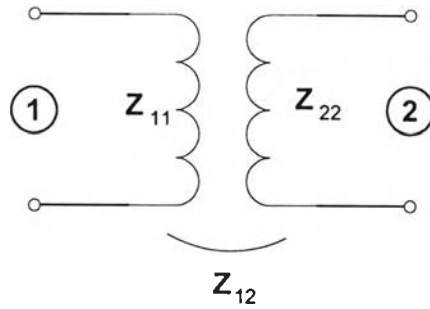
เมื่อ S_{rating} คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏพิกัดของหม้อแปลง

V_1, V_2 คือ แรงดันพิกัดของหม้อแปลง

และถ้าค่าทั้งหมดเป็นค่าที่อิงกับด้านใดด้านหนึ่ง อย่างเช่น ด้าน 1 ดังนั้น $V_2 = V_1$

จากสมการ (4.32) ทำให้พบข้อจำกัดของวงจรลักษณะที่ ว่าไม่สามารถแทนวงจรของหม้อแปลง ถ้าหม้อแปลงต่อแบบ วาย/เดลต้า เพราะ ทั้งสองด้านของหม้อแปลงต้องต่อจากปมถึงดิน หรือจุดต่อร่วมอื่น ฉะนั้นจึงใช้รูปแบบของวงจรเป็น ดังรูป 4.14 คือเป็นขดลวด 2 ขด ที่มีการเหนี่ยวนำซึ่งกันและกันด้วย

ในการกำหนดลักษณะวงจร ทำเพียงแค่กำหนดชื่อให้ปมนั้นๆ ตัวอย่างเช่น นำหม้อแปลงชนิดเฟสเดียว 3 ตัว มาแต่เป็นหม้อแปลง 3 เฟส โดยให้ทางด้านปฐมภูมิ เป็นแบบ วายที่ต่อลงดิน ในขณะเดียวกันทางด้านทุติยภูมิ เป็นแบบ เดลต้า จะให้หม้อแปลงตัวแรกต่อขดลวดแบบ HA ลงดินและ จาก LA ไปยัง LB ส่วนหม้อแปลงลูกที่สอง เป็นแบบ HB ลงดิน และ จาก LB ไปยัง LC ส่วนลูกที่สามเป็นแบบ HC ลงดิน และ จาก LC ไปยัง LA นอกจากนี้ยังเป็นการปรับการเลื่อนเฟสของหม้อแปลงไปในตัวด้วย



รูปที่ 4.14 วงจรของหม้อแปลงชนิดแทนด้วยขดลวด 2 ขด

ข้อควรระวัง องค์ประกอบทั้งสี่ของเมตริกซ์ $[X]$ ในสมการที่ (4.31) เป็นข้อมูลของ กระแส กระตุ้น (รีแอกแตนซ์ทำแม่เหล็ก, $X_m = 100$ PU.) กับรีแอกแตนซ์วงจรลัด ซึ่งแทนด้วยผลต่าง ระหว่าง X_{11} กับ X_{12} และ ระหว่าง X_{22} กับ X_{21} ซึ่งถ้ามีการปัดจุดทศนิยมค่าทั้งสี่ให้เป็นจำนวนเต็ม ค่าทั้งสี่จะเท่ากัน นั่นคือ 100 PU. และจะทำให้รีแอกแตนซ์วงจรลัดมีค่าเป็นศูนย์ และนั่นไม่ใช่สิ่งที่ต้องการ เนื่องจากส่วนใหญ่แล้ว รีแอกแตนซ์วงจรลัดจะมีผลมากกว่า รีแอกแตนซ์ทำแม่เหล็ก ดังนั้นในการปัดค่าของเมตริกซ์ $[X]$ จะใส่ค่าที่เป็นค่าละเอียดมากๆ (โดยปกติ เป็นตัวเลขอย่างน้อย 5-6 ตำแหน่ง) และอาจหา รีแอกแตนซ์วงจรลัด ได้จากสมการ

$$X_{\text{short}} = X_{11} - \frac{X_{12}^2}{X_{22}} \quad \text{เมื่อมองจากด้าน 1.} \quad (4.33)$$

ทางผู้พัฒนาโปรแกรมแนะนำให้ตรวจสอบค่าที่ได้จากสมการ (4.33) กับข้อมูลที่ได้จากทดสอบ ว่ามีความแตกต่างกันมากน้อยเพียงไร

4.4.2.2 หม้อแปลงชนิด 3 ขดลวด

จะหาอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ของหม้อแปลงแบบเฟสเดียว 3 ขดลวด ได้ โดยวงจรแบบวาย ดังรูปที่ 4.12 โดยทั่วไปในวงจรแบบนั้น จะทำการต่อรีแอกแตนซ์ทำแม่เหล็กที่จุดสตาร์ แต่เพราะค่าในช่วงที่ไม่อ้อมตัวของรีแอกแตนซ์ทำแม่เหล็ก มีค่าสูงกว่ารีแอกแตนซ์วงจรลัดมาก ดังนั้นจึงสามารถต่อกับขดลวดด้าน ปฐมภูมิ ทุติยภูมิ หรือ ตติยภูมิได้

จากตัวอย่างของรูปที่ 4.12 สมมติให้กระแสกระตุ้นมีค่าเป็น 1% เมื่อวัดจากด้านปฐมภูมิ และไม่คิดถึงความสำเร็จเนื่องจากกระตุ้น จะได้รีแอกแตนซ์ทำแม่เหล็กที่จุดสตาร์ เป็น 100.0045 PU. และ

$$[X] = \begin{bmatrix} 100 & 100.0045 & 100.0045 \\ 100.0045 & 100.1260 & 100.0045 \\ 100.0045 & 100.0045 & 100.1240 \end{bmatrix} \text{ PU.} \quad (4.34)$$

การกำหนดลักษณะการต่อของวงจร ทำได้คล้ายกับที่กล่าวมาแล้ว ตัวอย่างเช่น จาก HA ไปดิน, LA ไป LB และ TA ไป TB

4.4.3 เมตริกซ์ความเหนี่ยวนำผกผันแทนหม้อแปลงเฟสเดียว ชนิด 2 และ 3 ขดลวด

ในกรณีที่ไม่คิดถึงกระแสกระตุ้น จะแทนด้วยเมตริกซ์ $[L]^{-1}$ ซึ่งมีข้อดีคือ ไม่ต้องคำนึงถึง ข้อจำกัดดังที่เกิดขึ้นกับหัวข้อ 4.2 นอกจากนี้ยังสามารถแทนค่ากระแสกระตุ้นได้ ทุกค่า แม้กระทั่งค่าศูนย์

4.4.3.1 หม้อแปลงชนิด 2 ขดลวด

เช่นเดียวกับในหัวข้อ 4.2 อาจหาค่า R และ X ของอิมพีแดนซ์วงจรลัด จากสมการ (4.30) และ จากรูปที่ 4.13 (เมื่อตัดความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กออกจากวงจร) สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$[R_{pu}] = \begin{bmatrix} R_{1,pu} & 0 \\ 0 & R_{2,pu} \end{bmatrix} \text{ และ } [\omega L_{pu}]^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{X_{pu}} & -\frac{1}{X_{pu}} \\ -\frac{1}{X_{pu}} & \frac{1}{X_{pu}} \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

องค์ประกอบในเมตริกซ์ $[\omega L_{pu}]^{-1}$ ก็คือ ผลรวมของแอดมิตแตนซ์ที่ต่ออยู่กับ ปมนั้นๆ ตัวอย่างในรูปที่ 4.13 เมื่อไม่คิดถึงกระแสกระตุ้น จะได้เมตริกซ์

$$[R_{pu}] = \begin{bmatrix} 0.0025 & 0 \\ 0 & 0.0025 \end{bmatrix} \text{ และ } [\omega L_{pu}]^{-1} = \begin{bmatrix} 10 & -10 \\ -10 & 10 \end{bmatrix}$$

เมตริกซ์ในสมการ (4.35) เป็นค่าต่อหน่วย เมื่อต้องการค่าจริงต้องทำการ เปลี่ยนโดย

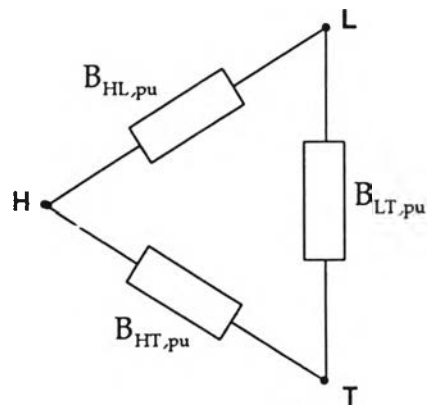
$$[R] = \frac{1}{S_{\text{rating}}} \begin{bmatrix} R_{1,\text{pu}} V_1^2 & 0 \\ 0 & R_{2,\text{pu}} V_2^2 \end{bmatrix} \quad \Omega \quad (4.36 \text{ ก.})$$

$$[\omega L_{\text{pu}}]^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{V_1^2} & -\frac{1}{V_1 V_2} \\ -\frac{1}{V_1 V_2} & \frac{1}{V_2^2} \end{bmatrix} \quad \text{S} \quad (4.36 \text{ ข.})$$

4.4.3.2 หม้อแปลงชนิด 3 ขดลวด

เป็นการซับซ้อนเกินไปในกรณีนี้ ที่จะคิดถึงความต้านทานของหม้อแปลง ดังนั้นจึงทำการละเลยความต้านทานเสีย อย่างไรก็ตามอาจเพิ่มความต้านทานเข้าที่หลังได้โดยใช้โปรแกรมย่อย TRELEG หรือ BCTRAN [2] (จะไม่กล่าวถึงในที่นี้)

วงจรมุมของหม้อแปลงชนิด 3 ขดลวดนี้มีอยู่ 2 แบบ ขึ้นกับลักษณะการต่อของหม้อแปลง แบบแรกคือ เป็นแบบวาย และอีกแบบคือ แบบเดลต้า โดยที่วงจรแบบวาย จะเป็นเหมือนดังในหัวข้อที่ 4.4.1 ฉะนั้นจะไม่กล่าวซ้ำอีก จะพิจารณาเฉพาะแบบ เดลต้า ดังแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 วงจรเดลต้า

โดยที่ค่าช้สเซปแดนซ์ทั้ง 3 หาได้จาก

$$B_{HL,pu} = \frac{X_{T,pu}}{X^2} \quad (4.37 \text{ ก.})$$

$$B_{HT,pu} = \frac{X_{L,pu}}{X^2} \quad (4.37 \text{ ข.})$$

$$B_{LT,pu} = \frac{X_{H,pu}}{X^2} \quad (4.37 \text{ ค.})$$

เมื่อ $X^2 = X_{H,pu} X_{L,pu} + X_{L,pu} X_{T,pu} + X_{H,pu} X_{T,pu}$

สมมติค่าตัวแปรต่างๆ ด้วยตัวเลข ดังนี้

$$B_{HL,pu} = 8.89484, B_{HT,pu} = 9.04371, B_{LT,pu} = -0.33495$$

จะพบว่า ช้สเซปแดนซ์ใน สมการ (4.37) ไม่ได้เป็นส่วนกลับของรีแอกแตนซ์
วงจรรัดที่ได้จากสมการ (4.29) และ ในการหาเมตริกซ์ $[\omega L]^{-1}$ ทำได้โดยอาศัยรูปที่ 4.15
กับกฎการหาเมตริกซ์ของแอดมิตแดนซ์

$$[\omega L]^{-1} = \begin{bmatrix} B_{HL,pu} + B_{HT,pu} & -B_{HL,pu} & -B_{HT,pu} \\ -B_{HL,pu} & B_{HL,pu} + B_{LT,pu} & -B_{LT,pu} \\ -B_{HT,pu} & -B_{LT,pu} & B_{HT,pu} + B_{LT,pu} \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

หรือ

$$[\omega L]^{-1} = \begin{bmatrix} 17.93855 & -8.89484 & -9.04371 \\ -8.89484 & 8.55989 & 0.33495 \\ -9.04371 & 0.33495 & 8.70876 \end{bmatrix}$$

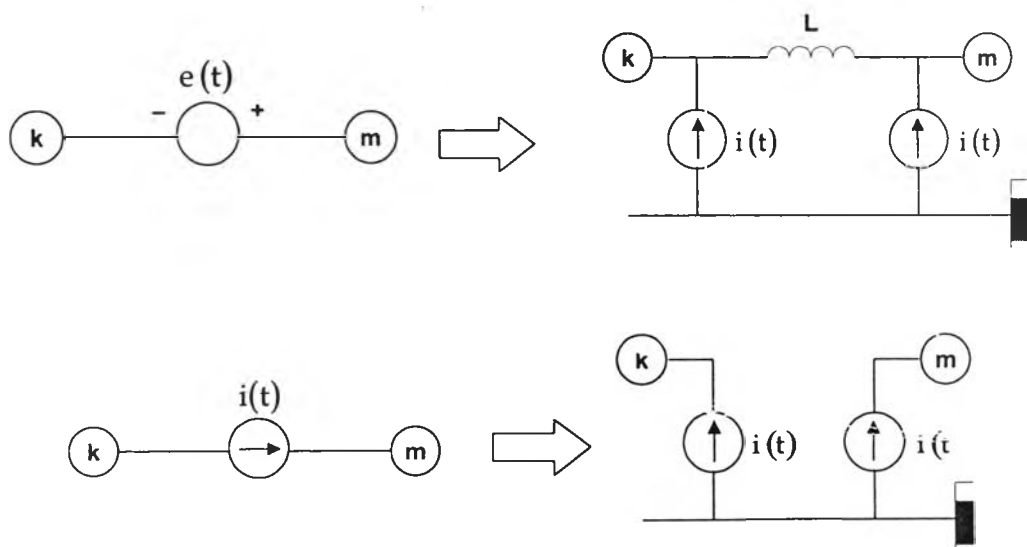
ถ้าต้องการค่าที่เป็นค่าจริง

$$[\omega L]^{-1} = \begin{bmatrix} \text{ค่าในหลักและแถวแรกของ (3.38)} \times \frac{\sqrt{S_{\text{rating}}}}{V_H} \\ \text{ค่าในหลักและแถวสองของ (3.38)} \times \frac{\sqrt{S_{\text{rating}}}}{V_L} \\ \text{ค่าในหลักและแถวสามของ (3.38)} \times \frac{\sqrt{S_{\text{rating}}}}{V_T} \end{bmatrix}$$

4.5 แหล่งกำเนิดแรงดัน และ แหล่งกำเนิดกระแส

เป็นแหล่งจ่ายพลังงานที่เป็นฟังก์ชันของเวลาในแบบต่างๆ เช่น รูปคลื่นไซน์ รูปคลื่นลาด (Ramp Function) รูปคลื่นอิมพัลส์ (Impulse Function) หรืออื่นๆ ในการเลือกใช้แหล่งกำเนิดชนิดใด และ เป็นฟังก์ชันแบบไหน ขึ้นกับปัญหาที่ทำการวิเคราะห์ ตัวอย่างเช่น ทำการศึกษาถึง แรงดันเกินเนื่องจากเกิดฟ้าผ่าลงบนสายส่ง กรณีนี้จะทำการแทนแหล่งจ่ายพลังงานเป็น แหล่งกำเนิดกระแส และ เป็นรูปคลื่นอิมพัลส์

ทั้งแหล่งกำเนิดแรงดัน และกระแส จะต้องมียุขขั้วหนึ่งเป็น ปมดิน (Ground Node) หรือ ปมอ้างอิง (Reference Node) ในกรณีที่ เป็น แหล่งกำเนิดแรงดัน หรือ กระแส ต่ออยู่ระหว่าง 2 ปม ต้องทำการเปลี่ยนวงจรเสียใหม่ โดยให้มีปลายด้านหนึ่งต่อลงปมดิน ดังแสดงใน รูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 การเปลี่ยนวงจรของแหล่งจ่ายพลังงาน