บทที่ 2
วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาและเข้าใจถึงทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย นับว่ามีความสำคัญ และเป็นประโยชน์อย่างมากในการดำเนินงาน ทั้งนี้เพื่อเป็นพื้นฐานความรู้ และความเข้าใจในงานสำหรับนำไปเป็นแหล่งอ้างอิงในการดำเนินงานวิจัย ดังนั้นในบทนี้จึงได้นำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ โดยจะกล่าวถึงเฉพาะส่วนที่เป็นประโยชน์หรือถูกกล่าวอ้างถึงต่อการดำเนินงานวิจัย ทั้งนี้เพื่อให้เนื้อหามีความกระชับและชัดเจนยิ่งขึ้น

1. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและหลักการและทฤษฎีที่ใช้ในงานวิจัยนี้

1.1 สนามแม่เหล็ก

- **พื้นฐานสำหรับสนามแม่เหล็ก** (เผด็จ เผ่าละออ, 2549)

การบอกถึงปริมาณอย่างหนึ่งอย่างใดของสรรพสิ่งในธรรมชาติ อาจกระทำได้โดยการบอกถึงขนาดแต่เพียงอย่างเดียวซึ่งรู้จักกันในนามของปริมาณเชิงสเกลาร์ หรืออาจบอกทั้งขนาดและทิศทางควบคู่กันซึ่งรู้จักกันในนามของปริมาณเชิงเวกเตอร์ พื้นฐานสำคัญในการศึกษาสนามแม่เหล็กจะเริ่มต้นจากทฤษฎีของเวกเตอร์ โดยจะเริ่มต้นด้วยพีชคณิตของเวกเตอร์ ดังนี้

ถ้าให้ A เป็นเวกเตอร์ใดๆ ในระนาบ *xyz* จะเขียนเวกเตอร์ A ภายในปริภูมิ ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของพิกัดฉากหรือพิกัดคาร์ทีเซียน (cartesian coordinate) ได้ในลักษณะ

$$\mathbf{A} = A_x\mathbf{i} + A_y\mathbf{j} + A_z\mathbf{k} \qquad (1)$$

เมื่อ i, j และ k เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วย ที่ชี้ไปในทิศทางบวกของแนวแกน *x*, *y* และ *z* ตามลำดับ โดยมี A_x, A_y และ A_z เป็นส่วนประกอบพิกัดฉากของ A ในปริภูมิ

ถ้าให้ A และ B คือเวกเตอร์ แล้ว A•B คือการคูณกันแบบดอท (dot product) เรียกการคูณแบบนี้ว่า การคูณเชิงสเกลาร์ (scalar product) นิยามโดย

$$\mathbf{A}\cdot\mathbf{B}=|\mathbf{A}||\mathbf{B}|cos\theta=A_xB_x+A_yB_y+A_zB_z \quad (2)$$

เมื่อ θ คือมุมระหว่างเวกเตอร์ A กับ B และ $0\leq\theta\leq\pi$

ส่วน A×B คือการคูณกันแบบครอส (cross product) เรียกการคูณแบบนี้ว่า การคูณเชิงเวกเตอร์ (vector product) นิยามโดย

$$\mathbf{A}\times\mathbf{B}=|\mathbf{A}||\mathbf{B}|sin\theta(\pm\mathbf{n}) \quad (3)$$

เมื่อ n นิยามให้เป็นเวกเตอร์ตั้งฉากกับเวกเตอร์ A และ B โดยเครื่องหมาย $\pm$ ใช้กำหนดทิศทางของผลคูณเวกเตอร์แบบครอส โดยถ้าเวกเตอร์ A หมุนตามเข็มนาฬิกาเป็นมุม θ เข้าหาเวกเตอร์ B จะกำหนดให้ n เป็นบวก ในทางตรงกันข้ามก็กำหนดให้เป็นลบ หรือยึดหลักการของสกรู โดยถ้าขันสกรูให้เคลื่อนที่เข้าไปในเนื้อวัตถุจะกำหนดให้ n เป็นบวก และถ้าคลายสกรูออกจากเนื้อวัตถุจะกำหนดให้เป็นลบ ซึ่งเทียบได้กับกฎมือขวานั่นเอง

$$\mathbf{A}\times\mathbf{B}=(A_yB_z-A_zB_y)\mathbf{i}+(A_zB_x-A_xB_z)\mathbf{j}+(A_xB_y-A_yB_x)\mathbf{k} \quad (4)$$

หรือเขียนในรูปของดีเทอร์มิแนนต์ได้ดังนี้

$$\mathbf{A}\times\mathbf{B}=\begin{vmatrix}\mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k}\\ A_x & A_y & A_z\\ B_x & B_y & B_z\end{vmatrix} \quad (5)$$

เมื่อทราบวิธีคำนวณผลคูณเชิงสเกลาร์และผลคูณเชิงเวกเตอร์ซึ่งเป็นพื้นฐานเบื้องต้นแล้ว จากนั้นจึงดำเนินการศึกษาถึงการหาค่าเชิงอนุพันธ์ของฟังก์ชันสเกลาร์และฟังก์ชันเวกเตอร์ (ชัยณรงค์ วิเศษศักดิ์วิชัย, 2545) ซึ่งจะกล่าวต่อไปดังนี้

ถ้าให้ f เป็นฟังก์ชันสเกลาร์ 3 ตัวแปร $f(x,y,z)$ แล้ว ค่าเชิงอนุพันธ์ของฟังก์ชัน f สามารถเขียนได้ดังนี้

$$df = \frac{\partial f}{\partial x}dx + \frac{\partial f}{\partial y}dy + \frac{\partial f}{\partial z}dz \tag{6}$$

และจากการกำหนดตัวดำเนินการอนุพันธ์ที่เรียกว่าเดล (del: ∇) ดังนี้

$$\nabla = \mathbf{i}\frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{j}\frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{k}\frac{\partial}{\partial z} \tag{7}$$

ดังนั้นเมื่อนำ ∇ กระทำต่อฟังก์ชัน f จะได้ ∇f ซึ่งเรียกว่าเกรเดียนต์ (gradient) ของฟังก์ชัน f โดยจะมีความหมายในลักษณะ

$$\nabla f = \frac{\partial f}{\partial x}\mathbf{i} + \frac{\partial f}{\partial y}\mathbf{j} + \frac{\partial f}{\partial z}\mathbf{k} \tag{8}$$

และถ้ากำหนดให้ A คือเวกเตอร์แล้ว $\nabla \cdot \mathbf{A}$ ซึ่งเป็นการคูณกันแบบดอท จะเรียกว่าไดเวอร์เจนซ์ (divergence) ของ A นิยามโดย

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z} \tag{9}$$

ส่วน $\nabla \times \mathbf{A}$ ซึ่งเป็นการคูณกันแบบครอส จะเรียกว่าเคิร์ล (curl) ของ A นิยามโดย

$$\nabla \times \mathbf{A} = \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z}\right)\mathbf{i} + \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x}\right)\mathbf{j} + \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y}\right)\mathbf{k} \tag{10}$$

หรือเขียนในรูปของดีเทอร์มิแนนต์ได้ดังนี้

$$\nabla \times \mathbf{A} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ A_x & A_y & A_z \end{vmatrix} \tag{11}$$

ไดเวอร์เจนซ์และเคิร์ลเป็นเพียงอนุพันธ์อันดับหนึ่ง เราสามารถใช้เดลดำเนินการสองครั้ง เพื่อให้ได้อนุพันธ์อันดับสอง ซึ่งเรียกว่าลาปลาเซียน (laplacian:∇^2) ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \tag{12}$$

ให้ A คือเวกเตอร์ จะได้ลาปลาเซียนของ A คือ

$$\nabla^2 \mathbf{A} = \frac{\partial^2 A_x}{\partial x^2}\mathbf{i} + \frac{\partial^2 A_y}{\partial y^2}\mathbf{j} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial z^2}\mathbf{k} \tag{13}$$

เอกลักษณ์ของเวกเตอร์ที่สำคัญต่อการดำเนินการอนุพันธ์อันดับสองมีอยู่ 2 เอกลักษณ์ ดังแสดงด้วยสมการที่ (14) และ (15) ดังนี้คือ

$$\nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{A}) = 0 \tag{14}$$

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A} \tag{15}$$

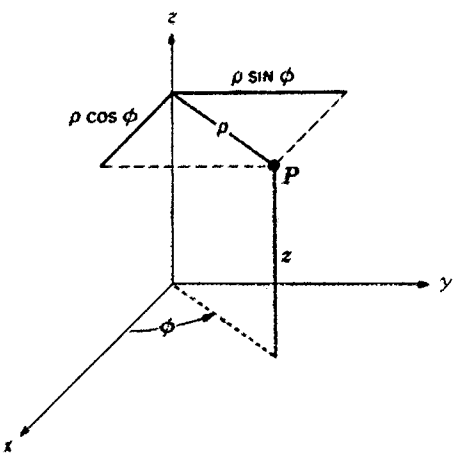
การแปลงระบบพิกัดที่มีพิกัดตั้งฉากซึ่งกันและกัน (William, 1989) จากพิกัดฉากไปเป็นพิกัดทรงกระบอก (cylindrical coordinate) ดังแสดงด้วยรูปที่ 1 สามารถแสดงได้โดย ถ้าให้ A เป็นเวกเตอร์ใดๆ ภายในปริภูมิ ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของพิกัดฉาก คือ

$$\mathbf{A} = A_x \mathbf{a_x} + A_y \mathbf{a_y} + A_z \mathbf{a_z} \tag{16}$$

เมื่อ $\mathbf{a}_x$, $\mathbf{a}_y$ และ $\mathbf{a}_z$ เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วย โดยมี A_x, A_y และ A_z เป็นส่วนประกอบพิกัดฉากซึ่งจะต้องถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปส่วนประกอบพิกัดทรงกระบอก โดยถ้าให้ A เป็นเวกเตอร์ใดๆ ภายในปริภูมิ ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของพิกัดทรงกระบอก คือ

$$\mathbf{A} = A_\rho \mathbf{a}_\rho + A_\phi \mathbf{a}_\phi + A_z \mathbf{a}_z \qquad (17)$$

เมื่อ $\mathbf{a}_\rho$, $\mathbf{a}_\phi$ และ $\mathbf{a}_z$ เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วย โดยมี A_ρ, A_ϕ และ A_z เป็นส่วนประกอบพิกัดทรงกระบอก



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดฉากและพิกัดทรงกระบอก

จากรูปที่ 1 จะเห็นว่า ณ จุด $P(x,y,z)$ หรือ $P(\rho,\phi,z)$ จะได้ว่า

$$x = \rho \cos\phi \quad , \quad y = \rho \sin\phi \quad , \quad z = z$$

จะเห็นว่าตัวแปร x, y, z อยู่ในเทอมของตัวแปร ρ, ϕ, z และในทำนองเดียวกันจะได้ว่า

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2} \quad , \quad \phi = tan^{-1}\frac{y}{x} \quad , \quad z = z$$

ซึ่งจะเห็นว่าตัวแปร ρ, ϕ, z อยู่ในเทอมของตัวแปร x, y, z

ในการเปลี่ยนจากระบบพิกัดหนึ่งไปเป็นอีกพิกัดหนึ่ง จะใช้หลักการคูณกันของเวกเตอร์แบบดอท การเปลี่ยนพิกัดฉากไปเป็นพิกัดทรงกระบอกจะต้องหาค่า A_ρ, A_ϕ ที่อยู่ในเทอมของ A_x , A_y โดยที่ $A_z = A_z$ ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$A_\rho = \mathbf{A}\cdot\mathbf{a}_\rho = \left(A_x\mathbf{a}_x + A_y\mathbf{a}_y + A_z\mathbf{a}_z\right)\cdot\mathbf{a}_\rho = A_x\mathbf{a}_x\cdot\mathbf{a}_\rho + A_y\mathbf{a}_y\cdot\mathbf{a}_\rho$$

$$A_\rho = A_x.\cos\phi \quad + A_y\sin\phi \tag{18}$$

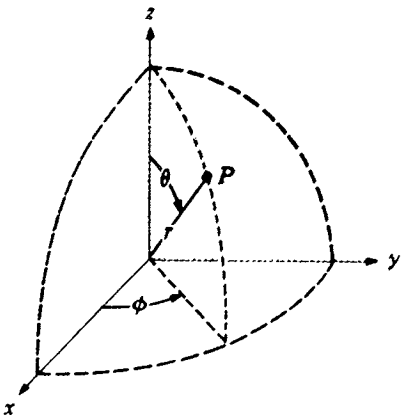
$$A_\phi = \mathbf{A}\cdot\mathbf{a}_\phi = \left(A_x\mathbf{a}_x + A_y\mathbf{a}_y + A_z\mathbf{a}_z\right)\cdot\mathbf{a}_\phi = A_x\mathbf{a}_x\cdot\mathbf{a}_\phi + A_y\mathbf{a}_y\cdot\mathbf{a}_\phi$$

$$A_\phi = -A_x\sin\phi + A_y\cos\phi \tag{19}$$

ส่วนการแปลงจากพิกัดฉากไปเป็นพิกัดทรงกลม (spherical coordinate) ดังแสดงด้วยรูปที่ 2 สามารถแสดงได้โดย ถ้าให้ A เป็นเวกเตอร์ใดๆ ภายในปริภูมิ ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของพิกัดทรงกลม คือ

$$\mathbf{A} = A_r\mathbf{a}_r + A_\theta\mathbf{a}_\theta + A_\phi\,\mathbf{a}_\phi \tag{20}$$

เมื่อ $\mathbf{a}_r$, $\mathbf{a}_\theta$ และ $\mathbf{a}_\phi$ เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วย โดยมี A_r , A_θ และ A_ϕ เป็นส่วนประกอบพิกัดทรงกลม



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดฉากและพิกัดทรงกลม

จากรูปที่ 2 จะเห็นว่า ณ จุด $P(x,y,z)$ หรือ $P(r,\theta,\phi)$ จะได้ว่า

$$x = r\sin\theta\cos\phi \quad , \quad y = r\sin\theta\sin\phi \quad , \quad z = r\cos\theta$$

จะเห็นว่าตัวแปร x, y, z อยู่ในเทอมของตัวแปร r, θ, ϕ และในทำนองเดียวกันจะได้ว่า

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad , \quad \theta = \cos^{-1}\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \quad , \quad \phi = \tan^{-1}\frac{y}{x}$$

ซึ่งจะเห็นว่าตัวแปร r, θ, ϕ อยู่ในเทอมของตัวแปร x, y, z

การเปลี่ยนพิกัดฉากไปเป็นพิกัดทรงกลม จะต้องหาค่า A_r, A_θ, A_ϕ ที่อยู่ในเทอมของ A_x, A_y, A_z ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} A_r &= \mathbf{A}\cdot\mathbf{a_r} = \left(A_x\mathbf{a_x} + A_y\mathbf{a_y} + A_z\mathbf{a_z}\right)\cdot\mathbf{a_r} \\ &= A_x\mathbf{a_x}\cdot\mathbf{a_r} + A_y\mathbf{a_y}\cdot\mathbf{a_r} + A_z\mathbf{a_z}\cdot\mathbf{a_r} \\ A_r &= A_x\sin\theta\cos\phi + A_y\sin\theta\sin\phi + A_z\cos\theta \end{aligned} \qquad (21)$$

$$A_\theta = \mathbf{A}\cdot\mathbf{a_\theta} = \left(A_x\mathbf{a_x} + A_y\mathbf{a_y} + A_z\mathbf{a_z}\right)\cdot\mathbf{a_\theta}$$
$$= A_x\mathbf{a_x}\cdot\mathbf{a_\theta} + A_y\mathbf{a_y}\cdot\mathbf{a_\theta} + A_z\mathbf{a_z}\cdot\mathbf{a_\theta}$$
$$A_\theta = A_x\cos\theta\cos\phi + A_y\cos\theta\sin\phi + A_z\sin\theta \qquad (22)$$

$$A_\phi = \mathbf{A}\cdot\mathbf{a_\phi} = \left(A_x\mathbf{a_x} + A_y\mathbf{a_y} + A_z\mathbf{a_z}\right)\cdot\mathbf{a_\phi}$$
$$= A_x\mathbf{a_x}\cdot\mathbf{a_\phi} + A_y\mathbf{a_y}\cdot\mathbf{a_\phi} + A_z\mathbf{a_z}\cdot\mathbf{a_\phi}$$
$$A_\phi = -A_x\sin\phi + A_y\cos\phi \qquad (23)$$

- **สนามแม่เหล็กและศักย์เชิงเวคเตอร์แม่เหล็ก**

เมื่อทราบทฤษฎีและคุณสมบัติของเวกเตอร์ที่จำเป็นแล้ว ต่อไปจะได้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็กและศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (เฉลิมพล น้ำค้าง, 2538) ซึ่งต้องอาศัยความรู้ของระบบเวกเตอร์จากข้างต้น

ประจุไฟฟ้า (electric charge) คือปริมาณของความเป็นไฟฟ้าที่สถิตอยู่ในสสารนั้นๆ ซึ่งแรงปฏิสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้าจะเรียกว่าแรงไฟฟ้า (electric force) และถ้าหากประจุไฟฟ้ามีการเคลื่อนที่ด้วย จะเกิดแรงที่เรียกว่าแรงแม่เหล็ก (magnetic force)ด้วยเหตุที่ทั้งแรงไฟฟ้าและแรงแม่เหล็กมีแหล่งกำเนิดเดียวกันคือประจุไฟฟ้าการจัดจำแนกกลุ่มของแรงจึงได้จัดให้ทั้งสองแรงนี้อยู่ในกลุ่มเดียวกันที่เรียกว่าแรงแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic force) ทุกๆ ประจุในสสารจะมีความเข้มสนามไฟฟ้า (electric field intensity) หรืออาจเรียกว่าสนามไฟฟ้า (electric field: E) อยู่ปริมาณหนึ่ง ที่เป็นตัวกำกับให้ประจุหนึ่งออกแรงกระทำต่อประจุหนึ่งด้วยแรงปริมาณหนึ่ง ส่วนความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux density) หรืออาจเรียกว่สนามแม่เหล็ก (magnetic field: B) จะเป็นตัวกำกับให้ออกแรงกระทำเฉพาะประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ ซึ่งสนามแม่เหล็กนี้เองที่เป็นรากฐานของกลไกในการผันแปลงพลังงานจากรูปแบบหนึ่งไปสู่รูปแบบอื่นๆ โดยใช้เป็นพื้นฐานสำหรับอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และหม้อแปลง ซึ่งการผันแปลงพลังงานที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์เหล่านี้ จะประกอบด้วยกฎพื้นฐานอยู่ 4 กฎ (Chapman, 1998) คือ

1) เมื่อกระแสไหลในเส้นลวดตัวนำจะเกิดสนามแม่เหล็กล้อมรอบเส้นลวดนั้น

2) เมื่อสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาจะเกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นใน ขดลวด ที่เกิดจากการพันของเส้นลวดตัวนำ (พื้นฐานปรากฏการณ์หม้อแปลง)
3) เมื่อกระแสไหลในเส้นลวดตัวนำที่วางอยู่ในสนามแม่เหล็กจะเกิดแรงทางกลขึ้น (พื้นฐานปรากฏการณ์มอเตอร์)
4) เมื่อเส้นลวดตัวนำเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กจะเกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้น (พื้นฐานปรากฏการณ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า)

ซึ่งปริมาณของสนามแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับวัสดุตัวกลาง สามารถแสดงได้โดย

$$B = \mu H \tag{24}$$

เมื่อ μ คือความซาบซึมได้ของแม่เหล็ก (magnetic permeability) มีค่าเท่ากับ $\mu_0\mu_r$ โดยที่ μ_0 คือความซาบซึมได้ของสูญญากาศ มีค่าเท่ากับ $4\pi\times10^{-7}$ H/m และ μ_r คือความซาบซึมได้สัมพัทธ์ (relative permeability) โดยจะขึ้นอยู่กับวัสดุตัวกลาง ส่วน H คือความเข้มสนามแม่เหล็ก (magnetic field intensity) และจากการศึกษาคุณสมบัติของ B พบว่า

$$\nabla\cdot B = 0 \tag{25}$$

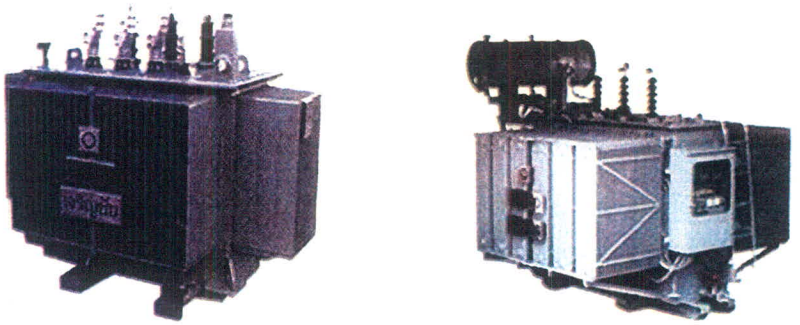
ซึ่งสมการที่ (25) นี้คือกฎของเกาส์ (Gauss's law) ในรูปอนุพันธ์ของสนามแม่เหล็ก โดยถ้านำไปประกอบกับการใช้เอกลักษณ์ในสมการที่ (14) จะสรุปได้ว่าหากไดเวอร์เจนซ์ของ B เท่ากับศูนย์แล้ว ย่อมมีอีกเวกเตอร์หนึ่งที่เมื่อกระทำเคิร์ลแล้วได้ผลเป็นเวกเตอร์ B เวกเตอร์ใดที่กระทำเคิร์ลแล้วเท่ากับ B จะเรียกว่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (magnetic vector potential: A) ดังนี้

$$B = \nabla\times A \tag{26}$$

ดังนั้นเมื่อต้องการคำนวณหาสนามแม่เหล็ก B จึงเลี่ยงโดยการไปคำนวณหาศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก A ก่อน ซึ่งสามารถคำนวณได้ง่ายกว่า โดยสนามแม่เหล็ก B สามารถคำนวณได้ด้วยการเคิร์ลศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก A เท่านั้น

1.2 หม้อแปลงไฟฟ้า

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนระดับแรงดันให้สูงขึ้นหรือต่ำลงตามต้องการ ภายในประกอบด้วยขดลวด 2 ชุดคือ ขดลวดปฐมภูมิ (Primary winding) และ ขดลวดทุติยภูมิ (Secondary winding) แต่สำหรับหม้อแปลงกำลัง (Power Transformer) ขนาดใหญ่บางตัวอาจมีขดลวดที่สามเพิ่มขึ้นคือ ขดลวดตติยภูมิ (Tertiary winding) ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าขดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ และแรงดันที่แปลงออกมาจะมีค่าต่ำกว่าขดทุติยภูมิ



รูปที่ 3 รูปหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส

- **ชนิดของหม้อแปลงไฟฟ้า**

หม้อแปลงไฟฟ้าถูกแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆได้หลายวิธี เช่น แบ่งตามโครงสร้าง ได้แก่ ชนิดแกน (core type) และชนิดเปลือกรอบ (shell type) หรือแบ่งตามตัวกลางที่ใช้ทำฉนวนและตัวระบายความร้อน ได้แก่ ก๊าซ SF6 และน้ำมันหม้อแปลง สุดท้ายแบ่งตามกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกไปได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้าที่ขนาดมากกว่า 2500 kVA ขึ้นไปเรียกว่า หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (power transformer) ซึ่งจะอยู่ตามสถานีย่อยไฟฟ้า ส่วนหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขนาดตั้งแต่ 2500 kVA ลงมาเรียกจะเรียกว่าหม้อแปลงจำหน่าย (distribution transformer)

สำหรับหม้อแปลงจำหน่ายที่ใช้งานทั่วไปของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคแบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ

1.) ระบบ 1 เฟส 3 สาย มีใช้งาน 4 ขนาดคือ 10 KVA, 20 KVA, 30 KVA, 50 KVA

2.) ระบบ 3 เฟส 4 สาย มีหลายขนาดได้แก่ 30, 50, 100, 160, 250, 315, 400, 500, 1000, 1250, 1500, 2500 KVA.

การจำแนกหม้อแปลงตามขนาดกำลังไฟฟ้าที่ใช้งานมีดังนี้

1.) ขนาดเล็กจนถึง 1 VA เป็นหม้อแปลงที่ใช้กับการเชื่อมต่อระหว่างสัญญาณในงานอิเล็กทรอนิกส์

2.) ขนาด 1-1000 VA เป็นหม้อแปลงที่ใช้กับงานด้านเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้านขนาดเล็ก

3.) ขนาด 1 kVA -1 MVA เป็นหม้อแปลงที่ใช้กับงานจำหน่ายไฟฟ้าในโรงงาน สำนักงานที่พักอาศัย

4.) ขนาดใหญ่ตั้งแต่ 1 MVA ขึ้นไป เป็นหม้อแปลงที่ใช้กับงานระบบไฟฟ้ากำลังในสถานีไฟฟ้าย่อย การผลิตและจ่ายไฟฟ้า

นอกจากนี้หม้อแปลงยังสามารถจำแนกชนิดตามจำนวนรอบของขดลวดได้ดังนี้

1.) หม้อแปลงแรงเคลื่อนไฟฟ้าเพิ่ม (Step-Up) ขดลวดทุติยภูมิจะมีจำนวนรอบมากกว่าขดลวดปฐมภูมิ

2.) หม้อแปลงแรงเคลื่อนไฟฟ้าลง (Step-Down) ขดลวดทุติยภูมิจะมีจำนวนรอบน้อยกว่าปฐมภูมิ

3.) หม้อแปลงที่มีแทปแยก (Tap) ทำให้มีขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้หลายระดับ

4.) หม้อแปลงที่ใช้สำหรับแยกวงจรไฟฟ้าออกจากกัน (Isolating) ขดลวดทุติยภูมิจะมีจำนวนรอบเท่ากันกับขดลวดปฐมภูมิหรือมีแรงเคลื่อนไฟฟ้า

- **ส่วนประกอบของหม้อแปลงไฟฟ้า**

หม้อแปลงแบ่งออกตามการใช้งานของระบบไฟฟ้ากำลังได้ 2 แบบคือ หม้อแปลงไฟฟ้าชนิด 1 เฟส และหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด 3 เฟสแต่ละชนิดมีโครงสร้างสำคัญประกอบด้วย

1.) ขดลวดตัวนำปฐมภูมิ (Primary Winding) ทำหน้าที่รับแรงเคลื่อนไฟฟ้า

2.) ขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Winding) ทำหน้าที่จ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้า

3.) แผ่นแกนเหล็ก (Core) ทำหน้าที่เป็นทางเดินสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและให้ขดลวดพันรอบแกนเหล็ก

4.) ขั้วต่อสายไฟ (Terminal) ทำหน้าที่เป็นจุดต่อสายไฟกับขดลวด

5.) แผ่นป้าย (Name Plate) ทำหน้าที่บอกรายละเอียดประจำตัวหม้อแปลง

6.) อุปกรณ์ระบายความร้อน (Coolant) ทำหน้าที่ระบายความร้อนให้กับขดลวด เช่น อากาศ, พัดลม, น้ำมัน หรือใช้ทั้งพัดลมและน้ำมันช่วยระบายความร้อน เป็นต้น

7.) โครง (Frame) หรือตัวถังของหม้อแปลง (Tank) ทำหน้าที่บรรจุขดลวด แกนเหล็ก รวมทั้งการติดตั้งระบบระบายความร้อนให้กับหม้อแปลงขนาดใหญ่

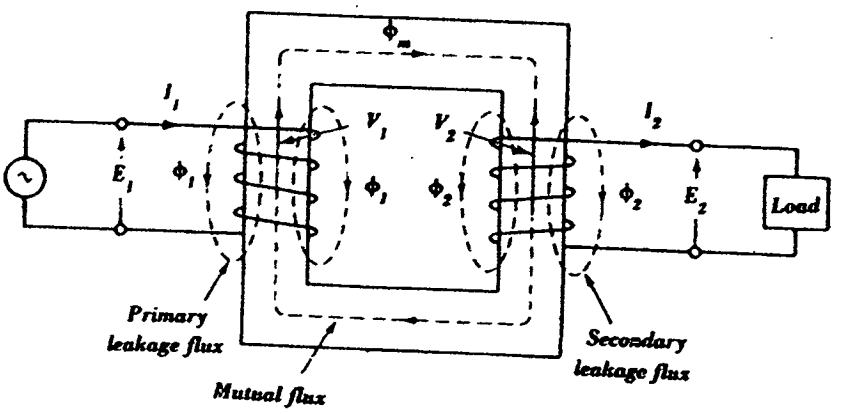
8.) สวิตช์และอุปกรณ์ควบคุม (Switch Controller) ทำหน้าที่ควบคุมการเปลี่ยนขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้า และมีอุปกรณ์ป้องกันไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ รวมอยู่ด้วย

วัสดุที่ใช้ทำขดลวดหม้อแปลงโดยทั่วไปทำมาจากสายทองแดงเคลือบน้ำยาฉนวนมีขนาดและลักษณะลวดเป็นทรงกลมหรือแบนขึ้นอยู่กับขนาดของหม้อแปลง ลวดเส้นโตจะมีความสามารถในการจ่ายกระแสได้มากกว่าลวดเส้นเล็ก

หม้อแปลงขนาดใหญ่มักใช้ลวดถักแบบตีเกลียวเพื่อเพิ่มพื้นที่สายตัวนำให้มีทางเดินของกระแสไฟมากขึ้น สายตัวนำที่ใช้พันขดลวดบนแกนเหล็กทั้งขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิอาจมีแทปแยก (Tap) เพื่อแบ่งขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้า (ในหม้อแปลงขนาดใหญ่จะใช้การเปลี่ยนแทปด้วยสวิตช์อัตโนมัติ)

วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า (มงคล ทองสงคราม ,2549)

วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นวงจรที่มีสัณลักษณ์มาแทนส่วนประกอบของหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาและการคำนวณค่าต่างๆในหม้อแปลงไฟฟ้านั้น



รูปที่ 4 วงจรหม้อแปลงไฟฟ้า

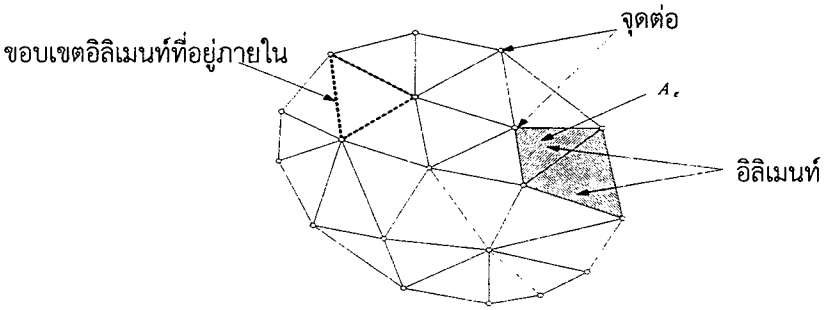
เมื่อฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหลที่ขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ (Φ_1, Φ_2 ในรูปที่ 4) เคลื่อนตัวครบ Loop จะมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับ inductive reactance (X_L) ซึ่งเราเรียกว่า leakage

1.3 ระเบียบวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์

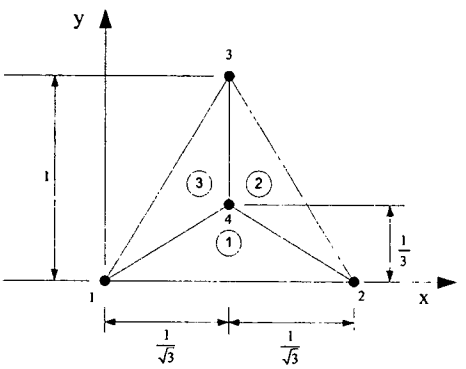
ระเบียบวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อใช้คำนวณหาผลเฉลยโดยประมาณของปัญหาที่อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ โดยการแบ่งรูปร่างขอบเขตของปัญหาออกเป็นอิลิเมนท์ แล้วสร้างสมการของแต่ละอิลิเมนท์ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ และอิลิเมนท์ต่าง ๆ จะเชื่อมต่อกันด้วยจุดต่อซึ่งเป็นตำแหน่งที่คำนวณหาค่าผลเฉลย สำหรับระเบียบวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์ในงานวิจัยนี้จะดำเนินการคำนวณแบบ 3 มิติ แต่จะกล่าวถึงวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์แบบ 2 มิติ ซึ่งเป็นหลักการเบื้องต้นเอาไว้เท่านั้น

หลักการของระเบียบวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์ คือ เริ่มจากการแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นพื้นที่หลาย ๆ ส่วนที่เรียกว่าอิลิเมนท์ โดยที่การกระจัด และแรงภายในของแต่ละอิลิเมนท์ ณ จุดที่อิลิเมนท์ต่อโยงกันจะต้องเข้ากันได้และสมดุล ซึ่งอิลิเมนท์ต่าง ๆ นี้ จะขึ้นอยู่กับความละเอียดของแต่ละงานว่าต้องการรูปร่างลักษณะใกล้เคียงกับของจริงดั้งเดิมมากเท่าใด ซึ่งถ้าพิจารณาแบบ 2 มิติอาจอยู่ในรูปลักษณะของสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าก็ได้ โดยค่าผลเฉลยโดยประมาณที่มีจำนวนที่นับได้ที่จะคำนวณออกมานั้นจะมีความแม่นยำขึ้นอยู่กับขนาด และจำนวนของอิลิเมนท์ที่ใช้ในการแก้ปัญหานั้น ซึ่งขั้นตอนโดยทั่วไปของวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์ประกอบไปด้วยขั้นตอนใหญ่ ๆ ทั้งหมด 6 ขั้นตอน (ปราโมทย์ เตชะอำไพ, 2542) โดยมีรายละเอียดดังนี้ คือ

1. แบ่งอิลิเมนท์ย่อยให้กับระบบ (Discretization) แบ่งขอบเขตรูปร่างของระบบปัญหาที่ต้องการหาผลลัพธ์ออกเป็นอิลิเมนท์ย่อย ๆ โดยแต่ละอิลิเมนท์จะมีพื้นที่ A_e ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งเป็นรูปแสดงการแบ่งอิลิเมนท์ของรูปร่างปัญหาแบบ 2 มิติ (ระนาบ xy) โดยใช้อิลิเมนท์รูปสามเหลี่ยมสามจุดต่อ ซึ่งประกอบไปด้วยโหนด (Nodes) อิลิเมนท์ (Elements) และขอบเขตของอิลิเมนท์ที่อยู่ภายใน (Interelement boundaries) และเพื่อเป็นแนวทางในการสร้างโปรแกรมการคำนวณสำหรับการป้อนข้อมูลของทุก ๆ อิลิเมนท์ จึงขอยกตัวอย่างรูปร่างของปัญหาที่ประกอบด้วยอิลิเมนท์รูปสามเหลี่ยมทั้งหมด 3 อิลิเมนท์ 4 โหนด ดังแสดงด้วยรูปที่ 7



รูปที่ 6 การแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นอิลิเมนท์



รูปที่ 7 รูปร่างของปัญหาที่ประกอบด้วย 3 อิลิเมนท์ 4 โหนด

ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ต้องการ คือ หมายเลขของอิลิเมนท์ และหมายเลขของโหนด พร้อมทั้งค่าพิกัดของแต่ละโหนด ดังแสดงด้วยรูปที่ 7 พร้อมทั้งสรุปเป็นตารางได้ดังตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ลักษณะข้อมูลของอิลิเมนท์

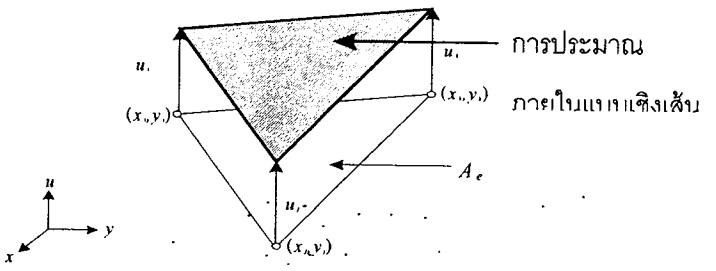
หมายเลขอิลิเมนท์	หมายเลขโหนด		
	โหนด *i*	โหนด *j*	โหนด *k*
1	1	2	4
2	4	2	3
3	1	4	3

หมายเหตุ : โหนด *i* *j* และ *k* คือหมายเลขของโหนดที่ *i* *j* และ *k* ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

ตารางที่ 2 ลักษณะข้อมูลของตำแหน่งโหนด

หมายเลขโหนด	พิกัดแกน x	พิกัดแกน y
1	0	0
2	$2/\sqrt{3}$	0
3	$1\sqrt{3}$	1
4	$1/\sqrt{3}$	1/3

2. เลือกรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนท์ (Element interpolation function) อย่างในกรณีอิลิเมนท์รูปสามเหลี่ยมจะประกอบด้วย 3 โหนดที่มีตัวห้อย i j และ k ซึ่งวนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 11 (Bickford, 1994) ซึ่งเป็นการประมาณค่าภายในอิลิเมนท์แบบเชิงเส้น (Linear representation)



รูปที่ 8 การประมาณภายในแบบเชิงเส้นบนอิลิเมนท์รูปสามเหลี่ยม

ตำแหน่งของโหนด (x_n,y_n) $n = i$ j และ k เป็นตำแหน่งของตัวที่ไม่ทราบค่า u_n โดยสมมติลักษณะการกระจายของผลลัพธ์ ณ ตำแหน่งใด ๆ บนอิลิเมนท์ $u_e(x,y)$ เป็นแบบเชิงเส้น ดังนี้

$$u_e(x,y) = \alpha + \beta x + \gamma y \tag{27}$$

โดยที่ α, β, γ เป็นค่าคงที่ ซึ่งสามารถหาได้จากโหนดทั้งสามดังนี้

$$u_e(x_i, y_i) = u_i = \alpha + \beta x_i + \gamma y_i$$

3. สร้างสมการของอิลิเมนท์ (Element formulation) ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหา ซึ่งขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญของวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์ อย่างเช่นกรณีสมการของอิลิเมนท์สามเหลี่ยมที่ได้ยกมาเป็นตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 10 จะอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix}_e \begin{bmatrix} u_i \\ u_j \\ u_k \end{bmatrix}_e = \begin{bmatrix} f_i \\ f_j \\ f_k \end{bmatrix}_e \tag{31}$$

ซึ่งเขียนโดยย่อได้ว่า $[K]_e\ [u]_e = [f\ ]_e$ โดย $[u]_e$ คือ เมทริกซ์ตัวไม่ทราบค่าที่โหนด และตัวห้อย e แสดงให้ทราบว่าเป็นเมทริกซ์ระดับอิลิเมนท์ ซึ่งสมการของอิลิเมนท์ดังกล่าว จำเป็นต้องถูกสร้างขึ้นมาให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้น ๆ การสร้างสมการของอิลิเมนท์ซึ่งอยู่ในรูปแบบของสมการที่ (31) สามารถทำได้โดย

- วิธีการโดยตรง (Direct approach) วิธีนี้สามารถใช้ได้เฉพาะกับปัญหาที่เข้าใจได้ง่าย ๆ อย่างเช่น ปัญหาต่าง ๆ ในรูปทรง 1 มิติ เท่านั้น ซึ่งไม่สามารถขยับขยายเปลี่ยนแปลงเพื่อนำไปใช้กับปัญหาใน 2 หรือ 3 มิติโดยทั่วไปได้

- วิธีการแปรผัน (Variational approach) หลักการสำคัญของวิธีการนี้คือ จำเป็นจะต้องทำการหาหรือสร้างฟังก์ชัน ซึ่งเมื่อทำการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันนั้นแล้ว จะเป็นผลให้เกิดสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่สอดคล้องกับปัญหาที่กำลังสนใจอยู่ อย่างไรก็ตามวิธีการแปรผันเป็นวิธีการดั้งเดิมที่ใช้กันในช่วงต้น ๆ ของการพัฒนาวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นปัญหาที่เกี่ยวกับทางด้านโครงสร้าง และยังมีจุดอ่อนอีกคือ จำเป็นต้องทราบฟังก์ชันแปรผันที่สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้น ๆ ซึ่งปัญหาหลาย ๆ ชนิดในทางปฏิบัติสามารถสร้างสมการอนุพันธ์ขึ้นมาได้ แต่ไม่สามารถหาฟังก์ชันแปรผันที่สอดคล้องกันนั้นได้

- วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Method of weighted residuals) วิธีนี้จะใช้วิธีการสร้างสมการไฟไนท์อิลิเมนท์จากสมการเชิงอนุพันธ์โดยตรง โดยไม่จำเป็นต้องทราบฟังก์ชันแปรผันที่สอดคล้อง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการสร้างสมการไฟไนท์อิลิเมนท์สำหรับปัญหาโดยทั่ว ๆ ไป และถูกจัดให้เป็นวิธีที่นิยมที่สุดในการประยุกต์ใช้กับปัญหาต่าง ๆ ในปัจจุบัน

4. นำสมการของแต่ละอิลิเมนท์ที่ได้มาประกอบกัน (Assembly) เป็นสมการรวมของระบบจากขั้นตอนที่ 1 หากแบ่งลักษณะรูปร่างของปัญหาออกเป็นอิลิเมนท์ย่อยซึ่งประกอบด้วย n โหนด จะก่อให้เกิดระบบสมการรวมซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยจำนวนทั้งสิ้น n สมการ โดยแสดงได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & . & . & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & . & . & K_{2n} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & . & . & K_{3n} \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ K_{n1} & K_{n2} & K_{n3} & . & . & K_{nn} \end{bmatrix}_{sys(n\times n)} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ . \\ . \\ u_n \end{bmatrix}_{sys(n\times 1)} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ . \\ . \\ f_n \end{bmatrix}_{sys(n\times 1)} \quad (32)$$

หรือเขียนโดยย่อได้ดังนี้ $[K]_{sys}\ [u]_{sys} = [f\ ]_{sys}$ จากสมการที่ (32) เมทริกซ์ $[K]_{sys}$ จะมีคุณสมบัติของความเป็นเมทริกซ์สมมาตร กล่าวคือ $[K]_{sys} = [K]^T_{sys}$ และมีคุณสมบัติของการจับกลุ่มกันของค่าที่ไม่เท่ากับศูนย์บริเวณแนวทแยงมุมของเมทริกซ์ ซึ่งจะมีลักษณะอยู่รวมกันเป็นแถบ (Banded matrix) จากคุณสมบัติดังกล่าวนี้ จะก่อให้เกิดประโยชน์อย่างมากในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทางปฏิบัติที่จำเป็นต้องใช้จำนวนโหนดเป็นจำนวนมากเพื่อที่จะก่อให้เกิดผลเฉลยที่เที่ยงตรง โดยสามารถพัฒนาให้เก็บเฉพาะค่าที่ไม่เท่ากับศูนย์ไว้ในหน่วยความจำเพื่อใช้ในการคำนวณเท่านั้น

การนำสมการย่อยของแต่ละอิลิเมนท์มาประกอบกันเข้าเป็นสมการรวมของระบบจำเป็นต้องมีหลักการ ซึ่งหลักการที่จะกล่าวนี้ เป็นหลักการที่ง่าย สามารถทำได้โดยสะดวก เหมาะกับรูปร่างของปัญหาที่มีอิลิเมนท์ย่อยจำนวนมาก ๆ และหลักการนี้จะถูกนำไปใช้ในการพัฒนาคอมพิวเตอร์โปรแกรมด้วย โดยสามารถทำความเข้าใจได้จากตัวอย่างรูปร่างของปัญหาดังรูปที่ 5 กล่าวคือจะทำการสร้างสมการรวมของระบบซึ่งประกอบด้วย 3 อิลิเมนท์ 4 โหนด โดยจะแสดงการรวมของเมทริกซ์ $[K]_{sys}$ เพื่อเป็นตัวอย่าง

วิธีการนี้ทำได้โดยเขียนสมการของอิลิเมนท์ต่าง ๆ พร้อมทั้งกำกับหมายเลขของโหนดทางแถวนอนและแถวตั้งของแต่ละอิลิเมนท์ให้ถูกต้อง โดยจากรูปที่ 7 $[K]_e$ ของอิลิเมนท์ที่ 1 ประกอบด้วยโหนดหมายเลข 1 2 และ 4 ส่วน $[K]_e$ ของอิลิเมนท์ที่ 2 ประกอบด้วยโหนด

หมายเลข 2 3 และ 4 และ $[K]_e$ ของอิลิเมนท์ที่ 3 ซึ่งเป็นอิลิเมนท์สุดท้ายประกอบด้วยโหนดหมายเลข 1 3 และ 4 โดยสามารถเขียนแสดงให้เห็นได้ดังนี้

$$[K]_{e1} = \begin{matrix} \\ (1) \\ (2) \\ (4) \end{matrix} \begin{bmatrix} (1) & (2) & (4) \\ a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix} \tag{33}$$

$$[K]_{e2} = \begin{matrix} \\ (2) \\ (3) \\ (4) \end{matrix} \begin{bmatrix} (2) & (3) & (4) \\ d_1 & e_1 & f_1 \\ d_2 & e_2 & f_2 \\ d_3 & e_3 & f_3 \end{bmatrix} \tag{34}$$

$$[K]_{e3} = \begin{matrix} \\ (1) \\ (3) \\ (4) \end{matrix} \begin{bmatrix} (1) & (3) & (4) \\ g_1 & h_1 & i_1 \\ g_2 & h_2 & i_2 \\ g_3 & h_3 & i_3 \end{bmatrix} \tag{35}$$

เมื่อมีหมายเลขกำกับทั้งทางแถวนอนและแถวตั้งกำกับสัมประสิทธิ์ทุกตัวของเมทริกซ์ของทุกอิลิเมนท์แล้ว จากนั้นนำสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ เหล่านี้มาใส่ลงในเมทริกซ์ระบบรวม $[K]sys$ เช่น ค่าสัมประสิทธิ์ b_3 ซึ่งอยู่ในแถวนอนที่ 4 แถวตั้งที่ 2 ของอิลิเมนท์ย่อยที่ 1 จะไปปรากฏอยู่ในแถวนอนที่ 4 แถวตั้งที่ 2 ของเมทริกซ์ระบบรวมดังแสดงในสมการ เป็นต้น

$$[K]_{sys} = \begin{matrix} \\ (1) \\ (2) \\ (3) \\ (4) \end{matrix} \begin{bmatrix} (1) & (2) & (3) & (4) \\ a_1 + g_1 & b_1 & h_1 & c_1 + i_1 \\ a_2 & b_2 + d_1 & e_1 & c_2 + f_1 \\ g_2 & d_2 & e_2 + h_2 & f_2 + i_2 \\ a_3 + g_3 & b_3 + d_3 & e_3 + h_3 & c_3 + f_3 + i_3 \end{bmatrix} \tag{36}$$

5. ประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) ที่สอดคล้องกับปัญหาลงในสมการรวมของระบบเพื่อหาค่าผลเฉลย โดยการแก้สมการรวมของระบบเพื่อหาตัวไม่ทราบค่าที่โหนด

6. คำนวณหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ต้องการต่อไป เมื่อทราบค่าผลลัพธ์ที่โหนดต่าง ๆ แล้ว สามารถคำนวณหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่สัมพันธ์กับผลลัพธ์นี้ต่อไปได้

จากขั้นตอนทั้ง 6 ขั้นตอน จะเห็นได้ว่าระเบียบวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์เป็นวิธีที่มีแบบแผนเป็นขั้นเป็นตอน โดยมีส่วนที่สำคัญที่สุดคือการสร้างสมการของอิลิเมนท์ในขั้นตอนที่ 3 ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่กำหนด และในขั้นตอนทั้ง 6 ขั้นตอนนี้จะนำไปพัฒนาขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการคำนวณต่อไป

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Driesen, Deliege, Belmans, and Hameyer (2000) ได้ดำเนินการศึกษาและจำลองผลของสนามแม่เหล็กและความร้อนของหม้อแปลงในสภาวะจ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์แบบ 2มิติและ 3 มิติ ในการคำนวณสนามแม่เหล็กจะคำนวณเป็นแบบความถี่เดียว (time harmonic) โดยคำนวณทั้งสถานะคงตัวและสถานะชั่วครู่ [1]

Preis, Biro, Buchgraber, and Ticar (2006) ได้ใช้วิธีไฟไนท์อิลิเมนท์จำลองผลและศึกษาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งวิธีนี้ผู้วิจัยยังได้กล่าวถึง ปัจจัยที่มีผลต่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและความร้อนในหม้อแปลงไฟฟ้าอันได้แก่ความซาบซึมแม่เหล็กและค่าความนำไฟฟ้า [2]

Elmoudi , Lehtonen ,and Nordmanได้ศึกษาและพัฒนาโปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนท์แบบ 3 มิติ เพื่อคำนวณหาสนามแม่เหล็กและเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณขดลวดของหม้อแปลง เมื่อเกิดการลัดวงจร และนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรม[3]

Tsili, Amoiralis, Kladas, and Souflarisได้ดำเนินการศึกษาความสัมพันธ์ของกระแสที่มีผลต่อสนามแม่เหล็กที่ทำให้เกิดความร้อนและกำลังงานสูญเสียในบริเวณแกนเหล็ก ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้วิธีไฟไนท์อิลิเมนท์แบบ 3 มิติในการแก้ปัญหา

งานวิจัยของ Azevedo, Rezende, Delaiba, Oliveira, Carvalho and Bronzeado (2006)ได้ศึกษาการเกิดความผิดพร่องภายในหม้อแปลงโดยใช้วิธีไฟไนท์อิลิเมนท์[5]ในการศึกษาและวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้จะจำลองผลสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงจำหน่ายในสภาวะที่สภาวะปกติและสภาวะที่เกิดความผิดพร่อง