

บทที่ 4

โปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

4.1 บทนำ

การจำลองผลเพื่อคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กและขนาดของการสั่นสะเทือนของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดเล็กพิกัด 3 แรงม้า ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้คอมพิวเตอร์ Intel CORE™ i5 2.3 GHz, 4 GB SD-RAM สำหรับประมวลผล โดยได้ประดิษฐ์ไฟไนท์อีลิเมนต์ขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB บนรากฐานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กและสมการการเคลื่อนที่ที่ถูกต้อง โดยรับค่าอินพุตซึ่งเป็นคุณลักษณะของจุดต่อและอีลิเมนต์จากการสร้างกริดอัตโนมัติโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปชื่อ Solid Work การจำลองผลนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงการกระจายตัวของฟลักซ์แม่เหล็ก ณ ตำแหน่งต่างๆ ในแต่ละปริมาตรของมอเตอร์เมื่อโรเตอร์หมุนไป และวิเคราะห์ถึงขนาดของการสั่นสะเทือนในมอเตอร์ ดังนั้นในบทที่ 4 นี้ จึงได้กล่าวถึงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของมอเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผล และอธิบายถึงโครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็ก และโปรแกรมคำนวณการสั่นสะเทือนในมอเตอร์

4.2 พารามิเตอร์ของมอเตอร์

การจำลองผลสนามแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ในบทนี้ ได้พิจารณามอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดเล็กพิกัด 3 แรงม้า โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทั้งทางไฟฟ้าและทางกลของมอเตอร์ได้รับการรวบรวมไว้ในตารางที่ 4.1 ส่วนรายละเอียดและมิติต่างๆ ของมอเตอร์ ร่องสเตเตอร์และโรเตอร์ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.1, 4.2, และ 4.3 ตามลำดับ

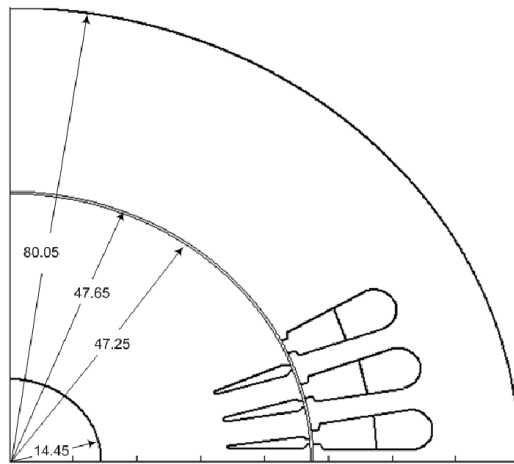
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้า

พารามิเตอร์	ค่า
กำลังงานขาออก	3 HP
แรงดันแหล่งจ่าย	380 V (ต่อแบบสตาร์)
จำนวนขั้ว	4 P
ความถี่แหล่งจ่าย	50 Hz
ความเร็วพิกัด	1455 rpm

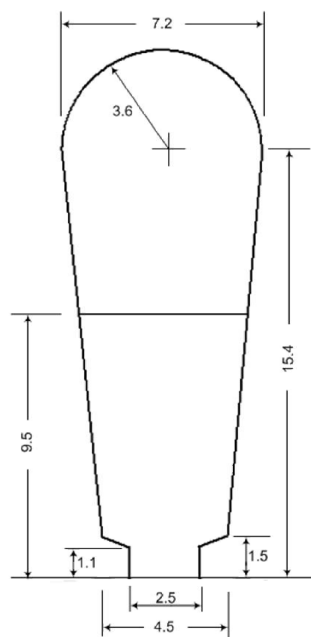
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้า (ต่อ)

พารามิเตอร์	ค่า
ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์	$1.11 \Omega/\phi$
ความต้านทานของขดลวดโรเตอร์	$0.47 \Omega/\phi$
รีแอคแตนซ์ของขดลวดสเตเตอร์	$1.05 \Omega/\phi$
รีแอคแตนซ์ของขดลวดโรเตอร์	$1.05 \Omega/\phi$
รีแอคแตนซ์ที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก	$22.09 \Omega/\phi$
โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์	0.089 Kg.m^2
โมดูลัสของแกนสเตเตอร์	$1.2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
โมดูลัสของเฟรม (อลูมิเนียม)	$7.1 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$
ความหนาแน่นมวลของแกนสเตเตอร์	$7.8 \times 10^3 \text{ N/m}^3$
ความหนาแน่นมวลของเฟรม	$0.9 \times 10^3 \text{ N/m}^3$
อัตราส่วนของปัวซอง	0.25
ชนิดการพันของขดลวดสเตเตอร์	แบบสองชั้น
จำนวนร่องของสเตเตอร์	36 ร่อง
จำนวนร่องของโรเตอร์	44 ร่อง
ความกว้างช่องอากาศ	0.4 mm
ระยะพิทช์	7/9
จำนวนรอบการพัน/ขดลวด	15 รอบ
เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดสเตเตอร์	1.8 mm
สภาพการนำไฟฟ้าของแท่งตัวนำโรเตอร์	$4.9 \times 10^7 \Omega^{-1}/\text{m}$
ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์	$1.11 \Omega/\phi$
ความต้านทานของขดลวดโรเตอร์	$0.47 \Omega/\phi$

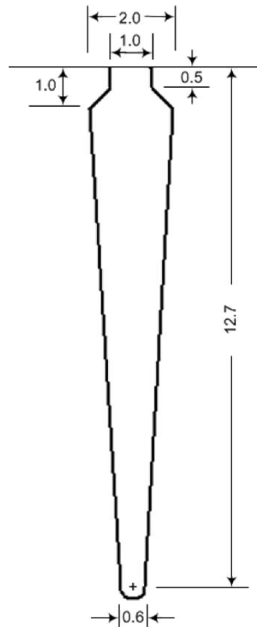
หมายเหตุ แหล่งที่มาของพารามิเตอร์เหล่านี้ได้จากการรวบรวมข้อมูลจากหนังสือและบทความทางวิชาการจำนวนมาก ที่มีการดำเนินงานกับมอเตอร์ขนาดพิกัดใกล้เคียงกันกับงานวิจัยนี้ เพื่อให้ได้มาซึ่งค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่สมบูรณ์และเพียงพอต่อการจำลองผล



รูปที่ 4.1 ภาคตัดส่วนหนึ่งของมอเตอร์เหนี่ยวนำและมิติ (mm)



รูปที่ 4.2 ภาคตัดของร่องสเตเตอร์และมิติ (mm)



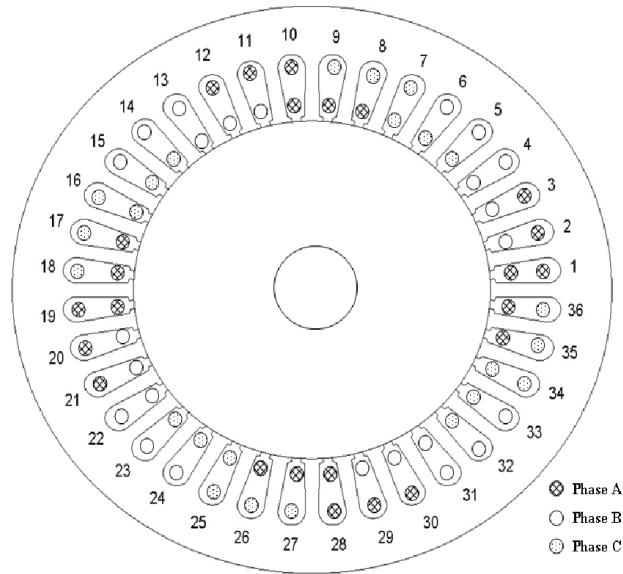
รูปที่ 4.3 ภาควัดของร็องโรเตอร์และมิติ (mm)

ลักษณะการพันของขดลวดสเตเตอร์ทั้งสามเฟส (A , B และ C) แสดงไว้ในรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นการพันแบบสองชั้น มีระยะพิต 7/9 ร็อง กระแสในแต่ละเฟสที่ไหลอยู่ในขดลวดที่พันอยู่ในแต่ละร็องของสเตเตอร์เปลี่ยนแปลงเป็นฟังก์ชันของเวลาโดยจะขึ้นอยู่กับขนาดของแหล่งจ่าย และค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เมื่อทราบกระแส I ในแต่ละเฟสจึงสามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกระแสภายนอก J_0 ที่ป้อนเป็นอินพุตให้แก่โปรแกรมไฟในทอลิเมนที่ได้ตั้งสมการที่ (4.1) โดยรายละเอียดการคำนวณค่าของกระแสที่จ่ายให้แก่มอเตอร์ จะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

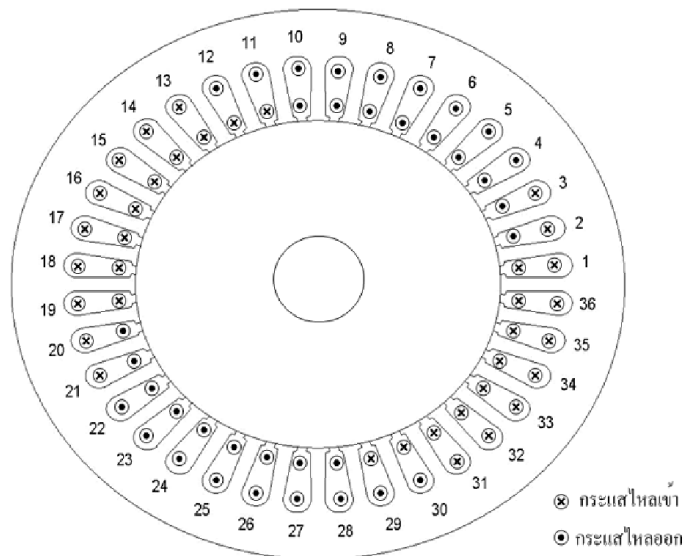
$$J_0 = \frac{n \cdot I}{a_l} \quad (4.1)$$

เมื่อ n คือจำนวนรอบการพันของขดลวด และ a_l คือพื้นที่หน้าตัดของขดลวด โดยการป้อนค่า J_0 ให้แก่โปรแกรมจะต้องคำนึงถึงทิศทางกระแสด้วย ดังแสดงด้วยรูปที่ 4.5 ซึ่งเป็นการแสดงทิศทางกระแสไหลของกระแสในแต่ละเฟส ณ เวลาขณะหนึ่ง กรณีที่พิจารณามอเตอร์ใน 2 มิติ (ระนาบ xy) J_0 จะมีทิศทางวิ่งเข้าหรือวิ่งออกจากหน้ากระดาษ ซึ่งในการคำนวณจะกำหนดให้

กระแสที่มีทิศทางวิ่งเข้ากระดามีเครื่องหมายบวก และกระแสที่มีทิศทางวิ่งออกกระดามีเครื่องหมายลบ สำหรับการคำนวณแล้วสามารถจัดได้โดยง่ายเพราะกระแสในแต่ละจังหวะเวลาหนึ่งๆ จะประกอบด้วยค่ากระแสที่มีค่าเป็นบวก, ลบ และศูนย์ ดังนั้นในแต่ละจังหวะที่มอเตอร์หมุน จะมีทั้งกระแสไหลเข้า, ออก และ ไม่มีกระแสไหลตามลำดับ



รูปที่ 4.4 การพันขดลวดสเตเตอร์ของกระแสไฟ 3 เฟสใน 36 ร่อง



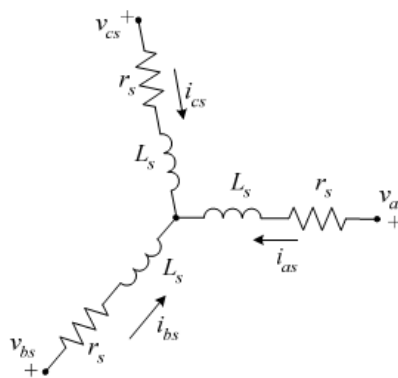
รูปที่ 4.5 ทิศทางการไหลของกระแส ณ เวลาขณะหนึ่ง

4.3 การคำนวณกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

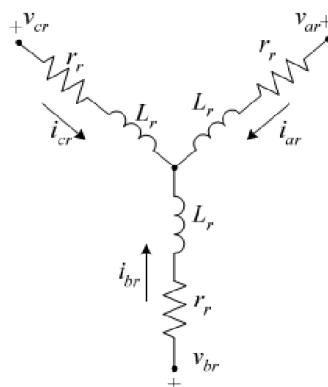
การคำนวณกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจะต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมทางไฟฟ้าและพฤติกรรมทางกลของมอเตอร์ ดังรายละเอียดที่อธิบายต่อไปนี้

4.3.1 แบบจำลองทางไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส มีรูปแบบเป็นอิมพีแดนซ์ (RL อนุกรม) ต่อแบบวาย อิมพีแดนซ์แต่ละกิ่งเป็นสิ่งแทนแกนขดลวดสเตเตอร์ และเป็นการต่ออิมพีแดนซ์แบบสามเฟสสมดุลที่ให้อยู่กับที่ ดังแสดงด้วยรูปที่ 4.6 ส่วนขดลวดโรเตอร์ดังแสดงด้วยรูปที่ 4.7 มีลักษณะคล้ายกับขดลวดสเตเตอร์ทุกประการ ยกเว้นแต่ไม่ได้ถูกยึดอยู่กับที่ จึงพิจารณาได้ว่าขดลวดโรเตอร์สามารถหมุนเคลื่อนที่ไปที่มุมต่างๆ



รูปที่ 4.6 ขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส



รูปที่ 4.7 ขดลวดโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

โดยที่ v_{as}, v_{ar} คือ แรงดันของเฟส a ของขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ตามลำดับ (V)

v_{bs}, v_{br} คือ แรงดันของเฟส b ของขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ตามลำดับ (V)

v_{cs}, v_{cr} คือ แรงดันของเฟส c ของขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ตามลำดับ (V)

i_{as}, i_{ar} คือ แรงดันของเฟส a ของขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ตามลำดับ (A)

i_{bs}, i_{br} คือ แรงดันของเฟส b ของขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ตามลำดับ (A)

i_{cs}, i_{cr} คือ แรงดันของเฟส c ของขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ตามลำดับ (A)

เมื่อพิจารณาแบบจำลองทางไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยคิดเทียบมาทางด้านสเตเตอร์ เราอาจเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ทางไฟฟ้าในขดลวดสเตเตอร์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = r_s \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{as} \\ \lambda_{bs} \\ \lambda_{cs} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

โดยที่ $\lambda_{as}, \lambda_{bs}$ และ λ_{cs} คือฟลักซ์เชื่อมโยง (flux linkage) ที่ขดลวดสเตเตอร์ในเฟส a, b และ c ตามลำดับ และเขียนแสดงฟลักซ์เชื่อมโยงดังกล่าวในรูปความสัมพันธ์กับกระแสต่างๆ ได้ว่า

$$\begin{bmatrix} \lambda_{as} \\ \lambda_{bs} \\ \lambda_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_s + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_s + L_{ms} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} +$$

$$L_{ms} \begin{bmatrix} \cos(\theta_R) & \cos(\theta_R + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_R - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_R - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_R) & \cos(\theta_R + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_R + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_R - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_R) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i'_{ar} \\ i'_{br} \\ i'_{cr} \end{bmatrix}$$

โดย $L_{ms} = \frac{2}{3}L_m$ เมื่อ L_m คือค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก, θ_R คือมุมของโรเตอร์คิดเทียบกับแกนของขดลวดสเตเตอร์ที่เฟส a และ ' เป็นสัญลักษณ์เพื่อสื่อให้ทราบว่าคิดเทียบมา

ทางด้านสเตเตอร์แล้ว ในทำนองเดียวกัน ความสัมพันธ์ทางไฟฟ้าในขดลวดโรเตอร์ อาจเขียนแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} v'_{ar} \\ v'_{br} \\ v'_{cr} \end{bmatrix} = r'_r \begin{bmatrix} i'_{ar} \\ i'_{br} \\ i'_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda'_{ar} \\ \lambda'_{br} \\ \lambda'_{cr} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

โดยที่

$$\begin{bmatrix} \lambda'_{ar} \\ \lambda'_{br} \\ \lambda'_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L'_r + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L'_r + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L'_r + L_{ms} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i'_{ar} \\ i'_{br} \\ i'_{cr} \end{bmatrix} + L_{ms} \begin{bmatrix} \cos(\theta_R) & \cos(\theta_R - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_R + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_R + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_R) & \cos(\theta_R - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_R - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_R + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_R) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}$$

จากปริภูมิสถานะในสมการที่ (4.2) และ (4.3) จะเขียนให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\frac{d}{dt}[i] = [G]^{-1}[H][i] + [G]^{-1}[v] \quad (4.4)$$

เมื่อ

$$[i] = [i_{as} \quad i_{bs} \quad i_{cs} \quad i'_{ar} \quad i'_{br} \quad i'_{cr}]^T$$

$$[v] = [v_{as} \quad v_{bs} \quad v_{cs} \quad v'_{ar} \quad v'_{br} \quad v'_{cr}]^T$$

โดยที่

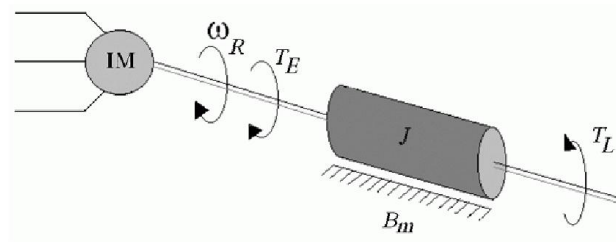
$$[G] = \begin{bmatrix} L_s + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_s + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_s + L_{ms} \\ L_{ms} \cos(\theta_R) & L_{ms} \cos\left(\theta_R - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\theta_R + \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\theta_R + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos(\theta_R) & L_{ms} \cos\left(\theta_R - \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\theta_R - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\theta_R + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos(\theta_R) \\ L_{ms} \cos(\theta_R) & L_{ms} \cos\left(\theta_R + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\theta_R - \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\theta_R - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos(\theta_R) & L_{ms} \cos\left(\theta_R + \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\theta_R + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\theta_R - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos(\theta_R) \\ L'_r + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L'_r + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L'_r + L_{ms} \end{bmatrix}$$

$$[H] = \begin{bmatrix} -r_s & 0 & 0 \\ 0 & -r_s & 0 \\ 0 & 0 & -r_s \\ \omega_R L_{ms} \sin(\theta_R) & \omega_R L_{ms} \sin\left(\theta_R - \frac{2\pi}{3}\right) & \omega_R L_{ms} \sin\left(\theta_R + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \omega_R L_{ms} \sin\left(\theta_R + \frac{2\pi}{3}\right) & \omega_R L_{ms} \sin(\theta_R) & \omega_R L_{ms} \sin\left(\theta_R - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \omega_R L_{ms} \sin\left(\theta_R - \frac{2\pi}{3}\right) & \omega_R L_{ms} \sin\left(\theta_R + \frac{2\pi}{3}\right) & \omega_R L_{ms} \sin(\theta_R) \\ \omega_R L_{ms} \sin(\theta_R) & \omega_R L_{ms} \sin\left(\theta_R + \frac{2\pi}{3}\right) & \omega_R L_{ms} \sin\left(\theta_R - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \omega_R L_{ms} \sin\left(\theta_R - \frac{2\pi}{3}\right) & \omega_R L_{ms} \sin(\theta_R) & \omega_R L_{ms} \sin\left(\theta_R + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \omega_R L_{ms} \sin\left(\theta_R + \frac{2\pi}{3}\right) & \omega_R L_{ms} \sin\left(\theta_R - \frac{2\pi}{3}\right) & \omega_R L_{ms} \sin(\theta_R) \\ -r'_r & 0 & 0 \\ 0 & -r'_r & 0 \\ 0 & 0 & -r'_r \end{bmatrix}$$

ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณามอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดโรเตอร์กรงกระรอก ซึ่งปลายทั้งสองด้านของแท่งตัวนำจะถูกตัดวงจรไว้ ดังนั้นเทอม v'_{ar} , v'_{br} , และ v'_{cr} จะมีค่าเป็นศูนย์

4.3.2 แบบจำลองทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

แบบจำลองทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เมื่อมอเตอร์ขับโหลด สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แบบจำลองทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

โดยที่ ω_R คือ ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ (rad/sec)

J คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ (Kg.m^2)

B_m คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานเชิงความหนืดของมอเตอร์ (N.m/rad/sec)

T_E คือ แรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้น (N.m)

T_L คือ แรงบิดของโหลด (N.m)

สมการการเคลื่อนที่ของโรเตอร์อาจเขียนแสดงได้ดังนี้

$$\frac{d\omega_R}{dt} = \frac{P}{2J} T_E - \frac{B_m}{J} \omega_R - \frac{P}{2J} T_L \quad (4.5)$$

เมื่อ

$$T_E = \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m \cdot \text{Im} \{ i'_{abcr} i_{abcs} e^{-j\theta_R} \}$$

โดยที่

$$i_{abcs} = i_{as} + ai_{bs} + a^2 i_{cs}$$

$$i'_{abcr} = i'_{ar} + ai'_{br} + a^2 i'_{cr}$$

$$a = e^{-j\theta_R}$$

ซึ่ง P คือจำนวนชั่วแม่เหล็กของมอเตอร์ และ Im คือพจน์ของจำนวนจินตภาพ และ

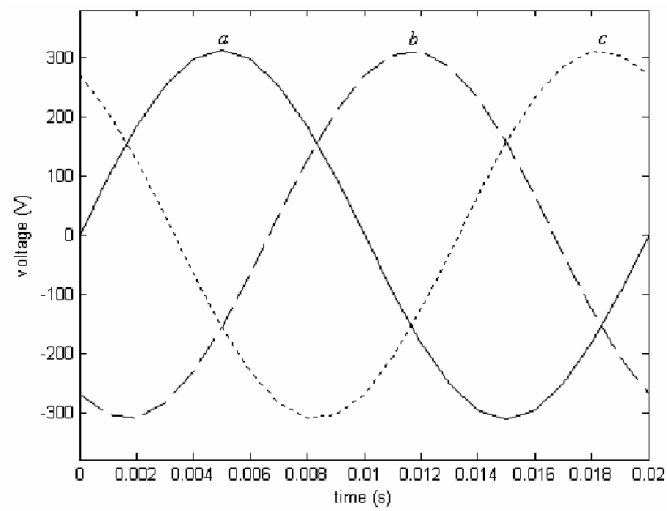
$$\frac{d\theta_R}{dt} = \omega_R \quad (4.6)$$

จากสมการที่ (4.5) และ (4.6) จะเขียนให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

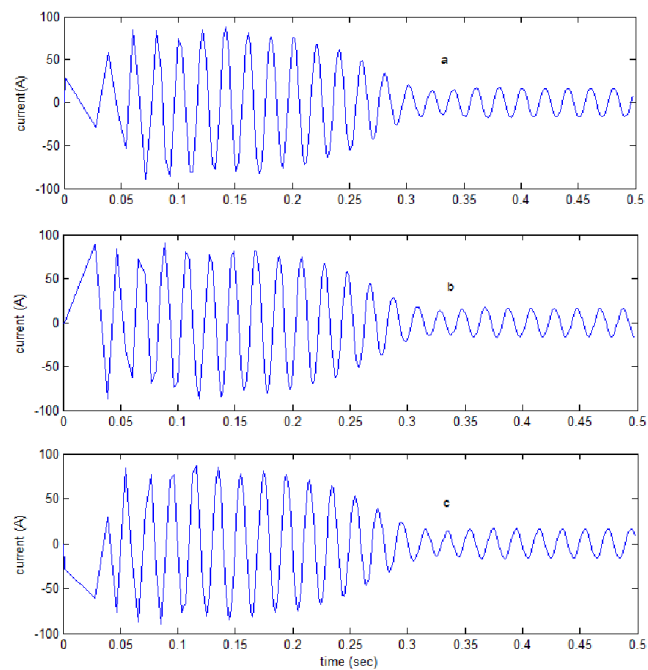
$$\begin{bmatrix} \frac{d\omega_R}{dt} \\ \frac{d\theta_R}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{B_m}{J} & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_R \\ \theta_R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{P}{2J} \\ 0 \end{bmatrix} [T_E - T_L] \quad (4.7)$$

4.3.3 การคำนวณกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

การคำนวณกระแสในแต่ละเฟสจะต้องอาศัยความสัมพันธ์ของสมการแบบจำลองของมอเตอร์ทั้งทางไฟฟ้าและทางกลดังสมการที่ (4.4) และ (4.7) ข้างต้น เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้า กระแสตรงสามเฟสดังแสดงในรูปที่ 4.9 ประกอบกับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังปรากฏในตารางที่ 4.1 จะได้ผลลัพธ์ของกระแสในแต่ละเฟสดังแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นกระแสที่ใช้ในการคำนวณหาค่า J_0 ดังได้กล่าวไว้ข้างต้น

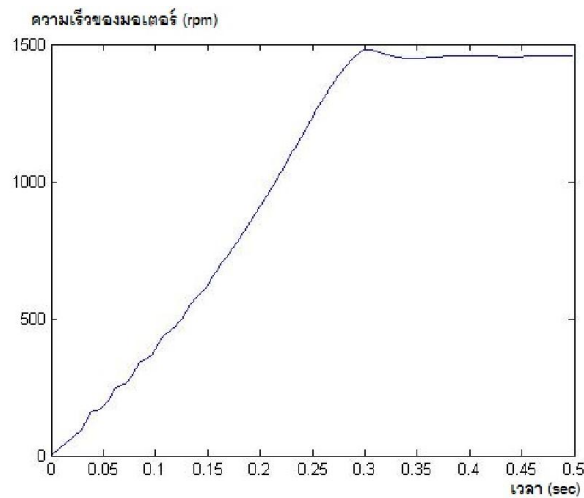


รูปที่ 4.9 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าแต่ละเฟสที่จ่ายให้มอเตอร์

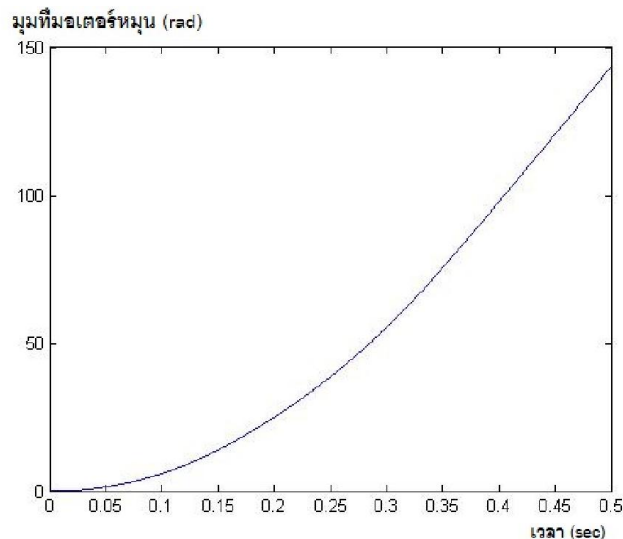


รูปที่ 4.10 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าแต่ละเฟสที่จ่ายให้มอเตอร์

จากสมการที่ (4.4) ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณนอกจากค่า I_a , I_b และ I_c ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาแล้วยังมีความเร็วรอบของมอเตอร์ (N_r) และมุมที่มอเตอร์หมุน (θ) เปลี่ยนแปลงตามเวลาดังแสดงในรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 กราฟความเร็วรอบเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ได้จากการคำนวณ



รูปที่ 4.12 กราฟมุมที่มอเตอร์หมุนเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ได้จากการคำนวณ

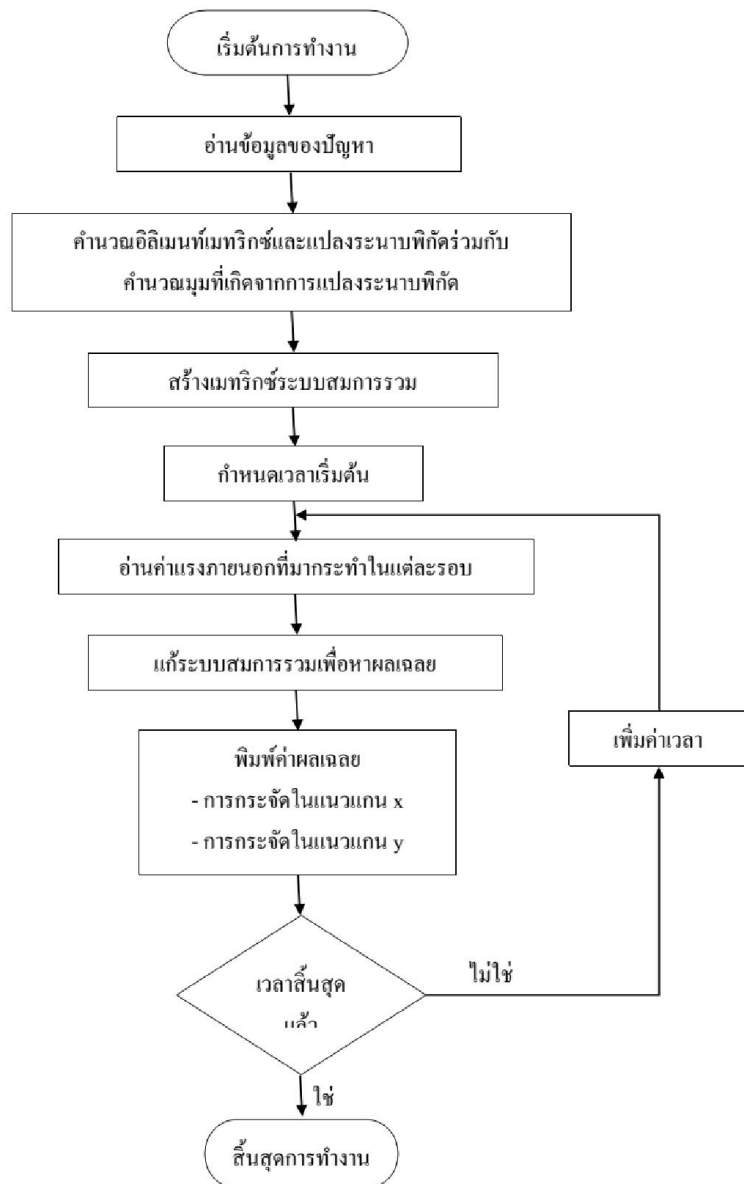
จากรูปที่ 4.11 ค่าความเร็วรอบจะมีค่าเป็นศูนย์ที่เวลาเริ่มต้นและจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและคงที่ที่เวลาประมาณ 0.3 วินาที ด้วยค่าความเร็วรอบประมาณ 1455 *rpm* หรือคำนวณเป็นอัตราเร็วเชิงมุมได้จาก $\omega_r = N(2\pi)/60$ ซึ่งจะมีค่าอัตราเร็วเชิงมุมเท่ากับ 152.43 *rad/sec* จะเห็นได้ว่ามีค่าความเร็วรอบที่ได้จากการคำนวณใกล้เคียงกับค่าความเร็วพิกัดของมอเตอร์ ซึ่งมีความเร็วพิกัดเท่ากับ 1455 *rpm*

4.4 โครงสร้างของโปรแกรมจำลองผล

โปรแกรมจำลองผลเพื่อศึกษาถึงการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก และโปรแกรมจำลองผลเพื่อศึกษาถึงการสั้นสะท้อนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เกิดจากการประดิษฐ์ไฟไนต์อิลิเมนต์ขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นด้วย MATLAB โดยกริดที่สร้างขึ้นเพื่อกำกับคุณลักษณะของจุดต่อและอิลิเมนต์ที่ป้อนให้แก่โปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนต์ เกิดจากการสร้างกริดโดยโปรแกรมสำเร็จรูปชื่อ Solid Work ซึ่งรายละเอียดของโปรแกรมหาดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังนี้

4.4.1 โปรแกรมคำนวณสนามแม่เหล็ก

การคำนวณสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำสำหรับโรเตอร์หมุน เมื่อคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงตามเวลาค่อนข้างคำนวณได้ยาก แต่ปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีสมรรถนะสูงและมีหน่วยความจำขนาดใหญ่ จึงสามารถคำนวณสนามแม่เหล็กด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับคำนวณค่าสนามแม่เหล็กที่ใช้กันอยู่ทั่วไป มีราคาแพง ประมวลผลช้า และไม่มีความคล่องตัวเมื่อพิจารณาถึงกรณีที่โรเตอร์หมุนดังนั้นงานวิจัยนี้จึงประดิษฐ์ไฟไนต์อิลิเมนต์ขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นด้วย MATLAB เพื่อคำนวณค่าสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำ สำหรับโครงสร้างของโปรแกรมคำนวณสนามแม่เหล็กอาจแทนได้ด้วยแผนภูมิในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 แผนภูมิแสดงการทำงานของโปรแกรมคำนวณสนามแม่เหล็ก

จากแผนภูมิในรูปที่ 4.13 ซึ่งแสดงโครงสร้างโปรแกรมจำลองผลของระบบโดยรวมเพื่อให้
เกิดความเข้าใจถึงหน้าที่ของโปรแกรมแต่ละส่วน จะได้อธิบายถึงรายละเอียดหน้าที่ต่างๆเป็น
ขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดเวลาเริ่มต้นและค่าเงื่อนไขเริ่มต้น : โปรแกรมจะเริ่มทำงานด้วยการกำหนดค่าเวลาเริ่มต้น $t = 0$ สำหรับการคำนวณในรอบแรก ซึ่งจำนวนรอบหรือเวลาสิ้นสุดของการคำนวณ จะขึ้นอยู่กับจำนวนหรือเวลาที่ใช้ในการหมุนไปที่มุมต่างๆ ของมอเตอร์ โดยเมื่อมอเตอร์หมุนไปลักษณะของอิลิเมนต์และจุดต่อจะแปรเปลี่ยนตามมุมที่หมุนไปด้วย โดยโปรแกรมยังมีหน้าที่ในการกำหนดค่าเงื่อนไขเริ่มต้น โดยงานวิจัยนี้มีค่าเงื่อนไขเริ่มต้นในรอบแรกคือการให้ค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กเป็นศูนย์ $A(t=0)=0$ ส่วนการหมุนรอบถัดไปจะใช้คำตอบจากรอบที่ผ่านมาเป็นค่าเงื่อนไขเริ่มต้น ทั้งนี้เพื่อให้การหาคำตอบที่ถูกต้องดำเนินการได้รวดเร็ว

ขั้นตอนที่ 2 อ่านข้อมูลของปัญหาในแต่ละรอบ : จากนั้นโปรแกรมจะรับค่าข้อมูลอินพุตซึ่งแสดงถึงลักษณะของอิลิเมนต์และจุดต่อ จากเอาต์พุตไฟล์ที่เกิดจากการสร้างกริดของโปรแกรมสำเร็จรูปชื่อ Solid Work ที่ ซึ่งรายละเอียดในไฟล์ประกอบด้วยจำนวนและตำแหน่งของจุดต่อ หมายเลขของจุดต่อที่ประกอบขึ้นเป็นอิลิเมนต์ จำนวนและหมายเลขของอิลิเมนต์เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณอิลิเมนต์เมทริกซ์ : ขั้นตอนนี้โปรแกรมจะใช้การคำนวณอิลิเมนต์เมทริกซ์รูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสของทุกๆ อิลิเมนต์ ดังแสดงด้วยสมการที่ (2.41) จากบทที่ผ่านมา หรือนำมาแสดงใหม่ในบทนี้ดังสมการที่ (4.8) โดยที่ $\{A\}_{4 \times 1}^{t+\Delta t}$ คือเวกเตอร์คำตอบของสมการที่ทำการคำนวณในแต่ละรอบ

$$\left(\frac{1}{\Delta t} [M]_{4 \times 4} + [K]_{4 \times 4} \right) \{A\}_{4 \times 1}^{t+\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} [M]_{4 \times 4} \{A\}_{4 \times 1}^t + \{F\}_{4 \times 1}^{t+\Delta t} \quad (4.8)$$

สมการที่ (4.8) นี้ จะต้องอาศัยความสัมพันธ์ของอิลิเมนต์เมทริกซ์การนำทางไฟฟ้า $[M]_{4 \times 4}$ ดังแสดงด้วยสมการที่ (2.30) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (4.9) อิลิเมนต์เมทริกซ์ความซาบซึมได้ของแม่เหล็ก $[K]_{4 \times 4}$ ดังแสดงด้วยสมการที่ (2.34) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (4.10) และโหลดเวกเตอร์กระแสที่ผลิตขึ้นเอง $\{F\}_{4 \times 1}^{t+\Delta t}$ ซึ่งยกกำลัง $t + \Delta t$ หมายถึงโหลดเวกเตอร์กระแสที่ผลิตขึ้นเอง ณ เวลาเดียวกับที่ต้องการคำนวณหาคำตอบ ดังแสดงด้วยสมการที่ (2.37) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (4.11) เมทริกซ์เหล่านี้จะถูกคำนวณทีละอิลิเมนต์ เพื่อนำไปสร้างเป็นระบบเมทริกซ์สมการรวม

$$[M]_{4 \times 4} = \frac{s\sigma V}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$$[K]_{4 \times 4} = \frac{1}{36\mu V} \begin{bmatrix} b_1b_1 + c_1c_1 + d_1d_1 & b_1b_2 + c_1c_2 + d_1d_2 & b_1b_3 + c_1c_3 + d_1d_3 & b_1b_4 + c_1c_4 + d_1d_4 \\ & b_2b_2 + c_2c_2 + d_2d_2 & b_2b_3 + c_2c_3 + d_2d_3 & b_2b_4 + c_2c_4 + d_2d_4 \\ & & b_3b_3 + c_3c_3 + d_3d_3 & b_3b_4 + c_3c_4 + d_3d_4 \\ \text{Sym} & & & b_4b_4 + c_4c_4 + d_4d_4 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$\{F\}_{4 \times 1} = \frac{\mathbf{J}_0 V}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

ขั้นตอนที่ 4 สร้างเมทริกซ์ระบบสมการรวม : โปรแกรมจะทำหน้าที่รวมอิลิเมนต์เมทริกซ์ย่อยๆ เข้าเป็นเมทริกซ์ใหญ่ของระบบสมการรวมดังแสดงด้วยสมการที่ (2.42) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (4.12) โดยมีหลักการคือ หาหมายเลขจุดต่อที่แท้จริงของอิลิเมนต์ที่พิจารณาอยู่ แล้วใส่ค่าสัมประสิทธิ์ของอิลิเมนต์เมทริกซ์นั้นลงในเมทริกซ์ใหญ่ของระบบสมการรวมให้ถูกต้อง ซึ่งหากแบ่งลักษณะของปัญหาออกเป็นอิลิเมนต์ย่อย n จุดต่อ จึงก่อให้เกิดระบบสมการรวมซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยทั้งสิ้น n สมการ

$$[J]_{n \times n} [A]_{n \times 1} = [f]_{n \times 1} \quad (4.12)$$

ขั้นตอนที่ 5 กำหนดเงื่อนไขขอบเขต : โปรแกรมจะทำหน้าที่ประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตก่อนทำการแก้ระบบสมการรวม โดยมีหลักการคือ คัดแปลงระบบสมการรวมตามสมการที่ (4.12) ให้สอดคล้องกับค่าเงื่อนไขขอบเขต โดยงานวิจัยนี้จะกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขตให้ขอบในติดกับเพลลาและขอบนอกของมอเตอร์มีค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กเป็นศูนย์ ($A = 0$)

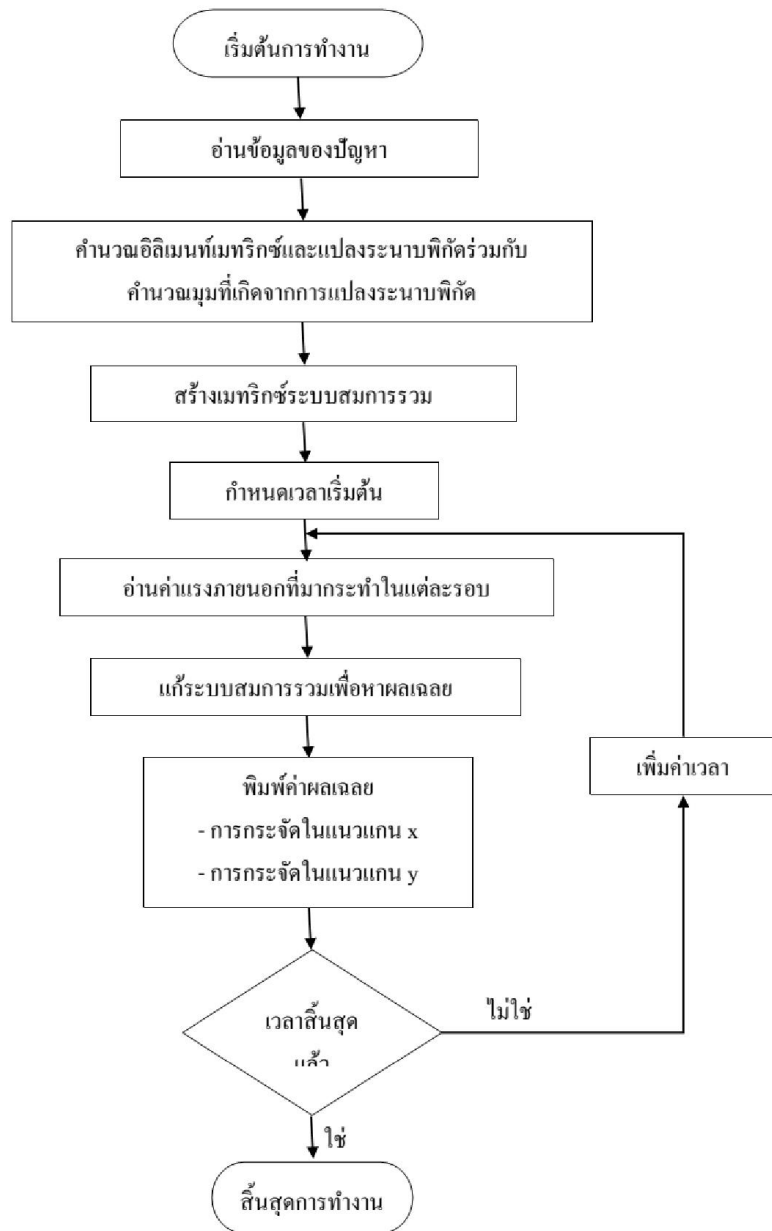
ขั้นตอนที่ 6 แก้ระบบสมการรวมเพื่อหาค่าผลเฉลย : โปรแกรมจะทำหน้าที่แก้สมการเชิงเส้นดังสมการที่ (4.12) เพื่อหาค่าผลเฉลยของระบบสมการรวม

ขั้นตอนที่ 7 พิมพ์ค่าผลเฉลย : จากนั้นโปรแกรมจะพิมพ์ค่าผลเฉลยออกมาเป็นกราฟแสดงขนาดซึ่งจะประกอบด้วยค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ค่าสนามแม่เหล็ก และแรงแม่เหล็ก

ขั้นตอนที่ 8 เวลาสิ้นสุดแล้ว : ขั้นตอนนี้โปรแกรมจะพิจารณาถึงการคำนวณค่าในรอบถัดไป ถ้าหากเวลาที่กำหนดในการคำนวณยังไม่สิ้นสุดโปรแกรมก็จะย้อนกลับไปขั้นตอนที่ 2 อ่านข้อมูลของปัญหาในแต่ละรอบ และกระทำซ้ำตามขั้นตอนที่ 2 ถึงขั้นตอนที่ 8 ดังเดิม แต่ถ้าหากสิ้นสุดเวลาที่กำหนดให้โปรแกรมก็จะหยุดการคำนวณ เป็นอันจบการทำงานของโปรแกรม

4.4.2 โปรแกรมคำนวณการสั่นสะเทือน

การคำนวณขนาดของการสั่นสะเทือนสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ โรเตอร์หมุนที่แสดงอยู่ในรูปของการกระจัดที่ผิวด้านไปจากรูปร่างดั้งเดิมของมอเตอร์ก่อนที่จะไม่มีแรงภายนอกมากระทำค่อนข้างดำเนินการได้ยาก เนื่องจากผลลัพธ์ของการกระจัดอย่างละเอียดที่ครอบคลุมตลอดทั้งพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ต้องอาศัยการคำนวณที่มีความซับซ้อนสูง ปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีสมรรถนะสูงและมีหน่วยความจำขนาดใหญ่ จึงสามารถคำนวณการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ในทุกๆ ตำแหน่งด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงประดิษฐ์ไฟไนต์อีลิเมนต์ขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นด้วย MATLAB เพื่อคำนวณขนาดของการสั่นสะเทือนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งลำดับการทำงานของโปรแกรมคำนวณการสั่นสะเทือน สามารถแทนได้ด้วยแผนภูมิดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 แผนภูมิแสดงการทำงานของโปรแกรมคำนวณการสั่นสะเทือน

จากแผนภูมิดังรูปที่ 4.14 อาจเข้าใจได้ถึงลำดับการทำงานของโปรแกรม โดยโปรแกรมจะทำงานเป็นขั้นตอนและมีหน้าที่ต่างกันไป ซึ่งจะอธิบายการทำงานของโปรแกรมได้ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 อ่านข้อมูลของปัญหา : ขั้นตอนนี้โปรแกรมทำหน้าที่รับค่าข้อมูลต่างๆ ได้แก่ จำนวนและตำแหน่งของจุดต่อ หมายเลขของจุดต่อที่ประกอบขึ้นเป็นอิลิเมนต์ จำนวนและหมายเลขของอิลิเมนต์ และค่าพารามิเตอร์ทางวัสดุต่างๆ เช่น แกนสแตเตอร์และโครงสแตเตอร์ของมอเตอร์เป็นต้น ดังแสดงด้วยรูปที่ 3.1 ในบทที่ 3 ซึ่งเป็นข้อมูลอินพุตที่เรียกใช้ตอนเริ่มต้นของโปรแกรมเพียงครั้งเดียว เนื่องจากเมื่อพิจารณาการสันสะเทือนจะพิจารณาในส่วนของแกนสแตเตอร์และโครงสแตเตอร์เท่านั้น ซึ่งจะไม่ปรากฏการเปลี่ยนแปลงใดๆ เลยเมื่อโรเตอร์หมุนไป

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณอิลิเมนต์เมทริกซ์และแปลงระนาบพิกัดร่วมกับคำนวณมุมที่เกิดจากการแปลงระนาบพิกัด : จากนั้นโปรแกรมจะคำนวณอิลิเมนต์เมทริกซ์รูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสของทุกๆ อิลิเมนต์ โดยมีสมการไฟไนท์อิลิเมนต์ซึ่งเป็นสมการการเคลื่อนที่แสดงได้ด้วยสมการที่ (3.1) จากบทที่ผ่านมา หรือนำมาแสดงใหม่ในบทนี้ดังสมการที่ (4.13)

$$[M]_{12 \times 12} \frac{\partial^2 \{x\}_{12 \times 1}}{\partial t^2} + [D]_{12 \times 12} \frac{\partial \{x\}_{12 \times 1}}{\partial t} + [K]_{12 \times 12} \{x\}_{12 \times 1} = \{F\}_{12 \times 1} \quad (4.13)$$

สมการที่ (4.13) นี้ จะต้องอาศัยความสัมพันธ์ของอิลิเมนต์เมทริกซ์มวล $[M]_{12 \times 12}$ ดังแสดงด้วยสมการที่ (3.32) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (4.14) อิลิเมนต์เมทริกซ์ความแข็งของสปริง $[K]_{12 \times 12}$ ดังแสดงด้วยสมการที่ (3.18) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (4.15) โดยจะไม่พิจารณาถึงอิลิเมนต์เมทริกซ์ความหน่วง $[D]_{12 \times 12}$

$$[M] = [R]^T [\tilde{M}] [R] \quad (4.14)$$

$$[K] = [R]^T [\tilde{K}] [R] \quad (4.15)$$

โดยที่เมทริกซ์ $[R]$ คือค่าที่ใช้สำหรับถ่ายโอนจากระนาบพิกัดเฉพาะถิ่นสู่ระนาบพิกัดวงกว้างดังแสดงด้วยสมการที่ (3.19) ของบทที่ 3 หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (4.16) ส่วน $[\tilde{M}]$ และ $[\tilde{K}]$ คือเมทริกซ์มวลและเมทริกซ์ความแข็งของสปริงในระนาบพิกัดเฉพาะถิ่นดังแสดงด้วยสมการที่ (3.31) และ (3.17) ของบทที่ 3 ตามลำดับ หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (4.17) และสมการที่ (4.18) ตามลำดับ ซึ่งโดยโปรแกรมจะทำหน้าที่ในการแปลงระนาบพิกัดวงกว้างไปเป็นระนาบพิกัด

เฉพาะถิ่นและแปลงกลับไปเป็นระนาบพิกัดวงกว้างตามเดิม เพื่อนำไปสร้างเป็นระบบเมทริกซ์
สมการรวม

$$[R] = \begin{bmatrix} \cos(\tilde{x}, x) & \cos(\tilde{x}, y) & \cos(\tilde{x}, z) & 0 & 0 & 0 \\ \cos(\tilde{y}, x) & \cos(\tilde{y}, y) & \cos(\tilde{y}, z) & 0 & 0 & 0 \\ \cos(\tilde{z}, x) & \cos(\tilde{z}, y) & \cos(\tilde{z}, z) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cos(\tilde{x}, y) & \cos(\tilde{x}, z) \\ 0 & 0 & 0 & \cos(\tilde{y}, x) & \cos(\tilde{y}, y) & \cos(\tilde{y}, z) \\ 0 & 0 & 0 & \cos(\tilde{z}, x) & \cos(\tilde{z}, y) & \cos(\tilde{z}, z) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \cos(\tilde{x}, x) & \cos(\tilde{x}, y) & \cos(\tilde{x}, z) & 0 & 0 & 0 \\ \cos(\tilde{y}, x) & \cos(\tilde{y}, y) & \cos(\tilde{y}, z) & 0 & 0 & 0 \\ \cos(\tilde{z}, x) & \cos(\tilde{z}, y) & \cos(\tilde{z}, z) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos(\tilde{x}, x) & \cos(\tilde{x}, y) & \cos(\tilde{x}, z) \\ 0 & 0 & 0 & \cos(\tilde{y}, x) & \cos(\tilde{y}, y) & \cos(\tilde{y}, z) \\ 0 & 0 & 0 & \cos(\tilde{z}, x) & \cos(\tilde{z}, y) & \cos(\tilde{z}, z) \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

$$[\tilde{M}] = \frac{\rho V_e}{20} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

$$[\tilde{K}] = [\tilde{B}]^T [\tilde{D}][\tilde{B}]V \quad (4.18)$$

สำหรับรายละเอียดต่างๆในสมการที่ (4.16), (4.17) และ (4.18) สามารถศึกษาได้จากหัวข้อ 3.2.2 ฟังก์ชันการประมาณภายในและสมการของอีลิเมนต์ ในบทที่ 3

ขั้นตอนที่ 3 สร้างเมทริกซ์ระบบสมการรวม : จากนั้นโปรแกรมจะทำหน้าที่รวมอีลิเมนต์เมทริกซ์ย่อยๆ ที่คำนวณได้จากโปรแกรมเข้าเป็นเมทริกซ์ใหญ่ของระบบสมการรวม ดังแสดงด้วยสมการที่ (3.33) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (4.19) โดยหากแบ่งลักษณะของปัญหาออกเป็นอีลิเมนต์ย่อย n จุดต่อ จึงก่อให้เกิดระบบสมการรวมสำหรับการเคลื่อนที่ของระบบ ซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยทั้งสิ้น $3n$ สมการ ทั้งนี้เนื่องจากพิจารณาการกระจัดทั้งแนวแกน x y และ z

$$[M]_{3n \times 3n} \frac{\partial^2 \{x\}_{3n \times 1}}{\partial t^2} + [D]_{3n \times 3n} \frac{\partial \{x\}_{3n \times 1}}{\partial t} + [K]_{3n \times 3n} \{x\}_{3n \times 1} = \{F\}_{3n \times 1} \quad (4.19)$$

ขั้นตอนที่ 4 กำหนดเวลาเริ่มต้น : จากนั้นโปรแกรมจะกำหนดแรงเริ่มต้น $F(t=0)=0$ แล้วทำการคำนวณค่าผลลัพธ์ของการกระจัดทั้งแนวแกน x y และ z ซึ่งจะเป็นค่าเงื่อนไขเริ่มต้นในการคำนวณต่อไป

ขั้นตอนที่ 5 อ่านค่าแรงภายนอกที่มากระทำในแต่ละรอบ : โปรแกรมจะรับแรงที่ได้จากการคำนวณในเวลาเดียวกันกับที่จะคำนวณการสั่นในรอบนั้นๆ

ขั้นตอนที่ 6 แก่ระบบสมการรวมเพื่อหาผลเฉลย : จากนั้นโปรแกรมจะทำหน้าที่แก้สมการการเคลื่อนที่ในรูปของสมการสามัญอันดับสองเพื่อหาค่าผลเฉลยของระบบสมการรวมดังสมการที่ (4.19) โดยเลือกใช้วิธีผลต่างกลาง ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.3 ในบทที่ 3 การแก้ระบบสมการเชิงเส้นตามสมการที่ (3.37), (3.38) และ (3.39) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (4.20), (4.21) และ (4.22) ตามลำดับ

$$[M_{eff}]\{x\}^{t+\Delta t} = \{F_{eff}\} \quad (4.20)$$

โดยที่

$$[M_{eff}] = \left[\frac{1}{\Delta t^2} [M] + \frac{1}{2\Delta t} [D] \right] \quad (4.21)$$

$$\{F_{eff}\} = \{F\}^t - \left[[K] - \frac{2}{\Delta t^2} [M] \right] \{x\}^t - \left[\frac{1}{\Delta t^2} [M] - \frac{1}{2\Delta t} [D] \right] \{x\}^{t-\Delta t} \quad (4.22)$$

ขั้นตอนที่ 7 พิมพ์ค่าผลเฉลย : จากนั้นจะพิมพ์ค่าผลเฉลยที่ต้องการออกมา ซึ่งประกอบด้วยค่าการกระจัดในแนวแกน x y และ z ที่เปลี่ยนแปลงไปจากตำแหน่งดั้งเดิมของทุกๆ จุดต่อ

ขั้นตอนที่ 8 เวลาสิ้นสุดแล้ว : ขั้นตอนนี้โปรแกรมจะพิจารณาถึงการคำนวณค่าในรอบถัดไป ถ้าหากเวลาที่กำหนดในการคำนวณยังไม่สิ้นสุดโปรแกรมก็จะย้อนกลับไปขั้นตอนที่ 5 อ่านค่าแรงภายนอกที่มากระทำในแต่ละรอบ และกระทำซ้ำตามขั้นตอนที่ 5 ถึงขั้นตอนที่ 8 ดังเดิม แต่ถ้าหากสิ้นสุดเวลาที่กำหนดให้โปรแกรมก็จะหยุดการคำนวณ เป็นอันจบการทำงานของโปรแกรม

4.5 สรุป

การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เมื่อพิจารณาปัญหาในสถานะชั่วคราวก่อนข้างดำเนินการได้ยากและมีความซับซ้อน การทำความเข้าใจอย่างละเอียดและลึกซึ้งต่อค่าสนามแม่เหล็กและขนาดของการสั่นสะเทือนที่แปรเปลี่ยนไปในขณะที่โรเตอร์หมุน จึงยากเกินกว่าที่จะนึกหรือจินตนาการได้ เป็นเหตุให้ต้องพึ่งพาเทคนิคการจำลองผลระบบด้วยคอมพิวเตอร์ดังที่บทที่ 4 ได้นำเสนอไว้ โปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนใน

บทนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นด้วย MATLAB โดยมีโครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็ก และโปรแกรมจำลองผลการสั่นสะเทือนดังที่อธิบายด้วยแผนภูมิในรูปที่ 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ โปรแกรมดังกล่าวจะรับค่าอินพุตซึ่งแสดงตำแหน่งของอิลิเมนต์และจุดต่อจากโปรแกรมสำเร็จรูป ชื่อ Solid Work และจะส่งค่าผลลัพธ์ที่ได้ให้โปรแกรม MATLAB เพื่อการคำนวณและแสดงผลในรูปแบบกราฟฟิก