

การสร้างแบบจำลองสนามแม่เหล็กของมอเตอร์แม่เหล็กถาวรแบบฟลักซ์ตามแนวแกน
โดยใช้วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ

Magnetic Field Modeling of Axial Flux Permanent Magnet Motor
Using 3D Finite Element Method

อารักษ์ บุญมาตย์*, ธนัญญา สิมมา และ พงษ์พิสิฐ สายคำ

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000

*Corresponding Author: arak.bu@rmuti.ac.th, 080-1647600

Received 27 April 2025; Received in revised form 28 May 2025; Accepted 2 June 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของตำแหน่งการติดตั้งแม่เหล็กถาวรต่อการกระจายสนามแม่เหล็กและลักษณะแรงบิดในมอเตอร์แกนฟลักซ์ โดยใช้เครื่องมือจำลองเชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์สามมิติ (3D-FEM) ที่พัฒนาขึ้นเอง รูปแบบที่วิเคราะห์ประกอบด้วยมอเตอร์แม่เหล็กถาวรแบบฝังในแกนโรเตอร์ (IPMSM) และแบบติดตั้งที่ผิวโรเตอร์ (SPMSM) ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า IPMSM ให้การกระจายศักย์เวกเตอร์แม่เหล็กที่สม่ำเสมอกว่า และมีแรงบิดเฉลี่ยสูงกว่า SPMSM อย่างมีนัยสำคัญ ข้อค้นพบนี้สนับสนุนแนวทางการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับมอเตอร์แกนฟลักซ์ในยานยนต์ไฟฟ้า โดยมุ่งเน้นการเพิ่มสมรรถนะและการลดขนาดของมอเตอร์

คำสำคัญ: มอเตอร์ฟลักซ์แนวแกน, แม่เหล็กถาวร, วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ 3 มิติ, ยานยนต์ไฟฟ้า

Abstract

This study examines the impact of permanent magnet placement on magnetic field distribution and torque characteristics in flux axial motors using a self-developed three-dimensional finite element method (3D-FEM) simulation tool. Two configurations were analyzed: interior permanent magnet synchronous motors (IPMSMs) and surface permanent magnet synchronous motors (SPMSMs). Results indicate that IPMSMs achieve a more uniform magnetic vector potential distribution and significantly higher average torque compared to SPMSMs. These insights support optimal design strategies for flux axial motors in electric vehicle applications, targeting enhanced performance and motor downsizing.

Keywords: Axial Flux Motor, Permanent Magnet, 3D Finite Element Method, Electric Vehicle

บทนำ

ในปัจจุบัน ประเทศไทยยังคงพึ่งพาเทคโนโลยีและบุคลากรจากต่างประเทศในการพัฒนายานยนต์

ไฟฟ้า ทั้งในด้านการออกแบบ การผลิต และการบำรุงรักษา ส่งผลให้ขาดความสามารถในการพัฒนาเทคโนโลยีขั้นสูงภายในประเทศ โดยเฉพาะใน

องค์ประกอบสำคัญอย่าง "มอเตอร์ไฟฟ้า" ซึ่งเป็นหัวใจหลักของระบบขับเคลื่อน [1-2]

มอเตอร์แกนฟลักซ์ (Axial Flux Motor) เป็นทางเลือกที่มีศักยภาพ เนื่องจากมีโครงสร้างแบนและกะทัดรัด เหมาะสำหรับการออกแบบที่ต้องการประหยัดพื้นที่ โดยเฉพาะในยานยนต์ไฟฟ้าที่มุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพและลดขนาดของระบบขับเคลื่อน นอกจากนี้ยังให้แรงบิดต่อขนาดสูงเมื่อเทียบกับมอเตอร์ทั่วไป [3] จึงเป็นที่สนใจในงานวิจัยด้านวิศวกรรมไฟฟ้าและพลังงาน

องค์ประกอบสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของมอเตอร์คือการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กภายใน ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปแบบการติดตั้งแม่เหล็กถาวร เช่น การฝังแม่เหล็กถาวรในโรเตอร์ (IPMSM) หรือการติดตั้งที่ผิวโรเตอร์ (SPMSM) ความแตกต่างนี้ส่งผลต่อคุณสมบัติของสนามแม่เหล็กและค่าแรงบิดที่มอเตอร์สามารถสร้างได้ [4]

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายเพื่อศึกษาและเปรียบเทียบผลกระทบของรูปแบบการติดตั้งแม่เหล็กถาวรภายในมอเตอร์แกนฟลักซ์ โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ (3D Finite Element Method: 3D FEM) ผ่านโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเอง เพื่อให้สามารถจำลองสภาพสนามแม่เหล็กได้อย่างใกล้เคียงความเป็นจริง ช่วยเพิ่มความแม่นยำในการออกแบบมอเตอร์ที่เหมาะสมกับการใช้งานในยานยนต์ไฟฟ้า [5] และเป็นการสร้างองค์ความรู้ที่สามารถต่อยอดไปสู่การพัฒนาเทคโนโลยีในประเทศได้อย่างยั่งยืน

วิธีดำเนินงาน

1. แบบจำลองคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กในมอเตอร์แม่เหล็กถาวรแบบฟลักซ์ตามแนวแกน

ในการคำนวณหาสนามแม่เหล็กสามารถดำเนินการได้โดยเล็งไปคำนวณหาศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กก่อน เนื่องจากสามารถคำนวณได้ง่ายกว่า โดยสนามแม่เหล็กสามารถคำนวณได้ด้วยการเคิร์ลศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก [6] ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$B = \nabla \times A \quad (1)$$

การคำนวณสนามแม่เหล็กของมอเตอร์แกนฟลักซ์เริ่มจากการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็ก โดยการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงค่าตามเวลา มีอิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสองส่วนคือ ขอลวดสเตเตอร์ที่รับกระแสไฟฟ้าเป็นอินพุตและแม่เหล็กถาวรบริเวณโรเตอร์ [7-8] ซึ่งทั้งสองจะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้น ดังสมการที่ (2)

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times A = j + \nabla \times H_c \quad (2)$$

j คือผลรวมของค่ากระแสในขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งประกอบด้วยสองส่วนคือ กระแสภายนอก (external current: j_0) และกระแสตกค้าง (eddy current: j_{eddy}) ดังสมการที่ (3)

$$j = j_0 + j_{eddy} \quad (3)$$

เมื่อ $j_{eddy} = -\sigma \frac{\partial A}{\partial t}$ โดยที่ σ คือ สภาพนำทางไฟฟ้า (conductivity) นำสมการที่ (3) แทนในสมการที่ (2) จะได้

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times A = j_0 - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \times H_c \quad (4)$$

จากการศึกษาคุณสมบัติของ A พบว่า $\nabla \cdot A = 0$ ประกอบกับการใช้เอกลักษณ์ของสมการ จึงได้สมการของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กดังสมการที่ (5)

$$\frac{1}{\mu} (-\nabla^2 A) = j_0 - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \times H_c \quad (5)$$

จากสมการที่ (5) เขียนให้อยู่ในรูปสมการอนุพันธ์ย่อย จะได้สมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสองดังสมการที่ (6)

$$\frac{1}{\mu} \left(\frac{1}{\mu_x} \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{1}{\mu_y} \left(\frac{1}{\mu_y} \frac{\partial A}{\partial y} \right) + \frac{1}{\mu_z} \left(\frac{1}{\mu_z} \frac{\partial A}{\partial z} \right) - \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} \right) \right) = -j_0 + \left(\left(\frac{\partial H_{cx}}{\partial y} - \frac{\partial H_{cy}}{\partial z} \right) i - \left(\frac{\partial H_{cy}}{\partial x} - \frac{\partial H_{cx}}{\partial z} \right) j + \left(\frac{\partial H_{cy}}{\partial x} - \frac{\partial H_{cx}}{\partial y} \right) k \right) \quad (6)$$

ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สนามแม่เหล็กของมอเตอร์แกนฟลักซ์ เมื่อพิจารณามอเตอร์ใน 3 มิติ

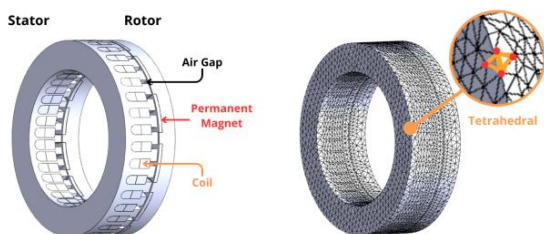
ตามระนาบพิกัด xyz ซึ่งแปรผันตามเวลา จึงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6) ซึ่งเป็นการสมมติให้สนามแม่เหล็กวางตัวตามพื้นที่หน้าตัดในระนาบพิกัด xyz ของมอเตอร์ ดังนั้นการพิจารณาเทอมของ A และ j_0 จะปรากฏเฉพาะส่วนประกอบของแกน z เท่านั้น โดยสมการจะปรากฏอยู่ในรูปสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง [8]

2. การสร้างสมการไฟไนต์อิลิเมนต์ 3 มิติ

2.1 การแบ่งอิลิเมนต์พื้นที่ศึกษา

ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Analysis) ของระบบที่ซับซ้อน การแบ่งพื้นที่ปัญหาออกเป็นองค์ประกอบย่อย (Discretization) ถือเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญยิ่ง งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ องค์ประกอบย่อยแบบสี่หน้า (Tetrahedral Element) สำหรับการจำลองเชิงโครงข่าย (Mesh Generation) เนื่องจากเป็นรูปทรงที่ประกอบด้วยจำนวนโนด (Nodes) หรือจุดเชื่อมต่ออย่างน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบในรูปทรงอื่น ส่งผลให้สามารถลดภาระในการคำนวณได้อย่างมีประสิทธิภาพ [8-9]

โดยสมมติให้การแจกแจงของตัวแปรที่สนใจภายในแต่ละองค์ประกอบเป็นแบบเชิงเส้น (Linear Interpolation) ซึ่งเพียงพอต่อการประมาณค่าในเบื้องต้น การสร้างโครงข่ายองค์ประกอบ (Finite Element Mesh) ในการศึกษาครั้งนี้ดำเนินการโดยใช้ซอฟต์แวร์สำเร็จรูป SOLIDWORKS ซึ่งสามารถสร้างองค์ประกอบได้ทั้งหมด 104,984 องค์ประกอบ และมีจำนวนจุดเชื่อมต่อรวม 19,945 จุด สำหรับต้นแบบของมอเตอร์ชนิดแกนฟลักซ์ (Flux Switching Motor Prototype) รายละเอียดแสดงไว้ในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การแบ่งอิลิเมนต์และจุดต่อบนต้นแบบมอเตอร์แกนฟลักซ์ด้วยอิลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า

2.2 ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์

เป็นการเลือกรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์ (Element Interpolation Function) โดยเมื่อสมมติลักษณะการกระจายของผลเฉลยบนอิลิเมนต์เป็นแบบเชิงเส้น [9] จึงได้

$$A(x, y, z) = A_1N_1 + A_2N_2 + A_3N_3 + A_4N_4 \quad (7)$$

โดยที่ N_i , $i = 1, 2, 3, 4$ คือฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์ และ A_i , $i = 1, 2, 3, 4$ คือผลลัพธ์ของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแต่ละจุดต่อ (1, 2, 3, 4) ของอิลิเมนต์ [10] ซึ่ง

$$N_i = \frac{1}{6V} (a_i + b_i x + c_i y + d_i z) \quad (8)$$

จากสมการที่ (5) เป็นสมการเชิงเวกเตอร์ ซึ่งเป็นสมการเดียวกับสมการที่ (6) ที่เป็นสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง เมื่อจัดรูปสมการที่ (4) ให้สมการด้านขวาเท่ากับศูนย์ และจาก $H_c = v\mu_0 M$ และ $v = I/\mu$ [11] จะได้ดังสมการที่ (9)

$$\nabla \times v(\nabla \times A) - j_0 + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \nabla \times (v\mu_0 M) = 0 \quad (9)$$

การสร้างสมการของอิลิเมนต์ด้วยการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างมีหลักการดังนี้คือ หากแทนผลเฉลยโดยประมาณลงในสมการที่ (9) จะไม่ได้ค่าเท่ากับศูนย์ แต่จะมีค่าเท่ากับ R [11-12] ดังแสดงด้วยสมการที่ (10)

$$\nabla \times v(\nabla \times A) - j_0 + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \nabla \times (v\mu_0 M) = R \quad (10)$$

2.3 การสร้างสมการอิลิเมนต์

ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างของกาเลอร์คิน (Galerkin Weighted Residual Method) โดยวิธีการนี้จะคูณ R ด้วยฟังก์ชันน้ำหนัก W ซึ่งมีรูปแบบเดียวกับฟังก์ชันฐาน จากนั้นทำการอินทิเกรตตลอดทั้งโดเมนขององค์ประกอบ V และกำหนดผลรวมของอินทิเกรชันให้เท่ากับศูนย์ [12] นั่นคือ

$$\int_V W_n R dV = 0, \quad n = 1, 2, 3, 4 \quad (11)$$

สำหรับอีลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า จุดที่ไม่รู้ค่ามี 4 จุด ซึ่งได้แก่จุดต่อทั้งสี่ ดังนั้นจึงต้องการ 4 สมการในการแก้หาจุดที่ไม่รู้ค่า นั่นหมายถึงในสมการที่ (11) จะต้องมามีค่า $n=1,2,3,4$ และโดยปกติเราจะเลือก $W_n=N_n$ ซึ่งเรียกว่าบับโนฟ-กาเลอร์คิน (Bubnov-Galerkin) [13] ดังนั้นเมื่อแทน R ด้วยสมการที่ (10) ลงในสมการที่ (11) จึงได้

$$\iiint_V \nabla \times (\nu (\nabla \times A) - \nu \mu_0 M) N_n dx dy dz + \iiint_V N_n \sigma \frac{\partial A}{\partial t} dx dy dz = \iiint_V N_n j_0 dx dy dz \quad (11)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (11) จัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\iiint_V N_n \sigma \frac{\partial A}{\partial t} dx dy dz + \iiint_V \nu \left(\frac{\partial A}{\partial x} \frac{\partial N_n}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial y} \frac{\partial N_n}{\partial y} + \frac{\partial A}{\partial z} \frac{\partial N_n}{\partial z} \right) dx dy dz = \iiint_V \nu \mu_0 \left(M_x \left(\frac{\partial N_n}{\partial y} - \frac{\partial N_n}{\partial z} \right) - M_y \left(\frac{\partial N_n}{\partial x} - \frac{\partial N_n}{\partial z} \right) + M_z \left(\frac{\partial N_n}{\partial x} - \frac{\partial N_n}{\partial y} \right) \right) dx dy dz + \iiint_V N_n j_0 dx dy dz \quad (12)$$

จากสมการที่ (12) พิจารณาในรูปสมการทั่วไปได้ดังสมการที่ (13)

$$[M]_{4 \times 4} \{A\}_{4 \times 1} + [K]_{4 \times 4} \{A\}_{4 \times 1} = \{F\}_{4 \times 1} \quad (13)$$

โดยเมื่อแยกพิจารณาสมการที่ (13) ทีละพจน์จะสามารถพิจารณาได้ดังนี้

$$[M]_{4 \times 4} = \frac{\sigma V}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$[K]_{4 \times 4} = \frac{\nu}{36V} \begin{bmatrix} b_1 b_1 + c_1 c_1 + d_1 d_1 & b_1 b_2 + c_1 c_2 + d_1 d_2 & b_1 b_3 + c_1 c_3 + d_1 d_3 & b_1 b_4 + c_1 c_4 + d_1 d_4 \\ b_2 b_1 + c_2 c_1 + d_2 d_1 & b_2 b_2 + c_2 c_2 + d_2 d_2 & b_2 b_3 + c_2 c_3 + d_2 d_3 & b_2 b_4 + c_2 c_4 + d_2 d_4 \\ b_3 b_1 + c_3 c_1 + d_3 d_1 & b_3 b_2 + c_3 c_2 + d_3 d_2 & b_3 b_3 + c_3 c_3 + d_3 d_3 & b_3 b_4 + c_3 c_4 + d_3 d_4 \\ b_4 b_1 + c_4 c_1 + d_4 d_1 & b_4 b_2 + c_4 c_2 + d_4 d_2 & b_4 b_3 + c_4 c_3 + d_4 d_3 & b_4 b_4 + c_4 c_4 + d_4 d_4 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\{F\}_{4 \times 1} = \frac{\nu \mu_0}{6} \left(M_x \begin{bmatrix} c_1 - d_1 \\ c_2 - d_2 \\ c_3 - d_3 \\ c_4 - d_4 \end{bmatrix} - M_y \begin{bmatrix} b_1 - d_1 \\ b_2 - d_2 \\ b_3 - d_3 \\ b_4 - d_4 \end{bmatrix} + M_z \begin{bmatrix} b_1 - c_1 \\ b_2 - c_2 \\ b_3 - c_3 \\ b_4 - c_4 \end{bmatrix} \right) + \frac{j_0 V}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

2.4 การแก้ปัญหภายใต้สถานะชั่วคราว

ในการวิเคราะห์ปัญหาในสภาวะไม่คงตัว (Transient State) งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้วิธีความสัมพันธ์เวียนบังเกิด (Recurrence Relation Method) โดยลักษณะของผลลัพธ์ขึ้นอยู่กับ

ค่าพารามิเตอร์ β ตามที่แสดงในสมการที่ (17) ซึ่ง Δt คือช่วงเวลา (Time Step) ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีผลต่างสี่เหลี่ยมย้อนหลัง ดังแสดงในสมการที่ (18) เนื่องจากสามารถรับประกันการลู่เข้าของคำตอบได้ และให้ผลลัพธ์ที่มีความต่อเนื่องในเชิงเวลาอย่างเหมาะสมกับลักษณะพลวัตของระบบที่ศึกษา [14]

$$\beta \{A\}^{t+\Delta t} + (1-\beta) \{A\}^t = \frac{\{A\}^{t+\Delta t} - \{A\}^t}{\Delta t} \quad (17)$$

$$\{A\}^{t+\Delta t} = \frac{\{A\}^{t+\Delta t} - \{A\}^t}{\Delta t} \quad (18)$$

เลือกใช้วิธีผลต่างสี่เหลี่ยมย้อนหลัง จึงได้ผลลัพธ์ของสมการไฟไนท์อีลิเมนต์เมื่อพิจารณาปัญหาที่ขึ้นอยู่กับเวลา ดังสมการที่ (19)

$$\left(\frac{1}{\Delta t} [M] + [K] \right) \{A\}^{t+\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} [M] \{A\}^t + \{F\}^{t+\Delta t} \quad (19)$$

2.5 การคำนวณค่าตัวแปรอื่นที่ต้องการ

เมื่อทราบค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก A ที่จุดต่อต่างๆ แล้ว จึงสามารถคำนวณหาค่าต่างๆ ที่สัมพันธ์กันต่อไปได้ โดยสนามแม่เหล็ก B ที่กระจายตัวในระบบพิกัดฉาก (ระนาบ xyz) ของมอเตอร์สามารถคำนวณได้จาก $B = \nabla \times A$ ดังนั้นเมื่อพิจารณามอเตอร์ใน 3 มิติ ตามระนาบพิกัด xyz จึงได้ค่าสนามแม่เหล็กในแนวแกน x (B_x) และค่าสนามแม่เหล็กในแนวแกน y (B_y) [15] ดังแสดงด้วยสมการที่ 20 และ 21 ตามลำดับ

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} = \frac{c_1 A_1 + c_2 A_2 + c_3 A_3 + c_4 A_4}{6V} \quad (20)$$

$$B_y = -\frac{\partial A_z}{\partial x} = -\left(\frac{b_1 A_1 + b_2 A_2 + b_3 A_3 + b_4 A_4}{6V} \right) \quad (21)$$

จากนั้นแปลงระบบจากพิกัดฉากไปเป็นพิกัดทรงกระบอก เพื่อใช้คำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กในแนวรัศมี (radial flux density, B_r) และสนามแม่เหล็กในแนวสัมผัส (tangential flux density, B_t) ที่กระทำกับช่องอากาศของมอเตอร์ตรงส่วนของฟันสเตเตอร์ในแต่ละซี่ที่มีมุม ϕ

เปลี่ยนแปลงไป สามารถแสดงได้ดังนี้
 $B_r = B_x \cos \phi + B_y \sin \phi$, $B_t = -B_x \sin \phi + B_y \cos \phi$

[15-16]

เมื่อกำหนดค่า B_r และ B_t แล้ว จากนั้นจึงใช้สมการความเค้นของแมกซ์เวลล์หาค่าแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำกับช่องอากาศ ซึ่งจะมีผลต่อการสั่นสะเทือนในมอเตอร์ PMSM โดยที่

$$F_r = \frac{1}{2\mu_0} (B_r^2 - B_t^2) \quad (22)$$

$$F_t = \frac{1}{\mu_0} (B_r B_t) \quad (23)$$

ซึ่ง F_r และ F_t คือแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวรัศมีและแนวสัมผัสตามลำดับ โดยขนาดของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวสัมผัสจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับแนวรัศมี ดังนั้นการพิจารณาแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำกับช่องอากาศของมอเตอร์ แต่เมื่อพิจารณาแรงบิดของมอเตอร์ที่ทำให้โรเตอร์หมุน แรงแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวสัมผัสจะเป็นแรงหลักที่ต้องนำมาพิจารณา [16]

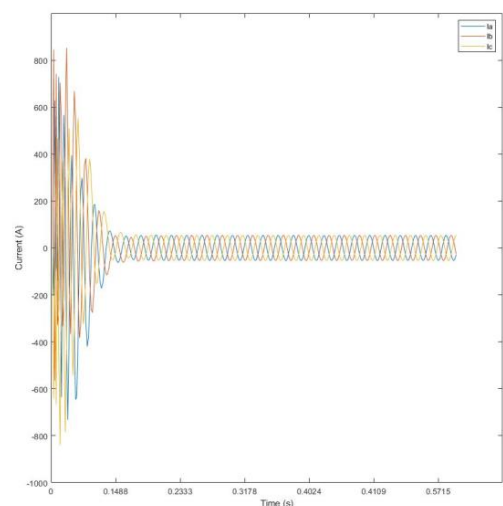
3. การประยุกต์เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขต

ประยุกต์เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขต (initial and boundary condition) ที่สอดคล้องกับปัญหาในสมการรวมของระบบ (constraints) ซึ่งงานวิจัยนี้มีค่าเงื่อนไขเริ่มต้นในรอบแรกที่พิจารณาการหมุนของมอเตอร์คือ $A(t=0) = 0$ ส่วนการหมุนรอบถัดไปจะใช้คำตอบจากรอบที่แล้วเป็นเงื่อนไขเริ่มต้น เพื่อประหยัดเวลาในการหาคำตอบที่ถูกต้อง [17] ส่วนค่าเงื่อนไขขอบเขต จะกำหนดให้ขอบในที่ดีกับเพลลาและขอบนอกของมอเตอร์มีค่า $A = 0$

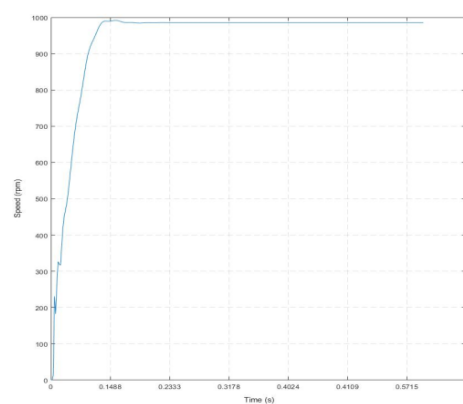
การจำลองผลสนามแม่เหล็ก ได้พิจารณาต้นแบบมอเตอร์แกนฟลักซ์แบบสเตเตอร์เดี่ยวโรเตอร์เดี่ยวขนาด 5kW โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆทั้งทางไฟฟ้าและทางกลแสดงในตารางที่ 1 [17-18] และกระแสที่นำมาจำลองแสดงดังรูปที่ 2

ตารางที่ 1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์แกนฟลักซ์

พารามิเตอร์	ค่า
กำลังงานขาออก	5 kW
แรงดันแหล่งจ่าย	380 V
จำนวนขั้ว	6 P
ความถี่แหล่งจ่าย	50 Hz
ความเร็วพิกัด	1000 rpm
ชนิดการพันของขดลวดสเตเตอร์	แบบสองชั้น
จำนวนร่องของสเตเตอร์	36 ร่อง
ความกว้างช่องอากาศ	1.5 mm
ความหนาแม่เหล็ก	4 mm
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก	200 mm
เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน	140 mm



รูปที่ 2 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าแต่ละเฟสที่จ่ายให้มอเตอร์



รูปที่ 3 กราฟความเร็วรอบเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ได้จากการคำนวณ

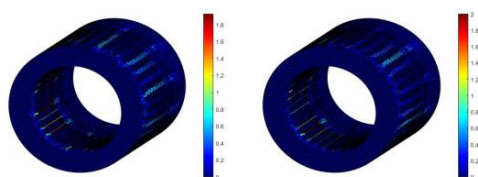
จากรูปที่ 3 จะเห็นว่า ค่าความเร็วรอบจะมีค่าเป็นศูนย์ที่เวลาเริ่มต้น และจะมีเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และคงที่ที่เวลาประมาณ 0.2 วินาที ด้วยค่าความเร็วรอบประมาณ 985 rpm

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

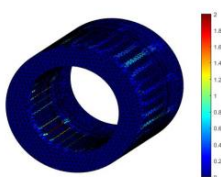
ในการคำนวณเชิงตัวเลขผลลัพธ์ที่ได้ของสนามแม่เหล็กโดยใช้ MATLAB ดังแสดงในรูปที่ 4 เป็นผลการจำลองของมอเตอร์มอเตอร์แกนฟลักซ์แบบแม่เหล็กถาวรฝังในแกนโรเตอร์ แสดงการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก ตามปริมาตรของมอเตอร์เมื่อโรเตอร์หมุนไปจากมุม 0 องศา ถึง 180 องศา ในรูปที่ 5 เป็นผลการจำลองของมอเตอร์มอเตอร์แกนฟลักซ์แบบแม่เหล็กถาวรฝังในแกนโรเตอร์ แสดงการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก ตามปริมาตรของมอเตอร์เมื่อโรเตอร์หมุนไปจากมุม 0

องศา ถึง 180 องศา โดยโรเตอร์ทั้งสองรูปแบบหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ด้วยมุมต่างกัน 45 องศา

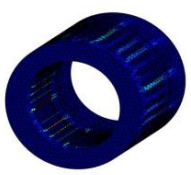
การคำนวณหาค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในแนวลำตัว (B_r) ที่กระทำกับช่องอากาศของมอเตอร์ตรงส่วนของฟันสเตเตอร์ในแต่ละซี่ทั้ง 36 ซี่ ที่มีมุมการหมุนของโรเตอร์แปรเปลี่ยนไป โดยรูปที่ 4-5 เป็นการแสดงค่า B_r ที่กระทำตรงฟันของสเตเตอร์ในแต่ละซี่ ซึ่งเป็นการพิจารณาเมื่อร่องโรเตอร์หมุนไป 0 องศา, 90 องศา และ 180 องศา (ซี่ที่ 1 คือตำแหน่ง 0 องศา เทียบกับแกน x+ และซี่ถัดไปจะวางตัวเป็นลำดับในทิศทางตามเข็มนาฬิกา) ซึ่งจะสังเกตเห็นว่ารูปกราฟมีแอมพลิจูดสูงสุดประมาณ 0.3 T และรูปกราฟของ B_r จะมีลักษณะเหมือนเดิมเมื่อโรเตอร์หมุนผ่านไปประมาณ 180 องศา



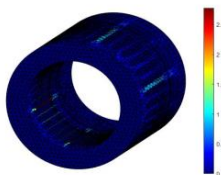
(ก) 0 องศา



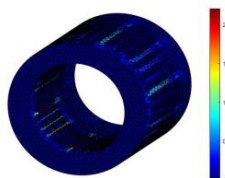
(ข) 45 องศา



(ค) 90 องศา



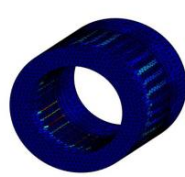
(ง) 135 องศา



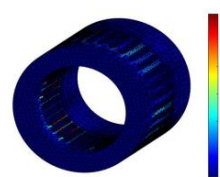
(จ) 180 องศา

รูปที่ 4 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T)

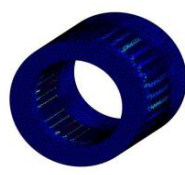
เมื่อพิจารณาการติดตั้งแม่เหล็กแบบฝังในแกนโรเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกา



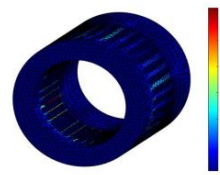
(ก) 0 องศา



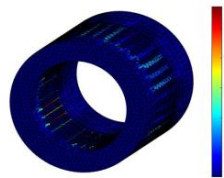
(ข) 45 องศา



(ค) 90 องศา



(ง) 135 องศา



(จ) 180 องศา

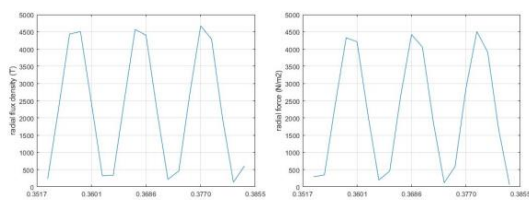
รูปที่ 5 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T)

เมื่อพิจารณาการติดตั้งแม่เหล็กที่ผิวโรเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกา



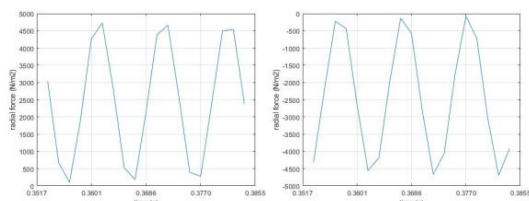
เมื่อคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กแล้ว ได้นำสมการความเค้นของแมกซ์เวลล์มาหาค่าแรงแม่เหล็กในแนวรัศมีและแนวสัมผัสที่กระทำกับช่องอากาศตรงพื้นสเตเตอร์ในแต่ละซี่ เทียบกับเวลาที่โรเตอร์หมุนครบ 1 รอบ โดยพิจารณาซี่ที่ 1 ถึงซี่ที่ 6 เนื่องจากผลการกระทำซ้ำกันตามระยะพิทช์ จากรูปที่ 6 พบว่ากราฟแรงแม่เหล็กในแนวรัศมีเทียบกับเวลามีลักษณะคล้ายคลื่นไซน์ โดยมีแรงสูงสุดประมาณ $60,117 \text{ N/m}^2$ ที่ซี่ที่ 6 และต่ำสุดประมาณ $3,732 \text{ N/m}^2$ ที่ซี่ที่ 5 ซึ่งแรงในแนวรัศมีส่งผลต่อการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ จากรูปที่ 7 กราฟแรงแม่เหล็กในแนวสัมผัสแสดง

พฤติกรรมคล้ายคลื่นไซน์เช่นกัน โดยมีแรงสูงสุดประมาณ $45,643 \text{ N/m}^2$ ที่ซี่ที่ 3 และต่ำสุดประมาณ 544 N/m^2 ที่ซี่ที่ 1 ซึ่งแรงแนวสัมผัสมีผลต่อการหมุนของมอเตอร์ สำหรับรูปที่ 8 พบว่าแรงแม่เหล็กในแนวรัศมีมีค่าสูงสุดประมาณ $8,638 \text{ N/m}^2$ ที่ซี่ที่ 1 และต่ำสุดประมาณ 432 N/m^2 ที่ซี่ที่ 3 ขณะที่ในรูปที่ 9 กราฟแรงแม่เหล็กในแนวสัมผัสมีค่าสูงสุดประมาณ $9,635 \text{ N/m}^2$ ที่ซี่ที่ 3 และต่ำสุดประมาณ $1,082 \text{ N/m}^2$ ที่ซี่ที่ 5 แสดงให้เห็นพฤติกรรมของแรงที่แตกต่างกันในแต่ละซี่และผลกระทบที่มีต่อการทำงานของมอเตอร์



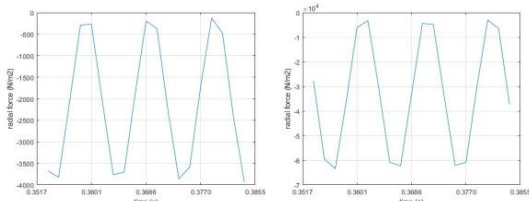
(ก) ซี่ที่ 1

(ข) ซี่ที่ 2



(ค) ซี่ที่ 3

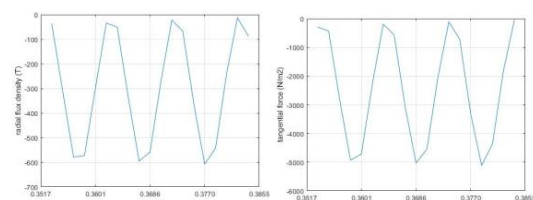
(ง) ซี่ที่ 4



(จ) ซี่ที่ 5

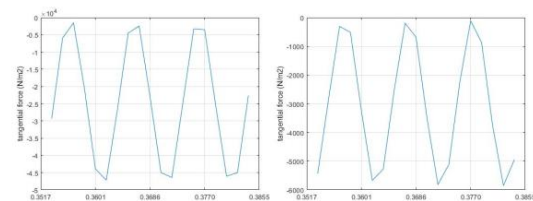
(ฉ) ซี่ที่ 6

รูปที่ 6 แรงแม่เหล็กตามแนวรัศมีที่กระทำกับพื้นสเตเตอร์เมื่อพิจารณาการติดตั้งแม่เหล็กที่ฝังโรเตอร์



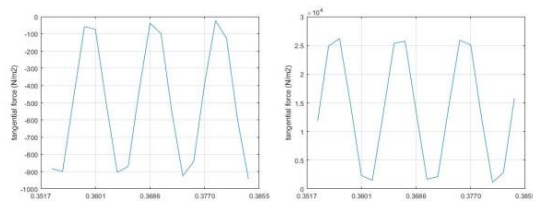
(ก) ซี่ที่ 1

(ข) ซี่ที่ 2



(ค) ซี่ที่ 3

(ง) ซี่ที่ 4

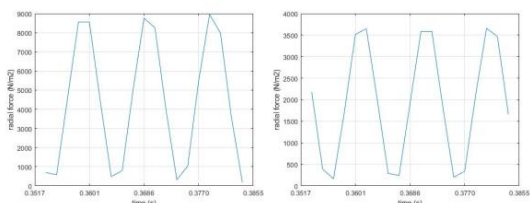


(จ) ซี่ที่ 5

(ฉ) ซี่ที่ 6

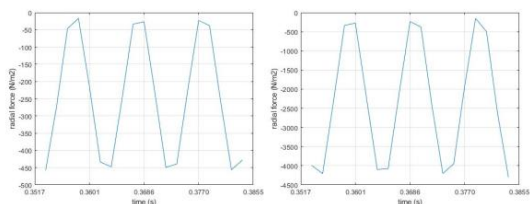
รูปที่ 7 แรงแม่เหล็กแนวสัมผัสที่กระทำกับพื้นสเตเตอร์เมื่อพิจารณาการติดตั้งแม่เหล็กแบบฝังในแกนโรเตอร์





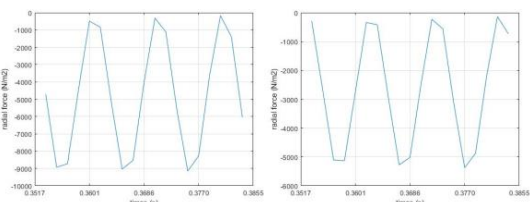
(ก) ชีตที่ 1

(ข) ชีตที่ 2



(ค) ชีตที่ 3

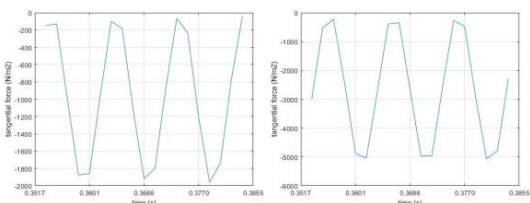
(ง) ชีตที่ 4



(จ) ชีตที่ 5

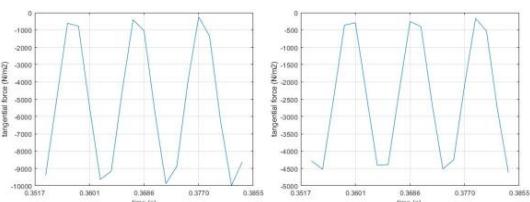
(ฉ) ชีตที่ 6

รูปที่ 8 แรงแม่เหล็กตามแนวรัศมีที่กระทำกับฟันสเตเตอร์เมื่อพิจารณาการติดตั้งแม่เหล็กที่ผิวโรเตอร์



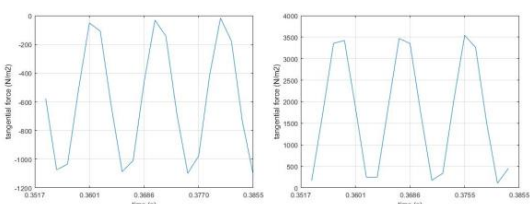
(ก) ชีตที่ 1

(ข) ชีตที่ 2



(ค) ชีตที่ 3

(ง) ชีตที่ 4



(จ) ชีตที่ 5

(ฉ) ชีตที่ 6

รูปที่ 9 แรงแม่เหล็กตามแนวสัมผัสที่กระทำกับฟันสเตเตอร์เมื่อพิจารณาการติดตั้งแม่เหล็กที่ผิวโรเตอร์

เมื่อพิจารณาแรงบิด (r) ที่ทำให้โรเตอร์หมุนในสถานะคงที่ จะใช้แรงแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวสัมผัส (F_t) มาพิจารณา โดยสามารถหาแรงบิดที่เกิดขึ้นได้จากสมการ $r = F_t \times r^2$ เมื่อ r คือรัศมีของมอเตอร์ ค่าแรงบิดในตารางที่ 2 และ 3 จะพิจารณาเมื่อโรเตอร์หมุนไปตามมุมต่างๆ ตั้งแต่มุม 0 องศา ถึง 180 องศา ทิศทางตามเข็มนาฬิกาต่างกันทีละ 45 องศา

ตารางที่ 2 แสดงค่าของแรงบิดสูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อพิจารณาการติดตั้งแม่เหล็กถาวรแบบฝังในแกนโรเตอร์

มุมที่มอเตอร์หมุนไป (องศา)	เวลา (s)	ค่าแรงแม่เหล็กแนวสัมผัส (N/m^2)	ค่าแรงบิดสูงสุด (Nm)
0	0.3517	3.08×10^4	307.96
45	0.3601	4.60×10^4	459.87
90	0.3686	3.41×10^4	341.01
135	0.3770	6.37×10^4	636.66
180	0.3855	3.83×10^4	382.86

ตารางที่ 3 แสดงค่าของแรงบิดสูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อพิจารณาการติดตั้งแม่เหล็กถาวรที่ผิวโรเตอร์

มุมที่มอเตอร์หมุนไป (องศา)	เวลา (s)	ค่าแรงแม่เหล็กแนวสัมผัส (N/m^2)	ค่าแรงบิดสูงสุด (Nm)
0	0.3517	1.29×10^4	129.23
45	0.3601	8.09×10^4	80.91
90	0.3686	8.85×10^4	85.44
135	0.3770	9.72×10^4	97.25
180	0.3855	1.31×10^4	131.12

จากตารางที่ 2 แสดงค่าของแรงบิดสูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อพิจารณาการติดตั้งแม่เหล็กถาวรแบบฝังในแกนโรเตอร์ ค่าแรงบิดสูงสุดที่เกิดขึ้นเท่ากับ 636.66 Nm ที่มุม 135 องศา และจากตารางที่ 3 แสดงค่าของแรงบิดสูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อพิจารณาการติดตั้งแม่เหล็ก

ถาวรติดตั้งแม่เหล็กถาวรที่ผิวโรเตอร์ ค่าแรงบิดสูงสุดที่เกิดขึ้นเท่ากับ 131.12 Nm ที่มุม 180 องศา

จากการจำลองสนามแม่เหล็กของมอเตอร์แกนฟลักซ์ โดยเปรียบเทียบการติดตั้งแม่เหล็กถาวรสองรูปแบบ คือ แบบฝังในแกนโรเตอร์ (IPM) และแบบติดตั้งที่ผิวโรเตอร์ (SPM) พบว่า มอเตอร์แบบฝังในแกนโรเตอร์ให้การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่สมดุลกว่า มีความหนาแน่นสนามแม่เหล็กและแรงแม่เหล็กในแนวรัศมีสูงกว่า ส่งผลให้แรงบิดเฉลี่ยที่ได้มีค่ามากกว่ามอเตอร์แบบติดตั้งที่ผิวโรเตอร์ ขณะที่แบบติดตั้งที่ผิวโรเตอร์มีการกระจายสนามแม่เหล็กที่ไม่สมดุล ส่งผลให้แรงบิดต่ำกว่า ดังนั้นโครงสร้างแม่เหล็กแบบฝังในจึงเหมาะสำหรับการพัฒนามอเตอร์แกนฟลักซ์ที่ต้องการแรงบิดสูงและขนาดกะทัดรัดสำหรับใช้งานในยานยนต์ไฟฟ้า

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลกระทบของรูปแบบการติดตั้งแม่เหล็กถาวรในมอเตอร์แกนฟลักซ์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบสามมิติ พบว่าการติดตั้งแม่เหล็กแบบฝังในแกนโรเตอร์ (Interior Permanent Magnet: IPM) ส่งผลให้การกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กมีความสมดุลมากกว่าการติดตั้งที่ผิวโรเตอร์ (Surface Permanent Magnet: SPM) โดยมีความหนาแน่นสนามแม่เหล็กและแรงบิดสูงกว่ารูปแบบ SPM อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพและเสถียรภาพของมอเตอร์ในสภาวะการหมุนคงที่ ทั้งนี้ รูปแบบ IPM จึงเหมาะสมสำหรับการพัฒนาเทคโนโลยีมอเตอร์แกนฟลักซ์เพื่อใช้งานในยานยนต์ไฟฟ้า ที่ต้องการแรงบิดสูงในขนาดที่กะทัดรัด อย่างไรก็ตาม เพื่อให้การประเมินสมรรถนะของมอเตอร์มีความครบถ้วนยิ่งขึ้น งานวิจัยในอนาคตควรขยายขอบเขตการศึกษาไปยังปัจจัยอื่น ๆ เช่น ลักษณะรูปทรงแม่เหล็ก ชนิดวัสดุแม่เหล็ก คุณสมบัติทางความร้อน และพฤติกรรมของมอเตอร์ภายใต้สภาวะโหลดที่เปลี่ยนแปลง เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการออกแบบและประเมินประสิทธิภาพในสภาพการใช้งานจริง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนการศึกษาจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

เอกสารอ้างอิง

- [1] T. F. Chan and L. L. Lai, "An axial-flux permanent-magnet synchronous for a direct-coupled wind-turbine system," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 22, no. 1, pp. 86–94, Mar. 2007.
- [2] S. Javadi and M. Mirsalim, "Design and analysis of 42-V coreless axial-flux permanent-magnet generators for automotive applications," IEEE Trans. Magn., vol. 46, no. 4, pp. 1015–1023, Apr. 2010.
- [3] A. Kampker et al., "Comprehensive Review and Systemization of the Product Features of Axial Flux Machines," 2024 1st International Conference on Production Technologies and Systems for E-Mobility (EPTS), Bamberg, Germany, 2024.
- [4] Aydin, M., Gulec, M., Demir, Y., et al.: Design and validation of a 24-pole coreless axial flux permanent magnet motor for a solar powered vehicle'. 2016 XXII Int. Conf. on Electrical Machines (ICEM), Lausanne, Switzerland, 2016, pp. 1493–1498.
- [5] Benzaquen J, He J, Mirafzal B. Toward more electric powertrains in aircraft: Technical challenges and advancements. CES Trans Electric Motors Syst 2021;5(3): 177–193.
- [6] B. V and C. C, "Characteristic Stability Analysis of Axial Flux Motors in Comparison with Radial Flux Motors Subjected to EV Application," 2023 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid, and Renewable Energy (PESGRE), Trivandrum, India, 2023, pp. 1-6.



[7] A. Bunmat and P. Pao-la-or, (2015). Analysis of magnetic field effects operators working a power transmission line using 3-D finite element method, *2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Pattaya, Thailand, pp. 1187-1191.

[8] P. Saikham, P. Pao-La-Or, T. Yuangkaew, and A. Bunmat, (2023). Electromagnetic Field Simulation of Pantograph for Electric Train Using 3D Finite Element Method, *2023 International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, Krabi, Thailand, pp. 68-71.

[9] M. V. K. Chari and S. J. Salon, (2000). *Numerical methods in electromagnetism*, Academic Press, USA.

[10] Jr.W.H. Hayt and J.A. Buck, (2006). *Engineering Electromagnetics* (7th edition), McGraw-Hill, Singapore.

[11] S. Hadi, (1999). *Power System Analysis*, Senior Consulting Edition (3rd ed.), New York: Mc-Graw Hill.

[12] R. Lerch, (1990). Simulation of piezoelectric devices by two and three dimension finite element, *IEEE Transactions on Ultrasonics*, 37 (2): 233-247.

[13] M. Ibrahim and A. Abd-Elhady, (2017), Calculation of Electric Field and Partial Discharge Activity Reduction for Covered Conductor/High Voltage Insulator Systems, *Electric Power Systems Research*, vol. 144, pp. 72-80.

[14] P. Pao-la-or, and A. Bunmat, (2019). Shielding of Magnetic Field Effects on Operators Working a Power Transmission Lines Using 3-D FEM, *International Journal of*

Mechanical Engineering and Robotics Research, vol. 8, no. 5.

[15] A. Bunmat, P. Saikham and P. Pao-La-Or, "Distributions of Flux and Electromagnetic Force in Brushless Motor Using 3-D FEM," *2023 International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, Krabi, Thailand, 2023, pp. 342-345.

[16] A. Bunmat, T. Kongtham, P. Krikodsong, W. Bunyawut and T. Simma, "Magnetic Field Simulation of Multiphase Wind Generator Using 3D Finite Element Method," *2024 12th International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, Pattaya, Thailand, 2024.

[17] Mojtaba Alamdar Yazdi, Seyed Amin Saied, and Seyyed Mehdi Mirimani (2020). Design and construction of new axial-flux permanent magnet motor. *IET Electric Power Applications*. 14: 2389-2394.

[18] Hao, Z.; Ma, Y.; Wang, P.; Luo, G.; Chen, Y. A Review of Axial-Flux Permanent-Magnet Motors: Topological Structures, Design, Optimization and Control Techniques. *Machines* 2022.

