

نمذجة ومحاكاة المحرك الكروي ذو المغناطيس الدائم

حسن سليمان*

(تاريخ الإيداع 6 / 1 / 2020. قُبل للنشر في 20 / 10 / 2020)

□ ملخص □

يهتم هذا البحث بدراسة المحركات الكروية التي يمكنها تنفيذ حركة دورانية بثلاث درجات حرية بمفصل وحيد، والتي تملك تطبيقات في الصناعة؛ الروبوتيك؛ صناعة السيارات والصناعات الطبية. نعرض بدايةً مقدمة عن المحركات الكروية وتطبيقاتها، ثم نعرض دراسة عن المحركات الكروية ذات المغناطيس الدائم من حيث بنيتها ومبدأ عملها. نعرض بعد ذلك النموذج الرياضي للمحرك الكروي، حيث نعرض طريقة تابع النواة لنمذجة العزم الكهرطيسي، والنموذج الديناميكي للمحرك باستخدام نموذج أولر-لاغرانج. يعرض البحث أخيراً تمثيل ومحاكاة نموذج المحرك الكروي ضمن بيئة MATLAB/Simulink، حيث قمنا بدراسة توزيع الحقل المغناطيسي وأثر النفاذية المغناطيسية للثابت والدائر على العزم الكهرطيسي باستخدام برنامج Solidworks، وقمنا بحساب تابع النواة للمحرك الكروي واختبرنا مبدأ عمل المحرك على النموذج المقترح. حيث أظهرت نتائج المحاكاة كفاءة النموذج المقترح. كما قمنا باقتراح نموذج أولي لبنية جديدة مناسبة للتنفيذ العملي في المستقبل.

الكلمات المفتاحية: المحرك الكروي ذو المغناطيس الدائم، درجات الحرية، تابع النواة، نموذج أولر-لاغرانج.

* ماجستير - قسم هندسة النظم الإلكترونية والميكانيكية - المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا - دمشق - سورية.

Modeling and Simulation of Permanent Magnet Spherical Motor

Hassan Suleiman *

(Received 6 / 1 / 2020. Accepted 20 / 10 / 2020)

□ ABSTRACT □

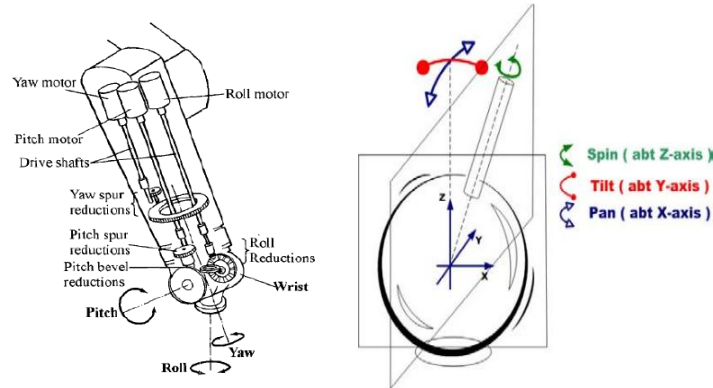
This thesis aims to study spherical motors, which can achieve three degrees of freedom motion in one joint, which have wide applications in manufacturing, robotics, automobile and medical industries. First, we present introduction about spherical motor and their applications, and then we present a study about permanent magnet spherical motor in terms of structure and working principle. Second, we present the mathematical model of the spherical motor, where we present kernel function method for modeling electromagnetic torque, as well as the dynamic model of the motor using Euler-Lagrange model. Finally, we present a spherical motor simulation model in the MATLAB/Simulink environment. We used Solid works to study magnetic field distribution and effect of stator and rotor magnetic permeability on the electromagnetic torque. We calculate kernel function for proposed motor and test the working principle. Simulation results showed the efficiency of the proposed model. We proposed a new structure suitable for future practical implementation.

Keywords: permanent magnet spherical motor, degrees of freedom, kernel function method, Euler-Lagrange model.

*Master degree †Department of Electronic and mechanical systems, Higher Institute for Applied Sciences and Technology (HIASST), Damascus, Syria.

مقدمة:

مع التطور التكنولوجي الحاصل في مجال الروبوتيك والأتمتة الصناعية ازدادت الحاجة لمشغلات (actuators) متعددة درجة الحرية [1]. اعتمدت المحاولات الأولى للحصول على مشغلات متعددة درجات الحرية على ربط مجموعة من المحركات أحادية درجة الحرية مع بعضها البعض، كما هو الحال في مفصل الرسغ للروبوت بوما [2] (الشكل (b.1))، حيث تم الجمع بين ثلاثة محركات أحادية درجة الحرية لتحقيق حركة ثلاثية درجة الحرية. تعاني هذه الطريقة من عدة مشاكل أهمها [3]: الاحتكاك والخلوص (backslash) في ميكانيزم نقل الحركة مما يقلل من دقة الحركة، زيادة الوزن والعطالة، زيادة الحجم والتكلفة والتعقيد، كما تسبب بطئاً في الاستجابة الديناميكية للنظام، بالإضافة إلى أن ربط المحركات على التسلسل يزيد من العزوم المطبقة من قبل هذه المحركات. لحل هذه المشاكل قام الباحثون بالسعي لإيجاد محركات متعددة درجات الحرية وذات بنية مدمجة (Compact)، لذلك تم طرح فكرة المحركات الكروية ثلاثية درجة الحرية (Spin, Pan, Tilt) (الشكل (a.1)).



(a) الحركة ثلاثية درجة الحرية (b) روبوت بوما [2]

الشكل رقم (1): الحركة ثلاثية درجة الحرية

مميزات وتطبيقات المحركات الكروية

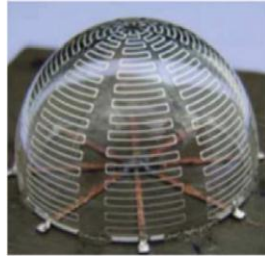
تتغلب المحركات الكروية على المشاكل الناتجة عن ربط مجموعة من المحركات أحادية درجة الحرية مع بعضها البعض وتتميز بما يلي [3]:

- دقة الحركة العالية (High motion precision)
- الحجم المدمج (Compact size)
- انخفاض العطالة وسرعة الاستجابة

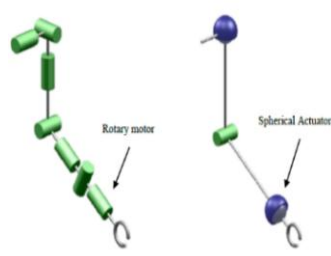
هذه المميزات جعلت المحرك الكروي مناسباً للكثير من التطبيقات، ففي مجال الروبوتيك يمكن أن يستخدم هذا المحرك في مفصل الكتف والرسغ والعيون [4] بالإضافة إلى إمكانية استخدامه في نظام التحكم بارتفاع الأقمار الصناعية، كما يمكن استخدامه في السيارات كحامل ضوء متحرك أو تحريك المرآة الجانبية أو حتى في استبدال العجلات بمحركات كروية كما في السيارات الكهربائية [3]، ويمكن استخدامه في الأطراف الصناعية. بالإضافة للكثير من المجالات التي يمكن أن يستخدم فيها كما يلي:

- أجهزة التوضع بالليزر (الشكل (a.2))، الأذرع الآلية (الشكل (b.2))، الطابعات ثلاثية الأبعاد (الشكل (c.2)).

- آلات التفريز والخراطة (الشكل (f.2))، نظم المراقبة والتحكم بالصورة (الشكل (e.2))، الأطراف الصناعية (الشكل (d.2)).



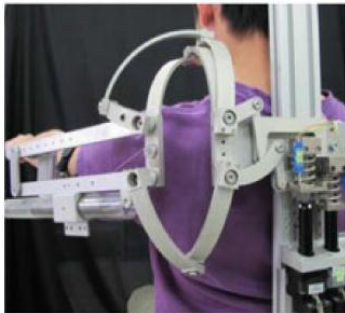
(c) الطابعات ثلاثية الأبعاد [5]



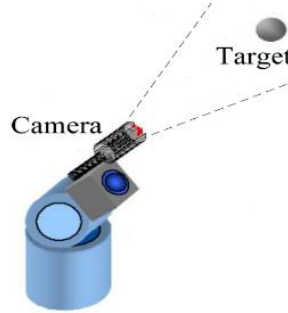
(b) الأذرع الآلية [4]



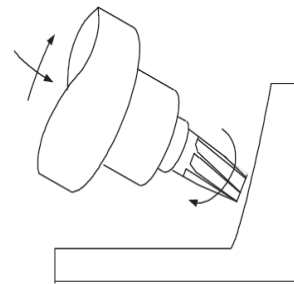
(a) التوضع باستخدام الليزر [3]



(d) الأطراف الصناعية [5]



(e) نظم المراقبة والتحكم بالصورة [6]



(f) آلات التفريز والخراطة [3]

الشكل رقم (2): تطبيقات المحركات الكروية

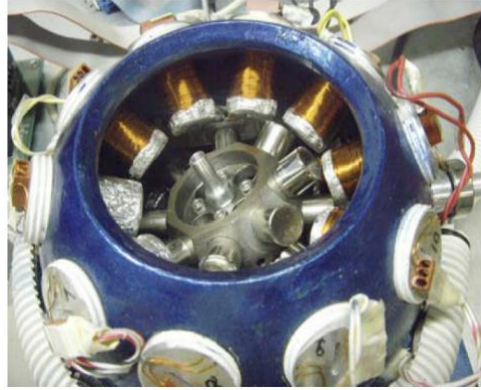
ولكن ما يزال إنتاج المحركات الكروية بشكل تجاري يواجه تحديات كثيرة، بسبب بنية المحركات الكروية المعقدة التي تجعل من ديناميك الحركة معقد وصعب التحليل بالإضافة إلى صعوبات في إيجاد التصميم الأمثل [4]. كما أنّ اللاخطية وعدم الدقة في نموذج المحرك تجعل من عملية التحكم بالمحرك الكروي تشكل تحدياً حقيقياً [3].

أهمية البحث وأهدافه:

تتم أهمية هذا البحث في كونه خطوة هامة وأساسية لتصميم وتصنيع محرك كروي ذي مغناطيس دائم لاستخدامه في التطبيقات الصناعية المختلفة. يهدف هذا البحث إلى دراسة بنية ومبدأ عمل المحرك الكروي ذي المغناطيس الدائم، بناء نموذج رياضي للمحرك الكروي بشقية الكهربائي والميكانيكي، دراسة أثر النفاذية المغناطيسية للثابت والدائر على توزيع الحقل المغناطيسي وعلى شدة العزم الكهربيسي، محاكاة عمل المحرك في بيئة (Matlab/Simulink).

طرائق البحث ومواده:

تم بناء نموذج محاكاة للمحرك الكروي المصمم في جامعة (Georgia Institute of Technology) [5] (الشكل (3))، يبين (الجدول (1)) مواصفات هذا المحرك. تم استخدام بيئة (Matlab/Simulink) في محاكاة نموذج المحرك، قمنا باستخدام برنامج Solidworks لدراسة توزيع الحقل المغناطيسي وحساب العزم الكهربيسي.



الشكل رقم (3): المحرك الكروي المصنع في جامعة Georgia Institute of Technology

الجدول رقم (1): محددات المحرك المصنع في جامعة Georgia Institute of Technology

Rotor PMs poles	يتألف من 16 قطب مغناطيسي موزعة على طبقتين متناظرتين في كل طبقة 8 أقطاب (الشكل (c.4))
magnetization Position	يتحدد موضع الأقطاب المغناطيسية من خلال أشعة موضع r بالاعتماد على الزاويتين التاليتين ((الشكل (7)) $\gamma_r = 20^\circ; \delta_r = 45^\circ$
Cylindrical PM parameters	length=0.5 in, dim = 0.5 in
Rotor radius	76.2 mm (3 inches)
Offset of mass center	انطباق مركز الثقل مع مركز الدائر $\vec{r} = 0$
M. of Inertia, (kg-m2)	$j_a = 6.0576e^{-005}; j_t = 3.8628e^{-005}$ عزم العطالة حول المحور z $j_a = j_z$ عزم العطالة حول المحورين x, y $j_t = j_x = j_y$
Frictional coefficient Cf	0.3 Nm · sec
Air-gap between EM & PM	0.762mm (0.03in)
Stator EMs poles	يتألف من 20 ملف كهربي موزعة على طبقتين متناظرتين في كل طبقة 10 ملفات (الشكل (b.4))
magnetization Position	يتحدد موضع الملفات من خلال أشعة موضع s بالاعتماد على الزاويتين التاليتين ((الشكل (7)) $\gamma_s = 26^\circ; \delta_s = 36^\circ$
EM parameters	length=1 in, dim = 0.75 in, 1050 turns
Coil wire and resistance	29 AWG, 6.46 Ohms
Current limit	$I_{sat} = 1 \text{ Ampere}$

أنواع المحركات الكروية:

إنّ عملية تصنيف المحركات الكروية صعبة نتيجة تنوع التصاميم المقترحة وعدم وجود تصميم ثابت لهذه الأنواع ولكن يمكن تصنيفها بشكل تقريبي كما يلي:

المحركات الكروية الكهراجهادية (ultrasonic spherical motor)، المحركات الكروية التحريضية، المحرك الكروي ذو الممانعة المتغيرة، المحرك الكروي الخطوي، المحرك الكروي ذو المغناطيس الدائم.

تتميز المحركات الكروية ذات المغناطيس الدائم بعدد من المميزات نذكر منها [1]:

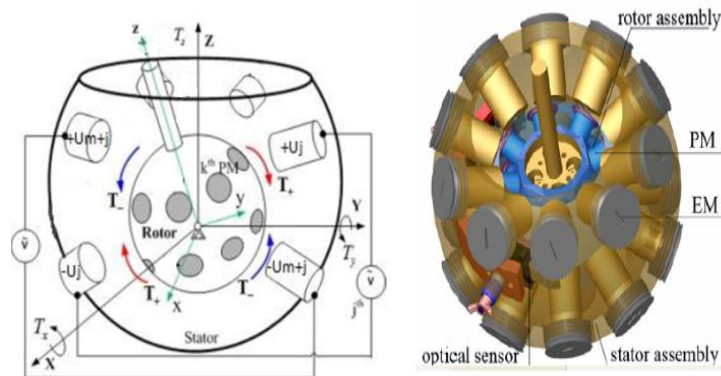
1. مردود أعلى، يلغي الحاجة إلى ملفات توليد الحقل المغناطيسي على الدائر، مما يقلل من الضياعات.
2. نسبة الاستطاعة/ العزم إلى الحجم أفضل من أنواع المحركات الكروية الأخرى.
3. أداء ديناميكي أفضل.
4. كلفة منخفضة نظراً لانخفاض تكلفة المغناط الدائمة (rare-earth PM) في الفترة الأخيرة.

لذلك تم اختيار هذا النوع من المحركات الكروية ليكون مجالاً لبحثنا.

بنية ومبدأ عمل المحرك الكروي ذي المغناطيس الدائم:

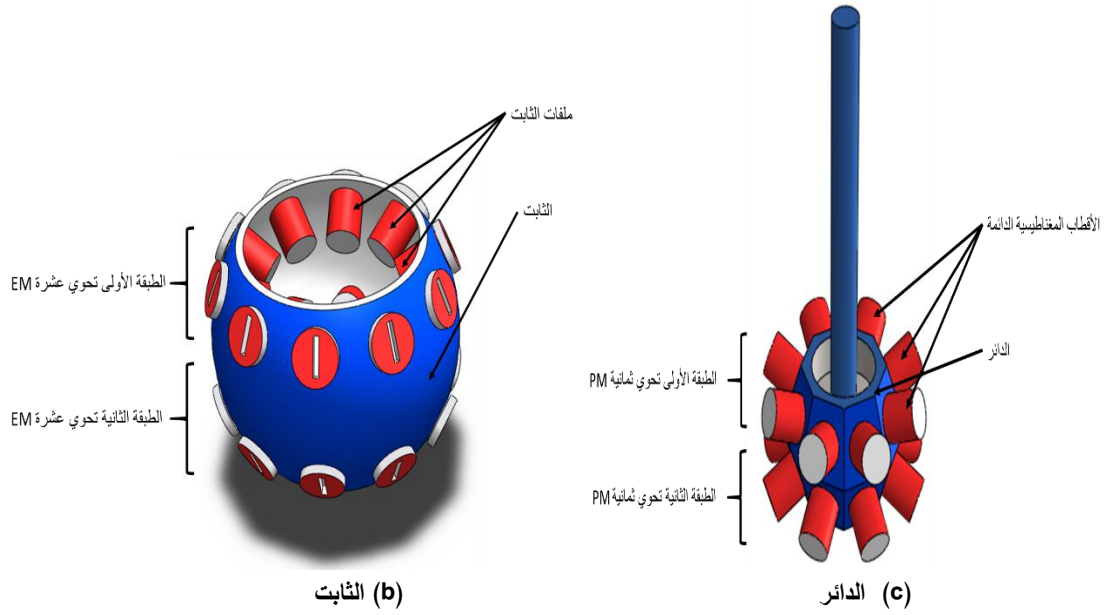
لا يوجد حتى الآن بنية محددة للمحرك الكروي ذو المغناطيس الدائم حيث قام الباحثون باقتراح العديد من البنى للمحرك الكروي ذو المغناطيس الدائم محاولين الحصول على الأداء الأفضل.

تتألف بنية المحرك المدروس (الشكل (a.4)) من جزء ثابت هو كرة مجوفة مفتوحة من الأعلى ما يتيح لمحور الدائر بالتحرك بثلاث درجات حرية (مغزلي، ميلان، دوران افقي عمودي) (Pan, Tilt, Spin). يتوضع على الجزء الثابت 20 ملف كهربيائي (EM) Electromagnet (الشكل (b.4)). تتوزع الملفات على شكل طبقتين متناظرتين (طبقة في الجزء العلوي وطبقة في الجزء السفلي) وتوصل هذه الملفات على شكل أزواج بحيث يتم وصل كل ملف من الطبقة العلوية مع الملف المقابل من الطبقة السفلية (الشكل (d.4)). يتألف الجزء الدائر من حامل معدني يتوضع عليه 16 من الأقطاب المغناطيسية الدائمة (PM) Permanent magnet (الشكل (c.4)). يثبت الجزء الدوار باستخدام رولمان عام على طبقتين متناظرتين وبشكل متناوب (شمالي، جنوبي) (الشكل (c.4)). يثبت الجزء الدوار باستخدام رولمان عام (Universal Bearing) بحيث يكون مركز الدائر متطابق مع مركز الثابت ويتيح مجال حركة بثلاث درجات حرية. بشكل عام يتم تحديد عدد الملفات والأقطاب الدائمة بحسب الدقة والعزم المطلوبين.



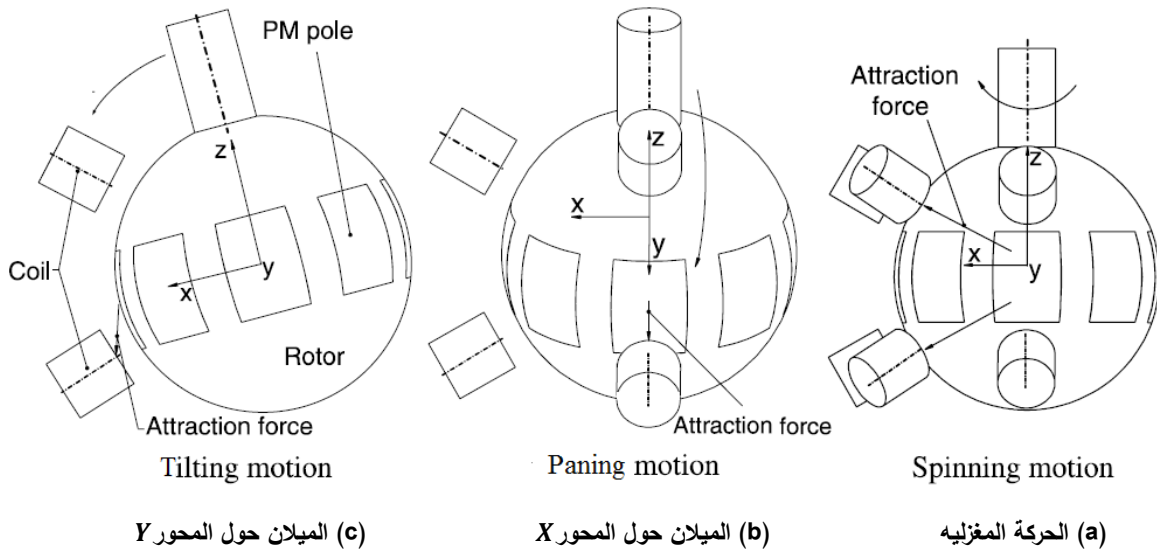
(d) وتوصيل ملفات الثابت

(a) المحرك الكروي الكامل



الشكل رقم (4): بنية المحرك المدروس

يعتمد مبدأ عمل المحركات الكروية ذات المغناطيس الدائم على مبدأ التجاذب والتنافر بين الحقول المغناطيسية للملفات والأقطاب المغناطيسية الدائمة. يمكن الحصول على حركة كروية ضمن فضاء عمل المحرك من خلال التحكم بتيارات ملفات ثابت المحرك. عند تفعيل ملفين بنفس الاتجاه من الطبقتين يميل الدائر في اتجاه الملفين المفعلين أي دوران حول أحد المحورين X, Y (Tilt, Pan) (الشكل (b,c,5))، وعند تفعيل كامل الملفات يدور الدائر حول محورة Z (spin) (الشكل (a,5))، يعمل هذا المحرك بالاعتماد على قطار نبضات بحسب الحركة المطلوبة.



الشكل رقم (5): مبدأ عمل المحركات الكروية ذات المغناطيس الدائم

يظهر (الشكل (6)) مقطع عرضي في المحرك الكروي المقترح [5]، يتم توصيل كل زوج من الملفات على التسلسل وبقطبية متعاكسة (الشكل (d.4)). عند إعطاء التغذية للزوج Uj يتولد قطب شمالي N في الملف العلوي المقابل للطرف الشمالي N للقطب المغناطيسي العلوي ويتولد قطب جنوبي S في الملف السفلي المقابل للطرف الجنوبي للقطب المغناطيسي السفلي، بسبب ذلك تولد قوى تتأثر بين الملفات المفعلة وبين الأقطاب المغناطيسية المقابلة. يولد ذلك مزدوجة عزم كهربي $T +$ تسبب ميلان الدائر عن المحور Z (أي الدوران حول المحور Y العمودي على مستوى سطح الورقة) بزاوية تتناسب وشدة التيار المار في زوج الملفات. عند إعطاء التغذية للزوج $Um + j$ يتولد قطب شمالي N في الملف العلوي المقابل للطرف الشمالي N للقطب المغناطيسي العلوي ويتولد قطب جنوبي S في الملف السفلي المقابل للطرف الجنوبي S للقطب المغناطيسي السفلي، يؤدي ذلك لتوليد مزدوجة عزم كهربي $T -$ تسبب ميلان الدائر عن المحور Z بالاتجاه المعاكس للاتجاه السابق. وعند إعطاء التغذية لكلا الزوجين $Um + j, Uj$ يتولد مزدوجتي عزم $T +, T -$ يلغيان بعضهما ويبقى الدائر ثابت، لتحريك الدائر إلى نقطة توازن جديدة يجب تطبيق عزم قيادة. يمكن توليد عزم قيادة ΔT من خلال تغيير شدة التيارات المارة في الملفات. يمكن كتابة علاقة العزم بالشكل التالي [6]:

$$T_i = T_{i+} + T_{i-} + \Delta T_i \quad (1)$$

$$T_{i+} = (T_i \pm \Delta T_i) / 2 \quad \text{AND} \quad T_{i-} = (T_i \mp \Delta T_i) / 2$$

حيث i تشير إلى مركبات العزم (X, Y, Z)

T_{i-}, T_{i+} عزم الثبات (static torque)

ΔT_i عزم القيادة (driving torque)

تم قسمة كل من T_{i-}, T_{i+} على 2 لأنهما يجب أن يكونا متساويين (كل منهما نصف العزم الكلي المطبق) ومتعاكسين حتى يلغيان بعضهما ويستقر الدائر في نقطة التوازن الجديدة

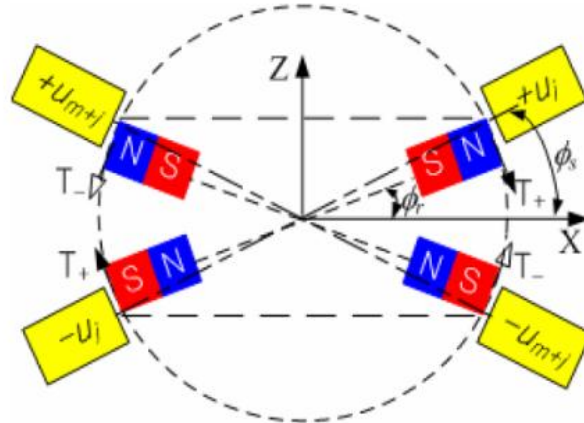
عزم القيادة ΔT_i هو الذي يحرك الدائر إلى موضع محدد (α, β) . حتى يستقر الدائر يجب تطبيق عزم الثبات

$$T_{i-}, T_{i+} \neq 0 \quad \text{أي يجب تطبيق عزم لا يساوي الصفر}$$

حتى يستقر المحرك في موضع محدد يجب أن يحقق ما يلي:

$$T + T_L = 0 \quad \Delta T = 0 \quad \text{and} \quad \|T_+\| = -\|T_-\| \neq 0 \quad (2)$$

حيث T_L عزم الحمل. يمكن تحريك الدائر إلى أي موضع بتوليد عزم قيادة ΔT بالاتجاه المناسب وبالقيمة المناسبة وحتى يستقر في هذه النقطة يجب أن ينعدم عزم القيادة ويطبق عزم الثبات T_-, T_+ ليحافظ على الاستقرار في هذه النقطة. يمكن الحصول على حركة دورانية مغزليه (spin) عند موضع معين بالمحافظة على المركبة ΔT_z من عزم القيادة ΔT ليحقق حركة الدوران المطلوبة بالإضافة لتوليد عزم الثبات T_-, T_+ الذي يحافظ على الاستقرار في هذه النقطة.



الشكل رقم (6): مقطع عرضي في المحرك الكروي المدروس

نمذجة المحرك الكروي ذو المغناطيس الدائم:

1. نمذجة العزم الكهرطيسي باستخدام طريقة توابع النواة (Kernel Functions)

بهدف الحصول على نموذج للعزم الكهرطيسي قابل للحساب بالزمن الحقيقي استخدمنا طريقة تابع النواة [7]. يوصف نموذج تابع النواة العزم بشكل تحليلي (closed form) وفق علاقة رياضية لحالة زوج (PM-EM) كتابع للوضع النسبي بين زوج الأقطاب الدائمة للدائر وزوج ملفات الثابت، يمثل تابع النواة العزم الكهرطيسي المتولد من تفاعل زوج (PM-EM) كتابع للوضع النسبي بين زوج الأقطاب الدائمة للدائر وزوج ملفات الثابت، ويتعميم العزم الناتج عن حالة زوج (PM-EM) (تابع النواة) على كل الملفات والأقطاب نحصل على العزم الكلي.

لتحديد الموضع النسبي بين الملفات والأقطاب المغناطيسية يتم تعريف أشعة الموضع التالية [8]:

s : شعاع الموضع للملفات m_s تحسب بالاعتماد على الزاويتين γ, δ (الشكل (7)) في جملة إحداثيات الثابت (XYZ) باستخدام العلاقة التالية:

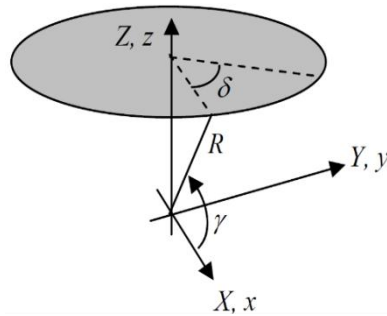
$$s_i = [\cos\gamma_s \cos(j-1)\delta_s \quad \cos\gamma_s \sin(j-1)\delta_s \quad \sin\gamma_s]^T \quad (3)$$

where $j = 1, 2, 3, \dots, m_s$

r : شعاع الموضع للأقطاب المغناطيسية m_r في جملة إحداثيات الدائر (xyz) باستخدام العلاقة التالية:

$$r_i = (-1)^i [\cos\gamma_r \cos(i-1)\delta_r \quad \cos\gamma_r \sin(i-1)\delta_r \quad \sin\gamma_r]^T \quad (4)$$

where $i = 1, 2, 3, \dots, m_r$



الشكل رقم (7): زوايا توضع الأقطاب والملفات

يتم أخذ حالة زوج من الأقطاب المغناطيسية الدائمة للدوائر وزوج من ملفات الثابت (الشكل (8)). يتم إيجاد تابع النواة المكافئ ℓ لهذه الحالة باستخدام إحدى الطرق التقليدية (العناصر المنهية، قوة لورنتز، تتسور اجهاد مكسويل، الطاقة المختزنة....). تحسب قيمة تابع النواة من أجل كل المواضع النسبية λ بين الملف والقطب المغناطيسي، ثم يتم إجراء تقريب (curve fitting) لهذه القيم واستنتاج تابع النواة المكافئ.

يتحدد الوضع النسبي بين الملف والقطب المغناطيسي من خلال الزاوية ρ بين شعاع الموضع للملف s وشعاع الموضع للقطب المغناطيسي r (الشكل (8)). بما أن الدائر يتحرك بثلاث درجات حرية فنحن بحاجة لتحديد موضع الأقطاب المغناطيسية بالنسبة للثابت بشكل دائم لذلك نستخدم مصفوفة الدوران باستخدام زوايا اولر (α, β, γ) وفق تسلسل xyz:

$$\begin{aligned} r_{XYZ} &= \Gamma^T r_{xyz} \\ \begin{Bmatrix} \vec{i} \\ \vec{j} \\ \vec{k} \end{Bmatrix} &= [\Gamma]^T \begin{Bmatrix} \vec{i} \\ \vec{j} \\ \vec{k} \end{Bmatrix} \\ \Gamma &= [R_\gamma][R_\beta][R_\alpha] \end{aligned} \quad (5)$$

يحسب شعاع خصائص العزم (Torque Characteristic Vector (TCV)) كما يلي:

$$K = m\ell(\lambda)\vec{e}_c \quad (6)$$

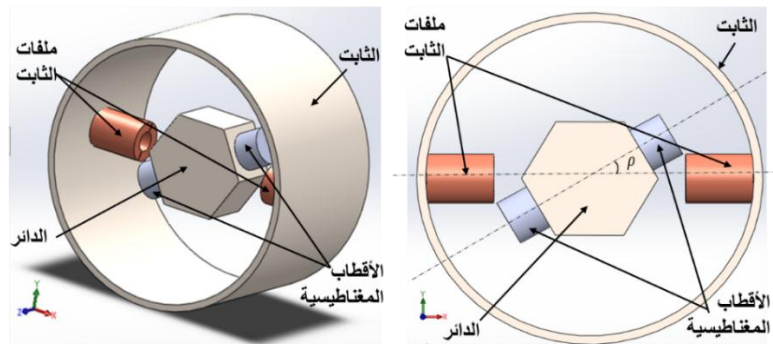
$$\lambda = |s|\rho, \text{ where } \rho = \cos^{-1}\left(\frac{r \cdot s}{|r||s|}\right) \text{ and } \vec{e}_c = \frac{r \times s}{|r \times s|}$$

r, s : أشعة الموضع للملفات والأقطاب المغناطيسية.

$\ell(\lambda)$: تابع النواة الخاص بالمحرك الكروي.

ρ : الزاوية بين r, s .

m : مغناطيسية القطب المغناطيسي.



الشكل رقم (8): محاكاة زوج من الأقطاب المغناطيسية الدائمة للدوائر وزوج من ملفات الثابت

بتعميم حالة زوج (مغناطيس، ملف) يتم حساب TCV الناتج عن تفاعل الملف EM j^{th} مع كل الأقطاب المغناطيسية كما يلي [7]:

$$\begin{aligned} K_j &= \sum_{K=1}^{N_p} m_K \ell(\lambda_{jk}) \vec{e}_c \\ \lambda_{ij} &= |s_j| \rho_{ij}, \text{ where } \rho_{ij} = \cos^{-1}\left(\frac{r_i \cdot s_j}{|r_i||s_j|}\right) \text{ and } \vec{e}_{cj} = \frac{r_i \times s_j}{|r_i \times s_j|} \end{aligned} \quad (7)$$

بالتالي يصبح عزم المحرك الكلي كما يلي:

$$T_A = [T_x \quad T_y \quad T_z]^T = [K]u \quad (8)$$

Where

$$[K](\in \mathcal{R}^{3 \times N_E}) = [K_1 \quad \dots \quad K_j \quad \dots \quad K_{N_E}]$$

And

$$u = [u_1 \quad \dots \quad u_j \quad \dots \quad u_{N_E}]^T$$

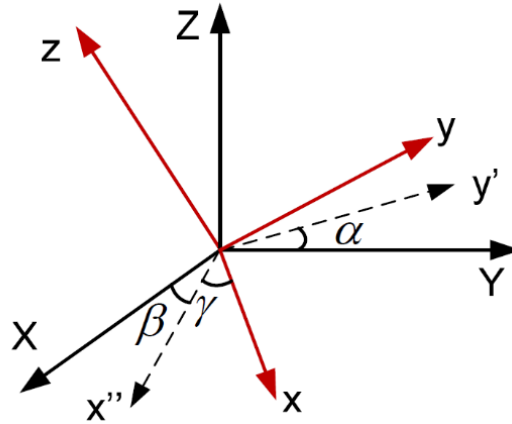
u : التيار

باستخدام نموذج العزم العكسي يمكن حساب التيارات التي تولد العزم المطلوب كما يلي:

$$u = [K]^T ([K][K]^T)^{-1} T \quad (9)$$

2. نمذجة ديناميك الحركة للمحرك الكروي

تعتبر عملية النمذجة الديناميكية للمحرك الكروي مهمة جداً من أجل توصيف حركة المحرك الكروي متعدد درجات الحرية [9] [10]. يقوم النموذج الديناميكي بتحديد حركة الدائر الناتج عن تطبيق العزم الكهربي المحسوب من نموذج العزم الكهربي السابق. يشابه ديناميك الحركة للمحرك الكروي ديناميك الحركة لذراع روبوت بثلاث درجات حرية. لتوصيف ديناميك الحركة نعزف جملتي إحداثيات، جملة إحداثيات ثابتة مقترنة بالثابت XYZ وجملة إحداثيات متحركة مقترنة بالدائر xyz (الشكل (9)) [5]. في الحالة الابتدائية تكون جملة إحداثيات الدائر منطبقة على جملة إحداثيات الثابت بالتالي زوايا اولر $\alpha = \beta = \gamma = 0$. للوصول الى أي نقطة في فضاء العمل الخاص بالمحرك الكروي يمكن أن نستخدم ثلاث دورانات وفق تسلسل xyz، حيث يدور أولاً حول المحور X، بزواوية α ، بعد ذلك يدور الدائر حول المحور y' (المحور الجديد الناتج عن الدوران الأول) بزواوية β ، ثم بعد ذلك يدور حول Z الجديدة بزواوية γ .



الشكل رقم (9): ديناميك حركة الدائر

يتم نمذجة ديناميك حركة المحرك الكروي باستخدام طريقة أولر-لاجرانج [11]. تعتمد هذه الطريقة على علاقة لاجرانج التي تمثل الفرق بين الطاقة الحركية والطاقة الكامنة كما في العلاقة التالي:

$$L = T_K - U_P \quad (10)$$

T_K : الطاقة الحركية، U_P : الطاقة الكامنة

تعطى معادلة أولر-لاجرانج التي تحدد العلاقة بين تابع لاجرانج والعزم بالعلاقة التالية:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}'} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = T \quad (11)$$

بحل هذه المعادلة نحصل على نموذج العزم الديناميكي بالشكل التالي:

$$[M]\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} = T \quad (12)$$

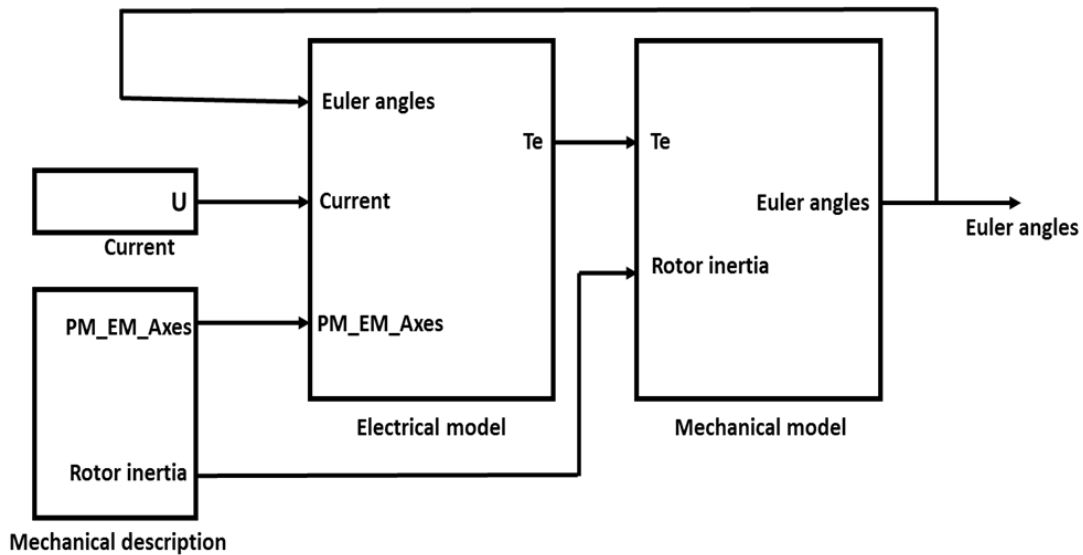
$$[M] = \begin{bmatrix} I_t C_\beta^2 + I_a S_\beta^2 & 0 & I_a S_\beta \\ 0 & I_t & 0 \\ I_a S_\beta & 0 & I_a \end{bmatrix}$$

$$C(q, \dot{q})\dot{q} = \begin{bmatrix} 2I_a \alpha' \beta' S_\beta C_\beta + I_a \beta' \gamma' C_\beta - 2I_t \alpha' \beta' C_\beta S_\beta \\ I_t \alpha'^2 C_\beta S_\beta - I_a \alpha'^2 C_\beta S_\beta - I_a \alpha' \gamma' C_\beta \\ I_a \alpha' \beta' C_\beta \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} C_\gamma C_\beta & -S_\gamma C_\beta & S_\beta \\ S_\gamma & C_\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}$$

النتائج والمناقشة:

تم تمثيل وبناء نموذج المحرك الكروي في بيئة MATLAB، تم بناء محاكاة نموذج العزم الكهربي للمحرك باستخدام طريقة تابع النواة؛ وبناء محاكاة النموذج الميكانيكي بطريقتين الأولى باستخدام نموذج أولر-لاجرانج والثانية باستخدام مكتبة Simmechanic في الماتلاب، يظهر (الشكل (10)) المخطط الصندوقي لمحاكاة عمل المحرك الكروي في الحلقة المفتوحة.



الشكل رقم (10): المخطط الصندوقي لمحاكاة عمل المحرك الكروي في الحلقة المفتوحة

يتألف هذا المخطط من الكتل التالية:

▪ وحدة توليد التيارات (currents):

تقوم هذه الوحدة بتوليد تيارات ملفات ثابت المحرك الكروي بحيث يمكن التحكم بموضع وسرعة المحرك بالحلقة المفتوحة من دون وجود تغذية راجعة لهذه الوحدة.

▪ **وحدة التوصيف الميكانيكي (Mechanical_discription):**

تعرف هذه الوحدة محددات النموذج الديناميكي للحركة، (الجدول(1)). كما تقوم هذه الكتلة بتعريف موضع الأقطاب المغناطيسية للدوائر ضمن جملة الأحداثيات المرتبطة بالدوائر (المعادلة(4))، وأقطاب الثابت ضمن جملة الأحداثيات المرتبطة بالثابت (المعادلة(3)).

▪ **وحدة النموذج الكهربائي (Electrical Model):**

تقوم وحدة النموذج الكهربائي بحساب العزم الكهرطيسي بالاعتماد على نموذج العزم باستخدام طريقة توابع النواة المذكورة. تسمح هذه الطريقة بكتابة عزم المحرك كتابع رياضي للتيار مما يسمح بتنفيذ التحكم بالزمن الحقيقي. دخل هذه الكتلة هو تيارات ملفات الثابت، مواضع أقطاب الدائر والثابت، وزوايا دوران دائر المحرك اللازمة لتحديث مواضع أقطاب الدائر بالنسبة للثابت بعد حركة الدائر. تعتمد هذه الطريقة على إيجاد العلاقة بين العزم والتيار كتابع للوضع النسبي بين أقطاب الدائر المغناطيسية وملفات الثابت (معادلة (7)).

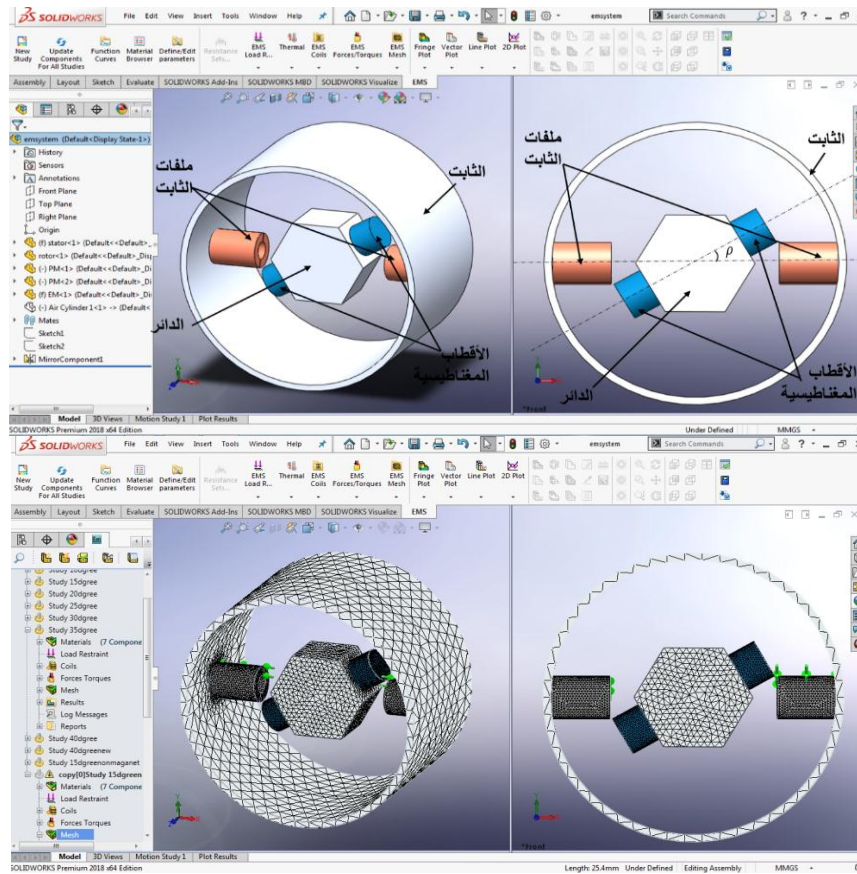
لإيجاد تابع النواة قمنا بإجراء محاكاة باستخدام برنامج solidworks لحالة مكونة من زوج من الأقطاب المغناطيسية الدائمة للدائر وزوج من ملفات الثابت (الشكل(11)). بدايةً قمنا بدراسة أثر النفاذية المغناطيسية للثابت والدائر على توزيع الحقل المغناطيسي وعلى شدة العزم الكهرطيسي. يظهر (الشكل(12))، توزيع الحقل المغناطيسي من أجل معامل نفاذية مرتفع ومعامل نفاذية منخفض للثابت والدائر. ويظهر الجدولان (الجدول (2)) (الجدول (3)) مركبات العزم الكهرطيسي في الحالتين. نلاحظ أن قيمة العزم الكهرطيسي تزداد في حالة معامل النفاذية المغناطيسية المرتفع. في الواقع تقوم المادة ذات معامل النفاذية المرتفع بتقليل التسريب المغناطيسي وتزيد من قيمة المركبة القطرية للحقل المغناطيسي التي تولد العزم الفعال. نلاحظ من (الشكل(12)) أنّ خطوط الحقل المغناطيسي تكون شبه عمودية عند الانتقال من الهواء إلى الثابت والدائر في حالة معامل النفاذية المرتفع بحيث تحقق شروط الحدود التي تنص على أن الحد الفاصل بين منطقتين ذاتي نفاذية مغناطيسية مختلفة يجب أن يحقق ما يلي:

$$B_1 \cdot n = B_2 \cdot n \quad (13)$$

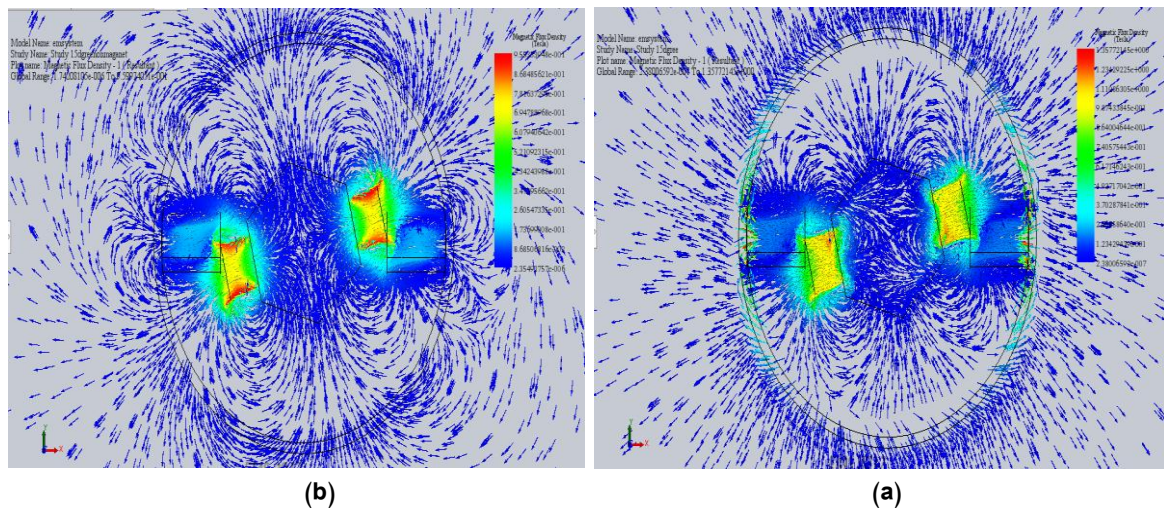
الشرط الثاني: يجب أن تبقى المركبة الناطمية لكثافة الحقل المغناطيسي مستمرة على طول الحد الفاصل

$$(H_1 - H_2) \times n = 0 \quad (14)$$

وهذا ما يسبب زيادة المركبة r للحقل المغناطيسي وبالتالي زيادة العزم. حيث أن 1,2 تدلان على منطقتين ذاتي نفاذية مغناطيسية مختلفة



الشكل رقم (11): محاكاة زوج من الأقطاب المغناطيسية الدائمة للدائر وزوج من ملفات الثابت باستخدام برنامج solidworks



(a) حالة الدائر والثابت من مادة ذات نفاذية مغناطيسية عالية (b) حالة الدائر والثابت من مادة ذات نفاذية مغناطيسية منخفضة

الشكل رقم (12): محاكاة توزيع الحقل المغناطيسي باستخدام برنامج solidworks

الجدول رقم (2): مركبات العزم في حالة الثابت والدائر من مادة ذات نفاذية مغناطيسية عالية

من أجل $\rho = 15^\circ$	T_x	T_y	T_z
Torque (N.m)	-0.00057224	0.0002646	0.43264

الجدول رقم (3): مركبات العزم في حالة الثابت والدائر من مادة ذات نفاذية مغناطيسية منخفضة

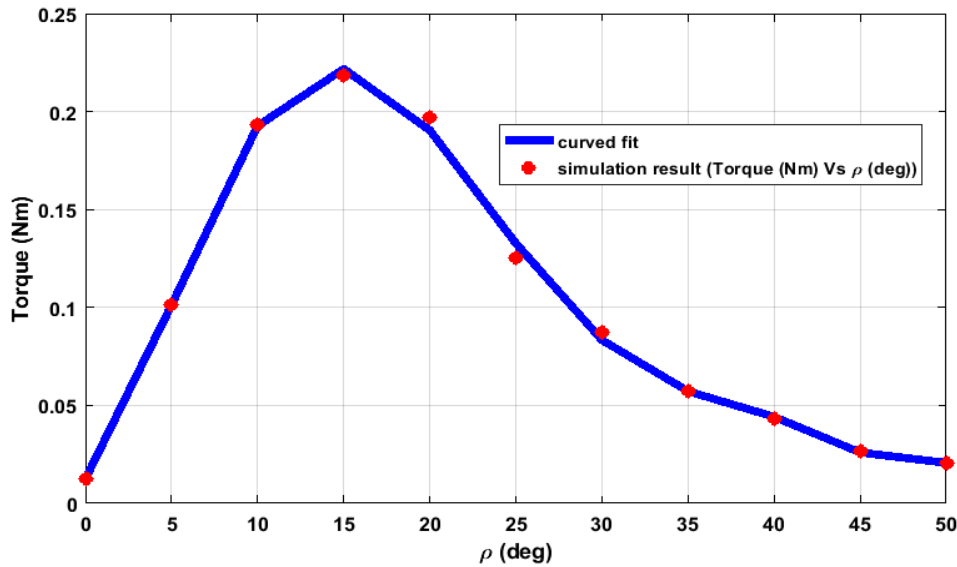
من أجل $\rho = 15^\circ$	T_x	T_y	T_z
Torque (N.m)	0.00019213	0.0030371	0.37792

للحصول على تابع النواة نستخدم نفس المواد المغناطيسية المستخدمة في تصنيع المحرك الكروي المدروس ونوجد قيم العزم الكهربي من أجل قيم مختلفة للزاوية ρ . يظهر (الجدول (4)) قيم العزم من أجل قيم مختلفة للزاوية ρ .

الجدول رقم (4): قيم العزم من أجل قيم مختلفة لـ ρ

p (degree)	T_z	T_y	T_x	T
0	-0.012561	0.0005141	0.0003331	0.01257593
5	0.10124	-0.0037948	0.0007849	0.101314136
10	0.19324	-0.0006293	0.0003166	0.193241284
15	0.21855	-0.0040094	0.0007055	0.218587912
20	0.19728	0.0017636	-0.0004366	0.197288366
25	0.12508	0.0007076	-0.0004213	0.125082711
30	0.087407	0.003661	-0.0019448	0.08750525
35	0.057095	-0.0018635	0.0011281	0.057136541
40	0.042726	-0.0037167	0.0028064	0.042979074
45	0.026474	0.0017425	-0.002027	0.026608602
50	0.020576	-0.0001448	-4.809E-05	0.020576566

يظهر (الشكل (13)) العزم الكهربي كتابع للزاوية بين أقطاب الثابت وأقطاب الدائر وذلك نتيجة للمحاكاة التي قمنا بها.



الشكل رقم (13): العزم الكهرطيسي كتابع للزاوية بين زوج من أقطاب الدائر وزوج من أقطاب الثابت،

يمكننا الحصول على تابع النواة وذلك بإجراء تقريب لعلاقة العزم كتابع للزاوية بين أقطاب الدائر والثابت، ومن ثم استخدامها في تمثيل ومحاكاة العزم الكهرطيسي للمحرك. بإجراء التقريب نحصل على تابع النواة التالي:

$$\ell(\rho) = a_1\rho^7 + a_2\rho^6 + a_3\rho^5 + a_4\rho^4 + a_5\rho^3 + a_6\rho^2 + a_7\rho + a_8 \quad (15)$$

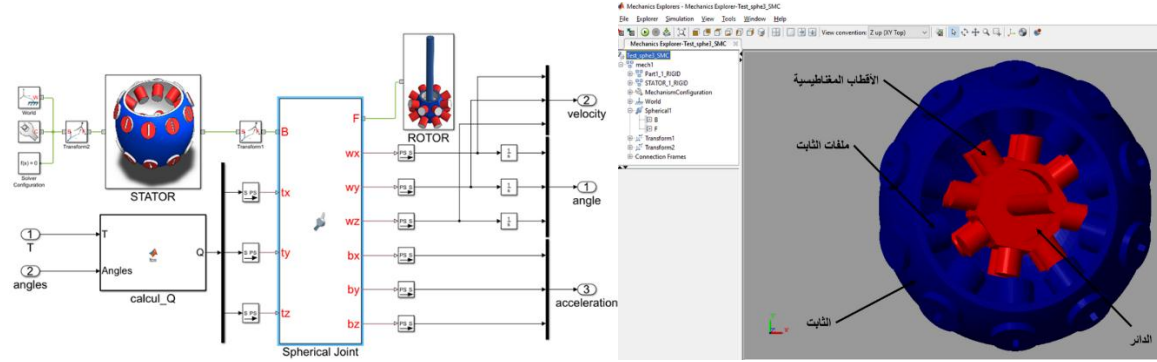
$$a_1=29.74, a_2=-40.65, a_3=-36.87, a_4=93.78, a_5=-56.55, a_6=10.43, a_7 = 0.4758$$

$$a_8 = 0.01262$$

نلاحظ أن العزم الكهرطيسي ينخفض مع زيادة الزاوية ρ بين شعاع الموضع للملف S وشعاع الموضع للقطب المغناطيسي r بسبب التباعد بين الملفات والاقطاب المغناطيسية ما يؤدي لانخفاض قوى التجاذب والتنافر بينهما.

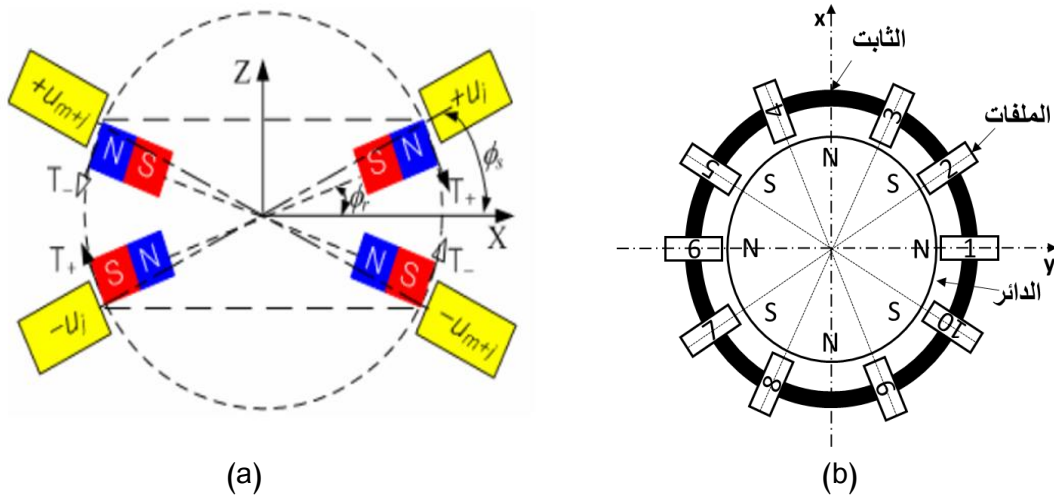
▪ وحدة النمذج الميكانيكي (Mechanical Model):

تقوم وحدة النمذج الميكانيكي بتوصيف ديناميك الحركة. دخل هذه الوحدة هو خرج كتلة النمذج الكهربائي وهو العزم الكهرطيسي، بالإضافة لعزوم عطالة الدائر، وخرج هذه الكتلة زوايا دوران دائر المحرك. تم محاكاة ديناميك الحركة باستخدام معادلة اولر لاغرانج المذكورة سابقاً (المعادلة (12)). قمنا كذلك ببناء نمذج ميكانيكي للمحرك (الشكل (14)) باستخدام برنامج solidworks يمكننا من حساب بارامترات النمذج الميكانيكي للمحرك عند أي تعديل على بنية المحرك، ومن محاكاة عمل المحرك عند شروط عمل مختلفة. يوصف هذا النمذج حركة الدائر بالنسبة للثابت من خلال إضافة قيد تركز بين الدائر والثابت وهو ما يسمح للدائر بالتحرك بثلاث درجات حرية. بالاعتماد على هذا النمذج تم بناء محاكاة للجزء الميكانيكي باستخدام مكتبة Simmechanic في الماتلاب. تم استخدام الرابطة الكروية الموجودة في مكتبة Simmechanic (Spherical joint) لتربط بين الجزء الدائر والجزء الثابت باعتبار أن جملة إحداثيات الثابت منطبقة على جملة الإحداثيات المرجعية. يتم التحكم بالرابطة الكروية باستخدام العزم الكهرطيسي T القادم من النمذج الكهربائي، وقد أظهرت نتائج المحاكاة تطابق النمذج المبني باستخدام اولر لاغرانج مع النمذج المبني باستخدام Solidworks&Simmechanic.



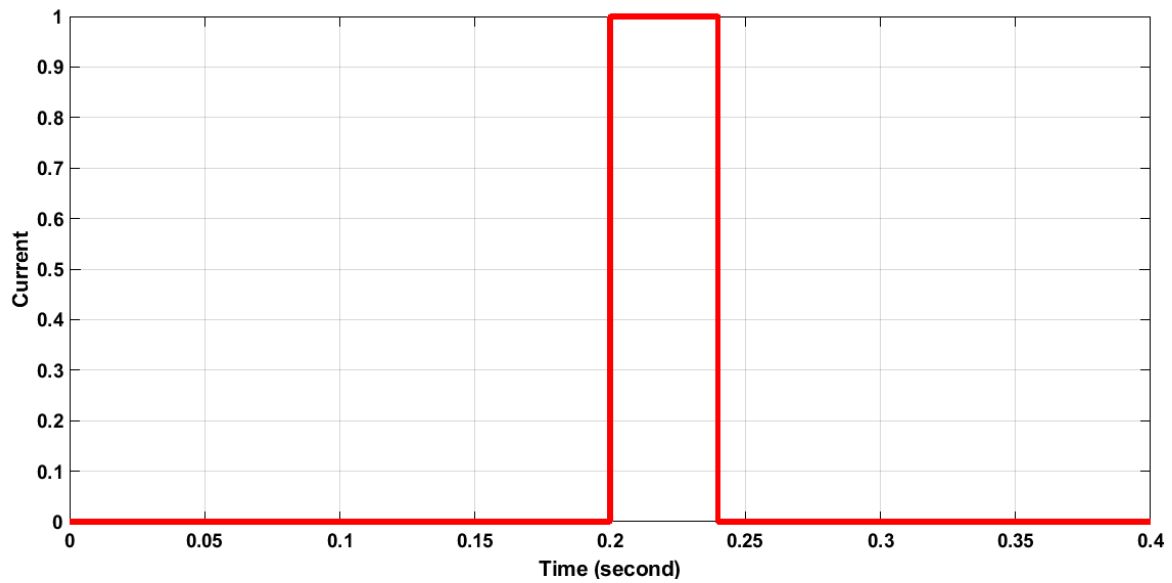
الشكل (14): محاكاة ديناميك الحركة باستخدام مكتبة Simmechanic

لفهم وإيضاح مبدأ عمل المحرك الذي ذكرناه سابقاً، نقوم بتغذية أزواج ملفات الثابت بتيارات ذات قطبية مناسبة بحيث يعمل المحرك وفق مبدأ التجاذب والتنافر المغناطيسي. نبدأ بدراسة حركة الميلان. يظهر (الشكل (b.15)) مقطع أفقي في المحرك الكروي عند الحالة البدائية لموضع المحرك الكروي. في الحالة البدائية تنطبق جملة إحداثيات الدائر مع جملة إحداثيات الثابت، ويتقابل زوجي الملفات 1,6 مع زوجين من الأقطاب المغناطيسية بشكل مباشر. نلاحظ أنّ زوج الملفات 1 يقابل زوج الملفات Uj ، وزوج الملفات 6 يقابل زوج الملفات $Um + j$ من الحالة المدروسة سابقاً (الشكل (a.15)).

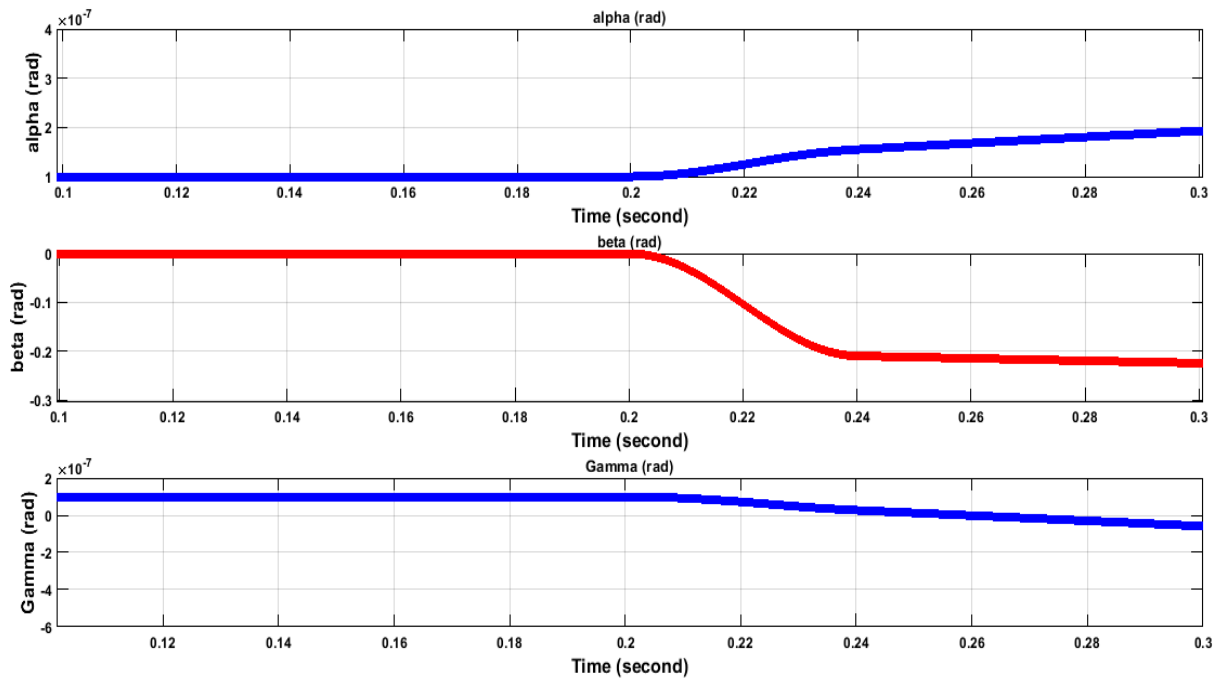


الشكل رقم (15): المقطعين الأفقي والجانب في المحرك الكروي، (b) مقطع أفقي في المحرك الكروي، (a) مقطع جانبي في المحرك الكروي

نقوم بتفعيل زوج الملفات 1 بالنبضة الموضحة (بالشكل (16)). تتولد مزدوجة عزم تسبب ميلان الدائر حول المحور y بزاوية $\beta = -13.75^\circ = -0.24Rad$ ، (الشكل (17)). عند تفعيل زوج الملفات 6 بنفس النبضة تتولد مزدوجة عزم تتسبب بميلان الدائر حول المحور y بالاتجاه المعاكس وبنفس الزاوية $\beta = +13.75^\circ = +0.24Rad$ ، (الشكل (18)). عند تفعيل الزوجين 1,6 تتولد مزدوجتي عزم متعاكستين تلغيان بعضهما بعضاً ويبقى الدائر ثابتاً في مكانه، (الشكل (19)).

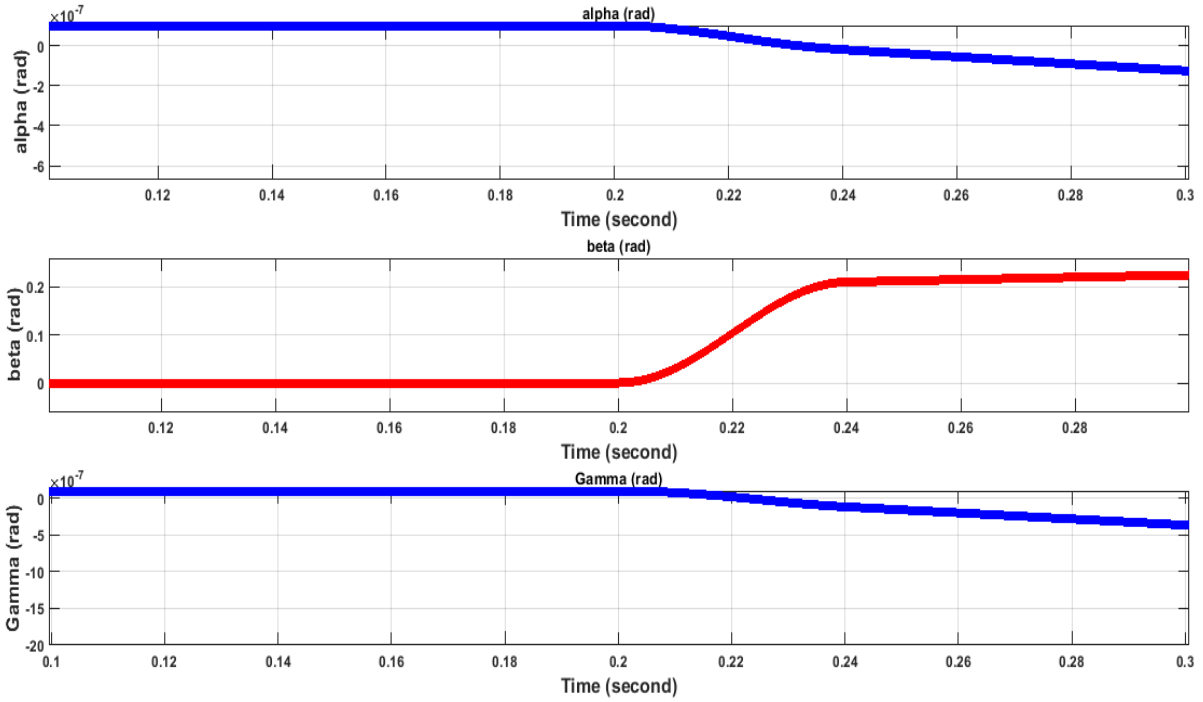


الشكل رقم (16): إشارة التيار المستخدمة لقيادة ملفات الثابت، حالة ميلان



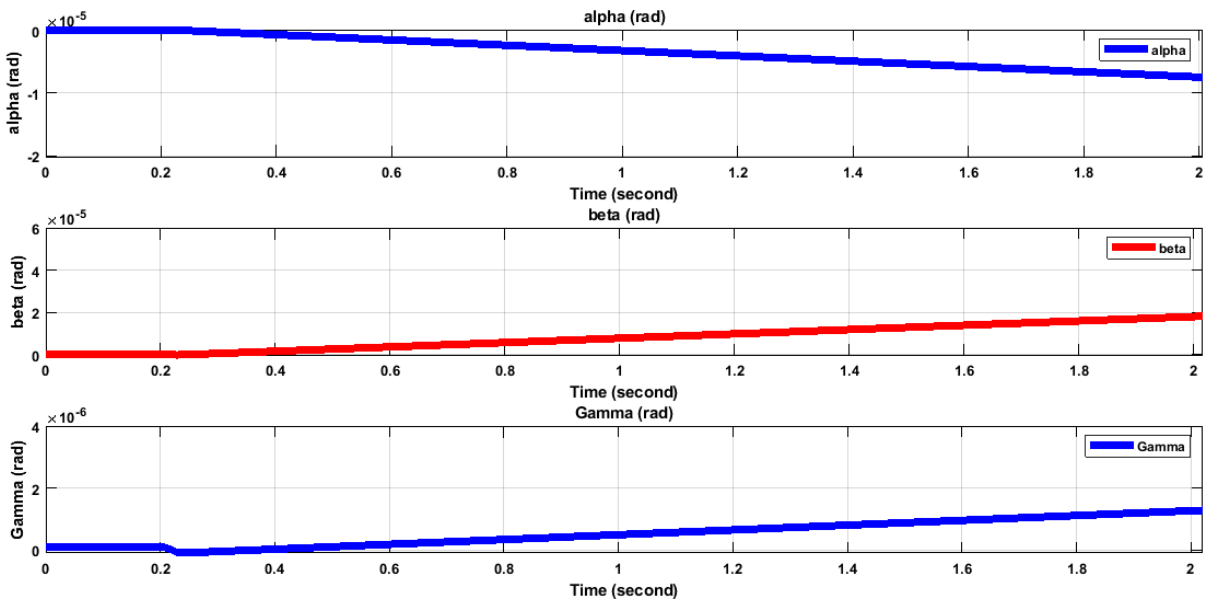
الشكل رقم (17): استجابة موضع المحرك لإشارة تيار زوج الملفات 1

عندما نقوم بتفعيل زوج الملفات 1 نلاحظ أن المحرك يميل حول المحور y بزاوية $\beta = -0.24\text{Rad}$ في حين أن الزوايا α, γ شبة معدومة ومن رتبة 10^{-7}



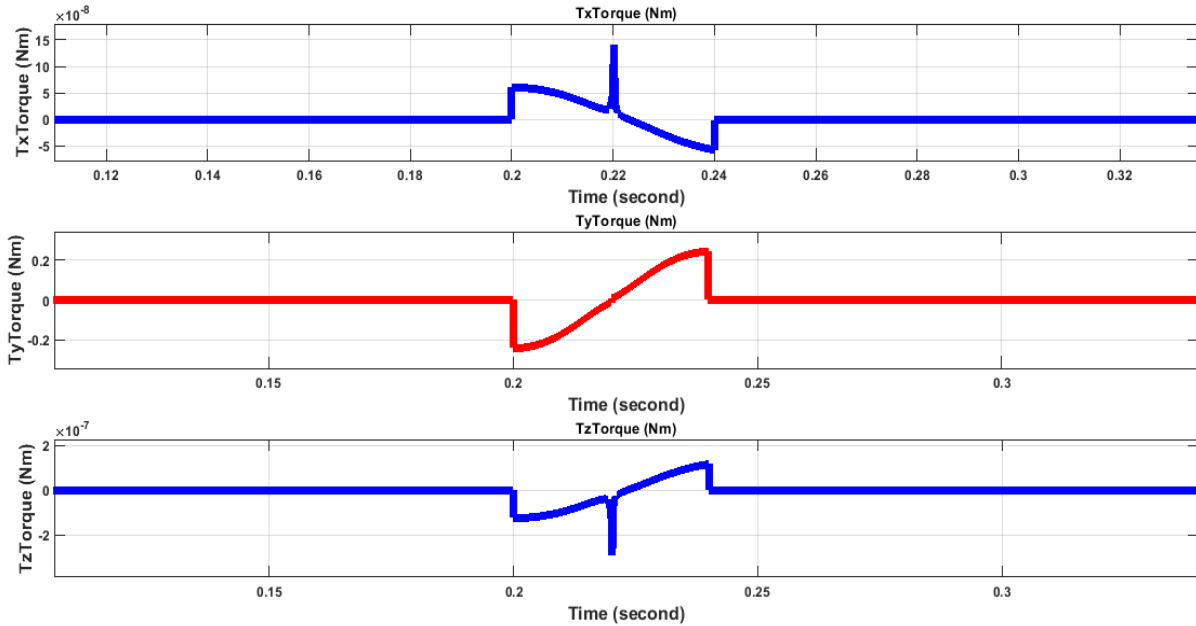
الشكل رقم (18): استجابة موضع المحرك لإشارة تيار زوج الملفات 6

عندما نقوم بتفعيل زوج الملفات 6 نلاحظ أن المحرك يميل حول المحور y بالاتجاه المعاكس وبنفس الزاوية $\beta = 0.24 \text{ Rad}$ في حين أن الزوايا α, γ شبة معدومة ومن رتبة 10^{-7}



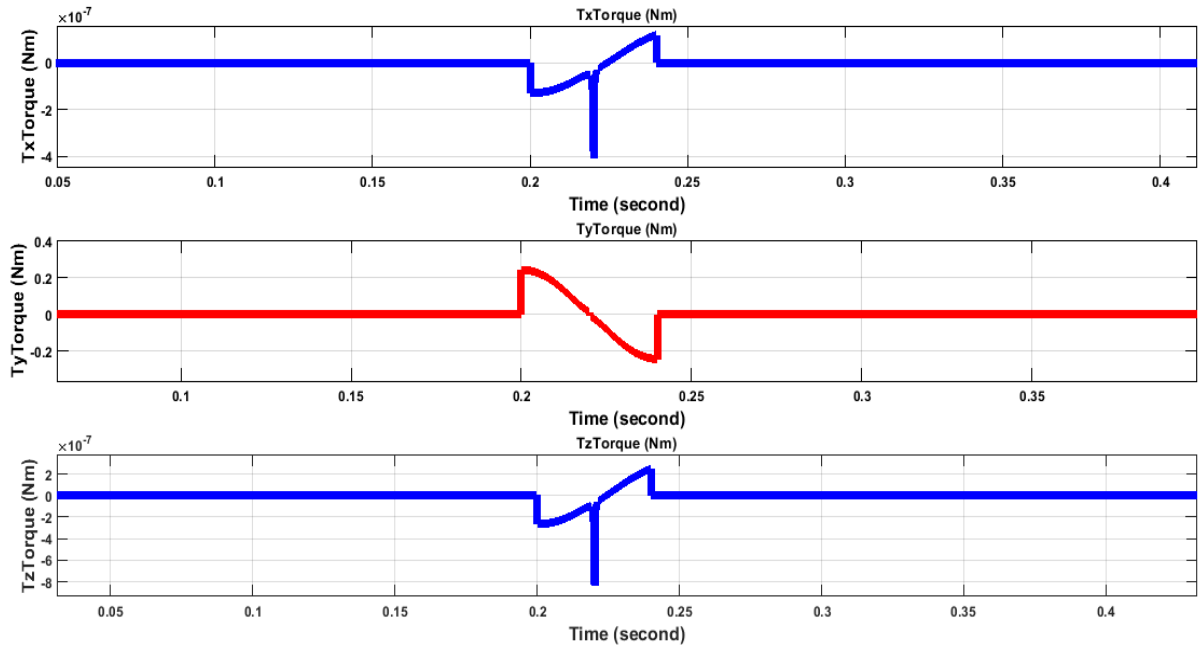
الشكل رقم (19): استجابة موضع المحرك لإشارة تيار زوجي الملفات 6،1

عند تفعيل الزوجين 1,6 تتولد مزدوجتي عزم متعاكستين تُلغيان بعضهما بعضاً ويبقى الدائر ثابتاً في مكانه، نلاحظ أن الزوايا (α, β, γ) شبه معدومة من رتبة 10^{-5} يوضح (الشكل(20)) العزم الكهرطيسي للمحرك الناتج عند تفعيل الزوج 1 ويوضح (الشكل(21)) العزم الناتج عند تفعيل الزوج 6. نلاحظ أن العزم T_y في الحالتين يتطابق في القيمة ويتعاكس بالإشارة ما يسبب انعكاس اتجاه الميلان. يوضح (الشكل(22)) العزم الكهرطيسي للمحرك الناتج عند تفعيل الزوجين 1,6 معاً نلاحظ أن العزم شبه معدوم



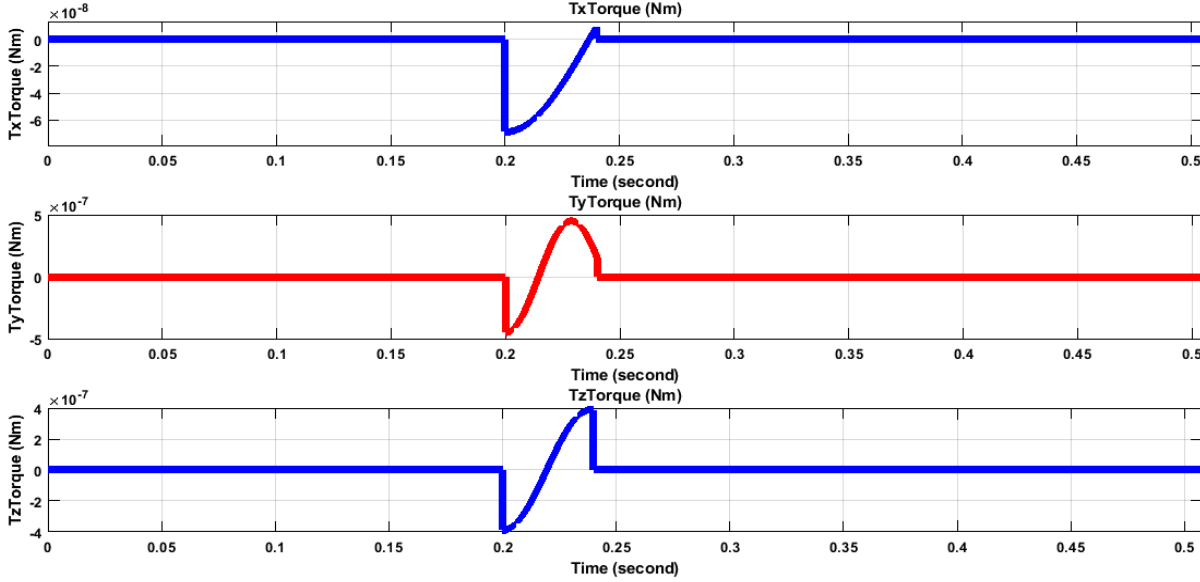
الشكل رقم (20): إشارة عزم المحرك عند تفعيل زوج الملفات 1

نلاحظ أن العزم T_y يبدأ من قيمة سالبة ويزداد حتى ينعدم عند حدوث تقابل بين زوج الملفات 1 والاقطاب المغناطيسية المقابلة على الدائر ويستمر بالازدياد حتى تنتهي النبضة المطبقة ما يسبب ميلان الدائر



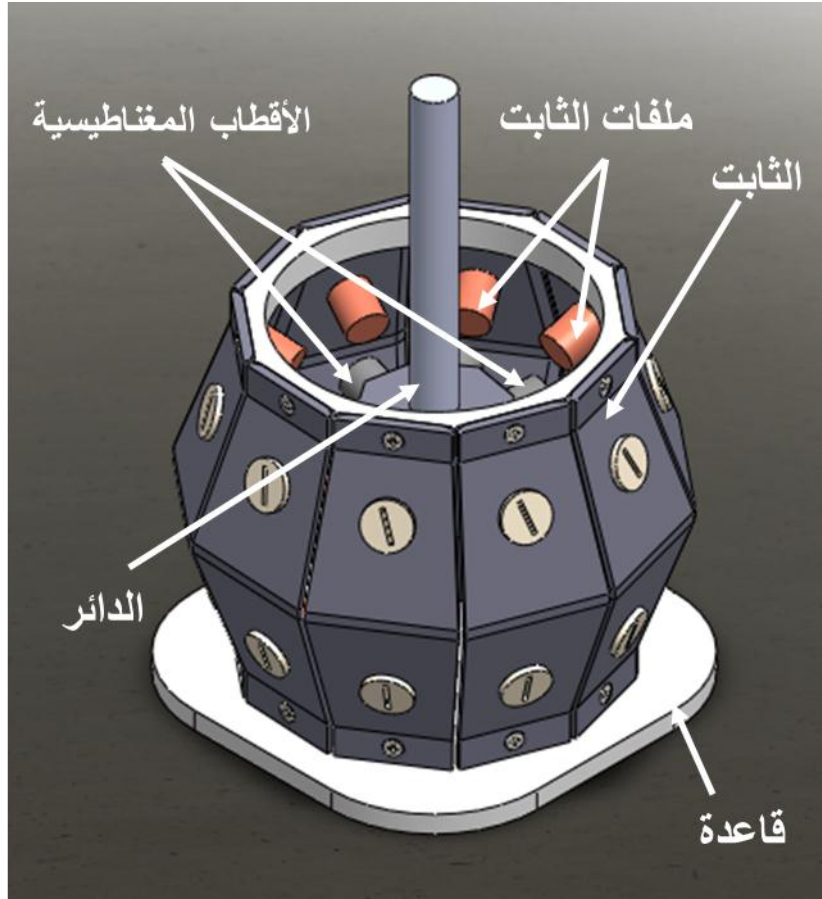
الشكل رقم (21): إشارة عزم المحرك عند تفعيل زوج الملفات 6

نلاحظ أن العزم T_y يبدأ من قيمة موجبة ويتناقص حتى ينعدم عند حدوث تقابل بين زوج الملفات 6 والأقطاب المغناطيسية المقابلة على الدائر ويستمر بالتناقص حتى تنتهي النبضة المطبقة ما يسبب ميلان الدائر بالاتجاه المعاكس للحالة السابقة عند تفعيل الزوج 1.



الشكل رقم (22): إشارة عزم المحرك عند تفعيل زوجي الملفات 1،6

عند تفعيل الزوجين 1،6 معاً نلاحظ أن العزم شبة معدوم من رتبة 10^{-7} بالتالي يبقى الدائر في موضعه بدون حركة بناء على دراسة بنية ومبدأ عمل المحرك الكروي ذي المغناطيس الدائم وعلى محاكاة المحرك السابق وبشكل خاص محاكاة زوج من الأقطاب المغناطيسية الدائمة للدائر وزوج من ملفات الثابت (الشكل (11)) ومحاكاة الجزء الميكانيكي باستخدام برنامج Solidworks ومكتبة Simmechanic في Matlab (الشكل (14)) يمكننا اقتراح نموذج أولي لمحرك كروي مناسبة للتنفيذ العملي كما يوضح (الشكل (23))، يتألف الثابت من عشرة أجزاء تتيح تثبيت الملفات بالزاوية المطلوبة وتسهل عملية تصنيع الثابت، يتم تثبيت الدائر باستخدام رولمان كروي.



الشكل رقم (23): البنية المقترحة للمحرك الكروي ذي المغناطيس الدائم

الاستنتاجات والتوصيات:

تشكل عملية النمذجة التي قمنا بها مرحلة أولية لتصميم وتصنيع المحرك الكروي، إذ تسمح باختبار أي تغيير في بنية المحرك الكروي؛ عدد ملفات الثابت؛ عدد الأقطاب المغناطيسية الدائمة للدائر؛ شكل وحجم الأقطاب المغناطيسية؛ تغيير نوع المادة المغناطيسية للدائر والثابت. يشكل هذا العمل قاعدة لمتابعة البحث في مجال المحركات الكروية. يمكن العمل مستقبلاً على:

- تنفيذ عملي لنموذج أولي لمحرك كروي ذي مغناطيس دائم بغرض استخدامه في تطبيق معين (ذراع روبوتية، أطراف صناعية، نظم المراقبة).
- تطوير نظام تحسس (Sensing System) تسمح بتقدير موضع/سرعة المحرك.
- التحقق العملي من خوارزميات التحكم ونظام التحسس.

References:

- (1) Liang Yan, I-Ming Chen, Chee Kian Lim, Guilin Yang, Wei Lin, Kok-Meng Lee, "Design and Analysis of a Permanent Magnet Spherical Actuator", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, APRIL 2008
- (2) P. J Mckerrow, "Introduction to Robotics", Addison- Wesley Publishing Company, 1991.

- (3) Liang Yan, I-Ming Chen, Chee Kian Lim, Guilin Yang, Wei Lin, Kok-Meng Lee, "Design, Modeling and Experiments of 3-DOF Electromagnetic Spherical Actuators ", Springer Science and Business Media B.V. 2011
- (4) Junghyun Chu, "Study on Multi-DOF Spherical Actuator and Intelligent Control", PhD, thesis, Osaka university, 2017.
- (5) Kok-Meng Lee, Hungsun Son, "Open-Loop Controller Design and Dynamic Characteristics of a Spherical Wheel Motor ". IEEE Transactions on Industrial Electronics, VOL. 57, NO. 10, October 2010
- (6) Kok-Meng Lee, Hungsun Son, "Torque Model for Design and Control of a Spherical Wheel Motor ". IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Monterey, California, USA, 24-28 July 2005
- (7) Kun Bai, Kok-Meng Lee, "Permanent Magnet Spherical Motors Model and Field Based Approaches for Design, Sensing and Control", Wuhan and Springer Nature, 2018
- (8) Hungsun Son, and Kok-Meng Lee, "Distributed Multipole Models for Design and Control of PM Actuators and Sensors", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, VOL. 13, NO. 2, APRIL 2008
- (9) Kok-Meng Lee, Ronald B. Roth, Zhi Zhou, " Dynamic Modeling and Control of a Ball-Joint-Like Variable-Reluctance Spherical Motor", Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, MARCH 1996
- (10) Xiwen Guo, Yuan Zhao, Yuansheng Li."Dynamic Modeling, Characteristic Analysis and Co-simulation of the Permanent-Magnet Spherical Actuator". School of Electrical Engineering and Automation, Anhui University, Hefei, Anhui, China. Elektrotehniski Vestnik 2014
- (11) Bruno Siciliano, Lorenzo Sciavicco, Luigi Villani, Giuseppe Oriolo, "Robotics Modelling, Planning and Control ", Springer, 2009