مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية
المجلد41 العدد (4) – 2025: 1-13

Damascus University Journal for engineering sciences
Vo 41 number (4) -2025: 1-13

نمذجة ومحاكاة مكدس خلايا الوقود المستخدم في سيارة كهربائية

ربيع عدنان علو *[1] مسلم طعمة[2] عباس صندوق[3]

*[1]. – طالب دكتوراه، مهندس في قسم هندسة السيارات والآليات الثقيلة، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق، سورية. rabbehalo1@Damascusuniversity.edu.sy

[2]. أستاذ، دكتور، قسم هندسة السيارات والآليات الثقيلة، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق، سورية. MussallamTomeh@damascusuniversity.edu.sy

[3]. أستاذ، دكتور، قسم الطاقة الكهربائية، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق، سورية. AbbasSandok@damascusuniversity.edu.sy

الملخص:

تبين لنا هذه الدراسة أهمية خلايا الوقود والمجالات المتنوعة التي يمكن أن تستخدم فيها وإمكانية اعتبارها مصدر نظيف للطاقة يستخدم في تغذية السيارة الكهربائية بالطاقة اللازمة لعمل المحرك الكهربائي بعد ربطها مع نظام قيادة كهربائية ليتم التحكم وتنظيم الخرج الكهربائي الذي نحصل عليه من مكدس خلايا الوقود الذي يستخدم لتغذية المحرك الكهربائي المستخدم في السيارة الكهربائية، ليتم بعدها تبيان العلاقات الرياضية الناظمة لخلية الوقود والمحددة لعملية النمذجة ووضع النموذج الحاسوبي العام لدارة القيادة والتحكم الكهربائية الذي من خلاله سوف يتم محاكاة استجابة مكدس خلايا الوقود المفترض استخدامه في السيارة الكهربائية المصممة والذي تم ذكر محدداته التشغيلية والتصميمية كافة، ليصار بعدها إلى محاكاة استجابة عمل مكدس خلايا الوقود ووضع المنحنيات البيانية التي توضح أدائه لحالات عمل مختلفة وحمولات متغيرة تحاكي الظروف التشغيلية للسيارة خلال الاستثمار الحقيقي لها.

الكلمات المفتاحية: مكدس خلايا الوقود – النموذج الحاسوبي لدراة القيادة الكهربائية – السيارة الكهربائية المصممة–حالات العمل المختلفة

تاريخ الايداع: 2023/2/6
تاريخ القبول: 2023/4/24

حقوق النشر: جامعة دمشق – سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب **CC BY-NC-SA**

ISSN (online): 2789-6854

Modeling and simulating of the fuel cell stack's used in an electric car

Rabbeh Adnan Alo*[1] Mussallam Tomeh[2] Abbas Sandok[3]

*[1]. (PhD Student), Engineer, Engineering Department of cars and heavy machinery, Faculty of Mechanical & Electrical Engineering, Damascus University, Syria. rabbehalo1@Damascusuniversity.edu.sy

[2]. Professor, Engineering Department of cars and heavy machinery, Faculty of Mechanical &Electrical Engineering, Damascus University, Syria. MussallamTomeh@damascusuniversity.edu.sy

[3]. Professor, Department of Electrical Power Engineering, Faculty of Mechanical & Electrical Engineering, Damascus University, Syria. AbbasSandok@damascusuniversity.edu.sy

Received: 6/2/2023
Accepted: 24/4/2023

Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a CC BY- NC-SA

Abstract:

This study demonstrates the importance of fuel cells, the various fields in which they can be used, and the possibility of considering them a clean source of energy to supply the electric car with the needed energy to operate its electric motor, after being linked with an electric driving system, to control and regulate the electrical output obtained from the fuel cells stack that is used in supplying the electric motor in the electric car, after which the mathematical relations regulating the fuel cell which specifies its modeling process are demonstrated and the general computer model of the electrical command and control circuit is established through which the response of the fuel cell stack simulator is supposedly used in the designed electric car, and all its operational and design determinants have been mentioned. Then, the response of the fuel cell stack will be simulated and graphic curves that show its performance for different working cases and varying loads that simulate the operating conditions of the car through its actual investment.

Key Words: Fuel Cell Stack - Computer Model for Electric Drive Circuit - Designed Electric car - Different working conditions.

المقدمة:

تعتبر خلايا الوقود خلايا كهر وكيميائية تحول الطاقة الكيميائية إلى طاقة كهربائية من خلال أوكسجين الهواء، وأكثر أنواع الوقود الشائعة والمستخدمة لهذه التطبيقات هي الهيدروجين (H2) والميثانول (CH3OH) والإيثانول، وتجري الأبحاث حالياً على تحسين وتطوير تقنيات ومواد استخلاص الهيدروجين من الأنواع السائلة للوقود، وعمليات خلية الوقود ذات كفاءة عالية وتنتج القليل من الانبعاثات الضارة [1,2,11].

1- هدف البحث وأهميته:

تهدف هذه الدراسة إلى حصولنا على النتيجة من استخدام مكدس خلايا وقود كمنبع تغذية للسيارة الكهربائية المصممة عوضاً عن المدخرات لتقوم بتغذية المحرك الكهربائي بالطاقة اللازمة عن طريق نظام القيادة الكهربائية الواصل بين هذا المكدس والمحرك الكهربائي المستخدم وبالتالي بيان استجابة السيارة لحالات الحمل المختلفة وقدرة المكدس المفترض استخدامه على تقديم الطاقة المطلوبة لتلبية هذه التغيرات.

2- خطوات البحث:

كانت خطوات إعداد هذا البحث كالآتي:

1- دراسة مرجعية عن عدد من خلايا الوقود وأنواعها المختلفة.

2- دراسة نظرية عن مكدس خلايا الوقود المفترض استخدامه في السيارة الكهربائية المصممة.

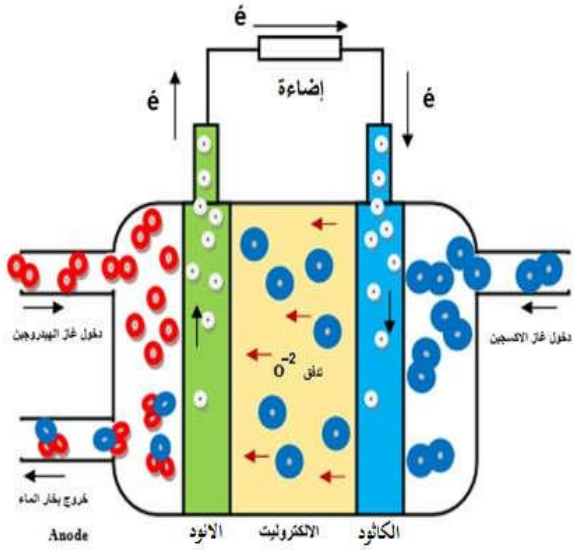
3- دارة النموذج الحاسوبي العام ضمن بيئة MatLab لمحاكاة استجابة مكدس خلايا الوقود المستخدم.

4- المنحنيات البيانية التي تبين مدى استجابة مكدس خلايا الوقود وفقا لظروف وحالات العمل المفروضة.

5- مناقشة النتائج النهائية ووضع المقترحات والتوصيات.

3- الدراسة المرجعية:

يوضح لنا الشكل التالي (1) خلية الوقود والأجزاء المكونة لها وكيفية حركة العناصر.



الشكل(1) مبدأ عمل خلية الوقود [3]

عمليات خلايا الوقود لا تتطلب درجات حرارة خاصة فبعض أنواعها تتم في درجة حرارة المحيط بينما أنواع وتصاميم أخرى تحتاج لدرجات حرارة تصل إلى 1000 درجة مئوية والجدول التالي (1) يوضح بعض أنواع خلايا الوقود ومؤشراتها التشغيلية وذلك حسب كل نوع:

http://journal.damascusuniversity.edu.sy/index.php/index/index

ISSN (online): 2789-6854

الجدول (1) أنوع خلايا الوقود مع مؤشراتها التشغيلية [4]

نوع خلية الوقود	Electrolyte الكهربائية	درجة الحرارة درجة مئوية	كفاءة الخلية %	التطبيقات التي تستخدم كل نوع
AFC Alkaline Fuel Cell	KOH	90 ÷ 60	60 ... 50	الهواتف النقالة + تطبيقات الجر
PEMFC Proton Exchange Membrane Fuel Cell	Polymer electrolyte	80 ÷ 50	60... 50	الهواتف النقالة + تطبيقات الجر
DMFC Direct Methanol Fuel Cell	Membrane	130 ÷ 110	40...30	الهواتف النقالة
PAFC Phosphoric Acid Fuel Cel	H3PO4	220 ÷ 160	55	تطبيقات الجر
MCFC Molten Carbonate Fuel Cell	Alkaline carbonates	660 ÷ 620	65...60	تطبيقات الجر
SOFC Solid Oxide Fuel Cell	ZrO2	1000 ÷ 800	65...55	التطبيقات الثابتة وتطبيقات الجر

تعتبر خلايا وقود PEMFC (خلية الوقود ذات غشاء التبادل البروتوني) الأكثر استخداماً في السيارات الكهربائية العاملة على خلايا الوقود كونها الأفضل في تطبيقات الجر بسبب تصميمها الملائم للعمليات الديناميكية اللازمة في السيارات، وهذه الخلايا تستخدم الهيدروجين كمصدر للطاقة. [4]

تجمع خلايا الوقود في السيارة الكهربائية ضمن غلاف واحد يدعى مكدس خلايا الوقود وتكون كمية الطاقة التي نحصل عليها من خلال هذا المكدس تتعلق بحجمه فمثلاً من أجل الحصول على جهد أعلى يجب زيادة عدد الخلايا (وصل تسلسلي)، بينما نحتاج لزيادة مساحة السطح للخلايا لزيادة كثافة التيار.[5]

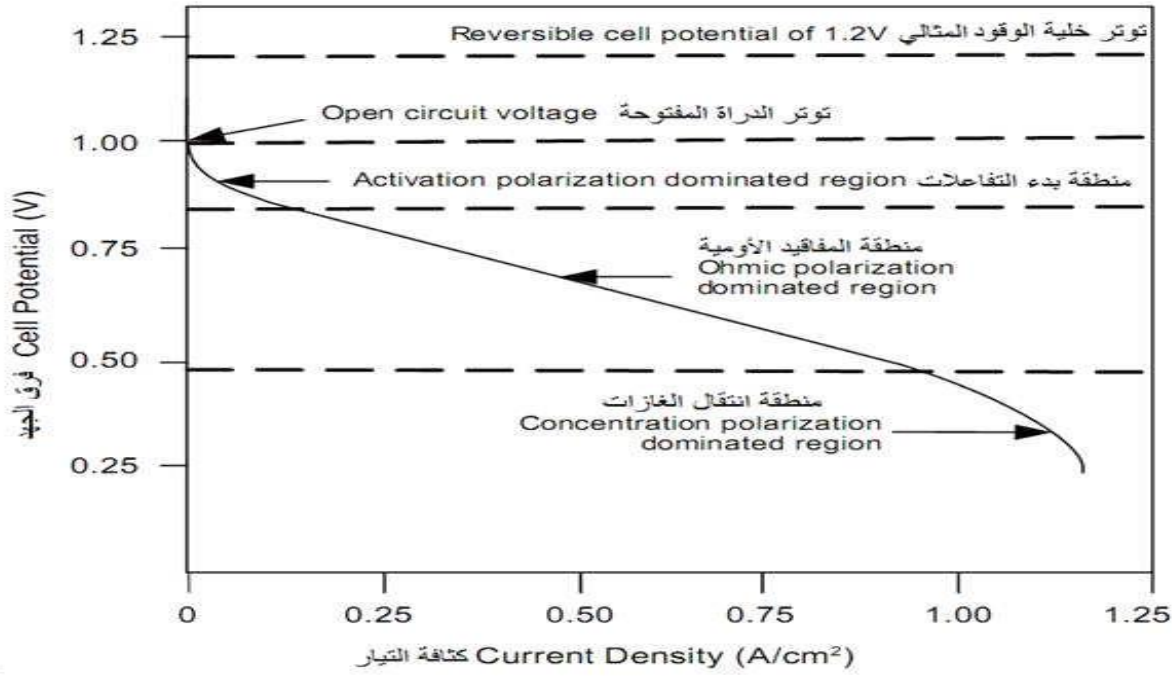
السيارة الكهربائية العاملة على خلايا الوقود والتي تستخدم الهيدروجين كوقود تتضمن محرك كهربائي ونظام قيادة كهربائي يستخدم التيار الكهربائي الناتج عن مكدس خلايا الوقود PEMFCوالذي ينتج طاقة حوالي 90 كيلو واط.[3]

الوظائف الرئيسية للغشاء البوليمري المنحل بالكهرباء هي التوصيل للبروتونات من المصعد إلى جانب المهبط لخلية الوقود وفصل المواد المتفاعلة و صناعة السيارات تبحث دوما عن أغشية منخفضة التكلفة والتي يمكن تشغيلها في درجات حرارة مناسبة من دون الحاجة إلى إدارة متطورة من أجل تبريدها. [7]

وفيما يلي الشكل رقم (2) الذي يبين منحني العمل لخلايا الوقود PEMFC:[8]

http://journal.damascusuniversity.edu.sy/index.php/index/index

ISSN (online): 2789-6854



الشكل(2) منحني العمل لخلايا الوقود– PEMFC

في هذه الدراسة وكون نموذج خلية الوقود متوفر بشكل جاهز في بيئة برنامج ماتلاب 2021 كما سيتم إيضاحه فيما يأتي فأنه سوف نكتفي بذكر العلاقات الرياضية المعبرة عن خلية الوقود والتي نحتاجها في عملية النمذجة والتي تعطى كالتالي: [10]

$$V_L = V_o - I_L.R_{int} - V_{act}$$

$$V_{act} = V_2 \cdot \ln(I_o/I_L)$$

حيث أن:

V2, Io ثوابت تحدد من المنحنيات المميز.

Vo: توتر الدارة المفتوحة وهو أصغر من توتر الخلية الأعظمي دائما.

Vl: توتر الحمولة اللازم تأمينه.

Vact: توتر التفاعل.

Rint: المقاومة الداخلية للخلية.

il.Rint: التوتر الضائع بسبب وجود المقاومة الداخلية

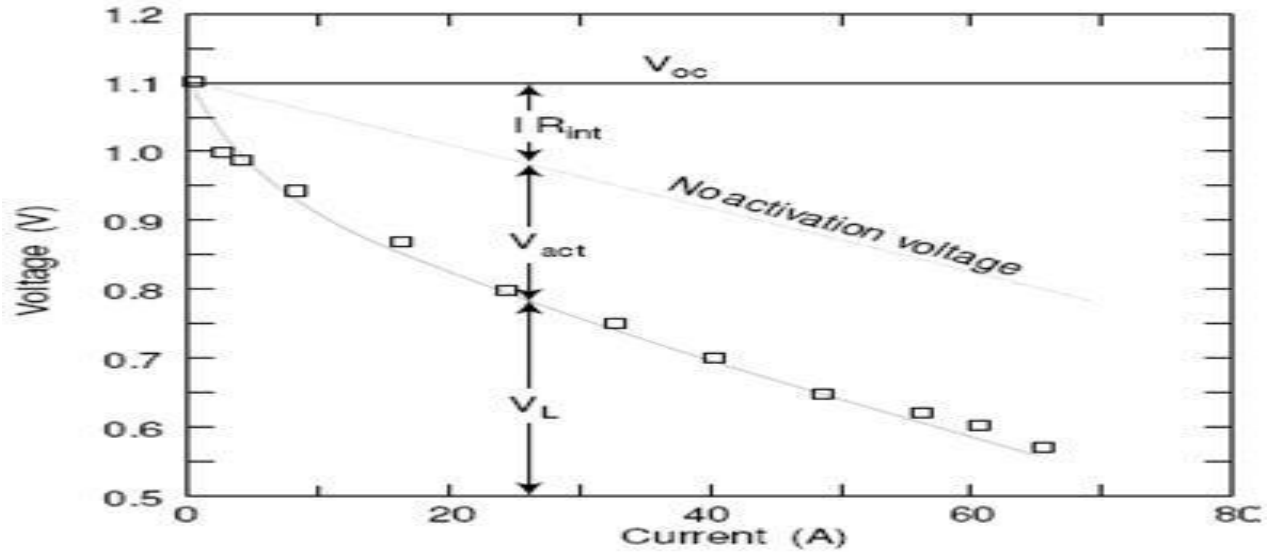
إنه في الواقع العملي فأن المنحنيات المميزة لخلايا الوقود تسلك سلوكا لا خطي وذلك عند تضمين ضياعات التفاعل أثناء الحسابات وبالتعويض نحصل على العلاقة التالية: [10]

$$V_L = Vo - IL.Rint - V2 \cdot \ln(Io/I_L)$$

كما يبين الشكل (3).

http://journal.damascusuniversity.edu.sy/index.php/index/index

ISSN (online): 2789-6854



الشكل(3) المنحني المميز لمعظم خلايا الوقود[10]

4- الدراسة النظرية:

تم في هذه الدراسة توضيح محددات مكدس خلايا الوقود الذي تمت عليه عملية النمذجة والذي قمنا بأخذه جاهزا من بيئة برنامج MATLAB لوجود مكدس مشابه للمكدس الذي نحتاجه، كما سيتم توضيح النموذج النهائي لدارة القيادة الكهربائية التي تتحكم في جريان القدرة التي تؤخذ من مكدس خلايا الوقود وتستهلك في تحقيق مسير السيارة الكهربائية المصممة.

خلايا الوقود المستخدمة في هذه الدراسة كانت من النمط PEMFC والتي تم شرحها في الدراسة المرجعية مسبقاً، وكانت قيم ومحددات مكدس خلايا الوقود المستخدم كما هي موضحة في الجدول (2) التالي: [9]

الجدول (2) قيم محددات مكدس خلايا الوقود المستخدم

المحدد	النوع	القيم
مكدس خلايا الوقود	PEMFC	6KW-45VDC
عدد الخلايا	PEMFC	65 خلية
كفاءة المكدس	PEMFC	% 55
درجة حرارة التشغيل	PEMFC	65 سيلسيوس

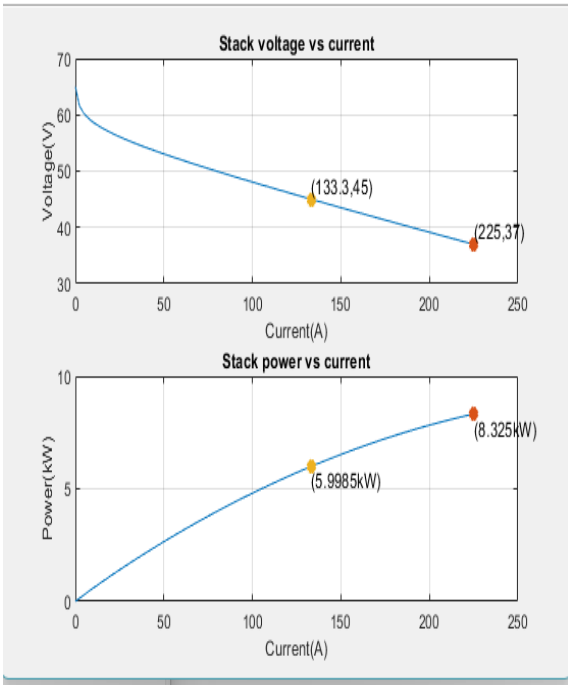
يبين الشكل (6) النموذج المصمم في بيئة برنامج MATLAB لكل من مكدس خلايا الوقود المفترض استخدامه مع نظام القيادة الكهربائية للسيارة الكهربائية المصممة مع اعتبار مصدر ومنبع التغذية الكهربائية لهذه السيارة هو مكدس خلايا الوقود

http://journal.damascusuniversity.edu.sy/index.php/index/index

ISSN (online): 2789-6854

نمذجة ومحاكاة مكدس خلايا الوقود المستخدم في سيارة كهربائية الذي تم توضيح محدداته في الجدول السابق، حيث تم في هذه الدراسة محاكاة عمل هذا النموذج وفق عدة حالات عمل لحمولات ميكانيكية مختلفة قد تتعرض لها السيارة في ظروف استثمارية مختلفة متوافقة مع استطاعتها التصميمية والحمولات التي تتغلب عليها والتي تم تحديدها سابقاً في الدراسة التصميمية للسيارة الكهربائية والتي لسنا في صدد ذكرها هنا، كان الهدف من هذه الحمولات المختلفة في هذه الدراسة معرفة مدى قدرة مكدس خلايا الوقود المستخدم على تلبية استجابة الحمولات المتغيرة للسيارة المصممة من خلال تأمين الطاقة اللازمة للمحرك الكهربائي المستخدم لعمل وتحريك السيارة والتغلب على مقاومات الحركة الممانعة لها.

قبل عرض النموذج العام الذي تم تصميمه في بيئة MATLAB لنظام التحكم والقيادة للسيارة المصممة نوضح في الشكل الآتي (4) العلاقة بين كل من الجهد والاستطاعة لمكدس خلايا الوقود المستخدم وعلاقته مع التيار الكهربائي حيث يبين المخططين المذكورين في هذا الشكل النقاط التشغيلية لمكدس خلايا الوقود المستخدم في هذه الدراسة حيث نجد من المنحني البياني المعبر عن علاقة كل من جهد المكدس وعلاقته بالتيار الكهربائي أن قيم نقطة التشغيل الاسمية للمكدس كانت عند 45 فولط و 133.3 أمبير، أما قيم نقطة التشغيل العظمى كانت عند 37 فولط و 225 أمبير. أما في المنحني المعبر عن استطاعة المكدس وعلاقتها بتغير قيمة التيار فنجد من المنحني البياني المعبر عن هذه العلاقة أن القيمة الاسمية لاستطاعة مكدس خلايا الوقود المستخدم كانت 5998.5 واط، في حين كانت القيمة العظمى لهذه الاستطاعة 8325 واط علماً أن قيم التيار في الحالتين بقيت كما هي في حالة منحني الجهد وفيما يلي المنحنيين البيانيين للحالتين المذكورتين:



الشكل (4) منحني قيم التيار لمكدس خلايا الوقود وفقا لتغير الجهد والاستطاعة

يجب التنويه إلى أن القيم الاسمية لضغط إمداد مكدس خلايا الوقود المفترض استخدامه في السيارة الكهربائية المصممة (للهواء 1 بار، للوقود 1.5 بار) كما أن معدل تدفق الهواء الاسمي للمكدس المستخدم يبلغ 300 ليتر بالدقيقة . [9]

علو، طعمة، صندوق

نمذجة ومحاكاة مكدس خلايا الوقود المستخدم في سيارة كهربائية

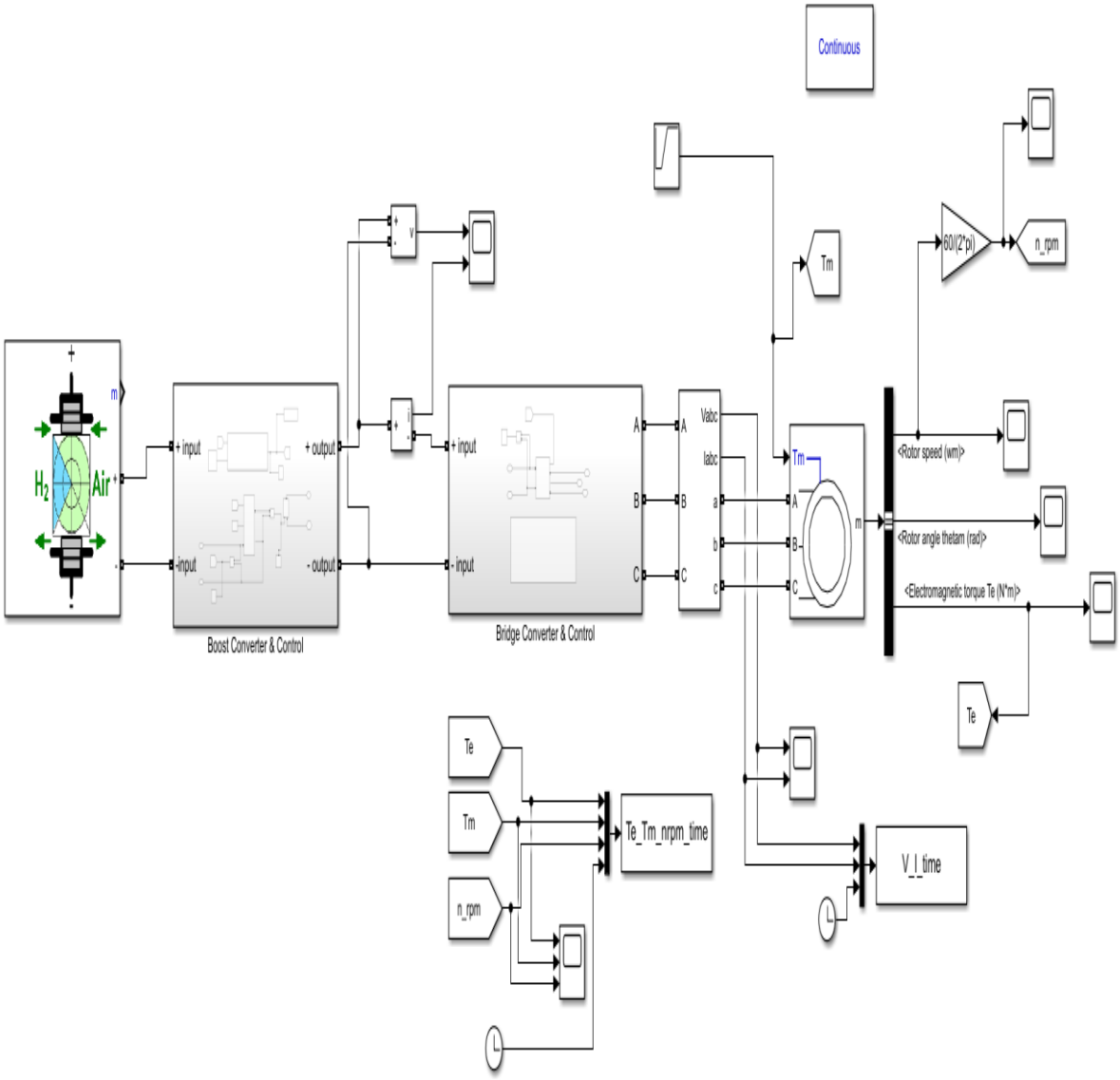
5- دارة النموذج العام ضمن بيئة MatLab 2021 لمحاكاة استجابة مكدس خلايا الوقود المستخدم:

فيما يلي نبين النموذج العام الذي تم تصميميه في بيئة برنامج MATLAB 2021 والذي يحاكي مكدس خلايا الوقود المقترح تركيبه على السيارة المخبرية المصممة مع نظام قيادته الكهربائية وكافة عناصره ، كما سيتم محاكاة أداء عمل هذا

الشكل (5) مخطط تدفقي لسير العمليات ضمن النموذج الحاسوبي العام

علو، طعمة، صندوق

النموذج ضمن البرنامج المذكور لبيان مدى إمكانية استخدام مكدس خلايا الوقود المذكور كما ستوضح المنحنيات البيانية والحالات المدروسة فيما يأتي لاحقاً ، ولكن قبل ذلك يبين لنا المخطط التدفقي (5) ويوضح آلية تدفق وسير العمليات والخطوات النمذجية ضمن النموذج العام للدارة وفق كل مرحلة وخطوة للحصول على الخرج النهائي وقيادة المحرك الكهربائي.



الشكل (6) النموذج الحاسوبي لدارة التحكم في المحرك الكهربائي باستخدام خلايا الوقود ماتلاب2021

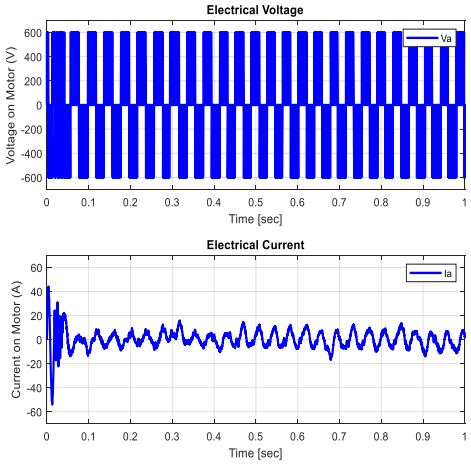
6- المنحنيـــات البيانيـــة للحـــالات

المدروسة:

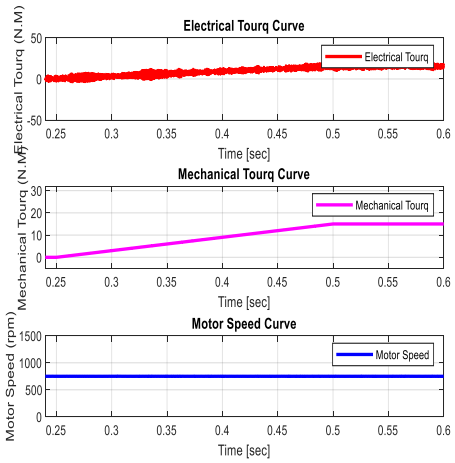
تم في هذه الدراسة اختبار ثلاث حالات عمل حالتان تعبر عن الحمل الميكانيكي وتغيره وحالة تعبر عن تغير سرعة الدوران

نمذجة ومحاكاة مكدس خلايا الوقود المستخدم في سيارة كهربائية من السرعة الوسطية إلى السرعة العظمى مع ثبات الحمل الميكانيكي وكانت المنحنيات البيانية لهذه الحالات في دراستنا كالآتي:

الحالة الأولى : تغير الحمل الميكانيكي المطبق من الإقلاع (لا وجود لحمل) إلى حمل أعلى منه (متوسط القيمة) tm 0- 15 , n =750 المنحنيات البيانية كما يلي :



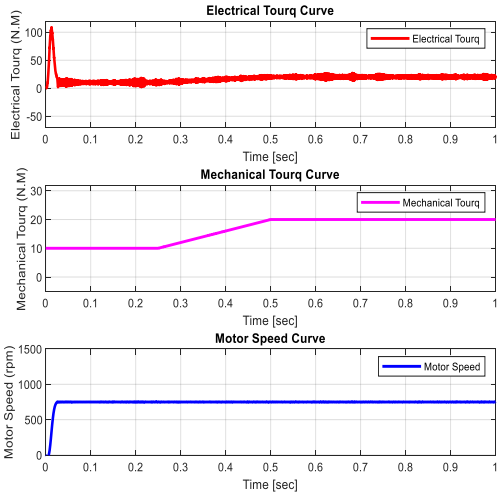
الشكل(8) توضيح الفترة الزمنية للتغير الحاصل في منحنيات العزم الكهربائي والحمل الميكانيكي وسرعة دوران المحرك



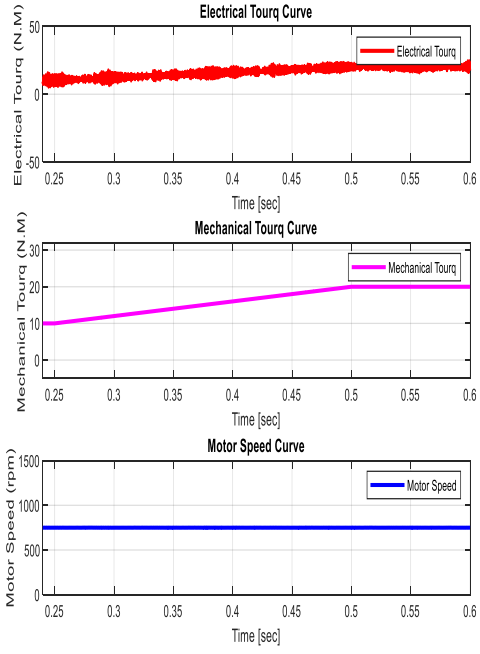
الشكل(9) منحني التيار والجهد الواصل للمحرك الكهربائي بالنسبة للزمن

الحالة الثانية: تغير الحمل الميكانيكي المطبق من حمل منخفض إلى حمل أعلى منه (متوسط القيمة) tm 10-20 n =750 المنحنيات البيانية كما يلي:

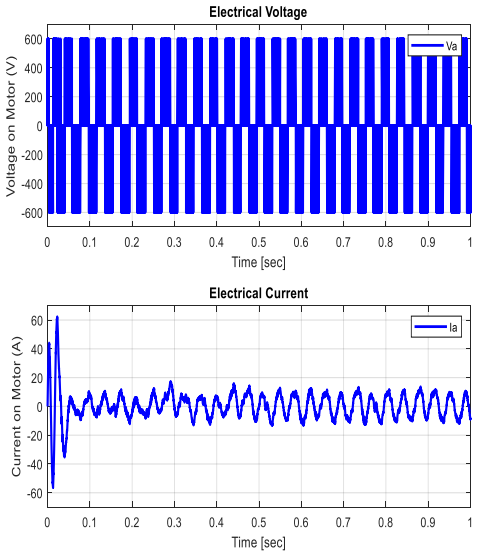
علو، طعمة، صندوق



الشكل(10) منحنيات العزم الكهربائي والحمل الميكانيكي وسرعة دوران المحرك بالنسبة للزمن

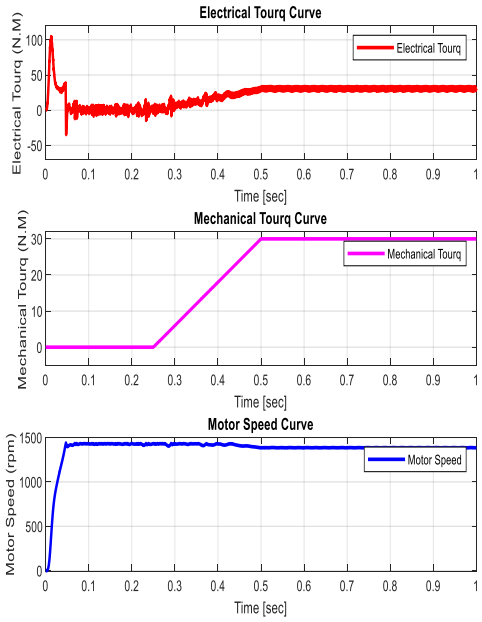


الشكل(11) توضيح الفترة الزمنية للتغير الحاصل في منحنيات العزم الكهربائي والحمل الميكانيكي وسرعة دوران المحرك

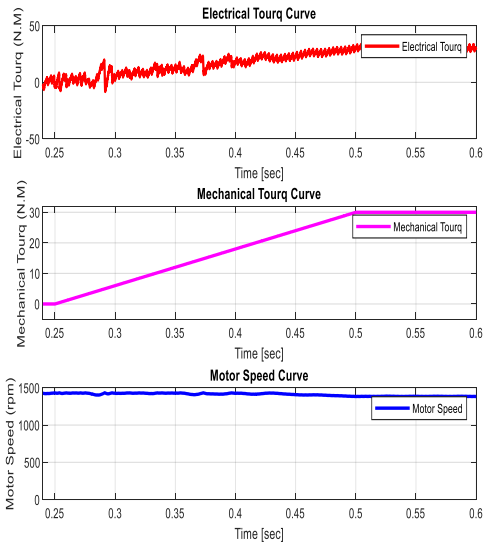


الشكل(12) منحني التيار والجهد الواصل للمحرك الكهربائي بالنسبة للزمن

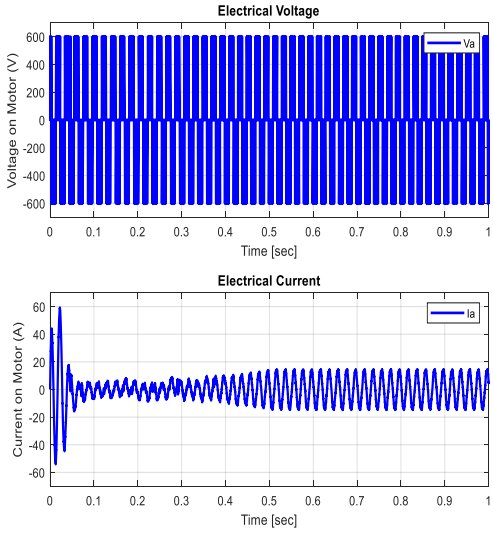
الحالة الثالثة: تغير الحمل الميكانيكي المطبق من الإقلاع وحتى وصول السيارة إلى الحمولة القصوى tm 0-30, n=1430 وكانت المنحنيات البيانية كما يلي:



الشكل (13) منحنيات العزم الكهربائي والحمل الميكانيكي وسرعة دوران المحرك بالنسبة للزمن



الشكل(14) توضيح الفترة الزمنية للتغير الحاصل في منحنيات العزم الكهربائي والحمل الميكانيكي وسرعة دوران المحرك



الشكل(15) منحني التيار والجهد الواصل للمحرك الكهربائي بالنسبة للزمن

7- مناقشة النتائج:

1- إن مكدس خلايا الوقود المفترض استخدامه أبدى استجابة وقدرة على تأمين الطاقة اللازمة للمحرك الكهربائي ونظام قيادته المستخدم لمختلف حالات العمل التي ناقشتها هذه الدراسة.

نمذجة ومحاكاة مكدس خلايا الوقود المستخدم في سيارة كهربائية علو، طعمة، صندوق

2- في الحالة الثانية لهذه الدراسة تم اختبار استجابة مكدس خلايا الوقود على تأمين القدرة اللازمة لتأمين الإقلاع على دعسة جزئية (سرعة دوران متوسطة) مع وجود حمل ميكانيكي مطبق (متوسط القيمة) على السيارة الكهربائية المصممة ووفقا للمنحنيات البيانية لهذه لحالة أبدى مكدس خلايا الوقود المفترض استخدامه مع نظام القيادة الكهربائية القدرة والاستجابة على تحريك السيارة وإقلاعها.

3- في الحالة الثانية من هذه الدراسة تم اختبار استجابة مكدس خلايا الوقود أيضا على نفس الدعسة الجزئية (سرعة دوران متوسطة) لكن مع الانتقال من حمولة ميكانيكية مطبقة منخفضة القيمة إلى قيمة حمولة ميكانيكية أعلى منها ، وقد أبدى ايضا مكدس خلايا الوقود المستخدم مع نظام قيادته الكهربائي القدرة والطاقة اللازمة للمسير كما تبين المنحنيات البيانية لهذه الحالة حيث استجابت السيارة لزيادة الحمل الميكانيكي المطبق على هذه الدعسة الجزئية.

4- في الحالة الثالثة لهذه الدراسة تم محاكاة عمل السيارة الكهربائية المصممة من خلال قدرة مكدس خلايا الوقود المستخدم على تأمين الطاقة الكهربائية اللازمة لانتقال السيارة من الإقلاع إلى أعظم سرعة على نسبة غيار واحدة وهذه الحالة مشابهة تماما للتجارب العملية التي تمت على السيارة الكهربائية المصممة (لكن منبع القدرة كان مختلفاً)، تبين لنا من خلال المنحنيات البيانية أن مكدس خلايا الوقود مع نظام القيادة الكهربائية المستخدم قد تمكن من تحقيق الاستجابة المطلوبة لسير السيارة وتغلبها على الحمل المطبق في هذه الحالة .

الخلاصة:

من خلال ما سبق في هذه الدراسة نجد أنه من الممكن استخدام مكدس خلايا الوقود الوارد ذكره في الدراسة المرجعية مع نظام القيادة الكهربائية في التصميم العملي من خلال تركيبه على السيارة المصممة وبالتالي قدرته على تأمين الطاقة اللازمة للمحرك الكهربائي المستخدم مع نظام القيادة الكهربائية الموجود (المحرك الكهربائي مع رافع الجهد ومقطع التيار) وبالتالي تأمين مسير السيارة وهذا ما تم محاكاته في حالات العمل الثلاث التي تمت مناقشتها، مع اقتراح أن تتم محاكاة عمل أنواع أخرى من مكدسات خلايا الوقود وبيان مدى استجابتها في حالة السيارة المصممة ويمكن أيضا اقتراح زيادة وزن السيارة المصممة لبيان مدى قدرة مكدس خلايا الوقود المفترض في هذه الدراسة على تلبية وتغطية هذه الزيادة الحاصلة في الوزن.

التمويل: هذا البحث ممول من جامعة دمشق وفق رقم التمويل (501100020595).

References:

1- EG&G Technical Services, Inc. Fuel Cell Handbook. (7th ed). USA: Solid State Energy Conversion Alliance, 2002.

2- Ali, D. M. and Salman, S.K., INVESTIGATION INTO MODELLING OF A FUEL CELL STACK SYSTEM. Robert Gordon University: UK.2005.

3- Seneviratne K. A Novel, solid oxide fuel cell anode substrate: performance and lifetime studies, Universitetet i Agder/University of Agder; 2013.

4- Robert Bosch GmbH , " BOSCH Electronic Automotive Handbook " , section (22 + 24) ,2008.

5- www.fuel cell store. Com / fuel – cell – stacks.4.2.2019.

6- Treffinger P, Brinner A, Scholl R, E.Friedrich H, "FULE CELL AND HYDROGEN VEHICLES – STATE OF THE ART AND CHALLENGES FOR IMPROVED MATERIALS " ResearchGate, july 2006 .

7- Wieser, C.: Fuel Cells 4(2004) 245-250.

8- http://kawngroup.com/fuel-cells/.

9- MATLAB-2021.

10- مطر جهاد " دراسة ومحاكاة ربط خلية وقودية بمقلّب الكتروني "الجزائر، جامعة محمد خيضر بسكرة ،2013.

11- عاشوري انتصار، مخلوفي نعيمة "محاكاة عددية لظاهرة استهلاك وإنتاج الغازات المختلفة في خلية وقود الأكسيد الصلب الأنبوبية "جامعة قاصدي مرباح ورقلة.2018.