

دراسة ونمذجة خلية وقود هيدروجيني ذات غشاء تبادل بروتوني مع مقطع الكتروني رافع للتوتر

عمرو السعدي¹، د.م. وسيم سعيد²

¹طالب ماجستير - طاقة كهربائية همك - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.
²دكتور - طاقة كهربائية همك - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.

الملخص

يتناول هذا البحث بنية خلية الوقود ذات غشاء تبادل بروتوني والتفاعلات الحاصلة فيها والمعادلات الرياضية التي تصف أداءها ووضع نموذج حاسوبي لها في بيئة MATLAB لمحاكاة الخصائص الساكنة والديناميكية للخلية الوقودية وتحديد سلوكها عند تغير قيمة التيار المستجر منها، كما يتناول البحث دراسة وتصميم المقطع الرفع للتوتر المستخدم لربط الخلية الوقودية مع الحمل، ونمذجة هذا المقطع وربطه مع نموذج الخلية الوقودية.

الكلمات المفتاحية: خلايا الوقود، المقطع الرفع للتوتر.

تاريخ الإيداع: 2022/5/27

تاريخ القبول: 2022/8/22



حقوق النشر: جامعة دمشق - سورية،
يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب

الترخيص CC BY-NC-SA 04

Study and Simulation Proton Exchange Hydrogen Fuel Cell with Boost Converter

Amr Al Saadi¹, Dr. Waseem Saeed²

Received: 27/5/2022

Accepted: 22/8/2022



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

¹Master's student - Electrical Energy HMC - Faculty of Mechanical and Electrical Engineering - Damascus University.

²Doctor - Electrical Energy HMC - Faculty of Mechanical and Electrical Engineering - Damascus University.

Abstract

This research aims to study the structure of the proton exchange membrane fuel cell PEMFC and the chemical reactions inside it among the mathematical equations which describe its performance, in addition to simulate the fuel cell in MATLAB to show its static/dynamic characteristics and describes its performance when changing the withdrawn current. This research is also deals with the study and the design of boost converter which is used as an interface between fuel cell and load and simulate both the converter and fuel cell.

Keywords: Fuel cell, Boost converter.

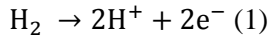
سلوكها الديناميكي عند تحميلها، وذلك بربطها مع مقطع رافع للتوتر تم دراسته في هذا البحث ووضع المعادلات المساعدة في تصميمه بما يتيح إمكانية تعديل هذا التصميم لاستخدامه في تطبيقات أخرى.

2. خلية الوقود الهيدروجيني ذات غشاء التبادل

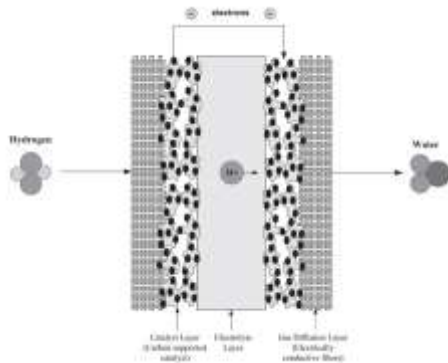
البروتوني

1.2 بنية الخلية الوقودية والتفاعلات الكيميائية داخلها.

خلية الوقود هي خلية كهروكيميائية تحول الطاقة الكيميائية في الوقود الهيدروجيني إلى طاقة كهربائية، وتتكون من قطبين (مصعد Anode ومهبط Cathode) يفصل بينهما مادة كهليلتية نصف ناقلة مصنعة من نوع خاص من المواد البوليميرية تسمى تجارياً Nafion تسمح فقط بعبور بروتونات الهيدروجين عبرها وتمنع الإلكترونات من المرور لتمر عبر مسار خارجي ناقل مولدة بحركتها تياراً كهربائياً. وبمساعدة محفز يغلف المصعد يكون عادة مصنعة من البلاتين أو الكربون يتم فصل جزيء الهيدروجين عند المصعد إلى بروتونات والإلكترونات وفق التفاعل التالي: [4] [6] [7]



يسمح الكهليلت لبروتون الهيدروجين فقط بالعبور خلاله من المصعد إلى المهبط بينما تتدفق الإلكترونات من خلال مسار دارة خارجية مما ينشأ عنه تيار كهربائي وفق الشكل التالي:



الشكل (1) بنية الخلية الوقودية [4]

1. المقدمة:

يتجه العالم اليوم بكياناته جميعاً للاستثمار في الطاقة المتجددة، وينطلق هذا الاتجاه من التحذيرات الحثيثة بشأن ضرورة الحد من ظاهرة التلوث المناخي إضافة إلى تقلب وضع أسواق المشتقات النفطية وخضوعها للتبدلات والأزمات الاقتصادية والمالية والسياسية، إضافة إلى الأخذ بعين الاعتبار بعض الأصوات التي تقول بفرضية تجاوز ذروة الإنتاج النفطي. ويبدو أن ظاهرة الاحتباس الحراري وما ينتج عنها من تغيرات مناخية مسببة للكوارث الطبيعية كالأعاصير والفيضانات والجفاف والتي باتت تهدد وجود مساحات كبيرة من الأراضي المأهولة بملايين البشر هي أحد أهم الدوافع التي تسعى الدول للحد من أثرها عن طريق السعي لتخفيض نسبة الانبعاثات الكربونية.

وتعتبر خلايا الوقود الهيدروجيني من المصادر الواعدة للطاقة الكهربائية النظيفة والصديقة للبيئة خاصة في مجال المركبات الكهربائية إضافة إلى إمكانية استخدامها لتوليد الكهرباء في المرافق السكنية وحتى التجارية فهي خلايا صامتة ولا ينتج عنها أي نواتج احتراق ملوثة للبيئة وتقتصر نواتج عملها على الماء، وتعمل باستخدام غاز الهيدروجين الذي يمكن الحصول عليه بالتحليل الكهربائي للماء باستخدام أحد مصادر الطاقة المتجددة كالخلايا الكهروضوئية على سبيل المثال.

تناولت بعض الدراسات السابقة أداء خلية الوقود ذات غشاء التبادل البروتوني من الناحية الستاتيكية^[3]، بينما تناولت دراسات أخرى نمذجة خلية الوقود بإهمال بعض الظواهر مثل ظاهرة أثر الطبقة المضاعفة أو هبوط توتر التركيز^[1]، بينما اتجهت بعض الدراسات إلى اختبار أداء الخلية الوقودية عند تحميلها بشكل مباشر دون تنظيم التوتر على خرجها^[7]، وكانت الغاية من هذه الدراسة محاولة تقديم نموذج شامل للخلية الوقودية يحاكي مختلف الظواهر الحاصلة فيها ويختبر

3.2 ضياعات الجهد في الخلية الوقودية

تخضع الخلية الوقودية أثناء عملها واستمرار التيار منها لمجموعة من ضياعات الجهد V_L حيث يكون: [3] [5] [6] [7]

$$V_L = V_{act} + V_{ohm} + V_{con} \quad (6)$$

حيث V_{act} هو ضياع جهد التفعيل وينجم عن الحاجة إلى صرف طاقة لبدء التفاعل الكيميائي داخل الخلية، وتكون هذه الضياعات على صورة هبوط في جهد الخلية يكون كبيراً جداً عند بداية تشغيل الخلية ثم ما يلبث أن يتناقص مع تزايد قيمة التيار الكهربائي المستخرج من الخلية i_{fc} ، ويعطى بالعلاقة: [3] [6]

$$V_{act} = -[\varepsilon_1 + \varepsilon_2 * T + \varepsilon_3 * T * \ln(C_{O_2}) + \varepsilon_4 * T * \ln(i_{fc})] \quad (7)$$

حيث $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$ معاملات تعطى في النشرة الفنية المفصلة للخلية الوقودية.

C_{O_2} هو تركيز الأكسجين على سطح محفز المهبط وواحدته mol/cm^3 ويُعطى بالعلاقة: [3] [6]

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5.08 * 10^{-6} * e^{\frac{498}{T}}} \quad (8)$$

أما V_{ohm} فهي ضياعات الجهد الأومية داخل الخلية الوقودية والتي تنشأ بسبب مقاومة الغشاء البوليميري لمرور بروتونات الهيدروجين عبره R_C ، إضافة إلى مقاومة الغشاء بحد ذاته R_m ، وتعطى ضياعات الجهد الأومية في الخلية بالعلاقة: [3]

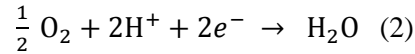
$$V_{ohm} = (R_m + R_C) * i_{fc} \quad (9)$$

وتسمى V_{con} بضياعات التركيز، حيث تنشأ بسبب إعاقة مرور الغازات في الخلية عند ارتفاع قيمة التيار المستخرج واقتربها من القيمة الحدية العظمى i_L وتعطى بالعلاقة: [3] [7]

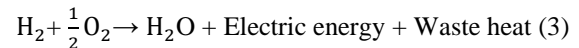
$$V_{con} = -B \ln\left(1 - \frac{i}{i_L}\right) \quad (10)$$

حيث i هي قيمة كثافة التيار المستخرج من الخلية $[A/cm^2]$ و i_L هي قيمة كثافة التيار الحدي (الأعظمي) الذي يمكن استجراؤه من الخلية، B ثابت يعطى في النشرة الفنية المفصلة للخلية الوقودية.

وتتابع بروتونات الهيدروجين والالكترونات مسارها لتتحد مع الأكسجين عند المهبط منتجةً الماء وفق التفاعل التالي: [4] [6] [7]



وبالتالي تكون العبارة الإجمالية للتفاعل الحاصل ضمن الخلية الوقودية: [4] [6] [7]



2.2 توتر نيرنست في الخلية الوقودية

يعطى توتر الدارة المفتوحة للخلية الوقودية المسمى بتوتر نيرنست بالعلاقة: [3]

$$E_n = -\frac{\Delta G_{fo}}{2F} + \frac{\Delta S}{2F} (T - T_{ref}) + \frac{RT}{2F} \ln\left(\frac{P_{H_2} * P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{H_2O}}\right) \quad (4)$$

حيث ΔG_{fo} هو تغير طاقة جيبس الحرة عند الشروط النظامية ويعطى بالقيمة -237.17 [kJ/mol]

F ثابت فارادي وتساوي قيمته $96485.3329 \text{ [A.sec/mol]}$

ΔS تغير الانتروبي وتعطى قيمته $-0.164 \text{ [kJ/mol.K]}$ عند الشروط النظامية

T درجة حرارة عمل الخلية المطلقة (كلفن) T_{ref} درجة الحرارة المرجعية وهي 298.15 [Kelvin]

R ثابت الغازات العام وتعطى قيمته 8.3145 [J/mol.K] $P_{H_2O}, P_{O_2}, P_{H_2}$ الضغوط الجزئية للهيدروجين والأكسجين والماء على الترتيب $[\text{atm}]$.

وبتعويض قيم هذه الثوابت في العلاقة (4) نحصل على علاقة توتر نيرنست للخلية الوقودية: [3] [5] [6]

$$E_n = 1.229 - 0.85 * 10^{-3} (T - T_{ref}) + 4.3087 * 10^{-5} * T * \ln\left(\frac{P_{H_2} * P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{H_2O}}\right) \quad (5)$$

وبتشغيل الخلية عند الشروط النظامية لضغط الغازات $P = 1 \text{ [atm]}$ والحرارة $T = 298.15 \text{ [K]}$ نلاحظ أن قيم الحدين الثاني والثالث في المعادلة (5) يصبحان مساويان للصفر ويكون توتر الخلية المفتوحة في الشروط النظامية مساوياً للقيمة 1.229 [V] .

4.2 توتر الكدس للخلايا الوقودية

عملياً يتم توصيل عدد N_s من الخلايا على التسلسل لتشكيل أكداس الخلايا الوقودية للحصول على الجهد المطلوب وتكون عندها قيمة توتر الكدس: [3] [6] [7]

$$V_{stack} = N_s(E_n - V_L) \quad (11)$$

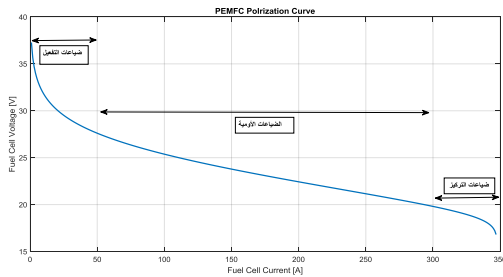
5.2 الخصائص الساكنة للخلية الوقودية

يمكن نمذجة المعادلات الرياضية (5)، (6)، (7)، (8)، (9)، (10)، (11) في بيئة MATLAB لرسم منحنى الاستقطاب للخلية الوقودية والذي يعبر عن خصائصها الساكنة وذلك باستخدام المحددات التفصيلية الواردة في النشرة الفنية لخلية الوقود - Ballard Mark-V 35 cells-5kW-

PEMFC والمعطاة في الجدول (1).

الجدول (1) النشرة الفنية التفصيلية لخلية وقود [2]

Symbol	Parameter	Value
N_s	Number of cells	35
T	Operating Temperature [K]	373.15
A	Active Cell area [cm ²]	232
P_{ca}	Pressure of cathode [bar]	2.41
V_{an}	Volume of anode channel [L]	5
V_c	Volume of cathode channel [L]	10
R_c	Membrane Resistance against proton [Ω]	0.0003
Ψ	Membrane Humidification Factor	12.5
I_L	Max Fuel cell Current density [A/cm ²]	1.5
C_{dl}	Double layer capacitance [F]	8.12
P_{an}	Pressure of anode [bar]	2.41
ϵ_1	Activation Parametric coefficient	-0.948
ϵ_2	Activation Parametric coefficient	-1.93×10^{-4}
ϵ_4	Activation Parametric coefficient	7.6×10^{-5}
l	Membrane thickness [cm]	0.0178
B	Concentration Parametric Coefficient	0.016



الشكل (2) منحنى الاستقطاب للخلية الأومية

كما تم اختبار عمل خلية الوقود عند درجات حرارة مختلفة في النموذج الحاسوبي فكان تغير منحنى استقطاب الخلية وفقاً لما هو مبين بالشكل (3)

يظهر الشكل (2) منحنى الاستقطاب للخلية الوقودية الذي يبين تغير توتر الخلية الوقودية بتغير قيمة التيار المستقر منها، حيث نلاحظ أن المنحنى ينقسم إلى ثلاثة مناطق، المنطقة الأولى هي منطقة الضياعات الناتجة عن هبوط جهد التفعيل في بداية التفاعل، والمنطقة الثانية والتي تأخذ شكلاً خطياً هي منطقة الضياعات الناتجة عن هبوط الجهد الأومي والتي تزداد خطياً بزيادة قيمة التيار المستقر من الخلية، أما المنطقة الثالثة فهي منطقة ضياعات جهد التركيز والتي تزداد بصورة حادة كلما اقتربت قيمة التيار المستقر من الخلية من القيمة الحدية العظمى لتيار الخلية.

6.2 ظاهرة التأخير الناتج عن جريان الغازات في الخلية

الوقودية

تبين معادلة التفاعل الكيميائي داخل الخلية الوقودية عند المصعد (1) أن تأين مول واحد من الهيدروجين يحرر الكترونين، وتكون الشحنة الموافقة لهذه العملية مساوية لجداء كمية الهيدروجين المتفاعلة بشحنة الاكترونات المتحررة. وباعتبار أن الشحنة هي جداء التيار بالزمن عندئذ تكون كمية الهيدروجين المستهلكة خلال واحدة الزمن كعلاقة مع قيمة تيار الخلية: [1]

$$q_{H_2} \left[\frac{\text{mol}}{\text{s}} \right] = \frac{I}{2F} \quad (12)$$

لكن عملياً لا تستطيع الخلية مواكبة تغيرات الحمل بشكل لحظي وذلك بسبب التأخير الناتج عن انخفاض ضغط الوقود الهيدروجيني عند المصعد وضغط الأكسجين الموجود في الهواء عند المهبط.

ويمكن التعبير عن هذا التأخير انطلاقاً من معادلة الغازات

العامية:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (13)$$

حيث P هو ضغط الغاز عند مدخل الخلية [atm]، V حجم الغاز عند مدخل الخلية [m^3]، n عدد مولات الغاز [mol]، R ثابت الغازات العام، T درجة حرارة الغاز [Kelvin]. وباشتقاق طرفي المعادلة (13) وإعادة كتابتها

تكون قيمة تغير ضغط الهيدروجين [1] [2]:

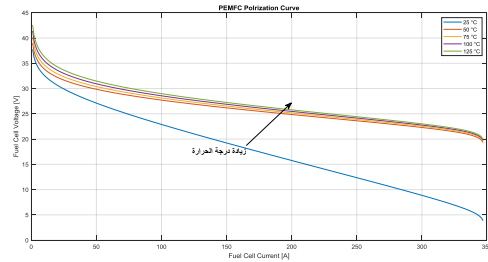
$$\frac{d}{dt} P_{H_2} = \frac{R \cdot T}{V_{an}} (q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{out} - q_{H_2}^r) \quad (14)$$

وباعتبار ثابت $K_r = \frac{1}{4F}$ يكون:

$$q_{H_2} \left[\frac{\text{mol}}{\text{s}} \right] = 2K_r \cdot i_{fc} \quad (15)$$

وباعتبار معامل استخدام U يعبر عن مردود الوقود الهيدروجيني للخلية تكون قيمة كمية الهيدروجين المقدمة للخلية: [1]

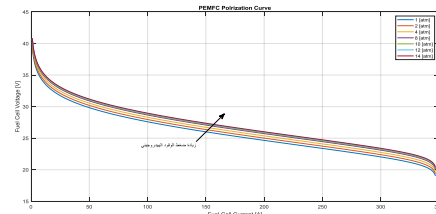
$$q_{H_2}^{in} = \frac{N_s i_{fc}}{2FU} \quad (16)$$



الشكل (3) أثر تغير درجة الحرارة على أداء الخلية الوقودية فبزيادة درجة الحرارة نلاحظ تحسن أداء الخلية الوقودية، وذلك يعود لزيادة قيمة توتر نيرنست بحسب المعادلة (5)، إضافة إلى انخفاض قيمة هبوط جهد التفعيل لكون درجة الحرارة أحد المحددات الداخلة في حساب قيمته.

عملياً يتم تشغيل الخلية الوقودية عند درجة الحرارة التي توصي بها الشركة الصانعة للخلية الوقودية حيث أن الزيادة عن هذه القيمة قد تؤدي إلى تبخير الرطوبة اللازمة لغشاء الخلية وجفافه، وبالتالي إعاقة مرور بروتونات الهيدروجين وانخفاض أداء الخلية وقد تؤدي إلى تلف بعض مكوناتها التي لا تستطيع تتحمل درجات حرارة أعلى.

أيضاً تم اختبار عمل الخلية في النموذج عند قيم مختلفة لضغط الوقود الهيدروجيني، حيث يبين الشكل (4) ارتفاع قيمة توتر الخلية بارتفاع قيمة ضغط الوقود الهيدروجيني، وعملياً يؤخذ بعين الاعتبار تشغيل الخلية عند الضغط المحدد من قبل الشركة الصانعة للخلية دون تجاوزه لما قد يسبب من تطبيق إجهاد على مكونات الخلية وارتفاع درجة حرارتها وإتلافها. ويُظهر الشكل (4) أنه عند زيادة قيمة الضغط عن 8 [atm] تتقارب المنحنيات وتكون الزيادة في قيمة التوتر صغيرة.



الشكل (4) أثر تغير ضغط الغازات على الخلية الوقودية

الدائرة المكافئة للخلية الوقودية عند أخذ أثر الطبقة المضاعفة

بعين الاعتبار مبينة بالشكل (5-ب)

$$(5-أ) \quad (5-ب)$$

يلاحظ هذا الأثر في الخلية الوقودية عند التغيرات السريعة في قيمة التيار المستقر وذلك لكون قيمة المقاومة الداخلية للخلية صغيرة جداً من رتبة ميلي أوم حيث تعطى قيمة الثابت الزمني لهذا المكثف بالعلاقة:

$$\tau = R_{int} * C_{dl} \quad (20)$$

يبين الشكل (5-ب) أن قيمة أثر الطبقة المضاعفة يرتبط

بكل من هبوط التركيز وهبوط التفعيل فقط، وتعطى قيمة تغير التوتر V_d على طرفي المكثف الناتج عن الطبقة المضاعفة بالعلاقة^[2]:

$$\frac{dV_d}{dt} = \frac{I}{C_{dl}} - \frac{V_d}{C_{dl}R_{eq}} \quad (21)$$

حيث:

$$R_{eq} = R_{act} + R_{con} \quad (22)$$

وبالتالي تصبح علاقة توتر الخلية الوقودية بعد أخذ أثر

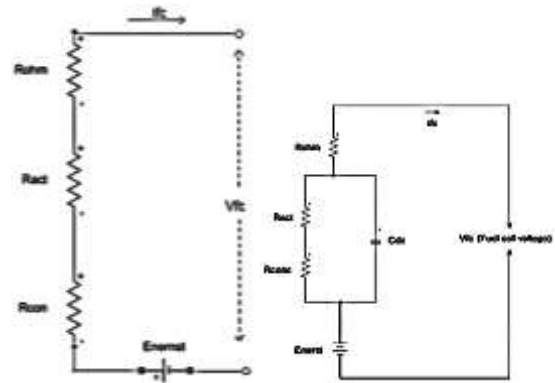
الطبقة المضاعفة بعين الاعتبار^[2]:

$$V_{stack} = N(E_n - V_d - V_{ohm}) \quad (23)$$

8.2 النموذج الديناميكي للخلية الوقودية في بيئة

MATLAB/SIMULINK

بناء على كل من معادلة توتر نيرنست (5)، ومعادلة توتر الكدس V_{stack} (23)، والمعادلات التي تصف هبوطات الجهد (الضياعات) وهي ضياعات التفعيل Activation Losses التي تصفها المعادلتين (7) و(8)، والضياعات الأومية Ohmic Losses التي تصفها المعادلة (9)، وضياعات التركيز Concentration Losses التي تصفها المعادلة (10)، ومعادلة كمية الهيدروجين المقدمة للخلية (16)، وبالأخذ بعين الاعتبار الحالة الديناميكية لخلية الوقود التي تنشأ عن ظاهرة التأخير الناتج عن جريان الغازات والتي تم التعبير عنها بالمعادلات (17)(18)(19)، إضافة إلى أثر الطبقة المضاعفة Double Layer Effect والتي تعبر عنها المعادلة



الشكل (5) الدائرة المكافئة للخلية الوقودية في الحالة الستاتيكية (أ) والحالة الديناميكية (ب) [5]

وباعتبار كامل كمية الهيدروجين المقدمة تتفاعل ضمن الخلية تصبح المعادلة التي تعبر عن ضغط الغازات على مداخل الخلية الوقودية:

$$P_{H_2} = \frac{R.T}{V_{an}} \int_0^t (q_{H_2}^{in} - 2 \cdot K_r \cdot i_{fc}) dt \quad (17)$$

وبشكل مشابه بالنسبة لكل من الأكسجين المغذي للخلية

والماء الناتج عنها يكون:

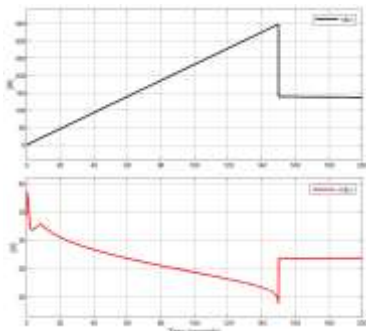
$$P_{O_2} = \frac{R.T}{V_{ca}} \int_0^t (q_{O_2}^{in} - K_r \cdot i_{fc}) dt \quad (18)$$

$$P_{H_2O} = \frac{R.T}{V_{ca}} \int_0^t (q_{H_2O}^{in} - 2 \cdot K_r \cdot i_{fc}) dt \quad (19)$$

7.2 أثر الطبقة المضاعفة Double Layer Effect في

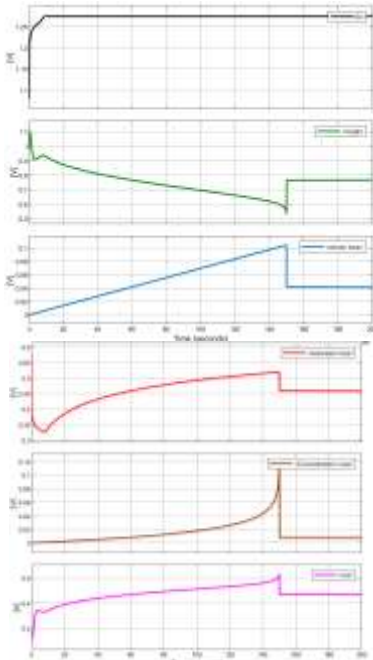
خلية الوقود

تُعطى الدائرة المكافئة لخلية الوقود في الحالة الساكنة بالشكل (5-أ)، حيث يكون توتر الخلية كما ذكرنا مساوياً لقيمة توتر نيرنست مطروحاً منه قيم هبوطات جهد التفعيل والتركيز وهبوط الجهد الأومي، لكن عملياً وبسبب طبيعة بناء الخلية الوقودية المكونة من غشاء التبادل البروتوني المسامي الذي يسمح بمرور بروتونات الهيدروجين الموجبة نحو المهبط من جهة، وكذلك تجمع الالكترونات عند المهبط المسامي من جهة أخرى، فإن ذلك يخلق طبقتين مشحونتين بشحنات متعاكسة ما يكافئ مكثفاً ونظراً لكون الطبقتين ذات طبيعة مسامية فإن السعة الناتجة تشابه مكثفاً فائق السعة. وتكون



الشكل (8) منحنيات التيار والتوتر لخلايا الوقود في الحالة الديناميكية

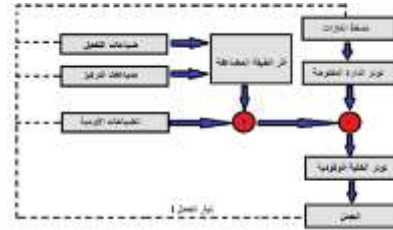
وبأخذ خلية واحدة فقط توتر دارتها المفتوحة عند الشروط النظامية من حرارة وضغط مساوٍ للقيمة [V] 1.229 وتشغيل النموذج الحاسوبي لمراقبة قيم توتراتها وهبوطات الجهد الحاصلة فيها حصلنا على منحنيات توترات الخلية الوقودية المبينة بالشكل (9).



الشكل (9) توترات الخلية الوقودية في الحالة الديناميكية.

نلاحظ أن قيمة توتر نيرنست E_n والذي يعبر عن تشغيل الخلية عند قيم حرارة وضغط تختلف عن الشروط النظامية ارتفع إلى القيمة [V] 1.274 وذلك بسبب زيادة قيمة ضغط الهيدروجين المغذي للخلية وعمل الخلية عند قيم حرارة أعلى،

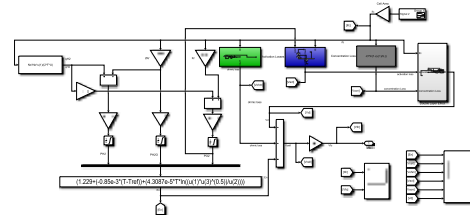
(21)، يمكن بناء نموذج لعمل الخلية الوقودية اعتماداً على المعادلات المذكورة أعلاه وفق الشكل (6) وذلك للإفادة منه في تصميم النموذج الحاسوبي في بيئة MATLAB/SIMULINK.



الشكل (6) نموذج خلية الوقود ذات غشاء التبادل البروتوني

وباستخدام المحددات الواردة في النشرة الفنية للخلية Ballard MARK V الموضحة في الجدول (1).

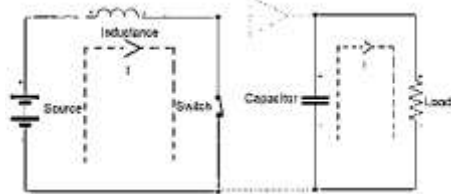
تم نمذجة خلية الوقود ذات غشاء التبادل البروتوني في بيئة MATLAB/SIMULINK كما هو موضح بالشكل (7).



الشكل (7) النموذج الديناميكي لخلية الوقود في بيئة MATLAB/SIMULINK

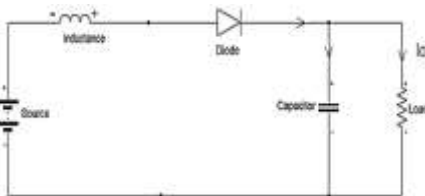
بتشغيل النموذج الحاسوبي عند قيمة متزايدة للتيار من الصفر وحتى قيمة التيار العظمى ومن ثم عند ثبات قيمة التيار المستقر من الخلية، حصلنا على النتائج الموضحة بالشكل (8) والتي تظهر هبوط قيمة التوتر مع ازدياد قيمة التيار خاصة عند الاقتراب من قيمة التيار الأعظمي المستقر من الخلية والذي يساوي إلى جداء كثافة التيار الأعظمي للخلية (1.5 A/cm^2) بمساحة السطح الفعال للخلية A والذي تبلغ قيمته بحسب النشرة الفنية للخلية 232 cm^2 وبالتالي تكون قيمة التيار الأعظمي لهذه الخلية مساوية إلى [A] 348.

يُمانع بدوره ارتفاع التيار عبره بشكل مفاجئ، أما الحمل فيمر عبره تيار المكثف المشحون مسبقاً كما يبين الشكل (11).

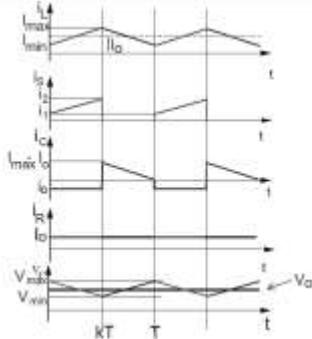


الشكل (11) حالة وصل القاطع في المقطع الرفع للتوتر

ومن ثم يتم فصل القاطع خلال الفترة $(1-k)T$ وعندها ينتقل الديود إلى حالة التوصيل ويجري التيار عبر الديود والحمل ويتم إعادة شحن المكثف من جديد وذلك كما يوضح الشكل (12).



الشكل (12) حالة فصل القاطع في المقطع الرفع للتوتر



الشكل (13) منحنيات التيار المار في الملف والقاطع والمكثف والحمل وتوتر المكثف

ويكون لدينا: [8] [10]

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{1-k} = \frac{T}{t_{off}} \quad (24)$$

حيث:

$$0 < k < 1, \quad V_s < V_o < \infty$$

ونكون قيمة توتر الملف V_L خلال زمن وصل القاطع

t_{on} :

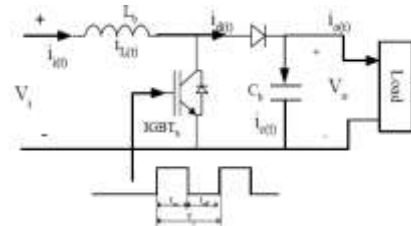
$$V_L = V_s = L \frac{\Delta I}{t_{on}} \quad [V] \quad (25)$$

كما نلاحظ أن توتر الخلية الواحدة V_{cell} ينخفض بصورة كبيرة بزيادة التحميل نتيجة لهبوط التوتر الأومي V_{ohm} الذي يزداد بدوره خطياً بزيادة قيمة التيار المستخرج من الخلية، إضافة لهبوط توتر التفعيل V_{act} الذي تكون قيمته مرتفعة جداً في اللحظات الأولى لعمل الخلية، أما هبوط توتر التركيز V_{con} فترتفع قيمته بصورة حادة عند مقارنة التيار الحدي الأعظمي للخلية عند اللحظة 150s كما يظهر هبوط التوتر الناتج عن ظاهرة الطبقة المضاعفة V_d والمرتبطة بقيمة كل من هبوط توتر التركيز وهبوط توتر التفعيل.

3. المقطع الإلكتروني الرفع للتوتر Boost Converter

1.3 آلية العمل

يعتمد مبدأ عمل هذا المقطع على رفع قيمة التوتر المقدم من المنبع V_s إلى توتر محدد V_o يصمم عنده المقطع بغرض تقديمه إلى الحمل وذلك باستخدام دائرة مكونة من قاطع الكتروني ترانزستوري موصل على التفرع بين المنبع والحمل، ومن ملف موصل على التسلسل مع المنبع يخترن قدرة كهربائية خلال فترة توصيل القاطع t_{on} كما هو موضح بالشكل (10).



الشكل (10) دائرة المقطع التفرعي الرفع للتوتر [8] [10]

مبدأ عمل هذه الدارة هو توصيل القاطع Switch خلال فترة زمنية k من الدور T أي لفترة تساوي kT حيث k هو عامل الدور (Duty Cycle) وتكون قيمته محدودة بين الصفر والواحد $0 < k < 1$ ، ويكون الديود في هذه الفترة منحازاً بشكل عكسي، ويمر تيار المنبع خلال هذا الزمن عبر الملف الذي

$$L = \frac{V_s * k}{\Delta I_L * f} \quad [H] \quad (31)$$

وتكون أقل قيمة مناسبة للمكثف معطاة بالمعادلة:^[9]

$$C \geq \frac{k * V_o}{\Delta V_o * R * f} \quad [F] \quad (32)$$

وعلى سبيل المثال باعتبار توتر الدخل مساوياً $V_s=25$

[V] وتوتر الخرج المطلوب $V_o=48$ [V] فإن قيمة عامل

الدور k تحسب بالعلاقة:

$$k = 1 - \frac{V_s}{V_o} = 1 - \frac{25}{48} = 0.479$$

ولكن قيمة توتر دخل المقطع المقدمة من الخلية الوقودية

متغيرة لذا نلجأ إلى استخدام متحكم تناسبي تكاملي يقوم بتغيير

قيمة عامل الدور بناء على قيمة توتر الخرج والقيمة المرجعية المطلوبة للتوتر.

وباعتبار قيمة تردد القاطع $f=25$ [KHz] وقيمة مقاومة

الحمل $R=1$ [Ω] وباستخدام المعادلتين (31) (32) تكون

قيمة الملف المناسبة لعمل المقطع $L=20.8$ [μH] وتكون أدنى

قيمة للمكثف مناسبة لعمل المقطع $C=2$ [mF] وكلما زادت

قيمة هذا المكثف عن القيمة الدنيا المحسوبة كلما حصلنا على

تتعيم أفضل لتوتر خرج المقطع.

3.3 نمذجة المقطع الرافع للتوتر مع الخلية الوقودية

تمت نمذجة المقطع الرافع للتوتر في بيئة

MATLAB/SIMULINK كما يوضح الشكل (14) حيث

يتكون النموذج الحاسوبي من ملف وديود ومكثف وقاطع

الالكتروني ترانزستوري IGBT يطبق عليه نبضات يتم التحكم

بعامل دورها Duty Cycle والذي يمثل زمن وصل النبضة

وذلك باستخدام كتلة تحوي متحكماً تناسبياً تكاملياً PI يربط مع

مولد لنبضات متحكم بعرضها PWM تقدم إلى بوابة القاطع

الترانزستوري ويتم تعديل هذه النبضات بناء على كل من قيمة

التوتر المقاسة على خرج المقطع وقيمة التوتر المرجعي

المطلوبة.

حيث L هو عامل التحريض الذاتي للملف مقدراً بوحدة

[H].

وبالتالي توّول العلاقة إلى الشكل الذي يعبر عن تغير قيمة

التيار ΔI على طرفي الملف:

$$\Delta I = \frac{kV}{fL} \quad [A] \quad (26)$$

وتكون قيمة تغير التوتر ΔV_C على طرفي المكثف C

معطى بالعلاقة:

$$\Delta V_C = \frac{I_o k}{fC} \quad [V] \quad (27)$$

2.3 تصميم المقطع الرافع للتوتر

يلزم لتصميم المقطع اختيار قيمة كل من الملف والمكثف

بشكل دقيق، فاختيار ملف بقيمة صغيرة يساهم في استجابة

أسرع لكنه يؤدي إلى تغير كبير في قيمة تيار الدخل وبالتالي

زيادة قيمة الضياعات في القاطع الالكتروني والحاجة إلى

مكثف بقيمة كبيرة للتقليل من تعرجات التوتر عند الخرج. تمثل

المعادلة (28) القيمة الحدية للملف والتي تمثل أقل قيمة يمكن

اختيارها دون خروج المقطع عن الخدمة وذلك عند قيم محددة

لكل من مقاومة الحمل R وتردد التقطيع f وعامل الدور k :

[9][10]

$$L_c = \frac{k(1-k)^2 R}{2f} \quad [H] \quad (28)$$

أما الاختيار المناسب لقيمة المكثف فيحدد قيمة تغير

موجة الخرج والمعطاة بالعلاقة:^[9]

$$\Delta V_C = \frac{I_o k}{fC} \quad [V] \quad (29)$$

حيث I_o هو تيار الحمل [A]، C سعة المكثف [F]

نريد تصميم مقطع يتغير تيار دخله من القيمة العظمى

إلى القيمة الدنيا بنسبة 25% أي:

$$\Delta I_L = 0.25 I_L$$

حيث تكون قيمة التيار I_L المارة في الملف معطاة

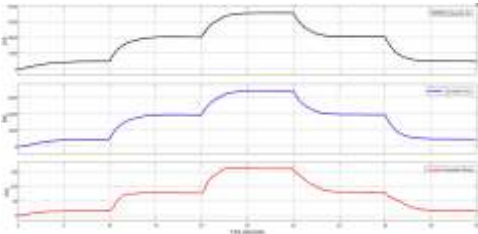
بالعلاقة:^[10]

$$I_L = \frac{V_s}{(1-k)^2 * R} \quad (30)$$

وبالتالي تكون قيمة الملف المناسبة باعتبار هذا التغير

المسموح في تيار الدخل:^[9]

حيث نلاحظ من الشكل (15) انخفاض قيمة توتر الخلية الوقودية عند دخول الحمل الأول في اللحظة 10s نتيجة ارتفاع التيار المستجر منها وانخفاض توتر الخلية مرة أخرى عند دخول الحمل الثاني في اللحظة 20s، وبالمقابل فإن المقطع يستمر بتنظيم الجهد عند السوية المطلوبة [V] 48 حيث يقوم المتحكم PI بتعديل قيمة عامل الدور k وبالتالي تعديل عرض النبضة المطبقة على بوابة القاطع الإلكتروني، ويبين الشكل (16) منحنيات استطاعة دخل المقطع الرفع للتوتر ومنحني استطاعة خرج إضافة إلى مفايد الاستطاعة.

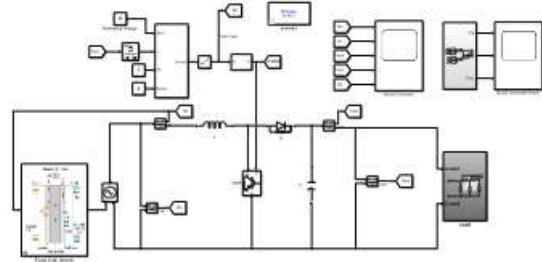


الشكل (16) منحنيات استطاعة دخل وخرج ومفايد المقطع الرفع للتوتر

4. النتائج

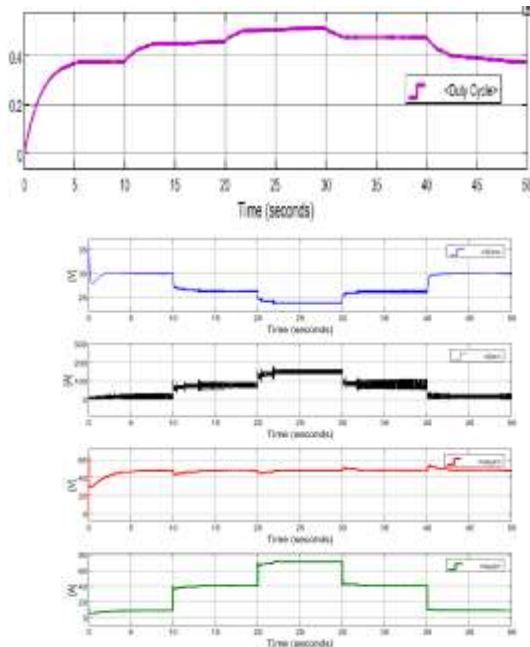
- إن زيادة قيمة التيار المستجر من الخلية الوقودية يؤدي إلى انخفاض توترها بصورة كبيرة خاصة عند الاقتراب من قيمة التيار الحدي الأعظمي لها.
- تحتاج الخلية الوقودية إلى مقطع إلكتروني رافع للتوتر قادر على تنظيم جهد خرجها المتغير بتغير قيمة تيار الحمل المستجر منها لتكون قادرة على تلبية متطلبات الحمل باستمرار.
- تم اقتراح تصميم المقطع الإلكتروني وحساب عناصره بحيث استطاع المقطع تنظيم توتر الخلية الوقودية لتحقيق متطلبات الحمل بالحفاظ على سوية التوتر المطلوبة 48 [V] ثابتةً وذلك باستخدام متحكم تناسبي تكاملي قادر على تغيير قيمة عامل دور التقطيع باستمرار عند تغير توتر الدخل المقدم من الخلية الوقودية.

تم ربط المقطع بموديول خلية الوقود ذات غشاء التبادل بروتوني PEMFC Ballard-Mark-V والتي تمت نمذجتها وفق الشكل (7) وربط خرج المقطع بحمل متغير.



الشكل (14) نموذج المقطع مع نظام الخلايا الوقودية

تم تشغيل النموذج عند زمن أخذ عينات يبلغ $1[\mu s]$ لاختبار عمل المقطع وقدرته على تنظيم الجهد عند وصله على الخلايا الوقودية لتغذية حمل أومي قيمته $5[\Omega]$ ثم إضافة حمل أومي آخر في اللحظة 10s بقيمة $1.5[\Omega]$ ومن ثم إضافة حمل آخر بنفس القيمة عند اللحظة 20s وإعادة فصل الحمل الثاني في اللحظة 30s وفصل الحمل الأول في اللحظة 40s.



الشكل (15) منحنيات توتر وتيار المقطع الرفع للتوتر عند وصله على نظام الخلايا الوقودية ومنحني عامل الدور

5. الخاتمة

تم في هذا البحث دراسة خلايا الوقود ذات غشاء التبادل البروتوني من حيث بنيتها وسلوكها ووضع المعادلات الرياضية الناظمة لعملها وبناء نموذج حاسوبي لهذه الخلية بناء على هذه المعادلات لدراسة خصائص الخلية في الحالتين الستاتيكية والديناميكية، كما تمت دراسة المقطع الالكتروني الرافع للتوتر والمستخدم لربط هذه الخلية مع الأحمال بغرض تنظيم توترها الذي يتغير بتغير قيمة التيار المستجر منها والحصول على توتر ثابت يلبي متطلبات عمل هذا الحمل، حيث تم دراسة آلية عمل هذا المقطع ووضع

المعادلات الرياضية الناظمة لعمله والمعادلات المساعدة لتصميم المقطع واختيار القيم المناسبة للعناصر المكونة له بما يواكب تغيرات جهد الخلية للحصول على توتر ثابت على خرج المقطع، وقد تم بناء نموذج حاسوبي للمقطع في بيئة MATLAB/SIMULINK وربطها مع نموذج الخلية الوقودية لمراقبة أداء هذا المقطع مع الخلية.

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

:المراجع References

1. Lajnef, T., Abid, S., & Ammous, A. (2013). **Modeling, Control, and Simulation of a Solar Hydrogen/Fuel Cell Hybrid Energy System for Grid-Connected Applications**. Advances in Power Electronics.
2. Lee, C. H., & Yang, J. T. (2011). **Modeling of the Ballard-Mark-V proton exchange membrane fuel cell with power converters for applications in autonomous underwater vehicles**. Journal of Power Sources, 196(8), 3810-3823.
3. Saeed, E. W., & Warkozek, E. G. (2015). **Modeling and analysis of renewable PEM fuel cell system**. Energy Procedia, 74, 87-101.
4. Spiegel, C. (2011). **PEM fuel cell modeling and simulation using MATLAB**. Elsevier.
5. Wang, C., Nehrir, M. H., & Shaw, S. R. (2005). **Dynamic models and model validation for PEM fuel cells using electrical circuits**. IEEE transactions on energy conversion, 20(2), 442-451.
6. Salameh, Z. M. (2014). **Dynamic analysis of a stand alone operation of PEM fuel cell system**. Journal of Power and Energy Engineering, 2014. system. Journal of Power and Energy Engineering, 2014.
7. Abd El Monem, A. A., Azmy, A. M., & Mahmoud, S. A. (2012). **Dynamic modelling of proton exchange membrane fuel cells for electric vehicle applications**. ERJ. Engineering Research Journal, 35(3), 205-214.
8. Hasaneen, B. M., & Mohammed, A. A. E. (2008, March). **Design and simulation of DC/DC boost converter**. In 2008 12th International Middle-East Power System Conference (pp. 335-340). IEEE.
9. Lopa, S. A., Hossain, S., Hasan, M. K., & Chakraborty, T. K. (2016). **Design and simulation of DC-DC converters**. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 3(01), 63-70.
10. Posdzi, N. B. M., & Rani, R. B. A. (2020). **Design and develop a boost converter by using matlab simulink simulation**. Southeast Asian Journal of Technology and Science, 1(2), 48-53.