دراسة تأثير الضغط في أداء خلايا الوقود من نوع PEM عند التشغيل بأحمال متغيرة[1]

المهندس سيد محمد حسين موسوي[2] الأستاذ الدكتور المهندس هاشم ورقوزق[3]

الدكتور المهندس محمود الأحمد[4]

الملخص

يمكن عَدُّ إنتاج الطاقة الكهربائية المستمرة من خلايا الوقود من الطرائق الواعدة لتوليد الكهرباء إذْ أنَّ كفاءتها عالية وقد تصل إلى (40-60)%، كما تمتلك وثوقية عالية دون حدوث تلوث بيئي، سيعرض في هذا البحث آلية الحصول على أفضل أداء و أعلى مردود لمنظومة خلايا الوقود من نوع غشاء تبادل البروتونات Proton Exchange (PEM) Membrane، وذلك من خلال التحكم بضغط غازات الوقود المحقونة. ثم باستخدام المعادلات الرياضية الناظمة لعملها التي تبين أداء الخلية ونمذجتها باستخدام برنامج الماتلاب MATLAB، وذلك لتأكيد أثر التحكم بالضغط في الأداء والمردود لخلايا الوقود.

[1] أعد البحث في سياق رسالة الدكتوراه للمهندس سيد محمد حسين موسوي بإشراف الأستاذ الدكتور هاشم ورقوزق ومشاركة الدكتور المهندس محمود الأحمد.

[2] قسم هندسة الطاقة الكهربائية– كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية–جامعة دمشق.

3 قسم هندسة الطاقة الكهربائية– كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية–جامعة دمشق.

[4] قسم هندسة الطاقة الكهربائية– كلية الهندسة الكهربائية–جامعة نبراسكا – الولايات المتحدة الأمريكية.

1-مقدمة:

إن توليد الكهرباء بالهيدروجين لا يحتاج دوماً إلى محطات كبيرة، بل إن اسطوانة من الهيدروجين لدى وصلها إلى عدد من خلايا توليد الكهرباء بالوقود الهيدروجيني قد يفي بالغرض. إذْ إنَّ خلية الوقود هي جهاز قادر على تحويل الطاقة الكيميائية إلى طاقة كهربائية، وتوليد تيار كهربائي مستمر ذي توتر ضعيف، تجمع في حزمة (Fuel cells Stack). تربط هذه الخلايا على التسلسل وعلى التوازي لتعطي التوتر والتيار المطلوبين. يمكن استخدام مبدلات التيار والتوتر(Inverter) معها للحصول على التوتر المتناوب بالقيمة المطلوبة لتغذية أجهزة الإنارة أو أي نوع من الأدوات الكهربائية. وقد قامت بعض الشركات الصانعة بتقديم منتجات من هذا النوع إلى الأسواق ومنها شركة Ballard التي ركبت مجموعات كهربائية باستطاعة من 1 إلى 250 كيلووات. في هذا البحث سَيُدْرَسُ تأثير الضغط في داء أكثر أنواع الخلايا شيوعاً، وهي خلايا غشاء تبادل البروتونات Proton Exchange Membrane (PEM)[1][2]:

2- خلية الوقود ذات غشاء تبادل البروتونات (PEM) Proton Exchange Membrane:

اخترعت خلية الوقود ذات غشاء تبادل البروتونات في سنة 1960 للميلاد في شركة جنرال الكتريك على يد العالمين L. Niedrach & T. Grubb وهي تعدُّ من أفضل أنواع خلايا الوقود و أصغرها حجماً بالنسبة إلى الطاقة الناتجة منها، هذا النوع من خلايا الوقود هو الأكثر انتشاراً في العالم كما أنَّه هو المستخدم في مجالات متعددة نظراً إلى صغر حجمه وانخفاض درجة حرارة العمل فيه. يستخدم في هذا النوع غشاء من مادة البوليمير تسمى نفيون Nafion (التي تؤدي دور الوسيط الكهروكيميائي في الخلية) وهي مادة ذات شكل صلب، وهذا يقلل من درجة حرارة التفاعل ويزيد من الكفاءة (سرعة التفاعل في بدء التشغيل والاستجابة عند التحميل). يوضع غشاء الفصل البوليميري بين قطبين من البلاتين المثقب، وليس هناك أي خطر من نشوء تلوث منه نظراً إلى طبيعته الصلبة ويتم التفاعل فيها تحت درجة حرارة ^{o}C 80، وعند تعرض الغشاء للماء يصبح مادة موصلة للايونات. تصنع الأقطاب من البلاتين وفي بعض الخلايا تطلى بالذهب مما يسبب ارتفاع سعرها. يصل المردود فيها من (40 إلى60)%، كثافة الاستطاعة فيها عالية مقارنة بمثيلاتها من الخلايا إذْ تصل إلى($350-600\frac{mw}{cm^2}$).

2-1- بنية خلية الوقود:

تتكون خلية الوقود من الأجزاء الآتية:

-المصعد (Anode) : هو القطب السالب لخلية الوقود ويمكن أن يكون له عدة مهام، فهو يقود الالكترونات المحررة من جزيئات الهيدروجين ليتم استعمالها في تغذية دائرة كهربائية خارجية، كما أنّه يحتوي على مجارٍ وظيفتها تشتيت غاز الهيدروجين على سطح المحفز catalyst.

-المهبط(Cathode) : هو القطب الموجب لخلية الوقود، ويحتوي على مجارٍ لتوزيع الأوكسجين على سطح المحفز(catalyst)، كما أنّه يقود الالكترونات بالاتجاه الخلفي من الدائرة الكهربائية الخارجية للمحفز، حيث تتوحد جزيئات الأوكسجين وايونات الهيدروجين لتشكل الماء.

-المحلول الكهربائي (Electrolyte): هذه المادة تقود فقط الايونات المشحونة إيجابياً القادمة من الهيدروجين وتمررها من قطب إلى قطب آخر وباتجاه واحد، وتمنع مرور الالكترونات من خلالها.

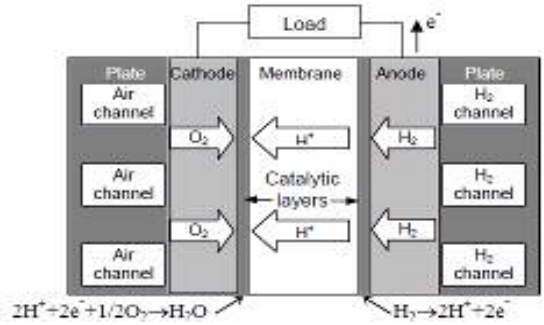
-المحفزات (Catalysts) : وهي مؤلفة من مواد خاصة، تستعمل فيها معادن نادرة مثل البلاتين Platinum والنيكلNickel وإنّ استخدام هذه المحفزات في النظام يسهل تفاعل الأوكسجين مع الهيدروجين.

– مجمع التيار ثنائي القطبية (Bipolar Plates): يعمل على تجميع الالكترونات من الأقطاب وتوزيع الوقود عليها، ويصنع من معادن موصلة أو مطلية بالذهب ذات متانة ميكانيكية جيدة، ويكون على طرفي الخلية. [3][4]

2-2- مبدأ عمل خلية الوقود:

لتوضيح مبدأ عمل خلايا الوقود سنكتفي بشرح آلية العمل في خلية ذات غشاء تبادل البروتونات، تعتمد فكرة عملها على وجود غشاء فاصل (membrane) أي الـ Electrolyte والمحفز(catalyst) الذي يصنع عادة من مسحوق البلاتين (platinum) الذي يكسو ورق الكربون أو القماش بطبقة رقيقة جداً، و يوضع الجانب المطلي بالبلاتين جهة غشاء تبادل البروتون من البلاتين. لدى دخول الهيدروجين (H_2) إلى الخلية يعمل البلاتين على فصله إلى بروتون (proton) وإلكترون (electron) ويسمح الغشاء الفاصل بمرور البروتونات، ولا يسمح بمرور الإلكترونات التي لا تجد وسيلة للعبور إلا من خلال مجمعات التيار، والحصول على تيار كهربائي مستمر(DC)، وفي الناحية المقابلة من الغشاء عند القطب الثاني (المهبط) يتحد الإلكترون مع البروتون بوجود المحفز مرة أخرى ومع وجود الأوكسجين يتكون الماء (H_2O) وتنتشر الحرارة كما في الشكل (1) وتتم التفاعلات فيها على الشكل الآتي:

$$\rightarrow Cell: \quad 2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O \qquad Anode: \quad 2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-$$
$$Cathode: \quad O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$$



الشكل(1) آلية العمل في خلية الوقود PEM.

3- التعاريف المستخدمة:

– كثافة التيار: (Current Density): وهو مقدار التيار المتولد في السنتيمتر المربع الواحد من السطح الفعال للخلية.

– منحنى الاستقطاب (Polarization Curve): الذي يبين علاقة كلٍ من التوتر وكثافة الاستطاعة بكثافة تيار الخلية.

– كثافة الاستطاعة (Power Density): هي الاستطاعة المتولدة في السنتيمتر المربع الواحد من السطح الفعال للخلية.

4- المعادلات الرياضية لخلية الوقود PEM Fuel) Cell Thermodynamic Analysis):

الهدف من هذه الدراسة هي الحصول على المعادلات الرياضية التي تبين عمل الخلية ومحدداتها كتوتر الدارة المفتوحة وتيارها والضياعات التي تحدث عند تشغيلها، وهكذا الاستطاعة المتولدة ومردود خلية الوقود. [5]

4-1: توتر الدارة المفتوحة لخلية الوقود :

يرتبط توتر الدارة المفتوحة في ظروف العمل الحقيقي بدرجة حرارة العمل، إذْ تتغير طاقة جيبس حسب ضغط الوقود الداخل إلى الخلية ودرجة حرارة التشغيل و الماء الناتج من التفاعل، بناء على التفاعلات الكهروكيميائية التي تتم في خلايا الوقود.

تأتي معادلة نرنست(The Nernst equation) $\Delta G = \Delta G^o + RT \ln Q$ لتبين العلاقة بين توتر الدارة المفتوحة (E_o) في الشروط النظامية (T=25 C^o $P_{H_2} = P_{O_2} = 1atm$) وتوتر العمل لخلية الوقود(E) في درجات حرارة وضغوط مختلفة تعطى المعادلة على الشكل كالآتي: [6] [11][12]

$$E = \frac{\Delta G}{2F} - \frac{\Delta S}{2F}(T - T_{ref}) + \frac{R \times T}{2F} \times [\ln(P_{H2}) + \frac{1}{2}\ln(P_{O2})] \quad (4\text{-}1)$$

إذْ ΔG تغير الطاقة الحرة لجيبس Gibbs بـ (J/mol). وΔS المفاقيد الانتروبية (entropy) بـ(J/mol)

إذْ (R) ثابت الغاز (8.314 joule/K.mole)،و(T) درجة الحرارة كلفين، و(P_H) ضغط الغاز في المصعد و(P_O) في المهبط و(bar)، (F) ثابت فاراداى Faraday's Constant (96.487 joule/k.mole) وإذا عوضت المقادير في المعادلة السابقة يتم الحصول على المعادلة الآتية: [6][10] [11]

$$E = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3}(T - 298) + 4.31 \times 10^{-5} \times T \times [\ln(P_{H2}) + \frac{1}{2}\ln(P_{O2})] \quad (4\text{-}2)$$

4-2:- ظاهرة الاستقطاب (Polarization phenomenon) :

عند تحميل خلية الوقود يهبط توتر العمل ليصل إلى 60% أو 70% من توتر الدارة المفتوحة وذلك (بسبب ظاهرة الاستقطاب(Polarization) التي تسمى أحياناً (Over Voltage) و(Over Potential) ويعبر عنها في المراجع الحديثة بالضياعات (Losses) وتتكون هذه الضياعات أو الاستقطاب من ثلاثة مصادر وهي:

4-2-1- استقطاب التفعيل (η_{act}) Polarization :Activation

عند بدء تحميل الخلية يهبط التوتر بشكل مفاجئ بمقدار (η_{act} >50−100 mv) وبعدها يبقى التوتر ثابتاً، ذلك بسبب الطاقة اللازمة لبداية التفاعل بين الغازات خصوصا الاكسيجين، مقدار هذا الهبوط يرتبط بنوع المحفزات وكثافة الهيدروجين والاكسيجين على سطح المحفزات، وتعطى معادلة استقطاب التفعيل بعد التعويض من[1][2] Table بالشكل الآتي [13][11][6] [7].

$$L_{act} = \xi_1 + T \times [\xi_2 + \xi_3 \times \ln(C^* o_2) + \xi_4 \times \ln(i)] \quad (4\text{-}3)$$

$$L_{act} = -0.944 + T \times (0.00354 - 7.8 \times 10^{-5} [\ln(C^* o_2)] - 0.00019 \times \ln(i)) \quad (4\text{-}4)$$

حيث i التيار(أمبير) وC^*o_2 كثافة الاكسيجين على المحفزات و تحسب من المعادلة الآتية: [8]

$$C^* o_2 = \frac{P_{o2}}{5.08 \times 10^6 EXP(\frac{-498}{T})} \quad (4\text{-}5)$$

4-2-2- الاستقطاب الاومي (η_{ohm}) Ohmic :Polarization

يتناسب الاستقطاب الاومي طرداً مع التيار ونظراً إلى أنَّ مقاومة الخلية تقريبا ثابتة يكون تغير الاستقطاب الاومي خطيا وهذا يحدث بسبب نشوء المقاومة أمام عبور الايونات في الالكتروليت، والمقاومة الاومية للأقطاب، وبتخفيض هذه المقاومات عن طريق استخدام الالكتروليت المناسب والمعادن المناسبة في الأقطاب يمكن التغلب على هذه المشكلة، وتكتب المعادلة على الشكل الآتي. [3]

$$L_{ohm} = iR^{internal} \quad (4\text{-}6)$$

إذْ i تيار الخلية و$R^{internal}$ المقاومة الداخلية للخلية، وتعطى في النشرة الموسعة للخلية، أو تحسب من العلاقة الآتية:[3]

$$R^{internal} = 0.0160 - 3.5 \times 10^{-5} \times T + 8.0 \times 10^{-5} \times i \quad (4\text{-}7)$$

4-2-3- استقطاب التركيز Concentration :Polarization (η_{Con})

يحدث هذا الاستقطاب عند كثافات تيار عالية، ويحدث بسبب عدم وصول غازات التفاعل إلى الأقطاب بشكل

كافٍ والذي يسبب الهبوط في توتر الخلية ويحسب من العلاقة الآتية:[8] [9]

$$L_{Con} = \beta \times \ln(1 - \frac{J}{J_{\max}}) \quad \& \quad \begin{matrix} \beta = 0.016V \\ J_{\max} = 1.0A/Cm^2 \end{matrix} \qquad (4\text{-}8)$$

تعطى(J_{max}) في نشرة الخلايا واعتُمِدَ في هذه الدراسة على القيمة (1 A) لتوافقها مع معظم الدراسات في هذا المجال.

إذْ β ثابت الخلية المستخدمة و J كثافة التيار J_{max} أكبر كثافة تيار، وتأخذ قيمته بين واحد وواحد ونصف أمبير على السنتيمتر المربع، وتصبح المعادلة النهائية لتوتر الخلية على الشكل الآتي:

$$V = E - L_{act} - L_{ohm} - L_{Con} \qquad (4\text{-}9)$$

$$V = (1.23 - 0.9\times10^{-3}(T-298) + \frac{RT}{4F}\ln(P^2_{H2}\times P_{O2})) - [+0.9514 - T\times(0.00312 + T\times7.4\times10^{-5}[\ln(C^*o_2)] - 0.000187\times\ln(i)) - (i\times(0.01605 - 3.5\times10^{-5}\times T + 8.0\times10^{-5}\times i)) - (\beta\times\ln(1-\frac{J}{J_{\max}}))] \qquad (4\text{-}10)$$

4-3: استطاعة خلية الوقود

يتم الحصول على استطاعة خلية الوقود من المعادلة الآتية إذْ (I) كثافة التيار في السنتيمتر المربع في قطب الخلية.(A) سطح القطب، (V) توتر الخلية، وتعطى هذه القيم في نشرة الخلية.

$$(P = V\times I\times A) \qquad (4\text{-}11)$$

4-4: مردود خلية الوقود:

تعطى في المراجع معادلات متعددة لتبيان المردود حيث المعادلة التالية هي المردود الكهربائي والأبسط والأكثر استخداما في البحوث. في العلاقة لدينا (i) تيار الخلية و(E) توتر الدارة المفتوحة و(V) توتر عمل الخلية وعليه.[15]

$$Eff. = \frac{i\times V}{i\times E} = \frac{V}{E}\% \qquad (4\text{-}12)$$

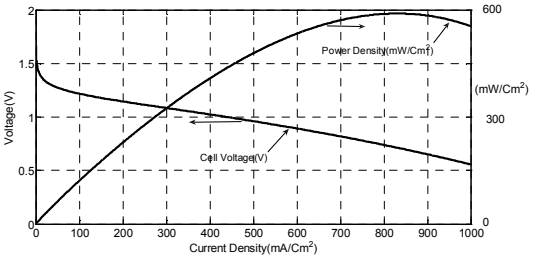
5 : استخدام المعادلات الرياضية لتمثيل أداء خلايا الوقود PEM في بيئة برنامج Matlab:

لدراسة أداء خلية الوقود في حالة التشغيل اعتماداً على المعادلة الرياضية النهائية (10–4) التي تم الحصول عليها بدمج كلٍّ من المعادلات (4-4) (4-7) (4-8) (4-2)، إذْ تمتاز هذه المعادلة بأنها أقل تأثيراً بالمحددات الميكانيكية والفيزيائية لمكونات الخلية، وتعتمد على الثوابت ودرجة الحرارة التشغيل وضغط الغازات الداخلة وكثافة التياروتوتر خلية الوقود. ثم تم تمثيل هذه المعادلة النهائية في بيئة برنامج Matlab Table[4] لبيان الأداء الكهربائي للخلية وتأثير ضغط غازات الوقود ودرجة الحرارة عليها، ولهذا اختيرت مجموعة خلايا وقود بوليميرية (PEM) لشركة بالارد(Ballard (Mark V حيث أجريت الدراسة على خلية واحدة (single fuel cell) ، ولدى حل المعادلات و تغيير البارامترات تم الحصول على النتائج التالية والتي هي مشابهة تماما للمنحنيات المبينة في النشرات العلمية لخلايا الوقود،و تم الحصول على أنَّ أفضل تحكم بأداء الخلية هو من خلال التحكم بضغط غازات الوقود. ولتوثيق ما تم التوصل إليه أجريت تغيرات على نموذج لمنظومة خلايا الوقود المنمذجة في برنامج Matlab/Simulink وسيوضح ذلك بالتفصيل في الفقرات اللاحقة. [12] [Table.1&2] من Appendix 1.

5-1: منحنى علاقة توتر الخلية وكثافة الاستطاعة مع كثافة التيار(Voltage/Power relationship Curve):

يبين الشكل (2) علاقة كل من التوتر الناتج عن الخلية وكثافة الاستطاعة بكثافة التيار وذلك لحالة العمل في الشروط المعطاة في نشرة الخلية كدرجة الحرارة

والضغط (1bar & 343 K) وهو مشابه للمنحنيات المنشورة في النشرات العلمية لخلايا الوقود، و إذْ تزداد كثافة الاستطاعة بازدياد كثافة التيار ثم تنخفض بسبب تزايد الاستقطابات المؤثرة في توتر الخلية، عادة لا تكون أعلى نقطة بالمنحنى هي نقطة العمل للخلية أي لا يمكن العمل عند الاستطاعة العظمى وذلك بسبب أن مردود الخلية يكون منخفضاً، ويزداد توليد الماء وترتفع الحرارة في هذه النقطة مما يصعب قيادة الخلية ويقصر من عمرها المفيد. هذا المنحنى هو المعيار الحقيقي لأداء الخلية واستنتاج توتر وتيار العمل والاستطاعة العظمى التي يمكن استجرارها دون إلحاق الضرر بالخلية عند دراسة تأثير الضغط والحرارة فيها والتي سيم استعراضها في الفقرات اللاحقة بالتفصيل. المؤشر الموضوع على المنحنى يبيّن ازدياد كثافة الاستطاعة ونقصان توتر الخلية بزدياد كثافة التيار المستجر من الخلية.



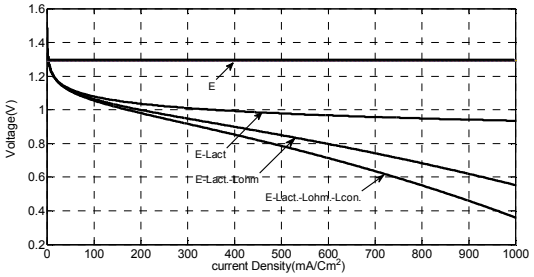
الشكل (2) علاقة كل من التوتر بكثافة الاستطاعة مع كثافة التيار.

2-5: منحنى الاستقطاب للخلية (polarization Curve):

يبيّن الشكل(3) توتر الدارة المفتوحة للخلية (E) ومراحل هبوط التوتر في خلية الوقود عند التشغيل، وكما أشير إليه سابقاً هذا الهبوط ناتج عن الاستقطابات الثلاثة (التفعيل L_{act}) و(الاومي L_{Ohm}) و(التركيز L_{Con})، كما يبيّن الشكل أن توتر الخلية عند بدء التشغيل يهبط بشكل مفاجئ، وذلك بسبب ضياعات التفعيل (L_{act}) وبعد ذلك يقل هذا الهبوط حتى يكاد يختفي.

الهبوط الثاني في التوتر ناتج عن المقاومة الداخلية (L_{Ohm}) للخلية، بسبب نشوء المقاومة أمام عبور الايونات في الالكتروليت والمقاومة الاومية للأقطاب ويتزايد خطياً مع تزايد تيار الحمل.

الهبوط الثالث في التوتر (L_{Con}) يحدث عند كثافات تيار عالية، وذلك بسبب عدم وصول غازات التفاعل ألى الأقطاب بشكل كاف، كما يبّين الشكل ضياعات التفعيل والهبوط الاومي عند كثافة تيار منخفضة، هي الغالبة والأكثر وضوحاً.



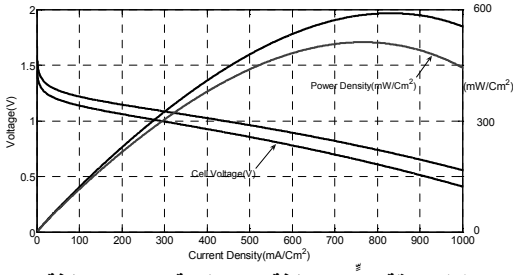
الشكل(3) الاستقطابات الثلاثة التي تؤثر سلباً في أداء الخلية.

3-5: تأثير الضغط والحرارة على منحني الاستقطاب وكثافة الاستطاعة:

يبّين الشكل(4) منحنى الاستقطاب لخلية الوقود وذلك لحالتين من التشغيل:

الحالة الأولى من العمل ضمن الشروط المعطاة في نشرة الخلية كدرجة الحرارة والضغط المعطاة في النشرة (1 bar & 343 K). الحالة الثانية من العمل عند ($0.5bar$ & 25^oC) مما يبّين هبوط الطاقة المتولدة من الخلية. عادة درجة الحرارة والضغط في خلايا الوقود البوليميرية تتناسب طرداً مع الاستطاعة المتولدة. أمَّا درجة الحرارة فيجب أن تكون أقل من درجة الغليان للماء حتى لا تتسبب بتبيس الغشاء

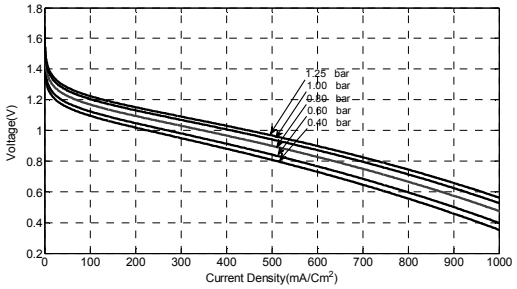
الفاصل الذي يعمل بتمرير الايونات عندما يكون طرياً، لهذا يرى أن إدارة درجة الحرارة في منظومة خلايا الوقود ذات أهمية كبيرة ويسعى إلى تثبيتها عند ظروف عمل مختلفة عن طريق مروحة تبريد أو نظام تبريد ملحق بالخلية، يعمل على الماء أو سوائل تبريد أخرى، ويكون التحكم باستطاعة الخلية عن طريق ضخ كمية الوقود. يبّين الشكل(4) أنه عند انخفاض الحرارة والضغط كيف ينخفض التوتر إلى 0.1 فولت، وهو الذي يسبب انخفاض المردود بمقدار 10% من المردود الاسمي لها.



الشكل(4) علاقة كلٍّ من كثافة الاستطاعة والتوتر بكثافة التيار عند ظروف تشغيل مختلفة.

4-5: تأثير الضغط في أداء خلية الوقود (Impact of Pressure on Fuel Cell Voltage):

يبين الشكل(5) أنه عند زيادة الضغط يتحسن أداء خلية الوقود البوليميرية، لكن هذا الازدياد يجب أن يكون ضمن الضغط المسموح فيه في نشرة الخلية، لذا عند ازدياد الضغط عن القيمة الاسمية (1bar) يتحسن الأداء قليلاً، ويبين ذلك تقارب قيم توتر الخلية عند زيادة الضغط أكثر من القيم الاسمية الذي يوضحه تقارب الخطوط في الشكل (5)، هذا الازدياد يؤدي إلى ارتفاع درجة الحرارة و قيم الاستقطابات الثلاث إذْ ستكون تأثيراته السلبية أكثر من الإيجابية؛ مما يسبب انخفاض المردود وزيادة كلفة الإنتاج، لذا أكبر ضغط هو الذي يعطى في نشرة منظومة خلايا الوقود المستخدمة وهنا كان الضغط هو (1 bar).



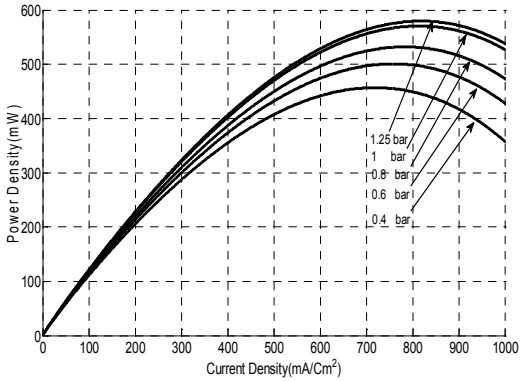
الشكل(5) تأثير ضغط غازات الوقود في أداء خلية الوقود.

5-5:التحكم بضغط غاز الهيدروجين لتحسين أداء خلية الوقود:

كما وضح سابقاً عندما يضخ الهيدروجين على المصعد (Anode)، عندها سيتجزأ بواسطة المحفز إلى ايون الهيدروجين (البروتون) الذي يعبر من خلال الغشاء الفاصل (membrane) داخل الخلية، والإلكترون سيمر عبر الدارة الخارجية الموصولة للحمل ليتحد الإلكترون مع البروتون بوجود المحفز مرة أخرى، ومع وجود الأوكسجين يتكون الماء (H_2O)وتنتشر الحرارة.

غالباً عند تشغيل منظومة خلايا الوقود بأحمال متغيرة يتم التحكم بصمام خزان الهيدروجين أي كمية الغاز المضخ في النظام (liter /minute) عند ضغط ثابت أو تغير الضغط تبعا لفتحة الصمام دون التركيز عليه، ونظراً إلى أنَّ عدد الإلكترونات التي ستمر عبر الدارة الخارجية ترتبط بتيار الحمل وهذا يحدد كمية الهيدروجين المستهلكة، لذلك عندما يضخ غاز الهيدروجين بضغط ثابت وكون استطاعة الحمل أقل من الاستطاعة الاسمية للخلية، عندها سيتراكم الغاز على المهبط؛ مما يسبب عدم عبور الايونات من الغشاء الفاصل، ويحدث هبوط مردود الخلية.[14]

لذا بغية الحصول على أفضل أداء لمنظومة الخلايا استناداً إلى النتائج الحاصلة في الفقرة (5-4) يمكن التحكم بضغط غازات الوقود من خلال تيار الحمل، لذا عندما يكون الحمل متغيراً يتم العمل على تغيير ضغط الغازات ليتناسب مع الاستطاعة المطلوبة من منظومة الخلايا، يبّين الشكل (6) مجال التحكم باستطاعة الخلية من خلال تغير ضغط غازات الوقود.

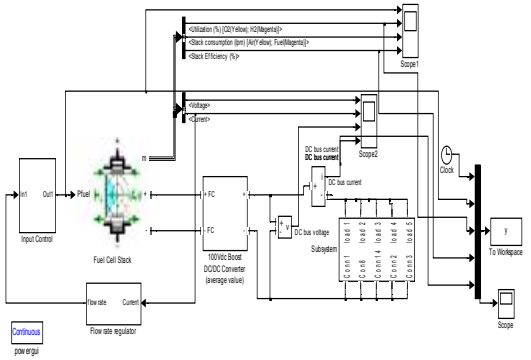


الشكل(6) تأثير تغير الضغط على الاستطاعة المتولدة من الخلية.

5-6: استخدام بيئة Simulik/Matlab لدراسة تأثير الضغط في أداء الخلية.

لبيان ما تم التوصل إليه في الفقرة السابقة وتوضيحه استخدم النموذج الموجود في بيئةMatlab/Simulink لمنظومة خلايا وقود من نوع PEM، واختير نموذج باستطاعة 1.26Kw ذو موصفات تتلاءم مع ما درس سابقاً بالمعادلات الرياضية، [Tabel.4].

أُدْخِلَتْ تعديلات على دارة التحكم حتى يمكن الباحث من خلال تغير تيار الحمل تغير كمية ضخ غازات الوقود وهكذا كمية ضغط هذه الغازات التي يريدها أن تزداد بتزايد تيار الحمل، و أجريت تعديلات على حمل منظومة الخلايا بحيث قُسِّمَ الحمل على خمس مراحل ليزداد خلال هذه المراحل بالتساوي، إذْ في المرحلة النهائية يكون الحمل الاسمي للمنظومة، خلال عمليات التغير تم رفع المردود الاسمي للمنظومة إلى 50% ليتناسب مع الدراسة دون إحداث خلل في عملها كما في الشكل (7). درس عمل هذه المنظومة عند ثلاث وضعيات مختلفة وتم الحصول على النتائج الآتية: [Table.3] من Appendix 2

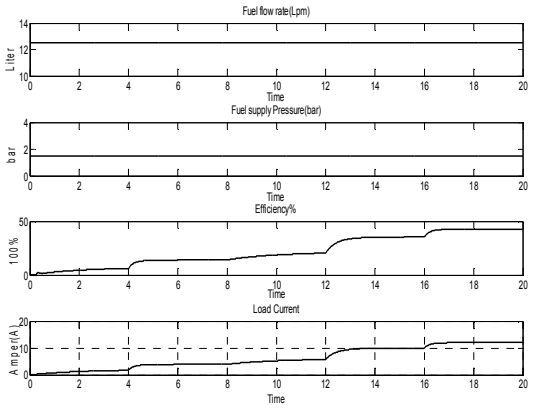


يبّين الشكل (7) نموذج منظومة خلايا PEM بعد التعديلات التي أجريت عليها في بيئة Simulik/Matlab .

5-6-1: أداء منظومة خلايا الوقود عند ضغط ثابت وكمية ضخ وقود ثابتة :

Performance of Fuel Cells System on constant Fuel flow rate and pressure

في هذه الحالة تم العمل على تثبيت الضغط (Pressure 1.5 bar) و كمية الوقود الداخلة (Fuel flow rate) (12.2 Liter/min.) إلى المنظومة كما يبين الشكل (8)، حيث المردود في البداية منخفض جداً، وبعد ذلك يزداد المردود بتزايد تيار الحمل ويصل إلى أفضل حالة عندما تعمل المنظومة على كامل الحمل (الحمل الاسمي)، لكن خلال المراحل الأربع الأولى للحمل المردود منخفض، وهذا يدل على أن أداء الخلية بشكل عام ليس جيداً.

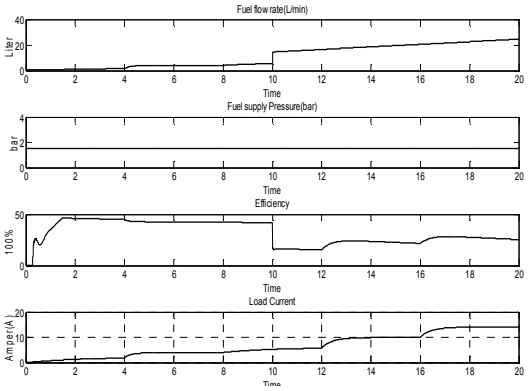


الشكل (8) مخططات أداء منظومة خلايا الوقود عند ضغط وكمية ضخ وقود ثابت.

5-6-2: عمل منظومة خلايا الوقود عند ضغط ثابت وكمية ضخ وقود متحكم بها :

Performance of Fuel Cells System on constant pressure and variable Fuel flow rate

في هذه الحالة تم تثبيت الضغط (1.5 bar)، كمية الوقود الداخلة إلى المنظومة (Liter/min.) تتغير حسب تيار الحمل إذْ كلما ازداد تيار الحمل ازدادت فتحة صمام الوقود عند الضغط الاسمي للمنظومة بشكل ثابت، كما يّبين الشكل (9) المردود في البداية يكون جيداً، وبعد ذلك بتزايد الحمل حتى النصف يكون المردود في المستوى المطلوب، لكن عند تزايد تيار الحمل من النصف حتى القيمة الاسمية للحمل فإن المردود ينخفض ويتأرجح حول نصف المردود الاسمي للمنظومة؛ مما يدل على أداء سيئ للمنظومة.

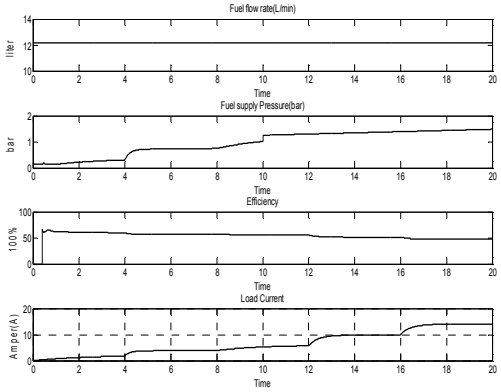


الشكل (9) منحنيات أداء منظومة خلايا الوقود عند ضغط ثابت وكمية ضخ وقود متغيرة.

5-6-3: عمل منظومة خلايا الوقود عند ضغط متغير وكمية ضخ وقود ثابتة :

Performance of Fuel Cells System on constant Fuel flow rate and variable pressure

في هذه الحالة تم العمل على تثبيت كمية الوقود الداخلة إلى المنظومة (المقدار الاسمي 12.2 Liter/min.)، وتغير الضغط ضمن مجال (1.5 – 0.0 bar) طرداً مع تيار الحمل، كما يبّين الشكل (10) يزداد تيار الحمل بشكل تدريجي ضمن خمس مراحل، عندها دارة التحكم للمنظومة تعطي أوامر بزيادة ضغط غازات الوقود متناسبا مع تيار الحمل بغية الحصول على أفضل مردود لعمل المنظومة، فكما يبّين الشكل(10) المردود يتأرجح حول 50% عند مراحل التحميل كلّها من وضعية أقل حالة التحميل حتى تحميل الاسمي للمنظومة وهذا يعطي أفضل أداء للمنظومة. وذلك كما ذكر في الفقرة (5-4)عند انخفاض الضغط تنخفض الاستطاعة المتولدة من منظومة الخلايا مما جعلناه يتناسب مع استطاعة الحمل المطلوبة عند حالات تحميل أقل من التحميل الاسمي لها.



الشكل (10) منحنيات أداء منظومة خلايا الوقود عند ضغط متغير و كمية ضخ وقود ثابتة.

6- الخاتمة:

تم باختصار عرض مبدأ عمل خلايا الوقود البوليميرية PEM استناداً إلى المعادلات الرياضية الواصفة لخواص خلايا الوقود الأساسية ودمج هذه المعادلات، وتم الحصول على المعادلة العامة التي توضح تأثير الحرارة وضغط غازات التفاعل في الاستطاعة المتولدة، ومن ثَمَّ في أداء الخلية ككل، تم نمذجة هذه المعادلات باستخدام بيئة MATLAB والحصول على المنحنيات الواصفة لأثر كل حالة، هذه المنحنيات التي ذكرت في البحث تعطي صورة أوضح لتفهم أداء خلايا الوقود والعمل على تلافي العوامل الفاعلة في إنقاص استطاعة خرج الخلايا، كما اِسْتُخْدِمَ نموذج لمنظومة خلايا وقود موجود في بيئة Matlab/Simulink التي يتلاءم مع ما درس، وأُجْرِيَتْ تغيرات على دارة التحكم لهذه المنظومة مما أسهمت هذه العملية بشكل كبير في بيان تأثير هذه التغيرات الإيجابية في أداء المنظومة وتوثيق ما توصل إليه من خلال هذه الدراسة لقيادة منظومة خلايا الوقود، والعمل على توفير أفضل الشروط حتى تستطيع هذه الخلايا العمل عند أفضل مردود دون التسبب بضرر لمنظومة خلايا الوقود.

البحث المنشور[14] أفاد هذا البحث بالطريقة العملية لتأثير الضغط في آليّة العمل في خلايا الوقود، وهكذا خواص خلايا شركة بالارد[1][2] Table كانت دليل العمل وأسهمت في تزويد البحث بمزيد من المعرفة في سلوك خلايا الوقود.

Appendix 1

Table 1 – Parameters of the Ballard Mark V fuel cell

Param.	Value	Param.	Value
T	343 K	ξ_1	-0.948
A	50.6 cm^2	ξ_2	$0.00286+0.0002\ln(A)+(4.3\cdot10^{-5})\ln(C_{O_2})$
l	178 µm	ξ_3	$7.6\cdot10^{-5}$
P_{O_2}	1 atm	ξ_4	$-1.93\cdot10^{-4}$
P_{O_2}	1 atm	ψ	23
B	0.016 V	J_{max}	1500 mA/cm^2
R_c	0.0003 Ω	J_n	1.2 mA/cm^2

يبين [1]Table النشرة الموسعة لخلايا الوقود PEM من شركة بالارد [12].

Table 01: Progressive expressions of the PEMFC electrochemical model

Author and Fuel Cell Model	Polarization, Empirical expression and variable parametric coefficients
Amphlett (2000)	$R_M = \frac{r_M \cdot l}{A}$
	Ballard mark – IV / *Ballard mark – V*
	ξ_1= - 0,9514 / ξ_1= - 0,944
	ξ_2= 3,12×10^{-3} / ξ_2= 3,54×10^{-3}
	ξ_3= 7,4×10^{-5} / ξ_3= 7,8×10^{-5}
	ξ_4= - 1,87×10^{-4} / ξ_4= - 1,96×10^{-4}
Amphlett (1996) Ballard Mark V 5 Kw, A=230 cm^2	*Model : GSSEM* ξ_1= - 0,948 ± 0,004; ξ_2= 0,00286+0,0002(ln A)+(4,3×10^{-5})lnC_{O_2}; ξ_3= (7,6 ± 0,2)×10^{-5}; ξ_4= - (1,93 ± 0,05)×10^{-4}
	$R_M = \xi_1 + \xi_2 \cdot T + \xi_3 \cdot I_{DC}$
	ξ_1= - 0,944; ξ_2= 3,54×10^{-3}; ξ_3= 7,80×10^{-5}; ξ_4= - 1,96×10^{-4}
	ξ_1= 3,30×10^{-3}; ξ_2= - 7,55×10^{-5}; ξ_3= 1,10×10^{-4}

[Table.2]from [13]

```
Jmax=1000.1; %mileAmp/cm^2
Lcon=B*log(1-(J/Jmax));
V=E+Lact+Lohm+Lcon;
V1=E+Lact+Lohm;
V2=E+Lact;
V3=E;
%Pfeul=(J.*V);
plot(J,V1)
plot(J,V2)
plot(J,V3)
plot(J,V)
%plot(J,Pfeul)
%plot(V,Pfeul)
%plot(T,Pfeul)
grid
```

[Table.4] برمجة المعادلات الرياضية في بيئة Matlab

المراجع

[1]-Connea , J.M. " hydrogen Fuel for Surface Transportation"1996.

[2]- Services Athero,Fuel Cell Handbook " EG&G Services ,2000.

[3] – Http://Fuel Cells.Si.edu//alk/alkmain.htm.

[4]- Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies: Rev 0, December 2001.

[5] – Yang ,C. " Introduction to Fuel Cell Science and Engineering "Lecture 5 - Fuel Cell Fundamentals. Hydrogen Economy , TTP 289 -2002.

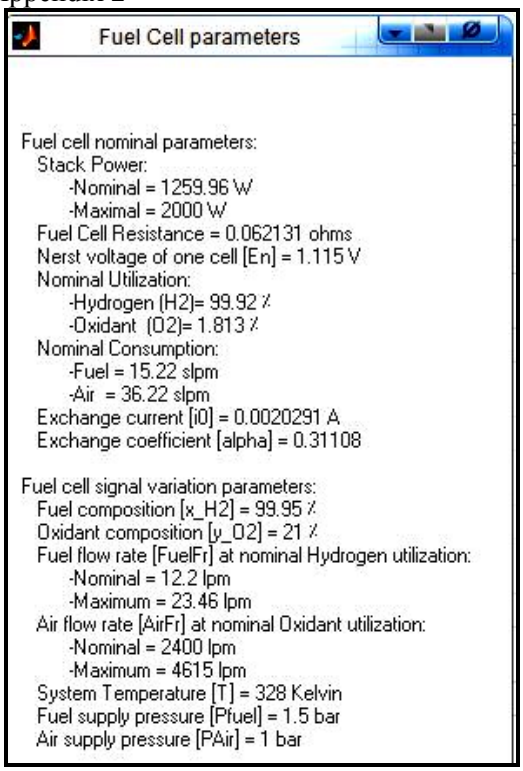
[6] - Bernardi , D.M. , Alche, J. " A Mathematical Model of the solid-polymer Electrolyte Fuel Cell" , Electrochemical Society, Vol.139,N 0.1,Jan.1995.

[7] – R.F. Mann, J.C.Amphlett, "Development and Application of a Generalized steady-state Electrochemical Model for a PEM Fuel cell " J. power Sources /2000.

[8] – J.M.Correa, F.A. Farret, " An Analysis of the Dynamic Performance of proton Exchange Membrane Fuel Cells using an Electrochemical Model"/ IEEE Industial Electronics Society, 2001.

[9] – D. Xue, Z. Dong "Optimal Fuel Cell System Design Considering Functional Performance and Production Costs" J. power Sources/ 1998.

Appendix 2



[Table.3] مواصفات منظومة خلايا الوقود في برنامج Matlab/Simulink.

%feul cell (V, I)

```
%feul cell (V, I)$
T=343; %K
R=8.31447;
F=96484;
P=1;
P1=P; %PH2
P2=P; %Po2
E=1.229-0.0085*(T-
298)+T*0.0000431*(log(P1)+0.5*log(P1));
%En=Enernst for open cercut
D=exp(-498*T.^(-1));
i=0.01:0.01:75;
J=i*15;
Lact=-
0.9514+T*(0.00354+0.000078*((log(P2/(5.08
*(10^6))))*D)-0.000196*log(i)); %Activtion
losses
Rint=0.01605-0.000035*T+0.00008*i;
Lohm=-i.*Rint;  %ohmic losses
B=0.016; %volt
```

[10]- R. Roshandel, B. Farhanieh. " The effects of non-uniform distribution of catalyst loading on polymer electrolyte membrane fuel cell performance" ELSEVIER/ September 2007.

[11] R.F. Mann , J.C. Amphlett , M.A.I. Hooper , H.M. Jensen , B.A. Peppley , and P.R. Roberge, " Development and application of a generalized steady – state electrochemical model for a PEM fuel cell." J. power Sources , vol. 86 ,pp. 173 -180 ,2000.

[12] Jeferson M. Correa, student Member , IEEE, Felix A.Farret, Luciane N. Canha, and Marcelo G. Simoes, Senior Member , IEEE. " An Electrochemical –Based Fuel -cell Model suitable for Electrical Engineering Autoation Approach" 2004 IEEE.

[13] Bouziane MAHMAH. Abdelhamid M'RAOUI. Maïouf BELHAMEL. Hocine BENMOUSSA " Experimental Study and Modelling of a Fuel Cell PEMFC Fed Directly with Hydrogen / Oxygen" June 2006 – Lyon France.

[14] Q. Li W. Chen, Y. Wang, J. Jia, M. Han. "Nonlinear robust control of proton exchange membrane fuel cell bystate feedback exact linearization"Journal of Power Sources (2009).

[15] Jia, Member.Q. Li, Y. Wang,Y.T.Cham, "Modeling and Dynamic Characteristic Simulation of a proton exchange membrane fuel cell linearization"2009 IEEE.

تاريخ ورود البحث إلى مجلة جامعة دمشق: 2009/8/31.