

# A New Model for Load Tracker for an Electrochemical Power System with DC-DC Converter based on Artificial Neural Networks and Fuzzy Logic

Dr. Imane Dilaneh\*

(Received 23 / 3 / 2022. Accepted 14 / 9 / 2022)

## □ ABSTRACT □

This paper presents a new methodology to improve the performance efficiency of an electrochemical power system type of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC), using a new tracer model based on the use of Artificial Neural Networks (ANN), and Fuzzy logic (FL), to track load changes. The use of the proposed Neuro-Fuzzy Tracker aims to achieve the optimal operation of the power system, by providing the load with the required electrical energy with high accuracy and at a high speed that is compatible with the speed of changes in the load, while achieving the optimal consumption of fuel used in the electrochemical energy conversion processes, in addition to improving the value of the electrochemical energy conversion efficiency factor. In this context, the proposed tracker model in the research consists of two models, the first neuron and the other Fuzzy logic model, working in sequence. The proposed neural model estimates the optimum operating current to be extracted from the PEMFC system to match the instantaneous load requirements. The proposed neural model estimates the optimum operating current to be extracted from the PEMFC system to match the instantaneous load requirements. While the Proposed Fuzzy logic Controller (PFLC) is working, it determines the appropriate variations of the operating ratio used to adjust the duty cycle of the DC-DC voltage Converter o track the load. The simulation results for PEMFC load tracking performed in Matlab/Simulink environment showed that the proposed Neuro-Fuzzy Tracker (ANN-PFLC) achieves optimal performance of the system, compared with using other reference models and compared with the direct coupling condition without tracker and without a voltage converter.

**Keywords:** Electrochemical Power System, Proton Exchange Membrane Fuel Cells, Load following, Artificial Neural Networks, Fuzzy-logic, DC-DC Converter.

---

\* Associate Professor, Department of Mechanical Power Engineering, faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria. iman.dilaneh@tishreen.edu.sy.

## نموذج جديد لمتتبع حمل لنظام طاقة كهروكيميائي مع مبدل جهد مستمر يعتمد على الشبكات العصبونية الاصطناعية والمنطق العائم

د. إيمان ديلانة\*

(تاريخ الإيداع 23 / 3 / 2022. قُبِلَ للنشر في 14 / 9 / 2022)

### □ ملخص □

يقدم هذا البحث منهجية جديدة لتحسين كفاءة أداء نظام طاقة كهروكيميائي نوع خلايا الوقود ذات غشاء تبادل البروتونات (Proton Exchange Membrane Fuel Cells, PEMFC)، باستخدام نموذج جديد لمتتبع مرتكز على استخدام الشبكات العصبونية الصناعية (Artificial Neural Networks, ANN)، والمنطق العائم (FL, Fuzzy logic)، لتتبع تغيرات الحمل. يهدف استخدام المتتبع العصبوني العائم المقترح، إلى تحقيق التشغيل الأمثل لنظام الطاقة، وذلك بتزويد الحمل بالطاقة الكهربائية المطلوبة بالدقة العالية وبالسرعة الفائقة المتلائمة مع سرعة تغيرات الحمل، مع تحقيق الاستهلاك الأمثل للوقود المستخدم في عمليات التحويل الكهروكيميائي للطاقة، بالإضافة لتحسين قيمة عامل كفاءة التحويل الكهروكيميائي للطاقة. في هذا السياق، يتشكل نموذج المتتبع المقترح في البحث، من نموذجين الأول عصبوني والآخر عائم يعملان على التسلسل. يعمل النموذج العصبوني المقترح، على تقدير تيار التشغيل الأمثل المطلوب استجراره من نظام PEMFC، بحيث يتناسب مع متطلبات الحمل اللحظية. بينما يعمل المتحكم العائم المقترح (Proposed Fuzzy Logic Controller, PFLC)، على تحديد التغيرات المناسبة لنسبة التشغيل المستخدمة لضبط دورة عمل مبدل الجهد لتتبع الحمل. أظهرت نتائج المحاكاة لتتبع الحمل لنظام PEMFC المنجزة في بيئة Matlab/Simulink، أن المتتبع العصبوني-العائم (ANN-PFLC) المقترح يحقق الأداء الأمثل للنظام، مقارنة مع استخدام نماذج أخرى مرجعية ومقارنة مع حالة الاقتران المباشر بدون متتبع وبدون مبدل جهد.

**الكلمات المفتاحية:** نظام طاقة كهروكيميائي، خلايا وقود ذات غشاء تبادل البروتونات، تتبع الحمل، شبكات عصبونية صناعية، منطق عائم، مبدل جهد مستمر.

\*أستاذ مساعد- قسم هندسة القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.  
iman.dilaneh@tishreen.edu.sy

**مقدمة:**

تعتبر خلايا الوقود إحدى أهم المصادر الواعدة لتوليد الطاقة الكهربائية في المستقبل القريب. فهي تعتبر طاقة بديلة متجددة تقوم بتحويل الطاقة الكيميائية للوقود إلى طاقة كهربائية عبر التفاعلات الكهروكيميائية، كما تمتاز بكثافة طاقة عالية مقارنة بصغر حجمها، حيث يمكنها توليد طاقة كهربائية من بضعة كيلو واط إلى ميغا واط، بالإضافة لملائمتها للاستخدام في التطبيقات المختلفة المتنقلة والمحمولة والثابتة [1]. لكن تعتبر أكبر التحديات التي تواجه استخدام خلايا الوقود، هي مشكلة عدم استقرار الطاقة الناتجة أثناء التشغيل، وذلك لتأثير عدد من المتغيرات على الطاقة الناتجة منها، كمتطلبات الحمل المتغيرة، وظروف التشغيل المتغيرة من درجة الحرارة ومحتوى الماء في الغشاء ورطوبته، وضغط الغازات المحقونة في الخلية [2,3]. لذلك تناولت العديد من الدراسات العلمية، دراسة وتحديد شروط التشغيل المثلى لخلية الوقود، وبينت أن درجات حرارة التشغيل والضغط العالية تؤدي إلى تقصير عمر الخلية، خاصة خلية الوقود ذات غشاء تبادل البروتونات، وذلك نتيجة لجفاف وتشقق الغشاء البوليميري للخلية مع الوقت، مما يسبب بالنتيجة توقف عملية تدفق البروتونات عبر الغشاء [1].

من جهة أخرى، تطرقت أبحاث أخرى إلى تحسين جودة وكفاءة الطاقة الناتجة لخلية الوقود، وذلك بالتحكم بمعدل تدفق غاز الوقود المحقون عند المصعد للخلية، والذي يكون غالباً غاز الهيدروجين النقي أو غاز هيدروكربوني مشبع بالهيدروجين، بالإضافة للتحكم بمعدل تدفق غاز الأوكسجين المحقون عند المهبط للخلية [4,5]. في المرجع [4]، تم اقتراح استخدام عدة تقنيات من الذكاء الصناعي لتحديد وضبط معدل تدفق الهيدروجين بالاعتماد على تغيرات تيار خرج نظام خلايا وقود ذات غشاء تبادل البروتونات. بينما في المرجع [5]، تم اقتراح نموذج لمتحكم عائم لضبط معدل تدفق الغازات المتفاعلة لخلية وقود ذات الأوكسيد الصلب. فيما تناولت العديد من الأبحاث العلمية الأخرى، تحسين كفاءة أداء أنظمة خلايا الوقود المقترنة بشكل غير مباشر مع الحمل باستخدام مبدل جهد مقاد باستخدام، إما متحكم تقليدي تناسبي-تكامل-تفاضلي (PID)، أو تقنيات تتبع تقليدية أو تقنيات تحكم متقدمة [6,7,8,9]. حيث تؤثر عملية اقتران خلية الوقود مع الحمل على طاقة خرج الخلية، وذلك نتيجة لتغير نقطة العمل للخلية، والناتجة عن تقاطع منحنى الحمل مع منحنى الاستقطاب للخلية، وهذا يتطلب بالنتيجة ضبط موقع تغير نقطة العمل بشكل مستمر باستخدام مبدل جهد مقاد بمتحكم [9,10]. أظهرت نتائج المرجع [8]، إن استخدام متحكم مرتكز على تقنية الاضطراب والمراقبة للتحكم بدورة عمل مبدل الجهد، حقق زيادة ملحوظة في الطاقة الناتجة لنظام خلايا الوقود ذات غشاء تبادل البروتونات مقارنة مع حالة استخدام متحكم PID تقليدي وذلك عند تتبّع تغيرات الحمل. كذلك في المرجع [9]، تم اقتراح نموذج لمتحكم عصبوني لتقدير نسبة التشغيل لمبدل جهد، وذلك باستخدام التيار والتغير السابق لنسبة التشغيل كمتغيرات دخل للنموذج العصبوني لتحسين كفاءة خرج نظام خلايا الوقود عند تغير ظروف التشغيل.

**أهمية البحث وأهدافه:**

يقدم هذا البحث منهجية جديدة لتحسين كفاءة أداء نظام طاقة كهروكيميائي نوع خلايا الوقود ذات غشاء تبادل البروتونات PEMFC، وذلك بتطوير نموذج جديد لمتتبع مرتكز على استخدام الشبكات العصبونية الصناعية ANN، والمنطق العائم FL، لتتبع تغيرات الحمل. يهدف استخدام المتتبع العصبوني المقترح، إلى تحقيق التشغيل الأمثل لنظام الطاقة، وذلك بتزويد الحمل بالطاقة الكهربائية المطلوبة بالدقة العالية وبالسرع الفائقة المتلائمة مع سرعة تغيرات الحمل، مع تحقيق الاستهلاك الأمثل للوقود المستخدم في عمليات التحويل الكهروكيميائي للطاقة. في هذا

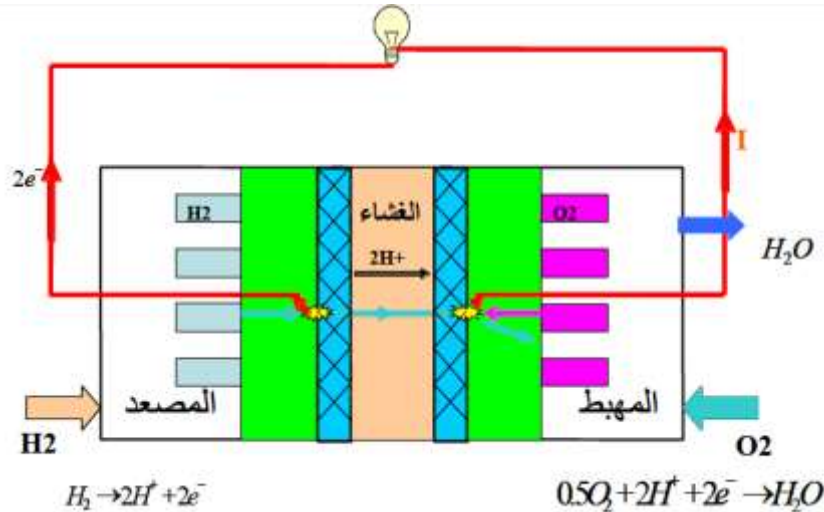
السياق، يتشكل نموذج المتنبع المقترح في البحث، من نموذجين الأول عصبوني والآخر عائم يعملان على التسلسل. حيث يعمل النموذج العصبوني المقترح، على تقدير تيار التشغيل المطلوب استجراره من نظام (PEMFC) ANN (Current Estimator, IFC\_ANN)، بما يتناسب مع متطلبات الحمل اللحظية. بينما يعمل المتحكم العائم PFLC المقترح، على تحقيق عمل نظام PEMFC عند تيار التشغيل IFC\_ANN، وذلك باستخدام الخطأ في التيار الناتج عن الفرق بين تيار التشغيل IFC\_ANN وتيار خرج نظام PEMFC، لتحديد تغيرات نسبة التشغيل المستخدمة لضبط دورة عمل مبدل الجهد لتتبع الحمل. بالنتيجة، يحقق المتنبع العصبوني-العائم (ANN-PFLC) المقترح، تحسين قيمة عامل كفاءة التحويل الكهروكيميائي للطاقة، والتقليل من ضياعات الطاقة، مقارنة مع استخدام نماذج أخرى مرجعية ومقارنة مع حالة الاقتران المباشر بدون متنبع وبدون مبدل جهد.

### طرائق البحث ومواده:

يعتمد تصميم نموذج متنبع الحمل المقترح، على استخدام توابع معرفة في مكتبة Neural Network Toolbox من بيئة Matlab، لتشكيل نموذج مقدر التيار العصبوني. بالإضافة، لتصميم نموذج لمتحكم عائم بتطبيق العمليات الأساسية المعروفة في المنطق العائم باستخدام مكتبة Fuzzy Logic Toolbox الموجودة في بيئة Matlab. يتم كذلك اختبار وتقييم أداء نظام خلايا الوقود مع متنبع الحمل المقترح باستخدام نموذج المحاكاة للنظام المنجز في بيئة Matlab/Simulink.

### 1- خلية الوقود ذات غشاء تبادل البروتونات PEMFC

تعتبر خلايا الوقود PEMFC، أكثر جذبا وملائمة لاستخدامها نظراً لانخفاض درجة حرارة التشغيل والتي تتراوح بين 50 إلى 80 درجة مئوية. كما تمتاز بكثافة طاقة عالية بالنسبة لواحدة السطح الفعال للخلية، وكفاءة العالية بين (40-60)%، وبدء التشغيل السريع [3، 4]. يبين الشكل (1) التركيب العام الداخلي لخلية وقود PEMFC.



الشكل (1) خلية وقود ذات غشاء تبادل البروتونات PEMFC

يستخدم في هذا النوع من الخلايا غشاء من مادة البوليمير والذي يسمى الإلكتروليت (Electrolyte)، الذي يوضع بين القطبين للخلية المصعد والمهبط، فعند دخول الهيدروجين إلى الخلية من جهة المصعد وتحوله إلى بروتون

والكترون بوجود المحفز، يتم عبور البروتونات عبر الغشاء الفاصل من جهة المصعد إلى القطب الثاني المهبط، أما الالكترونات فتعبر لتغذي دارة كهربائية خارجية بتيار كهربائي مستمر. بينما في الجهة الأخرى من الغشاء الفاصل عند المهبط، يتحد البروتون مع الالكترون بوجود المحفز ومع وجود الأوكسجين لينتكون الماء.

## 2-النموذج الرياضي لخلية وقود ذات غشاء تبادل البروتونات PEMFC

يحدد توتر التشغيل  $V_{FC}$  لخلية الوقود عند شروط التشغيل المختلفة من درجة حرارة وضغط للغازات، بالاعتماد على توتر الدارة المفتوحة  $E$ ، ولكن تنخفض قيمة توتر  $V_{FC}$  لخلية الوقود عادة من (70-60%) عن قيمة توتر الدارة المفتوحة  $E$ ، بسبب الهبوطات في التوتر الناتجة عن استقطاب التفعيل  $V_{act}$ ، الاستقطاب التركيز  $V_{con}$ ، والاستقطاب الأومي  $V_{om}$ . ينتج هبوط التوتر  $V_{act}$ ، نتيجة الضياع في الطاقة اللازمة لبدء تفاعل الغازات. وبينما يحدث هبوط التوتر  $V_{act}$ ، عند كثافات تيار عالية، بسبب عدم وصول غازات التفاعل إلى الأقطاب بشكل كاف. في حين، يتناسب هبوط التوتر  $V_{om}$ ، طردا مع التيار ويحدث نتيجة نشوء المقاومة لعبور البروتونات عبر الغشاء البوليميري، بالنتيجة، يعطى التوتر  $V_{FC}$  خلية بدلالة تيار التشغيل للخلية  $I_{FC}$ ، باستخدام العلاقة اللاخطية التالية [3]:

$$V_{FC} = E - V_{act} - V_{con} - V_{om} \quad (1)$$

$$V_{FC} = E - \frac{R * T}{2 * F} * \log \left( \frac{I_{FC}}{I_0} \right) - \frac{R * T}{2 * F} * \log \left( 1 - \frac{I_{FC}}{I_L} \right) - I_{FC} * R_{FC} \quad (2)$$

$$E = E_0 + \frac{R * T}{2 * F} * \log \left( \frac{P_{H_2} * P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}} \right) \quad (3)$$

حيث أن:

- $V_{FC}[V]$ ،  $I_{FC}[A]$  تيار وتوتر خرج PEMFC على التوالي.
- $E_0$  توتر الدارة المفتوحة التشغيلي المحدد عند الشروط القياسية الموافقة لدرجة الحرارة  $[T_0 = 20^\circ C]$ ، والضغط  $p_0 = 1[atm]$ .
- $R$  ثابت الغاز المثالي،  $F$  هو ثابت فاراداي ( $F = 96485 \frac{C}{mol}$ ).  $R_{FC}$  المقاومة الداخلية للخلية.
- $P_{H_2O}$ ،  $P_{O_2}$ ،  $P_{H_2}$ : تمثل ضغط غازات الهيدروجين والأوكسجين وضغط بخار الماء المتشكل.
- $I_0$  التيار اللازم لبداية التفاعل بين الغازات.
- $I_L$  يمثل القيمة الحدية العظمى لتيار PEMFC.

يتم عادة وصل عدد من خلايا الوقود PEMFC، وعددها  $N_{FC}$  للحصول على التوتر المناسب للحمل الكهربائي. كما تتعلق كميات معدل تدفق الغازات اللازمة لتوليد الطاقة الكهربائية من نظام خلايا الوقود، بقيمة التيار الكهربائي المستجر. حيث يعطى معدل التدفق المولي لغاز لهيدروجين  $q_{H_2}[mol/s]$  ولغاز الأوكسجين  $q_{O_2}[mol/s]$ ، بالعلاقات التالية [6,3]:

$$q_{H_2} = \frac{N_{FC} * I_{FC}}{2 * F} \quad (4)$$

$$q_{O_2} = \frac{N_{FC} * I_{FC}}{4 * F} \quad (5)$$

كما يتم عادة استخدام مبدل جهد، للحصول على التيار  $I_L[A]$  والتوتر  $V_L[V]$ ، المناسبين للحمل. لذلك نستخدم في هذا البحث، مبدل رافع للجهد حيث يرتبط كل من تيار وتوتر دخل وخرج مبدل الجهد بالعلاقات التالية:

$$\frac{I_L}{I_{FC}} = \frac{V_{FC}}{V_L} = 1 - D \quad (6)$$

تمثل D قيمة نسبة التشغيل المستخدمة لتعديل عرض النبضة (Pulse Width Modulation, PWM).

### 3- نمذجة مقدر التيار العصبوني في بيئة Matlab

نقترح في هذا البحث، نموذج لمقدر تيار عصبوني، لتحديد تيار التشغيل لنظام PEMFC بشكل لحظي ودقيق عند تغيرات الحمل المختلفة. يحوي النموذج المقترح، على متغير دخل واحد هو  $P_L$  ممثل للاستطاعة الكهربائية للحمل المطلوبة، ومتغير خرج واحد ممثل لتيار التشغيل  $I_{FC\_ANN}$  لنظام PEMFC. نستخدم لنمذجة الشبكة العصبونية الصناعية في بيئة Matlab، التابع "newff"، مع اعتماد خوارزمية التدريب العكسي "Marquardt Levenberg" المعرفة بالتابع "trainlm"، وتابع التنفيع 'tansig' سيغمويد (تابع الظل القطعي) في الطبقات الخفية، والتابع التنفيع الخطي "purelin" في طبقة الخرج. كما تم اختبار الشبكة أثناء التدريب بالاعتماد على تقييم القيم الناتجة لكل من متوسط مربع الخطأ (Mean square error, MSE) ولمعامل الارتباط (Correlation Coefficient, R) والتي تتحدد بالعلاقات التالية [9,2]:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{K=1}^N (I_{FC\_K} - \widetilde{I_{FC\_K}})^2 \quad (7)$$

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{K=1}^N (I_{FC\_K} - \widetilde{I_{FC\_K}})^2}{\sum_{K=1}^N (I_{FC\_K} - \overline{I_{FC\_K}})^2}} \quad (8)$$

$$\overline{I_{FC\_K}} = \frac{1}{N} \sum_{K=1}^N I_{FC\_K} \quad (9)$$

حيث  $I_{FC\_K}$  تمثل القيم الحقيقية و  $\widetilde{I_{FC\_K}}$  تمثل القيم المقدرة  $I_{FC\_ANN}$ ، الناتجة من نموذج الشبكة. أما  $\overline{I_{FC\_K}}$  تمثل المتوسط الحسابي للقيم الحقيقية للخرج  $I_{FC\_K}$  والتي عددها يساوي N.

### 4- نموذج المتحكم العائم PFLC المقترح

نقترح في هذا البحث، استخدام متحكم عائم PFLC لتحقيق عمل نظام PEMFC عند تيار التشغيل لخرج مقدر التيار العصبوني لتتبع تغيرات الحمل. لهذا الغرض، نعتبر متغيرات الدخل (Input Variables) للمتحكم PFLC كل من الخطأ  $E(k)$  وتغيره  $CE(k)$ . يمثل الخطأ في التيار الفرق بين القيم اللحظية لتيار التشغيل المقدرة  $I_{FC\_ANN}(k)$  وقيم التيار  $I_{FC}(k)$  لخرج نظام PEMFC. بينما يمثل متغير الخرج (Output Variable) للمتحكم PFLC، تغير نسبة التشغيل  $dD(k)$  المستخدمة لتحديد نسبة التشغيل اللحظية  $D(k)$  المستخدمة لضبط دورة عمل مبدل الجهد. بالتالي، تحدد متغيرات الدخل والخرج للمتحكم PFLC كما يلي:

$$E(k) = I_{FC\_ANN}(k) - I_{FC}(k) \quad (10)$$

$$CE(k) = E(k) - E(k-1) \quad (11)$$

$$dD(k) = D(k) - D(k-1) \quad (12)$$

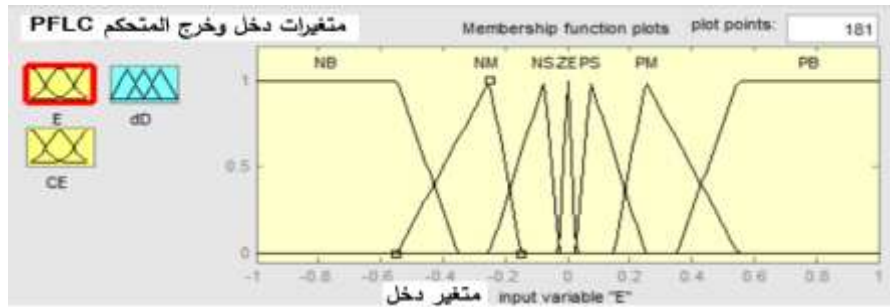
بتطبيق عملية التعويم (Fuzzification)، يمكن تحويل المتغيرات  $E(k)$ ،  $CE(k)$ ،  $dD(k)$  العددية لدخل وخرج نموذج المتحكم العائم، إلى متغيرات ممثلة بمجموعات عائمة (Fuzzy sets)، معبر عنها بمتغيرات لغوية مختلفة:

Negative (سالب)، Positive (موجب)، Zero (صفر)، Negative-Big (سالب كبير)، Negative-Medium (سالب متوسط)، Negative-Small (سالب صغير)، Positive-Big (موجب كبير)، Positive-Medium (موجب متوسط)، Positive-Small (موجب صغير).

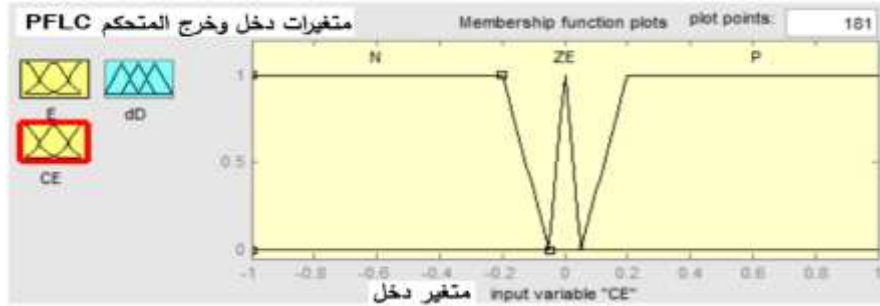
تمثل هذه المجموعات العائمة بتتابع انتماء (Membership Functions)، مثلثية الشكل وأخرى ذات شبه منحرف، وذلك بهدف تحقيق العلاقة التناسبية بين تغير الخطأ وتغير خطوة التشغيل، وتأمين انتقال سلس وتدرجي من مجموعة قائمة إلى أخرى، يوضح الجدول (1) المتغيرات اللغوية للمجموعات العائمة لنموذج المتحكم العائم PFLC. بينما يوضح الجدول (2) قواعد الأساس لنموذج المتحكم PFLC العائم. توضح الأشكال (2)، (3) و(4) على التوالي، عملية تعويم متغيرات دخل وخرج نموذج المتحكم العائم المقترح.

جدول (1) المتغيرات اللغوية للمجموعات العائمة لنموذج المتحكم العائم PFLC المقترح

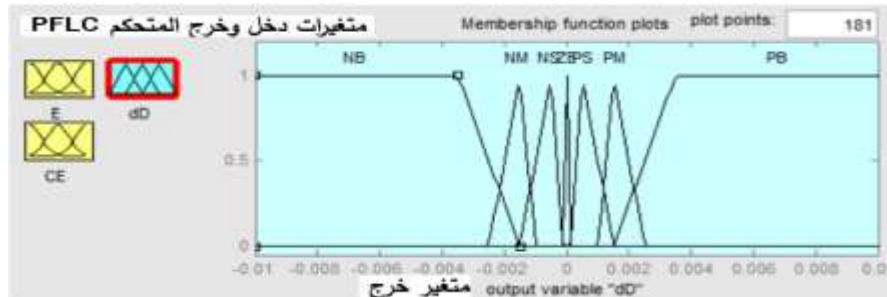
المتغيرات اللغوية					
Negative	N	Negative-Small	NS	Positive- Medium	PM
Negative-Big	NB	Positive	P	Positive-Big	PB
Negative- Medium	NM	Positive-Small	PS	Zero	ZE



الشكل (2) تعويم الخط E متغير الدخل الأول للمتحكم PFLC.



الشكل (3) تعويم تغير الخطأ CE متغير الدخل الثاني للمتحكم PFLC.



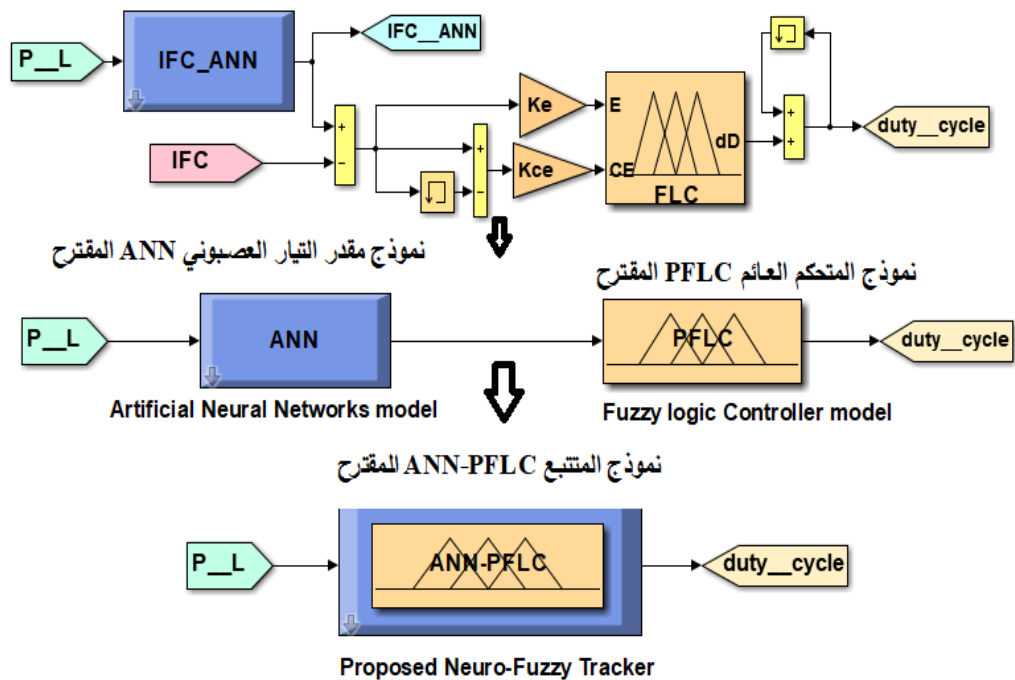
الشكل (4) تعويم تغير نسبة التشغيل dD متغير الخرج للمتحكم PFLC.

الجدول (2) قواعد الأساس لنموذج المتحكم PFLC العائم.

	CE		
E	N	ZE	P
NB	NB	NB	NM
NM	NB	NM	NS
NS	NM	NS	ZE
ZE	NS	ZE	PS
PS	ZE	PS	PM
PM	PS	PM	PB
PB	PM	PB	PB

### 5- نموذج المتتبع ANN-PFLC المقترح

يتشكل نموذج المتتبع العصبي العائم ANN-PFLC المقترح لتتبع تغيرات الحمل لنظام PEMFC في بيئة Matlab/Simulink، من الوصل على التسلسل لكل من نموذج مقدر التيار العصبي والمتحكم العائم المقترحين في البحث. يبين الشكل (5) محاكاة نموذج المتتبع PFLC-ANN المقترح في بيئة Matlab/Simulink.



الشكل (5) محاكاة نموذج المتتبع PFLC-ANN المقترح في بيئة Matlab/Simulink

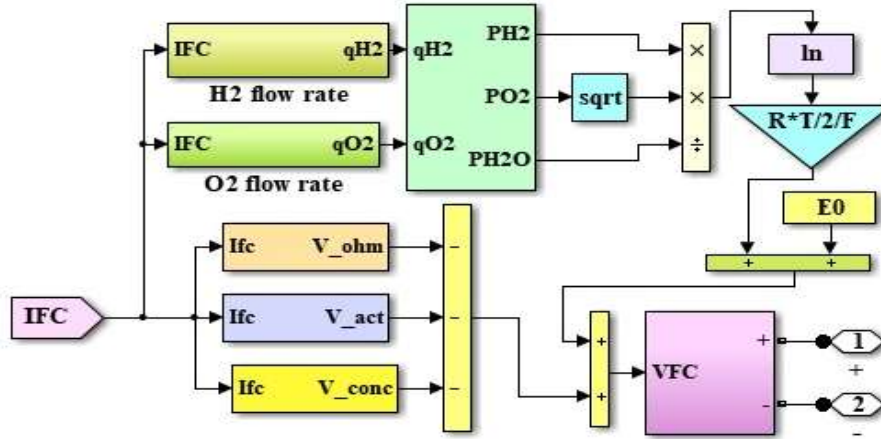
حيث يقوم نموذج مقدر التيار العصبي، بالاعتماد على متغير الدخل للنموذج الممثل للاستطاعة الكهربائية للحمل المطلوبة  $P_L$ ، بتقدير تيار التشغيل  $I_{FC\_ANN}$  المطلوب استجراره من نظام PEMFC، ليتم استخدام الخطأ في التيار



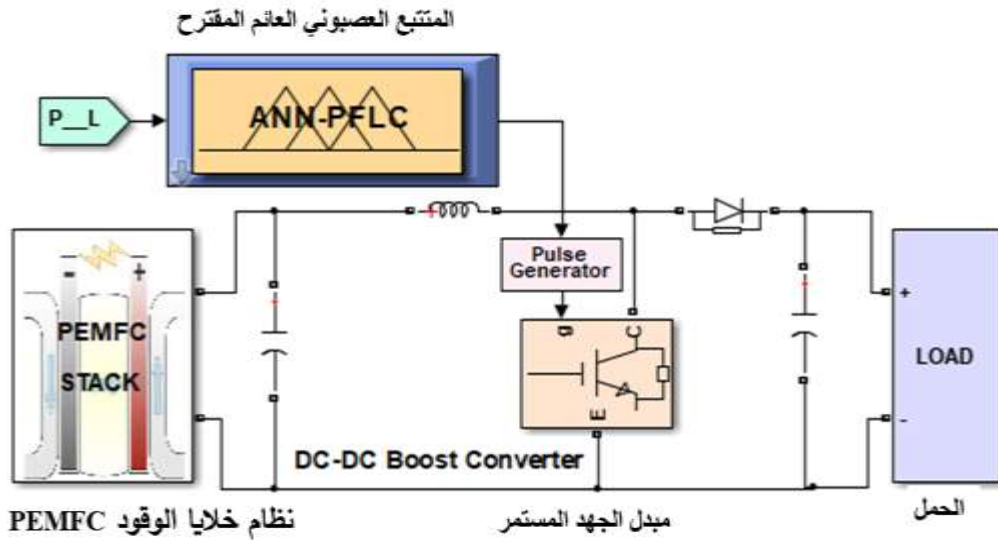
وتغيره CE، لتحديد التغيرات المناسبة نسبة التشغيل اللحظية والمستخدممة بالنتيجة لضبط دورة عمل مبدل الجهد لمتتبع الحمل. تمثل  $K_e$  و  $K_{ce}$  عوامل التقييس المستخدمة لضبط مجال تغير كل من الخطأ E وتغيره CE ضمن المجال  $[-1,1]$ .

### 6- محاكاة نظام PEMFC مع المتتبع ANN-PFLC المقترح

يبين الشكل (6)، محاكاة نظام PEMFC في بيئة Matlab/Simulink، الذي يتكون من 30 خلية موصولة على التسلسل، للحصول على الجهد المطلوب والاستطاعة الاسمية 2000 واط. الشكل (7)، يبين الاقتران غير المباشر لنظام PEMFC مع الحمل باستخدام مبدل رافع الجهد والمتتبع ANN-PFLC المقترح.



الشكل (6) محاكاة نظام PEMFC في بيئة Matlab/Simulink.

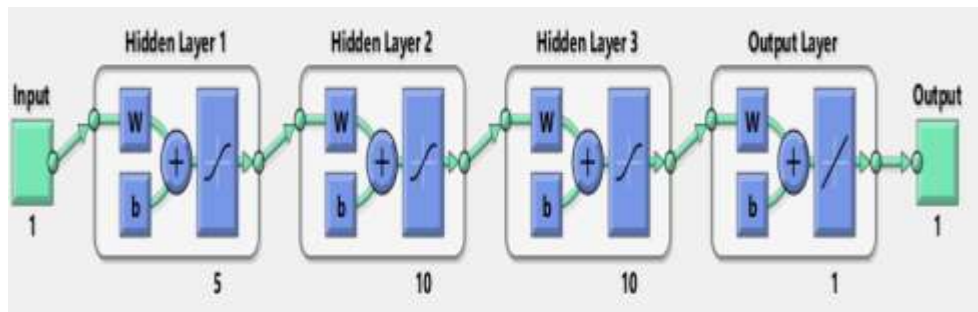


الشكل (7) محاكاة نظام PEMFC مع مبدل الجهد والمتتبع ANN-PFLC في بيئة Matlab/Simulink.

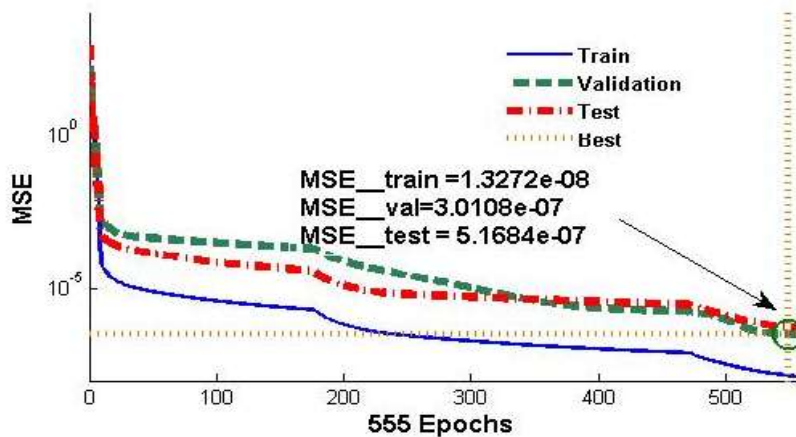
## النتائج والمناقشة:

### 1- اختيار هيكلية الشبكة العصبونية لنموذج مقدر التيار العصبوني المقترح

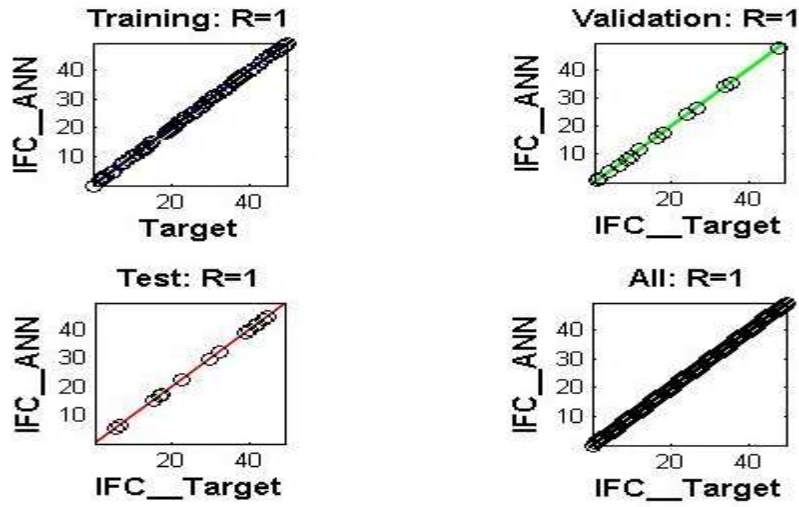
نعتمد للحصول على قاعدة بيانات تدريب الشبكة العصبونية اللازمة لتشكيل نموذج مقدر التيار العصبوني، على استخدام النماذج الرياضية المعطاة في الفقرة السابقة لنظام PEMFC ومبدل الجهد. يتم اختيار هيكلية الشبكة العصبونية من حيث عدد الطبقات الخفية، وعدد العصبونات في كل طبقة بالتجريب، وذلك بمقارنة القيم الناتجة لكل من متوسط مربع الخطأ MSE وقيم معامل الارتباط R الناتجة في نهاية عملية التدريب. حيث يعتمد معيار الاختيار على اختيار الشبكة الموافقة للقيم الأصغر لمتوسط مربع الخطأ وقيمة متقاربة أو مساوية لمعامل الارتباط. بالنتيجة، تتكون هيكلية الشبكة المختارة في البحث لنموذج مقدر التيار العصبوني، من ثلاث طبقات خفية، وخمس عصبونات في الطبقة الخفية الأولى، وعشرة عصبونات في كل من الطبقة الخفية الثانية والثالثة كما هو مبين في الشكل (8). حيث تحقق هذه الهيكلية المختارة قيم جيدة لكل من متوسط مربع الخطأ في نهاية كل من مرحلة التدريب (Train)، والتحقق (Validation)، والاختبار (Test) كما هو مبين في الشكل (9). وكذلك تحقق هيكلية الشبكة قيم مثلى مساوية للواحد لمعامل الارتباط كما هو مبين في الشكل (10). ويمكننا الحصول على قيم أفضل لمتوسط مربع الخطأ MSE، وذلك بزيادة عدد العصبونات والطبقات الخفية، ولكن ذلك يزيد من حجم وتعقيد الشبكة.



الشكل (8) هيكلية الشبكة العصبونية المختارة لتقدير  $I_{FC\_ANN}$  الناتجة في بيئة Matlab.



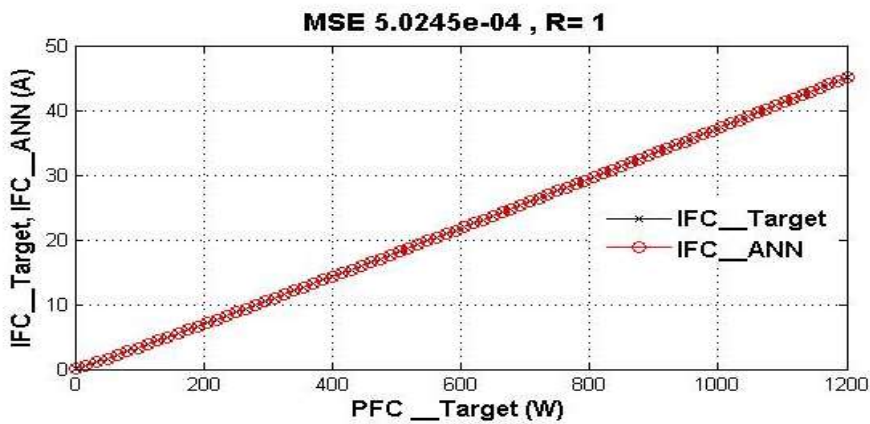
الشكل (9) منحنى الأداء للشبكة العصبونية المستخدمة لتقدير  $I_{FC\_ANN}$ .



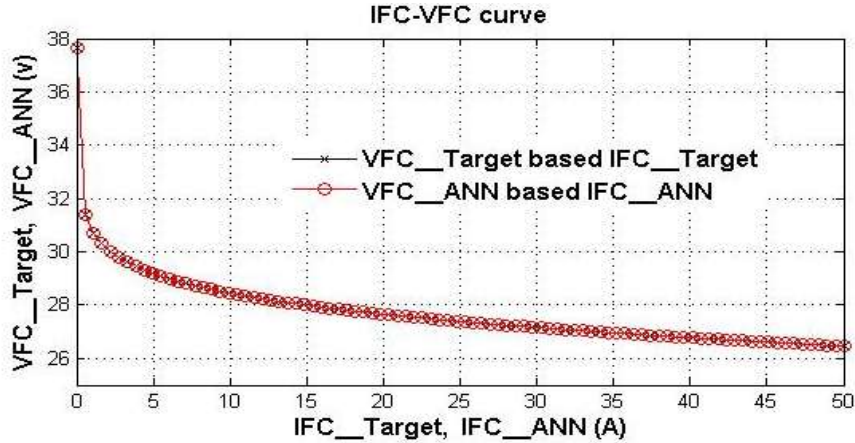
الشكل (10) معاملات الارتباط للشبكة العصبونية المستخدمة لتقدير IFC\_ANN .

## 2- تقييم كفاءة أداء نموذج مقدر التيار العصبوني المقترح

يمكن التحقق من كفاءة أداء نموذج مقدر التيار العصبوني في التقدير الدقيق لتيار IFC\_ANN لخرج نظام خلايا الوقود الذي استطاعته العظمى الاسمية 1200 واط. وذلك بتطبيق على مدخل نموذج مقدر التيار العصبوني، قيم للاستطاعة الكهربائية PFC\_target ، متزايدة من الصفر حتى الاستطاعة العظمى، ومن ثم نحصل على القيم المقدره IFC\_ANN . يبين الشكل (11)، مقارنة بين القيم المقدره IFC\_ANN الناتجة عند قيم للاستطاعة PFC\_target ، مع القيم النظرية للتيار IFC\_target الموافقة لقيم PFC\_target الناتجة من النموذج الرياضي لنظام PEMFC، حيث يظهر التطابق الدقيق بين المنحنيات الناتجة في كلتا الحالتين، وهذا توضحه أيضا القيم الناتجة لمتوسط مربع الخطأ  $MSE = 5.0245 \times 10^{-4}$  ، ومعامل الارتباط R=1 المبينة على الشكل (11) و الناتجة باستخدام كل من القيم المقدره IFC\_ANN والقيم النظرية للتيار IFC\_target .



الشكل (11) مقارنة بين القيم المقدره IFC\_ANN والنظرية للتيار IFC\_target الناتجة عند الاستطاعة PFC\_target .

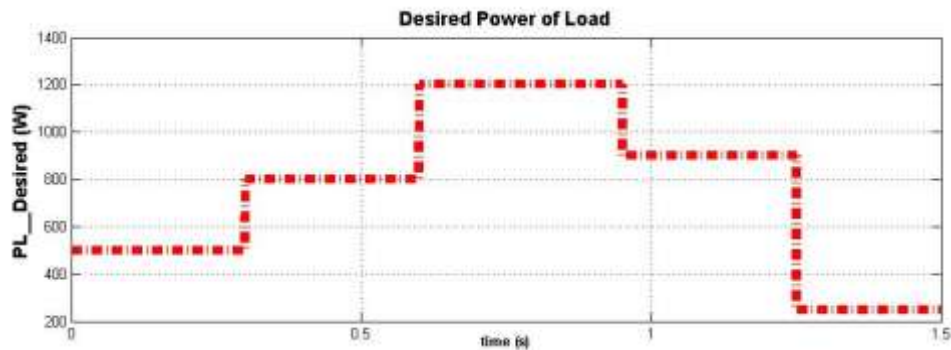


الشكل (12) منحنى الاستقطاب الناتج في حالتي استخدام القيم المقدره  $I_{FC\_ANN}$  والنظرية للتيار  $I_{FC\_target}$ .

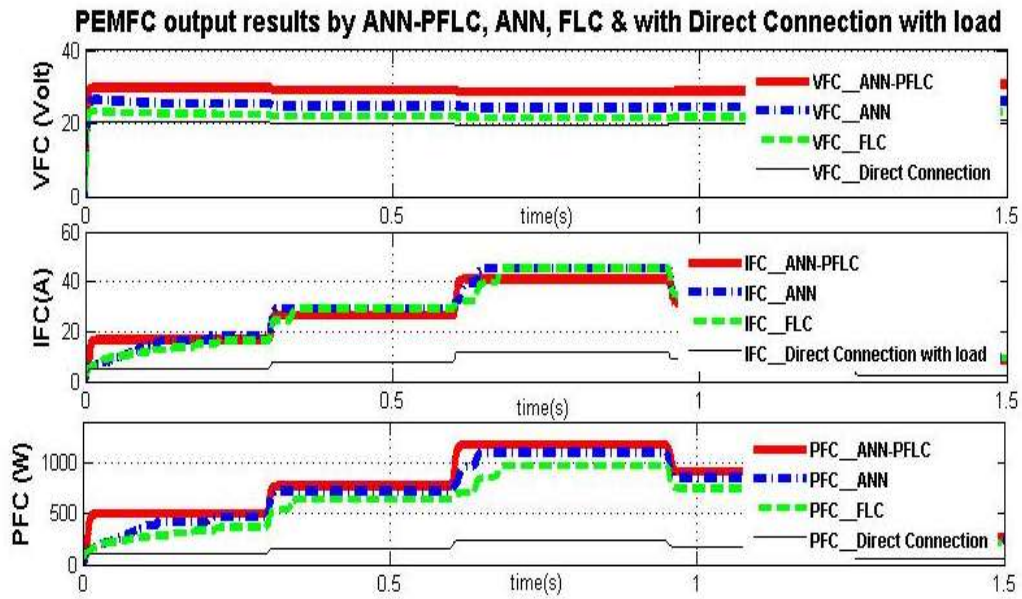
بينما يبين الشكل (12)، منحنى الاستقطاب الناتج في حالتي استخدام القيم المقدره  $I_{FC\_ANN}$  والنظرية للتيار  $I_{FC\_target}$ . حيث يلاحظ التطابق الدقيق بين قيم التوتر  $V_{FC\_ANN}$  الناتجة باستخدام قيم  $I_{FC\_ANN}$  والقيم النظرية للتوتر  $V_{FC\_target}$  الناتجة بتطبيق قيم  $I_{FC\_target}$ . بالنتيجة، يتطابق سلوك منحنى الاستقطاب الناتج في حالتي استخدام  $I_{FC\_ANN}$  و  $I_{FC\_target}$ . حيث تتخفف قيم التوتر مع ازدياد قيم التيار نتيجة كل من استقطاب التفعيل، والاستقطاب الأومي واستقطاب التركيز. بالنتيجة، يشكل نموذج مقدر التيار العصبوني نموذج حاسوبي يغني عن استخدام النماذج الرياضية للاخطية لنظام خلايا الوقود في تقدير تيار التشغيل للنظام بدقة وبسرعة فائقة.

### 3- تقييم كفاءة أداء المتتبع ANN-PFLC عند تتبع الحمل لنظام PEMFC

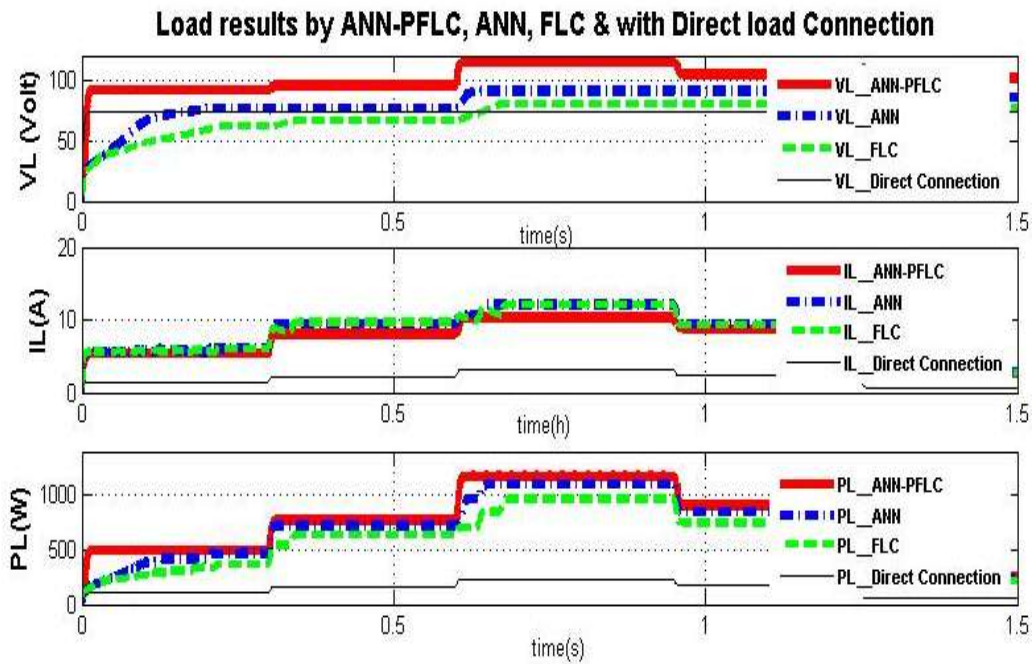
يعتمد تقييم كفاءة أداء نظام خلايا PEMFC عند تتبع الحمل على مقارنة نتائج المحاكاة الناتجة في بيئة Matlab/Simulink، باستخدام المتتبع ANN-PFLC المقترح مع حالات استخدام متتبع عصبوني مرجعي [9] ANN، وآخر قائم FLC [10]، ومع حالة الاقتران المباشر لنظام PEMFC مع الحمل بدون متتبع وبدون مبدل جهد. يتم في البحث اعتماد فرضيات لتغيرات الاستطاعة الكهربائية للحمل المقترن بشكل غير مباشر مع نظام PEMFC، هذه التغيرات للاستطاعة للحمل خلال فترات زمنية محددة مبينة في الشكل (13).



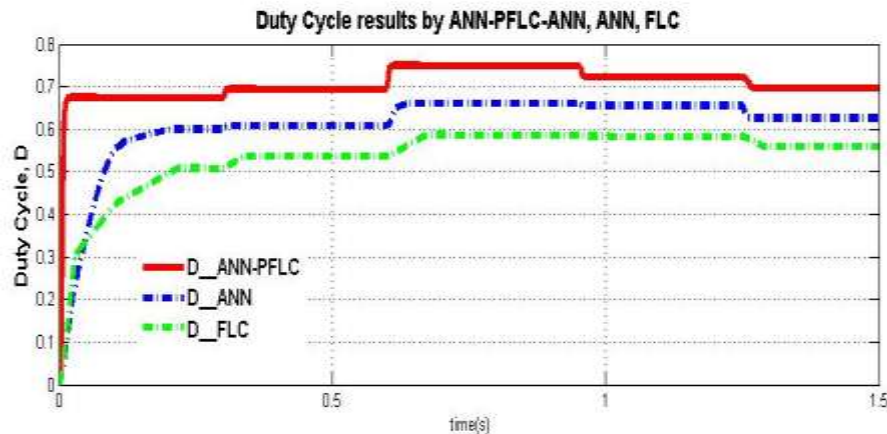
الشكل (13) تغيرات الاستطاعة للحمل الكهربائي.



الشكل (14) منحنيات التوتر، التيار والاستطاعة خرج PEMFC، باستخدام ANN-PFLC، ANN، FLC وبدون متتبع.



الشكل (15) منحنيات التوتر، التيار والاستطاعة للحمل، الناتجة باستخدام ANN-PFLC، ANN، FLC وبدون متتبع.



الشكل (16) نتائج منحنيات نسب التشغيل، الناتجة باستخدام ANN-PFLC، ANN، FLC.

يبين الشكل (14) على التوالي، نتائج منحنيات التوتر، التيار والاستطاعة لخرج نظام PEMFC الناتجة في حالة استخدام المتتبع ANN-PFLC، والمتتبعات المرجعية ANN، FLC وبدون متتبع عند تتبع تغيرات الحمل المبينة في الشكل (13). بينما يظهر الشكل (15) نتائج التوتر والتيار والاستطاعة للحمل، والتي تظهر دور مبدل الجهد في رفع قيمة توتر الحمل وخفض قيمة التيار مقارنة مع توتر والتيار خرج نظام PEMFC على التوالي. كذلك يبين الشكل (16)، نتائج تغيرات نسبة التشغيل الناتجة، والمستخدم لضبط دورة عمل مبدل الجهد لتحقيق تتبع الحمل بكفاءة ودقة تختلف تبعاً لكفاءة أداء كل من المتتبعات الأتفة الذكر.

يمكن استخلاص من النتائج المبينة في الأشكال (14)، (15) و(16)، ما يلي:

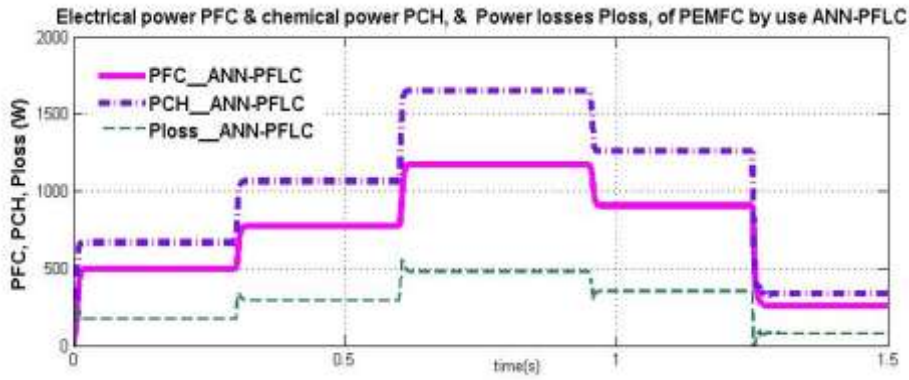
- تفوق المتتبع ANN-PFLC المقترح في أدائه على المتتبعات الأخرى، بتحقيق استخلاص استطاعة من نظام PEMFC كما هو مبين في الشكل (14)، مطابقة تماماً للاستطاعة الافتراضية المطلوبة للحمل المبينة في الشكل (13)، والتي تتطابق أيضاً مع الاستطاعة المنقولة للحمل كما هو مبين في الشكل (15). بينما كانت الاستطاعة الناتجة من نظام PEMFC أقل من الاستطاعة المطلوبة باستخدام المتتبعات الأخرى المرجعية ومقارنة مع حالة الاقتران المباشر مع الحمل.

- يعود سوية الأداء الجيد للمتتبع المقترح، المطلوبة لارتكازه من جهة على استخدام الشبكات العصبونية التي تمتاز بدقتها العالية وسرعتها الفائقة في تحديد تيار التشغيل الموافق للحمل المطلوب، بالإضافة، لاستخدام المنطق العائم الذي ساهم في تحسين الأداء الديناميكي للمتتبع، وذلك بتحديد نسبة التشغيل المناسبة بسرعة تتوافق مع سرعة تغيرات الحمل كما هو مبين في الشكل (16). بينما تفاوتت المتتبعات المرجعية من ناحية الدقة والسرعة في تتبع تغيرات الحمل.

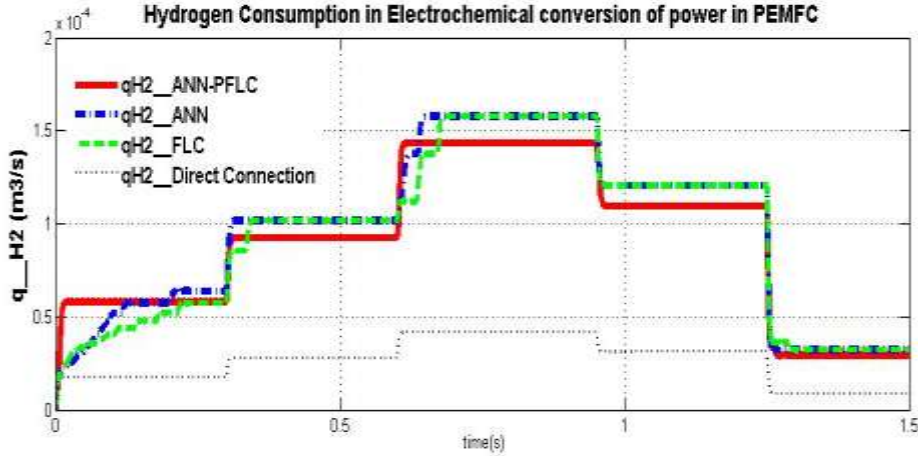
- تبين نتائج الاقتران المباشر لنظام PEMFC مع الحمل، بأن استطاعة الخرج للنظام PEMFC أقل بكثير من القيم المطلوبة. وهذا يظهر ضرورة استخدام مبدل جهد مفاد خلال ظروف التشغيل المختلفة لضبط، تموضع نقطة العمل للنظام، الناتجة من تقاطع منحنى الاستقطاب للنظام مع منحنى توتر-تيار للحمل، لتحقيق التشغيل الفعال والأمثل لنظام PEMFC بتغطية متطلبات الحمل بالطاقة الكهربائية المطلوبة.

#### 4- تقييم عامل كفاءة التحويل الكهروكيميائي للطاقة لنظام PEMFC

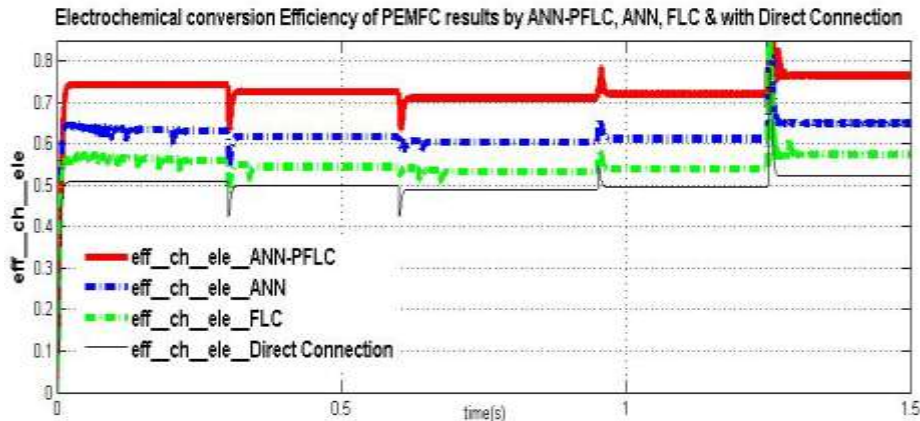
يعتبر الهيدروجين الوسيط الحامل للطاقة الكيميائية التي يتم تحويلها إلى طاقة كهربائية عن طريق تفاعله مع غاز الأوكسجين بوجود المحفزات في نظام PEMFC. يحدد عامل كفاءة التحويل الكهروكيميائي للطاقة لنظام PEMFC ( $eff_{ch\_ele}$ ) (Efficiency of Electrochemical conversion of energy, [3])، بنسبة الطاقة الكيميائية ( $P_{CH}$ , Chemical Energy) المختزنة في الهيدروجين المستهلك في نظام PEMFC، إلى الطاقة الكهربائية ( $P_{ele}$ , Electrical Energy) لخرج نظام PEMFC الممثلة بالطاقة  $P_{FC}$ . وتمثل الطاقة الضائعة ( $P_{loss}$ , Losses of Energy, [3])، الفرق بين كل من الطاقة الكيميائية  $P_{CH}$  والطاقة الكهربائية الناتجة  $P_{FC}$ .



الشكل (17) الطاقة الكهربائية  $P_{FC}$ ، الكيميائية  $P_{CH}$ ، الضائعة  $P_{loss}$  لنظام PEMFC باستخدام ANN-PFLC.



الشكل (18) معدل استهلاك الهيدروجين عند تتبع الحمل باستخدام ANN-PFLC، ANN، FLC وبدون متتبع.



الشكل (19) عامل كفاءة التحويل الكهروكيميائي  $eff_{ch\_ele}$  باستخدام ANN-PFLC، ANN، FLC، وبدون متتبع.

يبين الشكل (17)، نتائج كل من الطاقة الكهربائية  $P_{FC}$ ، والكيميائية المقدمة  $P_{CH}$ ، و الضائعة  $P_{loss}$  لنظام PEMFC الناتجة باستخدام ANN-PFLC. بينما يظهر الشكل (18)، معدل استهلاك الهيدروجين عند تتبع الحمل. كما يبين الشكل (19)، عامل كفاءة التحويل الكهروكيميائي للطاقة لنظام PEMFC.

تمكننا نتائج المحاكاة الناتجة في الأشكال السابقة، من استخلاص النتائج والملاحظات التالية:

- يتطلب توليد الطاقة الكهربائية  $P_{FC}$  من نظام PEMFC، تقديم طاقة أكبر كيميائية  $P_{CH}$  كطاقة دخل لنظام PEMFC كما هو مبين في الشكل (17)، وذلك نتيجة الضياعات في الطاقة التي ترافق عملية التحويل الكهروكيميائي للطاقة، والتي منها الضياعات الناتجة عن الهبوطات في التوتر نتيجة استقطابات: التفعيل، التركيز والاستقطاب الأومي. كما أن هناك طاقة حرارية كبيرة ضائعة ترافق حدوث التفاعلات الكهروكيميائية.
- بلغت القيمة الوسطية لقيمة عامل كفاءة التحويل الكهروكيميائي للطاقة أثناء عملية تتبع الحمل، باستخدام المتتبع ANN-PFLC المقترح:  $eff_{ch\_ele} = 73.61\%$ ، وباستخدام المتتبع العصبي ANN:  $eff_{ch\_ele} = 62.3\%$ ، أما باستخدام المتتبع العائم FLC:  $eff_{ch\_ele} = 55.1\%$ ، وفي حالة الاقتران المباشر مع الحمل:  $eff_{ch\_ele} = 50.30\%$ .
- تحسن قيمة عامل الكفاءة  $eff_{ch\_ele}$ ، عند تتبع الحمل باستخدام المتتبع ANN-PFLC المقترح، يعود لتحقيق عمل نظام PEMFC عند تيار التشغيل المحدد وفقا لمتطلبات الحمل. وبالنتيجة تم ضبط معدلات غاز الهيدروجين المستخدم كوسيط حامل للطاقة الكيميائية المخزنة فيه والتي تم تحويلها عبر التفاعلات إلى طاقة كهربائية ناتجة من نظام PEMFC، كما هو مبين في الشكل (18)، حيث يلاحظ أن تغيرات معدلات غاز الهيدروجين المستهلك عند تتبع الحمل، تتوافق زيادة ونقصان مع تغيرات تيار التشغيل المبينة في الشكل (14).

### الاستنتاجات والتوصيات:

تم في هذا البحث اقتراح نموذج جديد لمتتبع مرتكز على استخدام الشبكات العصبونية الصناعية والمنطق العائم لتتبع تغيرات الحمل لنظام PEMFC في بيئة Matlab/Simulink. بالتالي، يمكن تلخيص ما تم إنجازه والتوصل إليه في البحث بالنقاط التالية:



- ✓ تحقيق التشغيل الأمثل لنظام الطاقة، وذلك بتزويد الحمل بالطاقة الكهربائية المطلوبة.
- ✓ تحقيق عمل نظام PEMFC عند تيار التشغيل المحدد وفقا لمتطلبات الحمل، ساهم بضبط معدلات استهلاك غاز الهيدروجين المتناسبة طرديا مع التيار. بالنتيجة، تم تحقيق الاستهلاك الأمثل للوقود المستخدم في عمليات التحويل الكهروكيميائي للطاقة.
- ✓ تحقيق إدارة الطاقة الكهروكيميائية للنظام ساهم في تحسين قيمة عامل كفاءة التحويل الكهروكيميائي للطاقة. وهذا يحقق التشغيل الاقتصادي للنظام.
- ✓ يحقق الاقتران غير المباشر لنظام PEMFC مع الحمل، باستخدام مبدل جهد مقاد تحسين في استطاعة خرج النظام مقارنة مع حالة الاقتران المباشر مع الحمل.
- ✓ نوصي بالاهتمام بدراسة طرق توليد الطاقة الكهربائية باستخدام الهيدروجين الأخضر الناتج عن طريق تخزين طاقة مصادر الطاقة المتجددة، وذلك لسهولة استرجاع الطاقة المخزنة فيه باستخدام خلايا الوقود.
- ✓ نوصي بالاهتمام باستخدام خلايا الوقود، كونها تتمتع بالقدرة على امداد الأحمال الكهربائية بطاقة مستمرة طالما تم تأمين الوقود اللازم لتشغيلها. وهذا يجعلها تتفوق على الطاقات المتجددة التي تواجه مشكلة العمل المتقطع لعدم إمكانية توفر مواردها بشكل دائم

## References:

- [1] WU, D.; PENG, C.; YIN, C.; TANG, H. *Review of System Integration and Control of Proton Exchange Membrane Fuel Cells*. Electrochemical Energy Reviews 3, 2020, 466–505.
- [2] SALIMI, F.; LAY, E.; IRANZO, A.; SALVA, J.; SUNDEN, B. *On neural network modeling to maximize the power output of PEMFCs*. Electrochimica Acta, 2020, 1-12.
- [3] OMRAN, A.; LUCCHESI, A.; SMITH, D.; ALASWAD, A.; AMIRI, A.; TABBI, W.; RICCARDO, J.; OLABI, A. *Mathematical model of a proton-exchange membrane (PEM) fuel cell*. International Journal of Thermo fluids 11, 2021, 1-10.
- [4] M. QAISER, M.; ASGHAR, A.; JAFFERY, M.; JAVAID, M.; KHURRAM, M. *Flow Control of Hydrogen Fuel in PEM fuel cell using Soft Computing Techniques*. Journal of Ovonic Research 17, 2021, 31- 44.
- [5] DARJAT, S.; ARIS, T.; SUDJADI, K.; ANDRA, K. *Designing Hydrogen and Oxygen Flow Rate Control on a Solid Oxide Fuel Cell Simulator Using the Fuzzy Logic Control Method*. Processes 8, 2020, 1-23.
- [6] HARRAG, A.; REZK, H. *Indirect P&O type-2 fuzzy-based adaptive step MPPT for proton exchange membrane fuel cell*. Neural Computing and Applications 33, 2021, 9649–9662.
- [7] CAO, Y.; LI, Y.; ZHANG, G.; KITTISAK, J.; NASSERI, M. *An efficient terminal voltage control for PEMFC based on an improved version of whale optimization algorithm*. Energy Reports 6, 2020, 530–542.
- [8] BARHOMI, E.; FARHANI, S.; BACHA, F. *High efficiency power electronic converter for fuel cell system application*. Ain Shams Engineering Journal, 2021, 1-10.
- [9] HARRAG, A. *Novel Neural network single sensor MPPT for Proton Exchange Membrane Fuel Cell*. Journal of New Materials for Electrochemical Systems 24, 2021, 43-48.
- [10] ALY, M.; REZK, H. *An improved fuzzy logic control-based MPPT method to enhance the performance of PEM fuel cell system*. Neural Computing and Applications, 34(6), 202, 4555-4566.