مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (10) العدد (11) 2026

Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (10) No. (11) 2026

استخدام خلايا الوقود الهيدروجينية ذات غشاء التبادل البروتوني (PEM) لتحسين استقرار نظام كهروريحي مستقل

د. جاسم يوسف*

م. يارا عطيه**

(تاريخ الإيداع 2026/4/26 . قُبِل للنشر في 2026/6/3)

□ ملخّص □

تم في هذا البحث بناء نموذج لنظام طاقة كهربائي ريحي يستخدم مولد تزامني ذو مغناطيس دائم (PMSG) مع خلايا وقود غشاء تبادل البروتون (PEM) لتحقيق استقرار خرج النظام المستقل عن الشبكة.

بهدف دراسة استقرار نظام الطاقة الكهروريحي المستقل باستخدام خلايا الوقود الهيدروجينية نستخدم الحزمة البرمجية MATLAB لإظهار تأثير وجود خلايا الوقود إلى جانب نظام لتحقيق استقرار الخرج والموازنة ما بين الإنتاج والاستهلاك للنظام المدروس.

تم نمذجة نظام الطاقة الكهروريحي المكون من عنفة ريحية مع مولد تزامني ذو مغناطيس دائم (PMSG) وربطه مع خلية وقود تغذى بالهيدروجين من خلال نموذج منفصل لنظام تحليل الماء كهربائياً لإنتاج الهيدروجين اللازم للخلية، كما تم اختبار النظام عند عدة حالات عمل، عند حالة عمل النظام الريحي بشكل مستقل (بدون خلية) والثانية هي حالة دمج خلايا الوقود مع النظام الريحي عند العمل بسرعة ثابتة وسرعة رياح مضطربة.

أكدّت نتائج المحاكاة قدرة خلايا الوقود على تنظيم الجهد عند دمجها مع نظام طاقة الرياح إضافة لدورها كمصدر طاقة جديد يضاف لأنظمة طاقة الرياح ويحقق الاستقرار بفارق زمني قدره $\Delta T = 189.7\ ms$ بين قمة الاضطراب والعودة للاستقرار كاستجابة سريعة لمنظومة هجينة تحتوي على قصور ذاتي ميكانيكي (عنفة ريحية) وتفاعلات كيميائية (خلية وقود).

إن زيادة مقاومة الحمل ضمن المجال المدروس تؤدي لتحسين الجهد بنسبة $\mathbf{31.5}\ \%$ وتقليل الإجهاد على خلية الوقود مما يساعد في تحسين الاستقرار مع انخفاض التموجات وبقاء مساهمة العنفة في دعم استقرار خرج النظام بشكل فعال حيث تعمل خلية الوقود كمصدر طاقة احتياطي قادر على تعويض التقلبات الناتجة عن تغير سرعة الرياح.

الكلمات المفتاحية: طاقة الرياح– خلايا الوقود الهيدروجينية (PEM)– مولد الرياح التزامني– الاستقرار– MATLA.

* مدرس في قسم هندسة تقانات الطاقات المتجددة – كلية الهندسة التقنية – جامعة طرطوس – طرطوس – سورية.

** طالبة دراسات عليا (ماجستير) في قسم هندسة تقانات الطاقات المتجددة – كلية الهندسة التقنية – جامعة طرطوس – طرطوس – سورية.

مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (10) العدد (11) 2026

Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (10) No. (11) 2026

Using Proton Exchange Membrane (PEM) Hydrogen Fuel Cells to Improve the Stability of an Off-Grid Wind Power System

Dr. Jasem Yousef *

Eng. Yara Attieh **

(Received 26/4/2026. Accepted 3/6/2026)

□ ABSTRACT □

In this study, a model of a wind-powered electrical energy system was developed that uses a permanent magnet synchronous generator (PMSG) in conjunction with proton exchange membrane (PEM) fuel cells to stabilize the output of the off-grid system.

To study the stability of the off-grid wind-solar power system using hydrogen fuel cells, we use the MATLAB software package to demonstrate the effect of the fuel cells on system output stability and the balance between production and consumption in the studied system.

The wind-hydroelectric power system, consisting of a wind turbine coupled with a permanent magnet synchronous generator (PMSG), was modeled and integrated with a hydrogen-fed fuel cell through a separate model of an electrolysis system to produce the hydrogen required for the cell. The system was also tested under several operating conditions: when the wind system operated independently (without the fuel cell), and when the fuel cells were integrated with the wind system operating at a constant speed and under fluctuating wind speeds.

The simulation results confirmed the ability of fuel cells to regulate voltage when integrated with a wind energy system, in addition to their role as a new energy source added to wind energy systems, achieving stability with a time difference of $\Delta T=189.7$[ms] between the peak of disturbance and the return to stability as a rapid response for a hybrid system containing mechanical inertia (wind turbine) and chemical reactions (fuel cell).

Increasing the load resistance within the studied range improves power output by 31.5% and reduces stress on the fuel cell, which helps improve stability by reducing ripple. The turbine continues to play an effective role in maintaining system output stability, as the fuel cell acts as a backup power source capable of compensating for fluctuations caused by changes in wind speed.

Key words: Wind Energy - Hydrogen Fuel Cells (PEM) – Synchronous Wind Generator - Stability - MATLAB.

*** Doctor in the Department of Renewable Energy Engineering – Faculty of Technical Engineering – Tartus University – Tartus – Syria.**

****Postgraduate Student (Master's) in the Department of Renewable Energy Engineering – Faculty of Technical Engineering – Tartus University – Tartus – Syria.**

1-المقدمة

تعد طاقة الرياح من أهم مصادر الطاقة المتجددة وأكثرها انتشاراً نظراً لتوفرها في العديد من المناطق وكفاءتها العالية التي تصل إلى 59% في إنتاج الطاقة الكهربائية مقارنة ببعض المصادر الأخرى، حيث شهدت تقنيات توربينات الرياح تطوراً كبيراً في العقود الأخيرة مما ساهم في تحسين كفاءتها وموثوقيتها ومع ذلك فإن طبيعة الرياح المتغيرة وعدم استقرار سرعتها يؤديان إلى تقلبات في القدرة المنتجة، الأمر الذي يسبب تحديات كبيرة عند استخدام هذه الأنظمة لتغذية الأحمال الكهربائية، خاصة في الأنظمة المستقلة (Off-grid Systems)التي لا تكون مرتبطة بالشبكة الكهربائية الرئيسية(release & event, 12 November 2025) .

ظهرت الحاجة إلى استخدام تقنيات تخزين الطاقة لمعالجة مشكلة تقلبات إنتاج الطاقة من المصادر المتجددة إذ يعتبر الهيدروجين أحد أهم حوامل الطاقة الواعدة في هذا المجال حيث يمكن إنتاجه من خلال عملية التحليل الكهربائي للماء ثم تخزينه واستخدامه لاحقاً لإنتاج الكهرباء مرة أخرى بواسطة خلايا الوقود (Fuel cells)((IRENA), September 2019) .

حيث أظهرت دراسات عديدة نماذج محاكاة لنظام توليد الطاقة وتخزينها (الرياح والهيدروجين) مع دراسة تأثيرات درجات حرارة التشغيل المختلفة على إنتاج الهيدروجين وعلى توليد الكهرباء واستهلاك الهيدروجين لخلية الوقود أن دمج طاقة الهيدروجين مع طاقة الرياح سيؤدي لحل مشكلة فائض الطاقة بشكل فعال (Meng & He, 2023).

ونُشرت دراسة تعتمد على إجراء مقارنة بين نظامين ونمذجتهما ومحاكاتهما بناءً على معايير الأداء صافي التكلفة الحالية والتكلفة المعيارية للكهرباء والكهرباء المولدة توضح أن النظام الهجين (رياح، هيدروجين، خلية الوقود) لديه ميزة اقتصادية واضحة كأقل صافي تكلفة حالية وتكلفة معيارية للكهرباء على مدى عمر المشروع البالغ 25 عاماً مقارنة بنظام تخزين رياح- بطارية(Adjei & Nwulu, 2023) .

1-1-هدف البحث

في هذا السياق، تهدف هذه الدراسة إلى تحليل ودراسة استقرار نظام طاقة كهروريحي مستقل مدعوم بخلايا الوقود الهيدروجينية من خلاله نمذجة ومحاكاة النظام باستخدام أدوات المحاكاة الهندسية (برنامج MATLAB) مع دراسة تأثير دمج وخلايا الوقود في تحسين أداء النظام واستقراره (MATLAB, MathWorks, n.d.).

1-2-أهمية البحث وأهدافه

في ظل الحاجة لتحقيق الاستقرار في أنظمة طاقة الرياح وانطلاقاً من استخدام خلايا الوقود الهيدروجينية كتقنية جديدة تم اقتراح نموذج يمكن من خلال دراسة بارامترات نظام التوليد الريحي المتكامل مع خلايا الوقود الهيدروجينية وتقييم أدائه للوصول إلى نموذج نظام طاقة رياح يحقق الاستقرار باستخدام خلايا الوقود الهيدروجينية.

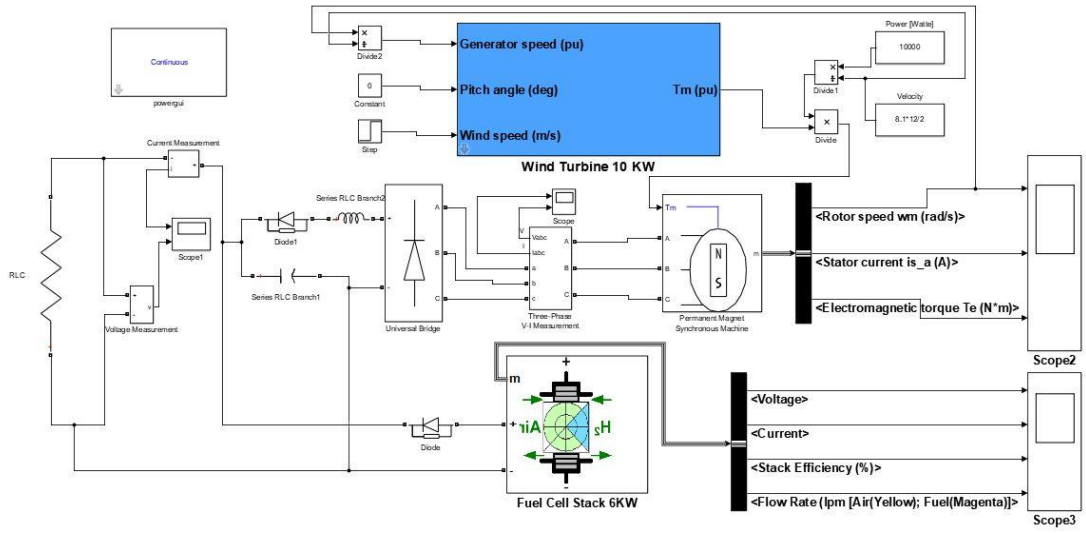
2-طرق البحث ومواده

تم تطوير نموذج لمحاكاة نظام طاقة كهروريحي يعتمد على دمج توربينات الرياح التي تعمل بمولد تزامني تحريضي ذو مغناطيسية دائمة (PMSG) مع خلايا الوقود الهيدروجينية ذات غشاء تبادل البروتون (PEM) من أجل تحسين استقرار النظام الكهربائي في الشبكات المستقلة، وتم تنفيذ نموذج النظام السابق

باستخدام بيئة Simscape ضمن برنامج MATLAB اعتماداً على العلاقات الرياضية التي تصف سلوك مكونات النظام مثل توربينات الرياح والمولدات الكهربائية وخلايا الوقود.

2-1-نظام الطاقة المقترح

يبين الشكل (1) نمذجة النظام المُقترح باستخدام MATLAB، ويتألف من توربين رياح بقدرة10 MW يعتمد على مولد PMSG مُتصل بخلية وقود 6 kw لتغذي حمل أومي متغير.



الشكل (1) النظام المقترح لعنفة الرياح مع مولد PMSG وخلية وقود PEM.

2-1-1-النموذج الرياضي للتوربين الريحي

يتم تحويل طاقة الرياح إلى طاقة ميكانيكية بواسطة توربينات الرياح ثم إلى طاقة كهربائية بواسطة المولد الكهربائي، كما في العلاقة (1) يمكن التعبير عن الطاقة الحركية الموجودة في تيار الرياح:

$$\boldsymbol{E = \frac{1}{2} m v^2} \qquad (1)$$

حيث: E: هي الطاقة الحركية المخزنة في الريح [J] ، m: كتلة الهواء[kg] ، v: سرعة الرياح $[m/s]$.

أما الطاقة الميكانيكية المستخرجة من التوربين تتناسب طرداً مع مكعب سرعة الرياح فتعطى بالعلاقة (2):

$$\boldsymbol{P_m = \frac{1}{2} \rho \ A_r \ C_P(\lambda, \beta) \ V_w^3 = C_P(\lambda, \beta) P_w} \qquad (2)$$

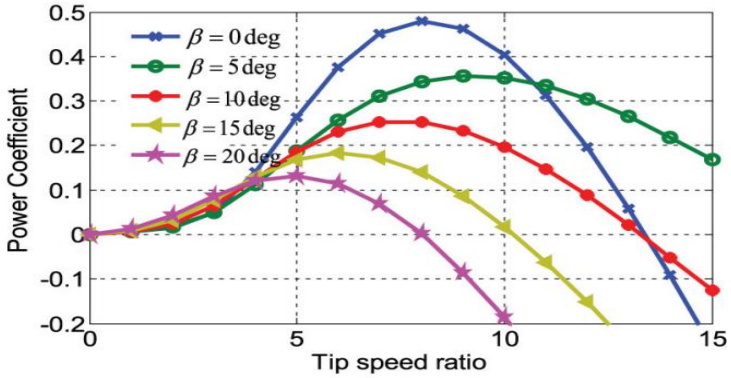
حيث: P_m : الاستطاعة الميكانيكية للعنفة [W] ، (ρ): كثافة الهواء$[k_g/m^3]$ ، $A_r = \pi R^2$: المساحة التي يغطيها دائر العنفة $[m^2]$ ، R: نصف قطر الدوار(طول الشفرة) [m] ، V_w: سرعة الرياح $[m/s]$ ، $C_P(\lambda, \beta)$: معامل الكفاءة، λ نسبة السرعة الطرفية للشفرة: $\lambda = \omega . R/v$ ، β: زاوية ميل شفرة التوربين (Ali, 2018).

ويعبر عن عزم الدوران الميكانيكي للمولد التحريضي بالعلاقة التالية:

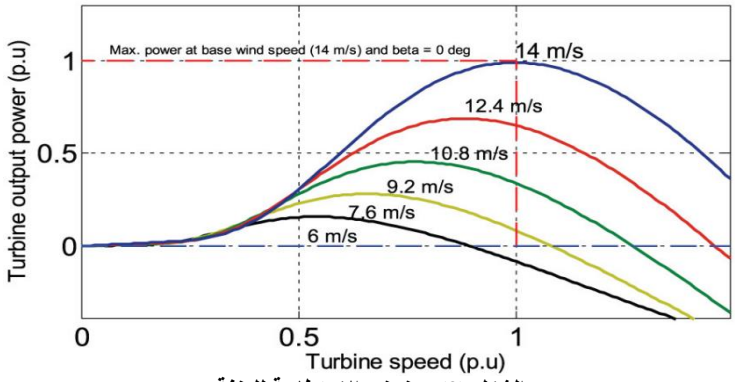
$$\boldsymbol{T_m = \frac{P_m}{w_r} = \frac{C_p(\lambda, \beta) P_w}{w_r}} \qquad (3)$$

حيث: T_m : العزم الميكانيكي [N.m] ، w_r : السرعة الزاوية $[rad/s]$.

يوضح الشكل (2) منحني معامل الكفاءة مقابل السرعة الطرفية للشفرة (Cp_λ) بالنسبة لقيم مختلفة لزاويا الميل (β)، كما يوضح الشكل (3) استطاعة خرج التوربين مقابل سرعة التوربين عند قيم مختلفة لسرعة الرياح (V_W).



الشكل (2): العلاقة بين معامل الكفاءة والسرعة الطرفية للشفرة.



الشكل (3): منحني الاستطاعة للعنفة.

2-1-2-النموذج الرياضي لخلايا الوقود

يتم وصف أداء خلية الوقود رياضيًا من خلال العلاقة بين الجهد والتيار، حيث يتأثر الجهد الناتج بعدة عوامل مثل الضياعات الكهروكيميائية والحرارية. ويمكن التعبير عن الجهد الناتج من خلية الوقود بالعلاقة التالية:

$$V_{fc} = E - V_{act} - V_{ohmic} - V_{conc} \qquad (4)$$

حيث:

V_{fc} : جهد خلية الوقود $[v]$، E: الجهد النظري (الجهد العكسي أو جهد نرنست $[v]$.

V_{act}: ضياعات التنشيط $[v]$، V_{ohmic}: ضياعات المقاومة الأومية $[v]$.

V_{conc}: ضياعات تركيز الغازات $[v]$.

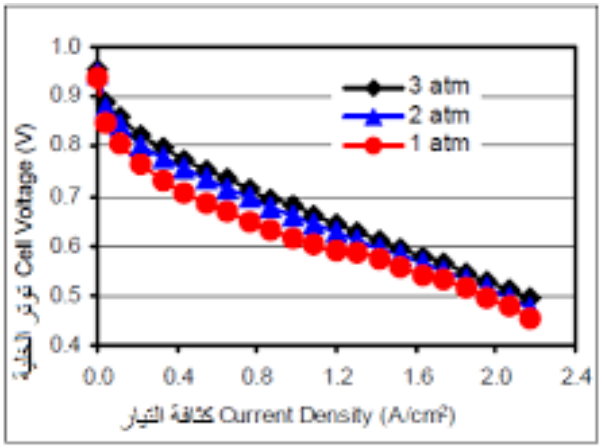
ويعبر عن الجهد النظري باستخدام معادلة نرنست (Nernst Equation):

$$E = E_0 + \frac{RT}{2F} \ln\left(\frac{P_{H2}\sqrt{P_{O2}}}{P_{H2O}}\right) \qquad (5)$$

حيث:

E_0 : الجهد القياسي لخلية الوقود وقيمته حوالي (1.23v)، R: ثابت الغازات العام $[J/mol.k]$، T: درجة الحرارة بالكلفن $[k]$، F : ثابت فاراداي $[96485\ C/mol]$،

P_{H2O}: ضغط الماء[bar] ، (P_{H2}): ضغط الهيدروجين [bar] ، (P_{O2}): ضغط الأكسجين [bar] (Larminie & James, 2003).



الشكل (4): منحني أداء خلية الوقود (PEM) عند ضغوط مختلفة ودرجة حرارة ثابتة ونسبة رطوبة ثابتة.

2-1-3-النموذج الرياضي لاستقرار النظام الكهربائي

يتم تحليل استقرار الأنظمة الكهربائية باستخدام نماذج رياضية تمثل العلاقة بين القدرة المولدة والقدرة المستهلكة في النظام. ويعتمد تحليل الاستقرار الديناميكي عادة على معادلات الحركة للمولدات والتي تعرف باسم معادلة التأرجح (Swing Equation)، الصيغة الأساسية (Sharrouf، 2019)(بدلالة العزم):

$$J\frac{d^2\delta_m}{dt^2} = T_m - T_e = T_a \qquad (6)$$

حيث:

J: عزم القصور الذاتي $[J]$، δ_m: زاوية الدوار الميكانيكية $[rad]$، T_m : العزم الميكانيكي $[N.m]$، T_e : العزم الكهربائي $[N.m]$.

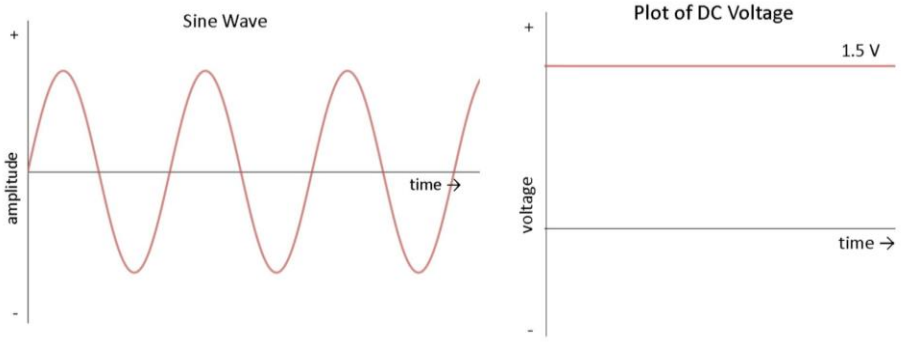
الصيغة الأساسية (بدلالة القدرة):

$$\frac{2H}{\omega_s}\frac{d^2\delta_e}{dt^2} = P_m - P_e \qquad (7)$$

حيث:

H: ثابت القصور الذاتي $[s]$ ، δ_e : زاوية القدرة الكهربائية $[rad]$، ω_s: السرعة الزاوية المتزامنة $[rad]$، P_m: الاستطاعة الميكانيكية الداخلة $[W]$، P_e : الاستطاعة الكهربائية الخارجة $[W]$ (Sharrouf، 2019).

ويوضح الشكل (5) منحنيات الجهد المتناوب والمستمر للحالة المستقرة:



الشكل (5): منحنيات الجهد المتناوب والمستمر المستقرة (AC and DC Voltage Stability).

بناءً على قانون موازنة الطاقة يجب أن يتساوى التوليد مع الاستهلاك لضمان استقرار الجهد وفق المعادلة:

$$\boldsymbol{P = I \times V} \qquad (\mathbf{8})$$

$$\boldsymbol{P_{wind} + P_{FC} - \frac{(V_{dc})^2}{R} = C \times V_{dc} \times \frac{dV_{dc}}{dt}} \qquad (\mathbf{9})$$

حيث:

R : مقاومة الحمل (Ω) ، C: سعة مكثف التنعيم بالنسبة للتيار المستمر (μF).

كما ترتبط مقاومة الحمل بالتيار من خلال قانون أوم:

$$\boldsymbol{V_{dc} = I \times R \quad \Rightarrow \quad I_{Load} = \frac{V_{dc}}{R}} \qquad (\mathbf{10})$$

يتحدد زمن استجابة الجهد لتغير الحمل بثابت الزمن (τ) الناتج عن وجود المكثف والحمل معاً:

$$\boldsymbol{\tau = R \times C} \qquad (\mathbf{11})$$

وتفسر تغير زمن الاستقرار (Settling Time) بتغير قيمة المقاومة فكلما زاد الحمل قلت المقاومة قل الثابت الزمني وأصبح النظام يستجيب للتغيرات بشكل أسرع لكن بحساسية أكبر للاضطرابات.

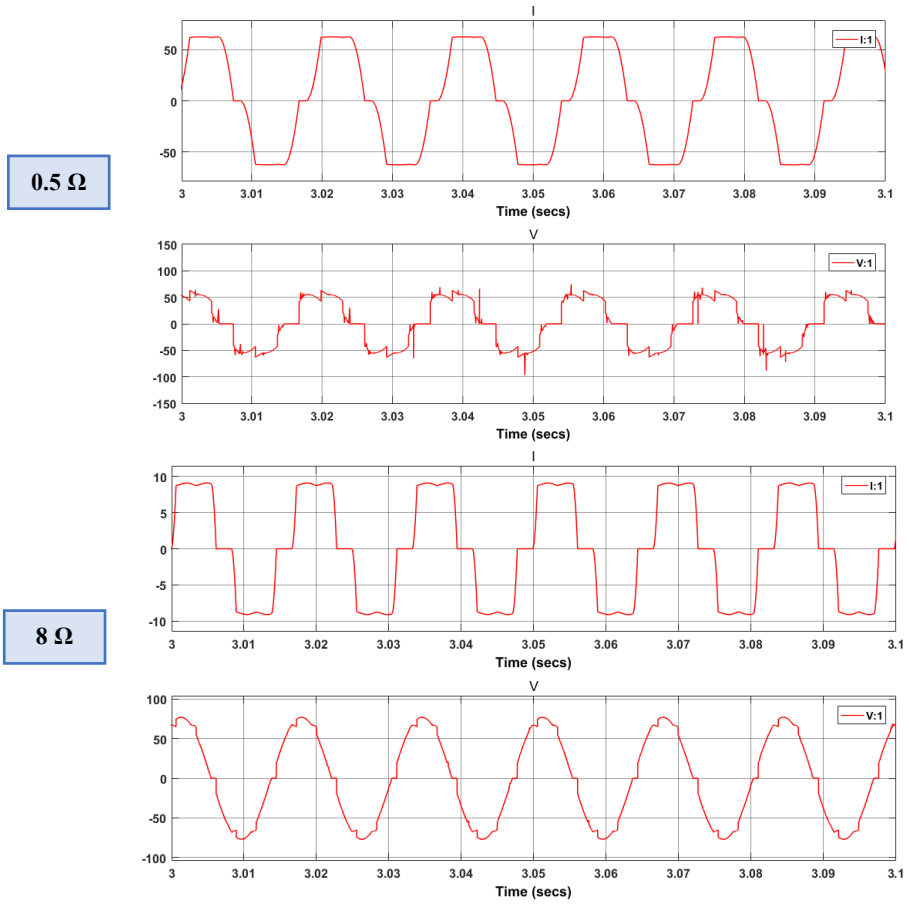
3-نمذجة النظام باستخدام MATLAB

يظهر الشكل (1) النظام المقترح باستخدام MATLAB، ولتقييم فعالية نظام طاقة الرياح مع خلية الوقود في تحقيق الاستقرار تم دراسة أداءه ضمن سيناريوهين:

3-1-الحالة الأولى: نمذجة النظام عند مقاومتي حمل متغيرتين الأول في ظل سرعة رياح ثابتة:

1.منحنيات الخرج للعنفة الريحية

يوضح الشكل (6) منحنيات خرج العنفة (الجهد والتيار) عند مقاومتي الحمل $(0.5\ \Omega)$ و $(8\ \Omega)$:

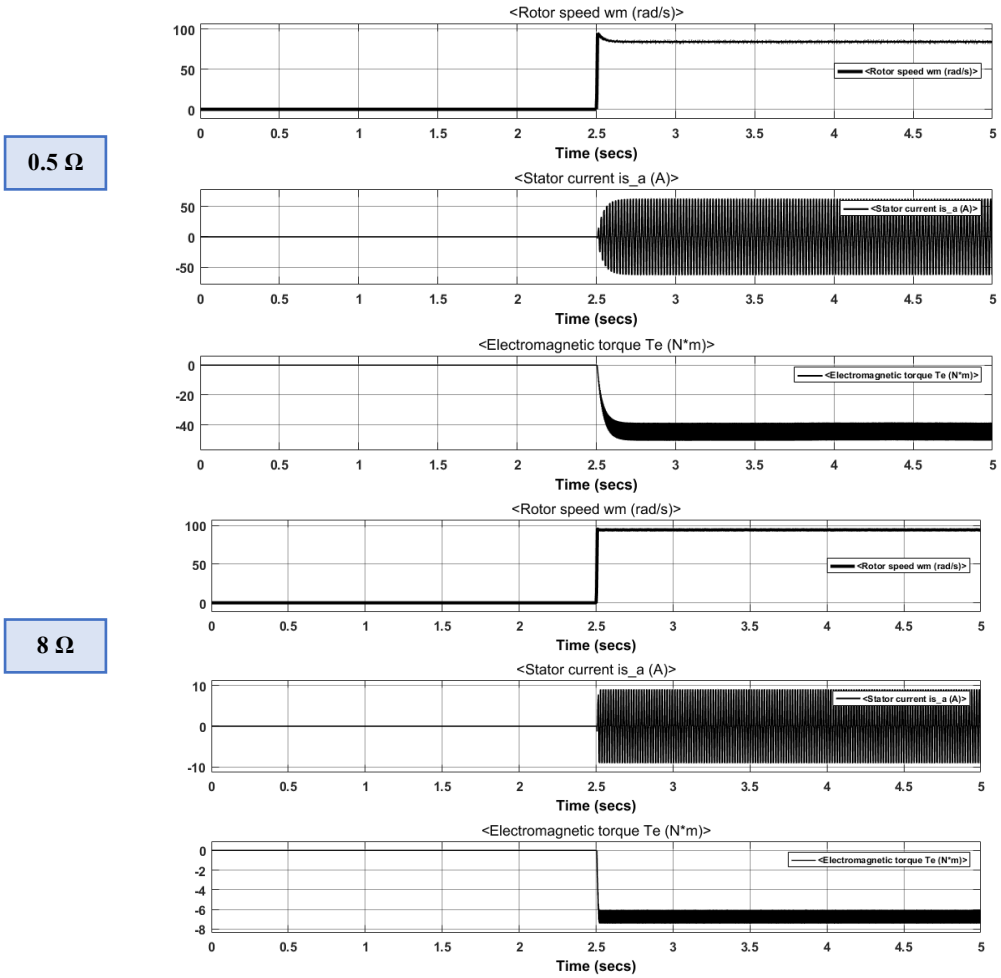


الشكل (6): التغيرات الحاصلة على العنفة الريحية والمولد عند مقاومتي الحمل الأومي (0.5 Ω) و(8 Ω) وسرعة رياح (12 m\s)، موجات الخرج للتيار والجهد على طور واحد.

من الشكل (6) يظهر تذبذب واضح عند مقاومة الحمل الأولى **(0.5 Ω)** نتيجة سحب التيار الكبير مما يؤدي لهبوط وتشوه في الجهد بسبب المقاومة الأومية لملفات المولد والإشباع المغناطيسي في القلب الحديدي الذي يؤدي لهبوط غير خطي في الجهد ويزداد تأثير المفاعلة الحثية لملفات المولد التي تعمل على تأخير التيار بالنسبة للجهد أما في الشكل الثاني عند حمل **(8 Ω)** فيكون شكل موجة الجهد أقرب للموجة الجيبية لأن المولد يعمل في حالة تحميل خفيف (Light Load) مما يسمح بالحفاظ على جودة الجهد وجودة التيار بالمقارنة مع الحالة السابقة بالتالي تشغيل أكثر استقراراً، وكذلك نلاحظ من الشكلين السابقين التشوه الناتج في الجهد والتيار نتيجة استخدام الكترونيات القدرة في التقويم.

2.منحنيات الخرج لمولد العنفة الريحية

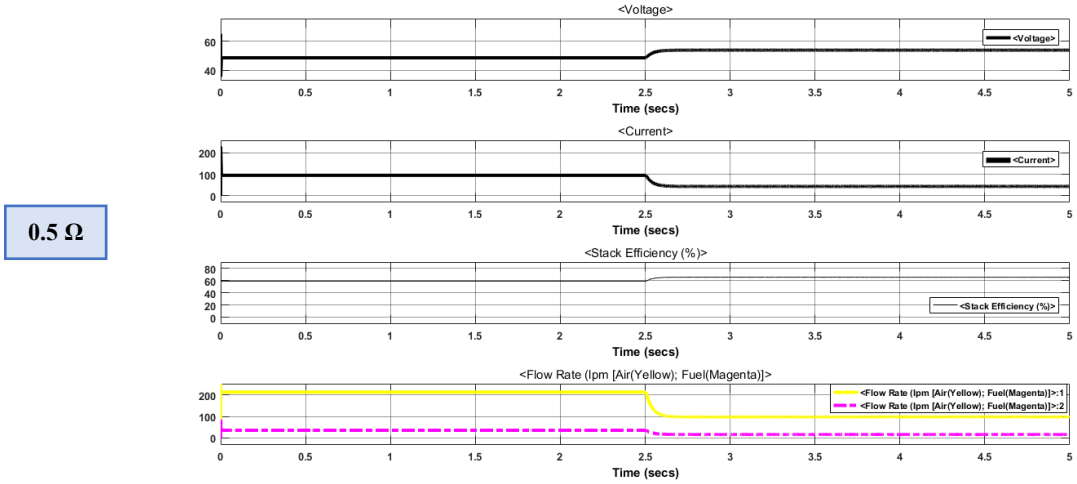
يظهر الشكل (7) أن زيادة مقاومة الحمل الأومي من **0.5 Ω** إلى **8 Ω** تسبب استقرار أعلى في قيمة الجهد وانخفاض كبير في قيمة التيار المسحوب من المولد بنسبة تقارب **82** % حيث انخفض من قيمة **50 *A*** في مقاومة الحمل الأولى إلى قيمة **9 *A*** في مقاومة الحمل الثاني فينخفض بذلك العزم نتيجة لزيادة قيمة السرعة الزاوية نتيجة الحمل الميكانيكي الأخف على العنفة.



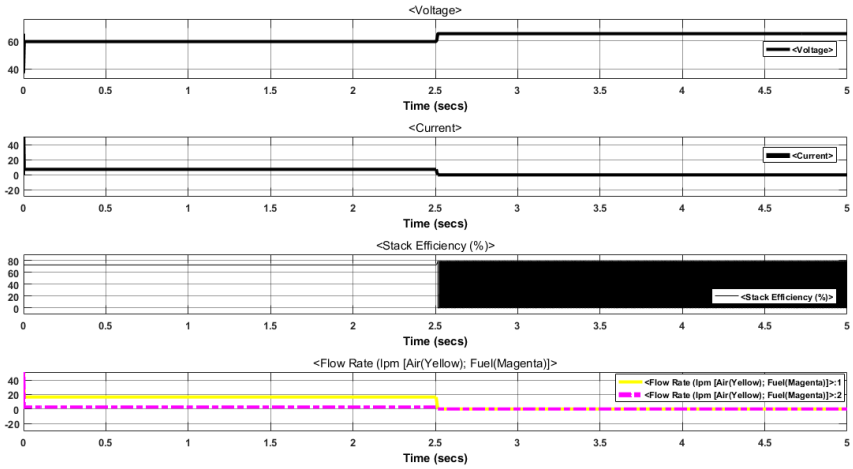
الشكل (7) : منحنيات سرعة الدائر (Rotor Speed)، تيار الثابت (Stator Current)، العزم الكهرومغناطيسي (Electromagnetic Torque) عند مقاومة الحمل الأومي (0.5 Ω) و(8 Ω).

3.منحنيات الخرج لخلية الوقود

عند بدء التشغيل تحصل في الخلية تفاعلات كيميائية ونحصل على خرج الخلية بالشكل التالي:



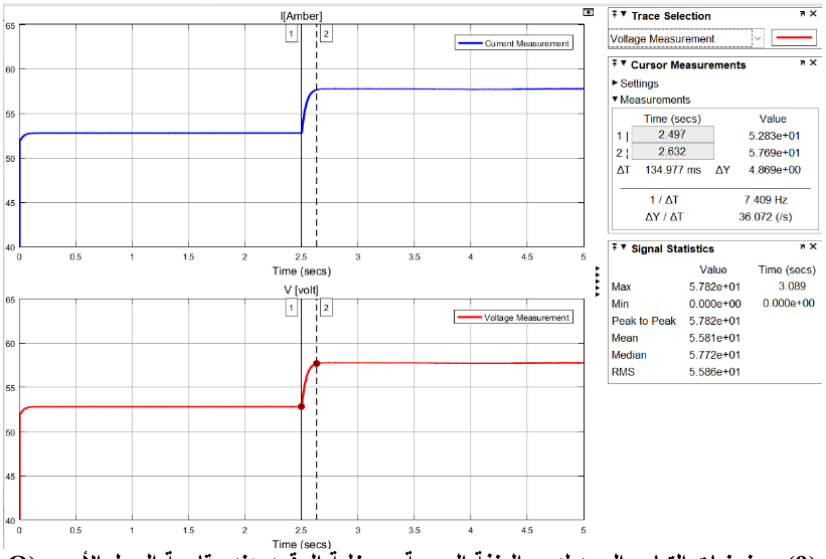
8 Ω



الشكل (8) : منحنيات جهد خلية الوقود (Fuel Cell Voltage)، تيار خلية الوقود (Fuel Cell Current)، كفاءة خلية الوقود (Efficiency)، تدفق الهيدروجين والهواء (Flow Rate) عند مقاومة الحمل الأومي (0.5 Ω) و(8 Ω).

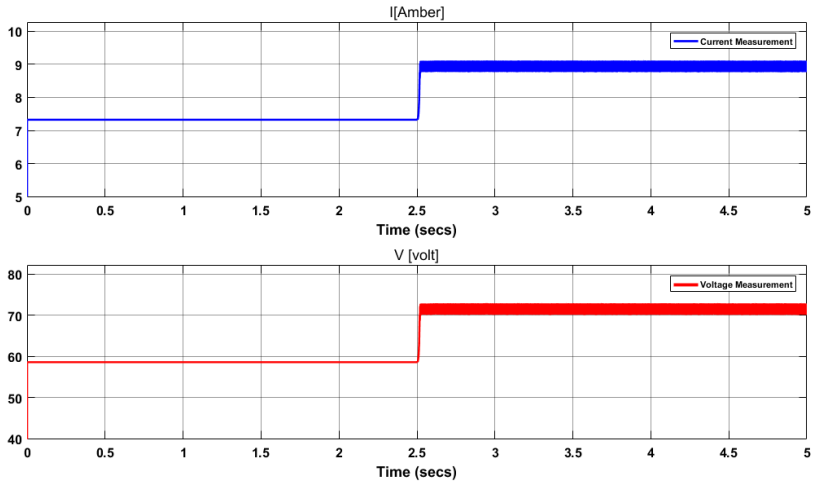
نلاحظ من المنحنيات في الشكل (8) أنه كلما زادت مقاومة الحمل الأومي كلما حافظنا على جهد مستقر وعالي أما قيمة التيار فتنخفض وترتفع بذلك كفاءة الخلية نتيجة انخفاض الضياعات داخلها وينخفض نتيجة لذلك استهلاك الهيدروجين والهواء حتى يصل لقيمة معدومة تقريباً بالتالي استهلاك جيد.

4.منحنيات الخرج للنظام الهجين (عنفة الرياح + خلية الوقود)



الشكل (9) : منحنيات التيار والجهد لدمج العنفة الريحية مع خلية الوقود عند مقاومة الحمل الأومي (0.5 Ω).

يوضح الشكل (9) منحنيات التيار والجهد لدمج العنفة الريحية مع خلية الوقود حيث تكون قيمة التيار في البداية **95 *A*** ثم ترتفع لتصل إلى **105 *A*** حيث يظهر تأثير خلية الوقود في استجابة النظام خلال زمن صغير قدره **(0.135sec)** تسهم في تلبية الطلب العالي ويؤمن نظام التغذية المستقرة للحمل من خلال استجابة الخلية للطلب مما يظهر التكامل بين العنفة والخلية أما بالنسبة للجهد فيكون قليلاً بقيمة تبدأ من **47 *V*** وتصل حتى **57 *V*** ويظهر انخفاض طفيف فالدمج لا يلغي هبوط الجهد بالكامل إنما يخفف منه.



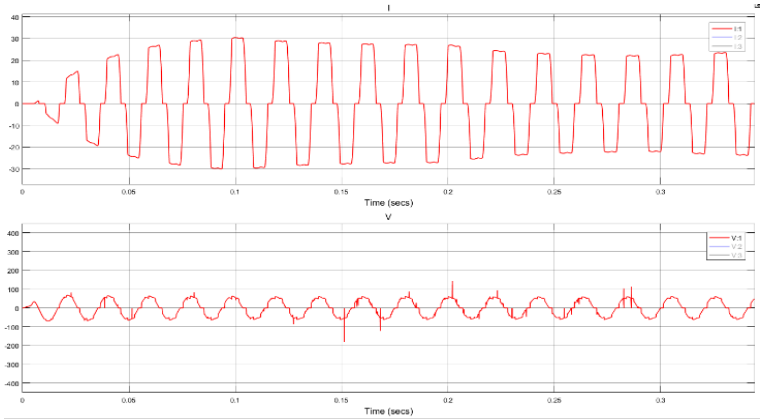
الشكل (10) : منحنيات التيار والجهد لدمج العنفة الريحية مع خلية الوقود عند مقاومة الحمل الأومي (8 Ω).

يبين الشكل (10) أنه عند الحمل الأومي (8 Ω) يكون التيار مستقر ومنخفض نسبياً عند قيمة $9\ A$ ومساهمة العنفة تكون واضحة في تخفيف الحمل عن الخلية والإشارة مستقرة أما بالنسبة للجهد فيقترب من القيمة الاسمية $75\ V$ ويستقر عندها وتكون التموجات قليلة جداً بالتالي جودة الطاقة عالية وفق المعادلة (8).

3-2-الحالة الثانية: نمذجة النظام عند سرعة رياح مضطربة ومقاومة حمل ثابتة:

1.منحنيات الخرج للعنفة الريحية

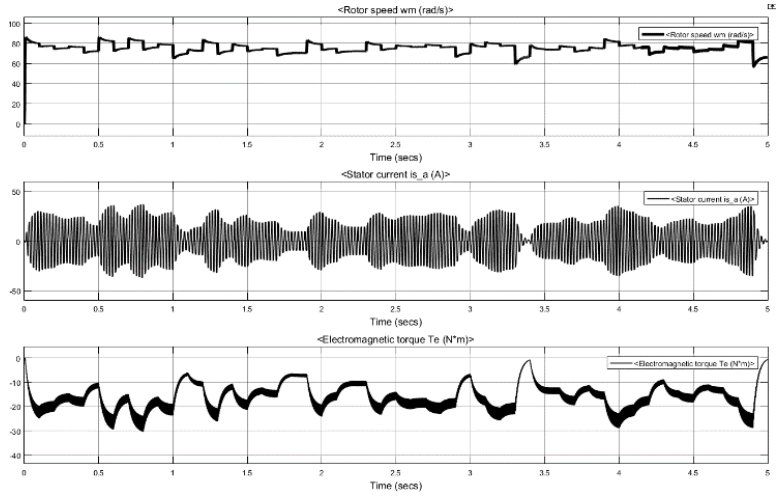
يوضح الشكل (11) منحنيات خرج العنفة جهد وتيار عند سرعة رياح مضطربة ومقاومة حمل (1 Ω):



الشكل (11): التغيرات الحاصلة على العنفة الريحية والمولد عند مقاومة الحمل الأومي (1 Ω) وسرعة رياح مضطربة، موجات الخرج للتيار والجهد على طور واحد.

نلاحظ أن التيار يبدأ من الصفر ويأخذ شكلاً متذبذباً متزايد في السعة إضافة لوجود توافقيات ناتجة عن عملية التقويم أو طبيعة الحمل الموصول أما منحني الجهد فيظهر نبضات بشكل حاد نتيجة لعمليات التبديل (Switching) في دوائر إلكترونيات القدرة المرتبطة بالعنفة أو بسبب تداخل العزم الكهرومغناطيسي المتذبذب، فسعة الجهد ترتبط مباشرة بسرعة الدوران.

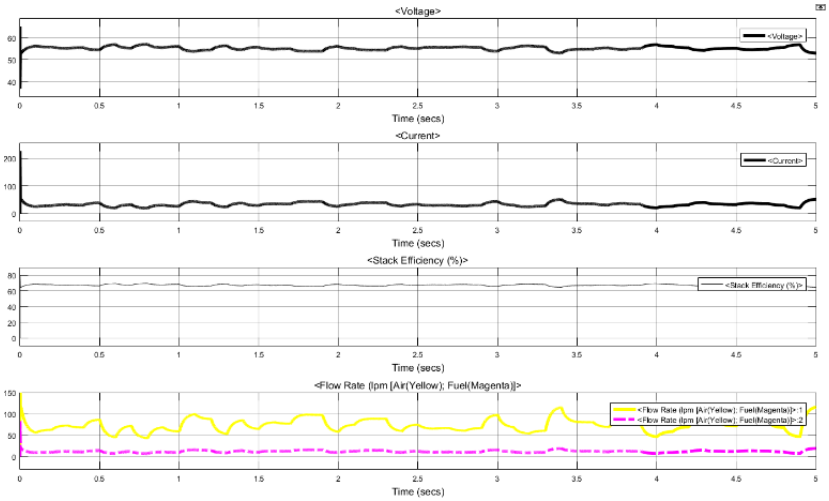
2.منحنيات الخرج لمولد العنفة الريحية



الشكل (12) : منحنيات سرعة الدائر (Rotor Speed)، تيار الثابت (Stator Current)، العزم الكهرومغناطيسي (Electromagnetic Torque) عند مقاومة الحمل الأومي (1Ω) وسرعة رياح مضطربة.

يتذبذب منحنى سرعة الدائر حول القيمة المتوسطة $75\sim80\ rad/s$ بشكل مسنن وغير منتظم استجابة لعطالة عنفة الرياح الميكانيكية غير المستقرة مما يؤدي لتغير مستمر في الطاقة الحركية الناتجة على دائر المولد. ويظهر تيار الثابت متغير السعة بشكل كبير وواضح مع مرور الوقت نتيجة تغير الاستطاعة الكهربائية المولدة أما بالنسبة للعزم فيظهر المنحنى تذبذبات حادة متزامنة بين $10\sim30\ N.m$.

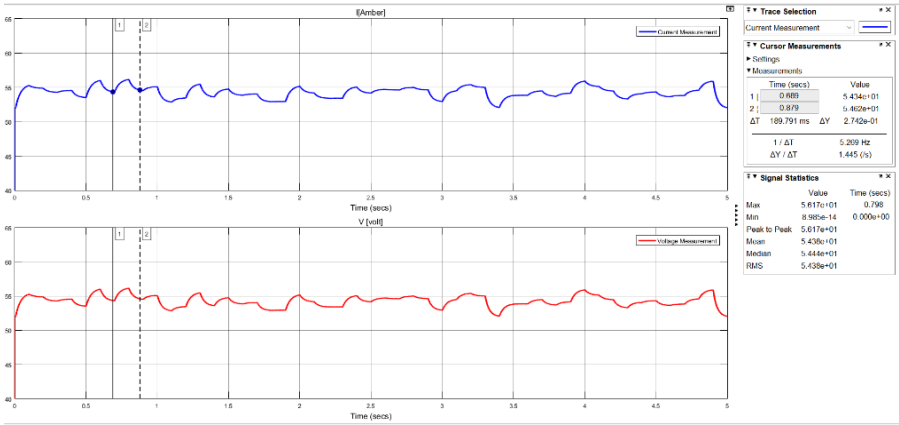
3.منحنيات الخرج لخلية الوقود



الشكل (13) : منحنيات جهد خلية الوقود (Fuel Cell Voltage)، تيار خلية الوقود (Fuel Cell Current)، كفاءة خلية الوقود (Efficiency)، تدفق الهيدروجين والهواء (Flow Rate) عند مقاومة الحمل الأومي (1Ω) وسرعة رياح مضطربة.

تبين المنحنيات الظاهرة في الشكل (13) أن الجهد الكهربائي للخلية يحافظ على استقراره حول القيمة $55\ V$ ، بينما يتذبذب التيار بشكل حاد ليعوض النقص الناتج عن تذبذب الرياح. في حين يظهر منحني الكفاءة استقراراً ملحوظاً عند مستويات تتراوح بين $55\sim60\%$ أما منحني التدفق فيعكس دقة نظام التحكم في التغذية حيث تضخ كميات الوقود والهواء بناءً على تيار الحمل المطلوب والارتفاع المفاجئ في التدفق يضمن عدم حدوث نقص في الأكسجين داخل الخلية عند القفزات المفاجئة في الحمل، مما يحمي غشاء الخلية من التلف.

4.منحنيات الخرج للنظام الهجين (عنفة الرياح + خلية الوقود)



الشكل (14) : منحنيات التيار والجهد لدمج العنفة الريحية مع خلية الوقود عند مقاومة الحمل الأومي (1Ω) وسرعة رياح مضطربة.

بالنظر إلى (Signal Statistics) نجد أن متوسط الجهد $54.38\,V$ مع تذبذب لا يتجاوز $\pm 5.6\,V$هذا يعني أن نسبة التذبذب هي حوالي **10%**، وهي نسبة مقبولة جداً في ظل وجود رياح مضطربة (Ali, 2018). بينما أظهرت المؤشرات الفرق الزمني $\Delta T = 189.7\,ms$ بين قمة الاضطراب والعودة للاستقرار حيث يعد هذا الزمن استجابة سريعة جداً لمنظومة هجينة تحتوي على قصور ذاتي ميكانيكي (عنفة ريحية) وتفاعلات كيميائية (خلية وقود).

4-الاستنتاجات والتوصيات

4-1-الاستنتاجات

1. بينت نتائج المحاكاة أن دمج خلية الوقود الهيدروجينية **(PEM)** مع نظام طاقة الرياح يساهم في استقرار الجهد بنسبة تقارب **31.5** % بالتالي تحسن الاستقرار مع انخفاض التموجات.

2. عند زيادة الحمل الأومي من **0.5 Ω** إلى **8 Ω** انخفض التيار بشكل كبير بنسبة تقارب **91.4** % مما يدل على انخفاض الطلب على القدرة من المنظومة وينخفض تشوه جهد العنفة نتيجة الإشباع المغناطيسي وتأثير إلكترونيات القدرة بالتالي استقرار خرج النظام.

3. زيادة مقاومة الحمل تؤدي إلى تحسين جودة الجهد وتقليل الإجهاد على خلية الوقود مع بقاء مساهمة العنفة في دعم الاستقرار العام للنظام بشكل فعال حيث تعمل خلية الوقود كمصدر طاقة احتياطي قادر على تعويض التقلبات الناتجة عن تغير سرعة الرياح.

4. تثبت الدراسة أن النظام الهجين يعتبر موثوقاً في حال توقف الرياح تماماً (سرعة صفر) حيث تستطيع خلية الوقود الانتقال من نمط الدعم إلى نمط المصدر الأساسي لتغطية الأحمال مما يمنع انقطاع التغذية عن الأحمال.

4-2-التوصيات

1. إجراء دراسات لتحسين استراتيجيات التحكم وإدارة تدفق الطاقة في الأنظمة الهجينة التي تجمع بين مصادر الطاقة المتجددة وتقنيات الهيدروجين بهدف تعزيز استقرار النظام الكهربائي.

2. دراسة حالات الاستقرار عند الأحمال اللاخطية في الأنظمة الهجينة التي تجمع مصادر طاقة الرياح وتقنيات الهيدروجين.

5-المراجع

1. ADJEI,P, &NWULU,N.2023.*Optimal Hybrid Renewable Energy System: A Comparative Study of Wind/Hydrogen/Fuel-Cell and Wind/Battery Storage.*

2. ALI,D.N.2018. *Lectures on Wind Turbines, Faculty of Technical Engineering, Tartus University.*

3. Dr.SUMAYA SHARROUF.2019. *Lectures on Power System Stability, Faculty of Electrical Engineering, Tishreen University*.

4. LARMINIE,J.2003. *Fuel Cell Systems Explained.*

5. LARMINIE,J.2003. *Fuel Cell Systems Explained.*

6. MATLAB,MATHWORKS, https://www.mathworks.com/.

7. MENG,Z, & HE,Q.2023. *Research on energy utilization of wind-hydrogen coupled energy storage power generation system.*

8. RELEASE,P, & EVENT,L.12 November 2025. *World Energy Outlook 2025. The International Energy Agency (IEA).*

9. THE INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA).2019 September. *Hydrogen: A renewable energy perspective.*