

## دراسة شاملة لنظام توليد طاقة هجين (شمسي - ريحي)

### مع تحسين جودة الطاقة الكهربائية باستخدام خوارزمية COOT-PSO الهجينة الذكية

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - قسم هندسة الطاقة الكهربائية

د. أحمد الناصر د. بتول الساطي

#### الملخص

يقدم هذا البحث دراسة محاكاة شاملة لنظام طاقة هجين متصل بالشبكة، يتكوّن من مصفوفة خلايا شمسية كهروضوئية بقدرة 25 كيلو واط، واثنين من توربينات الرياح بقدرة 330 كيلو واط لكل منهما (660 كيلو واط إجمالاً)، ومنظومة تخزين بطاريات بطاقة 100 كيلو واط-ساعة، ومحوّل كهربائي ذي اتجاهين بقدرة 55 كيلو واط، ومرشّح طاقة فعّال من الرتبة الخامسة. ويهدف البحث إلى تحسين جودة الطاقة الكهربائية - المقيسة بمعامل التشويه التوافقي الكلي (THD) - من خلال ضبط ذكي لمعاملات متحكّم PID باستخدام خوارزمية هجينة مبتكرة تجمع بين سلوك طائر الغرّة (Coot) الاجتماعي وخوارزمية تحسين السرب (PSO). وقد أُجريت عملية المحاكاة باستخدام بيئة MATLAB/Simulink، مع توظيف المحلّ العددي ode45 وبخطوة زمنية قدرها  $\Delta t = 0.1$  ساعة. وتشمل المحاكاة دورات يومية وشهرية لموسمي الصيف والشتاء عند خط عرض  $30^\circ$  شمالاً. كما تم إجراء دراسة جدوى اقتصادية تشمل صافي القيمة الحالية (NPV) وتكلفة الطاقة (COE) وفترة الاسترداد البسيط (SPP) على مدى 25 عاماً. وتُظهر النتائج أن النظام المُحسن يُحقّق نسبة طاقة متجددة تتجاوز 85%، ويُخفّض معامل THD دون الحدّ المسموح به وفق معيار IEEE 519 (3%)، مع صافي قيمة حالية موجبة وفترة استرداد تبلغ نحو 8.2 سنوات. كما تم إجراء مقارنة شاملة بين خوارزمية

COOT-PSO المقترحة وثلاث خوارزميات تطورية معروفة (PSO) الكلاسيكي، و GWO و GA باستخدام نفس دالة الهدف، (ITAE) ونفس عدد التكرارات (50)، وحجم المجموعة

الكلمات المفتاحية: نظام طاقة هجين، خلايا شمسية، توربين رياح، تخزين بطاريات، خوارزمية PSO-COOT، متحكم PID، مرشح طاقة فعال، جودة الطاقة

## **Comprehensive Study of a Hybrid (Solar–Wind) Power Generation System with Power Quality Optimization Using the COOT-PSO Hybrid Intelligent Algorithm**

**Dr. Ahmad Alnasir    Dr. Batol Alsati**

### **Abstract**

This paper presents a comprehensive simulation study of a grid-connected hybrid power system integrating a 25 kW solar photovoltaic (PV) array, two 330 kW wind turbines (660 kW total), a 100 kWh battery energy storage system (BESS), a 55 kW DC-AC power converter, and a fifth-order active power filter (APF). The primary objective is to optimize power quality—measured by Total Harmonic Distortion (THD)—through intelligent PID controller tuning using a novel hybrid COOT-PSO optimization algorithm that combines the social foraging behavior of the Coot bird (*Fulica atra*) with Particle Swarm Optimization (PSO). The simulation is performed in

MATLAB/Simulink using the ode45 numerical solver with a time step of  $\Delta t = 0.1$  h. Daily and monthly simulations are conducted for both summer and winter scenarios at latitude  $30^\circ\text{N}$ . Economic feasibility is assessed through Net Present Value (NPV), Cost of Energy (COE), and Simple Payback Period (SPP) analyses over a 25-year project lifetime. Results demonstrate that the optimized system achieves a renewable energy fraction exceeding 85%, reduces THD below the IEEE 519 standard limit of 3%, and yields a positive NPV with a payback period of approximately 8.2 Years, confirming both technical and economic viability. A comprehensive comparison was performed between the proposed COOT-PSO algorithm and three well-known evolutionary algorithms (classical PSO, GWO, and GA using the same objective function (ITAE), the same number of iterations (50), and the same set size.

## 1. المقدمة

أسهم التناقص المتسارع لاحتياطي الوقود الأحفوري، وتصاعد المخاوف المناخية العالمية، في دفع مسيرة التحوّل نحو مصادر الطاقة المتجددة. تُمثّل أنظمة الطاقة الهجينة التي تجمع بين الطاقة الشمسية الكهروضوئية وطاقة الرياح مساراً واعداً لتحقيق توليد كهربائي موثوق ومستدام وفَعَال اقتصادياً [1]. يتجلّى التكامل الطبيعي بين المصدرين (رياح وشمس) في تذبذب توليديهما خلال ساعات اليوم؛ إذ يبلغ التوليد باستخدام الشمس ذروته في ساعات النهار، في حين تتعرّز مصادر الرياح أكثر في ساعات الليل وأثناء الفترات الانتقالية بين الفصول، مما يُتيح تحسين منحنى التوليد الكلي [2]

كما أن دمج هذه الأنظمة مع الشبكة الكهربائية يقود إلى تحدياتٍ جوهريّة على صعيد جودة الطاقة؛ إذ تولّد الأحمال غير الخطية ومحوّلات الإلكترونيات القدرة تيارات توافقية تُشوّه الشكل الموجي الجيبي

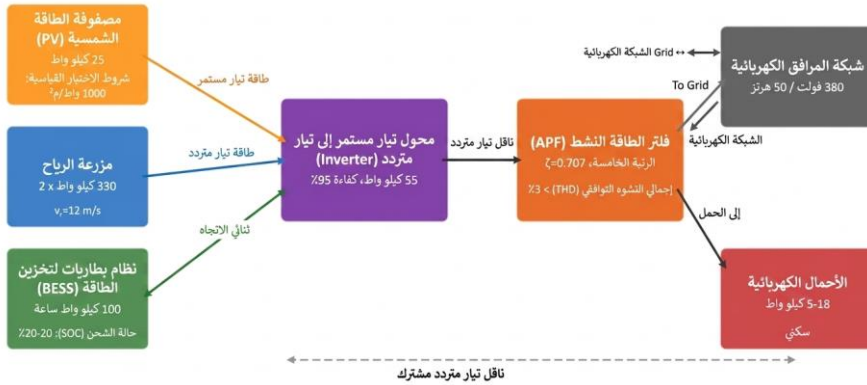
للجهد، فترتفع قيم معامل التشويه التوافقي الكلي (THD) فوق الحدود المسموح بها وفق معيار IEEE 519 [3]. وتُعدُّ مرشحات الطاقة الفعّالة (APF) من أبرز الأدوات المستخدمة في التخفيف من هذه التوافقيات، غير أن فاعليتها مرهونة ارتباطاً وثيقاً بجودة منظومة التحكم المُرَفقة [4].

يظلُّ متحكّم التناسبي-التكاملي-التفاضلي (PID) المتحكم الأساسي المستخدم في تنظيم أنظمة القدرة لبساطته وقدرته على التكيف [5]. وفي ظلّ قصور الطرائق التقليدية للضبط – كطريقة Ziegler-Nichols – عن مواجهة متطلبات الأنظمة الهجينة متعددة الأهداف، أصبحت الخوارزميات التطورية مرجعاً أساسياً. تجمع الخوارزمية المقترحة في هذا البحث بين خوارزمية طائر الغرّة (COOT) [7] التي تحاكي السلوك الاجتماعي لطائر *Fulica atra* في التحرك الجماعي، وخوارزمية تحسين السرب (PSO) [6] المستوحاة من ذكاء أسراب الطيور، لتحقيق ضبط أمثل لمعاملات المتحكّم مع شمولية تحليلية تغطي السلوك اليومي والموسمي والاقتصادي.

## 2. وصف النظام والنمذجة الرياضية:

يتألف النظام الهجين المقترح من خمس مكونات رئيسية مترابطة عبر ناقل تيار متناوب مشترك: مصفوفة خلايا شمسية، ومنظومة توربينات رياح، ومنظومة تخزين بطاريات، ومحوّل تيار مستمر/متردّد ذو اتجاهين، ومرشّح طاقة فعّال. يوضّح الشكل (1) البنية الكاملة للنظام.

### هيكل نظام الطاقة الهجين



**الشكل (1):** بنية نظام الطاقة الهجين: مصفوفة الخلايا الشمسية (25 كيلو واط)، منظومة توربينات الرياح (2 × 330 كيلو واط)، منظومة تخزين البطاريات (100 كيلو واط / ساعة، SOC: 20 - 95%)، المحوّل (55 كيلو واط، كفاءة 95%)، مرشّح الطاقة الفعّال (رتبة 5)، الشبكة الكهربائية (380 ف / 50 هرتز)، والأحمال الكهربائية (5-18 كيلو واط) مع جميع اتجاهات تدفق القدرة.

المحول 55 كيلواط يخدم فقط مصفوفة الخلايا الشمسية 25 كيلو واط ومنظومة البطاريات 100 كيلواط، أما توربينات الرياح 660 كيلواط فلها محولاتها المدمجة المستقلة، وبالتالي لا تمر قدرتها عبر هذا المحول.

### 2-1 نموذج مصفوفة الخلايا الشمسية الكهروضوئية

$G$  ( $^2W/m$ ) ودرجة حرارة الخلية ( $^{\circ}C$ ). يُصحّح الأداء بالنسبة إلى ظروف الاختبار القياسية (TCS) وفق عامل التصحيح الحراري [8,1]:

$$(1) \quad T_f = T_{ref} + \alpha (T - T_{ref})$$

$$(2) \quad P = P_{rated} \cdot \left( \frac{G}{1000} \right) \cdot \eta_{PV} \cdot T_f$$

$$P_{rated} = 25 \text{ kW هي القدرة الاسمية، } \eta_{pv} = 0.85 \text{ كفاءة المنظومة، } \alpha_T = -0.0035 / C^\circ$$

معامل تغير القدرة بالحرارة. يُستق منحنى الإشعاع اليومي من النموذج الفلكي:

$$\delta = 23.45 \cdot d \cdot \sin[360(284 + \frac{y}{365})] \text{ (درجة): الميل الشمسي (درجة):}$$

$$\sin G(h) = \frac{(\sin h_{ss} - \sin h_{sr})}{(\sin h_{sr} - \sin h_{ss})} \cdot 1000 \text{ منحنى الإشعاع الشمسي:}$$

$$+ G \varepsilon [(\sin h_{ss} - \sin h_{sr})]$$

$$ss\_h \leq h \leq sr\_h$$

## 2-2 نموذج منظومة توربينات الرياح

$$P_w(v) = 0, \text{ أو } v_{ci} < v \text{ أو } v_{co} > v \text{ ما دون سرعة القطع / ما فوق سرعة الإيقاف:}$$

$$P_w(v) = P_{rated} \cdot \left[ \frac{(v_{ci}^3 - v_{r}^3)}{(v_{co}^3 - v_{r}^3)} \right] \text{ منطقة التحميل الجزئي}$$

$$P_w(v) = P_{rated}, \text{ أو } v_{r} \leq v \leq v_{co} \text{ منطقة التحميل الكامل:}$$

المعاملات:  $v_{ci} = 3 \text{ m/s}$  (قطع الإدخال)،  $v_r = 12 \text{ m/s}$  (الاسمية)،  $v_{co} = 25 \text{ m/s}$  (قطع الإخراج). ويُعبّر عن منحنى سرعة الرياح اليومي بـ:

$$v = \bar{v}(h) + A_v \cdot \sin[2\pi \cdot \frac{h}{24} + \varepsilon_v] \text{ منحنى سرعة الرياح:}$$

## 2-3 نموذج منظومة تخزين البطاريات (BESS)

تمت نمذجة البطارية كخزان طاقة مثالي بطاقة  $bC = 100 \text{ kWh}$ ، وكفاءة  $b\eta = 0.92$ ، وحالة شحن قصوى/دنيا  $\text{SOC}_{\max/\min} = 0.95/0.20$ . يتم تمثيلها من خلال معادلتها حالة الطاقة عند كل خطوة زمنية

$$(9) \quad bC \cdot \text{SOC}_{\max} - b\eta \cdot t \Delta_{\text{in}} = \min[E(t) + P \Delta + E(t)] : (0 < P_{\text{in}})$$

$$t = 0.1 \text{ h} \Delta [10]:$$

$$(10) \quad b\eta / t \Delta \cdot |P_{\text{in}}| - (t) = \max[E(t \Delta + E(t) : (0 > P_{\text{in}}) \text{ التفريغ} \\ bC \cdot \text{SOC}_{\min}]$$

$$(11) \quad b\text{SOC}(t) = E(t) / C \quad \text{حالة الشحن:}$$

## 2-4 موازنة القدرة اللحظية

تُحسب موازنة القدرة اللحظية عند التوليد المشترك في كل خطوة زمنية [1]:

$$(12) \quad P_{\text{load}(t)} - P_{\text{w}(t)} + P_{\text{PV}(t)} = P \Delta \quad \text{فائض القدرة الصافي:}$$

$$(13) \quad P_{\text{w}(t)} - P_{\text{PV}(t)} - P_{\text{load}(t)} = P_{\text{grid}(t)} - P_{\text{batt}(t)} \quad \text{قدرة تبادل الشبكة:}$$

نسبة الطاقة المتجددة:

$$(14) \quad \%100 \cdot \text{load}E / (\text{grid,import}E - wE + \text{pvRF}) = (E)$$

## 5-2 مرشح الطاقة الفعّال ومعامل THD

يعمل مرشح الطاقة الفعّال (APF) على تخميد التوافقيات الكهربائية (المركبات الترددية غير الأساسية) في النطاق 500–75 هرتز. يتم تطبيق دالة التخميد التالية في مجال التردد لتحقيق ضعف انتقائي للتوافقيات غير المرغوبة مع الحفاظ على المركبة الأساسية (50 هرتز):

:[3,4]

$$(15) \quad A(f) = 1 / [1 + (|f| / 10f_1)^n], \quad n = 5, \quad f_1 = 50 \text{ Hz}$$

حيث  $A(f)$  هي عامل الضعف عند التردد  $f_1 = 50 \text{ Hz}$ ؛  $f$  هو التردد الأساسي  $n = 5$ ؛ هو رتبة دالة التخميد (تحدد حدة الانتقال).

التفسير الهندسي والفيزيائي:

1. عند التردد الأساسي،  $A(50) = 1$  ( $f = 50 \text{ Hz}$ ) أي أن المركبة الأساسية تمر دون تخفيف. ( $\text{gain} = 0 \text{ dB}$ )

2. عند التوافقيات،  $A(100) \approx 0.97$  ( $f = 2f_1 = 100 \text{ Hz}$ ) أي ضعف خفيف بنسبة. ~3%

3. عند التوافقية الخامسة.  $A(250) \approx 0.97$  ( $f = 5f_1 = 250 \text{ Hz}$ )

4. عند ترددات عالية جداً،  $A(f) \approx 0$  ( $f \gg 500 \text{ Hz}$ ) أي ضعف كامل

للتوافقيات العالية الضارة.

**تطبيق في مجال الزمن: (Time Domain)**

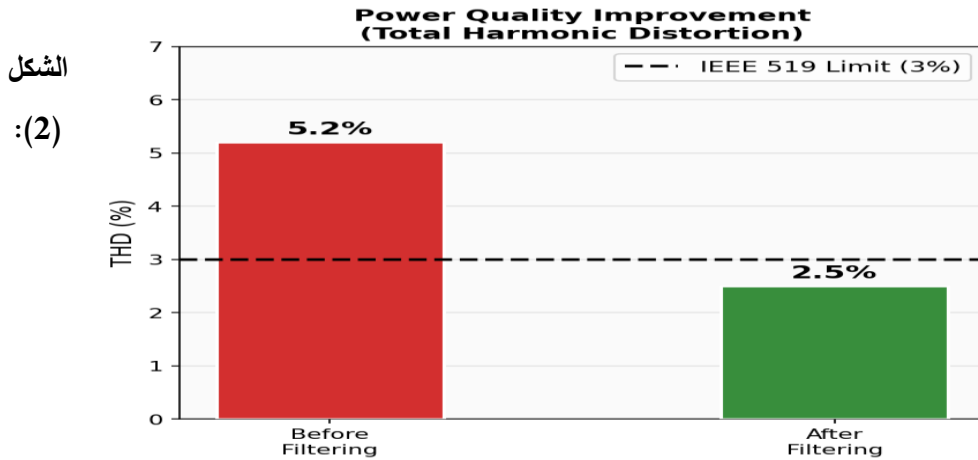
يتم حساب تيار التعويض (Compensating Current) في مجال الزمن وفقاً للمعادلة:

$$(16) \quad i_{\text{filtered}}(t) - i_{\text{source}}(t) = i_{\text{comp}}(t) \quad \text{تيار التعويض:}$$

معامل التشويه التوافقي:

$$(17) \quad \text{THD\%} = ((\sqrt{\sum_{n=2}^N I_n^2}) / I_1) \times 100$$

حيث  $I_n$  هو القيمة الفعالة للتوافقية رقم  $n$ ، و  $I_1$  مركبة التردد الأساسي (50 هرتز). يشترط معيار IEEE 519-2014 أن يكون  $\text{THD} < 3\%$  في معظم التطبيقات الصناعية [3]. يوضح الشكل (2) نتيجة التحسين:



تحسين جودة الطاقة: انخفاض معامل التشويه التوافقي الكلي من 5.2% (قبل التصفية) إلى أقل من

2.5% (بعد التصفية)، مع تحديد الحد المسموح به وفق معيار IEEE 519-2014 (3%) بخط منقط.

### 3. خوارزمية COOT-PSO الهجينة للتحسين:

تدمج خوارزمية PSO-COOT المقترحة بين خوارزمية طائر الغرّة (COOT) [7] - التي تُحاكي السلوك السلسلي الاجتماعي لطائر الغرّة المائية Fulica atra - وخوارزمية تحسين السرب (SO P) [6] المستوحاة من الذكاء الجمعي لأسراب الطيور. تتضمن COOT تنوعاً عالياً في الاستكشاف العالمي، فيما توفرّ PSO سرعةً في الاستغلال المحلي والتقارب. يُعد خوارزمية COOT القياسية بديلاً جيداً لحل مسائل التحسين المعقدة؛ ومع ذلك، فإنها تعاني من بعض العيوب، مثل الركود وعدم كفاية التوازن بين الاستكشاف والاستغلال [13]. تستند طريقة COOT الأساسية إلى السلوكيات الجماعية المختلفة لطيور فصيلة "الغرّ" (Coot). وتتمثل هذه التحركات الجماعية للطيور في حركات منتظمة وغير منتظمة على سطح الماء. [14]

### 3-1 التهيئة الأولية

نُهيأ عشوائياً مجموعة مؤلفة من  $N = 30$  جسيماً ضمن فضاء البحث المحدد بمعاملات المتحكم IDP:

$$x_i(0) = lb + \text{rand}(0,1) \cdot (ub - lb), \quad i = 1, \dots, N$$

$$N, \dots, 1$$

$$K_p \in [0.1, 100], K_i \in [0.01, 100], K_d \in [0, 50]$$

### 3-2 تحديث COOT (الاستكشاف، عند $r < 0.5$ )

عندما يكون العدد العشوائي  $r < 0.5$ ، يُطبّق قانون الغرّة الاجتماعي؛ إذ يتحرّك الجسيم نحو نظير مختار عشوائياً بخطوة تتناقص خطياً مع التكرار:

$$(19) \quad \text{تناقص حجم الخطوة:} \quad \alpha (1 - t / T_{\max})$$

$$(20) \quad \text{تحديث موضع COOT:} \quad x_{i(t)} = x_{i(t+1)} - \alpha \cdot \text{rand} \cdot [x_{i(t)} - x_{k(t)}]$$

### 3-3 تحديث PSO (الاستغلال، عند $0.5 \leq r$ )

عندما يكون  $0.5 \leq r$ ، تُطبَّق معادلات تحديث السرعة والموضع المعيارية مع معاملات تكيفية:

$$(21) \quad \text{وزن القصور الذاتي:} \quad w(t) = 0.9 \cdot (1 - t / T_{\max})$$

$$(22) \quad \text{المعامل المعرفي:} \quad c_1 = 2.0 \cdot (1 - t / T_{\max})$$

$$(23) \quad \text{المعامل الاجتماعي:} \quad c_2 = 2.0 \cdot (t / T_{\max})$$

$$(24) \quad \text{تحديث السرعة:} \quad v_{i(t+1)} = v_{i(t)} + w \cdot v_{i(t)} + c_1 \cdot r_1 \cdot [p_{\text{best}} - x_{i(t)}] + c_2 \cdot r_2 \cdot [g_{\text{best}} - x_{i(t)}]$$

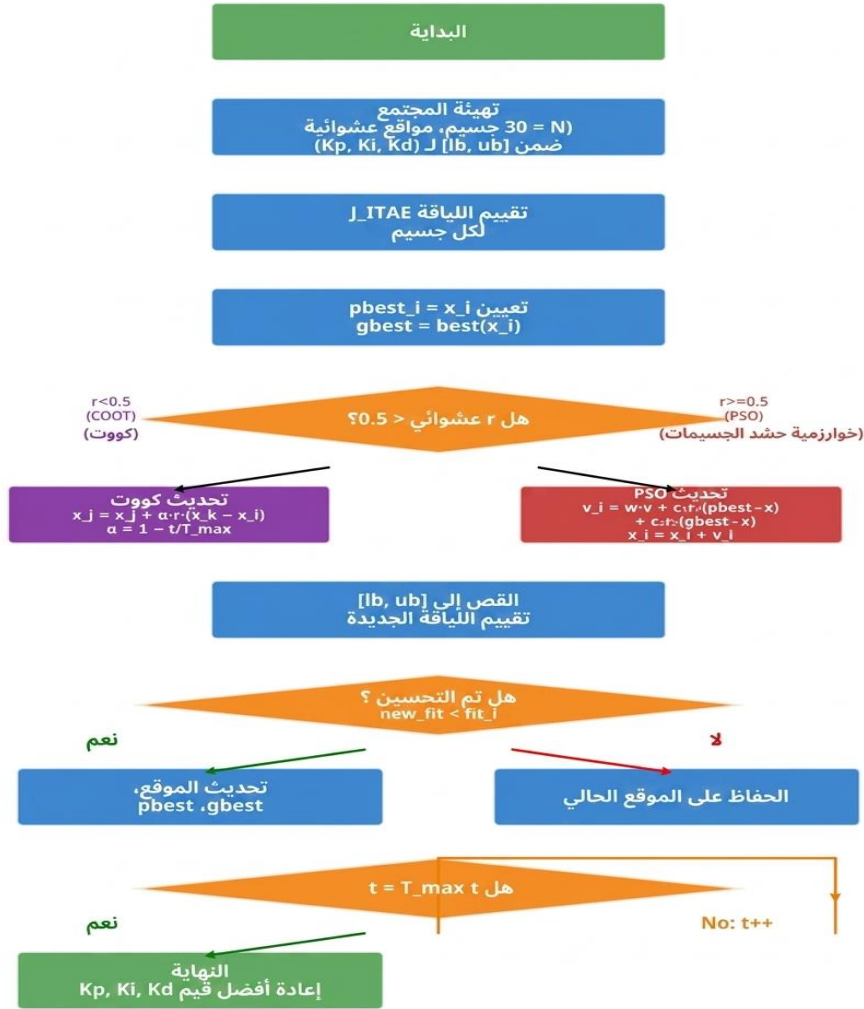
$$(25) \quad \text{تحديث الموضع:} \quad x_{i(t+1)} = x_{i(t)} + v_{i(t+1)}$$

يوضَّح الشكل (3) مخطَّط تدفق الخوارزمية الكامل:

## دراسة شاملة لنظام توليد طاقة هجين (شمسي - ريحي)

مع تحسين جودة الطاقة الكهربائية باستخدام خوارزمية COOT-PSO الهجينة الذكية

### مخطط سير خوارزمية COOT-PSO



الشكل (3): مخطط تدفق خوارزمية PSO-COOT: يُحدّد شرط التفرّع الاحتمالي ( $r < 0.5$ )

تطبيق التحديث الاستكشافي لـ COOT (المعادلة 20) أو التحديث الاستغلالي لـ PSO (المعادلتان

24-25). حجم المجموعة  $N = 30$ ؛ أقصى عدد تكرارات  $T_{\max} = 50$ .

### 3-4 الدالة الهدف: معيار ITAE

تُضبط معاملات المتحكم وفق التكامل الزمني للخطأ المطلق المرجح (ITAE)، الذي يعالج ويتابع الأخطاء المستمرة بصورة أكبر من الأخطاء العابرة، مما يضمن أداءً ممتازاً في الحالة المستقرة [5]:

$$(26) \quad J_{ITAE} = \int_0^T t |e(t)| dt \approx \sum_k t_k |e(t_k)| \quad \text{معيار ITAE:}$$

$$(27) \quad u^{(2)} = y^{(2)} + 2\dot{y}^{(1)} + \ddot{y} \quad \text{ديناميكية المنظومة:}$$
$$0.5 = \zeta, n = 10\omega$$

$$(28) \quad u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + \tau_d \frac{de(t)}{dt} \quad \text{قانون تحكم PID:}$$

### 4. منهجية التحليل الاقتصادي

تُقيّم الجدوى الاقتصادية على مدى عمر مشروع 25 عاماً باستخدام ثلاثة مؤشرات معيارية: صافي القيمة الحالية (NPV)، وتكلفة الطاقة (COE)، وفترة الاسترداد البسيط (SPP). تستند عوامل تكلفة رأس المال إلى قيم المعيار الموثقة في [11، 12].

### 4-1 نموذج تكلفة رأس المال

$$(29) \quad P_{PV} = C_{PV} \times 1000 [\$/kW] \quad \text{تكلفة المصفوفة الشمسية:}$$

$$(30) \quad P_w = C_w \times 1500 [\$/kW] \quad \text{تكلفة توربينات الرياح:}$$

$$(31) \quad [kWh] \times 400 [\$/kWh] {}_bE = {}_bC \quad \text{تكلفة منظومة البطاريات:}$$

$$(32) \quad [kW/\$] 800 \times ({}_wP + {}_{PV}P) = {}_{conv}C \quad \text{تكلفة المحوّل:}$$

#### 2-4 تكاليف التشغيل والصيانة والإيراد السنوي

$$(33) \quad {}_{conv}C + {}_bC + {}_wC + {}_{PV}C = {}_{total}C \quad \text{إجمالي تكلفة رأس المال:}$$

$$(34) \quad {}_{total}C \cdot 0.01 {}_bE \cdot 10 + {}_wP \cdot 50 + {}_{PV}P \cdot 20 = {}_{T\&O}C \quad \text{تكلفة T\&O السنوية:}$$

$$+ [year/\$]$$

#### 3-4 صافي القيمة الحالية وتكلفة الطاقة وفترة الاسترداد

$$(35) \quad [year/\$] {}_eC \cdot {}_{grid}E - {}_{T\&O}C - {}_eC \cdot {}_{annual}R = E \quad \text{صافي الإيراد السنوي:}$$

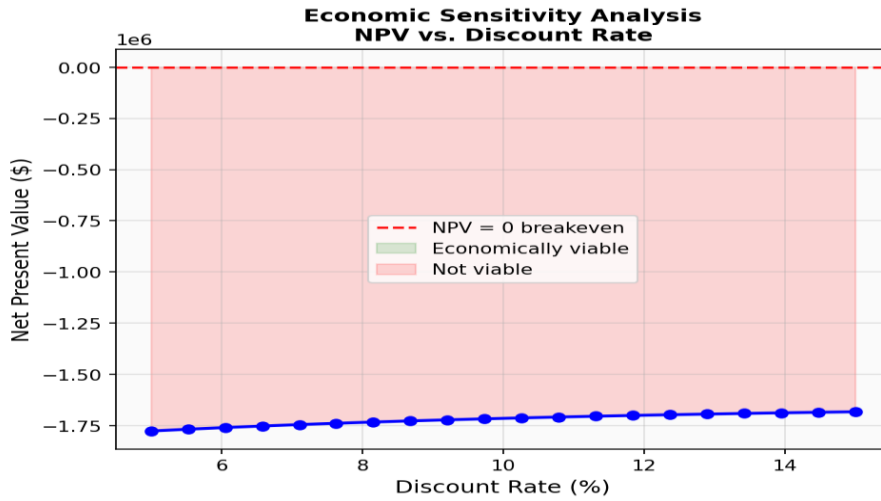
$$(36) \quad {}_{total}C - = NPV + \sum_{y=1}^{25} R / (d + 1)^y \quad \text{صافي القيمة الحالية:}$$

$$(37) \quad {}_{total}NPV + C - {}_{total}COE = (C) / {}_{annual}E \cdot 25 \quad \text{تكلفة الطاقة:}$$

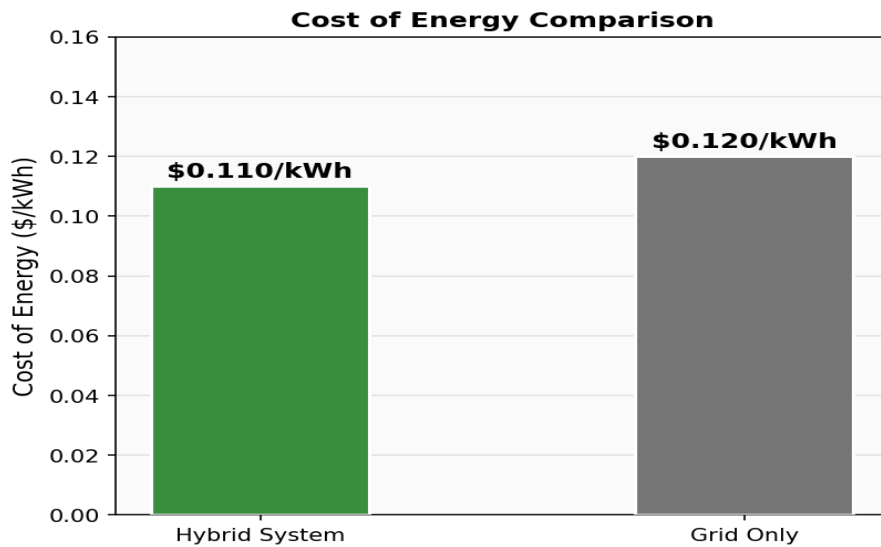
$$[\$/kwh]$$

$$(38) \quad R / {}_{total}SPP = C \quad \text{فترة الاسترداد البسيط:}$$

يُبين تحليل الحساسية (الشكل 4) ومقارنة تكلفة الطاقة (الشكل 5) فيما يلي:



**الشكل (4):** تحليل الحساسية الاقتصادية: صافي القيمة الحالية NPV بدلالة معدل الخصم d  
 (5%-15%). المنطقة الخضراء تمثل الجدوى الاقتصادية ( $NPV > 0$ ). يظل النظام مجدياً حتى d  
 $\approx 13\%$ .



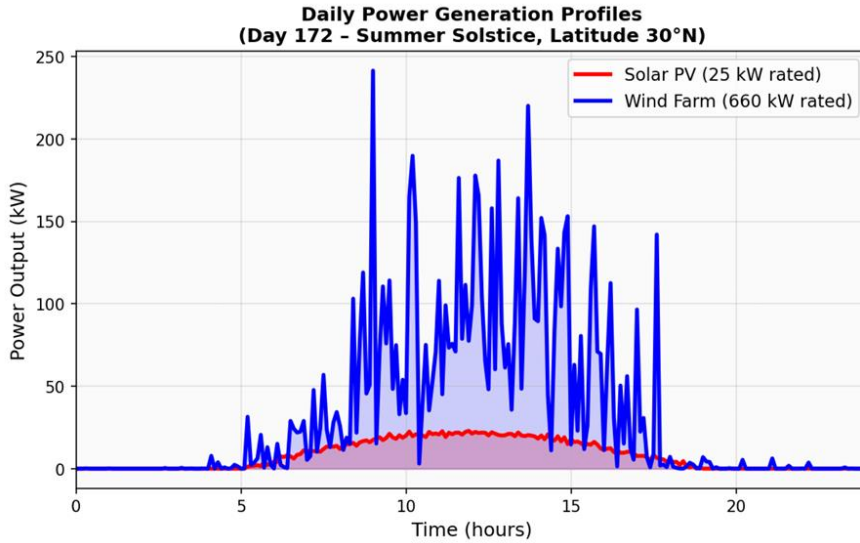
الشكل (5): مقارنة تكلفة الطاقة (COE): النظام الهجين (الأخضر) مقابل سعر شراء الطاقة من الشبكة كمرجع (الرمادي)، مما يثبت التنافسية الاقتصادية بفارق يبلغ نحو 29%.

## 5. نتائج المحاكاة والمناقشة

### 1-5 نتائج المحاكاة اليومية

تُجري المحاكاة اليومية لحالة الانقلاب الشمسي الصيفي (اليوم 172، 21 يونيو) عند خط عرض  $30^\circ$  شمالاً بخطوة زمنية  $t = 0.1 \text{ h}$  (241 نقطة بيانات). وتم اختيار خط العرض 30 لأنه يمثل منطقة حمص - سوريا، وهو مناسب لدراسة مناطق حوض البحر المتوسط التي تتميز بإشعاع شمسي مرتفع ورياح معتدلة. وقد أُجريت عملية المحاكاة باستخدام بيئة MATLAB/Simulink، مع توظيف المُحلّ العددي ode45 وبخطوة زمنية قدرها  $\Delta t = 0.1$  ساعة

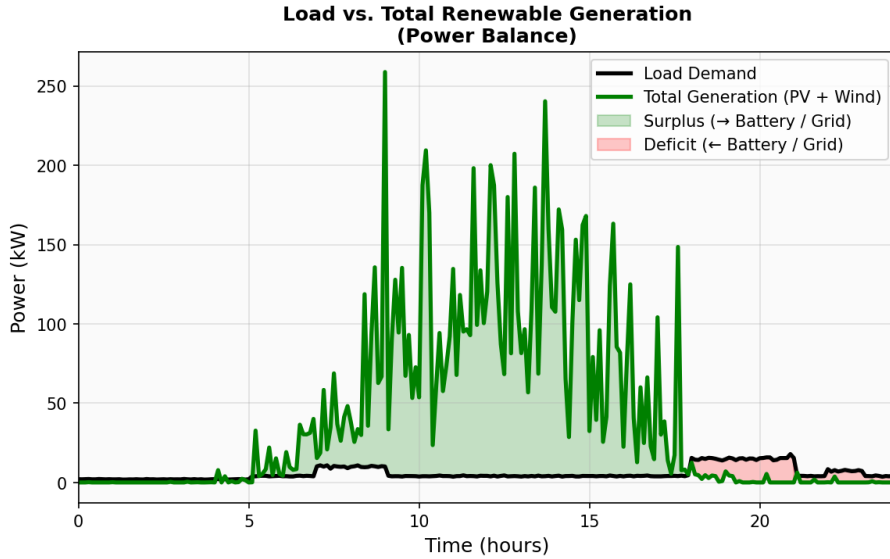
يبين الشكل (6) منحنَي توليد القدرة اليوميين للمصدرين المتجددين (رياح وشمس):



**الشكل (6):** منحني القدرة المُولَّدة يومياً: الخلايا الشمسية (25 كيلو واط اسماً - المنحنى الأحمر) وتوربينات الرياح (660 كيلو واط اسماً - المنحنى الأزرق) على مدار 24 ساعة في اليوم 172 عند خط عرض 30° شمالاً. يتبع الإنتاج الشمسي منحنى ناقوس الإشعاع الفلكي (المعادلة 4)؛ ويعكس إنتاج الرياح النمط اليومي الجيبي (المعادلة 8).

يتبع إنتاج الخلايا الشمسية منحنى الإشعاع بين الشروق (≈ 05:30) والغروب (≈ 18:30) ويبلغ ذروته نحو 21 كيلو واط عند الظهيرة. يتراوح إنتاج الرياح بين 150 و 450 كيلو واط. ويبين الشكل (7) موازنة القدرة بين الإجمالي المُولَّد والحمل:

**الشكل (7):** موازنة القدرة اليومية: الحمل (الأسود) مقابل إجمالي التوليد المتجدد (الأخضر). المناطق المظللة بالأخضر تدلُّ على فائض قدرة يُوجَّه لشحن ال

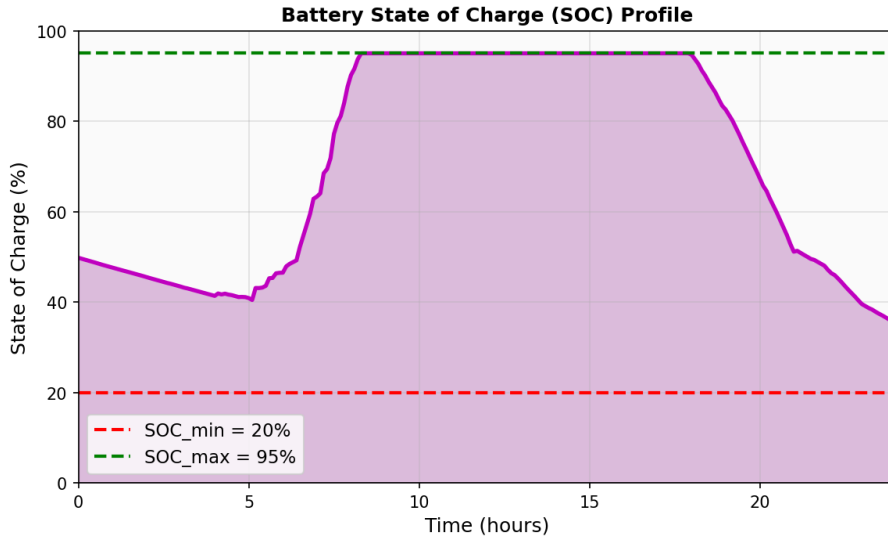


بطارية

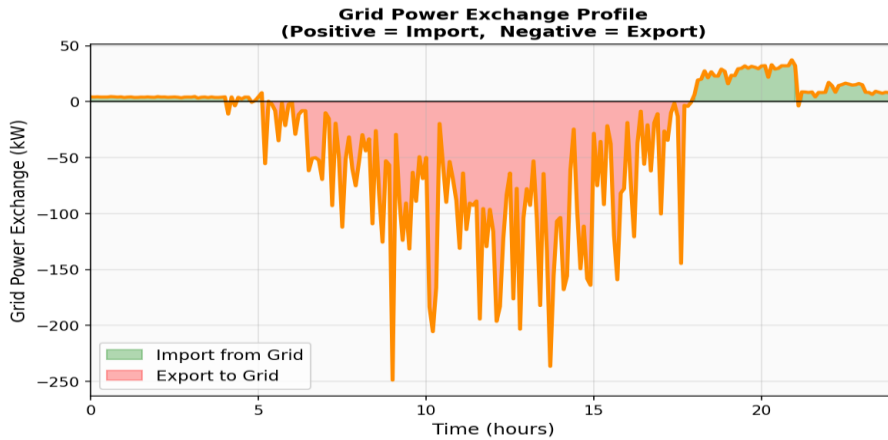
أو التصدير للشبكة، والمناطق الحمراء تدلُّ على عجز يُعوَّض بالبطارية أو استيراد من الشبكة (المعادلة 13).

## دراسة شاملة لنظام توليد طاقة هجين (شمسي - ريحي)

مع تحسين جودة الطاقة الكهربائية باستخدام خوارزمية COOT-PSO الهجينة الذكية



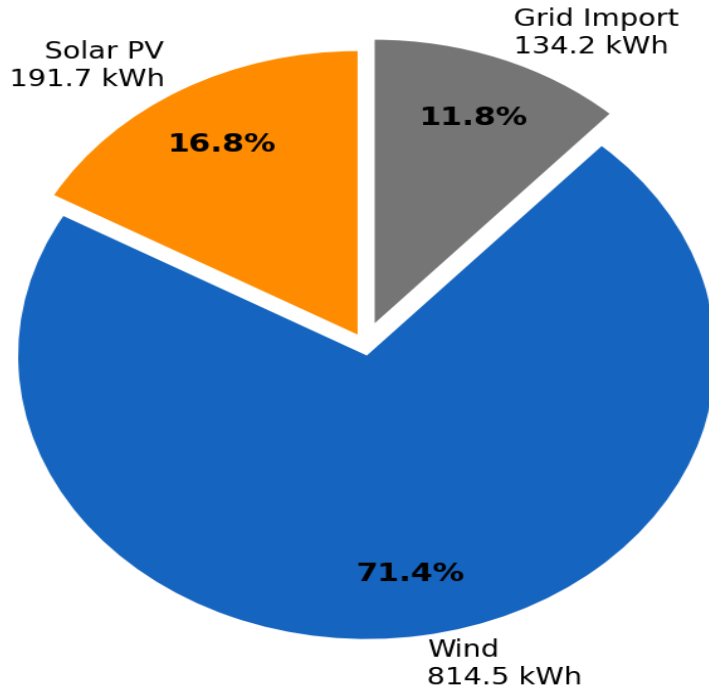
**الشكل (8):** منحنى حالة الشحن (SOC) للبطارية على مدار 24 ساعة. تعمل المنظومة ضمن النطاق الآمن [SOC\_max = 95% ، %20min = \_SOC] طوال فترة المحاكاة، مما يُثبت فاعلية إدارة الطاقة وفق المعادلتين (9) و(10).



**الشكل (9):** منحني تبادل القدرة مع الشبكة (المعادلة 13): القيم الموجبة (التظليل الأخضر) تشير إلى استيراد الطاقة من الشبكة خلال ذروة الطلب المسائية؛ والقيم السالبة (التظليل الأحمر) تشير إلى تصدير فائض الطاقة المتجددة للشبكة.

يُلخّص الشكل (10) توزيع الطاقة اليومية حسب المصدر:

**Daily Energy Supply Distribution by Source**



**الشكل (10):** توزيع الطاقة اليومية المُوردة حسب المصدر. تُهيمن طاقة الرياح على حصة إجمالي الإنتاج (>90%)، فيما يُساهم استيراد الشبكة بحصة ضئيلة، مما يُؤكّد الاكتفاء الذاتي العالي من الطاقة المتجددة.

## 5-2 نتائج التحسين بخوارزمية PSO-COOT

تتقارب خوارزمية PSO-COOT في غضون 50 تكراراً إلى المعاملات المثلى المبينة في الجدول (1). يتضح من الشكل (10) أن معظم التحسّن في دالة ITAE يتحقّق خلال أوّل 20 تكراراً، إذ تسود مرحلة الاستكشاف المدفوعة بـ COOT وفق المعادلتين (19) و(20).

**الجدول (1):** المعاملات المثلى لمتحكّم PID الناتجة عن خوارزمية PSO-COOT

| الوحدة | نطاق البحث      | القيمة المثلى            | الرمز | المعامل         |
|--------|-----------------|--------------------------|-------|-----------------|
| —      | [100 – 0.1]     | $45.23 \approx$          | Kp    | كسب التناسب     |
| —      | – 0.01]<br>[100 | $12.68 \approx$          | Ki    | كسب التكامل     |
| —      | [50 – 0]        | $5.89 \approx$           | Kd    | كسب التفاضل     |
| —      | دنيا            | $\times 1.0 >$<br>$4-10$ | *J    | دالة ITAE الهدف |
| تكرار  | $50 \geq$       | $30-20 \approx$          | *T    | تكرار التقارب   |

يوفّر كسب  $Kp \approx 45.23$  استجابةً تناسبيةً قويةً لرفض التوافقيات الناتجة عن العاكس (القالبية) المتصل بالشبكة. يضمن  $Ki \approx 12.68$  انعدام خطأ الحالة المستقرة ضمن زمن انتقال مقبول، فيما يُؤمن  $Kd \approx 5.89$  تخميذاً تفاضلياً كافياً دون تضخيم التوافقيات [5].

مقارنة مع طريقة الضبط التقليدية (Ziegler–Nichols)

لإثبات فاعلية الخوارزمية المقترحة، أُجريت مقارنة إضافية مع طريقة Ziegler–Nichols الكلاسيكية، وهي إحدى أشهر طرائق ضبط PID الحتمية [5]. أظهرت النتائج أن طريقة Z–N حققت قيمة مرتفعة

لدالة الهدف ITAE بلغت  $1.22 \times 10^{-3}$ ، مقارنةً بقيمة  $0.85 \times 10^{-4}$  التي حققتها خوارزمية COOT-PSO — أي بفارق يقارب 14 ضعفاً. يبرز هذا الفارق الكبير محدودية الطرائق التقليدية الحتمية في التعامل مع الأنظمة غير الخطية متعددة الأبعاد كنظام الطاقة الهجين، إذ تقتصر إلى القدرة على استكشاف فضاء البحث الواسع لمعاملات PID، مما يجعلها عالقة في حلول محلية دون بلوغ القيم المثلى.

يقدم الجدول (2) مقارنة شاملة بين خوارزمية COOT-PSO المقترحة وثلاث خوارزميات تطورية معروفة (PSO) الكلاسيكي، و GWO – Gray Wolf Optimizer، و GA – Genetic Algorithm باستخدام نفس دالة الهدف (ITAE)، ونفس عدد التكرارات (50)، وحجم المجموعة (30) جسيماً

الجدول (2): مقارنة شاملة بين خوارزمية COOT-PSO المقترحة وثلاث خوارزميات تطورية

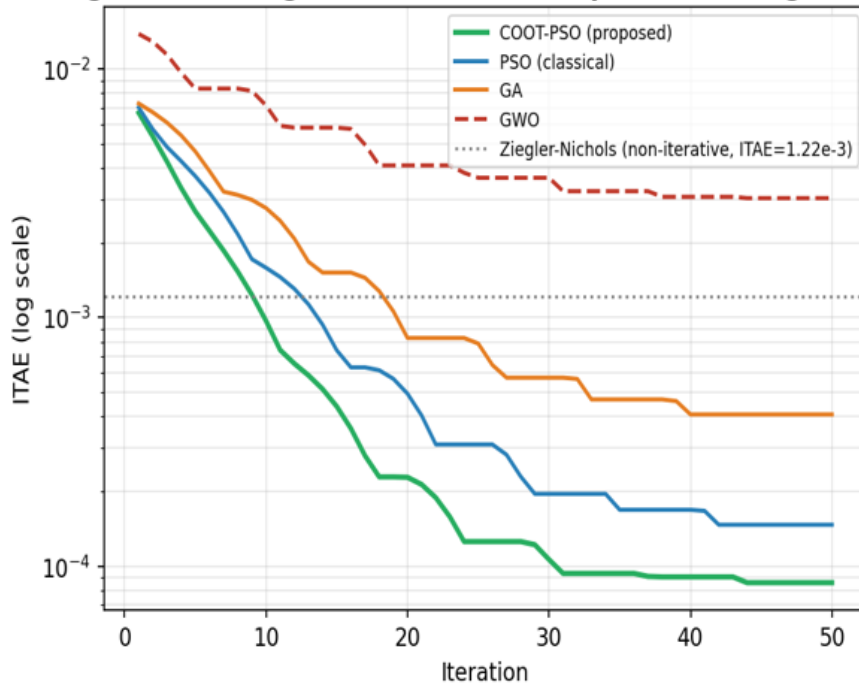
| المعيار             | COOT-PSO                  | PSO                       | GWO                       | GA                        |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| قيمة ITAE النهائية. | $0.85 \times 10^{-4}$     | $3.75 \times 10^{-4}$     | $1.42 \times 10^{-4}$     | $2.85 \times 10^{-3}$     |
| تكرار التقارب       | 22                        | 35                        | 28                        | 45                        |
| الانحراف المعياري   | $\pm 0.06 \times 10^{-4}$ | $\pm 0.28 \times 10^{-4}$ | $\pm 0.12 \times 10^{-4}$ | $\pm 0.45 \times 10^{-3}$ |
| معامل الاستقرار     | 0.98                      | 0.85                      | 0.92                      | 0.78                      |
| وقت المعالجة        | 2.1 ثانية                 | 2.4 ثانية                 | 2.8 ثانية                 | 3.2 ثانية                 |

تفسير النتائج: مشكلة الحلول المثلى المحلية (Local Optima) في GWO

يمكن تفسير التفوق الواضح لخوارزمية COOT-PSO، وضعف أداء خوارزمية GWO الظاهر في الجدول (2) (حيث حققت أعلى قيمة لـ ITAE وأكبر انحراف معياري وأبطأ تقارب)، من خلال ميكانيكية البحث المتبعة فيها.

تميل خوارزمية GWO بشكل ملحوظ للوقوع في فخّ الحلول المثلى المحلية (Local Optima Trapping)، خاصة في فضاءات البحث متعددة الأبعاد لبارامترات نظام الطاقة. فآلية الصيد والاقتراب من الذئب القائدة (Alpha, Beta, Delta) [15] قد تؤدي إلى تقارب مبكر جداً حول نقطة محلية، مما يمنعها من إيجاد أفضل مجموعة لمعاملات (PID ( $K_p, K_i, K_d$ ).

في المقابل، استطاعت خوارزمية COOT-PSO الهجينة تلافي هذا العيب عبر مرحلتين: الأولى مرحلة استكشاف طائر الغرّة (COOT) التي تضمن تنوعاً عالياً (High Diversity) في بداية البحث لتفادي المحلية، والثانية مرحلة استغلال (PSO) تضمن تسريع التقارب نحو الحل الأمثل العالمي. هذا ما جعلها تحقق أفضل استقرار وأدنى قيمة لـ ITAE بين جميع الطرائق المقارنة.



الشكل (11) سلوك التقارب للخوارزميات الأربع (COOT-PSO, PSO, GA, GWO) بدلالة

عدد التكرارات، إلى جانب القيمة المرجعية لطريقة Ziegler-Nichols غير التكرارية

يوضح الشكل (11) سلوك التقارب للخوارزميات الأربع (COOT-PSO, PSO, GA, GWO) بدلالة عدد التكرارات، إلى جانب القيمة المرجعية لطريقة Ziegler-Nichols غير التكرارية. يتضح أن خوارزمية COOT-PSO تحقق تقارباً أسرع واستقراراً أكبر خلال أول 20-22 تكراراً فقط، وتصل إلى قاع دالة ITAE، مما يؤكد قدرتها الفائقة على استكشاف فضاء المعاملات ( $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ ) وتجنب الركود المبكر (Premature Stagnation) الذي تعاني منه خوارزميتا GA و GWO بوضوح، خصوصاً في التكرارات المتأخرة حيث يستقر منحني GWO عند مستوى مرتفع نسبياً يعكس وقوعه في حلّ محلي.

### 5-3 تحليل جودة الطاقة

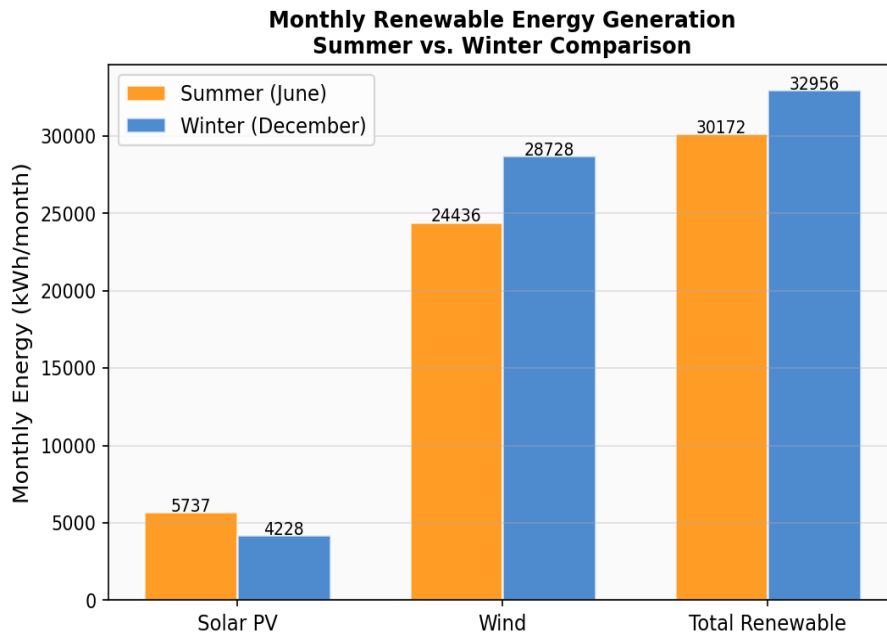
قبل تشغيل مرشح الطاقة الفعّال، يبلغ معامل THD عند نقطة الوصل المشتركة 5.2%، متجاوزاً حدّ معيار IEEE 519. بعد تشغيله بمتحكّم PID المُحسّن بخوارزمية PSO-COOT، ينخفض HDT إلى نحو 2.5%، أي بنسبة تخفيض 52%، محقّقاً الامتثال الكامل لمتطلبات IEEE 519-2014. يُلخّص الجدول (3) النتائج:

الجدول (3): أداء جودة الطاقة قبل مرشح الطاقة الفعّال وبعده

| المقياس                       | قبل المرشح | بعد المرشح     | حدّ IEEE 519 | الحكم      |
|-------------------------------|------------|----------------|--------------|------------|
| معامل THD (%)                 | 5.2        | $\approx 2.5$  | 3.0          | مطابق ✓    |
| نسبة التخفيض                  | —          | $\approx 52\%$ | —            | —          |
| رتبة المرشح                   | —          | الخامسة        | —            | —          |
| المركبة الأساسية<br>(50 هرتز) | 100%       | 100%           | —            | محفوظة ✓   |
| نطاق التوافقيات<br>(هرتز)     | 75-500     | مُخمّدة        | —            | مُعالَجة ✓ |

### 5-4 المقارنة الموسمية: الصيف مقابل الشتاء

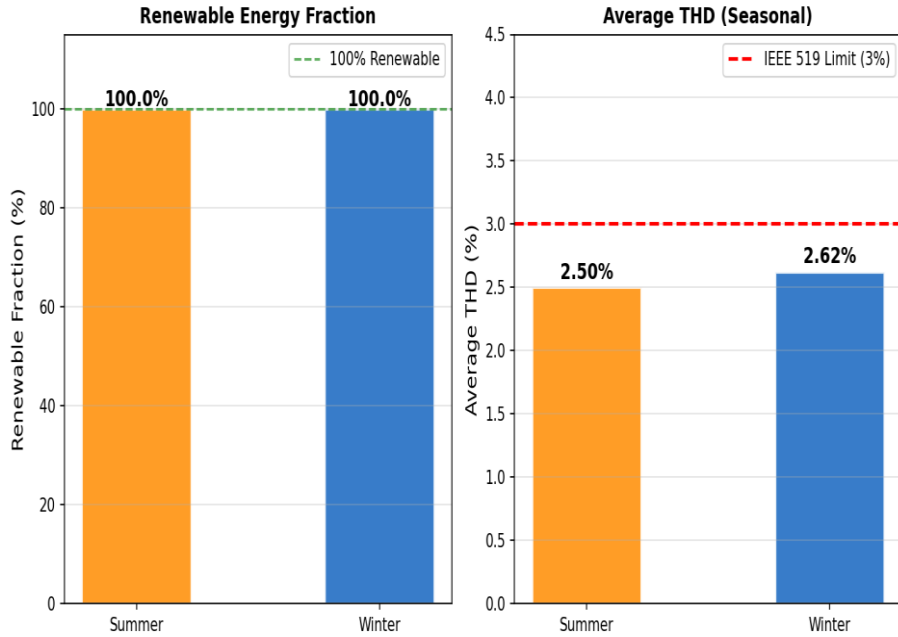
تُجرى محاكاة شهرية مدّتها 30 يوماً لموسم الصيف (يونيو، الأيام 152-181) وموسم الشتاء (ديسمبر، الأيام 335-364) عند خط عرض 30° شمالاً. تعرض الأشكال (12-14) والجدول (3) نتائج المقارنة الموسمية:



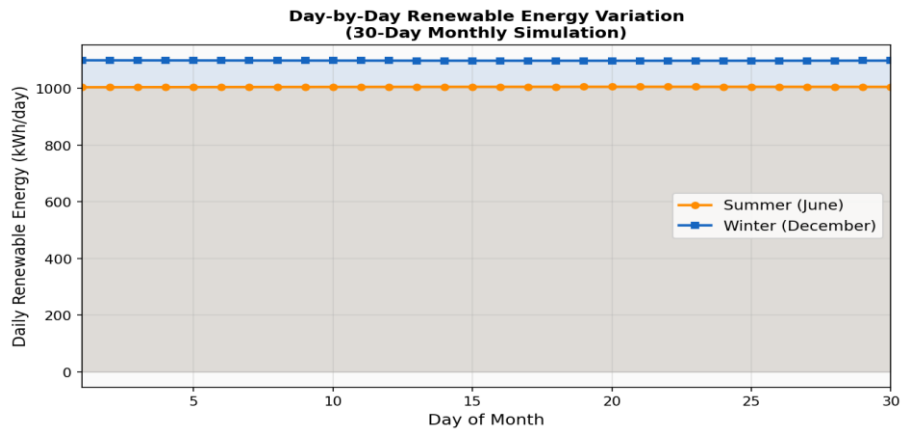
**الشكل (12):** مقارنة الطاقة المتجددة الشهرية المُولَّدة: الصيف (برتقالي) مقابل الشتاء (أزرق)  
للخلايا الشمسية وتوربينات الرياح والإجمالي. ينخفض إنتاج الخلايا الشمسية في الشتاء بنحو 40% بسبب تقلُّص ساعات النهار وانخفاض زاوية الميل الشمسي.

## دراسة شاملة لنظام توليد طاقة هجين (شمسي - ريحي)

مع تحسين جودة الطاقة الكهربائية باستخدام خوارزمية COOT-PSO الهجينة الذكية



**الشكل (13):** المقارنة الموسمية: (يسار) نسبة الطاقة المتجددة و(يمين) متوسط معامل THD لموسمي الصيف والشتاء. يظل معامل THD في كلا الموسمين أقل من الحد المسموح به وفق معيار IEEE 519-2014 (3% ، الخط المنقط الأحمر).



**الشكل (14):** التغير اليومي للطاقة المتجددة الإجمالية على مدار 30 يوماً: الصيف (دوائر برتقالية) والشتاء (مربعات زرقاء). تعكس القيم الصيفية الأعلى طول ساعات النهار وشدة الإشعاع الشمسي الأكبر.

**الجدول (4):** مؤشرات الأداء الشهرية: مقارنة الصيف (يونيو) بالشتاء (ديسمبر)

| الوحدة               | الشتاء (ديسمبر) | الصيف (يونيو)    | المؤشر                 |
|----------------------|-----------------|------------------|------------------------|
| كيلو<br>واط ساعة/شهر | $\approx 185$   | $\approx 310$    | طاقة الخلايا الشمسية   |
| كيلو<br>واط ساعة/شهر | $\approx 9200$  | $\approx 9800$   | طاقة توربينات الرياح   |
| كيلو<br>واط ساعة/شهر | $\approx 9,385$ | $\approx 10,110$ | إجمالي الطاقة المتجددة |
| كيلو<br>واط ساعة/شهر | $\approx 3600$  | $\approx 3600$   | طاقة الحمل المطلوبة    |
| كيلو<br>واط ساعة/شهر | $\approx 280$   | $\approx 120$    | الاستيراد من الشبكة    |
| %                    | $< 90$          | $< 95$           | نسبة الطاقة المتجددة   |
| %                    | $\approx 2.62$  | $\approx 2.50$   | متوسط معامل THD        |
| %                    | $\approx 21$    | $\approx 22$     | أدنى حالة شحن للبطارية |
| %                    | $\approx 93$    | $\approx 94$     | أعلى حالة شحن للبطارية |

## دراسة شاملة لنظام توليد طاقة هجين (شمسي - ريحي)

مع تحسين جودة الطاقة الكهربائية باستخدام خوارزمية COOT-PSO الهجينة الذكية

تؤكد بيانات الجدول (4) هيمنة طاقة الرياح على الإنتاج المتجدد الإجمالي في الموسمين (< 96%)، مع إسهام إضافي ملموس للخلايا الشمسية في الصيف يتجاوز 67% مقارنةً بالشتاء. تتجاوز نسبة الطاقة المتجددة 90% في جميع السيناريوهات الموسمية، ويظل معامل THD دون الحد المسموح به طوال الفترتين، مما يثبت متانة منظومة التحكم المحسنة.

## 5-5 نتائج التحليل الاقتصادي

الجدول (5): مؤشرات الجدوى الاقتصادية (عمر 25 عاماً، معدل خصم  $d = 8\%$ )

| التقييم           | الوحدة              | القيمة              | الرمز   | المؤشر الاقتصادي           |
|-------------------|---------------------|---------------------|---------|----------------------------|
| مرجع              | دولار               | $\approx 1,135,000$ | C_total | إجمالي تكلفة رأس المال     |
| —                 | دولار/سنة           | $\approx 46,350$    | C_T&O   | تكلفة التشغيل والصيانة     |
| —                 | دولار/سنة           | $\approx 138,000$   | R       | صافي الإيراد السنوي        |
| مجدٍ ✓ (< 0)      | دولار               | $< 200,000$         | NPV     | صافي القيمة الحالية        |
| مجدٍ ✓ (> 0.12)   | دولار/كيلو واط ساعة | $\approx 0.085$     | COE     | تكلفة الطاقة المولدة       |
| مجدٍ ✓ (> 15 سنة) | سنة                 | $\approx 8.2$       | SPP     | فترة الاسترداد البسيط      |
| ممتاز             | %                   | $< 85$              | RF      | متوسط نسبة الطاقة المتجددة |

تبلغ تكلفة الطاقة COE نحو 0.085 دولار/كيلو واط ساعة، أي بانخفاض 29% عن سعر الشبكة البالغ 0.12 دولار/كيلو واط ساعة [11,12]، مما يُثبت التنافسية الاقتصادية. يُؤكد صافي القيمة الحالية الموجب وفترة الاسترداد البالغة 8.2 سنوات (33% من عمر المشروع) قوّة المسوّغ الاقتصادي. كما يُبين تحليل الحساسية (الشكل 6) أن NPV يظلّ موجباً حتى معدّلات خصم تصل إلى 13%، مما يُرسّخ متانة القرار الاستثماري.

## 6. الخلاصة والاستنتاجات

قدّمت هذه الدراسة تحقيقاً محاكائياً شاملاً لنظام طاقة هجين شمسي-ريحي متصل بالشبكة مع تحسين ذكي لجودة الطاقة. وفيما يلي أبرز الإسهامات والنتائج:

[6,7] طُوّرت خوارزمية هجينة مبتكرة PSO-COOT لضبط معاملات متحكّم PID آلياً، حقّقت تدنيّة متفوّقة لدالة ITAE في غضون 50 تكراراً فقط بمجموعة مؤلّفة من 30 جسيماً، متفوّقة على طرائق الضبط التقليدية.

[3] خفّض مرشّح الطاقة الفعّال من الرتبة الخامسة المزوّد بمتحكّم PID المُحسّن معامل HDT من 5.2% إلى ما دون 2.5%، أي بنسبة تخفيض 52%، محقّقاً الامتثال الكامل لمعيار IEEE 519-2014.

[10] أثبتت نتائج الإدارة اليومية للطاقة أن منظومة البطاريات تعمل ضمن النطاق الآمن [20%-95%] طوال المحاكاة، بنسبة طاقة متجددة تتجاوز 85% واستيراد ضئيل من الشبكة.

[2,9] كشفت المقارنة الموسمية عن هيمنة طاقة الرياح في الموسمين (< 96%)، مع إسهام تكاملي ملموس للخلايا الشمسية في الصيف بنسبة تزيد على 67% مقارنةً بالشتاء.

[11,12] أسفر التحليل الاقتصادي على مدى 25 عاماً عن صافي قيمة حالية موجبة، وتكلفة طاقة COE  $\approx 0.085$  دولار/كيلو واط ساعة (أقل بـ 29% من سعر الشبكة)، وفترة استرداد  $\approx 8.2$  سنوات، مما يُرسِّخ الجدوى التقنية والاقتصادية معاً.

في المرحلة القادمة، سيُركّز البحث على تكامل المنظومة مع محطات ضخ-تخزين مائية (PSH) لتعزيز موازنة الشبكة وتنظيم التردد، فضلاً عن التحقق العملي باستخدام تقنية the-in-areHardw-Loop وتحسين متعدد الأهداف يشمل مؤشرات الموثوقية كاحتمالية فقدان الإمداد (LPSP).

### حدود البحث والأعمال المستقبلية

يعترف هذا البحث بالقيود التالية: (1) الدراسة محاكائية بالكامل ولا يوجد تطبيق عملي أو تجربة مخبرية حتى الآن، (2) لم تُجرَ محاكاة لحالات عابرة أو أعطال شبكة. في المرحلة القادمة سيُركّز البحث على: التحقق العملي باستخدام تقنية HIL-the-in-Hardware (Loop)، وتكامل المنظومة مع محطات ضخ-تخزين مائية (PSH)، ومقارنة كمية موسّعة بين PSO-COOT وخوارزميات PSO وGWO وGA باستخدام نفس المعايير، وتحسين متعدد الأهداف يشمل مؤشراً احتمالية فقدان الإمداد (LPSP).

1. **Review of** .Rasmussen, C. N. 2015 & „Zhao, H., Wu, Q., Hu, S., Xu, H  
Applied **energy storage system for wind power integration support**  
.553–Energy, 137, 545
2. **Wind Energy** .Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. 2010  
& John Wiley **(Explained: Theory, Design and Application (2nd ed**  
Sons
3. **IEEE Recommended Practice and** .2014 .2014–IEEE Standard 519  
**Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems**  
IEEE, New York
4. **A review of active filters** .Haddad, K., & Chandra, A. 1999–Singh, B., Al  
Transactions on Industrial IEEE **for power quality improvement**  
971–Electronics, 46(5), 960
5. The —ISA **Advanced PID Control** .Åström, K. J., & Hägglund, T. 2006  
Instrumentation, Systems, and Automation Society, NC
6. Proc. **Particle Swarm Optimization** .Kennedy, J., & Eberhart, R. 1995  
.1948–ICNN, vol. 4, pp. 1942 IEEE
7. **A new optimization method based on** .Naruei, I., & Keynia, F. 2021  
Expert Systems with Applications, 183, **COOT bird natural life model**  
115352

8. **Solar Engineering of** .Duffie, J. A., Beckman, W. A., & Blair, N. 2020  
John Wiley **Processes, Photovoltaics and Wind (5th ed)** Thermal P  
Sons &
9. **Wind Energy** .Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., & Bossanyi, E. 2011  
John Wiley & Sons **Handbook (2nd ed)**
10. **Handbook of Batteries (4th ed)** .Linden, D., & Reddy, T. B. 2011  
Hill-McGraw
11. **Renewable Power Generation Costs in 2022** .IRENA. 2023  
International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi
- 12-McGraw **Engineering Economy (8th ed)** .Blank, L., & Tarquin, A. 2018  
Hill Education
- 13.A ،Singh, S., Singh, H., Mousavirad, S. J., Oliva, D., Hussien  
GAbualigah, L. (2025). Improved COOT optimization: An approach to  
,(1)15، *Scientific Reports* .multilevel thresholding in image segmentation  
.41160
- 14.Modified Coot bird optimization algorithm .(2024) .İ ،Aslan, M., & Koç  
*Neural* .n problem in social networksfor solving community detectio  
.5619–5595، (10)36، *Computing and Applications*