

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231598

基于指数分布优化器的混合光伏-温差系统最大功率点跟踪

杨博, 谢蕊, 武少聪, 韩一鸣

(昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 为解决混合光伏-温差(photovoltaic thermoelectric generator, PV-TEG)系统的最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)问题以提高能源转换效率和利用率, 提出了一种基于指数分布优化器(exponential distribution optimizer, EDO)的混合 PV-TEG 系统 MPPT 技术。EDO 通过模拟指数分布的随机变化来搜索潜在的解空间, 由于随机性, 算法可有效避免在局部遮蔽条件(partial shading condition, PSC)下陷入局部最优, 并在搜索空间中广泛探索以找到最优解。算例研究包括启动测试、太阳辐照度阶跃变化、随机变化、香港四季实际算例 4 个部分, 并与其他 5 种算法进行对比分析, 以较为全面地验证所提 EDO 技术在混合系统 MPPT 应用中的可行性和有效性。仿真结果表明, 采用 EDO 的混合 PV-TEG 系统在不同运行条件下均能稳定、高效地实现最优越的 MPPT 性能, 尤其是在春季低辐照度的条件下, EDO 产生的能量分别超过蜻蜓算法(dragonfly algorithm, DA)、增量电导法(incremental conductance method, INC)、扰动观测法(perturbation observation method, P&O)能量输出的 68.85%、66.13%和 59.69%。

关键词: 指数分布优化器; 最大功率点跟踪; 混合光伏-温差系统

Hybrid PV-TEG system maximum power point tracking based on an exponential distribution optimizer

YANG Bo, XIE Rui, WU Shaocong, HAN Yiming

(Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: To solve the maximum power point tracking (MPPT) problem of a hybrid photovoltaic-thermoelectric generator (PV-TEG) system to improve energy conversion efficiency and utilization, a hybrid PV-TEG system MPPT technique based on an exponential distribution optimizer (EDO) algorithm is proposed. The EDO searches the potential solution space by modeling random variations of the exponential distribution. Because of the randomness, the algorithm can effectively avoid falling into a local optimum under partial shading condition (PSC), and explores extensively in the search space to find the optimal solution. The case study includes four parts: start-up test, step change of solar irradiance, stochastic variation, and actual cases of four seasons in Hong Kong, and is compared to and analyzed with five other algorithms to more comprehensively verify the feasibility and effectiveness of the proposed EDO technique in the application of hybrid system MPPT. The simulation results show that the hybrid PV-TEG system with EDO can achieve superior MPPT performance stably and efficiently in different operating conditions. In particular, the energy generated by EDO in low irradiance conditions in spring exceeds 68.85%, 66.13%, and 59.69% of the energy outputs of the dragonfly algorithm (DA), incremental conductance method (INC), and perturbation observation method (P&O), respectively.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 62263014 and No. 52207109).

Key words: exponential distribution optimizer; maximum power point tracking; hybrid PV-TEG system

0 引言

近年来, 传统能源的不可再生性及其造成的环境污染和温室效应促使人们开始寻找环境友好型的

可再生能源^[1-3], 应用可再生能源应对气候变化、推动能源变革已成为国际社会的普遍共识和一致行动^[4-6]。光伏发电作为可再生能源领域的一个关键领域, 不仅对环境友好, 还具有可持续性和可扩展性, 其广泛应用已经在全球范围内推动了可再生能源的增长^[7-9]。尽管可再生能源和光伏发电的潜力巨大, 但在实际应用中仍然存在发电效率低的问题: 光伏

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (62263014, 52207109); 云南省基础研究专项资助 (202201AT070857)

电池捕获的大部分太阳能会以热量的形式散失,能量转换效率降低的同时,组件温度的升高也可能对电池的电气参数和使用寿命产生负面影响,导致光伏发电系统的维护和更换成本增加;此外,一些外部环境因素,如灰尘、雨雪等,也会对光伏板的性能产生不利影响^[10-12]。为了降低光伏电池的温度并充分收集利用光伏系统产生的废热,一种有效的解决方法就是将光伏系统与温差发电(thermoelectric generator, TEG)结合起来,形成混合 PV-TEG 系统^[13-14]。

最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制技术在提高混合可再生能源系统的能量转换效率方面发挥着关键作用,因为在动态变化的运行条件下,尤其是在部分遮蔽条件(partial shading condition, PSC)下出现多个局部最大功率点(local maximum power point, LMPP)时,如何高效、精确地修改运行点以最大化收集功率,对于混合系统来说至关重要。迄今为止,很多研究已针对混合 PV-TEG 系统开发应用了一系列 MPPT 算法。文献[15]将多元宇宙优化算法(multi-verse optimization, MVO)应用于 PSC 下混合 PV-TEG 系统的 MPPT,使系统在更短的时间内具有更高的功率产出;文献[16]提出的分阶比例积分导数(fractional-order proportional integral derivative, FOPID)混合系统 MPPT 控制算法根据误差信号调整占空比,通过产生适当的控制动作使系统工作点移动到更接近曲线峰值的位置以达到最大功率点(maximum power point, MPP)。但这两项研究存在算例场景和对比较算法不够多样的问题:文献[15]只针对固定光照条件和光照阶跃变化两种算例进行了测试分析,且未和传统算法——扰动观测法(perturbation observation method, P&O)^[17]、增量电导法(incremental conductance method, INC)^[18]等进行对比研究;文献[16]则只与 P&O 进行了比较,对比较算法较为单一。文献[19]提出的双曲切型自适应变步长 INC 法利用双曲正切函数的单调增长和快速变化的特点,使步长可以根据光照强度等外部环境条件的变化进行快速自适应调整,但该方法可能导致工作点在全局最大功率点(global maximum power point, GMPP)附近波动,降低系统的稳定性。文献[20]开发了一种通过使用松鼠优化(squirrel search optimization, SQS)算法训练前馈神经网络(feed-forward neural network, FFNN)的混合系统 MPPT 算法,该算法被应用于处在动态工作条件或者是非均匀温度分布(non-uniform temperature distribution, NUTD)条件下的混合系统中,并在处理 NUTD 下的 GMPP、低效率和振荡等问题方面展现出了良好的性能。然而,

该方法也存在一定的局限性,如对训练数据的质量要求高、复杂性高、实现成本高、开发周期长等。文献[21]将 INC 算法、粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)和 P&O 算法结合起来以实现混合 PV-TEG 系统的混合 MPPT 技术,该混合方法与分别单独使用 INC、PSO 和 P&O 相比,能够实现更高的输出功率;但多种算法的组合不可避免地增加了系统的复杂性,而且多参数调整通常会消耗大量的时间和资源。文献[22]将算术优化算法(arithmetic optimization algorithm, AOA)与混合 PV-TEG 系统的 MPPT 控制相结合,通过使用算数运算符来更新位置,但该算法是一种局部搜索算法,如果搜索空间较大或者问题具有多个 LMPP 时易陷入局部最优;此外,在处理混合 PV-TEG 系统中的一些离散变量时, AOA 的性能也会受到限制。

通过以上分析可知,这些研究提出的混合系统 MPPT 算法存在算例场景和对比较算法不够多样、稳定性差、计算复杂度高、易陷入局部最优等问题,且上述研究显著的趋势是大部分由国外学者主导,而在国内关于混合 PV-TEG 系统 MPPT 技术的研究数量却相对有限,这表明在这一领域国内的研究仍需进一步丰富和提升。因此,针对以上问题,本文提出了基于指数分布优化器(exponential distribution optimizer, EDO)的混合 PV-TEG 系统 MPPT 方法。EDO 是一种新颖的基于群体的元启发式算法^[23],其灵感来自数学中的指数概率分布模型(exponential probability distribution, EPD),该算法主要利用 3 个概念,即无记忆属性、指导解和指数随机变量之间的指数方差来更新当前解。受到随机性和指导解的影响,EDO 具有较强的全局探索能力,可有效避免在 PSC 下陷入局部最优,并在搜索空间中广泛探索,以找到最优解;且 EDO 的控制参数较少,方便实现和调整,可有效降低系统的复杂性并缩短开发周期;此外,EDO 算法采用的是在线优化方式,能够即时采集数据并实时进行优化,相比于一些计算量更大的离线优化方法,EDO 的计算复杂度相对适中,适合于混合 PV-TEG 系统 MPPT 实时的优化需求。研究针对 EDO、INC、P&O、飞蛾扑火优化算法(moth-flame optimization, MFO)^[24]、多元宇宙优化算法(multi-verse optimization, MVO)^[25]、蜻蜓算法(dragonfly algorithm, DA)^[26]6 种算法在启动测试、太阳辐照度阶跃变化、太阳辐照度随机变化、香港四季实际算例 4 种不同算例场景下进行了测试、比较和分析,以验证所提 EDO 技术的可行性、有效性和优越性。

1 混合 PV-TEG 系统建模

1.1 PV 系统建模

基于双二极管模型 (double diode model, DDM)^[27-28] 的光伏电池输出电流^[29-30]为

$$I_{PV} = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - \frac{V_{PV} + I_{PV}R_s}{R_p} \quad (1)$$

式中: I_{ph} 为光生电流; I_{d1} 和 I_{d2} 为二极管饱和电流; R_s 和 R_p 分别为串联电阻和并联电阻; V_{PV} 为输出电压。

I_{ph} 可表示^[31]为

$$I_{ph} = (I_{sc} + K_i(T - T_{STC})) \frac{G}{G_{STC}} \quad (2)$$

式中: I_{sc} 为标准温度下的短路电流; K_i 为短路电流温度系数; T 和 T_{STC} 分别为温度和标准测试条件 (standard testing conditions, STC) 下的温度; G 和 G_{STC} 分别为瞬时辐照度和 STC 下的辐照度; T_{STC} 和 G_{STC} 分别取 298 K 和 1000 W/m²。

I_{d1} 和 I_{d2} ^[32] 分别为

$$I_{d1} = I_{o1} \left[\exp \left(\frac{q(V_{PV} + I_{PV}R_s)}{n_1 N_s k T} \right) - 1 \right] \quad (3)$$

$$I_{d2} = I_{o2} \left[\exp \left(\frac{q(V_{PV} + I_{PV}R_s)}{n_2 N_s k T} \right) - 1 \right] \quad (4)$$

式中: I_{o1} 和 I_{o2} 分别为二极管反向饱和电流; q 为电荷量; n_1 、 n_2 为二极管理想因子; N_s 为光伏电池串联数量; $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J}^{[33]}$ 。

此时光伏电池输出电流可改写^[34]为

$$I_{PV} = I_{ph} - I_{o1} \left[\exp \left(\frac{q(V_{PV} + I_{PV}R_s)}{n_1 N_s k T} \right) - 1 \right] - \quad (5)$$

$$I_{o2} \left[\exp \left(\frac{q(V_{PV} + I_{PV}R_s)}{n_2 N_s k T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{PV} + I_{PV}R_s}{R_p}$$

光伏组件的发电效率 η_{PV} 为

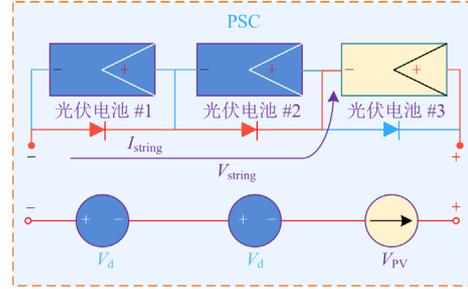
$$\eta_{PV} = \frac{P_{PV}}{GA_{PV}} = \frac{V_{PV} I_{PV}}{GA_{PV}} \quad (6)$$

式中: A_{PV} 为光伏组件的表面积; P_{PV} 为光伏输出功率。

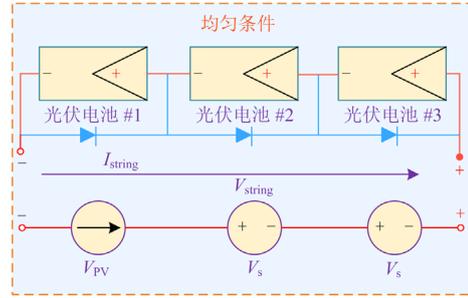
1.2 PSC 下的光伏系统建模

在实际应用中, 光伏系统可能由于树木、云层或建筑物的遮挡而工作在 PSC 下, 造成“热斑效应”, 为了防止该效应对光伏系统的损害, 本文模型在光伏电池上反向并联了旁路二极管^[35], 如图 1 所示。其中, I_{string} 和 V_{string} 分别为光伏串的电

流和电压, 旁路二极管在正常情况时处于反偏状态, 不影响光伏电池正常工作, 但当出现 PSC 时, 旁路二极管两端将形成正向偏压, 二极管导通, 从而限制电流, 有效解决热斑效应问题, 避免被遮挡的电池出现过热损伤。



(a) PSC 条件



(b) 均匀条件

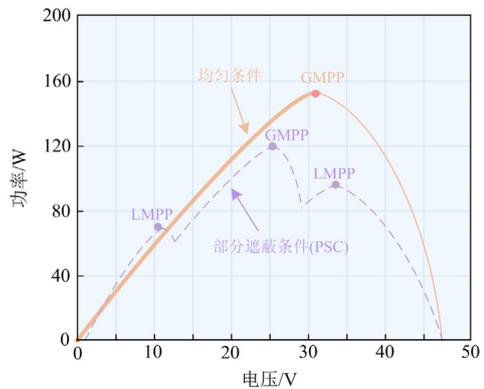
图 1 带旁路二极管的光伏阵列

Fig. 1 PV array with bypass diode

但这也将不可避免地导致 P - V 特征曲线上出现多个 LMPP, 而不是理想的单一 GMPP, 如图 2 所示, 其中, LMPP 的数量与存在 PSC 组件的数量成正比。为了最大限度地获取光能, 光伏系统应始终工作在 GMPP 附近^[36]。PSC 下的光伏电池电压 $V_{reverse}$ 根据式(7)进行约束和限制。

$$V_{reverse} = nV_{PV-oc} + V_{Bdiode} \quad (7)$$

式中: V_{PV-oc} 为开路电压; n 为未被遮蔽的 PV 电池的数量; V_{Bdiode} 为旁路二极管电压降。



(a) P - V 曲线

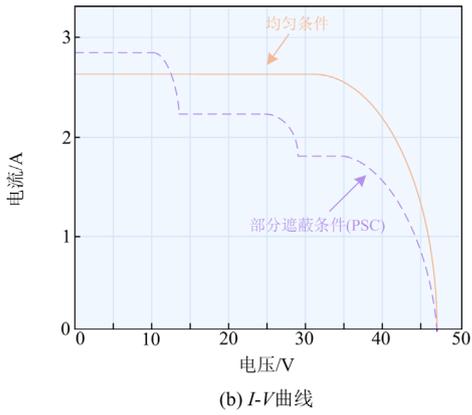


图2 PSC和均匀条件下PV阵列输出特性曲线比较
Fig. 2 Comparison of output characteristic curves of PV arrays in PSC and uniform condition

1.3 TEG 系统建模

图3展示了一个典型TEG模块的等效电路。其中： V_L 和 I 分别为TEG模块的端电压和端电流； V_{TEG} 为TEG模块的输出电压。TEG模块在冷热侧温差保持不变时产生的开路电压^[37]如式(8)所示。

$$V_{oc} = \alpha_{pn}(T_h - T_c) = \alpha_{pn}\Delta T \quad (8)$$

式中： α_{pn} 为两种材料(P和N)的塞贝克系数差值； T_h 和 T_c 分别为热侧和冷侧的温度； ΔT 为冷热两侧温度差。

TEG系统主要受到塞贝克效应和汤姆森效应的影响，汤姆森系数 τ 可表示为

$$\tau = T_{avg} \frac{d\alpha_{pn}}{dT_{avg}} \quad (9)$$

式中， T_{avg} 为热侧和冷侧之间的平均温度。为建立更准确的TEG模型，将 τ 设定为非零。

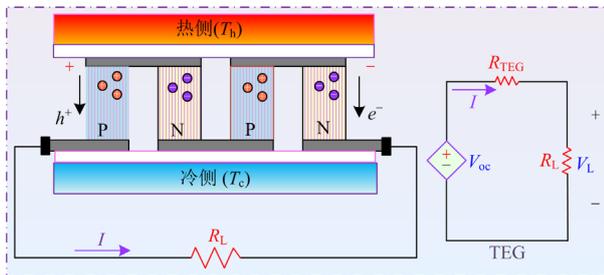


图3 TEG模块等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of TEG module

α_{pn} 随 T_{avg} 的变化而动态变化，如式(10)所示。

$$\alpha_{pn}(T_{avg}) = \alpha_0 + \alpha_1 \ln\left(\frac{T_{avg}}{T_0}\right) \quad (10)$$

式中： α_0 和 α_1 分别为塞贝克系数基准值和变化率；

T_0 为初始温度。

TEG系统的输出功率^[38-39]为

$$P_{TEG} = (\alpha_{pn}\Delta T)^2 \cdot \frac{R_L}{(R_L + R_{TEG})^2} \quad (11)$$

式中： R_L 为负载电阻； R_{TEG} 为TEG内部电阻。

1.4 混合PV-TEG系统建模

PV和TEG可以并联或串联连接，串联连接具有最少的功率电子开关数量和最小的功率损失，如图4所示。混合PV-TEG系统的典型结构如图5所示^[40-41]，PV板和TEG相互平行放置，在PV组件的背板上安装陶瓷板并放置在TEG模块的热侧，散热器则被布置在冷侧以降低冷侧温度，这确保了TEG的一个合理的温差水平，以实现更高的能量转换效率。PV系统主要吸收紫外线和可见光，红外辐射则被用于加热TEG顶部使热侧与冷侧之间产生温差，TEG不仅收集余热对PV系统起到了冷却作用，还有效提高了太阳能光谱的利用效率。

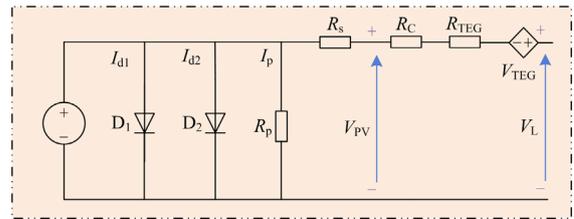


图4 混合PV-TEG系统单个模块电气连接图

Fig. 4 Electrical connection diagram of a single module of the hybrid PV-TEG system

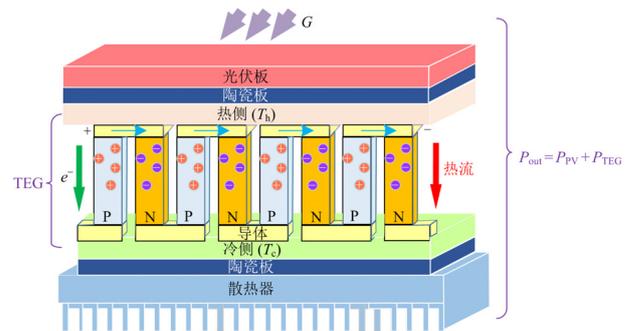


图5 混合PV-TEG系统典型结构

Fig. 5 Structure of a typical hybrid PV-TEG module

在混合系统中，TEG冷侧的温度 $T_c = T_{STC}$ ，热侧温度 T_h 则随环境温度、风速和太阳辐照度而动态变化，如式(12)所示。

$$T_h = 0.943T_{STC} + 0.0195G - 1.528V_w + 0.3529 \quad (12)$$

式中， V_w 为风速，范围为1~10 m/s。

混合PV-TEG系统通常有两个MPPT控制器和升压电路，以汇集从两个阵列获得的功率，图6为

混合 PV-TEG 系统拓扑图。整个混合系统的总输出功率 P_{out} 是 PV 系统的输出功率 P_{PV} 和 TEG 系统的输出功率 P_{TEG} 之和, 如式(13)所示。

$$P_{out} = P_{PV} + P_{TEG} \quad (13)$$

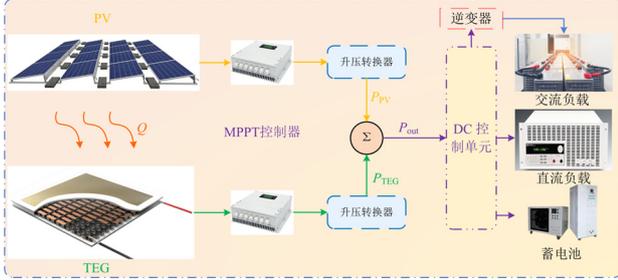


图 6 混合 PV-TEG 系统拓扑图

Fig. 6 Hybrid PV-TEG system's topology diagram

混合 PV-TEG 系统的整体能量转换效率^[42-43]可以表示为

$$\eta_{PV-TEG} = \eta_{PV} + \eta_{TEG} = \frac{P_{PV} + P_{TEG}}{GA_{PV}} \quad (14)$$

式中, η_{PV-TEG} 为 TEG 系统的发电效率。

2 基于 EDO 的混合 PV-TEG 系统 MPPT 设计

2.1 EDO 介绍

EDO 包括开发和探索两个策略, 开发阶段主要利用无记忆属性、指导解和指数随机变量之间的指数方差来更新当前解, 探索阶段则是从指数分布得出的原始种群中选择两个解来更新解决方案, 并最终找到最优解。

2.1.1 种群初始化

EDO 根据式(15)、式(16)进行种群初始化。

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,D} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \cdots & x_{2,D} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{N,1} & x_{N,2} & \cdots & x_{N,D} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$x_{i,j} = l_{bj} + r_{rand}(u_{bj} - l_{bj}) \quad (16)$$

式中: \mathbf{X} 为原始种群; N 和 D 分别为个体总数和维度; $x_{i,j}$ 为第 i 个候选指数分布向量的第 j 个变量; $i=1,2,\dots,N$; $j=1,2,\dots,D$; l_{bj} 和 u_{bj} 分别为第 j 个变量的下限和上限; r_{rand} 为 $[0,1]$ 之间的一个随机数。

2.1.2 开发阶段

在此阶段 EDO 根据指导解寻找全局最优解, 如式(17)所示。

$$x'_{guide} = \frac{x'_1 + x'_2 + x'_3}{3} \quad (17)$$

式中: t 为当前迭代次数; x'_{guide} 为第 t 次迭代时的指导解, 为一个已排序种群(种群个体按照适应度值从高到低进行排序)的前 3 个最佳解(x'_1 、 x'_2 、 x'_3)的平均解。

构建一个无记忆矩阵 \mathbf{Y} , $t=1$ 时, $\mathbf{Y}=\mathbf{X}$; 当 $t \geq 2$ 时, \mathbf{X} 和 \mathbf{Y} 的更新不同。第 i 个候选解 v_i 的位置更新公式如式(18)所示。

$$v_i = \begin{cases} a(y'_i - \sigma^2) + bx'_{guide}, & \text{if } x'_i = y'_i \\ b(y'_i - \sigma^2) + \log(\phi)x'_i, & \text{else} \end{cases} \quad (18)$$

式中: a 和 b 为自适应参数, a 主要控制优胜解与其方差的距离, b 则扩展了指导解周围的搜索空间; y'_i 就是无记忆矩阵 \mathbf{Y} 中的第 i 个解; σ^2 为指数方差; ϕ 为在 $[0, 1]$ 之间生成的一个随机数; $\log(\phi)$ 为优胜解共享的有用信息的比率; x'_i 为当前优胜解。

式(18)中的参数计算如下。

$$a = f^{10} \quad (19)$$

$$b = f^5 \quad (20)$$

$$f = 2r_{rand} - 1 \quad (21)$$

式中, f 为 $[-1, 1]$ 中生成的一个随机数。

标准差 σ 等于均值 δ , 如式(22)所示。

$$\sigma = \delta = \frac{x'_{guide} + y'_i}{2} \quad (22)$$

2.1.3 探索阶段

此阶段利用原始种群的两个优胜解(x'_{r_1} 、 x'_{r_2})建立优化模型, 其中, r_1 和 r_2 为 $[1, N]$ 之间的随机整数, 且 $r_1 \neq r_2$, 代表从种群中随机选择两个不同的个体。新的解通过式(23)进行更新。

$$v_i = x'_i - x'_{mean} + (cZ_1 + (1-c)Z_2) \quad (23)$$

$$x'_{mean} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x'_{i,j} \quad (24)$$

式中: x'_{mean} 为原始种群中所有解的平均值; $x'_{i,j}$ 为第 t 次迭代时随机产生的指数随机变量。

式(23)中的参数可表示为

$$\begin{cases} c = df \\ d = \frac{1-t}{t_{max}} \\ Z_1 = x'_{mean} - D_1 + D_2 \\ Z_2 = x'_{mean} - D_2 + D_1 \end{cases} \quad (25)$$

式中: c 为一个调整后的参数, 表示潜力 Z_1 和 Z_2 与当前新解共享信息的比值; d 为一个自适应参数, 从零开始随着时间的推移逐渐减少; t_{max} 表示最大

迭代次数: D_1 和 D_2 分别为 x_{mean}^t 和两个优胜解之间的距离。

$$\begin{cases} D_1 = x_{\text{mean}}^t - x_{r_1}^t \\ D_2 = x_{\text{mean}}^t - x_{r_2}^t \end{cases} \quad (26)$$

2.1.4 开关参数和种群更新

EDO 随机生成一个 $[0, 1]$ 之间的开关参数 α , 并设定阈值为 0.5, 根据 α 判断一个个体在迭代中执行开发阶段还是执行探索阶段。此外, 种群根据式(27)、式(28)更新 \mathbf{X} 和 \mathbf{Y} 两个矩阵。

$$y_i^{t+1} = v_i \quad (27)$$

$$\begin{cases} x_i^{t+1} = v_i, \text{ if } \text{fit}(v_i) < \text{fit}(x_i^t) \\ x_i^{t+1} = x_i^t, \text{ else} \end{cases} \quad (28)$$

式中, $\text{fit}(\cdot)$ 为适应度函数。

2.2 基于 EDO 的混合系统 MPPT 设计

所提出的基于 EDO 的混合 PV-TEG 系统 MPPT 主要通过将输出电压调整为接近最佳点来实现 GMPP, 而输出电压则是通过调节到 DC-DC 转换器

的脉宽调制(pulse width modulation, PWM)信号的占空比来控制的, 图 7 为所采用技术的 MPPT 实现流程图。混合系统通过两个 Boost 升压电路进行升压, 基于 EDO 的 MPPT 控制器将提取与最佳输出电压相关的最佳占空比(D_c), 且该电压被输入绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)进行下一次迭代。由于混合 PV-TEG 系统的目标是最大化其功率输出, 因此稳定的功率输出可以直接视为所实现占空比的相应适应度值, 与较大的适应度值相关联的个体表明它具有更好或更高质量的解, 而每个控制周期的适应度值可以通过收集实际电压和电流来确定。此外, 在进行算例测试的过程中, 对算法的参数进行调整和优化可以提高其搜索能力, 使算法与系统的适配性更佳。由于解空间的非线性和复杂性, 不可避免地会存在一些遗漏的情况, 但通过调参后的 EDO 搜索得到的潜在解空间是相对较为完整的, 最终的结果会无限逼近全局最优解。

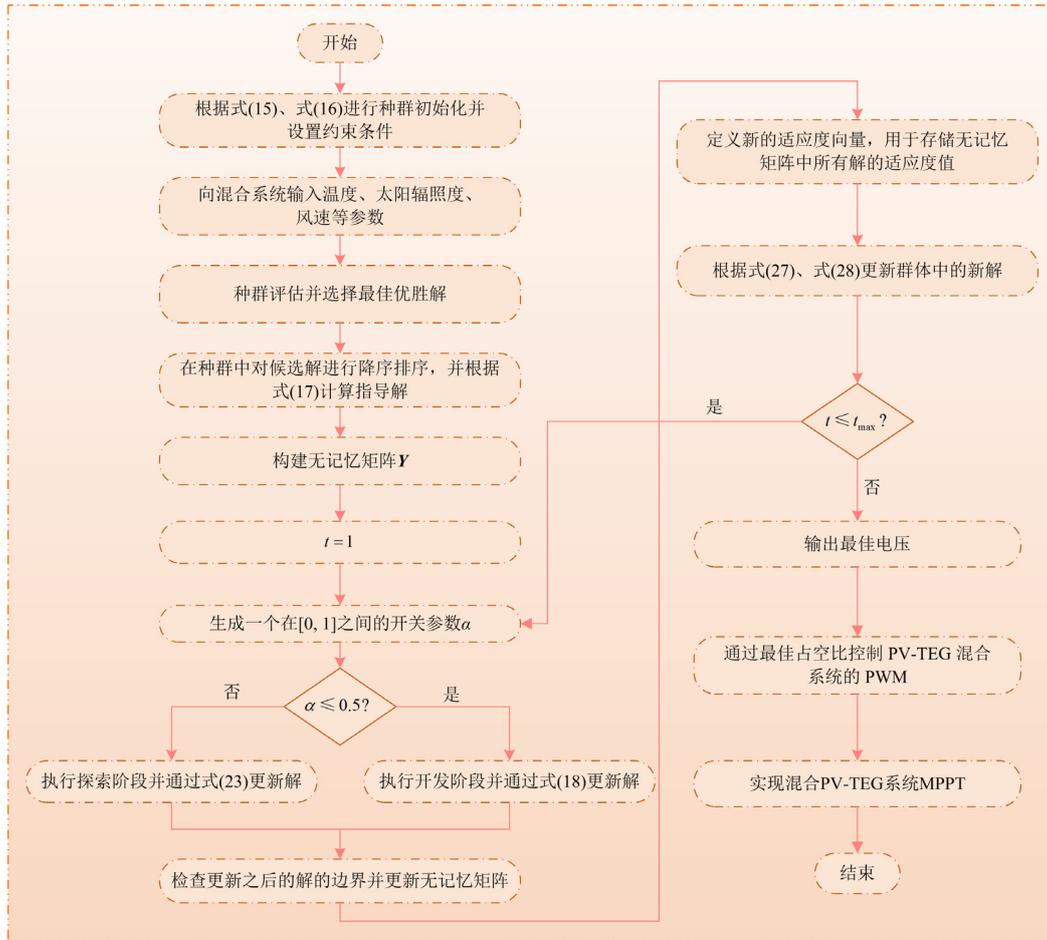


图 7 基于 EDO 的混合 PV-TEG 系统 MPPT 求解流程图

Fig. 7 Flowchart of EDO-based MPPT solving for hybrid PV-TEG system

3 算例分析

为了综合评价基于 EDO 的混合 PV-TEG 系统的 MPPT 性能, 进行启动测试、太阳辐照度阶跃变化、太阳辐照度随机变化、香港四季实际算例 4 个算例研究, 并针对 DA、P&O、INC、MFO、MVO、EDO 这 6 种算法进行比较和分析, 表 1 列出了混合系统及其采用的升压转换器的主要参数。其中, PV 系统和 TEG 系统的模型规模均设计为 5×1 , 种群数和最大迭代次数都设置为 12 和 4, 初始占空比为 0.5, 且每 0.001 s 更新一次占空比, INC 和 P&O 的步长设置为 10^{-6} 。DC-DC 升压电路电容大小设置为 $1 \mu\text{F}$, 电感设置为 0.5 H, IGBT 晶闸管缓振阻尼电阻设定为 $1 \times 10^{-5} \Omega$, 仅采用电压控制。实验均在 Matlab/Simulink 2021a 上进行, 运行设备配备 11th Gen Intel(R) Core(TM) i5-11400 CPU, 2.60 GHz 和 32 GB 内存。在实际应用中, 基于 EDO 的 MPPT 方法不需要较高要求的硬件投入或复杂的软件环境, 开发难度适中。可先采用 MATLAB 编程软件对 EDO 进行开发和仿真, 再由 Arduino 作为 MPPT 控制器执行嵌入的 MPPT 算法代码^[44]。Arduino 是一种常见且易于获取的硬件平台, 具有良好的扩展性和稳定性, 能够满足基本的控制需求。整个系统运行过程中, Arduino 通过 USB 连接到电脑端, 监测输出电压和电流, 如图 8 所示。

此外, 为了对不同算法的优化稳定性进行定量评估, 本文引入两个指标来计算功率波动, 如式(29)和式(30)所示。

$$\Delta v^{\text{avg}} = \frac{1}{T_{\text{all}} - 1} \sum_{t=2}^{T_{\text{all}}} \frac{|P_{\text{out}}(t_{\text{current}}) - P_{\text{out}}(t_{\text{current}} - 1)|}{P_{\text{out}}^{\text{avg}}} \quad (29)$$

表 1 混合 PV-TEG 系统模型主要参数

Table 1 Main parameters of the hybrid PV-TEG system model

TEG 模型		DC/DC 升压转换器	
塞贝克系数基	210	传递函数	$V_{\text{out}} = V_{\text{in}} / (1 - D_c)$
准值 $\alpha_0 / (\mu\text{V}/\text{K})$		开关频率 f_s / kHz	20
塞贝克系数变化	120	负载 R / Ω	3
率 $\alpha_1 / (\mu\text{V}/\text{K})$		电感 L / mH	250
初始温度 T_0 / K	300	电容 $C_1, C_2 / \mu\text{F}$	66, 200
PV 模型			
型号	JA Solar JAM6-60-250/SI		
每个模块电池数量/个	60		
最大功率/W	249.8742		
开路电压 $V_{\text{PV-oc}} / \text{V}$	37.92		
短路电流 I_{sc} / A	8.62		
电压最大值 $V_{\text{max}} / \text{V}$	30.96		
电流最大值 $I_{\text{max}} / \text{A}$	8.07		



图 8 基于 EDO 的混合 PV-TEG 系统 MPPT 软件和硬件配置示意图

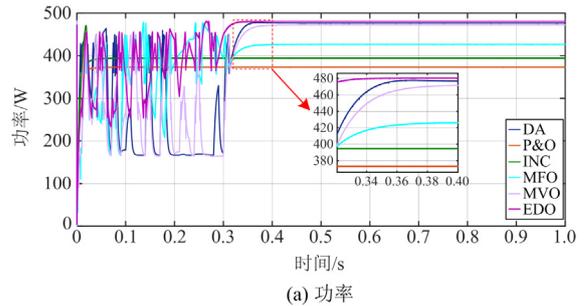
Fig. 8 Software and hardware configuration schematic diagram of the MPPT method for EDO-based hybrid PV-TEG system

$$\Delta v^{\text{max}} = \max_{t=2,3,\dots,T_{\text{all}}} \frac{|P_{\text{out}}(t_{\text{current}}) - P_{\text{out}}(t_{\text{current}} - 1)|}{P_{\text{out}}^{\text{avg}}} \quad (30)$$

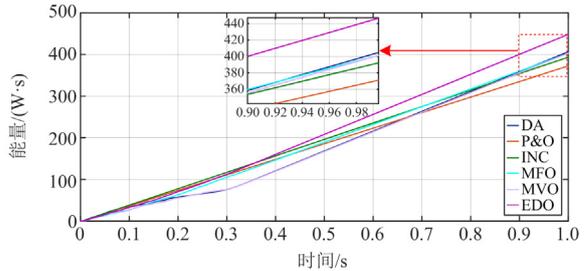
式中: Δv^{avg} 和 Δv^{max} 分别为混合系统总输出功率的平均变化值和最大变化值; t_{current} 为当前时间段; T_{all} 为时间段的数量; $P_{\text{out}}^{\text{avg}}$ 为混合系统在整个时间段内的平均输出功率; $P_{\text{out}}(t_{\text{current}})$ 和 $P_{\text{out}}(t_{\text{current}} - 1)$ 分别为当前时间段和上一时间段的混合系统总输出功率。

3.1 启动测试

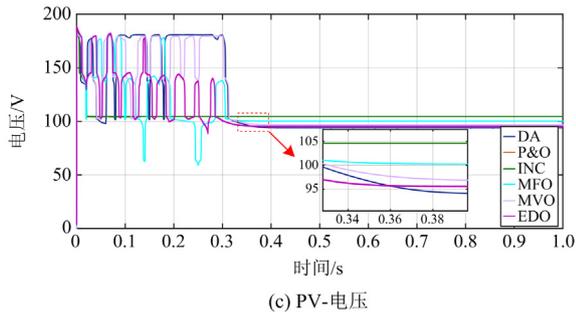
启动测试在环境温度保持不变(25°C)的情况下, 将仿真模型中输入的太阳辐照度分别设置为 $900, 700, 200, 400, 600 \text{ W}/\text{m}^2$, 以验证基于 EDO 算法的混合 PV-TEG 系统在启动时的 MPPT 性能。图 9 为启动测试得到的结果, 如图 9(a)、图 9(b)所示, 与其他 5 个算法相比, 基于 EDO 的混合 PV-TEG 系统求解效率最高, 在 0.34 s 就可收敛到 GMPP, 且具有最大的输出功率(480.25 W)和能量($448.30 \text{ W}\cdot\text{s}$), 其能量分别比 P&O、INC 和 MFO 产生的能量高出 20.39%、13.95%和 11.33%; 此外, EDO 的功率波动



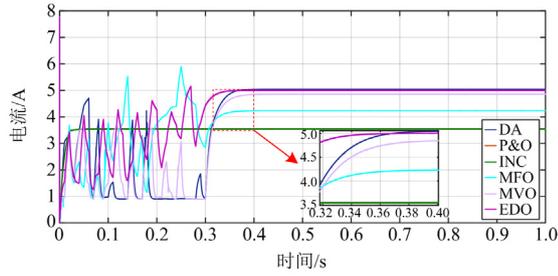
(a) 功率



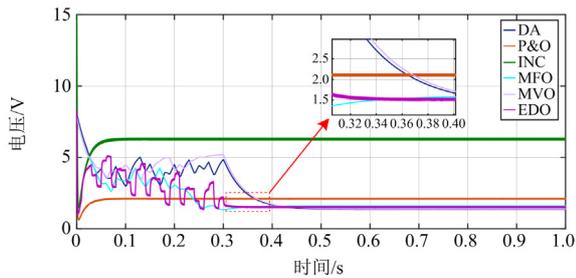
(b) 能量



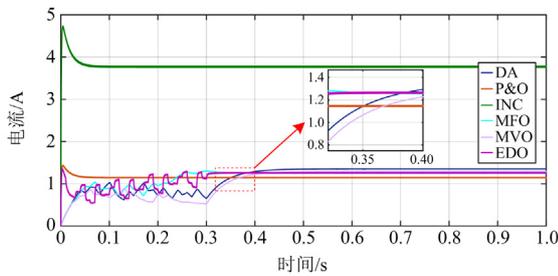
(c) PV-电压



(d) PV-电流



(e) TEG-电压



(f) TEG-电流

图9 混合 PV-TEG 系统在恒温-太阳辐照度固定条件下 MPPT 结果对比

Fig. 9 Comparison of MPPT results of hybrid PV-TEG system in constant temperature-solar irradiance fixed conditions

是最小的(Δv^{avg} 和 Δv^{max} 分别为 18.37%、0.0021%), 收敛后也并未出现在 GMPP 附近波动或引发功率振荡问题。尽管传统算法 P&O 和 INC 收敛较快, 但其找到的都是较低质量的 MPP。测试结果表明, 6 种算法中 EDO 算法在处理初始输入数据时的稳定

性、准确性和效率等方面都是最优的, 同时也确保了 EDO 在后续更复杂的算例测试中能够可靠地执行混合系统的 MPPT。

3.2 太阳辐照度阶跃变化

如图 10 所示, 本节在 25 °C 的恒定温度条件下, 测试太阳辐照度阶跃变化(变化范围在 200~1000 W/m²)对 PV-TEG 阵列功率输出的影响。PV 板接收的太阳辐照度发生阶跃变化, 这导致每个 TEG 模块的热侧输入温度也随之变化。图 11(a)显示出 DA、MFO、MVO 和 EDO 在输入信号阶跃变化的第一阶段分别需要 0.41 s、0.34 s、0.41 s 和 0.32 s 达到收敛, EDO 是所有方法中收敛速度最快的, 且输出功率在整个过程中也始终是最大的; 从图 11(b) 可得, EDO 产生的能量最高, 为 2431.31 W·s, 分

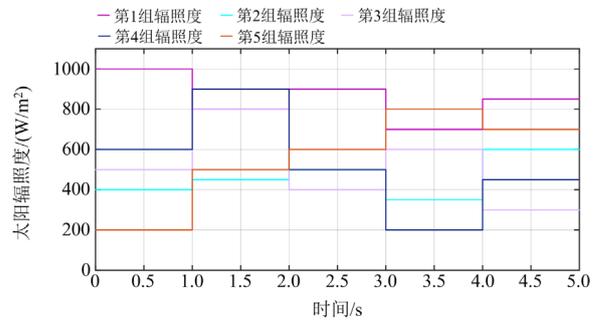
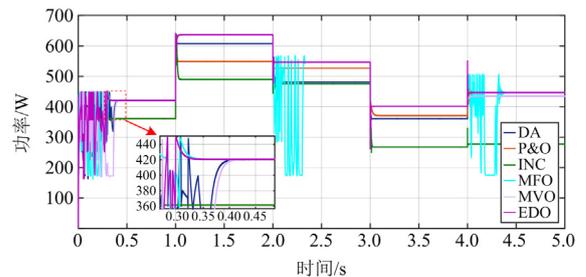
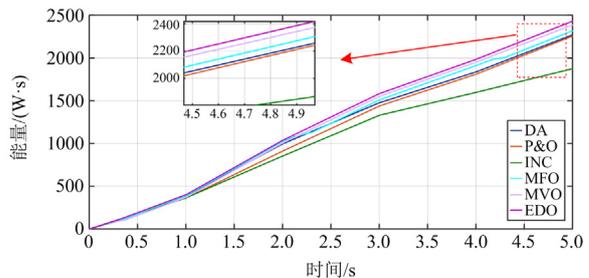


图 10 输入混合 PV-TEG 系统的 5 组太阳辐照度阶跃变化曲线图

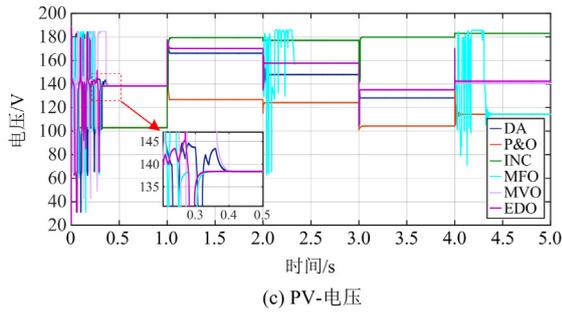
Fig. 10 Five sets of solar irradiance step change plots for the input hybrid PV-TEG system



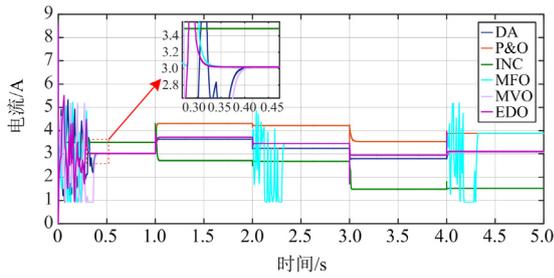
(a) 功率



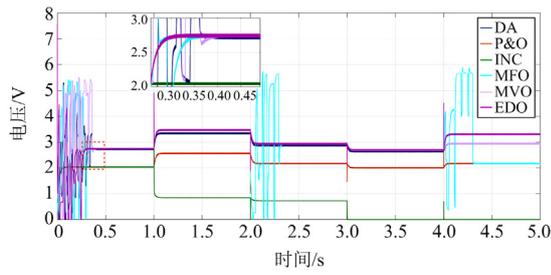
(b) 能量



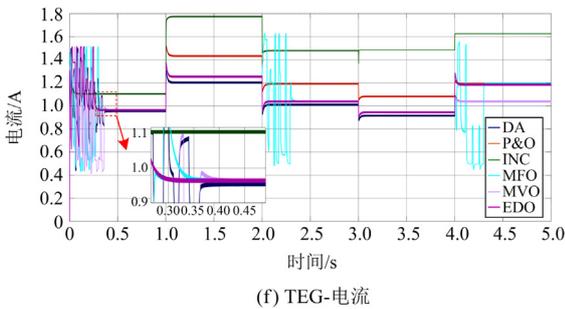
(c) PV-电压



(d) PV-电流



(e) TEG-电压



(f) TEG-电流

图 11 混合 PV-TEG 系统在恒温-太阳辐照度阶跃变化条件下 MPPT 结果对比

Fig. 11 Comparison of MPPT results for hybrid PV-TEG system in constant temperature-solar irradiance step change condition

别高出传统算法 INC 和 P&O 能量输出的 29.62%和 7.73%，这都表明了 EDO 能够更高效地实现 MPPT。此外，太阳辐照度的阶跃变化增加了在输入信号变化期间 MFO 的功率波动，而 EDO、MVO 则大大避免了这一瞬态过程，这证实了基于 EDO 的 MPPT

对 PV-TEG 系统在阶跃输入条件下的强大稳定性。

3.3 太阳辐照度随机变化

为了针对太阳辐照度随机变化情况进行测试和分析，本节采用一个简化的方法生成模拟数据：使用正弦函数来模拟一天中 12 h 太阳辐照度的变化(变化范围在 200~1000 W/m²)，并添加随机噪声以模拟现实中的波动，如图 12 所示。TEG 系统冷侧温度在 25 °C 保持不变，热侧则受到 12 h 的太阳辐照度连续和随机变化的影响。

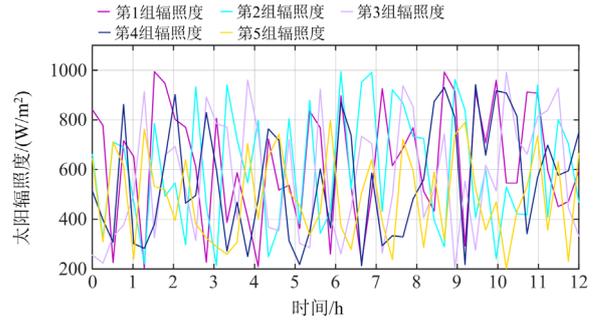
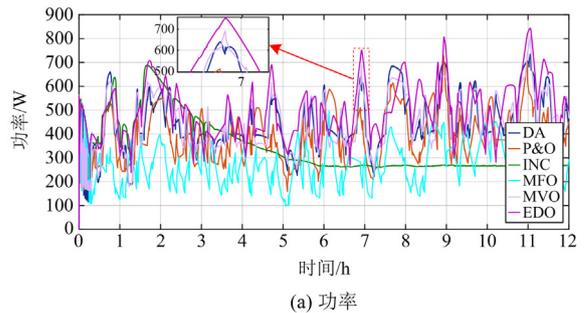


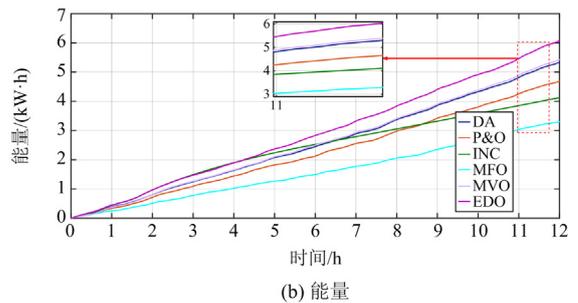
图 12 输入混合 PV-TEG 系统的 5 组太阳辐照度随机变化曲线图

Fig. 12 Five sets of stochastic variation curves of solar irradiance input to the hybrid PV-TEG system

图 13 展示了使用 6 种算法在太阳辐照度连续和随机变化条件下得到的混合 PV-TEG 系统的 MPPT 结果。结合图 13 和输出数据可知，EDO 具有最优越的功率和能量输出，其中，基于 EDO 的混合 PV-TEG 系统输出最高的能量为 6.07 kW·h，分别超过 MFO、INC 和 P&O 能量输出的 83.93%、47.33%



(a) 功率



(b) 能量

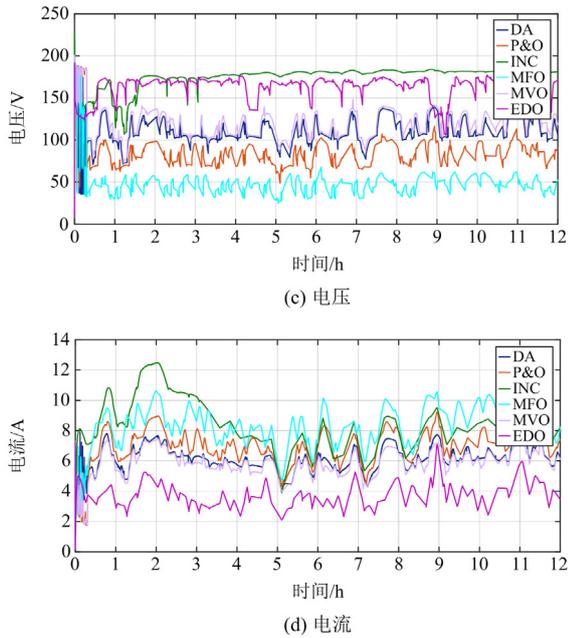


图 13 混合 PV-TEG 系统在恒温-太阳辐照度随机变化条件下 MPPT 结果对比

Fig. 13 Comparison of MPPT results of hybrid PV-TEG system in constant temperature-solar irradiance random variation conditions

和 29.42%，而输出的最大功率为 843.50 W，比 INC 的最大功率输出高出 50.10%，且 EDO 与其余算法相比更不容易陷入局部最优，这说明尽管在辐照度条件发生长期的、连续的和随机的变化，EDO 仍然能够在 6 种算法中脱颖而出，实现最优越的 MPPT 性能。

3.4 香港四季实际算例

本算例利用香港四季的太阳辐照度和温度测量值对 6 种不同的方法进行评估。香港属亚热带季风气候，夏季炎热多雨，气温在 27~33 °C，冬季凉爽干燥，年平均气温 22.8 °C。台风通常由北太平洋西部和东海的热带气旋产生，经常在 7 月~9 月影响香港。这项研究数据是从 2022 年 4 个季节中分别选择一个典型日收集的，采样间隔为 10 min，采样位置及采样数据分别如图 14 和图 15 所示。



图 14 太阳辐照度和温度测量装置的详细地理位置

Fig. 14 Detailed geographic location of the solar radiation and temperature measuring device

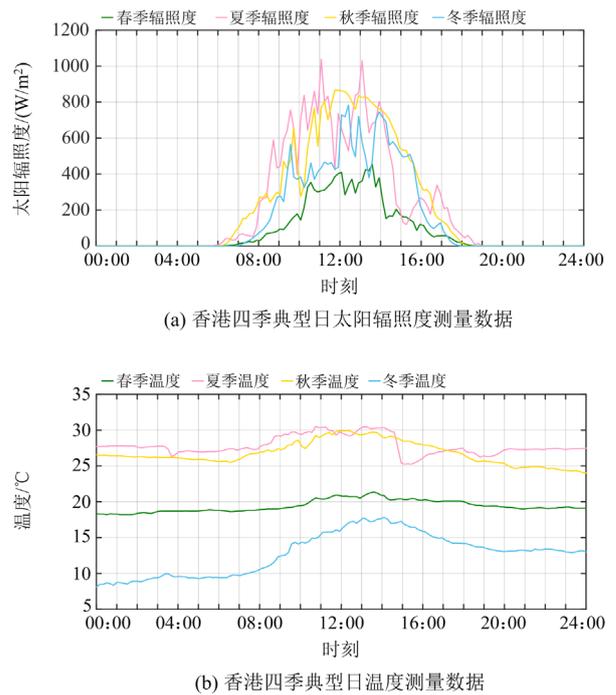
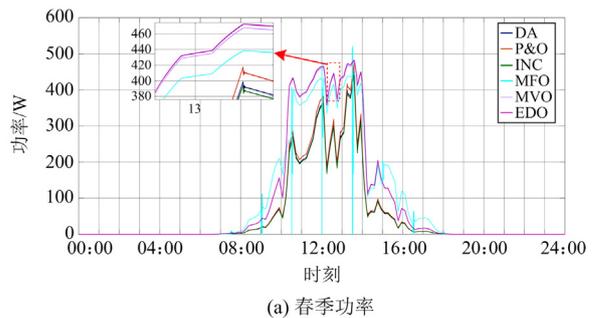


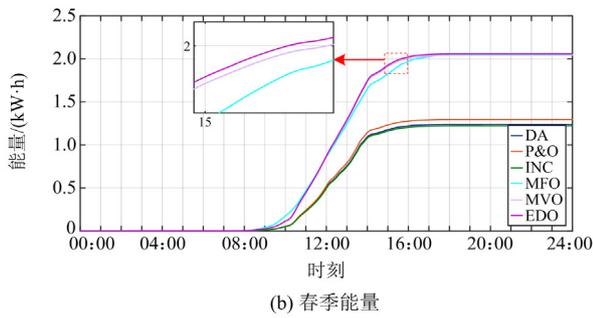
图 15 输入混合 PV-TEG 系统的香港实际算例测量数据

Fig. 15 Measured data of actual cases in Hong Kong with input of hybrid PV-TEG system

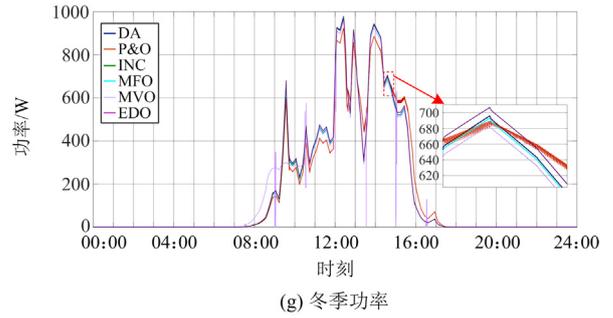
在长期的真实测量数据输入条件下，6 种方法的输出功率和能量如图 16 所示，表 2 为 4 种算例研究结果统计。根据算例测试结果显示，EDO 在春、夏、秋、冬四季典型日输出的能量分别为 2.06、5.54、5.74、3.83 kW·h，均在 6 种算法中是最高的，尤其是在春天低辐照度的条件下 EDO 产生的能量分别超过 DA、INC、P&O 能量输出的 68.85%、66.13% 和 59.69%，且在春季、夏季和秋季均具有最小的 Δv^{avg} ，分别为 24.68%、30.66% 和 20.22%，具有较强的抗干扰性，不容易因外部扰动而导致功率波动。此外，从图 16 的功率曲线图可以看出，尽管 MFO、MVO 获得的功率和能量高于传统算法 P&O 和 INC，但是在不同的输入条件下它们的功率波动会比传统算法更加剧烈和明显，稳定性方面不如传统



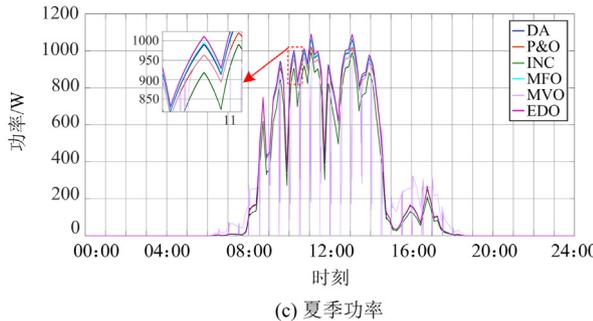
(a) 春季功率



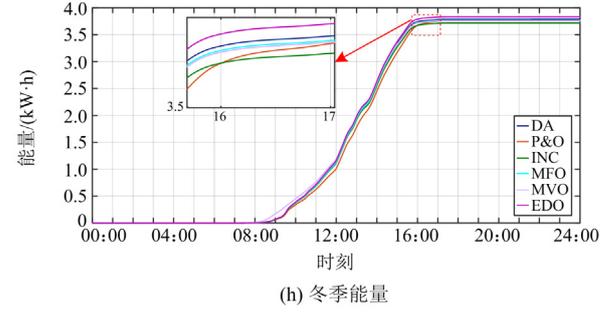
(b) 春季能量



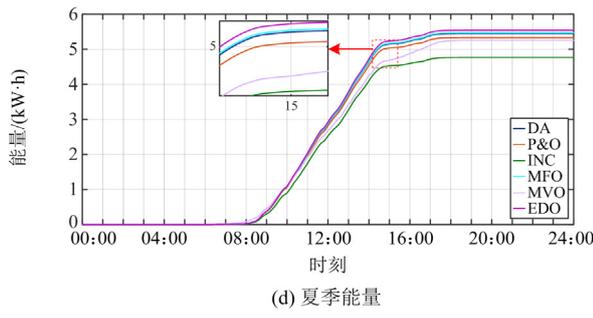
(g) 冬季功率



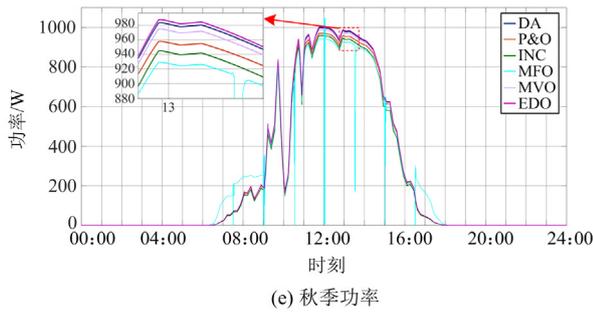
(c) 夏季功率



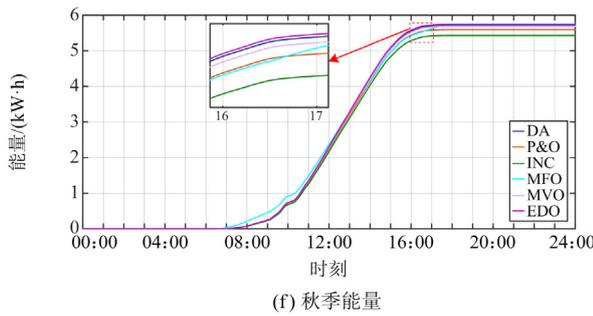
(h) 冬季能量



(d) 夏季能量



(e) 秋季功率



(f) 秋季能量

图 16 混合 PV-TEG 系统通过 6 种方法获得的四季功率和能量
Fig. 16 Four seasons of power and energy obtained by six methods for hybrid PV-TEG system

算法。本节算例分析表明，EDO 总能在四季典型日里获得最突出、最令人满意的优化指标，这验证了其在实际工程中的显著稳定性和可行性。

4 结论

本研究针对混合 PV-TEG 系统提出了一种基于 EDO 的 MPPT 技术。其贡献/优势如下：

1) 为充分收集利用光伏系统产生的废热提高能源利用率，采用光伏与 TEG 结合的混合发电方式，实现了两种不同能源的双重利用，并在一定程度上提高了整体能源转换效率，解决了单一能源转换效率不高的问题。

2) 将一种新颖的基于群体的元启发式算法 EDO 与混合 PV-TEG 系统 MPPT 相结合，提供了一种新的混合 PV-TEG 系统 MPPT 方法，并在多种算例条件下——启动测试、太阳辐照度阶跃变化、太阳辐照度随机变化、香港四季实际测量数据，针对 6 种算法进行了测试、比较和分析，较为全面地验证了所提 EDO 技术的可行性、有效性和优越性。

3) 算例研究表明，不同的测试条件下，EDO 总能够在 6 种算法中脱颖而出，实现最优越的 MPPT 性能，具有较强的通用性和适应性，且其具有较少的控制参数，与其他算法相比在实际应用中更易于实现和调整；此外，EDO 还具有较好的收敛性和稳定性。

表 2 4 种算例研究结果统计
Table 2 Statistics on the results of the four arithmetic studies

算例研究	参数	DA	EDO	INC	MFO	MVO	P&O
启动测试	功率/W	476.30	480.25	394.70	426.42	471.89	373.50
	能量/(W·s)	406.39	448.30	393.43	402.68	402.89	372.36
	$\Delta v^{\max}/\%$	70.13	18.37	66.09	23.90	21.83	69.53
	$\Delta v^{\text{avg}}/\%$	0.050	0.0021	0.020	0.016	0.011	0.041
太阳辐照度阶跃变化	功率/W	609.74	641.63	640.28	641.63	641.63	641.17
	能量/(W·s)	2271.99	2431.31	1875.78	2320.05	2386.93	2256.94
	$\Delta v^{\max}/\%$	47.71	46.87	58.68	58.55	56.91	48.77
	$\Delta v^{\text{avg}}/\%$	0.012	0.011	0.041	0.012	0.013	0.018
太阳辐照度随机变化	能量/(kW·h)	5.33	6.07	4.12	3.30	5.43	4.69
	$\Delta v^{\max}/\%$	85.25	79.94	84.33	81.17	85.67	80.06
	$\Delta v^{\text{avg}}/\%$	11.56	15.54	2.17	18.05	12.22	14.97
春季	功率/W	451.96	482.96	446.46	445.94	477.69	472.58
	能量/(kW·h)	1.24	2.06	1.22	2.05	2.04	1.29
	$\Delta v^{\max}/\%$	378.10	350.85	379.10	301.57	351.16	379.19
	$\Delta v^{\text{avg}}/\%$	43.31	24.68	43.40	25.31	26.59	43.37
香港四季实际算例	功率/W	1060.00	1090.22	991.15	1066.47	990.36	1021.13
	能量/(kW·h)	5.45	5.54	4.77	5.47	5.26	5.33
	$\Delta v^{\max}/\%$	209.04	208.13	226.31	208.82	198.71	210.18
	$\Delta v^{\text{avg}}/\%$	31.31	30.66	34.46	31.37	30.75	30.82
秋季	功率/W	998.23	1002.77	958.89	941.40	988.92	970.18
	能量/(kW·h)	5.72	5.74	5.43	5.69	5.68	5.59
	$\Delta v^{\max}/\%$	217.87	206.69	219.19	217.71	218.21	218.87
	$\Delta v^{\text{avg}}/\%$	22.21	20.22	22.35	21.31	22.18	22.12
冬季	功率/W	978.67	970.45	958.35	973.56	958.32	923.59
	能量/(kW·h)	3.79	3.83	3.72	3.77	3.76	3.76
	$\Delta v^{\max}/\%$	340.64	328.58	339.41	340.33	342.17	247.03
	$\Delta v^{\text{avg}}/\%$	42.40	41.74	42.36	42.39	37.04	36.33

这些优势都有利于混合 PV-TEG 系统在动态变化的环境中稳定、高效地实现 MPPT。

4) 在长期的真实测量数据输入条件下, EDO 在春、夏、秋、冬四季典型日输出的能量均在 6 种算法中最高, 尤其是在春天低辐照度的条件下 EDO 产生的能量分别超过 DA、INC、P&O 能量输出的 68.85%、66.13%和 59.69%, 表明 EDO 在动态工作条件下和 NUTD 影响下具有优秀的全局搜索能力, 能够有效避免陷入 LMPP。

5) EDO 在启动测试和阶跃测试中得到的 Δv^{avg} 和 Δv^{\max} 都是 6 种算法中最小的, 且在春季、夏季和秋季也均具有最小的 Δv^{avg} , 分别为 24.68%、30.66%和 20.22%, 展示出了较强的抗干扰性, 不容易因外部问题扰动而导致功率波动, 并未出现在 GMPP 附近波动或引发功率振荡。

6) 基于 EDO 的混合系统 MPPT 技术可针对相关领域的研究及其他类似能源系统中的 MPPT 问题提供有价值的经验和见解。

在未来还需要进行硬件在环实验来进一步验证各种算法的 MPPT 性能, 以评估系统的硬件可实施性。此外, 采用不同类型的 PV 电池和 TEG 材料、不同的混合系统模型、不同的规模等都可能对混合系统的 MPPT 性能产生影响, 在实际应用中还需要对此做进一步的探究, 以实现最佳的能量转换和性能。

参考文献

- [1] YANG B, XIE R, DUAN J H, et al. State-of-the-art review of MPPT techniques for hybrid PV-TEG systems: modeling, methodologies, and perspectives[J]. Global Energy Interconnection, 2023, 6(5): 567-591.
- [2] 程杉, 傅桐, 李泮洋, 等. 含高渗透可再生能源的配电网灵活性供需协同规划[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(22): 1-12.
CHENG Shan, FU Tong, LI Fengyang, et al. Flexible supply demand collaborative planning for distribution networks with high penetration of renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 1-12.

- [3] 何胜华, 范必双, 夏侯智联, 等. 一种新颖的模糊自耦合 PI 在风力机 MPPT 控制中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(9): 46-55.
HE Shenghua, FAN Bishuang, XIAHOU Zhicong, et al. A novel fuzzy self-coupled PI for wind turbine MPPT control[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(9): 46-55.
- [4] 岳舟, 李浩天, 廖辰星, 等. 一种光伏发电用高增益多电平逆变器[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(16): 136-148.
YUE Zhou, LI Haotian, LIAO Chenxing, et al. A high gain multilevel inverter for photovoltaic power generation[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(16): 136-148.
- [5] 杨博, 李玉林, 孙一心, 等. 基于博弈论的微电网电力交易综述[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2023, 48(3): 105-118.
YANG Bo, LI Yulin, SUN Yixin, et al. A critical review of microgrid power trading based on game theory[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science), 2023, 48(3): 105-118.
- [6] 程先龙, 保佑智, 何度江, 等. 基于 EMD-ELM-LSTM 的短期风电功率预测[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2023, 48(6): 78-87.
CHENG Xianlong, BAO Youzhi, HE Dujiang, et al. Short-term wind power prediction based on EMD-ELM-LSTM[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science), 2023, 48(6): 78-87.
- [7] MIRZA A F, MANSOOR M, ZHAN K, et al. High-efficiency swarm intelligent maximum power point tracking control techniques for varying temperature and irradiance[J]. Energy, 2021, 228: 1-27.
- [8] 杨海柱, 李庆华, 张鹏. 基于 tGSSA-DELM 的短期光伏发电功率预测[J]. 智慧电力, 2023, 51(10): 70-77.
YANG Haizhu, LI Qinghua, ZHANG Peng. Short-term photovoltaic power generation prediction based on tGSSA-DELM[J]. Smart Power, 2023, 51(10): 70-77.
- [9] 罗茜, 陈卓, 郝正航, 等. 基于新型趋近律的光伏 MPPT 控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 139-153.
LUO Qian, CHEN Zhuo, HAO Zhenghang, et al. MPPT control strategy based on a new reaching law for a photovoltaic power system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 139-153.
- [10] YANG B, ZHU T J, WANG J B, et al. Comprehensive overview of maximum power point tracking algorithms of PV systems under partial shading condition[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 268: 1-24.
- [11] 高娟, 吴润泽, 郝建红, 等. 基于光伏供能的孤岛微电网无线传感网能量调度优化策略[J]. 电力建设, 2023, 44(4): 119-129.
GAO Juan, WU Runze, HAO Jianhong, et al. Energy scheduling for solar-powered isolated microgrids with intelligent monitoring based on WSN[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(4): 119-129.
- [12] 周步祥, 吴晨旭, 邱一苇, 等. 计及光伏出力时序不确定性的电制氢多机集群优化调度[J]. 电力建设, 2023, 44(9): 108-117.
ZHOU Buxiang, WU Chenxu, QIU Yiwei, et al. Optimal scheduling of multi-electrolyzer power-to-hydrogen clusters considering the temporal uncertainty of photovoltaic power[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(9): 108-117.
- [13] CAI Y, WANG W W, LIU C W, et al. Performance evaluation of a thermoelectric ventilation system driven by the concentrated photovoltaic thermoelectric generators for green building operations[J]. Renewable Energy, 2020, 147: 1565-1583.
- [14] WEN X, JI J, SONG Z, et al. Comparison analysis of two different concentrated photovoltaic/thermal-TEG hybrid systems[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 234: 1-17.
- [15] 李大虎, 周泓宇, 周悦, 等. 基于多元宇宙优化算法的混合光伏-热电系统 MPPT 设计[J]. 中国电力, 2023, 56(11): 197-205.
LI Dahu, ZHOU Hongyu, ZHOU Yue, et al. Multi-verse optimization-based MPPT design for PV-TEG system[J]. Electric Power, 2023, 56(11): 197-205.
- [16] KANAGARAJ N, AL-ANSI M. Maximum power extraction control algorithm for hybrid renewable energy system[J]. Computer Systems Science & Engineering, 2023, 45(1): 769-784.
- [17] ALTWALLBAH N M M, RADZI M A M, AZIS N, et al. New perturb and observe algorithm based on trapezoidal rule: uniform and partial shading conditions[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 264: 1-23.
- [18] SUN C H, LING J, WANG J. Research on a novel and improved incremental conductance method[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 15700.
- [19] BAI L. Maximum power point tracking control of PV-TE hybrid power generation system in greenhouse[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2022: 1-9.
- [20] MIRZA A F, SZCZEPANKOWSKI P, LUSZCZ J. Cleaner energy for sustainable future using hybrid photovoltaics-thermoelectric generators system under non-static conditions using machine learning based control technique[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 53: 1-17.
- [21] OBAID W, HAMID A K. Grid-connected hybrid solar/thermoelectric power system with hybrid INC/PSO/PO MPPT system in Sharjah, United Arab Emirates[C]//2022 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET), February 21-24, 2022, Dubai, United Arab Emirates: 1-5.
- [22] MIRZA A F, MANSOOR M, ZERBAKHT K, et al. High-efficiency hybrid PV-TEG system with intelligent control to harvest maximum energy under various non-static operating conditions[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 320: 1-16.
- [23] ABDEL BASSET M, EL SHAHAT D, JAMEEL M, et al. Exponential distribution optimizer (EDO): a novel

- math-inspired algorithm for global optimization and engineering problems[J]. *Artificial Intelligence Review*, 2023: 1-72.
- [24] MIRJALILI S. Moth-flame optimization algorithm: a novel nature-inspired heuristic paradigm[J]. *Knowledge-based Systems*, 2015, 89: 228-249.
- [25] WU Z Q, CAO B L, HOU L C, et al. Maximum power point tracking for photovoltaic system based on improved multi-verse algorithm[J]. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2021, 43(12): 3735-3742.
- [26] MERAIHI Y, RAMDANE-CHERIF A, ACHELI D, et al. Dragonfly algorithm: a comprehensive review and applications[J]. *Neural Computing and Applications*, 2020, 32: 16625-16646.
- [27] 刘斌, 谈竹奎, 唐赛秋, 等. 基于数据预测启发式算法的光伏电池参数识别[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(23): 72-79.
- LIU Bin, TAN Zhukui, TANG Saiqiu, et al. Photovoltaic cell parameter extraction using data prediction based on a meta-heuristic algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(23): 72-79.
- [28] YANG B, YE H Y, WANG J B, et al. PV arrays reconfiguration for partial shading mitigation: recent advances, challenges and perspectives[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 247: 1-28.
- [29] COTFAS P A, COTFAS D T. Comprehensive review of methods and instruments for photovoltaic-thermoelectric generator hybrid system characterization[J]. *Energies*, 2020, 13(22): 1-32.
- [30] LEELAVATHI M, KUMAR V S. Deep neural network algorithm for MPPT control of double diode equation based PV module[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 62: 4764-4771.
- [31] BABU C, PONNAMBALAM P. The theoretical performance evaluation of hybrid PV-TEG system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 173: 450-460.
- [32] PILLAI D S, RAJASEKAR N. Metaheuristic algorithms for PV parameter identification: a comprehensive review with an application to threshold setting for fault detection in PV systems[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82: 3503-3525.
- [33] YANG B, WANG J B, ZHANG X S, et al. Comprehensive overview of meta-heuristic algorithm applications on PV cell parameter identification[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 208: 112595.
- [34] CHOULLI I, ELYAQOUTI M, SAADAoui D, et al. Hybrid optimization based on the analytical approach and the particle swarm optimization algorithm (Ana-PSO) for the extraction of single and double diode models parameters[J]. *Energy*, 2023, 283: 1-20.
- [35] YANG B, YU T, ZHANG X S, et al. Dynamic leader based collective intelligence for maximum power point tracking of PV systems affected by partial shading condition[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 179: 286-303.
- [36] YANG B, ZHONG L E, ZHANG X S, et al. Novel bio-inspired memetic salp swarm algorithm and application to MPPT for PV systems considering partial shading condition[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 215: 1203-1222.
- [37] MAMUR H, COBAN Y. Detailed modeling of a thermoelectric generator for maximum power point tracking[J]. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 2020, 28(1): 124-139.
- [38] ZHANG X S, TAN T, YANG B, et al. Greedy search based data-driven algorithm of centralized thermoelectric generation system under non-uniform temperature distribution[J]. *Applied Energy*, 2020, 260: 1-15.
- [39] LAMBA R, KAUSHIK S C. Modeling and performance analysis of a concentrated photovoltaic-thermoelectric hybrid power generation system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 115: 288-298.
- [40] RUZAIMI A, HASSAN W Z W, AZIS N, et al. Performance analysis of thermoelectric generator implemented on non-uniform heat distribution of photovoltaic module[J]. *Energy Reports*, 2021, 7: 2379-2387.
- [41] YANG B, WU S C, H J X, et al. Salp swarm optimization algorithm based MPPT design for PV-TEG hybrid system under partial shading conditions[J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 292: 1-27.
- [42] SINGH S, IBEAGWU O I, LAMBA R. Thermodynamic evaluation of irreversibility and optimum performance of a concentrated PV-TEG cogenerated hybrid system[J]. *Solar Energy*, 2018, 170: 896-905.
- [43] YANG B, ZHANG M T, ZHANG X S, et al. Fast atom search optimization based MPPT design of centralized thermoelectric generation system under heterogeneous temperature difference[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 248: 1-15.
- [44] REFAAT A, ELBAZ A, KHALIFA A E, et al. Performance evaluation of a novel self-tuning particle swarm optimization algorithm-based maximum power point tracker for port on exchange membrane fuel cells under different operating conditions[J]. *Energy Conversion and Management*, 2024, 301: 1-18.

收稿日期: 2023-12-15; 修回日期: 2024-04-02

作者简介:

杨博(1988—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为基于人工智能的新能源系统优化与控制; E-mail: yangbo_ac@outlook.com

谢蕊(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为混合光伏-温差系统最大功率点跟踪; E-mail: 2511146029@qq.com

韩一鸣(1993—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为特高压交流输电线路新型继电保护与故障定位。E-mail: 2038173876@qq.com

(编辑 周金梅)