

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191519

# 基于自适应罗盘搜索的集中式温差发电系统 MPPT 设计

孙立明<sup>1</sup>, 杨博<sup>2</sup>

(1. 广州水沐清华科技有限公司, 广东 广州 510898; 2. 昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500)

**摘要:** 提出了一种新型自适应罗盘搜索(Adaptive Compass Search, ACS)算法, 用于非均匀温差分布(Non-uniform Temperature Distribution, NTD)条件下的集中式温差发电(Thermoelectric Generation, TEG)系统最大功率点跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)。集中式 TEG 系统仅使用一个 MPPT 变换器, 因此与组串式和模块式的 TEG 系统结构相比, 其运行与维护成本较低。然而, 在 NTD 条件下, 集中式 TEG 系统通常会出现多个最大功率点(Maximum Power Point, MPP)。为有效寻找集中式 TEG 系统的全局 MPP, 采用了一种基于探索方向的自适应序列方式, 通过利用过去的搜索结果来显著提高 ACS 的全局搜索能力。通过三个算例对 ACS 的 MPPT 性能进行了研究, 即温度恒定、温度阶跃变化以及随机温度变化。仿真结果表明, 与扰动观测(Perturb and Observe, P&O)算法、粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法和罗盘搜索(Compass Search, CS)算法相比, ACS 能以更快的速度和更高的收敛稳定性获得高质量的全局 MPP。

**关键词:** 集中式温差发电系统; 最大功率点跟踪; 非均匀温差分布; 自适应罗盘搜索

## MPPT design of centralized thermoelectric generation system using adaptive compass search

SUN Liming<sup>1</sup>, YANG Bo<sup>2</sup>

(1. Guangzhou Shuimutech Co., Ltd., Guangzhou 510898, China; 2. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

**Abstract:** This paper proposes a novel Adaptive Compass Search (ACS) for Maximum Power Point Tracking (MPPT) of a centralized Thermoelectric Generation (TEG) system under the condition of Non-uniform Temperature Distribution (NTD). The centralized TEG system employs only one MPPT converter and thus the overall costs of operation and maintenance can be significantly reduced compared to that of string-type and modularized configurations. However, multiple Maximum Power Points (MPPs) usually appear in a centralized TEG system under an NTD condition. In order to effectively and efficiently seek the global MPP, an adaptive sequence of exploration directions is employed to considerably enhance the global searching ability of ACS through the previous searching results. Three case studies are carried out to study the MPPT performance of ACS, including constant temperature difference, step change of temperature, and random temperature variation. Simulation results show that ACS can obtain a high-quality global MPP with a faster speed and a higher convergence stability than those of Perturb and Observe (P&O), Particle Swarm Optimization (PSO), and Compass Search (CS), respectively.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61963020).

**Key words:** centralized thermoelectric generation system; maximum power point tracking; non-uniform temperature distribution; adaptive compass search

## 0 引言

近年来, 能源危机的日益严重和传统化石燃料带来的环境污染, 引发了人们对太阳能、风能、水

能、地热能、波浪能、潮汐能和生物质能等新能源的巨大关注<sup>[1-3]</sup>。众所周知, 新能源的利用率较低, 其中大部分的能量以废热的形式排放到大气中, 不仅造成了资源的浪费, 还加剧了温室效应<sup>[4]</sup>。因此, 如何有效利用废热中的能量成为了目前新能源发电领域的一个重要研究方向。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61963020)

温差发电(Thermoelectric Generation, TEG)作为一种有效利用废热的绿色发电方式,其能够将热能转换成电能<sup>[5-6]</sup>。TEG主要由物理和电气稳定的半导体器件构成,具有可靠性高、寿命长、重量轻等突出特点。然而,受制于高成本和低效率,TEG的应用仅限于医疗、军事、远程和空间应用。近年来,随着热电材料的研发,其安装成本和发电效率问题得到缓解,TEG开始广泛应用于生产生活。如太阳能热电系统<sup>[7]</sup>、天然气锅炉<sup>[8]</sup>、生物质燃油加热器<sup>[9]</sup>、热电联产系统<sup>[10]</sup>等。

TEG通常用于具有时变温差的动态环境中,因此可通过有效且精确地调整其最佳电气运行点来获得最大功率,即最大功率点跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)<sup>[11]</sup>。迄今为止,已有大量专家学者针对TEG系统进行了MPPT的技术研究。例如,文献[12]提出了一种扰动观测(Perturb and Observe, P&O)算法,通过扰动TEG系统的运行点,观察其输出功率,以确定最大输出功率的变化方向。文献[13]采用增量电导法,通过比较电导导数与瞬时电导比值的增量来搜索MPP。但是,在温度变化较大时,其搜索效率会显著降低,且在最大功率点(Maximum Power Point, MPP)附近存在较大的稳态振荡,进而引起不必要的功率损耗。文献[14]采用一种恒定电压法,通过周期性地检测TEG模块的开路电压 $U_{oc}$ ,来控制TEG模块的输出电压,实现TEG模块的MPPT。文献[15]提出了一种基于短路电流比例法的MPPT,对TEG负载进行周期性地断开,以测量其短路电流。文献[16]设计了一种基于线性外推的MPPT算法,该算法使用了两个随机工作点的电流-电压坐标来计算新的MPP位置。文献[17]提出了一种极限追踪控制法对TEG的MPP进行寻优,其可在未知TEG模型和成本函数的情况下在线获取MPP。

虽然上述MPPT技术能有效应用于组串式TEG系统和模块式TEG系统的MPPT。但上述两类TEG系统包含了大量MPPT变换器,极大增加了总体运行成本和未来维护的成本。特别是在非均匀温差分布(Non-uniform Temperature Distribution, NTD)条件下,其往往需要大量的MPPT变换器来保证相对较高的发电效率。与之相比,集中式TEG系统仅使用一个MPPT变换器,所有TEG都以串联-并联形式排列,能极大地降低控制成本。另外,上述MPPT策略容易使系统陷入局部最大功率点(Local Maximum Power Point, LMPP),导致发电总效率降低。

相比之下,启发式算法具有灵活、无模型、无梯度机制以及能避免局部最优的特点,可作为集中式TEG系统在NTD条件下实现MPPT的有效方式。

但此类算法通常需要大量的种群进行迭代,计算量较大,难以满足集中式TEG系统全局最优解的快速逼近要求。

基于上述讨论,本文提出了一种自适应罗盘搜索(Adaptive Compass Search, ACS)算法,该算法是一种模式搜索算法,采用基于探索方向的自适应序列方式,能有效实现NTD条件下集中式TEG系统的全局MPPT。且由于仅使用一个单Agent进行极值优化,即算法采用单个个体进行寻优<sup>[18]</sup>,取代传统启发式算法采用的种群(多个个体)寻优,能显著提高系统的计算速率。最后,本文基于温度恒定,温度阶跃变化和随机温度变化三个算例,将ACS算法、P&O算法、粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)<sup>[19]</sup>算法和罗盘搜索(Compass Search, CS)<sup>[20]</sup>算法的MPPT性能进行比较,仿真结果验证了ACS的有效性和优势。

## 1 集中式 TEG 系统建模

### 1.1 TEG 模块建模

TEG系统可以看作是具有内阻的串联电压源,其开路电压 $U_{oc}$ 和内部电阻 $R_{TEG}$ 随温度而变化,图1给出了TEG模块的等效电路。若热端和冷端之间的温差保持恒定,则由TEG模块产生的开路电压 $U_{oc}$ 可以描述为<sup>[13]</sup>

$$U_{oc} = \alpha_{pn}(T_h - T_c) = \alpha_{pn}\Delta T \quad (1)$$

式中: $\alpha_{pn}$ 表示塞贝克(Seebeck)系数; $T_h$ 和 $T_c$ 分别表示热端和冷端的温度; $\Delta T$ 表示热端和冷端之间的温差。

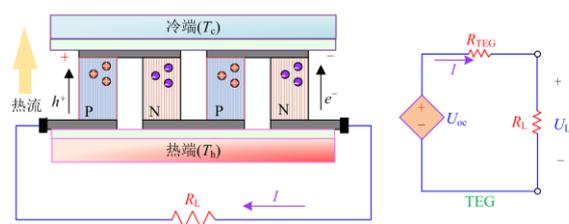


图 1 TEG 模块的等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of a TEG module

材料的塞贝克系数 $\alpha_{pn}$ 由塞贝克效应引起,其符号和大小取决于组成热电偶的两种导体的热电特性和结点的温度差。当电流通过有温度梯度的均匀导体时,每个热电元件独立地产生或吸收热量,这一现象称为汤姆逊(Thomson)效应,所吸放的热量称为汤姆逊热。在此,汤姆逊系数 $\tau$ 可描述为<sup>[13]</sup>

$$\tau = T \frac{d\alpha_{pn}}{dT} \quad (2)$$

式中,  $T$  表示平均温度。

对于确定的TEG模块,  $\tau \neq 0$ 。因此, 塞贝克系数会随平均温度的变化而变化, 其方程表达式如式(3)<sup>[21]</sup>所示。

$$\alpha(T) = \alpha_0 + \alpha_1 \ln(T/T_0) \quad (3)$$

式中:  $\alpha_0$  表示塞贝克系数的初始变化率;  $\alpha_1$  表示塞贝克系数的变化率;  $T_0$  表示参考温度。

根据基本电路理论, TEG模块的输出功率  $P_{\text{TEG}}$  可描述为

$$P_{\text{TEG}} = (\alpha_{\text{pn}} \Delta T)^2 \frac{R_L}{(R_L + R_{\text{TEG}})^2} \quad (4)$$

式中,  $R_{\text{TEG}}$  和  $R_L$  分别为TEG模块内阻和负载电阻。

### 1.2 TEG 系统结构

单个TEG模块的输出电压低、功率小, 因此需要将多个模块串/并联构成TEG系统, 以获得较高的电压和功率<sup>[22]</sup>。当TEG系统运行在NTD条件下时, 其功率损耗将显著增加。本文旨在研究NTD条件下集中式TEG系统的MPPT, 使其能够快速、可靠地寻找全局最大功率点(Global Maximum Power Point, GMPP), 并以最低的运行和维护成本获得最高的发电效率。图2给出了TEG系统的三种典型结构:

1) 集中式TEG系统: 它以串/并联形式将TEG模块和一个MPPT变换器组合在一起, 如图2(a)所示。其变换器的运行和维护的成本最低, 但NTD条件下的功率损耗最高<sup>[23]</sup>。

2) 组串式TEG系统: 每个TEG串沿热源等温线放置, 并与一个MPPT变换器连接, 如图2(b)所示。其变换器的运行和维护成本及NTD条件下的功率损耗均居于集中式TEG系统和模块化TEG系统之间。

3) 模块式TEG系统: 每个TEG模块使用相应的MPPT变换器独立跟踪其自身的MPP, 如图2(c)所示。其变换器运行和维护的成本最高, 但NTD条件下的功率损耗最低。

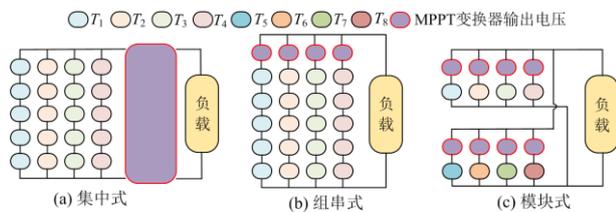


图2 TEG系统的3种典型结构

Fig. 2 Three typical configurations of TEG system

### 1.3 NTD 条件下的集中式 TEG 系统建模

由于集中式TEG系统常应用于具有时变温差的动态环境中, 因此其输出功率会随运行条件的变化而变化。假设集中式TEG系统中有  $N$  个串/并联的

TEG模块, 则其模型可描述为<sup>[13]</sup>

$$I_i = \begin{cases} (U_{\text{oci}} - U_{\text{Li}}) \frac{I_{\text{sci}}}{U_{\text{oci}}} = I_{\text{sci}} - \frac{U_{\text{Li}}}{R_{\text{TEGi}}}, & \text{如果 } 0 \leq U_{\text{Li}} \leq \frac{I_{\text{sci}}}{U_{\text{oci}}} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (5)$$

$i = 1, 2, L, N$

式中:  $U_{\text{oci}}$  和  $I_{\text{sci}}$  分别表示第  $i$  个TEG模块的开路电压和短路电流;  $U_{\text{Li}}$  为第  $i$  个TEG模块的MPPT变换器输出电压;  $R_{\text{TEGi}}$  为第  $i$  个TEG模块的内阻。由第  $i$  个TEG模块输出的功率  $P_{\text{TEGi}}$  可描述为

$$P_{\text{TEGi}} = \begin{cases} U_{\text{Li}} I_i = I_{\text{sci}} U_{\text{Li}} - \frac{I_{\text{sci}}}{R_{\text{TEGi}}} U_{\text{Li}}^2, & \text{如果 } 0 \leq U_{\text{Li}} \leq \frac{I_{\text{sci}}}{U_{\text{oci}}} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (6)$$

$i = 1, 2, L, N$

其中, 集中式TEG系统的总输出功率  $P_{\text{TEG}\Sigma}$  可由以下方程获得

$$P_{\text{TEG}\Sigma} = \sum_{i=1}^N P_{\text{TEGi}} \quad (7)$$

由于所有TEG模块都连接到同一个MPPT变换器上, 因此研究集中式TEG系统的总输出功率  $P_{\text{TEG}\Sigma}$  与MPPT变换器输出电压  $U_L$  之间的关系非常重要, 如图3所示。由图可见, 总体TEG输出功率曲线呈多峰特性, 需设计有效的MPPT算法搜索GMPP。

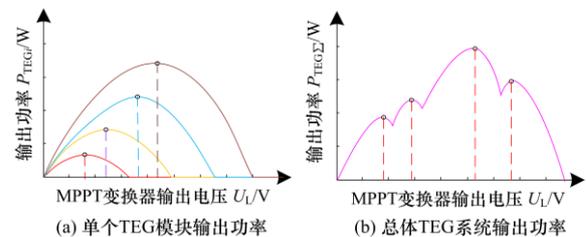


图3 集中式 TEG 系统的总输出功率与 MPPT 变换器输出电压之间的关系

Fig. 3 Relationship between the total output power and the output voltage of MPPT converter of the centralized TEG system

## 2 自适应罗盘搜索

### 2.1 罗盘搜索

罗盘搜索(Compass Search, CS)是一种经典的搜索方式, 分为三个步骤: (a) 模式矩阵确定; (b) 探索移动; (c) 模式移动<sup>[24]</sup>。图4给出了双变量极值优化问题的搜索过程。在指定的一个初始点, 有往东、往南、往西、往北四个寻优方向(见图4(a)); 根据搜索点的比较, 算法依次往北、往东、往北更

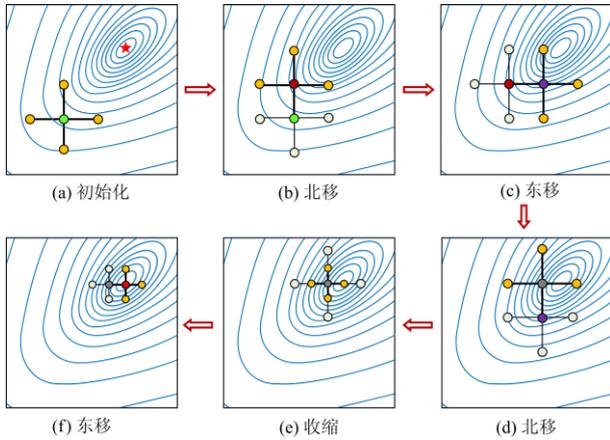


图 4 双变量极值优化问题的罗盘搜索过程

Fig. 4 Searching process of CS for a two-variable minimum optimization

新位置, 如图 4(b)一图 4(d); 当四个方向都找不到更好的解时, 便收缩寻优范围, 即减小搜索步长, 如图 4(e); 基于新的步长, 再继续寻优(见图 4(f)), 直到算法满足收敛条件。

### 1) 模式矩阵确定

针对  $n$  个变量的优化, 可以基于当前点为所有变量选择  $2n$  种搜索模式, 其中每个变量具有两种基本搜索模式(即, 正向搜索和反向搜索)。模式矩阵如下所示<sup>[24]</sup>。

$$M = \begin{bmatrix} \Delta_1 & -\Delta_1 & 0 & 0 & L & L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta_2 & -\Delta_2 & L & L & 0 & 0 \\ M & M & M & M & \Delta_i & -\Delta_i & M & M \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L & L & \Delta_n & -\Delta_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中,  $\Delta_i$  表示第  $i$  个优化变量的步长。

### 2) 探索移动

对于每个优化变量, 需基于当前解  $x_k$ , 实施探索移动以找到潜在的更高质量的解, 其步骤如下<sup>[24]</sup>。

步骤 1: 设置参数  $i=0$ 、基准点  $x_b = x_k$ 。

步骤 2: 实施正向搜索:  $x^{\text{new}} = x_b + M(:, 2i-1)$ 。

步骤 3: 若  $F_k(x^{\text{new}}) < F_k(x_b)$ , 则令  $x_b = x^{\text{new}}$ , 执行步骤 5; 否则实施反向搜索:  $x^{\text{new}} = x_b + M(:, 2i)$ , 执行步骤 4。

步骤 4: 若  $F_k(x^{\text{new}}) < F_k(x_b)$ , 则令  $x_b = x^{\text{new}}$ , 执行步骤 5。

步骤 5: 设置  $i=i+1$ ; 若  $i>n$ , 则终止; 否则执行步骤 2。

其中:  $k$  表示第  $k$  次迭代;  $x^{\text{new}}$  表示新的搜索结果;  $F$  表示适应度函数。适应度值越小, 表示极值优化的解的质量越高。

### 3) 模式移动

在进行大范围的探索移动后, CS 可以根据搜索结果更新现有的最优解。基于适应度函数评价, 如果新搜索方案的解质量更高, 则替换当前最优解, 否则为了进行更有效的搜索, 将缩小优化变量的步长, 如下所示<sup>[24]</sup>。

$$x_{k+1} = \begin{cases} x^{\text{new}}, & \text{如果 } F_k(x^{\text{new}}) < F_k(x_b) \\ x_k, & \text{否则} \end{cases} \quad (9)$$

$$\Delta_{i,k+1} = \begin{cases} \Delta_{i,k}, & \text{如果 } F_k(x^{\text{new}}) < F_k(x_b) \\ \gamma \Delta_{i,k}, & \text{否则} \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $\gamma$  表示步长的衰减系数。

## 2.2 探索方向的自适应序列

在移动过程中, 如果 CS 通过正向搜索找到了更好的解, 则可能会在反向搜索中错过潜在的解, 如图 5(a)所示。为了提高全局搜索能力, 在搜索过程中引入了探索方向的自适应序列, 它可以利用已有的搜索结果确定每个优化变量的最佳搜索方向, 具体如下:

$$x^{\text{new}} = \begin{cases} x_b + M(:, 2i-1), & \text{如果 } r < p_k \\ x_b + M(:, 2i), & \text{否则} \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $r$  是  $[0,1]$  之间的随机数。  $p_{k+1}$  表示第  $k+1$  次迭代时正向搜索的动态选择概率, 可通过以下方式更新:

$$p_{k+1} = \begin{cases} p_k + \beta(1-p_k), & \text{如果 } r < p_k \text{ 且 } F_k(x^{\text{new}}) < F_k(x_b) \\ p_k(1-\beta), & \text{如果 } r < p_k \text{ 且 } F_k(x^{\text{new}}) > F_k(x_b) \\ p_k(1-\beta), & \text{如果 } r \geq p_k \text{ 且 } F_k(x^{\text{new}}) < F_k(x_b) \\ p_k + \beta(1-p_k), & \text{如果 } r \geq p_k \text{ 且 } F_k(x^{\text{new}}) > F_k(x_b) \\ p_k, & \text{如果 } F_k(x^{\text{new}}) = F_k(x_b) \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $\beta$  表示选择概率的增量比, 它保证了  $p_{k+1}$  的范围始终为  $[0,1]$ 。由于正/反向搜索的动态选择概率总和始终为 1, 因此反向搜索的动态选择概率等于  $1-p_{k+1}$ , 如图 5(b)所示。

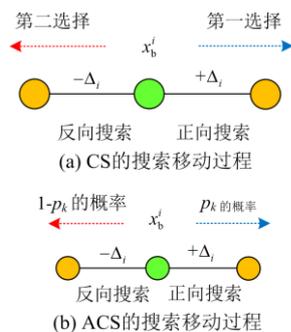


图 5 搜索移动比较

Fig. 5 Comparison of exploration move

### 3 基于 ACS 的集中式 TEG 系统 MPPT 设计

#### 3.1 控制变量

集中式 TEG 系统旨在通过改变 MPPT 变换器输出电压以实现 NTD 条件下的全局 MPPT, 如图 6 所示。由于集中式 TEG 系统通常利用 DC-DC 调压器<sup>[14]</sup>向外部负载提供能量, 因此可以通过调整 PWM 的占空比来控制 MPPT 变换器输出电压。为了确保占空比被限制在其上、下限之间, 需进行以下设置:

$$x^{\text{new}} = \begin{cases} 0, & \text{如果 } x^{\text{new}} < 0 \\ 1, & \text{如果 } x^{\text{new}} > 1 \end{cases} \quad (13)$$

与此同时, 需将 ACS 的初始解限定在搜索区间的中点, 以保证在初始搜索过程中进行更加广泛的搜索。

#### 3.2 适应度函数

适应度函数由目标函数和约束条件构成。其中, 目标函数可以直接转换为适应度函数。为了使集中式 TEG 系统的总输出功率达到最大, 其第  $k$  次迭代的适应度函数  $F_k$  可通过以下方式计算:

$$F_k(x) = -U_L(t_k)I(t_k) \quad (14)$$

式中,  $U_L(t_k)$  和  $I(t_k)$  分别表示第  $k$  次迭代后的占空比  $t_k$  的 MPPT 变换器输出电压和输出电流。

#### 3.3 MPPT 设计

ACS 算法的收敛判据为

$$|F_k - F_{k-1}| \leq \varepsilon \quad (15)$$

式中:  $\varepsilon$  表示收敛误差, 本文选取  $\varepsilon = 10^{-5}$ ;  $F_k$  和  $F_{k-1}$  分别表示第  $k$  次迭代和第  $(k-1)$  次迭代的适应度函数值。

基于 ACS 的集中式 TEG 系统 MPPT 设计的总体流程如表 1 所示。

一般来说, P&O 对快速变化的运行条件适应度较差, 且很容易陷入 LMPP 中。相比之下, ACS 不需要精确的 TEG 系统模型, 仅需测量 MPPT 变换器输出电压就能有效逼近 GMPP。同时, 与 PSO 算法相比, ACS 采用了单 Agent 代替种群进行极值优化, 极大提高了计算速度。因此, ACS 能以更快的速度和更小的功率振荡收敛到高质量的 GMPP。图 6 给出了 NTD 条件下基于 ACS 的集中式 TEG 系统总体 MPPT 设计。具体地, ACS 输出的占空比  $t_k$  经过脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)后进入绝缘栅双极型晶体管 (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT), 于是 MPPT 变换器输出电压  $U_L$  动态变化并反馈至 ACS 中, 直到满足算法收敛条件。

表 1 基于 ACS 的集中式 TEG 系统 MPPT 设计总体流程

Table 1 Overall execution procedure of ACS based MPPT design for the centralized TEG system

1:	初始化初始坐标, 动态选择概率, 步长和收敛误差 $\varepsilon$ ;
2:	设置 $k=0$ ;
3:	对 DC-DC 调压器中的 PWM 信号的占空比 $t_k$ 进行初始化;
4:	<b>WHILE</b> $\Delta_{i,k} > \varepsilon$
5:	采集实时 MPPT 变换器输出电压和输出电流;
6:	根据公式(14)计算适应度函数;
7:	根据公式(12)更新正向搜索的动态选择概率;
8:	<b>IF1</b> $F_i(x^{\text{new}}) < F_i(x_k)$
9:	根据公式(9)进行模式移动操作;
10:	根据公式(11)确定新的探索移动方向;
11:	<b>ELSE</b>
12:	<b>IF2</b> 第一个探索移动已经开始, 则执行第二个探索移动;
13:	<b>ELSE</b>
14:	根据公式(10)缩小优化变量的步长;
15:	根据公式(11)确定新的探索移动方向;
16:	<b>END IF2</b>
17:	<b>END IF1</b>
18:	根据公式(13)检查占空比 $t_k$ 的上/下限;
19:	在 DC-DC 调压器中重新设置 PWM 的占空比 $t_k$ ;
20:	设置 $k:=k+1$ ;
21:	<b>END WHILE</b>
22:	输出 PWM 信号的最佳占空比 $t_{\text{opt},k}$ ;
23:	当 TEG 系统的输入温度发生变化时, 重新执行步骤 1 到步骤 22.

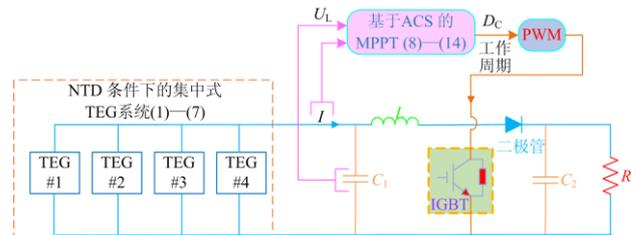


图 6 NTD 条件下基于 ACS 的集中式 TEG 系统总体 MPPT 设计

Fig. 6 Overall ACS based MPPT design of centralized TEG system under NTD condition

### 4 算例分析

本节将 ACS 应用于 NTD 条件下的集中式 TEG 系统以实现 MPPT, 在温度恒定、温度阶跃变化和随机温度变化三个算例下, 对 ACS、P&O<sup>[12]</sup>、PSO<sup>[19]</sup>和 CS<sup>[20]</sup>的 MPPT 性能进行比较。由于算法参数均会对算法寻优性能造成影响, 这些参数会对集中式 TEG 系统输出功率产生影响。由于 TEG 系统需要算法能够快速逼近最大功率点, 所有算法在满足优化精度的同时, 还需要尽可能减小计算迭代次数。根据这个原则, 本文经过多次仿真试错分析设置算法的较优参数。其中: P&O 的固定步长设为 0.005 s; PSO 的种群大小和最大迭代次数都设置为 5; CS 的初始步长、衰减因子分别设置为 0.2 s 和 0.5; ACS

的增量比  $\beta$  设置为 0.9; 四种算法的控制时间均设置为 0.01 s。表 2 中给出了集中式 TEG 系统和其所连接的升压变换器<sup>[14,19]</sup>的主要参数。仿真在 1.8 GHz IntelR CoreTMi7 CPU 和 16 GB RAM 配置的个人计算机上运行, 模型采用 Matlab/Simulink 2017b 搭建。

为定量评估集中式 TEG 系统的功率振荡幅度, 引入如下两个指标<sup>[25-26]</sup>。

$$\Delta v^{\text{avg}} = \frac{1}{T_{\text{all}} - 1} \sum_{t=2}^{T_{\text{all}}} \frac{|P_{\text{out}}(t) - P_{\text{out}}(t-1)|}{P_{\text{out}}^{\text{avg}}} \quad (16)$$

$$\Delta v^{\text{max}} = \max_{t=2,3,\dots,T_{\text{all}}} \frac{|P_{\text{out}}(t) - P_{\text{out}}(t-1)|}{P_{\text{out}}^{\text{avg}}} \quad (17)$$

式中:  $\Delta v^{\text{avg}}$  和  $\Delta v^{\text{max}}$  分别表示集中式 TEG 系统输出功率的平均振荡指标和最大振荡指标;  $t$  为时间;  $T_{\text{all}}$  为总运行时间;  $P_{\text{out}}^{\text{avg}}$  表示在总迭代次数内集中式 TEG 系统输出功率的平均值。

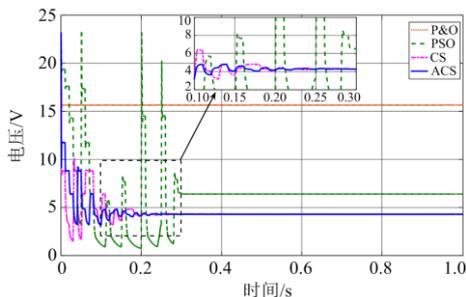
表 2 集中式 TEG 系统和 MPPT 变换器的主要参数

Table 2 Main parameters of centralized TEG system and MPPT converter

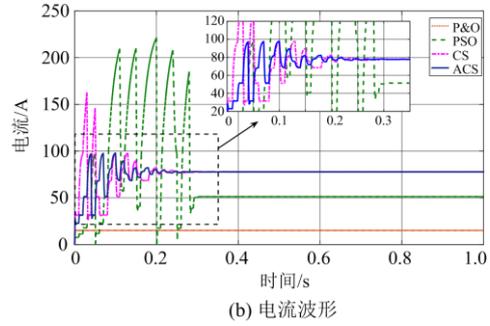
TEG 模块		MPPT 变换器	
参数	数值	参数	数值
并联的串数	4	传递函数	$V_{\text{out}}=V_{\text{in}}/(1-D_C)$
模块数/串	200	开关频率	$f_s=20 \text{ kHz}$
塞贝克系数的初始变化率	$\alpha_0=210 \mu\text{V/K}$	负载	$R=3 \Omega$
塞贝克系数的变化率	$\alpha_1=120 \mu\text{V/K}$	电感	$L=250 \text{ mH}$
参考温度	$T_0=300 \text{ K}$	电容	$C_1=66 \mu\text{F},$ $C_2=200 \mu\text{F}$

### 4.1 温度恒定

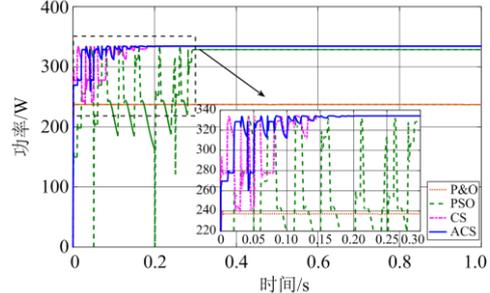
本算例旨在测试恒温条件下 ACS 的 MPPT 性能。模拟如下工况: 分别将 4 个 TEG 串的热端温度设置为 247 °C、123 °C、76 °C 和 41 °C; 冷端温度设置为 47 °C、31 °C、18 °C 和 13 °C。图 7 显示了 4 种算法的 MPPT 响应结果。可以看出, 除 P&O 外, 所有的算法需要经历一系列搜索才能逼近 GMPP。其中, ACS 能以最快的速度 and 最小的功率振荡收敛到最高质量的 GMPP。同时, ACS 因采用了单 agent 代替种群进行极值优化, 显著地提高了收敛速率。



(a) 电压波形



(b) 电流波形



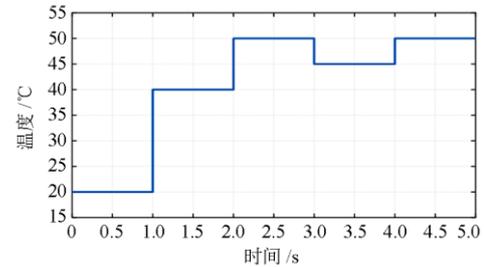
(c) 功率波形

图 7 温度恒定下基于 4 种算法所获得的集中式 TEG 系统 MPPT 性能

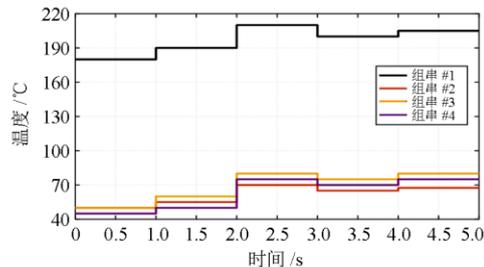
Fig. 7 MPPT performance of centralized TEG system obtained by four methods under constant temperature difference

### 4.2 温度阶跃变化

本算例旨在测试温度阶跃变化下 4 种算法的 MPPT 性能, 如图 8 所示。模拟了 5 s 内冷、热端的温度变化, 图 8(a)、图 8(b)分别给出了 TEG 的冷端和热端温度变化曲线。



(a) 冷端温度变化曲线



(b) 热端温度变化曲线

图 8 NTD 条件下集中式 TEG 系统的温度阶跃变化

Fig. 8 Step change of temperature of centralized TEG system under NTD condition

4 种算法在温度阶跃变化下的 MPPT 性能对比结果如图 9 所示。可以看出, P&O 易陷入低质量的 LMPP, PSO 易产生较大的功率振荡, 且需经过较长收敛时间才能逼近集中式 TEG 系统的 GMPP。相比之下, ACS 产生的功率振荡较小, 其能以较小的功率振荡快速收敛到高质量的 GMPP。

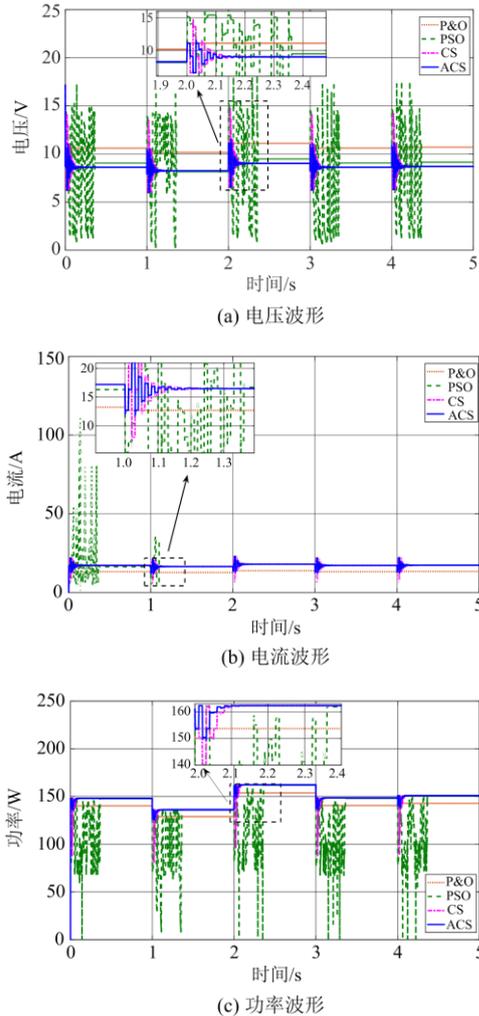


图 9 温度阶跃变化下基于 4 种算法所获得的集中式 TEG 系统的 MPPT 性能

Fig. 9 MPPT performance of centralized TEG system obtained by four methods in the step change of temperature

### 4.3 随机温度变化

本算例旨在测试较长时间内 ACS 的 MPPT 性能, 模拟了一天内的随机温度变化情况, 4 种算法所获得的 MPPT 性能对比结果如图 10 所示。从图 10(a)可知, ACS 在大多数时间段均可获得比其他算法更高质量的 MPP。此外, 由于收敛稳定性高, CS 和 ACS 的平均振荡指标和最大振荡指标均远小于 PSO, 如图 10(b)和图 10(c)所示。

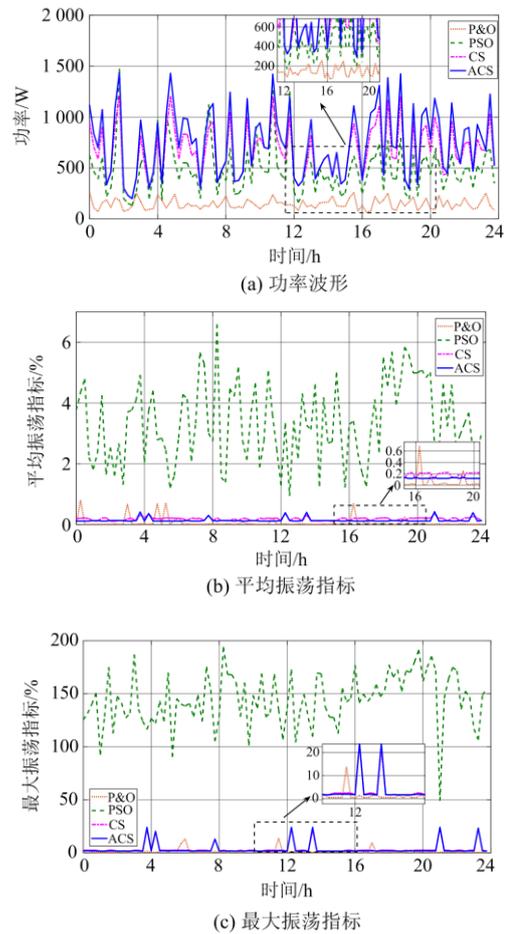


图 10 随机温度变化下基于 4 种算法所获得的集中式 TEG 系统的 MPPT 性能

Fig. 10 MPPT performance of centralized TEG system obtained by four methods in the random temperature variation

### 4.4 定量分析

表 3 给出了 4 种算法在上述 3 种算例下的定量分析结果(最优结果加粗显示)。由表可知, 在 3 种算例下, ACS 均能产生最大的能量。随机温度变化中, ACS 产生的能量分别比 P&O、PSO 和 CS 高 513.89%、151.95%和 113.15%。一般情况下, 具有多个搜索个体的 PSO 算法比仅具有单 Agent 搜索的 ACS 算法搜索效果更好。但因为 MPPT 的控制周期较短, 极大限制了 PSO 算法的计算时间。因此在较短时间内, ACS 可以实现比 PSO 更深度的探索, 从而获得比 PSO 更高质量的解。另外, 可以看出 P&O 的平均振荡指标和最大振荡指标在所有算例中均是最小的, 其次是 ACS 和 CS。因此, ACS 可以通过探索方向的自适应序列更加逼近 GMPP, 并通过其简单的优化机制和单 Agent 搜索来降低功率振荡。

表 3 4 种算法在 3 种算例下的定量分析结果  
Table 3 Statistical results obtained by four algorithms  
under three scenarios

算例	指标	P&O	PSO	CS	ACS
温度 恒定	能量/W s	237.0244	304.467 9	329.771 9	<b>331.748 2</b>
	$\Delta v^{\max} / \%$	<b>0.497 1</b>	102.440 1	26.885 3	20.520 8
	$\Delta v^{\text{avg}} / \%$	<b>0.010 6</b>	1.073 0	0.253 8	0.132 5
温度阶 跃变化	能量/W s	706.256 8	666.389 2	741.655 5	<b>744.279 3</b>
	$\Delta v^{\max} / \%$	<b>13.622 9</b>	106.66 75	36.744 8	16.801 7
	$\Delta v^{\text{avg}} / \%$	<b>0.008 2</b>	1.549 2	0.116 0	0.037 2
随机温 度变化	能量/kW h	3.446 8	11.656 9	15.653 8	<b>17.712 4</b>
	$\Delta v^{\max} / \%$	<b>1.334 8</b>	144.360 0	3.517 9	3.254 5
	$\Delta v^{\text{avg}} / \%$	<b>0.062 3</b>	3.369 2	0.189 3	0.144 1

## 5 结论

本文针对 NTD 条件下集中式 TEG 系统 MPPT 设计了一种新型 ACS 算法, 主要贡献/结论如下:

1) 与传统的 P&O 相比, ACS 能有效地避免陷入 LMPP。因此, 基于 ACS 的 MPPT 设计可以显著提高能源的利用率。

2) 与 PSO 相比, ACS 仅使用单 Agent 搜索, 能在 NTD 条件下对集中式 TEG 系统的 GMPP 进行更有效的逼近。因此, ACS 能以更快的速度和更高的收敛稳定性获得高质量的 GMPP。

3) 与原始 CS 相比, ACS 采用探索方向的自适应序列, 显著提高了 ACS 的全局搜索能力。因此, ACS 可有效降低算法陷入低质量 LMPP 的概率。

## 参考文献

- [1] 周强, 汪宁渤, 何世恩, 等. 高弃风弃光背景下中国新能源发展总结及前景探究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 146-154.  
ZHOU Qiang, WANG Ningbo, HE Shi'en, et al. Summary and prospect of China's new energy development under the background of high abandoned new energy power[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 146-154.
- [2] BADAL F R, DAS P, SARKER S K, et al. A survey on control issues in renewable energy integration and microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(1): 87-113. DOI: 10.1186/s41601-019-0122-8.
- [3] SINGH M. Protection coordination in distribution systems with and without distributed energy resources—a review[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(1): 294-310. DOI: 10.1186/s41601-017-0061-1.
- [4] 程富强, 洪延姬, 祝超. 碲化铋温差发电模块构型优化设计[J]. 高电压技术, 2014, 40(5): 1599-1604.  
CHENG Fuqiang, HONG Yanji, ZHU Chao. Structure optimization of a BiTe-based thermoelectric module[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(5): 1599-1604.
- [5] 晏维, 邱国跃, 袁旭峰, 等. 半导体温差发电技术应用及研究综述[J]. 电源技术, 2016, 40(8): 1737-1740.  
YAN Wei, QIU Guoyue, YUAN Xufeng, et al. Application and research of semiconductor thermoelectric power generation technology[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2016, 40(8): 1737-1740.
- [6] 鲍亮亮, 李启明, 彭文博, 等. 汽车尾气温差发电装置的设计、制作及性能测试[J]. 电源技术, 2016, 40(12): 2463-2465.  
BAO Liangliang, LI Qiming, PENG Wenbo, et al. Studies of thermoelectric device for automobile tail-pipe energy harvest: design, fabrication and performance[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2016, 40(12): 2463-2465.
- [7] 武家辉, 张强, 王维庆, 等. 太阳能冷热电联供系统的综合性能评价与研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21): 179-186.  
WU Jiahui, ZHANG Qiang, WANG Weiqing, et al. Evaluation and research on the comprehensive performance of a PV/T-CCHP system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 179-186.
- [8] 谢华宝, 许丹, 胡林献, 等. 电锅炉配置方式对弃风消纳效果的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21): 126-133.  
XIE Huabao, XU Dan, HU Linxian, et al. Study on effect of electric boiler configuration method on wind power curtailment[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 126-133.
- [9] BARMA M C, RIAZ M, SAIDUR R, et al. Estimation of thermoelectric power generation by recovering waste heat from biomass fired thermal oil heater[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 98: 303-313.
- [10] 宋卓然, 赵琳, 张子信, 等. 热电联产与风电机组联合运行滚动优化调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 110-116.  
SONG Zhuoran, ZHAO Lin, ZHANG Zixin, et al. Rolling optimal model for multiple heating source and wind turbine unit[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 110-116.
- [11] 吴馥郁, 胡中华, 马湘蓉, 等. 基于 MPPT 温差发电实验及仿真的研究[J]. 电子器件, 2019, 42(4): 843-849.  
WU Fuyu, HU Shenhua, MA Xiangrong, et al. Based on MPPT temperature difference power generation experiment and simulation research[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2019, 42(4): 843-849.
- [12] YU C, CHAU K T. Thermoelectric automotive waste heat

- energy recovery using maximum power point tracking[J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(6): 1506-1512.
- [13] TWAHA S, ZHU J, YAN Y Y, et al. Performance analysis of thermoelectric generator using DC-DC converter with incremental conductance based maximum power point tracking[J]. Energy for Sustainable Development, 2017, 37: 86-98.
- [14] CARREON-BAUTISTA S, ELADAWY A, MOHIELDIN A N, et al. Boost converter with dynamic input impedance matching for energy harvesting with multi-array thermoelectric generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(10): 5345-5353.
- [15] LAIRD I, LU D D C. High step-up DC/DC topology and MPPT algorithm for use with a thermoelectric generator[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 28(7): 3147-3157.
- [16] BIJUKUMAR B, RAAM A G K, GANESAN S I, et al. A linear extrapolation-based MPPT algorithm for thermoelectric generators under dynamically varying temperature conditions[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(4): 1641-1649.
- [17] PHILLIP N, MAGANGA O, BURNHAM K J, et al. Investigation of maximum power point tracking for thermoelectric generators[J]. Journal of electronic materials, 2013, 42(7): 1900-1906.
- [18] MIRJALILI S. Moth-flame optimization algorithm: a novel nature-inspired heuristic paradigm[J]. Knowledge-Based Systems, 2015, 89: 228-249.
- [19] LI H, YANG D, SU W Z, et al. An overall distribution particle swarm optimization MPPT algorithm for photovoltaic system under partial shading[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 66(1): 265-275.
- [20] KOLDA T G, LEWIS R M, TORCZON V. Optimization by direct search: new perspectives on some classical and modern methods[J]. SIAM Review, 2003, 45(3): 385-482.
- [21] CHAKRABORTY A, SAHA B B, KOYAMA S, et al. Thermodynamic modelling of a solid state thermoelectric cooling device: temperature-entropy analysis[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49: 3547-3554.
- [22] THANKAKAN R, SAMUEL NADAR E R. Investigation of thermoelectric generators connected in different configurations for micro-grid applications[J]. International Journal of Energy Research, 2018, 42(6): 2290-2301.
- [23] 吴红飞, 孙凯, 倪龙贤, 等. 集中-分布混合式高能效热电发电系统[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(23): 12-18, 114.  
WU Hongfei, SUN Kai, NI Longxian, et al. Centralized-distributed hybrid thermoelectric power system with high energy efficiency[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(23): 12-18, 114.
- [24] LI X Y, ZHANG L P, WEN L, et al. Free pattern search for global optimization[J]. Applied Soft Computing, 2013, 13(9): 3853-3863.
- [25] 杨博, 钟林恩, 朱德娜, 等. 部分遮蔽下改进樽海鞘群算法的光伏系统最大功率跟踪[J]. 控制理论与应用, 2019, 36(3): 339-352.  
YANG Bo, ZHONG Lin'en, ZHU Dena, et al. Modified salp swarm algorithm based maximum power point tracking of PV system under partial shading condition[J]. Control Theory & Applications, 2019, 36(3): 339-352.
- [26] 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.

收稿日期: 2019-12-09; 修回日期: 2020-01-06

作者简介:

孙立明(1977—), 男, 硕士, 主要研究方向为电力系统、工业制造过程的先进控制系统与装置, 电力系统生产过程数据的智能分析; E-mail: 2410924502@qq.com

杨博(1988—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 主要研究方向为新能源发电系统优化与控制以及人工智能在智能电网中的应用。E-mail: yangbo\_ac@outlook.com

(编辑 葛艳娜)