

DOI: 10.7667/PSPC180331

基于 PVPT 控制的小型光伏微电网混合控制研究

董润楠¹, 刘石¹, 郭芳²

(1. 华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京 102206; 2. 华北电力大学能源与机械工程学院, 北京 102206)

摘要: 针对小型光伏微电网系统由于受投资成本限制造成的经济性差、能源利用手段单一以及监控系统功能不完整的问题, 设计了一种基于光电光热一体化(Photovoltaic- photothermal, PVPT 或 PV/T)技术的简单改进方案。并在此基础上探讨了基于前端组件温度-功率关系的混合控制方法的可行性。利用 PVPT 原理的优点综合提升小型光伏微电网系统的整体经济效益。实验结果表明, 改进方案能有效地增加系统的发电效率, 丰富用户的光能利用手段。而以此改进方案为基础的混合温度功率控制方法调控过程平滑, 调控区间较小, 可作为小型光伏微电网系统的后备控制和功率微调控制。由于该改进方法成本较低、结构简单, 满足小型光伏微电网系统运营特点的要求, 具有一定的应用潜力。

关键词: 前端温度控制; 微电网; 光伏发电; 光电光热一体化; 发电效率; 混合控制

Research on hybrid control method of the small-scale photovoltaic microgrid based on PVPT control

DONG Runnan¹, LIU Shi¹, GUO Fang²

(1. School of Control and Computer Engineering, North China Power Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In view of the poor economic efficiency, single energy utilization method, and incomplete monitoring system function of small-scaled photovoltaic micro-grid system due to the restriction of investment cost, a simple improvement scheme is designed on the basis of photovoltaic-photothermal integration (photovoltaic-photothermal, PVPT or PV/T) technology, and the feasibility of hybrid control method based on the temperature-power relation of front-end components is discussed on this basis. The overall economic benefits of small-scale photovoltaic micro-grid system can be comprehensively improved through utilizing the strengths of PVPT principle. The experimental result shows that the improvement scheme can validly increase the power generation efficiency of the system, as well as enrich the luminous energy utilization methods of the users. The mixed temperature power control method based on such improvement scheme demonstrates a smooth regulation process and smaller regulation interval, and can be used for the backup control and fine control of small-scaled photovoltaic micro-grid system. Since such improvement method is low in cost and simple in structure, it meets the operation characteristic requirements of small-scaled photovoltaic micro-grid system, and possesses certain application potential.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61571189) and 111 Project of State Administration of Foreign Experts (No. B13009).

Key words: front-end temperature control; micro-grid; photovoltaic power generation; PVPT; power generation efficiency; hybrid control

0 引言

近年来, 大量中小型分布式光伏发电系统在我国村镇、城镇社区、商业中心以及以家庭为单位的

住宅小区^[1-2]安装并网, 由于其具有容量小、空间分散、间歇特性较强、电源数量巨大、电网通信负担增加、管理控制难度提升等特点, 使得发展小型微电网作为上级电网和分布式用户的中间代理网络成为可能。与传统中大型复杂微电网相比, 由于小型微电网通常受到投资成本、物理空间等因素的限制, 实际应用中具有空间分布分散、网内微源单体容量

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61571189); 国家外国专家局 111 项目资助(B13009)

小、网内微源数量众多、管理控制难度大的特点。因此，其主要面临以下 5 个方面的挑战：

1) 经济性。由于小型民用微电网系统常采用晶硅类组件，其光电转换效率低、光能利用手段单一，经济性差，成本回收时间长。

2) 故障监测。由于小型系统用户受到投资成本的制约，其系统结构简单、全网监控系统功能不全(如缺乏前端温度、光照、工作状态等监测功能)，故障检修维护成本高、故障难以定位，进一步降低了系统的经济性。例如针对组件因阴影遮挡产生的热斑效应和因生产质量缺陷损毁的热斑失效故障问题^[3]，由于缺乏前端状态监测功能需采用人工排查的方式进行故障定位和故障排除，检修时间长，发电收益影响大，运维成本高。

3) 控制手段单一。传统小型光伏微电网系统的主要控制设备在于并网逆变器，并网接口的输出功率调整多依赖于逆变器自身的电压频率控制^[4]、有功无功功率控制^[5]、下垂控制^[6]等控制方法，由于受成本因素影响，控制系统难以具备成熟的多层混合微电网自动监控系统^[7-9]，控制手段单一。

4) 光能源利用率低。多数小型光伏微电网用户多集中于乡村、CBD 商业区、居民区、学校等地区，占地面积较大、空间分布较为分散，单一使用光电转换技术，单位面积光能利用率低、利用手段单一。

5) 备用容量少，工作模式单一。多数中小型光伏微电网用户采用光伏发电、储能备用与市网供电相结合的形式，难以实现需求侧响应和互动，工作模式单一，储能系统的后备容量较少、难以进行二级调控和工作模式转换。

随着能源互联网技术、分层混合微电网控制技术、需求侧响应互动技术、PVPT 技术等日趋成熟，现代电力系统已逐渐具有多能流控制^[10]、潮流走向多变^[11]、能源供应个性化^[12]、分布式资源多元化^[13]等特点。小型光伏微电网系统将面临巨大挑战，虽然增加储能系统能够满足网内功率的动态调控平衡，保障系统的稳定运行，但受制于成本因素，其经济价值难以保障^[14]。PVPT 技术经过多年的发展，已较为成熟^[15]，其在发电的同时可为用户供热，实现了多种类型的光能利用，增加了光能的综合利用效率，提升了系统的经济性，尤其适用于分布式发电系统用户和小型微电网系统用户^[16-18]，但同样受制于成本问题使其难以得到推广和应用。

针对这些问题，研究适用于小型微电网系统特点的改进设计方案和控制方法，提升系统的经济性，增加小型微电网的光能利用率和能源转换效率是本文研究的重点问题。本文设计了一种基于 PVPT 原

理的简易改装组件，并在此基础上利用温度-功率关系探讨了一种混合小型光伏微电网的控制方法。通过利用 PVPT 技术原理对传统小型光伏微电网系统中组件进行简易改装，增加光能利用率的同时丰富了光能利用手段，提升了系统的经济性；利用组件温度的监测实现故障点快速定位；利用组件工作温度和功率的关系进行温度控制，以丰富系统控制手段的多样性。

1 光电光热综合利用基本原理

目前，我国常规分布式光伏发电系统组件采用晶硅类组件，该组件光电转换效率在 10%~18%，理论年均效率衰减率为 0.5%~0.8%。组件工作过程中产生大量热能，温度较高，且组件内部硅片光电转换效率受其自身工作温度的影响每升高 1 °C，组件效率下降约为 0.5%^[19]。常规晶硅类组件受环境影响，间歇特性较强，功率输出的波动性较大。PVPT 技术能够有效增加光电转换效率，丰富光能利用手段，提升系统的经济性。

如图 1 所示，典型的 PVPT 组件采用集成式封装设计，其冷却热能回收管封装于组件内部，由盖板、EVA 填充材料、电池模组、冷却流道和保温层组成^[20-21]。冷却循环方式则主要采用自然循环方式和强制循环方式^[22]。经测算，PVPT 组件系统的光能利用率可达 60%~80%^[23]，采用 PVPT 组件系统的发电效率增长为 20%~30%，投资成本增加仅约为 15%~20%，然而，对于已并网运行的系统而言需要通过更换组件来达到改造升级的目的，改造成本较高，成本回收周期延长。

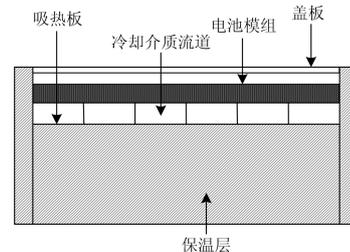


图 1 典型 PVPT 组件结构示意图

Fig. 1 Typical PVPT photovoltaic panel structure diagram

2 光伏组件改造模型

2.1 通用光伏组件模型

目前，传统晶硅类组件的光电特性分析研究已趋成熟，以经典光伏组件单二极管模型为例，其温度-功率模型公式为

$$P(V) = V \cdot I_{ph} - V \cdot I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + I \cdot R_s)}{A \cdot K \cdot T_c} \right] - 1 \right\} \quad (1)$$

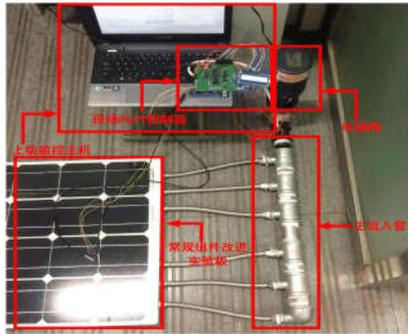
式中: I_{ph} 为电池模组输出电流, 单位为 A; I_0 为二极管反向饱和电流, 单位为 A; V 为末端电压, 单位为 V; R_s 为串联内阻, 单位为 Ω ; q 为电子电荷量; K 为波尔兹曼常数; A 为二极管影响因子; T_c 为组件内部电池温度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

参考文献[24]针对传统型光伏组件背板温度与电池模组间的关系进行了深入研究, 并得到了背板温度与组件电池模组的通用一维热传导模型为

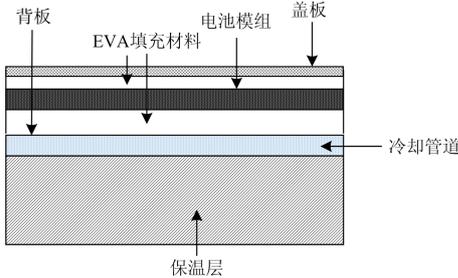
$$T_c = T_m + (E/E_0) \cdot \Delta T \quad (2)$$

式中: T_c 为组件硅片温度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$; T_m 为背板测量温度, 单位 $^{\circ}\text{C}$; E 为组件光照强度; E_0 为组件参考光照强度, 1000 W/m^2 ; ΔT 为在 1000 W/m^2 环境下组件背板温度和组件内部硅片电池温度的差值, 通常为 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ [24]。

常规 PVPT 组件采用在组件内部集成换热的方式, 组件成本较高, 难以被小型光伏微电网系统用户接受, 受投资成本限制, 可利用 PVPT 技术原理在传统晶硅类组件上进行简易改装, 改装组件实物图和剖面示意图如图 2 所示。在组件背板增加温度传感器、导热层和换热管件覆盖背板, 集热效率虽有所下降, 但改装成本较低、能源利用率的提升和光能利用手段的丰富改善了系统的经济性。



(a) 改造组件实验测试系统实物图



(b) 改造组件剖面示意图

图 2 改造组件实物图及剖面示意图

Fig. 2 Physical diagram and profile map of the improved panel structure

2.2 温度控制模型

在民用小型微电网中, 热能通常以热水为主,

本文换热介质采用冷却水并进行组件的换热模型构建和分析。图 3 所示为改进组件的热传导示意图。

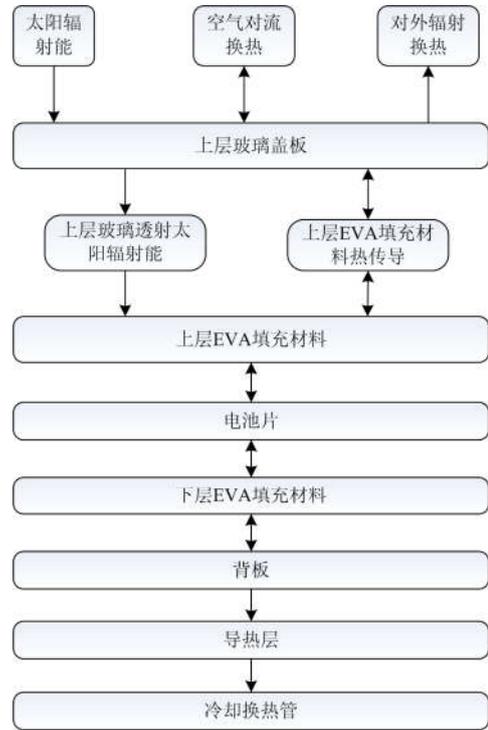


图 3 改造光伏组件纵向热交换结构示意图

Fig. 3 Longitudinal thermal transfer process diagram of the improved photovoltaic component

由此可列出光伏组件各部分的热平衡方程如下。

1) 盖板玻璃

$$SA \cdot \alpha_G + \frac{T_{E1} - T_c}{\frac{\delta_G}{2\lambda_G} + \frac{\delta_{E1}}{2\lambda_{E1}}} = \varepsilon_G \sigma (T_G^4 - T_A^4) + h_{AG} (T_G + T_A) + \Delta q_1 \quad (3)$$

式中: T_A 为环境空气温度; h_{AG} 为玻璃盖板和大气间的对流换热系数; T_G 为玻璃盖板温度; δ_G 为玻璃盖板的厚度; λ_G 为玻璃盖板的导热率; SA 为上层玻璃盖板透射辐照度; α_G 为玻璃盖板的透过率; ε_G 为玻璃盖板的吸收率; T_{E1} 为上层 EVA 填充材料的温度; δ_{E1} 为上层 EVA 填充材料的厚度; λ_{E1} 为上层 EVA 材料的导热率; σ 为黑体辐射常数; Δq_1 为热交换过程中的损失能量。

2) 上层 EVA

$$SA \cdot \tau_{E1} \cdot \varepsilon_{E1} + \frac{T_{PV} - T_{E1}}{\frac{\delta_{E1}}{2\lambda_{E1}} + \frac{\delta_{PV}}{2\lambda_{PV}}} = \frac{T_E - T_G}{\frac{\delta_G}{2\lambda_G} + \frac{\delta_{PV}}{2\lambda_{E1}}} + \Delta q_2 \quad (4)$$

式中: τ_{E1} 为上层 EVA 透过率; ε_{E1} 为上层 EVA 吸收率; T_{PV} 为硅片温度; λ_{PV} 为太阳能电池导热率; δ_{PV}

为太阳能电池板厚度; Δq_2 为热交换过程中的损失能量。

3) 硅片

$$SA \cdot \tau_{E1} \cdot \alpha_G = P + \frac{T_{PV} - T_{E2}}{\frac{\delta_{E2}}{2\lambda_{E2}} + \frac{\delta_{PV}}{2\lambda_{PV}}} + \frac{T_{PV} - T_{E1}}{\frac{\delta_{E1}}{2\lambda_{E1}} + \frac{\delta_{PV}}{2\lambda_{PV}}} + \Delta q_3 \quad (5)$$

式中: P 为单位面积硅片输出的功率; δ_{E2} 为下层 EVA 厚度; λ_{E2} 为下层 EVA 导热率; T_{E2} 为下层 EVA 温度; Δq_3 为热交换过程中的损失能量。

4) 下层 EVA

$$\frac{T_{PV} - T_{E2}}{\frac{\delta_{E2}}{2\lambda_{E2}} + \frac{\delta_{PV}}{2\lambda_{PV}}} = \frac{T_{E2} - T_b}{\frac{\delta_{E2}}{2\lambda_{E2}} + \frac{\delta_b}{2\lambda_b}} + \Delta q_4 \quad (6)$$

式中: δ_b 为下层背板厚度; λ_b 为下层背板导热率; T_b 为下层背板温度; Δq_4 为热交换过程中的损失能量。

5) 背板与换热器

$$\frac{T_{E2} - T_b}{\frac{\delta_{E2}}{2\lambda_{E2}} + \frac{\delta_b}{2\lambda_b}} = \frac{T_b - T_w}{\frac{\delta_b}{2\lambda_b} + \frac{\delta_w}{2\lambda_w}} + \Delta q_5 \quad (7)$$

式中: δ_w 为换热器接触面厚度; λ_w 为换热器接触面导热率; T_w 为换热器接触面温度; Δq_5 为热交换过程中的损失能量。

6) 流量控制模型

根据式(3)—式(7)得到冷却流量与组件工作温度模型为

$$\Delta t \cdot SA' \cdot S - P + (T_{final} - T_0) \cdot c_{pv} \cdot V_{pv} \cdot \rho_{pv} = (T_{out,w} - T_{in,w}) \cdot c_w \cdot v_w \cdot \rho_w \cdot s_w \cdot \Delta t \quad (8)$$

式中: S 为组件上层盖板面积; c_{pv} 为硅片比热容; V_{pv} 为硅片体积; ρ_{pv} 为硅片密度; c_w 为冷却介质比热; v_w 为冷却介质流速; ρ_w 为冷却介质密度; s_w 为冷却换热器横截面积; T_{final} 为硅片工作温度目标值; T_0 为硅片工作温度初始值; $T_{out,w}$ 为出水温度; $T_{in,w}$ 为入水温度; SA' 为硅片接收到的太阳辐照度, 表示如式(9)。

$$SA' = SA \cdot \tau_{E1} \cdot \alpha_G \quad (9)$$

3 温度-功率混合控制方法

3.1 基本策略

混合控制的基本原理是利用晶硅类组件温度与功率的关系, 用温度控制功率的输出, 如图 4 所示为混合控制的基本原理示意图。

基本运行策略为: 1) 在正常运行工况下, 利用自然循环的方法为组件降温使其由图 4 中的初始状态调整为目标值 1 所处的工作状态, 从而增加系统

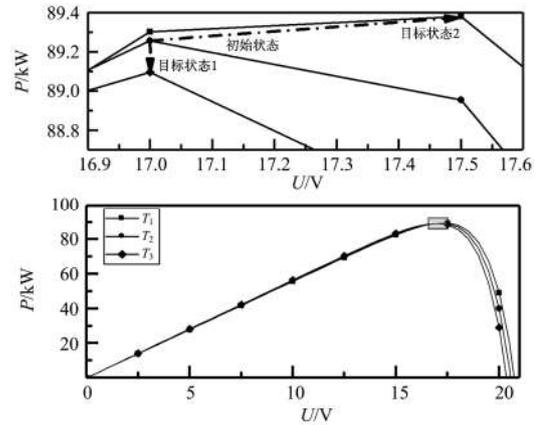


图 4 前端混合控制的温度控制功率原理示意图
Fig. 4 Schematic diagram of temperature control power in front-end hybrid control

输出功率, 提高组件的光能利用率, 此时冷却循环系统以最小耗能和最大降温为原则工作。2) 当系统需要调整功率输出的情况下(如在负荷小于发电功率输出且储能满功率状态的自发自用模式下), 可通过改变冷却流量来控制温度使系统由初始状态转变为目标值 1 或目标值 2 的工作状态, 从而改变正常组件的输出功率和热能回收率。3) 当组件发生热斑效应或热斑失效情况时, 可通过检测各背板温度的异常状态快速而精确地定位出故障组件位置, 缩短故障处理时间。

3.2 控制方法设计

基于 PVPT 技术的温度控制方法包括流量温度控制和逆变器内部功率控制两部分。以典型三相两级式逆变电路为例, 如图 5 所示。

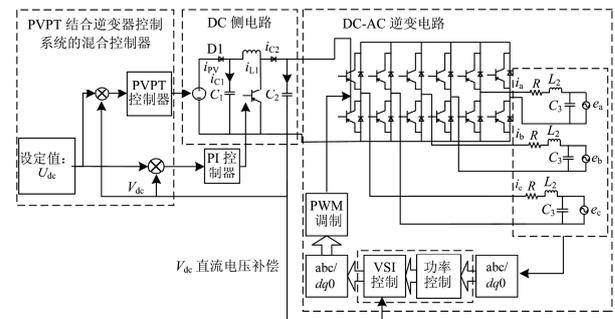


图 5 结合逆变器控制系统的温度功率控制结构框图
Fig. 5 Structure diagram of temperature power control in combination with inverter control system

其直流侧方程为

$$\frac{du_{pv}}{dt} = \frac{i_{pv}}{C_1} - \frac{i_{L1}}{C_1} \quad (10)$$

$$\frac{di_{L1}}{dt} = \frac{u_{pv}}{L_1} - \frac{s_k u_{dc}}{L_1} \quad (11)$$

式中: U_{pv} 为直流侧光伏支路输入电压; i_{pv} 为直流侧光伏支路输入电流; U_{dc} 为直流侧稳压电容 C_2 两端电压。

其交流侧方程为

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{Ri_d}{L_2} + \omega_0 i_q + \frac{A_d u_{dc}}{L_2} - \frac{e_d}{L_2} \quad (12)$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{Ri_q}{L_2} - \omega_0 i_d + \frac{A_q u_{dc}}{L_2} - \frac{e_q}{L_2} \quad (13)$$

$$\frac{du_{dc}}{dt} = \frac{C_3 S_k i_{L1}}{C_3 + C_2} - \frac{C_3}{C_3 + C_2} (i_d A_d + i_q A_q) \quad (14)$$

式中: i_d 和 i_q 分别为交流侧输出电流经过 abc/dq 变换后的电流分量; e_d 和 e_q 分别为交流侧并网电压经 abc/dq 变换后的分量; A_d 和 A_q 分别为开关电路的开关函数通过 abc/dq 变换后的 A_d 和 A_q 分量, 即占空比分量; ω_0 为电网频率; R 、 L_2 、 C_3 为逆变器 LRC 滤波电路元件。依据式(10)—式(14)可得到逆变器内部电流环控制模型为

$$i_d^* = (k_{pd1} + \frac{k_{id1}}{s})(P^* - P) \quad (15)$$

$$i_q^* = (k_{pq1} + \frac{k_{iq1}}{s})(Q^* - Q) \quad (16)$$

式中: P 和 Q 为实际输出有功功率和无功功率; P^* 和 Q^* 为设定目标有功功率和无功功率; k_{pd1} 和 k_{id1} 、 k_{pq1} 和 k_{iq1} 分别为电流内环 PI 控制器的参数值^[25]。

从电路模型式(12)和式(13)中可以看出, 交流侧的输出功率受直流侧输出电压影响, 而直流侧输出电压则与直流侧光伏组件支路的输入电压与电流有关, 传统直流侧电压控制采用最大功率点跟踪 (Maximum Power Point Tracking, MPPT) 控制, 而由于 MPPT 多采用扰动法的方式寻找最大功率点难以精确, 利用前端的温度控制可更好地对 MPPT 控制进行补偿, 通过将前端温度状态作为 MPPT 计算最大功率点计算的参考变量可以降低组件模型的未知变量数量, 从而提高 MPPT 的计算速度和精度, 其控制框图如图 5 所示。逆变器内部通过直流侧电压检测值进行电压-功率计算, 得到当前状态下的最大功率值, 利用功率差值代入 MPPT 控制器中进行目标功率点电压计算, 将计算得到的电压值送入混合控制器中的电压-温度控制模块中, 计算得到前端组件温度控制的目标值, 再由混合控制器调节现场组件冷却介质流量达到前端温度控制和输出功率控制的目的。

温度功率控制器基本控制框图如图 6 所示, 采

用先模拟计算后控制的方式, 其具体控制流程如下。

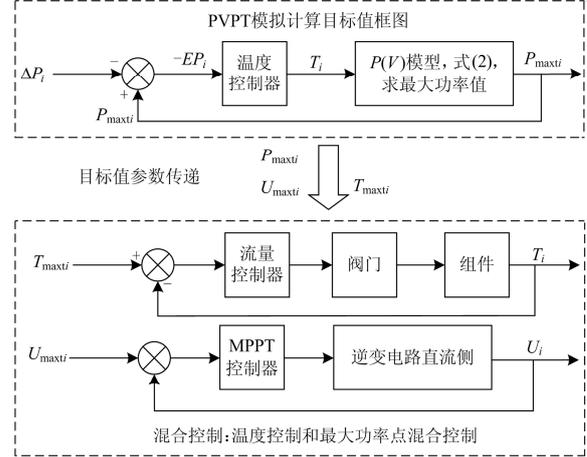


图 6 温度功率控制器控制框图

Fig. 6 Control block diagram of temperature power controller

步骤 1: 将 $\{E_i\}$ 和 $\{T_i\}$ 参数代入方程(2)中可求得组件内部硅片电池温度 $\{T_{Ci}\}$ 。

步骤 2: 将 $\{E_i\}$ 和 $\{T_{Ci}\}$ 参数代入方程(1)中可估算出组件输出功率值 $\{P_{Ci}\}$ 。

步骤 3: 判断是否具有外部功率调整值 ΔP_i , 若有进入步骤 4, 若没有进入步骤 3-1。

步骤 3-1: 自然循环下以最大流量 Q 、最小能耗为基础, 最大限度提升组件发电效率。

步骤 3-2: 利用式(2), 计算当前流量下组件工作温度的最大功率点电压估值 $\{U_{Ci}\}$ 。

步骤 3-3: 利用 MPPT $\{U_{Ci}\}$ 采用扰动法计算最大功率点参考值 $\{U_i\}$ 作为逆变器直流侧电路控制器的控制设定值进行控制。

步骤 4: 进入模拟计算模块, 利用如图 6 所示的计算控制框图计算 ΔP_i 所对应的 ΔT_i 及其对应目标参数 T_{maxi} 和对应的目标温度下最大功率点电压 V_{maxi} 。

步骤 5: 将模拟计算模块的预设目标参数 $\{T_{maxi}\}$ 和 $\{U_{maxi}\}$ 作为目标值发送到现场温度控制器和 MPPT 控制器中。

步骤 6: 利用 MPPT 控制器在当前温度下的预设目标值 $\{U_{maxi}\}$ 附近做扰动控制精确以寻找实际最大功率点电压值。

3.3 改进系统能效经济性分析

光伏发电系统常规冷却循环系统目前主要包含两种方式: 强制冷却和自然冷却两种方法, 其中由于强制冷却方式可最大化对组件温度进行降低, 降温效果好, 功率提升效果显著, 但冷却系统能耗较高, 通常以最大化光伏发电出力为目的, 并在大型集中式地面光伏电站中得到了广泛应用, 其经济性

已得到验证；自然冷却方式采用水塔式储水，利用水塔高度势能差进行冷却循环从而达到组件温度降低的目的，其冷却效果和功率提升效果低于强制冷却方式，但冷却系统能耗较低，多用于屋顶分布式光伏系统和小型地面光伏系统中，并已在家用 PVPT 系统中得到了广泛应用。本文根据已并网小型光伏微电网系统容量小、地理位置分散、用户多能需求和经济性需求高的特点，采用自然冷却循环的方式对系统以光伏组串阵列为单位进行设计。参考文献[20]中对传统 PVPT 系统在节约一次能源的角度下进行经济性分析和介绍，其分析模型主要考虑“常规能源系统与 PVPT 系统的可节约能源因素，采用了太阳分率指标——系统得到的有用太阳能与加热热水能量需求之比，即加热热水能量需求和辅助能源提供热量的差值与加热热水能量需求的比例”。但文章中未考虑热能回收系统的能耗问题和组件因降温达到的功率出力增加带来的经济性等问题。本文在该模型的基础上进行改进，综合考虑系统热能回收评价和电能消耗、出力增加对系统经济性等影响因素。本文所提改进的系统与传统系统相比，其系统综合经济性变化可表示为

$$\Delta P = P_b - P_c \quad (17)$$

式中： ΔP 为改进系统与传统系统的经济性变化增量； P_b 为增加冷却温控系统后系统收益； P_c 为增加冷却温控系统后系统增加的能耗成本。其中收益增加情况由增加的发电功率折算经济收益和增加的热水利用降低的能耗等效收益组成。由于改进系统中采用了自然冷却的方式，其温控系统增加的能耗成本主要由前端温度检测系统能耗成本、控制器能耗成本、前端冷却流量控制系统成本以及改造整体硬件成本 4 部分构成。如式(18)和式(19)所示。

$$P_b = \beta \cdot \sum_{i=1}^n \Delta p_i + \beta \cdot \gamma \cdot Q \cdot \Delta T \quad (18)$$

$$P_c = \delta \cdot (p_{\text{con}} + p_{\text{tem}} + p_{\text{flow}}) + p_{\text{ic}} \quad (19)$$

式中： β 表示微电网系统中分布式光伏发电收益价格折算率，由于目前我国分布式光伏发电系统的运行模式主要有自发自用型、余电上网型和全额上网型 3 类，不同地区不同类型的光伏系统其补贴及上网标杆电价均有所差异，因此该折算率主要由普通售电价、光伏补贴激励和上网标杆电价 3 部分组成； Δp_i 为光伏阵列中单一组件的发电功率增加量； γ 为热能回收再利用中将日常用水加热至相同温度下的电能耗等效因子； Q 为冷却温控系统的日均流量； ΔT 为冷却系统中入口温度和回收后温度变化量； δ 为能耗成本价格折算率，其组成同 β ； p_{con} 为

温控系统能耗； p_{tem} 为前端温度检测系统能耗； p_{flow} 为冷却系统流量控制环的能耗，其主要包括前端阀门开度控制能耗和加压循环系统能耗，本文中采用自然冷却方式利用阀门开度控制压力流量无额外加压循环系统，故其仅包含前端阀门开度控制能耗； p_{ic} 为系统改装硬件成本。

3.4 混合控制分析

由式(15)和式(16)可知，传统微电网逆变器的控制方案将直流侧与交流侧分开，这种方式降低了交流侧电压源接口(VSI)功率输出控制的复杂度。其具有以下特点：

1) 直流侧光伏阵列的输入电压受多种因素影响(如光照强度、环境温度、工作温度、阴影、组件工艺质量等)很难达到精确控制和稳定状态。在传统的光伏逆变器中，采用的 MPPT 控制常采用扰动法寻找组件的最大功率点电压，控制过程中波动较强，MPPT 计算时间较长。

2) 采用 3.1 节中所述的混合控制方法，可以有效利用前端组件温度监测的优势，将前端组件的温度控制状态作为补偿引入直流侧 MPPT 电压控制中，利用温度预估最大功率点电压值，再进行扰动寻找实际最大功率点，可有效地缩短 MPPT 控制时间。

3) 由于增加了前端冷却热能回收系统，可实现前端组件工作状态的实时监测，丰富了光能利用手段，增加了光能利用率，降低了光伏组件故障定位和故障诊断时间，增加了系统的整体经济性。

需要指出的是由于传统逆变器直流侧控制系统在传统控制中同样具备输入功率调控的能力，本文所提综合控制方法并非替代传统逆变器的直流侧功率控制功能，而是对其进行改进和补充。传统逆变器控制方式中，主要通过直流侧功率控制实现光伏微源发电功率的调控，但该调控过程中，前端组件的工作状态并未发生本质改变，其热能收集状态亦未发生改变，前端组件产生的多种二次能源利用率和可控性等级相对较低。与传统逆变器控制光伏微源发电功率相比，这种方法可以将前端组件的工作状态变量进行充分利用，根据用户需求以经济性为前提智能化改变前端组件热能收集状态，实现前端组件二次能源利用的需求性互动，但该方法在功率调控的过程中，调控时间较传统方式更长，调控过程更加平滑，精度更高。实际应用中可根据传统逆变器直流侧控制、前端温度-功率综合控制方法以及具体用电需求制定在不同控制时域要求下的个性化控制策略，丰富了光伏微源的控制手段，可作为小型光伏微电网系统中前端发电功率控制的后备控制

方案, 弥补了前端光伏组件控制手段空白的缺陷。

此外, 由于受投资成本和物理空间等因素的限制, 小型光伏微网系统容量常小于负荷总量, 实际应用中系统常处于产能小于需求的状态下。组件的前端温度控制旨在最大化降低组件的工作温度, 从而控制光伏微源最大功率输出, 提升系统的经济性。但在某些“常见”的特殊情况下, 系统需要被迫降低输出功率来保障可靠性时, 利用前端温度控制实现微电源功率调节的控制方法可作为小型光伏微网系统中一种有效的备用控制方式。如储能无法充电且产能大于负荷需求的自发自用工作模式下, 并且由于控制系统的二级控制和三级能量管理系统功能

不够完善, 使得底层功率输出控制效果较差, 系统的经济性下降。这种情况下, 控制前端组件的工作温度, 改变光伏阵列的输出功率的同时, 通过改变组件冷却介质流量来改变冷却介质循环后的温度, 实现系统在光电利用和光热利用中进行自主选择, 增加了用户的光能利用率, 提升了系统的经济性。

4 实验与仿真分析

本文针对前端温度控制方法的研究进行了实验和仿真分析, 实验平台结构如图 7 所示。实验和仿真共分为两部分, 组件升降温控制实验和混合控制中的逆变器功率输出调控模拟仿真。

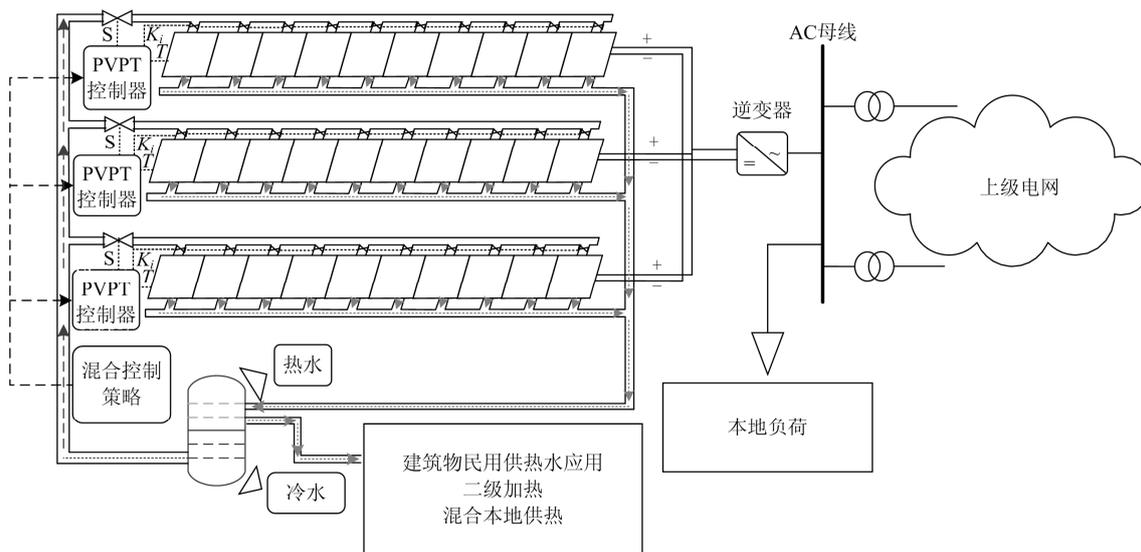


图 7 实验仿真平台结构示意图

Fig. 7 Experiment platform structure diagram

4.1 单一组件升降温实验

第一部分实验采用两块相同规格组件进行, 一块为 100 W_p 标准光伏组件, 一块为改进后的带冷却集热循环的改进组件, 实验过程中组件周边无阴影遮挡。实验中, 标准组件和改进组件实验环境相同, 实验环境温度最高为 35 °C, 最低为 23 °C, 环境无风, 无阴影遮挡, 光照充足, 冷却介质为水, 冷却循环入水温度为 10 °C。

如图 8 所示为实验当天 10:00—16:00 的全天两块组件正常工作时的温度状态监测曲线。从图 8 可以看出, 环境温度为 20~35 °C, 两块组件正常工作温度均在 40 °C 以上, 由于受到外界光照、阴影遮挡等情况的限制, 工作温度变化较为剧烈。从图 8 可以看出改进组件温度未进行冷却温度控制时其整体温度高于标准组件温度, 这是由于改进组件的冷却流道和保温层的作用导致散热效果低于标准组件。

PVPT 组件的这一特性在实际运行中可增加热能回收效率, 降低热能损耗。

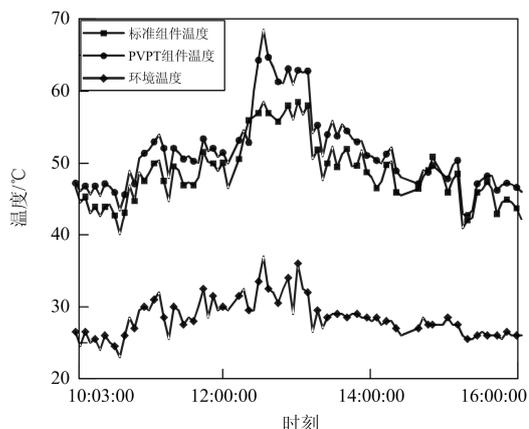


图 8 未进行温度控制时两块组件工作温度对比曲线

Fig. 8 Working temperature contrast curve of two components without temperature control

实验中在正常的自然循环冷却过程中进行降温控制实验，降温控制目标从 52 °C 降低为 44 °C。如图 9 所示，温度控制实验中 PVPT 组件由 51.5 °C 降低至 44.1 °C，降温用时 53 s，降温系数约为 0.14 °C/s。

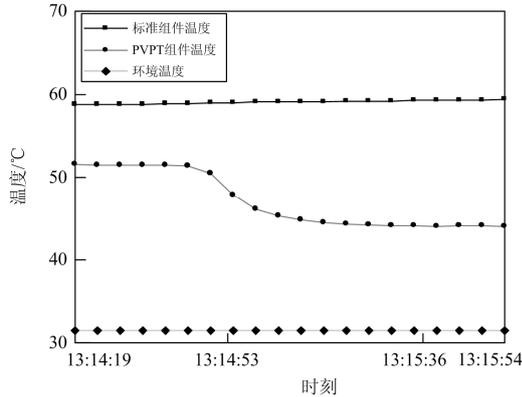


图 9 温度控制实验标准组件与改进组降温监测曲线
Fig. 9 Temperature curves of standard component and the improved component temperature in cooling process

传统光伏发电系统的发电原则为最大功率输出，通过控制组件小范围升温来降低输出功率的情况很少出现，通常仅在某些特殊工况下进行升温控制。图 10 所示为运行中的 PVPT 组件通过自身工作产热实现温度上升过程的状态监测曲线。从图 10 中可以看出，由于光照辐射的变化，在相同外界环境条件下标准组件的工作过程背板温度从 59.9 °C 降为 58 °C，而 PVPT 组件工作温度则由 38.4 °C 缓慢上升至 52.5 °C，温度上升系数为 0.012 °C/s。

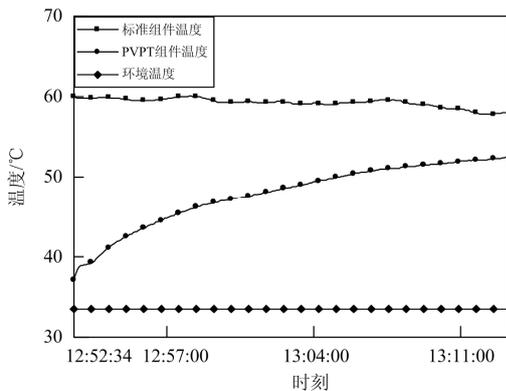


图 10 PVPT 组件工作温度自然升温过程状态监测曲线
Fig. 10 Working temperature natural rise process monitoring curve of PVPT component

4.2 混合控制中各组件温度-功率模拟

为了探讨系统因阵列整体温度控制造成的直流侧电压变化对逆变器功率输出的影响，进行了降温模拟功率输出控制仿真实验，模拟仿真采用 280 W 标准组件阵列作为模型进行模拟仿真。当 $t=4$ s 时，

模拟目标温度由 22.8 °C 降为 18 °C，当 $t=36$ s 时，模拟目标温度由 18 °C 升为 20 °C。

图 11 所示为全过程中目标温度值变化的阵列温度控制曲线和阵列输出直流侧电压值曲线，从图 11 中可以看到，当温度由 22.8 °C 降为 18 °C 时，直流侧输出电压由初始状态下的 705 V 升至 730 V，当温度由 18 °C 升为 20 °C，其电压由 730 V 降至 723 V。整个仿真时间为 56 s，电压变化较小。图 12 所示为逆变器在恒定并网电压的情况下，直流侧电压变化时其交流侧输出电流变化曲线，从图 12 中可以看出，升温时，电流由 60 A 升至 62 A，降温时电流由 62 A 降至 61.3 A，其变化区间较小。图 13 所示为阵列逆变器输出功率曲线，降温时输出功率由 18 kW 升至 18.65 kW，升温时输出功率由 18.65 kW 降至 18.46 kW。由于整个控制时间较长，曲线平滑，并未出现较大输出波动，仿真结果表明，基于前端温度控制的方式可以对系统逆变器输出功率进行小幅微调且调控过程较为平滑，可作为逆变器控制的后备控制方案，具有一定的可行性。

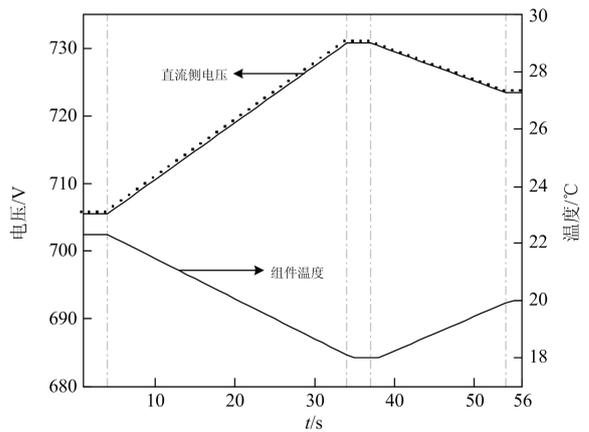


图 11 温度控制曲线和直流侧电压曲线
Fig. 11 Temperature control curve and DC side voltage curve

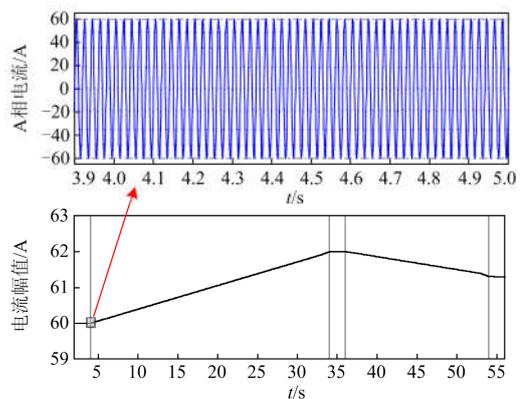


图 12 交流侧电流曲线和电流幅值曲线
Fig. 12 Current curve and current amplitude curve of AC side

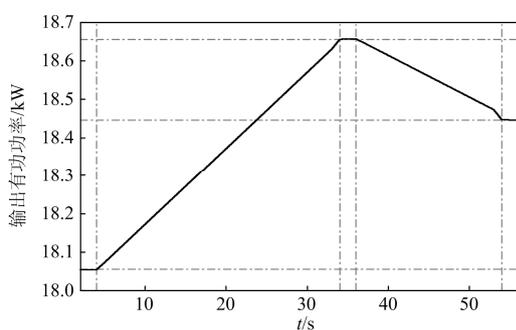


图 13 输出有功功率曲线

Fig. 13 Output active power curve

表 1 所示为实验过程中混合控制系统与传统组件系统的经济性对比分析的主要参数对比。PVPT 组件在温度控制过程中平均实际输出功率远高于标准组件的输出功率, 组件发电效率提升 21.14%, 综合能源利用效率提升 30.56%, PVPT 组件构成的分布式系统较传统组件构成的分布式发电系统效率和经济性提升明显。

表 1 标准组件与 PVPT 混合控制系统主要经济性对比

Table 1 Comparison of the main economic factors between the standard component and the PVPT component hybrid control system

	传统标准组件	改进组件
规格	100 Wp	100 Wp
单一组件实际功率输出	83.98 Wp	94.03 Wp
组件平均温度	65 °C	35 °C
光照等效时长	4.1 h	4.1 h
冷却水使用量	0 L	7.38 L
入水温度	—	10.2 °C
出水温度	—	31.7 °C
组件工作温度	40.2~69.5 °C	15.6~25.8 °C
环境温度	23.6~36 °C	23.6~36 °C
全天转化热量	—	666.414 kJ
单组件全天发电功率	1.041 kWh	1.269 kWh
温控系统耗电	—	0.046 9 kWh
组件发电效率提升	—	21.14%
综合能源利用率提升	—	30.56%
成本回收周期	7 年	5 年

目前采用冷却方式提升光伏组件发电功率的方式已在大规模集中式光伏地面电站中广泛使用。由于我国光照资源分布的限制, 大型光伏集中式光伏发电系统多分布于我国西部, 远离负荷和居民中心, 工程中多采用风冷和水冷方式为组件降温, 提升发电效率。由于地面电站远离用户, 其通常采用最大流量冷却、最大限度发电的原则, 热能回收利用的经济价值较低。中大型微电网系统多应用于工业中

心、偏远村镇以及海岛等地区, 其微源种类较多, 光伏微源发电容量占比相对较少, 距离用户中心和负荷中心距离较近, 采用前端冷却热能回收再利用的控制方法可在提升光能利用率的同时丰富光能利用手段, 提高系统的经济性, 增加用户对光能的利用率, 但由于其分布分散, 覆盖范围广的特点, 热能回收利用过程中具有一定的热能损失。而在小型民用光伏微电网系统中, 由于光伏微源处于用户负荷周边, 若忽略其发电过程中的热能, 势必造成光能利用的损失, 降低了光能的利用率, 其经济性较低。而若采用传统地面电站的最大功率、最低降温的工作原则, 其冷却回收的热能由于熵值一定, 其温度-流量比将造成用户可利用价值较低, 用户使用满意度下降等问题, 经济性价值依然较差。增加前端的温度控制, 可在有限热能回收的基础上控制流量, 达到提升用户对热能回收利用率和使用满意度的目的。表 2 对目前常见的 3 种光伏发电应用形式进行了详细对比。

表 2 3 种常见光伏发电系统冷却热能回收需求对比表

Table 2 Comparison of cooling heat recovery requirements of three common photovoltaic power systems

	小型光伏 微电网	中大型 微电网	集中式光伏 地面电站
能源种类	单一	多样	单一
容量规模	较小	中等	大型
空间分布	分散	分散	集中
新增数量增长趋势	增加	适中	减缓
系统空间覆盖面积	小	中	大
分布区域	城市社区、楼宇、别墅、CBD 商业区、学校等	海岛、大型工业产业基地、旅游景区等	西部光照资源充足区域
用途	民用、商业	商业、工业	工业
与负荷中心距离	周边	靠近	较远
冷却循环需求度	高	高	高
热能回收再利用需求度	高	高	低
热能回收损耗	低	中	高
用户再利用价值	高	中	低
用户再利用满意度	高	中	低

通过上述分析并结合表 2 不同类型光伏发电系统特点及热能利用对比, 可以发现小型民用光伏微电网系统中应用基于前端冷却热能回收的温度综合控制技术对于网内用户具有最大用户利用价值。在中大型微电网中, 光伏微源分布区域较大, 空间分散, 需要一定距离进行热能回收和传输, 具有一定的热能损耗, 且由于用户主要为民用和工业, 热能回收再利用的用户利用价值与小型光伏微电网系

统相比利用价值较低。并且由于网内电源种类较多,产热能力较强,手段丰富。因此本文所提方法更加适用于小型光伏微电网系统。

5 结论

本文针对小型民用光伏微电网受成本因素限制而造成的控制系统不完整、光电转换效率低、光能利用手段单一、故障处理时间长、经济性较差的特点,设计了一种基于PVPT理论的简易改进方案,并在此基础上将前端组件的温度作为状态补偿引入逆变器直流侧MPPT控制中,用以进行功率输出控制的调整。实验结果表明,改进组件的温度控制满足控制要求,在并网电压不变的情况下,可实现混合温度功率输出的控制。通过对实验结果的分析表明,利用这种简易改装的组件可以有效提升小型微电网用户的光能利用率,丰富了光能利用手段,增加了系统的经济性,缩短了系统的成本回收周期,具有一定的经济应用价值。

对前端组件的温度监测可以应用于故障快速定位及依据故障温度特征值区分的故障识别和分类处理中。光伏组件温度控制的混合控制方法对逆变器功率输出的调控区间较小,控制响应曲线平滑,可作为特定工况下的备用控制方案以提升系统的经济性,亦可作为系统逆变器功率输出微调的控制方法以弥补小型民用微电网受成本因素限制控制系统架构不完善的不足,具有一定的工程应用价值。

参考文献

- [1] 陈奕斌,林基明,刘迪迪. 微电网小区间的能量协作调度策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(22): 55-62.
CHEN Yibin, LIN Jiming, LIU Didi. Research on energy cooperation scheduling strategy in residential micro-grids[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(22): 55-62.
- [2] 朱洁,陈娅兰,张淼,等. 基于混合整数线性规划的家庭微电网能量优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(22): 96-101.
ZHU Jie, CHEN Yalan, ZHANG Miao, et al. Household micro grid energy optimal research based on MILP[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(22): 96-101.
- [3] 张映斌,夏登福,全鹏,等. 晶体硅光伏组件热斑失效问题研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(7): 1854-1861.
ZHANG Yingbin, XIA Dengfu, QUAN Peng, et al. Study on thermal spot failure of crystalline silicon PV modules[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2017, 38(7): 1854-1861.
- [4] ADHIKARI S, LI F. Coordinated V-f and P-Q control of solar photovoltaic generators with MPPT and battery storage in microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(3): 1270-1281.
- [5] ZHANG L, LIU Y, XIN H. Phase-plane analyses of a microgrid under PQ control mode[C] // Proc International Conference on Sustainable Power Generation and Supply (SUPERGEN 2012), September 8-9, 2012, Hangzhou, China: 1-5.
- [6] TAYAB U B, ROSLAN M A B, HWAI L J, et al. A review of droop control techniques for microgrid[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 76: 717-727.
- [7] LU X, GUERRERO J M, SUN K, et al. Hierarchical control of parallel AC-DC converter interfaces for hybrid microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 683-692.
- [8] FENG X, SHEKHAR A, YANG F, et al. Comparison of hierarchical control and distributed control for microgrid[J]. Electric Power Components and Systems, 2017, 45(10): 1043-1056.
- [9] OLIVARES D E, MEHRIZI-SANI A, ETEMADI A H, et al. Trends in microgrid control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(4): 1905-1919.
- [10] PAN Zhaoguang, GUO Qinglai, SUN Hongbin. Interactions of district electricity and heating systems considering time-scale characteristics based on quasi-steady multi-energy flow[J]. Applied Energy, 2016, 167: 230-243.
- [11] CORNEA O, ANDREESCU G D, MUNTEAN N, et al. Bidirectional power flow control in a DC microgrid through a switched-capacitor cell hybrid DC-DC converter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(4): 3012-3022.
- [12] MARTIRANO L, HABIB E, PARISE G, et al. Demand side management in microgrids for load control in nearly zero energy buildings[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(3): 1769-1779.
- [13] LIU Y, YU S, ZHU Y, et al. Modeling, planning, application and management of energy systems for isolated areas: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 82 (1): 460-470.
- [14] 何永贵,韦淑敏. 光储电站成本电价模型及投资决策分析[J]. 太阳能学报, 2017, 38(8): 2186-2194.
HE Yonggui, WEI Shumin. Cost pricing model and investment decision analysis of optical storage power plant[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2017, 38(8): 2186-2194.

- 2186-2194.
- [15] 肖泽成, 秦红, 靳晓帆. 太阳能电池冷却及光伏/光热一体化技术的新进展[J]. 电力与能源, 2011, 32(5): 397-401. XIAO Zecheng, QIN Hong, JIN Xiaofan. New development of solar cell cooling and PV/photothermal integrated Technology[J]. Power & Energy, 2011, 32(5): 397-401.
- [16] KANUMILLI C, DUTTA K K. Hybrid thermal photovoltaic system[C] // International Conference on Circuits, Communication, Control and Computing, November 21-22, 2014, Bangalore, India:17-20.
- [17] WANG Y N, LIN T T, LEONG J C, et al. Numerical investigation of high concentration photovoltaic module heat dissipation[J]. Renewable Energy, 2013, 50: 20-26.
- [18] 赖宇宁, 宋记锋, 李建昌, 等. 利用PVT组件降低热斑效应危害的研究[J]. 科技资讯, 2015, 13(20): 64-65. LAI Yuning, SONG Jifeng, LI Jianchang, et al. Study on reducing the harm of hot spot effect by using PVT component[J]. Science & Technology Information, 2015, 13(20): 64-65.
- [19] 季杰, 程洪波, 何伟, 等. 太阳能光伏光热一体化系统的实验研究[J]. 太阳能学报, 2005, 26(2): 170-173. JI Jie, CHENG Hongbo, HE Wei, et al. Experimental study on solar photovoltaic integrated system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2005, 26(2): 170-173.
- [20] MATUSKA T. Performance and economic analysis of hybrid PVT collectors in solar DHW system[J]. Energy Procedia, 2014, 48: 150-156.
- [21] 郭超, 季杰, 孙炜, 等. 多功能太阳能 PV/T 集热器的光电/光热性能研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(2): 372-377. GUO Chao, JI Jie, SUN Wei, et al. Study on Photoelectric/photothermal properties of multifunctional solar PV/T collector[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2017, 38(2): 372-377.
- [22] 王宝群, 姚强, 宋蕾, 等. 光伏/光热(PVT)系统概况与评价[J]. 太阳能学报, 2009, 30(2): 193-200. WANG Baoqun, YAO Qiang, SONG Qiang, et al. Overview and evaluation of PV/Photothermal (PVT) systems[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2009, 30(2): 193-200.
- [23] MONTGOMERY K H, HEREDIA C, WOODALL J M. Design and modeling of a high efficiency hybrid photovoltaic-photothermal concentrator (PVPTC) system[C] // 2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), June 16-21, 2013, Tampa, FL, USA: 1755-1760.
- [24] KING D L, KRATOCHVIL J A, BOYSON W E. Photovoltaic array performance model[R]. Sandia Report No. SAND 2004-3535 available from US Department of Commerce: National Technical Information Service, 2004.
- [25] 李江, 张永利, 刘强, 等. 分布式光储微电网系统并网控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 90-97. LI Jiang, ZHANG Yongli, LIU Qiang, et al. Research on grid-connected control strategy of distributed PV-storage microgrid system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 90-97.

收稿日期: 2018-03-26; 修回日期: 2018-08-21

作者简介:

董润楠(1988—), 男, 通信作者, 博士研究生, 主要从事分布式发电技术和微电网系统控制方法研究。E-mail: huaizhongyudong@163.com

(编辑 周金梅)