

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231141

突发散热故障时的光伏 MPPT 变换器控制方法研究

谢佳伟, 应展烽, 李德明

(南京理工大学能源与动力工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 作为光伏发电系统的重要组成部分, MPPT 变换器能够实现光伏电池最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制。但在环境通风不畅和冷却装置失效等突发性散热故障情况下, 变换器极易发生过热停机保护, 导致光伏电池无法输出功率, 严重影响光伏发电的可靠性与经济性。为此, 以一个 300 W 级 MPPT 变换器为对象, 对其功率器件温升特性进行了试验分析。随后, 结合传统 MPPT 算法和主动热管理策略, 提出了一种突发散热故障时的光伏 MPPT 变换器控制方法。通过对器件驱动信号占空比的动态限制和开关频率的分级调节, 所提方法能够主动调整器件工作损耗, 进而充分挖掘变换器输出功率。相关实验表明, 所提方法可最大程度保留变换器散热故障时的光伏出力, 并减少散热故障修复前的光伏发电经济损失。根据实验结果, 构建了所提方法性能评价指标, 并分析了方法性能的影响因素。

关键词: 光伏发电; 最大功率点跟踪控制; 功率器件; 结温估计; 主动热管理

A control method for a photovoltaic MPPT converter with a sudden heat dissipation fault

XIE Jiawei, YING Zhanfeng, LI Deming

(School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: As an important component of a photovoltaic power generation system, an MPPT converter is responsible for the maximum power point tracking control of photovoltaic cells. However, the converter is prone to overheating and shutdown when there are sudden heat dissipation faults, such as poor environmental ventilation and cooling device failure. The shutdown of the converter causes the output of the photovoltaic cell to be cut off, which seriously affects the reliability and economy of photovoltaic power generation. To address this, the temperature rise characteristics of power devices are analyzed in this paper by taking a 300 W MPPT converter as the object. Then, a control method for a photovoltaic MPPT converter when there is a sudden heat dissipation fault is proposed by combining the traditional MPPT algorithm with an active thermal management strategy. Through the dynamic limitation of the device duty cycle and the hierarchical adjustment of the device switching frequency, the proposed method is able to actively adjust the device loss, so as to fully exploit the output power of the converter. Related experiments show that the proposed method can retain the photovoltaic output of the converter during the heat dissipation fault to the greatest extent and reduce the economic loss of photovoltaic power generation before the repair of the heat dissipation fault. From the experimental results, this paper constructs a performance evaluation index of the proposed method and analyzes the influencing factors on the performance of the method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 52006102).

Key words: photovoltaic power generation; maximum power tracking control; power device; junction temperature estimation; active thermal control

0 引言

光伏发电的最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)是光伏系统的核心控制策略之

一, 能够最大化光伏电池输出功率, 提升整个系统运行经济性^[1-2]。经过数十年发展, MPPT 控制方法已经由扰动观察法^[3-4]和电导增量法^[5-6]等经典方法发展到了模糊控制法^[7-8]和神经网络控制法^[9-10]等智能方法, 极大地提升了光伏电池最大功率跟踪的精度与速度。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52006102)

光伏发电系统中, MPPT 变换器是用于实现光伏电池最大功率点跟踪的重要组件。近年来, 随着光伏发电容量的持续提升, 变换器内功率器件的发热量也在不断提高。正常情况下, 变换器散热设计应满足功率器件在光伏电池以最大功率输出时的热安全性要求。但在环境通风不畅和冷却系统失效等突发性散热故障情况下, 变换器无法有效向外部空间释放热量, 导致器件结温迅速上升, 最终引发变换器过热停机保护。相关数据表明, 温度过高引起的变换器故障占其故障总数的 55% 以上^[11-13]。因此, 突发性过热导致的变换器停机问题在工程中时有发生。

当 MPPT 变换器停机保护后, 光伏电池无法再为后级储能单元或负载提供电能, 严重影响光伏供电系统的可靠性和经济性。尤其对于高占比光伏发电接入电网而言, 光伏出力的骤降会降低电网运行的安全性, 导致更加严重的经济损失。因此, 有必要将功率器件的热安全性合理纳入光伏 MPPT 控制策略中, 避免变换器在散热异常状态下彻底过热停机, 尽可能地保留光伏电池的输出能力。

近年来, 功率器件主动热管理策略被提出并得到了快速发展^[14-15]。与简单粗放的过热停机保护不同, 主动热管理策略利用电流动态限制^[16]、开关频率调节^[17-18]或调制策略优化^[19-20]等手段, 对器件损耗进行实时调整, 从而主动控制器件结温, 达到避免器件过温、延长器件使用寿命或挖掘变换器过载能力等目的。凭借上述特点, 主动热管理策略已经在开关电源^[21-22]、电机驱动^[23-24]、风力发电^[25-26]等领域中得到了应用, 获得了良好成效。文献[27]将主动热管理思想引入光伏 MPPT 变换器中, 提出了一种“寿命校正”(Lifetime-Corrected)MPPT 方法。该方法以器件结温与变化率是否超标为依据, 通过对器件驱动信号占空比的自增或自减操作, 来限制器件结温及其波动, 从而在光照条件快速变化情况下, 有效降低器件热应力, 最终达到提升器件使用寿命的目的。但由于损耗调节方式单一以及缺乏结温的准确控制, 该方法难以在变换器散热异常状态下最大程度地保留光伏电池的输出功率。

为此, 本文将基于主动热管理策略原理, 提出一种针对突发散热故障情况下的光伏 MPPT 变换器控制方法。该方法通过对器件驱动信号占空比的动态限制和开关频率的分级调节, 实现器件结温的准确控制, 从而在避免变换器过热停机的同时, 充分挖掘其输出能力, 最大程度地保留光伏出力, 减少散热异常故障修复前的光伏发电系统经济损失。实验结果验证了所提方法的有效性与优越性, 并给出了方法性能评价指标和影响因素。

1 MPPT 变换器功率器件的温升特性

1.1 MPPT 变换器基本工作原理

在光伏发电系统中, MPPT 变换器连接着光伏电池、后级储能及逆变设备, 能够实时监测光伏电池输出电压 U_{pv} 与功率 P_{pv} , 实现电池最大功率点跟踪控制, 如图 1 所示。为满足多数工程对直流母线运行电压范围的要求, 光伏发电系统常采用升压型电路作为 MPPT 变换器的基本拓扑结构^[28]。

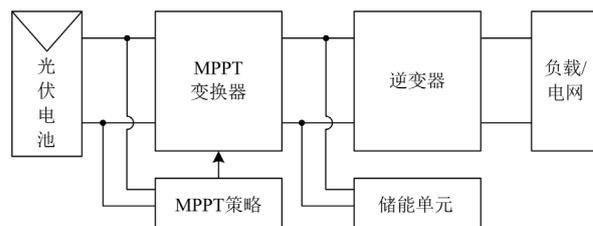


图 1 光伏发电系统中的 MPPT 变换器

Fig. 1 MPPT converter in photovoltaic power generation system

MPPT 控制的基本思想是通过调节变换器内功率器件驱动信号的占空比, 使光伏电池输出功率达到最大。扰动观察法是目前使用最广泛的 MPPT 控制策略, 其原理如图 2 所示。该策略通过不断改变器件驱动信号占空比 d , 对光伏电池电压 U_{pv} 施加扰动 ΔU_{pv} , 再通过扰动前后电池输出功率 P_{pv} 的变化 ΔP_{pv} , 确定下一时刻的占空比变化方向, 从而调整电压 U_{pv} 扰动方向, 最终令光伏电池的输出功率维持在最大值 $P_{pv,m}$ 附近。

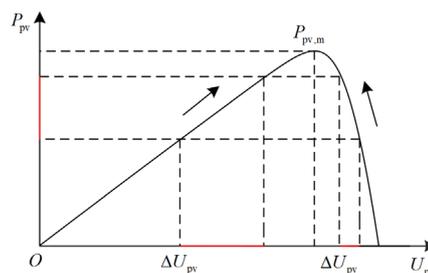


图 2 扰动观察法原理

Fig. 2 Principle of disturbance observation method

1.2 变换器热安全性实验平台

以一个 300 W 级的小功率 MPPT 变换器为对象, 搭建了如图 3 所示的热安全性实验平台。其中, 光伏电池模拟器能够准确地模拟光伏电池在不同光照强度和环境温度下的输出特性, 且其输出不受天气随机变化的影响, 有效保障了实验的可重复性。MPPT 变换器采用典型的 Boost 电路拓扑, 其可控

开关器件选用功率 MOSFET。风扇用于调节实验对流环境，可为变换器提供不同风冷条件。采集装置以 0.25 s 为周期，不断将实验数据上传至 PC 机中，用于后期处理与分析。

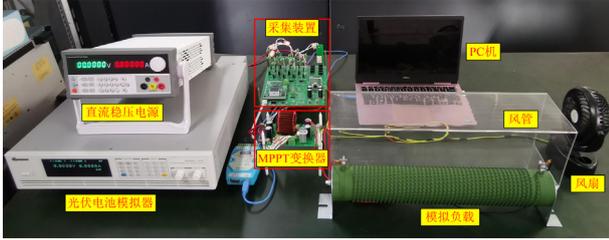


图 3 热安全性实验平台

Fig. 3 Thermal safety experimental platform

光伏电池模拟器所模拟的电池型号为 ZXM6-72-300-M，主要规格参数如表 1 所示。

表 1 光伏电池主要规格参数

Table 1 Main specifications of photovoltaic cells

参数	数值
开路电压 V_{oc}/V	46.190
短路电流 I_{sc}/A	8.660
最大功率点处电压 V_{mp}/V	37.200
最大功率点处电流 I_{mp}/A	8.060
开路电压温度系数 $K_v/(%/^{\circ}C)$	-0.388
短路电流温度系数 $K_i/(%/^{\circ}C)$	0.048

功率 MOSFET 采用 IRFB4229。根据厂家提供的数据手册^[29]，可得该功率器件的热网络模型，如图 4 所示。图中： T_j 和 T_c 分别为器件结温和壳温； T_1 和 T_2 分别为热网络模型节点 1 和节点 2 的温度。模型中的各热阻和热容参数取值如表 2 所示。在实验中，通过求解此热网络模型，能够实现 MOSFET 的结温估计，进而评估变换器的热安全性。

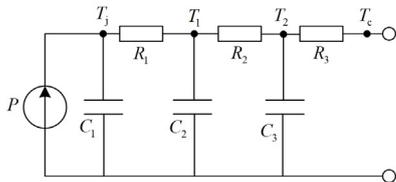


图 4 热网络模型

Fig. 4 Thermal network model

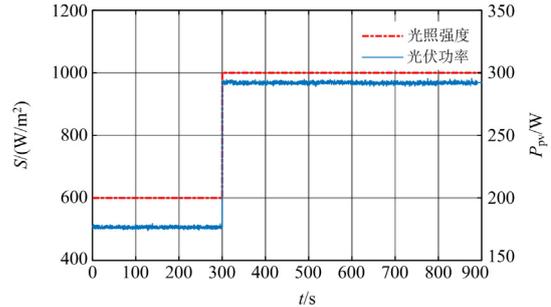
表 2 热网络模型参数

Table 2 Thermal network model parameters

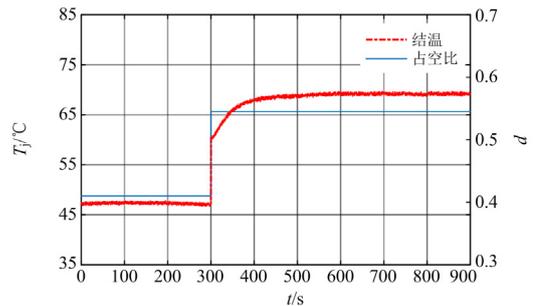
模型	热阻/($^{\circ}C/W$)			热容/($J/^{\circ}C$)		
	R_1	R_2	R_3	C_1	C_2	C_3
参数	8.1×10^{-2}	2.1×10^{-1}	1.6×10^{-1}	6.4×10^{-5}	4.9×10^{-3}	4.6×10^{-2}
数值	8.1×10^{-2}	2.1×10^{-1}	1.6×10^{-1}	6.4×10^{-5}	4.9×10^{-3}	4.6×10^{-2}

1.3 实验结果分析

利用实验平台对 MPPT 变换器开展测试。测试中，控制风扇在实验区域中产生 2.1 m/s 的风速，用于变换器散热。测试总时长为 900 s。当测试时间 $t \leq 300$ s 时，光伏模拟器所设定的光照强度 S 为 600 W/m^2 ，且变换器中的功率器件已工作于热稳态。当 $t > 300$ s 时，光照强度 S 跳变至 1000 W/m^2 。图 5 给出了上述光照强度变化条件下光伏电池输出功率、变换器功率器件占空比及结温等状态数据。



(a) 光照强度和光伏电池输出功率的变化情况



(b) 结温和占空比的变化情况

图 5 光照强度变化条件下的变换器实验结果

Fig. 5 Experimental results of the converter under the change of illumination conditions

由图 5 可见，当光照强度增加后，MPPT 算法的功率器件占空比 d 将增大，使光伏电池最大输出功率由 176.9 W 提升至 292.3 W。占空比和光伏功率的增大也提高了器件损耗，导致器件结温由原有的 $47.3^{\circ}C$ 上升至 $69.2^{\circ}C$ ，这表明器件热安全性会随着光伏输出功率的提升而降低。

通常情况下，MPPT 变换器的散热设计应当满足功率器件在最大功率点跟踪时的热安全性，但当变换器散热系统故障时，情况将发生改变。现模拟光伏电池在 1000 W/m^2 的恒定光照条件下运行，并通过改变风扇转速，在实验区域中分别创造风速为 2.1 m/s 和 0.65 m/s 的对流环境，前者高风速为变换器提供了正常风冷散热环境，而后者低风速导致了散热异常环境。图 6 给出了在这两种环境条件下光伏

电池输出功率和器件稳态结温随占空比的变化情况。

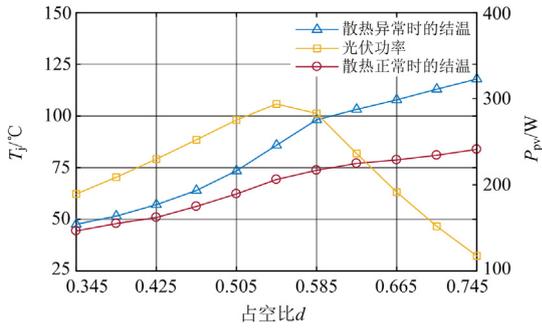


图 6 正常与异常散热情况下光伏电池输出功率和功率器件稳态结温随占空比的变化关系

Fig. 6 Photovoltaic power and steady-state junction temperature of power devices versus duty cycles under normal and abnormal heat dissipation conditions

设功率器件工作的结温限制值 T_{jlim} 为 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。容易发现, 同等占空比条件下, 散热异常时的器件结温明显高于正常散热环境中的结温。当占空比增加至最大功率点对应值 d_{mpp} 时, 散热异常下的器件结温将超过其限制值。这表明对于散热不良的变换器而言, MPPT 控制会加大器件过温风险。下面仍在 1000 W/m^2 恒定光照下, 令变换器先后在正常和异常散热环境中运行, 但在测试中引入过温停机保护机制。图 7 给出了过温保护前后光伏电池输出功率与变换器功率器件结温的变化情况。可以发现, 自变换器散热环境从 300 s 起出现异常后, 器件结温逐渐上升, 并在约 403 s 时达到限制值 T_{jlim} 。变换器随即触发停机保护, 迫使光伏发电功率骤变为 0 W , 严重影响光伏发电的可靠性与经济性。

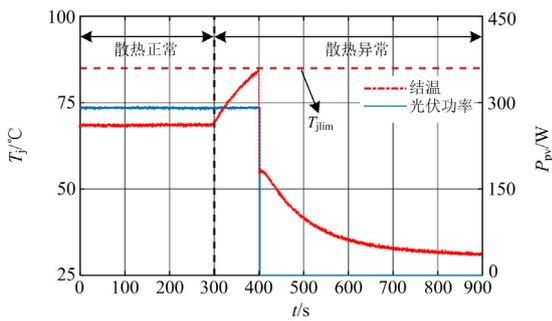


图 7 突发散热故障时的光伏电池输出功率与器件结温变化
Fig. 7 Changes of photovoltaic cell power and device junction temperature during sudden heat dissipation failure

2 突发散热故障时的 MPPT 变换器控制方法

2.1 主动热管理策略

主动热管理是通过主动控制功率器件发热来

提升功率设备运行安全性的一种热管理策略。该策略首先通过测量或估计方法获得功率设备中的关键功率器件结温, 再对结温进行实时控制, 并依据结温控制器输出结果, 对变换器的参考输出加以限制或改变器件开关频率, 从而主动调整器件损耗与发热量, 最终实现器件热管理。图 8 给出了主动热管理策略的基本框架。

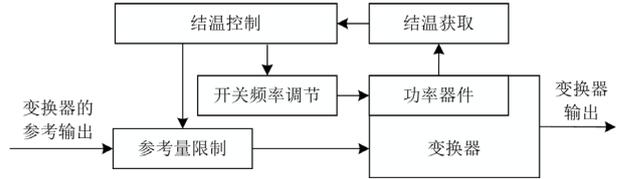


图 8 主动热管理策略的基本框架

Fig. 8 Basic framework of active thermal control strategy

2.2 所提方法原理

基于传统 MPPT 算法, 结合上述功率器件主动热管理框架, 提出针对突发散热故障时的光伏 MPPT 变换器控制方法, 其原理如图 9 所示。

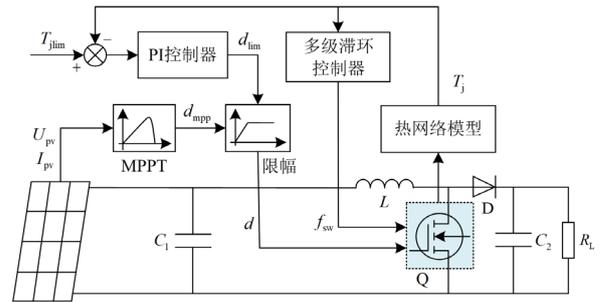


图 9 所提方法原理示意图

Fig. 9 Principle diagram of the proposed method

PI 控制器的表达式如式(1)所示。

$$\begin{cases} d_{lim}(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt \\ e(t) = T_{jlim} - T_j(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $d_{lim}(t)$ 为任意 t 时刻下的占空比限制值; K_p 为比例系数; K_i 为积分系数。

多级滞环控制器将结温划分为多个温度等级, 在温度阈值处采用滞环控制, 防止开关频率频繁切换, 其原理如图 10 所示。其中, T_{j1} 、 T_{j2} 、 T_{j3} 、 T_{j4} 为各个滞环的结温阈值, 当温度增加或减少到某一阈值后, 开关频率将会切换。

所提方法利用图 4 所示的热网络模型实时估计器件结温 T_j , 再分别通过 PI 控制器和多级滞环控制器实现结温控制。其中, PI 控制器输出 d_{lim} 用于限制扰动观察法所得占空比值 d_{mpp} 。虽然这会破坏光伏电池最大功率跟踪效果, 但可降低器件损耗与发

热, 保障变换器热安全性。多级滞环控制器的输出用于在结温过大时逐级降低开关频率 f_{sw} 。尽管这会一定程度提高变换器的电噪声, 但亦可有效降低器件损耗, 并提升变换器带载能力。

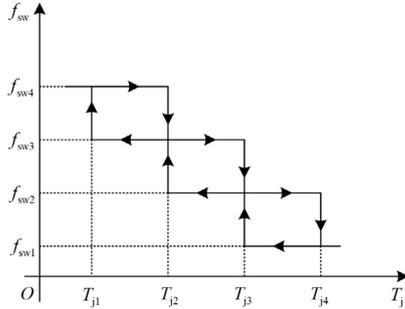


图 10 多级滞环控制器原理图

Fig. 10 Schematic diagram of multi-level hysteresis controller

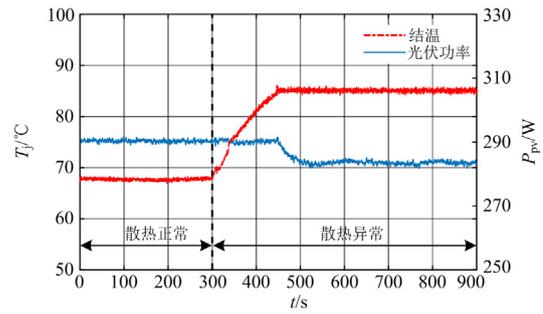
在动态限制后的占空比 d 和分级调节后的开关频率 f_{sw} 联合作用下, 器件结温能够得到准确控制。因此, 当发生散热异常时, 所提方法能够有效避免变换器的过热停机, 最大程度保留光伏电池在当前条件下的输出能力。若变换器的散热条件正常, 所提方法中的结温控制器和多级滞环控制器不会对原有 MPPT 策略所得占空比产生影响。即所提方法可在变换器散热能力满足要求时自行变为传统 MPPT 控制算法, 具有良好的自适应性。

3 所提方法实验验证与分析

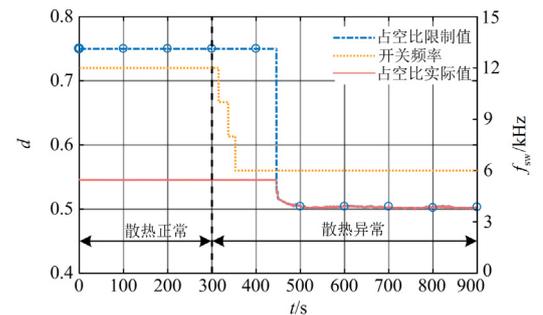
3.1 方法有效性验证

基于前文所述实验平台, 对所提方法有效性进行验证。实验仍在 1000 W/m^2 恒定光照条件下进行, 且变换器先后在风速为 2.1 m/s 的正常散热环境和风速为 0.15 m/s 的异常散热环境中运行, 以模拟突发性散热故障。在所提方法中, 结温 PI 控制器的比例系数 K_p 和积分系数 K_i 分别为 1.2×10^{-5} 和 1.0×10^{-4} 。另外, 本文采用三阶滞环控制器, 结温阈值分别设定为 $70.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $73.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $76.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $79.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。在上述阈值下, 开关频率 f_{sw} 以 2 kHz 为步长在 12 kHz 和 6 kHz 之间变化。图 11 给出了利用所提方法后得到的实验结果。

图 11 结果表明, 当发生散热异常后, 变换器的功率器件结温迅速升高。但在所提方法作用下, 器件开关频率从 12 kHz 起不断下降至 6 kHz , 以降低开关损耗。占空比则由原来的 54.5% 逐渐减小至限制值 50.2% 。这使功率器件结温被准确地控制在限制值 T_{jlim} 上, 光伏电池输出功率由原最大值 290 W 逐渐下降并稳定至 283 W 。



(a) 结温和光伏电池输出功率的变化情况



(b) 占空比和开关频率的变化情况

图 11 突发散热故障时利用所提方法得到的实验结果

Fig. 11 Experimental results obtained by the proposed method under sudden heat dissipation fault

图 12 给出了所提 MPPT 控制方法与基于过温保护的 MPPT 控制方法所得光伏电池输出功率结果对比。其中, t_{s1} 和 t_{s2} 分别为过温保护方法和所提方法得到的最大功率保留时长。由图 12 可知, 受过温保护机制的影响, 过温保护方法只能在突发散热故障后的 103 s 内维持光伏电池的最大功率输出, 并在此之后完全禁止光伏输出。而通过调整器件的开关频率和占空比, 所提方法可将光伏电池最大功率保留时长延长至 150 s , 并在之后通过调整光伏功率使系统维持运行。

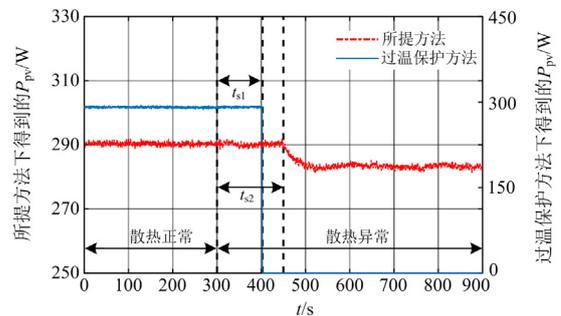
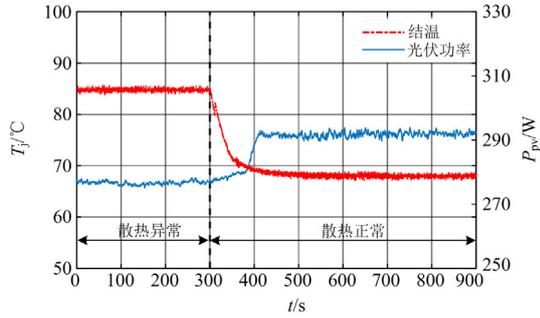


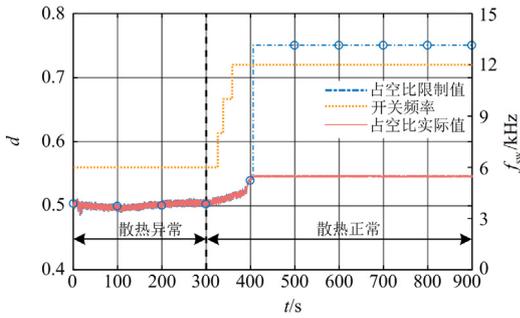
图 12 所提方法与基于过温保护的方法得到的光伏电池输出功率结果对比

Fig. 12 Comparison results of photovoltaic power obtained by the proposed method and the method based on overheating protection

图 13 给出了散热条件由异常恢复至正常时, 利用所提控制方法得到的实验结果。与图 11 结果相反, 当散热故障排除后, 变换器冷却能力得到强化, 器件结温不断下降。在所提方法作用下, 器件开关频率和占空比值逐步得到恢复。同时, 光伏电池输出功率也最终恢复至 MPPT 算法所得的最大功率跟踪结果 290 W 左右。



(a) 结温和光伏电池输出功率的变化情况



(b) 占空比和开关频率的变化情况

图 13 散热故障恢复时利用所提方法得到的实验结果

Fig. 13 Experimental results obtained by the proposed method when the heat dissipation fault is restored

上述实验表明, 本文所提方法有效避免了 MPPT 变换器在异常散热条件下的过热停机, 最大程度保留了光伏电池输出功率, 减少了散热异常状态修复前的光伏发电经济损失, 相比传统控制方法, 具有明显优势。

3.2 方法性能评价指标

当发生散热异常后, 所提方法对光伏电池输出功率的影响可分为暂态($t_1 \sim t_3$ 时段)和稳态($t_3 \sim \infty$ 时段)两个阶段, 如图 14 所示。

暂态阶段又可分为 $t_1 \sim t_2$ 和 $t_2 \sim t_3$ 两个时段。在 $t_1 \sim t_2$ 时段, 光伏电池仍可以最大功率跟踪算法的结果输出功率 P_{mpp} 。这是因为变换器和功率器件存在热容形成的热惯性效应, 导致器件结温上升至最高值 T_{jmax} 。当结温与其限制值 T_{jlim} 差距较大时, 所提方法判定光伏电池仍然能够短时维持 MPPT 算法

所得最大输出功率。在 $t_2 \sim t_3$ 时段, 器件结温不断接近限制值。此时, 仅依靠降低开关频率已无法抑制结温上升, 故所提方法开始逐渐减小光伏输出功率, 以实现结温控制。在稳态阶段中, 结温已被控制于 T_{jss} , 此值与限制值相近。相应地, 所提方法也将光伏电池输出功率稳定至能够满足器件热安全性要求的新功率值 P_{stab} 上。

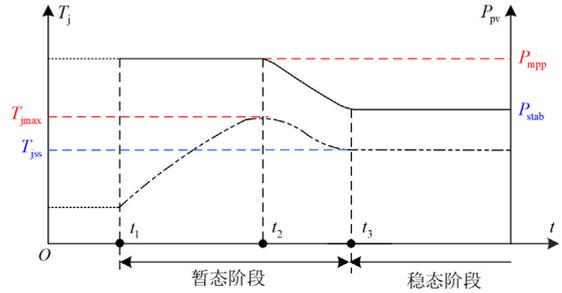


图 14 所提方法下光伏电池输出功率和器件结温的变化趋势

Fig. 14 Variation trend of photovoltaic power and device junction temperature under the proposed method

可见无论暂态阶段还是稳态阶段, 本文所提方法的根本目的都是避免变换器过温, 同时尽可能保留光伏出力。因此, 结温控制精度和光伏功率保留能力是评价方法性能的重要依据。其中, 结温控制精度性能可通过结温控制的超调量 σ 和稳态误差 e 两个指标加以描述, 而光伏功率保留能力可通过最大功率持续时间 t_s 及稳态功率保留度 k_s 两个指标表征。

结温超调量 σ 可定义为在所提方法的暂态阶段中, 所控结温的最高值 T_{jmax} 与限制值 T_{jlim} 之间的相对偏差, 如式(2)所示。

$$\sigma = \frac{T_{jmax} - T_{jlim}}{T_{jlim}} \times 100\% \quad (2)$$

稳态误差 e_1 可定义为在所提方法的稳态阶段中, 结温稳定值 T_{jss} 和限制值 T_{jlim} 之间的相对偏差, 如式(3)所示。

$$e_1 = \frac{T_{jss} - T_{jlim}}{T_{jlim}} \times 100\% \quad (3)$$

最大功率持续时间 t_s 可定义为在所提方法的暂态阶段中, 光伏电池仍可保持最大功率输出的时长。

$$t_s = t_2 - t_1 \quad (4)$$

稳态功率保留度 k_s 可定义为在所提方法的稳态阶段中, 最终保留下来的稳定光伏功率 P_{stab} 与最大功率 P_{mpp} 之间的比值, 即

$$k_s = \frac{P_{stab}}{P_{mpp}} \times 100\% \quad (5)$$

3.3 方法性能的影响因素分析

作为与光伏输出功率和功率器件结温的密切相关参数，光伏电池的光照强度 S 和 MPPT 变换器的散热异常程度 h 是影响上述指标的两个重要因素。对于采用强迫风冷的变换器而言，其散热异常程度可定义为

$$h = 1 - \frac{v_y}{v_z} \quad (6)$$

式中， v_y 和 v_z 分别为异常和正常散热环境下的冷却风速。 h 取值越接近于 1，表明散热异常程度越高。

下面在不同的光照强度 S 和散热异常程度 h 下利用所提方法开展实验，并记录方法性能指标。图 15 给出了所提方法性能指标参数随 S 和 h 的变化情况。

从图 15(a)和图 15(b)可以看出，在不同的光照强度 S 和散热异常程度 h 下，超调量 σ 和稳态误差

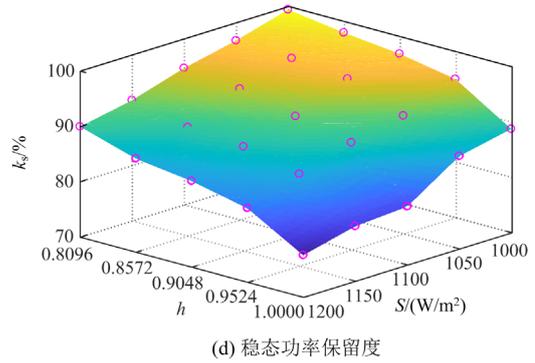
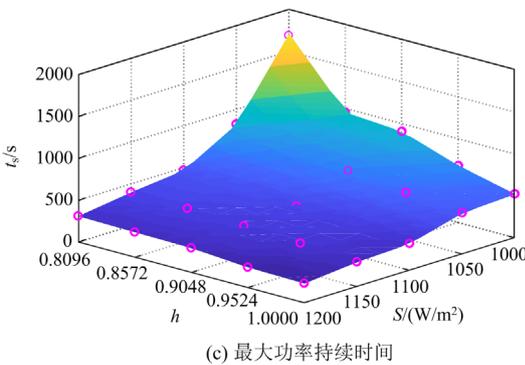
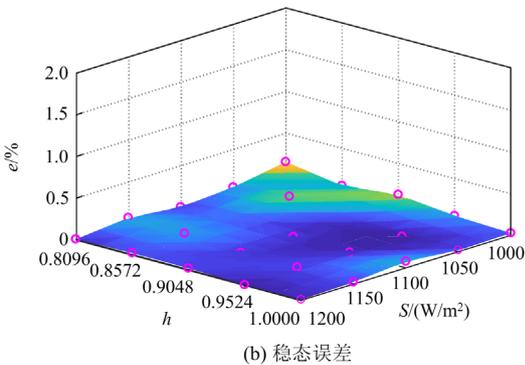
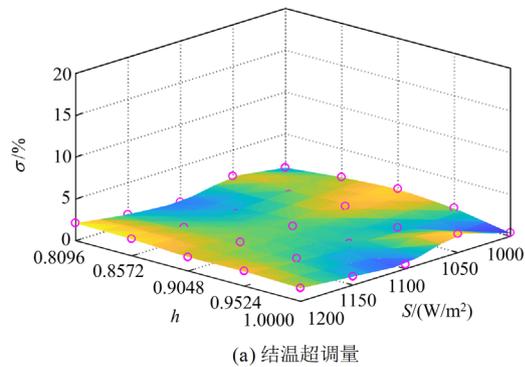


图 15 光照强度和散热异常程度对所提方法性能指标的影响

Fig. 15 Influence of light intensity and heat dissipation abnormality on the performance index of the proposed method

e 的变化并无明显的单调规律，但基本都处于 2% 以下。这是因为 S 和 h 对于结温控制系统而言本质上属于扰动量。在合适的控制参数下，结温控制精度受光照强度和散热异常程度的影响较小。

图 15(c)表明，随着光照强度 S 和散热异常程度 h 的增大，最大功率持续时间 t_s 呈现下降趋势。这是因为 S 和 h 的增大会分别提高突发散热异常后的器件初始结温及结温上升速率，缩短器件温升的热惯性过程，进而降低光伏电池最大输出功率的持续时间。

图 15(d)表明，随着光照强度 S 和散热异常程度 h 的增大，稳态功率保留度 k_s 也呈现下降趋势。这是因为 S 和 h 的提升会分别提高最大功率点处的光伏功率 P_{mpp} 和减小所保留下来的稳定光伏功率 P_{stab} ，从而降低光伏电池的稳态功率保留度。

上述结果表明，光照强度 S 和散热异常程度 h 对所提方法结温控制精度的影响较小，但对光伏发电功率保留能力的影响较大。这说明在工程中，从根本上防止变换器出现冷却故障依然是保障光伏发电出力的首要条件。但一旦发生了散热问题，所提方法能够尽可能避免变换器过热停机，最大程度保留光伏出力，减少散热故障修复前的光伏发电经济损失，因此具有重要的工程价值。

4 结论

本文基于主动热管理策略，将功率器件热安全性纳入了光伏 MPPT 变换器的控制策略中，提出了一种突发散热故障下的 MPPT 变换器控制方法，并分析了所提方法的性能评价指标。依据实验结果，得到如下结论：

- 1) 通过功率器件驱动信号占空比的动态限制

和开关频率的分级调节, 所提方法可在 MPPT 变换器发生散热故障时, 准确控制功率器件结温, 有效避免变换器过热停机, 最大程度保留光伏电池的输出功率, 减少散热故障修复前的光伏发电经济损失。

2) 光伏电池的光照强度和变换器的散热异常程度对所提方法结温控制精度影响较小, 但对光伏发电功率保留能力的影响较大, 这有助于对本文方法在工程中的实施效果进行初步判断与评估。

本文仅以一个小功率 MPPT 变换器为对象进行方法的有效性验证, 其结果不受变换器功率等级的影响。而由于大功率变换器的热惯性大且散热要求高, 所提方法的优势将更加明显。另外, 所提方法的基本思想还可推广至光伏系统的其他变换器中, 包括储能变换器和并网逆变器, 以提升整个光伏系统在突发散热故障情况下的运行可靠性与经济性。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 晏璐, 陈演斐, 刘喜泉, 等. 考虑旁路二极管故障的光伏组件数学建模及功率特性分析研究[J]. 智慧电力, 2023, 51(2): 84-90. YAN Lu, CHEN Zhenfei, LIU Xiquan, et al. Mathematical modeling and power characteristic analysis of photovoltaic modules considering bypass diode faults[J]. Smart Power, 2023, 51(2): 84-90.
- [3] 商立群, 李帆. 基于自适应布谷鸟搜索和扰动观察法的光伏最大功率点跟踪[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(8): 99-107. SHANG Liqun, LI Fan. PV power point tracking based on adaptive cuckoo search and perturbation observation method[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(8): 99-107.
- [4] LIU Lianxi, HUANG Chaojin, MU Junchao, et al. A P&O MPPT with a novel analog power-detector for WSNs applications[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2020, 67(10): 1680-1684.
- [5] POKHAREL M, GHOSH A, HO C N M, et al. Small-signal modelling and design validation of PV-controllers with INC-MPPT using CHIL[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(1): 361-371.
- [6] KUMAR N, SINGH B, PANIGRAHI B K, et al. Leaky-least-logarithmic-absolute-difference-based control algorithm and learning-based INC MPPT technique for grid-integrated PV system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(11): 9003-9012.
- [7] 杨德友, 崔冬晓, 蔡国伟. 基于云智能控制器的燃料电池最大功率跟踪策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(14): 3362-3370. YANG Deyou, CUI Dongxiao, CAI Guowei. A maximum power point tracking technology for fuel cells using cloud model based intelligent controller[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(14): 3362-3370.
- [8] 何胜华, 范必双, 夏侯智聪, 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.
- [9] KUMAR N, SINGH B, PANIGRAHI B K. PNKLMF-based neural network control and learning-based HC MPPT technique for multiobjective grid integrated solar PV based distributed generating system[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(6): 3732-3742.
- [10] 王志豪, 李自成, 王后能, 等. 基于 RBF 神经网络的光伏系统 MPPT 研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 85-91. WANG Zhihao, LI Zicheng, WANG Houneng, et al. MPPT study of solar PV power system based on RBF neural network algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 85-91.
- [11] 徐钊, 张一童, 潘震, 等. DC-DC 变换器的典型故障分类方法研究[J]. 西北工业大学学报, 2021, 39(1): 71-76. XU Zhao, ZHANG Yitong, PAN Zhen, et al. Research on typical fault classification method of DC-DC converter[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2021, 39(1): 71-76.
- [12] 李彬彬, 张玉洁, 张书鑫, 等. 具备故障阻断能力的柔性直流输电 DC/DC 变换器[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(5): 53-59. LI Binbin, ZHANG Yujie, ZHANG Shuxin, et al. DC/DC converter with fault blocking capability for HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(5): 53-59.
- [13] BAHARANI M, BIGLARBEHIAN M, PARKHIDEH B, et al. Real-time deep learning at the edge for scalable reliability modeling of Si-MOSFET power electronics converters[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(5): 7375-7385.
- [14] 魏云海, 陈民铀, 赖伟, 等. 基于 IGBT 结温波动平滑

- 控制的主动热管理方法综述[J]. 电工技术学报, 2022, 37(6): 1415-1430.
- WEI Yunhai, CHEN Minyou, LAI Wei, et al. Review on active thermal control methods based on junction temperature swing smooth control of IGBTs[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(6): 1415-1430.
- [15] WANG Yanbo, LIU Ping, LIU Dong, et al. Enhanced hierarchical control framework of microgrids with efficiency improvement and thermal management[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(1): 11-22.
- [16] RONANKI D, WILLIAMSON S S. Device loading and reliability analysis of modular multilevel converters with circulating current control and common-mode voltage injection[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 7(3): 1815-1823.
- [17] ANDRESEN M, MA Ke, BUTICCHI G, et al. Junction temperature control for more reliable power electronics[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(1): 765-776.
- [18] SHA Deshang, SUN Tengfei, ZHANG Jiankun. Varying switching frequency control for current-fed dual-active bridge DC-DC converter with constant flux density change for transformers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 3766-3777.
- [19] 李辉, 宋二兵, 刘海涛, 等. 双馈抽水蓄能机组用三电平变流器器件损耗分析及其改进调制策略[J]. 太阳能学报, 2019, 40(5): 1217-1224.
- LI Hui, SONG Erbing, LIU Haitao, et al. Loss distribution and improved modulation strategy of three-level converter for doubly-fed pumped storage unit[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2019, 40(5): 1217-1224.
- [20] UGUR E, DUSMEZ S, AKIN B. An investigation on diagnosis-based power switch lifetime extension strategies for three-phase inverters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(2): 2064-2075.
- [21] HAN Rong, XU Qianming, DING Hongqi, et al. Thermal stress balancing oriented model predictive control of modular multilevel switching power amplifier[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(11): 9028-9038.
- [22] KUPRAT J, BROECK C H V D, ANDRESEN M, et al. Research on active thermal control: actual status and future trends[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(6): 6494-6506.
- [23] QI Yuhao, MA Ke, XIA Shihao. Active thermal control with optimal phase angle under stall condition of machine drive inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(9): 10128-10132.
- [24] FALCK J, BUTICCHI G, LISERRE M. Thermal stress based model predictive control of electric drives[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(2): 1513-1522.
- [25] KO Y, ANDRESEN M, BUTICCHI G, et al. Discontinuous-modulation-based active thermal control of power electronic modules in wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(1): 301-310.
- [26] ZHANG Jianwen, WANG Jiacheng, CAI Xu. Active thermal control-based anticondensation strategy in paralleled wind power converters by adjusting reactive circulating current[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(1): 277-291.
- [27] ANDRESEN M, BUTICCHI G, LISERRE M. Thermal stress analysis and MPPT optimization of photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(8): 4889-4898.
- [28] SINGH S, KEWAT S, SINGH B, et al. Seamless control of solar PV grid interfaced system with islanding operation[J]. IEEE Power and Energy Technology Systems Journal, 2019, 6(3): 162-171.
- [29] 熊城, 应展烽, 姚凯, 等. 随机对流条件下全密封变换器负载能力的动态评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(18): 6812-6823.
- XIONG Cheng, YING Zhanfeng, YAO Kai, et al. Load capacity dynamic assessment method for fully-sealed converter under random convection[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18): 6812-6823.

收稿日期: 2023-09-03; 修回日期: 2023-11-14

作者简介:

谢佳伟(1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为光伏发电系统控制及可靠性技术; E-mail: xiejiawei0824@163.com

应展烽(1982—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电气设备可靠性分析与评估; E-mail: zhanfengying@njust.edu.cn

李德明(1998—), 男, 硕士, 研究方向为光伏发电系统控制及可靠性技术。E-mail: 1713063535@qq.com

(编辑 周金梅)