

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240901

用于孤岛模式下光储直流微网的改进超螺旋 MPPT 控制策略

杨建湘, 范毅然, 熊建斌, 张金良, 辛妍丽, 王 颖

(广东技术师范大学自动化学院, 广东 广州 510450)

摘要: 由于光储直流微网输出功率在孤岛模式下受外部环境的影响较大, 为提高系统的最大功率跟踪特性, 采用了正反激变换器的独立光伏发电拓扑结构。针对传统滑模控制在光伏最大功率跟踪(maximum power point tracking, MPPT)中存在的滑模抖振和响应速度慢等问题, 提出一种基于改进型超螺旋趋近律的 MPPT 滑模控制实现方法。该方法利用 Sigmoid 函数的连续性并与快速终端滑模面相结合, 优化了超螺旋趋近律, 改善了抖振效果, 提高了响应速度, 并利用 Matlab/Simulink 仿真平台与其他控制策略进行对比验证。结果表明: 当系统不存在外界扰动时, 所提方法均能实现对最大功率点的快速跟踪, 同时具有较小的抖振。当辐照度、温度发生变化时, 系统具有更好的动态响应速度和抗扰能力。

关键词: 光储直流微网; 正反激变换器; MPPT; 快速终端滑模; 超螺旋趋近律

Improved super-twisting MPPT control strategy for PV-storage DC microgrid in islanded mode

YANG Jianxiang, FAN Yiran, XIONG Jianbin, ZHANG Jinliang, XIN Yanli, WANG Qi

(College of Automation, Guangdong Polytechnic Normal University, Guangzhou 510450, China)

Abstract: In islanded mode, the output power of PV-storage DC microgrids is significantly affected by external environmental factors. To improve the system's maximum power point tracking (MPPT) characteristics, a push-pull converter based independent photovoltaic power generation topology is adopted in this paper. To address the issues such as chattering and slow response in traditional sliding mode control (SMC) for MPPT, this paper proposes an improved super-twisting sliding mode control method based on a modified super-twisting reaching law. By leveraging the continuity of the sigmoid function in combination with the fast terminal sliding mode surface, the proposed method optimizes the super-twisting reaching law, reduces chattering, and improves response speed. Matlab/Simulink simulations are used to compare with other methods and verify the proposed control strategy. The results show that in the absence of external disturbances, the proposed method can achieve fast and accurate MPPT with minimum chattering. When irradiance or temperature varies, the system shows better dynamic response and enhanced disturbance rejection capability.

This work is supported by the Key Project of 2022 National Natural Science Foundation of China-Guangdong Province Joint Fund (No. U22A20221).

Key words: PV-storage DC microgrid; push-pull converter; MPPT; fast terminal sliding mode; super-twisting reaching law

0 引言

随着“双碳”目标的提出以及大量传统化石燃料能源机组的退出和新能源发电机组的接入, 太阳能作为一种重要的清洁、可再生能源, 其发电量和

在电网中所占比重日益增大^[1-2]。而光伏发电作为一种可再生能源发电形式, 由于受到温度和辐照度等环境影响较大, 从而引起输出功率的波动进而影响发电效率^[3-4]。因此, 设计快速稳定的最大功率跟踪(maximum power point tracking, MPPT)技术对于光伏发电系统至关重要^[5-6]。

传统的 MPPT 控制方法有恒定电压法^[7]、扰动观察法^[8]、电导增量法^[9-10]等。然而, 传统的控制策略多采用定步长的方式, 若使用单一的控制策略无

基金项目: 2022 国家自然科学基金-广东省联合基金重点项目资助(U22A20221); 广东省自然科学基金面上项目资助(2024A1515011580)

法在复杂的光照环境下同时兼顾跟踪的速度与精度, 并且还存在着输出振荡的问题, 造成太阳能资源的严重浪费^[11-13]。为了应对复杂多变的光照环境, 随着现代控制理论的快速发展, 越来越多基于非线性控制理论的智能算法被运用到了传统的 MPPT 技术当中, 通过非线性控制理论强适应性与全局优化性可以更好地实现最大功率点的准确跟踪。因此, 通过研究“传统控制方式+非线性控制理论”的 MPPT 控制策略, 以及完善传统定步长方式和非线性控制理论的局限性, 对于提高 MPPT 的快速性与稳定性有重要意义。

近年来, 有不少专家学者针对传统定步长策略的缺陷分别从自适应、添加状态观测器以及改变步长系数这 3 个方面对扰动观察法和电导增量法进行了改进。其中自适应控制策略可根据实时数据动态调整控制参数, 以减少振荡。例如文献[14]提出了一种增强型的自适应扰动观察法(enhanced adaptive P&O, EA-P&O), 相较于传统扰动观察法, 减小了稳态振荡以及最大功率点的偏离, 同时利用智能振动检测方案和动态边界条件, 解决了遮阳期间无法检测功率峰值的问题。文献[15]提出了一种结合不完全微分和扰动观察法的 MPPT 控制算法, 旨在提高光伏系统在最大功率点附近的跟踪精度和减少功率振荡, 并且通过引入不完全微分来减少传统扰动观察法中的高频干扰, 实现控制的自适应调整。但是, 通过自适应策略对算法进行改进, 受初始参数配置的制约, 需要在控制器初始化阶段针对不同的外部环境设置不同的参数, 并进行反复调试, 若参数选取不当极有可能造成算法性能下降, 甚至无法正常工作; 而状态观测器是一种在控制理论中用于估计系统状态的装置, 尤其用于那些无法直接测量的状态。在光伏系统中, 将由外部干扰及模型参数变化造成的实际模型与理想模型输出的差异等效为控制输入, 从而减少对参数精度的依赖。文献[16]提出了一种新型的光伏系统频率支持控制方法, 采用了未知输入观测器(unknown input observer, UIO)来估计系统状态和未知干扰, 进而使系统能够有效地跟踪最大功率点。文献[17]提出了一种用于光伏电源系统的基于升压转换器的 MPPT 控制策略, 该策略首先存储基于光伏板功率调整的随机占空比值, 然后通过计算占空比的奇偶差异并改变占空比差异阈值来判断稳态, 能够快速响应光照强度的变化, 提高了 MPPT 的跟踪速度。然而, 面对系统参数的显著变化或未知变化时, 状态观测器可能需要重新调整或重新设计以保持其性能, 实用性较差。

为了减少对参数设置的依赖并兼顾实用性, 根

据系统当前的工作状态来调整步长系数, 以减少最大功率点附近的振荡, 在光伏发电系统中是更为实用且行之有效的策略。例如文献[18]通过引入新的步长调整系数, 并结合扰动观察法和电压闭环控制, 能够在光照剧烈变化时保持较大步长运行, 提高启动速度和动态响应速度。文献[19]提出了一种基于梯度优化思想的变步长扰动观察法, 通过自动改变扰动步长以提高寻优效率, 并引入功率预测算法, 以解决在外部条件剧烈变化时可能出现的误判问题。

故本文在计算最大功率点时, 在传统扰动观察法的基础之上融入变步长策略的思想, 该控制策略相较于传统的扰动观察法有如下优势: (1) 通过自适应地调整扰动步长, 以减小功率的振荡并提高跟踪效率, 减少了对固定步长参数的依赖; (2) 通过自适应调整步长来优化跟踪过程, 即使初始值不是最优的, 系统也能通过调整步长来达到较好的跟踪效果; (3) 贴近实际复杂的工况, 在直流微网系统中更加实用。

值得注意的是, 除了根据不同工况准确计算出系统最大功率点外, 如何优化各种非线性控制理论, 使其能够更简单更快速地跟踪到所计算出的最大功率点的值, 在完善“传统控制方式+非线性控制理论”的 MPPT 控制策略中也是至关重要的。为此, 不同专家学者针对模糊控制、神经网络控制、遗传算法控制等不同的非线性控制提出了多种改进策略。文献[20]提出一种将萤火虫算法与模糊扰动观察法相结合的控制策略, 通过双种群萤火虫算法提高系统的全局优化能力, 再利用模糊控制, 通过逻辑推理产生更加准确的控制信号, 最后通过电力电子变换器对等效负载进行动态调节。然而, 对于模糊控制而言, 需要建立一套完整的模糊控制理论, 若凭经验建立隶属函数和规则库可能会造成设计的不合理, 因此需要大量的数据和计算资源, 导致计算过程复杂。文献[21]提出了一种基于全局自适应补偿的细菌觅食 MPPT 算法, 通过对全局最优细菌的认知和学习, 自动调节步长, 提高功率跟踪的准确性。但此方法既要进行全局搜索也要进行局部搜索, 虽更易找到最优解, 却需要更多的计算时间, 造成数据处理实时性不强。文献[22]利用所采集的光伏板温度、辐照度、电压等信息, 对反向传播(back propagation, BP)神经网络进行训练, 将训练好的模型用于 MPPT 技术, 提高了系统的时效性。但神经网络算法训练过程较为复杂, 调整参数的过程也较为繁琐与耗时。文献[23]针对遗传算法在光伏 MPPT 过程中存在的“早熟”和跟踪精度较低的问题, 提出了一种多种群遗传算法与扰动观察法相结合的控制策略。

制策略，通过引入多种群之间的交流来择优选择功率跟踪点，进而提升跟踪精度，解决“早熟”问题。然而，上述设计方案虽然具有较高的寻优能力，但面临多种群之间不同的进化方向，会导致不同种群之间的质量随着迭代次数的增加而产生较大差异，进而导致收敛速度降低。上述改进策略均对算法的跟踪精度有较大提升，但却存在着计算过程繁琐、收敛速度较慢、算法原理复杂和设计成本较高等不足。

滑模控制可通过设计合适的滑模面和趋近律，实现快速趋近和准确跟踪，相较于一些复杂的控制方式，实现起来相对简单，并且由于滑模面的存在，系统状态会被强制到滑模面上进行运动，这使得滑模控制能够有效抵抗外界扰动，具有强鲁棒性^[24-28]，非常适用于“传统控制方式+非线性控制理论”的 MPPT 控制策略。文献[29]将单积分滑模控制扩展为双积分滑模控制，以较小的稳定时间实现稳态输出功率误差限制，同时也消除了部分由于天气条件导致的功率空白。文献[30]将强化学习控制策略应用于经典的电导增量 MPPT 技术当中，而所提出的 MPPT 算法为滑模控制器产生一个参考电压，该系统的优点之一是不受参数的影响，不需要大气数据，提高了控制方法的不确定性处理能力。上述方法均利用滑模控制方式，使得计算过程得到简化，设计成本得到降低。但由于滑模控制存在离散性问题，导致系统在达到最大功率点时具有大幅度抖振，不利于控制器的稳定，并且在快速变化的环境条件下不能显示出良好的动态性能。

基于此，许多专家学者提出了不同的改进措施。文献[31]提出了一种基于滑模控制的反馈线性化光伏 MPPT 控制方法，通过将滑模控制与反馈线性化相结合，消除了工作点周围的波动。文献[32]提出一种鲁棒函数扩展多核广义学习系统，通过引入不同条件下的辐照度和温度，更精确地计算复杂非线性光伏参考电压，并设计了一种自适应积分反步滑模控制器来跟踪参考电压，通过增加一个积分作用来有效抑制系统的稳态误差并提升功率的跟踪效率，具有响应速度快、抖振较小的优点。以上改进策略均在不同程度上减小了滑模控制存在的抖振问题，但都引入了复杂的函数，加大了设计上的难度。

超螺旋算法作为一种二阶滑模算法，可消除传统滑模控制中的不连续项，从而避免了高频抖振的问题，实现方式简单且效果明显^[33]。文献[34]设计了一种基于超螺旋滑模控制算法的 MPPT 控制器，有效地抑制了抖振现象。但是，尽管超螺旋算法通过高阶滑模面的设计减少了抖振，但是由于符号函

数的不连续性，在系统参数估计不准确或是存在较大外部扰动时，抖振仍有可能发生。此外，虽然超螺旋算法理论上保证了系统在有限时间内收敛，但这个特性可能在绝大多数情况下都不容易实现。

针对上述超螺旋算法中存在的问题，本文提出一种改进型超螺旋滑模趋近律的 MPPT 控制策略。首先，结合变步长扰动观察法的优势，在较小的误差下计算出系统最大功率点的具体数值；之后，采用一种连续的切换函数替代传统超螺旋算法中的符号函数，保证了趋近律在滑模面附近切换时的连续性，同时设计一种新的快速终端滑模面，提高了对抖振的抑制效果和系统的响应速率，并保证系统在有限时间内收敛，通过变步长扰动观察法与改进型超螺旋滑模的结合实现最大功率点的准确跟踪；最后，为验证本文所提出的 MPPT 控制策略的优越性，选取系统辐照度及温度作为主要特征参数进行仿真验证，结果表明本文所提方法具有更好的抑振效果，同时兼顾响应的快速性与准确性。

1 直流微网系统

如图 1 所示，在孤岛模式下，光储直流微网系统主要包括光伏发电系统、储能单元和直流负载。然而，在光储直流微网系统中，光伏发电系统的功率输出特性通常受环境(如太阳辐照度和温度)影响较大，从而影响光储系统的稳定性^[35]，故 MPPT 控制策略的优化对于光储微网系统的稳定性至关重要。因此，本文对传统超螺旋滑模控制算法进行了优化并应用于 MPPT 控制，提出了一种基于改进超螺旋滑模控制的 MPPT 控制策略。

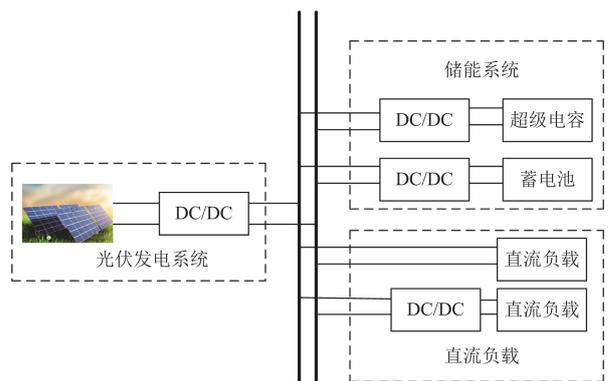


图 1 光储直流微网系统基本框架

Fig. 1 Basic framework of optical storage DC microgrid system

2 光伏系统数学模型及特性

如图 2 所示，光伏发电系统主要由光伏电源、DC/DC 变换器、MPPT 控制器以及负载组成。

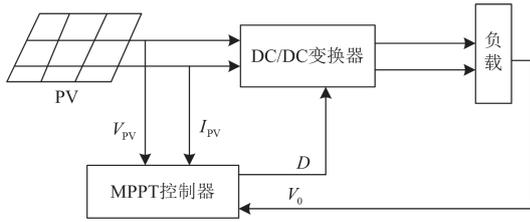


图 2 光伏发电系统结构图

Fig. 2 Structure of photovoltaic power generation system

DC/DC 变换器作为光伏发电系统中的重要载体, 是 MPPT 控制器的主要控制对象, 通过对采集的光伏电源输出电压 V_{PV} 、光伏电源输出电流 I_{PV} 进行处理, 输出占空比为 D 的 PWM 控制波形以控制 DC/DC 变换器中开关管的导通与关断, 进而调整系统的动态负载, 使其与光伏电源的内阻相匹配, 实现光伏电源的最大功率输出。

2.1 光伏电源数学模型

光伏电源是通过光电效应或者光化学效应直接把光能转化成电能的装置, 其输出特性具有非线性特点, 同时对外界环境的变化具有强敏感性。根据文献[36]求得输出电流 I_{PV} 为

$$\begin{cases} I_{PV} = I_{sc} \left[1 - C_1 \left(\exp\left(\frac{q}{C_2 V_{oc}}\right) - 1 \right) \right] \\ C_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \exp\left(-\frac{V_m}{C_2 V_{oc}}\right) \\ C_2 = \left(\frac{V_m}{V_{oc}} - 1 \right) / \ln\left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: I_{sc} 为短路电流; V_{oc} 为开路电压; q 为电子电荷; C_1 、 C_2 为中间变量; I_m 、 V_m 分别为最大功率点电流和最大功率点电压。

当外部环境改变时, 可得修正后的最大功率点电压 V'_m 和最大功率点电流 I'_m , 如式(2)所示。

$$\begin{cases} I'_m = I_m (1 + a\Delta T) \frac{M}{M_{ref}} \\ V'_m = V_m (1 - c\Delta T)(1 + b\Delta M) \end{cases} \quad (2)$$

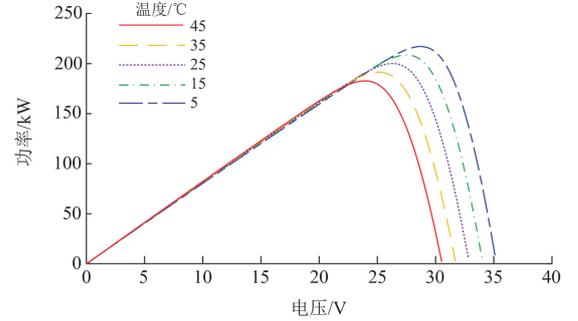
式中: M 为辐照度; M_{ref} 为标准条件下的辐照度; a 、 b 、 c 均为修正系数; ΔT 为温度变化量; ΔM 为辐照度变化量。所选取参数的具体数值如表 1 所示。

表 1 光伏电源数学模型参数表

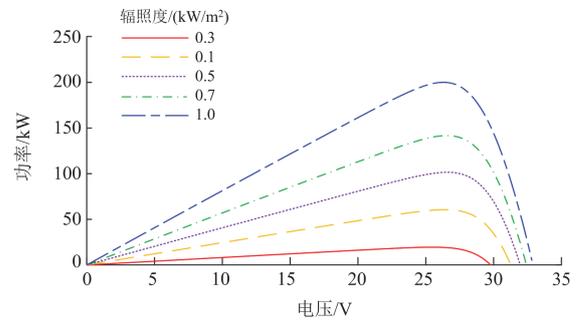
Table 1 Parameters of the mathematical model of photovoltaic power supply

参数	数值
$a/^\circ\text{C}$	0.0025
$b/^\circ\text{C}$	0.5
$c/^\circ\text{C}$	0.002 88
$M_{ref}/(\text{W}/\text{m}^2)$	1000

基于上述光伏系统的数学模型, 利用 Matlab 仿真软件可获得不同温度和太阳辐照度条件下的光伏电源输出特性曲线, 如图 3 所示。



(a) 不同温度下光伏电源输出的功率特性曲线



(b) 不同辐照度下光伏电源输出的功率特性曲线

 图 3 不同温度和辐照度下光伏电源输出的功率特性曲线
 Fig. 3 Power characteristic curves of photovoltaic power output at different temperatures and irradiance

2.2 正反激变换器模型

正反激变换器将两种变换器结合到一个电路中, 综合了正激与反激变换器各自的优点, 进而改善工作性能^[37-38], 其拓扑结构如图 4 所示。图 4 中: V_{PV} 为光伏电源输出电压; I_{PV} 为光伏电源输出电流; I_{Lm} 为励磁电流; I_L 为电感电流; V_0 为正反激变换器的输出电压; C_{PV} 、 C_0 均为并联电容; L_m 为励磁电感; L 为输出滤波电感; R 为负载; D_1 — D_4 均为二极管; Q 为功率开关管。

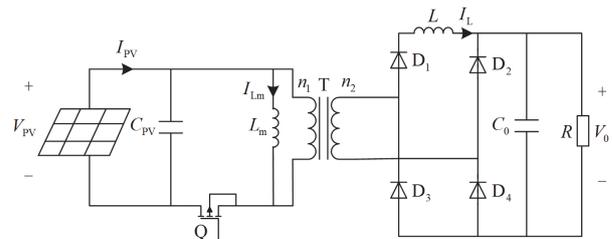


图 4 正反激电路拓扑

Fig. 4 Forward and reverse circuit topology

由图 4 可知, 当开关管 Q 导通时, 系统各状态量可表达为

$$\begin{cases} \frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L} \left(\frac{1}{n} V_{PV} - V_0 \right) \\ \frac{dV_C}{dt} = \frac{1}{C} \left(I_L - \frac{V_0}{R} \right) \\ \frac{dI_m}{dt} = \frac{1}{L_m} V_{PV} \end{cases} \quad (3)$$

当开关管 Q 关断时, 系统各状态量可表达为

$$\begin{cases} \frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{nL} V_m \\ \frac{dV_C}{dt} = \frac{1}{C} \left(\frac{V_0}{R} - nI_m \right) \\ \frac{dI_m}{dt} = -\frac{n}{L_m} V_0 \end{cases} \quad (4)$$

故系统的动态数学模型如式(5)所示。

$$\begin{cases} \frac{dI_L}{dt} = \frac{V_m}{nL} + \frac{u}{L} \left(\frac{1}{n} V_{PV} - V_0 - \frac{V_m}{n} \right) \\ \frac{dV_C}{dt} = \frac{1}{C} \left(\frac{V_0}{R} - nI_m \right) + \frac{u}{C} \left(I_L - \frac{2V_0}{R} + nI_m \right) \\ \frac{dI_m}{dt} = -\frac{n}{L_m} V_0 + \frac{u}{L_m} (V_{PV} + nV_0) \end{cases} \quad (5)$$

式中: u 为开关管 Q 的控制量, 当 $u=1$ 时, 开关管导通, 当 $u=0$ 时, 开关管关断; V_C 为输出滤波电容的两端电压; $n=n_1/n_2$ 代表变压器匝数比, n_1 和 n_2 分别为变压器一次侧匝数和二次侧匝数。则式(5)可表示为一般通用形式, 如式(6)所示。

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = f(x, t) + ug(x, t) \quad (6)$$

$$\text{式中: } \dot{x} = \begin{bmatrix} \frac{dI_L}{dt} \\ \frac{dV_C}{dt} \\ \frac{dI_m}{dt} \end{bmatrix}; \quad f(x, t) = \begin{bmatrix} \frac{V_m}{nL} \\ \frac{1}{C} \left(\frac{V_0}{R} - nI_m \right) \\ -\frac{nV_0}{L_m} \end{bmatrix};$$

$$g(x, t) = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \left(\frac{1}{n} V_{PV} - V_0 - \frac{V_m}{n} \right) \\ \frac{1}{C} \left(I_L - \frac{2V_0}{R} + nI_m \right) \\ \frac{1}{L_m} (V_{PV} + nV_0) \end{bmatrix}。$$

3 基于滑模控制的 MPPT 控制策略设计

根据光伏电源最大功率点跟踪原理: 通过调节

DC/DC 变换器的占空比进而调整系统的动态负载, 使其与光伏电源的内阻相匹配, 从而实现光伏电源的最大功率输出。图 5 为所设计的 MPPT 控制方案, 图中 β 、 K_p 、 K_d 均为待设计参数。该方案由控制外环和控制内环构成, 控制外环通过采集光伏电源输出电压 V_{PV} 以及输出电流 I_{PV} , 利用变步长扰动观察法计算出最大功率点参考电压 V_{ref} , 而光伏电源输出电压与参考电压之间的误差 e 则作为滑模控制器的输入, 输出量为等效控制率 u_{eq} , 将改进超螺旋趋近律作为辅助控制率 u_{sw} , 通过 PWM 调制原理并结合实际工作情况, 可改变占空比的大小, 进而实现光伏电源的最大功率点跟踪控制。

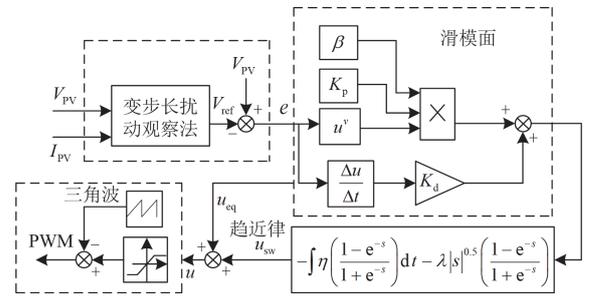


图 5 最大功率点跟踪控制方案

Fig. 5 Maximum power point tracking control scheme

3.1 变步长扰动观察法设计

传统扰动观察法虽然控制方式简单且容易实现, 但是采用定步长扰动方式必然会引起系统振荡, 若减小扰动步长, 虽可以减小稳态振荡幅度, 但会导致跟踪缓慢。因此, 为解决系统稳定性与准确性之间的矛盾, 可采用变步长的扰动观察法。

当系统的采样周期较短时, 可得 $|dP/dV| = |\Delta P/\Delta V|$, 故可设扰动步长为 $|\Delta P/\Delta V| \cdot \Delta U$ 。根据光伏电源输出的 P-V 特性曲线可知, 先对 ΔP 与 ΔV 进行判断, 若 $\Delta P=0$ 或 $\Delta V=0$, 证明此时系统处于最大功率点附近, 即可输出当前的功率值; 当系统远离最大功率点时, $|\Delta P/\Delta V|$ 较大, 故此时采用较大的扰动步长; 当系统靠近最大功率点时, $|\Delta P/\Delta V|$ 较小, 故此时采用较小的扰动步长。图 6 为变步长扰动观察法控制流程图。

3.2 快速终端滑模控制器设计

快速终端滑模相较于普通滑模的优势在于, 能够使系统在有限的时间内快速收敛到 0, 且有效克服线性滑模控制下系统渐进收敛的问题, 故其动态性能优于传统滑模控制。

定义系统误差为 x_1 , 误差变化率为 x_2 , 参考电压为 V_{ref} , 求得

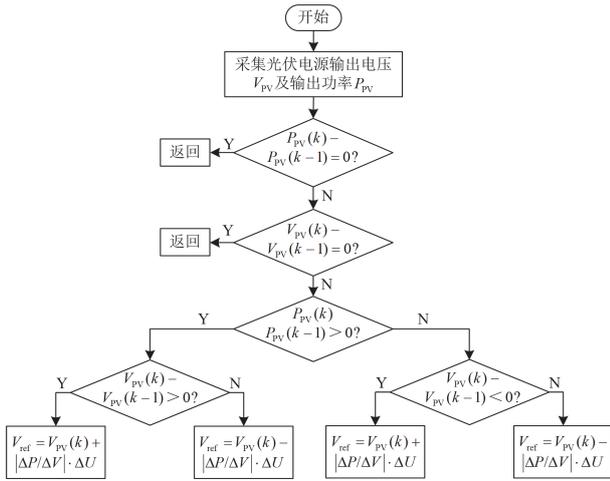


图 6 变步长扰动观察法控制流程图

Fig. 6 Control flow chart of variable step size perturbation method

$$\begin{cases} x_1 = V_{PV} - V_{ref} \\ x_2 = \dot{x}_1 = \frac{dV_{PV}}{dt} \end{cases} \quad (7)$$

根据现有研究, 针对本文的光伏 MPPT 控制系统所设计的快速终端滑模面如式(8)所示。

$$S = K_1 x_1^{p/q} + K_2 \dot{x}_1 \quad (8)$$

式中: S 为滑模变量; $q > p > 0$ 且均为正奇数; $K_1 > 0$, $K_2 > 0$ 。

快速终端滑模控制保证了系统在有限时间内到达滑模面, 使系统迅速收敛到平衡状态。系统的收敛时间可以通过选取不同参数进行调整。假设 $t = t_0$ 为系统处于任意初始状态下到达滑模面(即 $S = 0$)的时间, 令 $S = 0$ 可得

$$K_2 \dot{x}_1 = K_2 \frac{dx_1}{dt} = -K_1 x_1^{p/q} \quad (9)$$

将式(9)变换为

$$-\frac{K_2}{K_1} x_1^{-p/q} dx_1 = dt \quad (10)$$

对式(10)两边同时求积分可得

$$-\frac{K_2}{K_1} \int_{x_0}^0 x_1^{-p/q} dx_1 = \int_0^{t_0} dt \quad (11)$$

式中: x_0 为系统误差的初始值。

由此可得系统处在任意初始状态且 $x_0 \neq 0$ 的情况下, 沿滑模面 S 运动到平衡状态($x_1 = 0$)的时间为

$$t_0 = \frac{K_2}{K_1} \frac{q}{q-p} x_0^{\frac{q-p}{q}} \quad (12)$$

本文所设计的滑模控制律 u 采用等效控制率 u_{eq} 和辅助控制率 u_{sw} 相结合的形式, 具体表达式为

$$u = u_{eq} + u_{sw} \quad (13)$$

式中: 等效控制律 u_{eq} 保证系统的状态变量始终处于滑模面上, 而辅助控制率 u_{sw} 则是影响滑模控制的切换速度以及抖振大小的重要因素。对 S 求一阶导可得

$$\dot{S} = \frac{dS(x,t)}{dt} = \frac{\partial S}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial S}{\partial t} \frac{dt}{dt} = \frac{\partial S}{\partial x} \dot{x} + \frac{\partial S}{\partial t} \quad (14)$$

将式(6)代入式(14)中, 可得

$$\dot{S} = \frac{\partial S}{\partial x} [f(x,t) + g(x,t)u] + \frac{\partial S}{\partial t} \quad (15)$$

令 $\dot{S} = 0$, 可得

$$u_{eq} = - \left[\frac{\partial S}{\partial x} g(x,t) \right]^{-1} \cdot \left[\frac{\partial S}{\partial x} f(x,t) + \frac{\partial S}{\partial t} \right] \quad (16)$$

将式(5)代入式(16), 可得等效控制律为

$$u_{eq} = \frac{nV_0}{V_{PV} + nV_0} \quad (17)$$

3.3 改进超螺旋趋近率

辅助控制律作为滑模控制的切换项, 起到了保障系统收敛以及使滑动模态的过渡过程更加平滑的作用。超螺旋算法是一种二阶滑模算法, 可以消除传统滑模控制中的不连续项, 在一阶系统中有较为广泛的应用, 其表达式为

$$\begin{cases} u_{sw} = K_3 |S|^{0.5} \text{sign}(S) + u_2 \\ \dot{u}_2 = K_4 \text{sign}(S) \end{cases} \quad (18)$$

式中: K_3 和 K_4 均为待设计的参数。

为进一步削弱系统中的抖动, 本文引入 Sigmoid 函数, 其表达式如式(19)所示。将原式中不连续的 sign 函数替换为连续的 Sigmoid 函数, 使得函数在滑模面附近更具有连续性, 从而有效地消除滑模抖振。

$$\text{Sigmoid}(x) = \frac{1 - e^{-\alpha S}}{1 + e^{-\alpha S}} \quad (19)$$

式中: $\alpha \in \mathbb{R}$ 。

故改进后滑模趋近律为

$$\begin{cases} u_{sw} = K_3 |S|^{0.5} \frac{1 - e^{-\alpha S}}{1 + e^{-\alpha S}} + u_2 \\ \dot{u}_2 = K_4 \frac{1 - e^{-\alpha S}}{1 + e^{-\alpha S}} \end{cases} \quad (20)$$

为验证趋近律的可达性, 根据 Lyapunov 稳定性理论, 构造 Lyapunov 函数为

$$V = \frac{1}{2} S^2 \quad (21)$$

对该函数求导得

$$\dot{V} = S\dot{S} \quad (22)$$

当滑模变量 $S > 0$ 时, Sigmoid 函数 $\frac{1 - e^{-\alpha S}}{1 + e^{-\alpha S}} > 0$,

代入式(22)得 $\dot{V} < 0$ ；反之，当滑模变量 $S < 0$ 时，Sigmoid 函数 $\frac{1 - e^{-\alpha S}}{1 + e^{-\alpha S}} < 0$ ，代入式(22)得 $\dot{V} < 0$ 。因此，Lyapunov 函数关于时间的一阶导数小于 0 恒成立，根据 Lyapunov 稳定性判据，滑模变量 S 可以渐近收敛至 0，即本文所提出的改进滑模控制器渐近稳定。

4 仿真分析

为了展示改进控制策略的优越性，本文引入了 3 种不同的控制策略：PI、传统滑模、超螺旋滑模。为了进一步从计算量角度对控制策略进行比较，表 2 细列出了各个控制策略的具体表达式以及详细的参数选取。此外，为了展示所提控制策略的可行性，在 Matlab/Simulink 中搭建如图 4 所示的基于正反激电路结构的独立光伏发电系统模型，并在表 3 中给出了模型参数的取值。控制器参数为： $\Delta U = 0.08$ ， $K_1 = 106.3$ ， $K_2 = 10$ ， $K_3 = 40.75$ ， $K_4 = 50$ ， $p/q = 0.428$ 。

表 2 各控制策略表达式及参数值

Table 2 Each control strategy expressions and parameters		
控制策略	表达式	参数取值
PI	$G(S) = K_p + K_i/S$	$K_p = 0.5$ $K_i = 1$
传统滑模	$S = e + K_0 \dot{e}$ $u_{sw} = \eta \text{sign}(S)$	$K_0 = 100$ $\eta = 100$
超螺旋滑模	$S = e + K_0 \dot{e}$ $u_{sw} = \alpha S ^{0.5} \text{sign}(S) + \int \beta \text{sign}(S)$	$K_0 = 100$ $\alpha = 40.75$ $\beta = 50$

表 3 光伏发电系统参数

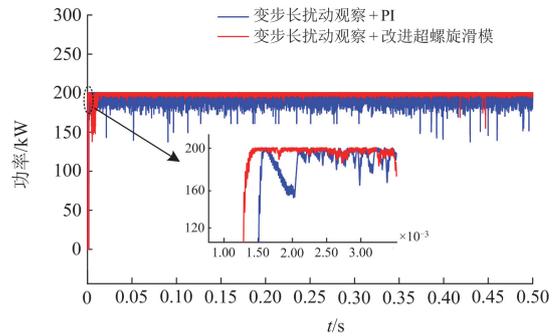
Table 3 Parameters of solar power generation system	
参数	数值
最大功率点 P_m/W	200.143
最大功率点电压 V_m/V	26.3
最大功率点电流 I_m/A	7.61
短路电流 I_{sc}/A	8.21
开路电压 V_{oc}/V	32.9
输入电容 $C_{pv}/\mu F$	90
励磁电感 $L_m/\mu H$	486
变压器变比 n	0.2
电感 $L/\mu H$	90
输出电容 $C_0/\mu F$	940
负载 R_0/Ω	100

本文通过以下 5 种情况进行分析讨论：1) 系统启动时的响应与跟踪特性；2) 温度不变，太阳辐照度跳变；3) 太阳辐照度不变，温度跳变；4) 标准温度条件下，辐照度渐变；5) 在标准辐照度条件下，

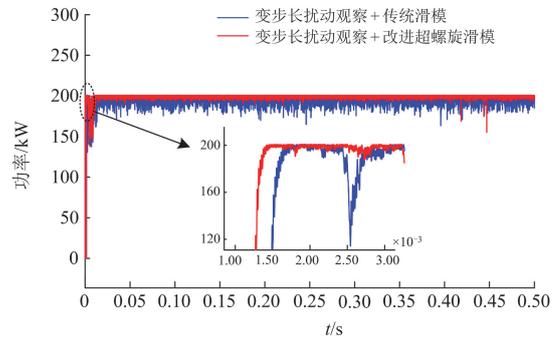
温度渐变。并从响应速度、跟踪精度以及输出的抖振程度等方面进行分析比较。

4.1 启动时跟踪特性

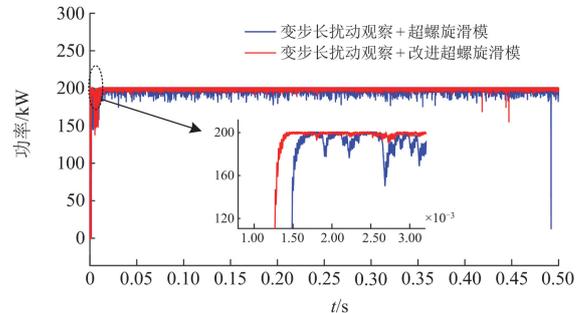
为了全面分析系统启动时的响应速度与稳态误差，环境条件可设置为： $T = 25^\circ C$ ，辐照度 $M = 1000 W/m^2$ 。本文所提控制策略与上述 3 种控制策略的效果对比如图 7 所示。并且为了详细地量化对比，表 4 给出了各对比量的具体数值：启动时，当系统远离最大功率点时，变步长扰动观察 + PI 控制方式跟踪到最大功率点的时间约为 2.10 ms；变步长扰动观察 + 传统滑模控制方式跟踪到最大功率点



(a) 经典PI控制对比图



(b) 传统滑模控制对比图



(c) 超螺旋滑模控制对比图

图 7 标准条件下不同控制策略功率对比图

Fig. 7 Power comparison diagram of different control strategies under standard conditions

表 4 不同控制策略数据对比

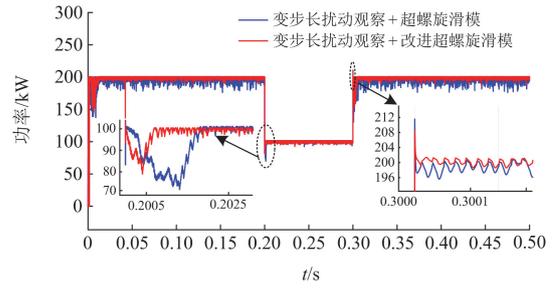
Table 4 Comparison of data of different control policies strategies

算法	响应时间/ms	精度/W	误差 Δe /W
变步长扰动观察 + PI	2.10	195.3	4.847
变步长扰动观察 + 传统滑模	1.80	196.5	3.647
变步长扰动观察 + 超螺旋滑模	1.65	197.3	2.847
变步长扰动观察 + 改进超螺旋滑模	1.46	198.6	1.547

的时间约为 1.80 ms; 变步长扰动+超螺旋滑模控制方式跟踪到最大功率点的时间约为 1.65 ms, 而变步长扰动观察 + 改进超螺旋滑模控制方式跟踪到最大功率点的时间约为 1.46 ms。而在稳态时, 本文所提出的控制策略具有更小的抖振, 并且在超螺旋滑模控制的基础之上进一步提升了去抖能力。而光伏系统输出的最大功率的平均值为 198.6 W, 稳态误差为 1.547 W。从图 7 和表 4 可以看出, 相比于其他 3 种控制策略, 本文所提控制策略具有更快的响应速度、更高的稳态精度以及更小的抖振。

4.2 考虑辐照度变化下性能对比

在标准条件下保证温度不变, 初始的辐照度为 1000 W/m^2 , 在 0.2 s 时部分遮光, 辐照度跳变为 500 W/m^2 , 在 0.3 s 时无遮光, 辐照度恢复为 1000 W/m^2 , 本文所提控制策略与上述 3 种控制策略的效果对比如图 8 所示。并且为了进行详细的量化对比, 表 5 给出了各对比量的具体数值: 在本文所提控制策略下, 辐照度从 1000 W/m^2 跳变到 500 W/m^2 , 系统重新到达稳定状态的响应时间 t_1 为 0.7 ms; 当



(c) 超螺旋滑模控制对比图

图 8 辐照度变化下不同控制策略功率对比图

Fig. 8 Power comparison diagram of different control strategies under irradiance variation

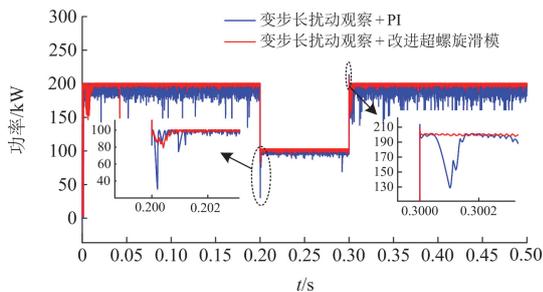
表 5 不同控制策略响应时间对比表

Table 5 Comparison table of response time of different controls

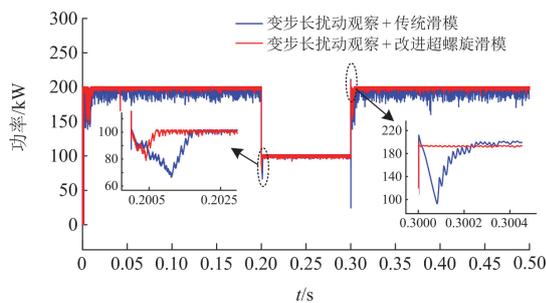
算法	响应时间	
	t_1 /ms	t_2 /ms
变步长扰动观察 + PI	1.2	0.15
变步长扰动观察 + 传统滑模	1.8	0.25
变步长扰动观察 + 超螺旋滑模	2	0.05
变步长扰动观察 + 改进超螺旋滑模	0.7	0.02

辐照度再跳变到 1000 W/m^2 时, 系统到达稳态的响应时间 t_2 为 0.02 ms。通过对比可以看出, 改进超螺旋 MPPT 控制策略在辐照度发生两次跳变后具有较快的响应速度。

此外, 图 9 为超螺旋滑模控制与改进超螺旋滑模控制在辐照度变化时系统状态轨迹 S 的变化曲线图。光伏板在 0.2 s 出现部分遮蔽时, 改进超螺旋滑模控制的状态轨迹 S 波动的极值点的绝对值为 1.21×10^{-4} , 超螺旋滑模控制的状态轨迹 S 波动的极值点的绝对值为 3.59×10^{-4} ; 0.3 s 去除遮蔽时, 改进超螺旋滑模控制的状态轨迹 S 波动的极值点的绝对值为 1.15×10^{-4} , 超螺旋滑模控制的状态轨迹 S 波动的极值点的绝对值为 5.96×10^{-4} 。根据两次辐照度的扰动可知, 改进超螺旋滑模控制具有更小的控制量输出。



(a) 经典PI控制对比图



(b) 传统滑模控制对比图

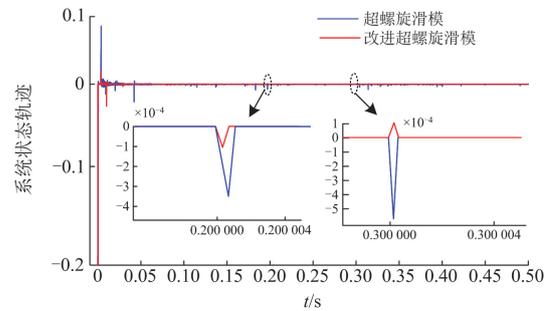


图 9 辐照度渐变时系统状态轨迹对比

Fig. 9 Comparison of system state trajectories during irradiation changes

根据表 6 的实验数据量化分析可知：在 0.3 s 前，本文提出的改进型超螺旋算法 MPPT 控制策略的功率波动幅值范围为 78.97~101.65 W；0.3 s 后波动幅值收敛至 189.59~208.60 W。相较于 PI、传统滑模控制及超螺旋滑模控制 3 种基准方法，本文策略在功率波动幅值的下限值和上限值两个维度均表现出更优的抑制效果。

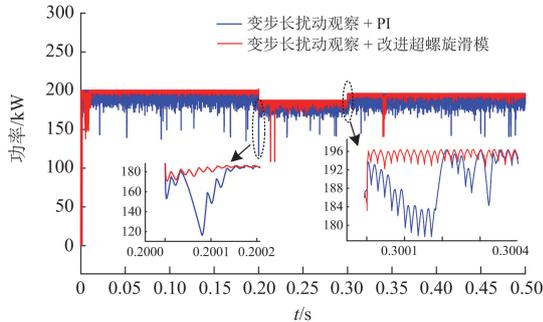
表 6 不同控制策略稳定性对比

Table 6 Stability comparison of different control strategies

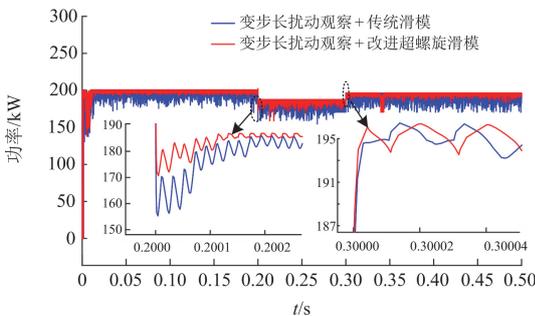
算法	0.2~0.3 s		0.3 s 以后	
	最低波动点/W	最高波动点/W	最低波动点/W	最高波动点/W
PI	30.53	101.65	133.55	213.57
传统滑模	64.66	101.05	96.75	212.15
超螺旋滑模	70.16	101.65	180.20	210.59
改进超螺旋滑模	78.97	101.65	189.59	208.60

4.3 考虑温度变化下性能对比

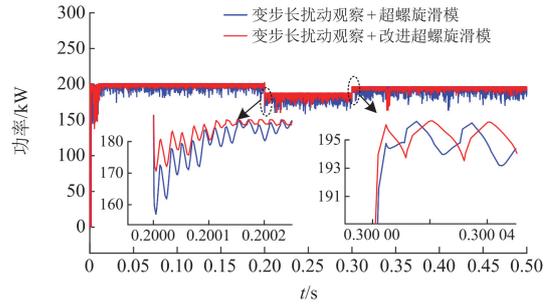
在标准辐照度下，系统初始温度在 0.2 s 时从 25℃ 跳变为 40℃，重新到达稳定状态的响应时间 t_1 为 0.14 ms；温度在 0.3 s 时跳变为 30℃，系统到达稳定状态的响应时间 t_2 为 0.005 ms。通过图 10 可以看出：当温度发生跳变时，在改进超螺旋 MPPT 控制策略下，系统具有较短的响应时间以及更小的超调量，具体数据对比如表 7 所示。



(a) 经典PI控制对比图



(b) 传统滑模控制对比图



(c) 超螺旋滑模控制对比图

图 10 温度变化下不同控制策略功率对比

Fig. 10 Power comparison of different control strategies under temperature change

表 7 温度变化下不同控制策略响应时间对比

Table 7 Comparison of response time of different control strategies under temperature change

算法	响应时间 t_1 /ms	响应时间 t_2 /ms
变步长扰动观察 + PI	0.16	0.4
变步长扰动观察 + 传统滑模	0.2	0.015
变步长扰动观察 + 超螺旋滑模	0.155	0.01
变步长扰动观察 + 改进超螺旋滑模	0.14	0.005

与此同时，为了更好地展现输出的控制量的差异，温度渐变时系统状态轨迹对比如图 11 所示，在 0.2 s 时，改进超螺旋滑模控制的状态轨迹 S 波动的极值点的绝对值为 1.61×10^{-4} ，超螺旋滑模控制的状态轨迹 S 波动的极值点的绝对值为 2.69×10^{-4} ；在 0.3 s 去除遮蔽，改进超螺旋滑模控制的状态轨迹 S 波动的极值点的绝对值为 1.31×10^{-4} ，超螺旋滑模控制的状态轨迹 S 波动的极值点的绝对值为 8.76×10^{-4} 。根据两次温度的扰动可知，改进超螺旋滑模控制具有更小的控制量的输出。

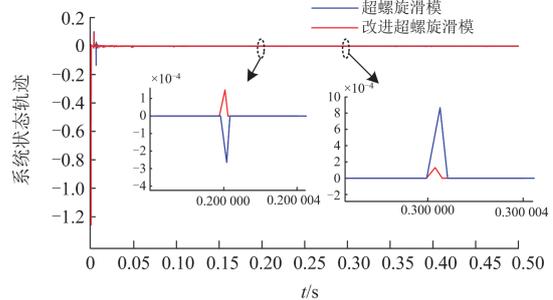


图 11 温度渐变时系统状态轨迹对比

Fig. 11 Comparison of system state trajectories during temperature gradient

根据表 8 的实验数据对比分析可知：在 0.3 s 前，改进型超螺旋 MPPT 控制策略下的光伏系统功

率波动范围为 170.63~187.89 W; 0.3 s 后, 波动范围收敛至 184.47~195.41 W。实验结果表明, 在温度扰动场景中, 本文所提控制方法通过动态调节机制将功率波动幅度压缩至 17.26 W 和 10.94 W, 显著优于对比方法, 验证了其功率输出在动态工况下表现出良好的稳定性。

表 8 温度变化下不同控制策略稳定性对比

Table 8 Stability comparison of different control strategies under temperature change

算法	0.2~0.3 s		0.3 s后	
	最低波 动点/W	最高波 动点/W	最低波 动点/W	最高波 动点/W
PI	116.21	187.72	164.68	196.14
传统滑模	155.07	187.98	167.38	196.09
超螺旋滑模	156.98	187.82	170.15	196.14
改进超螺旋滑模	170.63	187.89	184.47	195.41

4.4 标准温度下, 辐照度线性上升的性能对比

为了模拟实际光照条件的复杂变化, 如图 12 所示, 在 0~0.2 s 内, 将辐照度从 500 W/m² 线性上升到 800 W/m²; 在 0.2~0.3 s 内保持 800 W/m²; 在 0.3~0.4 s 内, 从 800 W/m² 线性上升到 1000 W/m²; 在 0.4~0.5 s 内保持 1000 W/m²。通过图 13 和表 9 的纵向对比可知, 在辐照度渐变的过程中, 传统 PI、

传统滑模控制以及超螺旋滑模控制的最大功率点跟踪曲线波动明显大于本文方法。

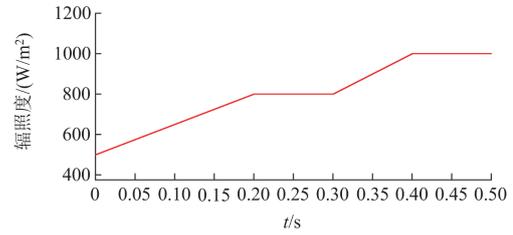


图 12 太阳辐照度渐变图

Fig. 12 Solar irradiance gradient map

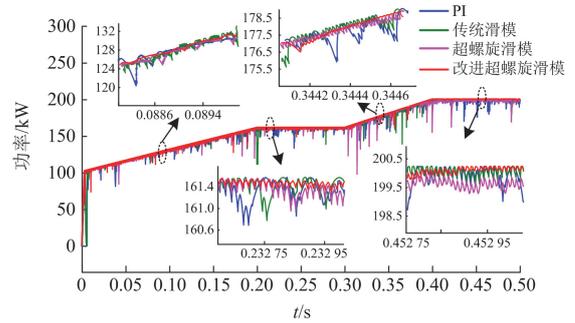


图 13 太阳辐照度渐变条件下功率对比

Fig. 13 Power comparison under the solar irradiance gradient

表 9 光照逐步遮挡下不同时间段功率波动对比

Table 9 Comparison of power fluctuations in different time periods under gradual illumination occlusion

算法	0.2~0.3 s			0.4~0.5 s		
	最低点/W	最高点/W	ΔP/W	最低点/W	最高点/W	ΔP/W
PI	155.43	161.74	6.31	195.15	200.31	5.16
传统滑模	156.21	161.61	5.40	196.39	200.58	4.19
超螺旋滑模	156.19	161.45	5.26	196.39	200.16	3.77
改进超螺旋滑模	158.68	161.76	3.08	198.46	200.40	1.04

4.5 标准辐照度下, 温度线性上升的性能对比

为了体现实际条件下温度的变化, 如图 14 所示, 将温度数值在 0~0.2 s 内从 -5 °C 线性上升到 10 °C; 在 0.2~0.3 s 内保持 10 °C 不变; 在 0.3~0.4 s 内从 10 °C 线性上升到 25 °C; 在 0.4~0.5 s 内保持 25 °C 不变。通

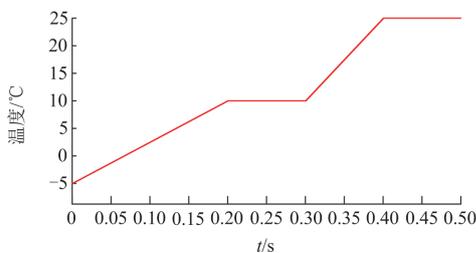


图 14 温度渐变图

Fig. 14 Temperature gradient map

过图 15 和表 10 的纵向对比可知, 在温度渐变的情况下, 传统 PI、传统滑模控制以及超螺旋滑模控制的最大功率点跟踪曲线波动明显大于本文方法。

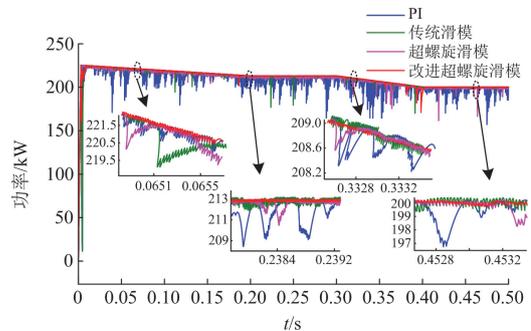


图 15 温度渐变条件下功率对比

Fig. 15 Power comparison under temperature gradient

表 10 温度渐变条件下不同时间段功率波动对比

Table 10 Comparison of power fluctuations in different time periods under temperature gradient

算法	0.2~0.3 s			0.4~0.5 s		
	最低点/W	最高点/W	$\Delta P/W$	最低点/W	最高点/W	$\Delta P/W$
PI	204.33	213.41	1.67	193.68	200.26	6.58
传统滑模	209.65	213.09	3.44	197.75	200.57	2.82
超螺旋滑模	210.59	212.79	2.2	198.07	200.26	2.19
改进超螺旋滑模	211.32	212.99	3.08	198.39	200.26	1.87

5 结论

针对基于传统滑模控制的MPPT方法中存在响应速度较慢和抖振较大等不足,本文提出了一种基于改进超螺旋滑模控制的控制策略。该方法结合变步长扰动观察法、快速终端滑模控制器与改进超螺旋趋近律,极大地提升了独立光伏发电系统中的控制性能。仿真试验表明,与传统控制方法相比,本文所提的控制方法具有以下特点。

1) 具有更快的响应速度和更高的稳态精度,系统可以在有限的时间内到达最大功率点。

2) 在保持快速响应的前提下,当系统处于稳态时,能够更好地消除滑模抖振。

3) 当发生光照和温度扰动时,系统的动态特性优于传统控制算法,可以在保证输出功率波动较小的前提下快速跟踪到新的最大功率点。

当前系统在遭遇扰动后,虽然输出功率能够回归到一个相对稳定的区间,但并未精确地稳定在最大功率点。未来的研究可以探索通过精细调整控制参数,以实现更小的稳态误差范围,从而增强系统对扰动的抵抗能力,并确保系统在面对环境变化时能够更准确地维持在最大功率输出状态。这涉及到对现有控制算法的参数优化以及改进,以提高系统在动态条件下的性能。

参考文献

- [1] 魏韡, 范越, 谢睿, 等. 平抑高比例新能源发电功率波动的风-光-储容量最优配比[J]. 电力建设, 2023, 44(3): 138-147.
WEI Wei, FAN Yue, XIE Rui, et al. Optimal ratio of wind-solar-storage capacity for mitigating the power fluctuations in power system with high penetration of renewable energy power generation[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(3): 138-147.
- [2] 高锋阳, 宋志翔, 高建宁, 等. 计及光伏和储能接入的牵引供电系统能量管理策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(3): 745-757.
GAO Fengyang, SONG Zhixiang, GAO Jianning, et al. Energy management strategy for traction power supply

system including PV and energy storage access[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(3): 745-757.

- [3] 李崎勇, 张伟斌, 赵新哲, 等. 改进鲸鱼算法优化支持向量回归的光伏最大功率点跟踪[J]. 电工技术学报, 2021, 36(9): 1771-1781.
LI Jiyong, ZHANG Weibin, ZHAO Xinzhe, et al. Global maximum power point tracking for PV array based on support vector regression optimized by improved whale algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(9): 1771-1781.
- [4] 孙浩男, 杜鹏, 刘念, 等. 大规模风光储场站群功率跟踪优化控制实时仿真[J]. 电力建设, 2024, 45(8): 62-74.
SUN Haonan, DU Peng, LIU Nian, et al. Real-time simulation of optimal power tracking control for large-scale wind-photovoltaic-storage power station clusters[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(8): 62-74.
- [5] YANG B, XIE R, DUAN J, 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.
- [6] 曹新春, 王发强. 光伏发电系统 MPPT 算法的比较研究[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(5): 25-35.
CAO Xinchun, WANG Faqiang. A comparative study on MPPT algorithms for photovoltaic power generation systems[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(5): 25-35.
- [7] 周文源, 袁越, 傅质馨, 等. 恒电压结合牛顿法的光伏系统 MPPT 控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(6): 6-13.
ZHOU Wenyuan, YUAN Yue, FU Zhixin, et al. Constant voltage tracking combined with newton method MPPT control for photovoltaic system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2012, 24(6): 6-13.
- [8] 易磊, 谢雨龙, 曾凡炎, 等. 基于神经网络的改进扰动观察法 MPPT 控制[J]. 太阳能学报, 2022, 43(4): 198-203.
YI Lei, XIE Yulong, ZENG Fanyan, et al. Improved perturbation observation method MPPT control based on neural network[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(4): 198-203.

- [9] 张东宁. 基于改进电导增量法的光伏最大功率点跟踪策略研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(8): 82-90.
ZHANG Dongning. Research on photovoltaic maximum power point tracking strategy based on improved conductance increment method[J]. Acta Energetica Sinica, 2022, 43(8): 82-90.
- [10] 韩翔宇, 纽春萍, 何海龙, 等. 基于优化增量电导法的温差发电最大功率点跟踪策略[J]. 高压电器, 2023, 59(11): 240-249.
HAN Xiangyu, NIU Chunping, HE Hailong, et al. Maximum power point tracking strategy for thermoelectric generation based on optimized incremental conductance method[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(11): 240-249.
- [11] 杨博, 谢蕊, 武少聪, 等. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 16(52): 12-52.
YANG Bo, XIE Rui, WU Shaocong, et al. Hybrid PV-TEG system maximum power point tracking based on an exponential distribution optimizer[J]. Power System Protection and Control, 2024, 16(52): 12-52.
- [12] 郑含博, 杜齐, 郭文豪, 等. 应用于光储系统中的改进型扰动观察 MPPT 算法[J]. 控制理论与应用, 2022, 39(3): 491-498.
ZHENG Hanbo, DU Qi, GUO Wenhao, et al. Improved perturbation and observation MPPT algorithm applied to a hybrid photovoltaic energy storage system[J]. Control Theory & Applications, 2022, 39(3): 491-498.
- [13] 谢佳伟, 应展烽, 李德明, 等. 突发散热故障时的光伏 MPPT 变换器控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(11): 170-178.
XIE Jiawei, YING Zhanfeng, LI Deming, et al. A control method for a photovoltaic MPPT converter with a sudden heat dissipation fault[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(11): 170-178.
- [14] AHMED J, SALAM Z. An enhanced adaptive P&O MPPT for fast and efficient tracking under varying environmental conditions[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 3(9): 1487-1496.
- [15] 党选举, 杨阳, 姜辉, 等. 基于不完全微分的自适应步长扰动观察法 MPPT 控制[J]. 太阳能学报, 2016, 37(12): 3022-3029.
DANG Xuanju, YANG Yang, JIANG Hui, et al. MPPT control of adaptive step size perturb & observe method based on incomplete differential[J]. Acta Energetica Sinica, 2016, 37(12): 3022-3029.
- [16] LI Qinmiao, BARAN M E. A novel frequency support control method for PV plants using tracking LQR[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2263-2273.
- [17] LI N, ZHANG C, WEI D, et al. A boost converter-based MPPT steady-state oscillation-free fast tracking control strategy for photovoltaic power systems[J]. IET Power Electron, 2022, 3(16): 483-488.
- [18] 周东宝, 陈渊睿. 基于改进型变步长电导增量法的最大功率点跟踪策略[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1491-1498.
ZHOU Dongbao, CHEN Yuanrui. Maximum power point tracking strategy based on modified variable step-size incremental conductance algorithm[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1491-1498.
- [19] 陈亚爱, 周京华, 李津, 等. 梯度式变步长 MPPT 算法在光伏系统中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3156-3161.
CHEN Yaai, ZHOU Jinghua, LI Jin, et al. Application of gradient variable step size MPPT algorithm in photovoltaic system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 3156-3161.
- [20] 樊立萍, 陈其鹏. 基于萤火虫优化模糊 P&O 的微生物燃料电池最大功率点跟踪[J]. 太阳能学报, 2024, 45(4): 374-381.
FAN Liping, CHEN Qipeng. Maximum power point tracking of microbial fuel cell based on firefly optimization fuzzy P&O[J]. Acta Energetica Sinica, 2024, 45(4): 374-381.
- [21] 商立群, 朱伟伟. 基于全局学习自适应细菌觅食算法的光伏系统全局最大功率点跟踪方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(12): 2606-2614.
SHANG Liqun, ZHU Weiwei. Photovoltaic system global maximum power point tracking method based on the global learning adaptive bacteria foraging algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(12): 2606-2614.
- [22] 胡桂廷, 张正江, 杨光辉, 等. 基于模型辨识与 BP 神经网络的光伏 MPPT 方法[J]. 控制工程, 2021, 28(10): 1931-1938.
HU Guiting, ZHANG Zhengjiang, YANG Guanghui, et al. A photovoltaic MPPT method based on model identification and BP neural network[J]. Control Engineering of China, 2021, 28(10): 1931-1938.
- [23] 吴子牛, 孟润泉, 韩肖清. 基于改进多种群遗传算法的光伏阵列多峰值 MPPT 研究[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(8): 102-109, 120.
WU Ziniu, MENG Runquan, HAN Xiaoqing. Research on multi-peak MPPT of photovoltaic array based on improved multi-population genetic algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(8): 102-109, 120.
- [24] INCREMONA G P, RUBAGOTTI M, TANELLI M, et al.

- A general framework for switched and variable gain higher order sliding mode control[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2021, 66(4): 1718-1724.
- [25] INOMOTO R S, MONTEIRO J R B D, FILHO A J S. Boost converter control of PV system using sliding mode control with integrative sliding surface[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(5): 5522-5530.
- [26] ANTONYSAMY R P, LEE S R, JUNG S Y, et al. Performance enhancement using robust sliding mode approach based current control for PMVG-WECS[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(10): 10156-10166.
- [27] KOMURCUGIL H, ZHANG Z, BAYHAN S. Guest editorial special section on recent advances on sliding mode control and its applications in modern industrial systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(2): 1149-1152.
- [28] RAI R, SHUKLA S, SINGH B. Sensorless field oriented SMCC based integral sliding mode for solar PV based induction motor drive for water pumping[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(5): 5056-5064.
- [29] RAHUL I, HARIHARAN R. Enhancement of solar PV panel efficiency using double integral sliding mode MPPT control[J]. Tsinghua Science and Technology, 2024, 29(1): 271-283.
- [30] BAG A, SUBUDHI B, RAY P K. A combined reinforcement learning and sliding mode control scheme for grid integration of a PV system[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 5(4): 498-506.
- [31] ZHANG Y, WANG J, LI H, et al. Dynamic performance improving sliding-mode control-based feedback linearization for PV system under LVRT condition[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(11): 11745-11757.
- [32] SAHANI M, BISWAL B, PRASAD E N, et al. An adaptive integral backstepping SMC and robust functional expanded multikernel BLS based MPPT control in PV-battery DC microgrid system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(3): 1-13.
- [33] 赵静, 林智昌, 姜斌, 等. 永磁同步直线电机的分数阶超螺旋滑模控制[J]. 控制理论与应用, 2023, 40(7): 1224-1232.
- ZHAO Jing, LIN Zhichang, JIANG Bin, et al. Fractional order super-twisting sliding mode control of permanent magnet synchronous linear motor[J]. Control Theory & Applications, 2023, 40(7): 1224-1232.
- [34] 李正明, 单晓晨, 徐鹏坤. 基于超螺旋滑模控制光伏 MPPT 的实现[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(21): 32-37.
- LI Zhengming, SHAN Xiaochen, XU Pengkun. Super-twisting sliding mode controller used in photovoltaic system MPPT[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(21): 32-37.
- [35] 皇金锋, 杨振宇, 李帅杰, 等. 基于混合储能的光储直流微网改进型滑模自抗扰控制[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 23(51): 151-159.
- HUANG Jinfeng, YANG Zhenyu, LI Shuaijie, et al. Improved sliding mode self-disturbance resistance control of an optical storage DC micro-grid based on hybrid energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2024, 23(51): 151-159.
- [36] 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 Xi, 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.
- [37] 刘树林, 沈一君, 刘旭, 等. 正-反激变换拓扑的功率传输分配特性及设计考虑[J]. 电工技术学报, 2023, 38(18): 5006-5016.
- LIU Shulin, SHEN Yijun, LIU Xu, et al. Power transmission distribution characteristics and design considerations of forward-flyback conversion topology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(18): 5006-5016.
- [38] WANG Shiyu, WAN Yue, CHEN Guicheng, et al. An efficient and compact equalizer based on forward-flyback conversion for large-scale energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024, 10(1): 1222-1232.

收稿日期: 2024-07-11; 修回日期: 2024-11-21

作者简介:

杨建湘(1987—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为新能源发电系统的稳定性分析及控制; E-mail: yangjx0108@gpnu.edu.cn

范毅然(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电及储能技术。E-mail: fanyiran@gpnu.edu.cn

(编辑 魏小丽)