

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241025

# 光伏发电最大功率追踪的改进电导增量法

程子霞<sup>1</sup>, 丁青波<sup>1</sup>, 柴旭峥<sup>2</sup>

(1. 郑州大学电气与信息工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 国网许昌供电公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 传统的电导增量法存在内部参数无法适应外部光照变化和外部光照变化时算法误判两个缺陷。为此, 提出一种基于光照预分组和电压变化趋势判别的改进电导增量法。首先, 该方法通过将光照水平预分组, 预先计算出各分组下算法的最佳参数, 根据外部光照所处分组分配算法参数以适应外部光照水平的变化。其次, 分析了算法发生误判问题的原因, 根据光照变化趋势与功率变化趋势间的关系来预测误判问题的出现。在预测到算法出现误判的情况下对电压趋势进行取反处理, 从而避免误判问题的发生。最后, 搭建光伏系统仿真模型对改进方法进行验证。仿真结果显示所提改进电导增量法具有较好的响应速度和稳定性。

**关键词:** 电导增量法; 最大效率跟踪; 误判问题; 光伏控制系统; 光照预分组

## Improved incremental conductance method for maximum power tracking in photovoltaic power generation

CHENG Zixia<sup>1</sup>, DING Qingbo<sup>1</sup>, CHAI Xuzheng<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;  
2. State Grid Xuchang Power Supply Company, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** The traditional incremental conductance method has two main shortcomings: its internal parameters cannot adapt to changes in external irradiance, and it tends to make misjudgments during irradiance variations. Thus this paper proposes an improved incremental conductance method based on irradiance pre-grouping and voltage change trend discrimination. First, the optimal parameters of the algorithm in each group are pre-calculated by pre-grouping the irradiance levels, and the algorithm parameters are then assigned according to the external irradiance group, allowing the algorithm to adapt to the changes in external irradiance. Second, the cause of the algorithm's misjudgment problem is analyzed, and potential misjudgments are predicted by examining the relationship between irradiance and power trends. The voltage trend is reversed when a misjudgment is predicted, thereby avoiding misjudgment. Finally, a photovoltaic system simulation model is built to verify the proposed method. Simulation results show that the improved incremental conductance method offers better response speed and stability.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52107130).

**Key words:** incremental conductance method; maximum efficiency tracking; misjudgment problem; photovoltaic control system; irradiance pre-grouping

## 0 引言

面对能源短缺危机和环境保护的挑战, 世界各国均致力于以太阳能、风能为代表的清洁能源的开发利用。我国“十四五”可再生能源发展规划中也明确指出将继续大力发展太阳能、风能等可再生能源, 逐步构建以新能源发展为主体的新型电力系统。

在此背景下, 我国光伏、风力发电进入了装机增长的快车道, 分布式光伏发电的发展势头尤为迅猛<sup>[1-5]</sup>。

在光伏发电等环境敏感型发电方式中, 发电功率会受到环境因素的影响而产生较大的波动, 从而导致发电功率的下降<sup>[6-7]</sup>。为提高光伏电池的发电效率, 最大功率点追踪(maximum power point tracking, MPPT)技术应运而生。根据控制算法的不同, MPPT控制策略可分为很多种, 常见的有恒压控制法<sup>[8]</sup>、电导增量法<sup>[9]</sup>和扰动观察法<sup>[10]</sup>等。随着非线性控制

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52107130)

理论的发展, 也出现了许多优化控制算法<sup>[11-13]</sup>以及非线性控制方法<sup>[14-15]</sup>。

电导增量法因其响应速度快、适应能力强而被广泛应用于光伏发电系统中。传统的电导增量法虽然能够达到追踪最大功率点(maximum power point, MPP)的效果, 但是电压变化量的选取非常困难, 一旦电压变化量的选取稍微偏大就极易导致系统失去稳定性, 而电压变化量的选取偏小又会导致系统的快速性降低。文献[16-19]提出将较为先进的控制策略加入到传统算法中去, 但控制方法复杂, 抗干扰能力较差。文献[20-21]提出了改进变步长电导增量法, 解决了定步长电导增量法系统稳定性较低这方面的缺陷。变步长电导增量法虽然解决了系统稳定性的问题, 但没有考虑到系统对于快速性的需求, 且其步长虽然可以随工作点的变化而变化, 但仍然受步长因子的制约。文献[22]提出以  $d(k)$  代替变步长系数, 并对 3 种不同的系数选取方案进行综合评估比较, 从而确定最优的变步长系数, 得到的 MPPT 控制算法有更好的综合跟踪性能。文献[23]通过分段将定步长电导增量法与变步长电导增量法结合起来, 同时兼顾到了快速性与稳定性的要求。

在恒定环境条件下, 上述方法相较于固定步长算法展现了显著的稳态精度优势, 有效确保了系统运行的稳定性和精确性。然而, 在光伏发电的实际应用中, 光照条件常常会发生突然变化(例如云层的快速遮挡和消散)。在这种情况下, 上述方法的步长调节因子在不同辐射强度下的差异显著影响了算法的瞬态响应速度, 使得系统在快速适应光照变化时表现不佳。此外, 在光照强度快速波动的情况下, 光伏阵列的输出特性将不再呈现单一的峰值曲线, 而是表现出非线性的变化, 这进一步增加了算法的复杂性, 并可能导致误判, 影响系统对 MPP 的精确追踪及整体效率。

为了解决光照环境变化时步长选择困难以及其频繁变化引发误判导致系统稳定性下降的问题, 本文提出了一种基于光照预分组和电压变化趋势判别的改进电导增量法。仿真结果表明, 所提出的控制方法在响应速度和稳定性方面均表现出较大优势。

## 1 光伏电池特性及电导增量法原理分析

### 1.1 光伏电池特性曲线分析

目前普遍使用的硅光伏电池等效电路如图 1 所示, 其中:  $I_{ph}$  为光伏电池光生电流;  $I_d$  为二极管反向饱和电流;  $R_{sh}$  为并联电阻;  $R_s$  为电路串联电阻。

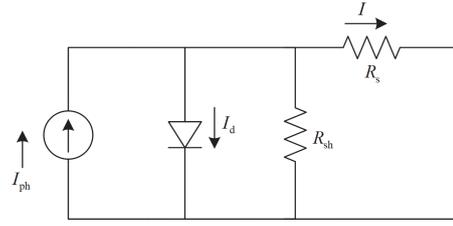


图 1 硅光伏电池等效电路示意图

Fig. 1 Equivalent circuit diagram of silicon photovoltaic cell

根据图 1 建立光伏电池的数学模型, 其数学表达式<sup>[24]</sup>为

$$I = I_{sc} \left\{ 1 - C_1 \left[ \exp\left(\frac{V + d_v}{C_2 V_{oc}}\right) \right] \right\} + D \quad (1)$$

其中

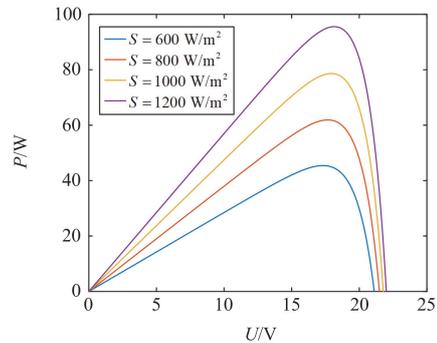
$$\begin{cases} C_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}\right) \exp\left(-\frac{V_m}{C_2 V_{oc}}\right) \\ C_2 = \frac{V_m}{V_{oc}} - 1 / \ln\left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}\right) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} D = I_{sc} S_1 + a T_1 (1 + S_1) \\ d_v = b T_1 + D R_s \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} T_1 = T - T_{ref} \\ S_1 = \frac{S}{S_{ref}} - 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $I$ 、 $V$  分别为光伏电池输出电流与输出电压;  $I_{sc}$ 、 $V_{oc}$ 、 $I_m$ 、 $V_m$  为光伏电池生产厂家给定的标准参考技术值;  $S_{ref}$  为太阳光强参考值, 取值为  $1000 \text{ W/m}^2$ ;  $T_{ref}$  为电池参考温度, 取值为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $S$ 、 $T$  分别为任意太阳光强和电池温度;  $S_1$ 、 $T_1$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $D$  均为中间变量;  $a$ 、 $b$  为补偿系数,  $a = 0.0054$ ,  $b = 0.21$ 。

根据公式(1), 在 Matlab/Simulink 仿真平台中建立光伏电池数学仿真模型。使用控制变量法设置两种外界条件: 一是外部温度不发生改变, 改变光照强度; 二是外部光照强度保持不变, 改变温度, 得出光伏电池的特性曲线如图 2 和图 3 所示。



(a) P-U 特性曲线

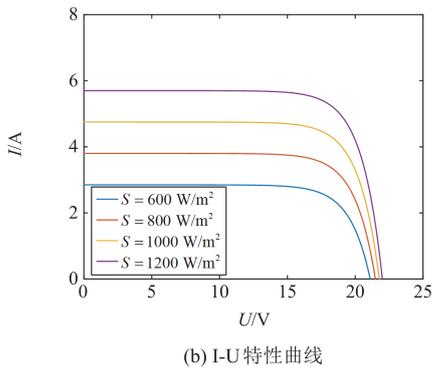


图 2 不同光照条件下的光伏电池输出特性曲线  
Fig. 2 Output characteristic curves of photovoltaic cells under different light conditions

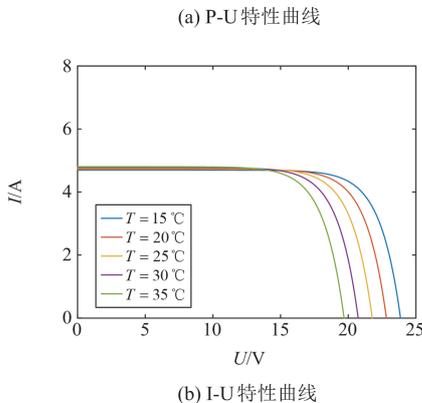
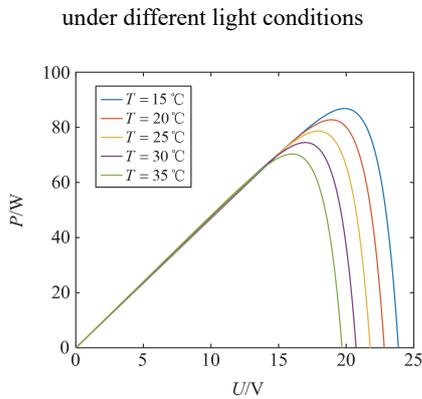


图 3 不同温度下的光伏电池特性曲线  
Fig. 3 Characteristic curves of photovoltaic cells at different temperatures

图 2 为在温度保持  $T = 25\text{ }^\circ\text{C}$  不变时, 光照强度从  $S = 600\text{ W/m}^2$  以  $200$  的差值升高至  $S = 1200\text{ W/m}^2$  时的光伏电池特性曲线。图 3 为在光照强度保持  $S = 1000\text{ W/m}^2$  不变时, 环境温度从  $T = 15\text{ }^\circ\text{C}$  以  $5$  的差值递增至  $T = 35\text{ }^\circ\text{C}$  时的光伏电池特性曲线。

分析图 2 和图 3 可知, 当温度保持恒定时, 随着外部光照强度的增加, 光伏单元的最大功率和开路电压都会相应升高。此外, 光照强度越大, 功率-电压(P-U)曲线在达到最大功率点之前的斜率也会

增大。在光照强度增大的同时, 光伏电池的输出电流也会随之增大。当光照强度不变时, 不同温度下的 P-U 特性曲线在达到最大功率点之前几乎完全重合, 但最大功率点的位置会随着温度的升高而向左移动, 并且最大功率值也会随温度升高而减小。对于电流-电压(I-U)特性曲线, 在达到最大功率点之前, 曲线表现为完全重合, 温度的升高只导致开路电压的降低。

### 1.2 传统电导增量法原理分析

传统电导增量法分为定步长电导增量法与变步长电导增量法, 它们的基本原理是根据 P-U 特性曲线提出的。

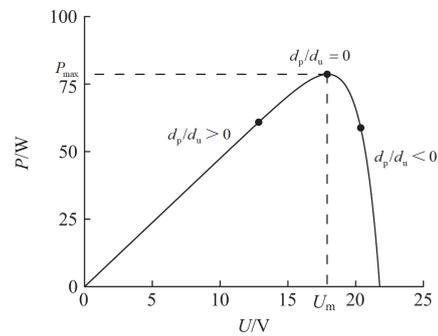


图 4 电导增量法基本原理图  
Fig. 4 Basic schematic of incremental conductance method

分析图 4 可知, 光伏电池 P-U 曲线有且仅有一个“峰值”, 在“峰值”处曲线的斜率  $d_p/d_u = 0$ , 而在“峰值”的左侧一直存在  $d_p/d_u > 0$ , 在“峰值”的右侧一直存在  $d_p/d_u < 0$ 。根据  $d_p/d_u$  与  $0$  的大小关系可以判断此时光伏电池的工作点是处在 MPP 的左侧还是右侧, 若处于 MPP 的左侧则电压变化量取正, 反之则取负。定步长电导增量法与变步长电导增量法不同之处在于每次算法循环时所取的电压变化量不同。

对于定步长电导增量法其电压变化量的取值极易偏大, 因此定步长电导增量法在追踪到 MPP 后的稳定性较低; 而对于变步长电导增量法其电压变化量的值一般较小, 因此其快速性较低。

为了解决传统电导增量法存在的电压变化量鲁棒性缺陷, 将定步长电导增量法与变步长电导增量法结合使用, 其原理如图 5 所示。

图中, 取一阈值  $m$ , 将光伏电池的 P-U 特性曲线截断为 3 部分, 令  $|d_p/d_u| = m$ , 在曲线上能找到两处符合条件的工作点 A 和 B。在 A 点的左侧光伏电池 P-U 特性曲线约为一条单调递增的直线, 而在 B 点的右侧又可以看作一条更陡的单调递减的直

线, 且有  $|d_p/d_u| > m$ 。

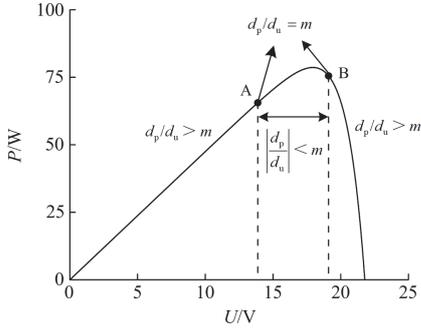


图 5 改进电导增量法原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of improved incremental conductance method

在工作点 A 和 B 之间, P-U 特性曲线则是越靠近 MPP 就越平滑, 且有  $|d_p/d_u| < m$ <sup>[19]</sup>。

由以上分析可知, 在电导增量法工作过程中, 当  $|d_p/d_u| > m$  时, 说明光伏电池工作在 A 点的左侧或 B 点的右侧, 此时工作点与 MPP 间仍有较大余量, 电导增量法的步长可取一个较大值, 因此取步长为固定值  $\Delta U = \Delta U_{\max}$ ; 当  $0 < |d_p/d_u| \leq m$  时, 光伏电池工作在 A 点与 B 点之间, 说明此时的工作点接近 MPP, 出于稳定性考虑电导增量法的步长需要取一较小值, 因此取步长  $\Delta U = k|d_p/d_u|$ 。其中:  $\Delta U_{\max}$  为定步长电导增量法中维持系统稳定的最大步长;  $k$  为变步长电导增量法中的步长因子。

阈值  $m$  的取值根据 P-U 曲线左侧  $|d_p/d_u|$  的最大值来取定,  $m$  的取值应小于左侧  $|d_p/d_u|$  的最大值以确保系统的快速性,  $m$  应满足

$$0 < m \leq |d_p/d_u|_{\text{left max}} \quad (5)$$

然而,  $m$  的取值不能过小, 否则会导致系统在 MPP 附近产生振荡, 从而降低系统的稳定性。因此, 阈值  $m$  的取值一般稍小于 P-U 曲线左侧斜率最大值即可。这样既保证了系统在 MPP 附近的稳定性, 又保证了系统在远离 MPP 时的快速性。

图 5 所示固定阈值的电导增量法考虑到了稳定性和快速性两方面的因素, 弥补了定步长和变步长电导增量法的不足。

## 2 针对传统电导增量法缺陷的改进

### 2.1 固定阈值的电导增量法在光照变化环境下的分析

尽管固定阈值的电导增量法在一定程度上解决

了传统电导增量法在稳定性和快速性之间的矛盾, 但由于步长的选取依然沿用了传统电导增量法中固定步长和固定步长因子的设定, 且阈值  $m$  一旦确定便不再调整, 因此在光照变化较大的环境下, 仍然存在较大的缺陷。

图 6 是光照强度为  $600 \text{ W/m}^2$  与  $1200 \text{ W/m}^2$  时光伏电池的两条特性曲线。

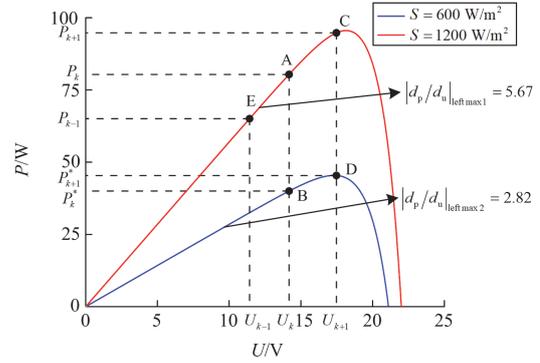


图 6 两种光照强度下光伏电池的特性曲线

Fig. 6 Characteristic curves of photovoltaic cells under two light intensities

图 6 中:  $U_{k+1}$ 、 $U_k$ 、 $U_{k-1}$  为各工作点电压;  $P_{k+1}$ 、 $P_k$ 、 $P_{k-1}$ 、 $P_{k+1}^*$ 、 $P_k^*$  为两种光照条件下光伏电池在各工作点的功率。

阈值  $m$  的选取应根据 P-U 曲线左侧  $|d_p/d_u|$  的最大值来取定, 由式(5)可得在两种光照环境下选取的  $m$  值范围为

$$0 < m_1 \leq 5.67 = |d_p/d_u|_{\text{left max 1}} \quad (6)$$

$$0 < m_2 \leq 2.82 = |d_p/d_u|_{\text{left max 2}} \quad (7)$$

式中:  $m_1$ 、 $m_2$  分别为  $S = 1200 \text{ W/m}^2$ 、 $S = 600 \text{ W/m}^2$  时算法的最佳阈值。

假定系统初始工作在  $1200 \text{ W/m}^2$  的光照强度下, 由式(6)结合 1.2 节分析,  $m_1$  的取值应尽可能地接近 5.67。则有

$$2.82 < m_1 \leq 5.67 = |d_p/d_u|_{\text{left max 1}} \quad (8)$$

若光照强度突变至  $S = 600 \text{ W/m}^2$ , 光伏电池的特性曲线也会发生变化, 由式(7)和式(8)可得以下关系:

$$0 < m_2 \leq 2.82 < m_1 \leq 5.67 \quad (9)$$

固定阈值电导增量法的阈值  $m_1$  一经选取就不会更改, 因此在  $S = 1200 \text{ W/m}^2$  的条件下选定阈值  $m_1$  后, 即使光伏电池的特性曲线变化, 固定阈值的电导增量法仍会按照阈值  $m_1$  来进行 MPP 的搜寻。

由式(9)可知,在光照强度突变至  $600 \text{ W/m}^2$  后,  $m_1$  的值大于 P-U 曲线左侧  $|d_p/d_u|$  的最大值,根据图 5 所示原理,固定阈值的电导增量法算法将在整个 MPP 的左侧以及右侧  $|d_p/d_u| \leq m_1$  的部分(靠近 MPP)选用定步长电导增量法的步长来进行 MPP 的追踪而不会在临近 MPP 时转换为变步长电导增量法,从而导致系统稳定性下降甚至失去稳定性。同理,当光照强度升高后,固定阈值的电导增量法将在 MPP 的左侧以及右侧部分(远离 MPP)只选取变步长电导增量法来进行 MPP 的追踪,使系统的快速性下降。

固定阈值的电导增量法本质上是定步长电导增量法与变步长电导增量法分段应用。然而,作为判断条件的阈值如果在光照环境变化时不能及时调整,就会导致改进措施失效,从而使系统无法在定步长和变步长电导增量法之间做出合理选择。这种情况下,系统将无法同时兼顾稳定性和快速性。

由上述分析得到结论:固定阈值的电导增量法虽然解决了静态光照条件下电导增量法的鲁棒性缺陷,却没有考虑动态光照条件下快速性与稳定性的矛盾。

### 2.2 传统电导增量法误判问题分析

除 2.1 节分析的缺陷之外,光照条件的变化还会给电导增量法带来误判问题<sup>[12]</sup>。

在图 6 中,设某时刻系统工作在 A 点,此时光照环境由  $S = 1200 \text{ W/m}^2$  突变到  $S = 600 \text{ W/m}^2$ ,系统工作的 P-U 特性曲线也会发生改变,工作点也由 A 点转移到 B 点。

此时因为电导增量法无法获取外部环境改变的信息,所以 MPP 的搜索仍会按照原先的 P-U 特性曲线的特点来进行。而此时工作点的电压由  $U_k$  转移到  $U_{k+1}$ ,电导增量法计算功率  $P$  差值的工作点为功率  $P_{k+1}^*$  与功率  $P_k$ ,而不是功率  $P_k^*$ 。

显然,工作点 A 和 D 不属于同一条特性曲线,因此出现问题:工作点 C 与工作点 A 相比变化趋势是升高的( $d_p/d_u > 0$ ),而与正确的工作点 B 相比变化趋势是下降的( $d_p/d_u < 0$ ),即电导增量法采集到的功率变化趋势与实际功率变化趋势是相反的,而电导增量法会根据错误的变化趋势( $d_p/d_u < 0$ )判定而向左侧搜索 MPP,这就出现了误判问题。

误判问题会导致系统无法追踪到光伏电池 MPP 的时间增加,降低系统的快速性,使得系统的发电效率下降;还可能因此导致系统在不同工作点之间进行频繁切换,使输出功率出现波动,从而影

响系统的稳定性。

### 2.3 固定阈值电导增量法的改进

为了解决光照环境变化时阈值  $m$  选取困难以及频繁变化导致误判,从而影响系统快速性和稳定性的问题,本文提出了一种基于光照分组和电压变化趋势判别的改进电导增量法。其原理如下。

考虑光伏电池安装的实际情况有以下特点:

- 1) 根据光伏电池实际的安装情况,光伏电池的安装地区几乎不会再进行移动;而对于某一固定地区,环境的光照强度总是在一定范围内的。
- 2) 光伏电池的内部物理结构在出厂后保持不变,这意味着在特定的外部环境条件下,光伏电池的 P-U 特性曲线是固定的。
- 3) 温度对光伏电池 P-U 特性曲线的影响较小,环境温度的变化对 MPP 几乎没有影响。因此,温度对 MPP 追踪的影响可以忽略不计,只需考虑光照条件。

基于以上 3 点可以得出:对于实际工程中安装的光伏电池,在进行 MPP 搜寻时,可以忽略外部温度的影响,而且在各个光照强度下的 P-U 特性曲线在安装后是固定不变的。对于电导增量法而言,这意味着在不同光照条件下,最佳阈值的取值也是固定的。

一般来说,某地的光照强度是一个连续变量,因此其最佳阈值也应当是一个连续量。事实上,小范围光照强度的变化对最佳阈值的影响通常较小。因此,在一定程度上牺牲精准度的情况下,可以将光照强度划分为若干组,并用每组光照强度的平均值来代表该组的光照水平。这样,光照强度与对应的最佳阈值就转化为一组离散的量,分别对应于各个光照强度的分组。因此可得结论:在某地安装后的光伏电池,将该地光照强度分组后,每组都有一个固定的最佳阈值,且这个阈值可根据光伏电池的物理参数计算。

由此可提出跟随光照的自适应阈值的改进方法:

- 1) 将光伏电池安装地光照强度水平合理分为若干组,取每组上下限光照强度的平均值来替代整组光照强度水平。
- 2) 根据光伏电池出厂时的物理参数,结合光伏电池数学模型画出在各组光照强度条件下的 P-U 特性曲线,并以此计算出各组光照条件下的最佳阈值  $m_g$ 。
- 3) 将计算出的若干  $m_g$  值预存,在电导增量法开始循环之前检测光伏电池的外部光照强度,查询当前光照强度所属的分组并选择该分组对应的最佳阈值  $m_g$ 。

4) 算法本次循环时使用选定的最佳阈值进行MPP的追踪。

光照分组管理的流程图如图7所示。

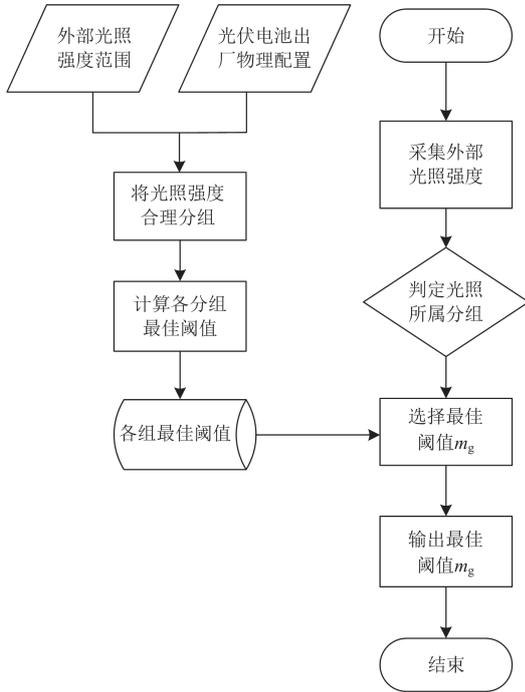


图7 光照分组管理的流程图

Fig. 7 Flowchart of light grouping management

通过对光照强度进行分组管理, 可以根据外部环境的变化动态调整阈值  $m$ , 从而减少外部光照变化对算法鲁棒性带来的负面影响。同时, 这种方法能将由光照环境变化引起的误差控制在各分组的上下限差值之内, 确保系统在不同光照条件下依然保持良好的性能。

然而, 这种方法并非完全精确, 误差会随着分组数量的不同而有所变化。理论上, 分组数越多, 误差越小; 当分组数足够大时, 误差将趋近于 0, 因此, 分组数越多, 本方法的效果越好。在实际应用中, 为了提高精度, 应尽可能选择较大的分组数。

各组光照水平下最优  $m$  的取值规则分析如下: 当光照分组结束后, 需要找出最佳  $m$  来替代整组光照水平下的阈值, 仍以图7对  $m$  的最佳取值进行定性分析。图6所示缺陷也可等同于有一分组为  $600\sim 1400\text{ W/m}^2$ , 取光照水平为  $1200\text{ W/m}^2$  时的  $m$  值替代整组光照的  $m$  值, 光照水平突降至区间最低点  $600\text{ W/m}^2$  后出现稳定性降低的情况。

因此可以得出结论: 对于某分组, 若替代整个分组的  $m$  值不等于分组最低光照水平对应的值, 则仍会出现稳定性降低的情况。由此得出各组光照水

平下的最优  $m$  值  $m_g$  取值规则为

$$m_g = m_{\min} \quad (10)$$

式中:  $m_{\min}$  为各光照分组下限值所对应的  $m$  值。

## 2.4 误判问题的解决

误判问题, 其本质上是光照突变后电导增量法仍然使用光照突变前后采样的功率进行比较才会导致算法出现误判的问题。实际上, 光照的突变并不一定会导致误判问题的发生。

对于误判问题的具体分析如下: 定义变量  $k_1$ 、 $k_2$  分别为原光照水平与光照水平突变后的下次循环与本次循环的功率差、电压差的比值为

$$k_1 = \frac{P_{n+1} - P_n}{U_{n+1} - U_n} \quad (11)$$

$$k_2 = \frac{P_{n+1}^* - P_n}{U_{n+1} - U_n} \quad (12)$$

式中:  $k_1$  为光照保持恒定时  $d_p/d_u$  的值;  $k_2$  为光照发生突变后  $d_p/d_u$  的值;  $U_{n+1}$ 、 $U_n$  为本次与下次算法循环时的工作点电压;  $P_n$  为算法本次循环时的功率;  $P_{n+1}$  为光照保持恒定后算法所测功率;  $P_{n+1}^*$  光照发生突变后算法所测功率。

在图6中, 有工作点 A、B、C、D、E, 假定光照条件由  $S = 1200\text{ W/m}^2$  突变到  $S = 600\text{ W/m}^2$ , 此时  $k_1$ 、 $k_2$  可表达为

$$k_1 = \frac{P_{k+1} - P_k}{U_{k+1} - U_k} \quad (13)$$

$$k_2 = \frac{P_{k+1}^* - P_k}{U_{k+1} - U_k} \quad (14)$$

此时有  $k_2 < 0 < k_1$ ,  $k_1$ 、 $k_2$  异号, 说明光照突变后算法计算功率变化趋势与实际情况刚好相反, 算法向着远离 MPP 的方向搜索, 出现误判情况。

而当光照条件由  $S = 600\text{ W/m}^2$  突变到  $S = 1200\text{ W/m}^2$  时, 结合图6,  $k_1$ 、 $k_2$  可表达为

$$k_1 = \frac{P_{k+1} - P_k^*}{U_{k+1} - U_k} \quad (15)$$

$$k_2 = \frac{P_{k+1}^* - P_k^*}{U_{k+1} - U_k} \quad (16)$$

有  $0 < k_2 < k_1$ ,  $k_1$ 、 $k_2$  同号, 此时即使电导增量法使用了错误采样的功率值, 但光照突变后算法功率变化趋势与实际情况相同, 算法仍然向 MPP 的方向继续搜寻, 并没有出现误判情况。

由上述分析可知, 电导增量法是否出现误判问题可由 $k_1$ 、 $k_2$ 的符号判断: 光照发生突变后, 若 $k_1$ 、 $k_2$ 同号, 算法不会出现误判情况; 若 $k_1$ 、 $k_2$ 异号, 算法一定会出现误判情况。

而在算法工作过程中, 当光照发生突变后算法只能采集到 $P_{n+1}^*$ 的值而无法确定 $P_{n+1}$ 的值, 因此 $k_1$ 的值也难以确定, 从而无法判断是否会发生误判问题。为了解决这个问题, 定义变量 $k_3$ 为

$$k_3 = \frac{P_n - P_{n-1}}{U_n - U_{n-1}} \quad (17)$$

式中:  $P_{n-1}$ 为算法上次循环时所测得的功率;  $U_{n-1}$ 为算法上次循环时的工作点电压;  $k_3$ 为光照发生突变算法前一次循环时 $d_p/d_u$ 的值。

由图 6 所示的光伏特性曲线可知, 无论是在 MPP 的左侧或是右侧,  $k_3$ 、 $k_1$ 总是保持同号; 而对于自适应阈值的电导增量法, 不会出现步长过大而使算法两次循环横跨 MPP 的情况出现。因此, 可用已知的 $k_3$ 来代替 $k_1$ 进行误判问题的分析。

判断误判问题是否发生的条件就转换为: 光照发生突变后, 若 $k_3$ 、 $k_2$ 同号, 算法不会出现误判情况; 若 $k_3$ 、 $k_2$ 异号, 算法一定会出现误判问题。

根据上述分析, 解决电导增量法中的误判问题的方法如下: 当检测到光照突变时, 可以根据当前循环和上一次循环的工作点电压和功率, 计算出 $k_3$ 、 $k_2$ 的值, 通过对比这两个值, 可以判断出电导增量法在本次循环中是否存在误判问题。如果存在误判, 则将传统电导增量法计算出的电压变化趋势取反。这样, 电导增量法将继续朝着正确的 MPP 方向搜索, 而不会向远离 MPP 的方向偏移, 从而有效解决了误判问题。

而当两次循环接连出现光照突变, 即本次循环与下次循环光照都发生突变时, 以 $k_3$ 代替 $k_1$ 虽然能在本次循环中纠正搜索方向, 但会在下次循环时必定出现误判问题。为了解决这个缺陷, 引入误判标志 flag。且定义为

$$\text{flag} = \text{sign}(k_3 \cdot k_2) \cdot \text{flag} \quad (18)$$

式中: flag 初值设置为 1, 代表未发生误判。当算法第一次检测到误判问题的发生时( $k_3$ 、 $k_2$ 异号)flag 值将与-1 相乘, 同时根据判据将本次误判问题预测并修正(搜索趋势取反)。

在紧接的第二次循环中, 若再次发生光照突变则有两种情况: 如表 1 所示, 在第一次循环出现误判问题后, 第二次循环时, 根据 $k_3$ 、 $k_2$ 异号来进行判定判定结果正好与实际情况相反, 因此将判定

结果与误判标志 flag 相乘后将得到正确的结果, 且根据 flag 的表达式可知, 在第二次循环不发生误判后其值修正为 1, 即未发生误判, 在第二次循环发生误判后其值保持为-1。

表 1 第二次循环误判问题分析

Table 1 Analysis of the second cycle misjudgment problem

是否发生误判问题	$k_1$ 、 $k_2$ 异号?	第三次循环flag值
是	否	-1
否	是	1

通过引入误判标志 flag 可以处理连续发生误判问题后判据 $k_3$ 、 $k_2$ 不可靠的缺陷。

结合对两种缺陷的改进, 将其加入到传统电导增量法的流程图中, 得到改进电导增量法的算法流程图如图 8 所示。

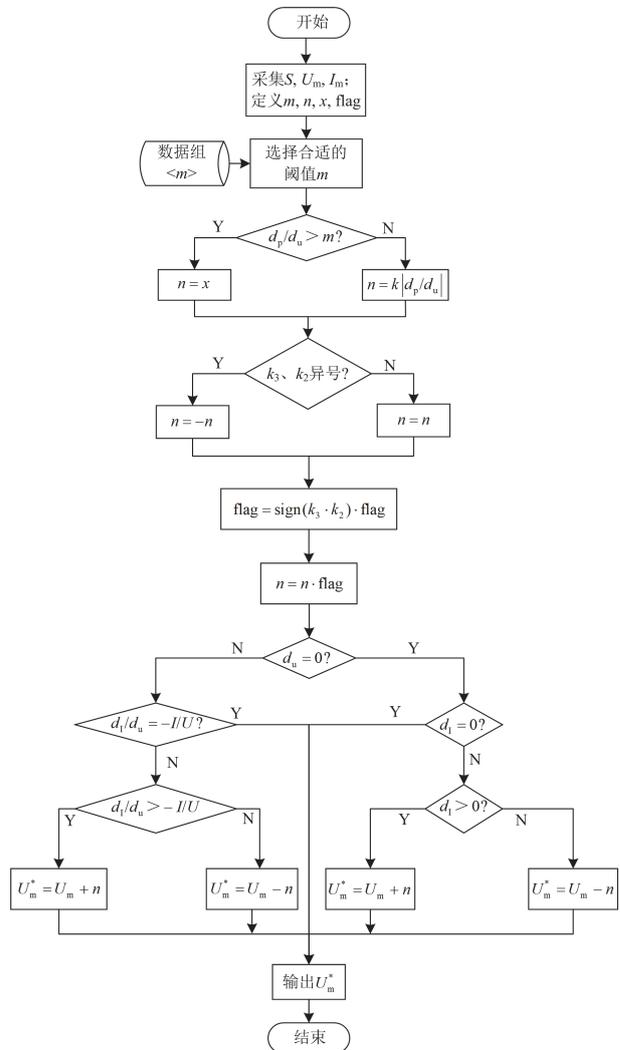


图 8 基于光照分组的改进电导增量法的算法流程图

Fig. 8 Algorithm flow chart of incremental conductance method based on light grouping

### 3 仿真实验

一般来说, 直流母线的参考电压要大于光伏电池的输出电压, 因此光伏单元的 DC/DC 变换器要具有升压效果, Boost 变换器是使用最广泛的升压变换器, 本文控制系统电路的选择也是 Boost 升压电路<sup>[24]</sup>。

光伏电池控制系统的主要组成部分有: 光伏阵列、MPPT 模块、Boost 升压电路以及直流负载。图 9 为典型的光伏电池控制系统结构。根据光伏电池控制系统结构图在 Simulink 中搭建仿真电路。

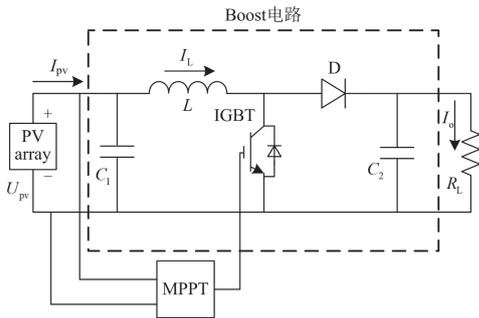


图 9 光伏电池控制系统结构图

Fig. 9 Structure diagram of photovoltaic cell control system

对光伏控制系统各模块进行初始化, 设定光伏电池额定功率为 140.5 W, 直流负载为 30  $\Omega$ , 固定阈值选定 3.0, 仿真时间为 1.5 s。在 1.5 s 的仿真实验中, 光照强度的变化趋势如图 10 所示, 初始光照强度设置为 1400  $\text{W}/\text{m}^2$ , 在 0.5 s 时降低至 1200  $\text{W}/\text{m}^2$ , 在 1 s 时降低为 1000  $\text{W}/\text{m}^2$ 。

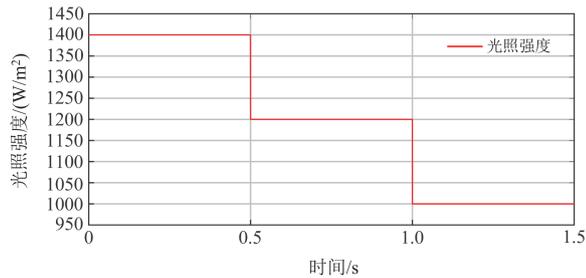


图 10 光照强度变化趋势

Fig. 10 Variation trend of light intensity

首先使用固定阈值 MPPT 控制方法在光伏控制系统仿真模型上进行仿真实验, 固定阈值  $m$  取 3.0, 观察光伏电池输出功率, 得到仿真结果如图 11 所示。

分析图 11 可知, 光伏控制系统使用的为固定阈值的电导增量法, 在 0~0.5 s, 光照水平较高, 光伏电池的 P-U 特性曲线左侧的斜率比预先设定的阈值要高得多, 分段效果失效, 电导增量法的步长取值

偏大导致系统稳定性下降, 此时间段光伏电池的功率会在 MPP 附近出现较大的波动。

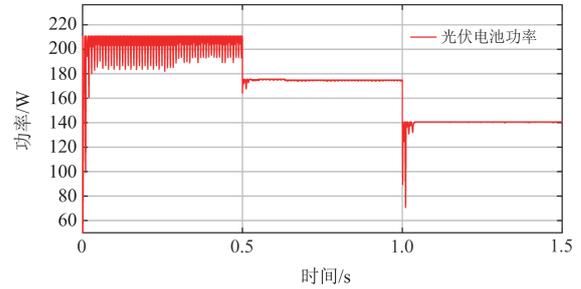


图 11 使用固定阈值电导增量法的光伏电池功率

Fig. 11 Photovoltaic cell power using a fixed threshold incremental conductance method

在 0.5~1 s 时, 光照水平降至 1200  $\text{W}/\text{m}^2$ , 光照水平与设定的最佳阈值相契合, 因此系统稳定性与快速性都较高, 处于最佳运行状态。在 1~1.5 s 时, 光照水平降至 1000  $\text{W}/\text{m}^2$ , 此时光伏电池的 P-U 特性曲线左侧的斜率比预先设定的阈值要低得多, 分段效果也会失效, 电导增量法的补偿取值偏小导致系统快速性下降, 因此在此光照水平下对 MPP 的追踪时长大大延长。仿真结果与第 2 节的分析保持了一致。

使用自适应阈值的 MPPT 控制方法时, 需要提前确定光伏电池安装地点的光照水平, 选定某地作为仿真实验地点, 其 2023 年全年地表辐射水平统计如图 12 所示。

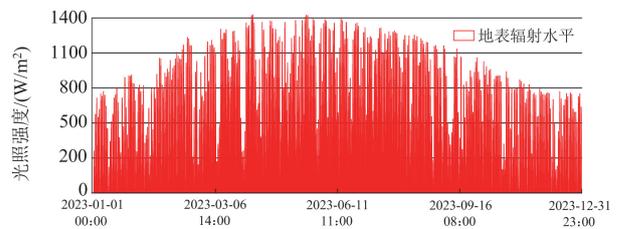


图 12 某地 2023 年全年地表辐射水平统计

Fig. 12 Annual surface radiation level statistics in 2023

分析图 12 可知, 除去夜间, 此地的光照强度水平基本分布在 200~1400  $\text{W}/\text{m}^2$  的区间之内。将光照水平分为 4 组, 分别为 200~500  $\text{W}/\text{m}^2$ 、500~800  $\text{W}/\text{m}^2$ 、800~1100  $\text{W}/\text{m}^2$ 、1100~1400  $\text{W}/\text{m}^2$ 。取各组光照水平的下限值, 使用各分组的光照水平下限值代表各分组的光照水平, 分析各光照分组的 P-U 曲线, 结合阈值  $m$  的取值规则列表 2。

表 2 中:  $k_{\text{left max}}$  为 P-U 曲线 MPP 点左侧斜率的最大值;  $k_{\text{left max}1} - k_{\text{left max}4}$  为使用各分组下限光照强度值代替整组光照后各组 P-U 曲线 MPP 点左侧斜

率的最大值。

表 2 各光照分组下的最佳阈值选取

Table 2 Optimal threshold selection for each illumination group

光照水平分组/(W/m <sup>2</sup> )	$k_{left\ max}$	阈值 $m$
1100~1400	$k_{left\ max1} = 4.21$	$k_{left\ max1} - 0.1$
800~1100	$k_{left\ max2} = 3.25$	$k_{left\ max2} - 0.1$
500~800	$k_{left\ max3} = 2.30$	$k_{left\ max3} - 0.1$
200~500	$k_{left\ max4} = 1.59$	$k_{left\ max4} - 0.1$

固定阈值电导增量法的阈值即可根据此表取 1100 W/m<sup>2</sup> 光照条件下的最佳阈值约 3.15, 且得到自适应阈值的 MPPT 控制方法在各光照分组下的最佳阈值, 将其存为数组等待调用。

然后使用自适应阈值的 MPPT 控制方法在光伏控制系统仿真模型上进行仿真实验, 且在 1 s 后加入连续光照变化的干扰, 观察光伏电池输出功率, 得到的仿真结果和光照变化分别如图 13 和图 14 所示。

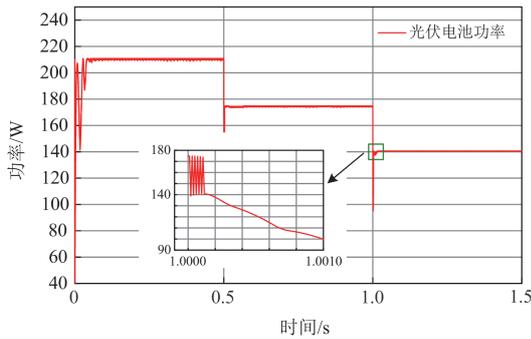


图 13 使用自适应阈值电导增量法的光伏电池功率

Fig. 13 Photovoltaic cell power using an adaptive threshold incremental conductance method

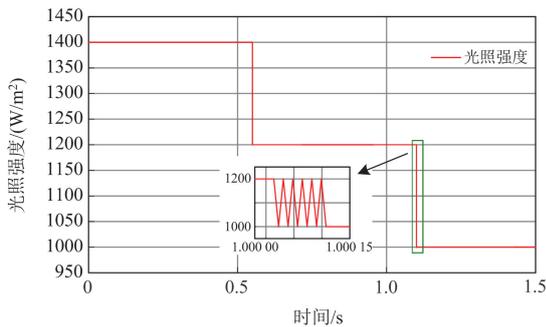


图 14 光照强度变化趋势

Fig. 14 Variation trend of light intensity

分析图 13 可以得出以下结论: 首先, 在 1.5 s 的仿真时间内, 尽管光照水平发生了变化, 系统在成功搜寻到 MPP 后, 光伏电池的功率始终保持稳定。这表明本文所提方法在应对光照环境变化时, 其

稳定性几乎不受影响; 其次, 尽管光照发生变化, 追踪所需的时间并没有明显增加, 表明本文方法在保证稳定性的同时, 依然能够维持较快的响应速度。此外, 在光照发生突变后, 算法能够迅速在连续的循环中向着正确的 MPP 方向调整, 并最终成功找到 MPP, 证明该方法在动态光照变化下的有效性。

将两种方法仿真结果中的追踪时长以及振荡幅度进行统计, 结果如表 3 所示。

表 3 两种电导增量法的追踪时长与振荡幅度

Table 3 Tracking time and oscillation amplitude of two incremental conductance methods

方法	追踪时长/s	功率振荡幅度/W
固定阈值电导增量法	0.03	9.0
自适应阈值电导增量法	0.0105	1.0

分析表 3 可得出以下结论: 在面对光照变化的外部环境时, 与传统电导增量法相比, 本文提出的改进电导增量法在平均跟踪时长上提高了 2.85 倍, 振荡幅度降低了约 90%。这表明改进后的电导增量法能够更有效地应对光照强度变化, 且系统输出波形的振荡幅度明显减小, 有效避免了误判问题。同时, 该算法在跟踪速度和精度上都取得了显著提升, 验证了本文所提光伏电池控制方法在实际应用中的正确性和优越性。

### 4 结论

本文分析了光伏发电最大功率跟踪中常用的电导增量法存在的问题, 主要包括在光照环境变化时步长选取困难以及光照变化频繁时发生误判, 导致系统稳定性下降。针对步长选取困难的问题, 本文提出了阈值预分组匹配的改进策略; 针对误判的原因进行分析, 发现电压变化趋势与光照变化趋势是导致误判的关键因素, 并通过对电压变化趋势进行取反处理来有效避免误判。将这两项改进措施应用于自适应阈值电导增量法, 并进行了仿真验证。结果表明, 所提出的改进电导增量法在响应速度和稳定性方面表现优异, 能够显著提高光伏发电系统的运行可靠性和发电效率, 具有重要的实用价值。

### 参考文献

[1] 晏璐, 陈贞斐, 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.

- [2] 马启鹏, 郝正航, 张裕, 等. 含高渗透率分布式光伏配电网的网络分区与电压协调控制[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(3): 93-102, 108.  
MA Qipeng, HAO Zhenghang, ZHANG Yu, et al. Network partition and voltage coordination control of distributed PV power distribution network with high permeability[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(3): 93-102, 108.
- [3] 王彤, 李永达, 高洁, 等. 基于受扰轨迹空间解耦的直驱风电机组非线性动态降阶方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(21): 8206-8217.  
WANG Tong, LI Yongda, GAO Jie, et al. Nonlinear dynamic order reduction method of direct driven wind turbine based on disturbed trajectory space decoupling[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(21): 8206-8217.
- [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] SHANG L, GUO H, ZHU W. An improved MPPT control strategy based on incremental conductance algorithm[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(2): 1-8.
- [6] 谢佳伟, 展展烽, 李德明. 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. 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.
- [7] 肖瑶, 钮文泽, 魏高升, 等. 太阳能光伏/光热技术研究现状与发展趋势综述[J]. 发电技术, 2022, 43(3): 392-404.  
XIAO Yao, NIU Wenzhe, WEI Gaosheng, et al. Review on research status and developing tendency of solar photovoltaic/thermal technology[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(3): 392-404.
- [8] 邹文斌, 韩松, 荣娜, 等. 基于分布式共识协同的光伏逆变器电压控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(1): 166-173.  
ZOU Wenbin, HAN Song, RONG Na, et al. Voltage control strategy for a PV inverter based on distributed consensus collaboration[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(1): 166-173.
- [9] 鲁宗相, 李昊, 乔颖. 从灵活性平衡视角的高比例可再生能源电力系统形态演化分析[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(1): 12-18.  
LU Zongxiang, LI Hao, QIAO Ying. Morphological evolution of power systems with high share of renewable energy generations from the perspective of flexibility balance[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(1): 12-18.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 闫根弟, 赵晋斌, 张广勇, 等. 基于 RMPPT/PID 双模控制的光伏发电 MPPT 研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(3): 169-173.  
YAN Gendi, ZHAO Jinbin, ZHANG Guangyong, et al. Research of photovoltaic generation MPPT based on RMPPT/PID dual-mode control[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(3): 169-173.
- [14] 杨海柱, 李庆华, 张鹏. 基于 tGSSA-DELM 的短期光伏发电功率预测[J]. 智慧电力, 2023, 51(10): 70-77.  
YANG Haizhu, LI Qinghua, ZHANG Peng. Short-term photovoltaic power generation prediction based on tGSSA-DELM[J]. Smart Power, 2023, 51(10): 70-77.
- [15] 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.
- [16] 刘海涛, 马丙泰, 郝思鹏, 等. 考虑功率限值管理的光储系统建模及控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(11): 100-108.  
LIU Haitao, MA Bingtai, HAO Sipeng, et al. Modeling and control strategy for photovoltaic energy storage system considering power limit management[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2022, 34(11): 100-108.

- [17] 薛飞, 马鑫, 田蓓, 等. 基于改进蜻蜓算法的光伏全局最大功率追踪[J]. 中国电力, 2022, 55(2): 131-137.  
XUE Fei, MA Xin, TIAN Bei, et al. Photovoltaic global maximum power tracking based on improved dragonfly algorithm[J]. Electric Power, 2022, 55(2): 131-137.
- [18] 郭春平, 汤寅琪, 林思伟. 基于模糊控制的变步长电导增量法的最大功率点跟踪策略[J]. 现代电子技术, 2022, 45(19): 145-151.  
GUO Chunping, TANG Yinqi, LIN Siwei. Fuzzy control based variable step conductance increment method for maximum power point tracking strategy[J]. Modern Electronics Technique, 2022, 45(19): 145-151.
- [19] 李大虎, 周泓宇, 周悦, 等. 基于多元宇宙优化算法的混合光伏-热电系统 MPPT 设计[J]. 中国电力, 2023, 56(11): 197-205.  
LI Dahu, ZHOU Hongyu, ZHOU Yue, et al. Multi-verse optimization-based MPPT design for PV-TEG system[J]. Electric Power, 2023, 56(11): 197-205.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 郭金智, 潘子峻, 袁绍军, 等. 基于改进电导增量法的变步长 MPPT 算法[J]. 电气传动, 2022, 52(20): 50-56.  
GUO Jinzhi, PAN Zijun, YUAN Shaojun, et al. Variable step size MPPT algorithm based on improved conductance increment method[J]. Electric Drive, 2022, 52(20): 50-56.
- [23] 王庆磊, 徐红城, 张强, 等. 基于变步长电导增量法改进型 MPPT 的研究[J]. 电器与能效管理技术, 2017(21): 10-15, 47.  
WANG Qinglei, XU Hongcheng, ZHANG Qiang, et al. Research of improved MPPT based on variable step incremental conductance method[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2017(21): 10-15, 47.
- [24] 于鸿, 吴振奎, 李国政, 等. 基于改进电导增量法的光伏 MPPT 控制研究[J]. 电工技术, 2023(8): 72-75.  
YU Hong, WU Zhenkui, LI Guozheng, et al. Research on photovoltaic mppt control based on improved conductance increment method[J]. Electric Engineering, 2023(8): 72-75.

收稿日期: 2024-03-31; 修回日期: 2024-08-25

作者简介:

程子霞(1974—), 女, 博士, 副教授, 主要从事高电压与绝缘技术教学与研究工作; E-mail: chzx@zzu.edu.cn

丁青波(2000—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为光伏发电系统及其控制; E-mail: sxywwq3034@163.com

柴旭峰(1978—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事电力系统运行、分析与控制方面的研究和实践工作。  
E-mail: chaixuzheng@126.com

(编辑 石晋美)