

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.06.002

考虑最大功率点估计模型校准的光伏功率备用控制

杨峻¹, 彭乔¹, 蔡永翔², 王扬²

(1. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065;

2. 贵州电网有限责任公司电力科学研究院, 贵州 贵阳 550007)

摘要:并网光伏系统通常以最大功率模式运行,无法全面响应电网调节需求,因此需要研究功率备用控制(power reserve control, PRC)。基于最大功率点估计(maximum power point estimation, MPPE)的PRC利用光伏等效模型,通过数据拟合实现MPPE,从而实现光伏功率备用。然而,随着光伏组件老化,MPPE估计误差增大,可能影响系统安全稳定运行。文中提出考虑光伏组件老化时MPPE模型参数校准的光伏系统PRC。首先提出基于麻雀搜索算法的MPPE模型参数校准方法,然后根据光伏组件老化特性和MPPE误差演变趋势,提出MPPE模型校准的改进评价指标和校准周期整定原则,最后将其应用于基于MPPE的PRC中。仿真结果表明,该方法能够实现光伏组件老化后MPPE模型参数自动校准,并且显著提高了MPPE精度,增强了PRC在实际应用中的可靠性。

关键词:光伏系统;功率备用控制(PRC);光伏单二极管模型;最大功率点估计(MPPE);模型参数校准;麻雀搜索算法

中图分类号:TM615

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2024)06-0012-09

0 引言

随着技术改进和政策支持,以光伏和风电为代表的的新能源在电网中的渗透率不断增加^[1-5]。为应对新能源出力不确定性和间歇性可能对电网造成的稳定问题,新能源系统被要求为电网提供主动支撑^[6-11]。然而,光伏系统通常运行在最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)模式,当电网出现功率缺额时光伏系统无法为其提供额外的功率支撑,可能导致频率失稳等一系列问题^[12]。因此,为实现对电网的全方位主动支撑,有必要对光伏系统功率备用控制(power reserve control, PRC)进行研究。

PRC的关键在于实时最大功率点(maximum power point, MPP)的估计,目前的实现方式主要包括周期MPPT^[13]、最大功率点估计(maximum power point estimation, MPPE)^[14]和高斯过程回归预测^[15-16]等。基于MPPE的PRC(MPPE-PRC)无须频繁改变光伏运行点,不依赖于特定的光伏场站安装运行结构(如由部分光伏组件运行在MPPT下提供MPP信息的主从运行方式^[17]),也无需大量传感器等额外装置,具备较高的工程实用性^[14]。MPPE通常依赖于光伏组件的经验模型或等效数学模型,利用端口电压、电流等实际运行数据,建立光伏阵

列功率-电压($P-V$)关系,以实现光伏组件实时MPPE。

然而,光伏组件存在老化导致的性能衰减问题,会造成光伏 $P-V$ 特性曲线变化、最大输出功率逐年降低^[18],其线性衰减率甚至可能达到每年2.43%^[19],碲化镉光伏组件的年最高衰减率甚至可能超过5%^[20]。此外,实验结果表明光伏组件在进入初始稳定后仍存在高温光致衰减的风险,且衰减现象与光伏串联电阻密切相关^[21]。需要注意的是,光伏组件内部物理参数在出现1%的衰减率时可能已经出现较大改变^[22]。这意味着当光伏组件实际最大功率存在可察误差时,用于MPPE的等效数学模型参数可能已出现严重偏差。除长期运行导致的正常衰减以外,光伏组件局部故障和非常规运行也会导致其最大功率降低。例如高辐照和不平衡运行可能导致组件过热^[23-24],加快光伏组件的老化。局部灰尘污染也可能导致光伏组件工作状态不均衡而老化^[25-26],进而增大等效模型参数误差。

随着光伏组件老化,当其等效模型参数误差超过允许范围时, $P-V$ 曲线可能无法拟合,算法无法估计最大可用功率,MPPE-PRC可靠性受到影响,甚至可能导致光伏系统功率控制崩溃。因此,有必要定期对光伏组件等效模型进行参数校准。目前主要通过人工测量或算法自动校准光伏组件数学模型,其中人工测量由运维人员测量组件参数并离线计算进行校准,人力成本较高且需要长时间停运光伏系统,难以频繁进行校准作业,易导致误差累积。

收稿日期:2023-10-30;修回日期:2024-01-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52207218);贵州省科技支撑计划资助项目“面向高比例分布式光伏消纳的交流混合中低压配电网关键技术与装置研发”

算法自动校准则是基于理论推导或智能算法,利用光伏组件实测和估计值进行自动校准,不影响光伏场站正常生产,人力成本低,校准精度高,可在不同工况下进行离线、在线参数校准,实用性、经济性更优。文献[27]基于二极管理想系数与开路电压间有关温度的关系,提出一种单二极管模型参数确定方法,但其依赖于大量光伏组件的运行数据,包括基于传感器测量的温度和辐照度数据,且无法在光伏正常运行时同步进行模型参数校准。文献[28]利用布谷鸟算法搜索光伏单二极管、双二极管模型的最优参数,但仅关注模型数据拟合,未考虑光伏场站在功率备用需求下的在线参数校准场景。此外,大多数方法对数据拟合或校准结果的评价指标单一^[28-30],未对重点关注区间进行针对性优化,限制了方法的精度,甚至可能导致光伏在提供电网支撑过程中控制失稳。文献[31]利用经预处理的电流-电压(I - V)数据,通过时间序列预测和网格搜索算法提取光伏组件参数,并完成光伏组件等效模型参数的实时校准,但该方法同样未针对 PRC 运行区进行优化,可能导致校准后 MPPE-PRC 的参考功率指令依旧存在偏差,且此算法较为复杂、计算资源需求高。

针对已有研究在 MPPE 模型参数校准问题上效率较低、精度不足、对 PRC 运行特性考虑不足的问题,文中提出一种考虑 MPPE 模型参数校准的光伏系统 PRC。首先,提出基于麻雀搜索算法(sparrow search algorithm, SSA)的 MPPE 模型参数自动校准方法;然后,提出 MPPE 模型校准的评价指标以及校准周期设计方法;最后,通过 MATLAB/Simulink 软件进行仿真分析,结果表明所提方法能有效应对光伏组件老化,实现 MPPE 模型参数自动校准,保证 MPPE-PRC 精度。

1 MPPE 及其等效模型校准方法

为缓解光伏系统出力波动对电网的影响,提高光伏出力的可控性,PRC 等灵活功率控制策略被提出。PRC 是指在光伏场站中使光伏运行点偏离 MPP 的控制策略,其原理如图 1 所示。常规控制下,光伏系统运行在 MPP,而 PRC 使得光伏可以运行在功率备用点(power reserve point, PRP)。当电网需要光伏系统输出额外功率时,光伏运行点由 PRP 向 MPP 移动;而当电网需要光伏减少出力时,光伏运行点由 PRP 继续向下移动。在 PRC 中,最重要的是测量或估计光伏系统的最大可用功率。由于 MPPE 能够连续实时估计 MPP 并保持系统运

行点的稳定性,因此 MPPE 成为 PRC 获取最大可用功率的有效选择。

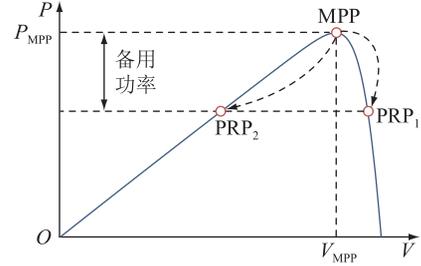


图 1 光伏系统 PRC 示意

Fig.1 Schematic diagram of PRC of PV system

如图 1 所示,同一功率备用参考值对应 P - V 曲线上的 2 个运行点。文中选取 MPP 右侧的备用功率点,即 PRP₁,原因是 PRP₁ 处的光伏电流变化率较大,具备较高的动态性能,能够为 MPPE 快速提供多组采样数据。此外,当光伏系统需要灵活调整输出功率时,PRP₁ 也具备更快的响应速度。

1.1 基于单二极管模型的 MPPE

光伏组件运行原理复杂,通常利用等效数学模型对其进行表征。最常用的模型是单二极管模型,其结构简单,同时能够较为准确地表征光伏组件功率特性,适用于 MPPE 以及 MPPE-PRC 的研究中^[14,32]。基于单二极管模型的光伏组件 I - V 关系为:

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{kT_{cell}}\right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中: I 为光伏组件的输出电流; I_{ph} 为光照下光伏短路电流; I_0 为反向饱和电流; q 为元电荷; V 为端口电压; R_s 、 R_{sh} 分别为串联和并联电阻; k 为玻尔兹曼常数, $k=1.38 \times 10^{-23}$ J/K; T_{cell} 为 PN 结温度。

基于光伏单二极管等效模型及 Lambert W 函数简化,可以得到光伏组件 MPP 所对应电压 V_m 和电流 I_m 的非线性函数^[14],即:

$$\begin{cases} V_m = \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) \alpha_{I_{sc}}(w - 1) - R_s I_{ph} \left(1 - \frac{1}{w}\right) \\ I_m = I_{ph} \left(1 - \frac{1}{w}\right) - \frac{\alpha_{I_{sc}}(w - 1)}{R_{sh}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\alpha_{I_{sc}}$ 为短路电流 I_{sc} 的归一化温度系数; w 为 Lambert W 函数求得的辅助函数, $w = W\{eI_{ph}/I_s\}$, I_s 为二极管饱和电流。

需要注意的是,式(2)中各模型参数受光伏组件温度和辐照度等因素影响。考虑温度和辐照度影响的模式参数^[14]为:

$$\begin{cases} I_{ph} = I_{ph0}G(1 + \alpha(T - 25)) \\ I_s = I_{s0}\lambda T^3 \exp(E_k) \left(1 - \frac{1}{\lambda}\right) \\ a = a_0\lambda T \\ R_s = R_{s0} \\ R_{sh} = R_{sh0}/G \end{cases} \quad (3)$$

式中： I_{ph0} 、 I_{s0} 、 R_{s0} 、 R_{sh0} 、 I_{s0} 为各相应模型参数在标准测试条件下的数值； G 为辐照度； λ 为实际温度与标准温度的比值； T 为光伏组件温度； a 为二极管理想因子； a_0 为 a 在标准测试条件下的数值； E_k 为光伏组件在实际温度和标准测试温度下硅能隙数值计算的简化系数，为常数。

$$E_k = [(1/T_0) - 0.000 267]E_0/k \quad (4)$$

式中： E_0 为硅在标准温度 T_0 时的常数， $E_0 = 1.795 8 \times 10^{-19}$ J。

将式(3)代入式(1)可得仅含 V 、 I 、 T 、 G 这4个独立变量的新 I - V 特性表达式^[33]，即：

$$\ln\left(\frac{GI_{ph0}(1 + \alpha_{sc} T_0(\lambda T - 1)) - I - G(V + IR_{s0})/R_{sh0}}{I_{s0}T^3 \exp(E_k(1 - 1/(\lambda T)))R_{s0}}\right) = \frac{V + IR_{s0}}{a_0\lambda T} \quad (5)$$

将光伏运行点采样数据代入式(5)，再通过最小二乘法(least squares method, LSM)拟合 P - V 曲线即可得到 T 和 G 的估计值。在此过程中，LSM将式(5)中关于 T 和 G 的偏导数为0，从而使得光伏电压、电流测量值和其估计值之间的有序偏差平方和最小。由于这是一个非线性问题，通常选用Levenberg-Marquadt算法求解。将拟合得到的 T 和 G 代入式(3)可求得各模型参数实时值，再代入式(2)即可估计实时MPP。

1.2 基于SSA算法的光伏等效模型参数校准方法

由1.1节可知，光伏单二极管模型中各个参数的基准值(即上文提到的标准测试条件下得到的数值)非常重要。常规方法通常将参数基准值作为常数处理。然而，光伏组件物理特性也会因老化在内的多种因素影响而改变，若一直使用制造时经标准测试得到的参数初始值进行MPPE会出现较大误差。因此，需要对光伏等效模型参数进行校准以消除老化等因素导致的误差。

文中基于MPPE得到的结果与采样实际值进行光伏等效模型参数校准。当MPPE结果与实际值间的误差小于阈值时则模型准确。显然，这是一个优化问题，文中利用SSA求解该优化问题。SSA是一种基于麻雀觅食行为的启发式优化算法^[34]，在解决连续优化问题方面表现良好，具有较强的全局

搜索能力和鲁棒性。具体而言，SSA将种群划分为3类角色，其中发现者拥有较大的搜索范围，寻找评价指标更佳的潜在区域，为追随者提供迭代方向。预警者实时监测危险情况，一旦发现危险即转移到另一个区域进行搜索，得益于预警机制，SSA具备跳出局部最优的能力。在参数校准这一应用场景中，优化起点和精确值间距离通常很近，SSA在局部最优方面的优势能有效减小算法停留在搜索起点的几率^[35-36]。

在SSA中，发现者更新位置的规律为：

$$\mathbf{X}_{m,n}^{(j+1)} = \begin{cases} \mathbf{X}_{m,n}^{(j)} \exp\left(\frac{-m}{bi_m}\right) & P \leq M \\ \mathbf{X}_{m,n}^{(j)} + QL & P > M \end{cases} \quad (6)$$

式中： j 为迭代次数； m 为个体的编号； n 为优化的维度； i_m 为最大迭代次数； \mathbf{X} 为 n 维矩阵，表示个体坐标； b 为 $[0,1]$ 间的随机数； Q 为服从正态分布的随机数； \mathbf{L} 为 $1 \times n$ 的全1矩阵； P 为随机生成的预警值， $P \in [0,1]$ ； M 为设定的安全阈值，当预警值高于阈值时发现者迅速远离原区域。

追随者位置更新公式为：

$$\mathbf{X}_{m,n}^{(j+1)} = \begin{cases} Q \exp\left(\frac{\mathbf{X}_w^{(j)} - \mathbf{X}_{m,n}^{(j)}}{m^2}\right) & m > N/2 \\ \mathbf{X}_p^{(j+1)} + |\mathbf{X}_{m,n}^{(j)} - \mathbf{X}_p^{(j+1)}| \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{L} & m \leq N/2 \end{cases} \quad (7)$$

式中： \mathbf{X}_w 、 \mathbf{X}_p 分别为当前发现的最差位置、最优位置； $\mathbf{B} = \mathbf{A}^T(\mathbf{A}\mathbf{A}^T)^{-1}$ ， \mathbf{A} 为 $1 \times n$ 的矩阵，其中元素随机为1或-1； N 为麻雀种群的大小，即算法中搜索个体的数量。

预警者的更新表达式为：

$$\mathbf{X}_{m,n}^{(j+1)} = \begin{cases} \mathbf{X}_w^{(j)} + \beta |\mathbf{X}_{m,n}^{(j)} - \mathbf{X}_w^{(j)}| & J_m > J_g \\ \mathbf{X}_{m,n}^{(j)} + K \frac{|\mathbf{X}_{m,n}^{(j)} - \mathbf{X}_p^{(j+1)}|}{J_m - J_g + \exp(-10)} & J_m \leq J_g \end{cases} \quad (8)$$

式中： β 为服从正态分布的一个随机数； K 为 $[-1,1]$ 间的随机数； J_m 为编号为 m 的个体所对应的评价指标； J_g 为全局最佳位置 \mathbf{X}_w 所对应的评价指标。当 $J_m > J_g$ 时，个体会向全局最佳位置的方向移动，而当 $J_m \leq J_g$ 时，证明新的最优区域出现，个体会移动到该位置附近，并更新 \mathbf{X}_w 。

在校准模型参数时，首先调整光伏系统运行点，记录一组光伏运行状态数据 $\mathbf{X}_{pvi} = [V_{vi} \ I_{vi} \ P_{vi}]$ 作为校准参考值。然后运行点自动返回原点，MPPE模型参数被采样，并作为SSA各群位置更新的起点。利用扰动后运行状态 \mathbf{X}_{pvi} 拟合得到辐照度和温

度的估计值 G_e 、 T_e 。然后,基于 G_e 、 T_e 和经 SSA 更新后的模型参数估计光伏运行状态(电流与电压),将光伏运行估计结果与采样结果对比求得参数评价指标 J ,并通过迭代使 J 的值趋向更小,直至 SSA 达到迭代次数上限 i_m 。重复上述过程,以消除 G_e 和 T_e 带来的起点误差。当 J 达到终止限值 J_L 时,校准结束。此时, J 最小时对应的单二极管模型参数即为最优近似值。

2 考虑 MPPE 模型校准的光伏 PRC

2.1 MPPE-PRC

并网光伏系统结构如图 2 所示,其中包括光伏阵列电容 C_{pv} 、直流升压变换器输出电容 C_{dc} 、光伏组件运行电流 I 、电压 V 、逆变器直流侧电压值 V_{dc} 及其参考值 V_{dc}^* 。含 MPPE-PRC 的光伏控制系统由 4 个部分组成,其中主功率控制生成并网光伏系统第一级直流升压模块的控制信号,确保光伏组件的输出满足功率指令要求。并网控制模块包括直流电压钳位外环和电流内环控制,产生并网逆变器的调制信号,相角参数 θ 由锁相环(phase locked loop, PLL)利用网侧电压 V_{abc} 和电流 I_{PCC} 计算得到。PRC 模块根据最大功率 P_{pv}^{MPP} 、备用功率指令 P_{pv}^{res} 和频率调节指令 P_{pv}^f 生成主功率控制模块的参考值,并由 PI 控制器直接输出占空比 d 到脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)控制器,而 P 由 MPPE 模块提供。文中为应对光伏组件老化带来的误差,采用考虑模型参数校准的 MPPE,其工作原理如第 1 章所述。

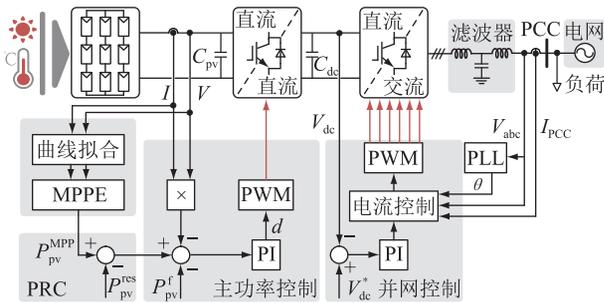


图 2 含 MPPE-PRC 的光伏系统控制框图

Fig.2 Control block diagram of PV system with MPPE-PRC

2.2 MPPE 参数自动校准的评价指标

1.2 节提到,MPPE 校准过程由评价指标 J 评价。现有基于优化算法进行光伏参数辨识或校准的工作中,通常以单一的均方根误差(root mean squared error, RMSE)指标作为评价指标^[28-30]。但 RMSE 将所有误差一视同仁,未考虑不同电压区间 P - V 曲线误差的权重以及异常值的影响,可能使得

曲线误差平均值小但运行区误差偏大,导致对 P - V 曲线估计误差的评价不合理。

因此,文中提出能够更加准确地评价 P - V 曲线估计精度和曲线形态的 MPPE 参数自动校准的评价指标 J ,其定义为:

$$J = aR_1 + bR_2 + cR_3 + P_{er} \quad (9)$$

式中: R_1 、 R_2 、 R_3 分别为估计 P - V 曲线的 RMSE、平均绝对误差(mean absolute error, MAE)和决定系数 R^2 ; P_{er} 为最大功率估计值与实际值之差; a 、 b 、 c 为评价指标内各项指标的系数,决定各项目在迭代过程中的倾向。各子项中, R_1 侧重 P - V 曲线整体估计精度, P_{er} 关注 MPP 估计精度,而 R_3 则关注 P - V 曲线形态的相似度。各子项指标的计算公式为:

$$\begin{cases} R_1 = \sqrt{\frac{1}{c} \sum_{i=1}^c (P_{ri} - P_{ei})^2} \\ R_2 = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^c |P_{ri} - P_{ei}| \\ R_3 = \frac{\sum_{i=1}^c (P_{ri} - \bar{P}_r)(P_{ei} - \bar{P}_e)}{\sqrt{\sum_{i=1}^c (P_{ri} - \bar{P}_r)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^c (P_{ei} - \bar{P}_e)^2}} \end{cases} \quad (10)$$

式中: p_{ri} 、 p_{ei} 分别为抽样点 i 实际功率和估计功率; c 为抽样点数量; \bar{P}_r 、 \bar{P}_e 分别为抽样点平均实际功率和平均估计功率。而在计算评价指标时,需要根据抽样点电压估计功率。由于单二极管模型中 I 和 V 的关系由超越方程定义,将全部采样点电流求出以计算评价指标将消耗大量计算资源。因此,文中随机抽样部分采样点计算评价指标。

具体考虑 MPPE-PRC 应用场景,光伏系统在 MPP 和 PRP₁ 附近的估计精度需要重点关注。另外,由于 PRC 过程中光伏运行点几乎不涉及前段和末端截止电压区域,因此可以适当减少这些区域的抽样数量,以提高效率和校准精度。

由于 MPP 常位于 0.8 倍截止电压,而 PRP₁ 在 MPP 右侧且远离截止电压,因此随机抽样点 i 的电压 V_i 满足正态分布, $V_i \sim N(0.85, 1)$ 。

由以上方法得到的评价指标综合考虑 P - V 曲线各段的准确度,并且减少了无效区间的采样点数量,显著降低了计算资源需求,对于自动校准策略的收敛速度也有一定提升。

2.3 MPPE 内等效模型参数自动校准的周期

尽管文中提出的模型参数自动校准方法可在线实时进行,不影响光伏场站的正常工作,但频繁校准会消耗大量计算资源,设定合理的周期 T_{on} 自动

进行校准依旧十分必要。

文献[21]指出,光伏组件功率衰减速度分不同阶段。在安装初期,最大功率 P_m 将出现较快衰减,安装首年的衰减幅度为 5% 左右,约一年后进入相对稳定的平台期,通常认为此时其出力能力以每年 1%~1.5% 的速度劣化。此外,参数 R_{sh} 的变化幅度接近 40% 时,最大功率的衰减仅为 3.4%^[22]。这意味着在 MPPE 中,参数误差的发展过程相对隐蔽,当参数误差产生时,最大功率估计的误差值可能仍低于场站正常工作时的功率波动。而当最大功率 P_m 出现明显的衰减时,参数误差已超过 MPPE 所允许的上限,因此周期 T_m 需要设定在出现明显衰减前。

MPPE 对参数误差的要求通常为 10% 以内,若参数误差超出这一数值,拟合所得曲线与实际值间偏差可能无法通过 LSM 中的 R^2 校验(0.99)。为保障 MPPE-PRC 的稳定性,MPPE 参数误差应控制在 5% 以内。

此外, P_m 的衰减和光伏自身物理特性的劣化存在一定的线性关系^[21],基于衰减的线性特性,可以测算 MPPE 参数自动校准的工作周期。考虑到光伏出力衰减的类线性化特性,可根据参数误差达到上限的大致时间计算校准系统运行周期,即:

$$T_{on} = \frac{d_{5\%}}{d_y} \quad (11)$$

式中: d_y 为光伏最大出力的年线性衰减率; $d_{5\%}$ 为 MPPE 参数误差 5% 时所对应的平均最大功率估计误差。

文中提出的 MPPE 内光伏等效模型自动校准方法包括校准、抽样、评价指标计算和校准周期计算等多个部分,其完整流程如图 3 所示。

3 仿真验证

针对文中方法,在 MATLAB/Simulink 中搭建如图 2 所示的两级式并网光伏系统仿真模型,以验证 MPPE 校准的效果和所提 MPPE-PRC 在动态环境下的性能。仿真模型中以一台额定功率 325 kW 的同步发电机模拟光伏系统接入的电网,负荷接在电网侧;光伏系统采用的组件型号为 SunPower SPR-305E-WHT-D,设定为 5 块串联 66 块并联的形式,辐照强度默认为 800 W/m²,温度恒为 25 ℃,此时光伏最大功率为 80.6 kW。仿真模型系统参数如表 1 所示。

3.1 自动校准策略周期整定

通过定量调整等效模型中参数的平均误差,产

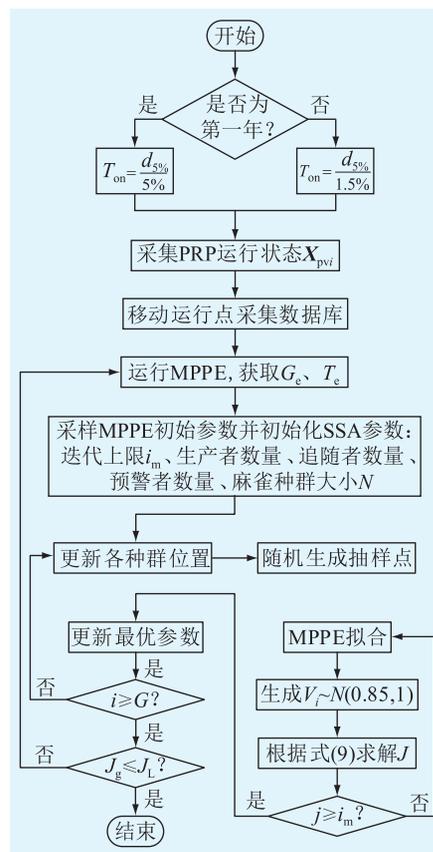


图 3 MPPE-PRC 校准策略流程

Fig.3 Flow chart of MPPE-PRC correction strategy

表 1 仿真系统参数

Table 1 Parameters of the simulation system

参数	数值
光伏标称功率/kW	100.7
额定电网电压/V	400
直流母线参考电压/V	500
直流电容/mF	1
直流母线电容/mF	10
滤波电容/mF	0.04
逆变侧滤波电感/mH	0.04
网侧滤波电感 L_g /mH	0.032

生多组误差已知的 MPPE 参数来模拟光伏组件出现不同参数误差时 MPPE 对其功率特性的估计效果(辐照度设定为 1 000 W/m²,温度恒定 25 ℃,最大功率 $P_m = 100.7$ kW)。每一幅度随机生成 50 组参数,再对各项指标求平均值,结果如表 2 所示。

可见在参数误差超过 5% 时,最大功率值的误差仍不显著,但此时已需要对 MPPE 内光伏等效模型参数进行校准,以保证其稳定性。

根据 MPPE 的 R^2 校验要求,其参数误差不宜超过 5%,而根据表 2 中 MPPE 估计效果可知,当参数误差达到 5% 时,功率偏差 $d_{5\%} = 0.583$ 6%。若组件

表 2 不同等效模型参数误差下 MPPE 的估计效果
Table 2 Estimation performance of MPPE under different parameter errors of equivalent model

误差/%	评价指标			
	P_m/W	RMSE/p.u.	MAE/p.u.	$R^2/p.u.$
1	126.18	1.074 3	1.533 7	0.999 8
2	217.94	1.623 3	2.254 1	0.999 6
3	303.62	2.002 6	2.722 6	0.999 5
4	435.26	2.831 9	3.871 3	0.999 0
5	587.70	3.860 3	5.235 1	0.998 2
6	675.51	3.993 5	5.948 8	0.997 6

为稳定运行期内,取光伏最大出力的年线性衰减 d_y 为 1.5%^[21],针对表 2 给出的 MPPE 结果,其校准周期 T_{on} 应为 0.389 1 a,即应每 4.5 月进行一次校准。而在安装初期快速衰减阶段, d_y 的取值应适当调整至 5%左右^[21], $T_{on}=0.116 7$ a,即每 1.4 月进行一次校准。例如,若未及时进行校准,当参考功率 P_{ref} 为 MPPE 所得时,估计值高于实际出力能力,光伏系统将会出现功率跌落,并进入振荡状态,如图 4 所示。这一现象严重影响系统稳定性,当光伏系统向电网提供频率支撑等辅助服务时,该现象将使频率事件进一步恶化。

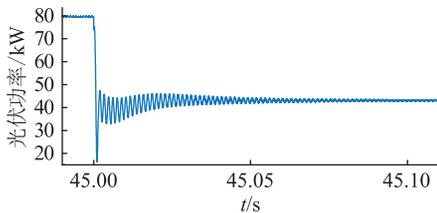


图 4 P_{ref} 过大时光伏功率曲线

Fig.4 PV power curve when P_{ref} is overly large

3.2 MPPE 内光伏模型参数校准策略效果验证

为验证策略校准效果,在 MATLAB/Simulink 中将光伏组件的参数数值设定为标准值的 105%,以模拟组件正常运行半年后的老化状态,老化后光伏组件的 $P-V$ 采样数据由端口电压扫描得到,校准前 MPPE-PRC 中参数为面板给出的标准值。

在仿真中运行自动校准策略。校准前,相较于准确值,MPPE-PRC 内等效模型参数的平均误差被设定为 5%。SSA 种群数量为 100,其中发现者占 20%,追随者占 80%,而预警者则为整个种群中随机的 20%,SSA 最大迭代次数为 100,辐照强度和温度恒定,无需进一步迭代。每次计算 J 时,采样点的数量为 50。

在仿真中设置 3 种校准评价指标作为对比,分别为 J_1 、 J_2 、 J_3 。其中, J_1 仅考虑估计值和实际值间的 RMSE,曲线形状和最大功率误差; J_2 在此基础上

增加对 MAE 的考虑; J_3 的计算方法和 J_2 相同。

$$\begin{cases} J_1 = a_1 R_1 + c_1 R_3 + P_{er} \\ J_2 = a_2 R_1 + b_2 R_2 + c_2 R_3 + P_{er} \end{cases} \quad (12)$$

此外,在计算 J_1 和 J_2 时,数据采样点随机分布在完整的 $P-V$ 曲线上,而计算 J_3 时,采用关注运行区估计精度的随机抽样方法,采样点集中分布在 MPP 和 PRP_1 附近。

图 5 为一次自动校准中评价指标的迭代过程。从图 5(a)和图 5(c)中各指标的变化趋势可见,在评价体系中引入 MAE 后(J_2),相较于 J_1 ,校准算法的最终收敛效果更好,但迭代过程中振荡幅度较大,且收敛到最优位置的速度较慢。这是因为单二极管等效模型存在一定误差,而计算数据随机分布在曲线上,因此仅增加 MAE 无法兼顾 $P-V$ 曲线全部区段的精度。而从图 5(d)中评价指标的下降速度可见,采用集中抽样并着重考虑运行点区间后(J_3),算法在收敛精度和速度方面表现更好,各指标的收敛过程也更为稳定。

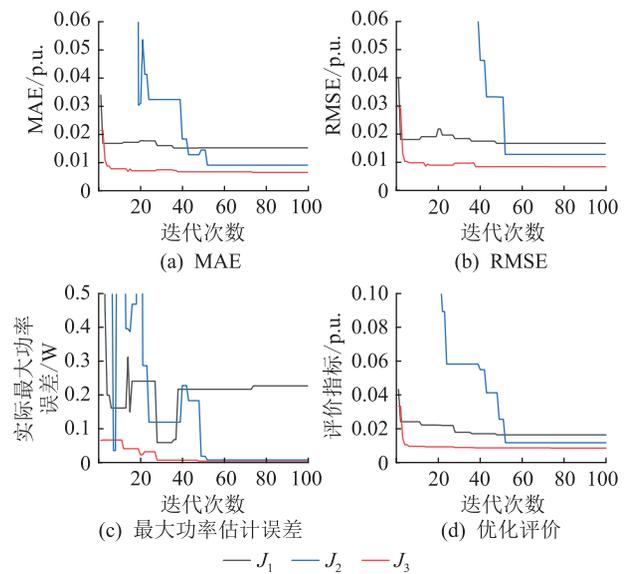


图 5 校准优化过程中的评价指标曲线

Fig.5 Evaluation indices in correction optimization process

图 6 为不同评价指标下经 1 次校准后的 MPPE 算法估计所得 $P-V$ 曲线和实际采样数据对比。由图 6 可见,当仅考虑 RMSE 和 R^2 时(J_1),算法所得估计值整体偏差较大,而加入 MAE 指标后(J_2),估计精度有所提升,但是在曲线前半段偏低(图 6(a)),后半段偏高(图 6(b)),出现相反的误差,这可能是算法综合考虑全段误差所带来的指标冲突造成的。而采用集中抽样逻辑后(J_3),估计误差显著降低,在 MPP 和 PRP_1 区段都表现出和采样数值更加契合的结果。此外,由图 6(a)可见估计值在 MPP 到

PRP₁ 区域的拟合效果优于前半段,这是由于抽样过程中重点关注实际运行点,这能够提升光伏系统在 PRC 工况下的运行稳定性。

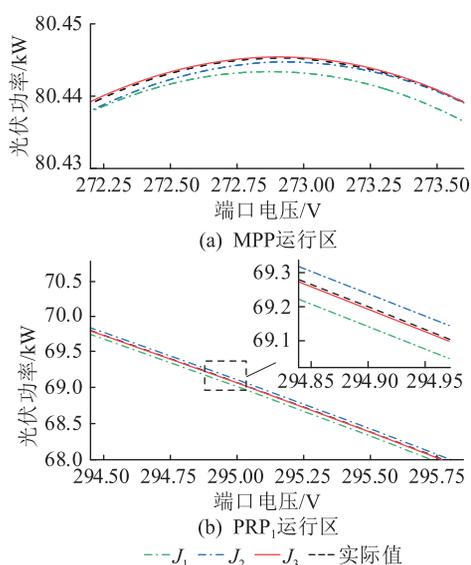


图6 不同评价指标下 MPPE 校准效果对比

Fig.6 Comparison of MPPE correction performance with different evaluation indicators

3.3 经校准 MPPE-PRC 的性能对比

如前文所述,等效模型的参数校准显著提升了 MPPE 的精度,为了测试校准后 MPPE 动态运行时的性能,对 MPPE-PRC 进行仿真验证,结果如图 7 所示。

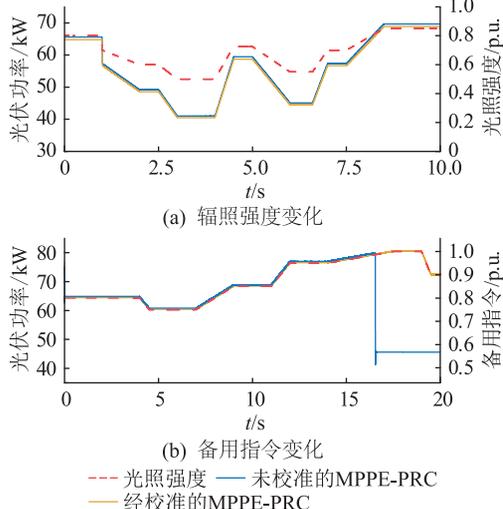


图7 有无参数校准的 MPPE-PRC 控制下光伏功率曲线
Fig.7 PV power curves under MPPE-PRC with and without parameter correction

算例中 MPPE-PRC 内等效模型参数设置为 SPR-305E-WHT-D 型光伏参数标准值的 1.05 倍(未校准)和 3.2 节中经过一次校准得到的参数值(已校准),并使光伏系统运行在变辐照强度和变功率备用指令的条件下。其中,当辐照强度改变时,功率

备用容量恒定为 0.2 p.u.,而备用指令变化时辐照强度恒定为 800 W/m²不变,此时参考功率 P_{ref} 等于最大功率估计值乘以备用指令。

由图 7 可见,当光伏组件衰减,MPPE 存在误差时,PRC 的实际功率相较于系统指令偏高,这不利于系统运营商对电源侧的精准调控。此外在变备用指令的工况下,未经校准的 PRC 错误估计了最大出力能力, P_{ref} 进入不稳定区域,光伏功率跌落,严重影响系统稳定性。因此,MPPE 的准确性极大程度上影响了 MPPE-PRC 的稳定性。

为进一步验证提出的考虑 MPPE 内模型校准的 PRC 在光伏系统参与系统频率响应场景下的有效性,进行光伏在经校准和未校准 MPPE-PRC 控制下提供频率支撑的仿真分析。具体而言,光伏系统频率主动响应能力来自于虚拟惯量控制和频率阻尼控制^[13],在 40 s 时施加一个系统容量 5% 的负荷阶跃作为系统的扰动,以观察频率暂态过程中频率和光伏出力的变化情况,仿真结果如图 8 所示。

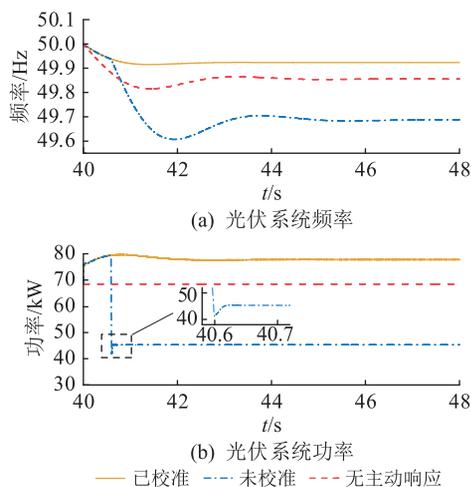


图8 有无参数校准的 MPPE-PRC 控制下光伏系统频率支撑效果对比

Fig.8 Comparison of frequency support performance of PV system under MPPE-PRC with and without parameter correction

在图 8(a) 中,相较于光伏系统恒功率运行状态,频率偏差显著扩大。而已校准后的 MPPE-PRC 对场站功率裕度计算精准,功率参考值设定合理,频率支撑效果明显且稳定。由图 8(b) 可知当光伏组件出力衰减,MPPE 内模型参数未校准时,控制系统高估光伏实时最大出力,导致频率响应过程中功率参考值过大,光伏出力跌落。由图 8(b) 局部放大图可见功率跌落进入振荡环节后与图 4 所示波形类似。此时系统功率缺额扩大,电网频率恶化。因此,定期对 MPPE-PRC 进行校准有利于光伏系统的稳定运行。

4 结论

文中为解决光伏组件老化导致 MPPE-PRC 精度下降的问题,提出利用 SSA 实时校准 MPPE 模型参数的 PRC 方法。文中设计的综合评价指标提高了模型参数校准和 MPPE 精度,克服了传统评价指标对 PRC 工况下重点运行区间精度考虑的不足。采用集中抽样策略不仅降低了计算资源的消耗,同时通过提出的 MPPE 校准周期自动整定方法实现了所提 PRC 的自动运行,加强了其工程实用性。仿真结果表明,文中所提方法校准收敛速度快、功率跟踪精准,且校准后 MPPE 在估计光伏 $P-V$ 特性曲线时精度更高。总体而言,文中所提方法显著改善了光伏系统在功率备用场景和频率支撑场景下的稳定运行能力。下一步将继续开展局部遮挡等不同工况下的光伏 MPPE 以及 PRC 研究工作,进一步提高方法的全面性和实用性。

参考文献:

- [1] 韩泽雷,鞠平,秦川,等. 面向新型电力系统的频率安全研究综述与展望[J]. 电力自动化设备,2023,43(9):112-124.
HAN Zelei, JU Ping, QIN Chuan, et al. Review and prospect of research on frequency security of new power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(9): 112-124.
- [2] 高丙团,胡正阳,王伟胜,等. 新能源场站快速有功控制及频率支撑技术综述[J]. 中国电机工程学报,2024,44(11):4335-4352.
GAO Bingtuan, HU Zhengyang, WANG Weisheng, et al. Review on fast active power control and frequency support technologies of renewable energy stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(11): 4335-4352.
- [3] 李可雨,王峰,贾红云,等. 基于光伏逆变器的快速功率控制系统研究及应用[J]. 电力工程技术,2023,42(4):241-247.
LI Keyu, WANG Feng, JIA Hongyun, et al. Research and application of rapid power control system based on photovoltaic inverter[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(4): 241-247.
- [4] TENG Y T, DENG W, PEI W, et al. Review on grid-forming converter control methods in high-proportion renewable energy power systems[J]. Global Energy Interconnection, 2022, 5(3): 328-342.
- [5] 许洪华,邵桂萍,鄂春良,等. 我国未来能源系统及能源转型现实路径研究[J]. 发电技术,2023,44(4):484-491.
XU Honghua, SHAO Guiping, E Chunliang, et al. Research on China's future energy system and the realistic path of energy transformation[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(4): 484-491.
- [6] 李怡,李永丽,李松,等. 基于 VSG 的光伏及混合储能系统功率分配与虚拟惯性控制[J]. 电力自动化设备,2023,43(7):27-34.
LI Yi, LI Yongli, LI Song, et al. Power distribution and virtual inertia control of photovoltaic and hybrid energy storage system based on VSG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(7): 27-34.
- [7] BAŠKARAD T, HOLJEVAC N, KUZLE I. Photovoltaic system control for power system frequency support in case of cascading events[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2023, 14(2): 1324-1334.
- [8] 钟成元,桂前进,江千军,等. 数据驱动的高比例新能源发电集群分布式电压控制[J]. 全球能源互联网,2022,5(3):251-260.
ZHONG Chengyuan, GUI Qianjin, JIANG Qianjun, et al. Data-driven distributed voltage control for high-penetration renewable power clusters without complete model[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2022, 5(3): 251-260.
- [9] PENG Q, SANGWONGWANICH A, YANG Y H, et al. Grid-friendly power control for smart photovoltaic systems[J]. Solar Energy, 2020, 210: 115-127.
- [10] LIANG H Q, HAN X N, YU H Y, et al. Transmission line fault-cause identification method for large-scale new energy grid connection scenarios [J]. Global Energy Interconnection, 2022, 5(4): 362-374.
- [11] 湛归,殷爽睿,艾芊,等. 智能楼宇型虚拟电厂参与电力系统调频辅助服务策略[J]. 电力工程技术,2022,41(6):13-20,57.
ZHAN Gui, YIN Shuangrui, AI Qian, et al. A strategy for smart building-based virtual power plants participating in frequency regulation auxiliary service [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(6): 13-20, 57.
- [12] 陈阳,谢丽蓉,马兰,等. 考虑光伏预测误差兼顾平抑波动的双层储能运行策略[J]. 电力工程技术,2023,42(1):70-79.
CHEN Yang, XIE Lirong, MA Lan, et al. Double-layer energy storage operation strategy that takes into account PV output error and smooths out fluctuations [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(1): 70-79.
- [13] PENG Q, TANG Z T, YANG Y H, et al. Event-triggering virtual inertia control of PV systems with power reserve [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(4): 4059-4070.
- [14] BATZELIS E I, KAMPITSIS G E, PAPATHANASSIOU S A. Power reserves control for PV systems with real-time MPP estimation via curve fitting[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(3): 1269-1280.
- [15] KANWAL S, KHAN B, ALI S M, et al. Gaussian process regression based inertia emulation and reserve estimation for grid interfaced photovoltaic system [J]. Renewable Energy, 2018, 126: 865-875.
- [16] 程濛,刘舒然,骆琪霖. 基于高斯混合模型的配电网大规模光伏与电动汽车充电桩协同规划[J]. 供用电,2023,40(1):18-24.
CHENG Meng, LIU Shuran, LUO Qilin. Collaborative planning

- of large-scale photovoltaic and electric vehicle charging stake in distribution network based on Gaussian mixture model[J]. *Distribution & Utilization*, 2023, 40(1):18-24.
- [17] SANGWONGWANICH A, YANG Y H, BLAABJERG F, et al. Delta power control strategy for multistring grid-connected PV inverters[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2017, 53(4):3862-3870.
- [18] 赖海文, 韩会丽, 黄伟宏, 等. 户外运行 17 年单晶硅光伏组件性能失效研究[J]. *材料导报*, 2019, 33(2):215-219.
LAI Haiwen, HAN Huili, HUANG Weihong, et al. Study on electrical performance failure of mono-crystalline silicon photovoltaic module after outdoor operation for 17 years[J]. *Materials Reports*, 2019, 33(2):215-219.
- [19] QUANSAH D A, ADARAMOLA M S. Ageing and degradation in solar photovoltaic modules installed in northern Ghana[J]. *Solar Energy*, 2018, 173:834-847.
- [20] KICHOU S, WOLF P, SILVESTRE S, et al. Analysis of the behaviour of cadmium telluride and crystalline silicon photovoltaic modules deployed outdoor under humid continental climate conditions[J]. *Solar Energy*, 2018, 171:681-691.
- [21] 朱冰洁, 宋昊, 陈昊旻, 等. 不同温度条件下晶体硅光伏组件光/电致衰减[J]. *太阳能学报*, 2023, 44(6):227-233.
ZHU Bingjie, SONG Hao, CHEN Haomin, et al. Light/current-induced degradation of crystalline silicon photovoltaic modules under different temperatures[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2023, 44(6):227-233.
- [22] CARRERO C, RAMIREZ D, RODRÍGUEZ J, et al. Sensitivity analysis of loss resistances variations of PV generators applied to the assessment of maximum power point changes due to degradation[J]. *Renewable Energy*, 2021, 173:351-361.
- [23] LILLO-BRAVO I, GONZÁLEZ-MARTÍNEZ P, LARRAÑETA M, et al. Impact of energy losses due to failures on photovoltaic plant energy balance[J]. *Energies*, 2018, 11(2):363.
- [24] 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.
- [25] COSTA S C S, DINIZ A S A C, KAZMERSKI L L. Solar energy dust and soiling R&D progress: literature review update for 2016[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82:2504-2536.
- [26] 王平, 杜炜, 张海宁, 等. 表面积灰影响光伏组件泄漏电流与衰减寿命的研究[J]. *太阳能学报*, 2019, 40(1):119-125.
WANG Ping, DU Wei, ZHANG Haining, et al. Pollution impact on the leakage current and power degradation of photovoltaic modules[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2019, 40(1):119-125.
- [27] BATZELIS E I, KAMPITSIS G E, PAPATHANASSIOU S A, et al. Direct MPP calculation in terms of the single-diode PV model parameters[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2015, 30(1):226-236.
- [28] KANG T, YAO J G, JIN M, et al. A novel improved cuckoo search algorithm for parameter estimation of photovoltaic (PV) models[J]. *Energies*, 2018, 11(5):1060.
- [29] 简献忠, 翁志远, 王如志. CIJAYA 算法在光伏组件参数辨识中的应用[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(11):19-26.
JIAN Xianzhong, WENG Zhiyuan, WANG Ruzhi. CIJAYA algorithm for parameters identification of photovoltaic module model[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2021, 42(11):19-26.
- [30] 曾一婕, 王龙, 黄超. 基于 Jaya-DA 算法的太阳电池模型参数辨识[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(2):198-202.
ZENG Yijie, WANG Long, HUANG Chao. Parameter identification of solar cell model based on jaya-da algorithm[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2022, 43(2):198-202.
- [31] CHEN X, DING K, YANG H, et al. Research on real-time identification method of model parameters for the photovoltaic array[J]. *Applied Energy*, 2023, 342:121157.
- [32] CHENNOUFI K, FERFRA M, MOKHLIS M. An accurate modelling of photovoltaic modules based on two-diode model[J]. *Renewable Energy*, 2021, 167:294-305.
- [33] BATZELIS E I, PAPATHANASSIOU S A. A method for the analytical extraction of the single diode PV model parameters[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2016, 7(2):504-512.
- [34] XUE J, SHEN B. A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm[J]. *Systems Science & Control Engineering*, 2020, 8(1):22-34.
- [35] 宋扬, 石勇, 刘宝泉, 等. 基于改进麻雀搜索算法的机场微电网优化调度策略[J]. *电力科学与技术学报*, 2022, 37(3):33-40.
SONG Yang, SHI Yong, LIU Baoquan, et al. Optimal dispatching strategy of airport microgrid based on the improved sparrow search algorithm[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2022, 37(3):33-40.
- [36] 沈建良, 来骏, 张翼, 等. 基于 ACMD 和 BiGRU-Attention 的负荷预测模型研究[J]. *浙江电力*, 2023, 42(6):70-77.
SHEN Jianliang, LAI Jun, ZHANG Yi, et al. Research on a load forecasting model based on ACMD and BiGRU-Attention[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2023, 42(6):70-77.

作者简介:



杨峻

杨峻(2001),男,硕士在读,研究方向为电力系统频率稳定与控制、光伏系统并网控制(E-mail:yangjun0187@outlook.com);

彭乔(1994),女,博士,副研究员,通信作者,研究方向为电力电子化电力系统稳定与控制、新能源与储能并网控制;

蔡永翔(1991),男,博士,工程师,从事配电网运行分析与控制工作。

Multi-risk-scenarios flexibility evaluation model of regional power grid considering economic efficiency of dispatching measures

ZHOU Qihang¹, GUAN Lin¹, XIAN Weihong¹, XUAN Peizheng², CHENG Lanfen², LI Zixi¹

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. China Southern Power Grid Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: Because of the integration of large amount of new energy sources, the power flow variation and voltage volatility in regional power system increase and it escalates the risk of equipment overload. In face of the uncertainty of new energy power, quick and accurate identification of the overload risk scenarios, and optimal utilization of various flexible resources from the source-grid-load parties to eliminate potential operational risks, are the urgent demands for the secure operation of the regional power grids. The flexibility evaluation indexes for the regional power grid are proposed, i.e. the flexibility demand index, the flexibility margin index and the flexibility resource utilization index, which comprehensively measure the requirements, resource and operation level of a regional power system for flexible operation. Under the target of the flexibility measurement, the mathematical models and computational method considering multiple risk scenarios are proposed, and the operation mode adjustment and the open-loop points scheduling are taken into account as the control measures. Case studies validate the feasibility and superiority of the proposed flexibility evaluation model, in comparison with the traditional boundary scenario analysis. The test results indicate that the proposed indicators, models, and algorithm can reflect the requirements and capabilities of regional power grids for operational flexibility with consideration of rich risk scenarios. The obtained dispatch solutions take into account both the economic and comprehensive aspects of various flexibility dispatch measures.

Keywords: distributed new energy; regional power grids; operation and dispatch; risk analysis; multi-risk-scenarios; flexibility evaluation

(编辑 方晶)

(上接第 20 页)

Power reserve control of photovoltaic system considering parameter correction in maximum power point estimation

YANG Jun¹, PENG Qiao¹, CAI Yongxiang², WANG Yang²

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Electric Power Research Institute of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550007, China)

Abstract: The grid-connected photovoltaic (PV) systems generally operate in the maximum power mode, where they are unable to fully respond to the adjustment requirements of the power grid. Therefore, research on power reserve control (PRC) for PV systems is needed. The maximum power point estimation (MPPE)-based PRC applies the equivalent model of a PV module to realize power reserve in the PV system, where the MPPE is conducted based on curve fitting. However, with the aging of PV modules, the error in MPPE increases, potentially impacting the stability and security of the system. A PRC method for PV systems that considers the correction of model parameters in MPPE as PV modules age is proposed in this paper. Firstly, a correction method for model parameters in MPPE is proposed based on the sparrow search algorithm. Then, considering the aging characteristics of PV modules and the evolution trend of MPPE error, an improved assessment criterion for the correction of MPPE model and the tuning principle of correction periods are proposed and finally applied to the MPPE-PRC method. Simulation results show that the proposed method can automatically correct the model parameters in MPPE as PV modules age. It can significantly improve the MPPE accuracy and enhance the reliability of PRC in practical applications.

Keywords: photovoltaic (PV) system; power reserve control (PRC); photovoltaic single-diode model; maximum power point estimation (MPPE); model parameter correction; sparrow search algorithm

(编辑 方晶)