

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231568

光伏电站理论发电功率的优化计算模型与方法

王亚军^{1,2}, 王继东¹, 曹曼³, 孔祥玉¹, 赵增保⁴, 袁龙²

(1. 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072; 2. 国网河北省电力有限公司, 河北 石家庄 050021;
3. 陆军工程大学石家庄校区, 河北 石家庄 050003; 4. 河北省气象服务中心, 河北 石家庄 050021)

摘要: 光伏电站理论发电功率计算结果的准确性直接影响弃光电量的统计, 对电网调度及光伏发展规划影响重大。理论发电功率的传统计算方法有样板逆变器法和气象数据外推法, 当样板逆变器的出力受到限制时, 样板逆变器法计算结果不准确, 而气象数据外推法参数众多且难以确定。针对上述问题, 提出了一种光伏电站理论发电功率优化计算方法。首先, 介绍了样板逆变器法和气象数据外推法的计算原理, 并分析了两种方法的特点和不足。然后, 基于光伏电站历史出力及气象信息, 提出了改进样板逆变器法和改进气象数据外推法。在实际应用中, 当弃光未发生或者在弃光初始阶段采用计算精度更高的改进样板逆变器法开展计算, 当样板逆变器出力受到限制时, 切换至改进气象数据外推法进行求解。最后, 对国内某光伏电站在不同气象条件下开展仿真计算, 验证了所提方法的合理性和有效性。

关键词: 光伏电站; 理论发电功率; 弃光电量; 样板逆变器法; 气象数据外推法

Optimization calculation models and methods for the theoretical power of a photovoltaic power station

WANG Yajun^{1,2}, WANG Jidong¹, CAO Man³, KONG Xiangyu¹, ZHAO Zengbao⁴, YUAN Long²

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education (Tianjin University), Tianjin 300072, China; 2. State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050021, China; 3. Shijiazhuang Campus, Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China; 4. Public Meteorological Service Centre of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: The accuracy of a theoretical power calculation result for a photovoltaic power station affects the statistics of the curtailment electricity directly, and has a significant impact on power grid dispatching and photovoltaic development planning. The traditional calculation methods for generation power include the template inverter and meteorological data extrapolation methods. When the output of the template inverter is restricted, the template inverter method is inaccurate, and the parameters of the meteorological extrapolation method are numerous and difficult to determine. To solve the above problems, an optimization calculation method is proposed. First, the calculation principles of the template inverter and the meteorological data extrapolation methods are introduced, and the characteristics and shortcomings of the two methods are analyzed. Then, improved template inverter and improved meteorological data extrapolation methods are proposed based on the historical output of a photovoltaic power station and the meteorological information. In practical application, when there is no photovoltaic curtailment or the photovoltaic curtailment is in the initial stage, the improved template inverter method with higher calculation accuracy is used for calculation; when the output of the template inverter is restricted, the improved meteorological data extrapolation method is used. Finally, the simulation results for a domestic photovoltaic power station in different meteorological conditions verify the rationality and effectiveness of the proposed method.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51377119).

Key words: photovoltaic power station; theoretical power; curtailment electricity; template inverter method; meteorological data extrapolation method

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51377119); 国网河北省电力有限公司科技项目资助(5204BB200029)

0 引言

近年来,我国新能源行业发展迅速,装机容量逐年增加^[1-3]。仅2023年,我国风电和光伏装机容量分别达到44134万kW和60949万kW,同比增长分别为20.7%和55.2%。随着我国“碳达峰、碳中和”目标的提出,新能源规模增速将进一步提升,需通过市场化方式实现并网消纳^[4-5]。

光伏发电系统调峰能力差,并网与调度运行的技术难度大,光伏出力的随机性对电力平衡与经济运行提出了挑战^[6-9]。光伏发电具有明显的时段性,午后出力水平高,其他时段出力水平低。以新能源为主体的新型电力系统,要求电网规划设计及运行分析中必须充分考虑新能源接入的影响。文献[10]提出了基于统计学特征的新能源纳入电网备用方案,该方法可以作为大规模新能源接入后电网日前调度方式安排的依据;文献[11]针对现有风电特性指标无法确定风电出力曲线的基本形状,引入了指标体系的时段属性概念,提出面向系统运行的风电出力特性指标体系;文献[12]在传统调峰平衡和生产模拟分析方法基础上,提出一种基于混合整数优化的多区域新能源接纳能力评估模型,可有效评估一定限电比例要求下可接纳的新能源装机规模;文献[13-14]针对新能源的随机性开展概率潮流计算,分析了新能源出力对电力平衡的影响。

由于电网调峰需要、输电断面限制、光伏组件检修等原因,在保证电力系统安全稳定运行的基础上,需要在特殊时段对光伏电站的输出功率进行限制。合理有效地计算光伏电站的理论发电量和弃光电量,有助于电网调度部门在弃光时段结束时统计光伏电站的理论发电能力并合理安排常规机组的运行方式,有助于发电企业合理安排生产检修计划、评估电厂效益,同时为电网公司和发电企业合理评估限电措施以及电量结算提供依据。

当前对弃光电量的研究成果较少,对弃风电量的研究成果较多^[15-17],由于光伏发电与风力发电有不同的出力特性,弃光问题与弃风问题不能完全等同而论。

为提高光伏行业监测管理水平,进一步规范光伏电站消纳监测统计工作,文献[18-19]明确了光伏电站数据报送要求,给出了样板逆变器法和气象数据外推法的计算公式和相关参数说明,指导有关企业开展理论发电量和弃光电量计算;文献[20]针对光伏电站在自动发电控制(automatic generation control, AGC)过程中,当前AGC可控理论功率计算的问题,提出了采用线性回归和随机森林两种方法计算理论

发电功率;文献[21]为计算新能源电站的风光容量最优配比,对样板机法进行改进,通过样板机和非样板机的实测出力值动态评估两者间的发电性能差异,进而计算新能源电站的理论功率;文献[22]针对集中式光伏弃光问题,从调峰能力、输送能力、消纳能力以及设备运行等方面分析了集中式光伏电站产生弃光的原因,提出了基于标杆光伏电站的弃光电量计算方法和基于辐照强度数据还原的弃光电量计算方法;文献[23]采用测光法和样板机法计算理论电量,并对样板机的选择进行分析说明;文献[24]考虑日地运动和大尺度天气过程等不同物理因素的影响,基于太阳辐射模型,提出了一种光伏出力随机性分量的提取方法。

本文介绍了目前各光伏电站理论发电功率计算中常用的样板逆变器法和气象数据外推法,分析计算模型,并指出其缺点和不足,同时基于调度主站采集的光伏电站出力、样板逆变器出力、辐照强度和温度等数据,提出一种考虑弃光过程的光伏电站理论发电功率优化计算方法。

1 光伏电站理论发电功率数据现状

光伏电站理论发电功率指仅考虑当前自然光照资源的情况下,站内所有逆变器及相关设备均正常运行时可发出的功率,其积分电量为某时段的光伏电站理论发电量。可用发电功率指仅考虑站内受阻、不考虑站外受阻情况下的输出功率,其积分电量为某时段的光伏电站可用发电量。在正常情况下,若光伏电站组件没有检修,理论发电功率与实际出力应当接近。

光伏电站理论发电功率主要由各光伏电站功率预测系统计算产生,由于不同光伏电站采用的模型和算法不同,站内设备质量和运行管理水平也参差不齐,导致上送至调度主站的理论发电功率数据质量不一,部分光伏电站理论发电功率的计算不准确。

光伏电站理论发电功率存在异常,主要现象是光伏电站提供的夜间理论发电功率不为零、理论发电功率数据跳变、弃光期间理论发电功率随实际出力下降等。

理论发电功率典型异常情况如图1所示,某晴天10:00调度主站开始弃光,某光伏电站实际出力下降,此时应该是光伏理论发电功率上升时段,但是该站理论发电功率跟随实际出力同时下降。10:22弃光结束,光伏电站实际出力上升,理论发电功率同时上升。对理论发电功率与实际出力曲线进行分析,该站的理论发电功率计算不准确,无法进行弃光电量统计。这种情况产生的原因是该站采用样

板逆变器法计算理论发电功率，当样板逆变器出力受到限制时，无法通过样板逆变器出力推算全站出力。

在弃光场景下，另一光伏电站采用气象数据外推法进行理论发电功率计算，该站理论发电功率计算准确，如图2所示，理论发电功率不跟随光伏电站实际出力情况变化。

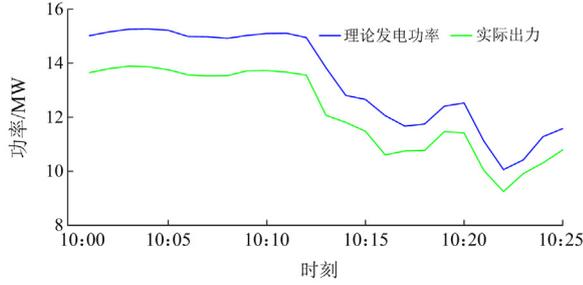


图1 理论发电功率异常曲线

Fig. 1 Anomalous curves of theoretical power

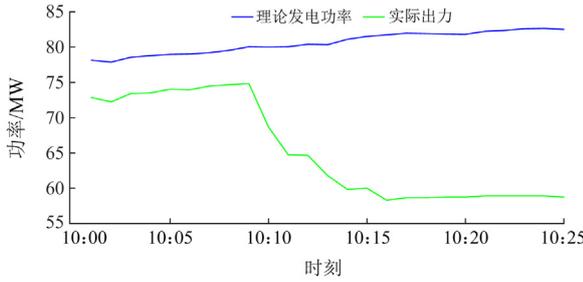


图2 理论发电功率正常曲线

Fig. 2 Normal curves of theoretical power

此外，采用样板逆变器法计算理论发电功率时，样板逆变器的选择不同，也会对计算结果产生影响。气象数据外推法受众多计算参数的影响，参数的准确性直接影响计算结果的准确性，以上两方面的原因导致光伏电站理论发电功率计算结果存在误差。

2 理论发电功率传统计算方法

2.1 样板逆变器法

样板逆变器法是在选定样板逆变器基础上，建立样板逆变器出力与全站出力之间的映射模型，计算全站理论发电功率与可用发电功率，计算模型分别如式(1)和式(2)所示。

$$P_j = \sum_{k=1}^K \frac{N_k}{M_k} \cdot \sum_{m=1}^{M_k} p_{j,k,m} \quad (1)$$

$$P'_j = \sum_{k=1}^K \frac{N'_k}{M_k} \cdot \sum_{m=1}^{M_k} p_{j,k,m} \quad (2)$$

式中： P_j 为光伏电站 j 的理论发电功率； P'_j 为光伏

电站 j 的可用发电功率； k 为逆变器型号编号； K 为逆变器型号数量； M_k 为型号 k 逆变器的样板逆变器数量； N_k 为型号 k 逆变器的全站总数量； N'_k 为型号 k 逆变器的开机运行总数量； $p_{j,k,m}$ 为光伏电站 j 型号 k 逆变器第 m 台样板机的实际功率。

所有光伏电站样板逆变器的选择，应考虑在不同地理位置的均匀分布，逆变器型号以及电池板类型、材料等具有代表性。原则上样板逆变器数量应占本站逆变器总数的5%~10%，对于组串式逆变器，应以单个子阵作为一个样板单元。

采用样板逆变器法计算的理论发电功率是以不受弃光影响，永远保持自由发电状态的逆变器作为代表，将该逆变器的有功功率乘以全站逆变器总数与样板逆变器数量的比值，从而得出在当前光照强度下，全站自由发电所能达到的最大出力。然而该方法计算光伏电站理论和可用发电功率受样板逆变器的选择影响较大，由于相同型号逆变器的光伏组件安装角度不同，实际出力也不同，因此选取有代表性的样板逆变器是该方法的难点。

2.2 气象数据外推法

气象数据外推法通过将水平辐照强度转换为光伏组件斜面辐照强度，将环境温度转换为板面温度来计算到光伏电站的理论发电功率。

根据气象监测设备在计算时间的实测辐照强度和环境温度，利用式(3)将水平辐照强度转化为光伏组件斜面的有效辐照强度。

$$G_e = G_{dn} \cos \theta + G_{dif} \left(\frac{1 + \cos Z'}{2} \right) + \rho G_t \left(\frac{1 - \cos Z'}{2} \right) \quad (3)$$

式中： G_e 为光伏组件斜面的有效辐照强度； G_{dn} 为气象监测设备测量的直射辐照强度； θ 为太阳入射角； G_{dif} 为气象监测设备测量的散射辐照强度； Z' 为光伏组件倾角； ρ 为地面反射系数； G_t 为气象监测设备测量的总辐照强度。

环境温度可采用式(4)转化为光伏组件的板面温度。

$$T_m = T + K' \cdot G_e \quad (4)$$

式中： T_m 为光伏组件的板面温度； T 为环境温度； K' 为温度修正系数，每年通过采集实际运行数据，利用自回归的方法对 K' 值进行修正。

根据光伏组件标准工况下的设备参数，利用式(5)和式(6)计算当前气象条件下组件的最佳输出电流 I_{MPP} 和最佳输出电压 U_{MPP} 分别如式(5)和式(6)所示。

$$I_{MPP} = I_{mref} \frac{G_e}{G_{ref}} (1 + a\Delta T) \quad (5)$$

$$U_{MPP} = U_{mref} \ln(e + b\Delta G)(1 - c\Delta T) \quad (6)$$

其中

$$\begin{cases} \Delta G = G_e - G_{ref} \\ \Delta T = T_m - T_{ref} \end{cases}$$

式中: I_{mref} 为光伏组件在标准工况下的最佳输出电流; G_{ref} 为标准太阳辐照强度, 值为 1000 W/m^2 ; ΔG 为实际光伏组件斜面的有效辐照强度与标准太阳辐照强度的差; a 、 b 、 c 均为补偿系数, 根据光伏组件实验数据进行拟合得到, 并根据实测数据定期修正; ΔT 为光伏组件的实际温度与标准组件温度的差值; T_{ref} 为标准组件温度, 值为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$; U_{mref} 为光伏组件在标准工况下的最佳输出电压。

利用式(7)计算光伏组件的直流输出功率 P_{dc} 。

$$P_{dc} = U_{MPP} \times I_{MPP} \quad (7)$$

综合考虑光伏电站组件的全部数量、光伏组件的老化、光伏组件的失配损失、光伏组件表面的尘埃遮挡、光伏电池板至并网点的线路传输及站用电损失、逆变器效率等因素, 计算光伏电站的理论发电功率 P_{acj} , 如式(8)所示。

$$P_{acj} = n_j \times P_{dc} \times K_1 \times K_2 \times K_3 \times K_4 \times \eta_{inv} \quad (8)$$

式中: n_j 为并网运行的光伏组件的全部数量; K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 分别为光伏组件老化损失系数、光伏组件失配损失系数、尘埃遮挡损失系数和线路传输及站用电损失系数, 每年通过采集实际运行数据, 利用自回归的方法进行修正; η_{inv} 为并网逆变器效率, 无量纲, 采用欧洲标准 EN 50530 进行等效。

采用气象数据外推法计算光伏电站理论发电功率, 计算过程复杂, 需要的参数众多, 参数的准确性对计算结果的准确性影响较大。

3 理论发电功率优化计算方法

3.1 改进样板逆变器法

样板逆变器法是在选定样板逆变器基础上, 计算全站理论发电功率, 其原理为每类样板逆变器代表了该类全部逆变器的平均态, 实际受天气变化、逆变器安装位置影响, 每类样板逆变器只是近似代表该类逆变器的平均态。为提升计算精度, 提出了改进样板逆变器法。与传统样板逆变器法不同的是, 改进样板逆变器法假定某个观测时刻的理论发电功率由样板逆变器实际功率加权得到, 权重作为参数由实际数据计算得出且动态更新, 计算模型为

$$P_j = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{M_k} a_{j,k,m} p_{j,k,m} \quad (9)$$

式中, $a_{j,k,m}$ 为光伏电站 j 型号 k 逆变器第 m 台样板

机的模型系数。

对于光伏电站 j 的理论发电功率, 写成观测次数为 i 的矩阵形式为

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X} \times \mathbf{A} + \mathbf{e} \quad (10)$$

其中

$$\begin{aligned} \mathbf{Y} &= [P_j^1 \quad P_j^2 \quad \cdots \quad P_j^i]^T \\ \mathbf{A} &= [a_{1,1,1} \quad a_{1,1,2} \quad \cdots \quad a_{j,k,m}]^T \\ \mathbf{X} &= \begin{bmatrix} p_{1,1,1}^1 & p_{1,1,2}^1 & \cdots & p_{j,k,m}^1 \\ p_{1,1,1}^2 & p_{1,1,2}^2 & \cdots & p_{j,k,m}^2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{1,1,1}^i & p_{1,1,2}^i & \cdots & p_{j,k,m}^i \end{bmatrix}^T \end{aligned}$$

式中: P_j^i 为光伏电站 j 第 i 个样本的理论发电功率; $p_{j,k,m}^i$ 为光伏电站 j 型号 k 逆变器第 m 台样板机第 i 个样本的实际功率; \mathbf{e} 为误差矩阵。

根据最小二乘法, 损失函数 \mathbf{A}^* 为

$$\mathbf{A}^* = \arg \min (\mathbf{Y} - \mathbf{X}\mathbf{A})^T (\mathbf{Y} - \mathbf{X}\mathbf{A}) \quad (11)$$

令 $\mathbf{E}_A = (\mathbf{Y} - \mathbf{X}\mathbf{A})^T (\mathbf{Y} - \mathbf{X}\mathbf{A})$, 则

$$\frac{\partial \mathbf{E}_A}{\partial \mathbf{A}} = 2\mathbf{X}^T (\mathbf{X}\mathbf{A} - \mathbf{Y}) = 0 \quad (12)$$

即有

$$\mathbf{X}^T \mathbf{X}\mathbf{A} = \mathbf{X}^T \mathbf{Y} \quad (13)$$

可得系数矩阵为

$$\mathbf{A} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y} \quad (14)$$

样板逆变器法的原理为根据光伏电站逆变器类型、逆变器分布等, 将全站出力分为若干子区, 选择部分逆变器作为样板, 认为一个子区中的样板逆变器代表该子区逆变器的平均态, 从而估测全站理论发电功率, 样板逆变器相关的参数完全由逆变器和样板逆变器数量决定。改进样板逆变器法不同之处在于考虑季节、天气、太阳高度角等因素影响, 认为子区中的样板逆变器近似代表子区逆变器的平均态, 样板逆变器相关的参数应基于近期内样板逆变器和全站总出力实际数据动态更新, 进一步估测当前全站总出力。

样板逆变器法以任何一个样板逆变器均能代表其所属区域内相同型号逆变器的平均态为前提, 而在实际中, 随着天气、太阳高度角等影响, 尤其在散状的积雨云出现并移动过程中, 会导致某些区域中的光伏电池板被云遮挡, 该区域的样板逆变器不能保证其代表所属区域的平均态, 这时样板逆变器法将会出现较大误差, 而改进样板逆变器法用实际数据估测样板逆变器出力在总出力中的权重, 通过动态更新回归模型参数, 可以有效提升计算精度。

动态回归的流程如图 3 所示，首先进行数据准备，采用当前时刻开始最近 10 天的历史数据，并剔除弃光时段和有质量问题数据。每次计算当前时刻理论发电功率时，首先判断当前时刻是否弃光，如果没有弃光，则采用最近 10 天数据和当前时刻数据，利用式(14)求解系数矩阵，得到当前时刻的模型系数，并将当前时刻样板逆变器的出力代入式(10)，即可求得该时刻的光伏电站理论发电功率；如果当前时刻弃光，但样板逆变器没有限电，则不采用当前时刻的数据；如果当前时刻弃光，且样板逆变器限电，则当前数据不可用，不能采用改进样板逆变器法求解。

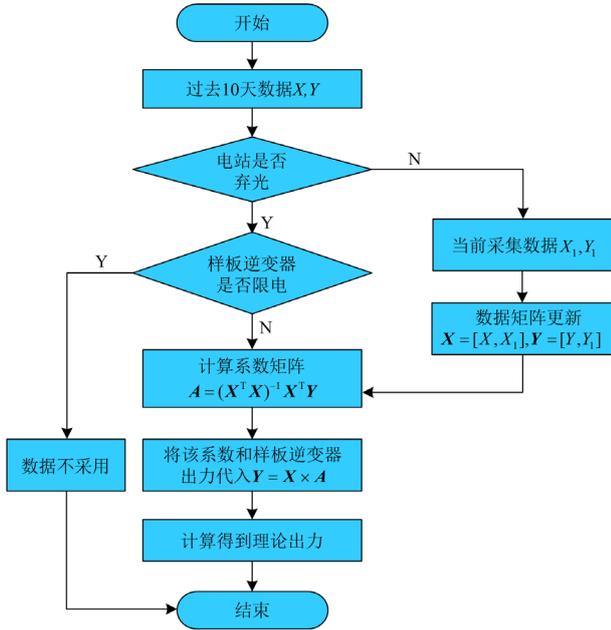


图 3 改进样板逆变器法动态回归流程

Fig. 3 Dynamic regression process of improved template inverter method

3.2 改进气象数据外推法

在样板逆变器出力正常的情况下，采用改进的样板逆变器法能够实现光伏电站理论发电功率的精准计算，但是在弃光末期，光伏电站的出力接近零时，部分样板逆变器的出力可能为零，这时标准样板逆变器法和改进的样板逆变器法均无法准确计算出光伏电站的理论发电功率。

气象数据外推法的原理是根据太阳能电池发电原理估算理论发电功率，采用气象数据外推法计算理论发电功率时不受逆变器出力的影响，该方法是综合考虑影响发电及传输损失等因素后，得到基于实际辐照强度的综合光能转换效率，进而计算理论发电功率，该方法计算结果受组件老化、组件失

配损失、尘埃遮挡、线路传输损失、逆变器效率下降等因素影响。该方法涉及众多参数，其中如光伏组件老化损失系数、光伏组件失配损失系数等由电站每年更新一次，更新频率较低且带有一定的主观性，同时温度修正、衰减修正往往需要若干年历史数据，对理论功率的计算带来不确定性。

光伏发电主要受气象要素中辐照强度和温度的影响。辐照强度、温度与功率之间的关系如式(15)^[25]所示。

$$P_{acj} = P_{ref} \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) [1 + k'(T - T_{ref})] \quad (15)$$

式中： P_{acj} 为光伏电站理论发电功率； P_{ref} 即为标准条件下的最大出力； G 为水平总辐射辐照强度； k' 为功率温度系数。

为简化计算流程，提出了改进的气象数据外推法，该方法整合各参数后，将气象要素中的辐照强度、温度作为变量，通过动态回归更新变量参数，确保理论发电功率计算结果的准确性。改进气象数据外推法简化了计算模型，能够克服气象数据外推法众多参数难以量化的问题，同时解决样板逆变器出力受到限制时，样板逆变器法理论发电功率计算结果不准确的问题。计算模型为

$$P_{acj} = n \times f(G, T) \quad (16)$$

式中： n 为并网运行的逆变器的全部数量； $f(G, T)$ 为单个逆变器发电功率模型。

$$f(G, T) = a_1 G + a_2 T \quad (17)$$

式中， a_1 、 a_2 为模型系数。

$f(G, T)$ 的训练数据由非弃光情况下且没有逆变器检修时的光伏电站实际功率 P_0 、运行逆变器数量 n_0 计算得到。

$$f(G, T) = P_0 / n_0 \quad (18)$$

对于光伏电站 j 的单个逆变器理论发电功率，写成观测次数 i 的矩阵形式为

$$Y' = X' \times A' + e \quad (19)$$

其中

$$Y' = [P_j^{i1} \quad P_j^{i2} \quad \dots \quad P_j^{in}]^T \quad (20)$$

$$A' = [a_1 \quad a_2]^T \quad (21)$$

$$X' = \begin{bmatrix} G_{11} & T_{12} \\ G_{21} & T_{22} \\ \vdots & \vdots \\ G_{i1} & T_{i2} \end{bmatrix}^T \quad (22)$$

式中： P_j^i 为光伏电站 j 单个逆变器第 i 个样本的理

论发电功率; G_{i1} 为第 i 个样本的水平总辐射辐照强度; T_{i2} 为第 i 个样本的环境温度。

模型系数 a_1 、 a_2 按式(14)计算, 求出后, 将当前辐照强度和温度代入式(16)和式(17), 即可求得当前时刻光伏电站的理论发电功率。该方法的动态回归流程和改进样板逆变器法的动态回归流程类似。

为保证理论发电功率的合理性, 对数据进行以下处理: ① 夜间理论发电功率为 0; ② 如果理论发电功率小于实际出力, 则理论发电功率等于实际出力。

3.3 计算流程

为保证在弃光过程中光伏电站理论发电功率计算的准确性, 提出了光伏电站理论发电功率优化计算方法, 该方法综合考虑改进样板逆变器法和改进气象数据外推法的优点。首先对全站当前总出力、样板逆变器出力、辐照强度和温度等数据进行预处理, 当数据超出合理限值时, 采用未来估计值或上一时刻值来代替当前值等方法, 保证数据在合理的限值范围内。当光伏电站未发生弃光或发生弃光但样板逆变器出力未受到限制时, 采用改进样板逆变器法开展计算, 当样板逆变器出力受到限制时, 切换至改进气象数据外推法进行求解。

本文所提方法的计算流程如图 4 所示, 其中弃光的判据为光伏电站收到调度主站下发的 AGC 指令值小于当前光伏电站出力, 样板逆变器限电的判据为 AGC 指令值小于所有样板逆变器出力总和。

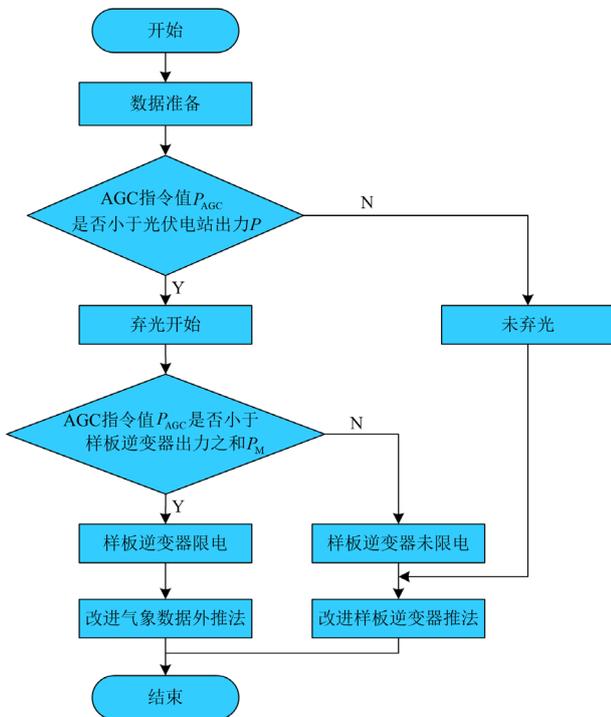


图 4 计算流程

Fig. 4 Calculation process

4 算例分析

4.1 数据准备

以某装机容量为 50 MW 的光伏电站为例, 采用 2020 年 8 月 1 日至 10 月 31 日光伏电站的历史数据, 采用改进样板逆变器法和改进气象数据外推法对理论发电功率展开计算, 所需数据为每 5 min 全站实时出力、样板逆变器出力、全站各逆变器运行状态信息、气象要素等实况信息。该电站逆变器相关信息如表 1 所示。

表 1 光伏电站逆变器信息

Table 1 Inverter information of photovoltaic power station

逆变器种类	样板逆变器数量/个	全站逆变器数量/个
逆变器 A	6	47
逆变器 B	6	47
逆变器 C	4	4

由于历史数据中存在样板逆变器采集功率为负数或夜间为零、气象要素实况缺测等情况, 数据处理方法如下: ① 若某时刻某样板逆变器采集结果为负数, 则认为是错误值, 剔除该值; ② 某时刻、某样板逆变器采集值在近 30 min 内相同时, 作为死数处理, 剔除该时刻数值; ③ 夜间样板逆变器采集功率、辐照强度实况赋值为 0; ④ 为保证历史数据的连续性, 缺测的实际出力采用气象数据外推法实时估计当前缺测值。

4.2 回归误差

训练数据采用 2020 年 8 月 1 日至 9 月 30 日调度主站直采数据, 改进样板逆变器法和改进气象数据外推法回归误差分布如图 5 和图 6 所示, 两种方法的平均绝对误差(mean absolute error, MAE)分别为 0.44%、0.66%, 最大误差(max error, MaxE)分别为 15.4%、43.14%。训练结果表明模型总体较为准确, 在个别点尤其是天气突变时刻误差较大。

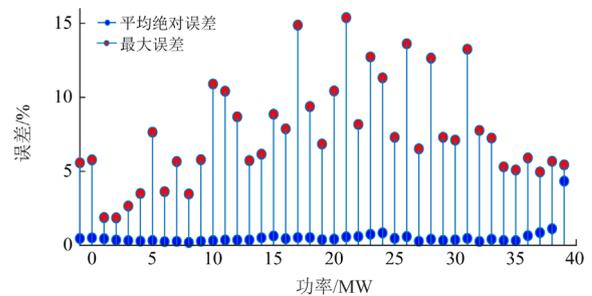


图 5 改进样板逆变器法回归误差分布

Fig. 5 Regression error distribution of improved template inverter method

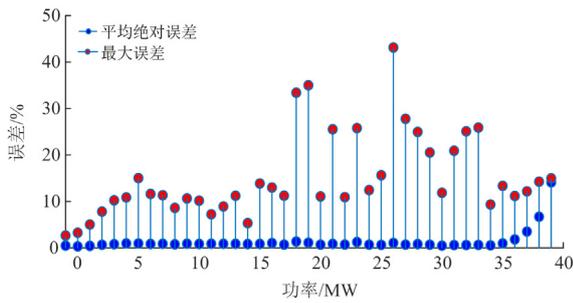


图 6 改进气象数据外推法回归误差分布

Fig. 6 Regression error distribution of improved meteorological data extrapolation method

4.3 模型系数

在每次计算理论发电功率前，采用当前时刻至历史 10 天的样板逆变器功率、气象监测、全站总出力数据(剔除限电、检修、错误等异常值)作为样本，开展计算得到模型系数，样本数据随时间变化而更

新，因此模型系数跟随动态更新。

8 月 16 日 12:00—12:30，采用改进样板逆变器法、改进气象数据外推法训练得到的模型系数变化过程如表 2 所示， $A1—A6$ 、 $B1—B6$ 、 $C1—C4$ 分别为 A、B、C 三类样板逆变器对应的模型系数， a_1 、 a_2 为气象外推法模型系数。模型系数随计算时间动态变化，表明太阳辐射在各光伏板区域的分布占比随时间而不同，其中部分样板逆变器的系数为负是因为该样板逆变器实际出力在天气波动时未随全站出力同步变化。A 类逆变器的第 6 个样板逆变器模型系数最大，表明该样板逆变器对所有 A 类逆变器的发电出力代表性最强，类似地 B 类逆变器第 5 个样板逆变器、C 类逆变器的第 1 个样板逆变器对各自逆变器种类代表性最强。改进气象数据外推法系数计算结果表明光伏电站总出力主要依赖于太阳辐射，受温度影响较小。

表 2 不同理论发电功率计算方法的模型系数

Table 2 Model coefficients of different theoretical power calculation methods

系数	时刻						
	12:00	12:05	12:10	12:15	12:20	12:25	12:30
$A1$	1.1213	1.1222	1.1162	1.1219	1.1295	1.1369	1.0915
$A2$	0.3420	0.3385	0.3357	0.3272	0.3342	0.3082	0.2866
$A3$	1.8360	1.8385	1.8426	1.8399	1.8435	1.8362	1.8196
$A4$	-2.2880	-2.3012	-2.3089	-2.3280	-2.3508	-2.3600	-2.3137
$A5$	0.4064	0.4013	0.3988	0.3970	0.4003	0.3928	0.4063
$A6$	37.2858	37.2717	37.2502	37.2743	37.2388	37.6685	37.6630
$B1$	-0.5506	-0.5395	-0.5252	-0.5119	-0.5157	-0.4837	-0.4548
$B2$	-0.4016	-0.4041	-0.4022	-0.4091	-0.4146	-0.4236	-0.3882
$B3$	-1.0632	-1.0527	-1.0412	-1.0327	-1.0203	-0.9989	-1.0272
$B4$	-1.2327	-1.2329	-1.2390	-1.2378	-1.2460	-1.2370	-1.2405
$B5$	4.0204	4.0397	4.0552	4.0840	4.1098	4.1256	4.0681
$B6$	2.4346	2.4686	2.5154	2.5001	2.5650	2.1453	1.9420
$C1$	17.0721	17.0461	17.0204	16.9740	16.9654	16.9899	17.0536
$C2$	10.4769	10.4504	10.4236	10.4268	10.3965	10.3263	10.3909
$C3$	7.0939	7.0925	7.1185	7.1243	7.1128	7.0696	6.9591
$C4$	4.6141	4.6228	4.5925	4.6027	4.5932	4.6462	4.8366
a_1	0.0444	0.0444	0.0443	0.0443	0.0443	0.0443	0.0443
a_2	-0.0062	-0.0059	-0.0056	-0.0053	-0.0050	-0.0047	-0.0052

4.4 计算结果

1) 4 种方法计算结果分析

采用 2020 年 10 月 1 日至 31 日光伏电站的历史数据，采用样板逆变器法、改进样板逆变器法、气象数据外推法和改进气象数据外推法对理论发电功率展开计算。

本文选取晴天、晴间多云、多云、多云间阴 4 个典型气象日进行分析，在光伏电站未检修和未弃光情况下，可用发电功率等于理论发电功率，采用

4 种方法分别计算该光伏电站每日每 5 min 理论发电功率，如图 7 所示。

4 种方法计算结果的误差对比曲线如图 8 所示，整体来看，气象数据外推法误差偏大，样板逆变器法次之，尤其在晴天和多云天气，两方法误差最大；改进气象数据外推法误差较小，但在晴天的中午时段、晴间多云的天气变化剧烈时段，仍存在一定误差；改进样板逆变器法误差最小，在各类天气条件下均与实际功率接近，误差主要出现在晴间多云天

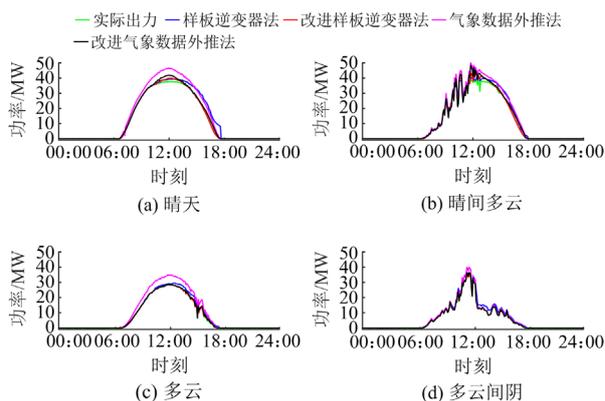


图 7 不同方法计算的理论发电功率与实际出力对比曲线

Fig. 7 Contrast curves of theoretical power and actual output in different methods

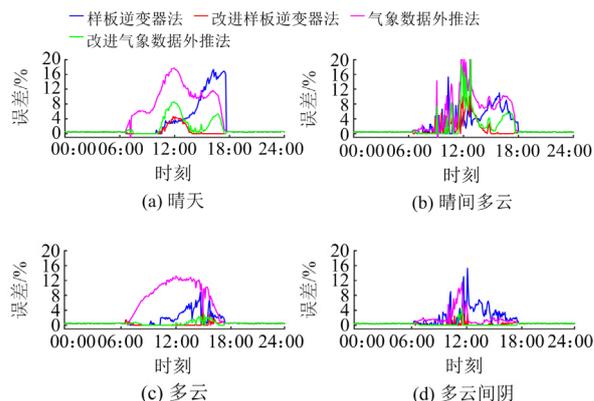


图 8 不同理论发电功率计算方法的误差对比曲线

Fig. 8 Error contrast curves of different theoretical power calculation methods

表 3 不同理论发电功率计算方法的误差分布

Table 3 Error distribution of different theoretical power calculation methods

天气	样板逆变器法		改进样板逆变器法		气象数据外推法		改进气象数据外推法	
	MAE	MaxE	MAE	MaxE	MAE	MaxE	MAE	MaxE
晴天	2.71	17.33	0.63	4.63	4.66	17.73	1.39	8.49
晴间多云	2.13	15.28	1.11	16.79	3.42	28.38	1.74	23.79
多云	1.18	8.96	0.38	5.25	4.03	13.19	0.51	2.77
多云间阴	1.5	15.25	0.39	4.9	1.17	11.44	0.31	4.65

气中天气变化剧烈时段。

4 种方法计算结果的平均绝对误差和最大误差如表 3 所示, 在晴天、晴间多云、多云天气下, 改进样板逆变器法平均绝对误差最小, 分别为 0.63%、1.11%、0.38%, 改进气象数据外推法次之, 分别为 1.39%、1.74%、0.51%, 样板逆变器法和气象数据外推法误差均相对较大, 各天气误差都在 1% 以上, 其中气象数据外推法误差最大。从最大误差来看, 改进样板逆变器法最小, 除晴间多云天气外均稳定在 6% 以下。在多云间阴天气时, 改进气象数据外推法最大误差最小, 改进样板逆变器法与其误差接近。

综上, 在各种理论发电功率计算方法中, 改进样板逆变器法和改进气象数据外推法能取得更高的计算精度。

通过对比分析, 改进样板逆变器法在理论发电功率计算中较为准确且稳定性高, 具有很好的实用价值, 如果增加具备有效观测数据的样板逆变器数量, 可进一步提升改进样板逆变器法的计算精度。改进气象数据外推法需高质量的环境监测数据, 在天气剧烈变化时仍需要提升其准确性, 但整体而言较样板逆变器法和气象数据外推法计算精度更高。

2) 本文所提方法计算结果分析

11 月 1 日, 在非弃光场景下, 采用样板逆变器法、气象数据外推法、本文方法计算的理论发电功率如图 9 所示, 3 种方法的理论发电功率与实际出力差值的积分电量分别为 29.7 MWh、56.6 MWh、4.3 MWh, 本文所提方法误差最小, 与实际出力曲线吻合度较高。

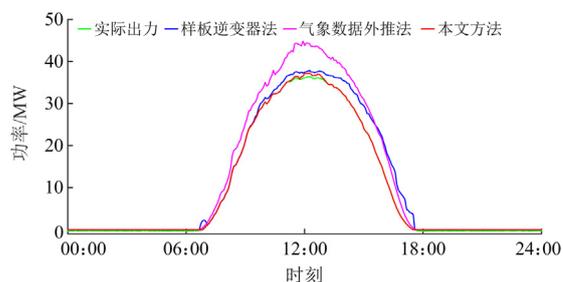


图 9 非弃光场景下的不同方法计算的理论发电功率

Fig. 9 Contrast curves of theoretical power based on different calculation methods under normal conditions

11 月 2 日, 当出现弃光场景时, 3 种方法的理论发电功率与实际出力曲线如图 10 所示。在 10:00

之前未弃光时, 本文所提方法和样板逆变器法都较为可信, 气象数据外推法误差稍大。在 10:00—14:50 弃光时段, 样板逆变器出力受限, 采用样板逆变器法计算的理论发电功率不准确, 气象数据外推法计算误差偏大, 本文方法计算较为准确, 在弃光和非弃光场景均有较好的适应性。

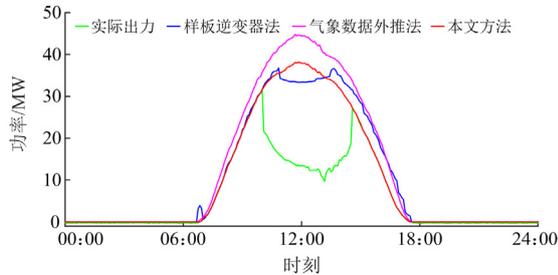


图 10 弃光条件下不同方法计算的理论发电功率

Fig. 10 Contrast curves of theoretical power based on different calculation methods in photovoltaic curtailment

5 结语

本文针对样板逆变器法和气象数据外推法在实际应用中面临的难题, 提出了一种考虑弃光过程的光伏电站理论发电功率优化计算方法。该方法以光伏电站历史出力及电网获取的气象信息为基础, 在弃光起始阶段采用计算精度更高的改进样板逆变器法, 在样板逆变器的出力受到限制时, 切换至改进气象数据外推法, 实现两种计算方法的有效结合。通过国内某光伏电站的仿真计算, 得到以下结论。

1) 改进样板逆变器法比样板逆变器法计算精度高, 但当样板逆变器的出力受到限制时, 两种方法计算结果均不准确。

2) 改进气象数据外推法相比气象数据外推法, 实现原理简单, 无需过多的参数设置, 计算精度高且计算结果不受弃光影响。

3) 在样板逆变器法、改进样板逆变器法、气象数据外推法、改进气象数据外推法 4 种计算方法中, 改进样板逆变器法计算精度最高, 其余依次是改进气象数据外推法、样板逆变器法、气象数据外推法。

4) 本文所提方法综合考虑改进样板逆变器法和改进气象数据外推法的计算优点, 在弃光和非弃光场景下均能确保光伏电站理论发电功率计算结果的准确性。

参考文献

[1] 张倩, 蒙飞, 李涛, 等. 基于周期信息增强的 Informer 光伏发电功率预测[J]. 中国电力, 2023, 56(10): 186-193.
ZHANG Qian, MENG Fei, LI Tao, et al. Informer photovoltaic power generation forecasting based on cycle

information enhancement[J]. Electric Power, 2023, 56(10): 186-193.

[2] 张锐, 饶欢, 徐睿烽, 等. 多运行目标下的分布式光伏接入配电网极限容量多模型评估方法[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(4): 143-150.
ZHANG Rui, RAO Huan, XU Ruifeng, et al. An evaluation method for the maximum distributed photovoltaic power capacity absorbed in the distribution networks considering multiple operation targets[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(4): 143-150.

[3] 吕清泉, 张珍珍, 马彦宏, 等. 区域光伏发电出力特性分析研究[J]. 发电技术, 2022, 43(3): 413-420.
LÜ Qingquan, ZHANG Zhenzhen, MA Yanhong, et al. Analysis and research on output characteristics of regional photovoltaic power generation[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(3): 413-420.

[4] 苏常胜, 王森, 孙谊嫔, 等. 面向网络节点的新能源高占比系统消纳阻力精细化评估[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5): 67-75.
SU Changsheng, WANG Sen, SUN Yiqian, et al. Refined evaluation of consumption resistance of system with high proportion of renewable energy for network nodes[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 67-75.

[5] 刘联涛, 刘飞, 吉平, 等. 储能参与新能源消纳的优化控制策略[J]. 中国电力, 2023, 56(3): 137-143.
LIU Liantao, LIU Fei, JI Ping, et al. Research on optimal control strategy of energy storage for improving new energy consumption[J]. Electric Power, 2023, 56(3): 137-143.

[6] 商立群, 李洪波, 侯亚东, 等. 基于 VMD-ISSA-KELM 的短期光伏发电功率预测[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(21): 138-147.
SHANG Liqun, LI Hongbo, HOU Yadong, et al. Short-term photovoltaic power generation prediction based on VMD-ISSA-KELM[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(21): 138-147.

[7] 雷柯松, 吐松江·卡日, 伊力哈木·亚尔买买提, 等. 基于 WGAN-GP 和 CNN-LSTM-Attention 的短期光伏功率预测[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(9): 108-118.
LEI Kesong, TUSONGJIANG·Kari, YILIHAMU·Yaermainaiti, et al. Prediction of short-term photovoltaic power based on WGAN-GP and CNN-LSTM-Attention[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(9): 108-118.

[8] 董志强, 郑凌蔚, 苏然, 等. 一种基于 IGWO-SNN 的光伏出力短期预测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 131-138.
DONG Zhiqiang, ZHENG Lingwei, SU Ran, et al. An IGWO-SNN-based method for short-term forecast of photovoltaic output[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 131-138.

[9] FANG Xiaolun, YANG Qiang, YAN Wenjun. Power generation maximization of distributed photovoltaic systems using dynamic topology reconfiguration[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(3): 508-522.

- [10] 张振宇, 孙晓强, 万筱钟, 等. 基于统计学特征的新能源纳入西北电网备用研究[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2047-2054.
ZHANG Zhenyu, SUN Xiaoqiang, WAN Xiaozhong, et al. Research on reserve of northwest power grid considering renewable energy based on statistical characteristics[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2047-2054.
- [11] 王建学, 张耀, 万筱钟, 等. 面向电网运行的新能源出力特性指标体系研究: 风电出力特性指标体系[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(2): 42-51.
WANG Jianxue, ZHANG Yao, WAN Xiaozhong, et al. An operation-oriented evaluation index system for renewable power output characteristics: wind power output characteristics[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(2): 42-51.
- [12] 元博, 徐志成, 刘俊, 等. 多区域新能源接纳能力评估模型研究及应用[J]. 中国电力, 2019, 52(12): 132-139.
YUAN Bo, XU Zhicheng, LIU Jun, et al. Research and application of multi-area new energy integration capability evaluation model[J]. Electric Power, 2019, 52(12): 132-139.
- [13] CHEN Yan, WEN Jinyu, CHENG Shijie. Probabilistic load flow method based on Nataf transformation and Latin hypercube sampling[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 4(2): 294-301.
- [14] TAMIMI B, CAFIIZARES C, BHATTACHARYA K. System stability impact of large-scale and distributed solar photovoltaic generation: the case of Ontario, Canada[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 4(3): 680-688.
- [15] 谢国辉, 李琼慧, 高长征. 风电弃风电量的计算方法与模型[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(3): 95-100.
XIE Guohui, LI Qionghui, GAO Changzheng. Calculation method and model of wind power curtailment[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(3): 95-100.
- [16] 苏辛一, 徐东杰, 韩小琪, 等. 风电年最大弃风电量计算方法及分析[J]. 中国电力, 2014, 47(7): 96-100.
SU Xinyi, XU Dongjie, HAN Xiaoqi, et al. A computing method for maximum annual wind energy curtailment[J]. Electric Power, 2014, 47(7): 96-100.
- [17] 张家安, 高晓东, 王铁成, 等. 计及弃光约束的配电网光伏接纳能力评估[J]. 电力工程技术, 2023, 42(6): 14-21.
ZHANG Jiaan, GAO Xiaodong, WANG Tiecheng, et al. Evaluate the hosting capacity of PV in distribution network: considering PV curtailment constraints[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(6): 14-21.
- [18] 国家市场监督管理总局. 光伏发电站功率控制系统技术要求: GB/T 40289—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
State Administration for Market Regulation. Technical requirement of power control system for photovoltaic power station: GB/T 40289—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [19] 国家能源局. 光伏电站消纳监测统计管理办法: 国能发新能规[2021]57号[EB/OL]. [2021-12-03]. http://zfxgk.nea.gov.cn/2021-12/03/c_1310383862.htm.
- [20] 宋小龙, 刘友宽, 伍阳阳, 等. 基于数据驱动的光伏电站理论功率计算方法[J]. 云南电力技术, 2023, 51(5): 21-25.
SONG Xiaolong, LIU Youkuan, WU Yangyang, et al. Calculation method of AGC theoretical power of photovoltaic power station based on data driving[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 51(5): 21-25.
- [21] 李延和, 杨立滨, 郝丽丽, 等. 基于改进样板机法的风光互补新能源电站容量配比优化[J]. 电力工程技术, 2022, 41(2): 224-233.
LI Yanhe, YANG Libin, HAO Lili, et al. Capacity ratio optimization of wind-solar hybrid new energy power station based on improved model-generator method[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(2): 224-233.
- [22] 路亮, 丁坤, 周识远, 等. 集中式光伏弃光分析及应对措施[J]. 中国电力, 2017, 50(7): 38-42.
LU Liang, DING Kun, ZHOU Shiyuan, et al. Solar curtailment of centralized PV station and its countermeasures[J]. Electric Power, 2017, 50(7): 38-42.
- [23] 邓煜, 王盛甲. 光伏电站理论电量计算方法探析[J]. 水电站机电技术, 2021, 44(1): 124-126.
DENG Yu, WANG Shengjia. Analysis of the theoretical power calculation method of the photovoltaic power station[J]. Mechanical & Electrical Technique of Hydropower Station, 2021, 44(7): 124-126.
- [24] 赵亮, 黎嘉明, 艾小猛, 等. 光伏出力随机性分量的提取和统计特性分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(1): 48-56.
ZHAO Liang, LI Jiaming, AI Xiaomeng, et al. Analysis on random component extraction and statistical characteristics of photovoltaic power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(1): 48-56.
- [25] 祁乐, 唐健, 陈新和, 等. 新能源实时错误数据辨识与修正深度学习模型[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(11): 19-28.
QI Le, TANG Jian, CHEN Xinhe, et al. New energy real-time error data identification and correction deep learning model[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(11): 19-28.

收稿日期: 2023-12-12; 修回日期: 2024-05-20

作者简介:

王亚军(1981—), 男, 通信作者, 博士研究生, 正高级工程师, 主要研究方向为新能源发电、电网调度自动化; E-mail: wangyajun398@126.com

王继东(1977—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电能质量、分布式发电和微电网、智能用电等; E-mail: jidongwang@tju.edu.cn

曹曼(1981—), 女, 硕士, 副教授, 主要研究方向为分布式发电和微电网。E-mail: caoman724@163.com

(编辑 张颖)