

基于无功监测引导的绿色变电站光伏消纳运行策略

王维^{1,2}, 杨逸凡^{1,2}, 季振亚^{1,2}, 韩雪^{1,2}, 蔡千慧^{1,2}

(1. 南京师范大学南瑞电气与自动化工程学院, 江苏南京 210046;

2. 江苏省综合能源设备及集成国际联合实验室, 江苏南京 210046)

摘要:针对光伏接入绿色变电站导致并网节点电压越限与出力消纳困难问题,提出一种基于无功监测引导的绿色变电站光伏消纳运行策略。该策略通过分析无功电压灵敏度与负荷覆盖率的关系,以光伏消纳最大化为目标函数,将无功监测与有功消纳进行解耦分析,进而预测有功超发功率和无功补偿控制修正量,构建无功电压关系模型。同时,通过挖掘储能系统当前荷电状态和容量约束关系,建立含储能系统的绿色变电站消纳模型。结合无功电压关系模型提出绿色变电站光伏消纳运行策略。在此基础上,采用改进粒子群算法求解模型,并基于 IEEE 33 节点对所提出的运行策略进行仿真分析。结果表明,所提策略能够在稳定节点接入电压的基础上,有效提升光伏的消纳能力。

关键词:无功监测;新能源消纳;运行策略;电压越限;储能系统;粒子群算法

中图分类号:TM73

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2026)02-0041-10

0 引言

随着新能源的大量普及,在变电站设计、建设及运行等各环节采取相应措施构建绿色变电站,旨在实现节能降碳和绿电消纳,已逐渐成为研究热点。分布式光伏变电站是绿色变电站的典型代表之一。然而,随着光伏接入比例的提高,变电站在源荷时间尺度上的失配可能会导致净负荷的急剧波动,进而引发配电网节点电压越限问题。研究指出,储能系统、电动汽车等柔性负荷能够根据电网需求调节自身用电行为,主动响应电网调控指令,实现源荷平衡与削峰填谷,从而提升配电网的光伏消纳能力^[1-4]。针对新能源接入配电网引起的节点电压越限问题,可采用光储调节手段,通过合理的协同优化运行策略,在治理电压越限的同时提高配电网的运行经济性^[5-8]。文献[9]通过评估新能源最大发电能力,建立无功电压优化模型,实现各节点电压的有效控制。文献[10]针对大规模新能源接入变电站的消纳问题,分析短路比指标与新能源消纳能力之间的关联性,提出一种基于短路比的新能源消纳能力模拟评估方法,该方法量化不同补偿方式对变电站电压优化的效果,最终通过电压评估实现新能源的最大化消纳。

针对绿色变电站接入光伏、风电等新能源后引发的电压波动问题,文献[11]通过分析双馈风机的无功调节能力,提出利用分布式电源(distributed generation, DG)无功余量进行无功优化。文献

[12]提出一种考虑无功支撑及电压变化的风电场运行策略。文献[13]针对光伏接入变电站后可能存在的孤岛问题,提出基于模型预测控制的动态电压和无功控制方案,该方案通过维持微电网的电压稳定性来实现对大电网电压的可靠支撑。文献[14]基于光伏发电预测和负荷消耗预测,估算注入电网的净功率和光伏逆变器吸收的无功功率,并通过求解确定线性方程组,确定特定时间段内储能系统的动态工作点,从而有效抑制电压越限并提升光伏承载能力。

近年来,随着电池储能技术的快速发展,储能参与电网协调运行的特征愈发明显^[15-16]。在电网侧,集中式储能系统作为电网重点要素,在电力系统优化运行和新能源有功消纳方面发挥重要作用^[17-18]。针对新能源接入综合能源系统带来的消纳和运行问题,主要解决方案包含双层优化配置方法^[19]、基于超短期负荷预测的能量分配方法^[20-21]和采用多主体博弈的优化运行策略等^[22]。在用户侧,文献[23]以新能源和电动汽车的无功功率调节范围为决策变量,以线损和电压偏差最小化为目标函数,基于普遍效应法提出配电网无功调节策略。文献[24]在评估新能源机组的无功调节能力基础上,提出无功优化模型,并通过引入熵权灰狼算法求解多目标无功优化的最优折中解,从而提高系统的运行水平。文献[25]构建静止无功补偿器(static var compensator, SVC)和储能并行的多目标模型,利用多目标遗传算法进行寻优,获得储能与 SVC 的最优配置与运行策略。文献[26]考虑光伏出力的波动性,从能源供应商收益角度出发,利用柔性负荷消

纳光伏出力,提出多时间尺度调度模型。

综上,绿色变电站接入配电网后会引发节点电压波动问题,特别是在光伏出力较大时,会导致接入节点电压越限,进而影响配电网运行稳定性与光伏消纳率。然而,目前针对光伏接入变电站的消纳运行策略研究相对较少。如何高效地利用储能系统参与光伏消纳并稳定系统电压水平,已成为当前迫切需要解决的关键问题。因此,文中在现有研究的基础上,从无功监测与电压波动的关系着手,以无功监测为切入点,结合储能系统运行特征,通过设定安全电压上下限和储能系统实时状态,提出一种适用于绿色变电站的光伏消纳与电压稳定的光储协同运行策略,最终达到降低弃光率和最大化光伏消纳的目的。

1 基于无功监测的变电站运行特性

在新能源高比例渗透电网的背景下,以光伏为代表的新能源接入改变了配电网的潮流分布,进而导致系统节点电压发生波动甚至越限。节点电压的监测与调控是当前光伏并网面临的主要难点之一。相比之下,无功监测数据较易获取,且与节点电压波动存在直接耦合关系。因此,相较于直接电压调控,以无功监测为引导协同调控节点电压,不仅提升了控制系统的稳定性,还具有简单、快速和准确的优势。[图1](#)为连接电网与光伏系统的线路理想模型。 U_i 为节点*i*的电压, $i=1,2,\dots,n$; R_i 、 X_i 分别为节点*i*的等效电阻、电抗; P_i 、 Q_i 分别为节点*i*的光伏电站输出有功功率、无功功率。

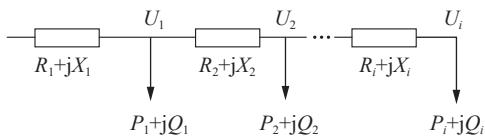


图1 连接线路理想模型

Fig.1 Idealized model of interconnection lines

绿色变电站通过获取光伏接入的无功信息以及上级电网的无功注入量,在连续2个控制周期完成数据调控后,即可计算得到上级电网向光伏接入地区注入的无功补偿量 $\Delta Q_{m,k+1}$:

$$\Delta Q_{m,k+1} = Q_{m,k+1} - Q_{m,k} \quad (1)$$

式中: $Q_{m,k}$ 为第*k*个控制周期的无功功率。在无功控制完成后的初始状态,上级电网向接入地区注入无功,在第1个控制周期内 $\Delta Q_{m,1}=0$ 。

第*k*+1个控制周期内的电压偏差均值 ΔV_{k+1} 为:

$$\Delta V_{k+1} = V_{k+1}^{\text{ave}} - V_0 \quad (2)$$

式中: V_{k+1}^{ave} 为第*k*+1个控制周期电压平均值; V_0 为标

么制计算中的电压基准值。

由于接入地区一般会采取无功补偿策略,为保证接入地区的无功补偿在规定范围内,需要计算节点电压与额定电压偏差的方差*E*为:

$$E = k_1 f_1(P_{\text{DG},1}, Q_{m,1}) + k_2 f_2(P_{\text{DG},2}, Q_{m,2}) + \dots + k_n f_n(P_{\text{DG},n}, Q_{m,n}) \quad (3)$$

式中: k_i 为节点*i*功率参数; $P_{\text{DG},i}$ 为DG接入节点*i*有功量; $Q_{m,i}$ 为节点*i*从上级电网得到的无功补偿量; f_i 为DG接入相应节点*i*的电压偏差函数。

可得第*k*+1个控制周期的无功需求允许值为:

$$\Delta Q_{k+1} = \Delta V_{k+1} \frac{\partial f_n}{\partial Q_{m,n}} \quad (4)$$

式中: $\partial f_n / \partial Q_{m,n}$ 为无功对电压影响的灵敏度。

为了分析无功与新能源消纳之间的关系,文中引入负荷覆盖率系数的概念,负荷覆盖率系数 δ_{load} 表达式为:

$$\delta_{\text{load}} = \frac{\sum_{t=\tau_1}^{\tau_2} \min(L(t), P(t))}{\sum_{t=\tau_1}^{\tau_2} L(t)} \times 100\% \quad (5)$$

式中: τ_1 、 τ_2 分别为负荷覆盖率系数计算的初始时刻和终止时刻; $L(t)$ 为*t*时刻接入变电站的负荷需求; $P(t)$ 为*t*时刻接入变电站的新能源发电量。负荷覆盖率系数反映了变电站总电负荷中绿色电力的占比。

节点电压稳定是保障光伏有功出力 P_{ap} 消纳的前提,且在不同负荷覆盖率系数下,系统的光伏消纳能力也不同。具体消纳能力 F_{xn} 计算如式(6)所示。

$$F_{\text{xn}} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{|U_i - U_i^{\text{SP}}|}{\Delta U_i^{\text{SP}}} P_{\text{ap}} \delta_{\text{load}} \xi \right) \quad (6)$$

式中: U_i^{SP} 为节点*i*的额定电压; ΔU_i^{SP} 为节点*i*的电压允许上下限之差; ξ 为在当前负荷覆盖率下的光伏有功消纳损失系数。式(6)反映了变电站有功消纳与电压越限(即无功监测量)之间的关系。由于负荷覆盖率反映源荷匹配程度,为表征负荷的变化波动情况,文中针对负荷需求 $L(t)$ 引入考虑波动变化的负荷计算表达式:

$$L(t) = \sum_{i=1}^n l(p_i, \hat{p}_i) + \sum_{k=1}^K \Omega(f'_k) \quad (7)$$

式中: l 为利用优化的分布式梯度提升(extreme gradient boosting, XGBoost)算法预测出的负荷基准数值; p_i 为节点*i*负荷实际数值; \hat{p}_i 为节点*i*负荷仿真计算值; f'_k 为利用XGBoost算法计算的第*k*个控制周期负荷随机波动因子; $\Omega(f'_k)$ 为考虑波动的第*k*个控制周期负荷的波动数值;*K*为时间段内总控制周期数。

式(4)—式(7)反映了新能源的消纳能力需要在保障电压稳定并兼顾负荷动态特性的前提下实现。同时, 式(4)—式(7)也明确了新能源消纳与无功监测之间的耦合关系, 为制定无功调节-光伏消纳协同运行策略提供理论基础。

2 基于无功监测的新能源消纳策略

2.1 目标函数

为评估新能源接入变电站后的消纳程度, 文中以新能源出力最大为目标, 即:

$$F_{nc} = \max \sum_{t=1}^T \sum_{b=1}^{n_{pv}} P_b^{\text{DG}}(t) \quad (8)$$

式中: T 为变电站总模拟运行时间, 因文中重点模拟日内场景, 设定 T 为 24 h; $P_b^{\text{DG}}(t)$ 为 t 时刻光伏场站 b 实际有功出力; n_{pv} 为光伏场站数。

2.2 运行约束

(1) 光伏机组出力约束。

光伏 DG 的有功、无功出力需满足:

$$\begin{cases} P_{\min,b}^{\text{DG}} \leq P_b^{\text{DG}}(t) \leq P_{\max,b}^{\text{DG}} \\ Q_{\min,b}^{\text{DG}} \leq Q_b^{\text{DG}}(t) \leq Q_{\max,b}^{\text{DG}} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $P_{\max,b}^{\text{DG}}$ 、 $P_{\min,b}^{\text{DG}}$ 分别为光伏场站 b 有功出力的上、下限; $Q_b^{\text{DG}}(t)$ 为 t 时刻光伏场站 b 实际无功出力; $Q_{\max,b}^{\text{DG}}$ 、 $Q_{\min,b}^{\text{DG}}$ 分别为光伏场站 b 无功出力的上、下限。

(2) 功率平衡约束。

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j \in \Omega_i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_{j \in \Omega_i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (10)$$

式中: U_j 为节点 j 的电压; Ω_i 为所有与节点 i 直接相连的节点集合; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为节点 i 和节点 j 之间导纳矩阵的实部和虚部; θ_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的相角差。

(3) 平衡节点约束。

$$P_{\min}^g \leq P^g(t) \leq P_{\max}^g \quad (11)$$

$$Q_{\min}^g \leq Q^g(t) \leq Q_{\max}^g \quad (12)$$

式中: $P^g(t)$ 为 t 时刻上级电网流入的有功功率; P_{\max}^g 、 P_{\min}^g 分别为平衡节点的有功功率上、下限; $Q^g(t)$ 为 t 时刻上级电网流入的无功功率; Q_{\max}^g 、 Q_{\min}^g 分别为平衡节点的无功功率上、下限。

(4) 无功补偿约束。

$$Q_{\min,i}^w \leq Q_i^w(t) \leq Q_{\max,i}^w \quad (13)$$

式中: $Q_i^w(t)$ 为 t 时刻节点 i 所需的无功补偿量; $Q_{\max,i}^w$ 、 $Q_{\min,i}^w$ 分别为节点 i 能够提供的无功补偿容量

上、下限。

(5) 节点电压约束。

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \quad (14)$$

式中: $U_{i,\max}$ 、 $U_{i,\min}$ 分别为节点 i 允许的电压上、下限。

(6) 光伏逆变器可调无功容量。

光伏逆变器为电网提供无功功率 Q , 其可调节容量表示为:

$$-\sqrt{S^2 - P^2} \leq Q \leq \sqrt{S^2 - P^2} \quad (15)$$

式中: S 为光伏逆变器的视在功率; P 为光伏输出的有功功率。

(7) 储能系统运行约束。

① 充放电功率范围约束。

$$\begin{cases} p_B(t) = p_B^{\text{dis}}(t) - p_B^{\text{ch}}(t) \\ 0 \leq p_B^{\text{dis}}(t) \leq u_B^{\text{dis}}(t)C_B \\ 0 \leq p_B^{\text{ch}}(t) \leq u_B^{\text{ch}}(t)C_B \end{cases} \quad (16)$$

式中: $p_B(t)$ 为 t 时刻储能电站的运行功率; $p_B^{\text{dis}}(t)$ 为 t 时刻储能电站的放电功率; $p_B^{\text{ch}}(t)$ 为 t 时刻储能电站的充电功率; $u_B^{\text{dis}}(t)$ 为 t 时刻储能电站放电状态, 为 0-1 变量; $u_B^{\text{ch}}(t)$ 为 t 时刻储能电站充电状态, 为 0-1 变量, $u_B^{\text{dis}}(t)$ 、 $u_B^{\text{ch}}(t)$ 均为优化变量; C_B 为储能电站设备容量, 为已知量。

② 充放电状态约束。

$$u_B^{\text{dis}}(t) + u_B^{\text{ch}}(t) \leq 1 \quad (17)$$

③ 荷电状态约束。

$$e_B(t+1) = e_B(t) + \gamma_B^{\text{ch}} p_B^{\text{ch}}(t) - p_B^{\text{dis}}(t) / \gamma_B^{\text{dis}} \quad (18)$$

式中: $e_B(t)$ 为 t 时刻储能电站的蓄电量; γ_B^{ch} 、 γ_B^{dis} 分别为储能电站的充电效率和放电效率。

④ 储能容量范围约束。

$$0 \leq e_B(t) \leq E_B \quad (19)$$

式中: E_B 为储能电站最大蓄电量。

⑤ 储能时长约束。

$$\begin{cases} E_B = N_B C_B \\ N_B \geq N_B^{\min} \end{cases} \quad (20)$$

式中: N_B 为储能电站的储电时长, 取整数; N_B^{\min} 为储能电站的最低储电时长。

2.3 协调消纳策略

为了在节点电压允许波动范围内最大化消纳新能源, 文中提出了绿色变电站新能源协同消纳策略, 其协同消纳策略流程如图 2 所示。

(1) 基于相关日内超短期预测模型, 计算获得光伏场站 b 接入节点有功功率的预测判定值 $P_{b,\text{futr}}$ 。该预测覆盖当前时间之后 90 min 的时间范围, 时间颗粒度为 30 min, 即:

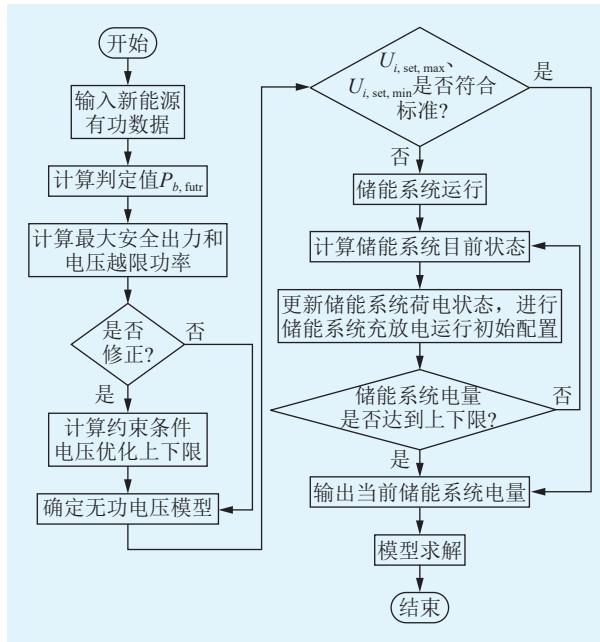


图 2 优化策略流程

Fig.2 Optimization strategy flowchart

$$P_{b,futr} = \frac{\gamma_1 P_{b,futr1} + \gamma_2 P_{b,futr2} + \gamma_3 P_{b,futr3}}{\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3} \quad (21)$$

式中: γ_1 、 γ_2 、 γ_3 为 3 个间隔点的权重系数; $P_{b,futr1}$ 、 $P_{b,futr2}$ 、 $P_{b,futr3}$ 为超短期预测得出光伏场站 b 的 3 个间隔点的有功预测值。超短期预测模型主要是基于历史数据和当前气象状况进行训练。

(2) 基于有功预测判定值 $P_{b,futr}$, 分别计算接入节点 i 新能源最大安全出力 $P_{i,max}$ 和电压越限功率 $P_{i,diff}$:

$$P_{i,max} = P_i + S_{i,p,v,sens}(U_{i,max} - U_i) \quad (22)$$

$$P_{i,diff} = P_{b,futr} - P_{i,max} \quad (23)$$

式中: $S_{i,p,v,sens}$ 为节点 i 有功功率对电压的灵敏度。

(3) 根据电压越限功率 $P_{i,diff}$ 计算节点电压稳定修正值 $\Delta U_{i,diff}$:

$$\Delta U_{i,diff} = \begin{cases} P_{i,diff} S_{i,p,v,sens} - \eta S_{i,q,v,sens} Q_d & P_{i,diff} > 0 \\ 0 & P_{i,diff} \leq 0 \end{cases} \quad (24)$$

式中: η 为无功裕量系数, 由绿色变电站内部无功需求决定; $S_{i,q,v,sens}$ 为节点 i 无功功率对电压的灵敏度; Q_d 为绿色变电站当前可提供的无功下调裕度。

(4) 根据有功功率对电压的灵敏度 $S_{i,p,v,sens}$ 、电压越限功率 $P_{i,diff}$ 及电压稳定修正值 $\Delta U_{i,diff}$, 计算修正后的电压优化上、下限值 $U_{i,set,max}$ 、 $U_{i,set,min}$, 即:

$$\begin{cases} U_{i,set,max} = U_i + \left| \frac{P_{i,diff} S_{i,p,v,sens} - \Delta U_{i,diff}}{2} \right| \\ U_{i,set,min} = U_i - \left| \frac{P_{i,diff} S_{i,p,v,sens} - \Delta U_{i,diff}}{2} \right| \end{cases} \quad (25)$$

(5) 利用修正后的限值 $U_{i,set,max}$ 和 $U_{i,set,min}$ 替换式(14)中节点电压的约束限值 $U_{i,max}$ 和 $U_{i,min}$, 得出无功

电压模型, 以上步骤能够起到稳定接入节点电压的作用。

(6) 若 $U_{i,set,max}$ 和 $U_{i,set,min}$ 在电网所能容纳的最大允许范围之内, 就地消纳光伏。若 $U_{i,set,max}$ 超出允许范围, 则启用储能系统进无功调节和光伏消纳。

(7) 储能系统消纳光伏输出, 根据储能系统当前充放电状态完成其运行初始评估, 再依据 $U_{i,set,max}$ 和 $U_{i,set,min}$ 进行储能系统充放电运行的初始配置。

(8) 计算储能电站蓄电量 e_B , 同时判断 e_B 是否到达运行的上下限, 若尚未达到则执行(7)中动作; 若达到上下限, 则输出此时的储能系统整体状态参数。

2.4 综合控制策略

文中提出的光伏消纳运行策略需要综合考虑无功监测和光伏出力特性, 因而该方法必须实现两者在时空上的解耦。该策略在时间尺度上基于无功调压周期实施控制, 并利用储能平抑光伏出力波动; 在空间尺度上采用分层分区电压管理机制, 通过避免电压越限实现光伏消纳最大化。变电站综合控制策略如下:

(1) 基于无功监测调节周期, 结合变电站支路拓扑模型和实时运行状态, 对支路无功数据进行预处理, 并输出最大安全出力判定结果。

(2) 光伏出力数据由外接口导入, 在结合最大安全出力判定与电压越限信息后, 进行无功消纳分析与电压上下限调整。

(3) 在综合无功消纳和电压上下限后, 利用储能设备消纳光伏出力波动。为提高策略精度, 需要对优化结果进行合理性检验, 防止设备投切振荡。

(4) 通过校验的优化方案可降低变电站信息交流的不确定性, 保证变电站遥控设备投切出口的安全可控。

综合控制策略流程如图 3 所示。

2.5 求解方法

文中的约束条件需要迭代更新, 普通粒子群算法在边界条件不明确时容易陷入局部最优解, 进而无法获得全局最优解。为解决边界条件不明确的问题, 文中引入交互机制, 采用改进粒子群算法进行边界反馈矫正, 基于流数据实时更新节点电压上下限和储能系统状态边界, 从而获得变电站运行状态条件判定的全局最优解。交互机制中的约束条件更新机理示意如图 4 所示。

粒子种群在多维空间中呈现多维状态分布。在同一维度下, 种群粒子横向交互能够提高全局搜索能力; 在不同维度下, 种群粒子纵向交互能够提高局部搜索能力。横向交互与纵向交互协同作用,

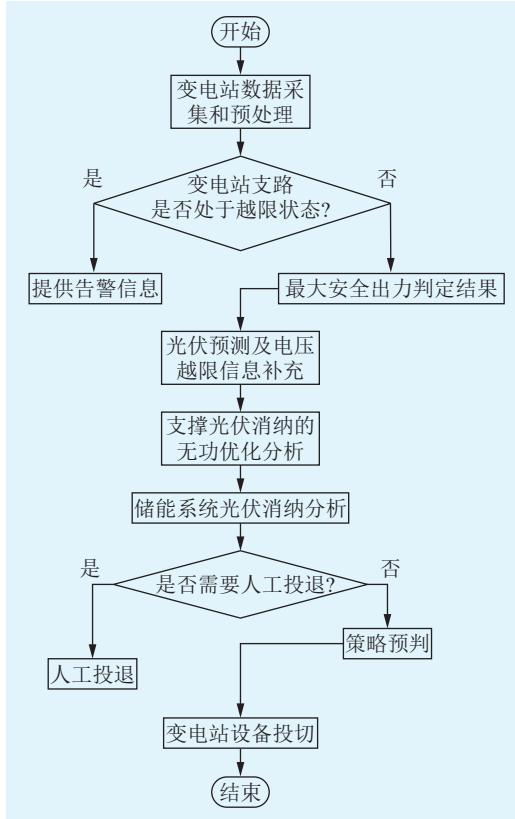


图3 综合控制策略流程

Fig.3 Overall control strategy flowchart

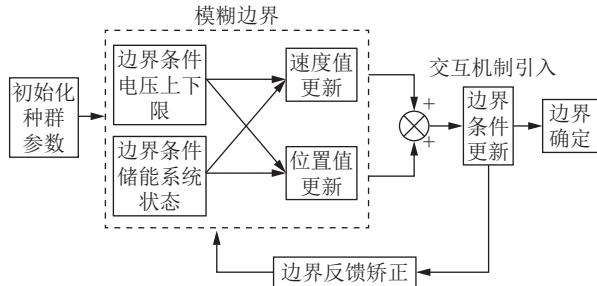


图4 交互机制中的约束条件更新机理示意

Fig.4 Schematic diagram of constraint condition updating mechanism in interactive mechanism

能有效提高算法前期的全局搜寻能力。

粒子群横向交互原理位置计算如式(26)所示, 其描述了种群中同一维度的粒子 i_p 和 j_p 进行位置交互, r_1 和 r_2 为区间 $[0,1]$ 的随机数, 经过横向交互后, 粒子位置信息迭代更新为 $x'(i_p)$ 和 $x'(j_p)$ 。

$$\begin{cases} x'(i_p) = r_1 x(i_p) + (1 - r_1)x(j_p) \\ x'(j_p) = r_2 x(j_p) + (1 - r_2)x(i_p) \end{cases} \quad (26)$$

式中: $x(i_p)$ 、 $x(j_p)$ 分别为 i_p 、 j_p 的位置信息。

粒子群纵向交互原理位置计算如式(27)所示, 其表示同一个粒子在不同维度 X 和 Y 之间进行位置交互, 经过纵向交互后, 粒子位置信息迭代更新为 $x'(i_p, X)$ 。

$$x'(i_p, X) = r_1 x(i_p, X) + (1 - r_2)x(i_p, Y) \quad (27)$$

式中: $x(i_p, X)$ 、 $x(i_p, Y)$ 分别为 i_p 在不同维度 X 和 Y 的位置信息。

引入交互机制的改进粒子群算法模型求解过程如下:

(1) 初始化算法参数和模型参数。输入经策略调节后的电压和储能系统决策变量相关参数等。

(2) 随机初始化种群参数。设置迭代次数 $Z=0$, 并进行相关参数的计算, 对种群中的每个粒子 i_p , 从 $i_p=1$ 开始, 计算其未交互前适应度初始值。

(3) 计算粒子群的相关参数, 对粒子群中粒子的位置值和速度值进行交互, 更新粒子的速度值和位置值, 并重新计算交互后的速度值和位置值, 当新适应度值优于原适应度值时, 接受本次交互更新; 否则, 放弃本次交互更新结果。

(4) 依次更新种群中所有粒子的位置与速度, 并根据约束条件进行边界处理, 产生个体最优值和全局最优值。

(5) 重新计算粒子群中各相关参数, 并依次计算各粒子的适应度函数值, 寻找并更新个体最优解; 评估整个种群内粒子的适应度值情况, 寻找并更新全局最优解。

(6) 更新粒子群所有粒子位置和速度信息, 并进行边界处理, 重新计算相关粒子参数。

(7) 重复步骤(5)和步骤(6), 当迭代结果满足最小误差或达到最大迭代次数时跳出循环, 最终输出全局最优解。

改进粒子群算法流程如图5所示。

3 算例分析

文中仿真采用简化后的 IEEE 33 节点系统, 如图6所示, 电压等级为 12.66 kV, 在 MATLAB 中进行模型的计算和求解。节点 0 为上级电网侧接入点, 节点 19、节点 22 和节点 31 为配备储能系统的绿色光伏变电站, 其电压等级均为 10 kV。节点 19 变电站接入绿色光伏装机容量为 5 MW, 配置储能系统容量为 12.084 MW·h。节点 22 接入绿色光伏装机容量为 2 MW, 配置储能系统容量为 9.068 MW·h。节点 31 接入绿色光伏装机容量为 1 MW, 配置储能系统容量为 4.263 MW·h。设定该系统的总负荷有功峰值为 10.40 MW, 负荷功率因数为 0.85~0.9。针对光伏出力的不同情况, 文中从负荷覆盖率的角度, 设置了负荷覆盖率不同的场景, 情形 1: 负荷覆盖率 30%; 情形 2: 负荷覆盖率 50%; 情形 3: 负荷覆盖率 70%。3 种情形分别对应源荷匹配度低、中、高 3 种情况。每种情形优化前

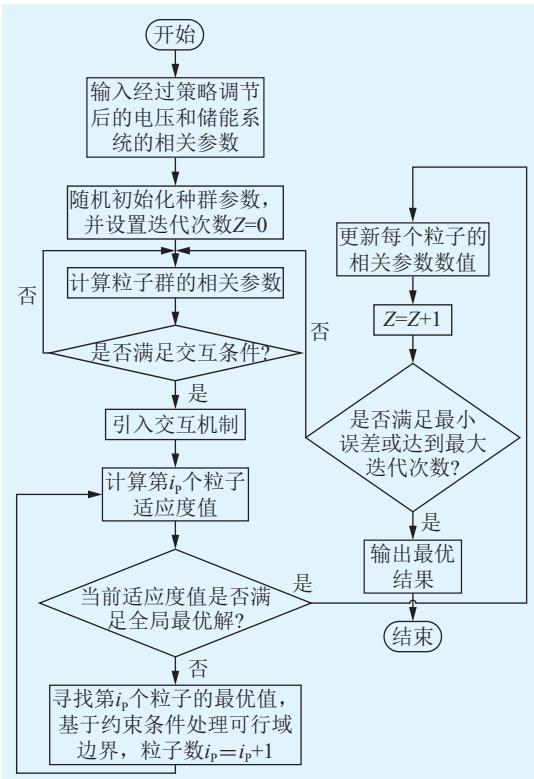


图 5 改进粒子群算法流程

Fig.5 Improved particle swarm algorithm flowchart

采取光储耦合消纳策略^[27](以下简称优化前策略),即在安全出力允许范围内(即电压越限功率内)利用储能系统消纳光伏出力;当光伏出力大于越限功率时,则切断光伏出力维持线路电压稳定。优化后储能系统运行策略为文中提出的无功监测的新能源消纳运行策略(以下简称优化后策略)。

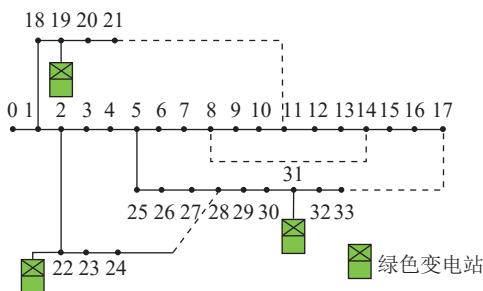


图 6 IEEE 33 节点系统

Fig.6 IEEE 33-node system

采用文中所提出的策略对图 6 中算例进行无功电压监测和有功消纳优化运行。参数设置如下:粒子群种群大小 $N=500$, 迭代次数 $Z=100$, 惯性权重 $\omega=0.8$, 学习因子 $c_1=c_2=2$ 。

为更好地检验无功优化策略对电压调节的效果,文中首先选取晴天条件下春季日 15:00, 负荷覆盖率为 30% 的场景,在利用无功监测进行判定后实施光伏消纳。**表 1** 给出了 3 个绿色变电站在当前时刻的无功监测数值,所有数值均为标幺值。定义

光伏电场接入点电压在 0.90~1.10 p.u. 为正常范围,无功对电压的灵敏度高于 0.3, 则判定电压波动较为敏感。由**表 1** 可知, 节点 19 变电站经无功监测判定, 其接入点电压为 0.892 p.u., 低于安全电压下限, 需要投入储能系统运行。由于该节点无功对电压的灵敏度为 0.306(高于 0.3), 该点的电压波动敏感存在进一步下降的风险。储能系统在当前运行周期内的介入, 有效稳定了接入点电压。经过判定与调节后, 在下一个运行周期将再次进行无功监测计算与判定, 当电压恢复至安全范围内时, 开始进行光伏消纳。

表 1 绿色变电站无功监测结果

Table 1 Renewable substation reactive power monitoring results
单位: p.u.

变电站 接入节点	接入点电压 计算值	电压偏差均值	上级电网接 入无功	无功对电压 的灵敏度	无功 需求
节点19	0.892	0.106	1.239	0.306	0.346
节点22	0.942	0.056	0.963	0.242	0.234
节点31	0.963	0.352	0.841	0.187	0.187

表 2 展示了当前时刻各变电站节点的光伏出力和储能系统运行结果。根据参考文献[28], 独立储能系统在全容量下连续放电时间不应低于 2 h, 且锂电池在主要设备不更换的前提下, 充放电深度不低于 90%。文中设置的储能系统容量, 除满足 2 h 的光伏储电需求外, 还应保留一定的可调裕量, 实现无功监测下的节点电压调节。节点 19、节点 22、节点 31 为接入配电网的绿色变电站, 配电网其余节点考虑负载接入。在传统的协同运行策略下, 无功电压调节基于给定的标准参数进行优化;若不考虑配电网电压上下限约束, 则电压调节存在明显的滞后性和波动性。该时刻各节点的电压幅值变化情况如图 7 所示。可以看出, 在经过优化后, 系统节点电压的波动范围显著减小, 且整体电压的波动幅度得到有效缓解。对比 2 种不同算法用普通粒子群算法得到的结果, 在编号较小的节点上, 电压幅值偏低且波动明显;在编号较大节点上, 普通粒子群算法与改进粒子群算法较为吻合。这一结果也表明, 改进粒子群算法的前期寻优速度更快, 结果更准确, 有利于建立准确的电压边界条件, 同时也证明所提综合控制策略可以实现接入节点电压的稳定控制。

文中提出的变电站消纳运行策略旨在提高光伏接入绿色变电站时的消纳能力。因此, 选取负荷覆盖率为 30%、50% 和 70% 的 3 种典型场景进行分析。日负荷曲线如图 8 所示, 在仿真计算时根据历史数据考虑负荷的日常随机波动特性。

表 2 仿真场景下光伏及储能系统运行情况

Table 2 Operation status of photovoltaic and energy storage systems under simulation scenario

变电站接入节点	光伏出力/kW	储能出力/kW	储能系统电量/(kW·h)
节点19	1 891	-228.65	1 048.40
节点22	756.4	-171.48	786.30
节点31	378.2	-80.02	366.94

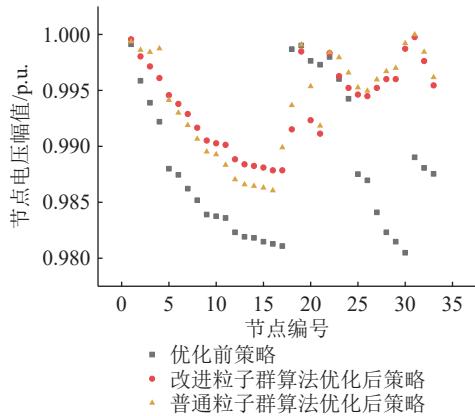


图 7 无功优化前后电压变化

Fig.7 Voltage variation before and after reactive power optimization

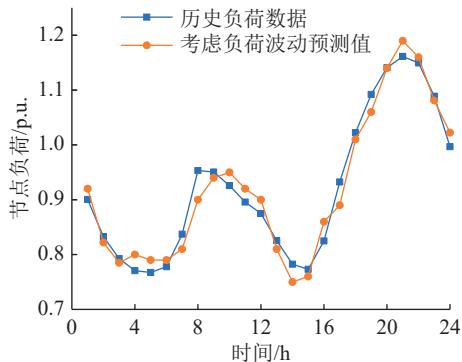


图 8 春季典型日负荷波动曲线

Fig.8 Typical daily load fluctuation curve in spring

图 9 为不同负荷覆盖率下优化前后的 DG 实际出力情况。在 06:00—18:00 时段内, 受午后日照强度高峰影响, 不同负荷覆盖率的场景下光伏机组出力曲线均呈倒“U”型。在 30% 负荷覆盖率情况下, 光伏出力经过优化后提升主要集中在 12:00—14:00, 并且在 13:00 时刻, 光伏有功出力比优化前提高了 0.003 3 p.u., 相较于优化前新能源有功出力提高了 7.92%。在 50% 负荷覆盖率情况下, 光伏实际有功出力提升范围更广, 主要集中在 10:00—17:00, 在 10:00 时刻, 光伏实际有功出力提高了 0.004 05 p.u., 提升幅度高于 30% 负荷覆盖率下的光伏有功出力。在 70% 负荷覆盖率情况下, 光伏有功出力的提升幅度明显大于低负荷覆盖率和中等负荷覆盖率情况下, 其最高提升幅度达到了 9.132 3%。

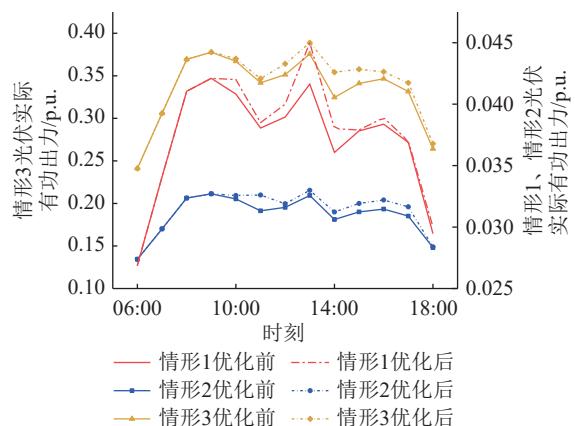


图 9 不同负荷覆盖率下优化前后的 DG 实际出力
Fig.9 Actual output of DG before and after optimization at different load coverage rates

为了研究文中提出的策略对于无功监测下的电压调节能力, 文中针对不同负荷覆盖率进行了节点电压幅值仿真, 具体结果如图 10 所示, 随着负荷覆盖率的提高, 节点电压的波动幅度也相应减小, 30% 负荷覆盖率下的节点电压幅值最大可以达到 1.000 73 p.u., 70% 负荷覆盖率下为 1.007 98 p.u.。在不同负荷覆盖率下, 优化后的节点电压波动幅值均有所降低, 节点电压稳定性提升。

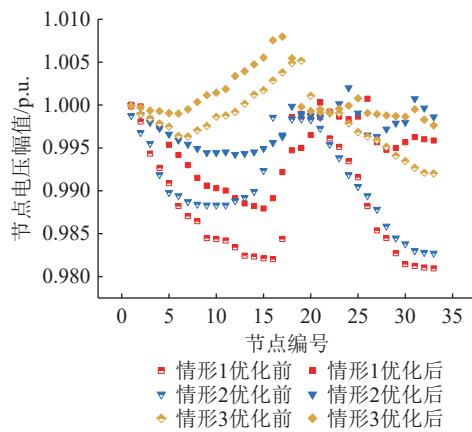


图 10 不同负荷覆盖率下的优化前后节点电压幅值

Fig.10 Node voltage amplitude before and after optimization at different load coverage rates

图 11 和图 12 展示了 3 种不同负荷覆盖率情形下的储能系统运行曲线。随着负荷覆盖率提高, 储能系统需要吸收和消纳的光伏出力增加, 日负荷高峰集中在 12:00—16:00。在 70% 负荷覆盖率情形下, 储能系统出力峰值达到 2 936.68 kW, 为 50% 负荷覆盖率情形下出力峰值 2 358.870 4 kW 的 1.24 倍, 为 30% 负荷覆盖率情形下出力峰值 1 602.096 kW 的 1.83 倍, 这也验证了文中提出的新能源消纳策略能有效调用储能系统提升光伏消纳率, 并平抑电压波动。

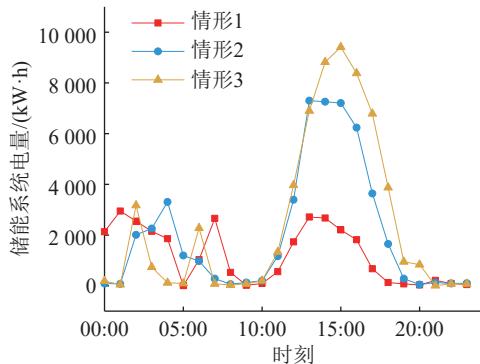


图 11 储能系统电量

Fig.11 Energy storage system capacity

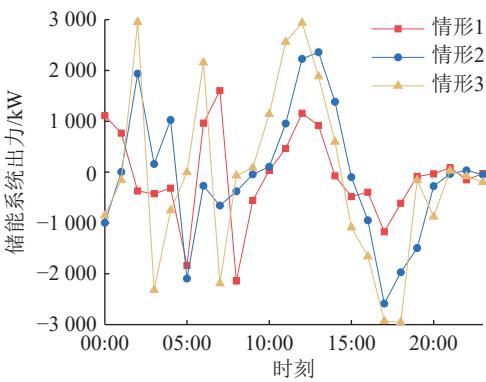


图 12 储能系统出力

Fig.12 Energy storage system output

表3为绿色变电站采用消纳运行策略优化前后的结果对比。可见,在不同负荷覆盖率情形下,绿色变电站优化后的弃光率相较于优化前明显下降。变电站在30%负荷覆盖率下优化后的弃光率下降了22.79%,在50%负荷覆盖率下优化后的弃光率下降了24.26%,在70%负荷覆盖率下优化后的弃光率下降了26.59%。随着负荷覆盖率提高,文中提出的运行消纳策略作用愈加明显。优化后系统电压幅值波动方差为0.0043,低于优化前的0.0063,表明该协同运行策略能够有效稳定节点电压。

表 3 优化前后结果对比

Table 3 Comparison of results before and after optimization

对比项目	优化前策略	优化后策略
是否具有无功监测	否	是
电压幅值平均值/p.u.	0.9873	0.9949
电压幅值波动方差/p.u.	0.0063	0.0043
情形1弃光率/%	1.36	1.05
情形2弃光率/%	2.72	2.06
情形3弃光率/%	5.49	4.03

4 结论

文中提出并建立基于无功监测引导的变电站

光伏消纳运行策略,该策略以新能源出力最大为目标函数,以系统有功和无功平衡为约束条件。文中采用改进粒子群算法进行前期快速全局寻优,在不同负荷覆盖率情形下验证了该策略的有效性,得出以下结论:

(1) 文中提出的无功监测引导策略通过建立无功电压关系模型,将无功监测与光伏有功消纳相结合,改善了变电站因电压幅值上升引发的弃光问题,有利于提高变电站运行稳定性。

(2) 在利用储能设备消纳光伏接入绿色变电站多余出力的基础上,通过储能系统的协同运行既能满足变电站连续放电时间不低于2 h的要求,同时也能提高不同负荷覆盖率情形下绿色光伏实际出力,对降低弃光率至关重要。

参考文献:

- [1] 徐同庆,王树彪,赵浩君.计及光伏消纳与光储充配置的配电网联合优化策略[J].电气工程学报,2025,20(1): 271-280.
XU Tongqing, WANG Shubiao, ZHAO Haojun. Joint optimization strategy containing photovoltaic consumption and photo-voltaic-storage-charging configuration in distribution network [J]. Journal of Electrical Engineering, 2025, 20(1): 271-280.
- [2] 马会萌,李相俊,吴荣宇,等.兼顾新能源消纳和主动支撑电网能力提升的多类型储能容量优化配置[J].电力建设,2024,45(6): 111-119.
MA Huimeng, LI Xiangjun, WU Rongyu, et al. Optimal capacity configuration method for multi-type energy storage systems enhancing new energy consumption and actively supporting the grid[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(6): 111-119.
- [3] 张知,赵海波,冉晴月,等.考虑不同区域电网差异性的新能源消纳成本测算与分摊方法[J].电力系统保护与控制,2024,52(24): 20-31.
ZHANG Zhi, ZHAO Haibo, RAN Qingyue, et al. Calculation and allocation method for absorption costs of new energy considering the differences in regional power grids[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(24): 20-31.
- [4] 王育飞,张文韬,杨铭诚,等.考虑虚拟控制参数调节的风储联合调频优化模型预测控制[J].电力系统保护与控制,2024,52(16): 37-48.
WANG Yufei, ZHANG Wentao, YANG Mingcheng, et al. Combined wind-storage system frequency regulation optimization model predictive control considering virtual control parameter adjustment[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(16): 37-48.
- [5] 刘洪波,刘永发,任阳,等.高风电渗透率下考虑系统风电备用容量的储能配置[J].发电技术,2024,45(2): 260-272.
LIU Hongbo, LIU Yongfa, REN Yang, et al. Energy storage configuration considering the system wind power reserve capacity under high wind power permeability[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(2): 260-272.

- [6] 顾怡, 邢洁, 马洪艳, 等. 计及配网电压越限的光储协同优化运行策略[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(3): 893-902.
- GU Yi, XING Jie, MA Hongyan, et al. Optimal operation strategy of distributed photovoltaic and energy storage systems by considering voltage violations in the distribution network[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(3): 893-902.
- [7] 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.
- [8] 徐文韬, 米阳, 蔡鹏程, 等. 基于机会约束规划的含多微网主动配电网分布式优化管理[J]. 电力建设, 2024, 45(11): 1-13.
- XU Wentao, MI Yang, CAI Pengcheng, et al. Distributed optimization management for active distribution networks with multiple microgrids based on chance-constrained programming[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(11): 1-13.
- [9] 张智光, 倪秋龙, 廖培, 等. 计及新能源消纳的地区电网无功电压优化控制策略[J]. 浙江电力, 2023, 42(1): 46-53.
- ZHANG Zhiguang, NI Qiulong, LIAO Pei, et al. An optimal reactive voltage control strategy for regional power grids considering new energy consumption[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(1): 46-53.
- [10] 丁坤, 陈博洋, 秦建茹, 等. 大规模新能源集群接入弱电网的消纳能力评估方法[J]. 电力建设, 2023, 44(11): 86-94.
- DING Kun, CHEN Boyang, QIN Jianru, et al. Evaluation method of consumption ability of new large scale energy clusters connected to weak grids[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(11): 86-94.
- [11] 刘华志, 李永刚, 王优胤, 等. 无功电压优化对新能源消纳的影响[J]. 电工技术学报, 2019, 34(S2): 646-653.
- LIU Huazhi, LI Yonggang, WANG Youyin, et al. Influence about reactive power voltage optimization on the dissipation of new energy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S2): 646-653.
- [12] 朱凌志, 陈宁, 王伟. 兼顾接入地区无功需求的风电场无功控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(5): 80-85.
- ZHU Lingzhi, CHEN Ning, WANG Wei. Wind farm reactive power control strategy considering local networks demand[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(5): 80-85.
- [13] FALAHI M, BUTLER-PURRY K, EHSANI M. Dynamic reactive power control of islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 3649-3657.
- [14] HASHEMI S, ØSTERGAARD J. Efficient control of energy storage for increasing the PV hosting capacity of LV grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(3): 2295-2303.
- [15] LI X J, WANG S X. Energy management and operational control methods for grid battery energy storage systems[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2021, 7(5): 1026-1040.
- [16] SHI Z D, WANG W S, HUANG Y H, et al. Simultaneous optimization of renewable energy and energy storage capacity with the hierarchical control[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022, 8(1): 95-104.
- [17] WANG W, HUANG S H, ZHANG G M, et al. Optimal operation of an integrated electricity-heat energy system considering flexible resources dispatch for renewable integration[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(4): 699-710.
- [18] AKHTAR I, KIRMANI S, JAMEEL M. Reliability assessment of power system considering the impact of renewable energy sources integration into grid with advanced intelligent strategies[J]. IEEE Access, 2021, 9: 32485-32497.
- [19] 王维, 贾丽, 杨逸凡, 等. 考虑市场计划的微能源网双层优化配置方法[J]. 电力工程技术, 2023, 42(6): 170-178.
- WANG Wei, JIA Li, YANG Yifan, et al. Two-layer optimization configuration method of micro-energy grid considering market plan[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(6): 170-178.
- [20] 杨家辉, 杨逸凡, 孙明宇, 等. 基于超短期预测的区域综合能源系统冲击响应调控策略[J]. 电气工程学报, 2025, 20(1): 239-249.
- YANG Jiahui, YANG Yifan, SUN Mingyu, et al. Regulation strategy of impact response of regional integrated energy system based on ultra short term prediction[J]. Journal of Electrical Engineering, 2025, 20(1): 239-249.
- [21] 段可, 王维, 曹伟杰, 等. 考虑气热能延迟特性的综合能源系统内能流自分配策略[J]. 电气工程学报, 2022, 17(3): 76-84.
- DUAN Ke, WANG Wei, CAO Weijie, et al. Self-allocation strategy of internal energy flow in integrated energy system considering the delay characteristics of gas and heating energy[J]. Journal of Electrical Engineering, 2022, 17(3): 76-84.
- [22] 李娜, 王维, 杨家辉, 等. 基于需求侧博弈的区域综合能源服务商最优运营策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(2): 112-120.
- LI Na, WANG Wei, YANG Jiahui, et al. Optimal operation strategy of regional comprehensive energy service providers based on a demand-side game[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(2): 112-120.
- [23] WU R B, LIU S Q. Multi-objective optimization for distribution network reconfiguration with reactive power optimization of new energy and EVs[J]. IEEE Access, 2023, 11: 10664-10674.
- [24] YU L L, ZHANG L H, MENG G J, et al. Research on multi-objective reactive power optimization of power grid with high proportion of new energy[J]. IEEE Access, 2022, 10: 116443-116452.
- [25] 张达, 孙伟卿, 杨文威. 考虑有功无功协调优化的配电网储能与无功补偿配置[J]. 电力系统及其自动化学报, 2024, 36(9): 44-50.

- ZHANG Da, SUN Weiqing, YANG Wenwei. Energy storage and reactive power compensation configuration of distribution network considering active and reactive power coordinated optimization[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2024, 36(9): 44-50.
- [26] 宋阳, 张静页, 王磊, 等. 计及预测偏差的光伏消纳多时间尺度调度研究[J]. 《电力工程技术》, 2018, 37(1): 58-64.
- SONG Yang, ZHANG Jingye, WANG Lei, et al. Research on multi-time scheduling of accommodating photovoltaic considering the error of photovoltaic prediction[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2018, 37(1): 58-64.
- [27] 刘天慧, 徐栎, 张广玉, 等. 基于光伏+储能出力特性耦合的东北电网新能源消纳策略[J]. 《电工技术》, 2023(24): 51-53.
- LIU Tianhui, XU Li, ZHANG Guangyu, et al. New energy absorption and consumption strategy of northeast power grid by coupled output characteristics of photovoltaic with energy storage[J]. *Electric Engineering*, 2023(24): 51-53.
- [28] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于加快推动新型储能发展的指导意见[EB/OL]. [2025-04-15]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-07/24/content_5627088.htm.
- National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Guiding opinions on accelerating the development of new-type energy storage[EB/OL]. [2025-04-15]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-07/24/content_5627088.htm.

作者简介：



王维

王维(1988),男,博士,副教授,研究方向为综合能源系统优化运行、无线电能传输技术等(E-mail: wangw_seu@163.com);
杨逸凡(1998),男,硕士在读,研究方向为综合能源系统储能优化运行;
季振亚(1988),女,博士,副教授,研究方向为电动汽车与电网互动等。

Operational strategy for renewable energy consumption in green substations guided by reactive power monitoring

WANG Wei^{1,2}, YANG Yifan^{1,2}, JI Zhenya^{1,2}, HAN Xue^{1,2}, CAI Qianhui^{1,2}

(1. School of Electrical & Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China; 2. Jiangsu Province Comprehensive Energy Equipment and Integration International Joint Laboratory, Nanjing 210046, China)

Abstract: In response to the challenges posed by grid-connected node voltage exceeding the limit and output consumption during photovoltaic (PV) consumption systems into green substations, the operational strategy for renewable energy consumption in green substations guided by reactive power monitoring is proposed in this research. The primary objective of this strategy is to maximize PV consumption by analyzing the relationship between reactive power-voltage sensitivity and the load coverage rate. Through the decoupling of reactive power monitoring from active power consumption and the precise prediction of crucial variables such as active power surplus and reactive power compensation control correction quantities, a reactive power-voltage relationship model is constructed. Furthermore, through considering their current charge status and capacity constraints, a green substation consumption model with energy storage systems is established. Operational strategy for renewable energy consumption in green substations guided is formulated based on a reactive power-voltage relationship model. The model is solved using a improved particle swarm algorithm and validated via simulations on the IEEE 33-node system. Results demonstrate that the proposed strategy ensures stable grid-connected voltage while significantly enhancing PV consumption capacity.

Keywords: reactive power monitoring; renewable energy consumption; operational strategy; voltage exceeding the limit; energy storage system; particle swarm algorithm

(编辑 吴昊)