

# 数据驱动的含高比例户用光伏的低压台区 电压协调控制策略

杨雷<sup>1</sup>,王献军<sup>1</sup>,王子鉴<sup>2</sup>,赵卫华<sup>1</sup>,李鹏<sup>3</sup>,李梦溪<sup>1</sup>

(1. 国网河南省电力公司 营销服务中心, 河南 郑州 450000;

2. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082;

3. 河南许继仪表有限公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:**随着我国低压台区中户用分布式光伏渗透率的持续增加,台区内部潮流发生变化,导致节点电压越限、三相不平衡等问题日益严重,对配电网的安全稳定运行构成严峻挑战。针对台区拓扑结构与线路参数未知、传统基于潮流计算的电压控制策略不再适用的情况,提出一种数据驱动的含高比例户用光伏的低压台区电压协调控制策略。首先,建立配电网低压台区三相线性近似模型,基于低压台区的历史运行数据,运用最小二乘法拟合节点功率与电压的关系。然后,采用光伏逆变器和储能系统作为调控设备,以最小化节点电压越限程度、最小化三相不平衡度和最小化设备调节量为目标函数,利用改进的多目标粒子群算法实现台区电压优化控制。最后,以21节点低压台区为例,通过与其他控制策略和方法进行仿真对比分析,验证了所提电压协调控制策略的有效性和先进性。

**关键词:** 低压台区; 数据驱动; 电压协调控制策略; 电压越限; 三相不平衡; 光伏逆变器; 储能系统

**中图分类号:** TM714.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed25479

## Data-driven Voltage Coordination Control Strategy for Low-voltage Distribution Networks with High Household Photovoltaics Penetration

YANG Lei<sup>1</sup>, WANG Xianjun<sup>1</sup>, WANG Zijian<sup>2</sup>, ZHAO Weihua<sup>1</sup>, LI Peng<sup>3</sup>, LI Mengxi<sup>1</sup>

(1. Marketing Service Center, State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450000, Henan, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China;

3. XJ Metering Co., Ltd., Xuchang 461000, Henan, China)

**Abstract:** As the penetration rate of household distributed PV in China's low-voltage distribution network continues to increase, the power flow of the distribution network has changed, leading to more serious problems such as node voltage overruns and three-phase imbalance, which poses a serious threat to the safe and stable operation of the distribution network. For situations where the distribution network topology and line parameters are unknown, the traditional voltage control strategy based on power flow calculation is no longer applicable, a data-driven voltage coordination control strategy was proposed for low-voltage distribution networks with high household photovoltaics penetration. First, a linear approximation model of the low-voltage distribution network was established, and the least squares method was applied to fit the relationship between node power and voltage based on the historical operation data of the low-voltage distribution network. Then, the photovoltaic inverter and energy storage system were used as regulation measures to minimize the degree of node voltage over-limit, minimize the three-phase unbalance and minimize the amount of equipment regulation as the objective function. The improved multi-objective particle swarm algorithm was utilized to achieve voltage optimization control. Finally, the effectiveness of the proposed voltage coordination control strategy was verified by simulation comparison and analysis with other control strategies and methods, taking the 21-node low-voltage station as an example.

**Key words:** low voltage distribution network; data-driven; voltage coordination control strategy; voltage over-

基金项目: 国网河南省电力公司科技项目(5217X0230002)

作者简介: 杨雷(1979—),女,硕士,高级工程师,主要研究方向为电力系统优化控制、电力系统运营,Email: amyrtatter@163.com

通讯作者: 王子鉴(1998—),男,博士研究生,主要研究方向为分布式光伏并网、新型电力系统优化控制,Email: zijianwang@hnu.edu.cn

limit; three-phase unbalance; photovoltaic inverter (PVI); energy storage system (ESS)

随着“双碳”目标的提出,以光伏为代表的可再生能源逐渐成为我国电力能源的重要来源<sup>[1]</sup>。特别是在整县分布式光伏试点和扶贫光伏等政策的支持下,低压台区内的户用分布式光伏装机数量和容量快速增长。然而,高比例的光伏渗透率、用户负荷与光伏出力时空不匹配性等问题导致配电网功率双向流动,会引起节点电压频繁越限、三相不平衡加剧等诸多问题<sup>[2]</sup>。因此,如何有效调控含高比例户用光伏低压台区的电压成为当下亟待解决的关键问题。

目前,已有很多国内外学者就分布式光伏并入配电网的电压控制策略问题进行了相关研究。首先,在调控措施方面,主要以功率控制方法解决电压越限问题。传统调控措施主要有调整变压器分接头位置和串联电容器组<sup>[3-4]</sup>,但是该类措施存在无法频繁操作、调节速度慢和精度低等缺陷。文献[5]提出了利用光伏逆变器(photovoltaic inverter, PVI)无功调节潜力的电压控制策略,但实际上无功补偿并不会消纳光伏的额外出力<sup>[6]</sup>。近年来,储能技术的不断进步使其成为光伏并网电压控制的新兴措施<sup>[7]</sup>。文献[8]建立了储能系统(energy storage system, ESS)的有功功率参与的电压优化控制模型。文献[9]针对电压越限问题,提出了“PVI + ESS”的控制策略。文献[10]认为未来需结合多种调控措施对电压进行协调控制,以克服单一有功或无功电压控制的局限性。

其次,在调控目标方面,文献[11]以节点电压与额定值的差值最小作为目标函数,采用鲁棒优化模型对ESS进行调控。虽然该策略可确保电压不越限,但将节点电压从越限值调控至额定值附近会增加调控设备的输出,导致调控经济性降低。文献[3, 9, 12]均采用一致性算法利用PVI的无功功率和ESS的有功功率对电压进行协调控制。但是,这些文献都未将三相不平衡、电压越限和调控经济性问题同时考虑。

最后,在台区拓扑方面,文献[6]基于Distflow潮流模型,采用换流器和ESS协调优化策略,改善电压越限和三相不平衡问题。文献[13]基于三相四线制最优潮流模型,兼顾最小化网损和最小化三相不平衡度(voltage unbalance factor, VUF),建立了PVI和ESS的协同控制模型。实际上,大多数低压台区存在量测装置覆盖不足、拓扑关系不

明确、线路参数未知等问题<sup>[14]</sup>,无法进行潮流计算。因此,上述基于潮流计算的调控策略都不适于拓扑未知的情况。文献[15]提出了一种无需台区拓扑参数的电压控制方法,但是该文献的研究仅针对单相线路,未考虑低压台区中存在的三相不平衡问题,并且存在电压优化目标过度调节的问题。

综上所述,在现有电压协调控制策略研究中,多侧重于单一的有功电压控制或无功电压控制,对结合PVI和ESS的协调电压控制策略方面研究不充分。同时,已有的电压控制研究中很少有同时考虑节点电压、节点VUF和调控经济性的联合优化。此外,现有文献大多以拓扑已知的低压台区为研究对象,而对拓扑参数未知的低压台区电压调控问题研究较少。

本文针对现有研究的不足之处,提出了一种基于数据驱动的低压台区电压协调控制策略。首先,基于低压配电台区各节点处智能电表的用户历史电压和电流数据,通过数据驱动的方式,采用最小二乘法建立台区三相线性近似模型,解决了在实际低压台区中拓扑结构和线路参数未知的情况下无法进行潮流计算的问题。其次,对台区内PVI无功出力和ESS有功出力进行两阶段协调控制,采用改进的多目标粒子群算法(improved multi-objective particle swarm optimization, IMOPSO),在调节设备出力最小的前提下,将越限节点的电压与VUF调控在允许范围内。相比于现有调控策略,在调控措施、调控目标方面都考虑更为全面。最后,采用实际算例对比分析,验证了本文所提电压协调控制策略的有效性。

## 1 低压台区三相线性近似模型

### 1.1 模型建立

针对辐射状的低压台区,可采用Distflow潮流模型描述,如下式所示:

$$\begin{cases} P_n = \sum_{o \in O} p_o + r_n i_n - p_n \\ Q_n = \sum_{o \in O} q_o + x_n i_n - q_n \\ u_n = u_m - 2(r_n p_n + x_n q_n) + (r_n^2 + x_n^2) i_n \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_n, Q_n$ 分别为注入节点 $n$ 的有功、无功功率; $O$ 为以节点 $n$ 为首节点的支路集合; $p_o, q_o$ 分别为

从节点  $n$  流向支路  $o$  的有功、无功功率;  $P_n, Q_n$  分别为流向节点  $n$  的有功、无功功率;  $m$  为以节点  $n$  为末节点的支路  $mn$  的首节点;  $r_n, x_n$  分别为支路  $mn$  的电阻、电抗;  $i_n$  为电流有效值的平方。

但是,该潮流模型是基于三相平衡条件下的单相模型,没有考虑低压台区内的电压三相不平衡问题。本文基于 Distflow 潮流模型的思想,建立了低压台区三相线性近似模型。在配电网三相模型中,节点  $n$  的各相复电压和注入复功率可用  $\dot{u}_n$  和  $\dot{S}_n$  表示,支路  $mn$  的阻抗矩阵、流过的各相复电流和功率可用  $z_n, \dot{i}_n$  和  $\dot{s}_n$  表示。由欧姆定律可知:

$$\dot{u}_n = \dot{u}_m - z_n \dot{i}_n \quad (2)$$

式中:  $\dot{u}_n, \dot{u}_m$  和  $\dot{i}_n$  均为  $3 \times 1$  的矩阵。

由于本文将中性线简化为直接接地的状态<sup>[16]</sup>,因此  $z_n$  为  $3 \times 3$  的矩阵。

在低压台区中,智能电表无法测量电压相角等数据,仅能够获取电压幅值。因此,本文将式(2)左右两边都乘以其共轭转置,然后仅保留结果的对角线元素,具体结果如下式所示:

$$\text{diag}(\dot{u}_n \dot{u}_n^*) = \text{diag}(\dot{u}_m \dot{u}_m^*) - 2\text{Re}[\text{diag}(\dot{u}_m \dot{i}_n^* z_n^*)] + \text{diag}(z_n \dot{i}_n \dot{i}_n^* z_n^*) \quad (3)$$

针对式(3)中等式左侧,设  $u_n$  为节点  $n$  中各相电压平方形成的矩阵,则

$$u_n = [U_{n,A}^2, U_{n,B}^2, U_{n,C}^2]^T = \text{diag}(\dot{u}_n \dot{u}_n^*) \quad (4)$$

式中:  $U_{n,A}, U_{n,B}, U_{n,C}$  分别为节点  $n$  中 A 相、B 相、C 相的电压幅值。

针对式(3)中等式右侧第二项,在三相模型中有  $\dot{U}_{n,A}/\dot{U}_{n,B} = \alpha k_{1,n}, \dot{U}_{n,A}/\dot{U}_{n,C} = \alpha^2 k_{2,n}, \alpha = e^{j120^\circ}$  和  $k_{1,n}, k_{2,n} \in \mathbb{C}$ , 表征了三相电压之间的不平衡程度。考虑低压台区中支路互阻抗远小于自阻抗,且 VUF 远小于电压幅值,认为  $k_{1,n} = k_{2,n} = 1$ , 则

$$\dot{u}_m \dot{i}_n^* z_n^* = \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ \alpha^2 & 1 & \alpha \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \odot \begin{bmatrix} z_n^{AA} & z_n^{AB} & z_n^{AC} \\ z_n^{BA} & z_n^{BB} & z_n^{BC} \\ z_n^{CA} & z_n^{CB} & z_n^{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{s}_{n,A} \\ \dot{s}_{n,B} \\ \dot{s}_{n,C} \end{bmatrix} \quad (5)$$

针对式(3)中等式右侧第三项,鉴于低压台区内线路网损通常远小于负荷,因此可忽略低压台区内线路损耗。则根据式(4)、式(5)可将式(1)和式(3)简化为

$$\begin{cases} u_n = u_m - 2(r'p_n + x'q_n) \\ P_n = \sum_{o \in O} p_o - p_n \\ Q_n = \sum_{o \in O} q_o - q_n \end{cases} \quad (6)$$

其中  $p_n = \text{Re}(\dot{s}_n)$   $q_n = \text{Im}(\dot{s}_n)$

$$P_n = \text{Re}(\dot{S}_n) \quad Q_n = \text{Im}(\dot{S}_n)$$

$$r' = \text{Re} \left( \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ \alpha^2 & 1 & \alpha \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \odot \begin{bmatrix} z_n^{AA} & z_n^{AB} & z_n^{AC} \\ z_n^{BA} & z_n^{BB} & z_n^{BC} \\ z_n^{CA} & z_n^{CB} & z_n^{CC} \end{bmatrix} \right) \quad (7)$$

$$x' = \text{Im} \left( \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ \alpha^2 & 1 & \alpha \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \odot \begin{bmatrix} z_n^{AA} & z_n^{AB} & z_n^{AC} \\ z_n^{BA} & z_n^{BB} & z_n^{BC} \\ z_n^{CA} & z_n^{CB} & z_n^{CC} \end{bmatrix} \right) \quad (8)$$

将单个节点的三相线性近似模型应用于  $N$  个节点的台区时,需要按节点编号对所有变量矩阵中的元素进行排序。以台区节点电压矩阵  $u$  为例,其形式为

$$\begin{cases} u = [u_1, u_2, \dots, u_n, \dots, u_N]^T \\ u_n = [U_{n,A}^2, U_{n,B}^2, U_{n,C}^2]^T \end{cases} \quad (9)$$

引入支路-节点关联矩阵  $A$ , 令  $W = A \otimes E_3$ , 则将式(6)应用于低压台区中的形式为<sup>[17]</sup>

$$Wu = (1_N \otimes E_3)u_0 + 2rp + 2xq \quad (10)$$

$$\begin{cases} P = W^T p \\ Q = W^T q \end{cases} \quad (11)$$

其中

$$\begin{aligned} r &= [e_1 \otimes r'_1, e_2 \otimes r'_2, \dots, e_n \otimes r'_n] \\ x &= [e_1 \otimes x'_1, e_2 \otimes x'_2, \dots, e_n \otimes x'_n] \end{aligned}$$

式中:  $1_N$  为所有元素全为 1 的  $N \times N$  矩阵;  $u_0$  为台区变压器低压侧电压矩阵; 矩阵  $p, q, P, Q$  的形式均与矩阵  $u$  相同;  $e_n$  为  $E_N$  中的第  $n$  列元素。

将式(11)代入式(10)中,可得低压台区三相线性近似模型为

$$u = (1_N \otimes E_3)u_0 + RP + XQ \quad (12)$$

其中  $R = 2W^{-1}rW^{-T}$   $X = 2W^{-1}xW^{-T}$

由于  $W, r$  和  $x$  的值仅与台区的拓扑参数有关,因此对于拓扑结构和参数固定的台区,  $W, r$  和  $x$  为定值,可采用式(12)通过节点注入功率与电压的近似线性关系计算节点电压。

## 1.2 参数拟合

实际低压台区中量测装置通常未能完全覆盖,因此台区的拓扑结构和线路参数是未知的,无法直接计算参数  $R$  和  $X$ 。然而,由于式(12)为线性方程组,可利用台区内各节点智能电表的电压电流历史观测数据,采用最小二乘法来拟合参数  $R$  和  $X$ 。以  $Z=[R; X]$  为决策变量,无约束的参数拟合模型如下式所示:

$$\min \|ZS - (u - 1_{3N}u_0)\|_2 \quad (13)$$

其中

$$S=[P; Q]$$

式中:  $S$  为智能电表电压电流数据所求得的功率

矩阵。

最终,参数 $Z$ 的计算公式为

$$Z = (\mathbf{u} - \mathbf{1}_{3N} \mathbf{u}_0) \mathbf{S}^T (\mathbf{S} \mathbf{S}^T)^{-1} \quad (14)$$

## 2 低压台区电压协调控制模型

### 2.1 目标函数

#### 2.1.1 节点电压越限程度

节点电压越限程度为某一时刻下各电压越限节点的电压幅值与电压允许值之间差值的和,如下式所示:

$$f_1 = \sum_{n=1}^N \sum_{\varphi \in \phi} U'_{n,\varphi} \quad (15)$$

$$U'_{n,\varphi} = \begin{cases} U_{n,\varphi} - U_{\max} & U_{n,\varphi} > U_{\max} \\ 0 & U_{\min} \leq U_{n,\varphi} \leq U_{\max} \\ U_{\min} - U_{n,\varphi} & U_{n,\varphi} < U_{\min} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $\phi$ 为 $A, B, C$ 三相的集合; $U'_{n,\varphi}$ 为节点 $n$ 中 $\varphi$ 相的电压越限量; $U_{n,\varphi}$ 为电压标么值; $U_{\min}, U_{\max}$ 分别为节点电压最小和最大允许值。

#### 2.1.2 VUF越限程度

VUF越限程度为某一时刻下各VUF越限节点的VUF与其允许值之间差值的和,如下式<sup>[18]</sup>:

$$f_2 = \sum_{n=1}^N VUF'_n \quad (17)$$

$$VUF'_n = \begin{cases} VUF_n - VUF_{\max} & VUF_n > VUF_{\max} \\ 0 & VUF_n < VUF_{\max} \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} VUF_n = \frac{\max\{U_{n,Aa}, U_{n,Ba}, U_{n,Ca}\}}{U_{n,ave}} \times 100\% \\ U_{n,Aa} = |U_{n,A} - U_{n,ave}| \\ U_{n,Ba} = |U_{n,B} - U_{n,ave}| \\ U_{n,Ca} = |U_{n,C} - U_{n,ave}| \\ U_{n,ave} = \frac{U_{n,A} + U_{n,B} + U_{n,C}}{3} \end{cases} \quad (19)$$

式中: $VUF'_n$ 为节点 $n$ 的VUF越限量; $VUF_{\max}$ 为VUF最大允许值; $U_{n,Aa}, U_{n,Ba}$ 和 $U_{n,Ca}$ 分别为节点 $n$ 的 $A$ 相、 $B$ 相、 $C$ 相电压与电压平均值的差值; $U_{n,ave}$ 为节点 $n$ 的电压平均值。

#### 2.1.3 调控设备总出力

调控设备总出力为某一时刻下所有调控设备出力的绝对值之和,如下式所示:

$$f_3 = \sum_{j \in J} |x_j| \quad (20)$$

式中: $j$ 为调控设备编号; $J$ 为所有可调控设备的集合; $x_j$ 为调控设备编号 $j$ 的有功或无功出力。

低压台区电压协调控制多目标优化函数如

下式所示:

$$\min F = [f_1, f_2, f_3] \quad (21)$$

### 2.2 调控设备

PVI因投资费用低、无功出力调节灵活、响应速度快和可频繁调节等优点,逐渐被广泛应用于电压控制领域,其无功调节成本一般约为0.067元/(kvar·h)<sup>[19]</sup>。ESS在日间能够储存过剩的光伏发电能量,避免电压越限,在夜间能够释放有功功率,缓解欠电压现象,达到削峰填谷和电压控制的目的,其有功调节成本约为0.8元/(kW·h)<sup>[19]</sup>。

虽然在阻抗比较大的低压台区中,ESS的有功功率相对于PVI的无功功率对于电压控制的效果更好,但是ESS的调节成本约为PVI调节成本的12倍,其经济性较差,且在低压台区内数量和容量有限,不适合作为电压控制的首要手段。然而,PVI的无功可调容量受逆变器容量和当前光伏有功出力的限制,若单独采用PVI进行电压控制,则在电压严重越限时刻可能会产生可调容量不足的情况,无法将电压控制在允许范围内。

因此,本文采用结合PVI和ESS的两阶段电压协调控制策略。首先,当线路中节点电压或VUF越限时,采用PVI的无功功率进行调压,以充分发挥其经济性优势。当PVI无功出力达到最大可调容量,而电压问题仍未解决时,进入第二阶段控制,通过ESS有功功率来辅助控制节点电压,以解决PVI单独调控的局限性。

### 2.3 约束条件

本文主要考虑了低压台区的功率平衡、PVI和ESS的运行限制,建立了包括节点功率、电压幅值、VUF,PVI出力、ESS状态等方面的约束条件。

#### 1) 节点功率平衡约束:

$$\begin{cases} P_{n,\varphi}(t) = P_{\text{ESS},n,\varphi}(t) + P_{\text{PV},n,\varphi}(t) - P_{\text{Load},n,\varphi}(t) \\ Q_{n,\varphi}(t) = Q_{\text{PVI},n,\varphi}(t) - Q_{\text{Load},n,\varphi}(t) \end{cases} \quad (22)$$

式中: $P_{n,\varphi}(t), Q_{n,\varphi}(t)$ 分别为 $t$ 时刻注入节点 $n$ 中 $\varphi$ 相的有功功率和无功功率; $P_{\text{Load},n,\varphi}(t), Q_{\text{Load},n,\varphi}(t)$ 分别为有功和无功负荷; $P_{\text{PV},n,\varphi}(t)$ 为户用分布式光伏出力; $P_{\text{ESS},n,\varphi}(t)$ 为ESS有功充放电功率; $Q_{\text{PVI},n,\varphi}(t)$ 为PVI无功功率。

#### 2) 电压幅值约束:

$$U_{\min} \leq U_{n,\varphi}(t) \leq U_{\max} \quad (23)$$

式中: $U_{n,\varphi}(t)$ 为电压标么值。

在低压台区中, $U_{\min}$ 和 $U_{\max}$ 分别为0.9(标么值)和1.07(标么值)。

3) VUF约束:

$$VUF_n(t) \leq VUF_{\max} \quad (24)$$

式中:  $VUF_n(t)$  为  $t$  时刻节点  $n$  的电压 VUF;  $VUF_{\max}$  在低压台区中取 2%。

4) PVI无功出力约束:

$$\begin{cases} -Q_{PVI,n,\varphi}^{\max}(t) \leq Q_{PVI,n,\varphi}(t) \leq Q_{PVI,n,\varphi}^{\max}(t) \\ Q_{PVI,n,\varphi}^{\max}(t) = \sqrt{S_{PVI,n,\varphi}^2 - P_{PV,n,\varphi}^2}(t) \end{cases} \quad (25)$$

式中:  $Q_{PVI,n,\varphi}^{\max}(t)$  为 PVI 的最大无功可调容量;  $S_{PVI,n,\varphi}$  为 PVI 的容量, 是光伏额定有功的 1.1 倍。

5) 储能状态约束:

$$\begin{cases} SOC_{\min} \leq SOC_{n,\varphi}(t) \leq SOC_{\max} \\ -P_{ESS}^N \leq P_{ESS,n,\varphi}(t) \leq P_{ESS}^N \\ SOC_{n,\varphi}(t+1) = SOC_{n,\varphi}(t) - \frac{\eta_{ESS} P_{ESS,n,\varphi}(t) \Delta t}{S_{ESS}} \\ SOC_{n,\varphi}(T) = SOC_{n,\varphi}(0) \end{cases} \quad (26)$$

式中:  $SOC_{\max}$ ,  $SOC_{\min}$  分别为  $SOC$  的上、下限, 本文中分别取 80% 和 20%;  $SOC_{n,\varphi}(t)$  为  $t$  时刻注入节点  $n$  中  $\varphi$  相的  $SOC$ ;  $P_{ESS}^N$  为 ESS 额定充放电功率;  $\eta_{ESS}$  为 ESS 充放电效率;  $\Delta t$  为调控时间间隔;  $S_{ESS}$  为 ESS 额定容量;  $T$  为最后一个调控时刻。

## 3 模型求解

### 3.1 改进的多目标粒子群算法

#### 3.1.1 非线性自适应惯性权重

传统的惯性权重取值方法未考虑到当前粒子的特性, 本文采用一种基于当前粒子与种群最优粒子的距离远近的自适应惯性权重变化策略。当距离较远时, 取较大的惯性权重以增强全局搜索能力。而当距离较近时, 取较小的惯性权重以加速局部寻优和提高收敛速度。非线性自适应惯性权重变化公式如下式所示:

$$\begin{cases} w_n^{(k)} = w_{\min} + (w_{\max} - w_{\min}) \sin\left(\frac{\pi}{2} X_n^{(k)}\right) \\ X_n^{(k)} = \frac{1}{x_{\max} - x_{\min}} \frac{1}{D} \sum_{d=1}^D |g_d^{(k)} - x_{n,d}^{(k)}| \end{cases} \quad (27)$$

式中:  $w_n^{(k)}$  为第  $n$  个粒子在第  $k$  次迭代时的惯性权重;  $w_{\min}$ ,  $w_{\max}$  分别为最小、最大惯性权重;  $X_n^{(k)}$  为距离系数;  $D$  为解空间总维数;  $d$  为维数编号;  $g_d^{(k)}$  为种群最优位置向量中第  $d$  维分量;  $x_{n,d}^{(k)}$  为位置向量的第  $d$  维分量。

#### 3.1.2 自适应学习因子

本文设定个体学习因子在迭代初期较大, 以防止多目标粒子群(multiple objective particle swarm

optimization, MOPSO) 算法过早陷入局部最优解, 随着迭代次数的增加而递减。而群体学习因子在迭代初期较小, 以增加 MOPSO 算法的全局搜索能力, 随着迭代次数的增加而逐渐递增, 以提高 MOPSO 算法在迭代后期的收敛速度。自适应学习因子变化公式如下式所示:

$$\begin{cases} c_1 = [(c_{\min} - c_{\max}) \frac{k}{k_{\max}}] + c_{\max} \\ c_2 = [(c_{\max} - c_{\min}) \frac{k}{k_{\max}}] + c_{\min} \end{cases} \quad (28)$$

式中:  $c_1$  为个体学习因子;  $c_2$  为群体学习因子;  $c_{\max}$ ,  $c_{\min}$  分别为学习因子的最大、最小值;  $k$  为当前迭代次数;  $k_{\max}$  为最大迭代次数。

#### 3.1.3 突变操作

为使 MOPSO 算法更好地应对容易陷入局部最优解的困扰, 并在全局搜索中更广泛地寻找潜在解, 本文引入了突变操作。在该操作中, 每个粒子以一定的概率在一个随机的维度上发生突变。如果突变后的粒子支配了突变前的粒子, 那么粒子的位置将被更新。否则, 粒子以 50% 的概率再次尝试突变。如果再次突变后的粒子仍未能支配突变前的粒子, 那么突变将不被接受。

#### 3.1.4 层次分析法和熵权法确定相对最优解

Pareto 最优解集包含了在多个目标函数下都无法改进的解, 因此不存在单一的最优解。在获得 MOPSO 算法的 Pareto 最优解集后, 本文首先采用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)和熵权法(entropy weight method, EWM)对多个目标函数进行权重计算; 其次对 Pareto 解集中各个解的多目标函数值乘以权重后求和, 得出每个解的多目标函数适应度; 最终对所有解的适应度进行排序, 选取适应度最低的解为相对最优解。

AHP 代表了主观权重分配方法, 其主要优点在于能够更合理地根据实际问题 and 主观经验确定权重。然而, 这使得结果更加主观化, 可能与实际数据脱节。另一方面, EWM 代表了客观权重分配方法, 它通过对原始数据进行分析 and 整理, 运用数学方法计算权重, 因此具有较高的客观性。但是它无法反映对不同目标函数的倾向, 容易导致结果与实际情况相矛盾。为了平衡主观和客观权重分配方法的优缺点, 本文将 AHP 和 EWM 的优点相结合, 采用主客观组合权重分配方法。这种方法在尊重客观数据的基础上考虑了决策者的倾向, 3 个目标函数的综合权重计算

公式如下式所示:

$$\omega_i = \frac{\omega_i^{EWM} \cdot \omega_i^{AHP}}{\sum_{i=1}^3 \omega_i^{EWM} \cdot \omega_i^{AHP}} \quad i = 1, 2, 3 \quad (29)$$

式中:  $\omega_i$  为第  $i$  个目标函数的综合权重;  $\omega_i^{EWM}$  为 EWM 计算的第  $i$  个目标函数权重;  $\omega_i^{AHP}$  为 AHP 计算的第  $i$  个目标函数权重。

### 3.2 电压协调控制策略流程

图1为本文所提出的基于数据驱动的含高比例户用光伏低压台区电压协调控制策略流程图。该流程分为3个主要阶段:线性近似模型计算电压、PVI无功电压控制以及ESS有功电压控制。

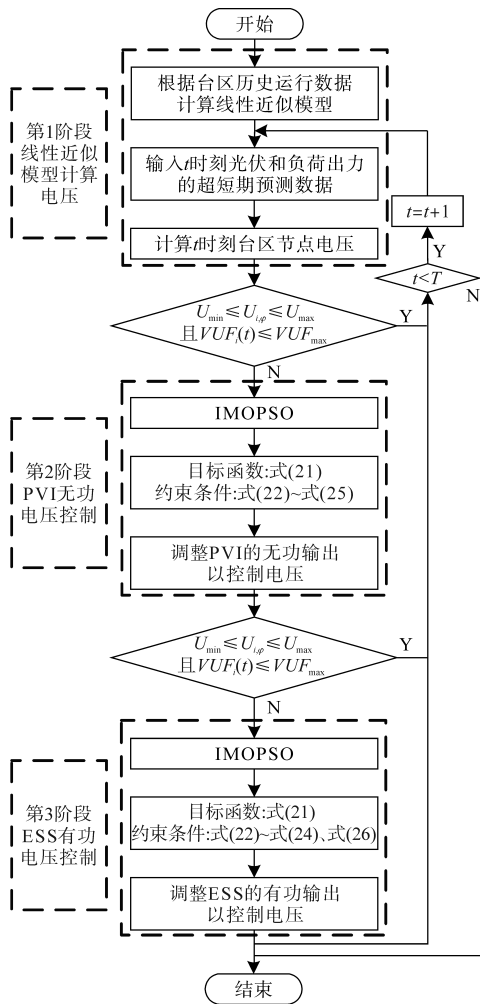


图1 电压协调控制策略流程图

Fig.1 Flow chart of voltage coordination control strategy

## 4 算例分析

### 4.1 参数设置

本文以河北省保定市郊区的21节点高比例户用光伏低压台区作为算例分析的对象。如图2所示,台区内所有单相户用光伏的额定功率为

6.5 kW, PVI容量为光伏额定功率的1.1倍。所有单相ESS的额定容量为20 kW·h, ESS额定充放电功率为4 kW, 充放电效率为0.94。

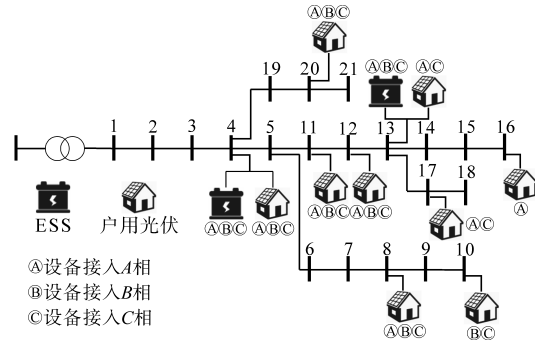


图2 含高比例户用光伏的21节点低压台区

Fig.2 21-node low-voltage distribution networks with high household photovoltaics penetration

需进行调控的典型日光伏和负荷出力超短期预测值如图3所示。光伏出力的基准值为光伏额定功率, 鉴于台区内各节点距离相近, 因此本文假设台区内所有光伏设备的出力相同。各节点各相负荷基准值数据如表1所示。

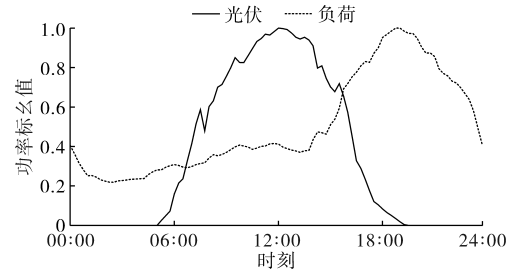


图3 典型日户用光伏和负荷出力曲线

Fig.3 Typical daily residential PV and load output curves

IMOPSO算法参数设置如下:粒子个数为100;粒子维数为21或6;储存库大小为100;每个维度的网格数为30;学习因子为2.5~0.5;最大迭代次数为30;惯性权重为0.95~0.4;变异概率为0.1;3个目标函数的综合权重分别为0.44, 0.39和0.17。

### 4.2 台区三相线性近似模型电压计算误差分析

为验证本文所提台区三相线性近似模型的电压计算准确性, 本文首先从配网主站数据库中提取该台区7天内每天96个时刻的节点三相电压  $U_{\Omega}^a$  和电流  $I_{\Omega}^a$  历史运行数据, 并根据  $U_{\Omega}^a$  和  $I_{\Omega}^a$  计算视在功率  $S_{\Omega}^a$ 。其次, 将前5天的数据记为  $U_{\Omega}^a$  和  $S_{\Omega}^a$ , 利用式(14)计算  $Z$ 。然后将后两天的数据记为  $U_{\Omega}^b$  和  $S_{\Omega}^b$ , 将  $U_{\Omega}^b, S_{\Omega}^b$  和  $Z$  代入式(12), 求出采用台区三相线性近似模型的电压计算值  $U_{\Omega}^b$ 。最后, 计算各节点三相电压实际值与计算值的误差  $\Delta U = U_{\Omega}^b - U_{\Omega}^b$ 。电压计算误差  $\Delta U$  的概率密度分布如图4所示。

表1 台区各节点各相负荷基准值

Tab.1 Reference value of each phase load at each node of distribution network

节点	负荷基准值					
	$P_A/kW$	$Q_A/kvar$	$P_B/kW$	$Q_B/kvar$	$P_C/kW$	$Q_C/kvar$
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	2.20	0.88	1.04	0.42	1.80	0.72
3	1.97	0.79	2.59	1.03	1.58	0.63
4	1.70	0.68	1.43	0.57	1.87	0.75
5	1.49	0.59	1.94	0.78	2.57	1.03
6	0.33	0.13	0.33	0.13	5.15	2.06
7	3.61	1.45	4.44	1.77	3.19	1.28
8	0.33	0.13	2.80	1.12	3.26	1.30
9	0.33	0.13	2.84	1.14	3.43	1.37
10	3.29	1.32	1.57	0.63	1.87	0.75
11	2.34	0.94	2.31	0.92	2.73	1.09
12	0.33	0.13	2.61	1.04	3.30	1.32
13	2.28	0.91	1.55	0.62	2.16	0.86
14	2.05	0.82	0.85	0.34	3.67	1.47
15	0.33	0.13	2.31	0.92	1.87	0.75
16	3.77	0.15	2.45	0.98	0.33	0.13
17	1.41	0.56	2.29	0.91	1.72	0.69
18	0.33	0.13	1.27	0.51	1.01	0.40
19	0.33	0.13	4.04	1.62	3.41	1.36
20	2.05	0.82	3.33	1.33	4.38	1.75
21	3.53	1.41	2.29	0.91	3.17	1.27

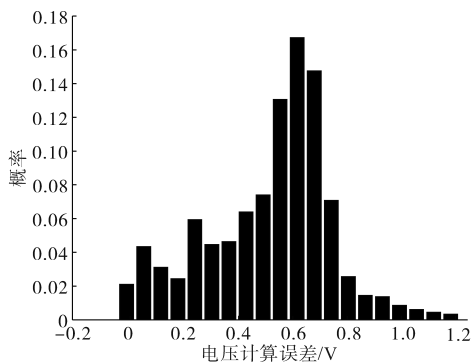


图4 电压计算误差概率密度分布情况

Fig.4 Probability density distribution of voltage calculation error

由图4可知,该模型的电压计算误差均位于0~1.2 V范围内,最大相对误差为0.45%,平均误差为0.447 V。这一结果验证了本文所提出的三相线性近似模型在电压计算方面的准确性。

### 4.3 不同控制策略电压控制效果分析

本文采用不同电压控制策略对电压控制效

表2 不同电压控制策略

Tab.2 Different voltage control strategies

电压控制策略	
策略1	无控制
策略2	本文所提协调控制策略
策略3	单独PVI无功电压控制
策略4	单独ESS有功电压控制
策略5	以电压偏差和VUF偏差最小为目标函数的本文所提控制策略

果进行分析,不同电压控制策略如表2所示,各个电压控制策略的电压控制效果如表3所示。

表3 不同电压控制策略的控制效果

Tab.3 Control effects of different voltage control strategies

	策略1	策略2	策略3	策略4	策略5
电压越限次数	1 277	0	253	1 121	0
电压越限总量 (标么值)	22.9	0	2.3	18.9	0
VUF越限次数	641	0	0	487	0
VUF越限总量/%	411.3	0	0	237.7	0
PVI总出力/kvar	0	1 377.4	1 377.4	0	5 609.1
ESS总出力/kW	0	42.28	0	346.6	204.3
电压控制成本/元	0	126.1	92.3	277.3	544.8

#### 4.3.1 策略1与策略2对比分析

图5~图8分别为无控制时和采用策略2控制时台区21节点96个时刻的三相电压和VUF情况。从图5中可以看出,在时段11:00—13:30,ABC三相电压均越限,如图5中平面1的上方部分所示,最大电压值为1.13(标么值)。在夜晚20:00时左右,如图5中平面2的下方部分所示,B,C相电压越下限,最小电压值达到0.86(标么值)。同时,在时段10:00—22:30均会出现VUF越限问题,如图7中平面1的上方部分所示,最大值为3.63%。

由图6和图8可以看出,本文所提方案能够有效地抑制电压越限和VUF越限情况。

#### 4.3.2 策略2与策略3和策略4对比分析

根据表3的数据可以看出,在采用策略3进行电压控制后,仍然发生了253次电压越限情况,PVI出力情况如图9所示。在采用策略4进行电压控制后,相较于无控制时,电压越限总量(各时段越限节点数的累计和)和VUF越限总量仅降低了17.47%和42.21%,储能SOC变化情况如图10所示。

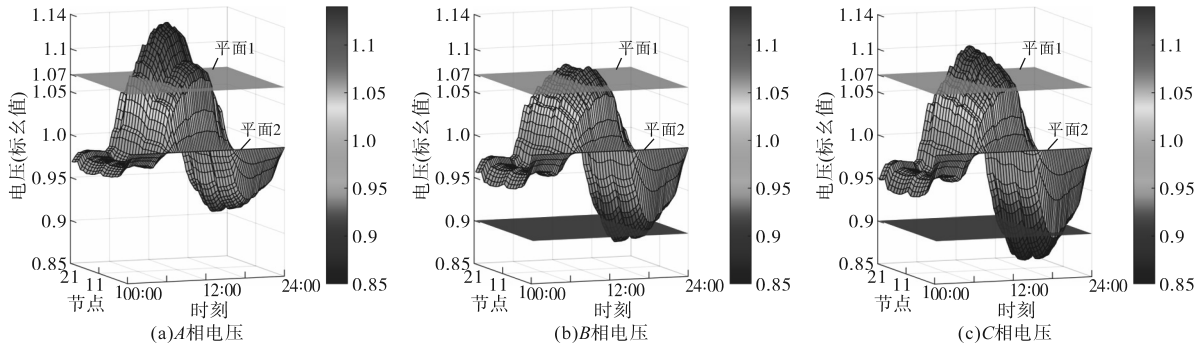


图5 无控制时台区节点电压情况

Fig.5 Node voltage situation in the station area without control

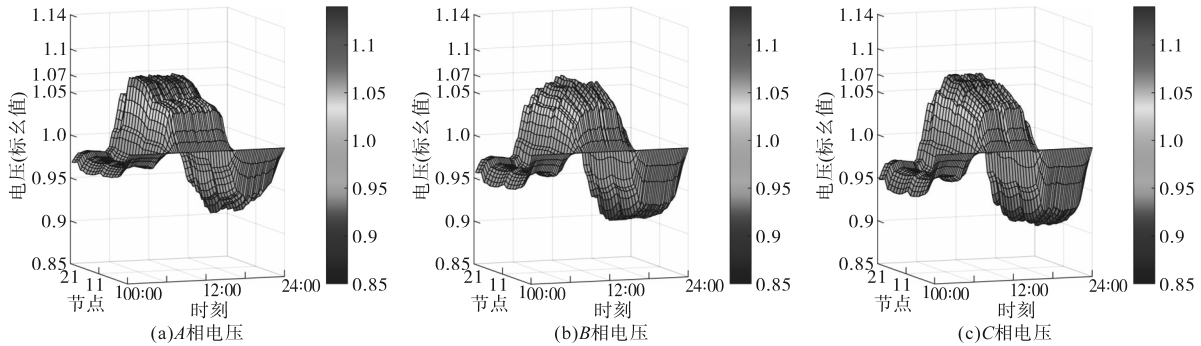


图6 采用控制策略2时台区节点电压情况

Fig.6 Node voltage in the station area when using control strategy 2

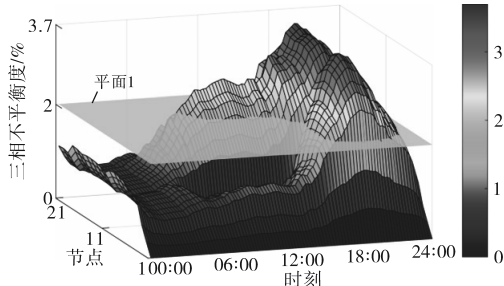


图7 无控制时台区节点VUF情况

Fig.7 VUF situation of nodes in the station area when there is no control

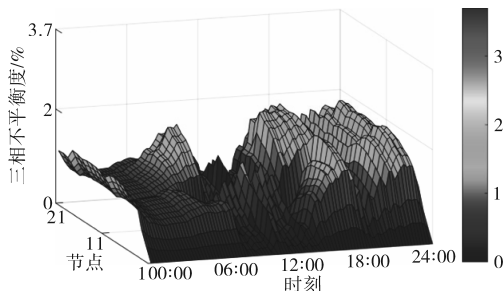


图8 采用策略2控制时台区节点VUF情况

Fig.8 VUF situation of nodes in the station area when using strategy 2 to control

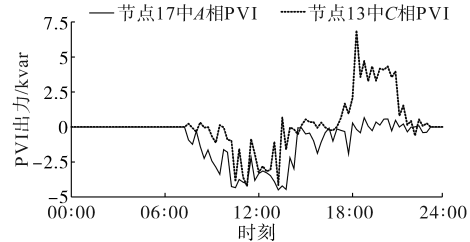


图9 采用策略3控制时PVI出力情况

Fig.9 PVI output when using strategy 3 control

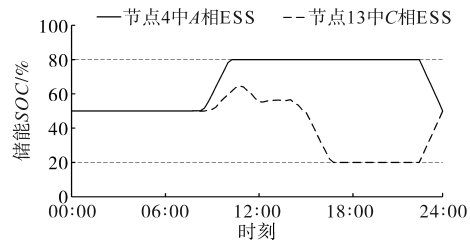


图10 采用策略4控制时储能SOC情况

Fig.10 Energy storage SOC situation when using strategy 4 control

观察到,两个ESS的SOC分别在时刻10:00和时刻16:30达到其上限和下限,因此无法再继续释放或吸收功率以进行电压控制,导致策略4的调控能力有限。

策略2不仅能够弥补PVI和SOC的不足,在电压控制效果方面更为出色,而且在经济性方面,与控制策略4相比,电压控制成本更低。

#### 4.3.3 策略2与策略5对比分析

策略5虽然能够将电压和VUF完全控制在

从图9中可以看出,在时刻12:00附近光伏发电的出力达到最大值,PVI的出力被限制,远低于时刻18:00的PVI出力,这导致PVI难以在该时刻将电压控制在允许的范围。从图10中可以

允许范围内,但与策略2相比,电压控制成本是其4.32倍。进一步验证了本文提出的目标函数既能够满足电压控制的要求,又能够降低调控成本,提高控制策略的经济性。

#### 4.4 不同求解方法收敛性分析

针对时刻9:45,分别使用MOPSO算法和IMOPSO算法进行计算。在第10次迭代时,Pareto解集的分布如图11和图12所示。

从图12中可以观察到,IMOPSO算法在搜索精度上表现更出色,具有更快的收敛速度,其Pareto解集的多样性更佳,分布更均匀。

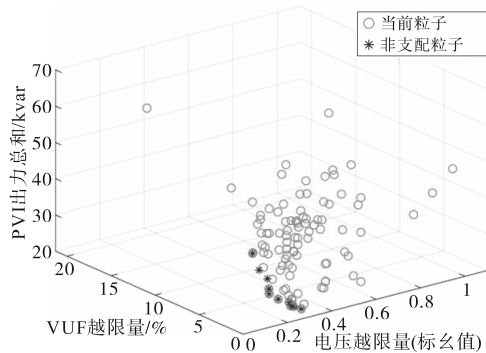


图11 MOPSO算法的Pareto解集分布

Fig.11 Pareto solution set distribution of MOPSO

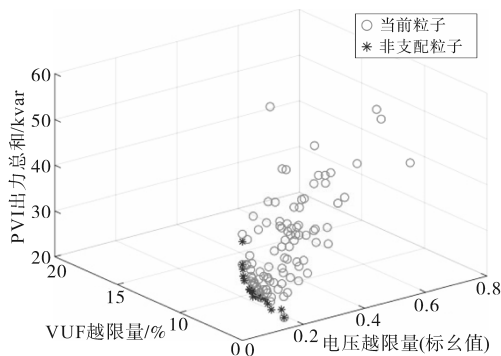


图12 IMOPSO算法的Pareto解集分布

Fig.12 Pareto solution set distribution of IMOPSO

#### 4.5 潮流计算与线性近似模型计算速度分析

策略6是在策略2的基础上,已知台区拓扑参数,采用潮流计算来求出节点电压的控制策略。策略2和策略6在典型日采用IMOPSO算法进行单一时刻电压控制的计算时间分别为5.74 s和38.3 s。策略2计算时间仅为策略6的14.9%,更适用于多节点个数短时间间隔的电压控制问题。

## 5 结论

本文针对拓扑未知的含高比例户用光伏低压台区电压协调控制策略问题展开了研究,得出如下结论:

1)建立了台区三相线性近似模型,通过数据驱动的方式,有效地拟合了节点注入功率和电压之间的映射关系,解决了因台区拓扑未知、无法进行潮流计算而无法将控制策略应用于低压台区的问题。该模型的电压计算平均误差仅为0.2%,并且相较于潮流计算,计算速度提高了85.1%。

2)所提出的电压协调控制策略充分结合了PVI的经济性优势和ESS的灵活性优势,成功弥补了单独采用PVI或ESS进行电压控制时的局限性。在本文的算例中,这一策略能够完全抑制台区内电压越限和三相不平衡问题。

3)电压调控目标函数综合考虑了电压越限程度、VUF越限程度和调控设备出力,仿真结果表明,该目标函数既保障了台区内电压的稳定性,又降低了调控成本54.5%。

4)对MOPSO算法进行了多方面改进,更好地平衡了算法的全局搜索能力和局部搜索能力,避免陷入局部最优,加快了收敛速度,显著提高了算法的性能。

#### 参考文献

- [1] 杨重伟,梁旭,毛岚.基于高比例光伏接入低压系统的电压控制研究[J].电气传动,2022,52(8):60-67.  
YANG Chongwei, LIANG Xu, MAO Lan. Research on voltage control of low voltage system based on high-proportion photovoltaic access[J]. Electric Drive, 2022, 52(8): 60-67.
- [2] 周洪伟,罗锐,刘永奎,等.光伏电站多并网逆变器无功电压控制[J].电气传动,2019,49(4):83-88.  
ZHOU Hongwei, LUO Rui, LIU Yongkui, et al. Reactive power and voltage control of multi-grid-connected inverter in photovoltaic power station[J]. Electric Drive, 2019, 49(4): 83-88.
- [3] 张博,唐巍,蔡永翔,等.基于一致性算法的户用光伏逆变器和储能分布式控制策略[J].电力系统自动化,2020,44(2):86-94.  
ZHANG Bo, TANG Wei, CAI Yongxiang, et al. Distributed control strategy of residential photovoltaic inverter and energy storage based on consensus algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2): 86-94.
- [4] 李志军,梁其琛,张家安.基于储能有功与OLTTC协调的配电网电压控制[J].南方电网技术,2024,18(6):89-97.  
LI Zhijun, LIANG Qichen, ZHANG Jiaan. Voltage control of distribution network based on coordination of energy storage active power and OLTTC[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(6): 89-97.
- [5] 蔡永翔,唐巍,张博,等.含高比例户用光伏低压配电网集中-就地两阶段电压-无功控制[J].电网技术,2019,43(4):1271-1280.  
CAI Yongxiang, TANG Wei, ZHANG Bo, et al. A two-stage

- volt-var control in LV distribution networks with high proportion of residential PVs[J]. Power System Technology, 2019, 43(4):1271-1280.
- [6] 付宇,白浩,李跃,等.面向高比例光伏消纳的低压交直流混合配电网时-空协调优化方法[J].南方电网技术,2023,17(1):84-93.  
FU Yu, BAI Hao, LI Yue, et al. Spatial-temporal coordinated optimization method of low voltage hybrid AC/DC distribution network for accommodation of high-proportion PVs[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(1):84-93.
- [7] 李翠萍,东哲民,李军徽,等.提升配电网新能源消纳能力的分布式储能集群优化控制策略[J].电力系统自动化,2021,45(23):76-83.  
LI Cuiping, DONG Zhemin, LI Junhui, et al. Optimal control strategy of distributed energy storage cluster for prompting renewable energy accommodation in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(23):76-83.
- [8] 马兴,徐瑞林,康文发,等.含分布式光伏、储能的低压配电网电压调节及储能SOC均衡方法[J].重庆大学学报,2022,45(5):9-20.  
MA Xing, XU Ruilin, KANG Wenfa, et al. Voltage regulation and battery energy storage SOC balancing method for low voltage distribution network with distributed PV and BESS[J]. Journal of Chongqing University, 2022, 45(5):9-20.
- [9] 闫佳琪.低压配电网中分布式光储系统的电压协调控制策略[D].吉林:东北电力大学,2023.  
YAN Jiaqi. Voltage coordinated control strategy for distributed photovoltaic-energy storage system in low-voltage distribution networks[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2023.
- [10] 唐巍,蔡永翔,徐鸥洋.低压配电网高比例户用光伏消纳技术研究综述[J].供用电,2017,34(10):2-7.  
TANG Wei, CAI Yongxiang, XU Ouyang. Review of accommodation strategies of high proportion residential photovoltaics in low voltage distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(10):2-7.
- [11] 吴科成,高志华,刘瑞宽,等.考虑分布式储能功率四象限输出的主动配电网鲁棒优化调度模型[J].南方电网技术,2021,15(11):75-84.  
WU Kecheng, GAO Zhihua, LIU Ruikuan, et al. Robust optimal scheduling model of active distribution network considering four-quadrant output of distributed energy storage power[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(11):75-84.
- [12] 姜飞,林政阳,何桂雄,等.基于动态一致性算法的光伏-储能分布式协调电压控制[J].天津大学学报,2021,54(12):1299-1308.  
JIANG Fei, LIN Zhengyang, HE Guixiong, et al. Coordinated voltage control of distributed photovoltaic-energy-storage systems based on a dynamic consensus algorithm[J]. Journal of Tianjin University, 2021, 54(12):1299-1308.
- [13] 唐巍,李天锐,张璐,等.基于三相四线制最优潮流的低压配电网光伏-储能协同控制[J].电力系统自动化,2020,44(12):31-40.  
TANG Wei, LI Tianrui, ZHANG Lu, et al. Coordinated control of photovoltaic and energy storage system in low-voltage distribution networks based on three-phase four-wire optimal power flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(12):31-40.
- [14] 徐晓春,李佑伟,戴欣,等.基于深度强化学习的馈线-台区两阶段电压优化[J].电网与清洁能源,2023,39(3):63-73.  
XU Xiaochun, LI Youwei, DAI Xin, et al. Two stage voltage optimization of feeder-station area based on deep reinforcement learning[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(3):63-73.
- [15] 张宇精,乔颖,鲁宗相,等.含高比例分布式电源接入的低感知度配电网电压控制方法[J].电网技术,2019,43(5):1528-1535.  
ZHANG Yujing, QIAO Ying, LU Zongxiang, et al. Voltage control for partially visible distribution networks with high DG penetration[J]. Power System Technology, 2019, 43(5):1528-1535.
- [16] KAREN B P. Distribution system modeling and analysis[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2013, 11(3):106-108.
- [17] KETATOS V, ZHANG L, GIANNAKI G B, et al. Voltage regulation algorithms for multiphase power distribution grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5):3913-3923.
- [18] 黄文帅,孙坚,胡鹏程,等.配电网中三相不平衡度计算方法研究[J].信息技术与信息化,2022(12):174-177.  
HUANG Wenshuai, SUN Jian, HU Pengcheng, et al. Research on calculation method of three-phase unbalance in distribution network[J]. Information Technology and Informatization, 2022(12):174-177.
- [19] 任耀宇.面向分布式能源接入的配电网优化[D].北京:华北电力大学,2021.  
REN Yaoyu. Distribution network optimization for distributed energy access[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.

收稿日期:2023-11-09

修改稿日期:2023-12-08