

含高比例分布式光伏的主动配电网 分区电压控制

张磊¹, 王凌谊², 赵爽², 纳智敏¹, 张勇¹, 刘志坚³, 虞忠明^{3*}

(1. 云南电网有限责任公司 曲靖供电局, 云南 曲靖 655099;

2. 云南电网有限责任公司规划建设研究中心, 云南 昆明 650011;

3. 昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650504)

Active Distribution Network Partition Voltage Control with High Proportion of Distributed Photovoltaic

ZHANG Lei¹, WANG Lingyi², ZHAO Shuang², NA Zhimin¹, ZHANG Yong¹,

LIU Zhijian³, YU Zhongming^{3*}

(1. Qujing Power Supply Bureau, GCS Yunnan Power Grid Corporation, Qujing 655099, China;

2. Planning and Construction Research Center of GCS Yunnan Power Grid Corporation, Kunming 650011, China;

3. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology,
Kunming 650504, China)

Abstract: [Objective] The high proportion of distributed photovoltaic (DPV) integration changes the operation of the active distribution network (ADN), and the randomness and volatility of PV output leads to excessive active losses, increased voltage fluctuations, and unbalanced reactive power allocation in the distribution network. Therefore, this paper proposes a network partition voltage control method based on improved electrical distance, aiming to achieve partition voltage control for ADN with high proportion DPV.

[Methods] In view of the large scale and high computational complexity of the decision variables and constraints of the centralized voltage optimization model in a high percentage of PV scenarios, this paper firstly proposed a network partition method based on the improvement of the electrical distance, which divided the ADN into multiple controllable sub-regions to reduce the solution scale. Secondly, a distributed voltage control strategy was designed for the voltage coordination problem at the boundary nodes of adjacent sub-region in the partition. Finally, a distributed solution method based on the slime mold algorithm was used to achieve an efficient solution for this strategy. [Results] Simulation verification was carried out using the IEEE 33 node model and a 199 node

real system in the Qujing of Yunnan Province. The results showed that the proposed partition-based distributed voltage control optimization method not only effectively maintained the system voltage level, but also its distributed solution efficiency was significantly better than the centralized optimization method. [Conclusion] The proposed method successfully realizes the cooperative control of voltage in each sub-region and effectively maintains the system voltage level.

Key words: distributed photovoltaic; active distribution network; network partition; slime mold algorithm; voltage control

摘要:【目的】高比例分布式光伏(DPV)接入改变了主动配电网(ADN)的运行方式,PV出力的随机性和波动性,导致配电网出现有功损耗过大、电压波动增大以及无功配置不均衡等问题。因此,本文提出了一种基于改进电气距离的网络分区电压控制方法,旨在实现含高比例DPV的ADN的分区电压控制。【方法】鉴于集中式电压优化模型在高比例DPV场景下决策变量与约束条件规模庞大、计算复杂度过高,本文首先提出基于改进电气距离的网络分区方法,将ADN划分为多个可控子区域以降低求解规模;其次,针对分区中相邻子区域边界节点的电压协调问题,设计了一种分布式电压控制策略;最后,采用基于黏菌算法的分布式求解方法实现该策略的高效求解。【结果】利用IEEE 33节点模型和云南曲靖的199节

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB2703500)

National Key Research and Development Program of China
(2022YFB2703500)

点真实系统进行仿真验证。结果表明,所提基于分区的分布式电压控制优化方法不仅能有效维持系统电压水平,其分布式求解效率也显著优于集中式优化方法。【结论】所提方法成功实现了各子区域电压的协同控制,有效维持了系统电压水平。

关键词: 分布式光伏; 主动配电网; 网络分区; 黏菌算法; 电压控制

0 引言

随着“碳达峰、碳中和”目标的推进,我国电力系统开始逐渐摆脱对传统能源的依赖,转而拥抱清洁能源^[1]。同时,由于国家对光伏(Photovoltaic, PV)下乡政策的扶持,配电网中 PV 呈现快速增长趋势,使得传统配电网向主动配电网(Active Distribution Networks, ADN)转型。然而,由于分布式电源出力存在不确定性及部分地区超高的 PV 渗透率等问题,给 ADN 的运行和控制带来了新的挑战^[2-4]。例如,ADN 频繁出现电压波动^[5-6]、功率倒送^[7-8]以及三相不平衡^[9-10]等。因此,对于含高比例分布式光伏(Distributed PV, DPV)的 ADN,维持其电压稳定是一个亟待解决的问题。

目前,国内外学者围绕 ADN 的电压稳定问题开展了广泛研究。传统的 ADN 电压控制多依赖集中式策略,即通过限制 DPV 出力和调整储能系统(Energy Storage System, ESS)的充放电策略来维持电压稳定。文献[11]设计了一种基于混合式变压器的鲁棒模型预测控制方法,在系统参数发生扰动时可增强电压控制的鲁棒性。然而,集中式控制普遍面临调度周期长、通信依赖高以及控制复杂度高问题。尤其在 DPV 渗透率不断提高的背景下,传统控制方法难以应对输出功率波动显著增加所带来的实时协调压力^[12-14],集中式控制的适用性逐步下降。

为降低控制复杂度,电压分区控制成为重要研究方向。目前主流方法多基于 K-means 算法、谱聚类算法、免疫算法以及复杂网络理论对配电网进行区域划分,从而实现分布式电压控制^[15-16]。这类方法通过缩小调控范围,显著提升了高渗透率 DPV 场景下的 ADN 电压稳定性^[17-20]。进一步地,研究开始在分区依据中引入

更多物理和时序特征。文献[21]融合功率平衡与电气距离指标实现更合理的网络划分。文献[22]引入 DPV 和风力发电的时序出力特性,以增强分区控制对负荷波动的适应性。文献[23]基于功率与电气距离实现分布式电源的有效消纳。文献[24]在分区算法中引入模块化思想,提升分区均衡性,避免 DPV 容量配置过于集中或稀疏。

尽管现有分区控制方法取得了一定成效,但仍面临三方面挑战。第一,分区方法多依赖静态拓扑结构进行网络划分,缺乏对 DPV 动态出力引发电气状态变化的响应机制^[15-16,22]的研究,尤其在高渗透率场景下可能引发分区失效与电压振荡;第二,部分研究虽提出考虑功率流和区域容量的划分原则,但缺乏明确的区域边界协调机制,难以应对子区域耦合导致的电压失配问题^[21,24-25];第三,ADN 电压控制模型本身具有显著的非线性与不确定性特征,涉及大量结构变量和约束,随着系统规模的扩大,其数学模型将转化为时空耦合的混合整数非线性规划问题^[26],模型的求解复杂度呈指数级增长^[27],严重制约实际工程的应用效率。

因此,如何提升复杂优化模型的求解效率成为当前研究的重点方向。元启发式算法因其对非线性、多峰和非凸问题的良好适应性而被广泛应用于分布式优化中。其中,粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法、灰狼优化(Grey Wolf Optimization, GWO)算法等已在 ADN 调控中取得初步成果^[28],但仍面临陷入局部最优与搜索效率较低的问题。黏菌算法(Slime Mould Algorithm, SMA)具备较强的全局搜索能力和较低的计算成本,在多模态优化环境中具有优越性,为解决 ADN 分区控制问题提供了新的技术路径。

综上,针对含高比例 DPV 的 ADN 的电压控制问题,本文提出了一种基于改进电气距离的分区优化控制策略。首先,构建以网络损耗最小化和节点电压偏差最小化为目标的分布式电压控制模型,融合 PV 出力、储能调节与二阶锥松弛潮流约束,确保 ADN 的安全运行;其次,提出基于改进电气距离的模块化分区方法,通过动态耦合电气特性与功率平衡,显著降低计算复杂度;最后,设计基于 SMA 的分布式求解机制,仅依赖边界子区域信息交换实现高效自治优化。经 IEEE 33 节点

模型及云南曲靖 199 真实节点系统验证,所提方法在维持电压稳定性的同时,求解效率较集中式方法有所提升。

1 ADN 电压优化建模

1.1 电压控制优化目标函数

将网络损耗最小化和节点电压偏差最小化作为优化目标,如式(1)所示:

$$\min F = \sum_{t \in T} \sum_{ij \in E} (r_{ij} I_{ij,t}^2) + \sum_{t \in T} \sum_{j \in B} (V_{j,t}^2 - V_{j,t,\text{ref}}^2)^2 \quad (1)$$

式中: F 为目标函数; E 为所有支路的集合; B 为所有节点的集合; T 为总时长。 r_{ij} 、 I_{ij} 分别为节点 i 、 j 间的阻抗、电流; $V_{j,t}$ 、 $V_{j,t,\text{ref}}$ 分别为 t 时刻节点 j 的电压、电压参考值。

1.2 ADN 运行约束条件设计

Distflow 潮流约束条件为

$$\begin{cases} P_j = \sum_{k \in \delta(j)} P_{jk} - \sum_{i \in \varphi(j)} (P_{ij} - I_{ij}^2 R_{ij}) + g_j V_j^2, \forall j \in B \\ Q_j = \sum_{k \in \delta(j)} Q_{jk} - \sum_{i \in \varphi(j)} (Q_{ij} - I_{ij}^2 x_{ij}) + b_j V_j^2, \forall j \in B \end{cases} \quad (2)$$

$$V_j^2 = V_i^2 - 2(P_{ij} R_{ij} + Q_{ij} x_{ij}) + I_{ij}^2 (R_{ij}^2 + x_{ij}^2), \forall ij \in E \quad (3)$$

$$I_{ij}^2 = \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{V_i^2}, \forall ij \in E \quad (4)$$

式中: $\delta(j)$ 为所有从节点 j 出发的支路所连接的下游节点 k 的集合; $\varphi(j)$ 为所有指向节点 j 的支路所连接的上游节点 i 的集合; P_j 、 Q_j 分别为节点 j 的有功功率、无功功率; P_{ij} 、 Q_{ij} 分别为从节点 i 流向节点 j 的有功功率、无功功率; R_{ij} 、 g_{ij} 、 x_{ij} 和 b_{ij} 分别为节点 i 、 j 间的电阻、电导、电抗和电纳; V_i 、 V_j 为节点 i 、 j 的电压。

在 ADN 中,流入节点 i 的净有功功率总和、净无功功率总和 $P_{i,\text{total}}$ 、 $Q_{i,\text{total}}$ 满足:

$$\begin{cases} P_{i,\text{total}} = P_i + P_{\text{PV},i} - P_{\text{load},i} \\ Q_{i,\text{total}} = Q_i + Q_{\text{PV},i} + Q_{\text{SC},i} - Q_{\text{load},i} \end{cases} \quad (5)$$

式中: P_i 、 Q_i 分别为节点 i 的有功功率、无功功率; $P_{\text{PV},i}$ 、 $Q_{\text{PV},i}$ 分别为节点 i 上 DPV 的有功功率、无功功率输出量; $P_{\text{load},i}$ 、 $Q_{\text{load},i}$ 分别为节点 i 上负荷的有功功率、无功功率吸收量; $Q_{\text{SC},i}$ 为节点 i 上 ESS 的无功功率。

为提高求解效率,使用二阶锥规划理论对式(4)进行松弛:

$$\left\| \begin{matrix} 2P_{ij} \\ 2Q_{ij} \\ \tilde{I}_{ij} - \tilde{V}_j \end{matrix} \right\|_2 \leq \tilde{I}_{ij} + \tilde{V}_j \quad (6)$$

式中: $\tilde{I}_{ij}$ 为支路 ij 的电流有效值; $\tilde{V}_j$ 为节点 j 的电压有效值。

配电网运行安全约束条件为

$$\begin{cases} V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \\ I_{ij} \leq I_{ij}^{\max} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $V_i^{\max}$ 、 $V_i^{\min}$ 分别为节点 i 电压的安全上限、下限; $I_{ij}^{\max}$ 为支路 ij 的电流安全上限。

DPV 需要通过逆变端口接入 ADN 中,DPV 的接入可以减少长距离输电带来的有功功率损耗,同时也可以输出无功功率参与系统电压调节。DPV 需满足约束条件:

$$\begin{cases} P_{\text{PV},i,t}^{\min} \leq P_{\text{PV},i,t} \leq P_{\text{PV},i,t}^{\max} \\ Q_{\text{PV},i,t} \leq |Q_{\text{PV},i,t}^{\max}| \\ Q_{\text{PV},i,t}^{\max} = \sqrt{(S_{\text{PV},i,t})^2 - (P_{\text{PV},i,t})^2} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $P_{\text{PV},i,t}$ 、 $Q_{\text{PV},i,t}$ 分别为时段 t 内节点 i 上 DPV 的有功功率、无功功率输出量; $P_{\text{PV},i,t}^{\min}$ 、 $P_{\text{PV},i,t}^{\max}$ 分别为时段 t 内节点 i 上 DPV 的最小、最大有功功率输出限值; $Q_{\text{PV},i,t}^{\max}$ 为时段 t 内节点 i 上 DPV 的最大无功功率输出限值; $S_{\text{PV},i,t}$ 为时段 t 内节点 i 上逆变器端口可输出的容量。

ESS 需满足约束条件:

$$\begin{cases} v_{j,t}^{\text{ch}} P_j^{\text{ch},\min} \leq P_{j,t}^{\text{ch}} \leq v_{j,t}^{\text{ch}} P_j^{\text{ch},\max} \\ v_{j,t}^{\text{dis}} P_j^{\text{dis},\min} \leq P_{j,t}^{\text{dis}} \leq v_{j,t}^{\text{dis}} P_j^{\text{dis},\max} \\ v_{j,t}^{\text{ch}} + v_{j,t}^{\text{dis}} \leq 1 \\ C_{j,t} = C_{j,t-1} + (P_{j,t}^{\text{ch}} \delta_j^{\text{ch}} - P_{j,t}^{\text{dis}} \delta_j^{\text{dis}}) \Delta t / E_j^e \\ C_j^{\min} \leq C_{j,t} \leq C_j^{\max} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $v_{j,t}^{\text{ch}}$ 、 $v_{j,t}^{\text{dis}}$ 分别为时段 t 内节点 j 处 ESS 的充电、放电状态; $P_j^{\text{ch},\max}$ 、 $P_j^{\text{ch},\min}$ 和 $P_j^{\text{dis},\max}$ 、 $P_j^{\text{dis},\min}$ 分别为节点 j 处 ESS 充电和放电功率的上、下限; $P_{j,t}^{\text{ch}}$ 、 $P_{j,t}^{\text{dis}}$ 分别为时段 t 内节点 j 处 ESS 的充电、放电功率; δ_j^{ch} 、 δ_j^{dis} 分别为充电、放电效率; $C_{j,t}$ 、 $C_{j,t-1}$ 分别为 t 时刻、 $t-1$ 时刻的荷电状态; E_j^e 为额定能量容量; $C_j^{\min}$ 、 $C_j^{\max}$ 分别为最大、最小荷电状态。

静止无功补偿器 (Static Var Compensator,

SVC) 需满足约束条件:

$$Q_{i,SVC}^{\min} \leq Q_{i,SVC} \leq Q_{i,SVC}^{\max} \quad (10)$$

式中: $Q_{i,SVC}$ 为节点 i 处 SVC 所发出的无功功率; $Q_{i,SVC}^{\min}$ 、 $Q_{i,SVC}^{\max}$ 分别为节点 i 处 SVC 所发出的最小、最大无功功率。

电压分区渗透率 θ_c 需满足约束条件:

$$\theta_c = \frac{\sum_{i=1}^{N_k^n} S_i^{\text{DPV}}}{\sum_{i=1}^{N_k^n} S_i^{\max}} \quad (11)$$

式中: N_k^n 为电压分区 k 内负荷节点数目; $S_i^{\max}$ 为分区 k 内的节点 i 处的负荷视在功率峰值; S_i^{DPV} 为节点 i 处 DPV 配置容量。

各电压分区内的 DPV 总配置容量应根据电压分区内的负荷总量进行确定, 并根据电压分区容量渗透率的约束, 对电压分区内的 DPV 总配置容量进行限制。

2 分区协调的分布式电压控制策略

2.1 基于改进电气距离的分区边界划分方法

假设所划分的 ADN 区域不重叠, 采用文献 [29] 的方法简化解耦区域耦合, 每个子区域通过联络线 ij 连接, 根据式 (5) 更新交换功率。当忽略边界支路的功率损失时, 联络线的损耗可忽略不计, 且不同分区间联络线上的功率损失对整体划分结果影响较小。

利用电压灵敏度 α 来反映电网中不同节点电压对 DPV 注入功率的响应特性, 根据文献 [30] 定义 ADN 中任意两节点 m 、 n 间的电气距离 d_{mn} :

$$d_{nm} = d_{mn} = -\ln(\alpha_{nm}\alpha_{mn}) \quad (12)$$

在以往研究中, 电网分区数量通常预先指定, 但这无法得到分布式模型的最佳结果。本文将电网分区初始时所有节点独立分区, 然后通过合并子区域形成新的分区。根据式 (13) ~ 式 (18), 将两个子分区组合计算综合指数, 选取综合指数最大值的组合结果。当综合指数达到最大值时, 停止合并操作, 从而确定最优分区数。ADN 分区将每个子分区视为节点, 节点间通过联络线连接, 联络线的模块度函数为

$$A_{mn}^L = \begin{cases} 1, & m, n \in E \\ 0, & m, n \notin E \end{cases} \quad (13)$$

$$A_{mn} = \begin{cases} 1 - \frac{d_{mn}}{\max(d_{mn})}, & d_{mn} \neq 0 \\ 0, & d_{mn} = 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中: A_{mn}^L 、 A_{mn} 分别为节点 m 、 n 间的电气连接权重系数、电气距离权重系数。

因此, 可得改进电气距离模块度函数 ρ 为

$$\rho = \frac{1}{\sum_m \sum_n A_{mn}^L} \times \sum_m \sum_n \left[A_{mn} - \frac{\sum_n A_{mn} \cdot \sum_m A_{mn}}{\sum_m \sum_n A_{mn}} \right] \delta(m, n) \quad (15)$$

式中: 节点 m 、 n 在相同分区时, $\delta(m, n) = 1$, 否则 $\delta(m, n) = 0$ 。

2.2 分区综合评估指标体系

2.2.1 功率平衡指标

ADN 正常运行时, 应避免各分区 DPV 数量不均衡, 以及电能浪费或不足。为此, 本文引入功率平衡指标, 用于判断有功功率、无功功率在各分区中的分布合理性。假设 ADN 被划分为 N 个分区, 功率平衡可表示为

$$\varphi^P = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{a=1}^N \frac{P_a^{\text{gen}}}{P_a^{\text{dem}}}, & P_a^{\text{gen}} < P_a^{\text{dem}} \\ 1, & P_a^{\text{gen}} \geq P_a^{\text{dem}} \end{cases} \quad (16)$$

$$\varphi^Q = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{a=1}^N \frac{Q_a^{\text{gen}}}{Q_a^{\text{dem}}}, & Q_a^{\text{gen}} < Q_a^{\text{dem}} \\ 1, & Q_a^{\text{gen}} \geq Q_a^{\text{dem}} \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} P_a^{\text{dem}} = P_a^L, a = 1, 2, \dots, N \\ P_a^{\text{gen}} = P_{a, \text{DPV}} + P_{a, P_i}, a = 1, 2, \dots, N \\ Q_a^{\text{dem}} = Q_a^L, a = 1, 2, \dots, N \\ Q_a^{\text{gen}} = Q_{a, \text{DPV}} + Q_{a, P_i}, a = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (18)$$

式中: P_a^{gen} 、 Q_a^{gen} 分别为第 a 个分区中发电机发出的有功功率、无功功率; φ^P 、 φ^Q 分别为有功平衡、无功平衡指标; P_a^L 、 Q_a^L 分别为第 a 个分区内负载的有功功率、无功功率; $P_{a, \text{DPV}}$ 、 $Q_{a, \text{DPV}}$ 分别为第 a 个分区内 DPV 产生的有功功率、无功功率; P_{a, P_i} 、 Q_{a, P_i} 分别为第 a 个分区内第 i 个电源的有功功率、无功功率; P_a^{dem} 、 Q_a^{dem} 分别为第 a 个分区中所需要的有功功率、无功功率。

2.2.2 计算复杂度

网络分区时需考虑各子区域的计算时间。计算复杂度函数可根据约束和决策变量的数量处理,即基于决策变量和约束数目分析复杂性。本文所求解的为线性方程组的系数矩阵,与线性约束相关的乘法计算次数 $T_{m(\infty)}$ 为

$$T_{m(\infty)} = 5x_{\infty} - 4 \quad (19)$$

式中: x_{∞} 为与线性约束相关的输入变量矩阵的维数。

与二阶锥约束相关的计算时间可以近似估计为与线性约束相关的计算时间的两倍。因此,整个优化模型的乘法计算次数 T_m 可以近似为

$$T_m = 10x_M + 5x_{\infty} - 12 \quad (20)$$

式中: x_M 为与二阶锥约束相关的输入变量矩阵的维数。

与线性约束相关的加减运算次数 $T_{n(\infty)}$ 为

$$T_{n(\infty)} = 3x_{\infty} - 3 \quad (21)$$

因此,整个优化模型的加减法计算次数 T_n 为

$$T_n = 6x_M + 3x_{\infty} - 9 \quad (22)$$

综上所述,计算复杂度 v 可以表示为

$$v = \omega_m \cdot T_m + \omega_n \cdot T_n \quad (23)$$

式中: ω_m 、 ω_n 分别为 T_m 、 T_n 的权重。

在模拟程序中,乘法计算比加法计算消耗更多时间,因此为简化分析,本文只计算乘法次数以估计计算量,即 $\omega_m = 1$ 、 $\omega_n = 0$ 。

模块度函数、功率平衡和计算复杂度三者共同构成综合指标,但三者处于不同的数量级,因此需进行归一化处理:

$$\hat{X} = \frac{X - \min(X)}{\max(X) - \min(X)} \quad (24)$$

式中: X 为 r_j 和 v 的值; $\hat{X}$ 为归一化后的值。

在使用综合指标进行分区划分时,所有节点初始时视为独立子分区,随后逐步合并。当综合指标达到最大值时,停止合并。因此,式(24)不会影响网络划分的计算过程。综合指标的表达式为

$$\begin{cases} \hat{\omega} = \hat{\rho} + \hat{\varphi}^P + \hat{\varphi}^Q - \hat{v}_{\max} \\ \hat{v}_{\max} = \max\{\hat{v}_1, \dots, \hat{v}_{N^P}\} \end{cases} \quad (25)$$

式中: $v_{\max}$ 为所有计算区域中最大计算复杂度。

当 $\hat{\omega}$ 达到最大值时,即可得到最优划分结果。

2.3 分区求解与执行步骤

ADN 分区网络划分的具体步骤如下。

第一步:将每个节点划分为一个单独的子区域,计算综合指标 $\omega(0)$ 。

第二步:以分区 a 为起点,从其他区域中随机选取一个区域 b ,将两者组合形成新的子区域。此步骤对所有区域并行执行。接着,计算每个组合综合指标的变化量 $\Delta\omega(m)$ 。在计算中,选择 $\Delta\omega(m)$ 最大的组合,用于更新综合指标 $\omega(m+1)$ 。

第三步:将新形成的子区域作为一个单独的节点,重复第二步进行划分,生成新的划分结果。

第四步:当没有区域可以进一步合并且综合指标 $\omega(m)$ 达到最大值时,分区过程终止,此时当前的分区方案为最优分区结果。

2.4 ADN 分区电压协调控制策略设计

本文所提配电网电压分区协调控制策略包括分区内无功可调容量确定、分区间信息交互和区内电压控制三个步骤。首先,分区控制器采集数据,计算当前分区的可调无功功率容量。然后,控制器与相邻分区进行信息交互,检测分区内节点电压是否越限。如果电压越限,利用分区内无功资源调节;若不足则调动其他分区协同调节。接着,分区控制器将当前状态信息发送给相邻分区控制器。

电压分区控制过程如图1所示。当分区2中存在电压越限节点时,分区2控制器调节无功功率,将节点电压恢复至正常范围。调整后,若分区2内所有节点电压恢复正常,则将其划为“电压不越限”分区。分区2控制器随后向相邻分区1和分区3更新状态信息,以调整各自的控制策略。

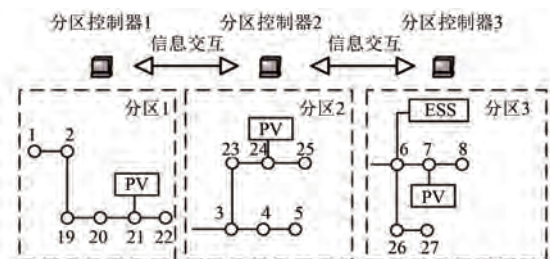


图1 电压分区控制过程

Fig. 1 Voltage partitioning control process

在“电压不越限”分区,控制策略以分区网络损耗最小化和电压波动最小化为目标;在“电压越限”分区,控制器通过频繁的信息交互,确保对相邻分区电压的影响最小,并优化本区内电压控

制,实现协调控制。

最后,控制器调节所有分区的电压,直到系统电压稳定。如果所有节点电压均在合理范围内,则电压控制结束;否则继续调整,直到满足要求。通过这一过程,配电网可实现高效协调的电压控制,保障系统安全,优化系统性能。

3 基于 Logistic-SMA 的分布式电压优化算法设计

3.1 SMA 原理与标准模型

SMA^[28]是 Li 等人于 2020 年提出的一种基于黏菌觅食行为的仿生优化算法。黏菌觅食行为的数学模型为

$$X(t+1) = \begin{cases} X_b(t) + vb \times [W \times X_A(t) - X_B(t)], & r_1 < p \\ vc \times X(t), & r_1 \geq p \end{cases} \quad (26)$$

$$p = \tanh |S(i) - DF| \quad (27)$$

式中: $X_b(t)$ 为第 t 次迭代时的最优位置; $X(t)$ 为第 t 次迭代时黏菌的位置; $X_A(t)$ 和 $X_B(t)$ 为第 t 次迭代时随机选择的两个黏菌的位置; $S(i)$ 为黏菌群的适应度; DF 为所有迭代中的最佳的适应度; W 为黏菌群的权重; vc 为从 1 到 0 逐渐减小的参数; r_1 为 $[0, 1]$ 上的随机数; p 为参数,用于选择位置更新策略; vb 为参数扰动因子, $vb \in [-a, a]$, a 的表达式为

$$a = \operatorname{arctanh}\left(1 - \frac{t}{\max_t}\right) \quad (28)$$

式中: $\max_t$ 为最大迭代次数。

权重 W 的表达式为

$$W[\operatorname{SmellIndex}(i)] = \begin{cases} 1 + r_2 \times \log\left[\frac{bF - S(i)}{bF - wF} + 1\right], & \text{condition} \\ 1 - r_2 \times \log\left[\frac{bF - S(i)}{bF - wF} + 1\right], & \text{others} \end{cases} \quad (29)$$

$$\operatorname{SmellIndex} = \operatorname{sort}(S) \quad (30)$$

式中:condition 为 $S(i)$ 排在种群的前一半; r_2 为 $[0, 1]$ 上的随机数; bF 、 wF 分别为当前迭代过程中获得的最优、最差适应度值; $\operatorname{SmellIndex}$ 为排序后的适应度值序列; $\operatorname{sort}(S)$ 为对种群中所有个体

的适应度值集合进行升序排序。

式(29)描述了黏菌脉宽与食物浓度之间的正负反馈机制。参数 r_2 表示静脉收缩模式中的不确定性,引入对数函数平滑数值变化率,防止收缩频率过大波动。权重函数中的 condition 模拟黏菌根据食物质量调整搜索策略。当食物浓度较高时,相应区域的权重增加;反之,当浓度较低时,权重降低,从而引导黏菌探索其他区域。基于这一权重变化规则,菌群位置更新表达式为

$$X(t+1) = \begin{cases} \operatorname{rand} \times (UB - LB) + LB, & \operatorname{rand} < z \\ X_b(t) + vb \times [W \times X_A(t) - X_B(t)], & r_1 < p \\ vc \times X(t), & r_1 \geq p \end{cases} \quad (31)$$

式中: UB 、 LB 分别为搜索边界的上、下限; rand 为 $[0, 1]$ 上的随机数; z 为进行全局搜索的概率。

3.2 Logistic 混沌映射与搜索机制改进

在传统 SMA 中,随机初始化种群无法有效保障种群多样性。引入 Logistic 混沌映射生成初始种群,可以确保个体在搜索空间内均匀分布,避免聚集效应,提升算法的全局搜索能力。这种方法增加了个体差异性,从而增强 SMA 在求解复杂优化问题时的探索和开发能力,最终提高优化性能和收敛速度。Logistic 混沌映射表达式为

$$y_{i,j+1} = 4y_{i,j}(1 - y_{i,j}) \quad (32)$$

式中: y 为序列, $y \in [0, 1]$; i 为种群大小; j 为解的位置。

3.3 改进算法在电压优化中应用流程设计

改进黏菌算法(Improved SMA, ISMA)流程如图 2 所示。首先,初始化并计算配电网潮流信息及网络损耗状况;然后,使用拉格朗日乘数法将目标函数和约束条件转化为单变量可解形式。接着,初始化黏菌个体,并应用 Logistic 混沌搜索算法设定初始种群,进行迭代计算。最后,比较搜索前后的状态,选取最优解,直到达到最大迭代次数。

4 算例分析

4.1 IEEE 33 算例参数设置

IEEE 33 节点配电系统如图 3 所示。该系统包含 33 个节点,PV 接入节点为 7、17、21、24 和 29,容量为 1.2 MW,最小功率因数为 0.95。ESS 接入节点为 5、6 和 29,容量为 0.2 MW,荷电状态

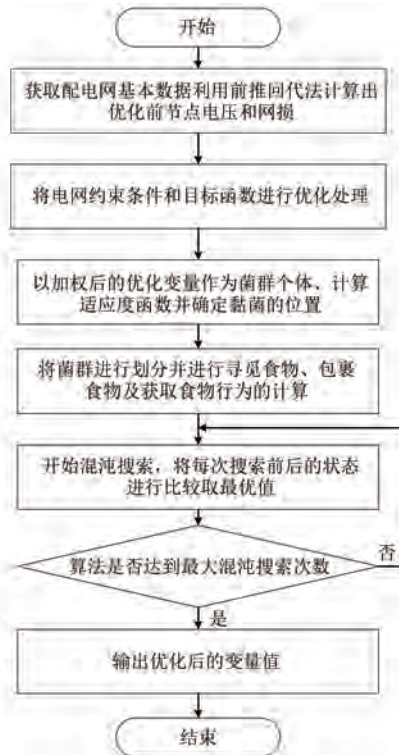


图2 ISMA 流程图

Fig. 2 ISMA flowchart

为 $[0.1, 0.9]$,充放电功率为 0.1 MW 。系统基准电压为 12.66 kV ,基准功率为 100 MW ,正常电压水平设定为 $[0.95, 1.05]$ 。系统PV出力与负荷曲线如图4所示,选取典型日负荷曲线,PV出力从4:30至11:00逐渐增强达到最大值,随后逐渐减弱。系统电压在中午达到峰值,12:00和18:00分别出现两次电压峰值。接入PV后,全天电压波动如图5所示,多个节点出现电压越限情况。

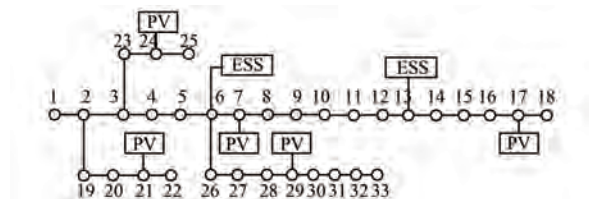


图3 IEEE 33 节点配电系统

Fig. 3 IEEE 33 node distribution system

4.2 IEEE 33 节点分区电压协调控制

利用所提的电压分区方法,分区结果如图6和表1所示。整个系统被划分为6个分区,每个分区内都有均匀的DPV和ESS,证明所提方法实现了综合指标中的条件,在保障分区间功率平衡的前提下,计算时间最短。

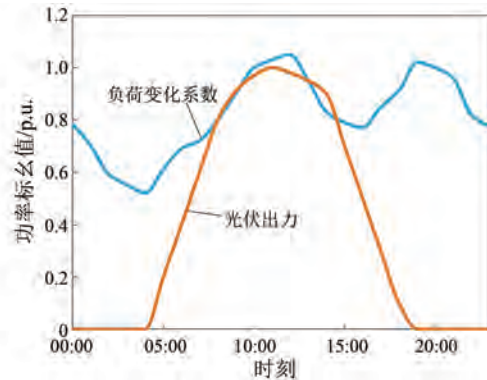


图4 系统PV出力与负荷曲线

Fig. 4 System PV output and load curves

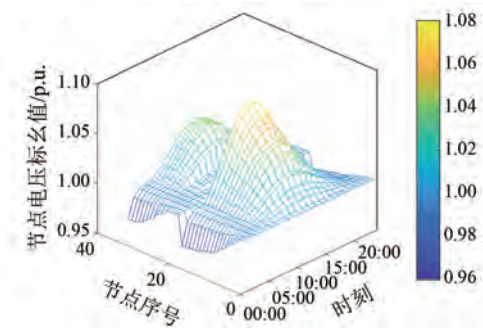


图5 DPV 接入后系统电压波动情况

Fig. 5 System voltage fluctuations after DPV integration

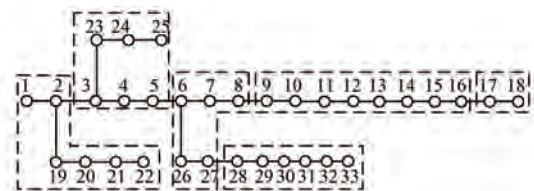


图6 IEEE 33 节点系统的电压分区控制结果

Fig. 6 Voltage partitioning control results for the IEEE 33 node system

表1 IEEE 33 节点系统分区结果

Tab. 1 IEEE 33 node system partitioning result

电压分区	节点分布
电压分区 I	1, 2, 19, 20, 21, 22
电压分区 II	3, 4, 5, 23, 24, 25
电压分区 III	6, 7, 8, 26, 27
电压分区 IV	9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16
电压分区 V	17, 18
电压分区 VI	28, 29, 30, 31, 32, 33

节点18在不同策略下的电压分区控制结果和IEEE 33节点系统网络损耗计算结果分别如图

7 和表 2 所示。

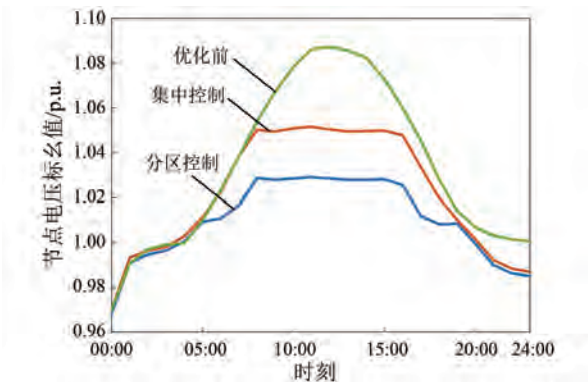


图 7 节点 18 的电压分区控制结果

Fig. 7 Voltage partition control results of node 18

IEEE 33 节点系统网络损耗计算结果		
Tab. 2 Calculation results of network loss of IEEE 33 node system		
控制策略	优化前/MW	优化后/MW
电压集中控制策略	0.414	0.343
电压分区控制策略	0.414	0.312

在 9:00~16:00 因 DPV 出力出现长时间电压越限。为此,分别采用电压分区控制策略和电压集中控制策略进行无功补偿调控。通过图 7 和表 2 可知,电压分区控制策略优于集中控制策略,网络损耗减少了 24.6%。这一现象主要由于电压分区控制通过将电网划分为多个控制区,实现局部电压控制,降低网络损耗,并且各区域控制器响应更快,减少电压波动。分区控制还减少了长距离信息传输,降低了能量损失,优化了 DPV 管理。

不同网络划分指标的计算时间对比如表 3 所示。

表 3 IEEE 33 节点系统下不同网络划分指标的计算时间比较		
Tab. 3 Comparison of computation time of different network segmentation metrics under IEEE 33 node system		
指标	步数	时间/s
本文所提指标	133	30.33
不考虑计算复杂度	190	39.62
不考虑功率平衡	210	45.79
集中式	-	50.46

由表 3 可知,本文所提指标在兼顾计算复杂度与功率平衡约束的前提下,取得了最优的计算

效率,仅需 133 步、30.33 s 即可完成优化。相比之下,当不考虑计算复杂度约束时,由于部分子区域存在计算负载不均的情况,导致总计算时间上升至 39.62 s,步数增加至 190;而在不考虑功率平衡约束时,区域间功率交换不均衡,需频繁协调,迭代次数进一步增加至 210,耗时达 45.79 s。集中式方案虽然不存在划分过程,但计算任务集中、处理顺序单一,因此计算耗时最长。结果验证了所提指标在小规模系统中能有效提升计算效率并减少优化步长。

不同渗透率下,电压分区控制策略和电压集中控制策略的计算结果如图 8 所示。

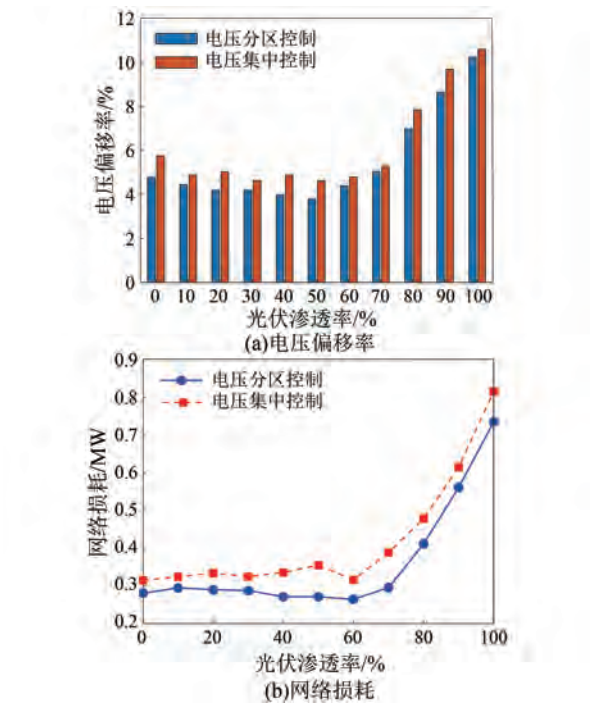


图 8 不同渗透率下不同电压控制策略计算结果

Fig. 8 Results of different voltage control strategies at various penetration levels

由图 8 可知,随着 PV 渗透率的增加,在两种控制策略下,电压偏移率和网络损耗均呈现先降后升的趋势。当 PV 渗透率低于 60% 时,网络损耗和电压偏移率随渗透率增加而小幅降低,主要因为负荷能够就地消纳 PV 功率,减少了功率传输和线路损耗。然而,当 PV 渗透率超过 60% 时,负荷无法完全消纳 PV 功率,且无法弃光时,PV 功率需要回送至上级电网,增加了线路功率流动,导致网络损耗和电压偏移率上升。尽管两种策略都能进行调控,但电压分区控制策略的效果更好。

4.3 不同策略对比

为了验证电压分区控制策略的优势,将其与集中控制策略进行对比。不同控制策略下的电压波动情况和电压控制情况对比分别如图 9 和图 10 所示。

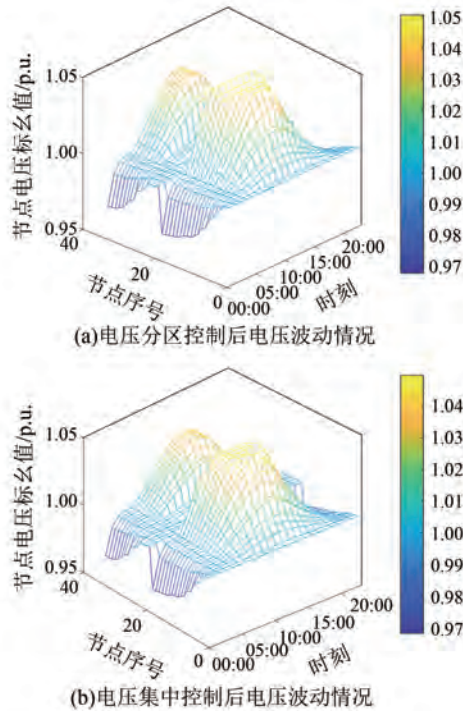


图 9 不同控制策略下的电压波动情况对比
Fig. 9 Voltage comparison chart under different control strategies

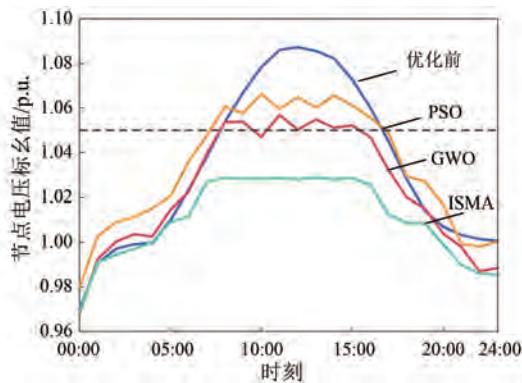


图 10 不同控制策略下节点 18 的电压控制对比
Fig. 10 Comparison of voltage control of node 18 under different control strategies

由于 DPV 输出波动,全天存在电压越限现象。由图 9 可知,尽管两种策略均能使电压维持在正常范围内,但本文所提电压分区控制策略能进一步减小电压波动,保证 ADN 的稳定运行。

由图 10 可知,采用 ISMA 优化后,节点 18 的电压降至安全限值 1.05 以下,相较于 GWO 算法和 PSO 算法,ISMA 能够更好地求解目标函数。电压偏移和电压偏差的优化效果明显优于 PSO,优化率分别为 63.24% 和 86.07%。

4.4 真实系统验证

云南省曲靖某地区实际电网拓扑如图 11 所示,该电网包含 199 个节点,系统网络分区结果如表 4 所示,该系统中接入了 4.5 MW 的 DPV, 2 MW 的储能设备。图中,蓝色五角星为 PV 接入点,紫色菱形为 ESS 接入点。

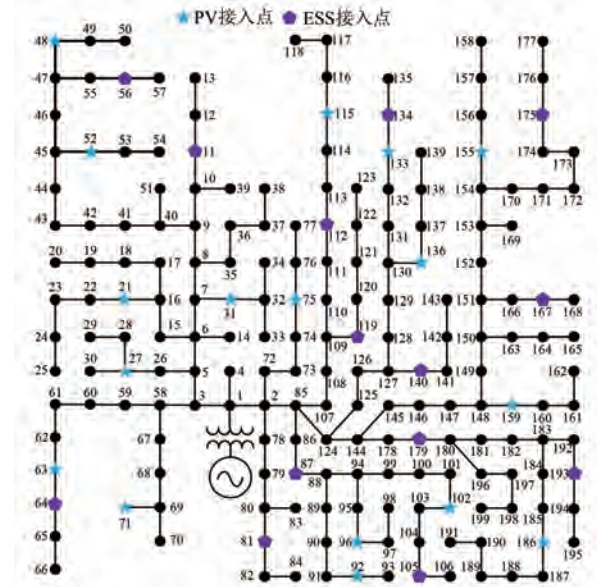


图 11 实际电网拓扑图

Fig. 11 Actual power grid topology

表 4 199 节点系统网络分区结果

Tab. 4 199 node system network partitioning results

电压分区	节点分布	电压分区	节点分布
1	1、4、2、72~77	12	124~127、140~143
2	78~84	13	144~148、159~162
3	58~71	14	178~180、196~199
4	5、26~30	15	181~195
5	6、14~25	16	107~109、119~123
6	7、8、31~38	17	110~118
7	9~13、39	18	128~139
8	40~45、51~53	19	149~151、163~168
9	46~50、55~57	20	152~158、169
10	85~93	21	170~177
11	94~98、99~106		

电压分区控制策略和集中式策略下的网络损耗对比如表 5 所示。不同网络划分指标的计算时间对比如表 6 所示。

表 5 199 节点系统网络损耗计算结果
Tab. 5 Calculation results of network loss of 199 node system

控制策略	优化前/MW	优化后/MW
电压集中控制策略	3.432	2.343
电压分区控制策略	3.432	0.312

表 6 199 节点系统下不同网络划分指标的计算时间
Tab. 6 Computation time for different network segmentation metrics under 199 node system

指标	步数	时间/s
本文所提指标	253	55.33
不考虑计算复杂度	310	69.62
不考虑功率平衡	433	75.79
集中式	-	80.46

由表 5 可知,所提控制策略能有效降低网络损耗。由表 6 可知,所提指标在大规模系统中同样展现出良好的扩展性与高效性,仅需 253 步、55.33 s 即完成优化任务。若不考虑计算复杂度约束,子区域规模失衡进一步放大,使计算时间增至 69.62 s,步数增加至 310;而不考虑功率平衡约束,区域间源荷错配严重,协调难度大,使迭代次数显著上升至 433,计算时间增至 75.79 s。集中式优化在系统规模扩大后缺乏并行能力的劣势更为明显,计算时间高达 80.46 s。该结果进一步证明,本文所提双约束分区机制在提升系统计算效率、缩短收敛时间方面具备较强工程适应性。

采用分区电压控制方法前后该地区 14:00 时的节点电压分布如图 12 所示。可见,当 DPV 和 ESS 同时进行工作,采用所提策略进行电压控制后,系统整体电压保持稳定且没有电压越限的情况发生。

5 结语

为解决含高比例 DPV 的 ADN 的电压控制问题,本文提出了一种基于改进电气距离的分区优化控制策略。该方法根据优化模型中的决策变量和约束条件数量,利用计算复杂度自动优化 ADN 的分区。同时,考虑到边界子区域之间的协调性,

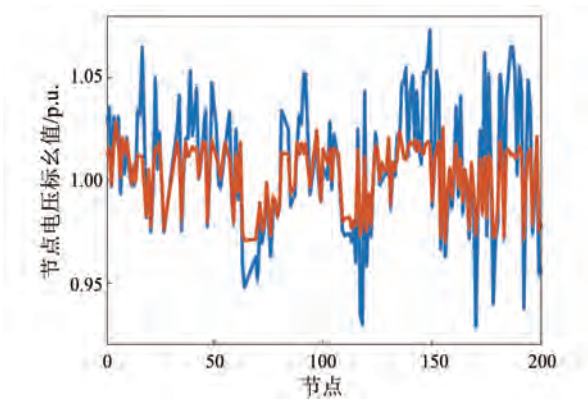


图 12 电压控制前后节点电压分布
Fig. 12 Node voltage distribution before and after voltage control

提出了一种分布式电压控制策略,并采用基于 ISMA 的分布式方法进行求解。最终,利用 IEEE 33 节点模型和云南曲靖地区的 199 节点系统进行仿真验证,结论如下。

(1) 基于网络损耗最小化与电压偏移率最小化双目标,建立了融合 DPV 出力波动、储能动态调节及二阶锥松弛潮流约束的 ADN 电压控制模型。仿真表明,该模型在降低网络损耗的同时,有效控制了电压偏移率,显著提升了电压质量。

(2) 所提动态耦合电气特性与功率平衡的分区方法,通过边界协调策略解决了电压越限问题。分区后电压合格率提升,计算耗时减少,兼顾了稳定性与计算效率。

(3) 所提 ISMA 可以在电压分区下实现 PV 储能无功资源的调配,控制电压稳定的同时保证解的最优性和精度,具有良好的实时性能。此外,ISMA 还为 ADN 的优化管理提供了强大的算法支持。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

张磊、王凌谊进行了方案设计、内容总结与论文撰写,赵爽、纳智敏、张勇进行了试验研究,刘志坚、虞忠明参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, content summary and paper writing were carried out by Zhang Lei and Wang Lingyi. The experimental study was conducted by Zhao Shuang, Na Zhimin and Zhang Yong. The manuscript was reviewed and revised by Liu Zhijian, Yu Zhongming. All authors have read and approved the final version of the manuscript for submission.

参考文献

- [1] 马宁宁, 谢小荣, 贺静波, 等. 高比例新能源和电力电子设备电力系统的宽频振荡研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40, (15): 4720-4732.
MA N N, XIE X R, HE J B, et al. Review of wide-band oscillation in renewable and power electronics highly integrated power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4720-4732.
- [2] 梁志峰, 叶畅, 刘子文, 等. 分布式电源集群并网调控: 体系架构与关键技术[J]. 电网技术, 2021, 45, (10): 3791-3802.
LIANG Z F, YE C, LIU Z W, et al. Grid-connected control of distributed power clusters: System architecture and key technologies [J]. Power System Technology, 2021, 45(10): 3791-3802.
- [3] 朱嘉远. “双碳”背景下含高需求响应负荷的配电网状态估计算法[J]. 电机与控制应用, 2023, 50 (2): 82-90.
ZHU J Y. Distribution network state estimation algorithm with high demand response enabled load under the background of "dual carbon" [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(2): 82-90.
- [4] 刘虹伶, 时维国. 基于灰狼优化的改进粒子群算法求解环境经济调度问题[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(11): 97-109.
LIU H L, SHI W G. Solving environmental economic dispatch problem using an improved particle swarm optimization algorithm based on grey wolf optimization [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(11): 97-109.
- [5] 伏祥运, 朱立位, 赵喆, 等. 计及动态电压稳定约束的分区柔性互联电网最大供电能力计算[J]. 电网技术, 2023, 47, (2): 553-563.
FU X Y, ZHU L W, ZHAO Z, et al. Calculation of maximum power supply capacity of partitioned flexible interconnected power grids considering dynamic voltage stability constraints [J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 553-563.
- [6] 吴鑫, 曹帅, 安天瑜, 等. 计及权重系数影响的区域电网时段多目标调度优化策略[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(7): 81-88.
WU X, CAO S, AN T Y, et al. Multi-objective scheduling optimization strategy of regional power grid considering the influence of weighting factors [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50 (7): 81-88.
- [7] 余昆, 唐修明, 陈星莺, 等. 高比例分布式光伏接入的配电网过电压责任分摊方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(24): 9535-9546.
YU K, TANG X M, CHEN X Y, et al. Overvoltage responsibility sharing method for distribution networks with high proportion of distributed PV integration [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43 (24): 9535-9546.
- [8] ZHANG Z, YUE D, DOU C, et al. Optimal voltage regulation via hybrid power compensation in high-PV-penetration ADN [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2024, 20(6): 9006-9014.
- [9] 邱革非, 杨昊天, 何超, 等. 基于二阶锥松弛的三相不平衡配电网最优潮流研究[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(12): 34-40+59.
QIU G F, YANG H T, HE C, et al. Research on optimal power flow in three-phase unbalanced distribution network based on second-order cone relaxation [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(12): 34-40+59.
- [10] 高雪寒, 高源, 赵健, 等. 基于数据潮流模型的高比例光伏配电网三相不平衡优化[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52, (8): 77-87.
GAO X H, GAO Y, ZHAO J, et al. Three-phase imbalance optimization of distribution networks with high PV penetration based on data flow model [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(8): 77-87.
- [11] 高荣, 寇鹏, 梁得亮, 等. 含混合式配电变压器的主动配电网电压鲁棒模型预测控制[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2081-2090+2388.
GAO R, KOU P, LIANG D L, et al. Robust model predictive control of voltage in active distribution networks with hybrid distribution transformers [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2081-2090 +2388.

- [12] 潘俊迪, 陈中, 倪纯奕, 等. 基于无模型自适应控制的配电网电压控制方案[J]. 电力工程技术, 2023, 42(5): 128-137.
PAN J D, CHEN Z, NI C Y, et al. Voltage control scheme for distribution networks based on model-free adaptive control [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(5): 128-137.
- [13] 车彬, 张泽龙, 杨燕. 考虑 V2G 储能特性与负荷需求响应的主动配电网低碳鲁棒调度[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(1): 29-39.
CHE B, ZHANG Z L, YANG Y. Low-carbon robust scheduling of active distribution networks considering V2G storage characteristics and load demand response [J]. Power Grid and Clean Energy, 2024, 40(1): 29-39.
- [14] 梅铭洋, 寇鹏, 张智豪, 等. 面向主动配电网的安全多智能体深度强化学习电压优化控制[J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(12): 157-167.
MEI M Y, KOU P, ZHANG Z H, et al. Safe multi-agent deep reinforcement learning voltage optimization control for active distribution networks [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(12): 157-167.
- [15] ABESSI A, VAHIDINASAB V, GHAZIZADEH M S. Centralized support distributed voltage control by using end-users as reactive power support [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(1): 178-188.
- [16] 马启鹏, 郝正航, 张裕, 等. 含高渗透率分布式光伏配电网的网络分区与电压协调控制[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(3): 93-102+108.
MA Q P, HAO Z H, ZHANG Y, et al. Network partitioning and voltage coordination control of distribution networks with high PV penetration [J]. Power Grid and Clean Energy, 2023, 39(3): 93-102+108.
- [17] 彭啸宇, 沈怡, 陆秋瑜, 等. 考虑风电出力不确定性的电网无功-电压控制鲁棒分区方法[J]. 电网技术, 2023, 47(10): 4102-4111.
PENG X Y, SHEN Y, LU Q Y, et al. Robust partitioning method for reactive power-voltage control in power grids considering wind power output uncertainty [J]. Power System Technology, 2023, 47(10): 4102-4111.
- [18] LI P, JI J, JI H R, et al. MPC-based local voltage control strategy of DGs in active distribution networks [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2911-2921.
- [19] 陈波, 贾亦真, 汪硕承, 等. 考虑通信缺失情景的光伏集群分散式电压控制方法[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(4): 152-158+167.
CHEN B, JIA Y Z, WANG S C, et al. Decentralized voltage control method for PV clusters considering communication failure scenarios [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(4): 152-158+167.
- [20] 郭沛, 王利利, 李锰, 等. 基于灵敏度聚类的含 DG 配电网电压分区控制方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(6): 100-107.
GUO P, WANG L L, LI M, et al. Voltage partitioning control method for distribution networks with DG based on sensitivity clustering [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(6): 100-107.
- [21] RUAN H B, GAO H J, LIU Y B, et al. Distributed voltage control in active distribution network considering renewable energy: A novel network partitioning method [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(6): 4220-4231.
- [22] 季玉琦, 陈雪寒, 薛源, 等. 考虑“源-荷”时序特性的配电网电压无功分区[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(4): 45-56.
JI Y Q, CHEN X H, XUE Y, et al. Voltage and reactive power partitioning in distribution networks considering “source-load” temporal characteristics [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(4): 45-56.
- [23] 李圣清, 刘博文, 李焕平, 等. 含高比例光伏的配电网分组协调电压控制策略[J]. 可再生能源, 2024, 42(4): 530-537.
LI S Q, LIU B W, LI H P, et al. Group coordinated voltage control strategy for distribution networks with high proportion of PV integration [J]. Renewable Energy, 2024, 42(4): 530-537.
- [24] PAPADIMITRAKIS M, KAPNOPOULOS A, TSAVARTZIDIS S, et al. A cooperative PSO algorithm for Volt-VAR optimization in smart distribution grids [J]. Electric Power Systems Research, 2022, 212: 108618.
- [25] 曹飞, 钱晶, 曾云, 等. 基于 SSA 的微电网负荷频率鲁棒 H_2/H_∞ 控制研究[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(6): 71-77.
CAO F, QIAN J, ZENG Y, et al. Research on load

- frequency robust H_2/H_∞ control of microgrid based on SSA [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2023, 50(6): 71-77.
- [26] 胡丹尔, 彭勇刚, 韦巍, 等. 多时间尺度的配电网深度强化学习无功优化策略[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(14): 5034-5045.
- HU D E, PENG Y G, WEI W, et al. Multi-time scale reactive power optimization strategy for distribution networks using deep reinforcement learning [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(14): 5034-5045.
- [27] 黄大为, 王孝泉, 于娜, 等. 计及光伏出力不确定性的配电网混合时间尺度无功/电压控制策略[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(17): 4377-4389.
- HUANG D W, WANG X Q, YU N, et al. Hybrid time-scale reactive power/voltage control strategy for distribution networks considering PV output uncertainty [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(17): 4377-4389.
- [28] LI S M, CHEN H L, WANG M J, et al. Slime mould algorithm: A new method for stochastic optimization [J]. *Future Generation Computer Systems*, 2020, 111: 300-323.
- [29] FENG C S, LI Z Y, SHAHIDEHPOUR M, et al. Decentralized short-term voltage control in active power distribution systems [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 9(5): 4566-4576.
- [30] XIONG W J, TANG Z Y, CUI X Y. Distributed data-driven voltage control for active distribution networks with changing grid topologies [J]. *Control Engineering Practice*, 2024, 147: 105933.

收稿日期:2025-06-05

收到修改稿日期:2025-06-23

作者简介:

张 磊(1986-),男,硕士,高级工程师,研究方向为电网规划及新能源并网,848556028@qq.com;

*通信作者:虞忠明(1988-),男,博士,副教授,研究方向为无功优化、有源配电系统的电压控制、分布式优化和能源管理,yuzhgmin@sina.com。