

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231245

计及随机性的多分布式电源接入中压配电网承载能力评估

李响¹, 张丹¹, 李秋燕², 王威立¹, 王燕芳¹, 贾一博²

(1. 郑州航空工业管理学院, 河南 郑州 450015; 2. 国网河南省电力有限公司经济技术研究院, 河南 郑州 455000)

摘要: 电力系统的源侧和荷侧均具有随机性, 影响配电网接入分布式电源的容量分析。为此, 提出了一种考虑源荷随机性的中压配电网多分布式电源承载能力评估方法。首先, 将分布式电源和负荷出力分解为可预测变量和随机变量, 结合序贯蒙特卡洛模拟法, 分别模拟时序周期内源荷随机生产模型。其次, 在划分供电分区和简化源荷接入位置基础上, 以各供电分区可接入分布式电源容量最大为目标, 考虑传输容量、电压偏差、短路电流等约束, 对配电网承载能力模型进行随机潮流求解。然后, 以指标变化量和限值距离为衡量依据, 确定多分布式电源有序接入策略, 防止局部运行参数不优而导致配电网对分布式电源承载能力受限。最后, 将该模型应用在中部某城市的区域配电网中, 验证该方法的可行性和有效性。

关键词: 配电网; 分布式电源; 承载能力; 序贯蒙特卡洛; 电压偏差

Hosting capacity evaluation of distributed generators accessing a medium voltage distribution network considering randomness

LI Xiang¹, ZHANG Dan¹, LI Qiuyan², WANG Weili¹, WANG Yanfang¹, JIA Yibo²

(1. Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou 450015, China; 2. Economic and Technological Research Institute, State Grid Henan Electric Power Co., Ltd., Zhengzhou 455000, China)

Abstract: Both the source and load sides of a power system have randomness. This affects the capacity of the distribution network in accessing distributed power sources. For this reason, a method for evaluating the carrying capacity of distributed generators in a medium voltage distribution network considering the randomness of power sources and loads is proposed. First, the outputs of distributed power sources and loads are decomposed into predictable and stochastic variables, and combined with a sequential Monte Carlo simulation method to simulate the source-load stochastic production model in the time period. Secondly, this paper makes a division of power supply partitions and a simplification of the source-load access location, with the goal of maximizing the capacity of each power supply zone to access distributed power sources and also considering constraints such as transmission capacity, voltage deviation, and short-circuit current to calculate the stochastic power flow with the distribution network hosting capacity model. Then, using the index variation and limit distance as the measurement basis, the multi-distributed power supply orderly access strategy is determined. This prevents the distribution network from being limited in power supply hosting capacity because of inappropriate local operating parameters. Finally, the model is applied to a regional distribution network in a central city to verify the feasibility and effectiveness of the method.

This work is supported by the Scientific and Technological Projects of Henan Province (No. 232102240102).

Key words: distribution network; distributed generator; hosting capacity; sequential Monte Carlo; voltage deviation

0 引言

随着“30年碳达峰、60年碳中和”目标的提出^[1-3], 构建以新能源为主体的新型电力系统是我国电力发展的必然选择^[4-6], 以风光为代表的新能源

发电迎来了快速发展期^[7]。然而, 在分布式电源(distributed generator, DG)快速发展的同时, 配电网对分布式电源的承载能力也成为能源部门和电力企业关心的问题^[8]。为此, 2023年6月国家能源局专门在浙江、广东、福建等6个省份选择部分县(市)开展分布式光伏接入电网承载能力评估工作。

分布式电源的接入位置、容量往往取决于自然

基金项目: 河南省科技攻关项目资助(232102240102)

资源限制和用户投资^[9-10], 而配电网对分布式电源的承载能力不仅受 DG 接入位置和容量的影响, 还受负荷大小、变压器容量等因素的影响, 因此, 配电网的承载能力是一个多因素影响、非线性优化问题^[11-12]。在政策、技术、用户需求等因素的驱动下, 以风、光为代表的分布式电源快速发展, 其对电网的影响也越来越大^[13], 国家相关部门和从业人员及时开展了新能源承载能力研究工作, 并且对新能源电网承载能力的评估与求解已取得了不少成果^[14-16]。文献[17]从电力供需平衡、安全稳定约束和电能质量 3 个角度构建新能源消纳能力评估问题的总体研究框架。文献[18]基于新能源发电的统计学特征, 提出消纳系数和承载系数来规划新能源装机容量。文献[19]将线路潮流线性化, 考虑电压、容量、机组爬坡等约束, 对输电网新能源承载能力进行评估。文献[20]基于广义短路比理论, 考虑构网型新能源设备是否接入情况, 评估小扰动同步约束情况下的新能源承载能力。文献[21]考虑容量、电压、保护、出力等约束, 采用灵敏度法分段顺推、倒推配电网对多分布式电源的承载力。文献[22]以高渗透率新能源并网后系统承载能力最大为目标, 考虑成本最低, 分两阶段优化分布式静态串联补偿器布置。文献[23]考虑光伏、风机及多种无功补偿装置的接入, 以可再生能源装机容量最大为目标, 建立分布式电源接入配电网的承载能力模型, 采用二阶锥松弛方法对模型进行转化并且求解。文献[24]将地区电网的水电灵活性和网架灵活性引入到新能源规划中, 提出了一种计及灵活资源调节潜力的高压配电网新能源接纳能力评估方法。

电力系统是个动态系统, 从时间尺度看, 分布式电源或负荷出力不仅在不同时刻呈现不同大小, 而且在同一时刻也会存在差异, 即具有随机性。分布式电源的随机性受自然条件影响, 如光伏发电随日照时间变化, 风力发电出力受风速影响^[25]; 而电力负荷本身也具有随机分量, 特别是在电动汽车、空调等多元负荷接入后, 负荷侧的随机特征更为明显。在评估配电网对新能源的承载能力时, 现有方法多考虑新能源侧的随机性, 在量化新能源出力时, 也往往倾向于固定的变化区间。实际上, 配电网的承载能力不仅与分布式电源的出力大小、接入位置有关, 而且与负荷大小也有关。在评估配电网对多个分布式电源接入的承载能力时, 不仅要考虑电源侧的随机性, 还要考虑负荷侧的随机性。因此, 本文以中压配电网对多分布式电源的承载能力为研究对象, 首先, 在统计历史数据的基础上, 将分布式电源和负荷出力解耦为可预测变量和预测偏差随机

变量, 结合序贯蒙特卡洛模拟法, 建立时序周期内的源荷出力模型和预测偏差随机模型; 其次, 通过划分供电分区, 简化分布式电源和负荷的接入场景, 以分布式电源接入容量最大为目标, 考虑配电网电压、传输容量等约束, 进行随机潮流计算; 最后, 为防止配电网因局部运行参数不优而导致承载能力受限的情况发生, 以指标变化量和限值距离为衡量依据, 分单约束条件和多约束条件, 确定多分布式电源有序接入策略。同时, 将模型应用于中部某城市配电网, 验证该方法的可行性和有效性。

1 总体思路

分布式电源和多元负荷的接入, 导致配电网中的源网不确定性因素增加, 已有的常规潮流计算方法在使用中具有一定的局限性, 潮流计算更倾向于区间潮流、连续潮流等方法, 这些算法在一定的程度上解决了源荷的变量特征, 但由于分布式电源和负荷的出力特性时序相关, 如分布式光伏出力具有午间最大、夜间不出力特点, 风电在夜间出力大、白天出力小, 而负荷往往是白天大、夜晚小, 因此, 在考虑配电网对分布式电源的承载能力时, 需要综合考虑多种分布式电源以及负荷时序上的随机性, 在潮流计算时选择随机潮流, 在建模时考虑源荷出力时间序列的随机模型。基于此, 本文研究的总体思路如图 1 所示。

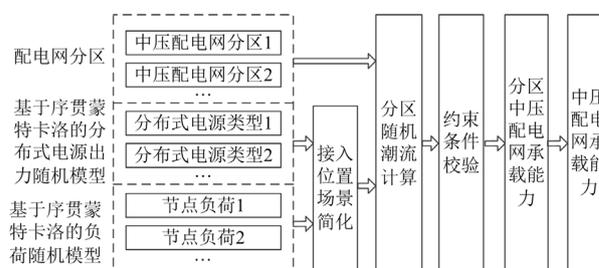


图 1 总体思路

Fig. 1 General idea

1) 配电网规模大、馈线多, 加上分布式电源接入位置和容量不确定, 若直接计算配电网对分布式电源的承载能力, 计算效率较低。因此, 为降低计算维度、提高计算效率, 先将整个配电网划分为以高压变电站为中心、若干条馈线组成的供电分区, 供电分区之间最好独立运行或电气联系不紧密。

2) 在划分供电分区基础上, 根据各分区的配电网拓扑关系, 建立分区配电网的节点导纳矩阵, 并基于各节点负荷历史数据, 统计循环周期内每一时刻出力平均值及预测随机偏差, 建立负荷出力的序贯蒙特卡洛随机模型。

3) 统计各分区的分布式电源类型, 基于各类分布式电源出力历史数据, 统计生产时序周期内的出力平均值和预测随机偏差, 建立各类分布式电源出力的序贯蒙特卡洛随机模型。

4) 建立分布式电源的典型馈线简化模型, 简化源荷接入位置场景, 结合分区配电网节点导纳, 进行随机潮流计算, 校验容量、谐波、电压偏差等约束, 得到各供电分区的分布式电源承载能力。

5) 求各个供电分区的分布式电源承载能力之和, 得到中压配电网对分布式电源的总承载能力。

2 分布式电源和负荷随机模型

2.1 基本理论

蒙特卡洛法是一种以概率和统计理论方法为基础的随机模拟方法, 主要是对研究对象状态进行随机抽样, 以获得问题近似解。蒙特卡洛法又分为非序贯蒙特卡洛法和序贯蒙特卡洛法, 在建立源荷出力随机模型时, 前者对出力状态直接抽样, 模型简单、易收敛, 但在生产时序上不能考虑源荷出力的相关性; 后者可以按照生产时序对系统的循环变化过程进行统计, 模拟分布式电源出力和负荷周期性的状态循环过程。序贯蒙特卡洛法基本计算公式为

$$\hat{I} = \frac{1}{T} \int_0^T f(x_t) dt \quad (1)$$

式中: \hat{I} 为研究对象评价指标的估计值; T 为仿真总时长; x_t 为研究对象在 t 时刻的运行状态; $f(x_t)$ 为研究对象的测试函数。

若考虑研究对象的状态转移, 则需离散化, 离散公式为

$$\hat{I} = \frac{1}{MT_c} \sum_{m=1}^M \int_{(m-1)T_c}^{mT_c} f(x_m) dt = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M I_m \quad (2)$$

式中: M 为循环周期数; T_c 为循环周期; I_m 为第 m 个周期系统评价指标结果。

序贯蒙特卡洛法的收敛判据为

$$\frac{\sigma(X)}{\sqrt{M} \times E(X)} < \varepsilon \quad (3)$$

式中: X 为收敛最慢的评价指标; $\sigma(X)$ 、 $E(X)$ 分别为 X 的标准差和均值; ε 为收敛判据的给定值, 一般取 0.03~0.08。

2.2 源荷出力随机模型

目前, 分布式电源和负荷出力随机性的处理方式有两种, 一种是用指定的概率密度函数, 常用 Beta 函数、Weibull 分布双参数曲线、正态分布分别模拟分布式光伏、风能及负荷的概率密度函数; 另一种

是将分布式电源和负荷的随机性用预测偏差表示, 即认为预测值是确定型分量, 可以通过历史数据进行统计, 但预测偏差采用随机模型。由于第二种预测模型分离了可预测变量, 对随机变量更有针对性, 因此, 预测模型更准确。

因此, 针对源荷出力的随机性, 以节点负荷历史数据、分布式电源出力数据为基础, 结合序贯蒙特卡洛理论, 采用分布式电源和负荷的预测偏差随机模型, 建立分布式电源和负荷的循环周期概率分布函数, 如式(4)所示。

$$\begin{cases} P_{i,t,h}^P = S_i^P \bar{\lambda}_h^P + \delta_p^t \\ P_{i,t,h}^W = S_i^W \bar{\lambda}_h^W + \delta_w^t \\ P_{i,t,h}^L = \beta_i P_{\text{Base}}^L (1 + \alpha)^{t-1} \bar{\lambda}_h^L + \delta_l^t \end{cases} \quad (4)$$

式中: $P_{i,t,h}^P$ 、 $P_{i,t,h}^W$ 、 $P_{i,t,h}^L$ 分别为第 t 年、第 h 时刻节点 i 处的光伏、风电、负荷的有功功率; S_i^P 、 S_i^W 分别为节点 i 处光伏、风电的装机容量; $\bar{\lambda}_h^P$ 、 $\bar{\lambda}_h^W$ 、 $\bar{\lambda}_h^L$ 分别为光伏、风电、负荷在 h 时刻的负载率; β_i 为系统节点 i 的负荷系数; P_{Base}^L 为基准年系统总负荷; α 为系统年均负荷增长率; δ_p^t 、 δ_w^t 、 δ_l^t 分别为光伏、风电、负荷的预测随机偏差。

光伏、风电、负荷的预测随机偏差常符合正态分布, 表达式如式(5)所示。

$$\begin{cases} \delta_p^t \sim N(0, \sigma(h, S_i^P)) \\ \delta_w^t \sim N(0, (\frac{1}{5} S_i^W \bar{\lambda}_h^W + \frac{1}{50} S_i^W)^2) \\ \delta_l^t \sim N(0, \frac{1}{10000} (\beta_i P_{\text{Base}}^L (1 + \alpha)^{t-1})^2) \end{cases} \quad (5)$$

3 多分布式电源接入配电网承载能力模型

3.1 目标函数

假设配电网整体对多个分布式电源的承载能力为 C_H , 共有 N 个供电分区, $C_{H(a)}$ 为第 a 个供电分区的分布式电源承载能力, $S_{\text{DG},i(a)}$ 为第 a 个供电分区节点 i 的分布式电源最大可接入容量, 则配电网对多个分布式电源的承载能力目标函数可转化为式(6)。

$$C_H = \sum_{a=1}^N C_{H(a)} = \sum_{a=1}^N \max \left\{ \sum_{i \in \Omega_{\text{DG}}} S_{\text{DG},i(a)} \right\} \quad (6)$$

式中, Ω_{DG} 为系统内所有分布式电源接入节点集合。

3.2 约束条件

中压配电网运行需要考虑以下约束。

1) 线路传输容量约束

线路传输功率不能超过线路额定传输容量。

$$S_l \leq S_{l,N} \quad (7)$$

式中, S_l 、 $S_{l,N}$ 分别为线路 l 的传输功率和额定传输容量。

2) 电源出力约束

分布式电源出力不能超过接入节点的最大容量, 如式(8)所示。

$$\begin{cases} S_{DG,i} \leq S_{\max,DG,i} \\ S_{G,i} \leq S_{\max,G,i} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $S_{DG,i}$ 、 $S_{\max,DG,i}$ 分别为分布式电源出力及其接入节点的最大容量; $S_{G,i}$ 、 $S_{\max,G,i}$ 分别为常规电源出力及其接入节点的最大容量。

3) 电压偏差约束

三相公共连接点电压偏差应满足 GB/T 12325, 节点电压 U_i 满足式(9)。

$$0.93U_N \leq U_i \leq 1.07U_N \quad (9)$$

式中, U_N 为节点额定电压。

4) 谐波约束

分布式电源接入后, 注入电网的谐波电流和谐波电压应满足 GB/T 14549。

$$\begin{cases} U_{ih,i} \leq U_{ih,\max} \\ I_{ih,i} \leq I_{ih,\max} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $U_{ih,i}$ 、 $I_{ih,i}$ 分别为节点 i 注入的谐波电压和谐波电流; $U_{ih,\max}$ 、 $I_{ih,\max}$ 分别为导则规定的谐波电压和谐波电流最大允许值。

5) 短路电流约束

分布式电源接入后, 短路电流不能超标。

$$I_{d,i} \leq I_{d,\max} \quad (11)$$

式中, $I_{d,i}$ 、 $I_{d,\max}$ 分别为节点短路电流和节点短路电流限制值。

6) 主变容量约束

分布式电源接入后, 主变的下网功率或者上网功率不应超出主变额定容量。

$$\left| \sum P_{DG,T,i} - \sum P_{L,T,i} \right| \leq S_{TN,i} \quad (12)$$

式中: $\sum P_{DG,T,i}$ 、 $\sum P_{L,T,i}$ 分别为主变接入分布式电源、负荷的有功之和; $S_{TN,i}$ 为主变的额定容量。

7) 反向负载率约束

反向负载率是指流经输变电设备(一般为线路或变压器)的反向功率与设备额定容量的比值, 反向负载率超过 80% 需要暂缓分布式电源项目接入。若线路 l 的反向功率为 S_R , 反向负载率 $I_R\%$ 的表达式为

$$I_R\% = \frac{S_R}{S_{l,N}} \leq 80\% \quad (13)$$

4 模型求解

4.1 分布式电源和负荷接入位置场景简化

接入多个分布式电源的典型中压馈线简化模型如图 2 所示。变电站中压母线电压为 U_0 , 馈线上共有 n 个节点, 节点 i 的接入负荷为 $P_{L,i} + jQ_{L,i}$, 接入分布式电源容量为 $P_{DG,i} + jQ_{DG,i}$ 。

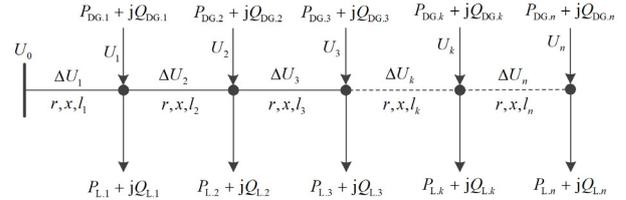


图 2 接入多个分布式电源的中压馈线简化模型

Fig. 2 Simplified model of mid-voltage feeder connected to multiple distributed generations

节点 k 到节点 $k+1$ 的馈线 $L_{k,k+1}$ 始端视在功率为

$$\dot{S}_{k,k+1} = \dot{S}_{k+1} + \Delta\dot{S}_{k+1} = P_{k,k+1} + jQ_{k,k+1} \quad (14)$$

式中: $\dot{S}_{k,k+1}$ 、 $P_{k,k+1}$ 、 $Q_{k,k+1}$ 分别为馈线 $L_{k,k+1}$ 的始端视在功率、有功功率、无功功率; \dot{S}_{k+1} 为馈线 $L_{k,k+1}$ 的末端视在功率; $\Delta\dot{S}_{k+1}$ 为馈线 $L_{k,k+1}$ 的功率损耗。

$$P_{k,k+1} = P_{L,k+1} - P_{DG,k+1} + \frac{(P_{L,k+1} - P_{DG,k+1})^2 + (Q_{L,k+1} - Q_{DG,k+1})^2}{U_{k+1}^2} R_{k+1} \quad (15)$$

$$Q_{k,k+1} = Q_{L,k+1} - Q_{DG,k+1} + \frac{(P_{L,k+1} - P_{DG,k+1})^2 + (Q_{L,k+1} - Q_{DG,k+1})^2}{U_{k+1}^2} X_{k+1} \quad (16)$$

式中, R_{k+1} 、 X_{k+1} 分别为馈线 $L_{k,k+1}$ 的电阻和电抗。

假设 r, x 分别为中压馈线单位长度电阻、电抗, l_i 为第 i 段馈线长度, 当中压馈线未接入分布式电源时, 电压偏差 $\Delta U_k\%$ 如式(17)所示。

$$\Delta U_k\% = \frac{\sum_{i=1}^k \left[r l_i \sum_{k=i}^n P_{L,k} + x l_i \sum_{k=i}^n Q_{L,k} \right]}{U_N^2} \times 100\% \quad (17)$$

在接入多个分布式电源之后, 电压损耗会发生变化, 电压偏差 $\Delta U_k\%$ 如式(18)所示。

$$\Delta U_k\% = \frac{1}{U_N^2} \left(\sum_{i=1}^k \left[r l_i \sum_{k=i}^n P_{DG,k} + x l_i \sum_{k=i}^n Q_{DG,k} \right] - \sum_{i=1}^k \left[r l_i \sum_{k=i}^n P_{L,k} + x l_i \sum_{k=i}^n Q_{L,k} \right] \right) \times 100\% \quad (18)$$

由于线路单位长度参数是定值，所以馈线电压受分布式电源和负荷的接入容量、接入位置的影响。若综合考虑负荷和分布式电源的影响，当负荷和分布式电源出力差值一定时，接入位置越远，电压偏差越大；当负荷和分布式电源接入位置一定时，两者差值越大，电压偏差越大。因此，为了简化分布式电源承载能力场景，采用模糊、K-means 等聚类方法将分布式电源和负荷接入位置聚类为线路末端或者中间某几处场景，这样能够减少位置变量，从而使随机潮流计算复杂度降低。采用分布式电源和负荷的序贯蒙特卡洛模型时，若循环周期为年，可直接抽样模拟；若循环周期为日，需考虑分布式电源和负荷差值最大时刻，即分布式电源出力最大而负荷最小时刻、分布式电源出力最小而负荷最大时刻。

4.2 求解流程

由于中压配电网的供电能力与其维数相关联(通常需要同时考虑几千或者几个节点)，分布式电源接入后，寻找配电网的最大承载能力更加困难。且分布式电源出力与负荷存在随机性，为避免复杂的卷积运算，做以下假设。

1) 由于接入单条线路距离越远，分布式电源和负荷对电压影响越大，所以假设分布式电源和负荷接入位置在线路末端。

2) 相同类型的分布式电源发电出力具有强相关性，可采用相同的概率密度函数。

3) 不同的约束条件越限可能需要对分布式电源采用不同的调控方式，如母线电压越上限一般对应着分布式电源出力最小，当负荷大时需要增大分布式电源出力。因此，配电网对分布式电源的承载力评估需要考虑各种典型的调控方式，解决的办法是基于不同时段划分采用不同的典型调控方式，在一定程度上自动考虑不同类型的分布式电源之间、分布式电源和负荷之间的相关性。

基于序贯蒙特卡洛法的配电网对分布式电源的承载能力求解流程如图 3 所示。

Step1: 设定基准电压、基准容量、循环周期及计算次数等参数，根据配电网拓扑关系，建立配电网节点导纳矩阵。

Step2: 建立各类分布式电源和负荷循环周期内的序贯蒙特卡洛概率分布函数，考虑相同类型分布式电源出力的强相关性，设置分布式电源的容量为变量。

Step3: 根据模型概率分布密度函数，生成分布式电源和负荷在生产时序周期内的随机数，结合节点导纳矩阵，进行随机潮流计算。

Step4: 根据潮流计算结果，对线路传输容量、

电源出力、电压波动、短路电流等约束校验。校验成功，进行 **Step5**，校验不成功且未达到计算次数，则跳转到下一轮计算，如果达到计算次数，则终止计算。

Step5: 统计分布式电源出力之和，如果大于前面计算结果，则记录各个分布式电源出力及总和；如果小于前面计算结果且未达到计算次数，则跳转到下一轮，如果达到计算次数，则终止计算。

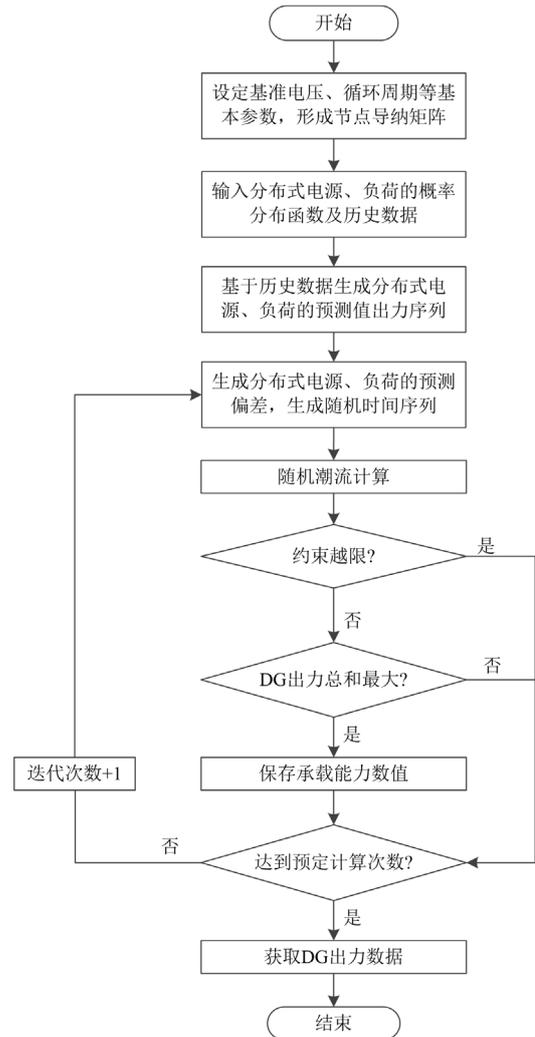


图 3 模型求解流程图

Fig. 3 Flow chart of model solution

5 分布式电源有序接入策略

中压配电网对分布式电源承载能力的大小通常取决于负荷的大小与分布、线路的线径和长度、分布式电源的接入位置和容量以及分布式电源的控制模式。基于序贯蒙特卡洛的随机潮流计算虽然能够求解配电网的总体承载能力和各个负荷/电源节点的出力上限，但电力系统要求供需实时平衡，且配

电网内部存在网络约束, 在物理结构上, 分布式电源接入接入位置和容量不同, 潮流大小不同, 对中压配电网的影响也不相同。因此, 需要引导分布式电源有序接入, 防止配电网因局部运行参数不优而导致承载能力受限的情况发生。

为了降低计算维度, 有序接入策略依然以供电分区为前提, 采用灵敏度思想, 以指标变化量和距离限值为衡量依据, 确定多分布式电源接入策略。具体思路为: 首先, 在初始状态下进行分区潮流计算, 得到各节点的电压偏差、传输容量、反向负载率、谐波等指标值; 然后, 根据分布式电源接入方案, 建立分布式电源序贯蒙特卡洛随机模型, 计算各方案下的潮流并统计各节点的指标值; 最后, 按照指标变化程度对接入方案进行排序, 实现分布式电源有序接入。为了防止误判, 指标变化程度的衡量不仅要考虑分布式电源接入前后的指标变化量, 还要考虑变化后指标值距离限值的大小。

假设某供电分区内有多个接入方案, 若考虑单约束条件, 指标变化量小、距离限值大的方案应该排在前面, 指标变化程度计算公式为

$$Y_Z = \min \left(\frac{Y_{i,Z}^{(1)} - Y_{i,Z}^{(0)}}{Y_{\text{lim},i}^{(1)} - Y_{\text{lim},i}^{(0)}} \right) \quad (19)$$

式中: Y_Z 为方案 Z 的指标变化程度; $Y_{i,Z}^{(0)}$ 、 $Y_{i,Z}^{(1)}$ 分别为分布式电源按照方案 Z 接入前后节点 i 的指标值; $Y_{\text{lim},i}$ 为节点 i 的指标限值。

若考虑多约束条件, 首先计算每个分布式电源接入方案的评价指标变化程度, 找出变化程度最大的评价指标; 然后对比每个接入方案变化程度最大的评价指标, 找出其中最小值所对应的接入方案, 即分布式电源接入最不明显方案。假设每个方案有若干个评价指标, 那么分布式电源按照方案 Z 接入后, 变化程度最大的评价指标计算公式为

$$Y_Z = \max \left(\frac{Y_{f,i,Z}^{(1)} - Y_{f,i,Z}^{(0)}}{Y_{\text{lim},f,i}^{(1)} - Y_{\text{lim},f,i}^{(0)}} \right) \quad (20)$$

式中: $Y_{f,i,Z}^{(0)}$ 、 $Y_{f,i,Z}^{(1)}$ 分别为分布式电源按照方案 Z 接入节点 i 前后第 f 个评价指标值; $Y_{\text{lim},f,i}$ 为节点 i 第 f 个评价指标的限值。

对比所有分布式电源接入方案, 指标作用最不明显的方案选择标准如式(21)所示。

$$Y = \min(Y_Z) \quad (21)$$

式中, Y 为分布式电源接入指标作用最不明显对应的方案。

6 算例分析

6.1 基本情况

以中部某城市区域配电网为例, 该城市夏季最高温度为 38°C , 年平均温度为 23°C , 太阳能年辐射为 $4500\sim 4700 \text{ MJ/m}^2$, 为太阳能二级可利用区。该城市风力资源丰富, 海拔在 70 m 以上的地区年平均风速为 $5.5\sim 6.5 \text{ m/s}$, 分布式电源开发以风、光为主。区域内共有 110 kV 变电站 4 座, 每座容量为 50 MVA , 中压馈线共 19 条, 配电网拓扑结构如图 4 所示。

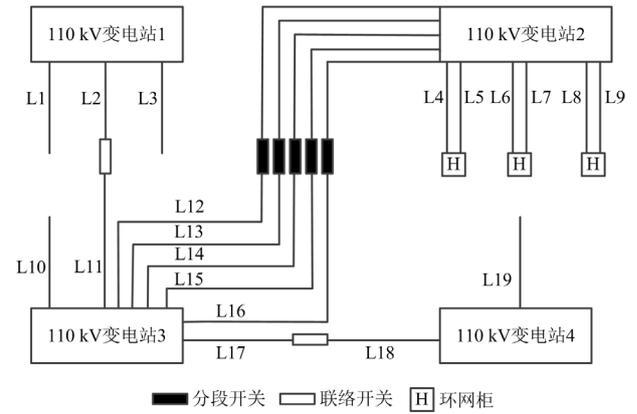


图 4 配电网拓扑结构

Fig. 4 Topological structure of distribution network

馈线基本情况及负荷分布如表 1 所示。

6.2 中压配电网承载能力计算

采用 Matlab 建立模型, 基准容量为 100 MVA , 基准电压为 10 kV , 光伏电站最小容量为 0.01 MW , 风电机组单机容量为 0.5 MW , 分布式电源和负荷序贯蒙特卡洛抽样以 24 h 为循环周期, 400 个循环周期共计抽样计算 9600 次。节点电压偏差和反向负载率均取配电网中所有馈线的最大值, 电压偏差散点及其概率分布、反向负载率散点及其概率分布如图 5—图 8 所示。

若要求电压偏差超过某一电压偏差的概率, 可对电压偏差概率分布进行积分求和。由图 6 可知, 节点电压偏差大部分集中在 $0.02\sim 0.04 \text{ p.u.}$, 该区间对应的电压偏差概率分布为 54.73% 。

馈线的反向负载率分布同电压偏差概率分布, 可积分求和得出反向负载率分布在某一区间的概率。由图 8 可知, 馈线反向负载率主要集中在 $10\%\sim 30\%$, 该区间对应的馈线反向负载率概率分布为 63.05% 。

表 1 馈线基本情况及负荷分布

Table 1 Basic information of feeder lines and load distribution

馈线	类型	长度/km	截面/mm ²	最大负荷历史 平均值/MW	负荷预测 偏差分布	线路传输 容量/MW	可接入新 能源类型
L1	架空	14.95	150	2.19	N(0,0.71)	6.5	光伏
L2	架空	27.21	150	2.39	N(0,0.73)	6.5	光伏
L3	架空	36.57	50	0.83	N(0,0.29)	2.9	光伏
L4	混合	20.34	70	1.51	N(0,0.49)	3.4	光伏
L5	架空	18.59	120	2.14	N(0,0.71)	5.3	光伏
L6	架空	10.62	120	1.82	N(0,0.59)	5.3	光伏
L7	架空	11.00	240	1.73	N(0,0.48)	7.3	光伏
L8	架空	8.00	240	2.55	N(0,1.61)	7.3	光伏
L9	混合	8.64	50	0.56	N(0,0.14)	2.9	光伏
L10	架空	13.54	150	1.33	N(0,0.53)	6.5	光/风
L11	架空	4.96	150	2.39	N(0,0.96)	6.5	光伏
L12	电缆	4.52	400	5.53	N(0,1.44)	7.5	光伏
L13	电缆	3.17	400	5.06	N(0,1.88)	7.5	光伏
L14	电缆	2.74	400	3.47	N(0,1.08)	7.5	光伏
L15	电缆	2.36	400	2.81	N(0,0.98)	7.5	光伏
L16	混合	3.74	240	3.86	N(0,0.98)	7.3	光伏
L17	混合	9.88	240	1.39	N(0,0.91)	7.3	光伏
L18	混合	10.97	150	2.66	N(0,0.89)	6.5	光伏
L19	架空	20.44	70	0.71	N(0,0.11)	3.4	光/风

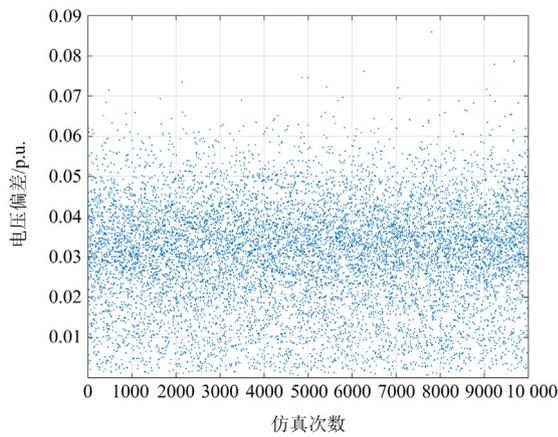


图 5 电压偏差散点图

Fig. 5 Scatter plot of voltage deviation

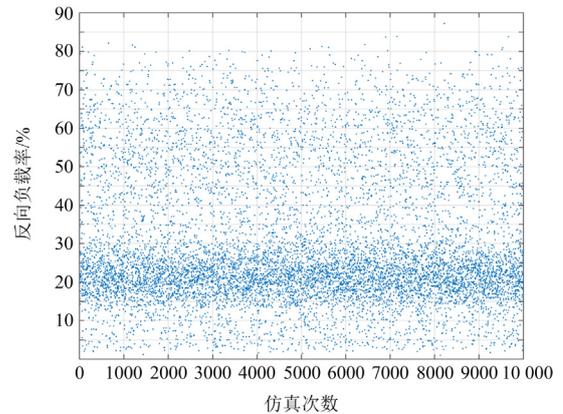


图 7 反向负载率散点图

Fig. 7 Scatter plot of reverse load rate

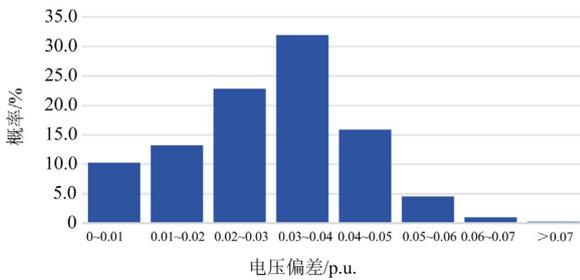


图 6 电压偏差概率分布

Fig. 6 Voltage deviation probability distribution

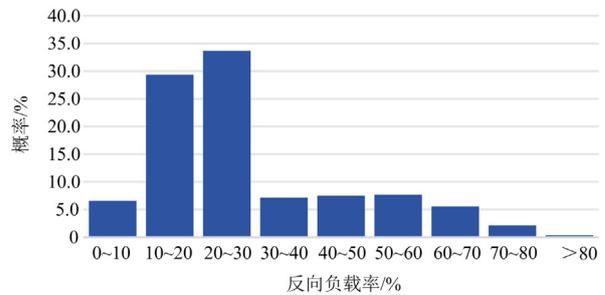


图 8 反向负载率概率分布

Fig. 8 Reverse load rate probability distribution

当配电网某馈线电压偏差超过 0.07 p.u.或者反向负载率超过 80%(重载)时, 说明分布式电源接入水平已经超过中压配电网的承载能力, 通过计算得到配电网对分布式电源的承载能力以及影响馈线承载能力的约束条件如表 2 所示。

表 2 区域配电网分布式电源承载能力

Table 2 Hosting capacity of distributed generations in the regional distribution networks

变电站	馈线	接入容量/MW		传输容量校验	承载能力越限条件	容量合计/MW
		光伏	风能			
1	L1	3.28	—	通过	电压偏差	9.30
	L2	4.08	—	通过	电源出力	
	L3	1.94	—	通过	电源出力	
2	L4	2.44	—	通过	电压偏差	18.29
	L5	3.74	—	通过	电压偏差	
	L6	2.74	—	通过	电压偏差	
	L7	3.29	—	通过	电压偏差	
	L8	4.81	—	通过	电压偏差	
	L9	1.27	—	通过	电压偏差	
3	L10	1.08	3.00	通过	谐波	40.00
	L11	5.02	—	通过	反向负载率	
	L12	6.44	—	通过	反向负载率	
	L13	6.89	—	通过	反向负载率	
	L14	5.43	—	通过	反向负载率	
	L15	3.73	—	通过	主变容量	
	L16	4.48	—	通过	电压偏差	
4	L17	3.93	—	通过	主变容量	6.31
	L18	4.17	—	通过	电源出力	
	L19	0.64	1.50	通过	电源出力	

该区域中压配电网可接入新能源容量共计 73.9 MW, 其中变电站 1—4 的可接入容量分别为 9.3 MW、18.29 MW、40 MW、6.31 MW, 可接入容量不超过各自变电站的主变容量。各条线路传输功率均能通过传输容量校验, 但存在一些约束条件限制线路接入容量, 如电压偏差、反向负载率等。根据各个变电站接入情况, 当分布式电源总体接入需求较少时, 可按照节点最大容量(电源出力约束)进行规划, 基本不会存在约束越限, 如变电站 1 和变电站 4。当分布式电源接入需求较多时, 会存在压降、潮流或主变容量等运行约束越限, 如变电站 3。在配电网承载能力最大时, 配电网节点电压时序、馈线反向负载率时序分布分别如图 9、图 10 所示。

从配电网节点电压、馈线反向负载率时序分布来看, 线路越长、分布式电源出力较负荷越大, 电压越容易越限; 而线径越小、源荷差值越大, 潮流越容易越限。

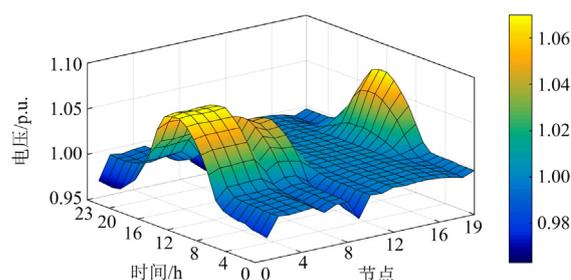


图 9 配电网节点电压时序分布

Fig. 9 Time sequence distribution of node voltages in the distribution network

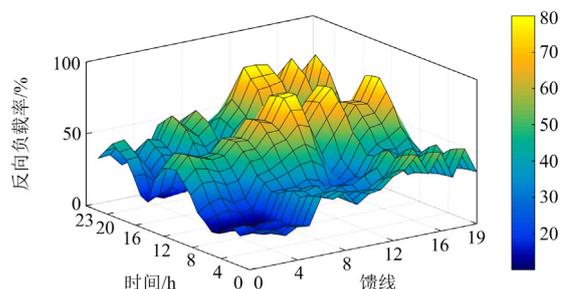


图 10 馈线反向负载率时序分布

Fig. 10 Time sequence distribution of feeder line reverse load rate

6.3 配电网承载能力提升措施

要提高中压配电网承载能力, 从规划角度一般可采取扩大导线半径、缩短供电距离或者优化分布式电源接入位置等措施。配电网承载能力未优化前可接入新能源容量为 73.9 MW, 以 L1 线路为例, 综合考虑扩大导线半径、缩短供电距离和优化接入位置, 共有 4 种优化方案, 每个优化方案具体情况如表 3 所示。4 种优化方案所需改造成本分别为: 269 万元、523 万元、1047 万元、1346 万元。

表 3 承载能力优化方案

Table 3 Optimization schemes of hosting capacity

待优化参数	优化前	优化方案 1	优化方案 2	优化方案 3	优化方案 4
接入位置	线路末端	线路末端	线路 3/4 处	线路 1/2 处	线路 1/4 处
供电距离/km	14.95	12	7	5	3
导线截面/mm ²	150	185	240	300	400

各个方案对配电网承载能力的提升情况如图 11 所示。

由图 11 可知, 方案 4 对 L1 承载能力提升最为明显, 提升了 5.47 MW, 分布式光伏承载能力单位容量成本(造价成本与提升容量之比)为 246.04 万元/MW, 为 4 个方案中最低; 方案 1 的总造价虽然低, 但分

布式电源承载能力单位容量成本却最高，为 618.14 万元/MW，即承载能力提升效果一般。由于 DG 接入容量增大以及设备参数的调整，需要对各个约束条件进行校验，校验结果如表 4 所示。

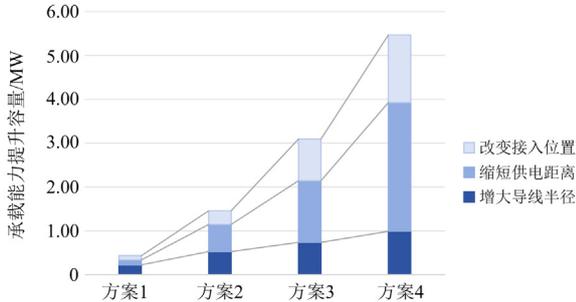


图 11 各个方案对承载能力的提升水平

Fig. 11 Improvement level of hosting capacity by each plan

表 4 约束条件校验

Table 4 Verification of constraint conditions

校验指标	优化后指标值	指标限值	校验结果
线路传输容量/MVA	6.56	9.57	通过
电源出力/MVA	6.56	9.57	通过
电压偏差/%	6	±7	通过
谐波电压/%	3.56	4	通过
谐波电流/A	7.78	20	通过
短路电流/kA	2.29	20	通过
主变容量/MVA	15.55	50	通过
反向负载率/%	72.15	80	通过

由表 4 可知，方案 4 的优化结果满足各个约束条件。同时对于 L1，若单独考虑 3 种措施提升水平，由图 11 可知，承载能力提升效果从高到低的顺序为：缩短供电距离、改变接入位置和增大导线半径。

6.4 与现有评估方法对比

现有的评估方法主要有枚举法和灵敏度分段法，枚举法主要用于电源、负荷取值较少的情况，并且评估精度较低。灵敏度分段法利用 DG 容量灵敏度，在固定负荷条件下，基于不同的 DG 容量初始值，利用指标灵敏度分段推导配电网对 DG 的承载能力，能较大简化计算复杂程度，提高计算精度，但也存在以下几个问题。

1) 计算精度一般取决于步长，当步长较小时，计算次数多，计算过程较为繁琐；当步长较大时，计算次数少，但精度有限。

2) 通常将负荷设定为某一固定值或有限变量，单一利用 DG 容量灵敏度在连续取值区间内计算配电网的承载能力；当配网节点较多、源荷取值范围较大时，容易陷入维数灾难导致收敛困难，所以对

计算工具的先进程度要求较高。并且负荷侧的取值对配电网的承载能力影响较大，当 DG 种类较多时，难以选定负荷值，比如夜晚负荷对风电消纳有利，白天负荷对光伏消纳有利，当配电网同时接入风电和光伏时，负荷的取值难以选取。

3) 不考虑源荷出力在时序上的相关性，可能会导致评估承载能力出现较大偏差。比如某个地区分布式光伏多而用电需求在夜晚出现最高峰，若取负荷的最大值衡量配电网对分布式光伏的承载能力，则会导致过高估计配电网的承载能力，因为实际上用电需求最大时负荷对分布式光伏的消纳作用很小甚至不产生作用。

结合序贯蒙特卡洛理论模拟时序周期内源荷随机生产模型，能较好地克服这些问题，从而使评估结果更为准确。根据该地区分布式电源实际接入情况，在分布式电源出力最大、负荷最小场景下，当分布式电源接入容量为 73.6 MW 时，中压配电网运行状态良好；当接入容量超过 74 MW 时，中压配电网较长线路开始出现电压偏差超标问题，说明该配电网的承载能力接近 74 MW，因此，承载能力评估结果符合实际。本文方法的评估结果与灵敏度分段法评估结果对比如表 5 所示。

表 5 评估结果对比

Table 5 Comparison of evaluation results

评估方法	是否考虑时序相关性	步长/MW	计算时间/s	承载能力/MW
本文方法	是	—	183.17	73.90
灵敏度分段法	是	0.01	211.32	73.51
	否	0.01	120.31	91.41
分段法	是	0.10	119.57	72.80

当采用灵敏度分段法时，考虑时序相关性且步长为 0.01 MW 的情况下，配电网的承载能力为 73.51 MW，与本文方法偏差 0.53%，主要是由源荷预测随机偏差以及灵敏度分段法不一致造成的，但本文方法所用时间较前者减少了 13.32%，配电网节点越多、计算精度要求越高，计算时间差距越明显。当灵敏度分段法不考虑时序相关性或步长选取为 0.1 MW 时，计算时间虽有所缩短，但计算结果较本文方法偏差分别为 23.69%、1.49%，计算精度不如本文方法。

7 结论

本文采用序贯蒙特卡洛法对分布式电源和负荷进行随机模拟，继而进行中压配电网对分布式电源承载能力的计算，通过理论研究和实例验证发现：

1) 结合序贯蒙特卡洛法建立源荷预测偏差随

机模型,能够很好地模拟分布式电源和负荷在循环周期内的出力随机性,充分考虑在生产时序上的源荷相关性,评估方法更合理。

2) 本文以分布式电源出力和节点负荷的历史数据为基础,分离出源荷随机变量中的确定型分量和可预测变量,并采用预测偏差表达源荷随机性,变动范围更小。

3) 中压配电网对分布式电源的承载能力计算是多元且非线性的,在评估分区配电网承载能力的基础上,对比不同方案对配电网的影响,以指标变化量和距离限值为衡量依据,能够充分发挥配电网的承载能力,对分布式光伏有序接入有一定的现实意义和理论依据。

参考文献

- [1] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893-1905.
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1905.
- [2] 谭青博,潘伟,王竹宁,等. 新型电力系统下综合能源系统的投资决策模型[J]. 智慧电力, 2023, 51(8): 46-52.
TAN Qingbo, PAN Wei, WANG Zhuning, et al. Investment decision model for comprehensive energy system under new power system[J]. Smart Power, 2023, 51(8): 46-52.
- [3] 谢小荣,贺静波,毛航银,等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 461-475.
XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-475.
- [4] 朱俊澎,施凯杰,李强,等. 考虑输电网潮流约束的时序生产模拟及新能源消纳能力评估[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1947-1955.
ZHU Junpeng, SHI Kaijie, LI Qiang, et al. Time series production simulation and renewable energy accommodation capacity evaluation considering transmission network power flow constraints[J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1947-1955.
- [5] 刘沅昆,张维静,张艳,等. 面向新型电力系统的新能源与储能联合规划方法[J]. 智慧电力, 2022, 50(10): 1-8.
LIU Yuankun, ZHANG Weijing, ZHANG Yan, et al. Joint planning method of renewable energy and energy storage for new-type power system[J]. Smart Power, 2022, 50(10): 1-8.
- [6] 尚勇,王喆,严欢,等. “双碳”背景下陕西新型电力系统研究探索[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(12): 20-27.
SHANG Yong, WANG Zhe, YAN Huan, et al. Research exploration of Shaanxi new type power system in the background of “dual carbon” [J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(12): 20-27.
- [7] BREYER C, KHALILI S, BOGDANOV D, et al. On the history and future of 100% renewable energy systems research[J]. IEEE Access, 2022, 10: 78176-78218.
- [8] 蒋霖,郑倩薇,王枫,等. 考虑直接负荷控制与风电不确定性的输电网扩展规划[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 138-146.
JIANG Lin, ZHENG Qianwei, WANG Feng, et al. Transmission network expansion planning considering direct load control and wind power uncertainty[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 138-146.
- [9] 舒印彪,张智刚,郭剑波,等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 1-8.
SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-8.
- [10] 李国庆,陆为华,边竞,等. 基于自适应扩散核密度估计的时序相关概率最优潮流计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(5): 1655-1663.
LI Guoqing, LU Weihua, BIAN Jing, et al. Probabilistic optimal power flow considering correlation and time series based on adaptive diffusion kernel density estimation[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1655-1663.
- [11] SHAFIULLAH M, AHMED S D, AL-SULAIMAN F A. Grid integration challenges and solution strategies for solar PV systems: a review[J]. IEEE Access, 2022, 10: 52233-52257.
- [12] 于昊正,赵寒杰,李科,等. 计及需求响应的分布式光伏集群承载能力评估[J]. 电力建设, 2023, 44(2): 122-131.
YU Haozheng, ZHAO Hanjie, LI Ke, et al. Carrying capacity evaluation of distribution network for distributed photovoltaic cluster considering user-side demand response[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(2): 122-131.
- [13] 黄鸣宇,张庆平,张沈习,等. 高比例清洁能源接入下计及需求响应的配电网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(1): 116-123.
HUANG Mingyu, ZHANG Qingping, ZHANG Shenxi, et al. Distribution network reconfiguration considering demand-side response with high penetration of clean

- energy[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(1): 116-123.
- [14] 周良学, 张迪, 黎灿兵, 等. 考虑分布式光伏电源与负荷相关性的接入容量分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(4): 56-61.
ZHOU Liangxue, ZHANG Di, LI Canbing, et al. Access capacity analysis considering correlation of distributed photovoltaic power and load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(4): 56-61.
- [15] 曲大鹏, 范晋衡, 刘琦颖, 等. 考虑配电网综合运行风险的充电桩接纳能力评估与优化[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3): 131-139.
QU Dapeng, FAN Jinheng, LIU Qiying, et al. Assessment and optimization of charging pile acceptance capacity considering the comprehensive operational risk of a distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 131-139.
- [16] 张兴友, 陈涛, 赵帅, 等. 配电网分布式电源承载能力评估指标体系构建及测算[J]. 山东电力技术, 2020, 47(11): 19-23.
ZHANG Xingyou, CHEN Tao, ZHAO Shuai, et al. Index system construction and calculation of distributed generation carrying capacity evaluation in distribution network[J]. Shandong Electric Power, 2020, 47(11): 19-23.
- [17] 文云峰, 杨游航, 邢鹏翔, 等. 多维因素制约下新能源消纳能力评估方法研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(1): 127-146.
WEN Yunfeng, YANG Youhang, XING Pengxiang, et al. Review on the new energy accommodation capability evaluation methods considering multi-dimensional factors[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(1): 127-146.
- [18] 张振宇, 王文倬, 张小奇, 等. 基于电力系统承载力指标的新能源装机规划方法[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 632-639.
ZHANG Zhenyu, WANG Wenzhuo, ZHANG Xiaoqi, et al. Renewable energy capacity planning based on carrying capacity indicators of power system[J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 632-639.
- [19] 董昱, 董存, 于若英, 等. 基于线性最优潮流的电力系统新能源承载能力分析[J]. 中国电力, 2022, 55(3): 1-8.
DONG Yu, DONG Cun, YU Ruoying, et al. Renewable energy capacity assessment in power system based on linearized OPF[J]. Electric Power, 2022, 55(3): 1-8.
- [20] 孙荣富, 袁辉, 王小路, 等. 考虑小干扰同步稳定约束的电网新能源承载能力评估方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(13): 1-8.
SUN Rongfu, YUAN Hui, WANG Xiaolu, et al. Assessment method for accommodable renewable energy capacity of grid considering small-signal synchronous stability constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(13): 1-8.
- [21] 谭笑, 王主丁, 李强, 等. 计及多约束的多分布式电源接入配电网最大承载力分段算法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(4): 72-81.
TAN Xiao, WANG Zhuding, LI Qiang, et al. Segmentation algorithm for maximum hosting capacity of distributed generator accessing to distribution network considering multiple constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(4): 72-81.
- [22] 王智伟, 张振宇, 李征, 等. 提升高渗透率新能源电网承载能力的 DSSC 优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 179-187.
WANG Zhiwei, ZHANG Zhenyu, LI Zheng, et al. Optimized DSSC configuration to enhance load-carrying capacity of the new energy grid with high permeability[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 179-187.
- [23] 郝文斌, 孟志高, 张勇, 等. 新型电力系统下多分布式电源接入配电网承载力评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(14): 23-33.
HAO Wenbin, MENG Zhigao, ZHANG Yong, et al. Carrying capacity evaluation of multiple distributed power supply access to the distribution network with the background of a new power system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(14): 23-33.
- [24] 王利利, 王皓, 任洲洋, 等. 计及灵活资源调节潜力的高压配电网新能源接纳能力评估[J]. 中国电力, 2022, 55(10): 124-131.
WANG Lili, WANG Hao, REN Zhouyang, et al. Evaluation of renewable energy accommodation capacity of high voltage distribution networks considering regulation potential of flexible resources[J]. Electric Power, 2022, 55(10): 124-131.
- [25] 鲁宗相, 林弋莎, 乔颖, 等. 极高比例可再生能源电力系统的灵活性供需平衡[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(16): 3-16.
LU Zongxiang, LIN Yisha, QIAO Ying, et al. Flexibility supply-demand balance in power system with ultra-high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(16): 3-16.

收稿日期: 2023-09-21; 修回日期: 2024-05-01

作者简介:

李响(1979—), 男, 通信作者, 硕士, 副教授, 研究方向为新能源发电与并网技术、配电网规划。E-mail: nomad0729@163.com

(编辑 周金梅)