

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2025.03.003

引用格式:侯兴哲,王思韡,苏宇,等. 低压配网日理论线损率的概率分析方法[J]. 重庆大学学报, 2025,48(3): 27-37.



低压配网日理论线损率的概率分析方法

侯兴哲¹,王思韡²,苏宇²,程瑛颖²,陈文礼²,陈飞宇³,吴至友⁴,黄浩川⁵,
何艺铭⁶,颜伟⁶

(1. 国网重庆市电力公司,重庆 400030; 2. 国网重庆市电力公司营销服务中心,重庆 401121; 3. 重庆国家应用数学中心,重庆 401331; 4. 重庆师范大学数学科学学院,重庆 401331; 5. 国网重庆市电力公司长寿供电分公司,重庆 401220; 6. 重庆大学输变电装备技术全国重点实验室,重庆 400044)

摘要:针对低压配网确定性日理论线损率计算难以支撑其波动范围的量化考核问题,提出一种低压配网日理论线损率的概率分析方法。首先,考虑低压配网三相四线接线实际,假设已知配变低压侧三相电压、分布式电源出力、负荷三相有功功率及无功功率的随机模型并进行模拟。考虑源荷相关性,采用等概率变换原则与秩相关结合的拉丁超立方技术抽样。基于蒙特卡洛模拟法,采用考虑三相不平衡的注入电流牛顿法计算潮流结果及日线损率的概率分布,为低压配网降损提供决策依据。最后,以实际低压配网衡山花园的实测数据证明该方法的有效性。

关键词:低压配网;理论线损率;概率分布;拉丁超立方;蒙特卡洛模拟

中图分类号:TM73

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2025)03-027-11

Daily theoretical line loss rate probability analysis for low voltage distribution networks

HOU Xingzhe¹, WANG Siwei², SU Yu², CHENG Yingying², CHEN Wenli², CHEN Feiyu³,
WU Zhiyou⁴, HUANG Haochuan⁵, HE Yiming⁶, YAN Wei⁶

(1. State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400030, P. R. China; 2. State Grid Chongqing Electric Power Company Marketing Service Center, Chongqing, 401121, P. R. China; 3. National Center for Applied Mathematics in Chongqing, Chongqing 401331, P. R. China; 4. School of Mathematical Sciences, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, P. R. China; 5. State Grid Chongqing Electric Power Company Changshou Branch, Chongqing 401220, P. R. China; 6. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology & System Security and New, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: Accurately determining the daily theoretical line loss rate in low-voltage distribution networks is challenging, making it difficult to quantitatively assess its fluctuation range. To address this issue, this paper proposes a probabilistic analysis method for evaluating the daily theoretical line loss rate in low-voltage

收稿日期:2024-08-29

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目(5700-202227226A-1-1-ZN)。

Supported by State Grid Headquarters Technology Project(5700-202227226A-1-1-ZN).

作者简介:侯兴哲(1965—),男,教授级高级工程师,主要从事电测量技术研究,(Email)hhxz@cq.sgcc.com.cn。

通信作者:颜伟,男,博士,教授,(E-mail)cquyanwei@cqu.edu.cn。

distribution networks. First, the actual three-phase four-wire connection of the low-voltage distribution network is considered, and it is assumed that the random models of three-phase voltage, distributed power output, and the three-phase active and reactive power of the distribution transformer on the low-voltage side are known and simulated. Then, source-load correlation is incorporated, and Latin hypercube sampling, combined with the equal probability transform principle and rank correlation, is employed. Finally, using the Monte Carlo simulation method, the probabilistic distribution of power flow and the daily theoretical line loss rate is calculated by the Newton injection current method, taking three-phase unbalance into account. This approach provides a decision-making basis for reducing losses in low voltage distribution networks. Experimental data from the Hengshan Garden low-voltage distribution network validate the effectiveness of the proposed method.

Keywords: low-voltage distribution network; theoretical line loss rate; probability distribution; Latin hypercube sampling; Monte Carlo simulation

线损率是衡量电网运行经济性和技术性的重要综合性指标^[1]。低压配网是电力系统的末端单元^[2],具有电压等级低、线路分支多和用户负荷不对称等特点,存在网架结构薄弱和设备老化等问题,导致其损耗在电网整体损耗中占比较高。理论线损可与实际线损对比,判断现有低压配网结构是否合理,运行方式是否经济^[3],为配网优化提出依据,但低压配网的理论线损计算仍存在问题。

一方面,目前常用的线损计算方法简单但精度较低,张闯伟^[4]采用均方根电流法,合理选取台区代表日,假设每小时内负荷电流不变进行积分运算求取理论线损。白帆^[5]基于等效电阻法,用总配电变压器有功和无功功率计算用户侧的等效电阻,使计算结果更加精确,但假设每条线路负载曲线一致、每个节点功率因数相同,不符合低压配网实际。翟术然等^[6]提出基于电压损失的台区线损评估方法,以线路末端有一个集中负荷时的功率损耗和电压损耗百分数之间的关系计算台区线路损耗。但这些方法都没有考虑低压配网的三相四线接线实际及其具体拓扑信息,所得结果不够精确。

另一方面,确定性的理论线损计算难以反应负荷、电源等不确定因素的随机变化对低压配网线损率的变化,具有局限性,可将概率分析方法引入理论线损计算中。在输电网中,颜伟等^[7]采用正态分布随机数模拟负荷功率状态,建立线路安全约束模型模拟潮流控制状态,确定网络线损率的范围。在配网中,陈芳等^[8]对月电量进行概率建模,按各类负荷的特征曲线匹配各时段负荷,基于潮流计算进行蒙特卡洛模拟(monte carlo simulation, MCS)得出日线损样本,但该文献没有考虑配网的不对称结构,忽略了各用户电量间的相关性对线损概率分布的影响,且存在传统蒙特卡洛模拟法计算量大、效率较低的问题。

随着中国能源绿色低碳转型步伐进一步加快,分布式电源的并入使低压配网由单一电源的简单网络变成了复杂的多载体网络^[9],电能传输方向发生改变,其潮流特性和线损率产生影响。文旭等^[10]满足节能降耗的需要,将风电机组并入输电网,假设其风速服从威布尔分布,对绿色能源出力、负荷状态及电压无功控制进行模拟。但低压配网中暂没有考虑分布式电源并入的理论线损率概率分析方法。

针对以上问题,文中提出基于精确潮流计算、考虑随机变量相关性的低压配网日理论线损率的概率分析方法,将配变低压侧三相电压、分布式电源出力、用户三相有功功率及无功功率作为随机变量建立概率分布模型;并考虑各随机变量间相关性,采用基于等概率变换和秩相关相结合的拉丁超立方抽样技术(latin hypercube sampling, LHS)进行抽样;最后,根据蒙特卡洛模拟法,进行多断面小时级注入电流型牛顿法潮流计算,得到日理论线损率的概率分布,为低压配网的降损管理提供更为全面可靠的参考信息和决策依据^[11]。

1 日理论线损率分析的随机变量及模型

1.1 随机变量的数学模型

在进行低压配网日理论线损率的概率分析时,考虑低压配网三相四线制的拓扑特征,将配变低压侧三相电压、光伏出力、用户三相有功功率及无功功率作为随机变量,假设已知各随机变量的概率分布函数,并基于

随机变量的历史样本数据可求取分布函数的参数以实现随机变量的状态模拟。

假设,配变低压侧三相电压、用户三相有功功率及无功功率1天24个整点时刻状态的波动均服从正态分布^[12]。以用户三相电压为例,建立其各断面概率分布模型为

$$f(U_i^d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_i^d} \exp\left(-\frac{(U_i^d - \mu_i^d)^2}{2(\sigma_i^d)^2}\right), \quad (1)$$

式中: d 为相编号; i 为端点编号; U_i^d 为端点 i 的 d 相电压量测数据; μ_i^d 、 σ_i^d 分别为 U_i^d 的均值及标准差。

基于光伏电源的历史数据,假设其出力时段为早上8点至晚上7点,各断面出力服从Beta分布,其概率分布模型^[13]为

$$f(p) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{p}{p_{\max}}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{p}{p_{\max}}\right)^{\beta-1}, \quad (2)$$

式中: p 、 p_{\max} 分别为光伏电源的实际输出功率和最大输出功率; $\Gamma(\cdot)$ 为伽玛函数; α 、 β 为Beta分布的形状参数。

1.2 随机变量相关性描述

文中采用Spearman相关系数^[14]描述低压配网源荷随机变量的相关性。假设,2个随机变量 \mathbf{K} 和 \mathbf{T} 的 N 组样本为 $[k_1, k_2, \dots, k_n]$ 与 $[t_1, t_2, \dots, t_n]$,则两者之间的Spearman相关系数 $\rho(\mathbf{K}, \mathbf{T})$ ^[15]可表示为

$$\rho(\mathbf{K}, \mathbf{T}) = \frac{\sum_{i=1}^N (R_{K_i} - \bar{R}_K)(R_{T_i} - \bar{R}_T)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (R_{K_i} - \bar{R}_K)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (R_{T_i} - \bar{R}_T)^2}}, \quad (3)$$

式中: R_{K_i} 和 R_{T_i} 分别为 k_i 和 t_i 的秩次; \bar{R}_K 和 \bar{R}_T 为秩次的平均值。随机变量的变化趋势越近似,相关系数越接近1或-1。则文中 n 个随机变量间的秩相关系数矩阵为 $\boldsymbol{\rho}$ 为^[16]

$$\boldsymbol{\rho} = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{12} & \cdots & \rho_{1n} \\ \rho_{21} & 1 & \cdots & \rho_{2n} \\ \cdots & \cdots & 1 & \cdots \\ \rho_{n1} & \rho_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

2 考虑随机变量相关性的LHS方法

传统蒙特卡洛模拟法采用简单抽样方法,经过大规模采样才能取得较为准确的结果^[17],且对存在相关性的源荷随机变量,无法直接通过抽样产生随机样本。文中采用Cholesky分解技术和等概率转换原则相结合的拉丁超立方抽样方法,将具有相关性的随机变量转换为相互独立的标准正态分布随机样本,再由其逆过程转换为具有相关性的源荷随机样本。

2.1 源荷概率分布的标准正态转换

假设,存在 n 个具有相关性的随机变量 $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n]$,此时随机变量之间的相关系数为 C_x ,根据等概率转换原则将 \mathbf{X} 变换为标准正态分布的随机向量 $\mathbf{Y} = [y_1, y_2, \dots, y_n]$,此时 \mathbf{X} 与 \mathbf{Y} 的函数关系为

$$\begin{cases} \Phi(y_i) = F(x_i), \\ x_i = F^{-1}[\Phi(y_i)]. \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\Phi(\cdot)$ 表示累积概率分布函数; $F^{-1}(\cdot)$ 表示函数 $F(\cdot)$ 的反函数。

当随机变量服从正态分布时,可直接转换为标准正态分布为

$$y_i = \frac{y_i' - \mu_i'}{\sigma_i'}, \quad (6)$$

式中: y_i 为标准正态分布变量; y_i' 为正态分布变量; μ_i' 和 σ_i' 分别为变量 y_i' 的均值和标准差。

2.2 含相关性随机变量的Cholesky分解

Cholesky分解^[18]可将正定矩阵转换为下三角矩阵与其转置矩阵的乘积形式,从而降低标准正态非分布随机变量之间的相关性。假设2.1节转换得到的含相关性的标准正态随机向量 \mathbf{Y} 的相关系数矩阵为 \mathbf{C}_y ,则进

行Cholesky分解得到

$$C_y = LL^T, \quad (7)$$

式中, L 为Cholesky分解得到的下三角矩阵。

根据下三角矩阵 L 和随机变量 Y 求解相互独立的标准正态分布随机变量 U 为

$$U = L^{-1}Y = L^{-1} \begin{bmatrix} \Phi^{-1}[F(x_1)] \\ \dots \\ \Phi^{-1}[F(x_n)] \end{bmatrix}. \quad (8)$$

2.3 含相关性随机变量的LHS采样实现

基于等概率变换原则和Cholesky分解,文中实现了随机变量 X 到 Y 再到 U 的转换。根据各随机变量的概率分布模型实现考虑相关性的LHS抽样方法的具体实施步骤如下。

1) 计算随机变量的相关系数 C_x : 根据配变低压侧三相电压、用户有功功率及无功功率的历史量测数据计算各随机变量之间的相关性。

2) 分别随机变量的相关系数矩阵 C_x : 采用Cholesky分解得到 C_x 的下三角矩阵 P 。

3) 生成标准正态分布随机变量矩阵 Y : 调用使总体抽样结果服从正态分布的拉丁超立方抽样函数得到 Y , 计算其相关系数矩阵 C_y , 并基于Cholesky分解得到其下三角矩阵 Q 。

4) 基于矩阵变换得新标准正态分布随机变量矩阵 $U = Y(PQ^{-1})$ 。

5) 排序: 对随机变量矩阵 U 排序, 得到顺序矩阵 L_s , 并使 Y 按照顺序矩阵 L_s 排序。

6) 获取采样数据: 根据式(5), 转换得到源荷满足相关性要求的采样样本数据。

3 基于MCS的日理论线损率概率分析方法

3.1 低压配网的三相四线潮流计算方法

3.1.1 线路等值模型

低压配网存在三相负荷和单相负荷, 所以有三相四线制连接的完全支路和单相二线制连接的缺相支路。支路完全的三相四线制配电线路等值模型如图1所示, a, b, c 表示端点的三相节点, n 表示端点的中性点; \dot{U}_k^δ ($\delta \in B_1, B_1 = \{a, b, c, n\}$) 表示端点 k 的 δ 相电压; \dot{I}_{ij}^δ 表示端点 i 和 j 之间的 δ 相电流; $Z_{ij}^{\delta_1, \delta_2}$ ($\delta_1 \in B_1, \delta_2 \in B_1$) 表示线路阻抗, 当 $\delta_1 = \delta_2$ 时表示各相线路的自阻抗; 当 $\delta_1 \neq \delta_2$ 时表示各相线路之间的互阻抗; $Z_{ng(k)}$ 表示中性点接地阻抗^[19]。

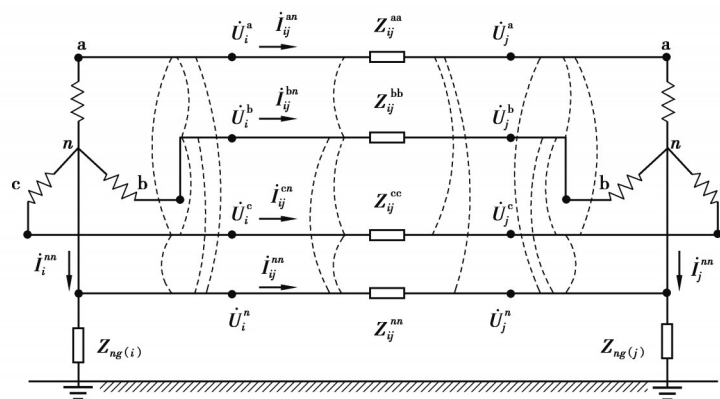


图1 配电线路等值模型

Fig. 1 Distribution line equivalence model

此时两端点 ij 间的支路导纳矩阵 Y_{ij} 表示为

$$Y_{ij} = \begin{bmatrix} y_{ij}^{aa} & y_{ij}^{ab} & y_{ij}^{ac} & y_{ij}^{an} \\ y_{ij}^{ba} & y_{ij}^{bb} & y_{ij}^{bc} & y_{ij}^{bn} \\ y_{ij}^{ca} & y_{ij}^{cb} & y_{ij}^{cc} & y_{ij}^{cn} \\ y_{ij}^{na} & y_{ij}^{nb} & y_{ij}^{nc} & y_{ij}^{nn} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中, y_{ij} 为支路导纳($\delta_1 = \delta_2$ 时表示各相自导纳, $\delta_1 \neq \delta_2$ 时表示支路间互导纳)。

若为缺相的不完全支路, 只需在导纳矩阵对应行列补 0。

3.1.2 负荷模型

假设三相负荷以恒功率星型接线方式接入低压配网中, 接线图如图 2 所示。

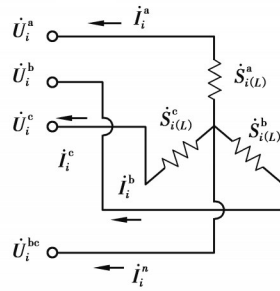


图 2 星形接线负荷模型

Fig. 2 Y-shaped load model

此时三相负荷注入电流公式为

$$\begin{cases} \dot{I}_i^d = -[\dot{S}_{i(L)}^d / (\dot{U}_i^d - \dot{U}_i^n)]^* \\ \dot{I}_i^n = -\sum_{d \in B_p, ge} \dot{I}_i^d \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\dot{S}_{i(L)}^d (d \in B_p, B_p = \{a, b, c\})$ 表示负荷 d 相相对于中性点的视在功率; \dot{I}_i^d 表示负荷 d 相电流; \dot{I}_i^n 表示负荷中性点电流; \dot{U}_i^d 表示负荷 d 相电压; \dot{U}_i^n 表示负荷中性点电压。

若为单相负荷, 则只存在单相线(假设为 a 相线)和中性线, 则其注入电流公式为

$$\begin{cases} \dot{I}_i^a = -[\dot{S}_{i(L)}^a / (\dot{U}_i^a - \dot{U}_i^n)]^* \\ \dot{I}_i^n = -\dot{I}_i^a \end{cases} \quad (11)$$

3.1.3 分布式电源模型

分布式电源通过滤波电抗并入低压配网时的结构如图 3 所示^[20]。 $\dot{I}_i^d, Z_i^d (d \in B_p)$ 分别为滤波支路的电流和电抗; \dot{U}_i^{ab} 和 \dot{U}_i^{bc} 分布式电源并网端点 i 的 2 组线电压。

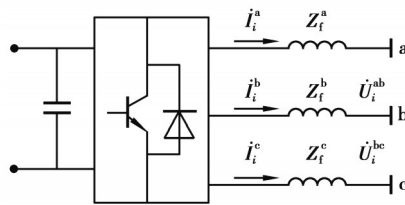


图 3 分布式电源结构图

Fig. 3 Distributed power supply structure

3.2 潮流方程的建立

文中采用注入电流型牛顿法进行潮流计算, 注入电流的实虚部平衡方程为

$$\frac{P_i^{dn} (e_i^d - e_i^n) + Q_i^{dn} (f_i^d - f_i^n)}{(e_i^d - e_i^n)^2 + (f_i^d - f_i^n)^2} = \sum_{k \in \varphi_i} \sum_{\delta \in B_p} (G_{ik}^{d\delta} e_k^\delta - B_{ik}^{d\delta} f_k^\delta), \quad (12)$$

$$\frac{P_i^{dn}(f_i^d - f_i^n) + Q_i^{dn}(e_i^d - e_i^n)}{(e_i^d - e_i^n)^2 + (f_i^d - f_i^n)^2} = \sum_{k \in \varphi_i} \sum_{\delta \in B_i} (G_{ik}^{d\delta} f_k^\delta + B_{ik}^{d\delta} e_k^\delta) \quad (13)$$

式中: P_i^{dn} 和 Q_i^{dn} 分别为端点 i 的 d 相有功功率和无功功率; e_i^δ 和 f_i^δ 分别为 \dot{U}_i^δ 的实部和虚部; e_i^n 和 f_i^n 分别为中性点电压 \dot{U}_i^n 的实部和虚部; φ_i 表示与端点 i 相连的端点集合(且包括端点 i)。

分布式电源采用对称电流控制,以 c 相作共相,具体公式如下:

$$\begin{cases} \text{Im}(\dot{I}_a e^{j120^\circ}) = \text{Im}(\dot{I}_c) \\ \text{Im}(\dot{I}_b e^{-j120^\circ}) = \text{Im}(\dot{I}_c) \\ \text{Re}(\dot{I}_a e^{j120^\circ}) = \text{Re}(\dot{I}_c) \\ \text{Re}(\dot{I}_b e^{-j120^\circ}) = \text{Re}(\dot{I}_c) \end{cases} \quad (14)$$

3.3 日理论线损率概率分析的计算步骤

基于等概率变换原则和秩相关相结合的拉丁超立方抽样方法,进一步结合蒙特卡洛模拟技术给出一种低压配网日理论线损率的概率分析方法,具体流程图如图4所示。

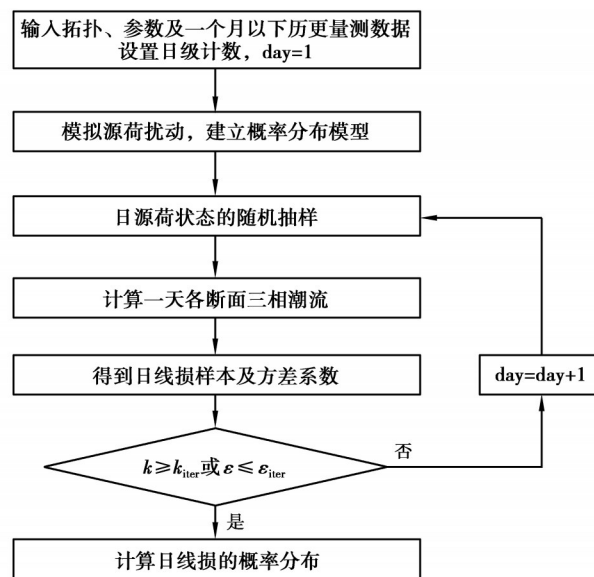


图4 日理论线损率的概率分析方法流程图

Fig. 4 Flow chart of probabilistic analysis method of daily theoretical line loss rate

具体计算步骤如下。

1) 参数和初始化设置: 输入低压配网网络结构参数、一个月及以上的历史量测数据, 设定日断面数、最大迭代次数 k_{\max} 、最小迭代次数 k_{\min} 和日理论线损率样本方差系数 $\varepsilon_{\text{iter}}$, 并初始化迭代次数。

2) 随机变量的概率分布模型建立: 基于历史量测数据建立配变低压侧的三相电压、用户三相有功功率及用户三相无功功率的正态分布概率模型, 建立分布式电源出力的 Beta 分布模型。

3) 抽样随机样本: 考虑随机变量之间的相关性, 基于拉丁超立方技术抽样随机变量的 N 组样本。

4) 基于低压配网三相潮流计算一天各断面潮流: 根据抽样样本数据及网络结构参数, 采用注入电流型牛顿法进行小时级三相潮流计算并计算日线损率。

5) 求取日理论线损率的方差系数: 当迭代次数大于最小迭代次数 k_{\min} 时, 根据步骤(4)的日理论线损率样本计算方差系数 ε 。

6) 判断是否收敛: 若 $\varepsilon > \varepsilon_{\text{iter}}$, 则重复步骤(4)到步骤(5); 若 $\varepsilon \leq \varepsilon_{\text{iter}}$, 则停止迭代。

7) 根据日理论线损率样本分析其概率分布。

4 算例分析

4.1 基础数据

以某地区的衡山花园低压配网为算例进行分析,其接线图如图 5 所示。该网络共 23 个端点,在端点 1 处主要分为 2 支。端点类型方面,端点 1 为配变低压侧虚拟电源(即平衡端点),端点 3、6、7、9、12、13、15、17、21 为三相负荷,端点 19 为 a 相负荷,端点 23 为 c 相负荷。线路型号方面,各负荷与相邻端点之间导线采用 4*YJV-50,其余导线型号为 4*YJV-95。仿真设置参数如下:潮流计算迭代判据的收敛精度为 10^{-5} ;蒙特卡洛模拟中,最小迭代次数 k_{min} 为 100,最大迭代次数 k_{max} 为 2 000,样本方差系数的收敛精度为 0.001 5,每日断面数为 24。

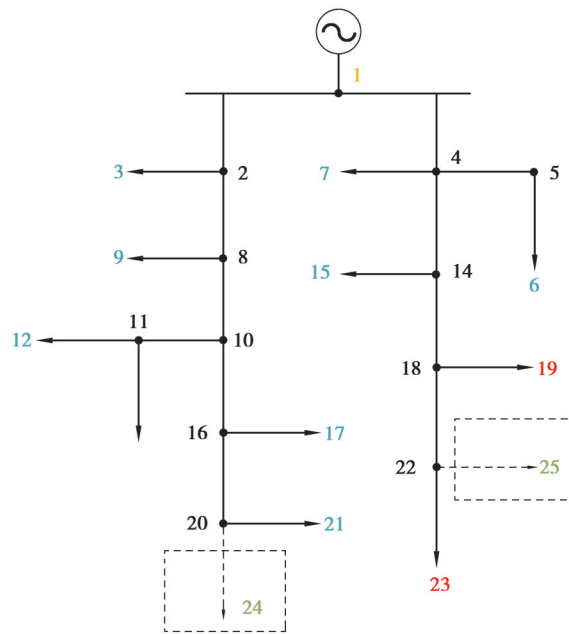
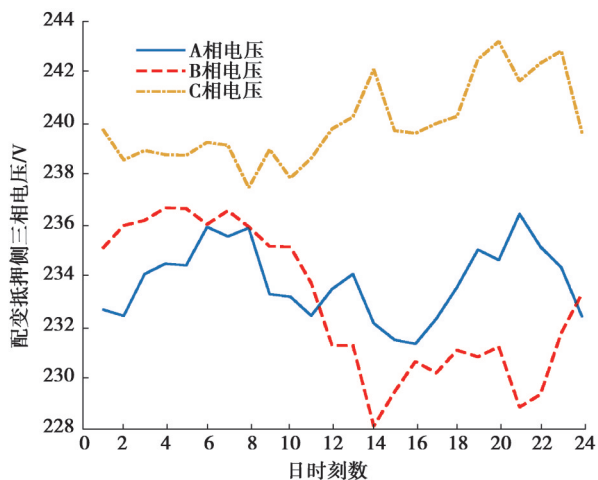


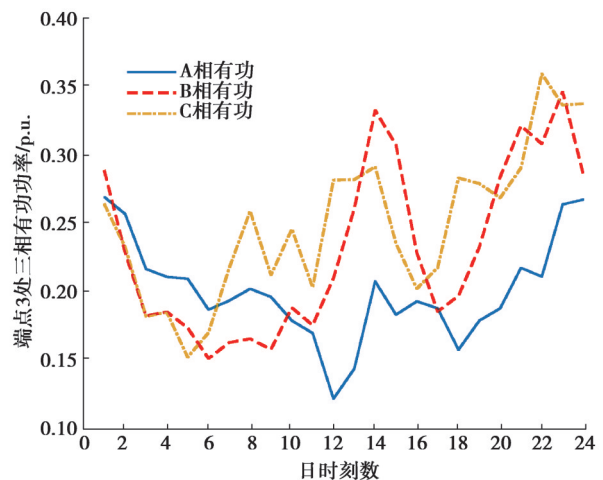
图 5 衡山花园接线图

Fig. 5 Hengshan Garden wiring diagram

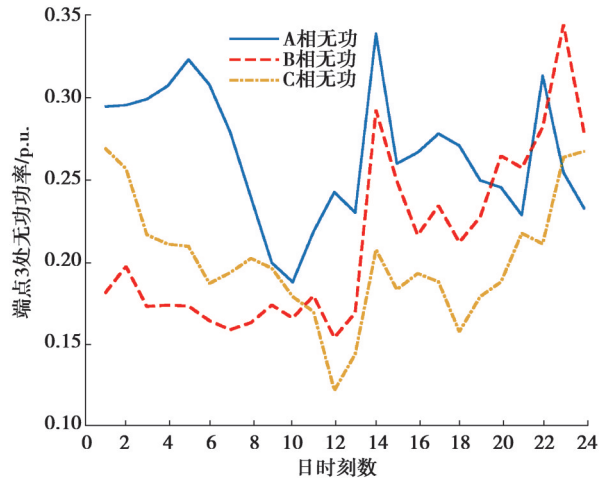
在该低压配网中,配变低压侧三相电压的期望曲线如图 6(a)所示,假设三相电压随机波动满足正态分布,方差为电压均值的 5%。其中一个负荷端点经归一化处理后的三相有功功率曲线和无功率功率曲线分别如图 6(b)和图 6(c)所示,假设三相有功和无功波动服从正态分布,标准差为其均值的 10%。



(a) 配变低压侧三相电压期望曲线



(b) 端点3处三相有功期望曲线



(c) 端点3处三相无功期望曲线

图6 部分随机变量24时段期望图

Fig. 6 Partial random variable 24 time periods expectation

4.2 随机变量相关性对日线损率影响分析

在实际低压配网中,各随机变量之间绝非完全独立的,而是存在相关性,本节在不考虑分布式电源并网的情况下,假设各端点三相随机变量之间的相关系数取相同值,分别为0、0.3、0.5、0.7。

在随机变量不同相关性下,得到日理论线损率的均值和标准差分别如图7所示。可知随着随机变量间相关性的增强,日理论线损率的均值基本无明显改变,而标准差会增大。

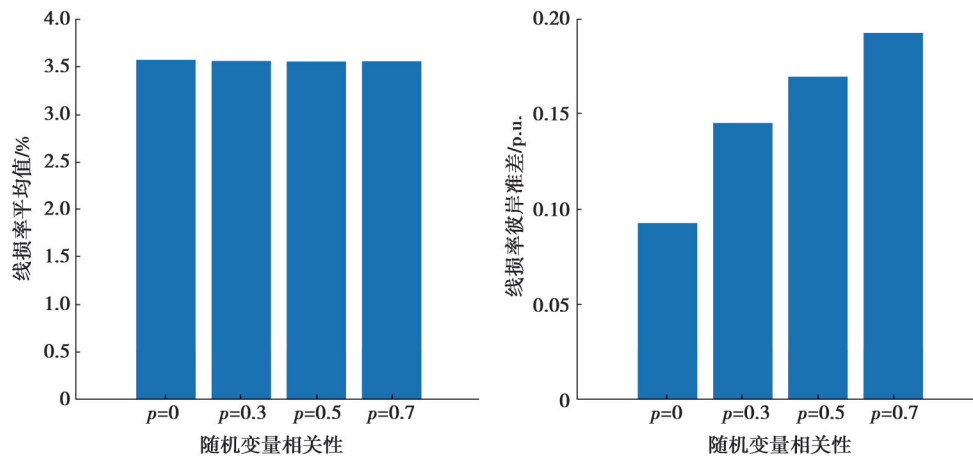


图7 随机变量不同相关性下日理论线损率的均值和标准差

Fig. 7 Mean and standard deviation of daily theoretical line loss rate under different correlations of random variables

日理论线损率的概率密度曲线如图8所示。图中纵坐标的PDF表示概率密度。从图中可知,日线损率的分布范围会随着随机变量相关性的增强而变大,概率密度分布会逐渐变得矮胖。

表1为随机变量不同相关性下的日线损率相关仿真结果,由表可知,当各变量独立,日理论线损率的变化范围为3.272%~3.840%;相关性为 $p=0.3$ 、 $p=0.5$ 和 $p=0.7$ 时,日理论线损率的变化范围分别为3.089%~4.049%、3.107%~4.111%及2.929%~4.202%,日线损率的变化范围在逐渐增大。而日线损率的均值变化范围较小,标准差分别为0.0927、0.1455、0.1699及0.1929,在逐渐增大。文中采用低压配网日理论线损率的方差系数作为蒙特卡洛模拟结束的收敛判据,随着随机变量相关性的增强,所需模拟次数分别为301、741、1015及1304,所需随机变量的样本数越多,模拟规模越大。

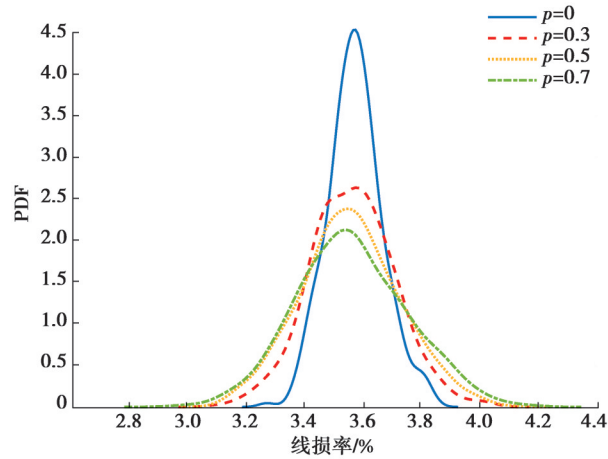


图 8 随机变量不同相关性下日理论线损率的 PDF

Fig. 8 PDF of daily theoretical line loss rates under different correlations of random variables

表 1 随机变量不同相关性下的仿真结果

Table 1 Simulation results under different correlations of random variables

随机变量相关性 p	日线损率变化范围/%	日线损率平均值/%	日线损率标准差/p.u.	模拟次数/次
0	3.272~3.840	3.573	0.092 7	301
0.3	3.089~4.049	3.564	0.145 5	741
0.5	3.107~4.111	3.557	0.169 9	1 015
0.7	2.929~4.202	3.561	0.192 9	1 304

4.3 分布式电源并网对日线损影响分析

分布式电源在并入低压配网时会对系统电能传输方向、潮流结果及线损率产生影响。本节将光伏电源并入衡山花园台区,在图 5 基础上接入 2 个分布式电源,分别接在 24、25 端点,仿真分析分布式电源对日理论线损率的影响。

假设各随机变量相关性 $p=0.5$,对比分析不含分布式电源和含分布式电源 2 种情况下的低压配网日理论线损率概率分布结果如图 9 所示,日理论线损率数值对比如表 2 所示。可知不含分布式电源时低压配网日理论线损率期望值为 3.557%,含分布式电源时日理论线损率期望值为 3.109%,相比不含分布式电源时降低了 0.448%。含分布式电源时概率分布曲线整体左移,在蒙特卡洛模拟中线损率的变化范围由 3.101%~4.111% 变为 2.665%~3.534%,说明分布式电源的不确定出力对线损率分布范围影响较大,能有效降低低压配网的线损率。同时日理论线损率的波动区间由 1.01% 降低到 0.869%,标准差也由 0.169 9 变为 0.141 8,说明并入分布式电源后,线损率的波动范围变小,数据更加集中。

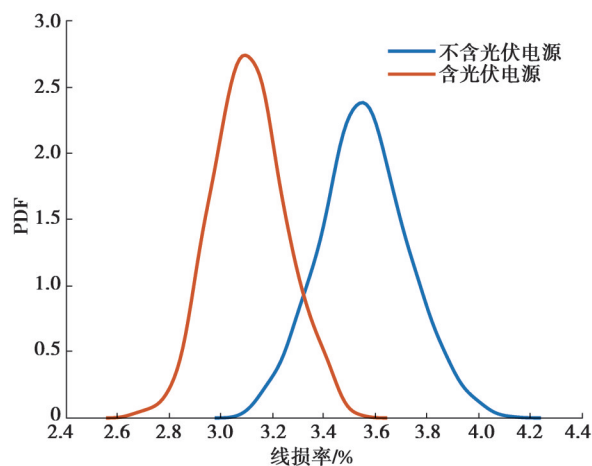


图 9 2 种情况下日理论线损率的 PDF 对比

Fig. 9 PDF comparison of daily theoretical line loss rates under two conditions

表2 2种情况下日理论线损率数值对比

Table 2 Numerical comparison of daily theoretical line loss rate under two conditions

仿真条件	线损率变化范围/%	线损率平均值/%	线损率标准差/p.u.
不含分布式电源	3.101~4.111	3.557	0.169 9
含分布式电源	2.665~3.534	3.109	0.141 8

5 结 论

针对低压配网确定性日理论线损率计算难以量化其波动范围的问题,提出了一种低压配网日理论线损率的概率分析方法,所提方法有以下特点:

1)将配变低压侧三相电压、光伏电源出力、用户三相有功及无功功率作为随机变量,符合低压配网三相四线制接线实际。

2)考虑随机变量间相关性,采用Cholesky分解和等概率转换原则相结合的拉丁超立方方法进行抽样。并对比分析不同相关性对日理论线损率分布的影响,随着随机变量间相关性的增强,日理论线损率均值基本不变,标准差增大。

3)将分布式电源并入低压配网,建立其潮流模型并计算日理论线损率的分布,与不含分布式电源相比,日理论线损率的均值明显减小,波动范围变小,数据更加集中。

参考文献

- [1] 李煜. 计及分布式电源接入影响的配电网极限线损研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
Li Y. Study on ultimate line loss of distribution network considering the influence of distributed generation access[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [2] 张之涵, 许泽宁, 吕东, 等. 基于概率分布的低压台区线损异常原因判定方法[J]. 电工技术, 2020(22): 116-119.
Zhang Z H, Xu Z N, Lv D, et al. Judgment method of abnormal line loss in low-voltage station area based on probability distribution[J]. Electric Engineering, 2020(22): 116-119. (in Chinese)
- [3] 胡毅飞. 含分布式电源的10kV配电网线损计算研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2017.
Hu Y F. Research on line loss calculation of 10kV distribution network with DG[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2017. (in Chinese)
- [4] 张闯伟. 榆社县配电网理论线损计算与降损措施研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
Zhang C W. Research on theoretical calculation and loss reduction measures of Yushe County distribution network[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [5] 白帆. 等值电阻法计算线损的简化研究[D]. 保定: 河北大学, 2014.
Bai F. Study on the equivalent resistancemethod to simplify the calculation of line loss[D]. Baoding: Hebei University, 2014. (in Chinese)
- [6] 翟术然, 张兆杰, 卢静雅, 等. 一种基于电压损失的台区线损评估方法: CN115169792A[P], 2022-10-11.
Zhai S R, Zhang Z J, Lu J Y, et al. The utility model relates to a line loss assessment method for station area based on voltage loss: China, CN115169792A[P], 2022-10-11. (in Chinese)
- [7] 颜伟, 李佐君, 吕志盛. 输电网络线损率的概率评估方法[J]. 电气应用, 2008, 27(20): 57-63.
Yan W, Li Z J, Lyu Z S. Probabilistic method for evaluating transmission loss rate[J]. Electrotechnical Application, 2008, 27(20):57-63. (in Chinese)
- [8] 陈芳, 张利, 韩学山, 等. 配电网线损概率评估及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13): 39-44.
Chen F, Zhang L, Han X S, et al. Line loss evaluation and application in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(13): 39-44. (in Chinese)
- [9] 吴佳文. 含分布式电源的配电网线损分析与降损措施研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2022.
Wu J W. Research on line loss analysis and loss reduction measures of distribution network with distributed generation[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2022. (in Chinese)

- [10] 文旭,颜伟,黄森,等. 计及绿色能源出力不确定性的输电网线损率概率评估[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 169-175.
Wen X, Yan W, Huang M, et al. Probabilistic transmission loss rate evaluation under green energy generation uncertainty[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 169-175. (in Chinese)
- [11] 黄德志,刘显淋,王宁,等. 基于同时段功率电量的台区电网典型日理论线损计算方法[C]//浙江省电力学会2021年度优秀论文集. 北京:中国电力出版社, 2022: 46-50.
Huang D Z, Liu X L, Wang N, et al. Calculation method of typical daily theoretical line loss of platform grid based on simultaneous power quantity[C]//2021 Outstanding Proceedings of Zhejiang Electric Power Society. Beijing: China Electric Power Press, 2022: 46-50.(in Chinese)
- [12] 户秀琼,梁清清. 交直流电力系统概率潮流计算新方法[J]. 科技与创新, 2023(6): 10-14.
Hu X Q, Liang Q Q. A new probabilistic power flow calculation method for AC/DC power systems[J]. Science and Technology & Innovation, 2023(6):10-14. (in Chinese)
- [13] 吕航,吴琼,王浩婷,等. 考虑不确定性的电热耦合多能微网系统概率潮流计算[J]. 上海电力大学学报, 2023, 39(2): 167-174.
Lyu H, Wu Q, Wang H, et al. Probabilistic tide calculation of electro-thermal coupled multi-energy micro-grid system considering uncertainty[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2023, 39(2): 167-174. (in Chinese)
- [14] 季鹏,陈芳芳,徐天奇,等. 基于 Spearman 相关系数法与有功分量法的高阻接地故障选线方法研究[J]. 山东电力技术, 2022, 49(12):8-13,31.
Ji P, Chen F F, Xu T Q, et al. Research on high-resistance grounding fault line selection method based on spearman correlation coefficient and active component[J]. Shandong Electric Power, 2022, 49(12): 8-13, 31. (in Chinese)
- [15] 车玉龙,吕晓琴,王晓茹. 考虑相关性的牵引负荷功率对电网影响概率分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(9): 3250-3261.
Che Y L, Lyu X Q, Wang X R. Probabilistic analysis of impact of traction load power on power grid considering correlation[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3250-3261. (in Chinese)
- [16] 赵毅,吴志,钱仲豪,等. 计及源-荷时空相关性的主动配电网分布式优化调度[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(19): 68-76.
Zhao Y, Wu Z, Qian Z H, et al. Distributed optimal dispatch of active distribution network considering source-load temporal and spatial correlations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(19): 68-76. (in Chinese)
- [17] 许进. 计及源-荷随机波动的电力系统可靠性评估[D]. 太原:太原理工大学, 2017.
Xu J. Power system reliability assessment considering random fluctuations of source and load[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [18] 皇甫成,郭金智,贾非,等. 一种考虑新能源出力相关性及不确定性的分布式发电规划策略[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(3): 105-110, 118.
Huang F C, Guo J Z, Jia F, et al. A distributed generation planning strategy considering the correlation and uncertainty of renewable energy output[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(3): 105-110, 118. (in Chinese)
- [19] 黄德志. 不对称配电网三相潮流与状态估计方法研究[D]. 重庆:重庆大学, 2020.
Huang D Z. Research on three-phase power flow and state estimation methods for asymmetric distribution network[D]. Chongqing: Chongqing University, 2020. (in Chinese)
- [20] 赵霞,罗兰,汪凡,等. 含不接地逆变电源的中低压配电网三相潮流模型[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(20): 5421-5430, 5718.
Zhao X, Luo L, Wang F, et al. Three-phase power flow model for integrated medium-and low-voltage distribution system with ungrounded inverter sources[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(20): 5421-5430,5718. (in Chinese)

(编辑 詹燕平)