

引用格式:刘自发,李颖雨,于普洋.一种基于蒙特卡洛方法的配电网概率可靠性快速计算方法[J].电力科学与技术学报,2024,39(2):9-19.

Citation: LIU Zifa, LI Jieyu, YU Puyang. A fast calculation method for probabilistic reliability of distribution network based on Monte Carlo method [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(2): 9-19.

一种基于蒙特卡洛方法的配电网概率 可靠性快速计算方法

刘自发¹, 李颖雨², 于普洋³

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 国网福建省电力有限公司福州供电公司, 福建 福州 350000;
3. 国家电网有限公司东北分部, 辽宁 沈阳 110179)

摘要: 配电网的概率可靠性能够弥补传统可靠性指标的期望值仅从均值角度衡量系统可靠性的不足, 但随着配电网规模扩大以及数据量的剧增, 能够同时兼顾计算准确性与计算速度的概率可靠性计算方法是亟待研究的。为此, 提出一种基于蒙特卡洛方法的配电网概率可靠性快速计算方法, 利用改进三点估计法以及三阶多项式正态变换, 在保留输入变量相关性的同时有效缩减输入样本点规模, 并采用级数展开得到概率可靠性。首先采用改进三点估计法, 在独立标准正态空间内选取样本点, 再通过三阶多项式正态变换将其转换为原始变量空间的样本点; 接着采用序贯蒙特卡洛方法, 在考虑孤岛划分的情况下对样本点进行可靠性计算; 最后通过 Edgeworth 级数展开, 得到可靠性指标的概率分布。对改进的 IEEE-RBTS Bus6 的 F₄ 馈线进行算例分析, 结果表明: 该文所提方法与传统蒙特卡洛方法的配电网系统可靠性计算结果之间仅存在 2.195% 的最大偏差, 而该文所提方法计算时间仅为传统蒙特卡洛方法的 1.05%, 证明该文所提方法在保证较高精度的同时可以显著提升计算速度。

关键词: 含源配电网; 可靠性; 蒙特卡洛方法; 点估计法; 级数展开

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.02.002 中图分类号: TM72 文章编号: 1673-9140(2024)02-0009-11

A fast calculation method for probabilistic reliability of distribution network based on Monte Carlo method

LIU Zifa¹, LI Jieyu², YU Puyang³

(1. School of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Fuzhou Power Supply Company, State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350000, China; 3. Northeast Branch of State Grid Corporation of China, Shenyang 110179, China)

Abstract: Probabilistic reliability can overcome the shortage of traditional reliability index expectation which only measures system reliability from the mean perspective. However, with the expansion of distribution network scale and the surge of data volume, a probabilistic reliability calculation method that can balance calculation accuracy and calculation speed is urgently needed. Therefore, a fast calculation method for probabilistic reliability of distribution network based on Monte Carlo method is proposed. The improved three-point estimation method and the third-order polynomial normal transformation are used to effectively reduce the size of input sample points while retaining the correlation of input variables, and the probabilistic reliability is obtained by series expansion. Firstly, the improved three-point estimation method is used to select sample points in the independent standard normal space, which are then transformed into sample points in the original variable space through the third-order polynomial normal transformation. Then, the sequential Monte Carlo method is used to calculate the reliability of the sample points considering the island division. Finally, the probability distribution of reliability index is obtained through Edgeworth series expansion. The

收稿日期: 2023-02-28; 修回日期: 2023-06-07

基金项目: 国家自然科学基金(5197074)

通信作者: 刘自发(1973—), 男, 博士, 教授, 主要从事配电网规划等研究; E-mail: tjubluesky@163.com

example analysis of the improved IEEE-RBTS Bus6 F4 feeder shows that there is only a maximum deviation of 2.195% between the reliability calculation results of the proposed method and the traditional Monte Carlo method, while the calculation time of the proposed method is only 1.05% of the traditional Monte Carlo method. It proves that the proposed method can significantly improve the calculation speed while ensuring high accuracy.

Key words: active distribution network; reliability; Monte Carlo method; point estimation method; series expansion

随着中国范围内具有分布式电源接入的配电网规模的日益庞大,以负荷与分布式电源功率波动为代表的影响系统稳定性与孤岛运行的不稳定因素也逐渐增多。另外,受光照、气温等条件影响,地理位置接近的分布式电源或负荷之间存在一定的相关性,该相关性表现为不同设备的功率波形具有特定程度上相似的时域特征。因此,分布式电源的接入使得配电网的安全稳定运行面临日渐增长的挑战。具有大量分布式电源接入的配电网运行稳定性的分析及优化过程需要揭示系统中负荷与分布式电源功率波动以及它们之间的相关系数对配电网可靠性产生的影响,而这一过程要求大量而且快速的可靠性计算。因此,研究配电网可靠性的快速计算方法对提高含源配电网的安全运行稳定性具有重要意义。

配电网的传统可靠性计算将负荷、分布式电源出力等不确定因素作为计算过程的输入量。通过网络简化、系统状态分析和计算,得到一段时间内的配电网可靠性指标期望值^[1]。然而,单纯的期望值不能完全反应配电网可靠性指标的统计特征^[2-3]。与之不同的是,配电网的概率可靠性能够对配电网可靠性指标的概率分布进行计算,使计算结果包含了可靠性指标的完整统计特征。相比于传统可靠性计算,概率可靠性计算能够表征单纯的可靠性指标期望值难以涵盖的统计意义上的系统可靠性状态,包含了更丰富的系统可靠性信息。

当前配电网概率可靠性计算方法主要有解析法和蒙特卡洛方法。解析法通过建立系统简化模型并进行数值计算得到可靠性指标,算法简单且计算速度较快,但难以得到可靠性指标的概率分布,且在处理规模稍大的系统时效率较低,模型简化时的误差对计算结果影响较大^[4]。蒙特卡洛方法能够通过故障元件抽样与系统状态分析得到可靠性指标的近似概率分布^[5],其计算结果精确性高,但需要大量的样本数据,计算的时间成本较解析法高。

为了实现配电网可靠性快速分析,在应用蒙特卡洛方法前本文先对样本数据进行规模缩减。改进三点估计法是使用随机变量的统计特征对生成样本点的一种方法,该方法对输入变量的分布类型

无特殊要求,适用范围广^[6]。使用改进三点估计法生成具有同样统计特征而规模缩减的计算样本点,可以大幅减小蒙特卡洛方法的总计算时间。

按统计特征生成的样本点中不同设备的功率波形之间失去了原有样本点中的相关性,需要使用相关方法复原该相关性。文献[7]采用 Nataf 逆变换处理连续变量的相关性问题,改进了传统点估计法无法处理变量相关性的弊端;文献[8]采用 Copula 函数形成不确定性因素联合分布,从而在可靠性评估中考虑了风速与负荷间的相关性;文献[9]将 Copula 函数进行分解与改进,通过适用于高维情况的 Regular-Vine Copula 函数来处理相关性。上述相关性处理方法均要求已知连续型变量的边缘分布。然而,在实际工程计算中,更易获取的是离散的历史数据,若直接根据历史数据拟合边缘分布来考虑相关性,仍易产生误差。因此,本文将常用于解决含相关性随机变量概率潮流问题的三阶多项式正态变换用于改进三点估计法生成样本点的相关性复原。该方法能在仅掌握离散历史数据的情况下考虑输入变量的相关性,且受输入变量的分布影响较小,具有较强的普适性^[10-11]。

概率可靠性计算的目标是得到配电网可靠性指标的连续概率密度函数和概率分布。传统蒙特卡洛方法虽然可以通过对大量原始数据进行逐一计算并统计得到概率分布,但仅能得到统计意义上的离散概率密度,而量化分析配电网概率可靠性需要连续且准确的概率密度函数。级数展开方法可基于原始数据数字特征拟合得到连续概率密度函数,更适用于后续的配电网概率可靠性分析过程。另一方面,基于三点估计法与三阶多项式正态变换对原始数据进行的缩减,级数展开法可以仅通过对原始数据中少数特征点进行分析计算求得其概率密度函数,能够在保证精确度的情况下大幅提升计算速度,克服了传统蒙特卡洛方法计算时间长的缺陷,因此,级数展开法可以作为配电网概率可靠性计算的一项高效可靠的工具。电力系统中常用的级数包括 Cornish-Fisher、Edgeworth 级数等。文献[12]采用 Cornish-Fisher 级数计算电力系统概率潮流;文献[13-14]采用 Gram-Charlier 级数进行有

源配电网的孤岛概率可靠性评估。Gram-Charlier级数展开需要通过各模拟抽样序列计算展开式的各阶矩,在高阶展开时计算量较大。为了缩减总体计算时间成本,本文选用较为简单的Edgeworth级数展开,该级数以标准正态分布为基础,可以近似表示任意随机变量的概率分布,对待求变量的数据要求较低,计算过程较为简便快捷^[15]。

首先介绍本文所提基于蒙特卡洛方法的配电网概率可靠性快速计算方法的基本原理以及计算步骤;接着以增设分布式电源的IEEE-RBTS Bus6的F₄馈线作为基本算例展开可靠性计算研究,此算例可以验证本文方法的准确性和有效性;最后在上述算例的基础上,利用本文提出的配电网可靠性快速计算方法,对比研究负荷的相关系数以及分布式电源的相关系数对配电网可靠性的影响。

1 基于改进三点估计法和级数展开的配电网概率可靠性计算理论基础

1.1 改进三点估计法

三点估计法是用随机变量的概率统计特征对特征点进行采样的方法,不需要进行复杂建模与数学代换处理,简单可行,仅需较少次数的确定性分析计算就能保证较高计算精度,适合工程实际应用。为了提高三点估计法准确性,使样本覆盖范围更大,本文结合概率论中正态分布的“3 σ 原则”,每个输入变量 X_i 增加一组边缘点来考虑边缘样本的特征^[16]。改进三点估计法的流程如下。

首先,对于 n 维输入变量 $\mathbf{X}'=(X_1, X_2, \dots, X_n)$,计算 $X_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的数学期望 μ_i 、标准差 σ_i 、偏度系数 $\lambda_{i,3}$ 以及峰度系数 $\lambda_{i,4}$ 。 X_i 选取的估计点为 $X_{i,k}=\mu_i+\xi_{i,k}\sigma_i (k=1, 2, \dots, 5)$, $k=1, 2, 3$ 时 $X_{i,k}$ 为传统三点估计法^[17]选取的估计点, $k=4, 5$ 时 $X_{i,k}$ 为改进三点估计法的新增估计点。位置系数与权重系数均与估计点一一对应。

X_i 的位置系数为

$$\begin{cases} \xi_{i,1}=\lambda_{i,3}/2+\sqrt{\lambda_{i,4}-3\lambda_{i,3}^2}/4 \\ \xi_{i,2}=0 \\ \xi_{i,3}=\lambda_{i,3}/2-\sqrt{\lambda_{i,4}-3\lambda_{i,3}^2}/4 \\ \xi_{i,4}=\sqrt{n} \\ \xi_{i,5}=-\sqrt{n} \end{cases} \quad (1)$$

$X_{i,k}$ 的权重系数衡量了各估计点在输出变量中的重要程度,即

$$\begin{cases} p_{i,1}=\frac{1}{\xi_{k,1}(\xi_{k,1}-\xi_{k,3})} \\ p_{i,2}=\frac{2n-1}{2n}\frac{1}{\lambda_{i,4}-\lambda_{i,3}^2} \\ p_{i,3}=\frac{-1}{\xi_{k,1}(\xi_{k,1}-\xi_{k,3})} \\ p_{i,4}=p_{i,5}=\frac{1}{4n} \end{cases} \quad (2)$$

然后,依次取出 X_i 的估计点 $X_{i,k}$,与剩余变量 $X_j (j \neq i)$ 的期望进行组合,形成一个估计点样本。理论上 n 维输入变量将生成 $5n$ 个样本,但其中样本 $(\mu_1, \dots, \mu_i, \dots, \mu_n)$ 出现 n 次,因此可将样本权重合并为 $\sum_{i=1}^n p_{i,2}$,样本总数缩减至 $4n+1$ 个,此时得到的样本中各元素之间不具有相关性。最终生成的样本为

$$\mathbf{X}=\begin{bmatrix} X_{1,1} & X_{1,3} & X_{1,4} & X_{1,5} & \cdots & \mu_1 \\ \mu_2 & \mu_2 & \mu_2 & \mu_2 & \cdots & \mu_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_n & \mu_n & \mu_n & \mu_n & \cdots & \mu_n \end{bmatrix}_{n \times (4n+1)}^T \quad (3)$$

用函数 $H(\cdot)$ 表示输入与输出变量之间的关系,将样本 \mathbf{X} 代入该函数,通过多维运算 $\mathbf{Y}=H(\mathbf{X})$,得到 m 维输出变量 $\mathbf{Y}=(Y_1, Y_2, \dots, Y_m)$,最后结合权重系数计算输出变量 \mathbf{Y} 的 v 阶原点矩:

$$\begin{aligned} \alpha_v &= E(\mathbf{Y}^v) = \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{1,3,4,5} p_{i,k} [H(\mu_1, \dots, X_{i,k}, \dots, \mu_n)]^v + \\ &= \sum_{i=1}^n p_{i,2} [H(\mu_1, \dots, \mu_i, \dots, \mu_n)]^v \end{aligned} \quad (4)$$

1.2 三阶多项式正态变换

在配电网的实际运行中,风机出力、光伏出力、负荷大小等系统输入变量之间存在相关性,且随着分布式电源渗透率的提高、负荷总量的增加,这些元素之间的耦合情况愈加复杂,对可靠性计算结果的影响也就越大,因此可靠性计算中不能忽视相关性问题。但由于三点估计法基于数字特征进行采样,导致得到的样本 \mathbf{X} 中各变量不具有相关性,因此,本文采用文献^[16]中的三阶多项式正态变换还原样本中的相关性。

对于多个变量间相关性的处理,三阶多项式正态变换只需获取输入变量的少量统计信息,变换过程中不必依赖准确的多变量联合概率密度函数,相较于Nataf变换^[6]等方法有更强的通用性。三阶多项式正态变换可以将任意分布随机变量表示为正态随机变量的多项式之和,不需要假设待求随机变

量的分布,可以直接用于离散的抽样数据,在实际应用中十分高效灵活。

三阶多项式正态变换的核心思想:用一个标准正态随机变量 Z_i 表示非独立非正态随机变量 S_i ,即

$$S_i = a_{i,0} + a_{i,1}Z_i + a_{i,2}Z_i^2 + a_{i,3}Z_i^3 \quad (5)$$

式中, $a_{i,0}, a_{i,1}, a_{i,2}, a_{i,3}$ 均为 S_i 的转换系数,满足条件 $a_{i,3} > 0$ 且 $a_{i,2}^2 - 3a_{i,2}a_{i,3} \leq 0$ 。

对式(5)进行 Cornish-Fisher 级数展开,得到通过 S_i 的数字特征求取转换系数的公式如下:

$$\begin{cases} a_{i,0} = \mu_i - \sigma_i \lambda_{i,3} / 6 \\ a_{i,1} = \sigma_i (33 - 3\lambda_{i,4}) / 24 \\ a_{i,2} = \sigma_i \lambda_{i,3} / 6 \\ a_{i,3} = \sigma_i (\lambda_{i,4} - 3) / 24 \end{cases} \quad (6)$$

式中, $\mu_i, \sigma_i, \lambda_{i,3}, \lambda_{i,4}$ 分别为 S_i 的期望、标准差、偏度系数、峰度系数。

将上述变换拓展至多维。 $\mathbf{S} = (S_1, S_2, \dots, S_n)$ 为 n 维非独立任意分布随机变量, \mathbf{S} 中各元素的相关系数可通过矩阵 $\boldsymbol{\rho}$ 描述, $\boldsymbol{\rho}$ 中元素 ρ_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, n$) 为 X_i, X_j 间的相关系数。非独立标准正态随机变量 $\mathbf{Z} = (Z_1, Z_2, \dots, Z_n)$ 与 \mathbf{S} 中的元素一一对应。设 $\boldsymbol{\rho}_0$ 为 \mathbf{Z} 的相关系数矩阵, ρ_{0ij} 为 Z_i, Z_j 间的相关系数。 ρ_{ij} 和 ρ_{0ij} 满足关系:

$$\begin{aligned} & 6a_{i,3}a_{j,3}\rho_{0ij}^2 + 2a_{i,2}a_{j,2}\rho_{0ij}^2 + \\ & (a_{i,1} + 3a_{i,3})(a_{j,1} + 3a_{j,3})\rho_{0ij} + \\ & (a_{i,0} + a_{i,2})(a_{j,0} + a_{j,2}) - \rho_{ij}\sigma_i\sigma_j - \mu_i\mu_j = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

求解式(7),选择满足 $|\rho_{0ij}| \leq 1$ 且 $\rho_{ij}\rho_{0ij} \geq 0$ 的解作为 ρ_{0ij} 的值,对所有 ρ_{0ij} 求解组成 $\boldsymbol{\rho}_0$, $\boldsymbol{\rho}_0$ 为对称矩阵,对其进行 Cholesky 分解得到下三角阵 L_0 ,即

$$\boldsymbol{\rho}_0 = L_0 L_0^T \quad (8)$$

在独立标准正态空间内, \mathbf{X} 为式(3)所示的基于改进三点估计法生成的独立标准正态随机变量,使用正交变换将 \mathbf{X} 转换为非独立标准正态随机变量:

$$\mathbf{Z} = L_0 \mathbf{X} \quad (9)$$

基于 \mathbf{Z} 再进一步利用式(5),计算非独立非正态随机变量 \mathbf{S} , \mathbf{S} 即为最终得到的考虑相关性且有代表性的系统状态样本。 \mathbf{S} 的每一列 S_i 表示系统中的某个元素,如风机、光伏出力以及各负荷点负荷量, \mathbf{S} 的每一行代表生成的具有代表性的系统状态行。

综上所述,随机变量的数字特征为三阶多项式正态变换的重要元素。对于已知概率分布的连续型变量以及仅有历史数据的离散型变量,三阶多项式正态变换都能够考虑变量之间的相关性。

1.3 Edgeworth 级数展开

Edgeworth 级数可以通过标准正态分布函数近

似表示任意随机变量的概率分布,相较于其他渐近展开级数,该级数的计算过程较为简便快捷。

通过改进三点估计法和三阶多项式正态变换,将获得系统状态样本 \mathbf{S} 输入系统可靠性计算过程 $H(\cdot)$ 中,得到输出变量 $\mathbf{Y} = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m)$, \mathbf{Y} 的每个维度 Y_i 代表单个可靠性指标在每个样本下的值。

为方便说明,令单个可靠性指标在各估计点样本下的值 Y_i 为随机变量 y ,在进行 Edgeworth 级数展开前,计算 y 的期望 μ_y 和标准差 σ_y ,并对其进行标准化处理,得到标准化变量:

$$\bar{y} = \frac{y - \mu_y}{\sigma_y} \quad (10)$$

y 的 i 阶 Hermite 正交多项式 $H_i(y)$ 和半不变量 $\boldsymbol{\kappa}_i$ 为 Edgeworth 级数的重要组成部分,分别为

$$\begin{cases} H_0(y) = 1 \\ H_1(y) = y \\ H_{i+1}(y) = iH_i(y) - iH_{i-1}(y) \end{cases} \quad (11)$$

$$\boldsymbol{\kappa}_v = \boldsymbol{\alpha}_v - \sum_{j=1}^{v-1} C_{v-1}^{j-1} \boldsymbol{\kappa}_j \boldsymbol{\alpha}_{v-j} \quad (12)$$

式中, $\boldsymbol{\alpha}_v$ 为随机变量 \bar{y} 的 v 阶原点矩。

根据 Edgeworth 级数展开得到随机变量 y 的概率分布函数为

$$F(y) = \int_y^{+\infty} \varphi(y) dy + \varphi(y) \sum_{i=3}^{+\infty} C_i H_{i-1}(y) \quad (13)$$

式中, $\varphi(\cdot)$ 为标准正态分布的概率密度函数; C_i 为 Edgeworth 级数的各项系数。

通过求导计算得到 y 的概率密度函数:

$$\begin{aligned} f(y) = F'(y) = & \varphi(\bar{y}) + \\ & \frac{\kappa_3}{3!} \varphi(\bar{y}) H_3(\bar{y}) + \frac{\kappa_4}{4!} \varphi(\bar{y}) H_4(\bar{y}) + \dots \end{aligned} \quad (14)$$

实际计算中取 Edgeworth 级数的前几项即可保证计算精度。在计算得到某可靠性指标的离散数据后,将其视为 $f(y) = F'(y)$ 的随机变量 y ,根据三阶多项式正态变换以及 Edgeworth 级数展开的步骤,便可得到该指标的连续概率分布函数,可以进一步观察并分析其概率分布情况。

2 基于改进三点估计法和级数展开的配电网概率可靠性计算方法

本文通过改进三点估计法和三阶多项式正态变换获得原始数据中具有代表性的状态样本,采用蒙特卡洛方法计算出各样本下的指标值,再进一步采用级数展开计算各指标的概率分布。

2.1 可靠性指标选取以及考虑配电网动态孤岛划分的序贯蒙特卡洛方法

本文选取4个负荷点可靠性指标:故障率 λ (次/a)、每次故障平均停电持续时间 r (h/次)、年平均停电时间 U (h/a)、负荷点电量不足期望(energy not supplied, ENS)(kW·h/a);3个不具有相关性的系统可靠性指标^[18]:平均停电频率(system average interruption frequency index, SAIFI)(次/(用户·a))、平均供电可用率(average service availability index, ASAI)(%)、系统电量不足期望(energy not supplied, ENS)(kW·h/a)。

本文根据元件故障模型计算各设备的连续工作时间(time to failure, TTF)和连续停运时间(time to repair, TTR)^[18]:

$$\begin{cases} t_{TTF} = -\ln(U_1/\lambda) \\ t_{TTR} = -\ln(U_2\mu) \end{cases} \quad (15)$$

式中, λ 、 μ 分别为设备的故障率和修复率; U_1 、 U_2 均为 $[0,1]$ 区间内均匀分布的随机数。

同时采用文献[19]中考虑配电网动态孤岛划分的序贯蒙特卡洛方法确定每次抽样的故障元件,并计算配电网可靠性,计算流程如图1所示。

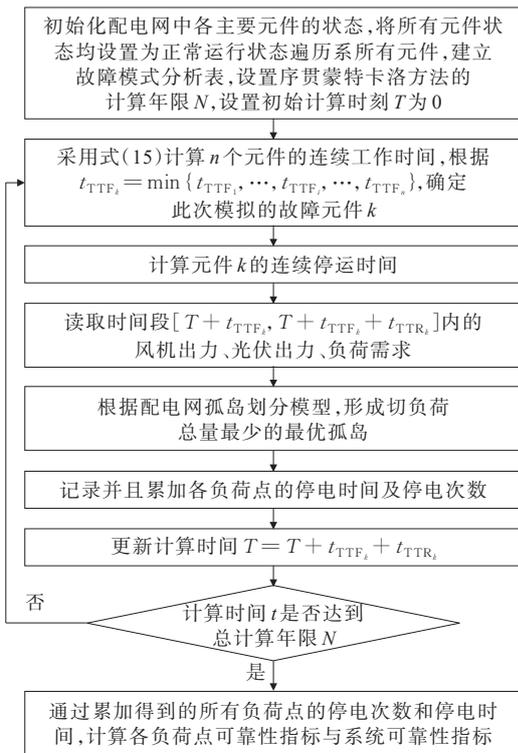


图1 考虑动态孤岛划分的配电网序贯蒙特卡洛方法流程
Figure 1 Flowchart of sequential Monte Carlo method for distribution network considering dynamic islanding

2.2 基于改进三点估计法和级数展开的配电网概率可靠性计算步骤

结合配电网可靠性计算的实际应用,基于改进三点估计法与Edgeworth级数展开的配电网概率可靠性计算流程如图2所示。

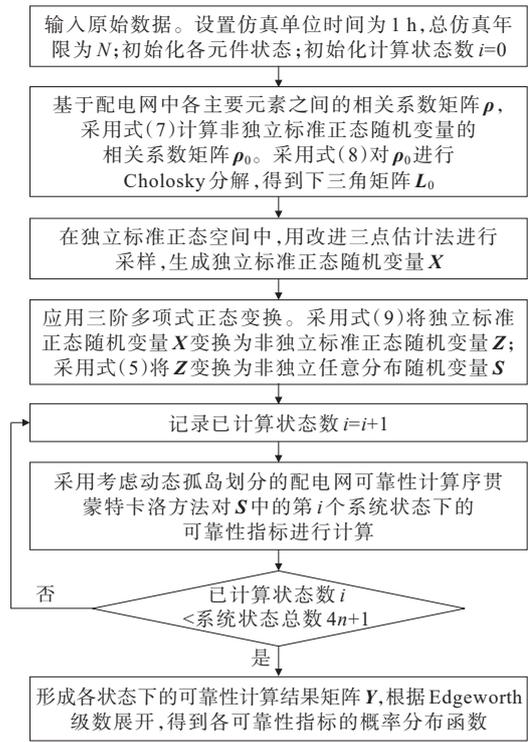


图2 基于改进三点估计法和Edgeworth级数展开配电网概率可靠性计算流程

Figure 2 Flowchart of probabilistic reliability calculation based on improved three-point estimation method and Edgeworth series expansion

1) 输入配电网网络结构、负荷和分布式电源原始数据、元件可靠性参数以及负荷和分布式电源相关系数等基础数据,设置仿真单位时间为1h,总仿真年限为N。初始化各元件状态,初始化计算状态数 $i=0$ 。

2) 基于配电网中各主要元素之间的相关系数矩阵 ρ ,采用式(7)计算 Z 的相关系数矩阵 ρ_0 ,采用式(8)对其进行Chololsky分解,得到下三角矩阵 L_0 。

3) 在独立标准正态空间中,采用改进三点估计法进行采样,每个标准正态分量均独立,标准正态变量的数字特征为期望 $\mu_i=0$ 、标准差 $\sigma_i=1$ 、偏度系数 $\lambda_{i,3}=0$ 、峰度系数 $\lambda_{i,4}=3$ 。计算采样点及其权重,形成式(3)所示的独立标准正态随机变量 X 。

4) 根据三阶多项式正态变换,采用式(9)将 X

变换为 Z ,再进一步采用式(5)将 Z 变换为 S ,即为最终得到考虑相关性的配电网概率可靠性计算样本。 S 的每一行代表一个典型系统状态。若配电网中共有 n_1 个负荷点、 n_2 台风机、 n_3 台光伏,则输入变量个数 $n=n_1+n_2+n_3$ 。 S 矩阵的构造如图3所示。

5) 记录已计算状态数 $i=i+1$ 。采用图1所示方法,对系统状态 i 下的各项可靠性指标进行计算。函数 $H(\cdot)$ 即代表可靠性计算过程,该过程可用 $Y=H(S)$ 表示。

6) 判断已计算状态数 i 是否达到系统状态总数 $4n+1$ 。若 $i=4n+1$,则进行步骤7);若 $i<4n+1$,

则返回步骤5)。

7) 形成所有状态下的可靠性指标计算结果集合 $Y=(Y_1, Y_2, \dots, Y_m)$,每个维度 Y_i 代表单个可靠性指标在每个样本下的值。由于本文选取了4项负荷点可靠性指标和3项系统可靠性指标,因此对于总负荷点数为 n_1 的配电网,可靠性计算结果集合 Y 的列数 $m=4n_1+3$,矩阵 Y 的构造如图4所示。

采用式(4)计算各可靠性指标 Y_i 的 v 阶原点矩,并根据Edgeworth级数展开,得到该可靠性指标连续的概率密度函数。然后通过对概率密度函数的分段积分,形成各可靠性指标的概率分布函数。

共 n 个随机变量, $n=n_1+n_2+n_3$

共 n_1 个负荷点				共 n_2 台风机				共 n_3 台光伏			
负荷1		...	负荷 n_1	风机1		...	风机 n_2	光伏1		...	光伏 n_3
$S_{1,1}$	...	S_{1,n_1}	S_{1,n_1+1}	...	S_{1,n_1+n_2}	S_{1,n_1+n_2+1}	...	$S_{1,n_1+n_2+n_3}$	...	$S_{1,n_1+n_2+n_3}$	→ 状态1
$S_{2,1}$	...	S_{2,n_1}	S_{2,n_1+1}	...	S_{2,n_1+n_2}	S_{2,n_1+n_2+1}	...	$S_{2,n_1+n_2+n_3}$	...	$S_{2,n_1+n_2+n_3}$	→ 状态2
\vdots	\ddots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\ddots	\vdots	
$S_{4n,1}$	...	S_{4n,n_1}	S_{4n,n_1+1}	...	S_{4n,n_1+n_2}	S_{4n,n_1+n_2+1}	...	$S_{4n,n_1+n_2+n_3}$	...	$S_{4n,n_1+n_2+n_3}$	→ 状态 $4n$
$S_{4n+1,1}$	...	S_{4n+1,n_1}	S_{4n+1,n_1+1}	...	S_{4n+1,n_1+n_2}	S_{4n+1,n_1+n_2+1}	...	$S_{4n+1,n_1+n_2+n_3}$	...	$S_{4n+1,n_1+n_2+n_3}$	→ 状态 $4n+1$

图3 配电网概率可靠性计算样本矩阵 S 的构造

Figure 3 Construction of sample matrix S for probabilistic reliability calculation of distribution network

$$Y=(Y_1, \dots, Y_{4n+1})=$$

4项负荷点可靠性指标												3项系统可靠性指标						
λ				U				r				ENS			SAIFI	...	ENS	
负荷1		...	负荷 n_1	负荷1		...	负荷 n_1	负荷1		...	负荷 n_1	负荷1		...	负荷 n_1	$Y_{4n_1+1,1}$	...	$Y_{4n_1+3,1}$
$Y_{1,1}$	...	$Y_{n_1,1}$	$Y_{n_1+1,1}$	...	$Y_{2n_1,1}$	$Y_{2n_1+1,1}$	...	$Y_{3n_1,1}$	$Y_{3n_1+1,1}$	...	$Y_{4n_1,1}$	$Y_{4n_1+1,1}$	...	$Y_{4n_1,1}$	$Y_{4n_1+1,1}$	...	$Y_{4n_1+3,1}$	→ 状态1
$Y_{1,2}$	...	$Y_{n_1,2}$	$Y_{n_1+1,2}$	...	$Y_{2n_1,2}$	$Y_{2n_1+1,2}$	...	$Y_{3n_1,2}$	$Y_{3n_1+1,2}$	...	$Y_{4n_1,2}$	$Y_{4n_1+1,2}$	...	$Y_{4n_1,2}$	$Y_{4n_1+1,2}$	...	$Y_{4n_1+3,2}$	→ 状态2
\vdots	\ddots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	
$Y_{1,4n}$	...	$Y_{n_1,4n}$	$Y_{n_1+1,4n}$	...	$Y_{2n_1,4n}$	$Y_{2n_1+1,4n}$	...	$Y_{3n_1,4n}$	$Y_{3n_1+1,4n}$	...	$Y_{4n_1,4n}$	$Y_{4n_1+1,4n}$	...	$Y_{4n_1,4n}$	$Y_{4n_1+1,4n}$	...	$Y_{4n_1+3,4n}$	→ 状态 $4n$
$Y_{1,4n+1}$	...	$Y_{n_1,4n+1}$	$Y_{n_1+1,4n+1}$	...	$Y_{2n_1,4n+1}$	$Y_{2n_1+1,4n+1}$	...	$Y_{3n_1,4n+1}$	$Y_{3n_1+1,4n+1}$	...	$Y_{4n_1,4n+1}$	$Y_{4n_1+1,4n+1}$	...	$Y_{4n_1,4n+1}$	$Y_{4n_1+1,4n+1}$	...	$Y_{4n_1+3,4n+1}$	→ 状态 $4n+1$

共 $(4n_1+3)$ 列,每列代表一个可靠性指标在各状态下的值

图4 所有状态下的可靠性指标计算结果矩阵 Y 的构造

Figure 4 Construction of calculation result matrix Y about reliability index for all states

3 算例分析

以IEEE-RBTS Bus6的F₄馈线系统为例,如图5所示,为验证本文所提方法的准确性,分别使用本文和传统蒙特卡洛方法进行配电网概率可靠性计算,以传统蒙特卡洛方法计算结果为基准进行对比。总仿真年限 $N=10\ 000$ a,馈线电压等级为33 kV。系统包括23个负荷点、1 183户用户、4台断路器、1台手动隔离开关、30条馈线、23台配电变压器、23台熔断器,每个变压器支路前均有1台熔断器。

系统接入4台分布式电源装置,为提高分布式电源出力的稳定性,为每台分布式电源配备储能电池模块。图5中DG₁、DG₂为光储一体机组,DG₃、DG₄为风储一体机组,设定光储一体机组DG₁、DG₂间相关系数为0.75,风储一体机组DG₃、DG₄间相关系数为0.85,其中风速概率密度采用含有 k 、 c 两参数Weibull分布^[20]描述,光照强度概率密度服从Beta分布^[21]。储能电池采用文献[19]中的充放电模型,由该模型生成的风速、光照强度与储能充电功率概率密度如图6所示。

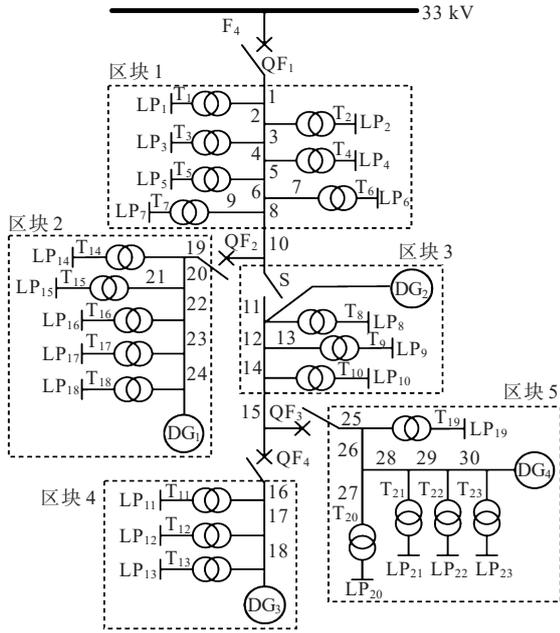


图 5 IEEE-RBTS Bus6 的 F₄ 馈线示意

Figure 5 Schematic diagram of IEEE-RBTS Bus6 with F₄ feeder

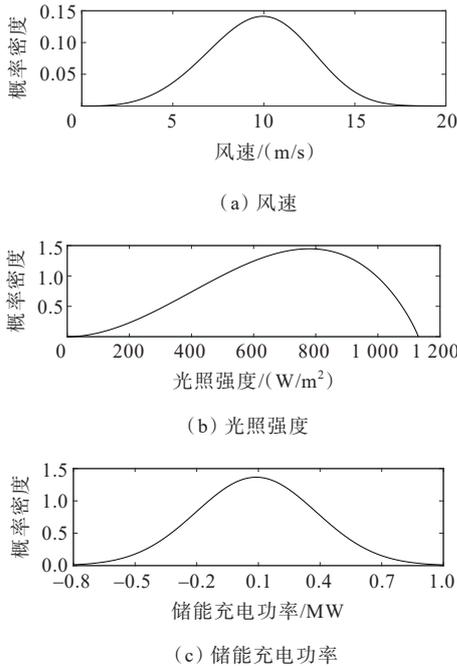


图 6 风速、光照强度与储能充电功率概率密度

Figure 6 Probability density of wind speed, light intensity and energy storage charge power

馈线、变压器的故障率和故障修复时间如表 1 所示(不考虑断路器和熔断器拒动的概率)。本系统峰值负荷为 10.928 4 MW,系统平均负荷为 4.815 5 MW,采用 IEEE-RTS79 系统中的负荷数据,设定所有负荷点间的相关系数均为 0.5。

表 1 算例系统中馈线、变压器的故障数据

Table 1 Fault data of feeder and transformer

元件	故障率	故障修复时间/h	故障隔离时间/h
馈线	0.046/(次/(a·km))	8	2
变压器	0.015/(次/a)	5	1

3.1 本文所提方法与蒙特卡洛方法计算结果及计算时间对比

在负荷、分布式电源相关系数均为初始定值的情况下,采用本文与传统蒙特卡洛方法得到的可靠性指标计算结果及相对偏差如表 2 所示,本文方法比传统蒙特卡洛方法计算得到的结果相对偏差较小,各项指标中偏差最大的仅为 2.192%,说明本文方法具有较高的计算准确性。

表 2 本文所提与传统蒙特卡洛方法的计算结果对比及相对偏差

Table 2 Comparison and relative deviation between calculated results and those of traditional Monte Carlo method

方法	SAIFI/(次/(用户·a))	ASAI/%	ENS/(kW·h/a)
蒙特卡洛	1.059 02	99.945 12	39.175 56
本文	1.036 48	99.945 23	38.315 73
相对偏差/%	2.192	0.000	2.156

本文所提和传统蒙特卡洛方法的计算时间分别为 85、8 088 s,对比可知,本文所提方法的总体计算时间仅为传统蒙特卡洛方法的 1.05%。因此,相对于传统蒙特卡罗方法,本文所提方法极大地提升了配电网概率可靠性的计算速度,为配电网可靠性的计算与分析提供了有力的工具。

概率可靠性计算结果为各可靠性指标的概率密度函数,但由于概率密度函数不能直观体现可靠性指标的概率分布情况,因此,本文算例将概率密度进行分段积分,求得各区间的概率并绘制折线图,形成可靠性指标的概率分布情况,并将该折线图与由传统蒙特卡洛方法计算结果绘制的概率直方图进行对比,如图 7 所示。

根据图 7,针对各可靠性指标的各分段概率,计算本文与传统蒙特卡洛方法得到指标出现概率的偏差。SAIFI、ASAI、ENS 的分段概率最大偏差分别为 7.224%、6.859%、7.388%,均在合理范围内。在计算系统可靠性指标的概率分布时,说明本文与蒙特卡洛方法偏差较小,计算结果具有准确性。

以图 5 中区块 1、2 为例,对比本文与传统蒙特

卡洛方法对负荷点指标的计算结果均值。区块1、2各负荷点指标值对比折线图分别如图8、9所示。计算图8中负荷点1~7的各项指标采用2种方法得到结果的偏差,其中 λ 、 r 、 U 、ENS的最大偏差分别为0.981%、2.606%、2.311%、2.938%。在计算区块1负荷点可靠性指标值时,说明本文与蒙特卡洛方法偏差较小,计算结果具有期望的准确性。计算图9中负荷点14~18的各项指标采用2种方法得到结果的偏差,负荷点14~16中 λ 、 r 、 U 、ENS的最大偏差分别为1.961%、2.161%、3.208%、3.143%。在计算负荷点14~16的可靠性指标时,本文与传统蒙特卡洛方法偏差稍大于1~7负荷点的。对于负荷点17、18, λ 的偏差分别为6.702%、14.678%, r 的偏差分别12.026%、16.828%, U 的偏差分别为10.845%、15.957%,ENS的偏差分别为12.482%、15.304%。根据区块1比区块2更靠近电源点、负荷点14~18依次远离电源点的系统特征,结合计算结果中区块2大于区块1的计算误差、负荷点18大于负荷点17的计算误差现象,本文方法在计算远距离负荷点可靠性指标及其概率分布时准确性有待提高。

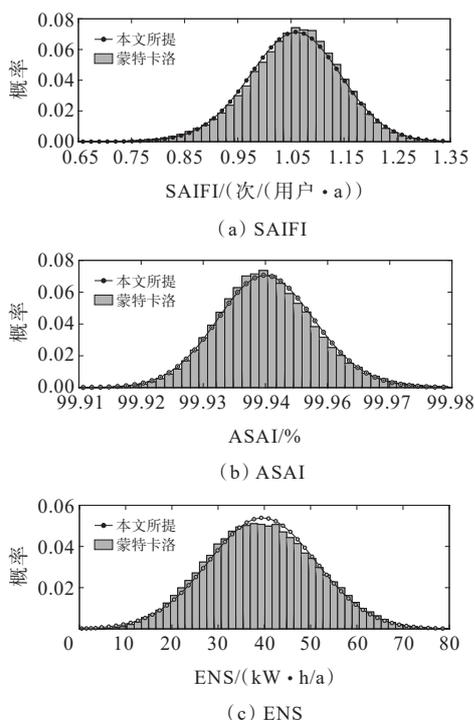


图7 本文和传统蒙特卡洛方法得到的系统各指标概率分布情况对比

Figure 7 Probability distributions for each index obtained between proposed method and traditional Monte Carlo method

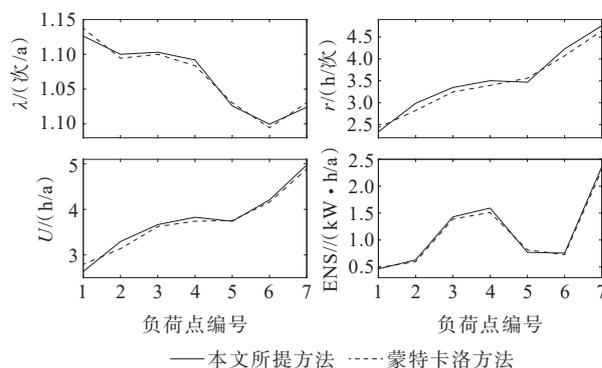


图8 本文和传统蒙特卡洛方法得到负荷点1~7的 λ 、 r 、 U 、ENS指标折线

Figure 8 Comparison results of λ , r , U , and ENS for load point 1~7

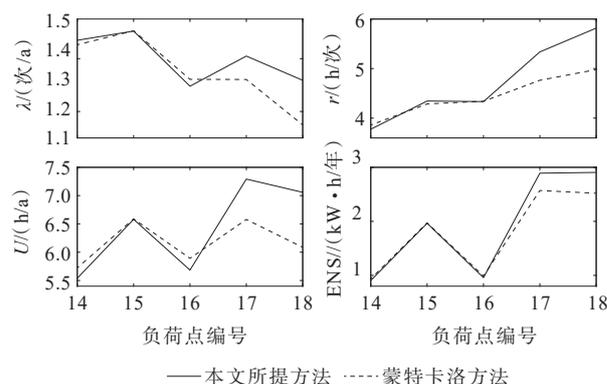


图9 本文和传统蒙特卡洛方法得到负荷点14~18的 λ 、 r 、 U 、ENS指标折线

Figure 9 Comparison results of λ , r , U , and ENS between proposed method and traditional Monte Carlo method for load point 14~18

3.2 负荷点相关系数对系统可靠性指标的影响

为分析负荷间相关性对系统可靠性计算结果的影响,本文设定所有负荷点间的相关系数相等,在分布式电源相关系数不变的基础上,以0.1为基本单位,逐级同步改变负荷点间的相关系数,计算不同负荷相关系数下的系统可靠性指标。在不同负荷相关系数下,分别采用本文和传统蒙特卡洛方法计算得到的系统可靠性指标值如图10所示。

根据图10,当负荷相关系数递增时,SAIFI呈现下降趋势,ASAI呈现上升趋势。这是由于负荷相关性增大时,负荷变化一致性增大,一定程度上减少了系统能量波动的随机性,而随机因素的减少有助于系统可靠性的提升,进而使得SAIFI减少、ASAI提高。因此,负荷的相关性增大对于系统的可靠性有提升作用。

根据图10,在同一负荷相关系数下,分别采用

本文和传统蒙特卡洛方法计算同一指标下的偏差,SAIFI、ASAI、ENS 的最大偏差分别为 3.462%、0.005%、3.687%。采用本文和蒙特卡洛方法计算同一指标下的偏差较小,因此本文方法具有较高的准确性。

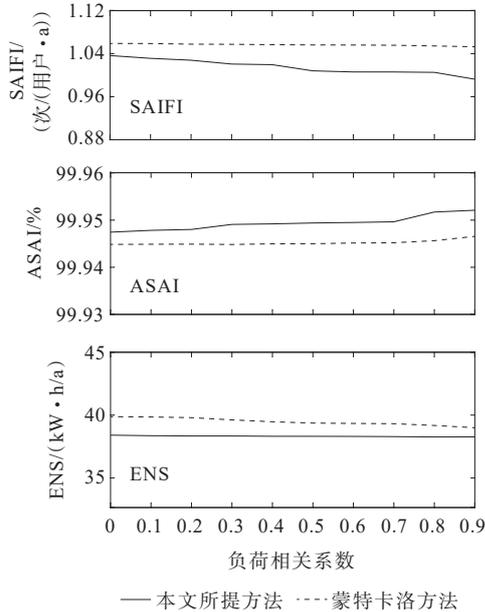


图 10 不同负荷相关系数下本文和传统蒙特卡洛方法得到的系统可靠性指标值

Figure 10 Comparison results of reliability indexes between proposed method and traditional Monte Carlo method under different load correlation coefficients

3.3 分布式电源相关系数对系统可靠性指标的影响

为分析分布式电源间相关性对系统可靠性计算结果的影响,根据运行结果,当风电和光伏机组的相关系数变化时,各指标的变化趋势相同,因此本文仅以风机为例进行分析。在负荷相关系数不变的基础上,以 0.1 为基本单位,逐级改变风机 DG_1 、 DG_2 之间的相关系数,计算不同相关系数下的系统可靠性指标值。不同负荷相关系数下采用本文和传统蒙特卡洛方法计算得到的系统可靠性指标值如图 11 所示。

根据图 11,当风机相关系数递增时,SAIFI、ENS 呈上升趋势,ASAI 呈下降趋势。这是由于风机间相关性增大时不同接入点的风电出力同步性增大,即出力同时增大或减小的可能性增加,风机响应负荷变化的灵活性下降,因此 SAIFI 增加、ASAI 降低,可靠性呈现下降趋势。

根据图 11,在同一风机相关系数下,分别采用本文和传统蒙特卡洛方法计算同一指标下的偏

差,SAIFI、ASAI、ENS 最大偏差分别为 2.156%、0.004%、2.981%。采用本文和蒙特卡洛方法计算同一指标下的偏差较小,因此本文方法具有较高的准确性。

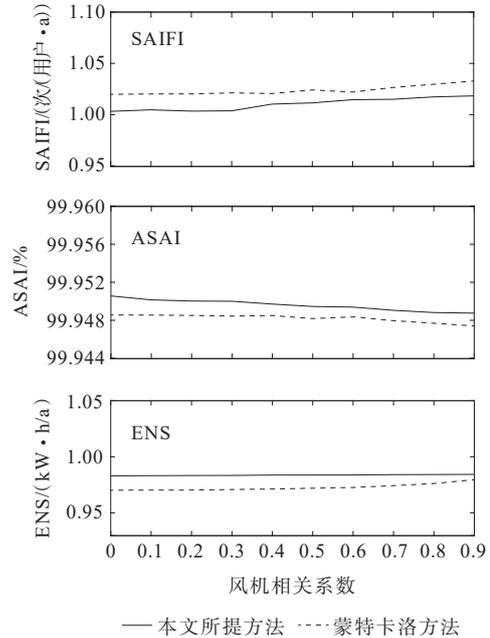


图 11 不同风机相关系数下本文和传统蒙特卡洛方法得到的系统可靠性指标值

Figure 11 Comparison results of reliability indexes between proposed method and traditional Monte Carlo method under different turbine correlation coefficients

3.4 考虑多影响因素的配电网概率可靠性计算

为进一步论证本文所提方法的准确性与有效性,参考文献[22]考虑多因素元件停运模型,在负荷、分布式电源相关系数均为初始定值的情况下,可靠性计算中考虑元件失效与外部天气因素;在 3 种配电网可靠性主要影响因素相互关联的情况下,分别采用本文和传统蒙特卡洛方法计算配电网可靠性指标值,并计算本文和传统蒙特卡洛方法所得结果的相对偏差。

情况 1 在元件故障状态抽样时只考虑可修复元件,不考虑元件失效情况;

情况 2 天气情况良好且考虑元件失效;

情况 3 天气情况恶劣且考虑元件失效。

计算结果如表 3 所示,可知情况 2、3 下本文和蒙特卡洛方法计算结果的偏差均小于情况 1 下的偏差。由此可见,在对配电网可靠性影响因素进行更加全面考虑的情况下,本文所提方法仍然具有较高准确度。同时,充分考虑多重影响因素能够一定程度提高配电网可靠性计算精确度。

表3 不同影响因素关联情况下本文和传统蒙特卡洛方法下的系统可靠性指标值

Table 3 Comparison results of reliability indexes in the case of different influencing factors

方法	情况	SAIFI/ (次/(用户·a))	ASAI/ %	ENS/ (kW·h/a)
蒙特卡洛	1	1.059 02	99.945 12	39.175 56
	2	0.994 21	99.951 07	38.908 87
	3	1.071 16	99.890 97	40.711 56
本文	1	1.036 48	99.945 23	38.315 73
	2	1.005 90	99.951 22	38.248 51
	3	1.087 72	99.891 02	40.064 28
相对偏差/%	1	2.192	0.000	2.156
	2	1.176	0.000	1.697
	3	1.546	0.000	1.590

4 结语

本文提出了一种基于蒙特卡洛方法的配电网概率可靠性快速计算方法,并将其应用于增改IEEE RBTS Bus6的F₄馈线系统进行算例分析,同时将本文与传统蒙特卡洛方法计算结果进行对比。

1) 在负荷、分布式电源相关系数均为初始定值的情况下,相较于传统蒙特卡洛方法,本文所提方法可以节约98.95%的时间。以蒙特卡洛方法计算结果为基准,本文所提方法对各可靠性指标的计算结果偏差较小,系统可靠性指标偏差均不超过2.195%。表明本文所提方法在保证高计算精确度的同时,极大地提升了配电网概率可靠性的计算速度,为配电网可靠性分析及计算提供了一个有力的工具。

2) 在不同负荷或分布式电源相关系数下,本文和传统蒙特卡洛方法对系统可靠性指标计算结果的偏差均不超过3.7%。本文所提方法在不同负荷或分布式电源相关系数下都具有较高的计算准确性。

3) 根据系统可靠性指标随负荷相关系数的变化趋势,负荷的相关性增大对于系统的可靠性有提升作用。根据系统可靠性指标随分布式电源相关系数的变化趋势,分布式电源相关性增大时其出力同步性增大,造成其响应负荷变化的灵活性下降,导致系统可靠性下降。

参考文献:

[1] URGUN D, SINGH C, VITTAL V. Importance sampling using multi-label radial basis classification for composite

- power system reliability evaluation[J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14(2): 2791-2800.
- [2] 万国成,任震,吴日昇,等. 混合法在复杂配电网可靠性评估中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 96-102.
- WAN Guocheng, REN Zhen, WU Risheng, et al. Hybrid method for the reliability evaluation of the complex distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 96-102.
- [3] 宫建锋,周宗川,靳盘龙,等. 考虑灵活性的交直流混合配电网储能双层规划[J]. 电力建设, 2022, 43(7): 48-56.
- GONG Jianfeng, ZHOU Zongchuan, JIN Panlong, et al. Two-level planning of ESS in AC/DC hybrid distribution network considering flexibility[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(7): 48-56.
- [4] TABARES A, MUNOZ-DELGADO G, FRANCO J F, et al. An enhanced algebraic approach for the analytical reliability assessment of distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 2870-2879.
- [5] 苗友忠,李顺昕,雷为民,等. 考虑用户负荷类型的含分布式电源的配电网可靠性评估[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(2): 93-99.
- MIAO Youzhong, LI Shunxin, LEI Weimin, et al. Reliability evaluation of distribution network with distributed generation considering customer sectors[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2): 93-99.
- [6] 宫娅宁,秦红,付洪斌,等. 考虑源荷不确定性的光伏发电系统优化调度策略[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(2): 112-118.
- GONG Yaning, QIN Hong, FU Hongbin, et al. Optimal schedule strategy for photovoltaic generation system considering the uncertainty in source and load[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(2): 112-118.
- [7] 张雪寒,余涛. 计及风速与负荷相关性的电-气互联系统概率可靠性评估方法[J]. 高电压技术, 2019, 45(10): 3263-3272.
- ZHANG Xuehan, YU Tao. Probabilistic reliability evaluation method of electricity-gas integrated energy system considering correlation of wind speed and loads[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3263-3272.
- [8] 丁明,宋晓皖,孙磊,等. 考虑时空相关性的多风电场出力场景生成与评价方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(10): 39-47.
- DING Ming, SONG Xiaowan, SUN Lei, et al. Scenario generation and evaluation method of multiple wind farms output considering spatial-temporal correlation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(10): 39-47.

- [9] 赵渊,刘庆尧,邝俊威,等. 电网可靠性评估中相关性变量的非参数R藤Copula模型[J]. 中国电机工程学报, 2020,40(3):803-812.
ZHAO Yuan, LIU Qingyao, KUANG Junwei, et al. A nonparametric regular vine Copula model for multidimensional dependent variables in power system reliability assessment[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(3):803-812.
- [10] 尹青,杨洪耕,马晓阳. 考虑多重不确定参数的配电网概率无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2017,45(7): 141-147.
YIN Qing, YANG Honggeng, MA Xiaoyang. Probabilistic reactive power optimization for distribution network considering multiple uncertainties[J]. Power System Protection and Control, 2017,45(7):141-147.
- [11] 崔挺,李雪萍,颜畅,等. 基于模型预测控制的风电场故障穿越有功无功优化控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022,50(2):12-20.
CUI Ting, LI Xueping, YAN Chang, et al. Active and reactive power optimization control strategy for wind farm fault ride-through based on model predictive control [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50 (2): 12-20.
- [12] AMIRI H, MOHAMMADI M, KARIMI M, et al. Probabilistic load flow based on parameterized probability-boxes for systems with insufficient information[J]. IEEE Access, 2021,9:161038-161045.
- [13] 葛少云,张鑫,刘洪,等. 基于点估计法的有源配电网概率可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2014,42(12): 91-100.
GE Shaoyun, ZHANG Xin, LIU Hong, et al. Active distribution network probabilistic reliability evaluation based on point estimation method[J]. Power System Protection and Control, 2014,42(12):91-100.
- [14] 楼冠男,蒋啸宇,顾伟,等. 基于事件触发的有源配电网改进变分算法及其稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2023,47(12):66-75.
LOU Guannan, JIANG Xiaoyu, GU Wei, et al. Event triggering based improved variational algorithm for active distribution network and its stability analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023,47(12):66-75.
- [15] 高元海,王淳. 级数展开法拟合概率潮流分布函数的局限及改进[J]. 中国电机工程学报, 2021,41(17):5900-5911.
GAO Yuanhai, WANG Chun. Limitation analysis and improvement for series expansion methods to fit the distribution function of probabilistic power flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2021,41(17):5900-5911.
- [16] 赵真,袁旭峰,徐玉韬,等. 一种改进三点估计法的概率潮流计算方法[J]. 南方电网技术, 2020,14(11):43-48.
ZHAO Zhen, YUAN Xufeng, XU Yutao, et al. An improved three-point estimate method for probability load flow calculation[J]. Southern Power System Technology, 2020,14(11):43-48.
- [17] 毛晓明,叶嘉俊. 主元分析结合Cornish-Fisher展开的概率潮流三点估计法[J]. 电力系统保护与控制, 2019,47(6):66-72.
MAO Xiaoming, YE Jiajun. A three-point estimate method for probabilistic load flow computation based on principal component analysis and Cornish-Fisher series [J]. Power System Protection and Control, 2019,47(6):66-72.
- [18] 程林,何剑. 电力系统可靠性原理和应用(第2版)[M]. 北京:清华大学出版社, 2015:10-131.
CHENG Lin, HE Jian. Principle and application of power system reliability (2nd Edition) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2015:
- [19] 孙雨潇,朱俊澎,袁越. 基于动态孤岛混合整数线性规划模型的主动配电网可靠性分析[J]. 电力建设, 2019,40(5):90-97.
SUN Yuxiao, ZHU Junpeng, YUAN Yue. Reliability evaluation based on dynamic island MILP model of active distribution network[J]. Electric Power Construction, 2019,40(5):90-97.
- [20] 李娟,周红莲,周二彪,等. 计及风速—电锅炉等电采暖负荷相关性的配电网可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2018,38(10):26-31.
LI Juan, ZHOU Honglian, ZHOU Erbiao, et al. Reliability evaluation of distribution network considering correlation between wind speed and electricity heating load such as electricity boiler[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018,38(10):26-31.
- [21] 宋晓通,翁志鹏,周京华,等. 基于多态不确定性全时序仿真的微电网可靠性评估与规划[J]. 高电压技术, 2020, 46(5):1508-1517.
SONG Xiaotong, WENG Zhipeng, ZHOU Jinghua, et al. Reliability evaluation and planning of microgrid based on whole time sequence simulation of multi-state uncertain[J]. High Voltage Engineering, 2020,46(5):1508-1517.
- [22] 贾国莎,李伟,黄奕,等. 基于多因素的电力系统充裕性评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(S1):38-42.
JIA Ousha, LI Wei, HUANG Yi, et al. Adequacy assessment of power systems based on multi-factor model[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2015, 27(S1): 38-42.