

基于点估计法的有源配电网概率可靠性评估

葛少云¹, 张鑫¹, 刘洪¹, 徐栋¹, 赵波², 张雪松²

(1. 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072; 2. 浙江省电力公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014)

摘要: 分布式可再生能源的接入增强了配电网可靠性的不确定性, 而应用现有方法进行的配电网可靠性评估无法全面反映孤岛内电源和负荷的随机波动性, 为此提出了基于点估计法的有源配电网概率可靠性评估方法。以蒙特卡洛模拟法为框架, 首先确定有源配电网故障分区, 建立孤岛随机变量概率模型, 其次通过基于点估计法的独立随机变量非线性变换方法, 对孤岛概率可靠性进行评估, 最后将多次模拟故障的可靠性结果概率叠加, 得出系统概率可靠性指标, 实现了对有源配电网可靠性的全面评估和分析。通过对改造的 IEEE RBTS Bus6 中的多分支馈线模型进行仿真计算, 验证了此种评估方法的有效性和准确性。

关键词: 分布式电源; 配电网; 概率可靠性; 点估计法; 蒙特卡洛仿真

Active distribution network probabilistic reliability evaluation based on point estimation method

GE Shao-yun¹, ZHANG Xin¹, LIU Hong¹, XU Li¹, ZHAO Bo², ZHANG Xue-song²

(1. Key Laboratory of Smart Grid (Tianjin University), Ministry of Education, Tianjin 300072, China;

2. Zhejiang Electric Power Corporation Research Institute, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The access of distributed renewable energy enhances the uncertainty of the distribution network reliability, whereas the distribution network reliability evaluation using existing methods cannot fully reflect the stochastic volatility of islanding power supply and loads. For this reason the approach of active distribution network probabilistic reliability evaluation based on point estimation method is proposed. In the framework of Monte Carlo simulation, the active distribution network failed subzone is determined and the probabilistic models of islanding random variables are established firstly; then the islanding probabilistic reliability is assessed with a nonlinear transformation method of independent random variables based on point estimate method; finally, system probabilistic reliability indexes can be obtained from the probabilistic superimposing of the results of repeating simulated failures, achieving a comprehensive assessment and analysis to the active distribution network reliability. The simulation on the transformed multi-branch feeder model of the IEEE RBTS Bus6 verifies the validity and accuracy of this assessment approach.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51107085).

Key words: distributed generation; distribution network; probabilistic reliability; point estimate method; Monte Carlo simulation

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)12-0091-10

0 引言

现代社会对连续优质供电的需求越来越高, 配电系统可靠性已成为电力用户关注重点; 同时, 提高配电系统可靠性需要大量投资, 直接关系电力企业和社会的经济效益^[1-2]。因此, 全面科学地评估配电系统可靠性具有重要的现实意义。

随着分布式电源 (Distributed Generation, DG) 和储能装置接入, 配电网电源出力与负荷功率一样, 也成为概率分布的随机变量, 电网运行的不确定性增加。配电网故障后, 除了联络线路转带负荷, DG 孤岛运行同样可以为某些负荷供电, 负荷供停电情况更加复杂^[3-4]。有源配电网供电模式的灵活性及其电源负荷的不确定性对准确全面评估配电网可靠性提出了新的要求。

近年来, 国内外学者对有源配电网的可靠性评估进行了深入研究, 针对不同的 DG 运行模式以及

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51107085); 国家电网公司科技项目

孤岛划分方式提出了多种可靠性评估方法^[5-8],但是充分考虑 DG 出力和负荷功率随机波动性的文献并不多见。文献[9]在馈线分区的基础上,引入基于成功概率的可靠性分析方法,建立了考虑 DG 出力不可控性的配电系统可靠性评估模型。文献[10]首次提出可靠性概率指标的概念,在传统配电网基于模拟法的可靠性评估中对可靠性指标逐年统计,从而得到负荷和系统可靠性指标的概率分布。文献[11]以解析法为基础,提出了考虑供电概率的有源配电网可靠性评估方法。这种方法计及了 DG 出力和负荷功率的随机性对负荷可供电情况的影响,但并未将这种随机性体现在可靠性指标上。文献[12]考虑了不同分布式电源出力场景下负荷被切除概率和孤岛形成概率,运用全概率公式计算出系统可靠性指标的平均值。文献[13]将电网概率可靠性分析处理为组合优化问题,以一种基于元启发式禁忌搜索的优化方法进行概率可靠性评估。上述文献考虑了故障发生、故障隔离修复和负荷功率波动的随机性,同时计及了 DG 出力波动性对配电网可靠性的影响,但都将可靠性评估结果表述为可靠性指标的期望值,而仅用期望描述高度不确定的具有一定概率分布的有源配电网可靠性并不全面。同时,现有方法在计算故障后孤岛内供电可靠性时,多采用对 DG 和负荷时序抽样的方法处理其随机性,用同一时间断面的抽样数据进行负荷平衡,多次抽样求得可靠性期望,孤岛可靠性计算精度直接受抽样间隔影响。

本文提出配电网概率可靠性概念,并结合配电网可靠性评估传统方法,提出了基于三点估计(Three-Point Estimate, TPE)法的有源配电网概率可靠性评估方法,介绍了此种方法在实际配电系统中的具体应用,并将可靠性评估结果与序贯蒙特卡洛仿真结果进行对比,验证了所提方法的准确性和实用性。

1 有源配电网可靠性评估

1.1 可靠性的概率评估

有源配电网发生故障后,在一定条件下 DG 可以与负荷组成孤岛运行,孤岛内负荷能否持续供电成为概率问题,负荷停电时间、缺供电量等具有不确定性。同时由于负荷功率的随机性,某次故障中无法形成孤岛而停电的负荷点的缺供电量同样具有不确定性。

对 DG 和负荷时序抽样计算孤岛可靠性时,计算准确性与计算效率之间存在矛盾。为此将 DG 出力和负荷大小看作随机变量,建立其概率模型,用

随机变量变换和叠加的方法直接计算可靠性指标。同时为了表现配电网可靠性的随机分布特性,可以用全面概率描述代替期望值表示配电网可靠性指标,即用各可靠性指标的期望、标准差及概率密度函数或累积分布函数来表示可靠性。概率可靠性可以更加全面、更有针对性地分析有源配电网可靠性,引入适宜工程计算的概率可靠性评估方法具有重要意义。

以现有配电系统可靠性评估方法为基础,考虑风速、光强和负荷大小的不确定性,有源配电网的概率可靠性评估是一个多随机变量的非线性运算问题。

1.2 概率可靠性评估的方法框架

目前,主流配电系统可靠性评估方法主要分为解析法(A analytical Method)和蒙特卡洛模拟法(Monte Carlo Simulation),以及一些两者的改进算法和混合方法。由于蒙特卡洛方法对复杂配电系统有更好的适应性,本文中配电网概率可靠性评估以准序贯蒙特卡洛模拟法为框架,基于馈线区对配电网进行编码,同时根据馈线区将故障后的配电网分为无影响区域、前向区域、故障区域和后向区域,从而建立系统的故障模式影响分析表(FMEA表),进行可靠性指标计算^[14-15]。图1为配电网编码分区示意图。

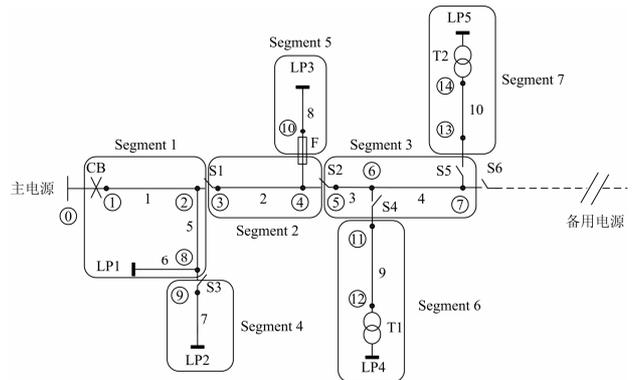


图1 配电网编码分区示意图

Fig. 1 Diagram of distribution network coding and zoning

使用蒙特卡洛法仿真计算时,通过产生随机数的方式对配电网元件状态进行抽样,确定故障元件、故障发生时刻 TTF、故障持续时间 TTR 和故障隔离时间 TTI^[15]。

以 TTR 为例介绍状态抽样。认为故障无记忆性,则故障修复时间服从指数分布,其概率密度函数为

$$f(t) = \mu e^{-\mu t} \quad (1)$$

式中: $f(t)$ 表示元件在 t 时刻被修复的概率; μ 表

示元件修复率。则元件修复时间为 T 的概率为

$$F'(T) = 1 - F(T) = e^{-\mu T} \quad (2)$$

$F'(T)$ 为区间 $[0,1]$ 内的数, 因此可以通过产生 $[0,1]$ 内的随机数的方式抽样 TTR, 抽样公式为

$$TTR = -\frac{1}{\mu} \ln R \quad (3)$$

式中, R 为区间 $[0,1]$ 内均匀分布的随机数。

抽样模拟出一次配电网故障后, 该次故障的 TTF、TTR 和 TTI 是确定值, 根据各小区分类和 DG 运行状态确定小区能否形成孤岛。

本文主要研究的负荷点可靠性指标有^[16]:

a) 停电时间 (Power Outage Duration, POD)

负荷点停电时间是指统计时间 (一次模拟故障或一年) 内该负荷点停电持续时间, 单位一般为 h/次或 h/年。

b) 缺供电量 (Energy Not Supply, ENS)

负荷点缺供电量是指统计时间 (一次模拟故障或一年) 内该负荷点因停电造成的电量损失, 记负荷点功率为 L_a , 则 $ENS = POD \times L_a$, 单位一般为 kWh/次或 kWh/年。

对于某次确定故障, 考虑到 DG 出力和负荷的随机性, 孤岛内各负荷点 POD 和 ENS 为随机变量, 其概率分布可采用随机变量非线性变换方法对电源、负荷等输入随机变量处理而求得; 而无法形成孤岛的小区中负荷的供电情况是确定的, POD 为故障隔离时间 TTI、故障持续时间 TTR 或 0 (不停电), ENS 的概率分布可由其负荷功率概率分布得到。利用蒙特卡洛模拟法多次模拟配电网故障, 得到各负荷点单次故障可靠性指标的概率分布序列 (或矩阵), 将其概率叠加后即可计算各负荷点概率可靠性及系统概率可靠性指标。

在此蒙特卡洛模拟法框架下, 有源配电网概率可靠性评估的核心在于孤岛内负荷概率可靠性的计算。下面通过孤岛随机变量概率模型建模和基于 TPE 法的随机变量处理介绍孤岛概率可靠性计算方法。

2 孤岛随机变量的概率模型

为了获得孤岛时期 DG 发电功率、负荷功率以及储能的荷电状态等随机变量的概率分布情况, 对风机、光伏、负荷和蓄电池等系统元件建立时序模拟模型, 在孤岛时期的时间邻域内进行蒙特卡洛抽样求取随机变量的各阶矩, 最终建立随机变量的概率模型。

2.1 孤岛元件时序模型

(1) 风力发电时序模型

风速实时序列可以采用自回归滑动平均 (ARMA) 模型产生, 详见文献[17]。

风机出力函数为

$$P_w = \begin{cases} 0, & 0 \leq SW_t < V_{ci} \\ (A + B \times SW_t + C \times SW_t^2) P_r, & V_{ci} \leq SW_t < V_r \\ P_r, & V_r \leq SW_t \leq V_{co} \\ 0, & SW_t > V_{co} \end{cases} \quad (4)$$

式中: SW_t 、 V_{ci} 、 V_r 、 V_{co} 分别为风机的实时风速、切入风速、额定风速和切出风速, P_w 和 P_r 为风机的实时出力和额定出力, 参数 A 、 B 、 C 为风机出力曲线非线性部分的多项式拟合系数。

(2) 太阳能发电时序模型

光照强度可以采用光照动态概率模型^[18]或 HDKR 模型^[19]产生。

光伏阵列的实时出力模型为

$$P_b = \begin{cases} P_{sn} (G_{bt}^2 / (G_{std} R_c)), & 0 \leq G_{bt} < R_c \\ P_{sn} (G_{bt} / G_{std}), & R_c \leq G_{bt} < G_{std} \\ P_{sn}, & G_{bt} \geq G_{std} \end{cases} \quad (5)$$

其中: P_b 和 P_{sn} 分别为光伏的实时功率和额定功率; G_{bt} 和 G_{std} 分别为实时光照强度和额定光照强度; R_c 为某一特定强度的光强, 实时光强超过 R_c 后, 光伏出力与光强的关系开始由非线性变为线性。

(3) 负荷时序模型

负荷点第 t 个小时的实时负荷为 $L_t = L_p \times P_w \times P_d \times P_h(t)$ ^[20]。其中 L_p 为年负荷峰值, P_w 、 P_d 和 $P_h(t)$ 分别为第 t 个小时对应的年-周负荷曲线、周-日负荷曲线和日-小时负荷曲线中的值。

(4) 储能装置时序模型

进入孤岛运行时, 储能装置的荷电状态(State of Charge, SOC)是按一定概率分布的随机变量。因此储能装置的充放电极限也不是确定的。同样, 由于孤岛内分布式电源出力、负荷功率及负荷削减情况是随机变化的, 孤岛结束时储能装置的 SOC 也应为随机变量。

本文以铅酸蓄电池为代表建立储能装置模型。铅酸蓄电池的两池模型 (Kinetic Battery Model, KiBaM) 可以较为全面地反映蓄电池充放电极限与 SOC 之间的关系, 具体参见文献[21]。

2.2 随机变量抽样

根据上述孤岛内元件模型, 各随机变量在孤岛时间内的概率分布并非典型分布, 因此采用基于蒙特卡洛抽样的方法来求取随机变量各阶中心矩^[22]。

蒙特卡洛方法基于大数定律, 抽样误差与样本

容量平方根成反比, 为了保证足够精度, 应该对孤岛时期内的随机变量多次抽样。在风速、光强等随机变量的连续时间序列上, 各采样点具有一定的迟滞相关性, 单纯的多次生成随机变量序列并在指定时间段抽样会掩盖这种相关性, 反而增大抽样误差。为了保留随机变量在时序上的相关性, 同时保证足够大的样本容量, 利用风速、光强、负荷功率等随机变量的日周期性, 在邻近时间序列上每隔 24 小时抽样相应时间段的随机变量值。设随机变量 x_k 的抽样样本为 w_k , 孤岛形成时刻为 t , 持续时间为 s , 仿真步长 1h, 则有

$$w_k = \left\{ \left[w_{t-24 \times m}, w_{t-24 \times m+1}, \dots, w_{t-24 \times m+s-1} \right], \dots, \left[w_{t-24}, w_{t-24+1}, \dots, w_{t-24+s-1} \right], \left[w_t, w_{t+1}, \dots, w_{t+s-1} \right], \left[w_{t+24}, w_{t+24+1}, \dots, w_{t+24+s-1} \right], \dots, \left[w_{t+24 \times m}, w_{t+24 \times m+1}, \dots, w_{t+24 \times m+s-1} \right] \right\} \quad (6)$$

w_k 共包含 $N = (2m+1) \times s$ 个抽样点, 则 x_k 的 v 阶原点矩和中心矩为

$$\alpha_{k,v} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_{k,i}^v, \quad v=1,2,\dots \quad (7)$$

$$M_{k,v} = \sum_{j=0}^v \binom{v}{j} \alpha_{k,(v-j)} (-\alpha_{k,1})^j \quad v=1,2,\dots \quad (8)$$

至此, 建立了 DG 出力和负荷功率等随机变量在孤岛期间的概率模型。储能装置 SOC 的概率分布与 DG 和负荷直接相关, 随其在电网正常运行和孤岛状态的充放电情况不断变化, 并无确定的概率模型。

3 基于 TPE 法的孤岛概率可靠性计算

当输入随机变量的概率分布已知时, 理论上可以直接推导出其函数的概率分布。但当二者间函数关系较为复杂时, 概率分布的推导将极为困难。因此可以通过数值方法, 从随机变量中选取少量估计点进行函数运算来估计目标变量的统计特征, 即为点估计法^[23]。在工程中常用的是三点估计 (TPE) 法。在孤岛概率可靠性评估中使用 TPE 法, 结合 Gram-Charlier 级数可以求得相关可靠性指标的概率密度函数。

3.1 TPE 法在孤岛概率可靠性计算中的应用

通过蒙特卡洛法抽样模拟出一次配电网故障后, 经过故障隔离形成若干孤岛。孤岛内各负荷点可靠性计算可通过以下函数表示:

$$\mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{h}(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (9)$$

其中: \mathbf{y} 为 m 维目标变量, y_k 表示各负荷点的 POD 或 ENS, 或者孤岛结束时储能装置的 SOC; \mathbf{x} 为 n

维随机变量, x_k 表示某节点的风速、光强、孤岛形成时储能荷电状态或负荷大小。对于有 k_1 个负荷、 k_2 台风机、 k_3 组光伏和 k_4 组储能装置的孤岛, $m = 2 \times k_1 + k_4$, $n = k_1 + k_2 + k_3 + k_4$ 。

设 x_k 的均值、标准差、 v 阶原点矩和中心矩分别为 μ_k 、 σ_k 、 $\alpha_{k,v}$ 和 $M_{k,v}$ 。在每个随机变量 $x_k (k=1,2,\dots,n)$ 上选取 3 个估计点, 记作 $x_{k,1}$ 、 $x_{k,2}$ 和 $x_{k,3}$, 表达式为

$$x_{k,i} = \mu_k + \xi_{k,i} \sigma_k, \quad i=1,2,3 \quad (10)$$

式中位置量度 $\xi_{k,i}$ 的表达式为

$$\begin{cases} \xi_{k,1} = \frac{\lambda_{k,3}}{2} + \sqrt{\lambda_{k,4} - \frac{3\lambda_{k,3}^2}{4}} \\ \xi_{k,2} = 0 \\ \xi_{k,3} = \frac{\lambda_{k,3}}{2} - \sqrt{\lambda_{k,4} - \frac{3\lambda_{k,3}^2}{4}} \end{cases} \quad (11)$$

其中, $\lambda_{k,3}$ 和 $\lambda_{k,4}$ 分别为随机变量 x_k 的偏度系数和峰度系数。

由式(7)可以看到, 每个随机变量所取的 3 个估计点分别为变量均值及其左右邻域内确定距离的两个点。将估计点组成 $n \times 3$ 阶估计点组矩阵 \mathbf{X} , 同时生成对应的 $n \times 3$ 阶权重矩阵 \mathbf{P} 。其中:

$$\mathbf{X}_{k,i} = [\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_{k-1}, x_{k,i}, \mu_{k+1}, \dots, \mu_n], \quad i=1,2,3 \quad (12)$$

$$\begin{cases} p_{k,1} = \frac{1}{\xi_{k,1}(\xi_{k,1} - \xi_{k,3})} \\ p_{k,2} = \frac{1}{n} - \frac{1}{\lambda_{k,4} - \lambda_{k,3}^2} \\ p_{k,3} = -\frac{1}{\xi_{k,3}(\xi_{k,1} - \xi_{k,3})} \end{cases} \quad (13)$$

取得估计点组后, 可认为孤岛期间内各随机变量按此估计点组取为确定值, 根据风机光伏出力、负荷大小和储能充放电情况, 结合负荷削减策略, 进行负荷平衡, 进而计算负荷点可靠性。

用 y_i 表示某负荷点的 POD 或 ENS, h_i 表示负荷平衡和此负荷点的可靠性计算过程, 则此估计点组取值下的负荷点可靠性估值为 $y_i = h_i(\mathbf{X}_{k,i})$, 对估计点组矩阵 \mathbf{X} 中各元素逐个进行计算, 形成 $n \times 3$ 阶估值矩阵。则 y_i 的 v 阶原点矩可以表示为

$$\alpha_{k,v} = E^v(y_i) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^3 [p_{k,i} \times h_i(\mathbf{X}_{k,i})^v] \quad (14)$$

利用 Gram-Charlier 展开级数可以由各阶原点矩计算可靠性指标或储能 SOC 的概率密度函数^[24]。

y_i 的标准化随机变量 \hat{y}_i 的概率密度函数为

$$f(\hat{y}_i) = \sum_{i=0}^m \frac{C_i}{i!} \varphi^{(i)}(\hat{y}_i) \quad (15)$$

式中, 展开级数的系数 C_i 是关于 $\alpha_{k,v}$ 的多项式。对 $f(\hat{y}_i)$ 进行相应反标准化变换, 即可得到可靠性指标或储能 SOC 的概率密度函数 $f(y_i)$, 完成此次孤岛概率可靠性计算。

3.2 孤岛概率可靠性计算流程

孤岛概率可靠性模块设计如图 2 所示。从风速、光强、负荷功率和孤岛形成时刻的 SOC 等随机变量入手, 经过风机、光伏和蓄电池模型以及负荷削减调度两个非线性过程, 得到孤岛内负荷点的停电时间、缺供电量的概率分布, 同时得到孤岛结束时刻蓄电池 SOC 的概率分布。

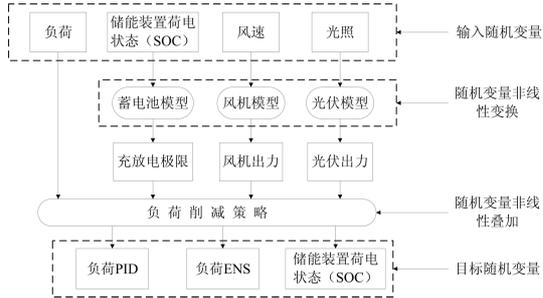


图 2 孤岛概率可靠性评估模块示意图

Fig. 2 Diagram of island probabilistic reliability assessment module

孤岛负荷削减策略采用文献[15]中的启发式负荷削减模型。当孤岛内储能装置所能释放的最大功率与 DG 出力之和小于该时刻孤岛内总负荷时, 则需削减负荷。优先削减孤岛时期内所需电量最小的负荷点, 直至满足孤岛运行条件。为避免负荷频繁启停, 被削减负荷在故障期间不再接入, 故被削减负荷的停电时间为削减时刻至故障修复的时间, 记为 T_{cut} 。

储能装置位于正常运行的配电网时, 其调度策略采用改进的负荷跟随策略^[15], 位于孤岛的储能装置在其最大充放电约束下由风机光伏充电或为负荷供电。以蓄电池为例, 根据 KiBaM 模型描述, 蓄电池放电特性约束与当前蓄电池剩余容量有关^[21], 因此随着蓄电池放电, 其可以供给的最大负荷在不断减小。在采用估计点组进行的确定性可靠性计算中, 孤岛期间 DG 出力、蓄电池初始 SOC 和负荷是确定的, 根据前述启发式负荷削减模型, 可以计算出孤岛期间内随着蓄电池放电依次被削减的负荷及其削减时刻, 从而计算各负荷点的 POD 和 ENS 。

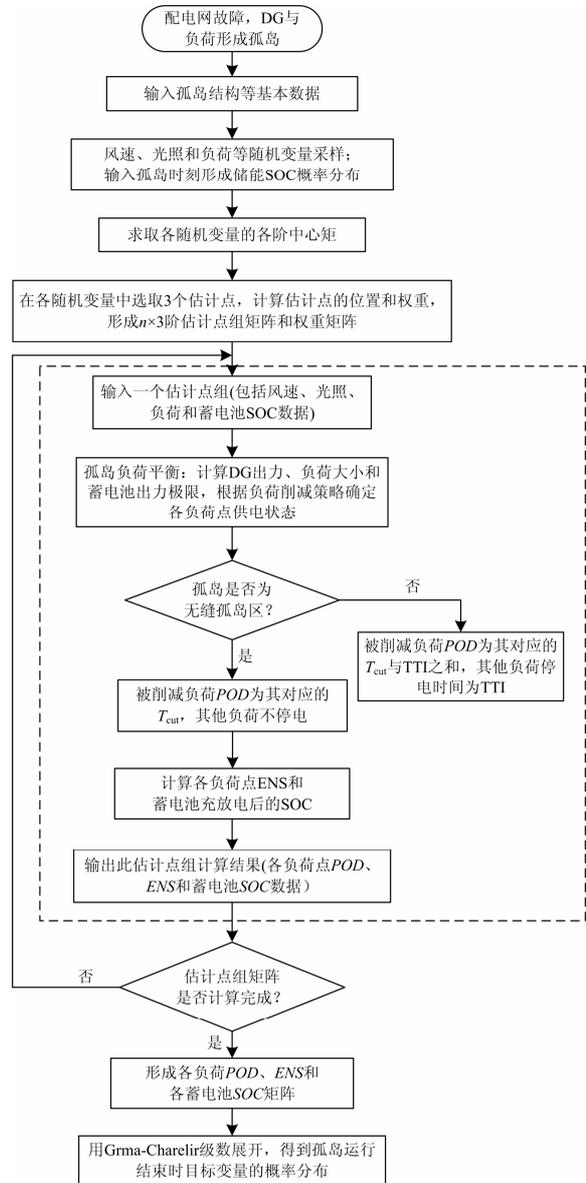


图 3 孤岛概率可靠性评估流程图

Fig. 3 Flowchart of island probabilistic reliability assessment

由于孤岛期间 DG 出力和负荷大小的随机性, 储能装置供出电量是不确定的, 因此退出孤岛运行时储能装置的 SOC 也是随机变量, 其概率分布可以通过孤岛概率可靠性计算得到。配电网正常运行期间, 认为 SOC 的概率分布趋势不变 (即各阶中心矩不变), 只有分布的期望值变化。从孤岛结束时刻 SOC 的期望值开始, 通过风机、光伏和负荷的时序模型以及改进的负荷跟随策略, 确定储能 SOC 的期望值时序序列, 从而得到下次故障发生时刻 (孤岛初始时刻) 的 SOC 期望值, 根据孤岛结束时刻 SOC 分布的各阶中心矩, 在 SOC 取值范围内展开, 即可得到孤岛初始时刻 SOC 概率分布。

基于点估计法的孤岛概率可靠性计算流程如图 3 所示。图中虚线框内为用随机变量的估计点组进行的确定性可靠性计算，即认为孤岛时间内 DG 出力、负荷大小和储能出力均为确定值，在此情况下计算各负荷点确定的停电时间和缺供电量等可靠性指标。

其中无缝孤岛指故障后可以通过断路器操作即刻形成的孤岛，与之相对，非无缝孤岛需要经过隔离开关进行故障隔离后才能形成，故障隔离前处于停电状态。

4 概率可靠性评估算法流程

有源配电网故障后，无法形成孤岛的小区存在以下几种情况：不受影响，完全停电，或经过故障隔离恢复供电，其负荷停电时间确定，可靠性的不确定性仅来源于负荷大小的不确定性，不受 DG 波动的影响，此类小区的负荷可靠性计算较为简单，应用负荷概率模型即可直接计算可靠性指标。因此有源配电网概率可靠性评估的核心在于孤岛概率可靠性计算，计算方法如第 3 节所述。

由多次故障模拟求得的可靠性指标计算负荷点和系统可靠性指标的过程是多随机变量线性变换问题，同样可以使用 TPE 法解决。多次故障模拟后，将每次故障求得的负荷点概率可靠性指标作为输入随机变量，通过 3.1 节方法生成估计点组矩阵和权重矩阵。对每个估计点组计算时，将估计点组中元素看作确定性方法中各次故障模拟求得的可靠性结果，根据负荷点和系统可靠性指标计算公式，采用确定性方法计算该点估计组对应的负荷点和系统可靠性结果。最后通过式 (14)、式 (15) 所示方法，得到目标随机变量，即负荷点和系统可靠性指标的概率分布。

基于 TPE 法的有源配电网可靠性评估流程如图 4 所示。基本步骤如下。

步骤一：输入网络结构，建立 FMEA 表库；仿真步长为 1 h，总模拟时间 N 年；生成风速、光强及各负荷功率的时序数据序列，初始化各储能装置初始状态及可靠性指标的概率描述矩阵。

步骤二：随机数抽样确定网络故障位置、TTF、TTI 和 TTR。

步骤三：查询 FMEA 表，确定各小区所属分类，判断小区是否形成孤岛。可形成孤岛的小区调用图 3 所示计算模块。对于不可形成孤岛的小区，利用负荷概率模型和确定的停电时间计算负荷缺供电量概率分布。

步骤四：根据孤岛概率可靠性计算模块输出的

储能装置 SOC 概率分布，建立配电网正常运行时储能装置充放电循环。重复步骤二、步骤三，直至达到模拟时间。

步骤五：对各负荷点单次故障的可靠性指标的概率分布概率叠加，计算各负荷点和系统的概率可靠性指标。

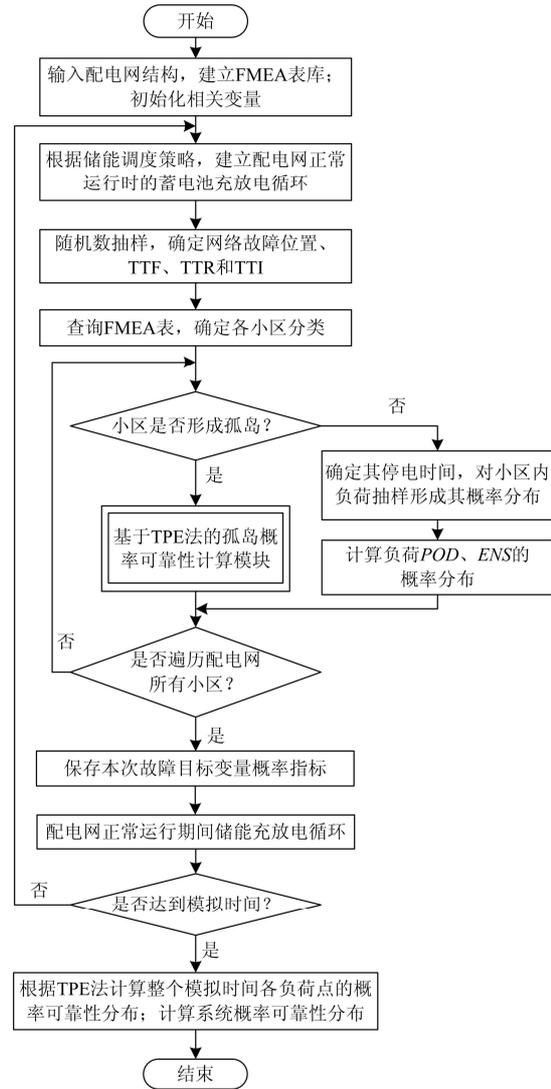


图 4 有源配电网概率可靠性评估流程图

Fig. 4 Flowchart of the probabilistic reliability assessment of active distribution network

5 算例分析

5.1 算例系统说明

本算例采用改造的 IEEE RBTS Bus6^[25-26]中的多分支馈线系统，如图 5 所示。其中每个 DG 包括同型号风机若干、1 组光伏阵列和 1 个蓄电池组。系统具体参数如下：

- 1) 馈线段: 各馈线段长度均取为 0.143 km。
- 2) 负荷: 各负荷点负荷峰值均取为 237.5 kW。
- 3) 风机: 单台风机额定功率 335 kW; 切入风速 2.5 m/s; 额定风速 12.5 m/s; 切出风速 25 m/s; 拟合参数 A 、 B 、 C 分别为 -39.58、6.37、2.02; 平均风速为 19.56 m/s, 风速分布标准差为 10.06 m/s。
- 4) 光伏阵列: 参数 R_c 和 G_{std} 分别为 0.15 kW/m^2 和 1 kW/m^2 。

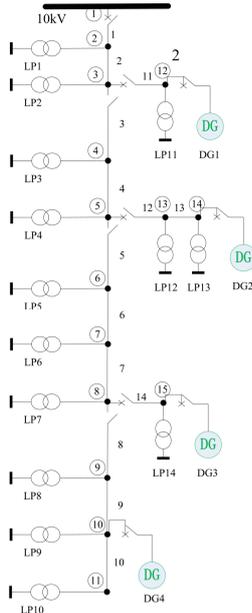


图 5 有源配电网结构示意图

Fig. 5 Active distribution network structure diagram

- 5) 蓄电池: 每块蓄电池额定容量 3000 Ah, 额定电压 2 V (6 kWh); 参数 $c=0.317$, $\alpha=1$, $k=1.22$, $\eta_c=\eta_d=0.927$, $I_{max}=610 \text{ A}$ 。

- 6) 元件故障率: 馈线故障率为 $0.065 \text{ 次/年} \times \text{km}$, 配变故障率为 0.015 次/年 , 开关故障率为 0.006 次/年 , 平均修复时间均为 5 h, 服从指数分布。故障隔离与负荷转带时间取恒定值 1 h。单台风机故障状态概率 $P_d=7.3\%$; 光伏阵列与蓄电池组的状态模型参数相同, 故障状态概率 $P_d=3.2\%$, 降额状态概率 $P_c=5\%$ 。

5.2 概率可靠性评估结果

设定系统模拟时间为 1×10^4 年。模拟结束后得到各负荷点及整个系统的概率可靠性指标, 即各可靠性指标的期望、标准差和概率密度函数等概率特征。

计算结果显示, 对于形成孤岛小区的负荷点, 其 POD 和 ENS 均表现出一定的波动性, 例如与 DG2 位于同一小区的 13 号负荷点, 其 POD 和 ENS 的概

率密度函数图像如图 6 所示; 对于无法形成孤岛小区的负荷点, 其 POD 为确定值, ENS 的概率分布情况与图 6 (b) 类似。

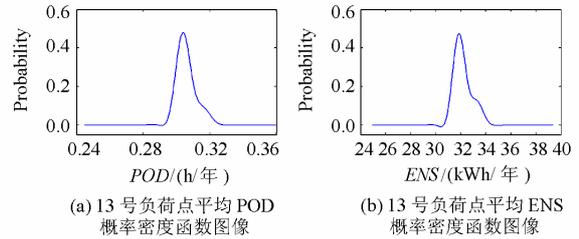


图 6 13 号负荷点可靠性指标概率分布图

Fig. 6 Probabilistic distribution of No. 13 load reliability index

可以看到, 单个负荷点的可靠性指标的概率分布近似服从正态分布。由于 TPE 法对每维随机变量选取 3 个估计点, 计算中只计及各随机变量 5 阶及以下的中心矩, 因此在使用 Gram-Charlier 级数展开时无法完全模拟可靠性指标真实概率分布, 出现了局部概率为负值的情况。

选取系统平均停电时间 SAIDI 和平均缺供电量 AENS 两个指标展示系统可靠性指标的概率分布情况, 如图 7 所示。

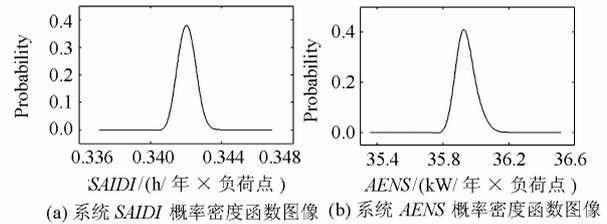


图 7 系统可靠性指标概率分布图

Fig. 7 Probabilistic distribution of system reliability index

可以看到, 相对于负荷点可靠性指标, 系统可靠性指标的概率密度函数图像更加平滑, 更接近标准正态分布图像。

其他系统可靠性指标的概率分布情况与图 7 类似, 受篇幅所限不一一列举。

5.3 与蒙特卡洛仿真结果比较

为了检验本文所提基于 TPE 法的有源配电网的概率可靠性评估方法 (Probabilistic Reliability Evaluation Method, PREM) 的准确性, 将可靠性指标计算结果与序贯蒙特卡洛仿真 (Standard Sequential Monte Carlo Simulation, SSMCS) 计算结果进行对比^[27]。

根据 SSMCS 对本算例的计算, 仿真年限达到 1×10^4 年时, 可靠性指标基本稳定, 各次仿真结果与平均值的偏差在 0.1% 以内, 因此选用 100 次仿真时间 1×10^4 年的 SSMCS 计算结果的平均值作为本算例

可靠性计算标准结果。

图 8 为两种方法计算的各负荷点 POD 和 ENS 的对比。图中阴影区域表示置信区间为 99.73% 的概率可靠性指标分布带，粗实线为 PREM 计算的可靠性指标期望值，虚线为 SSMCS 计算结果。由于 1~7 号负荷点所在馈线区不含有 DG，故障后停电情况确定，负荷点缺供电量也相对稳定，其可靠性指标分布带很窄；而 8~14 号负荷点可与 DG 形成孤岛运行，其供停电情况不确定性较大，因此分布带明显宽于其他负荷点。可以看到，PREM 结果的分布带基本包含了 SSMCS 结果，说明基于 TPE 法的 PREM 对各负荷点可靠性的评估是基本准确的。

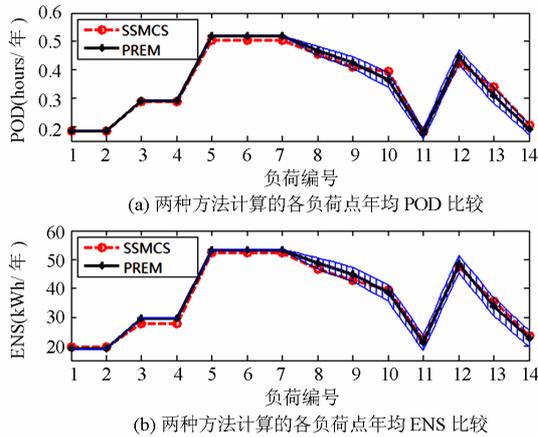


图 8 负荷点可靠性指标对比

Fig. 8 Load point reliability index comparison

表 1 为两种方法计算的系统可靠性指标的对比。概率可靠性指标期望值与标准蒙特卡洛仿真结果基本一致，误差在 1% 以内。说明 PREM 丰富了指标信息的同时保持了计算的准确性。

表 1 系统可靠性指标对比

Table 1 System reliability index comparison

方法	SAIFI/(次/年× 负荷点)	SAIDI/(h/年× 负荷点)	AENS/(kWh/年× 负荷点)	ASAI/%
SSMCS	0.114 6	0.424 5	44.49	0.999 96
PREM	μ 0.115 1	0.429 1	45.05	0.999 95
	σ 1.324E-04	5.364E-04	5.402E-02	1.500E-04

在同一仿真平台上用两种方法计算此算例，仿真时间同为 1×10^4 年时，耗费时间如表 2 所示，应用了 TPE 法的 PREM 所需时间是 SSMCS 的 1.7 倍左右，保持了较高的运行效率。

为了进一步对比两种方法的计算性能，将两种方法在不同仿真年限和运算时间下对系统可靠性指标 AENS 的计算结果进行对比，体现了两种方法在收敛性和稳定性上的差异。如图 9、图 10 所示。

表 2 计算时间对比

Table 2 Computation time comparison

方法	计算时间/s
SSMCS	3.272
PREM	5.481

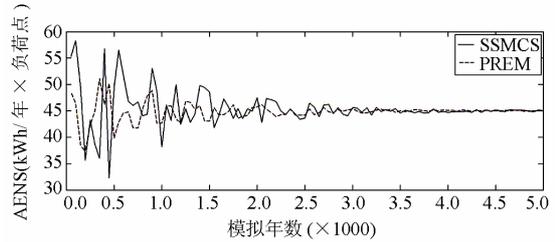


图 9 不同仿真时间下的 AENS 对比

Fig. 9 AENS comparison of different simulation time

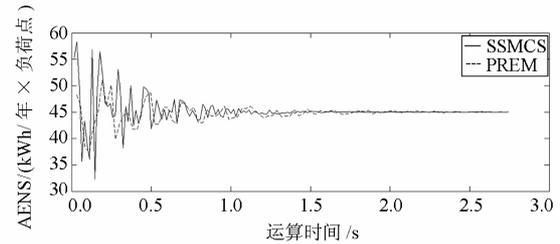


图 10 不同运算时间下的 AENS 对比

Fig. 10 AENS comparison of different calculation time

图 9 为不同仿真时间下，两种算法计算的 AENS 的对比。仿真时间较短时，PREM 的计算误差较小，计算稳定性更高，这是由于在孤岛可靠性计算中，PREM 直接应用随机变量的概率分布进行计算，避免抽样间隔带来的误差，单次故障可靠性计算更准确。因此 PREM 收敛速度明显快于 SSMCS。

但 PREM 单次故障运算时间长，达到相同仿真年限所需时间是 SSMCS 的 1.7 倍左右，本文又对基于运算时间的两种方法收敛性进行了对比，如图 10 所示。可以看到两种方法在相同时间轴下收敛速度基本相同。这说明，尽管 PREM 计算了远比 SSMCS 丰富的可靠性指标信息，但达到相同精度所需绝对时间并不比 SSMCS 长，体现了基于 TPE 法的 PREM 的优越性。

6 结论

针对现有方法仅用指标期望值描述可靠性、用间隔抽样处理 DG 和负荷随机性的不足，本文以蒙特卡洛模拟法为框架，提出了基于 TPE 法的有源配电网概率可靠性评估方法。该方法具有以下特点：

- (1) 可以将可靠性指标（如负荷点和系统的年均停

电时间、缺供电量等)用期望、标准差以及概率密度函数表示,从全貌上展示了有源配电网可靠性的概率分布特性。(2)直接用DG出力和负荷大小等随机变量的概率分布进行运算,排除了抽样间隔对计算精度的影响,提高了对单次故障中负荷点停电时间和缺供电量计算的准确性。(3)计算速度快,精度较高,可靠性计算结果与序贯蒙特卡洛仿真结果基本一致。本文提出的概率可靠性算法可以应用于多种分布式电源和储能装置接入的有源配电网,对配电网运行控制和规划有一定指导意义,具有较好的工程应用前景。

参考文献

- [1] 王建, 李兴源, 邱晓燕. 含有分布式发电装置的电力系统研究综述[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(24): 90-97.
WANG Jian, LI Xing-yuan, QIU Xiao-yan. Power system research on distributed generation penetration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(24): 90-97.
- [2] 何永秀, 朱苙, 罗涛, 等. 城市电网规划自然灾害风险评估研究[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 205-210.
HE Yong-xiu, ZHU Jiang, LUO Tao, et al. Risk assessment of natural disaster in urban electric power network planning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 205-210.
- [3] 张立梅, 唐巍, 赵云军, 等. 分布式发电对配电网影响的综合评估[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 132-135, 140.
ZHANG Li-mei, TANG Wei, ZHAO Yun-jun, et al. The integrated evaluation of impact of distributed generation on distribution net-work[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 132-135, 140.
- [4] 鲁宗相, 王彩霞, 闵勇, 等. 微电网研究综述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(19): 100-106.
LU Zong-xiang, WANG Cai-xia, MIN Yong, et al. Overview on microgrid research[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19): 100-106.
- [5] 胡国伟, 别朝红, 王锡凡. 考虑运行可靠性的含风电电力系统优化调度[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 58-65.
HU Guo-wei, BIE Zhao-hong, WANG Xi-fan. Optimal dispatch in wind integrated system considering operation reliability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 58-65.
- [6] ATWA Y M, EI-SAADANY E F. Reliability evaluation for distribution system with renewable distributed generation during islanded mode of operation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2009, 24(2): 572-581.
- [7] ZHU Dan, BROADWATER R P, TAM K S, et al. Impact of DG placement on reliability and efficiency with time-varying loads[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(1): 419-427.
- [8] 李勇, 刘俊勇, 魏震波, 等. 计及天气的分布式电源对配电网可靠性的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 93-98, 105.
LI Yong, LIU Jun-yong, WEI Zhen-bo, et al. Distribution network reliability considering weather and distribution generation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 93-98, 105.
- [9] 龚剑波, 黄民翔, 孙飞飞. 基于GO法的含分布式电源的配电系统可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(16): 90-94, 100.
GONG Jian-bo, HUANG Min-xiang, SUN Fei-fei. Reliability assessment based on GO methodology for the distribution system including distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(16): 90-94, 100.
- [10] 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 Guo-cheng, REN Zhen, WU Ri-sheng, et al. Hybrid method for the reliability evaluation of the complex distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 96-102.
- [11] 李志铿, 汪隆君, 王钢, 等. 计及故障重构的含分布式电源配电网可靠性评估[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(4): 35-40.
LI Zhi-keng, WANG Long-jun, WANG Gang, et al. Reliability evaluation for distribution system with distributed generations considering reconfiguration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(4): 35-40.
- [12] 陈璨, 吴文传, 张伯明, 等. 基于多场景技术的有源配电网可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(34): 67-73, 11.
CHEN Can, WU Wen-chuan, ZHANG Bo-ming, et al. An active distribution system reliability evaluation method based on multiple scenarios technique[J]. Proceedings of

- the CSEE, 2012, 32(34): 67-73, 11.
- [13] MORI H, KAKUTA H. A TS-based method for probabilistic reliability evaluation in power systems[C] // International Conference on Power System Technology (POWERCON), 2010: 1-6.
- [14] 谢莹华, 王成山. 基于馈线分区的中压配电系统可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 39-43.
XIE Ying-hua, WANG Cheng-shan. Reliability evaluation of medium voltage distribution system based on feeder partition method[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 39-43.
- [15] 王浩鸣. 含分布式电源的配电系统可靠性评估方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
WANG Hao-ming. Reliability evaluation of distribution system including distributed generation[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [16] 郭永基. 电力系统可靠性分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
GUO Yong-ji. Power system reliability analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [17] BILLINTON R, CHEN H, GHAJAR R. Time-series models for reliability evaluation of power systems including wind energy[J]. Microelectronics Reliability, 1996, 36(9): 1253-1261.
- [18] 余昆, 曹一家, 陈星莺, 等. 含分布式电源的地区电网动态概率潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 20-25.
YU Kun, CAO Yi-jia, CHEN Xing-ying, et al. Dynamic probability power flow of district grid containing distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 20-25.
- [19] FARRET F A, SIMOES M G. Integration of alternative sources of energy[M]. Hoboken, NJ, USA: Wiley-IEEE Press, 2006.
- [20] 葛少云, 王浩鸣, 王源山, 等. 含分布式风光蓄的配电系统可靠性评估[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(5): 16-23.
GE Shao-yun, WANG Hao-ming, WANG Yuan-shan, et al. Reliability evaluation of distribution system including distributed wind turbines, photovoltaic arrays and batteries[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(5): 16-23.
- [21] MANWELL J F, MCGOWAN J G. Lead acid battery storage model for hybrid energy systems[J]. Solar Energy, 1993, 50(5): 399-405.
- [22] 石东源, 蔡德福, 陈金富, 等. 计及输入变量相关性的半不变量法概率潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(28): 104-113, 12.
SHI Dong-yuan, CAI De-fu, CHEN Jin-fu, et al. Probabilistic load flow calculation based on cumulant method considering correlation between input variables[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(28): 104-113, 12.
- [23] HONG H P. Efficient point estimate method for probabilistic analysis[J]. Reliability Engineering & System Safety, 1998, 59(3): 261-267.
- [24] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2010.
SHENG Zhou, XIE Shi-qian, PAN Cheng-yi. Probability theory and mathematical statistics[M]. Fourth Edition. Beijing: Higher Education Press, 2010.
- [25] ALLAN R N, BILLINTON R, SJARIEF I. A reliability test system for educational purposes-basic distribution system data and results[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(2): 813-830.
- [26] BILLINTON R, JOHNNAVITHULA S. A test system for teaching overall power system reliability assessment[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(4): 1670-1676.
- [27] 赵渊, 周家启, 刘志宏. 大电网可靠性的序贯和非序贯蒙特卡洛仿真的收敛性分析及比较[J]. 电工技术学报, 2009, 24(11): 127-133.
ZHAO Yuan, ZHOU Jia-qi, LIU Zhi-hong. Convergence analysis and comparison of sequential and nonsequential Monte-Carlo simulation for bulk power system reliability assessment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(11): 127-133.

收稿日期: 2013-09-10; 修回日期: 2013-11-10

作者简介:

葛少云(1964-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事城市电网规划和配电系统自动化等方面的研究和教学工作; E-mail: syge@tju.edu.cn

张鑫(1988-), 男, 硕士研究生, 主要从事配电网可靠性评估方面的研究工作; E-mail: zhangxin11111@126.com

刘洪(1979-), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 主要从事城市电网规划、评估等方面的研究和应用工作。E-mail: liuhong@tju.edu.cn