

面向配电网可靠性评估的输电网等值方法

秦砺寒¹, 陈丹¹, 李顺昕¹, 赵国梁¹, 曹天植², 黄江倩³

(1. 国网冀北电力有限公司经济技术研究院, 北京 100045; 2. 华北电力科学研究院有限责任公司, 北京 100045;
3. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 随着主动式配电网的发展和分布式能源的大量接入, 输电网与配电网间的联系日益复杂紧密, 在对配电网进行可靠性评估时应充分考虑输电网可靠程度。提出了一种量化输电网可靠程度的输电网等值方法, 用以提高配电网可靠性评估的实用性。首先, 提出了节点最大负载能力的概念, 用以表征输电网向下游配电网的最大供电能力, 进而将输电网等值成配电网的电源节点。其次, 采用蒙特卡洛模拟法和最优化技术相结合的方法, 建立了输电网节点最大负载能力计算评估模型。最后, 采用 RBTS 输电系统进行测试, 验证了所提出的输电网可靠性量化等值方法的有效性。

关键词: 可靠性评估; 最大负载能力; 蒙特卡洛模拟法; 最优化技术

An equivalent method of transmission system for distribution network reliability assessment

QIN Lihan¹, CHEN Dan¹, LI Shunxin¹, ZHAO Guoliang¹, CAO Tianzhi², HUANG Jiangqian³

(1. State Grid Jibei Electric Power Company Limited Economic Research Institute, Beijing 100045, China;
2. North China Electric Power Research Institute Company Limited, Beijing 100045, China;
3. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: With the development of the active distribution network and the distributed energy, the links between the transmission grid and distribution network are more and more close and complex. The reliability of the transmission grid should be fully considered when the distribution network reliability assessment is studied. This paper presents a method to quantify the reliability of the transmission grid, in order to enhance the practicability of the reliability assessment of the distribution network. First, this paper presents the concept of maximum load capacity that shows the maximum power supply capacity of the transmission grid to supply the downstream distribution network, and then the transmission system can be equivalent to the power supply node of the distribution network. Secondly, Monte Carlo simulation and optimization techniques are used to establish the maximum load capacity evaluation model. Finally, RBTS transmission test system is used to verify the effectiveness of the proposed method of quantifying the reliability of the transmission grid.

Key words: reliability assessment; maximum load capacity; Monte Carlo simulation; optimization techniques

0 引言

随着经济发展, 为满足不断增长的电能需求, 取得更大的电能使用效益, 许多电网运行在极限状态下, 这使得系统承受了巨大的潜在危险。为保证电网安全稳定运行, 电力系统可靠性评估受到了极大的重视^[1-2]。但由于电力系统可靠性评估建模困难、计算复杂性高等原因, 过去的研究常将电力系统的各

主要部分分开进行评估分析, 即: 发电系统^[3-4]、输电系统^[5]、发输电组合系统^[6]、配电系统^[7-11]等。然而这样的研究方式人为地割裂了输电系统可靠性和配电系统可靠性的联系。

电力系统的可靠性是指由电源向负荷, 经过各个传输环节逐级传递电能, 最终采用供电可靠性指标来具体表征受端电能的充裕程度及安全程度^[12]。因此, 从电网整体来看, 输电系统的可靠性影响着配电系统的可靠性。且随着分布式能源的接入^[13]和主动式配电网的发展^[14], 输电网与配电网间的联系

会更加紧密而复杂,对各自的可靠性评估产生的影响也将更加明显。因此综合地考虑输电网可靠性与配电网可靠性是十分必要的,寻求途径建立起输电网与配电网之间的联系应是首要的研究任务。

本文提出了一种面向配电网可靠性评估的输电网等值方法。将输电网看作是配电网的电源,提出了节点最大负载能力的概念,用以表征输电网对配电网的影响。并且,利用最优化技术构建了考虑系统安全稳定运行约束的输电网节点最大负载能力评估模型。为了获得不同系统状态下指定节点的最大负载能力,本文采用蒙特卡洛模拟法^[15]对系统状态进行抽样,并结合评估模型求解出计及输电网元件可靠性的节点最大负载能力的分布情况。利用该结果便可以将输电网等值成一个两状态或者多状态的电源为配电网供电。本文提出的方法充分考虑了元件状态的不确定性,且计算量与系统规模关联不大,可适用于大规模系统。最后,本文基于 RBTS 输电系统对所提方法可行性和有效性进行了验证分析。

1 最大负载能力及其评估模型

1.1 最大负载能力

从电力系统的潮流流向来看,输电网可看作配电网的电源,因此可将输电网等值为一个两状态或者多状态的电源向配电网供电,即配电网的电源节点。最大负载能力(Maximum Load Capacity, MLC)是本文定义的用于表征在指定系统状态下,满足系统及其元件各种安全可靠要求下,指定的负荷节点所能接收的最大有功功率。即反映了输电网作为配电网的等值电源所能为配电网提供的最大供电能力。

1.2 最大负载能力评估模型

本文建立了节点最大负载能力评估的数学优化模型。该模型将输电网可靠性评估中系统状态校正措施和负载能力评估方法相结合。其中,系统状态校正措施主要为负荷削减,并以安全约束的形式加入到模型约束当中;节点负载能力的评估其核心思想是将节点负荷设置为可调节(可增加或削减)的优化变量。将两者相结合的优化模型可以做到在保证系统安全稳定运行的前提下求解出指定节点的最大负载能力。

以下给出最大负载能力评估的优化模型,该模型是对一个指定的节点在某个系统状态下进行最大负载能力评估。

1.2.1 目标函数

在对指定节点进行最大负载能力评估时需同时考虑对系统状态进行校正。即在通过最少切负荷满足系统安全稳定运行的前提下使待评估的节点负载

能力最大。因此本目标函数应该是切负荷量最小和节点负载能力最大这两个目标的加权和,即为

$$\min. a \sum_{i \neq k} P_{Ci} - b P'_{Lk} \quad (1)$$

式中: a 、 b 分别表示上述两个目标的权重; P_{Ci} 为节点 i 的负荷削减量; P'_{Lk} 表示指定的待评估节点 k 的有功负载的调节能力,该变量的大小反映了指定负荷节点的最大负载能力。 a 的取值应大于 b ,可取100倍左右。

1.2.2 约束条件

1) 功率平衡约束

对于指定的待评估节点 k ,其节点功率平衡方程为

$$P_{Gk} - P'_{Lk} - V_k \sum_{j=1}^n V_j (G_{kj} \cos \theta_{kj} + B_{kj} \sin \theta_{kj}) = 0 \quad (2)$$

$$Q_{Gk} - Q'_{Lk} - V_k \sum_{j=1}^n V_j (G_{kj} \sin \theta_{kj} - B_{kj} \cos \theta_{kj}) = 0 \quad (3)$$

式中: P_{Gk} 、 Q_{Gk} 分别为节点 k 上的发电机组的有功出力 and 无功出力; V_k 、 V_j 、 θ_{kj} 分别为节点 k 、 j 的电压幅值和相角差; G_{kj} 、 B_{kj} 分别为节点导纳矩阵第 k 行第 j 列元素的实部和虚部。需要说明的是,对于待评估节点 k 不设置切负荷变量。此外,目标函数主要考虑节点的有功最大负载能力,所以可以不对节点的无功负载能力进行评估,即可以不引入无功负载调节量 Q'_{Lk} 。(或者 Q'_{Lk} 按有功调节量的一定比例进行调节。)

其他节点的节点功率平衡方程为

$$P_{Gi} - P_{Li} + P_{Ci} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (4)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Li} + Q_{Ci} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (5)$$

式中: P_{Li} 、 Q_{Li} 分别为节点 i 的有功、无功负荷; P_{Ci} 、 Q_{Ci} 分别为节点 i 的有功、无功负荷削减量。

2) 发电机出力约束

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \quad (i \in S_G) \quad (6)$$

$$Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max} \quad (i \in S_G) \quad (7)$$

式中: P_{Gi}^{\min} 、 P_{Gi}^{\max} 、 Q_{Gi}^{\min} 、 Q_{Gi}^{\max} 分别为节点 i 上的发电机组的有功出力 P_{Gi} 的上、下限和无功出力 Q_{Gi} 的上、下限; S_G 为发电机集合。

3) 无功源出力约束

$$Q_{Ri}^{\min} \leq Q_{Ri} \leq Q_{Ri}^{\max} \quad (i \in S_R) \quad (8)$$

式中: Q_{Ri}^{\min} 、 Q_{Ri}^{\max} 为节点 i 上的无功源的无功出力 Q_{Ri} 的上下限; S_R 为无功源集合。

4) 电压约束

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (9)$$

式中, V_i^{\min} 、 V_i^{\max} 为节点 i 的电压 V_i 的上下限。

5) 负荷削减量约束

$$0 \leq P_{Ci} \leq P_{Li} \quad (10)$$

6) 节点负荷功率因数恒定约束

$$P_{Ci} Q_{Li} - Q_{Ci} P_{Li} = 0 \quad (11)$$

此约束表示各个节点负荷在削减前后功率因数应该保持恒定。

7) 负荷调节能力上下限约束

$$0 \leq \bar{P}'_{Lk} \leq \bar{P}'_{Lk} \quad (12)$$

式中, \bar{P}'_{Lk} 为节点 k 有功负载能力调节的上限, 该上限由该节点的主变容量等因素确定。

8) 线路限额

$$-S_l^{\max} \leq S_l \leq S_l^{\max} \quad (13)$$

式中: S_l 为支路 l 上的传输功率; S_l^{\max} 为支路 l 传输功率的限额。

2 蒙特卡洛模拟法在最大负载能力评估中的应用

上述评估模型是对一个指定的节点在某个系统状态下进行最大负载能力评估。然而, 指定节点的最大负载能力会随系统状态的变化而发生变化。所以, 为了综合评估在不同系统运行状态下指定节点的最大负载能力, 则首先需要获得一个包含不同运行状态的系统状态样本。蒙特卡洛法模拟法采用抽样的方法进行状态选择, 能充分考虑多类元素的不确定性因素, 包括发电机随机故障、输电线路随机故障、母线随机故障等。

在蒙特卡洛模拟法中, 首先要对系统内各个元素的状态抽样, 所获得的各个元素状态组合成一种系统状态。对每一系统状态 x , 都存在与其状态相对应的事件概率 $P(x)$, 假定 $C_{MLC}(x)$ 是状态 x 的最大负载能力函数, 最大负载能力函数的期望值 E_{MLC} 由式(14)表示。

$$E_{MLC} = \sum_{x \in X} C_{MLC}(x) P(x) \quad (14)$$

式中, X 为系统的状态空间。其中 $C_{MLC}(x)$ 的期望值可由式(15)估计。

$$\hat{E}_{MLC} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_{MLC}(x_i) \quad (15)$$

式中: \hat{E}_{MLC} 是 E_{MLC} 的估计值; x_i 是第 i 次系统状态取样值; N 是总的系统状态抽样次数; $C_{MLC}(x_i)$ 是 x_i 状态下指定节点的最大负载能力。

\hat{E}_{MLC} 的误差由其方差 $V(\hat{E}_{MLC})$ 决定:

$$V(\hat{E}_{MLC}) = V(C_{MLC}(x)) / N \quad (16)$$

式中, $V(C_{MLC}(x))$ 为最大负载能力函数 $C_{MLC}(x)$ 的方差, 其值由式(17)估计。

$$\hat{V}_{MLC} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (C_{MLC}(x_i) - \hat{E}_{MLC})^2 \quad (17)$$

方差系数 β 可表示为

$$\beta = \frac{V(\hat{E}_{MLC})}{\hat{E}_{MLC}^2} = \frac{\sqrt{V_{MLC}/N}}{\hat{E}_{MLC}} \quad (18)$$

β 可作为蒙特卡洛模拟法的收敛判据之一。总抽样次数 N 则可作为另一个辅助判据。

利用上述方法, 获得包含不同运行状态的系统状态样本, 同时对于每个系统状态, 都可以求出该系统状态下指定节点的最大负载能力。

3 算法流程

据前两节所述, 本文将最大负载能力评估模型和蒙特卡洛模拟法相结合, 得到了一种实用的节点最大负载能力评估算法。首先, 根据各类元件的故障率和修复率采用蒙特卡洛模拟法进行系统状态抽样, 获得系统状态样本。然后, 根据之前所述的系统安全约束条件对所抽取的各个系统状态进行分析与校正(负荷削减); 同时, 计算评估各个系统状态下指定节点的最大负载能力。最终, 统计形成指定节点的最大负载能力概率密度曲线。将最大负载能力相同或相近的系统状态进行合并, 进而可以将输电网等值成一个向配电网供电的两状态或多状态的电源。实现将输电网对配电网的影响转化成可靠性参数。并将之传递给配电网, 从而提高配电网可靠性评估的准确性。

综上所述, 为求解配电网多状态等值电源的计算流程, 如图1所示。可分为如下几个步骤:

- 1) 原始数据输入, 确立基本网架结构;
- 2) 指定待评估节点。待评估的节点即为需要进行可靠性评估的配网区域上游供电区域;
- 3) 采用蒙特卡洛模拟法进行系统状态抽样;
- 4) 对系统状态进行校验与调整, 并评估指定节点的最大负载能力;
- 5) 重复步骤3)、4)直至达到收敛条件或总抽样次数;
- 6) 根据求得的多组节点最大负载能力数据生成对应配网区域的多状态等值电源。为在配电网评估中考虑输电网影响提供数据基础。

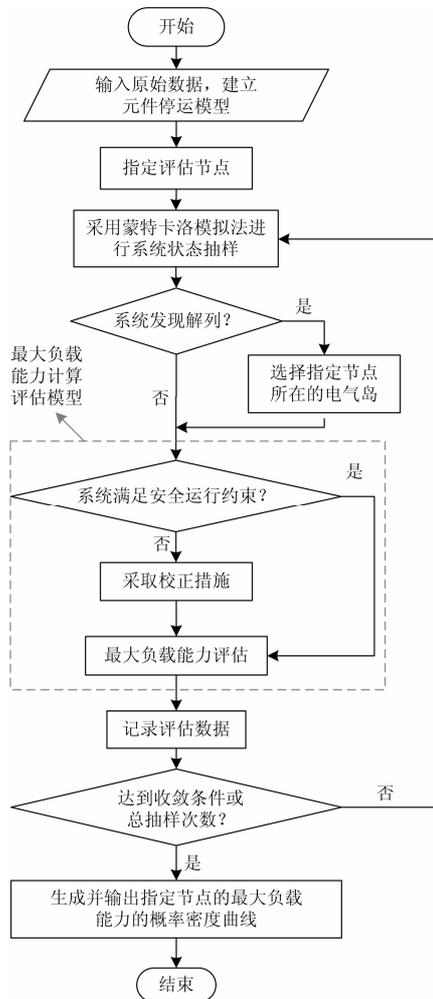


图 1 最大负载能力评估算法流程图

Fig. 1 Flow chart of maximum load capacity evaluation

该算法应用蒙特卡洛模拟法进行系统状态抽样，不仅可以有效地考虑输电网设备可靠性对节点最大负载能力的影响，还可以获得大量的输电网的可靠性统计信息；最大负载能力计算评估模型可以在保证系统安全稳定运行的前提下求解指定节点的最大负载能力，有较好的计算精度和求解速度。

4 算例分析

本文在 Visual Studio 2010 平台上采用 C 语言对本文提出的评估算法进行编程测试。以 RBTS 输电系统为例进行测试分析。该测试系统的一次接线图如图 2 所示。它是一个 6 节点系统，包含 11 台发电机、9 条输电线路。其中节点 1、2 为发电机节点，节点 2、3、4、5、6 带有负荷，系统电压为 230 kV，节点电压约束为 0.97~1.05 p.u.，总装机容量为 240 MW，系统峰荷为 185 MW。系统中各个设备的可靠性参数见文献[16-17]。

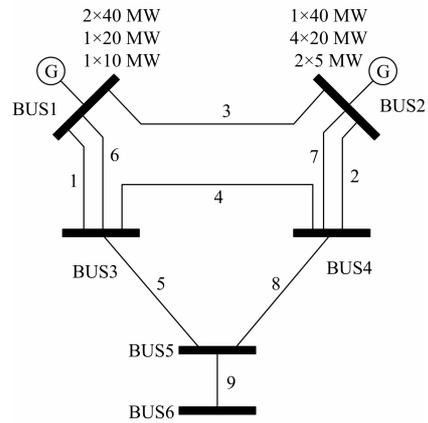


图 2 RBTS 输电系统

Fig. 2 Transmission system of RBTS

假设现需要对 BUS 6 下游配电区域进行可靠性评估，则首先需要采用本文提出的最大负载能力评估算法对 BUS 6 的负载能力进行评估。首先，采用蒙特卡洛模拟法进行系统状态的抽取。为形成系统随机状态 x_i ，在 $[0, 1]$ 区间上随机生成 N 个相互独立且均匀分布的随机数，之后对抽取后的系统结果进行统计，其中包括正常运行状态和故障状态。本文设置总抽样次数为 1 000 次，即 $N=1000$ 。在抽取系统状态之后，对指定的 BUS 6 进行评估，进而可以得出 BUS 6 在各种系统状态下的最大负载能力。

在所抽取的 1 000 个系统状态中有大量相同的系统状态。将这些相同的系统状态进行统计及合并，并将各个系统状态出现的频率看作出现概率，则可以得到如图 3 所示的 BUS 6 最大负载能力的概率密度曲线。因为系统状态与状态之间是不连续的，所以得到的最大负载能力的概率密度曲线是离散的。从图 3 中可以看出，BUS 6 有 84.9% 的概率向下游配电区域传输 124.55 MW 的有功功率，该最大负载能力所对应的系统状态即为系统的正常运行状态(基态)。

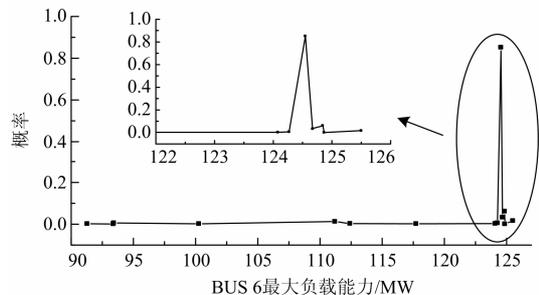


图 3 BUS 6 最大负载能力概率密度曲线

Fig. 3 Probability density curve of the maximum load capacity at BUS 6

即在图 3 中剔除系统正常运行状态则可获得故障运行状态下的结果, 如图 4。在系统发生故障的状态下, BUS 6 的最大负载能力在系统基态所对应的最大负载能力两侧都有分布。分布在左侧说明系统可能出现了以下故障: 1) BUS 6 与电源之间供电通路中的输电线路发生故障, 造成电源对 BUS 6 的供电能力减弱; 2) 发电机发生故障, 系统总出力降低。分布在系统基态所对应的最大负载能力的右侧可能的原因是: BUS 6 与电源之间供电通路外的线路或母线发生故障, 造成切负荷, 从而使电源有富余的功率向 BUS 6 传输。从图中 4 可以看出, 在系统故障运行状态下, BUS 6 有 3.7% 的概率向下游配电区域传输有功功率小于 124.55 MW, 有 11.3% 的概率传输大于 124.55 MW 的有功功率, 还有 0.1% 的概率 BUS 6 失电。

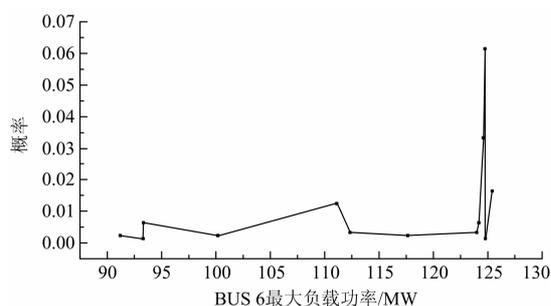


图 4 故障运行状态下 BUS 6 最大负载能力概率密度曲线
Fig. 4 Probability density curve of the maximum load capacity at BUS 6 on the fault operating state

为了便于对下游配电区域进行可靠性评估, 可以将多个系统状态进行合并, 等值成一个四状态的电源向配电区域供电。这四个状态分为系统正常运行状态、故障运行状态 I (该种运行状态下节点的最大负载能力低于基态时对应的最大负载能力)、故障运行状态 II (该种运行状态下节点的最大负载能力高于基态时对应的最大负载能力) 和故障停运状态。就 BUS 6 而言, 等值电源有 84.9% 概率工作在正常运行状态, 出力为 124.55 MW; 有 15% 的概率工作在故障运行状态, 其中有 3.7% 的概率工作在故障运行状态 I, 出力为 109.78 MW; 有 11.3% 的概率工作在故障运行状态 II, 出力为 124.89 MW; 另有 0.1% 的概率故障停运。传统电网一般都将输电网可靠性视为 100%, 而从本文算例结果可以看到, 有 15% 的概率输电网会出现不同程度的故障, 对配电网可靠性评估带来误差影响。本文方法有效考虑了输电网可靠性对配电网可靠性评估的影响, 使得评估结果更合理更准确。

5 结论

本文充分考虑了输电网可靠程度对配电网可靠性评估的影响, 并提出了相应的输电网等值方法。提出了输电网节点最大负载能力的概念, 并利用最优化技术构建了输电网节点最大负载能力评估模型, 再结合蒙特卡洛模拟法求解出最大负载能力的概率密度曲线, 最终将输电网等值成配电网的电源节点, 构建起了输电网与配电网之间的联系。RBTS 输电系统算例结果表明本文方法有效地量化了输电网对配电网可靠性评估的影响, 提高了配电网可靠性评估结果的准确性和实用性。

参考文献

- [1] 孙羽, 王秀丽, 王建学, 等. 电力系统短期可靠性评估综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(8): 143-154.
SUN Yu, WANG Xiuli, WANG Jianxue, et al. An overview of the short-term reliability evaluation of power system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(8): 143-154.
- [2] 熊小伏, 王建, 袁峻, 等. 时空环境相依的电网故障模型及在电网可靠性评估中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 28-35.
XIONG Xiaofu, WANG Jian, YUAN Jun, et al. Temporal and spatial environments dependent power grid failure method and its application in power grid reliability assessment[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 28-35.
- [3] 蔡德华, 陈柏熹, 程乐峰, 等. 实施需求侧管理对提高发电系统可靠性的影响探究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 51-56.
CAI Dehua, CHEN Baixi, CHENG Lefeng, et al. Effective study about the implementation of demand side management on improving reliability of generation system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 51-56.
- [4] 罗奕, 汪隆君, 王钢. 计及分布式电源出力相关性的微电网发电系统可靠性评估[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(12): 34-38.
LUO Yi, WANG Longjun, WANG Gang. Reliability assessment of microgrid generation system considering output correlation of distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(12): 34-38.
- [5] 王磊, 赵书强, 张明文. 考虑天气变化的输电系统可靠性评估[J]. 电网技术, 2011, 35(7): 66-70.
WANG Lei, ZHAO Shuqiang, ZHANG Mingwen. Reliability evaluation of transmission system considering weather change[J]. Power System Technology, 2011,

- 35(7): 66-70.
- [6] 谢绍宇, 王秀丽, 王锡凡, 等. 自适应重要抽样技术在发输电系统可靠性评估中的应用[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(5): 13-17.
XIE Shaoyu, WANG Xiuli, WANG Xifan, et al. Application of adaptive importance sampling technique in reliability evaluation of composite generation and transmission systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(5): 13-17.
- [7] 李海娟, 黄学良, 陈中, 等. 含电动汽车无线充电的配电网可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊 1): 244-250.
LI Haijuan, HUANG Xueliang, CHEN Zhong, et al. Reliability evaluation of distribution network with wireless charging of electric vehicle[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 244-250.
- [8] 许丹, 唐巍. 基于区域可达性分析的复杂配电网可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2011, 26(6): 172-178.
XU Dan, TANG Wei. Reliability evaluation of complex distribution networks based on regional accessibility analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(6): 172-178.
- [9] 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.
- [10] 赵洪山, 赵航宇. 考虑元件故障率变化的配电网可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 56-62.
ZHAO Hongshan, ZHAO Hangyu. Distribution system reliability analysis considering the elements failure rate changes[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 56-62.
- [11] 段东立, 武小悦, 邓宏钟. 基于时变故障率与服务恢复时间模型的配电系统可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(28): 57-64.
DUAN Dongli, WU Xiaoyue, DENG Hongzhong. Reliability evaluation of distribution systems based on time-varying failure rate and service restoration time model[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(28): 57-64.
- [12] 宋云亭, 张东霞, 吴俊玲, 等. 国内外城市配电网供电可靠性对比分析[J]. 电网技术, 2008, 32(23): 13-18.
SONG Yunting, ZHANG Dongxia, WU Junling, et al. Comparison and analysis on power supply reliability of urban power distribution network at home and abroad[J]. Power System Technology, 2008, 32(23): 13-18.
- [13] 田洪迅, 袁蓉, 赵渊. 含分布式电源的配网可靠性概率计算[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1562-1569.
TIAN Hongxun, YUAN Rong, ZHAO Yuan. Computation of probability distribution for reliability indices of distribution system containing distributed generation[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1562-1569.
- [14] 尤毅, 刘东, 于文鹏, 等. 主动配电网技术及其进展[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 10-16.
YOU Yi, LIU Dong, YU Wenpeng, et al. Technology and its trends of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 10-16.
- [15] 马振宇. 电网可靠性的蒙特卡洛仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(14): 55-58.
MA Zhenyu. Research of Monte Carlo simulation for power system reliability assessment[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(14): 55-58.
- [16] BILLINTON R, KUMAR S, CHOWDHURY N, et al. A reliability test system for educational purposed-basic results[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(1): 319-325.
- [17] BILLINTON R, KUMAR S, CHOWDHURY N, et al. A reliability test system for educational purposed-basic data[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1989, 4(3): 1238-1244.

收稿日期: 2015-11-16; 修回日期: 2016-06-14

作者简介:

秦砺寒(1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网规划、负荷预测、接入系统评审; E-mail: q88072529@163.com

陈丹(1981-), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为配电网规划; E-mail: chen.dan@jibei.sgcc.com.cn

李顺昕(1978-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网规划评审。E-mail: li.shunxin@jibei.sgcc.com

(编辑 魏小丽)