

计及配电自动化和转供电的配电网供电可靠性 灵敏度计算方法

叶琳浩^{1,✉}, 申展¹, 黄泽杰², 陈吕鹏²

(1. 中国南方电网有限责任公司, 广东 广州 510663; 2. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663)

摘要: [目的] 供电可靠性是衡量电力企业供电服务质量的重要考核指标之一。为了分析配电网不同供电可靠性提升措施的实施效果, 需要精确定位提升配电网供电可靠性的主要影响因素。[方法] 文章在传统的配电网可靠性估算方法的基础上, 充分考虑配电自动化及配电网转供电能力的影响, 提出了供电可靠性影响因素灵敏度计算方法。[结果] 构建典型农村配电网架和城市配电网架, 开展供电可靠性影响因素灵敏度计算和分析。[结论] 所提充分考虑了影响供电可靠性的主要因素及影响机理, 可为开展供电可靠性规划和配电网升级改造提供技术方向指引。

关键词: 配电网; 配电网规划; 可靠性评估; 灵敏度计算; 解析法

中图分类号: TM715; TM744

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)S1-0010-07

开放科学(资源服务)二维码:



Calculation Method of Power Supply Reliability and Sensitivity of Distribution Network Considering Distribution Automation and Power Transfer

YE Linhao^{1,✉}, SHEN Zhan¹, HUANG Zejie², CHEN Lüpeng²

(1. China Southern Power Grid Company Limited, Guangzhou 510663, Guangdong, China;

2. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China)

Abstract: [Introduction] Power supply reliability is one of the important evaluation index of power supply company. The paper aims to analyze the implementation effect of different power supply reliability improvement measures in distribution network, so it is necessary to accurately locate the main influencing factors of improving the power supply reliability of distribution network. [Method] Based on the traditional reliability estimation method of distribution network, the paper fully considered the influence of distribution automation and power transfer capability of distribution network, and proposed a sensitivity calculation method of power supply reliability influencing factors. [Result] The paper built typical rural and urban distribution grids, and carried out sensitivity calculation and analysis of factors affecting power supply reliability. [Conclusion] The paper fully considered the main factors affecting power supply reliability and the influence mechanism, which can provide technical direction guidance for power supply reliability planning and distribution network upgrading.

Key words: distribution network; distribution network planning; reliability assessment; sensitivity calculation; analytical method

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

供电可靠性是指供电系统持续供电的能力, 是考核供电系统电能质量的重要指标, 反映了电力工业对国民经济电能需求的满足程度, 已经成为衡量一个国家经济发达程度的标准之一。供电可靠性水

平直接影响到电力用户的用电体验, 电力公司规划建设重点努力提升的指标^[1-4]。

目前城市配电网和农村配电网仍然存在发展不平衡、发展需求不一致的问题。城市配电网的网架相对完善, 多以电缆线路的单环网/双环网接线为主, 可靠性水平较高。但随着社会经济的发展以及电力

公司对高可靠示范区打造的需求, 城市配电网的可靠性提升仍然面临投入较大, 可靠性提升效果不明显等诸多问题^[5]。农村配电网的网架相对较为薄弱, 且自动化水平不高, 在有限的投资下, 可靠性提升面临的主要问题在于提升方向和措施的精准性有待加强。可见, 无论是城市配电网还是农村配电网, 均亟需对供电可靠性提升的主要影响因素及其灵敏度进行分析。

供电可靠性提升主要影响因素及其灵敏度分析依赖理论供电可靠性评估方法。目前理论供电可靠性评估方法已有较多的研究^[6-9]。其中最为经典的评估方法是行标 DL/T 1563 中压配电网可靠性评估导则算例中给出的故障后果分析法和最小路法^[9]。故障分析法以枚举元件故障, 分析故障后果, 累计故障后果的方式开展可靠性评估, 是许多可靠性评估方法采用的基本思想。然而其计算较为复杂且未考虑配电自动化和线路实际可转供电能力的影响。

国内外针对供电可靠性评估还提出了蒙特卡洛模拟法^[10]、最小割集法^[11]、前推法^[12]和分块法^[13]等诸多方法。现有方法针对复杂配电网拓扑结构搜索、拓扑简化等进行了深入改进。然而针对城市配电网和农村配电网常用网架形式及配电自动化和转供电能力等重点规划建设方向缺乏针对性的考虑和分析。

为此, 本文以分析配电网不同供电可靠性提升措施的实施效果, 精确定位提升配电网供电可靠性的主要影响因素为目标。本文在传统的配电网可靠性估算方法的基础上, 充分考虑配电自动化及配电网转供电能力的影响, 提出了供电可靠性影响因素灵敏度计算方法。构建典型农村配电网架和城市配电网架, 开展供电可靠性影响因素灵敏度计算和分析。

1 计及配电自动化及转供电能力的可靠性评估

1.1 故障后果分析法的基本思路

故障模式后果分析法是中压配电网可靠性评估的基本方法, 适用于开环运行和闭环运行的配电网。故障模式后果分析法通过分析所有可能的故障事件及其对系统造成的后果, 建立故障模式后果分析表, 通过该表计算负荷点和系统可靠性指标。其具体步骤如下:

1) 枚举单个元件故障, 计入元件故障后断路器

跳闸、故障隔离、恢复供电过程, 确定故障对各负荷点的停电影响, 进一步确定各负荷点的故障停电率和故障停电时间。

2) 将所有元件单独故障后各负荷点的故障停电率和故障停电时间列表, 形成故障模式后果分析表。记故障后会造负荷点 LP 停电的元件集为 N , 元件集中第 i 个元件的故障停运率和故障修复时间分别为 λ_i 、 r_i 。该负荷点的故障停电率和故障停电时间期望值分别为 λ_{LP-F} 、 u_{LP-F} 。则有:

$$\lambda_{LP-F} = \sum_{i \in N} \lambda_i \quad (1)$$

$$u_{LP-F} = \sum_{i \in N} (\lambda_i \times r_i) \quad (2)$$

3) 根据负荷点故障停电率期望值和故障停电时间期望值计算该负荷点的其他可靠性指标。

4) 依次计算每个负荷点的可靠性指标, 并在此基础上计算系统可靠性指标。

1.2 考虑配电自动化和转供电的分区方法

故障后果分析法的核心分析思路在于按照故障概率加权故障后果, 其中故障后果的计算是重点。在中压配电网中, 影响不同用户故障后果的主要因素在于故障发生后, 故障定位、故障隔离、转供电和故障修复时间的差异。为了梳理配电网不同故障位置产生的故障后果, 考虑配电自动化及转供电能力对中压馈线进行分区。

1.2.1 以开关设备为界的一级分区

在配电网中, 起到隔离和分段作用的元件为各类开关设备, 包括断路器、负荷开关、联络开关等。为此, 以断路器、负荷开关、联络开关等作为分界点对中压馈线进行初步分区。如图 1 所示的中压馈线经过初步分区, 可以划分为 8 个一级分区。

1.2.2 考虑配电自动化和转供电的二级分区

考虑配电自动化和转供电能力后, 可以将图 1 中所述的一级分区分为多个类型。根据自动化开关位置信息, 可以将一级分区分为自动隔离区、人工隔离区和无法隔离区; 按照转供电能力可以划分为可转供电区和不可转供电区。合并两个维度最终可以划分出自动复电区、人工复电区、无法复电区三个类型的分区, 如表 1 所示。

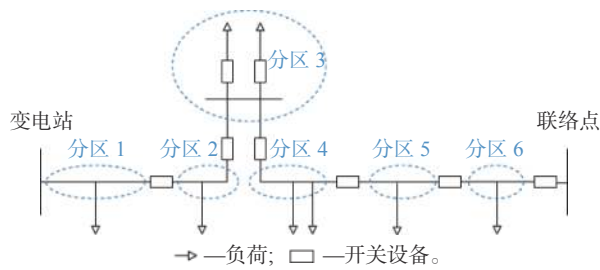


图 1 以开关设备为界的一级分区

Fig. 1 First-level zone bounded by switchgear

表 1 一级分区的类型划分

Tab. 1 Type division of first-level zone

自动化类型	转供电类型	
	可转供电区	不可转供电区
自动隔离区	自动复电区	无法复电区
人工隔离区	人工复电区	无法复电区
无法隔离区	无法复电区	无法复电区

在图 1 的基础上,加入中压馈线的自动化开关位置信息和转供电信息,如图 2 所示。按照故障后果分析法的思路,枚举分区 1~分区 8 的故障。以分区 2 的故障为例,根据故障位置,结合自动化布点信息和转供电信息可以将分区 1~8 进一步合并为自动复电区、人工复电区和无法复电区三个类型,如图 2 所示。

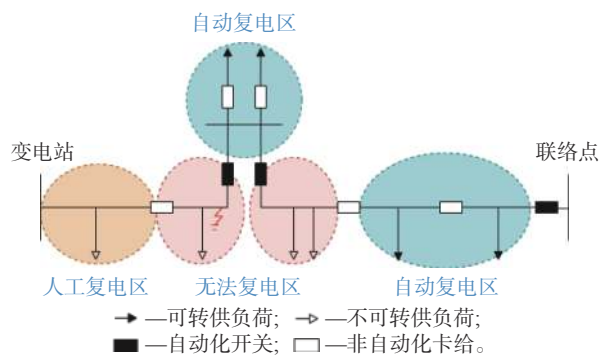


图 2 考虑复电时间的二级分区

Fig. 2 Second-level zone considering recovery time

如图 2 所示,其中与故障点在同一分区内的用户及下游无法转供电的用户归入无法复电区;在故障点所在分区自动化开关边界以外的可转供电用户,归入自动复电区;在故障点所在分区自动化开关边界以内的可转供电用户,归入人工复电区。

各类型二级分区用户的数量和感受到的停电时间如表 2 所示。

表 2 二级分区的停电时间

Tab. 2 Power outage time of second-level zone

二级分区	感受停电时间
自动复电区	自动复电时间 t_1
人工复电区	人工复电时间 t_2
无法复电区	故障修复时间 t_3

表 2 中自动复电时间 t_1 为通过配电自动化开关自动隔离切换的时间;人工复电时间 t_2 为通过人工进行隔离和切换的时间;故障修复时间 t_3 为从故障发生到故障修复完成所需的时间。通常,自动复电时间 t_1 远小于人工复电时间 t_2 ,人工复电时间 t_2 显著小于故障修复时间 t_3 。

1.2.3 计算户均停电时间

定义第 j 个分区的用户数为 N_j ,故障概率为 λ_j ,则第 i 个分区故障时,第 j 个分区感受到的停电时间为 t_{ij} ,则该中压馈线的户均停电时间为:

$$t_{SAIDI} = \sum_i \lambda_j N_j t_{ij} \quad (3)$$

2 供电可靠性影响因素分析

2.1 配电自动化类

影响配电网供电可靠性的配电网自动化类影响因素主要包括:配电自动化节点的覆盖率、自动复电时间、配电自动化开关类型等。

配电自动化节点覆盖率决定了图 2 中自动隔离区的大小,配电自动化节点覆盖率越高,则配电自动化开关两两间的用户数越少,故障隔离精细,用户感受到的平均故障隔离时间越短。因此,配电自动化节点覆盖率与供电可靠性之间应呈现正相关性。

自动复电时间是二级分区中自动复电区用户感受到的停电时间。自动复电时间越短,则二级分区中自动复电区的用户对整个中压馈线的总停电时户数贡献值越低,且进一步增强了配电自动化节点覆盖率对供电可靠性的贡献。因此自动复电时间与供电可靠性之间呈现负相关关系。

配电自动化开关类型主要分为断路器和负荷开关类型,二者的主要区别在于:断路器可以就地隔离故障,而负荷开关需要等待变电站出线开关跳开后

再隔离故障。配电自动化开关类型主要影响故障点上游用户感受到的自动复电时间差别,若配电自动化开关类型为断路器,则上游用户无需感受停电时间,否则需要感受一个极小的自动复电时间。

2.2 网架结构类

影响配电网供电可靠性的网架结构类影响因素主要包括:可转供电用户比例、主干线分段数、用户分布模式等。

可转供电用户比例是影响配电网供电可靠性的关键因素。可转供电用户比例主要受到联络点转供电能力的影响。可转供电用户比例越高,则人工复电区和自动复电区的用户数比例越高,整体感受到的停电时间越小,可靠性越高。因此,可转供电用户比例与供电可靠性之间呈现正相关关系。

主干线分段数主要影响一级分区的用户数量。主干线分段数越大,则每个分段的用户数越少,此时故障时最小隔离区间的用户最少,可靠性越高,但当主干线分段数过大时,开关数量增多可能导致整体的故障率增大,反而使供电可靠性降低。

用户分布模式主要分为均匀分布、前重后轻、前轻后重几种模式。由于故障发生时,故障所在一级分区上游分区可自动/人工复电,而下游分区的复电主要受到可转供电能力的影响。因此,前重后轻的分布模式通常优于均匀分布模式,优于前轻后重的分布模式。

2.3 设备水平类

影响配电网供电可靠性的配电网设备水平类影响因素主要包括:线路绝缘化率、线路电缆化率。

根据运行经验,电缆线路故障率远小于架空绝缘线的故障率;架空绝缘线故障率显著小于架空裸导线故障率。因此线路绝缘化率和线路电缆化率均与供电可靠性之间呈现正相关关系。

3 供电可靠性影响因素灵敏度计算

3.1 灵敏度计算

以供电可靠性影响因素为基础,将指标体系中某单一变量增加一个单位增量,并基于供电可靠性评估方法,计算供电可靠性的提升效果,可以获得供电可靠性影响因素的灵敏度,如下式所示:

$$m_i = \frac{F_R(\lambda_1, \dots, \lambda_i + \Delta\lambda_i, \dots, \lambda_n) - F_R(\lambda_1, \dots, \lambda_i, \dots, \lambda_n)}{\Delta\lambda_i} \quad (4)$$

式中:

m_i —— 指标 λ_i 的灵敏度;

F_R —— 供电可靠性评估方法;

$\Delta\lambda_i$ —— 指标 λ_i 的单位增量。

以计算设备停运率对可靠性指标影响的灵敏度为例,可先计算在某一设备停运率水平下的可靠性指标,再给设备停运率 1 个单位的增量,再计算可靠性指标,用新的可靠性指标值减去原来的指标值,即可得到可靠性指标对设备停运率的灵敏度。

3.2 线路模型及参数

建立典型农村配电网和城市配电网中压馈线模型,分析供电可靠性影响因素的灵敏度。所建立的农村中压馈线和城市中压馈线的主要参数如表 3 所示。

表 3 线路模型的主要参数

Tab. 3 Main parameters of circuit model

馈线类型参数取值	农村中压馈线	城市中压馈线
线路总长/km	20	5
线路总用户数(中压)/户	50	50
用户数分布模式	均匀分布	均匀分布
可转供电用户比例/%	0	75
分段数/段	2	4
绝缘化率/%	50	100
电缆化率/%	0	80
自动化开关覆盖率/%	0	50

3.3 农村中压馈线灵敏度分析

根据建立的农村中压馈线模型,采用 3.1 所述的灵敏度计算过程,改变配电自动化节点数量、自动复电时间、自动化开关类型、可转供电用户比例、分段数、用户分布模式、绝缘化率和电缆化率等指标的取值,计算中压馈线的 t_{SAIDI} 值,从而计算出各类指标与 t_{SAIDI} 的相关关系及灵敏度如表 4 所示。

由上表可知,配电自动化指标中,配电自动化节点比例与 t_{SAIDI} 值呈负相关关系;自动复电时间与 t_{SAIDI} 值呈正相关关系;配电自动化节点比例的灵敏度显著于自动化节点比例;自动化开关类型中,以断路器为开关类型时, t_{SAIDI} 值更小。提升配电自动化节点比例对可靠性的提升效果显著于减少复电时间,因此农村配电网应更多侧重于提高实用化的配电网自

表 4 农村中压馈线灵敏度计算结果

Tab. 4 Calculation results of sensitivity of rural MV feeder

分类	影响因素取值	SAIDI	灵敏度
—	基础模型	5.21	—
配电自动化节点比例	0%	4.29	-1.87
	50%	3.04	
	100%	2.42	
	—	—	
自动复电时间	50%	2.35	0.13
	75%	2.38	
	100%	2.42	
	125%	2.45	
	150%	2.48	
	—	—	
自动化开关类型	负荷开关	2.42	—
	断路器	2.38	
可转供电用户比例	0%	2.42	-1.23
	33%	2.42	
	66%	1.67	
	100%	1.30	
	—	—	
分段数	1	6.15	-0.24
	2	5.41	
	3	5.21	
	4	5.13	
	5	5.11	
用户分布模式	前重后轻	4.49	—
	均匀分布	5.21	
	前轻后重	5.93	
绝缘化率	0%	6.46	-2.51
	25%	5.84	
	50%	5.21	
	75%	4.58	
	100%	3.95	
电缆化率	0%	5.21	-1.75
	10%	4.64	
	20%	4.56	
	30%	4.49	
	40%	4.41	

动化节点建设,而不是追求更为先进的配电自动化技术路线。

网架结构指标中,可转供电用户比例和分段数均与 t_{SAIDI} 值呈现负相关关系,其中可转供电用户比例的灵敏度较为显著;用户分布模式中,前重后轻的分布模式 t_{SAIDI} 值最小。农村电网网架改造的重点在于提升可转供电用户比例,同时尽可能优化电源布点,降低末端用户占比较大的问题。

设备水平类指标中,绝缘化率和电缆化率与 t_{SAIDI} 值呈负相关关系,绝缘化率的灵敏度较为显著,即通过改造裸导线对提升农村配电网的可靠性更为显著。

3.4 城市中压馈线灵敏度分析

根据建立的城市中压馈线模型,采用 3.1 所述的灵敏度计算过程,改变配电自动化节点数量、自动复电时间、自动化开关类型、可转供电用户比例、分段数、用户分布模式、绝缘化率和电缆化率等指标的取值,计算中压馈线的 t_{SAIDI} 值,从而计算出各类指标与 t_{SAIDI} 的相关关系及灵敏度如表 5 所示。

由表 5 可知,城市配电网各类指标的灵敏度显著小于农村配电各类指标的灵敏度,可见关键指标的的提升对农村配电网可靠性提升效果更为显著。对于提升城市整体的供电可靠性,应首先着力于停电时间基数较大,可靠性较为薄弱的农村地区。

配电自动化指标中,配电自动化节点比例与 t_{SAIDI} 值呈负相关关系;自动复电时间与 t_{SAIDI} 值呈正相关关系;配电自动化节点比例的灵敏度显著于自动化节点比例;自动化开关类型中,以断路器为开关类型时, t_{SAIDI} 值更小。城市配电网的可靠性应更多着力提高实用化的配电自动化节点建设,对于配电自动化节点覆盖较为完善的线路,应尝试采用智能分布式等更为先进的配电自动化技术路线,突破可靠性提升瓶颈。

网架结构指标中,可转供电用户比例和分段数均与 t_{SAIDI} 值呈现负相关关系,其中可转供电用户比例的灵敏度较为显著;用户分布模式中,前重后轻的分布模式 t_{SAIDI} 值最小。城市配电网网架改造的重点在于进一步提升可转供电用户比例。

设备水平类指标中,绝缘化率和电缆化率与 t_{SAIDI} 值呈负相关关系,绝缘化率的灵敏度较为显著。城市配电网绝缘化率本身较高,因从电缆化率入手,通过架空线下地的方式提高用户数较多,故障频发线路的可靠性。

表 5 城市中压馈线灵敏度计算结果

Tab. 5 Calculation results of sensitivity of urban MV feeder

分类	影响因素取值	SAIDI	灵敏度
—	基础模型	0.29	—
	25%	0.26	
	50%	0.21	-0.07
配电自动化节点比例	75%	0.18	
	50%	0.18	
	75%	0.18	
自动复电时间	100%	0.18	0.01
	125%	0.18	
	150%	0.19	
	—	—	—
自动化开关类型	负荷开关	0.19	
	断路器	0.18	
可转供电用户比例	25%	0.26	
	50%	0.21	-0.09
	75%	0.18	
	100%	0.17	
分段数	1段	0.30	
	2段	0.29	
	3段	0.31	0.02
	4段	0.34	
	5段	0.37	
用户分布模式	前重后轻	0.22	
	均匀分布	0.29	—
	前轻后重	0.38	
绝缘化率	0%	0.98	
	25%	0.92	
	50%	0.82	-0.62
	75%	0.75	
	100%	0.29	
电缆化率	0%	0.67	
	10%	0.61	
	20%	0.60	-0.28
	30%	0.57	
	40%	0.55	

4 结论

本文在传统的配电网可靠性估算方法的基础上, 充分考虑配电自动化及配电网转供电能力的影响, 提出了供电可靠性评估方法及影响因素灵敏度计算方法。构建典型农村配电网架和城市配电网架, 开

展供电可靠性影响因素灵敏度计算和分析, 结果表明: 农村配电网可靠性的提升在于加强实用化的配电自动化节点建设、提升线路环网率和可转供电用户比例、加强裸导线改造; 城市配电网在提高配电自动化节点覆盖率的基础上, 应着眼于更为先进的配电自动化基数路线, 同时提高可转供电用户比例, 并争取架空线下地。

参考文献:

- [1] 王正国. 配电网可靠性评估与优化 [D]. 杭州: 浙江大学, 2009. WANG Z G. Reliability evaluation and optimization of distribution network [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009.
- [2] 杨潇. 配电网设备的供电可靠性研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2018. YANG X. The power supply reliability of distribution network equipment research [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018.
- [3] 马乐. 配电网供电可靠性分析及提高措施研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2016. DOI: 10.7666/d.D01071191. MA L. Analyses of power supply reliability and study of improve measures in distribution network [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016. DOI: 10.7666/d.D01071191.
- [4] 丁吉. 配电网规划的综合效益评估方法研究 [D]. 成都: 西华大学, 2018. DING J. Research on comprehensive-benefit evaluation method of distribution network planning [D]. Chengdu: Xihua University, 2018.
- [5] 李健, 马彬, 张植华, 等. 基于网格的城市配电网优化规划方法研究 [J]. 南方能源建设, 2015, 2(3): 38-42. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.03.007. LI J, MA B, ZHANG Z H, et al. Research on a grid-based optimal planning method for urban distribution system [J]. Southern energy construction, 2015, 2(3): 38-42. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.03.007.
- [6] 李志铿, 杨海森, 陈超. 计及转供电概率的配电网可靠性评估 [J]. 南方能源建设, 2014, 1(1): 30-33. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2014.01.005. LI Z K, YANG H S, CHEN C. Reliability evaluation for distribution system considering supply probability [J]. Energy construction, 2014, 1(1): 30-33. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2014.01.005.
- [7] 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): 35-39. DOI: 10.3321/j.issn:0258-8013.2004.05.007. XIE Y H, WANG C S. Reliability evaluation of medium voltage distribution system based on feeder partition method [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 35-39. DOI: 10.3321/j.issn:0258-8013.2004.05.007.
- [8] 张鹏, 王守相. 大规模配电系统可靠性评估的区间算法 [J]. 中

- 国电机工程学报, 2004, 24(3): 77-84. DOI: 10.3321/j.issn:0258-8013.2004.03.015.
- ZHANG P, WANG S X. A novel interval method for reliability evaluation of large scale distribution system [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(3): 77-84. DOI: 10.3321/j.issn:0258-8013.2004.03.015.
- [9] 国家能源局. 中压配电网可靠性评估导则: DL/T 1563—2016 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- National Energy Administration. Reliability evaluation guidelines for distribution system of medium voltage: DL/T 1563—2016 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2016.
- [10] 梁惠施, 程林, 刘思革. 基于蒙特卡罗模拟的含微网配电网可靠性评估 [J]. *电网技术*, 2011, 35(10): 76-81. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2011.10.032.
- LIANG H S, CHENG L, LIU S G. Monte carlo simulation based reliability evaluation of distribution system containing microgrids [J]. *Power system technology*, 2011, 35(10): 76-81. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2011.10.032.
- [11] 王秀丽, 罗沙, 谢绍宇, 等. 基于最小割集的含环网配电系统可靠性评估 [J]. *电力系统保护与控制*, 2011, 39(9): 52-58. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3415.2011.09.010.
- WANG X L, LUO S, XIE S Y, et al. Reliability evaluation of distribution systems with meshed network based on the minimum-cut set [J]. *Power system protection and control*, 2011, 39(9): 52-58. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3415.2011.09.010.
- [12] 管贵龙, 赵华, 吴延琳, 等. 考虑容量及电压约束的配电网可靠性评估前推故障扩散法 [J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(7): 61-67. DOI: 10.7500/AEPS20160614009.
- ZAN G L, ZHAO H, WU Y L, et al. Forward failure diffusion algorithm for reliability evaluation of distribution networks considering capacity and voltage constraints [J]. *Automation of electric power systems*, 2017, 41(7): 61-67. DOI: 10.7500/AEPS20160614009.
- [13] 刘柏私, 谢开贵, 马春雷, 等. 复杂中压配电网的可靠性评估分块算法 [J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(4): 40-45. DOI: 10.3321/j.issn:0258-8013.2005.04.008.
- LIU B S, XIE K G, MA C L, et al. Section algorithm of reliability evaluation for complex medium voltage electrical distribution networks [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(4): 40-45. DOI: 10.3321/j.issn:0258-8013.2005.04.008.

作者简介:



叶琳浩

叶琳浩 (第一作者, 通信作者)

1983-, 男, 高级工程师, 主要从事电网规划、电网运行与分析工作(e-mail)yelh@csg.cn。

申展

1987-, 男, 北京理工大学教授, 高级工程师, 主要从事电网规划、电网运行与分析工作(e-mail)shenzhan@csg.cn。

黄泽杰

1994-, 男, 工程师, 主要从事交直流配电网研究工作(e-mail)rayhuangzj@126.com。

陈吕鹏

1995-, 男, 工程师, 主要从事配电网研究工作(e-mail)chenlvpeng@gedi.com.cn。

(编辑 赵琪)