

计及配电网自动化分区的城市配电网供电可靠性评估方法

舒舟[✉], 杨文锋, 廖威

(深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: [目的]在配电网自动化水平日益提升的现状下,为了解决传统配电网供电可靠性评估方法未考虑配电网自动化影响的问题,文章提出了一种计及配电网自动化分区的城市配电网供电可靠性快速评估的方法。[方法]文章基于通路特征的节点划分法,通过划定配电网自动化分区,定义大分段和小分段,提出适用于计及配电网自动化分区的供电可靠性提升效果评估方法。[结果]所提方法与中压配电网可靠性评估行业标准相比,充分考虑了配电网自动化对降低故障定位、隔离和倒闸操作时间的影响,评估结果降低了22%左右。[结论]所提方法能更为精确地分析配电网自动化水平较高的配电网供电可靠性,适用于停电时间基数较小的城市配电网区域。

关键词: 城市配电网; 配电网规划; 可靠性评估; 配电网自动化; 解析法

中图分类号: TM7; TM732

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)06-0098-07

开放科学(资源服务)二维码:



Reliability Evaluation Method of Urban Distribution Network Power Supply Considering Automatic Partitioning of Distribution Network

SHU Zhou[✉], YANG Wenfeng, LIAO Wei

(Shenzhen Power Supply Co., Ltd., Shenzhen 518000, Guangdong, China)

Abstract: [Introduction] Under the current situation of increasing automation level of distribution network, in order to solve the problem that the influence of distribution automation is not considered in traditional distribution network power supply reliability assessment methods, in this paper, a method for rapid assessment of power supply reliability of urban distribution network is proposed, which takes into account the automatic partitioning of distribution network. [Method] In this paper, based on the node division method of path characteristics, by demarcating automatic partitioning of distribution network, defining large and small segments, a method for evaluating the effect of power supply reliability improvement that was suitable for automatic partitioning of distribution network was proposed. [Result] Compared with the industry standard for reliability evaluation of medium-voltage distribution network, the proposed method fully considers the influence of distribution automation on reducing fault location, isolation and switching operation time, and the evaluation result is reduced by about 22%. [Conclusion] The proposed method can more accurately analyze the power supply reliability of the distribution network with a higher level of distribution automation, and is suitable for urban distribution network areas with a small power outage time base.

Key words: urban distribution network; distribution network planning; reliability assessment; distribution automation; 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

电力系统供电可靠性是评判电力系统持续电能供应能力的重要指标^[1-3]。其中配电网的供电可靠性

更是直接关系到电力用户用电质量,评判电力企业供电服务能力的重要标准。为提高配电网的供电可靠性,针对配电网的开展供电可靠性评估是了解配电网可靠性水平,分析配电网可靠性薄弱环节^[4-6],指

收稿日期: 2022-09-02 修回日期: 2022-10-24

基金项目: 深圳供电局科技项目“城市新型配电系统低压台区低成本柔性互联关键技术研究、设备研发及示范应用”(SZKJXM20230053)

导配电网改造的重要手段^[7]。

常规配电网供电可靠性评估通常基于配电网的详细拓扑结构,采用故障模式后果分析和最小路法^[8],其计算复杂且未考虑配电自动化对供电可靠性的影响。国内外研究针对配电网供电性评估,还提出了蒙特卡洛模拟法^[9]、馈线分区法^[10]、回溯法^[11]以及网络等效法^[12-13]和分块法^[14-15]等,但仍未考虑配电自动化对供电可靠性的影响。

随着配电自动化技术的逐渐成熟和广泛应用,配电自动化对提升配电网供电可靠性的贡献越来越突出^[16-17]。部分发达地区配电网的故障停电时间基数已达到世界领先水平,且配电自动化水平较高,忽略配电网自动化的供电可靠性评估方法将导致评估结果出现较大的相对误差。

为此,本文章针对现有的配电网供电可靠性评估方法的问题,通过配电网自动化布点位置进行分区划分,提出了一种计及配电网自动化分区的城市配电网供电可靠性评估方法,所提方法能更为精确地分析配电自动化水平较高的配电网供电可靠性,适用于停电时间基数较小的城市配电网区域。

1 可靠性评估基本假设和定义

1.1 基本假设

为了简化评估,先对城市配电网的供电可靠性评估提出如下的基本假设条件:

1)以分段开关作为边界,将线路划分为多个线路分段,每个线路分段整体考虑,忽略分段内部的差异,以主要的线路类型、线路参数作为分段的整体参数。

2)配电变压器:假设配电变压器高压侧装设熔断器,配变故障仅影响配变所带负荷,不影响所在支线及主干线路其他负荷。

3)分支线路:如果分支线路配备支线开关,分支线路上的故障不影响主干线路其他负荷,如分支线路未配置支线开关,将分支线路归入主干线路考虑。

1.2 故障抢修过程和时间定义

在配电网抢修过程中,从故障发生到故障修复的全过程可以划分:故障发生、故障定位、故障隔离、倒闸操作、故障修复、全线复电几个较为关键的时间节点。其中故障发生是指实际设备发生故障的瞬间;故障定位是指故障发生后,通过人工手段或配

电自动化手段获知故障具体位置并定位到具体元件的时刻;故障隔离是指故障元件定位成功后,将故障元件从线路上退运下来,实现故障元件与非故障元件隔离的时刻;倒闸操作是指故障元件隔离成功后,通过人工或配电自动化的倒闸操作将可转供电用户恢复供电的时刻;故障修复是指通过更换或修复的手段将故障元件恢复到正常状态的时刻;全线复电时间是指故障修复完成后,恢复全线所有用户供电的时刻。

为了简化起见,将故障定位、故障隔离、倒闸操作几个受配电网自动化影响较大时刻组合起来,定义为故障定位、隔离和倒闸操作时间,记为 t_{df} 。将故障修复和复电时间组合起来,定义为故障修复复电时间,记为 t_r 。故障定位、隔离和倒闸操作时间 t_{df} 可具体划分为人工定位、隔离和倒闸操作时间 t_{dfm} 和自动化定位、隔离和倒闸操作时间 t_{dfa} 。通常,自动化定位、隔离和倒闸操作时间 t_{dfa} 的时间为秒级或分钟级,远小于人工定位、隔离和倒闸操作时间 t_{dfm} ,通过这种分类方式,可以有效体现配电自动化对提升供电可靠性的影响。

1.3 配电自动化分区划分

定义大分段为变电站出线开关、自动化分断开关、自动化联络开关分割而成的分段,大分段内的区域为自动隔离区;定义小分段为在每个大分段内,通过无自动化开关所分割的线路段,小分段内部区域称为手动隔离区。

以故障段为原点,可以将故障段上游和下游划分为:故障所在大分段上游、故障所在大分段下游、故障所在大分段内部的上游小分段、故障所在大分段内部的下游小分段、故障所在小分段几个部分,如图1所示。

2 故障停电时间的分类计算

2.1 主干线路故障

2.1.1 电缆系统

对于电缆系统,图1中所属拓扑划分中,用户分布在分段点B1~B6处,电缆线路通过进出线开关与用户进行隔离。

2.1.1.1 电缆线路故障

由于电缆线路两侧通过开关柜连接,因此电缆线路本体故障可通过开关柜进出线开关与负荷进行

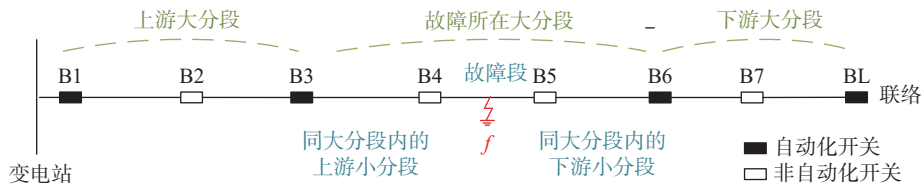


图 1 线路分段分区划分示意图

Fig. 1 Schematic diagram of line segment division

隔离,为此电缆线路故障不会导致用户无法隔离。根据电缆故障所在自动化分区的情况,可以将电缆故障划分为电缆所在大分段内/外两部分进行分析。具体如下:

1)故障所在大分段以外区域

故障所在大分段以外的其他大分段用户与故障点不属于同一个自动化分区,因此可根据用户实际情况,利用自动化开关进行恢复供电,具体如表 1 所示。

表 1 电缆故障所在大分段以外区域用户停电时间

Tab. 1 Power outage time for users in areas other than the large segment where the cable fault is located

所在分段	用户类型	用户感受停电时间
故障上游大分段	—	t_{dfa}
故障下游大分段	可转供用户	t_{dfa}
	不可转供用户	$t_{dfm}+t_{dr}$

2)故障所在大分段以内区域

故障所在大分段以内的其他大分段用户与故障点同属一个自动化分区,因此其可转供电用户无法通过自动化进行故障隔离和复电,需要感受人工定位、隔离和倒闸操作时间,具体如表 2 所示。

表 2 电缆故障所在大分段以内区域用户停电时间

Tab. 2 Power outage time for users in areas within the large segment where the cable fault is located

所在分段	用户类型	用户感受停电时间
故障所在大分段上游	—	t_{dfm}
故障所在大分段下游	可转供用户	t_{dfm}
	不可转供用户	$t_{dfm}+t_{dr}$

2.1.1.2 分段开关故障

对于电缆系统,用户通过环网柜出线,因此分段开关故障将导致分段开关处的用户无法转供电。对于故障所在大分段以外的区域,其用户感受到的停电时间与电缆本体故障类似,具体如表 3 所示。

表 3 分段开关故障的用户停电时间

Tab. 3 User outage time for segment switch failure

所在分段	用户类型	用户感受停电时间
故障上游大分段	—	t_{dfa}
故障下游大分段	可转供用户	t_{dfa}
	不可转供用户	$t_{dfm}+t_{dr}$
故障所在大分段内上游	—	t_{dfm}
故障所在大分段内下游	可转供用户	t_{dfm}
	不可转供用户	$t_{dfm}+t_f$
故障所在分段点	—	$t_{dfm}+t_f$

2.1.2 架空线系统

由于架空线系统中用户通常 T 接在线路上,对于电缆系统,图 1 中所属拓扑划分中,用户分布在分段点 B1~B6 之间的分段线路处。

2.1.2.1 架空线故障

1)故障所在大分段以外区域

故障所在大分段以外的其他大分段用户与故障点不属于同一个自动化分区,因此可根据用户实际情况,利用自动化开关进行恢复供电,具体如表 4 所示。

表 4 架空线故障所在大分段以外区域用户停电时间

Tab. 4 Power outage time for users in areas other than the large segment where the over-head line fault is located

所在分段	用户类型	用户感受停电时间
故障上游大分段	—	t_{dfa}
故障下游大分段	可转供用户	t_{dfa}
	不可转供用户	$t_{dfm}+t_{dr}$

2)故障所在大分段以内区域

故障所在大分段以内的其他大分段用户与故障点同属一个自动化分区,因此其可转供电用户无法通过自动化进行故障隔离和复电,需要感受人工定位、隔离和倒闸操作时间,具体如表 5 所示。

表5 架空线故障所在大分段以内区域用户停电时间
Tab. 5 Power outage time for users in areas within the large segment where the over-head line fault is located

所在分段	用户类型	用户感受停电时间
故障所在大分段上游	—	t_{dfm}
故障所在大分段下游	可转供用户	t_{dfm}
	不可转供用户	$t_{dfm} + t_{df}$
故障所在小分段	—	$t_{dfm} + t_{df}$

2.1.2.2 分段开关故障

对于架空线系统,此分段开关故障将导致分段开关所分隔的上下游小分段用户无法转供电。对于故障所在大分段以外的区域,其用户感受到的停电时间与电缆本体故障类似,具体如表6所示。

表6 分段开关故障的用户停电时间
Tab. 6 User outage time for segment switch failure

所在分段	用户类型	用户感受停电时间
故障上游大分段	—	t_{dfa}
故障下游大分段	可转供用户	t_{dfa}
	不可转供用户	$t_{dfm} + t_{df}$
故障分段开关紧邻上下游小分段	—	$t_{dfm} + t_f$
故障所在大分段内非紧邻下游	可转供用户	t_{dfm}
	不可转供用户	$t_{dfm} + t_f$
故障所在大分段内非紧邻上游	—	t_{dfm}

2.2 大分支停运导致的停电时户数

大分支为从主干线路引出且前端安装有带保护功能的断路器的支路,即分支线路故障的影响不会向主干线传导。因此,可以将大分支类比为一条从变电站出线的中压线路,按照前述方法计算大分支的故障停运时户数评估值,然后累加到整条线路的总时户数上,其计算方法不再赘述。

2.3 配变停运导致的停电时户数

故障段配电变压器发生故障停运后:配电变压器前端装设有保护设备(如熔断器),其故障停运仅影响所带用户,不会影响其他用户,用户感受配变的修复复电时间 t_r 。

3 客户平均停电时间计算

客户平均停电时间 S_{AIDI} 是衡量配电网供电可靠性最为重要的指标。本文基于故障模式后果分析法的思路,开展配电网供电可靠性评估。假设配电线

路所有可能的故障事件集合为 F ,对于任意故障事件 $f \in F$,假设其发生概率为 λ_f ,则针对故障事件 f 的故障发生所在线路段位置,可以计算故障事件导致的故障后果为:

$$R_f = \sum_{i=1}^n t_i N_i \quad (1)$$

式中:

n ——线路小分段数目;

t_i ——故障事件 f 导致的第 i 个小分段用户感受的停电事件(具体取值见第2节);

N_i ——第 i 个小分段的用户数。

因此对于配电线路所有可能的故障事件集合 F ,累计其各个故障事件 f 产生的故障后果,可以计算配电线路所有可能的故障事件的总故障后果为:

$$R_F = \sum_{f \in F} R_f \quad (2)$$

由此可计算客户平均停电时间为:

$$S_{AIDI} = \frac{R_F}{N} \quad (3)$$

4 算例及验证

以《中低压配电网可靠性评估导则》(DL/T 1563)的附录算例为基础,开展本文方法的算例模型,如图2所示。

图2算例的网络参数和可靠性参数在此处不再赘述。

行标算例中将故障点上游恢复供电时间和故障停电联络开关切换时间进行了区分,为了简化考虑,将二者统一定义为故障定位、隔离和倒闸操作时间,则开展可靠性评估所需参数如表7所示。

分别采用故障模式后果分析和最小路法进行计算,形成故障模式后果分析表和最小路分析表,最终行标算例网络的可靠性评估结果如表8所示。

由表8可知,行标算例网络经行标分析方法计算,故障停电时户数为0.4155时户, S_{AIDI} 为0.0831h, A_{SAI} 为99.9991%。

利用本文所提评估方法,根据自动化开关分布情况,可将原网络划分为4个小分段和3个大分段,其中4-b分支、6-e分支长度计入主干线,具体如图3所示。

按照图2所示的网络结构,可以对分段信息进

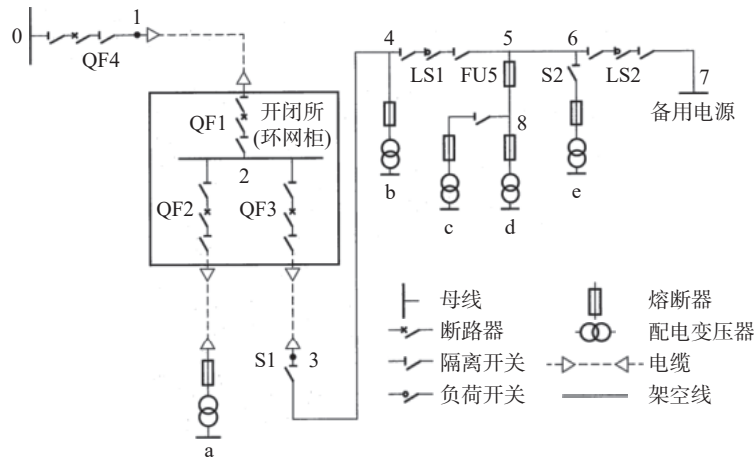


图 2 DL/T 1563 算例网络

Fig. 2 Example network in DL/T 1563

表 7 可靠性评估所需参数

Tab. 7 Parameters required for reliability assessment

参数名称	取值
人工故障定位、隔离和倒闸操作时间/h	0.5
自动化故障定位、隔离和倒闸操作时间/min	1
电缆修复时间/h	5
架空线修复时间/h	2
开关修复时间/h	3
变压器修复时间/h	3.5
电缆故障率/[次·(100 km·a) ⁻¹]	0.1
架空线故障率/[次·(100 km·a) ⁻¹]	0.3
开关故障率/[次·(百台·a) ⁻¹]	0.25
变压器故障率/[次·(百台·a) ⁻¹]	0.35

表 8 行标算例网络的评估结果

Tab. 8 Evaluation results of the industry standard example network

可靠性指标	行标评估结果
故障停电时户数/时户	0.4155
S_{AIDI}/h	0.0831
A_{SAI}	99.9991%

行总结, 如表 9 所示。

根据表 9 所示的评估参数, 利用本文所提评估方法, 经过评估, 可以获得如表 10 所示的评估结果。

由表 10 所示, 本文所提评估方法的评估结果在

行标评估结果的基础上, 有 22% 左右偏差。偏差主要的来源是本文所提方法充分考虑了配电自动化对降低故障定位、隔离和倒闸操作时间的影响, 在考虑配电自动化的情况下, 能显著降低用户平均停电时间。因此, 本文所提方法能更为精确地分析配电自动化水平较高的城市配电网供电可靠性。

5 结论

本文章从农村配电网主要特点的分析出发, 结

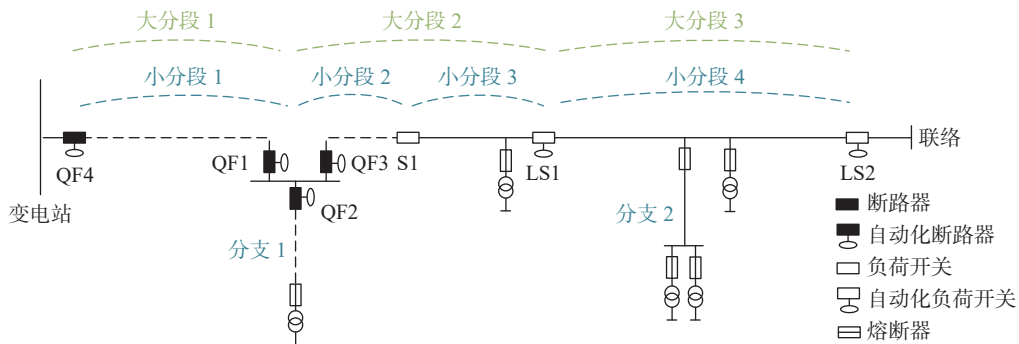


图 3 算例网络的分段近似拓扑

Fig. 3 Segment equivalent topology of example network

表 9 本文所提方法的评估过程

Tab. 9 Evaluation process of the proposed method

元件	故障概率/ (次·a ⁻¹)	t _f /h	感受t _{dfa} 用户数	感受t _{dmm} 用户数	感受t _{dmm} + t _f 用户数
QF4	0.0025	3	5	—	—
小分段1	0.002	5	5	—	—
QF1	0.0025	3	4	—	1
QF3	0.0025	3	3	1	1
小分段2	0.003	5	4	1	—
S1	0.0025	3	4	—	1
小分段3	0.0135	2	4	—	1
LS1	0.0025	3	1	—	4
小分段4	0.0105	2	2	—	3
QF2	0.0025	3	4	—	1
分支1	0.001	5	4	—	1
分支2	0.012	2	3	—	2
变压器1	0.0035	3.5	—	—	1
变压器2	0.0035	3.5	—	—	1
变压器3	0.0035	3.5	—	—	1
变压器4	0.0035	3.5	—	—	1
变压器5	0.0035	3.5	—	—	1

表 10 本文所提方法的评估结果

Tab. 10 Evaluation results of the proposed method

可靠性指标	行标评估结果	本文所提方法评估结果	评估差值
停电时户数/时户	0.4155	0.3239	22.05% (相对差)
S _{AIDI_F} /h	0.0831	0.0648	22.05% (相对差)
A _{SAI}	99.9993%	99.9991%	0.0002% (绝对差)

合配电网规划项目供电可靠性提升效果评估需求, 基于简化拓扑, 提出适用于农村配电网的规划项目供电可靠性提升效果评估方法。所提方法通过与中压配电网可靠性评估行业标准进行对比, 验证了方法的计算精度。所提方法实现对农村配电网大规模规划项目可靠性提升效果快速评估, 有效提升配电网规划质量。

参考文献:

[1] 肖颖涛, 王化全, 俞海峰, 等. 基于主成分分析法和模糊综合评价法的配电网评估 [J]. 南方能源建设, 2019, 6(3): 105-112.. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.018.
XIAO Y T, WANG H Q, YU H F, et al. Evaluation of

distribution network status based on principal component analysis and correspondence analysis [J]. Southern energy construction, 2019, 6(3): 105-112. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.018.

[2] 冯嘉顺, 曾繁祎, 赵青宇. 高可靠性主动配电网供电模式研究 [J]. 南方能源建设, 2017, 4(1): 92-95. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.01.017.
FENG J S, ZENG F Y, ZHAO Q Y. Study on feeding mode for active distribution system with high reliability demand [J]. Southern energy construction, 2017, 4(1): 92-95. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.01.017.

[3] 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.

[4] 梁赞, 冯永青. 基于可信性理论的有源配电网可靠性分析 [J]. 南方能源建设, 2015, 2(2): 62-65. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.02.011.
LIANG Y, FENG Y Q. Reliability assessment of distribution networks with distributed generators based on credibility theory [J]. Southern energy construction, 2015, 2(2): 62-65. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.02.011.

[5] 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]. Southern energy construction, 2014, 1(1): 30-33. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2014.01.005.

[6] 冯新龙, 孙岩, 林声宏, 等. 配电网综合评价指标体系及评估方法 [J]. 广东电力, 2013, 26(11): 20-25,53. DOI: 10.3969/j.issn.1007-290X.2013.11.004.
FENG X L, SUN Y, LIN S H, et al. Comprehensive evaluation index system of distribution network and evaluation method [J]. Guangdong electric power, 2013, 26(11): 20-25,53. DOI: 10.3969/j.issn.1007-290X.2013.11.004.

[7] 肖峻, 崔艳妍, 王建民, 等. 配电网规划的综合评价指标体系与方法 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(15): 36-40. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1026.2008.15.008.
XIAO J, CUI Y Y, WANG J M, et al. A hierarchical performance assessment method on the distribution network planning [J]. Automation of electric power systems, 2008, 32(15): 36-40. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1026.2008.15.008.

[8] 国家能源局. 中压配电网可靠性评估导则: DL/T 1563—2016 [S]. 北京: 中国电力出版社出版, 2016.
National Energy Administration. Reliability evaluation guidelines for distribution system of medium voltage: DL/T 1563—2016 [S].

- Beijing: China Electric Power Press, 2016.
- [9] 马立克, 王成山. 计及风能/光能混合发电系统的配电系统可靠性分析 [J]. *电力系统自动化*, 2005, 29(23): 33-38,79. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1026.2005.23.007.
- MA L K, WANG C S. Reliability analysis on the integration of wind/PV hybrid distributed generation in distribution system [J]. *Automation of electric power systems*, 2005, 29(23): 33-38,79. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1026.2005.23.007.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 万国成, 任震, 田翔. 配电网可靠性评估的网络等值法模型研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(5): 48-52. DOI: 10.3321/j.issn:0258-8013.2003.05.011.
- WAN G C, REN Z, TIAN X. Study on model of reliability-network-equivalent of distribution system reliability evaluation [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(5): 48-52. DOI: 10.3321/j.issn:0258-8013.2003.05.011.
- [13] 祁彦鹏, 张焰, 余建平, 等. 配电系统可靠性分析的最小割集-网络等值法 [J]. *电力系统及其自动化学报*, 2011, 23(2): 98-104. DOI: 10.3969/j.issn.1003-8930.2011.02.018.
- QI Y P, ZHANG Y, YU J P, et al. Application of minimum-cutset and network-equivalent method in distribution system reliability analysis [J]. *Proceedings of the CSU-EPSSA*, 2011, 23(2): 98-104. DOI: 10.3969/j.issn.1003-8930.2011.02.018.
- [14] 周念成, 谢开贵, 周家启, 等. 基于最短路复杂配电网可靠性评估分块算法 [J]. *电力系统自动化*, 2005, 29(22): 39-44. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1026.2005.22.007.
- ZHOU N C, XIE K G, ZHOU J Q, et al. Reliability evaluation of large scale distribution systems using the shortest path algorithm and section technique [J]. *Automation of electric power systems*, 2005, 29(22): 39-44. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1026.2005.22.007.
- [15] 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.
- [16] 褚文超, 张燕飞, 李英俊, 等. 城市电网供电可靠性影响因素分析及措施 [J]. *内蒙古电力技术*, 2016, 34(1): 19-24. DOI: 10.3969/j.issn.1008-6218.2016.01.018.
- CHU W C, ZHANG Y F, LING Y J, et al. Influencing factors analysis of power supply reliability in urban grid and its measures [J]. *Inner Mongolia electric power*, 2016, 34(1): 19-24. DOI: 10.3969/j.issn.1008-6218.2016.01.018.
- [17] 武文丽, 贾俊青, 杨德宇, 等. 配电网故障统计分析及其预防措施 [J]. *内蒙古电力技术*, 2020, 38(3): 94-97. DOI: 10.3969/j.issn.1008-6218.2020.00.053.
- WU W L, JIA J Q, YANG D Y, et al. Statistical analysis on distribution network fault and its prevention measures [J]. *Inner Mongolia electric power*, 2020, 38(3): 94-97. DOI: 10.3969/j.issn.1008-6218.2020.00.053.

作者简介:



舒舟

舒舟 (通信作者)

1989-, 男, 工程师, 华中科技大学电气工程硕士, 主要从事电网规划研究工作(e-mail) 569228107@qq.com。

杨文锋

1979-, 男, 高级工程师, 华北电力大学电气工程学士, 主要从事电网规划研究工作(e-mail)469994972@qq.com。

廖威

1990-, 男, 工程师, 湖南大学电气工程硕士, 主要从事电网规划研究工作(e-mail)387691142@qq.com。

(编辑 赵琪)