

配电网可靠性评估方法研究现状与展望

赵洪山, 赵航宇

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北保定 071003)

Current Status and Prospect of Reliability Evaluation Method for Distribution Network

ZHAO Hongshan, ZHAO Hangyu

(Department of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

摘 要: 配电网的可靠程度是决定供电可靠性的关键因素, 配电网可靠性评估方法也被广泛研究。根据前提条件的不同, 将现有的配电网可靠性评估进行分类, 介绍了不同类别下的可靠性评估方法, 并分析其优缺点与适用的网络。结合当前配电网可靠性评估中尚存在的不足与配电网的发展方向, 对未来智能配电网下的可靠评估需要研究的地方进行了展望。

关键词: 配电网; 可靠性评估; 现状; 展望

Abstract: The reliability of distribution network is key factor for the power supply reliability, and the reliability evaluation method for distribution network has also been studied widely. According to different conditions, the existing reliability evaluation method for distribution network is classified in this paper. Different reliability evaluation method is introduced, and the advantages, disadvantages and the applicability of each method are also researched. By combining the shortcomings in reliability evaluation for distribution network and the development direction of distribution network, the problems of reliability evaluation that need to be researched in the future intelligent distribution network are prospected.

Keywords: distribution system; reliability evaluation; current status; prospect

0 引 言

配电网直接连接着用户, 是决定供电可靠性的关键环节, 统计也表明大部分的停电事故都是因为配网侧故障造成的, 因此近些年来配电网的可靠性评估一直受到了广泛的关注。配电网的可靠性主要

通过可靠性指标来体现, 目前大部分关于配电网可靠性的文献也侧重于对可靠性指标的计算。由于配电网网架结构复杂多样, 元件数目和种类繁多, 因此配电网的可靠性评估是一个非常繁琐的问题, 但针对这个问题已经有许多方法被提出。这些可靠性评估方法的前提条件和适用的配电网各异: 有些只针对简单辐射状的配电网, 而有些则适用于含有复杂分支线路或者含有弱环网的配电网; 有些认为配电网元件传输功率不受限制, 在理想条件下考虑配电网的故障重构, 有些则考虑了转供元件最大传输容量的限制; 有些在可靠性计算时将故障率作为常数对待, 有些则考虑了元件的非恒定故障率; 有些只针对传统的单电源配电网, 有些则考虑的分布式电源或微网的接入。此外, 各种方法在计算时间与计算精度上也各有优缺点。

本文对近些年国内外配电网可靠性相关研究进行了深入的探讨, 在对其分类的基础上指出了各类方法适用的条件和存在的不足。结合可靠性评估尚存在的不足和当前配电网建设的发展方向, 对未来配电网可靠评估需要研究和改进的地方进行了展望。

1 传统的可靠性评估方法

1.1 概述

一般情况下, 将配电网可靠性评估方法可以分为模拟法^[1-2]和解析法^[3-12]。模拟法即蒙特卡洛模拟法, 该方法通过对元件运行状态进行采样来模拟配电网的运行, 通过对各个负荷点停电次数与停电时间的统计来得到负荷点可靠性指标, 进而求得系统可靠性指标。模拟法的计算复杂性受系统规模影响较小, 适用于大规模复杂系统的可靠性评估。但是,

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51077053)

模拟法的计算结果精度取决于模拟的年限,如果要对系统进行精确的可靠性评估,势必会消耗较长时间。

解析法根据处理对象的不同可以分为以元件为对象和以负荷点为对象2类。以元件为对象的方法依次分析每个元件故障给各个负荷点带来的影响,通过故障概率、故障时间的叠加得到各个负荷点的可靠性指标。以负荷点为对象的处理方法则针对每个负荷点,寻找其供电路径,然后分析供电路径上元件故障给负荷点带来的影响。

1.2 以元件为对象的处理方法

故障模式影响分析(failure mode effect analysis, FMEA)法是最基本的可靠性评估算法,也是以元件为对象进行分析的方法。该方法逐个分析元件故障产生的影响,形成故障模式影响表,通过各个故障模式产生的概率,综合求得可靠性指标。故障模式影响分析法思路清晰,但故障模式个数随元件个数快速增长,因此只适用于小规模的配电网可靠性分析。此外,一些方法如故障枚举法、故障遍历法^[3]等实际上也是通过枚举(遍历)元件故障产生的影响来计算可靠性指标,本质上与故障模式影响分析法相同。

在故障模式影响分析法的基础上,又产生了许多基于网络等值简化思想的方法,如馈线分区法^[4]、分块法^[5]、网络等值法^[6]、网络简化法^[7]等。这些方法本质相同,都是对产生故障影响相同的元件进行组合,用一个等效元件进行替代,并通过相应的等值计算公式求取等效元件的故障率和故障的平均修复时间,这样大大减小枚举元件的个数,降低了计算量。

1.3 以负荷点为对象的处理方法

最小路法^[8-10]是一种典型的以负荷点为对象的可靠性评估方法。对于某个负荷点,先搜索其到电源点的最小路,将系统元件分为最小路上的元件和非最小路上的元件,然后分别处理这2类元件对负荷点故障的影响。文献[8]基于最小路法,计及了最小路上备用电源和分段开关的影响,同时考虑了非最小路上的分支线保护。该算法适用于辐射状的配电网,但网络复杂时寻找各负荷点最小路所需时间较长,计算速度较慢。文献[9]以负荷点为研究对象,并指出以负荷点为中心的方法在只需评估单个负荷点的可靠性指标时有着巨大的优势。但是对配电网进行可靠性评估,往往是要评估各个负荷点和整个系统的可靠性,很少有只评估单个负荷

点可靠性的情况。

最小割集法^[11-12]同样是以负荷点为对象的可靠性评估方法。最小割集是引起系统失效的元件集合的最小子集,只要集合中存在未失效元件,系统就不会失效。该方法的基本思想是:对于每个负荷点,先寻找其最小割集,然后利用最小割集查出引起负荷点失去供电的故障模式,进而求得可靠性指标。需要指出的是,最小割集法主要应用于含回路的配电网可靠性分析。对于目前有些高压配电网少环网运行方式的情形,文献[11]采用搜索树方法寻找负荷点的最小割集,同时考虑了检修和备用电源的影响,提出了一种适用于含环网的高压配电网可靠性评估。但是网络结构复杂时,搜索每个负荷点的最小割集将消耗很长时间,形成最小割集的方法有待进一步研究。

2 考虑元件容量约束的可靠性评估方法

对于单电源辐射形配电网,故障发生后切除故障区域及其下游的供电,不存在负荷的转代问题,因此不用考虑元件容量的约束。但是,简单辐射状配电网供电可靠性差,目前我国绝大部分城市配电网已实现了手拉手、多分段多联络等多种形式的网架结构。故障发生后,故障下游区域可以通过联络线路寻找新的供电路径,而不必长时间处于停电状态。通过联络线转代故障下游区域负荷,将会增加原有馈线的负载,可能会产生线路、变压器容量超限,或者节点电压低于额定标准等问题。很多可靠性评估算法并没有涉及通过联络线转代负荷后的二次潮流约束问题,认为线路和变压器有足够大的传输容量,这就使得评估得到的各项可靠性指标过于乐观。对于目前对考虑元件容量约束的处理方法,可以将其分为2类。

2.1 基于潮流计算的容量约束判断

故障切除后,通过潮流计算来判断元件容量是否满足约束条件并通过供需容量比较定量的削减负荷。因为可靠性评估需要进行大量的潮流计算,所以潮流计算的效率对可靠性评估算法的计算量有着至关重要的影响。

文献[13]将环形系统中引起故障的事件分为全部失去连通性事件和部分失去连通性事件,对于部分失去连通性事件,负荷点和电源之间的连通路径并没有全部断开,但部分负荷通过新的路径获得供电会引起线路过载或电压越界。在二次潮流计算

时,忽略线路的电容和电阻,采用直流潮流法计算二次潮流分布,检查线路是否过负荷,若过负荷则对负荷进行削减,由此计算可靠性指标。

故障发生后配电网的结构发生变化,而采用前推回代法计算二次潮流则需要重新查找供电路径,采用“节点-支路”关联矩阵法则需要修正矩阵,这两种方法的计算复杂程度都较大。针对这个问题,文献[14]以配电网潮流计算公式为基础,提出共轭负荷矩的概念,并在其基础上估计节点电压和送端受端二次潮流,提高了节点电压约束、元件功率容量约束判断的速度。

文献[15]在最小路法的形式上提出递推等值的可靠性评估简化算法,基于辐射电网的逆流编号法,提出一种与前推回代法具有相似形式的牛顿法,不但具有前推回代法简单、易于编程的优点,还兼具牛顿法二次收敛特性,提高可靠性评估计算效率。

2.2 基于馈线挂接变压器容量判断方法

基于以下两点原因,可以不必采用精确的潮流计算来衡量元件的容量约束:

①采用潮流计算法来分析配电网故障后的潮流状况,需要知道各个负荷点的有功功率和无功功率。而目前我国大部分配电网的监测水平没法实时监测到各个负荷点的功率情况,也没有通信系统将采集到的实时功率数据上传到配电管理中心,基于历史数据估计负荷点的有功无功功率本来就存在很大的误差,所以没有必要采用精确的潮流计算法去判断是否满足转供容量的约束。

②辐射状运行配电网源流关系清晰,潮流计算只补充了因网损带来的附加信息,因馈线最大允许电流设定本身就有一定裕度,所以忽略网损带来的影响。

文献[16]基于配电变压器的负载率和馈线的同时率,提出校验馈线转供容量约束的方法,在满足时间工程需要的同时,大大降低了计算量。

文献[17]同样以馈线上挂接的变压器容量为参考,负荷转供的目标是使停电区域的用户数最少。同时该文献考虑了预安排停电对供电可靠性的影响,由故障引起的可靠性指标和由预安排停电情况下的可靠性指标进行叠加得到最终的可靠性指标,结果更符合实际情况。

2.3 两种方法比较

对于一般城市的配电网,尚没有对各个负荷点配置功率采集装置,负荷点功率的大小都是通过整

条馈线载流量的大小估计得到。在负荷点功率都存在较大误差的情况下,采用精确的潮流计算法来判断转供容量约束并不能提高判断的准确性,反而增加了计算时间,采用基于馈线挂接的变压器容量来判断转供容量约束更为合理。对于二次设备比较完善的配电网,如配电自动化试点城市,其对供电可靠性要求更高,而且也实现了对各个负荷点的实时监测,采用潮流计算法来判断转供容量约束则更为准确合理。

3 考虑参数不确定的可靠性评估方法

一般的可靠性评估建立在随机数学理论上,可靠性指标也多为期望值。然而,配电网的元件参数受天气、运行时间、运行状态等一系列因素影响,具有很强的不确定性,因此若将其作为常数对待往往会使可靠性计算结果与实际情况间存在一定的差异。对于配电网元件参数的不确定,已有文献进行了相关研究。

文献[18]介绍了4种不确定信息的基本数学理论,基于目前的可靠性评估方法,概述了在不确定性数学理论基础上的电力系统可靠性评估的总体框架。和确定参数的可靠性评估相比,不确定信息的可靠性评估计算量增加并不大,但计算出的可靠性指标包含更多的信息,能更准确地体现配电网的可靠性。

文献[19]针对一些元件参数不确定但可以限定在某一个范围内的情况,在区间数及其运算规则的基础上推导出区间计算的反演公式,提出配电网可靠性分析的改进区间数法。文献[20-21]分别介绍了盲数和联系数的基本概念与运算规则,并在其基础上建立可靠性评估模型,求取了可靠性指标的盲数和联系数形式,较好地体现了原始参数不确定性对配电网可靠性带来的影响。文献[22]改进了序贯蒙特卡洛模型法中的元件状态采样模型,计算了元件可靠性参数服从不同分布时可靠性指标的分布状态,为配电网的规划与运行提供有价值的参考信息。文献[23]同样指出元件故障率参数的分析和确定是可靠性分析的基础,建立元件故障率的全寿命周期分布模型并提出研究步骤。

上述方法均考虑了元件参数的不确定对可靠性评估的影响,并建立模型计算可靠性指标。但是,正因为元件参数的不确定性,所以其很难获取,文

文献中使用的参数也都带着一定的假设。初始参数作为可靠性评估已知条件,其准确性直接决定了可靠性评估的准确性。如果不确定参数选择不当,不但增加了可靠性评估的计算量,而且也不能提高可靠性指标的准确与合理性。

4 考虑分布式电源接入的可靠性评估方法

分布式电源(distributed generator, DG)凭借发电方式灵活、环境污染小等优点,越来越多地被接入到配电网中,在给配电网运行方式带了变化的同时,也给配电网的可靠性带来一定的影响。

文献[24]依据负荷重要程度将其划分为不同的等级,以等值负荷最大为目标建立孤岛运行模型,并在改进最小路法的基础上评估接入DG的配电网可靠性。文献[25]在区间数和区间运算概念的基础上,考虑了原始参数在一定范围内变化的情况,采用网络等值化简法对接入DG的配电网进行可靠性评估,并分析了DG接入位置不同对可靠性的影响。文献[26]在GO方法的基础上建立含DG接入的可靠性评估模型。但是,上述文献中均认为DG输出功率是在额定功率范围内可调节的量,这与实际情况存在较大差异。

分布式电源输出功率具有不确定性,并不能保证其能够时刻提供满足用户需求的有功无功功率,接入DG的配电网可靠性评估与没有接入的最大区别就是判断各种运行状态下的功率供求关系,并确定相应的负荷削减策略。所以,评估DG接入的配电网可靠性,首先要对DG输出功率进行建模。常用的分布式电源模型有两种,一种是时序模型^[30-33],另一种是概率模型^[27-29,34-35]。时序模型一般以1h为功率变化的单位,计算一年8760h内风机输出功率序列。概率模型则通过聚类方法,将采样得到的功率进行分类,得到若干种不同输出功率及其对应的概率。其次,建立负荷模型。负荷模型同样分为时序模型和概率模型,且负荷模型一般与分布式电源模型对应。

文献[29]利用1h内风速信息,通过风机的功率特性曲线求取风机不同输出功率的概率模型,负荷同样采用概率模型,利用最小割集法对接入风机作为系统备用电源的配电网进行可靠性评估,得出了风机的接入对配电网供电可靠性有一定提高的结论。

文献[30]通过风速数据和风机的功率特性曲线建立风机输出功率的时序模型,通过光强数据和光伏电池的功率特性曲线建立光伏电池输出功率的时序模型,通过负荷年一周、周一日、日一小时曲线建立负荷大小的时序模型,采用序贯蒙特卡洛模拟法对分布式电源和负荷功率进行同步采用,建立负荷削减模型满足功率供求约束,通过长时间的模拟求得接入风机和光伏电池的配电网可靠性指标。该方法思路清晰,但是对规模较大的系统要得到精确的可靠性指标,需要模拟的时间较长。

为了平滑分布式电源输出功率的波动性,通常将储能装置与分布式电源结合,以改善供电的质量与可靠性。文献[31]在分布式电源模型的基础上引入铅酸蓄电池,对系统故障后的模式进行了详细的说明,基于序贯蒙特卡洛模拟法求取可靠性指标,并探讨了不同充放电策略的影响,使得可靠性评估结果更为合理。同样,该方法也有计算精度与模拟时间矛盾的问题。

微网将分布式电源、负荷、储能以及控制装置有机地结合到中低压配电网中,它既可以与配电网联网运行,也可以与主网断开独立运行。随着微网技术的发展与完善,它将成为分布式电源接入配电网的最有效运行方式。文献[36-39]深入探讨了微网接入的配电网可靠性评估。

5 研究情景展望

5.1 对元件可靠性参数进行精确统计

元件的可靠性参数作为配电网可靠性评估的基础,直接决定着可靠性评估结果的准确性。但多数文献在评估配电网可靠性的时候都是通过引用文献[40]中的数据获得,而该文献发表时间较久,不能准确反映当下配电网的实际情况。分布式电源接入配电网的研究处于初级阶段,尚无全面有效的可靠性统计数据。原始可靠性参数的精确性直接决定了可靠性评估结果的精确性,完善配电基础可靠性数据的统计与管理,将是一项基础而又有深远影响的工作。

5.2 需求响应对配电网可靠性的影响

随着电力市场建设的推进,需求响应(demand response, DR)技术作为需求侧管理的核心项目被引入到电力系统中来。基于电价的需求响应通过电价的变化来改变用户的用电习惯,达到消峰填谷的目的^[41]。负荷曲线的优化不仅带来了经济效益,

同样会对配电网供电可靠性产生影响, 负荷高峰期负载率的下降将在一定程度上降低配电网故障的风险, 但关于这方面的研究还未见报道。在基于激励的需求响应中, 并不是所有负荷停电都会影响用户的供电满意程度, 必要时可以削减部分负荷来保证配电网的安全或者经济运行。这种机制下, 传统的可靠性指标体系难以适用, 新的可靠性指标体系与可靠性评估方法有待研究。

5.3 含微网的新型配电网可靠性评估

随着新能源发电技术的发展与智能电网的建设, 越来越多的分布式电源被接入到配电网中将成为趋势, 分布式电源的接入改变了传统配电网的运行模式, 其输出功率的随机性与间歇性也将对配电网可靠性评估产生重要影响。虽然目前已有文献研究了分布式电源或微网接入后的配电网可靠性评估方法, 但仍然存在一些重要问题有待解决:

① 分布式电源、负荷与储能装置的精确建模。在目前的可靠性评估方法中, 无论是分布式电源的时序模型还是概率模型都无法准确描述分布式电源实际的输出功率情况, 负荷模型同样过于粗略。在储能装置模型方面, 假设储能装置是高度自治可控的, 分布式电源发出功率大于负荷时, 所有多余功率完全被储能装置所接收, 这种理想化的假设将使可靠性评估结果过于乐观。更有效的可靠性评估仍依赖于系统元件的精确建模。

② 有效配电网运行模式分析。在孤岛划分策略方面, 目前只简单考虑了功率平衡, 并没有考虑到配电网运行状态的平滑过渡, 控制策略能否实现, 因此在实际中并不一定有效。此外, 分布式电源的接入将会给配电网运行的稳定性、保护逻辑、故障定位时间等方面都带来了影响, 可靠性评估中忽略这些影响或将这些影响理想化处理都将影响评估结果的准确性。因此有必要结合实际情况, 更深入地分析分布式电源接入后系统的运行模式。

③ 微网作为分布式电源接入配电网的有效运行方式, 其运行方式、运行特性以及与配电网相互影响机理将直接影响配电网运行的可靠性, 这些方面也有待细化研究。同时, 微网作为一个整体, 其自身可靠性指标体系与可靠性评估方法有待完善。

6 结束语

随着人们对配电网供电可靠性越发重视, 关于

配电网可靠性的研究也越来越多。本文对近些年国内外配电网可靠性评估方法进行分析, 并对未来配电网可靠性评估的方向进行展望:

① 根据前提条件的不同, 将现有的配电网可靠性评估方法进行分类。对不同类别的评估方法进行研究, 分析其优缺点与适用的配电网。

② 元件可靠性参数的精确性直接决定了可靠性评估结果的精确性, 配电网基础可靠性数据的统计与管理工作有待完善。

③ 智能配电网下分布式电源与储能装置的接入、需求响应技术的引入等都将对配电网供电可靠性产生重要影响, 新的可靠性指标体系与可靠性评估方法有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Billinton R, Wang P. Teaching distribution system reliability evaluation using Monte Carlo simulation [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(2): 397-403.
- [2] 丁明, 张静, 李生虎. 基于序贯蒙特卡罗仿真的配电网可靠性评估模型 [J]. 电网技术, 2004, 28(3): 38-42.
- [3] 李志民, 李卫星, 刘迎春. 辐射状配电系统可靠性评估的故障遍历算法 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26(2): 53-56.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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): 49-52.
- [7] 王旭东, 林济铿. 基于网络化简的含分布式电源的配电网可靠性分析 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34(4): 38-43.
- [8] 戴雯霞, 吴捷. 基于最小路的配电网可靠性快速评估法 [J]. 电力自动化设备, 2002, 22(7): 29-31.
- [9] 方水平, 管霖. 以负荷点为中心的配电系统可靠性评估算法 [J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(20): 15-19, 32.
- [10] Xie Kaigui, Zhou Jiaqi, Billinton R. Reliability evaluation algorithm for complex medium voltage electrical distribution networks based on the shortest path [J]. IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, 2003, 150(6): 686-690.
- [11] 相晓鹏, 邵玉槐. 基于最小割集法的配电网可靠性评估算法 [J]. 电力学报, 2006, 21(2): 149-153.

- [12] 王秀丽, 罗沙, 谢绍宇, 王新, 张艳丽. 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, 2009, 39(9): 52-58.
- [13] 郭永基, Kofi. 考虑容量约束的配电系统可靠性评估 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24(17): 48-52.
- [14] 邵黎, 谢开贵, 王进, 等. 基于潮流估计和分块负荷削减的配电网可靠性评估算法 [J]. 电网技术, 2008, 32(24): 33-38.
- [15] 吴素农, 吴文传, 张伯明. 考虑传输容量约束的配电网可靠性快速评估 [J]. 电网技术, 2009, 33(14): 21-25, 41.
- [16] 邱生敏, 管霖. 规划配电网简化方法及其可靠性评估 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33(1): 85-90.
- [17] 邱生敏, 王浩浩, 管霖. 考虑复杂转供和预安排停电的配电网可靠性评估 [J]. 电网技术, 2011, 35(11): 121-126.
- [18] 雷秀仁, 任震, 陈碧云, 等. 电力系统可靠性评估的不确定性数学模型探讨 [J]. 电力自动化设备, 2005, 25(11): 1-4.
- [19] 张鹏, 王守相, 王海珍. 配电系统可靠性评估的改进区间分析方法 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(17): 50-55.
- [20] 赵书强, 王海巍. 基于盲数的配电系统可靠性评估 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(16): 7-12.
- [21] 万官泉, 张尧, 汪穗峰. 基于联系数的配电系统可靠性不确定性评估 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(4): 30-34.
- [22] 赵渊, 郭胤, 谢开贵. 考虑参数不确定的电网可靠性概率分布特征 [J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2165-2172.
- [23] 苏傲雪, 范明天, 张祖平, 等. 配电系统元件故障率的估算方法研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(19): 61-66.
- [24] 刘传铨, 张焰. 计及分布式电源的配电网供电可靠性 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(22): 46-49.
- [25] 钱科军, 袁越, ZHOU Cheng-ke. 分布式发电对配电系统可靠性影响研究 [J]. 电网技术, 2008, 32(11): 74-78.
- [26] 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.
- [27] In-Su Bae, Jin-O Kim. Reliability Evaluation of Distributed Generation Based on Operation Mode [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(2): 785-790.
- [28] Atwa Y M, El-Saadany E F. Reliability evaluation for distribution system with renewable distributed generation during islanded mode of operation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2): 572-581.
- [29] 徐玉琴, 吴颖超. 考虑风力发电影响的配电网可靠性评估 [J]. 电网技术, 2011, 35(4): 154-158.
- [30] ZHAO Hong-shan, ZHAO Hang-yu, DENG Song. Reliability Evaluation for Distribution System Connected with Distributed Generations [C]. International Conference on Power System Technology, Chengdu, 2014: 1467-1473.
- [31] 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.
- [32] 苏傲雪, 范明天, 李仲来, 等. 计及风力发电影响的配电系统可靠性评估 [J]. 电力系统继电保护与控制, 2013, 41(1): 90-95.
- [33] 伍言, 刘俊勇, 向月, 等. 考虑光伏DG孤岛续航能力的配电网可靠性评估 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33(5): 112-118, 124.
- [34] 田洪讯, 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.
- [35] 芦晶晶, 赵渊, 赵勇帅, 等. 含分布式电源配电网可靠性评估的点估计法 [J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2250-2257.
- [36] 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.
- [37] 别朝红, 李更丰, 王锡凡. 含微网的新型配电系统可靠性评估综述 [J]. 电力自动化设备, 2011, 31(1): 1-6.
- [38] 郭思琪, 袁越, 傅质馨, 等. 计及负荷分级的并网型微网供电可靠性分析 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(22): 47-53.
- [39] 别朝红, 李更丰, 谢海鹏. 计及负荷与储能装置协调优化的微网可靠性评估 [J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 64-73.
- [40] Billinton R, Johnnavithula S. A Test System for Teaching Overall Power System Reliability Assessment [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(4): 1670-1676.
- [41] XIE Haipeng, BIE Zhaohong, Bowen Hua, et al. Reliability Evaluation of Smart Distribution Systems Considering Time-of-use Pricing. <http://docin.com/p-591590547.html>.

收稿日期: 2015-03-15

作者简介:

赵洪山(1965—), 男, 博士, 教授, 研究方向为配电网规划与可靠性、电力系统混杂建模等, E-mail: zhaohscn@126.com;

赵航宇(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电系统可靠性, E-mail: zhy535266357@163.com.

(责任编辑: 林海文)