

配电网可靠性定量分析研究综述

汪穗峰, 张勇军, 任倩, 张尧

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 主要对电力系统可靠性三大组成部分之一的配电网可靠性定量分析方面的情况进行了总结。首先对比了我国电力企业实际采用的统计性指标和定量计算采用的分析性指标; 其次对现有定量分析方法进行分类, 总结解析类和模拟类方法的特点及适用范围, 提出其优缺点; 最后给出目前配电网可靠性研究的发展方向。说明了进一步加强配电网可靠性研究工作的理论探索和时间应用的必要性。

关键词: 配电网; 可靠性; 定量分析; 综述

An overview of quantitative analysis of distribution system reliability

WANG Sui-feng, ZHANG Yong-jun, REN Qian, ZHANG Yao
(South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: This paper gives a systemic overview of the reliability quantitative analysis about distribution system. Difference between the indices used in quantitative analysis and the statistic ones used in electric company is compared at first. The existing research works about distribution system reliability analysis are classified into analytical method and simulation method. Each evaluation method's feature, the excellence and the weakness are introduced carefully and the available qualification is explained in the following. The future working directions, such as benefit analysis, voltage sags and weather influence, are pointed out at last. Even many theories are established to solve the reliability problem, there still has mountains to climb over necessarily.

Key words: distribution system; reliability; quantitative analysis; overview

中图分类号: TM732 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)03-0079-05

0 引言

配电网指的是电力系统中直接向用户供电的末端网络。因其设备众多故障频发, 引起了我国电力用户 80% 的停电事故^[1]。据报道, 作为国内配网可靠性最高的地区, 上海 2003 年供电可靠率为 99.921%, 当年停电时间为 6.89 小时; 而同年日本东京的供电可靠率达到 99.999%, 一年只停电 5 分钟^[2]。2005 年上海供电可靠率提高到 99.972%, 当年停电时间为 2.487 小时^[3]。可见, 我国配电网可靠性水平同国际先进水平仍有较大差距。

随着我国信息产业通信、电子与信息技术的发展与应用, 停电损失的不完全修复性对供电可靠性提出了极高的要求。提高供电可靠性已不仅仅是电力行业发展的大势所趋, 而更是国民经济发展的强烈需要。为此, 有必要从最初的设计规划阶段就引入定量分析以指导整个可靠性工作。

1 配电网可靠性定量分析的指标

计算可靠性指标是配电网可靠性定量分析的目的。目前, 我国配电网可靠性统计工作的通行规范是 2003 年由中国电力企业联合会电力可靠性管理中心颁布的《供电系统用户供电可靠性评价规程(DL/T836-2003)》。该规程主要给出了涉及的可可靠性术语的定义、各种系统状态的划分原则、可靠性统计指标及其计算公式, 并附送应用报表软件一套。

规程中提及的可靠性主要指标, 如 RS-1、AIHC-1, 和参考指标, 如 MIC、AENS, 共计 27 个, 涉及可体现可靠性的各个方面, 但并非可靠性定量分析中常用的指标。按照这些指标的定义公式, 其终归是统计指标, 只有在事故切实发生之后才进行累计, 只能回顾从有统计数据以来至今的可靠性情况。定量分析最初定义时并不是以统计为本的, 而是以计算为本, 在事故发生前即可通过解析的方法算出系统的可靠性, 故定义了与规程中不同的指标。配电

网可靠性定量分析时一般采用如下指标^[4,5]。

1.1 负荷点指标

包括年停电频率(λ), 年期望停电时间(r), 不可用率(U)。负荷点指标是可靠性定量分析中的重点, 既是求解系统指标的基础, 又可衍生出失电损失、成本/效益分析等研究内容。每个负荷点都可以求出各自的负荷点指标。但负荷点指标没有标准的定义式, 主要依据负荷点与其它负荷点及元件的可靠性逻辑来确定。算法不同, 负荷点指标的计算方式就可能不同。

1.2 系统指标

系统指标须由对象区域的负荷点指标求出。列出主要几个系统指标如下, 其中①~②为频率类指标, ③~④为持续时间类指标, ⑤~⑥为概率类指标, ⑦~⑧为能量类指标。

① 系统平均停电频率指标(次/户·年)

$$SAIFI = (\sum \lambda_i N_i) / \sum N_i \quad (1)$$

式中: λ_i 为系统内负荷点 i 的年停电频率指标, N_i 为负荷点 i 的用户数。

② 用户平均停电频率指标(次/户·年)

$$CAIFI = (\sum \lambda_i N_i) / \sum M_i \quad (2)$$

式中: M_i 为负荷点 i 的受影响停电用户数。

③ 系统平均停电持续时间指标(小时/户·年)

$$SAIDI = (\sum r_i N_i) / \sum N_i \quad (3)$$

式中: r_i 是负荷点 i 的年期望停电持续时间指标。

④ 用户平均停电持续时间(小时/户·年)

$$CAIDI = (\sum r_i N_i) / \sum M_i \quad (4)$$

⑤ 平均供电可用率

$$ASAI = (\sum 8760 N_i - \sum r_i N_i) / \sum 8760 N_i \quad (5)$$

⑥ 平均供电不可用率指标

$$ASUI = 1 - ASAI \quad (6)$$

⑦ 系统缺供电量指标(千瓦时/年)

$$ENS = \sum L_{ai} r_i \quad (7)$$

式中 L_{ai} 为负荷点 i 的平均负荷。

⑧ 系统平均缺供电量指标(Average Energy Not Supplied)(千瓦时/户·年)

$$AENS = ENS / \sum N_i \quad (8)$$

2 配电网可靠性定量分析的方法

2.1 元件可靠性参数的获取

元件可靠性参数是配电网定量分析的基础数

据。中电联在下发《供电系统用户供电可靠性评价规程》时附带有可靠性统计软件, 已在全国各市电力局使用多年。其工作之一是统计各主要配电网元件故障停电率、停电次数、停运停电率及停电平均持续时间, 积累了宝贵数据。以厂家提供的设备数据为补充, 可得到元件的可靠性参数。另外, 中电联可靠性管理中心每年的工作总结会集合全国各省市发、输、配系统的可靠性数据进行分析、制表、成书, 也是确定元件基本参数的重要途径之一。

2.2 解析法

解析法的基本思想是: 根据系统的结构、系统和元件的功能以及两者之间的可靠性逻辑关系, 建立系统的可靠性概率模型。通过递推或迭代等过程精确求解此模型, 从而计算出系统的可靠性指标。

解析法的代表方法, FMEA 法, 也是配电网可靠性定量分析的经典方法, 其全称为故障模式后果分析法(Failure Mode and Effect Analysis)。该法的基本思想是, 首先假定系统的故障元件, 然后对该元件故障引起的系统状态改变进行分析, 进而找出受影响的线路及停电的负荷点。重复此过程直至枚举完所有的系统元件, 按因果关系归纳成表。对影响同一负荷点的各元件故障率和修复时间, 根据逻辑关系进行计算叠加, 可得负荷点指标并进而求得系统的可靠性指标^[6,7]。FMEA 法原理清晰, 简单易懂, 但在处理带有复杂分支馈线的配电网时会出现维数灾。

为此文献[8, 9]提出了等值法。其基本原理是在 FMEA 法的基础上, 对网络进行化简, 变复杂网络为简单辐射状馈线。整个化简的步骤可分为上行等效和下行等效两部分。在首先的上行等效的过程中, 将分支馈线对上级馈线的影响用一个串在上级馈线中的等效节点元件来表示。从最末端的分支馈线开始等效, 逐级向上, 直到线路没有分支馈线为止。而后, 在下行等效的过程中, 将上级馈线对下级馈线的影响用一个串在下级馈线首端的等效节点元件来表示。与上行等效相反, 逐级向下, 直到负荷点为止, 计算出负荷点指标。等值法解决了配电网元件数量众多的困难, 但在编程实现时需要等效过程不断地递归调用, 容易出现人为的逻辑错误。

由于现代配电网中大量手动开关和自动开关的应用, 使得减小停电范围进行故障隔离成为了可能。开关装置的配置不能影响系统的故障频率, 但在减少停电持续时间方面有着巨大的贡献。文献[10]根据此思想将馈线按开关划分为多个最小自动隔离区和最小手动隔离区, 建立区域节点。按照潮流确定开关弧方向。搜索电源主通路和备用电源切换区,

确定故障模式,进行可靠性计算。该方法摒弃了传统 FMEA 法以元件为分析元的思维方式,确立以区域元件组合为基础对象的研究方法。强烈体现了配电网自动化对可靠性的影响。

由于配电网可靠性的拓扑结构强相关性,衍生出了许多图论分析法。文献[11]提出一种基于图论的复杂配电网可靠性评估方法。把配电网看作图,用图的邻接矩阵实现网络拓扑,用图的增加和删除操作修改邻接矩阵,达到即时修改网络拓扑和计算可靠性指标的目的。文献[12]引入了安全系统工程中常用的最小路法。以负荷点供电可靠为分析顶事件,将系统元件分为供电时必须经过的最小路上元件及供电时不必要经过的非最小路上元件,计算可靠性。更有学者探索 GO 法(Goal Oriented)^[13]、贝叶斯网络^[14]与配电网可靠性分析的结合。GO 法以潮流能成功从电源流向负荷点为分析对象,以元件成功运行频率概率及成功运行时间概率为基础数据进行分析;贝叶斯法则以各实际元件为底事件,以馈线为顶事件,树状描绘出系统最小状态割集与各事件间的逻辑关系,与安全系统工程中常用的 FTA 法(Fault Tree Analysis)有异曲同工之妙。两者的最大优势在于元件重要度的计算,因此便于对可靠性的薄弱环节和灵敏度进行分析。

由于元件可靠性参数存在不确定性,因此区间法、粗糙集、隶属函数等模糊可靠性方法也在配电网可靠性评估中有所应用。基于模糊数间的插值运算思想,文献[15]结合实际问题分析论域的变化及求解方法,提出了不同论域间模糊数的四则运算算法,并将其应用于中压配网的可靠性计算中。模糊算法的软肋在于模糊化和去模糊化过程中存在一些人人为的经验假设,属自身论证,其合理性需要通过实际数据或其它可靠性模型来印证。

2.3 模拟法

模拟法主要应用了蒙特卡罗的思想,相当于在计算机内重建了一个虚拟的系统,仿真系统的运行。因此模拟法允许采用时变的负荷模型,可以得到概率分布型的结果,在解决元件数量多、配电网重构方面也有较大优势。

文献[16]提出了一种序贯蒙特卡罗仿真法。当分支馈线发生故障时,不考虑网络重构,直接对故障次数、故障时间、停电量进行累加;当故障发生在主馈线时,对故障进行隔离,采用启发式推导算法对非故障区恢复供电。恢复供电时,对线路电流和节点电压进行校验,如果存在安全越限而需要停运一些负荷时,则采用综合考虑系统停电费用、停电量、网损和系统停电时间的目标函数,以决定

停运负荷点。序贯蒙特卡罗的特点在于对元件发生故障的时间和元件故障后的修复时间进行抽样,即对元件状态持续时间的抽样。通过比较各元件故障时间和修复时间的早晚,确定系统所处的状态。整个过程中始终存在一个虚拟的时间轴,按时间推演。

非序贯蒙特卡罗法则以对元件状态的概率抽样取代序贯蒙特卡罗法中对元件的寿命抽样。文献[17]利用此原理,在按隔离范围对馈线进行区域划分的基础上,以区域为单位进行了仿真。当元件寿命服从指数分布时,故障率 λ 为常数。元件故障次数为 k 次的概率 $P(k)$ 满足泊松分布:

$$P(k) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!} \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (9)$$

抽取 0~1 间均匀分布的随机数 α , 由下式确定元件的年故障次数:

$$e^{-\lambda} \sum_{j=0}^{k-1} \frac{\lambda^j}{j!} < \alpha \leq e^{-\lambda} \sum_{j=0}^k \frac{\lambda^j}{j!} \quad (10)$$

注意,由于采用了仿真的原理,上述 k 需为整数。

蒙特卡罗法在编程实现时,需要抽取大量的随机数,抽样方法的好坏决定了运算的效率和精度。电力系统内大部分元件故障率很低,只有在随机数取值非常接近 1 时才被认为是故障状态,即,若按 (0,1) 均匀分布直接抽样,百次甚至千次才会出现故障状态。抽样效率低下,浪费计算时间。文献[18]第四章中提出匕首抽样法,利用一次抽样产生多个样本,很好地解决了该问题。

3 配电网可靠性的研究展望

近年来,配电网可靠性定量分析除了在自身算法上的不断改进和创新之外,还出现了很多与其它学科、概念、问题交叉的方向。令可靠性分析更为具体化,更具有针对性,贴近实际问题。

3.1 电压暂降概念的引入

与稳定问题相比,配电网所属电力部门更关注配电网的线损和电压暂降问题。随着高新技术的发展,自动化生产线、精密工艺、基于计算机微处理器的数字型和电力电子型负荷在系统中所占比例越来越大。这些负荷对电压波动较为敏感。且电压暂降实际发生的次数远高于停电次数。我国可靠性指标仅统计停电的情况,无法体现用户在电能质量方面的要求。

文献[19]根据此需要提出了暂降事件次数、暂降能量、暂降经济损失三个可靠性补充指标。针对供电可靠率的定义,提出按电压暂降修正的 RS*-1、

RS*-2、RS*-3 思路。

文献[20]具体说明了考虑电压暂降时配电网可靠性的计算方法。计算配电网故障前后的潮流,确定各节点故障前后的电压;计算单相、两相、三相短路时故障距离与故障电压的关系,根据故障率和故障距离确定引起不同暂降幅值的频次;采用 SCBEMA(Specified Computer Business Equipment Manufacturer Association)曲线为负荷停运判据,根据贝叶斯网络的方法计算可靠性指标。

3.2 可靠性的经济性分析

提高可靠性的目的是避免停电,减少造成的经济损失,所以提高可靠性的效果就需要通过经济性优化来评估。

学者 Billinton 调查得出了加拿大地区的分类用户停电损失函数(Sector Customer Damage Functions)^[21],并将其应用在可靠性增强措施的成本-效益分析中^[22,23]。SCDF 依用户类型差异和停电持续时间长短而变化,所以在可靠性与经济性计算时采用了蒙特卡罗法及时变的负荷模型。文中提出了一系列经济性指标,如 ECOST、IEAR,计算其在可靠性增强前后的变化,以确定措施效果。

另外,可靠性定量分析对元件故障率及修复时间有很强的依赖性。文献[24]将元件的基本参数按不同气象发生概率,线性分解出正常、不利、极端条件下元件的基本参数,并分别计算各可靠性指标。直接显示了恶劣天气造成的可靠性恶化。

4 结论

配电网的安全可靠在向用户供电过程中扮演着非常重要的角色。随着大型电厂的不断投建,拉闸限电的情况已得到大大改善,电力企业正试图改变“重发轻供不管用”的政策,配电网可靠性已开始得到重视。

解析法原理清晰,容易实现,但其结果只能显示一个确定的数值解;模拟法对计算机仿真有较高的要求。在工程只能提供少量的数据时宜采用解析法,若能提供时变的负荷模型和单位停电损失,则采用模拟法可以得到更多更全面的结论。

电网改造、增强网架的过程中,按照何种原则规划、如何兼顾可靠与经济,虽然已有上述各种理论作为参考,仍需继续完善与细化。

参考文献

[1] 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.
WAN Guo-cheng, REN Zhen, TIAN Xiang. Study on Model of Reliability Network Equivalent of Distribution

System Reliability Evaluation[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 48-52.

- [2] 施明融,李力.对供电可靠性管理的再认识[A].2004年可靠性学术年会论文集[C].2004.85-87.
- [3] 贾立雄,胡小正,赵凯.2005年全国城市10kV用户供电可靠性分析[J].电力设备,2007,8(1):84-88.
- [4] Billinton R, Billinton J E. Distribution System Reliability Indices[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(1):561-568.
- [5] Allan R N, Billinton R, Sjarief I, et al. A Reliability Test System for Educational Purposes-Basic Distribution System Data and Result[J]. IEEE Trans on Power Systems,1991,6(2):831-820.
- [6] 别朝红,王秀丽,王锡凡.复杂配电系统的可靠性评估[J].西安交通大学学报,2000,34(8):9-13.
BIE Zhao-hong, WANG Xiu-li, WANG Xi-fan. Reliability Evaluation of Complicated Distribution Systems[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2000, 34(8): 9-13.
- [7] 陈文高.配电系统可靠性实用基础[M].北京:中国电力出版社,1998.
- [8] Billinton R, Wang P. Reliability Network Equivalent Approach to Distribution System Reliability Evaluation[J]. Proc-Gener Transm and Distrib, 1998, 145(2): 149-153.
- [9] 夏岩,刘明波,邱朝明.带有复杂分支子馈线的配电系统可靠性评估[J].电力系统自动化,2002,26(4):40-44.
XIA Yan, LIU Ming-bo, QIU Zhao-ming. Reliability Assessment of Distribution Networks with Complex Subfeeders[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002,26(4): 40-44.
- [10] 谢莹华,王成山.基于馈线分区的中压配电系统可靠评估[J].中国电机工程学报,2004,24(5):35-39.
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): 35-39.
- [11] 束洪春,刘宗兵,朱文涛.基于图论的复杂配电网可靠性评估方法[J].电网技术,2002,30(21):46-49.
SHU Hong-chun, LIU Zong-bing, ZHU Wen-tao. A New Method of Reliability Evaluation for Complex Distribution Network Based on Graph Theory[J]. Power System Technology, 2002, 30(21):46-49.
- [12] 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,2002,2(7):29-31.
DAI Wen-xia, WU Jie. Fast Evaluation for distribution Network Reliability Based on Minimal Path[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 2(7):29-31.
- [13] 徐荆州,李扬.基于Go法的复杂配电系统可靠性评估

- [J]. 电工技术学报, 2007, 22(1):149-153.
XU Jing-zhou, LI Yang. Reliability Assessment of Complex Distribution System Using GO Method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(1):149-153.
- [14] 霍利民, 朱永利, 张在玲, 等. 贝叶斯网络在配电系统可靠性评估中的应用[J]. 电工技术学报, 2004, 19(8): 113-118.
HUO Li-min, ZHU Yong-li, ZHANG Zai-ling, et al. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(8):113-118.
- [15] 王峻峰, 周家启, 谢开贵. 中压配电网可靠性的模糊评估[J]. 重庆大学学报, 2006, 29(2): 45-49.
WANG Jun-feng, ZHOU Jia-qi, XIE Kai-gui. Fuzzy Reliability Evaluation Algorithm for Medium Voltage Distribution Networks[J]. Journal of Chongqing University, 2006,29(2): 45-49.
- [16] 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.
DING Ming, ZHANG Jing, LI Sheng-hu. Sequential Monte-Carlo Simulation Based Reliability Evaluation Model for Distribution Network[J]. Power System Technology, 2004, 28(3): 38-42.
- [17] 王成山, 谢莹华, 崔坤台. 基于区域非序贯仿真的配电系统可靠性评估[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(14):39-43.
WANG Cheng-shan, XIE Ying-hua, CUI Kun-tai. Distribution System Reliability Evaluation Based on Zone Non-Sequential Simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(14):39-43.
- [18] 杨为民, 盛一兴. 系统可靠性数字仿真[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1990.
- [19] 陶顺, 肖湘宁, 刘晓娟. 电压暂降对配电系统可靠性影响及其评估指标的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(21): 63-69.
TAO Shun, XIAO Xiang-ning, LIU Xiao-juan. Study on Distribution Reliability Considering Voltage Sags and Acceptable Indices[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(21): 63-69.
- [20] 杨京燕, 倪伟, 肖湘宁, 等. 计及电压暂降的配电网可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(18):28-33.
YANG Jing-yan, NI Wei, XIAO Xiang-ning, et al. Reliability Evaluation of Distribution Network Considering Voltage Sags[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(18):28-33.
- [21] Jonnavithula A, Billinton R. Features that Influence Composite Power System Reliability Worth Assessment [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997,12(4):1536-1541.
- [22] Billinton R, Wang P. Distribution System Reliability Cost/worth Analysis Using Analytical and Sequential Simulation Techniques[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998,3(4):1245-1250.
- [23] Wang P, Billinton R. Reliability Benefit Analysis of Adding WTG to a Distribution System[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2001, 16 (2): 134-139.
- [24] Billinton R, Acharya J R. Weather-based Distribution System Reliability Evaluation[J]. IEE Proc-Gener, Transm and Distrib, 2006,153(5):499-506.

收稿日期: 2007-06-08; 修回日期: 2007-07-15

作者简介:

汪穗峰(1973-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化可靠性;

张勇军(1973-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统优化控制与规划; E-mail: zhangjun@scut.edu.cn

任倩(1984-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统可靠性。

(上接第 78 页 continued from page 78)

参考文献

- [1] 国家电力调度通信中心. 电力系统继电保护实用技术问答[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
State Power Dispatch Communication Center of China. The Applied Technology of Power System Relay Protection [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.
- [2] 国家电力调度通信中心. 电力系统继电保护典型事故分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
State Power Dispatch Communication Center of China. Typical Fault Analysis of Power System Relay Protection [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
- [3] 袁季修, 等. 保护用电流互感器应用指南[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
YUAN Ji-xiu, et al. Application Guide of Current Transformer for Protection[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.

收稿日期: 2007-06-21; 修回日期: 2007-07-21

作者简介:

王世祥(1970-) 男, 本科, 工程师, 主要从事继电保护及二次回路维护和检修工作; E-mail: wangshx123@tom.com

左婧(1980-) 女, 硕士, 主要从事继电保护及二次回路维护和检修工作。