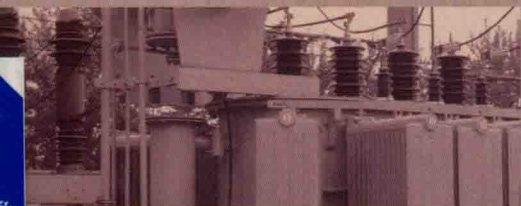




智能配电网的 用电可靠性

张勇军 陈旭 欧阳森/著



科学出版社

广东科学技术学术专著项目资金资助出版

智能配电网的用电可靠性

张勇军 陈 旭 欧阳森/著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

更高的可靠性是智能配电网最显著的特征之一，也是智能配电网的重要目标，研究智能配电网的用电可靠性是电力系统领域的一个重要方向。本书内容共 8 章，涉及智能配电网发展现状与趋势、用电可靠性的概念及影响因素、用电可靠性指标体系和评价方法、主动配电网用电可靠性场景分析、电压暂降实验研究、用电可靠性提升方法及能源互联网背景下的用电可靠性研究。

本书适合高等院校电力及相关专业的师生阅读参考，也可供从事智能配电网规划和可靠性分析的研究人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

智能配电网的用电可靠性/张勇军，陈旭，欧阳森著. —北京：科学出版社，2019.4

ISBN 978-7-03-060983-0

I. ①智… II. ①张… ②陈… ③欧… III. ①智能控制—配电系统—安全用电 IV. ①TM727

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 065447 号

责任编辑：郭勇斌 邓新平 / 责任校对：邹慧卿
责任印制：张 伟 / 封面设计：无极书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 4 月第 一 版 开本：787×1092 1/16

2019 年 4 月第一次印刷 印张：10 1/2

字数：240 000

定价：78.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

前 言

目前,我国在中高压用户的供电可靠性方面已进行了大量研究工作并取得明显进步,但由于技术手段的局限,用电可靠性的统计析工作尚处于起步阶段。国内配电网供电可靠性评估采用面向系统的供电可靠性指标体系,统计范围仅计及中高压用户,但随着电网的发展,智能电网、能源互联网、分布式电源、电能质量、主动配电网等新概念和新发展层出不穷,这些新内容和新应用的交错发展对可靠性造成许多影响,使其面临许多新问题。此外,电力用户日益重视和依赖电能,随着售电市场的逐步开放,基于用电体验的可靠性概念必然会逐渐成为市场的主流思想。

随着分布式电源、储能、充电桩等技术的应用,用户获取电能的方式不断丰富,用户的真实用电体验并不完全依赖于电网的供电水平。另外,随着电网的发展,短时停电和由电能质量问题引起的停电或设备停运事故越来越常见,虽然这对电网安全稳定没有多大影响,但对用户而言这些问题的危害不亚于持续停电事件,甚至损失更严重。因此,用电可靠性的考察内容不仅要全面反映停电事故,更要考虑用户用电体验,在现有可靠性评估指标的基础上进行完善细化,具体包括:①用户侧电能供给的持续性;②用户获得的电能可用度,主要包括电能质量问题(尤其是电压暂降和低电压)引起的系统不停电而用户停电或部分设备停运的情况。

所以,目前供电可靠性这套评价指标的局限性愈发明显:①由于低压线路设施故障、复电信息传达、非线性负荷接入等因素,用电用户直观感受的电力可靠性远差于供电企业公布的指标,使用户体验改善工作事倍功半;②面向系统的、不考虑电能可用度的传统评价指标体系已不能满足供售电企业配电网精细化管理和售电市场深度开发的新要求;③传统供电可靠性评估无法适用于主动配电网,主动配电网的运行控制需要一套更精细化更贴近用户的可靠性指标。

一些发达国家广泛采用标准 IEEE Std 1366TM—2012,且统计范围均已延伸至每个用户,即将传统的供电可靠性指标体系延伸到中低压配电网,并从停电频率、持续停电时间、可靠率三个方面描述供电可靠性。针对用户侧的可靠性问题,国内也开展了相关技术研究和试点工作。现有的用电可靠性研究工作主要集中于可靠性统计范围向低压用户拓展的可行性方法探索,常用方法有概率统计、故障模拟等。此外,现有文献已对电能质量与可靠性之间的关系进行分析研究。比如,已有文献论证了在供电可靠性定义中考虑电压暂降问题的必要性,并建议增加事件次数、暂降能量和经济损失三类补充指标,

但其仅针对电压暂降进行补充,未能全面反映电能质量对用电可靠性的影响。整体而言,目前国内尚缺乏用电可靠性的统一定义、指标体系及评估方法。

针对上述问题,结合配电网规划现状及其发展趋势,本书对用电可靠性进行系统性探索。在探讨供电可靠性与用电可靠性方面,作者认为,除了停电频率、持续停电时间和可靠率三个方面,用电可靠性指标体系还需考虑短时停电、重复停电概率、电能质量问题、用户侧与供电侧可靠性水平差距等问题。因此,为了全面切实反映用户实际获得的可靠性水平,有必要对可靠性评估指标进行完善细化。此外,用电可靠性指标确实对可靠性的监测统计分析工作提出了更高要求,用户对电能的要求在提高,供电企业也在寻求更精细化更贴近用户的管理方法,因此作者认为更具体的用电可靠性分析符合电网发展的趋势。虽然统计的工作量稍有增大,但用电可靠性指标体系能够更细致地反映可靠性问题所在,更便于指导供电企业的改造工作和精细化管理。

建立一套能够较完整切实反映用户实际用电体验的可靠性指标体系,可以为供电企业和用户提供更有效的评价标准。与现行的指标体系相比,用电可靠性指标体系全面反映了短时停电、电能质量、复电信息传递效率、低压配网可靠性等问题,能够有效表征用户用电可靠性和用电体验,也为电网企业提升客户满意度、发现可靠性薄弱环节提供指导,这比供电可靠性指标直接应用到用户侧更为可靠和实用。因此,本书建立的这套指标既适用于供电企业,也适用于用户(尤其是对可靠性要求较高的大用户)。反映用户用电体验的指标很可能不能全部成为标准,但必然会成为用户关注的对比性指标。用户通过比对各项指标进行供电服务选择或议价,这恰恰就是(电力)市场化的必备要素,也是目前国内外电力市场的主要区别之一。

从目前电力市场化的发展来看(尤其是售电侧改革),电网企业和用户已经逐步产生了各自的新的评价需求。在这片蓝海领域,经用户认可的可靠性指标、电能质量指标与电价策略将不再只停留在纸面,这同时也是电网企业精细化管理的必然需求。

本书第1章和第2章主要由陈旭执笔,第3章和第6章主要由欧阳森执笔,第4章4.1节、4.3节和4.4节主要由叶琳浩执笔,第4章4.2节和第5章主要由刘利平执笔,第7章和第8章主要由张勇军执笔。全书在撰写过程中得到了刘丽媛、莫一夫、黄廷城、郝金宝、陈丹伶、陈泽兴、刘泽槐等研究生及广州市奔流电力科技有限公司的蔡广林、黄春艳等的协助,由张勇军、陈旭和欧阳森统稿和校对。

本书得到了广东科学技术学术专著项目和中国南方电网有限责任公司科技项目(ZBKJ00000009)的大力支持,在此深表谢意。由于编写时间及作者水平所限,书中难免有疏漏之处,还望读者不吝赐教。

作者

2018年6月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 配电网的供电可靠性	1
1.2 配电网供电可靠性的研究现状	4
1.3 智能配电网与供电可靠性	14
1.4 智能配电网的发展	20
1.5 本章小结	21
参考文献	22
第 2 章 用电可靠性的概念和评价指标体系研究	26
2.1 可靠性概念的发展	26
2.2 用电可靠性与供电可靠性的区别	28
2.3 用电可靠性的评价指标	30
2.4 本章小结	35
参考文献	35
第 3 章 用电可靠性的影响因素研究	36
3.1 供电管理的相关原则	36
3.2 用电可靠性的影响因素分类	39
3.3 电能质量与用电可靠性	48
3.4 智能电网中的电能质量问题	51
3.5 供用电可靠性影响因素区分	54
3.6 本章小结	55
参考文献	55
第 4 章 新形势下的供用电可靠性统计及评估方法研究	57
4.1 可靠性统计向低压配电网拓展方法	57
4.2 考虑用电可靠性的客户用电信息管理系统	59
4.3 配电网用电可靠性运行状态综合分析评估方法	66

4.4 本章小结	71
参考文献	71
第5章 主动配电网的用电可靠性分析	72
5.1 分布式电源应用场景	73
5.2 储能技术应用场景	78
5.3 电动汽车应用场景	87
5.4 本章小结	94
参考文献	94
第6章 电压暂降的机制、实验方法与敏感性分析	96
6.1 电压暂降产生机制	96
6.2 南方地区电网的电压暂降及其影响	100
6.3 电压暂降敏感性实验平台和方法	101
6.4 低压脱扣器的电压暂降实验与数据分析	104
6.5 照明设备的电压暂降敏感性分析	107
6.6 本章小结	110
参考文献	110
第7章 智能配电网用电可靠性的提升措施研究	112
7.1 配电网用电可靠性提升需求度分析	112
7.2 提升供电可靠性的措施	120
7.3 提升用电可靠性的措施	122
7.4 本章小结	136
参考文献	137
第8章 能源互联网背景下的用电可靠性研究	138
8.1 能源互联网的形态与特征	138
8.2 智能电网与能源网融合的驱动力	140
8.3 智能电网与能源网融合模式	142
8.4 关键支撑技术	148
8.5 能源互联网对配电网用电可靠性的影响分析	157
8.6 本章小结	158
参考文献	158

第1章 绪 论

1.1 配电网的供电可靠性

1.1.1 电力系统可靠性的基本概念

可靠性是指一个元件、设备或者系统在预定的时间内，在规定的条件下完成规定功能的能力。它综合反映了对象的耐久性、无故障性、维修性、有效性和使用经济性等性质^[1]。

可靠性贯穿在产品 and 系统的整个开发过程中，形成了可靠性工程这门学科。可靠性工程涉及元件失效数据的统计和处理、系统可靠性的定量评定、运行维护、可靠性和经济性的协调等各个方面，具有实用性、科学性和实践性三大特点。可靠性工程提供评估理论、实用工具和方法，评估对象在规定的环境下、规定的时间内以给定的置信水平无故障地执行其设计功能的能力，规定、预测、设计、试验或仿真模拟对象可靠性性能，监测对象可靠性水平并反馈到有关的组织管理部门，从而提高对象的可靠性^[1,2]。

电力系统是一个由发电、输电、变电、配电和用电有机结合在一起的一个整体。简单电力系统示意图如图 1-1 所示。

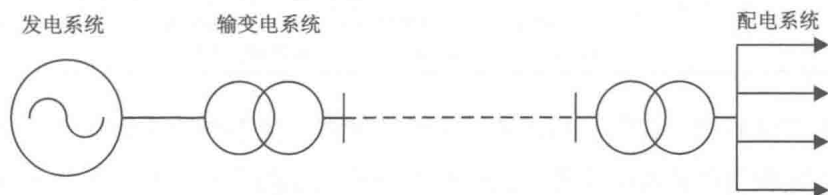


图 1-1 简单电力系统示意图

发电系统提供整个电力系统中负荷及各种损耗的能量来源，输变电系统将远离用户的发电厂的电能输送到负荷聚集的区域，而配电系统将输变电系统与用电系统连接起来，向用户分配和供应电能。在我国，配电系统又称为供电系统。通常称 35 kV 以上系

系统为高压配电系统，10（20、6）kV 系统为中压配电系统，380 V/220 V 系统为低压配电系统^[3]。当然，这几个部分不能只按电压来严格区分，而必须考虑系统设施的相关功能。

将可靠性工程的一般原理和方法与电力系统的工程问题相结合，便形成了电力系统可靠性的研究课题。在电力领域中，电力系统的可靠性指电力系统持续产生和供应电能的能力。这是 20 世纪 60 年代中期以后才发展起来的一门应用科学，它渗透到电力系统的规划、设计、运行和管理等各个方面^[1-3]。与电力系统的构成部分相适应，电力系统的可靠性也可以分为发电系统的可靠性、输变电系统可靠性、配电系统可靠性几个部分。相应地，发电系统的可靠性是指发电系统持续发电的能力，输变电系统的可靠性是指输变电系统持续输电的能力，配电系统的可靠性是指配电系统持续供配电能的能力。

在已有的研究中，发、输电系统的可靠性理论较为成熟，配电系统的研究起步较晚，但也已经有了大量关于配电系统可靠性的研究成果。按照电力系统可靠性范围的区分方法，电力系统的可靠性评估可以分为三个层级^[4]，如表 1-1 所示。

表 1-1 电力系统可靠性评估的三个层级

层级数	研究对象	主要内容
第一层级	发电设备	1. 假设输电和配电设备完全可靠，只研究发电设备的可靠性 2. 评估统一并网的全部发电机组按照可接受标准及期望数量满足电力负荷的电力和电量需求的能力的度量 3. 其提供的是充裕度的总体指标，并非对单个变电站和负荷点的指标。在数学上表示为发电容量和负荷两个随机变量的卷积运算
第二层级	发、输电设备	1. 考虑发电容量、电源位置约束和输电网络的过负荷及节点电压约束，忽略配电设备故障的考量 2. 通常情况下也将输电网络作为主要的关注目标，假设发电系统 100%可靠，只进行输电系统的可靠性评估 3. 不仅包括充裕度评估，也包括安全性评估。充裕度主要反映研究时间内发、输电系统静态条件下系统容量满足符合需求的程度，安全性反映短时间内系统容量动态满足符合需求的程度
第三层级	发、输、配电设备	1. 考虑的范围涉及发、输、配电设备，也被称为整体可靠性评估，即发、输、配电网按照可接受的标准和期望数量向供电点供应电力的能力的度量 2. 通常情况下只是将配电系统作为一个单独的部分，利用第二层级中得到的供电点指标作为配电系统可靠性分析的输入数据

从表 1-1 可以看出，在第三层级的可靠性研究中，主要侧重于配电系统的供电可靠性。往往将发电和输电系统的可靠性指标作为一个已知的参数，作为配电系统供电可靠性的一个输入数据，然后根据配电网的网络架构和运行方式进行配电系统的供电可靠性分析。

电力系统在正常的运行状态下，系统能够正常供电，不会出现切负荷的事件。但是如果系统受到某些偶发事件的扰动，如元件停运、负荷水平发生变化、雷击线路等，可能会产生系统的功率失衡、节点电压越限和线路潮流越限等故障的状态^[4,5]，从而会导致

切负荷的事件发生。电力系统的可靠性研究的主要内容即是系统的偶发故障的概率及其造成的结果分析,对系统的持续供电能力做出快速和准确的评价,并且找出影响系统可靠性水平的薄弱环节以求改善可靠性水平的措施,为电力系统的规划和运行提供决策支持^[2]。

1.1.2 配电网供电可靠性的研究意义

大多数电力公司对用户停电事件统计数据进行分析表明,配电系统对用户的停电事件具有很大的影响。据不完全统计,用户的停电事件中有 80%~95%是由配电系统故障引起的^[6]。随着现代社会对可靠性要求的不断提高,即使是局部电网故障,对电力企业、用户和社会的影响都日益增大^[7],因此,近年来配电系统可靠性问题逐渐受到更多的关注。相对于高压配电系统和低压配电系统,中压配电系统对用户供电可靠性的影响最大,也是可靠性评估的研究重点^[8]。

所谓供电可靠性,是指在电力系统设备发生故障时,使该故障设备的用户供电障碍尽量减少和使电力系统本身保持稳定运行的能力的大小。其实质是度量配电系统在某一时间内保持对用户连续充足供电的能力^[9]。

配电网的供电可靠性研究对配电网络的扩展规划、运行管理和电能交易等具有重要的意义。电源规划是扩展规划工作的主要内容,在当前可再生能源迅速发展的背景下^[10,11],配电网络的电源规划成了一个重要的研究课题,配电网网架规划是配电网扩展规划的另一个重要方面,合理的电网规划是建设坚强网架结构、保证电网安全稳定运行的基础,如果在网架规划中忽略可靠性因素可能会造成重大的经济和社会损失^[12]。在电网的运行当中,有效地采取以可靠性为中心的检修策略有着很重要的意义。以可靠性为基础,可以寻找系统的薄弱环节,更加有针对性地指定机组和电网的检修方案。在电力市场的环境下,可靠性水平成为电力作为商品这一属性中的一个重要的附加值,对于电力的定价策略也有着重要的影响,是定价的主要依据之一。总而言之,可靠性评估不仅具有理论的研究价值,而且还具有很重要的实际意义^[4]。

随着科学技术的不断发展,电力系统供应的电力用户的负荷特性比原先更加复杂,而且电力系统的规模越来越大,网架拓扑越来越庞杂,在原有的不含电源的配电系统中并入了风力发电和太阳能发电等分布式电源,这些都对原有的电网架构造成了不同程度的冲击,给电力的分析和运行调度带来了新的挑战。在此背景下,如果对配电网供电可靠性没有足够的重视,就很容易在配电系统发生事故时给电网造成更大的破坏,同时也造成更大的国民经济损失。所以,对配电系统的可靠性研究势在必行。

1.2 配电网供电可靠性的研究现状

配电系统供电可靠性既是电力用户的需要，也是供电企业自身发展的目标。供电可靠性的发展历程大体分为3个阶段。

1) 第1阶段，低可靠性水平阶段。低可靠性水平阶段是供电可靠性发展的初级阶段。此阶段供电可靠率一般在99%以下，对应的用户平均停电时间一般在87.6 h以上，并且每年的供电可靠率波动很大。

2) 第2阶段，迅速发展阶段。供电可靠性水平迅速增长，供电可靠率一般在99%以上，对应的用户平均停电时间一般在87.6 h以下。供电可靠性的总体发展趋势是螺旋式上升，每年的供电可靠率有一定的波动，但其波动范围要比第1阶段小。

3) 第3阶段，高可靠性水平阶段。供电可靠性水平已增加到很高，供电可靠率一般在99.99%以上，对应的用户平均停电时间一般在0.876 h（约53 min）以下。每年的供电可靠率较稳定，只有很小的波动，其波动范围比第1阶段、第2阶段都要小。

近年来，世界各地特别是欧洲和美国等经济技术发达的地区和国家，由于以电子技术为中心的技术高速发展，高度信息化设备的广泛应用及普及，社会的现代化正导致配电系统不断向综合自动化的方向发展。目前，供电可靠性已经达到了相当高的程度。如美国、英国、法国、日本等发达国家的供电可靠性水平均较高。以日本东京电力公司为例，日本东京电力公司在1986年以后的供电可靠率都在99.99%以上，对应的用户平均停电时间基本上都在0.876 h以下，即日本东京电力公司供电可靠率在1986年以后就进入了第3阶段。

经过多年的发展，我国城市供电可靠性水平逐步提高。1992年以后，我国城市供电可靠率开始达到99%以上，即1992年以前我国处于供电可靠性发展阶段的第1阶段，1992年以后进入了第2阶段，正在向第3阶段靠近。以2017年为例，我国10 kV用户平均供电可靠率为99.814%，平均停电时间16.27 h/户。其中，城市（市中心+市区+城镇）用户平均供电可靠率为99.943%，年平均停电时间为5.02 h/户；农村用户平均供电可靠率为99.768%，年平均停电时间为20.35 h/户。与国际先进水平相比，2011年新加坡供电可靠率达到99.999 941%，2009年日本东京供电可靠率达到99.999 619%，可以看出，我国供用电可靠性的提升空间和压力较大。

长期以来，世界各国对配电系统可靠性大多数采用宏观的平均值管理，即以整个配

电系统或地区网络总用户数或总供电容量为基础建立平均可靠性指标,作为对整个配电系统或者网络评价的依据。但是个别用户及负荷设备对停电甚至瞬时电压下降的反应有很大的差异及不平衡性,宏观平均值的可靠性指标已经不能满足这种用户的要求,因此必须进行进一步设定与地区用户要求相称的更高可靠性水平的目标值,并且按照每一个电力用户不同的情况来预测其可靠度的水平,这就是所谓的个别的可靠度微观管理极限值。对故障停电的个别可靠度管理归纳如下^[13]。

1) 按照不同的馈线分别进行管理,一般有两种方式:一是把故障多发的馈线列表,分别情况,实施重点管理,防止重复停电;二是把发生故障到修复位置的作业程序分别设定目标进行管理。

2) 在以营业为单位规定平均故障修复时间目标值的基础上,按照区域分别规定不同的修复时间极限值,以防止长时间停电。

3) 以配电线路为单位,规定每一年内重复停电的用户数及容许停电的最长时间。

4) 按照重要用户规定故障停电时间及停电次数的目标极限值,对超过目标极限值的用户采取适当的重点措施。

5) 对故障多发线路及长时间停电的线路规定目标值进行管理。

6) 对于配电系统,既要规定故障停电事件数、每回线路的停电时间等长期目标值,又要规定该长期目标下各年度应达到的年度目标值,并且以月为单位来实施和管理。

7) 规定馈线一年的因为故障而重复停电的次数及用户长时间停电的极限值和目标值,然后统计其超过极限值的线路数和用户数,以达成率为指标来进行管理。

英国电力委员会在1964年就制定了《国家标准事故和停电报表》,开始了可靠性基础数据的统计分析和统计工作,又在1975年颁布了《全国设备缺陷报表》,几十年来逐渐建立了完善的可靠性管理文件和统计指标。在可靠性管理方面,由电力委员会的故障报告中心负责统计事故和停电的记录及设备缺陷统计报表。每年结束后发布《年度停电分析和故障统计摘要报告》公布停电事件统计报表,发布《系统可靠性和运行报告》对各地区设备和系统可靠性进行评价,对供电方案的有效性和开关装置的失效与利用进行分析。同时电力委员会还提出分类的供电安全导则及其应用方法报告,把对用户的供电保持在一定的安全经济水平上,并应用停电频率、停电持续时间及供电量不足等电网可靠性主要评价指标,结合运行方式、特性曲线及其他的有关数据来估计运行特性及发展趋势,做出可靠性投资费用和效益分析,为正确的投资决策提供依据^[14]。

加拿大在20世纪50年代就已经开始了配电网供电可靠性的研究,1959年加拿大电力协会成立了供电连续性委员会,规定了用户停电时长、停电持续时间等能够反映配电网充裕度的指标。1962年建立了由加拿大电力协会的供电连续性委员会和配电系统可靠

性技术委员会共同组成的全国性的报告系统。加拿大不仅非常重视现有的配电系统的供电连续性,而且还重视对未来可靠性的预测和分析。其中,电力协会的供电连续性委员会主要负责年度实际可靠性指标的指定和考核,配电系统可靠性技术委员会负责可靠性预测评估和分析。北美共同采用的配电网供电可靠性指标最早由爱迪生电力研究所(Edison electric institute, EEI)、美国公共电力协会(American public power association, APPA)和加拿大电力协会(Canadian electricity association, CEA)提出,并且在1998年成为IEEE试行标准(IEEE Std 1366—1998, IEEE trial use guide for electric power distribution reliability indices)。其中最重要的指标包括系统平均停电频率指标(SAIFI)、用户平均停电频率指标(CAIFI)、用户平均停电持续时间指标(CAIDI)及系统平均停电持续时间指标(SAIDI)等^[14,15]。

日本的配电网可靠性分析工作大致是从20世纪70年代开始走上正轨的。日本的配电网可靠性指标和计算方法既有全国的统一标准,也有地区性的标准,而全国的可靠性指标主要有SAIFI和SAIDI两项。除此之外也研究了评估停电故障时供电转移能力的指标,主要包括反映网络结构和故障后负荷切换转移能力的联络率、正常运行率、有效运行率和适切馈线率等独特的综合评价指标。日本配电系统的可靠性管理对网络结构和切换能力进行了深入的研究,提出了以“裕度”概念为基础的评价方法,这一管理方式取得了良好的效果^[15]。

国内对配电网供电可靠性研究开始于20世纪80年代初期,略晚于对发电和输电系统的供电可靠性研究。水利电力部在1983年制定了一整套可靠性指标的《配电系统供电可靠性统计评价办法》,同时还在昆明地区的10 kV配电网中建立了试点。山东和上海等省(直辖市)也在开展配电网可靠性的统计工作。1985年4月,云南电力试验研究所正式颁布了《配电系统供电可靠性统计评价方法(试行)》。1989年能源部的电力系统可靠性管理中心对该办法进行了部分修改,并更名为《供电系统用户供电可靠性统计办法》,之后该办法又经过了多次修订,我国的配电网供电可靠性的管理工作也由此全面展开。但是由于当时缺少有效的分析方法及一些必要的统计数据,配电网供电可靠性的发展比较缓慢。近年来,随着国内经济的高速发展,电力负荷迅速增长,对供电可靠性的要求越来越高,国内外一些大规模停电事故造成的影响也推动着供电可靠性的研究进程。目前对于配电网的供电可靠性的研究已经成为电力系统研究中的一个热点问题,随着电力市场的概念越来越明晰,如何在电力市场的背景下取得供电可靠性和经济性的协调也被提到了研究的前沿。我国现如今已经在有组织、有计划地开展配电网供电可靠性的研究工作,提出更能反映实际情况的配电网供电可靠性指标,建立更加系统的模型,开发相关的软件,建立有效的配电网供电可靠性数据信息库和可靠性管理体系^[14]。

进入 21 世纪以来, 配电系统可靠性研究和管理表现出以下的发展趋势:

1) 既注重可靠性的统计分析, 又重视可靠性的预测评估。既进行系统宏观平均值指标统计, 又日益关注部分微观极值指标和监察及控制。

2) 日益重视设备可靠性基础数据的采集和整理, 关注可靠性信息对检修策略制定和调整的指导作用。

3) 日益关注可靠性对配电网规划和设计的指导。基于可靠性的配电系统规划方法已经成为近两年的研究热点之一。

4) 日益重视可靠性与经济性的协调。近十年开展了大量有关各类用户的供电可靠性价值研究, 从经济角度分析用户为提高供电可靠性所愿意承担的电价增量和供电企业为了提高供电可靠性水平需承担的成本, 为开放电力市场的供电企业规划投资提供指导。

1.2.1 配电网供电可靠性的主要指标

对于配电网中的负荷点来说, 主要的故障指标有年平均故障次数 (故障率) λ 、平均每次故障持续时间 r 、年平均停电总时间 T 和停电引起的电量损失 E 。各个指标的具体含义如下^[2]。

电网中负荷点的故障率 λ 是指该负荷点到某一时刻保持持续供电尚未发生故障, 在该时刻之后单位时间内发生故障的次数。通常选用一年作为一个单位周期, 单位为次/年。

故障持续时间 r 表示负荷点平均每次发生故障的持续时间, 单位通常为小时。

年平均停电总时间 T 为故障率和平均每次故障持续时间的乘积, 其单位通常为小时, 其数学公式可表示为

$$T = \lambda \cdot r \quad (1-1)$$

每年停电引起的电量损失 E 的计算方法为

$$E = T \cdot P \quad (1-2)$$

式中, P 为负荷点停电时所减少的负荷功率。

根据上面的负荷点的指标可以求出系统的可靠性指标值^[16]。

(1) 系统平均停电频率指标 (system average interruption frequency index, SAIFI)

SAIFI 是指每个由系统供电的用户在每单位时间内的平均停电次数。它可以用一年中用户停电的累积次数除以系统供电的总用户数来估计:

$$\text{SAIFI} = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i N_i}{\sum_{i=1}^N N_i} \quad (1-3)$$

式中, λ_i 指负荷点 i 的故障率; N 为负荷点数; N_i 为负荷点 i 的用户数。

(2) 系统平均停电持续时间指标 (system average interruption duration index, SAIDI)

SAIDI 是指每个由系统供电的用户在一年中经受的平均停电持续时间, 采用一年中经受的停电持续时间的总和除以该年中由系统供电的用户总数来计算:

$$\text{SAIDI} = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i r_i N_i}{\sum_{i=1}^N N_i} \quad (1-4)$$

式中, λ_i 指负荷点 i 的故障率; r_i 为负荷点 i 的故障平均持续时间; N 为负荷点数; N_i 为负荷点 i 的用户数。

(3) 用户平均停电持续时间指标 (customer average interruption duration index, CAIDI)

CAIDI 是指每个由系统供电的用户在一年中平均每次经受的停电持续时间, 采用一年中经受的停电持续时间的总和除以一年中用户停电的累积次数来计算:

$$\text{CAIDI} = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i r_i N_i}{\sum_{i=1}^N \lambda_i N_i} \quad (1-5)$$

式中, λ_i 指负荷点 i 的故障率; r_i 为负荷点 i 的故障平均持续时间; N 为负荷点数; N_i 为负荷点 i 的用户数。

(4) 用户平均停电频率指标 (customer average interruption duration index, CAIFI)

CAIFI 是指系统供电的用户中每个实际受到断电影响的用户所经受的停电次数, 可以采用一年中用户停电的积累次数除以受到停电影响的总用户数来计算:

$$\text{CAIFI} = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i N_i}{\sum_{j=1}^M N_j} \quad (1-6)$$

式中, λ_i 指负荷点 i 的故障率; N 为负荷点数; M 为负荷点中真正受到停电影响的负荷点数; N_i 为负荷点 i 的用户数; N_j 为受到停电影响的负荷点 j 的用户数。

(5) 平均供电可用率指标 (average service availability index, ASAI)

ASAI 是指用户在一年中经受的不停电小时总数与用户要求的总供电时长之比, ASAI 又被称为平均供电可靠率。

$$ASAI = (1 - \frac{SAIDI}{8760}) \times 100\% \quad (1-7)$$

(6) 系统平均缺供电量指标 (average energy not supplied, AENS)

AENS 是指在统计期间内, 平均每个用户因停电而缺供电量:

$$AENS = \frac{\sum_{i=1}^N P_i U_i}{\sum_{i=1}^N N_i} \quad (1-8)$$

式中, P_i 为负荷点 i 的平均负荷; N 为负荷点数; N_i 为负荷点 i 的用户数。

以上介绍的 6 个系统可靠性指标是评价配电网可靠性水平的关键指标, 其中以系统平均停电持续时间 SAIDI (即用户平均停电时间 AIHC₋₁) 和平均供电可用率指标 ASAI (即供电可靠率指标 RS₋₁) 两个最为常用; 而负荷点的可靠性指标 (故障率 λ 、故障持续时间 r 、不可用率 U) 并不作为评价配电网可靠性水平的指标, 但是它们作为配电网可靠性计算的过程指标, 是系统可靠性指标的基础, 要得到系统可靠性指标, 必须要先算出负荷点的可靠性指标^[17]。

1.2.2 供电可靠性统计及其原始参数

近年来, 国内外时有大停电事故发生^[18-20], 造成了巨大的经济和社会损失, 因此加强对电力系统可靠性统计和评估显得十分重要。可靠性原始参数的获取是可靠性研究中最基础、最重要的工作, 可靠性参数的可信度或准确度直接影响系统可靠性分析的计算结果。通常, 可靠性原始参数的获取是通过大样本系统宏观统计分析得到的^[21], 然而, 微观系统的可靠性原始参数则具有动态性和随机性, 受气候因素^[22]、人为因素^[23]、地理条件、产品自身的质量、负荷水平、电压频率运行因素^[24, 25]等的影响很大。对于新投产的项目, 采用全国范围统计的宏观数据作为微观、具体工程项目的可靠性原始参数, 往

往是不恰当的,无法反映微观工程所处的气候因素、地理环境和实际的运行情况。因此探索开发处理电力系统可靠性原始参数的方法,合理利用电力系统已有的可靠性原始参数来评估新投产的项目是非常有意义的。

文献[26]~[28]侧重于电力系统可靠性原始参数的预测和修正,很少涉及如何利用已有的可靠性原始参数来评估新投产的项目。文献[29]以可靠性原始参数已知线路的可靠性影响因素序列为基准向量,以可靠性原始参数未知线路的可靠性影响因素序列为待检向量,基于灰色关联和模糊数学理论,计算两向量之间的灰色关联度和模糊距离,并综合形成模糊差异度。根据长期统计所得的可靠性原始参数来正确选取新的工程应用中的可靠性原始参数。在此基础上文献[30]提出相似度指标,引入考虑其他影响因素的修正系数,通过模糊聚类分析将所有线路进行适当分类,计及气候和地理因素的影响程度来预估微观工程的可靠性原始参数,用同类中可靠性原始参数确定的输电线路来求取可靠性参数未知的输电线路,为合理评估新投产的输电线路的可靠性原始参数提供新方法。

采用相似度指标优于单一的欧氏贴近度、模糊贴近度或灰色关联度,比单纯地使用现有线路故障率的平均值更加准确,为合理地评估新投产工程的可靠性原始参数提供新的理论方法。该方法除了所考虑的气候影响因素外,线路的其他条件应基本相同,即适用于性质相同的系统。另外如何量化考虑更多的影响因素还有待进一步研究。

在学习和借鉴世界各国先进经验的基础上,我国电力可靠性管理在规划设计准则、统计管理准则、统计管理工具与指标发布等方面已经形成一个比较完善的体系。然而,可靠性管理工作中仍然存在不完善之处:①可靠性统计数据未发挥应有的作用,指标分析深度不够,未能挖掘设备、管理、人员素质等深层次的问题;②可靠性准则的制定与形势的发展还存在一些差距;③对现有可靠性研究成果的转化应用工作开展不充分;④低压用户的可靠性统计和可靠性微观管理尚未广泛开展;⑤不少供电企业片面追求指标,忽略了可靠性数据的真实性、准确性和完整性^[31]。

目前国内的供电可靠性管理工作往往局限于可靠性工作人员的事后统计管理,而没有真正将可靠性管理贯穿至电力生产管理全过程。因此,应当调动各有关生产单位的领导和工作人员,使各专业的检修、消缺、施工等专业工作环节共同参与可靠性管理,尽量缩短停电时间,体现电力生产以可靠性为中心的管理理念,发挥可靠性管理指导并服务于生产的作用。因此,应从生产运行、管理方面加强分析,帮助供电企业客观统计可靠性的各类指标,分析评估满足各种可靠性要求的电网结构和电力设备,为电网建设提出定量分析支撑的技术措施。