

基于模糊层次分析法的配电网重复多发性停电风险评估

徐铭铭¹, 曹文思², 姚森³, 徐恒博¹, 牛荣泽¹, 周宁¹

(1. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450002; 2. 华北水利水电大学 电力学院, 河南 郑州 450045; 3. 重庆大学 电气工程学院, 重庆 400044)

摘要:介绍重复多发性停电的概念。对95598停电投诉记录、配电网抢修管理平台、配电网运行监测平台等信息系统中的停电数据进行汇总分析,并进行实际调研工作。归纳配电网重复多发性停电常见原因,针对各种原因分别给出影响因数指标,用以衡量配电网重复停电概率水平。应用模糊层次分析法建立指标评价体系,分别从装备水平、运行维护水平和网架结构水平3个方面对配电网重复多发性停电发生概率的影响情况进行评价。针对某实际停电实例进行重复多发性停电风险评估,获得了重复多发性停电综合概率值。

关键词:配电网;重复多发性停电;模糊层次分析法;综合判断矩阵;停电预警;风险评估

中图分类号: TM 73

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.10.004

0 引言

随着社会经济的快速发展和国家能源发展方式的转变,人们对电的依赖性越来越强,对供电企业的供电能力、服务水平的要求也越来越高,但在电网不断建设和升级改造的过程中,不可避免会出现局部停电现象,影响用电企业的正常生产和居民客户的日常生活^[1-2]。国家电网公司客户服务数据显示,因频繁停电引起客户投诉的比例占投诉总量比重较大,成为名副其实的投诉重灾区。因此,如何控制配电网频繁停电现象,已成为供电企业在提供优质用电服务过程中亟待解决的关键性问题^[3-4]。

国网公司营销部在《关于对低电压和频繁停电投诉业务受理标准的说明》中,对客户投诉“频繁停电”的受理标准是:客户反映2个月停电3次及以上。因此重复性停电定义为某台区连续2个月发生3次及以上停电事件。因此,某停电事件是否演变为重复多发性停电需要进行大量的分析,然后给出重复多发性停电事件的预警与防治策略。

配电网网络结构复杂,设备种类多、数量大、分散广,运行方式多变,容易受到各种外部因素的影响,重复多发性停电涉及的因素众多。因此,配电网重复多发性停电的风险评估和预警是一项复杂的多属性综合评价问题^[5-8]。文献[9]提出一套停电风险评估指标,用于计算电网发生电力安全事故(事件)的风险值,将OPA模型运用于广东电网停电事故仿真,适用于高压输电系统,主网的一些风险评估方法已不再适用于配电网。文献[10]基于事故树和层次分析方法,以大面积停电事故树为基础建立

了4级指标,逐层分析了结构风险、技术风险和设 备风险,以此计算大面积停电风险综合风险度。文献[11]提出一种城市配电网应急预警方法,通过分析各类突发事件引发的设备停运概率,计算突发事件下配电网停电风险,并以此为判据确定突发事件预警级别。文献[12]针对配电网发展过程中运行风险影响因素的不断 增加,提出一种考虑多种影响因素的配电网风险评估模型,模型中配电网停电成本的计算采用了一种新方法,该方法反映了停电频率、停电持续时间及停电电量对停电成本的综合影响。已有的配电网风险评估的研究成果中以主观因素为主的经验分析与定性分析相结合的评估方法较普遍,没有标准统一的评估体系,而一些定量评估方法考虑的风险因素也比较单一^[8-12],并且大多没有应用于实践,仅停留在理论分析。

本文考虑重复多发性停电的多种影响因素,利用95598停电投诉记录、配电网抢修管理平台、配电网运行监测平台等信息系统中的停电数据进行汇总分析,并从2016年开始,每个月借助技术监督的机会到地市公司开展针对重复多发性停电的实际调研工作。以上停电数据共同构成了重复多发性停电的数据池。以此得到了重复多发性停电的主要影响因素,包括装备水平、运行维护水平、网架结构水平等方面。结合模糊层次分析法^[13-15]建立指标集来反映配电网停电事件演变为重复多发性停电事件的概率水平。建立重复多发性停电风险评估指标体系,量化主要因素对重复多发性停电风险的影响,并考虑气象因素影响和历史停电因素,进一步建立配电网重复多发性停电风险评估模型。该套风险评估体系能够对某一地区重复多发性停电进行预警阈值设定,判断某事件是否将发展成为重复多发性停电事件。运行维护人员可据此采取措施避免重复多发性停电事件的发生,保障配电网可靠运行,具有实际运用意义。

收稿日期:2017-09-04;修回日期:2018-07-05

基金项目:国家电网公司总部科技项目(SGHADK00PJJS-1600050)

Project supported by the Science and Technology Program of SGCC(SGHADK00PJJS1600050)

1 配电网重复多发性停电风险评估指标

1.1 重复多发性停电主要影响因素

配电网在运行中受到外部和内部多种因素的影响,容易发生短路、断线、绝缘击穿和闪络等故障。造成这些停电事件的常见原因有设备老化、用户侧故障、设备质量不过关、雷击、人为破坏等。鉴于导致配电网重复停电发生的因素众多,重复停电发生概率难以用解析方法描述,本文结合模糊层次分析法建立指标集来反映配电网重复停电发生概率水平。收集各市、县供电公司数据,建立重复多发性停电场景库,从而可知造成配电网重复停电主要有六大类原因:设计施工、设备原因、运行维护、外力因素、自然因素和用户影响。

a. 设计施工。

规划设计不当:配电网、配电网设备及其辅助设施由于规划设计不当造成故障停电。

施工安装不合格:配电网设备由于施工安装质量不良或工艺不过关等原因造成停电。

b. 设备原因。

产品质量不良:设备本身的结构设计、制造工艺、部件材料等不合格造成设备投运后引起停电。

设备老化:设备临近或超出服役期以及长期在非正常条件下运行等原因造成停电。

c. 运行维护。

运行管理不善:设备运行管理不善造成配电网设备故障引起停电。

责任原因不清:无法查明的原因造成停电。

d. 外力因素。

交通车辆破坏:供电设施受交通车辆破坏影响造成停电。

动物因素:鸟害、鼠害等动物因素造成停电。

盗窃:供电设施及其部件被盗造成停电。

异物短路:高空抛物、高空坠物、风筝、空中漂浮的异物等原因造成停电。

外部施工破坏:在其他单位工程项目施工中,施工机械碰撞线杆或者导线、挖断电缆等造成配电网设施短路或者被破坏,引起停电。

其他外力因素:由于火灾等其他外力因素造成停电。

e. 自然因素。

自然灾害:地震、洪水、海啸等大面积自然灾害造成停电。

气候因素:局部小范围天气因素(如大风、大雾、雷害、覆冰、高温、粘雪、泥石流等)造成停电。

f. 用户影响。

用户影响:由于用户供电设施故障或者运行操作失误造成其他用户停电。

由上述分析可知影响配电网基准概率水平的既

有配电网内部的自身因素,也有外部的环境因素。内部因素可以分装备水平和运行维护水平两大方面。外部因素专指人为破坏和树木鸟兽的影响,气候因素将对配电网的整体运行造成显著的影响。由于用户因素是电网运行单位无法控制的,因此暂不考虑该因素对配电网重复停电的影响。

1.2 重复多发性停电风险评估指标

基于模糊层次分析法,针对配电网重复多发性停电进行风险评估,将重复多发性停电风险评估目标分为目标层、准则层和因素层3层。目标层为配电网重复多发性停电发生概率;准则层为在正常天气下,配电网重复多发性停电发生概率的影响因素,包括装备水平、运行维护水平和网架结构水平3个方面指标。由此建立的重复多发性停电概率影响指标集如图1所示。

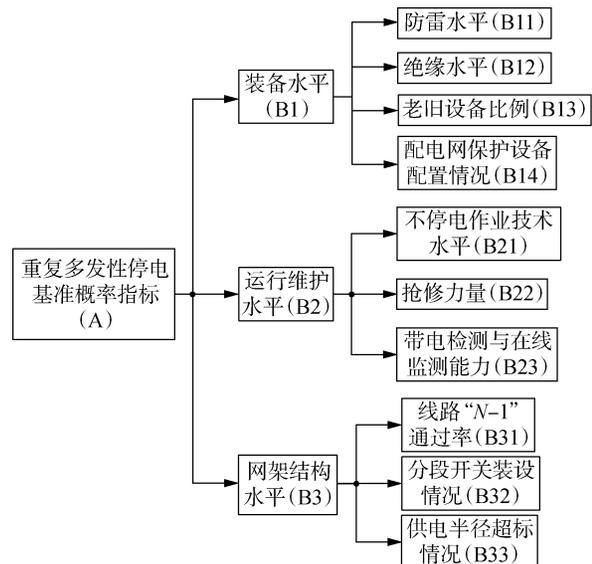


图1 重复多发性停电概率影响指标体系

Fig.1 Influence index system for probability of repeated multiple blackouts

装备水平反映配电线路的防护水平以及电力设备的整体服役年限;运行维护水平反映设备整体运行状态和维护管理水平,以及保护配置对重复停电概率的影响;网架结构水平主要包括供电半径、线路分段开关和分支开关的配置情况,反映这些因素对重复多发性停电事件的影响。

基准概率指标考虑了影响重复多发性停电发生概率的内部因素和外部因素,利用了电网的现状数据和历史数据,以期有效反映配电网重复多发性停电发生的概率水平。

a. 装备水平。

配电网的停电概率水平和装备水平密切相关,技术先进、性能可靠的电力装备是电网安全运行的硬件保证。

配电网架空线暴露在空中容易受到雷击,走廊

下生长茂盛的树木容易引起架空裸导线接地短路,粉尘等容易引起绝缘子污闪,因此,选取架空线绝缘化率和架空线防雷水平 2 个基础指标来衡量架空线的防护水平。

线路防雷水平反映架空线路在防雷接地设计等方面对该区域大气过电压的防护能力。

架空绝缘化率的高低反映的是架空线路对鸟害、异物、树线矛盾等外部影响的防护能力。

老旧或者超期服役的设备占设备总数的比例,一定程度上反映了配电网设备质量水平,影响重复停电的发生概率。

配电网保护缺失下,不同台区的故障往往会引发整线停运。配电网保护设备(分支开关、看门狗等)的合理配置,能够有效地防止故障范围的扩大,减少重复停电次数。

b. 运行维护水平。

配电网安全运行离不开先进可靠的电力装备作为物质基础,也离不开良好的运行维护。配电网运行管理中,巡视是否到位、消缺是否及时,关系到是否能够及时发现和解决设备隐患,影响故障率。配电网不停电作业是可靠供电的技术手段,既能实现对设备的检修、消缺,又能使设备保持持续运行状态。带电检测与在线监测技术的实施,能够使运行维护人员及时掌握配电网设备状态,提高运行维护水平。

因此选取设备不停电作业水平、抢修力量和带电检测以及在线监测情况来反映运行维护水平。

c. 网架结构。

配电网作为“两头薄弱”(即特高压骨干网架薄弱、配电网薄弱)环节之一,仍然存在着网架薄弱等多种问题,从而导致停电事故多发、用户投诉不断。随着经济不断发展,用电需求大幅增加,配电网网架结构亟待加强。

线路“N-1”通过率反映了配电网转供能力,线路“N-1”通过率越高,在发生故障时能够有效转供,避免停电发生。比如满足“N-1”原则的线路,当某条线路运行时出现故障,就将备用线路通过线路切换投入运行,有效减少了重复停电的发生。

在干线上加装分段开关将每条线路进行分段,用联络线来连接线路。故障出现在任何一段时,保证不会影响到其他段线路的正常供电,从而缩小故障范围,减少相应的重复停电数量。

供电半径的大小主要由负荷密度决定,过长的供电半径容易引起重过载、低电压、系统的电容电流增大等。

因此,选取线路“N-1”通过率、线路分段情况、供电半径超标情况作为反映配电网网架结构的影响因素指标。

1.3 配电网重复多发性停电综合概率值

配电网重复多发性停电综合概率值的计算公式为:综合概率值=基准概率值×气象影响因数×重复停电因数。其中,基准概率值由重复多发性停电风险评估指标体系中的基准概率指标经运算得到。

在恶劣天气条件下,断线、倒杆、短路、污闪等故障发生的可能将显著上升,这是因为在恶劣天气中,配电网的正常运行会受到来自各个方面的综合影响。

而对于停电事件而言,过去一月内发生的停电次数会影响其在本月演变为重复停电的概率。例如,相同的停电事件过去一月已发生的次数越多,则本月演变为重复停电的概率就相应越高。

为了表征气候因素对配电网停电概率水平以及历史停电次数对重复多发性停电概率的放大作用,以上得到的基准概率值要乘以一个气候影响因数和重复停电因数,最后得到一个综合概率值。

a. 气象影响因数。

配电网的运行统计数据表明,在恶劣的天气下配电网重复多发性停电概率水平较一般天气有显著提高。这是因为恶劣的天气将对配电网的整体运行造成影响,如恶化设备的运行条件甚至破坏电力杆塔导线、阻碍正常的运行维护等。在预安排停电事件中,也时常发生由于天气原因造成工期延误等情况,致使停电事件演变为重复多发性停电事件。因此,为了表征气象因素对配电网重复多发性停电概率的放大作用,引入气象影响因数。该因数根据气象灾害预警信号中不同的气象类型而确定,仅选取较为严重的黄色、橙色和红色预警等级。各个地区可根据本地区的运行统计数据对气象影响因数的具体取值进行调整。一般情况气象影响因数取值为:台风黄色预警取[1,1.2),橙色预警取[1.2,1.5),红色预警取[1.5,2);雷雨大风黄色预警取[1,1.2),橙色预警取[1.2,1.5),红色预警取[1.5,2);高温橙色预警取1.1,红色预警取1.2;大雾橙色预警取1.1,红色预警取1.2;结冰视天气情况和线路覆冰情况取值[1,1.5)。

b. 重复停电因数。

本项目评估重复多发性停电事件的风险,因此评估对象是一个已发生的停电事件。针对已有的配电网停电事件,评估其演变为重复多发性停电事件的风险,即评估该事件再次发生并达到 2 个月 3 次及以上的概率水平。

上月若发生过停电事件,则在未加强维护的情况下,该停电事件演变为重复多发性停电事件的概率将会增加。因此,考虑到历史已有停电信息对重复多发性事件停电事件的影响,引入重复停电因数来表征已有停电事件对重复多发性停电事件概率的

影响。上月发生停电1次,重复停电因数取1;上月发生停电2次,重复停电因数取1.5。

2 重复多发性停电风险评估模型

2.1 重复多发性停电评价

将各影响因素指标作为专家打分的依据,为了克服专家打分的主观性,专家以95598停电投诉记录、配电网抢修管理平台、配电网运行监测平台等信息系统中的停电数据和技术监督的调研数据为依据,相关数据来源于生产管理系统PMS(Power production Management System)和相关县、市供电公司报表,结合专家经验进行评分。专家参考指标因素情况,给定该因素得分值,以县公司为尺度,各地区运行人员结合停电事件发生地区各指标情况,根据各指标评分准则,给各指标进行评分。

由于各指标水平的高低与重复停电发生概率成负相关的关系,即装备水平、运行维护水平、网架架构水平越高,发生停电的概率就越低,反之则概率越高。基于以上分析,评分采用百分制,各指标水平越高,相应停电概率越低,因此得分越低;各指标水平越低,相应停电概率越高,因此得分也越高。

2.1.1 装备水平

a. 防雷水平。

根据各台区配置防雷保护的情况确定防雷水平。一般情况下其评分准则为:未装设避雷器评分为(50,80]分;仅供变高压侧装设避雷器评分为(20,40]分;避雷器装设完善评分为(10,20]分。

b. 绝缘水平。

根据架空线路的绝缘化率的情况,给出台区架空线路绝缘水平的评价。其相应评分准则一般为:未采用绝缘线取(50,80]分;部分线路采用绝缘线取(20,40]分;全部线路采用绝缘线取(10,20]分。

c. 老旧设备比例。

老旧设备故障率相应较高,在配电网中大量的老旧或超服役期的设备会严重影响供电可靠性,导致大量重复多发性停电。依据相关行业标准,评价标准包括:运行超过30a线路故障停电率,运行超过20a配变故障停电率,运行超过20a开关故障停电率。根据超期服役设备数量进行相应评分:大量老旧设备取(50,80]分;少量老旧设备取(20,40]分;无老旧设备取(10,20]分。

d. 配电网保护设备配置情况。

保护配置情况是影响配电网重复停电发生概率的重要因素之一。配电网保护设备(分支开关、看门狗等)的合理配置能够有效地防止故障范围的扩大,减少重复停电次数。无保护取(50,80]分;部分配置保护取(20,40]分;全部配置保护取(10,20]分。

2.1.2 运行维护水平

a. 不停电作业技术水平。

目前,多数县级供电公司已具备不停电作业能力,运行维护水平得到相应提高,但具备综合不停电作业能力的较少。根据工作人员获得各类不停电作业的证书等资质来衡量,反映不停电作业水平的评分准则为:不具备不停电操作能力取(50,80]分;只具备第一、二类简单操作能力取(30,40]分;具备第三、四类操作能力取(10,20]分。

b. 抢修力量。

足够的抢修力量能够及时处理配电网故障,防止事故蔓延,及时抢修,降低停电风险。因此,以抢修力量作为衡量配电网运行维护水平的重要因素之一。抢修力量指标有抢修站点平均抢修半径、每千米线路的抢修人员、抢修车辆等。评价抢修力量不足取(50,80]分;抢修力量中等取(30,40]分;抢修力量较强取(10,20]分。

c. 带电检测与在线监测能力。

带电检测与在线监测技术的应用是配电网运行维护水平由“被动抢修”向“主动运维”的转变,能够实现配电网精益化管理,有效防控重复停电的发生,用3a以内开展红外测温、振荡波、局部放电的次数来衡量。不具备带电检测与在线监测能力取(50,80]分;具有一定能力取(30,40]分;具备较强能力取(10,20]分。

2.1.3 网架结构水平

a. 线路“N-1”通过率。

线路“N-1”通过率反映了配电网转供能力,其值越高,在发生故障时越能够有效转供,避免停电发生。无转供能力取(50,80]分;有一定转供能力取(20,40]分;有较强转供能力取(10,20]分。

b. 分段开关装设情况。

在干线上加装分段开关将每条线路进行分段,用联络线来连接线路。故障出现在任何一段时,保证不会影响到其他段线路的正常供电,从而减少因不同分支停电导致的同一干线重复停电。分段开关装设情况评分准则为:无分段取(50,80]分;3段以下取(20,40]分;3段及以上取(10,20]分。

c. 供电半径超标情况。

供电半径的大小主要由负荷密度决定,过长的供电半径容易造成重过载、低电压、增大系统的电容电流等一系列影响。一般而言,供电半径超出标准越多,发生停电的可能性就越高,因此其评分值越高。供电半径情况评分准则为:超过规定取(40,80]分;符合标准取10分。

2.2 三角模糊数的模糊层次分析法模型

传统的层次分析法中专家打分采用点值,有时不能够准确地反映标度的模糊性和不确定性。模糊层次分析法将传统的层次分析法与模糊数学相结合,使用模糊数代替点值构成模糊判断矩阵,然后求

解局部权重向量,通过模糊数矩阵和向量计算得到综合模糊数权重,最后对其进行排序。这种方法能有效表达判断的不确定性,模型建立和求解也较简便,传统层次分析法可看作模糊层次分析法的一种特例。相对于传统的层次分析法,模糊层次分析法能够在很大程度上解决点值打分毫无弹性的问题,并且能比较有效地降低专家的个人偏好对打分的影响。较为常用的是采用三角模糊数进行打分的模糊层次分析法^[16]。

重复多发性停电主要因素有外力因素、运行维护、设计施工、设备原因、自然因素、计划检修、调电、限电、用户原因等,每个重复多发性停电主要因素中影响的原因很多,采用模糊层次分析法对各个因素进行分析,将得到停电原因的综合影响指标。

2.2.1 利用三角模糊数的模糊层次分析法构建模糊判断矩阵、计算局部权重

不同专家在构造比较判断矩阵时主观判断不确定,采用能够更好体现决策者模糊性和评价不确定性的三角模糊数代替传统层次分析法中的点值打分。本文引入三角模糊数构造模糊判断矩阵,利用模糊数比较大原理确定各指标的排序,以此获得权重值。

a. 构建模糊判断矩阵。

设与上层指标相关联的本层决策因素指标有 n 个,指标集为 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$,专家人数有 T 位, $a_{ijk} = (l_{ijk}, m_{ijk}, u_{ijk})$ ($i, j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, T$) 为专家 k 经过两两比较判断得出的指标 i 比指标 j 重要的模糊判断程度,其中 l_{ijk} 、 u_{ijk} 分别为左、右扩展判断的模糊程度, $u_{ijk} - l_{ijk}$ 越大,比较判断的模糊程度越高; m_{ijk} 为 a_{ijk} 的隶属度为 1 的中值。 a_{jik} 表示指标 j 比指标 i 重要的模糊判断程度,由模糊判断矩阵具有互补性,可得 $a_{jik} = a_{ijk}^{-1} = \left(\frac{1}{u_{ijk}}, \frac{1}{m_{ijk}}, \frac{1}{l_{ijk}}\right)$ 。最终构建 T 个模糊判断矩阵:

$$A_k = (a_{ijk})_{n \times n} = \begin{bmatrix} (l_{11k}, m_{11k}, u_{11k}) & (l_{12k}, m_{12k}, u_{12k}) & \cdots & (l_{1nk}, m_{1nk}, u_{1nk}) \\ (l_{21k}, m_{21k}, u_{21k}) & (l_{22k}, m_{22k}, u_{22k}) & \cdots & (l_{2nk}, m_{2nk}, u_{2nk}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (l_{n1k}, m_{n1k}, u_{n1k}) & (l_{n2k}, m_{n2k}, u_{n2k}) & \cdots & (l_{nnk}, m_{nnk}, u_{nnk}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

同理,可以构造指标体系中每层指标相对于上一层指标的模糊判断矩阵。采用 1—9 及其倒数的标度法构造三角模糊数互反判断矩阵。

b. 根据模糊判断矩阵计算局部权重。

在综合模糊判断矩阵中,指标 i 相对于其他因素指标的模糊综合程度为:

$$Q_{ik} = \left(\sum_{j=1}^n a_{ijk}\right) \otimes \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ijk}\right)^{-1} =$$

$$\left(\frac{\sum_{j=1}^n l_{ijk}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n l_{ijk}}, \frac{\sum_{j=1}^n m_{ijk}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n m_{ijk}}, \frac{\sum_{j=1}^n u_{ijk}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n u_{ijk}}\right)^{-1} \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ijk} = \left(\sum_{j=1}^n l_{ijk}, \sum_{j=1}^n m_{ijk}, \sum_{j=1}^n u_{ijk}\right) \quad (3)$$

$$\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ijk}\right)^{-1} = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n l_{ijk}}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n m_{ijk}}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n u_{ijk}}\right) \quad (4)$$

指标 i 与其他指标相比较的综合重要程度,即 $Q_{ik} > Q_{jk}$ ($j = 1, 2, \dots, n$ 且 $j \neq i$) 的可能性程度为:

$$d(x_{ik}) = \min_{j=1, 2, \dots, n, j \neq i} \left[\frac{l_{jk} - u_{ik}}{(m_{ik} - u_{ik}) - (m_{ik} - l_{ik})}, 1 \right] \quad (5)$$

则指标集 X 中各指标的局部因素模糊权重为:

$$W_k = \{d(x_{1k}), d(x_{2k}), \dots, d(x_{nk})\} \quad (6)$$

经归一化处理得到权重模糊集为:

$$W'_k = \{d'(x_{1k}), d'(x_{2k}), \dots, d'(x_{nk})\} \quad (7)$$

$$d'(x_{ik}) = \frac{d(x_{ik})}{\sum_{i=1}^n d(x_{ik})} \quad (8)$$

2.2.2 计算最终指标集的权重模糊集、综合权重

应用加权算术平均数方法,由 T 名专家根据指标集 X 的权重模糊集计算得到综合权重模糊集:

$$W = \sum_{k=1}^T \lambda_k W'_k \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^T \lambda_k = 1 \quad (10)$$

其中, λ_k 为第 k 名专家的权重。

应用三角模糊层次分析法求得本层相对于上一层指标的权重模糊集,向上逐层计算,进而计算出指标层各因素指标相对目标层的综合权重。

若各专家权重相同,可得综合判断矩阵,该矩阵中的每一个元素为:

$$a_{ij} = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^T a_{ijk} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij}) \quad (11)$$

其中, a_{ij} 为综合判断矩阵第 i 行第 j 列元素。

3 配电网重复多发性停电风险评估案例

3.1 综合权重计算

3.1.1 基于三角模糊数的模糊判断矩阵

以河南省某县供电公司为例,某农村地区某条配电网线路在一个夏季中发生了 2 次雷击断线事故,尤其是 2 次雷击断线发生在同一地点,经过分析确定该事件为故障停电事件,从多源信息系统中收

集该停电事件所在地区电力装备、网络结构、运行维护记录、故障记录等基础数据,从装备水平、运维水平、网架结构水平 3 个方面入手,专家组根据 1—9 标度方法,构建各层次模糊判断矩阵。表 1 给出了图 1 所示的评价体系指标层相对于目标层的基于三角模糊数的模糊判断矩阵,表中为 3 位专家的评价情况。

表 1 基于三角模糊数的准则层相对于目标层的模糊判断矩阵

Table 1 Fuzzy judgment matrix of rule hierarchy relative to object hierarchy based on triangular fuzzy number

指标	专家	装备水平	运行维护水平	网架结构水平
装备水平	1	(1,1,1)	(1,1,2)	(1,2,3)
	2	(1,1,1)	(1,1,2)	(2,3,4)
	3	(1,1,1)	(1,2,3)	(1,1,2)
运行维护水平	1	(1/2,1,1)	(1,1,1)	(1/2,1,1)
	2	(1/2,1,1)	(1,1,1)	(1/3,1/2,1)
	3	(1/3,1/2,1)	(1,1,1)	(1,1,1)
网架结构水平	1	(1/3,1/2,1)	(1,1,2)	(1,1,1)
	2	(1/2,1,1)	(1,2,3)	(1,1,1)
	3	(1/3,1/2,1)	(1,1,2)	(1,1,1)

注:表中每位专家评价构成 1 个三角模糊数。

各专家权重相同,根据式(11)可得到综合判断矩阵,即目标层指标的模糊判断矩阵,如表 2 所示。

表 2 基于三角模糊数的综合判断矩阵

Table 2 Comprehensive judgment matrix based on triangular fuzzy number

指标	装备水平	运行维护水平	网架结构水平
装备水平	(1,1,1)	(1,1.33,2.33)	(1.33,2,3)
运行维护水平	(0.44,0.5,1)	(1,1,1)	(0.61,0.83,1)
网架结构水平	(0.39,0.67,1)	(1,1.33,2.33)	(1,1,1)

3.1.2 基于三角模糊数的权重计算

由式(2)—(10)可得到各指标的局部因素模糊权重,如表 3 所示。

表 3 局部因素模糊权重

Table 3 Fuzzy weights of local factors

指标	模糊权重
装备水平	{0.25,0.45,0.84}
运行维护水平	{0.14,0.26,0.40}
网架结构水平	{0.17,0.29,0.54}

最终得到归一化的权重为:

$$W'_k = \{d'(x_{1k}), d'(x_{2k}), \dots, d'(x_{nk})\} = \{0.48, 0.21, 0.31\}$$

3.2 重复多发性停电的基准概率指标的评分值计算

考虑各指标的权重、气象因素以及重复停电因数等,依据模糊层次分析法逐层向上计算,得到事件的重复多发性停电风险概率值。表 4 给出评估重复多发性停电的基准概率指标的评分值。计算得到基准概率指标值为 50.559 分,根据综合概率值 = 基准概率值 × 气象影响因数 × 重复停电因数,考虑该地区 6~8 月为夏季雷电易发期,故选取气象影响因数为 1.2,上月已经发生 2 次停电,因此重复停电因数取 1.5。考虑气象因素和重复停电因数后,综合概率值为 91.006 分,应发出重复多发性停电预警。

3.3 配电网重复多发性停电风险概率量化评估结果分析

由上述分析可知,重复多发性停电基准概率值取值范围为 0~100 分;重复多发性停电综合概率值取值范围为 0~100 分,如果计算值超过 100 分按 100 分计。根据配电网重复多发性停电综合概率值的大小,重复多发性停电可能性分为可能性很大([70,100]分)、可能性较大([40,70]分)、可能性一般([20,40]分)、可能性较小([10,20]分)和可能性很小([0,10]分)5 个等级,本案例综合概率值为 91.006 分,应发出重复多发性停电预警。

表 4 综合权重和综合得分

Table 4 Comprehensive weights and scores

目标层	准则层		因素层		综合权重	评分值	综合得分	
	指标	相对上层指标综合权重	指标	相对上层指标综合权重				
重复多发性停电基准概率指标	装备水平	0.48	防雷水平	0.30	0.144 0	80	11.520	
			绝缘水平	0.21	0.100 8	40	4.030	
			老旧设备比例	0.31	0.148 8	40	5.792	
	运行维护水平	0.21	配电网保护设备配置情况	0.18	0.086 4	70	6.068	
			不停电作业技术水平	0.32	0.067 2	30	2.016	
			抢修力量	0.25	0.052 5	30	1.575	
	网架结构水平	0.31	带电检测与在线监测能力	0.43	0.090 3	70	6.321	
			线路“N-1”通过率	0.39	0.120 9	40	4.836	
			分段开关装设情况	0.42	0.130 2	60	7.812	
总计		1.00	供电半径超标情况	0.19	0.058 9	10	0.589	50.559

4 结论

a. 提出了配电网重复多发性停电风险评估的概

念,确定了配电网重复多发性停电综合评估方法的整体结构。

b. 确定了配电网重复多发性停电概率指标体

系中各个指标的定义和计算方法,建立了基于三角模糊数的模糊层次分析法模型,对配电网重复多发性停电发生概率进行了量化评估。

c. 对某实际停电实例进行了重复多发性停电风险评估。经过多元信息融合系统得到基础数据,进行指标值计算以及打分、计算等环节,获得了综合重复多发性停电概率值。结合该地区的重复多发性停电预警阈值,判断该事件将发展成为重复多发性停电事件,发出预警。运行维护人员可据此采取措施避免重复多发性停电事件的发生,保障配电网可靠运行。

参考文献:

- [1] 卢志刚,韩彦玲,常磊. 基于组合权重的配电网运行经济性评价[J]. 电力系统保护与控制,2008,36(18):1-5.
LU Zhigang, HAN Yanling, CHANG Lei. The economic evaluation of the distribution system operation based on the combination weighing[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(18): 1-5.
- [2] 蔡泽祥,周全. 配网接线方式对供电可靠性影响分析[J]. 电力系统及其自动化学报,2010,22(4):85-88.
CAI Zexiang, ZHOU Quan. Influence of distribution system connection modes on power supply reliability[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2010, 22(4): 85-88.
- [3] XIAO Fei, MCCALLEY J D. Power system risk assessment and control in a multiobjective framework[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(1): 78-85.
- [4] LI Gengfeng, ZHANG Peng, PETER B, et al. Risk analysis for distribution systems in the northeast US under windstorm[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(2): 889-898.
- [5] 周家启,赵霞. 电力系统风险评估方法和应用实例研究[J]. 中国电力,2006,39(8):77-81.
ZHOU Jiaqi, ZHAO Xia. Models and methods applied to risk assessment of power systems[J]. Electric Power, 2006, 39(8): 77-81.
- [6] 张吉军. 模糊层次分析法(FAHP)[J]. 模糊系统与数学,2000,14(2):80-88.
ZHANG Jijun. Fuzzy analytical hierarchy process[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2000, 14(2): 80-88.
- [7] 何永秀,戴爱英,杨卫红,等. 基于模糊理论的城市电网风险识别与评价[J]. 电网技术,2010,34(9):127-132.
HE Yongxiu, DAI Aiyong, YANG Weihong, et al. Identification and evaluation of risk in urban network planning based on fuzzy theory[J]. Power System Technology, 2010, 34(9): 127-132.
- [8] 吴子美,刘东,周韩. 基于风险的电力系统安全预警的预防性控制决策分析[J]. 电力自动化设备,2009,29(9):105-109.
WU Zimei, LIU Dong, ZHOU Han. Preventive control decision making based on risk analysis for power system security warning[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(9): 105-109.
- [9] 卢恩,鲁晓军,龙霏,等. 电力系统停电风险评估指标及方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(3):68-74.
LU En, LU Xiaojun, LONG Fei, et al. Indexes and method of power system outage risk assessment[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(3): 68-74.
- [10] 王博,游大海,尹根根,等. 基于多因素分析的复杂电力系统安全风险评价体系[J]. 电网技术,2011,35(1):40-45.
WANG Bo, YOU Dahai, YIN Xianggen, et al. A security risk assessment system of complicated power grid based on multiple factor analysis[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 40-45.
- [11] 李锐,陈颖,梅生伟,等. 基于停电风险评估的城市配电网应急预警方法[J]. 电力系统自动化,2010,34(16):19-23.
LI Rui, CHEN Ying, MEI Shengwei, et al. An early warning method for emergency response based on power failure risk analysis of distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(16): 19-23.
- [12] 苏海锋,姜小静,梁志瑞. 考虑多种影响因素的配电网运行风险评估[J]. 电测与仪表,2014,51(6):34-38.
SU Haifeng, JIANG Xiaojing, LIANG Zhirui. Distribution network operation risk assessment considering various influencing factors[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(6): 34-38.
- [13] 王若竹,周子毓,饶金涛. 国际总承包电力工程的风险识别与评价指标体系[J]. 东北电力大学学报,2012,32(15):12-15.
WANG Ruozhu, ZHOU Ziyu, RAO Jintao. Risk identification and evaluation index system of international contracting power engineering[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2012, 32(15): 12-15.
- [14] 林俊,王钺,苏迪. 改进的模糊层次分析法在配电网规划中的应用[J]. 高电压技术,2008,34(6):1161-1167.
LIN Jun, WANG Yi, SU Di. Application of an Improved FAHP to the distribution planning[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(6): 1161-1167.
- [15] 王鹤,曾鸣,陈珊,等. 基于模糊层次分析法的供电服务质量综合评价模型[J]. 电网技术,2006,30(17):92-96.
WANG He, ZENG Ming, CHEN Shan, et al. Comprehensive evaluation model for power supply service quality based on fuzzy analytic hierarchy process[J]. Power System Technology, 2006, 30(17): 92-96.
- [16] 高贺,孙莹,李可军,等. 一种新型智能配电网风险评估模型[J]. 电力自动化设备,2016,36(6):142-147.
GAO He, SUN Ying, LI Kejun, et al. Risk assessment model of smart distribution grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 142-147.

作者简介:



徐铭铭

徐铭铭(1985—),男,河南郑州人,工程师,博士,主要从事智能配电网方面的研究(E-mail: xu_ming_ming@vip.sina.com);

曹文思(1978—),男,河南开封人,副教授,硕士,主要从事电力系统安全稳定运行和配电网自动化方面的研究(E-mail: eegscaows@ncwu.edu.cn);

姚森(1992—),男,河南南阳人,硕士研究生,主要从事配电网可靠性分析方面的研究(E-mail: 809482886@qq.com);

徐恒博(1987—),男,河南郑州人,工程师,硕士,主要从事配电网可靠性分析方面的研究;

牛荣泽(1989—),男,河南新乡人,工程师,硕士,主要从事配电网停电分析方面的研究;

周宁(1971—),男,河南洛阳人,教授级高级工程师,硕士,主要从事配电网安全运行技术方面的研究。

(下转第 31 页 continued on page 31)

WANG Honglian. Copula theory and its applications in financial field[D]. Shanghai:Shanghai University of Finance and Economics, 2006.

[20] 邱小霞,刘次华,吴娟. Copula 函数中参数极大似然估计的性质[J]. 经济数学,2008,25(2):210-215.

QIU Xiaoxia, LIU Cihua, WU Juan. The properties of maximum likelihood estimation of parameter on Copula[J]. Mathematics in Economics,2008,25(2):210-215.

作者简介:

李 娟(1978—),女,江西鄱阳人,高级工程师,主要研究方向为电力系统规划与设计(E-mail:lijuan@jyy.xj.sgcc.com.cn);

周红莲(1988—),女,新疆乌苏人,工程师,硕士,主要研



李 娟

究方向为电力系统规划与设计(E-mail:905248644@qq.com);

周二彪(1989—),男,河南商水人,工程师,硕士,主要研究方向为电力系统规划与设计(E-mail:767305537@qq.com);

刘自发(1973—),男,黑龙江牡丹江人,教授,博士,主要研究方向为电网规划和优化运行、分布式电源接入电网分析(E-mail:tjbluesky@163.com);

王 威

(1974—),男,山东威海人,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为电网规划和优化运行、分布式电源接入电网分析(E-mail:wangwei-dongfang@163.com)。

Reliability evaluation of distribution network considering correlation between wind speed and electricity heating load such as electricity boiler

LI Juan¹, ZHOU Honglian¹, ZHOU Erbiao¹, LIU Zifa², WANG Wei³

(1. Economic Research Institute, State Grid Xinjiang Electric Power Company, Urumqi 830002, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

3. School of Machine and Electrical Engineering, Shandong Science and Technology University, Tai'an 271019, China)

Abstract: In the reliability evaluation process of the distribution network connected with wind power and electricity heating load such as electricity boiler, the joint bivariate normal distribution function of wind speed-load cannot accurately describe the correlation between wind speed and electricity heating load, which decreases the calculation accuracy. The Gumbel-Copula function of the correlation between wind speed and electricity heating load is established based on Copula theory, and the parameters in Copula function are determined by the maximum likelihood estimate method. Consequently, the joint probability density distribution function can be obtained, and the reliability indices of distribution network are calculated by using Monte Carlo simulation method. Case study results show that the Gumbel-Copula function can well describe the correlation between wind speed and electricity heating load, which contributes to the effective and accurate calculation of distribution network reliability.

Key words: distribution network; reliability evaluation; Copula theory; electricity heating load; Monte Carlo methods

(上接第 25 页 continued from page 25)

Risk assessment of repeated multiple blackouts for distribution network based on fuzzy AHP

XU Mingming¹, CAO Wensi², YAO Sen³, XU Hengbo¹, NIU Rongze¹, ZHOU Ning¹

(1. State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450002, China; 2. School of Electric Power, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China; 3. School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The concept of repeated multiple blackouts is introduced. The power outage data of information systems of 95598 power outage complaint recording, distribution network repair and management platform, and distribution network operation and monitoring platform are summarized and analyzed, and the actual investigation work is carried out. The common reasons of repeated multiple blackouts of distribution network are summarized, and the influence factor indexes are given for each reason to measure the probability of the repeated multiple blackouts. The index evaluation system is established by fuzzy AHP (Analytic Hierarchy Process) to evaluate the probability of the repeated multiple blackouts from three aspects, i.e. equipped level, operation and maintenance level, and grid structure level. The risk assessment of repeated multiple blackouts is carried out for an actual power outage case, and the comprehensive probability is obtained.

Key words: distribution network; repeated multiple blackouts; fuzzy AHP; comprehensive judgment matrix; blackout early warning; risk assessment