

10 kV配电网柱上断路器绝缘作业模糊层次分析法安全性分析

秦澔澔, 冯 满, 万星辰, 邓 慰

(国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 湖北 武汉 430074)

摘要: 为提高 10 kV 配电网柱上断路器更换或检修时安全性, 综合考虑影响其绝缘强度等风险因素, 建立了基于模糊层次分析法的旁路作业安全性分析模型。结合实际作业场景选取绝缘操作杆和绝缘斗臂车最常用的两种工器具对旁路作业中的安全性进行计算分析对比, 然后评价这两种工器具的适宜性, 得出绝缘斗臂车法是某供电公司 10 kV 配电网柱上断路器旁路作业最优方案, 所提评价方法能为配电网旁路作业中在具体作业工器具的选择提供参考。

关键词: 配电网; 柱上断路器; 旁路作业; 绝缘操作杆; 绝缘斗臂车; 模糊层次分析法

FAHP safety analysis of insulation operation of circuit breaker on 10 kV distribution network column

QIN Haohao, FENG Man, WAN Xingchen, DENG Wei

(Wuhan NARI Limited Liability Company, State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to improve the safety of 10 kV distribution network column circuit breaker during replacement or maintenance, and comprehensively consider the risk factors affecting its insulation strength, a bypass operation safety analysis model based on fuzzy analytic hierarchy process is established. Combined with the actual operation scenario, the safety of the two most commonly used tools and instruments, insulated operating rod and insulated bucket truck, in the bypass operation is calculated, analyzed and compared, and then the suitability of the two tools and instruments is evaluated. It is concluded that the insulated bucket truck method is the best scheme for the bypass operation of circuit breaker on 10 kV distribution grid column of a power supply company. The proposed evaluation method can provide reference for the selection of specific operation tools and instruments in distribution network bypass operation.

Key words: distribution network; column circuit breaker; bypass operation; insulated operating lever; insulated bucket truck; FAHP

0 引言

电力的持续供应是人民生活正常运行的重要基石。随着我国经济实力的不断提升, 对我国供电可靠性也提出了更加严格的要求。重大活动、重点项目保电、重要地区

及部门的不间断供电成为供电企业的重要社会责任^[1]。

由于10 kV配电网是直接面向广大客户的用电线路, 10 kV配电网故障设备的旁路作业成为保证供电可靠性、确保用电负荷不丢失及减少停

电次数的重要手段之一^[2-3]。户外运行的柱上断路器作为10 kV配电网中主要设备之一,由于完全暴露在自然环境中,大气中的风霜雨露和污秽等都会对断路器的可靠性造成一定的破坏,主要表现为漏电、传动卡顿等故障,导致需要对其旁路作业进行更换。

根据柱上断路器架设环境的不同和故障程度的差异,通常采用绝缘操作杆+专用工具法或者绝缘斗臂车+专用工具法进行旁路更换检修作业。由于两种方式方法的不同,如何找到合适的评价方法确定选用方法的安全性将具有重大意义。针对以上两种方法作业的特点,本文结合层次分析法、模糊综合评价法两种方法的优点,对浙江某供电公司配电网柱上断路器旁路作业方法的选择进行评判,建立了包括作业环境、柱上断路器、作业工具和作业人员等指标在内的配电网柱上断路器旁路作业安全性评价指标体系,在此评价指标体系的基础上,定量分析作业过程中的危险因素,确定选用不同方法旁路作业的安全等级,为配电网旁路作业方法的选择提供一个新的依据。

1 主要设备及工具安全风险分析

1.1 柱上断路器安全风险分析

由于柱上断路器作业风险主要是对带电作业人员的电击伤害,因此有必要对柱上断路器设备表面的电压和电场分布进行研究,便于作业人员掌握其绝缘薄弱的位置,检修或更换作业时具有针对性,有利于提高作业的安全性。

柱上断路器一般由铸铝外壳、操动机构、固封极柱、一次导体和绝缘拉杆等组成。其中,铸铝外壳接地,极柱下部设有接地螺栓。导体一般固封在极柱之中,极柱内部的导电件、绝缘件结构都将影响柱上断路器表面的绝缘水平。柱上断路器的局部放电多发生在不同材质的绝缘界面、同种介质内部的电场薄弱点和电场强度畸变的绝缘薄弱点。结合带电作业的特点,主要通过对断路器的极柱进行电磁仿真分析,掌握绝缘薄弱点出现的位置。

本文采用Maxwell电磁仿真软件对柱上断路器三维模型进行主回路对地电场仿真分析^[4-5]。电场仿真材料参数见表1。

表1 电场仿真材料参数

Tab. 1 Material parameters of electric field simulation

材料	相对介电常数
空气	1.000 6
极柱外壳、绝缘拉杆	4.4
主回路导体 - 铜	1.0
绝缘密封件 - 硅橡胶	3.0
绝缘拉杆嵌件 - 钢	1.0
外壳、真空管屏蔽罩 - 铝	1.0
真空管外壳 - 陶瓷	6.0

10 kV配电网柱上断路器额定电压为12 kV,相对地的雷电冲击耐受电压为75 kV。因此导体设置电位75 kV,铸铝外壳、绝缘拉杆下嵌件以及极柱下部的接地螺栓设置电位0 V。柱上断路器电压分布云图如图1所示。

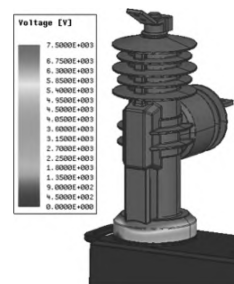


图1 柱上断路器电压分布云图

Fig. 1 Cloud diagram of voltage distribution of circuit breaker on column

由图1可知,除接地螺栓附近以外,极柱外壳底端的电压都仍在千伏级别。

柱上断路器极柱电场分布云图如图2所示。

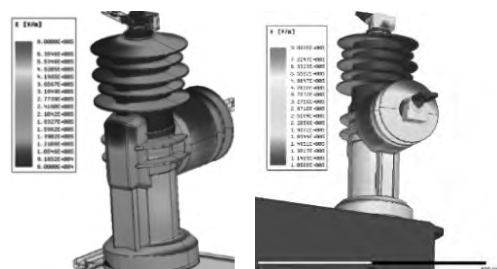


图2 柱上断路器极柱电场分布云图

Fig. 2 Cloud diagram of electric field distribution of pole column of circuit breaker on column

从图2中可以清晰地看出,极柱外表面场强最大值处位于极柱外壳的出线圆柱靠地侧与圆柱体的交接面处,最大场强值约为 9×10^5 V/m;次大值处为极柱外壳中部第二个伞裙与圆柱体的交界面处,场强值约为 8×10^5 V/m。

柱上断路器内部零部件电场分布云图如图3所示。

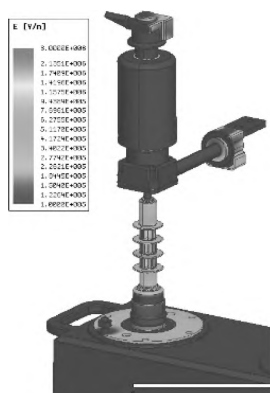


图3 柱上断路器内部零部件电场分布云图

Fig. 3 Cloud diagram of electric field distribution of internal parts of circuit breaker on column

由图3可知,去掉铝合金外壳后,极柱内部零部件中场强最大位置为绝缘拉杆,最大电场强度值约为 2×10^6 V/m,位于纵向第一个伞裙与圆柱体的交接面处。

柱上断路器密封垫电场分布云图如图4所示。

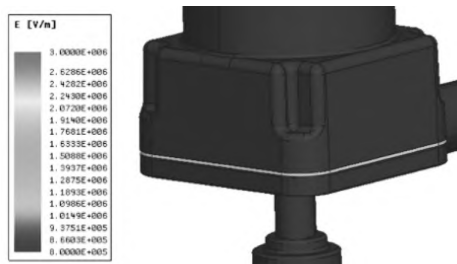


图4 柱上断路器密封垫电场分布云图

Fig. 4 Cloud diagram of electric field distribution of sealing gasket of circuit breaker on column

由图4可知,柱上断路器密封垫的最大场强值约为 3×10^6 V/m。

柱上断路器主要部件的最大电场强度见表2。

表2 柱上断路器主要部件的最大电场强度

Tab.2 Maximum electric field strength of main components of circuit breaker on column

(单位: kV/mm)

部位	极柱外壳表面	绝缘拉杆表面	密封垫表面	防雨帽表面	真空管外壳
柱上断路器	0.9	2.2	3.0	2.6	2.2

由表2结果分析得到,柱上断路器的触电风险点主要为外壳底端,拆除外壳后,主要是在密封垫和绝缘操作杆。

1.2 绝缘操作杆安全风险分析

旁路作业中,为了保证作业人员及设备的安全,除保证最小空气间隙外,作业所使用绝缘工具的有效长度也是保证人员安全的关键之一。绝缘操作杆通常和金属机械部件搭配进行柱上断路器拆除、更换或检修作业,所以在检验绝缘操作杆的绝缘性能时,必须减去金属部件的长度。通常220 kV及以下绝缘工具的电气试验一般采用短时工频耐受电压检验其绝缘强度,因此本文通过更换或检修柱上断路器所用的绝缘操作杆进行工频闪络电压特性研究来确定其安全风险的特点。试验中分别水平和垂直布置绝缘操作杆,通过调节电极之间的距离进行绝缘操作杆工频电压放电试验,得到相应的放电特性^[6-7]。具体如图5所示。水平和垂直布置沿面闪络电压见表3。



图5 绝缘杆水平和垂直布置工频放电试验

Fig. 5 Power frequency discharge test for horizontal and vertical arrangement of insulating rod

表3 水平和垂直布置沿面闪络电压

Tab. 3 Surface flashover voltage of horizontal and vertical arrangement

间隙距离 /cm	20	30	40	50	60	90
水平闪络电压 /kV	89	126	163	200	236	271
垂直闪络电压 /kV	101	148	177	216	247	275

试验表明, 1 m以下的绝缘操作杆在清洁干燥的条件下, 工频放电电压与电极间隙长度基本上成正比例增加。当绝缘工具的长度小于1 m时, 绝缘操作杆的布置方向对其工频闪络电压存在一定影响, 因此在确定评价其安全操作风险时, 按照垂直布置时的工频闪络特性确定绝缘水平。

同时须注意绝缘操作杆作业时的相-地主绝缘, 其安全性要求更高, 若作业过程中未采用绝缘遮蔽措施, 绝缘操作杆的最小有效绝缘长度应在最小电气安全距离的基础上增加0.7 m的人体活动范围, 以便与最小安全距离配合。

综上所述, 10 kV配电线路柱上断路器旁路作业时, 绝缘操作杆的最小有效绝缘长度在无绝缘遮蔽的情况下不得小于1 m, 否则不适宜用绝缘操作杆法进行作业。

1.3 绝缘斗臂车安全风险分析

10 kV配电线路柱上断路器旁路作业时亦可选择绝缘斗臂车进行作业, 为确保作业人员的安全, 主要是考核绝缘斗臂车上臂的绝缘水平^[8]。本文通过施加时长为15 min不同的工频电压来考核某绝缘斗臂车上臂的绝缘强度, 并测试最大的泄漏电流, 试验布置情况如图6所示, 试验结果见表4。

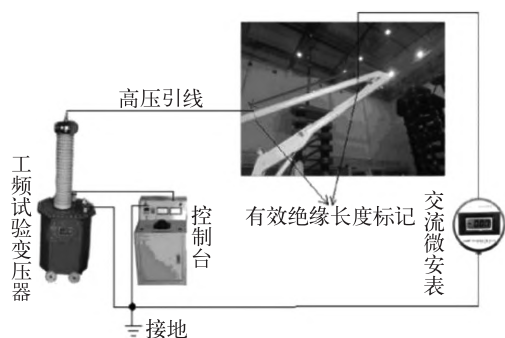


图6 绝缘臂交流耐压泄漏试验布置

Fig. 6 Arrangement of AC withstand voltage leakage test of insulating arm

表4 工频耐压泄漏电流试验结果

Tab. 4 Power frequency withstand voltage leakage current test results

试验电压 /kV	工频耐压泄漏电流试验 (通过耐受)	
	试验距离 /m	泄漏值 / μ A
10	0.5	10.4
20	0.5	38.3
30	0.5	60.7

由泄漏电流测量结果可知: 实验室条件下, 在工频电压为10 kV、20 kV和30 kV时, 绝缘臂在对应长度的泄漏电流值均在200 μ A以下, 且相同气象条件下单位长度泄漏电流值分别为10.4 μ A、38.3 μ A和60.7 μ A。在实际作业中, 由于受人体的活动范围及工器具的长度等因素限制, 人体与带电体的间隙距离最小应保持在0.5 m以上。因此, 斗臂车内带电作业人员在安全间隙距离大于0.5 m时进行旁路作业。

2 基于模糊层次分析法的配电网柱上断路器旁路作业方法安全性评价指标体系

2.1 模糊层次分析步骤

本文选用的是将模糊综合分析和层次分析法结合的模糊层次分析法, 可定量分析出相同作业条件下绝缘操作杆和绝缘斗臂车法的安全性, 其分析步骤主要分为5步, 如图7所示^[9-10]。



图7 分析步骤

Fig. 7 Analysis steps

2.2 构建安全性评价指标体系

配电网柱上断路器旁路作业方法安全性评价体系通常由目标层、子目标层和指标层等若干递阶层次因素构成, 见表5。

表5 评价指标体系
Tab. 5 Evaluation index system

子目标层	指标层
作业环境风险因素 (B1)	气压及温湿度 (C11)、风速 (C12)、接地电阻 (C13)、作业空间环境 (C14)、外绝缘条件 (C15)
现场作业管理风险因素 (B2)	操作证管理 (C21)、工作票管理 (C22)、监护管理 (C23)、应急管理 (C24)
柱上断路器风险因素 (B3)	绝缘水平 (C31)、动作可靠性 (C32)、负荷情况 (C33)、故障位置 (C34)
作业人员风险因素 (B4)	操作培训 (C41)、生理条件 (C42)、心理素质 (C43)、专业技能 (C44)
作业工具风险因素 (B5)	绝缘强度 (C51)、作业强度 (C52)、绝缘手套等配套情况 (C53)、机械强度 (C54)、协同程度 (C55)

由于评价体系中有些指标因素有具体的数据反映；有些指标只能通过专家主观评定，不同状态之间没有明确的界限；而另外一些指标因素只有安全和危险两种状态，因此将配电网柱上断路器旁路作业系统安全性评价中的判断因素分为量化型、判定型和判断型三类。

(1) 量化型

这类指标有确切的测量数据和数值标度，可以直接反映设备当前的运行状态，也可以根据历史运行记录和统计数据得出。

(2) 判定型

不能用具体的数值来度量，受专家的知识水平和工作经验等主观因素判断影响较大。

(3) 判断型

这类指标各状态之间有明确的划分标准，评判时间段内只能属于某一个状态，如工频耐压试验等，只有耐受或者击穿。

判断相同层次中各元素的重要程度，采用1~9标度法确定，并定量其重要程度，最终形成判别矩阵。为保证判断各元素重要程度的准确性，确定下一层指标权重，运用乘积方根的方法后进行归一化，得到最大特征值，对矩阵的合理性进行一致性检查。

2.3 模糊综合评判

子目标层指标因素均由下一层指标层的因素决定，子目标层的每个因素的评判是基于指标

层矩阵的多因素综合评判所得。通过运用模糊合成算子，将特征量的状态与其权重相乘，然后取其中最大值来反映不同特征量在单个评价体系中的重要程度，由下至上先后通过两级模糊综合评判，得到评价值 B ，最后根据 B 值的大小来判断两种作业方法的安全性程度。

2.4 否决权的指标因素

实际作业时，在配电网柱上断路器旁路作业系统安全状况评价因素中，相对于其他的权重等级为极重要的特征量，某些权重等级为极重要的特征量对配电网旁路作业安全运行有直接的影响，一旦这些指标处于不安全状态，应立即停止作业，否则将会引起绝缘击穿、触电和负荷丢失等严重事故。因而在本文评价方法中引入“否决权的指标因素”，若该因素处于不安全或不适宜状态，则无须进行后续评价，直接将该方法的安全性评定为不安全，且不选择。

本文否决涉及的指标因素有作业环境中的空间环境、作业工具的绝缘强度和作业人员的操作证管理。

3 实例

国网浙江某供电公司某10 kV配电网柱上断路器出现机械联锁变形失效现象，需要进行带负荷更换作业。作业环境适合绝缘斗臂车+绝缘操作杆进行旁路作业，作业形式如图8所示。

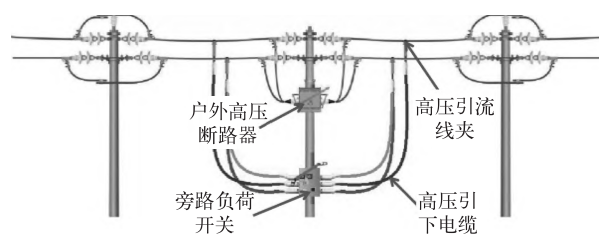


图8 作业形式示意图

Fig. 8 Schematic diagram of operation form

由于运行中的架空线路具有一定的对地电容，运行中的线路和旁路使用的柔性电缆具有较大的对地电容，在断开的过程中，均可能产生过电压，断路器断口可产生4倍的过电压，所以对操作工器具的绝缘要求特别严格。

3.1 两种操作方法评价对比

通过查阅工具的检测试验数据等资料,且专家现场根据评价指标逐项评价,得到绝缘操作杆方法和绝缘斗臂车法的安全性评价结果见表6。

表6 某供电公司配电网柱上断路器旁路作业两种工器具安全性评价结果对照表

Tab. 6 Comparison of safety evaluation results of two tools and instruments for bypass operation of circuit breaker on distribution network column of a power supply company

目标层指标	准则层指标	权重值	绝缘杆评价价值	绝缘斗臂车评价价值
B1 权重值: 0.088 6	C11	0.122 5	0.758 3	0.758 3
	C12	0.206 5	0.624 3	0.605 5
	C13	0.314 9	0.634 2	0.634 2
	C14	0.246 8	0.732 1	0.587 6
	C15	0.109 3	0.683 2	0.675 9
B2 权重值: 0.085 5	C21	0.295 7	0.745 3	0.745 3
	C22	0.265 4	0.704 0	0.704 0
	C23	0.184 6	0.512 1	0.483 3
	C24	0.254 3	0.607 3	0.558 4
B3 权重值: 0.256 9	C31	0.265 4	0.721 7	0.721 7
	C32	0.254 3	0.574	0.674
	C33	0.184 6	0.612 9	0.829 2
	C34	0.295 7	0.554 5	0.764 2
B4 权重值: 0.140 8	C41	0.494 5	0.687 3	0.574 5
	C42	0.351 4	0.578 9	0.699 8
	C43	0.113	0.701 5	0.652 5
	C44	0.041 1	0.694 5	0.656 6
	C51	0.317 9	0.597 6	0.753 7
B5 权重值: 0.428 2	C52	0.111 7	0.573 3	0.712 3
	C53	0.184 1	0.595 4	0.856 6
	C54	0.242 4	0.607 2	0.736 8
	C55	0.143 9	0.685 3	0.706 8

其中子目标层的指标权重判断矩阵中最大特征值为5.25,随机一致性比值为 $0.055 < 1$,此矩阵符合规定的一致性,即证明所确定的目标层指标各因素的权重是合理的。准则层随机一致性比值CR均小于0.1,这些指标层中各影响因素权重分配也是合理的。

3.2 分析

在环境作业风险因素中,由于绝缘斗臂车

需要的工作半径较绝缘杆法作业操作要求更高,绝缘操作杆适应性更强,故该项得分比绝缘斗臂车高。

在现场作业管理风险因素中,由于两种方法管理因素条件相差不大,因此专家打分趋于一致。

柱上断路器风险因素中,由于现场断路器初步判断故障是在机械联锁板有变形,未出现绝缘故障,绝缘操作杆适应负荷转移情况较差,同时绝缘斗臂车更适宜现场故障检修,所以针对故障位置得分较高一些。

作业人员风险因素中,由于斗臂车属于高空作业,对同一批操作人员的操作培训、心理要求和专业技能更为严格,所以得分较绝缘杆操作法低。

作业工具风险因素中,由于绝缘杆绝缘水平和机械强度较绝缘斗臂车低,绝缘手套、拆解和更换工具等要求工具较多,作业强度和人员协同程度较高,故得分较少。

将指标权重值与评价价值进行矩阵计算,最终的绝缘杆法和绝缘斗臂车法综合评价价值分别为0.626 6和0.714 6,绝缘斗臂车法更适合该供电公司在此次配电网柱上断路器旁路作业中使用。

4 结束语

本文通过仿真分析软件建立了10 kV柱上断路器的仿真模型,分析计算了其部位电压和电场分布特点,并进行了绝缘操作杆和绝缘斗臂车的绝缘试验,建立了以安全为目标层的综合评价指标体系,评估绝缘操作杆法和绝缘斗臂车法两种作业方法的适用性,得到以下结论:

1) 柱上断路器作业时,主要的安全风险点在其极柱外壳底端,绝缘操作杆的最小有效绝缘长度在无绝缘遮蔽的情况下不得小于1 m,绝缘斗臂车内带电作业人员在安全间隙距离大于0.5 m时方可进行旁路作业。

2) 针对某供电公司10 kV配电线路柱上断路器的旁路检修作业,采用模糊层次分析法对两种方法的安全性进行了实例评价,得到绝缘斗臂车

法更适宜当下的作业，证明了本文所提方法的有效性。

参考文献

- [1] 刘毅彬, 邓鹤鸣, 叶征, 等. 东莞地区10 kV配网断线事故分析及应对措施[J]. 电瓷避雷器, 2012, 135(3): 91-95.
- [2] 王友旭, 宋友, 聂德鑫, 等. 10 kV配网混联线路故障分析及应对措施[J]. 电瓷避雷器, 2019(1): 133-137, 144.
- [3] 欧相林, 邓鹤鸣, 王力农, 等. 10 kV配电线路带电作业安全综合评价应用分析[J]. 高压电器, 2013, 49(2): 55-60.
- [4] 古王荣, 吉利, 彭捷. 交流旁路开关的传动设计方案[J]. 高压电器, 2018, 54(3): 219-224.
- [5] 崔玉坤, 曹安全, 刘宇, 等. 35 kV旁路开关隔离部位电场分析及优化设计[J]. 高压电器, 2021, 57(6): 222-227.
- [6] 邓慰, 庄文兵, 秦瀚瀚, 等. ± 200 kV换流站典型电极安全距离试验研究[J]. 高压电器, 2017, 53(12): 112-118.
- [7] 吴田, 陈聪, 刘磊, 等. 绝缘操作杆表面状态与沿面放电关系试验研究[J]. 电力工程技术, 2020, 39(6): 132-137.
- [8] 邓鹤鸣, 蔡炜, 于鑫, 等. 66 kV输电线路绝缘斗臂车带电作业方式及安全防护[J]. 高电压技术, 2015, 41(9): 3091-3096.
- [9] 刘会家, 江泓, 吴田, 等. 基于FAHP的 ± 800 kV输电线路带电作业的等电位方式研究[J]. 智慧电力, 2021, 49(3): 80-87.
- [10] 王建, 邓慰, 李炼炼, 等. 高压试验安全模糊综合评价方法研究[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2018(4): 95-99.

作者简介

秦瀚瀚(1989—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统电磁兼容、输电线路电磁环境方向的研究工作。

(收稿日期: 2022-03-31)