

110 kV 同塔双回线路感应电压和感应电流对人体的危害研究

史华勃¹, 丁理杰¹, 彭施语², 梁晓斌¹, 张 华¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610072;

2. 四川水利职业技术学院 四川 都江堰 611830)

摘要: 针对 110 kV 同塔双回线路一回运行、一回停运 检修人员对感应电压和感应电流危害认识不足的问题, 以某次感应电致死事故为原型, 量化分析了 110 kV 线路典型设计方案下人体触电时承受的感应电压和感应电流。在分析人体电阻以及人体伤害与感应电压、感应电流和持续时间关系基础上, 研究了检修人员受感应电伤害风险与线路长度、运行线路潮流的关系。研究成果对于提升现场操作人员的安全意识, 减少安全生产事故具有重要意义。

关键词: 110 kV; 同塔双回; 感应电压; 感应电流; 人体危害

Abstract: Aiming at the problem that maintenance personnel lack of knowledge about induced voltage and induced current on the non-energized line while another line is energized in 110 kV double-circuit transmission lines, the quantitative analysis of induced voltage and induced current bore by human body when getting an electric shock is carried out based on the typical 110 kV line design. Based on the analysis of human body resistance and the relationship between harms to human body, the induced voltage and induced current and their duration, the relationship between the risk of injury by induced electricity, line length and line flow of energized line is studied. The research results are of great significance to improve the safety consciousness of operators and reduce production safety accidents.

Key words: 110 kV; double-circuit transmission line on same tower; induced voltage; induced current; harm to human body

中图分类号: TM726.1 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2017)03-0052-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.03.012

0 引言

同塔双回线路一回正常运行、另一回停运检修时, 由于回路之间的耦合作用, 在被检修线路上将会存在耦合电压。为了安全起见, 在检修线路时, 通常需要将该检修线路的两端接地, 这样, 在接地处将会流过一定的感应电流。若接地点断开, 或经人体接地, 人体将承受较高的感应电压; 同时人体上将流过感应电流, 对人身造成危害。

众多学者对 500 kV 及以上电压等级的同塔线路感应电压和感应电流的理论计算和仿真分析进行了研究。文献[1-3]对 1 000 kV 特高压线路感应电流和感应电压进行了分析。文献[4]对 750 kV 输电线路带电作业安全防护进行了研究。文献[5]对同塔架设的 220 kV/500 kV 输电线路感应电流与感应电压进行了仿真分析。文献[6]对 500 kV 同塔双回输电线路下平行运行的 0.38 kV 线路感应电

压和感应电荷进行了研究。文献[7]对一起 500 kV 隔离开关操作中感应过电压事故进行了分析。

一般情况下, 感应电压和感应电流水平分析主要用来校核接地刀闸参数, 为运行、设计部门提供参考。但运行线路对停运线路感应电对人体的危害研究较少, 特别是 110 kV 及以下电压等级的同塔线路, 由于线路短、电压等级低, 其感应电压和感应电流对人的危害未得到足够重视, 从而导致现场操作时常有人身伤亡事故发生, 因此, 研究 110 kV 同塔线路的感应电压和感应电流对人体的伤害十分必要。

按照国家电网公司 110 kV 同塔双回线路典型设计方案, 采用 PSCAD/EMTDC 软件建立了 110 kV 同塔双回线路分布参数模型。分析了各种接地方式下 110 kV 线路感应电压和感应电流, 重点研究了停运线路检修, 线路一侧某相接地刀闸断开并通过人体接地情况下的感应电压和感应电流。在研究人体电阻、人体伤害与感应电压和感应电流以及持续时间的基础上, 量化分析了检修人员人身伤害风险与

线路长度、运行线路潮流的关系。研究成果对于提升现场操作人员的安全意识,减少安全生产事故具有重要意义。

1 人体伤害与感应电压、感应电流的关系

1.1 人体电阻

人体阻抗通常包括内部阻抗和外部阻抗,外部阻抗与触电时所穿衣服、鞋袜以及身体的潮湿情况有关,从几千欧到几十兆欧不等;内部阻抗与触电者的皮肤阻抗和体内阻抗有关。

人体阻抗并非纯电阻,但主要由人体电阻决定。人体电阻也不是一个固定的数值,一般认为干燥的皮肤在低电压下具有相当高的电阻,约100 kΩ。当电压大于300 V时,这一电阻便下降为约1 000 Ω。表皮具有这样高的电阻是因为它没有毛细血管,手指某部位的皮肤还有角质层,角质层的电阻值更高,而不经常摩擦部位的皮肤的电阻值是最小的。皮肤电阻还同人体与带电体的接触面积及压力有关。当表皮受损暴露出真皮时,人体内因布满了输送盐溶液的血管而具有很低的电阻。

一般认为,接触到真皮里,一只手臂或一条腿的电阻大约为500 Ω,因此,由一只手臂到另一只手臂或由一条腿到另一条腿的通路相当于一只1 000 Ω的电阻。假定一个人用双手紧握带电体,双脚站在水坑里而形成导电回路,这时人体电阻基本上就是体内电阻,约为500 Ω。一般情况下,人体电阻可按1 000 Ω~2 000 Ω考虑。

大的接触表面积,电流路径为手到手,50 Hz/60 Hz交流接触电压为25 V至700 V,50%被测对象的人体总阻抗^[8]如图1所示。

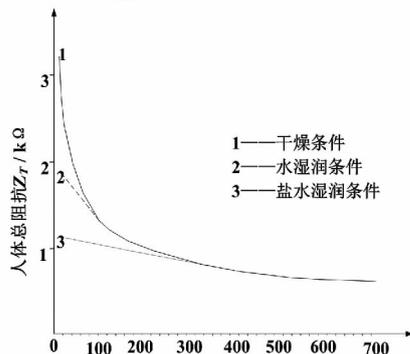
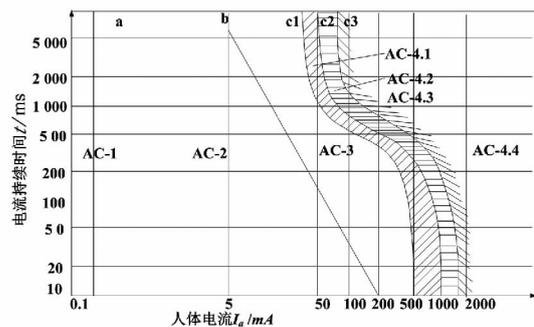


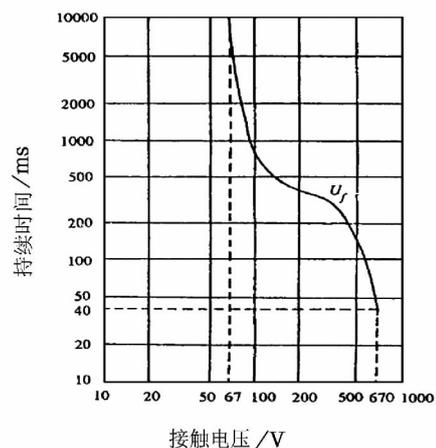
图1 人体电阻随接触电压变化趋势

1.2 感应电压、感应电流与持续时间关系

人体承受的感应电压和感应电流与持续时间的关系^[8-9]曲线如图2所示。图2(a)电流曲线中,曲线b的左侧,AC-1至AC-2区域对人体影响较小,不会造成大的伤害;AC-3区域可使人产生不自主的肌肉收缩、呼吸困难、可逆性的心脏功能障碍;AC-4曲线,曲线C1右侧即可使人产生心室纤维性颤动,C2-C3区域可使心室纤维性颤动的概率大于50%。根据图2(b)电压曲线,即使是220 V的市电,承受时间0.5 s以上就会有危险,670 V以上的电压承受40 ms就会发生危险。



(a) 人体承受电流与持续时间的危险曲线



(b) 人体承受接触电压与持续时间的危险曲线

图2 人体承受的电压、电流与持续时间的关系

2 110 kV 线路感应电压和感应电流

2.1 110 kV 线路典型设计方案

按照国家电网公司110 kV输电线路通用设计^[10],1D1子模块为海拔1 000 m以内,设计基本风速23.5 m/s(离地10 m),覆冰厚度10 mm,导线LGJ300/40的双回路铁塔,地线JLB-100。该模块直线塔平地 and 山区共用1套铁塔。耐张塔由1D2

子模块兼,悬垂串按 I 型布置,共 4 种塔型,杆塔具体设计条件和杆塔型号、尺寸见文献[10]。导地线参数如表 1 所示。

表 1 导地线参数

导地线	直流电阻/($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	计算半径/mm
导线	0.096 14	11.97
地线	0.719 3	6.1

2.2 典型接地方式下的感应电压和感应电流

按照前面 110 kV 线路典型设计方案建立电磁暂态仿真模型,其中线路模型为考虑频率特性的分布参数模型;参考 2016 年 4 月某次感应电致死事故发生时的线路长度,仿真中设定为 40 km,导线型号为 LGJ300/40,地线型号为 JLB-100。仿真中:导地线弧垂均取 10 m,绝缘子长度 1 m;线路按逆相序悬挂;110 kV 系统短路电流一般不超过 20 kA。计算时:线路两侧系统短路电流按 5 kA 计算等值阻抗;LGJ300 线路热稳极限按 100 MW 考虑。110 kV 系统稳态运行最高电压为 $110 \times (1 + 7\%) = 117.7$ kV,在计算中取 115 ~ 117 kV。线路等效阻抗参数如表 2 所示。

表 2 LGJ300 线路参数

长度/km	R_1/Ω	X_1/Ω	B_1/S
40	3.9	15.7	117.8×10^{-6}

典型接地方式下的感应电压和感应电流如表 3 所示。

表 3 典型接地方式下的感应电压和感应电流

接地方式	潮流 /MW	感应电压 /kV			感应电流 /A		
		A相	B相	C相	A相	B相	C相
一端接地	100	0.59	0.09	0.55	0.38	0.04	0.42
	50	0.29	0.04	0.27	0.38	0.04	0.42
两端接地	100	0	0	0	33.13	1.53	31.13
	50	0	0	0	16.34	0.76	15.36
不接地	100	3.26	0.48	3.98	/	/	/
	50	3.24	0.50	4.00	/	/	/

由以上计算,线路一端接地时,停运线路感应电压主要是电磁感应分量,其大小与线路潮流成正比;感应电流主要是静电感应分量,其大小与线路潮流无关,感应电压约 600 V,最大感应电流约 420 mA。线路两端均接地时,流过接地刀闸的电流与线路潮流成正比关系,最大电磁感应电流约 33 A,感应电压为 0。被检修线路不接地,停运线路两侧最大静电感应电压约 4 kV,与线路潮流无关。

2.3 人体触电时的感应电压和感应电流

110 kV 同塔双回线路停运检修时,一般线路两侧均通过线路接地刀闸接地,人体最可能受感应电压、感应电流危害的风险为:在停电线路工作点未装设人工接地线,停运线路一侧正常接地,另一侧由于人为原因使某接地相断开,此时,人身将承受一定的感应电压,并流过一定的感应电流。

2016 年 4 月,某地区实际生产中已发生过对线路侧的隔离开关检修时,检修人员未加挂接地线,在擅自将线路隔离开关 A 相线路侧接线板拆开时发生人身触电死亡事故。人体在此情况下的触电示意图如图 3 所示。

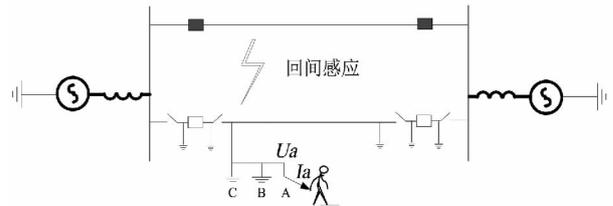


图 3 停运线路上人体触电示意图

1) 运行线路潮流 100 MW,人体电阻从 3 000 Ω 下降至 1 000 Ω 时,拆开线路接地刀闸,通过人体接地时的感应电压和感应电流变化趋势如图 4 所示。

停运线路在此接地方式下,人体承受的感应电压基本不变,最大约 700 V,且基本不随人体电阻变化;人体接入 AC 相感应电压最高,接入 B 相最低,这主要与两回导线的排列方式相关。感应电流随人体电阻的减小将逐渐增大,从 200 mA 增大到 700 mA。

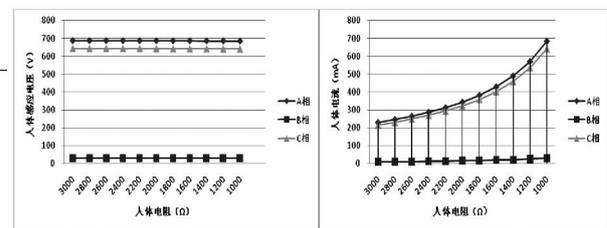


图 4 感应电压、电流随人体电阻变化趋势

2) 人体电阻 2 000 Ω 条件下,感应电压和感应电流随运行线路潮流变化趋势如图 5 所示。

由以上计算,人体电阻一定时,人体接触电压和流过人体的电流与运行线路潮流成正比;线路潮流 10 MW 时,人体最大感应电压约 70 V,最大感应电流约 35 mA;线路潮流达到 20 MW 时,人体感应电压可达 140 V,流过人体的电流可达 70 mA。

3) 运行潮流线路 100 MW,人体电阻 2 000 Ω 条件下,感应电压和感应电流随线路长度变化趋势如

图6所示。

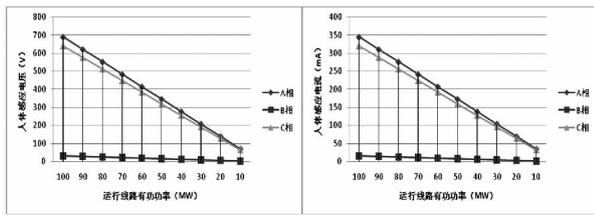


图5 感应电压、电流随运行线路潮流变化趋势

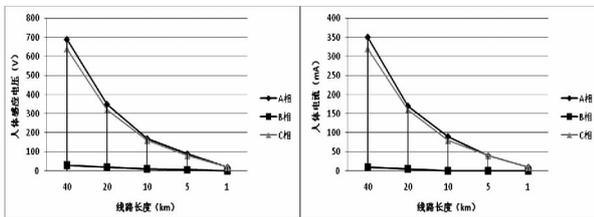


图6 感应电压、电流随线路长度变化趋势

由以上计算,运行线路潮流一定时,人体接触电压和流过人体的电流与线路长度成正比;线路潮流100 MW,线路长度5 km以下时,人体接触电压在90 V左右,人体电流约40 mA。考虑接触电压100 V以下时,人体电阻在2 000 Ω以上,实际通过人体的电流可能比计算值略小,但对人体仍然存在危险。线路长度1 km以下,或者在母线上操作时,人体感应电压约20 V,感应电流约10 mA。线路长度远小于5 km不装设接地线在停电线路检修时风险较小。

装设人工接地线后,即使一相接地刀闸通过人体接地,人体上的感应电压将被人工接地线强制钳位为0,感应电流全部通过接地线入地,此时可以保证人身安全。

3 人身伤害风险分析

按前面计算,线路长度一定时,接地端一相通过人体接地后,人承受的感应电压、感应电流与运行线路潮流成正比。

1) 按人体正常情况下的电阻2 000 Ω计算,线路40 km,潮流100 MW情况下,人体承受的最大感应电压约700 V,人体流过的最大感应电流约350 mA;即使线路潮流20 MW情况下最大感应电压约140 V,人体流过的最大感应电流约70 mA,会对人体造成巨大危害。

实际上,人体在承受300 V以上电压时,人体电阻将会下降至1 000 Ω左右;电压100 V以上,人体

电阻仍然低于2 000 Ω,约1 500 Ω。线路潮流100 MW情况下,人体承受的最大感应电流约700 mA;若线路潮流20 MW,最大感应电流为93 mA。

由以上分析,停运线路一端一相通过人体接地时,人体通过的电流和接触电压远大于人体对电压和电流的耐受能力,因此,人在触电瞬间如果不能快速脱离带电体,必然会造成人身伤亡。

2) 运行线路潮流一定时,人体接触电压和流过人体的电流与线路长度成正比;线路潮流100 MW,线路长度5 km以下时,人体接触电压在90 V左右,人体电流约40 mA。考虑接触电压100 V以下时,人体电阻在2 000 Ω以上,实际通过人体的电流可能比计算值更小,但仍然有风险。线路长度1 km以下,或者在母线上操作时,人体感应电压约20 V,感应电流约10 mA,人体可以承受。

4 结论

110 kV同塔双回线路,一回停电检修时,若拆开一端接地点的其中一相,对人身将产生严重的危害甚至死亡。

在此接地方式下,感应电压和感应电流主要是电磁感应分量,人体触电时承受的感应电压和感应电流与运行线路潮流、线路长度成正比;感应电压与人体无关,感应电流随人体电阻减小而增大。

线路长度大于5 km或运行线路潮流大于20 MW,若直接拆开一相接地刀闸存在极大的人身安全风险;在实际生产中,应严禁此类事件发生。

对停运线路隔离开关进行检修,或者其他可能失去接地保护的情况,必须对停运线路先装设人工接地线再开展工作才能保证人身安全。

参考文献

- [1] 刘浩军, 阎国增, 王少华, 等. 1 000 kV 皖南—浙北特高压交流线路静电感应电压分析[J]. 高电压技术 2015, 41(11): 3687-3693.
- [2] 李宝聚, 周浩. 淮南—皖南—浙北—沪西1 000 kV 交流同塔双回线路架空地线感应电压和感应电流仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(10): 86-89.
- [3] 周浩. 特高压交直流输电技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2014.

(下转第94页)

容易造成 NO_x 排放产生较大波动。

运行过程中,建议通过调整一次风量等参数严格控制平均运行床温 < 910℃,有效避免变负荷过程 NO_x 排放产生较大波动。结合府谷煤燃尽特性、NO_x 和 SO₂ 排放,协调控制运行床温、SNCR 脱硝喷氨量、炉内投入石灰石量和运行氧量等参数,实现府谷煤的洁净、经济和高效燃烧。

参考文献

[1] 岑可法. 循环流化床锅炉理论与运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.

[2] 刘行磊, 宋刚, 徐国辉, 等. 东方锅炉 300 MW 机组 CFB

锅炉混煤燃烧试验研究[J]. 东方电气评论, 2015(1): 32-36.

[3] 刘德昌, 阎维平. 流化床燃烧技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.

作者简介:

彭北松(1961), 工程师, 从事循环流化床锅炉调试工作;

刘行磊(1984), 硕士研究生、工程师, 从事循环流化床锅炉研制工作;

丁芸(1968), 从事循环流化床机组调试、运行优化及生产技术管理工作。

(收稿日期: 2017-01-13)

(上接第 55 页)

[4] 胡毅, 王力农, 刘凯, 等. 750 kV 输电线路带电作业安全防护研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(10): 1-4.

[5] 班连庚, 王晓刚, 白宏坤, 等. 同塔架设的 220 kV/500 kV 输电线路感应电流与感应电压仿真分析[J]. 电网技术, 2009, 33(6): 45-49.

[6] 马爱清, 徐东捷, 王海波, 等. 500 kV 同塔双回输电线路下平行运行 0.38 kV 线路时的感应电压和感应电荷[J]. 高电压技术, 2015, 41(1): 306-312.

[7] 李长益, 魏旭, 张劲松. 上河变电所 500 kV 隔离开关操作中感应过电压事故分析[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(4): 85-88.

[8] GB/T 13870.1-2008/IEC/TS60479-1:2005, 电流对人和家畜的效应[S].

[9] GB/T 16895.11-2011, 低压电气装置对暂时过电压和高压系统与地之间的故障的防护[S].

[10] 刘振亚. 国家电网公司输变电工程通用设计 110(66) kV 输电线路分册(2011年版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.

作者简介:

史华勃(1987), 硕士、工程师, 主要从事电力系统稳定分析与控制的研究。

(收稿日期: 2017-01-24)

(上接第 77 页)

管理方面的现状和存在困难,提出了配置文件的全过程管控流程,研究了以 SCD 文件语法和语义校验、SCD 文件过程层 CRC 计算、SCD 文件对比、SCD 文件的虚端子图形化展示 4 个方面为核心的配置文件管控系统。实现了配置文件的全过程管控,保证了配置文件的安全性、完整性、一致性、唯一性。

其成果已经运用在实际工程调试中。此应用缩短了实际智能变电站工程投运周期,增加了 SCD 文件的正确率和时效性,从而提升了 SCD 文件的规范度。

参考文献

[1] 国家电网公司. Q/GDW 383-2009, 智能变电站技术导则[S].

[2] 陈安伟. IEC 61850 在变电站中的工程应用[M]. 北

京: 中国电力出版社, 2012.

[3] 胡道徐, 沃建栋. 基于 IEC 61850 的智能变电站虚回路体系[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(17): 78-82.

[4] 王松, 宣晓华, 陆承宇. 智能变电站配置文件版本管理方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17): 1-4.

[5] 张沛超, 姜健宁, 杨漪俊, 等. 智能变电站配置信息的全生命周期管理[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(10): 85-89.

[6] 刘明忠, 童晓阳, 郑永康, 等. 智能变电站配置描述虚端子多视角图形化查看系统[J]. 电力系统自动化, 2014, 39(22): 104-109.

[7] 高磊. IEC 61850 SCL 配置文件比对工具的研究与实现[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(20): 88-91.

作者简介:

林波(1987), 助理工程师, 主要研究方向为智能电网技术、继电保护及自动化技术。

(收稿日期: 2017-01-13)