

降压运行交流架空输电线路出线避雷器绝缘配合问题

刘 静¹, 张名祥², 王庆军¹, 程登峰¹

(1. 安徽省电力科学研究院, 合肥 230022; 2. 安徽省电力设计研究院, 合肥 230000)

摘要: 某省某降压运行线路, 因遭受远区雷击发生跳闸事故, 线路绝缘未闪络, 站内避雷器损坏。通过对线路雷击跳闸分析、避雷器解体检查以及仿真计算, 判断线路出线避雷器损坏的原因是降压运行线路因线路参数发生变化, 在特殊工况下承受较大操作冲击电流, 超过避雷器所能承受能量, 使避雷器击穿。通过理论和电磁暂态仿真计算, 提出降压运行线路, 应校核避雷器标称放电电流和线路放电等级, 合理选择避雷器的技术参数, 提高线路运行可靠性和避雷器使用寿命。

关键词: 降压运行; 无间隙金属氧化物避雷器; 绝缘配合; 标称放电电流; 线路放电等级; 击穿; 电磁暂态仿真计算

中图分类号: TM726

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2014)06-0128-05

Inaccuracy of Insulation Coordination for MOA of Step-down Operation AC Overhead Transmission Line

LIU Jing¹, ZHANG Mingxiang², WANG Qingjun¹, CHENG Dengfeng¹

(1. Anhui Electric Power Research Institute, Hefei 230022, China;

2. Anhui Electric Power Design Institute, Hefei 230000, China)

Abstract: In this paper, starting from an accident of step-down operation line, which MOA in substation damaged but line insulation not flashover during a lightning shield failure occurred far from substation. Through the analysis of the shield failure accident, disintegration of MOA, via simulating calculation, conclude that MOA breakdown when it can't withstand the power under special conditions. Through theoretical and simulation calculation, it suggest that discharge current of arrester and transmission line discharge class of step-down operation line should be checked to improve the reliability of transmission line and service life of MOA.

Key words: step-down operation; metal-oxide surge arrester without gaps(MOA); insulation coordination; nominal discharge current of arrester; transmission line discharge class; puncture; EMTP-simulation

0 引言

为增强电网规划的近远期适用性, 节约投资成本, 500 kV 降压运行线路及变电站在多地得到应用。安徽省黄山地区目前主要由 2 条 500 kV 线路(以下简称线路 1、线路 2)提供电源, 两条线路按照 500 kV 电压等级设计, 采用同塔双回架设, 线路全长 133 km, 目前降压为 220 kV 运行, 站内设备按照 220 kV 电压等级设计。在一次分叉雷绕击线路两相, 造成线路跳闸事故中, 线路绝缘未发生闪络, 站内该线路出线避雷器发生击穿。通过查线、避雷器

解体检查以及仿真计算^[1], 确定该次故障原因为避雷器标称放电电流和线路放电等级选择不合理, 造成特殊工况下避雷器因能量吸收能力不足而发生击穿。对该降压运行线路、避雷器参数进行重新校核, 提出了降压运行线路避雷器选型方法。

1 故障概况

1.1 线路故障分析

某日, 降压运行线路 1 发生 A、C 相间短路, 开关三跳, 经巡线发现某基杆塔大号侧 A、C(A 相为同塔双回路的右上相, C 相为同塔双回路的右中相) 第 3 间隔棒处均有明显的放电烧灼痕迹, 见图 1。根

收稿日期: 2013-12-18; 修回日期: 2014-01-20

据雷电定位系统查询,故障时间点前后,故障线路周边有多处雷电活动记录,其中故障时间故障杆塔附近有-38.6 kA落雷。雷电记录与故障点塔号、跳闸时间、测距信息吻合,判断该次故障原因为分叉雷击中线路右上相(A相)和右中相(C相)导线造成相间短路,引发保护装置动作;随后进行2次试送电不成功,均为A相故障,第2次试送电后检查站内线路出线避雷器,A相绝缘电阻为零,放电计数器有放电痕迹。



图1 A相、C相导线放电痕迹

Fig. 1 Discharge traces of conductors

1.2 避雷器故障

两条降压运行线路出线避雷器型号为Y10W-204/532W,额定电压为204 kV,事故发生前运行情况良好,对故障相避雷器解体后发现:

1)通过解体检查,未发现避雷器装配工艺缺陷,密封良好,避雷器内部无受潮痕迹,避雷器阀片受潮原因排除,见图2;



图2 防爆板密封良好、芯体金属件无锈迹

Fig. 2 Sealing good & core metal without rust

2)经对未击穿阀片进行处理后,测试其电气参数恢复正常,抽检氧化锌电阻片未发生劣化,质量合格;

3)从避雷器未受潮,而避雷器芯体上部电阻片发生沿侧面闪络、下部电阻片发生热击穿,避雷器故障过程应当是部分电阻片先发生热击穿,避雷器绝缘降低;从避雷器本次故障防爆板未冲开情况看,故障过程持续时间较长^[2],见图3;



图3 阀片击穿、烧蚀痕迹

Fig. 3 Puncture & ablative of non-linear metal-oxide resistor

4)从解体情况分析,只能判断避雷器承受过压、过流造成闪络和击穿,无法判断是因承受过压或产

品质量问题。

2 过电压分析

2.1 雷电过电压

雷击故障点位于距离避雷器故障变电站88.4 km处,雷电流幅值为-38 kA,故障杆塔绕击耐雷水平约为28 kA,由于雷电流产生分叉绕击与AC两相,雷电流幅值进一步降低,因此未造成线路绝缘闪络,且此雷电波的传播时间已超过了雷电流波的持续时间,雷电波侵入波通过线路衰减后对站内设备不构成伤害^[3],根据雷电定位系统查询结果,该时间段,官山变进线段未有雷击记录,雷电侵入波影响可排除。

2.2 雷击跳闸操作过电压影响

根据故障录波图显示,雷击跳闸时,AC相短路发生后,短路故障持续35 ms,两侧开关跳闸,线路负荷为140 MV·A,通过电磁仿真计算软件ATP-EMTP,该过程的暂态过电压计算结果见表1。

表1 雷击跳闸操作过电压计算结果

Tab. 1 Operating overvoltage result of lightning trip-out

线路1	操作过电压/kV	过电压倍数/p.u.	避雷器放电电流/kA	最大短路电流/kA
A	410	1.99	11.60	12.3
B	400	1.94	0.64	—
C	410	1.99	11.30	12.3

试送电操作过电压计算结果见表2。

表2 试送电操作过电压计算结果

Tab. 2 Operating overvoltage result of trial line energization

试送电	合闸过电压(峰值)/kV	合闸45 ms后分闸过电压(峰值)/kV	最大过电压倍数/p.u.
假设A相避雷器此时完好	350	350	1.69
假设A相避雷器此时损坏,A相高阻接地	—	350	1.69

注:操作过电压 $1 \text{ p.u.} = \sqrt{2} U_m / \sqrt{3}$, U_m 为系统最大运行电压^[4]。

通过计算可以判断,以上过程线路操作过电压水平满足要求^[4],但雷击跳闸时,线路短路电流最大值为12.3 kA,见图4,与故障录波结果相吻合;经计算短路及跳闸过程中,避雷器放电电流为12.3 kA,高于避雷器规定的10 kA放电电流,持续时间约为0.4 ms,见图5。

根据避雷器长持续时间电流冲击耐受试验

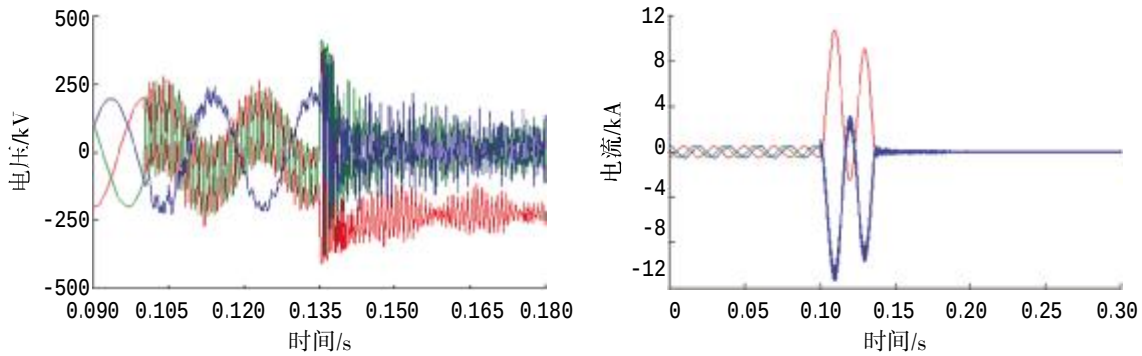


图 4 线路操作过电压、短路电流计算结果

Fig. 4 Operating over-voltage & short circuit current of transmission line

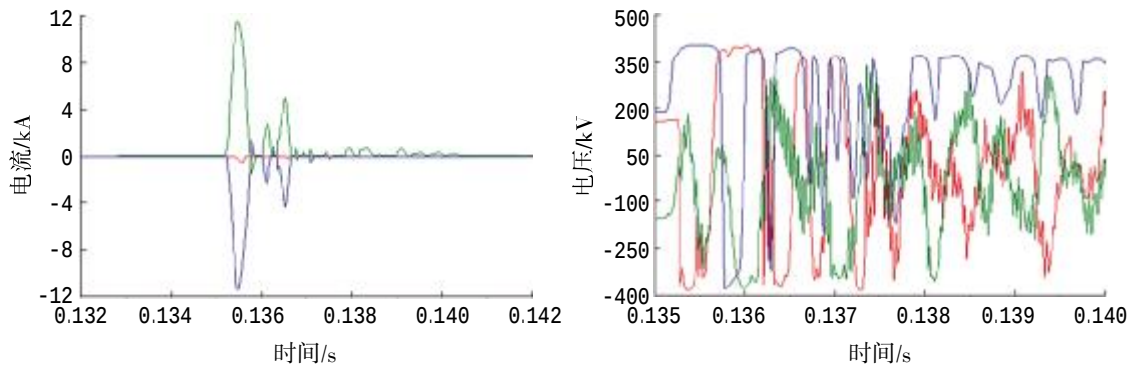


图 5 避雷器放电电流及电压

Fig. 5 Discharge & operating over-voltage of MOA

要求^[4], 应进行 18 次放电动作, 分为 6 组, 每组 3 次, 2 次动作间隔 50~60 s, 峰值视在持续时间根据放电等级为 2~2.8 ms, 不发生击穿、闪络等损坏; 大电流冲击耐受试验峰值 100 kA, 波形为 4/10 μ m 的方波冲击 2 次不发生击穿、闪络等损坏, 该次操作电流幅值及持续时间介于 2 者之间, 需对避雷器能量进行校核^[5]。

根据电磁暂态仿真计算软件计算结果, A 相避雷器在 0.4 ms 时间内其放电比能量为 4.3, B 相避雷器在 0.4 ms 时间内其放电比能量为 3.5, 根据厂家提供该避雷器型式试验报告可知, 该避雷器线路放电等级为 3 级, 该避雷器操作冲击残压 U_{res} 和额定电压有效值 U_n 之比为 2.22, 根据线路放电等级的选用原则^[6], 选择邻近较高的线路放电等级, 对应的线路放电等级为 4 或 5 级, 高于该避雷器 3 级的线路放电等级, 因此此次操作, 可能造成 A 相避雷器的击穿、闪络或破碎。

3 降压运行线路避雷器选型分析

由于线路 1、线路 2 按照 500 kV 电压等级架设, 站内设备按照 220 kV 电压等级设计, 线路避雷器选择 Y10W-204/532W, 按照相关标准^[7], 避雷器额定电压 $(252 \times 1.4 / \sqrt{2})$ 和残压选择无误, 但根据 500 kV 线路参数及绝缘水平, 避雷器标称放电电流、线路放

电等级偏低, 造成避雷器事故, 对于降压运行线路, 需对避雷器参数重新核算。

3.1 标称放电电流

3.1.1 避雷器标称放电电流对系统影响

避雷器标称放电电流是用于划分避雷器等级的, 它是避雷器最基本的技术参数之一, 表示避雷器保护特性和能量吸收能力的主要参数, 标称放电电流下的最大残压确定其雷电冲击保护水平, 影响变电站过电压保护的可靠性和避雷器本身运行的可靠性^[8]。

目前, 500 kV 系统标称放电电流一般选 10~20 kA, 220 kV 系统选择 5~10 kA^[9]; 该线路较为特殊, 线路按照 500 kV 电压等级设计, 降压为 220 kV 运行, 站内设备按照 220 kV 电压等级设计。

3.1.2 通过故障线路避雷器雷放电电流估算

选择避雷器标称放电电流的主要依据之一是雷电过电压侵入波通过避雷器的雷电放电电流, 这与避雷器所在地区的雷电日水平、雷电频度、线路防雷设计、进线段防雷设计、变电站的设备布置、运行方式以及变电站所处的地形等许多因素有关。

对于进线段落雷, 雷击点离变电站人口处愈近, 雷电侵入波过电压愈高, 变电站近区雷击时通过断路器线路侧避雷器的雷电放电电流可能很大; 进线段外远区雷, 是通过避雷器雷电放电电流中概率最高部分, 由于波的传播时间已超过了雷电流波的持

续时间,无须考虑波的多次折反射的叠加效应,通过避雷器的雷电流仅为单次进波,可通过避雷器雷电流公式^[10]进行简单估算。

$$I = \frac{1.2 \times 2U_{in} - U_{res}}{Z} \quad (1)$$

式(1)中: I 为通过避雷器雷电的放电电流估算值; U_{res} 为避雷器放电电流下残压; Z 为架空线路单相冲击波阻抗; U_{in} 为架空线路绝缘的雷电冲击耐受强度,可通过线路1、线路2避雷器的放电电流估算值为26.3 kA。

根据避雷器放电电流的估算式为^[8]

$$I_c = \frac{3.84(U_{cfo} - U_{res})}{Z} \quad (2)$$

U_{cfo} 为线路绝缘雷电冲击闪络电压,通过计算^[11],线路1、2避雷器放电电流的估算值为15 kA。

根据计算结果可知,线路雷电流通过避雷器雷电的放电电流估算值为26.3 kA,线路1、线路2避雷器放电电流的估算值为15 kA,均高于实际标称放电电流值10 kA;同时可以看出,如果降低线路绝缘水平或提高避雷器残压均可降低避雷器放电电流等级。

3.1.3 避雷器标称放电电流偏小危害

当避雷器标称放电电流选择偏小,通过高于标称放电电流的雷电流概率大,试验及运行经验表明使用寿命、运行可靠性与避雷器的雷电流耐受次数、冲击电流的幅值有关,遭受雷电流冲击次数越多,避雷器使用寿命减少,冲击电流幅值越大,能耐受雷电流冲击次数越少^[12]。

3.2 避雷器的线路放电等级

线路放电等级是避雷器耗散能量能力的另一种形式,与避雷器额定电压及其在特定线路参数(长度、波阻、过电压倍数)下所呈现的实际冲击电流和残压等有直接关系。在一般工程中,特别是100 km以下线路,均不需考虑线路放电等级问题^[13],一般500 kV避雷器放电等级为5级,220 kV避雷器放电等级为3级^[14]。

通过该次雷击跳闸事故计算可知,线路1 A相避雷器在0.4 ms时间内其放电比能量为4.3, B相避雷器在0.4 ms时间内其放电比能量为3.5,对应的线路放电等级为4或5级,根据厂家提供该避雷器型式试验报告可知,该避雷器放电等级为3级,超过避雷器在系统暂时过电压和操作过电压下所能承受的能量^[15-16]。

3.3 提高避雷器额定电压和残压,使用Y10W-216/562避雷器

目前,存在部分220 kV线路采用Y10W-216/

562避雷器,避雷器额定电压和残压提高,该避雷器的伏安特性曲线也发生变化^[17],标称放电电流下残压提高到562 kV,虽然降低站内设备绝缘裕度,但仍然满足绝缘配合条件^[18-19]。

根据安徽省降压运行线路参数,通过ATP-EMTP^[20]仿真,计算线路在不同位置发生单相短路、相间短路故障、三相短路故障时,避雷器所承受的过电压水平。计算结果显示,使用Y10W-216/562避雷器,在线路发生单相短路、相间短路时,操作过电压满足规程要求,避雷器不承受长时大电流冲击;在发生三相接地短路条件下,避雷器承受比能量可达到5.2;Y10W-216/562避雷器操作冲击残压 U_{res} 和额定电压有效值 U_r 之比为2.21,结合避雷器线路放电等级的选用原则,不推荐采用此方案。

3.4 提高避雷器标称放电电流

目前,220 kV出线避雷器主要采用10 kA标称放电电流,放电等级可为2、3、4级;500 kV出线主要采用20 kA标称放电电流,放电等级可为4、5级。根据线路参数,线路1、线路2避雷器放电电流的估算值为15 kA,均高于实际标称放电电流值10 kA。

使用标称放电电流为15 kA,额定电压204 kV,残压532 kV避雷器。

1)在两相短路情况下,避雷器放电电流最大达到11.2 kA,持续时间为0.4 ms,避雷器在0.4 ms时间内其放电比能量为4.2。

2)在三相短路情况下,避雷器放电电流最大达到9 kA,持续时间为0.5 ms,避雷器在0.5 ms时间内其放电比能量为3.5。

通过计算可知,为降低避雷器劣化,提高运行可靠性,降压运行线路1、线路2应选择15 kA标称放电电流,线路放电等级较高的避雷器。

4 结论

1)对于降压运行线路,应对避雷器冲击放电电流及线路放电等级进行校核,避免特殊工况下造成避雷器热击穿。

2)为延长避雷器使用寿命,建议对降压运行线路出线避雷器选型上,使用较高电压等级的标称放电电流和线路放电等级。

参考文献:

- [1] 王福寿.电力系统过电压计算[M].北京:水利水电出版社,1995.

- [2] 王维洲,刘先进,李 泽,等.500 kV 氧化锌避雷器运行条件及动作负载稳定性问题的研究[R]. 武汉:水电部武汉高压研究所,1985.
WANG Weizhou, LIU Xianjin, LI Ze, et al. The research of 500 kV MOA operating conditions and load stability problem of action [R]. Wuhan: Wuhan High Voltage Research Institute of Ministry of Water and Electricity, 1985.
- [3] 谢广润.电力系统过电压[M]. 北京:水利电力出版社,1985.
- [4] 朱 斌,王保山,李启盛,等.GB 11032—2010 交流无间隙金属氧化物避雷器[S]. 西安:中国国家标准化管理委员会,2010.
ZHU Bin, WANG Baoshan, LI Qisheng, et al. GB 11032—2010 Metal oxide surge arresters without gaps for AC [S]. Xi'an: China National Standardization Management Committee, 2010.
- [5] DL/T 620—1997 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S]. 武汉:行业标准-电力,1997.
DL/T 620—1997 Overvoltage protection and insulation coordination for AC electrical installations[S]. Wuhan: CN-DL, 1997.
- [6] GB 311.1—1997 高压输变电设备的绝缘配合[S].1997.
GB 311.1—1997 Insulation co-ordination for high voltage transmission and distribution equipment.[S].1997.
- [7] 西安高压电器研究所.GB/T 311.2—2002 绝缘配合第 2 部分:高压输变电设备的绝缘配合使用导则[S]. 西安:国家质检总局,2002.
XI'HARI.GB/T 311.2—2002 Insulation co-ordination—Part 2:Application guide for insulation co-ordination for high voltage transmission and distribution equipment [S]. Xi'an: CN-GB, 2002.
- [8] 王维洲,王保山.UHVMOA 设定 30 kA 级标称放电电流的必要性[J]. 高电压技术,2009,35(11):2612-2617.
WANG Weizhou, WANG Baoshan. Necessity of setting 30 kA nominal discharge current class for UHMOA [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(11): 2612-2617.
- [9] DL/T 804—2002 交流电力系统金属氧化物避雷器使用导则[S].2002.
DL/T 804—2002 Application guide of metal oxide surge arresters for AC power system[S].2002.
- [10] IEEE Std C 62.22—1997 IEEE guide for the application of metal-oxide surge arresters for alternating current systems[S].1997.
- [11] 电机工程手册编委会.电机工程手册:输变电配电设备卷[K]. 北京:机械工业出版社,1997.
- [12] 陈启发.无间隙金属氧化物避雷器选择手册[K]. 北京:中国电力出版社,1998.
CHEN Qifa. Use guide for AC metal-oxide surge arrester without gaps[K]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.
- [13] IEC 60099-5Ed2.0:2008 Surge arresters, part 5: Selection and application recommendations[S]. 2008.
- [14] EN IEC 60071-1:2006 Insulation coordination Part 1: Definitions, principles and rules[S]. 2006.
- [15] 远 翔,关雪飞,吴芳芳,等.随即参数对同塔双回输电线路雷击跳闸过程的影响 [J]. 高电压技术,2012,38(3): 697-703.
ZHOU Yuanxiang, GUAN Xuefei, WU Fangfang, et al. Effects of random parameters on the lightning flashover of double-circuit transmission line [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(3): 697-703.
- [16] WAGNER C F. The relation between stroke current and the velocity of the return current[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1963(82): 609-617.
- [17] IEEE Working Group on Estimating Lightning Performance of Transmission Lines. A simplified method for estimating lightning performance of transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1985, 104(4): 919-932.
- [18] 郭 洁,刘良壁,朱 跃.雷电冲击下金属氧化物避雷器动作负荷研究[J]. 高电压技术,2005,31(2):18-20.
GUO Jie, LIU Liangbi, ZHU Yue. Operation duty of metal oxide surge arresters at lightning surge [J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(2): 18-20.
- [19] VITET S, STENSTROM L, LUNDQUIST J. Thermal stress on ZnO surge arresters in polluted conditions (Part I Laboratory test methods & Part II Field test results)[C]// IEEE Transactions on Power Delivery. France: IEEE, 1992: 432-442.
- [20] 王 剑,朱小红,李召兄,等.330 kV 同塔双回线路过电压计算及分析[J]. 高电压技术,2011,37(10):2450-2457.
WANG Jian, ZHOU Xiaohong, LI Zhaoxiong, et al. Over-voltage calculation and analysis on the 330 kV double circuit transmission line on the same tower[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(10): 2450-2457.

刘 静(1981—),女,工程师,主要从事电力系统过电压方面的工作。