

# XLPE 电缆护层保护器引起护层环流异常分析

杨小兵 苏洪波 王志刚 吕林峰 杜 颢 赵 宏

( 国网成都供电公司检修公司 ,四川 成都 610041)

**摘要:** 高压电力电缆在中国城市现代化建设过程中运用越来越广泛。金属护层产生环流是高压单芯电力电缆中的普遍现象。简述了护层感应电压模型及影响环流的因素,定性分析了护层保护器对护层环流的影响,提出护层保护器异常会导致护层环流增大,并通过 220 kV 侯塘一线故障案例得到了验证。

**关键词:** XLPE 电力电缆; 环流; 影响因素; 护层保护器

**Abstract:** High - voltage power cable is used more and more in the process of urban modernization in China. The metal sheath generating circulation is a common phenomenon in the high - pressure single - core power cable. The induced voltage model of sheath and the factors influencing the circulation are briefly described , and the impact of sheath protector on sheath circulation is qualitatively analyzed. It is proposed that the sheath circulation will be increased caused by the abnormal sheath protector , and the research is verified through the fault case in 220 kV Houtang transmission line.

**Key words:** XLPE power cable; circulation; influencing factors; sheath protector

中图分类号: TM755 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2013)05 - 0087 - 04

## 0 引 言

电力电缆由于具有传输电能稳定、供电可靠性高、受气候和周围环境影响较小等优点,在中国城市化电网建设改造过程中日益受到供电部门的青睐<sup>[1-3]</sup>。根据法拉第电磁感应定律,高压电力电缆护层中产生感应电压是电力电缆中的固有现象。护层感应电压过高不仅对护层绝缘、人身安全产生影响,而且当护层感应电压不平衡时还会在护层中产生环流,其数值有时可能达到与线芯电流相同的数量级。从而造成大量能量损耗,降低传输效率,引起电缆温度升高,影响电缆寿命。

有关高压电缆护层环流引起的事故常有报导,引起了诸多学者对电缆护层感应电压电流的研究兴趣。文献[4-6]研究了护层连接方式对护层感应电压的影响;文献[7-8]研究了高压单芯电缆护层环流的计算并建立了计算模型;文献[9-13]对护层环流的抑制措施进行了探讨,提出用补偿电感的方法来降低护层感应电压进而减小感应电流。但很少有文献研究护层保护器对高压电缆护层环流的影响。下面首先从理论上分析了护层保护器对高压电缆环流的影响,认为护层保护器可失效会导致环流

增大并通过国网成都供电公司 220 kV 侯塘一线实际案例分析得到验证。

## 1 护层环流及其影响因素

护层环流是由护层感应电压不平衡产生的。实际中,由于电力通道资源有限,高压电缆往往都是双回路甚至多回路不规则排列敷设。任意排列双回路电缆单位长度的护层感应电压模型<sup>[13]</sup>为

$$E_{shA} = 2\omega I \times 10^{-7} \left[ \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{nr}{q} + j \frac{1}{2} \ln \frac{nqrS^2}{(pd_{GMRs})^2} \right]$$

$$E_{shB} = 2\omega I \times 10^{-7} \left[ \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{mSy}{td_{GMRs}} - j \frac{1}{2} \ln \frac{q^2S}{mtyd_{GMRs}} \right]$$

$$E_{shC} = 2\omega I \times 10^{-7} \left[ -\frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{mSy'}{zd_{GMRs}} - j \frac{1}{2} \ln \frac{n^2r^2S}{my'zd_{GMRs}} \right]$$

$$E_{shA'} = 2\omega I \times 10^{-7} \left[ \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{n'r'}{q's'} + j \frac{1}{2} \ln \frac{n'q'r's'S^2}{(pd_{GMRs})^2} \right]$$

$$E_{shB'} = 2\omega I \times 10^{-7} \left[ \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{m'Sy'}{td_{GMRs}} - j \frac{1}{2} \ln \frac{q'^2s'^2S}{m'ty'd_{GMRs}} \right]$$

$$E_{shC'} = 2\omega I \times 10^{-7} \left[ -\frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{m'Sy'}{zd_{GMRs}} - j \frac{1}{2} \ln \frac{n'^2r'^2S}{m'y'zd_{GMRs}} \right]$$

式中变量请参见原文。

根据欧姆定律  $I = U/R$ , 结合上述公式可知,影

响环流的因素主要有:线芯负载电流、电缆分段长度、电缆的排列方式、接地电阻和接触电阻大小、护层的连接方式以及护层保护器及接地箱等。

## 2 护层保护器对护层环流的影响

通常人们认为护层保护器的作用是限制工频过电压或冲击过电压在金属护套上产生过高的感应电压,安装在交叉互联接地箱内。交叉互联接地箱的内部连接如图1所示。

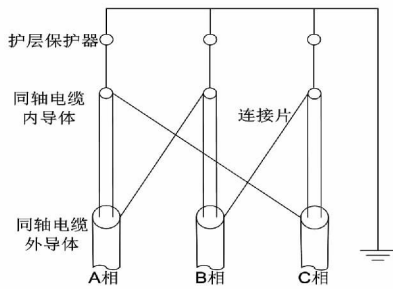


图1 交叉互联接地箱的连接方式

图1是工程运用比较普遍的连接方式。送电侧电缆护层接同轴电缆的线芯,受电侧电缆护层接同轴电缆外导体,交叉互联(A内→C外、C内→B外、B内→A外)后再经过护层保护器接地。直接接地箱的内部连接很简单,如图2所示。

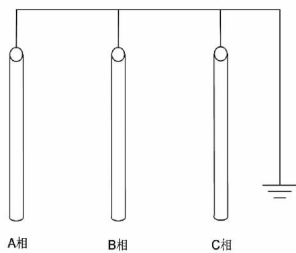


图2 直接接地箱的连接方式

电缆金属护层的每一个完整接地单元包括:直接→交叉→交叉→直接。这样就实现了三段换位,以保持护层感应电压 $\leq 50$  V,电缆金属护层三段换位连接如图3所示。

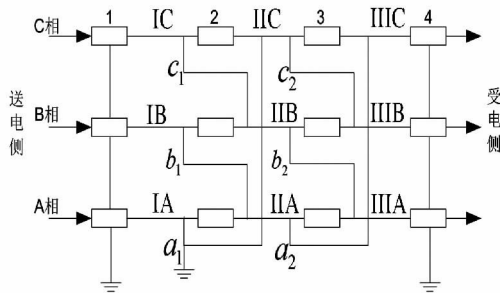


图3 电缆金属护层三段换位连接图

当护层保护器正常情况下 a1、a2、b1、b2、c1、c2 不接地,三段换位正常。如果护层保护器对地绝缘不良,以2号交叉互联A相护层保护器为例,相当于图3中 a1 点发生接地。此时 I A 段高压电缆护层两端接地,与线芯相当于构成一个 1:1 的变压器,会产生很大的感应电流。I A、II C、III B 三段电缆没有完成三段换位,这时 II C、III B 段合成电压就不会为零,因而流过 II C、III B 段护层的环流就会增大。而 I B、II A、III C 和 I C、II B、III A 是完成三段换位的,所以流过这几段护层的环流变化不大。

由以上分析可知 2 号交叉互联接地箱 A 相护层保护器损坏会导致 2 号接地箱 A 相、C 相以及 3 号接地箱 C 相、B 相环流明显增大。同理 2 号交叉互联接地箱 B 相护层保护器损坏会导致 2 号接地箱 B 相、A 相以及 3 号接地箱 A 相、C 相环流明显增大。2 号交叉互联接地箱 C 相护层保护器损坏会导致 2 号接地箱 C 相、B 相以及 3 号接地箱 B 相、A 相环流明显增大。

3 号交叉互联接地箱 A 相护层保护器损坏会导致 3 号接地箱 A 相、C 相以及 2 号接地箱 A 相、B 相环流明显增大。3 号交叉互联接地箱 B 相护层保护器损坏会导致 3 号接地箱 B 相、A 相以及 2 号接地箱 B 相、C 相环流明显增大。3 号交叉互联接地箱 C 相护层保护器损坏会导致 3 号接地箱 C 相、B 相以及 2 号接地箱 C 相、A 相环流明显增大。

实际上,线芯电流与护层环流是相互影响的<sup>[14-16]</sup>。所以一个交叉互联箱内任何一个护层保护器损坏,该接地单元内 4 个接地箱的三相环流都是有变化的,只是没有前面分析的相变化明显。

## 3 案例分析

国网成都供电公司 220 kV 侯塘一线由武侯变电站经架空线至三环路川藏立交附近与电缆相接,向塘坎街变电站输电,电缆部分全长 7 571 m,型号: YJLW02-Z-127/220-1×1 600 mm<sup>2</sup>。

### 3.1 护层的连接方式

侯塘一线全线分为 12 段,中间接头共 11 组,一组户外终端,一组 GIS 终端。护层接地系统分为 4 个完整接地单元。

交叉互联接地箱、直接接地箱的内部连接方式分别如图1、图2所示。每个接地单元护层连接图

表1 220 kV 侯塘一线同轴电缆电流

实测部位	2号交叉互联箱			3号交叉互联箱			11号交叉互联箱			12号交叉互联箱		
	A相	B相	C相	A相	B相	C相	A相	B相	C相	A相	B相	C相
处理前	95.7	115.7	56.8	104	60.1	94.2	36.5	86.3	122.6	未测	未测	未测
处理后	40.9	51	25	42.5	28	40.3	15.1	36.7	59.5	31	52.1	19

表2 220 kV 侯塘一线护层保护器泄露电流值

实测部位	2号互联箱护层保护器泄露电流 / $\mu$ A			3号互联箱护层保护器泄露电流 / $\mu$ A			11号互联箱护层保护器泄露电流 / $\mu$ A			12号互联箱护层保护器泄露电流 / $\mu$ A		
	A相	B相	C相	A相	B相	C相	A相	B相	C相	A相	B相	C相
更换前	45	72	47	19	15	20	20	28	20	42	70	46
更换后	21	20	25	未换	未换	未换	未换	未换	未换	27	29	25

如图4所示。

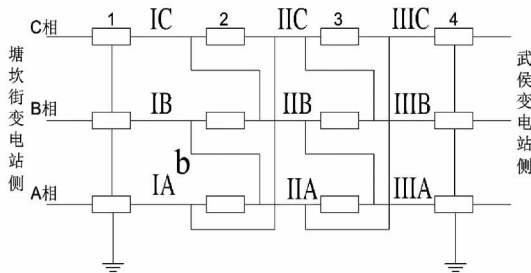


图4 电缆金属护层换位连接图

### 3.2 现场测试数据分析

表1是220 kV 侯塘一线正常运行时同轴电缆电流的实测值。从表中可以看到2、3、11号交叉互连带地箱的环流都很大,最大值分别达到115.7 A、104 A、122.6 A,最小值也是56.8 A、60.1 A、36.5 A。12号交叉互连带地箱的环流由于现场条件限制试验前没有测量。从运行经验上看,上述3个交叉互连带地箱的环流明显偏大,属于不正常运行情况,其余接地单元环流正常,故未一一给出。2、3号和11、12号交叉互连带地箱分别属于1、4号接地单元,故问题应该出在这两个接地单元。

从表2中可知2号和12号交叉互连带地箱B相护层保护器的泄露电流分别为72  $\mu$ A和70  $\mu$ A,都远远大于规定的 $\leq 50 \mu$ A,且其余护层保护器的泄露电流也接近该规定值。所以2号交叉互连带地箱和12号交叉互连带地箱B相护层保护器对地绝缘不良,此时对应接地单元的连接方式就发生了改变。

以2号交叉互连带地箱所在接地单元为例,若B相护层保护器对地绝缘不良,就相当于图4中b点发生接地。由第三节分析可知,b点接地就会导致2号接地箱B相、A相以及3号接地箱A相、C

相环流明显增大,从表中数据可以看到2号交叉互连带地箱的A相环流为95.7 A,B相环流为115.7 A,都明显大于C相环流56.8 A;3号交叉互连带地箱的A相环流为104 A,C相环流为94.2 A,也都明显大于B相环流60.1 A。同理,12号交叉互连带地箱B相护层保护器接地必然导致11号接地箱B相、C相环流明显增大,从表中数据看到11号接地箱B相环流86.3 A、C相环流122.6 A,同样远远大于A相环流36.5 A。这充分证明第三节的分析是正确的。

### 3.3 解决措施

由表2数据可知2号和12号交叉互连带地箱三相的护层保护器泄露电流过大,不能满足运行要求,故将该两个接地箱三相都更换成新的护层保护器,试验数据如表2所示。3号和11号交叉互连带地箱三相护层保护器泄露电流都满足要求,没有更换。其余运行条件均未改变。

处理后1、4号接地单元三相的环流参见表1,2号交叉互连带地箱A、B、C三相环流分别从95.7 A、115.7 A、56.8 A减小到40.9 A、51 A、25 A,降幅分别为57.26%、55.92%、55.99%。同理计算3号接地箱三相环流的降幅分别为59.13%、53.41%、57.22%,11号接地箱三相环流的降幅分别为58.63%、57.47%、51.47%。由此可见更换上述问题护层保护器后,侯塘一线护层环流过大问题得到了明显改善。

另外从表中数据也可以看到,处理后虽然环流明显减小,但还是比较大且三相不平衡,这可能与侯塘一线电缆分段不均匀、各段排列方式不同等因素有很大关系,将另文探讨。

## 4 结 论

研究表明 XLPE 电缆护层保护器失效会引起护层环流异常,其运行工况对电缆护层接地系统有很大影响。研究成果完善了人们对高压电缆护层保护器作用是限制工频过电压或冲击过电压在金属护套上产生过高感应电压的认识,对运行维护中高压单芯电缆护层环流异常分析及查找具有很大的指导意义。

### 参考文献

[1] Alexandler V Mamishev, Shayne X Short, Ta-Wei Kao, et al. Nonintrusive Sensing Techniques for the Discrimination of Energized Electric Cables [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1996, 45(2): 457-461.

[2] Rita de Cassia A Figueiredo, Sandoval Carneiro Jr, Manuel Ernani C Cruz. Experimental Validation of a Thermal Model for the Ampacity Derating of Electric Cables in Wrapped Trays [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(3): 735-742.

[3] 盛鹏, 李杰. 110 kV 电缆线路护层接地方式及护层保护的一些措施 [J]. 四川电力技术, 2008, 31(增刊): 91-94.

[4] 陈妹敏, 杨兰均, 张乔根, 等. 110 kV 电缆护层连接方式对护层过电压的影响 [J]. 高电压技术, 2006, 32(3): 37-39.

[5] 杨守信, 杨力. 110 kV 长庆电缆护套绝缘过电压保护分析计算 [J]. 高电压技术, 2004, 30(4): 22-24.

[6] 张全胜, 王和亮, 周作春. 110 kV XLPE 电缆金属护套交叉互联接地探讨 [J]. 高电压技术, 2005, 31(11): 71-73.

[7] 牛海清, 王晓兵, 蚁泽沛, 等. 110 kV 单芯电缆金属护套环流计算与试验研究 [J]. 高电压技术, 2005, 31

(8): 15-17.

[8] 王波, 罗进圣, 黄宏新, 等. 220 kV 高压单芯电力电缆金属护套环流分析 [J]. 高压电器, 2009, 45(5): 141-145.

[9] 马宏忠, 倪欣荣, 黎腊红. 高压电力电缆护层感应电压的补偿研究 [J]. 高电压技术, 2007, 33(3): 148-151.

[10] 王东海. 电缆改造引起的护层感应电压变化及其补偿 [D]. 南京: 河海大学, 2005.

[11] 姜宁, 王东海, 王春宁, 等. 电力电缆护层电压补偿装置研究 [J]. 电力自动化设备, 2007, 27(4): 52-55.

[12] 魏书荣, 马宏忠, 王东海. 电缆线路改造引起的护层感应电压变化及其补偿 [J]. 电线电缆, 2004(4): 26-28.

[13] 倪欣荣, 马宏忠, 王东海. 电缆护层电压补偿与护层电流抑制技术 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(5): 65-69.

[14] 牛海清, 王晓兵, 张尧. 基于迭代法的单芯电缆载流量的研究 [J]. 高电压技术, 2006, 32(11): 41-44.

[15] 贾欣, 曹晓珑, 喻明. 单芯电缆计及护套环流时的载流量 [J]. 高电压技术, 2001, 27(1): 25-26.

[16] 杨小静. 交联电缆额定载流量的计算 [J]. 高电压技术, 2001, 27(7): 11-12.

### 作者简介:

杨小兵(1981),男,硕士研究生,工程师,从事高压电缆运行维护工作;

苏洪波(1970),男,本科,工程师,从事高压电缆运行维护及检修管理工作;

王志刚(1963),男,本科,高级技师,从事高压电缆运行维护及检修工作;

吕林峰(1975),男,本科,技师,从事高压电缆运行维护工作;

杜 颢(1972),男,本科,工程师,从事电缆运行及电缆施工工作;

赵 宏(1983),男,本科,技师,从事高压电缆运行维护及检修工作。

(收稿日期: 2013-06-02)

(上接第40页)

(3) 基于对电网历年负荷特性数据的分析研究,考虑四川电网负荷特性的特点,采用趋势法和“重近轻远”加权平均法对四川电网负荷特性进行了预测。该法简单实用,给出的四川电网负荷特性值(季不平衡系数、日负荷率、日最小负荷率)有较高的可信度,在很大程度上反映出四川负荷特性未

来的发展趋势和特点,将为四川电网规划及生产经营等计划工作提供基础参考。

### 作者简介:

王海燕(1983),女,硕士研究生,工程师,研究方向为电力市场预测等。

(收稿日期: 2013-07-24)