

电力电缆护层电压补偿装置研究

姜 宁¹,王东海¹,王春宁¹,马宏忠²,倪欣荣²,徐树峰²,黎腊红²

(1. 南京供电公司,江苏 南京 210008;

2. 河海大学 电气工程学院,江苏 南京 210098)

摘要: 电力电缆线路改造时容易造成换位的电缆三段不等长,从而引起护层电压不平衡,产生护层环流。在对电缆护层电压理论分析的基础上,推导了电缆几种主要排列方式下的护层感应电压数学模型;提出了电缆护层电压的补偿方法。该方法是在电缆终端增加一补偿电感,即在铁芯上绕制线圈,此线圈一端接电缆金属护层末端,另一端接地,基于这一补偿方法开发了补偿装置计算的软件包,并进行仿真计算,在此基础上研制了补偿装置。通过改变该补偿装置的气隙和匝数,可以对电缆护层电压进行有效补偿,使补偿后电缆护层的总电压大为减小,有效地抑制了护层环流,可大幅度降低电缆损耗,提高电缆传输容量。

关键词: 电力电缆; 护层电压; 补偿装置; 护层环流

中图分类号: TM 247

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)04-0052-03

0 引言

目前,城市中电能已广泛采用电力电缆传输,高压电缆护层中产生感应电压是电力电缆中的普遍现象^[1-5]。过高的护层电压不但对人和相关设备的安全产生影响,更重要的是,护层电压产生护层环流,护层电流不但造成能量损耗,降低传输效率,而且使电缆温度上升,影响电缆寿命,并影响电缆的传输容量^[6-7]。敷设时常采用三段换位的方法降低护层电压^[8-9]。

随着城市建设的发展,电缆改造越来越多,但电力电缆线路改造时容易造成换位的电缆三段不等长,其长度往往不能满足原来的三段换位要求,从而引起金属护层电压不平衡,产生护层环流。

目前,国内外普遍采用的方法是补偿电缆(即增加电缆的长度)使其长度与原三段换位法的电缆等长,并将多放的电缆盘放在电缆沟中^[10]。这种方法不仅增加电缆长度即增加成本,而且多放电缆往往受到空间和敷设条件的限制。提出了一种更有效的方法,即用补偿电感的方法,并研制出补偿装置,通过调节装置上的绕组和气隙,能抑制护层末端感应电压,可以减小或消除护层感应电压,减小护层环流,从而大幅减小电缆损耗,同时采用所提出的方法可以有效地降低电缆改造成本。

1 电缆金属护层感应电压的理论计算

当电缆导线通过电流时,在其周围产生磁通,磁通不仅与线芯回路相链,同时也与电缆的金属护层

相链,在金属护层上产生感应电压,其值与线芯截面、电缆间距离和电流大小有关^[11]。现以应用广泛的双回路电缆为例分析电缆护层电压的计算方法。

1.1 任意排列的双回路电缆

双回路的排列方式有很多种,但分析方法基本相同,现以一种普遍适用的分析方法进行研究。

假定任意排列的双回路电缆线路各相之间的中心距离如图 1 所示。图中,以 AB 相电缆之间的距离 S 为基准,其他各相电缆之间距离用 S 的倍数(p 、 q 、 q' 、 n 、 n' 、 r 、 r' 、 m 、 m' 、 y 、 y' 、 t 、 z 、 s')表示,例如 AA' 相间的距离为 pS ,表示为 AB 电缆距离 S 的 p 倍。

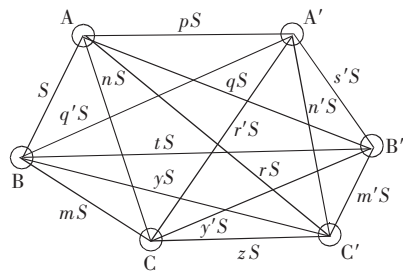


图 1 双回路各相电缆之间中心距的比率表示法
Fig.1 Ratio representation of center distances between different phase parallel-line cables

则 A 相护层由于附近回路所增加的磁通总和为

$$\varphi_p' = 2 \times 10^{-7} \times \left(I_A' \ln \frac{pS}{l_s} + I_B' \ln \frac{qS}{l_s} + I_C' \ln \frac{rS}{l_s} \right) \quad (1)$$

其中, l_s 为金属护层的几何平均距离。

假定附近回路的线芯电流也是平衡的,且 $I_A' = I_A$, 则式(1)可写成:

$$\varphi_p' = 2 \times 10^{-7} \times \left(\frac{1}{2} \ln \frac{p}{qr} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{q}{r} \right) I \quad (2)$$

因此,由附近回路在 A 相护层上产生的感应电

动势为

$$E_{SA1}=2\omega I\times 10^{-7}\times\left(-\frac{\sqrt{3}}{2}\ln\frac{q}{r}-j\frac{1}{2}\ln\frac{p}{qr}\right) \quad (3)$$

则可得到此双回路的 A 相护层的感应电动势为

$$E_{SA}=2\omega I\times 10^{-7}\times\left[\frac{\sqrt{3}}{2}\ln\frac{nr}{q}+j\frac{1}{2}\ln\frac{nqrS^2}{(pls)^2}\right] \quad (4)$$

同理,可得到此双回路的 B、C、A'、B'、C' 相护层的感应电动势分别为

$$E_{SB}=2\omega I\times 10^{-7}\times\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\ln\frac{mSy}{tl_s}-j\frac{1}{2}\ln\frac{q'^2S}{mtyl_s}\right) \quad (5)$$

$$E_{SC}=2\omega I\times 10^{-7}\times\left(-\frac{\sqrt{3}}{2}\ln\frac{mSy'}{zl_s}-j\frac{1}{2}\ln\frac{n^2r'^2S}{m'y'zl_s}\right) \quad (6)$$

$$E'_{SA}=2\omega I\times 10^{-4}\times\left[\frac{\sqrt{3}}{2}\ln\frac{r'n'}{q's'}+j\frac{1}{2}\ln\frac{n'q'r'S^2}{(pls)^2}\right] \quad (7)$$

$$E'_{SB}=2\omega I\times 10^{-4}\times\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\ln\frac{m'y'S}{tl_s}-j\frac{1}{2}\ln\frac{q'^2s'^2S}{m'ty'l_s}\right) \quad (8)$$

$$E'_{SC}=2\omega I\times 10^{-4}\times\left(-\frac{\sqrt{3}}{2}\ln\frac{m'yS}{zl_s}-j\frac{1}{2}\ln\frac{r^2n'^2S}{m'y'zl_s}\right) \quad (9)$$

1.2 电缆分段后的护层电压分布

为了减少护层电压的影响,正常情况下普遍采用三段换位的方法。电缆金属护层电压(由护层感应电动势引起)与电缆和线芯电流大小乘积成正比。因此,在电缆长度较长的情况下,感应电动势可能达到很大的数值。电缆分段不宜过长,分段长度控制在 500~800 m 之间比较合适^[12]。因此,在一般情况下,电缆护层两端或多点应牢固接地,以免护层电压造成危害。但是,护层接地形成通路,感应电动势就会引起电流而在护层中产生损耗,因而降低了电缆的传输容量。因此,当电缆长度较短,每根电缆中护层电压不超过 10~50 V 时,可以将电缆护层对地绝缘^[13-14],仅一点与地接通。而对于长电缆线路,可采用特制接头盒。这种特制接头盒在电的方面把两段电缆线芯连接起来,而电缆的金属护层 2 段互相绝缘,每段电缆长度仍根据每段电缆护层电压不超过 10~50 V 来确定。

为了减少接地点,可采用图 2 所示的换位连接法。电缆经过换位后,连接在一起接地。这种连接方法,如电缆是对称敷设,且每段长度相等,在平衡负载条件下,在金属护层中两接地点间的感应电动势等于零,因此不会产生电流。每一绝缘外套连接接头盒承受的电压为每段电缆长度护层电压的 $\sqrt{3}$ 倍。采用这种连接方法时,每段电缆长度应力求相等,电缆敷设位置应力求对称平衡。在电缆长度不

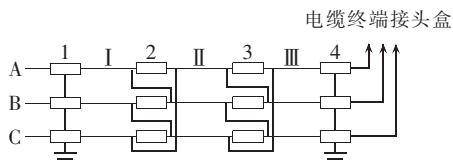


图 2 电缆金属护层换位连接线

Fig.2 Transposition connections of cable metal shield

相等时,在两接地点间将有电压,因而产生电流。但此时所产生的损耗比将两点直接接地时大幅减小^[15]。

2 电缆护层补偿电感计算与装置研制

2.1 基本原理

前文提到,在电缆改造中,由于地形条件等的限制,改造后电缆的长度往往与原来不完全相同,其长度发生变化,末端电缆一般不会正好等于原来的三段之长。在敷设不对称或电缆三段长度不相等时,在两接地点之间将有电压,如图 3(a)所示,因而在金属护层中产生环流。在电缆终端增加补偿电感,即在铁芯上绕制线圈,此线圈一端接电缆金属护层末端,另一端接地(图 4)。则由图 4 可知,单芯电缆导线线芯中有交变电流通过时,在其周围产生交变磁场,此交变磁场不仅与线芯本身和金属护层相链,同时与图 4 所示的线圈相链,进而会在线圈中产生感应电动势,此电动势可抵消电缆改造中由于三段不平衡所产生的护层末端电压。增加补偿电感后电缆护层感应电压分布如图 3(b)所示(图 3(a)中 L_3 处电压为 U_1 ,图 3(b)中 L_3 处电压被补偿到零)。

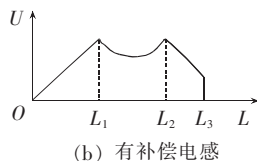
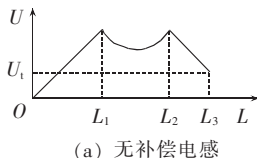


图 3 补偿电感前、后电缆护层电压分布图

Fig.3 Distribution of shield voltage without and with compensation

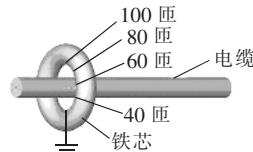


图 4 补偿电感结构示意图

Fig.4 Compensation inductance and cable

2.2 算例

按照前面的原理采用 VC++6.0 编写电缆改造双回路计算软件包,软件包中充分考虑了电缆的主要型号及当前的主要排列方式。选择电缆型号、敷设类型;输入各段电缆长度、线芯电流等,确认后即可计算得到电缆在选定排列方式下的护层电压,进而得到需要补偿多少电感才能使护层末端电压降为零,并算出此电感需要多少匝线圈。

例如,电缆型号为 YJLW₀₃,线芯标称截面为 400 mm²,电压等级为 110 kV,线芯电流为 250 A。电缆分为 3 段,第 1 段长 700 m,第 2 段长 700 m,第 3 段长 300 m,轴间距离 250 mm,电缆以双回路方式排列。仿真计算结果如表 1 所示(表中, U 为补偿前护层电压, L_b 为所需补偿电感量, N 为补偿电感匝数)。

由补偿前各相护层电压,通过调节气隙,得到为补偿此电压需要线圈匝数 N 和气隙 l_g 的关系如图 5 所示。由图 5 可见,线圈所需匝数与气隙长度的关系为线性关系。根据此匝数的电感进行补偿,可使护层电压大为降低(理论上在一定状态下可降低为零)。

表 1 仿真结果
Tab.1 Simulation results

相别	U/V	L _b /mH	N	相别	U/V	L _b /mH	N
A ₁	8.488	0.108 1	83	A ₂	16.040	0.204 2	158
B ₁	22.440	0.285 7	221	B ₂	22.440	0.285 7	221
C ₁	16.040	0.204 2	158	C ₂	8.488	0.180 1	83

当然,实际应用中没有必要追求“完全补偿”,因为,开始时护层电流大,补偿效果很明显,后来随着电流减小,要进一步提高补偿效果也越来越困难。

2.3 补偿装置

补偿装置委托专门定做动模设备的特种变压器厂定做,为拆装式、气隙可调、有可改变变比抽头的电感(类似拆装式零序变流器)。从用户方便及应用更广泛考虑,对补偿装置作了进一步改进,一是绕组总匝数改为 120 匝(以适应更宽的应用范围),分别在 40、60、80、100 匝引出抽头,并连接到接线端子。气隙由任意可调改为“相对固定与可调”结合,即一般用厂家提供的优选设定值(0.5 mm),特殊情况可以根据要求调整。设计中考虑了抗一次短路电流冲击。据此重新定做了可实际应用的补偿装置。该装置样机经现场运行,并进行大量测试,结果表明达到理想的补偿效果。

3 结语

通常电缆改造后,电缆三段不等长造成护层电压不平衡,从而引起护层环流,造成能量损耗,从而影响电缆的载流量,并降低电缆寿命。对电缆护层电压进行研究,提出了补偿电感的方法,给出了相关的计算模型,并研制了补偿装置。现场运行表明,使用该补偿装置,能使护层终端感应电压大为降低,有效减小了护层环流。

参考文献:

[1] DU Y,ZHOU Q B. Capacitance matrix of screened / insulated single-core cables of finite length[J]. IEE Proc-Sci,2005,152 (5):233-239.

[2] 王新超,潘贞存. 电力电缆接头故障的预警监测系统[J]. 电力自动化设备,2001,21(5):25-28.

WANG Xin-chao,PAN Zhen-cun. Power cable junction monitoring system for fault pre-warning[J]. Electric Power Automation Equipment,2001,21(5):25-28.

[3] 董小兵,蔡军,江秀臣,等. 10-35 kV XLPE 电缆在线监测技术[J]. 电力自动化设备,2005,25(9):20-24.

DONG Xiao-bing,CAI Jun,JIANG Xiu-chen,et al. On-line monitoring techniques for 10-35 kV XLPE cable [J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(9):20-24.

[4] 宫瑞磊,汪建成,王兆珉,等. 110 kV XLPE 绝缘电力电缆局部放电的探讨[J]. 电线电缆,2006(3):31-33.

GONG Rui-lei,WANG Jian-cheng,WANG Zhao-min,et al. Analysis of partial discharge in 110 kV XLPE power cables[J].

Electric Wire & Cable,2006(3):31-33.

[5] MAMISHEY A V,SHORT S X,KAO Ta-wei,et al. Nonintrusive sensing techniques for the discrimination of energized electric cables[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,1996,45(2):457-461.

[6] 贾欣,曹晓珑,喻明. 单芯电缆计及护套环流时载流量的计算[J]. 高电压技术,2001,27(1):25-26,38.

JIA Xin,CAO Xiao-long,YU Ming. Calculation of current rate in single-core cables with circulating current[J]. High Voltage Engineering,2001,27(1):25-26,38.

[7] 陈殊敏,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.

CHEN Shu-min,YANG Lan-jun,ZHANG Qiao-gen,et al. Effect of sheath-bonding method on induced overvoltages in 110 kV XLPE cable system in the case of ground fault surge[J]. High Voltage Engineering,2006,32(3):37-39.

[8] 刘子玉. 电气绝缘结构设计原理[M]. 北京:机械工业出版社,1981.

[9] 陆家榆,袁建生,马信山. 地下隧道中电力电缆的线路阻抗矩阵相序阻抗矩阵和参数的分析[J]. 电网技术,1998,22(9):5-8.

LU Jia-yu,YUAN Jian-sheng,MA Xin-shan. Analysis of matrix line impedance,matrix phase sequence impedance and parameters of power cables in underground tunnels[J]. Power System Technology,1998,22(9):5-8.

[10] 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):26-28,40.

WEI Shu-rong,MA Hong-zhong,WANG Dong-hai. The variation and compensation of induced voltage in the metal shield for the power cable renovation[J]. Electric Wire & Cable,2004(4):26-28,40.

[11] 郑肇骥,王焜明. 高压电缆线路[M]. 北京:水利电力出版社,1983.

[12] 王进,刘军,吴华喜. 防止高压单芯电缆外护套故障的一些对策[J]. 高电压技术,2004,30(S1):97-98.

WANG Jin,LIU Jun,WU Hua-xi. Countermeasures to prevent the troubles with the outer sheaths of high voltage single-core cables[J]. High Voltage Engineering,2004,30(S1):97-98.

[13] 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.

ZHANG Quan-sheng,WANG He-liang,ZHOU Zuo-chun. Study on cross connection grounding of metallic sheath of 110 kV XLPE power cable[J]. High Voltage Engineering,2005,31(11):71-73.

[14] 江秀臣,蔡军,董小兵,等. 110 kV 及以上电压等级交联电缆在线监测技术[J]. 电力自动化设备,2005,25(8):13-17.

JIANG Xiu-chen,CAI Jun,DONG Xiao-bing,et al. On-line monitoring techniques for 110 kV and above XLPE cable[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(8):13-17.

[15] 金辉,李聪华. 城市轨道交通供电系统的中压电缆布置及接地方式[J]. 电力设备,2005,6(4):58-60.

JIN Hui,LI Cong-hua. The medium-voltage cable arrangement and ground mode of traffic and power supply systems in city track[J]. Electrical Equipment,2005,6(4):58-60.

(责任编辑:柏英武)

作者简介:

姜宁(1965-),男,江苏南京人,总工程师,主要研究方向为电力系统自动化;

王东海(1972-),男,江苏南京人,工程师,硕士,主要研究方向为电力电缆运行与维护;

王春宁(1966-),男,江苏南京人,工程师,主要从事供电企业科技开发及管理工作;

马宏忠(1962-),男,江苏如皋人,教授,博士,主要研究方向为电力设备监测与诊断(E-mail:hhumhz@163.com)。

Research on shield voltage compensation unit of power cable

JIANG Ning¹, WANG Dong-hai¹, WANG Chun-ning¹,
MA Hong-zhong², NI Xin-rong², XU Shu-feng², LI La-hong²
(1. Nanjing Electric Power Co., Nanjing 210008, China;
2. Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The reconstruction of power cable lines often makes the three segments of the transposed cable unequal in length, which causes the metal shield voltage unbalanced and produces shield circulating current. Based on theoretical analysis, the mathematic models of induced voltage under several main arrangement modes are deduced. The compensation method is put forward, which connects an inductance to the end of cable metal shield. It is a grounded winding on an iron core, and the corresponding compensation unit and simulation calculation software are developed. By changing air gap and turn number of the inductance, it reduces the induced voltage of metal shield efficiently and thus suppresses the circulating current, with cable loss lowered and transmission capacity enhanced.

This project is supported by the National Natural Science Foundation of China(50477010) and the Teaching and Research Award Program for Outstanding Young Teachers in Higher Education Institutions of MOE, P.R.C..

Key words: power cable; shield voltage; compensation unit; shield circulating current