

110 kV单芯电缆混合接地的应用分析

110 kV单芯电缆在系统正常运行及短路故障时会在电缆金属护层产生感应电压，针对不同工程中的电缆线路，应合理地选择电缆的接地方式，确保金属护层感应电压在安全范围内。结合实际工程，新建110 kV电缆线路采用了交叉互联和单点接地的混合接地方式，交叉互联段各单元应尽量等分，降低护层感应电压，避免产生环流，从而造成金属护层发热及降低电缆输送能力。单点接地段应分析电缆在发生单相短路故障时护层感应过电压对电缆安全运行的影响，避免感应过电压过大，通过计算得出了利用电缆隧道内已有的接地线作为回流线可达到降低护层感应过电压的效果。

郑沛雯 胡 鹰/新疆石油工程设计有限公司

0 引言

单芯电缆金属导体中通过交流电时，其周围产生的磁场会与电缆金属护层相交，由于电磁场的作用，其金属护层上会产生感应电压。感应电压与导体流过的电流、导体长度以及导体排列方式均有关系^[1]。电缆正常运行时，较大的感应电压将会影响巡检人员安全，同时所引起的电流会造成金属护层发热，损耗电能。为避免电缆金属护层感应电压过大，不超过规范允许的限值，应选择合理的敷设和接地方式。

当电缆距离较短时，可采用单点接地形式，电缆一端直接接地，另一端经护层电压限制器接地。该种接地方式可保证在正常运行时，电缆金属护层感应电压较小，金属护层首端接地，末端不接地，护层相当于开路，不会产生环流，损耗较小；当系统发生单相接地短路时，两端直接接地，会避免感应电压过大而造成电缆绝缘击穿，形成多点接

地，保障电缆安全运行。

当电缆距离较长时，单点接地无法满足电缆金属护层的电压限制要求，故采用交叉互联接地方式，将每单元分为三等分段。交叉互联接地方式将A、B、C三相等长段金属护层通过交叉互联箱串接在一起，三相感应电压幅值相同，由于三相单芯电缆的相位差为120°，因此三相金属护层的感应电压相位差也近似为120°，若三小段分段均匀，且三相线路始终保持“品”字形对称敷设，则金属护层感应电压接近为零。

1 工程实例计算分析

结合本工程实际情况，110 kV单相电缆实际长度为3.66 km，电缆选用ZA-YJLW02-64/110 kV 1×300型，在已建电缆隧道内采用“品”字形敷设，并采用交叉互联的接地方式，每相共分为两个单元，每一单元内均为三个等分段，每一段电缆盘长为610 m，共6盘。由于采购周期长，前期直接按照估算长度订货，电缆实际到货为17盘545 m及1盘635 m，经核算，A、B、C三相每相分别需新增电缆为390 m、300 m及390 m，新增后电缆连接方式如图1所示。

1.1 交叉互联段电缆金属护层环流计算

由于现场到货有1盘电缆为635 m，较其余盘多90 m，因此交叉互联不等长，仍会产生感应电压。设 $L_{A3}=L_{C2}=545$ m， $L_{B1}=635$ m，具体交叉互联接线如图2所示。

电缆“品”字形敷设时，交叉互联



郑沛雯/助理工程师

关键词/Keywords

单芯电缆 ·
金属护层感应电压 ·
交叉互联 ·
单点接地 ·
回流线 ·

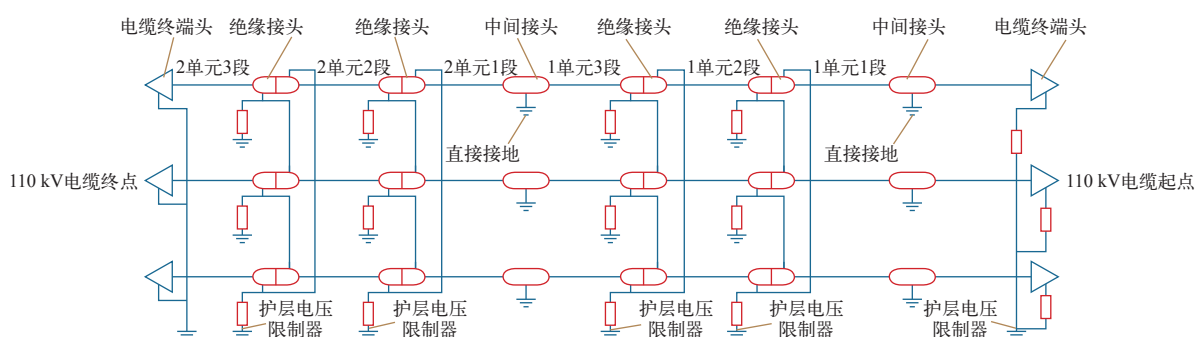


图1 电缆混合接地示意图

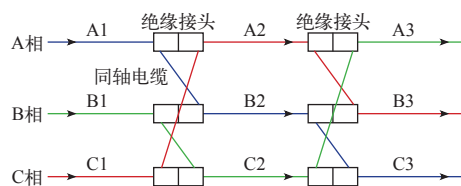


图2 交叉互联连接示意图

段感应电压^[2]表达式为

$$\begin{aligned}
 U_s &= U_{sA} + U_{sB} + U_{sC} \\
 &= 2WI \times 10^{-7} \left[\frac{\sqrt{3}}{2} (L_B - L_C) \ln \frac{S}{r_s} + \right. \\
 &\quad \left. j \frac{1}{2} (2L_A - L_B - L_C) \ln \frac{S}{r_s} \right] \\
 &= 1.92 \text{ V}
 \end{aligned} \quad (1)$$

式中， U_s 为交叉互联段感应电压，V； I 为电缆运行电流，A； r_s 为金属护套层平均半径，m； S 为电缆间相间距，m； L_A 、 L_B 和 L_C 分别为A、B和C三相电缆长度，m。

按照本工程电缆实际盘长计算，交叉互联段内产生的感应电压为1.92 V，小于文献[3]允许的50 V，故交叉互联段感应电压在安全限度内。

1.2 电缆金属护层感应电压计算

新增电缆段采用线路一端单点直接接地的方式，首端采用护层电压限制器接地，末端采用中间接头与交叉互联段电缆连接后直接接地，以下为在系统正常运行及发生接地故障时，新增段电缆金属护层感应电压计算。

(1) 正常运行时

金属护套感应电动势为

$$E_s = LE_{s0} = 8.03 \text{ V} \quad (2)$$

式中， E_s 为感应电动势，V； L 为电缆金属层的电气通路上任一部位与其直接接地处的距离，km； E_{s0} 为单位长度的正常感应电动势，V/km。

(2) 短路故障时

由于三相和两相短路电流不以大地为回路，且回路的路程较近，产生的感应电压可相互抵消，因此短路电流在金属护层上的感应电压较小，而在系统发生单相接地短路时，金属护层产生的感应过电压最大，即^[4]

$$U_{OV.AC} = \left[R + \left(R_g + jw \times 10^{-4} \ln \frac{D}{r_s} \right) L \right] I_k = 7.38 \text{ kV} \quad (3)$$

式中， $U_{OV.AC}$ 为系统单相接地时沿金属护层产生的感应过电压，kV； D 为地中电流穿透深度，m； R 为金属护层单点接地处的接地电阻， Ω ； R_g 为大地的漏电电阻， Ω/km ； r_s 为电缆金属层平均半径，m； I_k 为单相接地短路电流，kA； L 为电缆线路长度，m。

经计算，新增电缆段在正常运行时，金属护层感应电动势为8.03 V，满足规范不得大于50 V的要求，但在系统发生单相接地短路故障时，金属护层上感应过电压为7.38 kV，超过了护层电压限制器在短路切除时间5 s内耐受工频电压的最大值6 kV，易发生因护层电压限制器能量吸收能力不足而爆炸的事故，因此为抑制金属护层感应电压，新增电缆段需考虑单独设置一根回流线。

2 回流线的作用与选择

2.1 回流线的作用

当单芯电缆发生单相接地短路故障时，短路

电流以大地为回路，金属护层感应过电压很大，增加回流线后，接地电流一部分以大地为回路，另一部分以回流线及金属护层为回路，通过回流线的磁通抵消一部分电缆导体所产生的磁通，从而降低了金属护层的感应过电压^[5]。

2.2 回流线的选择

回流线的选择应根据文献[3]的规定，满足如下要求：①回流线的阻抗及两端的接地电阻，并应达到抑制电缆金属层工频感应过电压，使其截面积满足最大暂态电流作用下的热稳定要求；②回流线的排列配置方式应保证电缆运行时在回流线上产生的损耗最小；③电缆线路任一终端设置在发电厂、变电所时，回流线应与电源中性线接地的接地网连通。回流线可采用单芯电缆，同时电缆在电缆隧道内敷设时，电缆隧道内的接地线也具有一定程度的回流线功能。以下分别对两种形式的回流线效果进行计算。

2.2.1 当采用单芯电缆作为回流线时

(1) 电缆截面选择

允许最小截面积按照110 kV侧最大运行方式下单相短路的热稳定值进行选择，即

$$S_{\min} = \frac{\sqrt{Q_t}}{C} \times 10^5 = 129.7 \text{ mm}^2 \quad (4)$$

式中， $S_{\min}$ 为电缆允许最小截面积， mm^2 ； Q_t 为短路电流热效应，为 $I_k^2 t$ ， t 取线路后备保护动作时间， $\text{kA}^2 \cdot \text{s}$ ； C 为电缆的热稳定系数。

(2) 电缆耐受电压等级选择

计算发生单相接地短路故障时，金属护层上感应过电压为7.38 kV，为满足电缆导体与绝缘层的耐受电压水平，电缆应采用10 kV电压等级。

经计算，回流线可采用ZA-YJV-8.7/10 kV 1×150型单芯电缆，在前 $L/2$ 段固定在A、B相电缆之间敷设，在后 $L/2$ 段固定于B、C相电缆之间敷设，其中 L 为新增电缆段总长度。

增加回流线后，回流线与变电站接地网连通，此时感应过电压为

$$U_{\text{OV.AC}} = \left(Z_{\text{AA}} - Z_{\text{PA}} \frac{R_1 + R_2 + LZ_{\text{PA}}}{R_1 + R_2 + LZ_{\text{PP}}} \right) LI_k = 0.22 \text{ kV} \quad (5)$$

式中， Z_{AA} 为A相金属护层和发生接地故障的线芯以大地为回路的互阻抗； Z_{PA} 为A相金属护层和回流线以大地为回路的互阻抗； Z_{PP} 为回流线以大地为回路的自阻抗； R_1 、 R_2 为两端的接地电阻， Ω 。

增加回流线后，感应电压下降至0.22 kV，可以满足护层电压限制器及绝缘层的耐受电压要求。

2.2.2 当采用接地扁钢作为回流线时

本次已建电缆隧道全线敷设两根-50×5 Q235B接地扁钢，导体热稳定校验如下

$$S_{\min} = \frac{\sqrt{Q_t}}{C} \times 10^5 = 172.4 \text{ mm}^2 \quad (6)$$

式中， $S_{\min}$ 为导体允许最小截面积， mm^2 ； C 为导体的热稳定系数，钢取70。

在式(5)中，计算增加回流线后金属护层感应过电压值时均需回流线导体的平均半径，而接地扁钢无法确定其平均半径，故本次采用同等截面积及电阻率的 $\phi 18$ Q235B圆钢进行校验，电阻为0.51 Ω/km ，代入式(5)计算后得 $U_{\text{OV.AC}} = 1.30 \text{ kV}$ ，仍可满足要求。

经计算，以上设置独立回流线和利用已建接地扁钢作为回流线，在发生单相接地故障抑制金属护层感应过电压时，均可以保证在护层电压限制器工频电压以下，且独立回流线效果较好，但从投资角度分析，利用电缆隧道内已有接地扁钢更经济，且利于后期维护，关键还可以防盗，故本工程利用已建电缆隧道内-50×5接地扁钢作为回流线。

3 结束语

本文对单芯电缆交叉段互联不等分单元内感应电压的计算以及单点接地段两种形式的回流线效果进行计算，得出以下结论：

1) 单芯电缆交叉互联段内感应电压与电缆运行电流、敷设方式和分段长度均有关，对于实际工程中无法等分段电缆应计算分析其感应电压大小，确保感应电压在规范允许范围内，避免护层环流过大，造成金属护层发热及降低电缆输送能力。

(下转第70页)

- [4] 王治国. 超级电容储能技术在网电修井机中的应用 [J]. 石油机械, 2015, 43 (5): 104-106.
- [5] 徐刚, 王树龙, 韩菊, 等. 基于功率补偿的电动修井机控制系统 [J]. 机电工程技术, 2013, 42 (9): 11-15.
- [6] 高胜, 庞伶俐, 常玉连, 等. 修井井口机械自动化技术现状分析与展望 [J]. 石油机械, 2012 (2): 80-85.
- [7] 童亦斌, 吴岫, 金新民, 等. 双向DC/DC变换器的拓扑研究 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (13): 81-86.
- [8] 马奎安, 陈梅. 超级电容器储能系统充电模式控制设计 [J]. 2010, 27 (7): 85-88.
- [9] 万山明, 吴芳. 开关电源 (Buck电路) 的小信号模型及环路设计 [J]. 电源技术应用, 2004 (3): 142-145.
- [10] 王华, 谢元宝, 伍祚, 等. Buck斩波电路电流连续与电流断续的比较研究 [J]. 船电技术, 2017, 37 (5): 43-45.
- [11] 李继方, 汤天浩, 姚刚. 基于切换系统的储能节能系统双向DC-DC变换器建模与控制 [J]. 电工电能新技术, 2011, 30 (4): 21-25.
- [12] 于超光, 于红理, 胡明清. 风力变桨系统超级电容充电机设计与仿真 [J]. 变频器世界, 2015 (3): 39-42.
- [13] 徐德鸿. 电力电子系统建模及控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [14] 张婷, 程红丽, 黄文准, 等. Buck-Boost变换器电流滞环控制策略的研究与改进 [J]. 电子器件, 2016, 39 (2): 320-323.
- [15] 吴高阳, 鲁刚, 王红波, 等. 一种功率可调的恒功率电源 [J]. 电气开关, 2017, 55 (1): 16-19.
- [16] 张永昌, 高基豪. 预测直接功率控制中的数字延迟分析及补偿策略研究 [J]. 电气工程学报, 2016, 11 (11): 1-8.
- (收稿日期: 2018-02-10) **EA**

(上接第64页)

2) 对于单点接地的电缆线路应分析计算, 当发生单相短路故障时, 金属护层感应过电压对电缆绝缘水平及护层电压限制器耐受电压有影响, 避免感应过电压过大, 造成绝缘击穿或护层电压限制器损坏。当电缆在电缆隧道内或电缆沟内敷设时, 设置独立回流线及利用接地线作为回流线, 均具有降低护层感应过电压的作用。针对不同工程, 应核算两种方式对降低感应过电压的效果, 从而选择经济可行的措施。

参考文献

- [1] 刘杰. 高压电缆护套环流分析及防范措施 [J]. 通信电源技术, 2013, 30 (6): 58-61.
- [2] 种鹏蛟, 顾勇刚. 单芯电缆线路交叉互联环流分析 [C]. 2010电力电缆状态检修技术交流会论文集, 2010: 302-304.
- [3] 李国荣, 熊涛, 等. GB 50217—2007 电力工程电缆设计规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2007.
- [4] 江日洪. 交联聚乙烯电力电缆线路 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [5] 盛洞天, 李明亮. 回流线对电缆护层感应电压的影响分析 [J]. 现代商贸工业, 2011 (14): 271-272.
- (收稿日期: 2018-03-12) **EA**