110～220 kV单芯电缆护层接地及保护设计

110～220 kV电缆线路在城市电网建设过程中已被大量采用，其不易遭雷击、敷设设施占地面积少以及不影响城市景观等优点得到了充分体现。但高压单芯电缆在设计、使用过程中存在一些技术问题必须加以重视，否则会影响电缆线路的载流能力、运行寿命，甚至危及人身安全。从设计角度对高压单芯电缆护层接地及其保护进行了探讨。

季爱晖/宝钢工程技术集团有限公司

季爱晖/高级工程师

关键词/Keywords

电缆线路·
护层·
接地方式·
感应电压·
保护·

0 引言

城市电网入地建设不仅节约了大量的土地资源和空间资源，还减少了“城市蜘蛛网”，美化了城市环境。110～220 kV电缆线路在北京、上海等特大城市早已大量投入使用，取得了较好的社会效益。如今各大城市在电网建设过程中越来越重视以110～220 kV电缆作为主干输配电线路。

但是，110～220 kV电缆线路均为高压单芯电缆，为确保其能够长期安全运行，在设计阶段应高度关注电缆敷设、金属护层接地及其保护等技术问题，尤其是各种工况的护层感应电压值计算，应在允许值范围内，并针对工程条件的不同，配置相应的护层保护设备。

1 单芯电缆金属护层感应电压计算

单芯高压电缆正常运行时护层会产生感应电压，为安全运行，保证设备和巡检、运维人员的安全，设计时应计算单芯高压电缆的金属护层感应电压，并应在规范的允许值范围内。依据GB 50217—2007《电力工程电缆设计规范》，电缆线路的正常感应电动势最大值应满足下列规定：①未采取能有效防止人员任意接触金属层的安全措施时，不大于50 V；②除上述情况外，不得大于300 V。

交流系统中一回线路的三相单芯电缆线路以不同方式排列布置时，在电缆金属护层上非直接接地处的正常感应电压值可分别按照下列公式计算。

1）三相电缆呈等边三角形即“品”字形布置时

$$E_A = E_B = E_C = LIX_0 \qquad (1)$$

2）三相电缆呈直角三角形布置时

$$E_A = E_C = L \times 0.5I \times \sqrt{3}(X_0 + \frac{a}{2})^2 + (X_0 - \frac{a}{2})^2$$

$$E_B = LIX_0 \qquad (2)$$

3）三相电缆呈直线平行即“一”字形布置时

$$E_A = E_C = L \times 0.5I \times \sqrt{3}(X_0 + a)^2 + (X_0 - \frac{a}{2})^2$$

$$E_B = LIX_0 \qquad (3)$$

式中，E_A、E_B和E_C分别为A、B和C相电缆护层感应电压，V；L为电缆金属层电气通路上任意一点到直接接地处的距离，km；I为电缆导体正常工作电流，A；a为$2 \times 2\pi f \times \ln 2 \times 10^{-4}$（Ω/km）；$X_0$为$2 \times 2\pi f \times \ln(S/r) \times 10^{-4}$（Ω/km），$S$为各相邻电缆之间的中心距，m，$r$为电缆金属层的平均半径，m，$f$为工作频率，取50 Hz。

实际工程中，110～220 kV电缆线路一般敷设在专用的电缆管沟、电缆隧道或综合管廊中，通常无法全程设置能有效防止人员任意接触高压电缆金属护层的安全措施，所以工程设计时必须限制

其护层感应电压小于50 V，以此来确定线路的长度或长距离线路分段的长度。

2 单芯电缆金属护层接地方式

高压单芯电缆运行时，将在电缆金属护层产生感应电压。感应电压过高时，会使电缆金属护层及配套电缆附件、配件击穿损坏。为此，应对高压单芯电缆金属护层作接地保护设计，即确定相应的接地保护方式，配置高压电缆护层保护箱，正确选用氧化锌避雷器作过电压保护器。

2.1 一端接地，另一端经护层保护器接地

单芯高压电缆线路一端的电缆金属护层相互并联后接地，另一端经护层保护箱的每相过电压保护器相互并联后接地，如图1所示。

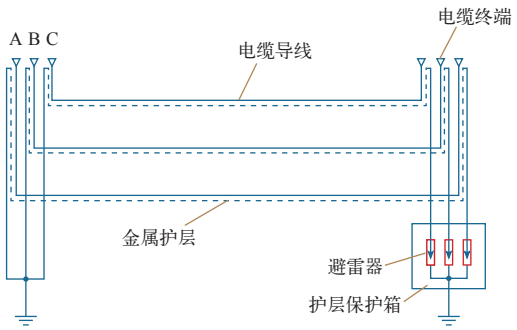

图1 一端接地，另一端经护层保护器接地

这种接地方式最大护层感应电压出现在护层保护箱内的过电压保护器接入端，正常运行时护层与地之间存在护层感应电压，各点感应电压值正比于电缆长度和电缆中流过的电流。但由于没有电流通路，护层内不会产生环流，也不产生损耗。这种接地一般适用于短距离的电缆线路中，因电缆护层不产生损耗，电缆的允许载流量相对较大。

过电压保护器（避雷器）的正确选择可以有效地防止护层绝缘击穿，当线路遭到雷击时，护层开路端会产生外过电压；在倒闸操作或系统短路时，护层开路端会产生很高的内过电压，因此在开路端设置过电压保护器非常必要。

2.2 两端分别并联接地

高压单芯电缆线路一端的电缆金属护层相互并联后接地，另一端的电缆金属护层相互并联后也直接接地，如图2所示。

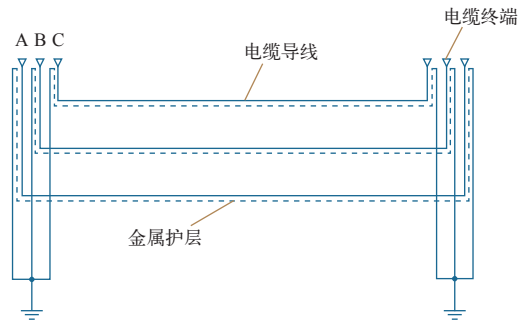

图2 两端分别并联接地

这种接地方式，正常运行时护层与地之间存在护层感应电压，且由于存在电流通路，在护层内会形成环流，产生损耗，通常会减小电缆的允许载流量。这种接地方式一般仅适用于短距离的电缆线路中，电缆的允许载流量相对较小，三相电缆呈“品”字形，敷设比“一”字形敷设所产生的损耗要小。

2.3 交叉互联两端连地

交叉互联是以三段等长度电缆组成一交叉互联段，每个分段之间通过绝缘中间接头相连接，绝缘接头将电缆的导体连通，而金属护层由接头盒外壳的绝缘法兰加以隔离，在绝缘接头处金属护层通过同轴电缆换位到另一相，使整根电缆的三相金属护层感应电压的矢量和接近于零。为简化起见，本文仅给出了电缆未换位的交叉互联两端接地方式的接线图，如图3所示。

这种接地方式情况下，在产生内、外过电压时，绝缘中间接头两侧也会产生过电压，同时

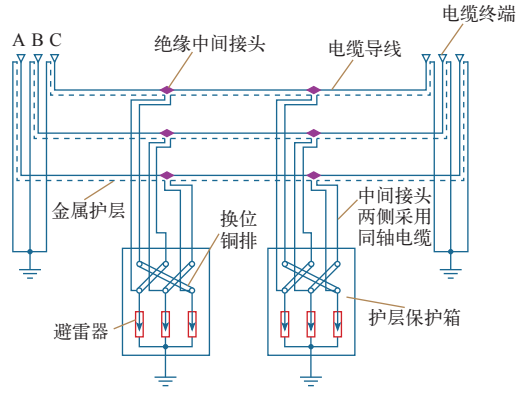

图3 交叉互联两端接地（电缆未换位）

会出现最大护层感应电压，容易发生护层绝缘击穿，因此在此处应装设过电压保护器。

在“一”字形敷设的三相电缆中，中间相护层电缆感应电压较两个边相低，为了使交叉互联取得更好效果，可以将一个交叉互联段内的电缆换位敷设，使护层感应电压均匀分布。这种接地方式适用于长距离的电缆线路中，因电缆护层没有环流，且不产生损耗，故电缆的允许载流量相对较大。

采用交叉互联保护方式时，电缆分段段间长度尽可能相同。分段长度不一致时，其差额不宜超过10%，必要时应进行电缆护层的损耗计算，以免损耗过大而影响电缆载流量。

3 单芯电缆金属护层保护设计

3.1 护层保护设计的必要性

在系统正常运行时，为确保人身安全，高压单芯电缆最大护层感应电压应小于50 V。

在非正常工况出现时，选择的保护措施应能确保电缆及其配套件的安全运行，即护层保护器的选择必须满足以下条件：

1）在系统最大短路电流出现时，护层保护器处的感应电压计算值应小于护层保护器的工频耐压值，确保护层保护器不损坏。

2）在系统最大短路冲击电流出现时，护层保护器处感应电压计算值应小于护层保护器冲击耐压值，确保护层保护器不损坏。

3）在雷电和开关操作过电压出现时，护层保护器动作，通过冲击电流，此时护层保护器处残压值应小于电缆护层冲击耐压值被1.4所除的值。

4）在雷电和开关操作过电压出现时，护层保护器动作，通过冲击电流，护层保护器应具有耐受20次冲击的能力而不致损坏。

3.2 工程实例设计

（1）工程概述

某冷轧厂拟增设一台100 MV·A、110/10 kV变压器，采用线路－变压器组方式供电，110 kV电源引自上级中央变电所110 kV母线，该110 kV母线的最大三相短路电流为40 kA，变压器高压侧额定电流为525 A。

110 kV电缆采用交联单芯电缆，技术参数如下：导体截面积为300 mm^2；外护层厚度为3.5～4.5 mm；电缆外径为78.5 mm；导体半径为10.4 mm； PVC护层冲击耐压为17 kV/mm；PE护层冲击耐压为14 kV/mm；电缆总长度为650 m。

三相110 kV电缆在隧道内桥架上呈“品”字形蛇形敷设，电缆不分段，电缆金属护层拟采用一端接地，另一端经护层保护器接地。

（2）电缆护层感应电压计算

根据式（2），各工况下线路电缆护层最大感应电压计算如下。

1）当系统正常运行时

$$E_A=E_B=E_C=L\times I\times 2\times 2\pi f\times\ln(S/r)\times 10^{-4}$$
$$=[0.65\times 525\times 628\times\ln(78.5/10.4)\times 10^{4}]\text{V}$$
$$=43.3\text{V} \quad (4)$$

计算结果小于50 V，满足规范要求，正常运行时能保证人身安全。

2）当系统最大运行方式下发生三相短路时

$$E_A=E_B=E_C=L\times I\times 2\times 2\pi f\times\ln(S/r)\times 10^{-4}$$
$$=[0.65\times 40\,000\times 628\times\ln(78.5/10.4)\times 10^{-4}]\text{V}$$
$$=3300\text{V} \quad (5)$$

选择的护层保护器工频耐压值应大于3.3 kV。

3）当系统最大运行方式下发生三相短路时，冲击电流为2.5 × 40 000 = 100 000 A，则

$$E_A=E_B=E_C=L\times I\times 2\times 2\pi f\times\ln(S/r)\times 10^{-4}$$
$$=[0.65\times 100\,000\times 628\times\ln(78.5/10.4)\times 10^{-4}]\text{V}$$
$$=8251\text{V} \quad (6)$$

选择的护层保护器冲击耐压值应大于8.25 kV。

（3）电缆护层耐压水平计算

根据电缆技术参数，外护层厚度为3.5～4.5 mm（平均值取4 mm）；PVC护层冲击耐压为17 kV/mm；PE护层冲击耐压为14 kV/mm，由此可得交联单芯电缆护层初始耐压值如下

PVC护层：17 kV/mm × 4 mm = 68 kV

PE护层：14 kV/mm × 4 mm = 56 kV

由于作业附加因素（$R_1=0.5$）、使用年限（$R_2=0.8$）以及施工时护层损失（$R_3=0.7$）等原

因的存在，会使电缆护层耐压值变小，计算得

PVC护层：(68×0.5×0.8×0.7) kV＝19 kV

PE护层：(56×0.5×0.8×0.7) kV＝15.7 kV

通过上述计算，本工程中最终选择了ABB公司的避雷器BHQ－3.6作为护层保护器，使用效果良好。

（4）护层保护线选择

交叉连接处中间接头的护层保护连接线必须采用同轴电缆，并按系统接地电流大小选择截面积。

其他电缆中间接头、电缆终端头的护层保护连接线可采用 PVC电力电缆，推荐采用同轴电缆，并按系统接地电流大小选择截面积。

护层保护的连接线长度尽量短，不宜超过10 m。

4 结束语

高压单芯电缆的应用在重视其金属护层接地及保护的同时，还应重视电缆的防火敷设设计，尤其是对特别重要的回路（如联络线），应采用高强度、长寿命、免维护以及满足防火要求的玻璃钢电缆防火槽盒加以保护；还应关注高压电缆敷设紧固件的配置，由于单芯高压电缆的直径大、绝缘厚、短路时动稳定力大以及受环境温度影响轴向应力变化大等因素，电缆敷设时应选用专用的高压电缆紧固件。如可调节钢管立柱，用于电缆隧道、电缆接头井和电缆井，作为电缆高差调节、换位、转向及电缆头紧固；带防护的铸铝磁枕（或玻璃钢磁枕），可用于变压器或开关地下室、电缆隧道、电缆接头井和电缆井，作为电缆落地支撑件或各类托臂上电缆支持件。

参考文献

[1] GB 50217—2007 电力工程电缆设计规范 [S].

[2] 《钢铁企业电力设计手册》编委会．钢铁企业电力设计手册 [M]．北京：冶金工业出版社，1996．

（收稿日期：2017－01－12）EA

广告 | AD

Weidmüller

魏德米勒Energy Meter电力参数测量仪
—— 高效透明的生产电能监测

魏德米勒Energy Meter电力参数测量仪不仅能监测电能的消耗，它还能监测电能质量的基本参数和分析来自不同导体的电流的细微差别，使电力行业用户能够快速地了解生产设备中电能参数的变化情况，保证其稳定和高效率地使用。具有综合功能的Energy Meter电力参数测量仪使您可以将生产点的能源网络分块测量，尽可能精确地进行监测，配备有一体的液晶显示屏，重要的监测数据如电压、电流、功率和能耗都能一目了然。

扫一扫，关注魏德米勒官方微信

Let's connect.

魏德米勒电联接(上海)有限公司
电话: 86 21-22195008 网址: www.weidmueller.com.cn