

架空线—电力电缆混合线路特性及保护配置探讨

江少成¹, 岳亚丽², 潘震宇¹, 黄万骏¹, 陈雷¹

(1. 温州电力局, 浙江 温州 325000; 2. 湛江供电局, 广东 湛江 524005)

摘要:从电力电缆的正序、负序、零序阻抗特性及零序阻抗与零序电流的关系, 分析了电力电缆同架空线的不同之处。在传统保护的基础上提出了自适应接地距离保护和零序电流保护方案。该方案能适应电网各种运行方式, 在各种接地故障时均能更可靠起到保护作用。

关键词: 电缆; 零序阻抗; 自适应; 接地距离保护; 零序电流保护

Abstract: Firstly, by introducing the characteristics of positive sequence impedance, negative sequence impedance, zero sequence impedance and the relationship between zero sequence impedance and zero sequence current, the differences between power cable and transmission line are analyzed. Then, the schemes of adaptive algorithm of ground distance relaying and zero sequence current protection are proposed based on the traditional current protection method. The scheme can be adapted for all operation modes of power grid. And it could provide a well protection to the power grid when all kinds of earth fault take place.

Key words: cable; zero sequence impedance; adaptive algorithm; ground distance protection; zero sequence current protection

中图分类号: TM773 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)06-0042-03

现阶段所使用的高压输电网络设备主要有两种: 架空线和电力电缆。架空线作为一种传统的输电线路, 其各种电气参数都比较稳定, 各种保护方案都有了比较完善的理论体系。但是由于它占地面积大, 电磁干扰强烈, 影响了城市的景观和环境, 逐渐淡出城市输电网络。

随着中国大中型城市建设的飞速发展和城市规划的要求, 电力电缆以其占地少、对人身安全、供电可靠、维护工作量小等优点得到了广泛的应用。城区 220 kV 和 110 kV 线路大量采用电力电缆, 特别是架空—电缆混联线路得到广泛使用。

但是电力电缆的电气参数不像架空线那样稳定, 尤其是它的零序参数, 均会随着所流经的零序电流的变化而发生改变, 正由于此, 传统的继电保护方案并非完全满足电力电缆的保护需要。在高压架空线路保护的基础之上, 针对电缆电气参数的特点, 探讨一种电缆—架空线混合线路的保护方案, 并进行理论、仿真分析甚至有条件进行试运行具有较好的意义和价值。

1 电力电缆的电气特性

目前使用的电力电缆有橡皮绝缘电力电缆、聚氯

乙烯绝缘电力电缆、油浸纸绝缘电力电缆、交联聚乙烯电力电缆 (XLPE)、高压充油电力电缆、SF₆ 气体绝缘电力电缆、超导电缆等。其中以 XLPE 应用最为广泛, 是城市电网改造的首选。

电缆由于制作工艺的不同, 使得它的电容和电感比较起普通架空线有很大的不同。架空线路的相间距远大于电缆线路相间距, 因此电缆的单位长度电感小的多, 由此导致一般电力电缆的阻抗角都明显小于架空线路的阻抗角。电缆的小电感特性带来了一系列诸如负载分配和短路电流水平等问题, 同时也影响继电保护的配置方案。

电力电缆无论是缆心之间, 还是缆心与护套之间的间距都要小得多, 再加上绝缘材料的高介电常数, 造成电缆的单位长度的电容要远大于架空线路单位长度的电容, 较同电压等级架空线路单位长度电容基本上高一个数量级, 较大数量级的分布电容必将在线路中产生较大的容性电流。对于较长电缆线路显然不能忽略分布电容所产生的容性电流对于保护配置的影响。

1.1 电缆的正负序阻抗

电缆线路序阻抗除了需要考虑电缆的型号、结构、护套接地方式以及布置 (例如是否布置于磁化通

道中)等因素之外,还必须计及集肤效应以及邻近电缆效应的影响。一般来讲,由于电缆缆心间距较小,正序(负序)阻抗比架空线要小。

1)单心电缆线路的金属护套只有一点互联接地;或各相电缆和金属护套均换位,且三个换位小段长度相等;或金属护套连续换位得很好时,电缆的正序(负序)阻抗为

$$Z_1 = Z_2 = R_c + j \frac{2}{3} \omega \times 10^{-4} \ln \frac{S \times nS \times mS}{GMR_A \times GMR_B \times GMR_C} \quad (1)$$

式(1)中, Z_1 、 Z_2 为单位正、负序阻抗; ω 为角频率; R_c 为三相线心的平均交流电阻, Ω / km ; S 、 mS 、 nS 为电缆各相相间距离; GMR_A 、 GMR_B 、 GMR_C 为自几何均距。

2)电缆的金属护套两端直接互联(接地)时,护套内电流与心线电流方向相反,并产生护套损耗,导致电缆正序(负序)电阻减小,正序(负序)电抗增加,计算公式如下。

$$Z_1 = Z_2 = R_c + j \frac{2}{3} \omega \times 10^{-4} \ln \frac{S \times nS \times mS}{GMR_C} + \frac{X_m R_s}{X_m^2 + R_s^2} - j \frac{X_m^3}{X_m^2 + R_s^2} \quad (2)$$

式(2)中, X_m 为金属护套与线心间的单位互感; R_s 为金属护套的直流电阻, Ω / km ; GMR_C 为线心的几何半径。

1.2 电缆的零序阻抗

1)短路电流一大地位回路:电缆线路的金属护套只在一端互联接地,而邻近无其他平行的接地导线,则在电网发生单相接地故障时,短路电流以大地作回路。单回路的零序单位阻抗为

$$Z_0 = 3 \{ R_c + R_g + j 2 \omega \times 10^{-4} \ln \frac{D_e}{[GMR^3 (S \times nS \times mS)^2]^{1/3}} \} \quad (3)$$

式(3)中, Z_0 为单位零序阻抗, Ω / km ; GMR 为线心的几何半径, D_e 为故障电流以大地作回路的等值回路深度; R_g 为大地漏电阻。

2)短路电流以金属护套作回路:电缆线路的金属护套在两端直接互联或交叉互联接地时,短路电流通过大地部分可忽略不计,可认为短路电流全部以金属护套作回路,回路电阻为金属护套的并联电阻,则单回路的零序单位阻抗为

$$Z_0 = R_c + R_s + j 2 \omega \times 10^{-4} \ln \left(\frac{GMR_s}{GMR_c} \right) \quad (4)$$

式(4)中, GMR 为金属护套的几何半径。

电缆金属护套仅在一端互联接地时,其零序单位阻抗值约为正、负序单位阻抗值的 7~10 倍。护套在两端互联接地时,电缆零序单位阻抗仅略大于正、负序单位阻抗值,而架空线路的 X_0 约为 X_1 的 3.6~4.5 倍。

对于 XLPE 套管型电缆,其零序阻抗的大小取决于所处铁磁场的导磁率,零序电流增大,磁感应强度增大,相对导磁率会增大。但是磁感应强度过大又会导致磁饱和,这就造成了处于铁磁场中的高压地下电缆的零序阻抗随零序电流的大小而改变。文献 [1] 给出了某电缆的零序阻抗与零序电流的关系曲线,如图 1。

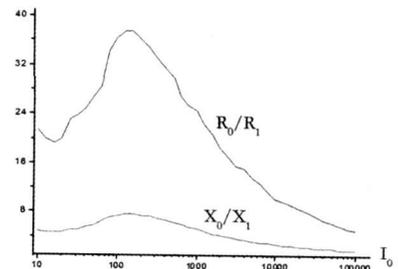


图 1 电缆零序电阻、电抗比与零序电流之间关系曲线

2 自适应接地距离保护方案

传统架空线接地距离保护,在理论和运行上已经相对完善,对于架空线路的保护可以说是尽善尽美,并且长期的使用中,也积累了相当的经验。而当运用在电力电缆中,却不相同, Z_0 会随着零序电流的不同而变化。因此,将传统接地距离保护的整定计算方法运用到电力电缆时,就会出现较大误差,甚至会带来运行上的错误。

电力电缆的零序阻抗和零序电流成非线性的函数关系,可以采用已有的零序电抗和零序电流的函数关系曲线(根据电缆出厂数据或投运前试验数据)。同时选用以零序电流为极化量的接地方向阻抗继电器和多边形阻抗继电器,以减小保护区受过度电阻的影响,使得保护区更加稳定;并且采用极化量后,受电力电缆的特殊电气特性影响较小,利于保护的可靠性和选择性。

以正序电压为极化量的接地方向阻抗继电器动作方程可以转化为

$$90^\circ \leq \frac{U_\Phi - [I_b + \frac{R_1 (\frac{R_0}{R_1} - 1) \times 3I_b + X_1 (\frac{X_0}{X_1} - 1) \times 3I_b}{3Z_1}] \times Z_{set}}{U_{\Phi 1} e^{j\theta}} \leq 270^\circ \quad (5)$$

式 (5) 中, U_Φ 为继电器所测得的电压; I_b 为继电器所测得的电流; $U_{\Phi 1} e^{j\theta}$ 为正序电压极化量; Z_{set} 整定阻抗。

记录所要保护电力电缆的电气参数, 包括电力电缆的长度、单位零序阻抗、单位正序阻抗, 电压等级等, 零序阻抗的初值一般采用电力电缆出厂设置。将整条线路分成很多小段, 对于单相接地短路和两相接地短路故障时, 对各个小段进行迭代逐次逼近计算, 得到不同短路点时的零序短路电流和 $(\frac{X_0}{X_1} - 1) 3I_b$ 、

$(\frac{R_0}{R_1} - 1) 3I_b$ 的函数关系, 并拟合成该线路的故障曲线。当发生接地短路时, 采集零序电流, 判断接地短路故障的类型是单相接地还是两相接地短路。将所采集的数据, 根据故障类型, 带入到计算机中对应的拟合曲线, 根据函数关系获得 $(\frac{X_0}{X_1} - 1) 3I_b$ 和 $(\frac{R_0}{R_1} - 1) 3I_b$, 根据式 (5) 来判断, 阻抗继电器是否动作。

3 自适应零序电流保护方案

对于电缆—架空混合线路, 电缆的零序阻抗是会随着零序电流的变化而变化的, 而架空线路的零序阻抗基本上趋于稳定, 不会随着运行状况的变化而发生变化。所以, 混合线路的零序参数是零序电流的非线性函数。文献 [2] 提供了两种零序阻抗的求取方法: 一种方法是查阅制造厂家提供的阻抗电流曲线, 但是, 人工查阅阻抗曲线的方法, 精确度较低而且费时、费力, 可行性很低; 另一种方法是基于迭代算法采用计算机编程实现对阻抗值的求取。

自适应零序电流保护方案的关键点在于设法确定给定线路在发生接地短路时零序电流与短路位置间的关系, 做出相应的关系曲线。其主要步骤如下。

(1) 确定该线路所处系统的经常运行方式、最大运行方式和最小运行方式。

(2) 收集被保护混合线路的基本参数, 包括架空线路的单位零序阻抗值, 电缆线路的参考零序阻抗初

值, 电缆的长度以及架空线路的长度等。

(3) 将整条混合线路合理分为诸多小段, 所分的小段数目越多则最终程序的计算精度就越高。

(4) 将系统最大运行方式至最小运行方式大区间合理划分为若干运行小区间, 然后逐一计算各运行方式下, 逐点发生接地短路故障时所流经的零序电流的大小。

(5) 将步骤 (4) 产生的数据采用最小二乘法对阻抗电流曲线进行拟合, 生成整条混合线路零序电流与短路位置间的关系曲线。每一种运行方式就对应着一条关系曲线。

(6) 当接地短路发生后, 采集零序电流值, 并判断短路的类型。计算短路前后短时间内的电压、电流突变量, 确定此时系统的运行方式, 并根据步骤 (5) 得到的关系曲线确定短路位置。

(7) 零序电流保护逻辑系统根据故障位置或故障零序电流值, 决定是否动作。

具体计算流程图如图 2 所示。

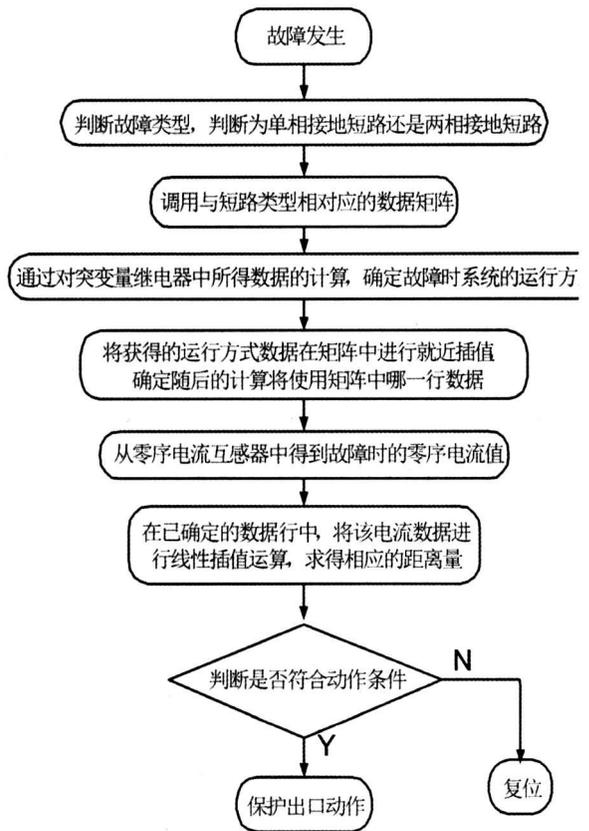


图 2 保护算法流程

该保护方案采用分布参数电路模型, 并充分考虑到电缆各部分的阻抗值会随短路点的变化而变化的

(下转第 54 页)

定,管道膨胀均匀,无振动,参数调整符合新老机组使用要求,实现了温度、压力的智能化自动调节,随时满足新老机组用汽要求,达到了预期目标,因此,可在需要不同品质、大流量蒸汽参数的企业中推广使用。

参考文献

[1] 李青,张兴营,徐光照.火力发电厂生产指标管理手册

[M].北京:中国电力出版社,2007.

[2] DL/T 5054-1996,火力发电厂汽管道设计技术规定 [S].

[3] 张燕侠.热力发电厂 [M].北京:中国电力出版社,2006.
(收稿日期:2009-02-23)

(上接第 44 页)

特性,将短路点的位置量作为继电器动作判据,较符合实际电缆运行状况。

4 仿真计算实例

对于某 110 kV 中长电缆线路,系统简化图如图 3 所示(MN 为电缆线路),系统参数如下。

$$Z_{1S} = (1.063 + j10.6)\Omega$$

$$Z_S = (1.216 + j11.4)\Omega$$

电缆线路采用 YJLW03 110/1×400 型 XLPE 长度为 20 km;电缆电气参数为 $R_1 = 0.0543 \Omega/\text{km}$, $X_1 = 0.211 \Omega/\text{km}$, $C_1 = 0.159 \mu\text{F}/\text{km}$;零序阻抗待定。相邻导线为架空线,选用型号为 LGJ-120 导线,线路电气参数为 $R_1 = 0.27 \Omega/\text{km}$, $X_1 = 0.412 \Omega/\text{km}$, $C_1 = 0.0088 \mu\text{F}/\text{km}$ 。变压器为 SF-20000/110 型, $P_k = 163 \text{ kW}$, $U_k\% = 10.5$, $P_0 = 60 \text{ kW}$, $I_0\% = 3$ 。

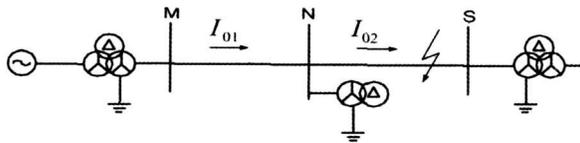


图 3 某 110 kV 系统网络接线图

零序 I 段按照上面提供的自适应计算步骤先离线确定电缆线路零序阻抗,在线路发生接地短路的情况下,根据短路类型在线、动态地确定零序 I 段的动作电流。在上述参数下,一般经过 5、6 次迭代运算,运算精度满足要求;计算经过表明单相接地故障时本方案零序 II 段灵敏度系数为 3.11,较传统方法提高 25%;两相接地短路时零序 II 段灵敏度系数 2.34,较传统方法提高 26%。

5 总结

综上所述,电力电缆零序阻抗具有非线性,随着

电缆线路所处系统的运行方式的改变、故障类型的改变,零序阻抗也会改变。

所提出的基于迭代算法的电缆线路的零序电流保护,充分考虑了电缆零序阻抗的特性,采用拟合曲线确定零序电流与短路点的关系。其整定值可以适应系统运行方式的改变;当系统运行方式改变时,保护针对该方式的仿真模型,进行迭代计算,从而可以精确确定该方式下的电缆零序阻抗及其整定值;虽然电缆线路零序阻抗不是常数,随着所处系统零序电流的大小而改变,因采用自适应插值的整定方法,保护的范

参考文献

[1] 丁蕾,范春菊.高压地下电缆自适应继电保护方案的研究 [J].继电器,2004,32(22):43-47.

[2] ZIPP J CONROY M. Protective relaying Considerations for Transmission Lines with High Voltage AC Cables IEEE Trans on Power Deliver, 1997, 12 (1): 83-96.

作者简介:

江少成(1979-),男,浙江龙游人,工程师,从事电力系统调度工作。

岳亚丽(1980-),女,河南人,助理工程师,从事电力系统继电保护工作。

潘震宇(1972-),男,浙江温州人,助理工程师,从事电力系统运行工作。

黄万骏(1972-),男,浙江温州人,助理工程师,从事电力系统调度工作。

陈雷(1982-),男,浙江温州人,助理工程师,从事电力系统调度工作。

(收稿日期:2009-09-17)