

# 高压地下电缆自适应继电保护方案的研究

丁蕾, 范春菊

(上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

**摘要:** 针对电力电缆与架空线路电气参数的不同, 分别从电力电缆分布电容以及零序阻抗两方面出发, 提出了适用于高压地下电缆的自适应保护方案。通过对采用电容电流补偿和不采用电容电流补偿的分相电流差动保护的動作行为的比较分析, 证明了电容电流补偿的必要性, 提出了基于电容电流半补偿的分相电流差动保护方案。由于电缆线路零序阻抗非线性特性对保护性能产生很大的影响, 精确计算电缆线路零序阻抗是非常必要的, 故提出了基于迭代算法的自适应零序电流保护方案的思路与步骤。

**关键词:** 高压地下电缆; 继电保护; 分布电容; 电容电流补偿; 零序阻抗

**中图分类号:** TM77      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1003-4897(2004)22-0043-05

## 0 引言

随着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 线路已经大量采用电力电缆进行输配电, 根据电网规划的要求, 预计在不久的将来还会出现 500 kV 电缆线路输电。但是我国目前针对高压以及超高压地下电缆输电线路保护方面的研究还相当的少, 所运行电力电缆线路均采用常规架空线路继电保护(包括微机保护)装置。尽管保护在运行过程中尚未反映出特殊问题, 但把架空线路保护照搬到电缆线路中是不适宜的。本文着重从电缆电气参数的特性入手, 讨论了它对保护的影响。借鉴长距离、高电压架空输电线路电流差动保护中电容电流的补偿方法, 提出了适于纵差保护的电容电流半补偿方案, 并对其動作行为进行了分析; 考虑到电缆线路零序阻抗的非线性, 提出了基于迭代算法的自适应零序电流保护整定计算步骤。

## 1 电力电缆电气参数特性

高压电力电缆与高压架空线路的电气参数特性有很大的不同, 当电缆用作电力输电线路时, 必须考虑它们之间不同的电气参数特性。

### 1.1 电力电缆电容与电感

在所有有关电缆电气参数特性的研究中, 关键是分布电容。同架空线路相比, 电力电缆无论是缆芯之间还是缆芯与护套之间的间距都要小的多; 另外由于绝缘材料的高介电常数, 造成电力电缆单位长度的电容要远大于架空线路单位长度的电容。数

值很大的电容电流将使输电线路两端的电流的幅值与相位发生严重畸变, 严重影响分相差动保护的動作特性。

此外, 由于架空线路的相间距远大于电缆线路相间距, 因此电力电缆的单位长度电感小于架空线路, 电缆的小电感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方案及配置。

### 1.2 电力电缆各序阻抗

#### 1.2.1 正序(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, 由于电缆缆芯间距较小, 正序(负序)阻抗比架空线要小。

文献[10]按照护套接地方式的不同, 分别提供了护套单端接地以及两端直接接地电缆正负序阻抗的详细计算方法。

1) 金属护套单端接地: 电缆的正序(负序)阻抗计算方法同架空线;

2) 金属护套两端直接接地: 护套内电流与芯线电流方向相反, 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。

#### 1.2.2 零序阻抗

电缆线路的零序电流同时经大地和护套(相当于架空线)返回, 对于安装于非磁化通道中的高压电缆, 零序阻抗介于以下两种情况之间

1) 金属护套单端接地: 短路电流主要以地作为回路, 护套内电流最小, 零序阻抗达到最大值;

2) 金属护套两端直接互联或交叉互联接地: 可

以认为短路电流全部以金属护套作为回路,流过大地部分的可以忽略,此时护套内电流最大,零序阻抗达到最小。

电缆线路的零序阻抗一般通过实测获得,在工程中可采用如下近似估计公式

$$\begin{aligned} R_0 &= 10 R_1 \\ X_0 &= (3.5 \sim 4.6) X_1 \end{aligned} \quad (1)$$

对于布置于铁磁材料中的三相电力电缆或套管型电缆,零序阻抗的计算就更加复杂。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。图 1 示出在 10 英寸钢管中布置的电缆零序阻抗与零序电流的关系曲线。

零序阻抗非线性会对接地保护的定值设置造成很大的影响,若以常规保护来处理,极有可能导致保护的不正确动作,尤其是在系统阻抗比较小的时候这个问题尤为突出。

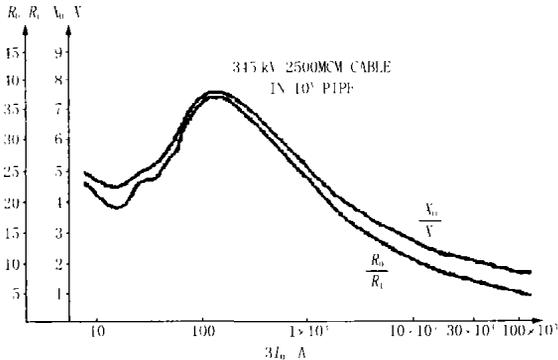


图 1 电缆零序阻抗与零序电流关系特性曲线

Fig. 1 Characteristic curves of the zero sequence impedance and current of cable

## 2 基于电容电流半补偿的分相电流差动保护方案

电力电缆的保护配置原则与架空线路基本一致,但由于二者之间电气参数特性的不同,使得电力电缆的某些保护的判据、动作量的整定方法与架空线路有很大的不同。

高压地下电缆分布电容很大,容抗很小,对电缆线路的纵联保护、距离保护以及电流保护等都会产生相应的影响,在此仅以纵联保护为例来分析分布电容对保护的影响及相应的补偿措施。

分相电流差动原理具有简单、可靠,能够适应各

种复杂接线的优点,已被广泛应用。但是,当分相电流差动用于电缆线路时应该考虑分布电容的影响,分布电容不仅影响故障暂态过程中计算出的电流相量精度,而且还会影响差动保护判据的准确性。文献[4]提出采用补偿方式对两端电容电流进行补偿,既可以提高差动保护在区内故障时的灵敏度,又可提高区外故障时的安全性。

### 2.1 传统相量差动保护动作原理

差动保护的模型见图 2,由图 2(a)可以看出,传统的分相差动保护的判据如下:

$$|I_m + I_n| > I_0 \quad (2)$$

$$|I_m + I_n| > K |I_m - I_n| \quad (3)$$

$I_m, I_n$  为线路两端电流;  $K$  为制动系数;  $I_0$  为制动电流门槛;其中,式(2)为辅助判据,式(3)为主判据,两式同时成立时保护作用于跳闸。区内故障时,如果电流的正方向为母线流向线路的话,两侧电流相角差小于  $90^\circ$ ,此时只要制动系数  $K$  小于 1,判据(3)恒成立,另外由于判据(2)的制动电流门槛  $I_0$  是按照躲过线路空载合闸充电电流来进行整定,数值很小,判据(3)同时成立,保护装置可靠动作。正常运行以及区外短路时,两侧电流大小相等、方向相反,动作量接近于零,两判据均不成立,差动保护不会误动作。

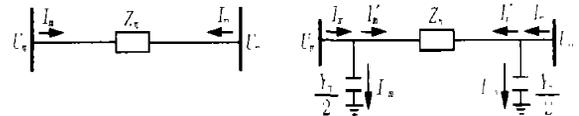


图 2 高压地下电缆等值接线图

Fig. 2 Equivalent circuit of the high-voltage underground cable

### 2.2 基于电容电流半补偿的分相电流差动保护方案

高压地下电缆分布电容较大,由于分布电容的存在使得在外部短路等情况下  $I_m + I_n = I_{cm} + I_{cn} = 0$ ,从而造成对保护性能的不良影响,见图 2(b)。很显然,  $I_{cm}$  与  $I_{cn}$  是由两侧母线电压产生的,因此也可在保护装置中用该电压产生补偿电流,使得在外部短路等情况下两侧继电器中电流之和为零,从而改善保护性能。

电容电流补偿可在两侧同时进行,即在线路两侧各补偿一半的电容电流,此方案称为半补偿;也可仅在线路合闸一侧进行,称为全补偿。本文采用目前较为常用的半补偿方式,具体补偿方法如下:

$$I_{bm} = U_m \frac{Y_c}{2}; I_{bn} = U_n \frac{Y_c}{2}$$

$$I_{BM} = I_m - I_{bm} \quad (4)$$

$$I_{BN} = I_n - I_{bn} \quad (5)$$

式中:  $I_{bm}$ 、 $I_{bn}$ 为线路两端参与补偿的电流;  $I_m$ 、 $I_n$ 为补偿前线路两端电流;  $I_{BM}$ 、 $I_{BN}$ 为补偿后线路两端电流;  $U_m$ 、 $U_n$ 为线路两端电压;  $Y$ 为整条线路容纳。

### 2.3 传统差动保护以及半补偿差动保护的動作特性分析

为了说明补偿电容电流差动保护的优越性,本文详细讨论了各种运行方式下,不同保护的動作特性。

#### 1) 电缆线路空载合闸

当电缆线路进行空载合闸时,为防止充电电流  $I_m$  引起保护误动,辅助判据中的  $I_0$  应按躲过分布电容的暂态充电电流来整定,而电缆线路电容电流很大,那么辅助判据中  $I_0$  必将整定得很大,从而降低了保护的灵敏度,见图 3(a);采用半补偿方式后,由图 3(b)补偿后的相量图可知:线路两侧补偿后电流  $I_{BM}$ 、 $I_{BN}$ 方向相反,  $I_0$  的整定值将大大减小,有利于提高保护的灵敏度。

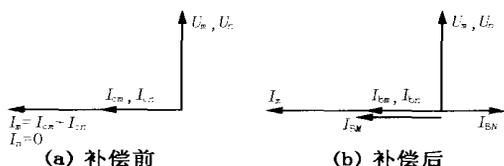


图 3 电缆线路空载合闸时两侧电流电压相量图

Fig. 3 Phasor diagrams of currents and voltages in both sides under no-load switching

#### 2) 电缆线路内部短路(以三相短路为例)

电缆线路发生内部三相短路时,线路两侧的电流、电压相量图见图 4。由该相量图可知:未补偿前由于分布电容的影响,线路两侧电流  $I_m$  与  $I_n$  数值减小,造成动作量减小,内部短路时,保护的灵敏度会下降,见图 4(a);而经过半补偿以后,由图 4(b)可知:  $I_{BM}$ 、 $I_{BN}$ 数值增大,差动保护判据中动作量增大,制动量基本保持不变,从而保护灵敏度得到提高。

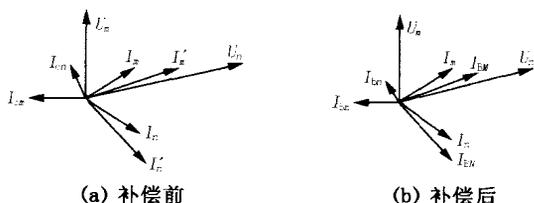


图 4 电缆线路内部短路时线路两侧电流、电压相量图

Fig. 4 Phasor diagrams of currents and voltages in both sides under internal fault

#### 3) 电缆线路外部短路(以三相短路为例)

电缆线路外部故障时,线路两侧电流、电压相量图见图 5。由补偿前后的相量图可知:由于电容电流的影响,两侧电流相位发生变化。当外部短路电流较小时,相位移较大,主判据可能满足动作条件而误动,如不采取补偿措施,只靠辅助判据,则此时门槛值  $I_0$  必须躲过外部故障时由分布电容而引起的暂态放电电流,其值较大,必将降低区内故障时保护动作的灵敏度,见图 5(a);而经过半补偿后,由图 5(b)可知,线路两侧电流  $I_{BM}$ 、 $I_{BN}$ 大小基本相等,相位差接近  $180^\circ$ ,无论是主判据还是辅助判据的动作量都大大减小,辅助判据的门槛值  $I_0$  可以取的较低,从而提高区内故障时保护的灵敏度。

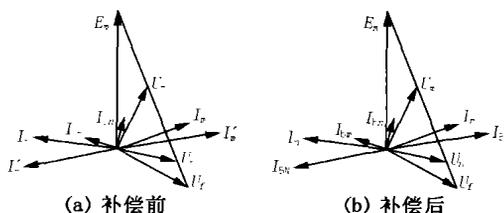


图 5 电缆线路外部短路时线路两侧电流、电压相量图

Fig. 5 Phasor diagrams of currents and voltages in both sides under external fault

由上面的分析可以看出,在电缆线路两侧差动保护装置中采用电容电流补偿是一种有效的补偿措施,既可提高其反应区内故障的灵敏度,又可提高区外故障时保护动作的可靠性。

### 3 基于迭代算法的自适应零序电流保护方案

对于布置于铁磁材料中的三相电力电缆或套管型电缆,由于零序阻抗的非线性,造成了接地短路的零序电流并非随故障点位置的改变而相应的增大或减小,这就给凡涉及接地故障保护的定值整定带来了极大的困难(例如接地距离与零序方向电流保护)。因为在用常规短路电流分析程序计算短路电流时,用的是恒定线路阻抗模型,所以用普通方法精确计算套管型电缆接地故障时电流的分布情况是不可能的。

考虑到电缆线路的零序阻抗是零序电流的函数,这里提出了基于迭代算法的自适应保护的思路:即先利用经验公式来确定零序阻抗初始迭代值;然后根据电缆所处系统短路电流数值查阅表或图,对其零序阻抗进行修正;利用修正后的零序阻抗再次计算短路电流,直至前后两次计算出的接地电流的

误差满足迭代精度要求,迭代结束。

下面以如图 6 所示系统零序一段为例详细说明基于迭代算法的自适应零序电流保护的整定计算步骤

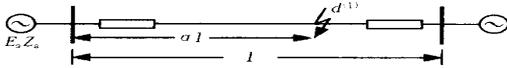


图 6 双侧电源简化系统图

Fig. 6 Schematic diagram with two-terminal sources

1) 设电缆线路零序阻抗初始迭代值

$$Z_0 = 10 R_1 + j3 X_1 \quad (6)$$

2) 忽略负荷电流  $I_f$ , 且线路按集总参数考虑时, 本线路末端发生单相短路电流时, 短路电流为:

$$I_{end} = \frac{E}{2 Z_{1s} + Z_{0s} + 2 l Z_1 + l Z_0} \quad (7)$$

式中:  $Z_{1s}$ 、 $Z_{0s}$  为系统正序、零序阻抗;  $Z_1$ 、 $Z_0$  为电缆线路正序、零序阻抗。

3) 本线路首端单相短路电流为:

$$I_{start} = \frac{E}{2 Z_{1s} + Z_{0s}} \quad (8)$$

4) 计算二者平均电流:

$$I_{ave} = (I_{end} + I_{start}) / 2 \quad (9)$$

5) 查阅制造厂提供零序阻抗曲线 ( $I_0 - R_0 / R_1$ 、 $I_0 - X_0 / X_1$ ) (如图 1) 或表 1 (如表 1 采用计算机迭代程序计算时要用计算出的零序电流对表进行插值) 确定对应该电流  $I_0$  下的  $R_0 / R_1$  和  $X_0 / X_1$ , 由于  $Z_1 = R_1 + j X_1$  已知, 即可确定下来。

6) 利用新的  $Z_0 = R_0 + j X_0$  值, 重复进行步骤 2)、3)、4), 比较两次迭代结果  $I_{ave}^{(1)}$  与  $I_{ave}^{(2)}$ , 若  $|I_{ave}^{(1)} - I_{ave}^{(2)}| < \epsilon$ , 则进入下一步计算, 否则重复进行步骤 2)、3)、4)。

7) 最后一步所确定的  $Z_0$  即为系统中该电缆线路的零序阻抗值, 利用该数值可最终精确计算本线路动作电流:

$$I_{dz} = \frac{K_k E}{2 Z_{1s} + Z_{0s} + 2 l Z_1 + l Z_0} \quad (10)$$

其中:  $K_k$  为零序电流保护可靠系数。

基于迭代算法的电缆线路自适应零序电流保护的特点:

1) 适应系统运行方式的改变。当系统运行方式改变时, 运行针对该方式的仿真模型, 进行自适应程序迭代, 从而可以精确确定该方式下的电缆零序阻抗。

2) 电缆线路的零序阻抗不再是常数, 而是随着所处系统零序电流的大小而改变, 从而可使其保护

表 1 电缆零序阻抗、零序电流特性关系

Tab. 1 Characteristic relationship between zero-sequence impedance and zero-sequence current

$3 I_0 / A$	$R_0 / R_1$	$X_0 / X_1$	$3 I_0 / A$	$R_0 / R_1$	$X_0 / X_1$	$3 I_0 / A$	$R_0 / R_1$	$X_0 / X_1$
15	24.9	5.3	20	22.1	4.8	25	21.1	4.6
30	21.3	4.9	35	22.3	4.9	40	23.4	5.1
45	24.4	5.2	50	24.9	5.3	55	25.1	5.4
60	26.0	5.5	65	26.8	5.7	70	27.2	5.7
75	27.6	5.8	80	26.0	6.0	85	29.2	6.1
90	30.0	6.3	95	31.0	6.4	100	32.1	6.6
150	37.2	7.6	200	37.9	7.7	250	37.4	7.6
300	36.6	7.4	350	35.6	7.3	400	34.6	7.1
450	33.6	6.9	500	32.5	6.7	550	31.6	6.5
600	30.7	6.4	650	30.0	6.3	700	39.3	6.1
750	28.6	6.0	800	27.9	5.8	850	27.4	5.8
900	26.8	5.7	950	26.3	5.6	1 000	25.8	5.5
1 500	22.2	4.8	2 000	19.7	4.4	2 500	18.0	4.1
3 000	16.7	3.8	3 500	15.6	3.6	4 000	14.8	3.5
4 500	14.1	3.4	5 000	13.5	3.3	5 500	13.0	3.2
6 000	12.5	3.1	6 500	12.1	3.0	7 000	11.8	3.0
7 500	11.5	2.9	8 000	11.2	2.8	8 500	10.9	2.8
9 000	10.6	2.7	9 500	10.4	2.7	10 000	10.2	2.7
15 000	8.7	2.4	20 000	7.7	2.2	25 000	7.1	2.1
30 000	6.6	2.0	35 000	6.2	1.9	40 000	5.9	1.9
45 000	5.6	1.8	50 000	5.4	1.8	55 000	5.2	1.8
60 000	5.0	1.7	65 000	4.9	1.7	70 000	4.7	1.7
75 000	4.6	1.7	80 000	4.5	1.6	85 000	4.4	1.6
90 000	4.3	1.6	95 000	4.2	1.6	100 000	4.2	1.6

范围达到最佳。

3) 整定完全由装置自动完成,不需人工干预。

#### 4 结语

本文从电力电缆电气参数的特殊性出发,提出基于电容电流半补偿的分相电流差动保护方案以及基于迭代算法的自适应零序后备保护方案。保护动作特性分析以及理论分析表明:经过补偿后的分相电流差动保护将很好对容性电流起到补偿作用,完全适用于高压地下电缆线路;基于迭代算法的自适应零序电流保护也可以解决零序阻抗非线性的问题,使得电力电缆线路的零序电流保护具有自适应性,保护的能达到最佳水平。

#### 参考文献:

- [1] Zpp J, Conroy M. Protective Relaying Considerations for Transmission Lines with High Voltage AC Cables[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(1): 83-96.
- [2] 朱声石(ZHU Sheng-shi). 高压电网继电保护原理与技术(Relay Protection Principle and Technology for High Voltage Transmission Lines) [M]. 北京:中国电力出版社(Beijing: China Electric Power Press), 1995.
- [3] 许正亚(XU Zheng-ya). 输电线路新型距离保护(New Distance Protection for Transmission Lines) [M]. 北京:中国水利电力出版社(Beijing: Hydraulic and Electric Power Press), 2002.
- [4] 李岩,陈德树,张哲,等(LI Yan, CHEN De-shu, ZHANG Zhe, et al). 超高压长线电容电流对差动保护的影响及补偿对策仿真分析(The Emulation Analysis for the Influence of Capacitance Current of UHV Transmission Lines on Differential Current Protection and Compensating Countermeasure) [J]. 继电器(Relay), 2001, 29(6): 6-9.

- [5] 武叶凯,邹东霞(WU Ye-kai, ZOU Dong-xia). 电容电流对差动保护的影响及补偿方案(The Influence of Capacitance Current of Transmission Line on Differential Current Protection and Compensating Countermeasure) [J]. 继电器(Relay), 1997, 25(8): 4-8
- [6] 文明浩,陈德树,尹相根(WEN Ming-hao, CHEN De-shu, YIN Xiang-gen). 超高压长线相量差动保护的研究(Study of Phasor Differential Protection for UHV Transmission Line) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2000, 24(10): 37-40.
- [7] 卓金玉(ZHUO Jir-yu). 电力电缆线路的相序阻抗(Sequence Impedance for Transmission Lines with AC Cables) [M]. 北京:机械工业出版社(Beijing: China Machine Press), 1999.
- [8] Nelon J P, Fellow. IEEE System Grounding and Ground fault Protection in the Petrochemical Industry: A Need for a Better Understanding[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2002, 38(6): 1633-1640.
- [9] Grzen J, Mahn E I. The 345 kV Underground/ Underwater Long Island Sound Cable Project[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8(3): 750-760.
- [10] 毛为民(MAO Wei-min). 电力电缆相序阻抗计算与分析(Sequence Impedance Calculation and Analysis for Transmission Lines with AC Cables) [J]. 供用电(Power Supply), 2002, 19(4): 24-25.

收稿日期: 2004-03-11; 修回日期: 2004-05-13

#### 作者简介:

丁 蕾(1972 - ), 女,讲师,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护,目前从事超高压地下电缆继电保护方面的仿真与算法研究; E-mail: dinglei@sjtu.edu.cn

范春菊(1967 - ), 女,副教授,在职博士生,长期从事人工智能在继电保护及综合自动化中的应用的的教学及科研工作。

### Research on schemes of adaptive protective relaying for transmission lines with high voltage underground cables

DING Lei, FAN Chur-ju

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** To the difference of electrical parameters between AC cables and overhead cables, an adaptive protection schemes for high voltage underground cables is proposed, from two aspects of AC cables distributive capacitance and zero sequence impedance. The compensation of capacitance current is very necessary according to the comparison analysis of the performance of the current phase differential protection with and without capacitance current compensation. The half compensation method is proposed for the current phase differential protection and the result shows capacitance current compensation method can improve the security and sensitivity of the differential protection. As the nonlinearity of the zero-sequence impedance of pipe-type cable influences the performance of the zero sequence overcurrent protection, it is necessary to calculate the zero-sequence impedance accurately. The adaptive scheme for zero sequence protection based on iterative algorithm is proposed in this paper.

**Key words:** high voltage underground cable; relay protection; distributed capacitance; capacitance current compensation; zero-sequence impedance