

# 长距离电力电缆的距离保护研究

黄 玥<sup>1</sup>, 范春菊<sup>1</sup>, 冯 伟<sup>2</sup>

(1.上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240; 2.深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518000)

**摘 要:**大规模海上风电场是风力发电的重点发展方向,海底电缆作为确保海上风电场并网的重要纽带,其分布电容远高于架空线路,高压远距离输电时线路中的电容电流不可忽略,可能会导致距离保护区内故障拒动的问题。距离保护动作判据的可靠性依赖于测量阻抗的准确性,为此,结合电缆实际物理结构研究电缆电气参数的计算方法,并论证公式的准确性。根据计算结果对电缆线路建立分布参数模型,分析分布电容对保护安装处测量阻抗的影响,推导证明长距离电缆线路测量阻抗与故障距离呈双曲正切的函数关系。在传统的电容电流半补偿方案的基础上,提出一种改进的距离保护方案。利用PSCAD搭建电缆模型并进行故障模拟,仿真结果表明,改进后的方案能够有效补偿线路电容电流、解决距离保护区内拒动以及区外误动的问题,同时兼具较好的抗过渡电阻能力,是一种理想的距离保护方案。

**关 键 词:**高压电力电缆;距离保护;分布电容;电容电流补偿

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2023.03.018 中图分类号:TM773 文章编号:1673-9140(2023)03-0166-08

## Research on distance protection of long-distance power cables

HUANG Yue<sup>1</sup>, FAN Chunju<sup>2</sup>, FENG Wei<sup>2</sup>

(1.School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2.Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

**Abstract:** Large-scale offshore wind farms are one key tendency of wind power generation development. Submarine cables, as an important link between offshore wind farms and grids, are with much higher distributed capacitance than overhead lines, and thus will generate a non-negligible capacitance current. In case of the long-distance high voltage transmission, this may lead to the refusal-operation of relays in the distance protection area. The reliability of distance protection operation criterion depends on the accuracy of measurement impedance. Therefore, in this paper, combined with the actual physical structure of cables, the calculation of relevant electrical parameters is studied, and the accuracy of the corresponding formulas are demonstrated. According to the consequent calculation results, a distributed parameter model is established for cable lines, and the influence of distributed capacitance on the measured impedance at the protection installation is analyzed. It is proved that the measured impedance of long distance cable lines is a function of hyperbolic tangent to the fault distance. On the basis of the traditional capacitive current semi-compensation scheme, an improved scheme is proposed. A cable model for fault simulation is carried out through PSCAD. The simulation results show that the improved scheme can effectively compensate the line capacitive current, reduce the portential refusal-operations in the distance protection area and the misoperation outside the area, with a better anti-transition

收稿日期:2022-06-02;修回日期:2022-09-05

基金项目:国家重点研发计划(2017YFB0903201)

通信作者:范春菊(1967—),女,副教授,主要从事电力系统继电保护及其综合自动化的研究;E-mail:fanchunju@sjtu.edu.cn

resistance ability at the same time, which will assist in distance protection performance.

**Key words:** high-voltage power cable; distance protection; distributed capacitance; capacitance current compensation

为了应对化石能源短缺和全球环境污染问题,以海上风电为代表的可再生能源接入电力系统已经成为中国能源格局的重要发展趋势之一<sup>[1-2]</sup>。无论是采用直流或者交流方式并入电网,海上风电都是通过海底电缆来实现的<sup>[3-4]</sup>。

与架空线路不同,海底电缆不需要支架支撑,从而建设成本较少,建设速度较快。此外,海底电缆大多被敷设在经过一定测试的海底,几乎不受到风浪等自然环境的破坏及人类生产活动的干扰,提高了输电的安全性、稳定性以及可靠性。然而,由于电缆与架空线相比具有较大的分布电容,使得输电线路的电气参数不再均匀分布<sup>[5]</sup>,给传统的线路保护造成困难,破坏了原有保护的可靠性。因此,研究如何消去分布电容对保护的影响具有重要的现实意义。

文献[6]利用动作电流相角的变化特征与传统的保护判据构成动作逻辑,避免了分布电容的影响;文献[7-8]提出了基于贝瑞隆模型的保护算法,从保护原理上消除了分布电容的影响。然而,上述方法都是针对双电源系统,并且需要输电线路两端参数。文献[9]通过插值法改进了贝瑞隆模型,可通过线路单端测量数据求出线路中任一点电压电流瞬时值,不再对双端测量数据进行比较,能够避免通道对保护的影响;文献[10]采用线路的分布参数模型,利用区外故障与区内故障时电气矢量相对位置不同作为判据,从保护原理上消除电容电流的影响,然而该方案对故障点采样频率需求较高,采样频率较低时误差较大。

本文根据相关理论<sup>[11]</sup>研究电缆线路基本电气参数的计算公式,并利用仿真模型验证该计算公式的准确性;为了进一步分析电缆分布电容对传统距离保护的影响,对电缆线路建立分布参数模型,研究保护安装处的测量阻抗,在分布电容的影响下,高压长距离电缆线路在保护安装处测量得到的阻抗与线路长度不成正比,严重影响了距离保护的灵敏性。在电容电流半补偿方案的基础上,提出一种改进的1/4补偿方案,最后采用PSCAD仿真验证改进方案的有效性。

## 1 电力电缆电气参数计算

电缆输电线路的基本电气参数由导体串联阻抗和并联导纳组成。串联阻抗可以通过导体材料、结构、物理尺寸和大地电阻率计算得到,其并联导纳可以通过物理尺寸和几何形状计算得到<sup>[12-13]</sup>。单芯电缆截面如图1所示。

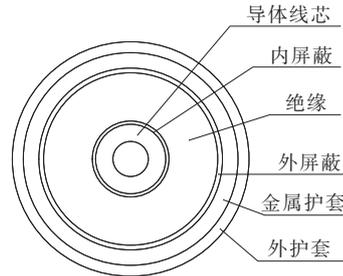


图1 单芯电缆截面

Figure 1 Cross section of a single-core cable

### 1.1 串联阻抗矩阵

单芯电缆的线芯层电压  $V_c$  与金属护套层电压  $V_s$  可以由回路电压法得到:

$$\begin{bmatrix} V_c \\ V_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{cc} & Z_{cs} \\ Z_{cs} & Z_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_c \\ I_s \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $Z_{cc}$  为线芯层自阻抗;  $Z_{cs}$  为线芯层与护套层的互阻抗;  $Z_{ss}$  为护套层自阻抗;  $I_c$  为线芯层电流;  $I_s$  为护套层电流。

在3根单芯电缆组成的三相系统中,由于土壤不能作为第  $i, j$  条电缆之间的电磁屏蔽,电缆之间存在相互耦合,记为  $Z_{ij}$ 。三相单芯电缆系统阻抗矩阵可表示为

$$\begin{bmatrix} V_{c1} & V_{c2} & V_{c3} & V_{s1} & V_{s2} & V_{s3} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} Z_{c1c1} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{c1s1} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{12} & Z_{c2c2} & Z_{23} & Z_{12} & Z_{c2s2} & Z_{23} \\ Z_{13} & Z_{23} & Z_{c3c3} & Z_{13} & Z_{23} & Z_{c3s3} \\ Z_{c1s1} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{s1s1} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{12} & Z_{c2s2} & Z_{23} & Z_{12} & Z_{s2s2} & Z_{23} \\ Z_{13} & Z_{23} & Z_{c3s3} & Z_{13} & Z_{23} & Z_{s3s3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{c1} \\ I_{c2} \\ I_{c3} \\ I_{s1} \\ I_{s2} \\ I_{s3} \end{bmatrix} \quad (2)$$

矩阵式(2)中各元素计算公式如下:

$$Z_{cici} = R_{c(ac)} + \pi^2 \times 10^{-4} f + j4\pi \times 10^{-4} f \cdot$$

$$\left[ \frac{\mu_c}{4} F(r_{oc}, r_{ic}) + \ln \left( \frac{D_{erc}}{r_{oc}} \right) \right], i=1, 2, 3 \quad (3)$$

$$F(r_{oc}, r_{ic}) = 1 - \frac{2r_{ic}^2}{(r_{oc}^2 - r_{ic}^2)} + \frac{4r_{ic}^4}{(r_{oc}^2 - r_{ic}^2)^2} \ln\left(\frac{r_{oc}}{r_{ic}}\right) \quad (4)$$

$$Z_{sisi} = R_{s(ac)} + \pi^2 \times 10^{-4} f + j4\pi \times 10^{-4} f \cdot \left[ \frac{\mu_s}{4} F(r_{os}, r_{is}) + \ln\left(\frac{D_{erc}}{r_{os}}\right) \right], i=1, 2, 3 \quad (5)$$

$$F(r_{os}, r_{is}) = 1 - \frac{2r_{is}^2}{(r_{os}^2 - r_{is}^2)} + \frac{4r_{is}^4}{(r_{os}^2 - r_{is}^2)^2} \ln\left(\frac{r_{os}}{r_{is}}\right) \quad (6)$$

$$Z_{cisi} = \pi^2 \times 10^{-4} f + j4\pi \times 10^{-4} f \cdot \ln\left(\frac{2D_{erc}}{r_{os} + r_{is}}\right), i=1, 2, 3 \quad (7)$$

$$Z_{ij} = \pi^2 \times 10^{-4} f + j4\pi \times 10^{-4} f \ln\left(\frac{D_{erc}}{d_{ij}}\right), \quad i, j=1, 2, 3, i \neq j \quad (8)$$

式(3)~(8)中,  $R_{c(ac)}$ 、 $R_{s(ac)}$ 分别为电缆线芯、金属护套交流电阻(具体计算方法后续介绍);  $\mu_c$ 、 $\mu_s$ 分别为电缆线芯、金属护套的相对磁导率;  $D_{erc}$ 为等效接地导线回路深度,  $D_{erc} = 660\sqrt{\rho/f}$  ( $\rho$ 为大地电阻率);  $r_{ic}$ 为电缆线芯的内半径;  $r_{oc}$ 为电缆线芯的外半径;  $r_{is}$ 为电缆金属护套层的内半径;  $r_{os}$ 为电缆金属护套层的外半径;  $d_{ij}$ 为第*i*、*j*条电缆的轴间距离。

线芯导体交流电阻计算:

$$R_{c(ac)} = R_{c(dc)} \cdot (1 + y_s + y_p) \quad (9)$$

$$R_{c(dc)} = \frac{1000\rho_c}{S} [1 + \alpha(T - 20)] \quad (10)$$

式(9)、(10)中,  $R_{c(dc)}$ 为导体直流电阻;  $y_s$ 、 $y_p$ 分别为导体趋肤效应系数、邻近效应系数;  $\rho_c$ 为导体电阻率;  $S$ 为导体标称横截面积;  $\alpha$ 为导体温度系数;  $T$ 为导体工作温度。

金属护套交流电阻计算:

$$R_{s(ac)} = \frac{1000\rho_s}{\pi(r_{os}^2 - r_{is}^2)} [1 + \alpha(T - 20)] \quad (11)$$

式中,  $\rho_s$ 为金属护套的电阻率。

电缆序阻抗与电缆的结构以及接地方式相关, 通常单芯电缆的护套层在电缆两端都是接地的, 可以认为护套层沿线各处电位为0, 即  $V_{s1} = V_{s2} = V_{s3} = 0$ , 将串联阻抗矩阵进行分块, 即

$$\begin{bmatrix} V_c \\ V_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{cc} & Z_{cs} \\ Z_{cs} & Z_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_c \\ I_s \end{bmatrix} \quad (12)$$

代入  $V_s = 0$ , 整理可得,

$$V_c = (Z_{cc} - Z_{cs}Z_{ss}^{-1}Z_{cs})I_c \quad (13)$$

从而得到三相串联阻抗矩阵为

$$Z_{abc} = Z_{cc} - Z_{cs}Z_{ss}^{-1}Z_{cs} \quad (14)$$

根据转换矩阵  $H$  即可得到电缆的序阻抗矩阵  $Z_{012}$ , 其对角线元素分别表示电缆线路的零序、正序以及负序阻抗。

$$Z_{012} = H^{-1}Z_{abc}H \quad (15)$$

$$H = \frac{1}{2\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 2 & 2 & 2 \\ 2 & -1 - \sqrt{3}i & -1 + \sqrt{3}i \\ 2 & -1 + \sqrt{3}i & -1 - \sqrt{3}i \end{bmatrix} \quad (16)$$

## 1.2 并联导纳矩阵

对于单芯电缆, 由于护套接地, 电缆相位之间没有互电容, 单个电缆电容与相间距无关。电缆等效电容分布如图2所示。

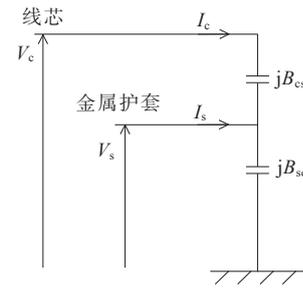


图2 电缆等效电容分布

Figure 2 Cable equivalent capacitance distribution

由图2可得电流与电压的关系表达式为

$$I_c = jB_{cs}(V_c - V_s) \quad (17)$$

$$I_c + I_s = jB_{se}V_s \quad (18)$$

整理可得:

$$I_c = jB_{cs}V_c - jB_{cs}V_s \quad (19)$$

$$I_s = -jB_{cs}V_c + j(B_{cs} + B_{se})V_s \quad (20)$$

由于电缆两端接地,  $V_s = 0$ , 每相的对地电纳值均为  $B_{cs}$ , 且三序电纳值均相等, 其计算公式如下:

$$B_{cs} = 2\pi f C_{cs} \quad (21)$$

$$C_{cs} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_{cs}}{\ln\left(\frac{r_{is}}{r_{oc}}\right)} \quad (22)$$

式中,  $\epsilon_0 = 8.854188 \times 10^{-3}$ ;  $\epsilon_{cs}$ 为线芯层与护套层之间绝缘层的相对介电常数。

## 1.3 计算方法验证

对220 kV单芯电缆YJLQ02进行参数计算, 该

电缆线路的原始参数<sup>[14]</sup>如表 1 所示。

表 1 单芯电缆原始参数

Table 1 Single-core cable original parameters

标称截面/ mm <sup>2</sup>	导体外径/ mm	内屏蔽厚度/ mm	绝缘厚度/ mm
800	34.2	1.5	27
外屏蔽厚 度/mm	铝包厚度/ mm	外护套厚度/ mm	电缆外径/ mm
1	3.5	3.4	113.2

如图 3 所示,当电缆采用等距离( $d=0.5\text{ m}$ )平行铺设方式时,根据式(2)~(22)可以计算得到该型号电缆的序阻抗、序导纳。

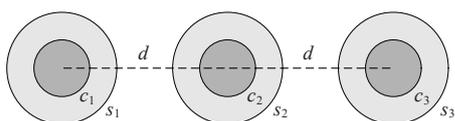


图 3 电缆等距离平铺示意

Figure 3 Cable equidistant laying schematic

在 PSCAD 里搭建单芯电缆模型(参数见表 1),从输出文件中计算得到电缆的各项参数,将其与理论计算值进行对比,如表 2 所示,计算误差最大为 11.66%,在可允许范围之内,从而验证了计算方法的准确性。

表 2 单芯电缆电气参数理论计算与仿真结果比较

Table 2 Comparison between theoretical calculation and simulation results of single-core cable electrical parameters

结果	电阻/( $\Omega/\text{km}$ )		感抗/( $\Omega/\text{km}$ )		容抗/( $10^6\ \Omega/\text{km}$ )	
	正/负序	零序	正/负序	零序	正/负序	零序
理论计算值	0.116 3	0.234 0	0.177 4	0.105 4	0.024 9	0.024 9
PSCAD 仿真值	0.111 0	0.228 5	0.176 6	0.104 6	0.022 3	0.022 3
误差/%	4.77	2.41	0.45	0.76	11.66	11.66

## 2 分布电容对距离保护的影响

当距离保护利用线路发生短路故障时,同时出现电压降低和电流增大的双重特征,利用保护安装处测量电压  $U_m$  与测量电流  $I_m$  的比值特征即  $U_m/I_m$  切除线路故障,从而实现继电保护<sup>[15]</sup>。对于架空输电线,其分布电容较小,对线路阻抗的影响可以忽略,在长距离输电条件下,线路阻抗仍与距离成正

比。因此,  $U_m/I_m = z_1 \cdot l$  能够准确反映故障点到保护安装处的距离,达到测距的目的,其中  $z_1$  表示输电线路单位长度的正序阻抗,为已知参数。

然而,根据文 1.3 中的计算结果可知,电力电缆存在较大的分布电容,远距离输送电能时分布电容产生的电容电流对线路的影响不可忽视。为了进一步分析该参数特性对测量阻抗的影响,即电缆测量阻抗与距离的关系,如图 4 所示,建立线路分布参数模型,其中,  $M$ 、 $N$  分别为线路始、末端,  $r$ 、 $l$  分别为电缆线路单位长度串联电阻和电感,  $g$ 、 $c$  分别为电缆线路单位长度电导和电容(工频计算条件下电缆线路的电导可忽略不计)。

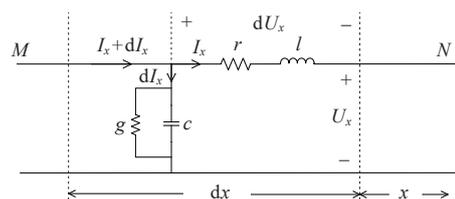


图 4 电缆分布参数模型

Figure 4 Cable distribution parameter model

单位长度  $dx$  下电缆线路的串联阻抗  $z$  以及并联导纳  $y$  可表示为

$$\begin{cases} zdx = (r + j\omega l)dx \\ ydx = (g + j\omega c)dx = j\omega cdx \end{cases} \quad (23)$$

距离线路末端  $x$ (km) 处单位长度电压降  $dU_x$  以及导纳支路电流  $dI_x$  可表示为

$$\begin{cases} dU_x = I_x zdx \\ dI_x = (U_x + dU_x) ydx \end{cases} \quad (24)$$

忽略高阶微分项,令线路末端( $N$ 端)电压和电流值作为初始条件,对式(24)进行拉普拉斯变换整理可得:

$$\begin{cases} U(s) = \frac{sU_N + zI_N}{s^2 - zy} \\ I(s) = \frac{sI_N + yU_N}{s^2 - zy} \end{cases} \quad (25)$$

由拉普拉斯反变换,式(25)可表示为

$$\begin{cases} U_x = \cosh(\gamma x) \cdot U_N + Z_c \sinh(\gamma x) \cdot I_N \\ I_x = \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma x) \cdot U_N + \cosh(\gamma x) \cdot I_N \end{cases} \quad (26)$$

式中,  $\gamma$  为线路的传播系数,  $\gamma = \sqrt{zy}$ ;  $Z_c$  为线路的波阻抗,  $Z_c = \sqrt{z/y}$ 。

假设  $x = L_{MN}$ , 则电缆线路的传输矩阵可表示为

$$\begin{bmatrix} U_M \\ I_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma x) & Z_c \sinh(\gamma x) \\ \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma x) & \cosh(\gamma x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_N \\ I_N \end{bmatrix} \quad (27)$$

由该传输矩阵可知, 当线路末端发生接地短路时, 即  $U_N = 0$  时电力电缆的短路阻抗可表示为

$$Z_m = Z_c \tanh(\gamma L) \quad (28)$$

由式(28)可知, 当电缆输电线路末端发生故障时, 电缆输电线路保护安装处的测量阻抗在数值上是故障距离的双曲正切函数, 与故障距离不成正比, 以文1.3中计算得到的220 V高压电缆输电线路参数为例, 绘制电力电缆短路阻抗与故障距离的关系曲线, 如图5所示。

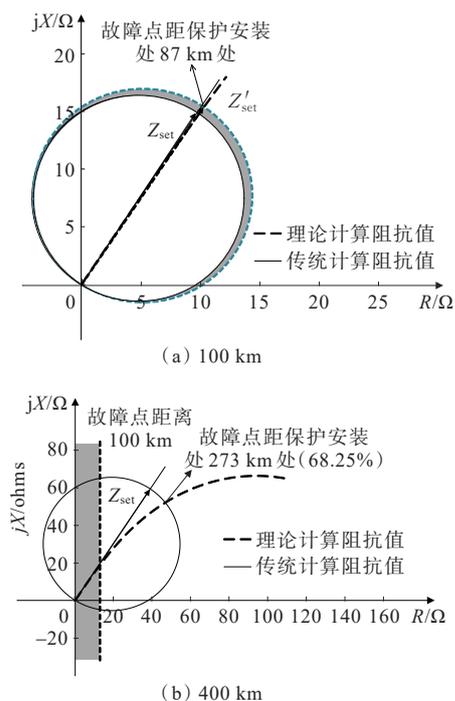


图5 电缆电阻与线路长度的关系

Figure 5 Relationship between cable resistance and line length

当电缆线路总长小于或等于100 km、发生区内短路故障时, 按式(28)计算得到的阻抗值与传统方法计算得到的阻抗值分别为  $21.42 \angle 56.86^\circ$ 、 $20.86 \angle 57.85^\circ$  (故障距离为100 km), 幅值误差为2.68%, 相角误差为-1.71%, 相差不大。假设传统距离保护方案保护I段按照线路全长的85%进行整定, 即按照  $Z_{set} = 0.85z_1 L$  来整定, 其中  $z_1$  为线路单

位长度正序阻抗,  $L$  对应为电缆线路总长。而根据电缆的传输矩阵可知, 当线路末端发生短路时, 线路阻抗应由式(28)计算得到, 以该阻抗值进行整定计算, 令  $Z'_{set} = Z_m$ , 同样绘制出一条整定阻抗圆曲线(图5(a)中虚线圆), 阴影区域即为距离保护I段的误差范围, 可计算得到误差为2.35%, 在误差允许范围内。此时, 线路距离I段保护能够可靠动作。

当电缆线路总长为400 km时, 保护安装处的测量阻抗见图5(b), 电缆输电线路的短路阻抗与故障距离不成正比。若仍采用传统方法计算电力电缆的短路阻抗, 即85%的线路阻抗作为保护的整定值, 此时保护装置实际上仅仅保护了线路的67%, 显然无法满足距离保护的灵敏性以及可靠性的要求, 因此, 需要对传统的距离保护进行改进。

### 3 基于电容电流补偿距离保护方案

#### 3.1 电容电流半补偿的距离保护

根据文2中分析可知, 由于电缆线路分布电容很大, 故障时产生的电容电流不可忽略, 长距离输电条件下线路末端发生短路故障会导致距离保护拒动。为了消除分布电容对线路保护的影响, 通常采取电容电流补偿的方法。

为了提高输电线路分布电容电流补偿的精确度, 工程上通常采用基于 $\pi$ 模型的半补偿法。该补偿法将输电线路视为一个四端口网络, 用 $\pi$ 模型电路进行等效, 如图6所示, 将电缆线路转化为集中参数模型, 在线路两端各补偿一半。其中,  $\pi$ 模型中相应的元件参数应通过分布参数模型计算得到。

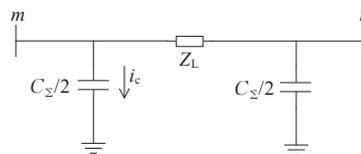


图6  $\pi$ 模型等效电路

Figure 6 Equivalent circuit diagram of  $\pi$  model

线路电容电流计算公式如下:

$$\dot{I}_c = j \frac{1}{2} \omega C_s \dot{U}_m \quad (29)$$

式中,  $C_s$  为全线路正序电容(假设正、负序电容相等);  $\dot{U}_m$  为  $m$  端相电压。

对电缆线路分布电容电流补偿后的距离 I 段保护的判据可表示为

$$90^\circ \leq \text{Arg} \frac{\dot{U}_m}{\dot{U}_m - (\dot{I}_m - j\frac{1}{2}\omega C_\Sigma \dot{U}_m) \dot{Z}_{\text{set}}} \leq 270^\circ \quad (30)$$

### 3.2 电容电流半补偿的距离保护的仿真

在文 3.1 中理论分析的基础上,采用线路总长为 400 km 的 220 kV 高压电缆输电线路作为仿真模型,如图 7 所示。线路各电气参数:正序电阻  $r_1 = 0.1110 \Omega/\text{km}$ ,零序电阻  $r_0 = 0.2285 \Omega/\text{km}$ ,正序感抗  $X_{L1} = 0.1766 \Omega/\text{km}$ ,零序感抗  $X_{L0} = 0.1046 \Omega/\text{km}$ ,正序容抗  $X_{C1} = 0.0223 \times 10^6 \Omega/\text{km}$ ,零序容抗与正序容抗相等。

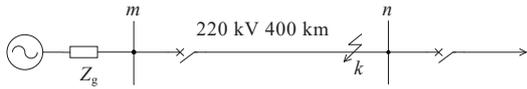


图 7 仿真示意

Figure 7 Simulation diagram

设置距离保护 I 段的整定值为  $Z_{\text{set}} = 0.85 \times (0.1110 + j0.1766) \times 400 \Omega$ 。对电缆线路分布电容电流分别采用不补偿和半补偿法进行仿真,距离保护 I 段的动作特性如图 8 所示,当不进行补偿时,在电缆线路大约 70% 处的测量阻抗已经落入阻抗圆外,导致区内保护拒动。

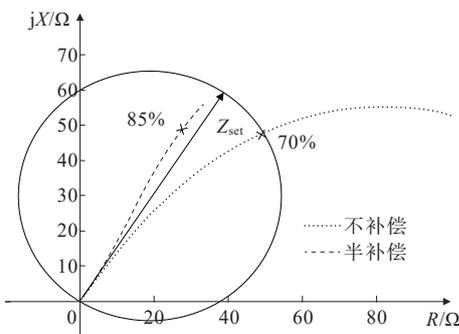


图 8 距离保护动作特性示意

Figure 8 Distance protection action characteristics diagram

电容电流半补偿法利用电缆线路首端相电压及全线电容值的一半对线路进行补偿运算,提高了传统距离保护的灵敏性。然而当故障点远离保护安装处时,由于保护安装处的电压较大,利用式 (29) 的方法对电容电流进行半补偿很容易出现过

补偿现象,导致区外故障误动。

### 3.3 改进的电容电流补偿的距离保护

出于进一步提高距离保护可靠性的需求,在原有的电容电流半补偿方案上进行改进。根据文 3.2 中分析可得,当故障点距保护安装处距离小于或等于  $l_k = 100 \text{ km}$  时,测量阻抗与故障距离基本等比例增长,受到电容电流影响较小,补偿的意义不大,可采取快速距离保护,即故障保护范围设置为线路全长的 25%;若故障距离大于  $l_k$ ,则对输电线路采取补偿度为 25% 的电容电流补偿,即 1/4 补偿。改进后的补偿方案逻辑框图如图 9 所示。

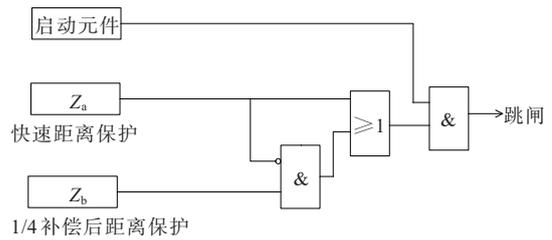


图 9 改进后的补偿方案逻辑框图

Figure 9 Logic block diagram of improved compensation scheme

快速距离保护需满足的动作判据可表示为

$$90^\circ \leq \text{Arg} \frac{\dot{U}_m}{\dot{U}_m - \dot{I}_m \dot{Z}_{\text{set}_1}} \leq 270^\circ, \quad \dot{Z}_{\text{set}_1} = 0.25z_1 L \quad (31)$$

1/4 补偿的动作判据为

$$90^\circ \leq \text{Arg} \frac{\dot{U}_m}{\dot{U}_m - (\dot{I}_m - j\frac{1}{4}\omega C_\Sigma \dot{U}_m) \dot{Z}_{\text{set}_2}} \leq 270^\circ, \quad \dot{Z}_{\text{set}_2} = 0.85z_1 L \quad (32)$$

由图 9 可知,当电缆线路发生故障时,启动元件首先动作,根据保护安装测量元件的实时数据可以计算得到故障线路的测量阻抗值。当故障点落入快速距离保护范围内时,则  $Z_a$  动作,该动作信号与启动元件的输出信号通过与门,共同作用于出口回路,使出口断路器跳闸,从而切除故障线路。若故障位置距离保护安装处较远但仍处于线路的 85% 以内时,快速距离保护  $Z_a$  不动作,1/4 电容电流补偿的距离保护  $Z_b$  动作,快速距离保护和 1/4 电容电流补偿的距离保护的输出信号通过与门,启动出口回路动作于跳闸。若线路发生区外故障时,2 种保护均可靠不动作。

将提出的1/4补偿法与半补偿法进行对比,2种方案的保护动作特性如图10所示,可以看出,相比于对全线路进行半电容电流补偿方法,在出口近区不补偿,长距离处采用补偿度为25%的补偿方案能够有效地避免区外故障误动的情况。

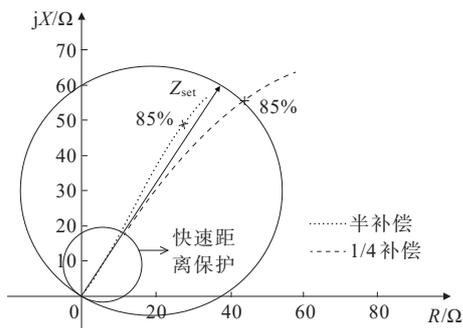


图10 2种方案的距离保护动作特性示意

Figure 10 Diagram of distance protection action characteristics in two schemes

### 3.4 不同补偿方式下距离保护抗过渡电阻能力

在文3.3中仿真结果的基础上,通过在线路内部设置不同位置故障、不同数值的过渡电阻,得到不同补偿方式下测量阻抗值与保护动作情况,如表3所示, $l_f$ 表示故障距离, $l$ 表示线路全长。

表3 不同补偿方式下距离保护动作特性

Table 3 Protective action characteristics under different transition resistances conditions

故障位置 $l_f/km$	过渡电阻 $R_f/\Omega$	测量阻抗		动作情况	
		半补偿	1/4补偿	半补偿	1/4补偿
	10	$15\angle 39^\circ$	$16\angle 32^\circ$	○	○
10% $l$	20	$21\angle 33^\circ$	$24\angle 27^\circ$	○	○
	50	$35\angle 17^\circ$	$37\angle 3^\circ$	○	○
	10	$48\angle 59^\circ$	$58\angle 54^\circ$	○	○
70% $l$	20	$53\angle 57^\circ$	$66\angle 47^\circ$	○	○
	50	$71\angle 45^\circ$	$82\angle 36^\circ$	×	×
	10	$53\angle 62^\circ$	$67\angle 53^\circ$	○	○
80% $l$	20	$59\angle 58^\circ$	$75\angle 48^\circ$	○	×
	50	$78\angle 45^\circ$	$91\angle 36^\circ$	×	×
	10	$63\angle 61^\circ$	$81\angle 50^\circ$	○	×
95% $l$	20	$69\angle 57^\circ$	$90\angle 47^\circ$	○	×
	50	$90\angle 43^\circ$	$105\angle 36^\circ$	×	×

注:×表示不动作,○表示动作。

由表3可知,在有过渡电阻存在的情况下,本文提出的补偿方案比半补偿灵敏性高;在过渡电阻较

小的情况下,保护灵敏度较高,随着过渡电阻的增大,保护灵敏度降低。当过渡电阻达到50Ω时,灵敏度已经不能满足保护的要求,应配合零序电流保护一起使用,从而提高大接地电阻存在时保护的灵敏性。过渡电阻为10Ω时2种补偿方案的保护动作特性如图11所示。

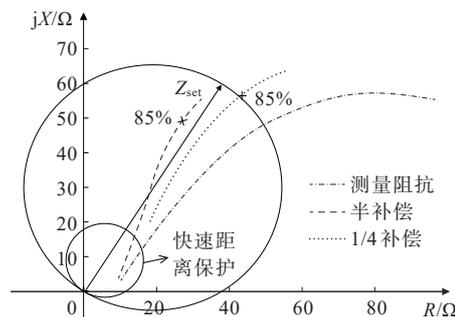


图11 过渡电阻为10Ω时距离保护动作特性示意

Figure 11 Distance protection action characteristics when the transition resistance is 10 Ω

## 4 结语

本文研究了电缆输电线路的分布参数特性,根据计算得出了电缆基本电气参数,分析表明,电气参数受到较大分布电容的影响。当电缆发生故障时,保护安装处的测量阻抗与保护安装处到故障点的距离不成正比;当远距离电缆输电线路发生故障时,传统的距离保护灵敏度降低,保护范围缩短。为了提高距离保护的灵敏性以及准确性,本文对基于电容电流半补偿法进行了改进,提出了1/4电容电流补偿的距离保护方案,并用PSCAD仿真验证了改进保护动作的可靠性和准确性。

### 参考文献:

[1] 周宜昌,刘艳,顾雪平.考虑多风电场黑启动价值的机组恢复顺序双层优化决策[J].电力系统自动化,2020,44(16):87-97.  
ZHOU Yichang, LIU Yan, GU Xueping. Bi-level optimization decision for unit recovery sequence considering black-start value of multiple wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(16):87-97.

[2] 王倩,盛四清,田颢璟.逆变电源对风火/光火打捆送端电网低频振荡影响及其惯量匹配方法[J].电力系统保

- 护与控制,2022,50(11):112-120.
- WANG Qian, SHENG Siqing, TIAN Haojing. Effect of an inverter on low frequency oscillation of wind-thermal/solar-thermal bundled sending-end power grid and inertia matching method[J]. Power System Protection and Control, 2022,50(11):112-120.
- [3] 高晨,赵勇,汪德良,等.海上风电机组电气设备状态检修技术研究现状与展望[J].电工技术学报,2022,37(S1):30-42.
- GAO Chen, ZHAO Yong, WANG Deliang, et al. Research status and prospect of condition based maintenance technology for offshore wind turbine electrical equipment [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022,37(S1):30-42.
- [4] 苗硕,李奇南,查鲲鹏,等.基于加窗FFT的风电场自适应振荡抑制策略[J].中国电力,2022,55(10):112-123.
- MIAO Shuo, LI Qinan, ZHA Kunpeng, et al. Adaptive oscillation suppression strategy for wind farms based on windowed FFT [J]. Electric Power, 2022,55(10):112-123.
- [5] 杜志华,徐驰,秦至臻,等.基于智能融合终端的中压配电线路断线故障检测方案[J].电网与清洁能源,2022,38(12):79-85+94.
- DU Zhihua, XU Chi, QIN Zhizhen, et al. A scheme for disconnection fault detection of medium-voltage distribution lines based on intelligent fusion terminals[J]. Power System and Clean Energy, 2022,38(12):79-85+94.
- [6] 宋璇坤,申洪明,黄少锋,等.特高压分布电容对电流差动保护的影响分析及对策[J].电力自动化设备,2018,38(1):169-172+192.
- SONG Xuankun, SHEN Hongming, HUANG Shaofeng, et al. Effect of distributed capacitance on differential current protection and relevant countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018,38(1):169-172+192.
- [7] 李斌,郭子焯,姚斌,等.适用于半波长线路的贝瑞隆差动改进算法[J].电力系统自动化,2017,41(6):80-85.
- LI Bin, GUO Zixuan, YAO bin, et al. Bergeron model based current differential protection modified algorithm for half-wavelength transmission line[J]. Automation of Electric Power System, 2017,41(6):80-85.
- [8] 李瀚霖,靳维,梁睿,等.基于故障信息自同步的有源配电网纵联保护[J].电力工程技术,2021,40(6):121-126+133.
- LI Hanlin, JIN Wei, LIANG Rui, et al. The pilot protection for active distribution network based on fault information self-synchronizes[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021,40(6):121-126+133.
- [9] 陈森,贾科,陈聪,等.基于高频阻抗曲线匹配的混合直流输电线路纵联保护[J].电力系统自动化,2021,45(12):119-125.
- CHEN Miao, JIA Ke, CHEN Cong, et al. Pilot protection for hybrid DC transmission line based on high-frequency impedance curve matching[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021,45(12):119-125.
- [10] 张雪丽,杨洪耕,王杨,等.考虑线路分布参数的并网系统稳定性分析[J].智慧电力,2021,49(4):44-50.
- ZHANG Xueli, YANG Honggeng, WANG Yang, et al. Stability analysis of grid connected system considering line distribution parameters[J]. Smart Power, 2021,49(4):44-50.
- [11] TLEIS N D. Power systems modelling and fault analysis [M]. Oxford, UK: Elsevier Ltd, 2008:172-207.
- [12] 崔戎舰,肖湃,吴高波,等.直流±250 kV海底电缆J型管段载流量提升研究[J].高压电器,2022,58(1):61-69.
- CUI Rongjian, XIAO Pai, WU Gaobo, et al. Study on current-carrying improvement of J-tubes section of ±250 kV DC submarine cable[J]. High Voltage Apparatus, 2022,58(1):61-69.
- [13] 李巍巍,白欢,吴惟庆,等.基于振荡波局部放电检测的电力电缆绝缘老化状态评价与故障定位[J].电测与仪表,2021,58(9):147-151.
- LI Weiwei, BAI Huan, WU Weiqing, et al. Evaluation and fault location of power cable insulation aging based on oscillation-wave partial discharge detection[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021,58(9):147-151.
- [14] 陈家斌. 电缆图表手册[M]. 北京:中国水利水电出版社,2004:136-158.
- CHEN Jiabin. Cable chart manual[M]. Beijing: China Water Power Press, 2004:136-158.
- [15] 黄少锋. 电力系统继电保护[M]. 北京:中国电力出版社,2015:67-68.
- HUANG Shaofeng. Power system relay protection[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015:67-68.