

海南联网海底电缆护套绝缘监测方法

王星¹, 尚涛², 黄贤球², 陈兵², 陈俊武¹, 陈爱文¹

(1. 华中科技大学电气与电子工程学院, 武汉 430074; 2. 南方电网超高压输电公司, 广州 510623)

摘要: 利用基于 Matlab 所建立的护套感应电流和电容电流模型, 讨论了电缆护套绝缘在各种故障情况下护套电流的响应特性。研究发现, 海底电缆护套中的感应电流与电缆护套绝缘状态的关系不密切, 无论护套绝缘是否发生异常, 其感应电流基本保持不变; 护套电容电流则与电缆护套绝缘关系密切, 而且这种关系呈现出单一函数对应关系, 因此, 可以从电缆两端测得的电容电流的大小, 计算出电缆护套故障的相别、位置等信息, 从而实现对海底电缆外绝缘情况的监测。

关键词: 海底电缆; 护套绝缘; 感应电流; 护套电容电流; Matlab

The Insulation Inspection Method for Submarine Cable Sheath of Hainan Grid Interconnection Project

WANG Xing¹, SHANG Tao², HUANG Xian-qiu², CHEN Bing², CHEN Jun-wu¹, CHEN Ai-wen¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. CSG EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510623, China)

Abstract: With the suggested Matlab-based models for inductive current and capacitance current in the sheath, the characteristics of shield currents are examined under various fault circumstance of the cable sheath insulation. The research discovers that the inductive current in the sheath is not much influenced by the situations of the submarine cable sheath insulation and keeps almost the same value. In vivid contrast the capacitance current is deeply depending on the sheath insulation, and the relationship between the capacitance current and the sheath fault appears as a single function. Therefore, the information about the faulting phase, the failure position etc. can be drew from the capacitance current measured at the two sides of the cable. By this way, the insulation inspection of submarine cable could be realized.

Key words: submarine cable; sheath insulation; inductive current; capacitance current; Matlab

海南联网工程跨越琼州海峡, 选用了技术成熟的超高压自容式单芯充油电缆^[1]。电缆是一次成型制造, 无中直接头, 两端直接接地^[2]。对这种高压自容式充油电缆的绝缘情况如何取样监测是个值得研究的课题^[3-6]。

本文根据海南联网工程海底电缆结构及其运行环境的特点, 对电缆护套中环流与护套绝缘的关系进行了分析。

1 海底电缆结构特点

海南联网工程的海底电缆的电缆中心油管直径 30 mm, 主绝缘厚度为 28.5 mm, 主绝缘外面有多层金属护套层, 如铅层、加固层、防蛀层、铠甲层等, 最外面的外披层厚度为 4 mm。与内层主绝缘相比, 外披层(及护套绝缘层)的厚度要薄很多, 极易遭受

外力破坏。为了防止运行中护套中各层的电压过高, 制造厂家将内部的铅层与铠甲层每隔 8 km 就短接一次, 于是在计算时将金属护套视为一个整体。

2 护套电流的理论计算

2.1 护套感应电流

海底电缆金属护套正常接地方式的等值电路图如图 1 所示^[7]。

图 1 中, E_1, E_2, E_3 分别为三相电缆芯线上通过的电流在 L1, L2, L3 三相电缆金属护套上产生的感应电势; R_1 和 R_2 为接地电阻; R_0 为大地的漏电阻; R 为电缆金属护套的电阻; X 为电缆金属护套的自感抗; E_{s1} 为其他两相电缆护套上环流 I_{s2} 和 I_{s3} 产生的单位感应电势, E_{s2} 和 E_{s3} 以此类推。

对于图 1 的等值电路, 设电缆线路长度为 l ,

其电压方程为:

$$\begin{cases} I_{s1}(R+jX) + (I_{s1} + I_{s2} + I_{s3})(R_1 + R_2 + R_e) + \\ \quad (I_{s2}jX_1l + I_{s3}jX_2l) = E_{s1}l, \\ I_{s2}(R+jX) + (I_{s1} + I_{s2} + I_{s3})(R_1 + R_2 + R_e) + \\ \quad (I_{s1}jX_1l + I_{s3}jX_2l) = E_{s2}l, \\ I_{s3}(R+jX) + (I_{s1} + I_{s2} + I_{s3})(R_1 + R_2 + R_e) + \\ \quad (I_{s1}jX_2l + I_{s2}jX_1l) = E_{s3}l. \end{cases} \quad (1)$$

式中: $R = R_s l$; $R_e = R_g l$; $X_1 = 2\omega \ln(D_e/S)$ 为单位长度中相和边相电缆护套的互感抗; $X_2 = 2\omega \ln[D_e/(2S)]$ 为单位长度边相和边相电缆护套的互感抗; R_s 为单位长度电缆护套的电阻; D_e 为电缆护套以大地为回路时回路等值深度; D_s 为电缆护套的等值直径。

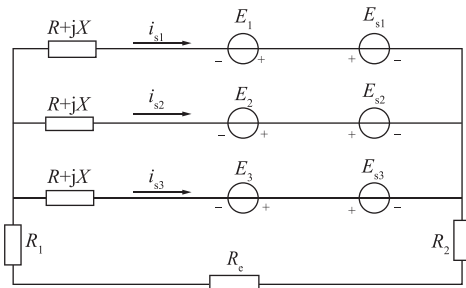


图 1 电缆护套环流等值电路

Fig.1 Circuit Model of Sheath Inductive Current

因电缆是平行敷设且金属护套是不交叉两端接地, 故有如下感应电势计算公式:

$$\begin{aligned} E_{s1} &= I_2 \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \ln(X_s + X_m) + \frac{1}{2} j(X_s - X_m) \right); \\ E_{s2} &= -jI_2 X_s; \\ E_{s3} &= I_2 \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \ln(X_s + X_m) + \frac{1}{2} j(X_s - X_m) \right). \end{aligned}$$

式中: $X_s = [2\omega \ln(2S / D_s)] \times 10^{-7} \Omega/m$;

$$X_m = (2\omega \ln 2) \times 10^{-7} \Omega/m.$$

若令 $R_0 = R_1 + R_2 + R_e$, 根据支路电流法可以得到金属护套上环流的矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} R_0 + R + jX & R_0 + jX_1 & R_0 + jX_2 \\ R_0 + jX_1 & R_0 + R + jX & R_0 + jX_1 \\ R_0 + jX_2 & R_0 + jX_1 & R_0 + R + jX \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s1} \\ I_{s2} \\ I_{s3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{s1} \\ U_{s2} \\ U_{s3} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

仿真计算时, 取中间相的线芯电流为 $I_2 = 750 \angle 0^\circ \text{ A}$, $l = 31 \text{ km}$, $D_e = 510 \text{ m}$, $D_s = 125.3 \text{ mm}$, $S = 10 \text{ m}$, $R_1 = R_2 = 0.5 \Omega$, $R_g = 0.0493 \Omega/\text{km}$, 代入

式 (2) 得:

$$I_{s1} = 404.75 - j626.03 \text{ A};$$

$$I_{s2} = -747.71 - j42.30 \text{ A};$$

$$I_{s3} = 342.43 + j670.01 \text{ A}.$$

其幅值分别为:

$$|I_{s1}| = 745.5 \text{ A}; |I_{s2}| = 748.9 \text{ A}; |I_{s3}| = 752.4 \text{ A}.$$

2.2 护套电容电流

海底电缆为单芯充油电缆, 各相电缆的护套电容电流仅与各自芯线的工作电压有关, 与另外两相无关。因此建立护套电容电流模型时可以只考虑一相的情况, 电缆的主绝缘部分用分布式并联电容电阻模块表示^[8]。为了简化模型, 根据海底电缆的实际参数设置 31 个并联电容电阻模块, 每个模块中 $C_0 = 0.239 \mu\text{F}$; $R_0 = 5.5 \text{ M}\Omega$ ($\tan \delta = 0.0024$)。图 2 为护套电容电流的等值仿真模型, 图中 f 点设为绝缘故障的位置, i_1, i_2 分别为在电缆首、末端测量到的接地护套电容电流, 合成 $i_0 = i_1 + i_2$ 。

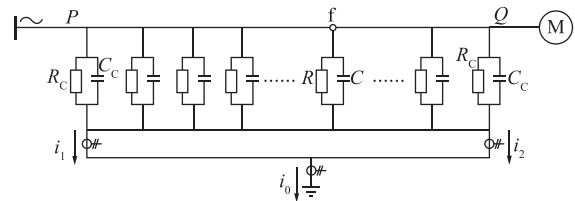


图 2 单相电力电缆接地护套电容电流仿真模型

Fig. 2 Simulation Model of Grounding-Sheath Capacitance Current of Single-Core Power Cable

仿真计算时, 可取芯线对地电压为 $U = 303 \angle 0^\circ \text{ kV}$, 于是得:

$$i_1 = i_2 = 0.85 + j352.6 \text{ A}; i_0 = 1.71 + j705.2 \text{ A}.$$

其幅值分别为:

$$|i_1| = |i_2| = 352.6 \text{ A}, |i_0| = 705.27 \text{ A}.$$

3 电缆护套绝缘与护套中电流的关系

3.1 感应电流

以边相一点接地故障为例建立故障模型 (边相外绝缘受到破坏发生接地故障, 接地电阻 $R_x = 0.5 \Omega$)。故障点将边相分成两部分, 不考虑相互之间的电感。由于海底电缆线路较长, 故障点前后的感应电压采用分布式模型。图 3 为相应的电路图。

如果设前段长度为 x , 则后一段长度为 $31 - x$, 于是故障线路上的芯线电流引起的感应电压分别为 $U_{s3}x/31$ 和 $U_{s3}(31 - x)/31$, 相邻护套电流引起的感

应电压分别为 $xU'_{s3}/31$ 和 $U'_{s3}(31-x)/31$ ，大地漏电阻也相应分成两部分。

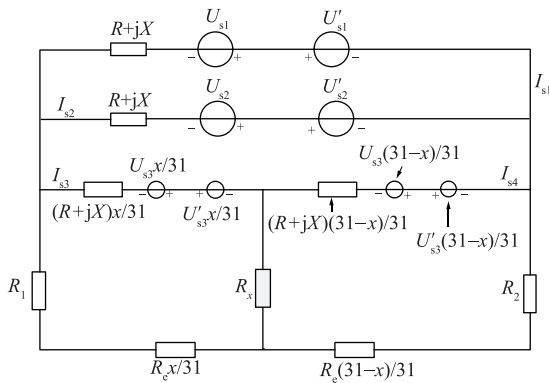


图 3 边相单点接地故障图

Fig.3 Circuit Model of One-point Grounding Fault of Outer Phase

Matlab 仿真计算的结果见图 4 (a) 所示。仿真结果与 2.1 节中计算的结果比较可以看出电缆发生故障后，护套中的感应电流并没有发生明显的变化。

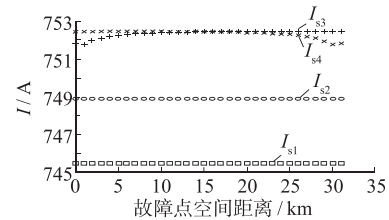
除了上述故障情况外，对于中间相单点接地、边相和中相相各一点接地、两边相各一点接地等情况都做了类似的仿真计算，所得结果见图 4 (b)、(c)、(d) 所示。仿真结果表明，当电缆外绝缘发生接地故障时，护套中的感应电流基本没有明显的变化。此外，还对电缆两点接地的故障情况进行了分析计算。仿真计算结果如图 4 (e) 所示，也未发现故障情况下护套感应电流有明显的变化。

3.2 护套电容电流

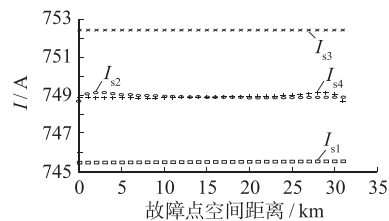
当电缆外绝缘发生接地故障时，护套电容电流会从故障点出流走相当大的一部分，因此两端的护套电容电流相应的会有所减小。故障点的位置如果发生变化，两端所测的护套电容电流会相应有所不同，根据护套电容电流的比值和变化幅度，可以判断大致的故障类型。

图 5 为护套电容电流的计算模型，图中电缆总长度为 l ，左右接地电阻分别为 R_1 和 R_2 ，接地故障电阻 R_x 距左侧距离为 x ，则距右侧为 $1-x$ 。如果设护套单位电阻为 R_s ，单位护套电容电流为 i_c 。

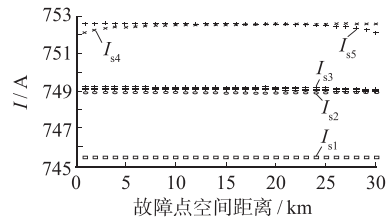
利用 Matlab 对护套电容电流与故障点距离的关系进行了仿真计算，计算中取 $R_1=R_2=0.5 \Omega$ ， $l=31 \text{ km}$ ， $R_s=0.017 \Omega/\text{km}$ ， $i_c=22.75 \text{ A/km}$ ，故障电阻 R_x 取几个不同的阻值，计算结果见图 6 所示。图 6 中的 5 条曲线从右至左依次表示接地阻值是 0.1Ω ， 0.3Ω ， 0.5Ω ， 1Ω 和 10Ω 的时候，电缆两



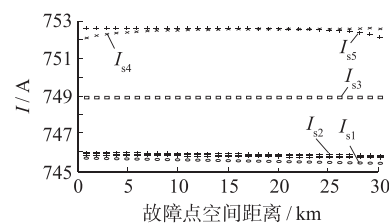
(a) Phase Inductive Currents of One Point Grounding Fault of Outer Phase



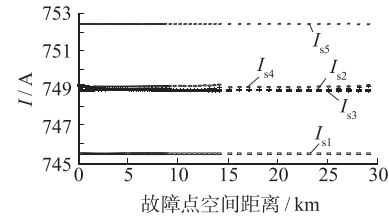
(b) Phase Inductive Currents of One Point Grounding Fault of Middle Phase



(c) Phase Inductive Currents of One Point Grounding Fault of Middle and Outer Phase



(d) Phase Inductive Currents of One Point Grounding Fault of Two Outer Phases



(e) Phase Inductive Currents of Two Points Grounding Fault of Middle Phase

图 4 各种故障情况下的电缆护套感应电流值
Fig.4 Phase Inductive Currents of Different Kinds of Grounding Fault

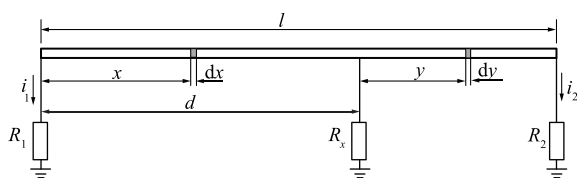


图5 单相电力电缆护套电容电流计算模型

Fig.5 Calculation Mode of Capacitance Current of Single-Core Power Cable

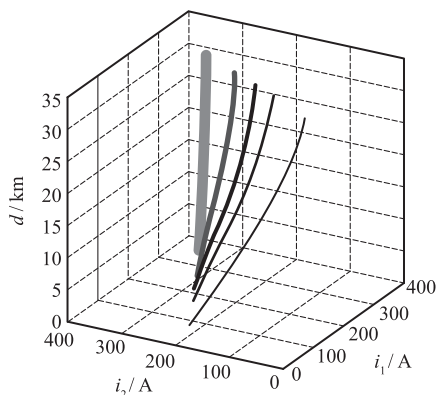


图6 接地故障发生后电缆两端护套电容电流与故障点的关系

Fig.6 Relationship between the Cable's Capacitance Current and the Grounding Fault Location in Different Conditions

端护套电容电流与故障点的关系。从仿真计算结果中可以发现:

1) 接地电阻越小, 发生接地故障时电缆两端的护套电容电流也就越小, 并且总护套电容电流也明显随之降低。

2) 接地阻值确定后, 电缆两端的护套电容电流与故障点距离是单一函数关系。也就是说, 当知道电缆两端的护套电容电流 i_1 和 i_2 后, 就可以测算出接地故障点的位置和推算出接地阻值的大小。

3) 当接地阻值达到电缆两端接地阻值的 20 倍以上后, 电缆两端的接地护套电容电流变化不大, 基本保持不变。这说明只要电缆没有发生低阻值接地故障, 电缆护套中的环流值基本保持不变, 海底电缆还可以继续维持原有的状态运行相当长一段时间, 从而有充足的时间排除外部故障。

4 结论

1) 海底电缆护套中的感应电流与电缆护套绝缘的关系不是很密切, 无论护套绝缘是否发生异常, 其感应电流基本保持不变。

2) 海底电缆护套中的护套电容电流与电缆护套绝缘关系密切, 电缆两端护套中的电容电流的大小, 与故障点的距离以及故障处的接地阻值都有关, 呈现出单一函数的对应关系。进一步研究这种关系, 可以从电缆两端护套中测得的电容电流的大小, 计算出电缆护套故障的相别、距离和阻值大小等信息, 这对建立实时检测海底电缆外绝缘运行安全状况的监测系统有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] 陈凌云, 朱熙樵, 李泰军. 海南联网工程海底电缆的选择[J]. 高压技术, 2006, 32(7): 39-42.
CHEN Ling-yun, ZHU Xi-jiao, LI Tai-jun. Choice of Submarine Cable of Hainan Interconnection Project [J]. High Voltage Technology, 2006, 32(7): 39-42.
- [2] 卓金玉. 电力电缆设计原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [3] SASAKI T, KURIHARA M, UCHIDA M, et al. Oil-Filled Cable Surveillance System Using Newly Developed Optical Fiber Gas Sensor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(2): 656-662.
- [4] COUDERC D, BOURASSA P, MUIRAS J M. Gas-in-oil Criteria for the Monitoring of Self-contained Oil-filled Power Cables [R]/IEEE 1996 Annual Report of the Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. San Francisco: IEEE, 1996
- [5] 陈志勇, 刘丽兵, 吴鹏, 等. 充油电缆和变压器在气相色谱分析方面的比较[J]. 高压电器, 2004, 40(2):119-120.
CHEN Zhi-yong, LIU Li-bing, WU Peng, et al. Comparison between Oil-filled Cable and Transformer in Gas Chromatography of Insulation Oil[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(2): 119-120.
- [6] 曹火江. 海底电(光)缆的保护和管理[J]. 电线电缆, 2006, (3): 34-38.
CAO Huang-jiang. Protection and Management of Electric(Optic) Submarine Cables [J]. Wire & Cable, 2006, (3): 34-38.
- [7] 贾欣, 曹晓珑, 喻明. 单芯电缆计及护套环流时载流量的计算[J]. 高压技术, 2001, 27(1): 25-26.
JIA Xin, CAO Xiao-long, YU Ming. Calculation of Current Rate in Single-Core Cables with Circulating Current[J]. High Voltage Technology, 2001, 27(1): 25-26.
- [8] 段建东, 陈天翔, 张保会, 等. 用接地线电流法进行电力电缆绝缘在线监测的仿真计算[J]. 高压电器, 2005, 41(1): 29-31.
DUAN Jian-dong, CHEN Tian-xiang, ZHANG Bao-hui, et al. Simulation of Online Monitoring of Power Cable Insulation Using Grounding Current Method [J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(1): 29-31.

收稿日期: 2008-07-30

作者简介:

王星(1982-), 男, 湖南通道人。硕士研究生, 研究方向为电力电缆在线监测。E-mail: t_wangxing@163.com。

尚涛(1969-), 男, 湖北大悟人。高级工程师, 从事电网生产运行和工程建设管理。

黄贤球(1969-), 男, 广东高明人。高级工程师, 从事电网生产运行和工程建设管理。