

改进的海底电缆终端电压计算方法

黄烜城¹, 朱正鼎², 储海军¹, 孙 凯², 赵凯强¹, 潘文霞²

(1. 江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211102; 2. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 210098)

摘 要:海底长电缆终端电压是实施耐压试验的重要参数, 为了确保耐压试验接线方案的安全性、有效性, 电缆终端电压的精确计算尤为关键。以江苏某风电厂 220 kV 海底电缆为例, 首先建立分布参数模型, 推导单相电缆沿线电压的计算公式。考虑铠装层以及另外两相电缆的影响, 结合三相电缆不同层之间的电容等效模型, 提出一种基于末端并联等效电容法的改进型海缆计算模型, 该模型能够准确计算海缆终端电压。利用 PSCAD/EMTDC 软件的精确模型仿真结果对所提海底电缆耐压试验终端电压计算公式进行验证, 证明所提海底电缆耐压试验终端电压计算公式准确、方便, 对保证耐压试验接线方案的安全性具有重要意义。

关 键 词:海底电缆; 耐压试验; 分布参数; 等效电容; 终端电压

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.05.022 中图分类号:TM863 文章编号:1673-9140(2020)05-0159-06

Improved calculation method of submarine cable terminal voltage

HUANG Xuancheng¹, ZHU Zhengding², CHU Haijun¹, SUN Kai², ZHAO Kaiqiang¹, PAN Wenxia²

(1. Jiangsu Frontier Electric Technology Co., Ltd., Nanjing 211102, China; 2. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Submarine cable terminal voltage is an important parameter for the implementation of voltage withstand test. In order to assure the safety and effectiveness of the wiring test of the voltage withstand test, the accurate calculation of the cable terminal voltage is particularly critical. A 220 kV submarine cable of a wind power plant in Jiangsu is considered. Firstly, the distribution parameter model is established and the formula for calculating the voltage along the single-phase cable is deduced. Then, the influence of armor layer and other two-phase cables is considered. Combined with the equivalent model of capacitance between different layers of three-phase cable, an improved calculation model of submarine cable based on the end parallel equivalent capacitor method is proposed to improve the calculation model so that the terminal voltage can be accurately calculated. Besides, the practical calculation equation of the terminal voltage is also verified by the accurate simulation results of PSCAD/EMTDC software, validating that the calculation equation of the terminal voltage for the submarine cable withstand voltage test deduced is accurate and convenient. It is of great significance to ensure the safety of the withstand voltage test connection scheme.

Key words: submarine cable; withstand voltage test; distribution parameter; equivalent capacitor; terminal voltage

随着海上风电装机容量的快速增加,高压XLPE海底电缆在欧洲和中国得到快速发展^[1]。对于长距离高压电缆的检测,目前国内外尚缺乏经验,ABB公司^[2]等对于XLPE以及其他类型长距离电缆的检测建议是:无论高压交流或直流电缆均使用交流耐压试验。

在交流耐压试验时,电缆终端电压的大小与试验电压和试验频率有关,海底电缆距离长,容量大。由于容升效应会引起终端电压升高^[3],终端电压是确保海缆耐压试验方案可行的重要约束条件,也是保证耐压试验接线方案安全、可靠的重要参数。然而在实际试验时,由于海缆距离过长,且终端处于海上一端^[4],检测终端电压困难,所以精确计算电缆终端电压的方法在工程应用中具有重要价值。

目前关于耐压试验海底电缆终端电压没有一种通用的计算方法,根据以往的实测值,耐压试验时海底电缆终端电压大约比首端试验电压高2%~3%,但是很少有文献对其进行理论分析。文献[5]以集中参数模型来表示电缆,并且给出了电缆终端电压计算公式。在研究长距离海缆时,根据集中参数进行计算误差较大。文献[6-8]以双线传输线的分布参数模型来表示电缆,利用长线方程来计算电缆沿线电压。然而海底电缆除了内导体和外护套之外,还有最外层铠装会影响电压的计算。

该文以均匀传输线的分布参数模型为基础,考虑铠装层以及另外两相电缆的影响,结合三相电缆不同层之间的电容等效模型,研究一种实施海底电缆耐压试验中终端电压的准确计算方法。

1 单相海缆沿线电压计算

1.1 耐压试验简介

海缆耐压试验原理如图1所示^[9],根据试验规程^[10-11],耐压试验采用20~300 Hz交流电压,127/220 kV电缆交流耐压试验采用1.7 U₀,试验时间为60 min。对电缆的主绝缘作耐压试验时,应分别在每一相上进行。在试验或测量时,金属屏蔽

或金属套和铠装层一起接地。由图1可知,在计算终端电压时,与电缆相连的试验设备可以等效为理想电压源,试验电压即为电源电压,试验频率为电源频率。

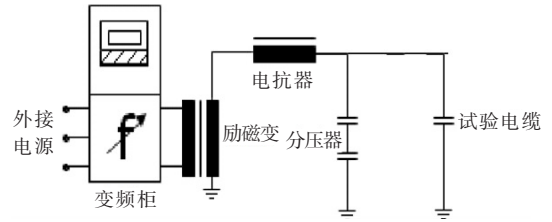


图1 耐压试验原理

Figure 1 Principle diagram of withstand voltage test

1.2 海底电缆沿线电压计算

对于大容量,长距离单相高压海底电缆,可以用具有均匀分布参数的简单等效电路^[12]表示,如图2所示。

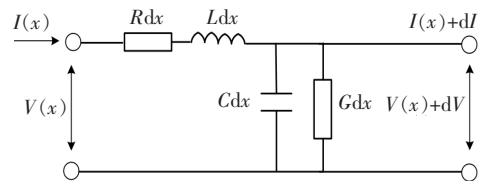


图2 电缆分布参数等效电路

Figure 2 Equivalent circuit of cable distribution parameter

其中长度 Δx 的短线段的分布参数为单位长度电阻 R 、电感 L 、电导 G 、电容 C 。分布参数计算公式^[13-15]为

$$\begin{cases} R = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0 \omega \rho_c}{2}} \left(\frac{1}{r_c} + \frac{1}{r_s} \right) \\ L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_s}{r_c} + \frac{R}{\omega} \\ G = \frac{2\pi\sigma}{\ln(r_s/r_c)} \\ C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(r_s/r_c)} \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\omega = 2\pi f$ 为角频率; r_c 和 r_s 分别为电缆的线芯半径和屏蔽层内半径; ρ_c 为电缆的线芯电阻率; μ_0 为真空磁导率; ϵ 和 σ 分别为电介质的介电常数和电导率。

为了简化后面的分析,把 x 看作距离末端的距

离,则由此模型可以得到均匀传输线的方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial v}{\partial x} = Ri + L \frac{\partial i}{\partial t} \\ \frac{\partial i}{\partial x} = Gv + C \frac{\partial v}{\partial t} \end{cases} \quad (2)$$

在零初始条件下,对式(2)两端取拉普拉斯变换,即

$$\begin{cases} \frac{dV(x,s)}{dx} = (R + sL)I(x,s) \\ \frac{dI(x,s)}{dx} = (G + sC)V(x,s) \end{cases} \quad (3)$$

求解式(3)可得

$$\begin{cases} V(x,s) = A \cos h\gamma(s)x + B \sin h\gamma(s)x \\ I(x,s) = \frac{1}{Z_0(s)} [A \sin h\gamma(s)x + B \cos h\gamma(s)x] \end{cases} \quad (4)$$

式中 x 为电缆线上任意一点距离末端的长度; A 和 B 由边界条件确定; $Z_0(s)$ 为线路的特性阻抗; $\gamma(s)$ 是线路传播常数。

$$\begin{cases} Z_0(s) = \sqrt{(R + sL)/(G + sC)} \\ \gamma(s) = \sqrt{(R + sL) \cdot (G + sC)} \end{cases} \quad (5)$$

设电缆末端接阻抗 $Z(s)$,可以得到末端边界条件为

$$V(0,s) = Z(s)I(0,s) \quad (6)$$

设始端接有内阻为 $Z_{in}(s)$ 的电压源 $U_s(s)$,始端边界条件可用复频域形式表示:

$$V(\lambda,s) = U_s(s) - Z_{in}(s)I(\lambda,s) \quad (7)$$

把边界条件代入到式(4)中推导出 $V(x,s)$:

$$V(x,s) = \frac{U_s(s) [\cos h\gamma(s)x + \frac{Z_0(s)}{Z(s)} \sin h\gamma(s)x]}{[1 + \frac{Z_{in}(s)}{Z(s)}] \cos h\gamma(s)\lambda + [\frac{Z_0(s)}{Z(s)} + \frac{Z_{in}(s)}{Z_0(s)}] \sin h\gamma(s)\lambda} \quad (8)$$

由网络函数的定义及性质可知,如果传输线的激励源是一个正弦信号,那么用 $j\omega$ 替换网络函数中的变量 s ,上述等式可用于分析线路上的正弦电压,其中电源角频率 $\omega = 2\pi f$,因此电缆沿线电压分布为

$$V(x,j\omega) = \frac{U_s (\cos h\gamma x + \frac{Z_0}{Z} \sin h\gamma x)}{(1 + \frac{Z_{in}}{Z}) \cos h\gamma\lambda + (\frac{Z_0}{Z} + \frac{Z_{in}}{Z_0}) \sin h\gamma\lambda} \quad (9)$$

虽然式(9)的计算过程相对比较复杂,但是计算结果却把正弦激励源的参数和负载参数有效地结合在一起,因此在求解沿线电压时更加方便、容易。

2 海底电缆终端电压计算

江苏某风电厂所用电缆模型如图 3 所示,除了导体与护套以外,单芯电缆还有最外层铠装层^[16],铠装层作用是保护电缆不被外力损伤。最常见的是钢带铠装与钢丝铠装,还有铝带铠装、不锈钢带铠装等,所以铠装层可以看成除导体与护套之外的第 3 层导体。由于分布参数模型是以双线传输线为基准的^[17],当考虑铠装层以及另两相电缆的影响,根据所推公式直接求终端电压会误差较大,所以需要改进模型来提高计算精度^[18]。

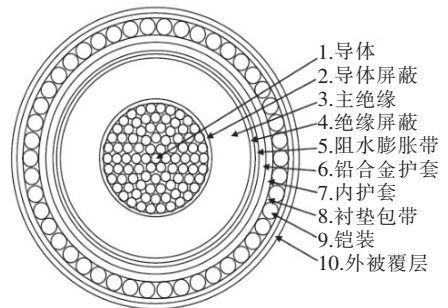


图 3 XLPE 海底高压电缆单芯结构

Figure 3 Single-core structure of XLPE submarine high-voltage cable

设 3 条单芯电缆呈品字型排列,由于在耐压试验中,电缆的 3 个护套和铠装都是接地的,护套和铠装的电压为 0,而电缆 2 个表面之间的电容是通过储能获得的,层与层之间的电位差为

$$W = \int \frac{1}{2} E^2 dV = \frac{1}{2} C (V_1^2 - V_2^2) \quad (10)$$

所以,只有 2 层呈现不同的电位,电容才会被考虑在内。

电缆线芯的接地回路电流为

$$I_{c1} = I_{c1a1} + I_{c1a2} + I_{c1a3} + I_{c1e2} + I_{c1e3} + I_{c1s1} + I_{c1s2} + I_{c1s3} \quad (11)$$

式中 I_{ciaj} 是电缆 i 和 j 的线芯与铠装之间的电流, I_{cisy} 是电缆 i 和 j 线芯与护套之间的电流, I_{cicj} 是电缆 i 和 j 的线芯之间的电流。

根据式(11)可得

$$I_{c1} = \sum_{i=1}^3 (V_{c1} - V_{ai}) B_{c1ai} + \sum_{i=2}^3 (V_{c1} - V_{ci}) B_{c1ci} + \sum_{i=1}^3 (V_{c1} - V_{si}) B_{c1si} \quad (12)$$

式中 V_{ci} 是电缆 i 线芯对地电压; V_{si} 是电缆 i 护套对地电压; V_{ai} 是电缆 i 铠装层对地电压; B_{cicj} 是电缆 i 线芯和电缆 j 线芯的互电纳; B_{cisy} 是电缆 i 线芯和电缆 j 护套的互电纳; B_{ciaj} 是电缆 i 线芯和电缆 j 铠装的互电纳。

因为电缆的护套和铠装对地电压为 0, 即 V_{ai} 和 V_{si} 等于 0。所以

$$I_{c1} = V_{c1} \left(\sum_{i=1}^3 B_{c1ai} + \sum_{i=2}^3 B_{c1ci} + \sum_{i=1}^3 B_{c1si} \right) - V_{c2} B_{c1e2} - V_{c3} B_{c1e3} \quad (13)$$

可以得到线芯 1 的自电纳为

$$B_{c1c1} = B_{c1a1} + B_{c1a2} + B_{c1a3} + B_{c1e2} + B_{c1e3} + B_{c1s1} + B_{c1s2} + B_{c1s3} \quad (14)$$

三相电缆不同层电容等效如图 4 所示, $c1$ 、 $c2$ 、 $c3$ 为三相电缆的线芯, $s1$ 、 $s2$ 、 $s3$ 为三相电缆的护套, $a1$ 、 $a2$ 、 $a3$ 为三相电缆的铠装层。由于三相电缆结构相同, 所以电缆电容相同。

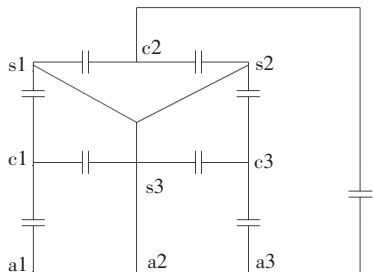


图 4 三相电缆不同层电容等效图

Figure 4 Equivalent diagram of different layer capacitance of three-phase cable

根据图 4, 电缆线芯和任一相铠装之间的电容等于电缆线芯和任一相外护套的电容, 所以

$$B_{c1a1} = B_{c1a2} = B_{c1a3} = B_{c1s1} = B_{c1s2} = B_{c1s3} = B_{cs} \quad (15)$$

任意 2 个电缆线芯之间的电纳: $B_{cicj} = 2B_{cs}$

任一相电缆线芯的自电纳为

$$B_{c1c1} = 10B_{cs} \quad (16)$$

由于单相电缆的电纳为 B_{cs} , 所以一种改进模型的方法是在每一相电缆终端并联等效 C_m , 即

$$C_m = 9 \cdot C_{cs} \cdot l \quad (17)$$

式中 C_{cs} 为单相电缆电容, l 为每一相电缆长度。

终端电压计算公式为

$$V = \frac{U_s}{(1 + j\omega C_m \cdot Z_{in}) \cos h\gamma l + (j\omega C_m \cdot Z_0 + \frac{Z_{in}}{Z_0}) \sin h\gamma l} \quad (18)$$

3 算例分析

利用 PSCAD/EMTDC 对海底电缆仿真并与计算结果进行对比, 所用电缆结构参数如表 1 所示。

表 1 海缆结构参数

Table 1 Structure parameters of submarine cable mm

名称	外径
铜阻水导体	48.4
半导体层	52.7
XLPE 绝缘	103.1
半导体电阻层	106.1
铅套+沥青	114.3
半导体 PE 护套	121.7
圆形聚乙烯填充条	133.7
聚丙烯纤维内衬层	137.5
镀锌钢丝铠装	149.5
聚丙烯纤维外被层	156.5

根据现场实测, 大丰风电场海底电缆耐压试验的试验电压为 217 kV, 试验频率为 29 Hz, 三相电缆的长度分别为 A 相 29.210 km、B 相 28.913 km、C 相 28.750 km。则 A 相电缆末端并联的电容为 50.59 μ F、B 相电缆末端并联的电容为 50.07 μ F、C 相电缆末端并联的电容为 49.79 μ F。

比较三相电缆终端电压的仿真值、根据长线方程求解的计算值和式(18)计算值,如表 2 所示。

表 2 比较仿真值、长线方程计算值和式(18)计算值

Table 2 Comparison of the simulation values and calculation values of long line equation and formula(18)

电缆	PSCAD 仿真值/kV	长线方程计算值/kV	与仿真值误差/kV	式(18)计算值/kV	与仿真值误差/kV
A 相	221.76	217.26	-4.50	221.71	-0.05
B 相	221.67	217.25	-4.42	221.61	-0.06
C 相	221.61	217.24	-4.37	221.56	-0.05

从表 2 数据可以看出,与直接利用长线方程的计算方法相比,式(18)的计算值与仿真值误差非常小。由表 2 可知,由长线方程计算的终端电压比试验电压大 0.1%左右,没有体现出由于容升效应而导致的电压升高;由式(18)计算得到的终端电压比试验电压大 2%左右,与经验值相符,所以式(18)可以更为准确地计算出电缆终端电压。

4 结语

该文提出一种实施海缆耐压试验时电缆终端电压的准确计算方法。该方法通过在电缆终端并联等效电容的方法计及海缆铠装层对海缆耐压试验终端电压的影响,提出了改进的终端电压计算公式。通过表 2 计算结果比较说明,该文提出的计算方法可简单、准确地计算出电缆终端电压,可以很好地体现由于容升效应导致的电压升高,为耐压试验接线方案的安全、可靠性提供技术保障。

参考文献:

- [1] 王晓彤,林集明,陈葛松,等. 广东—海南 500 kV 海底电缆输电系统电磁暂态研究[J]. 电网技术,2008,32(12):6-11.
WANG Xiaoton, LIN Jiming, CHEN Gesong, et al. Electromagnetic transient analysis of 500 kV submarine cable transmission system from Guangdong to Hainan [J]. Power System Technology, 2008, 32(12): 6-11.
- [2] 徐妍,孙凯,储海军,等. 长电缆耐压试验中电抗器串并联

- 组合的优选方法[J]. 高压电器,2020,56(3):234-239.
- XU Yan, SUN Kai, CHU Haijun, et al. Optimization method of reactor series/parallel reactor combination in long cable withstand voltage test[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(3): 234-239.
- [3] 戚革庆,吴建军,戴思源,等. 高压电力电缆在交流耐压过程中的容升现象研究[J]. 高压电器,2016,52(8):155-160.
QI Geqing, WU Jianjun, DAI Siyuan, et al. Capacitance rise phenomenon of power cable in AC voltage withstand test[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(8): 155-160.
- [4] 赵远涛,李健,罗楚军. 海南联网工程海底电缆过电压与绝缘配合研究[J]. 智能电网,2017,5(1):17-22.
ZHAO Yuantao, LI Jian, LUO Chujun. Research on overvoltage and insulation coordination of submarine cable for Hainan interconnection project [J]. Smart Grid, 2017, 5(1): 17-22.
- [5] 周志强. 基于宽频阻抗谱的电缆局部缺陷诊断方法研究[D]. 武汉:华中科技大学,2015.
- [6] 张安安,周志通,庄景泰,等. 基于行波瞬时振幅的高压直流输电线路故障测距方法研究[J]. 智慧电力,2020,48(2):78-84.
ZHANG Anan, ZHOU Zhitong, ZHUANG Jingtai, et al. Fault location method of HVDC transmission line based on traveling wave instantaneous amplitude[J]. Smart Power, 2020, 48(2): 78-84.
- [7] 邢海瀛,袁汉川,邓春,等. 基于分布参数的电力电缆故障定位新型算法研究[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(14):16-20+25.
XING Haiying, YUAN Hanchuan, DENG Chun, et al. A novel power cable fault location algorithm based on distributed parameters [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(14): 16-20+25.
- [8] 刘炎,夏向阳,李明德,等. 高压电力电缆轨迹法在线监测方法[J]. 电力科学与技术学报,2019,34(3):202-210.
LIU Yan, XIA Xiangyang, LI Mingde, et al. Research on online monitoring system based on locus method of HV power cable[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(3): 202-210.

- [9] 陶劲松,席成员,贺景亮,等. 湖南 110 kV 长距离电缆耐压试验[J]. 高电压技术, 2002, 28(11):48-49.
TAO Jinsong, XI Chengyuan, HE Jingliang, et al. AC voltage-withstadd test in hunan furongnan-datuo 110 kV long distance electric cable[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28 (11): 48-49.
- [10] GB/T 18890.1—2015. 额定电压 220 kV ($U_m = 252$ kV)交联聚乙烯绝缘电力电缆及其附件 第 1 部分:试验方法和要求[S].
- [11] Q/GDW 11316—2014. 电力电缆线路试验规程[S].
- [12] Dworsky L N. Modern transmission line theory and applications[M]. New York: John Wiley & Sons, 1979.
- [13] 徐政,钱洁. 电缆电气参数不同计算方法及其比较[J]. 高电压技术, 2013, 39(3):689-697.
XU Zheng, QIAN Jie. Comparison of different methods for calculation electrical parameters of power cables[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(3):689-697.
- [14] Fujimori Y, Ogasawara S, Takemoto M. Measurement of resistance characteristics of power cables in the very high frequency band for improving electromagnetic interference analysis[C]//2013 1st International Future Energy Electronics Conference (IFEEC), Tainan, China: IEEE, 2013.
- [15] 谢敏,周凯,赵世林,等. 新型基于反射系数谱的电力电缆局部缺陷定位方法[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 3083-3089.
XIE Min, ZHOU Kai, ZHAO Shilin, et al. A new location method of local defects in power cables based on reflection coefficient spectrum [J]. Power System Technology, 2017, 41(9):3083-3089.
- [16] 刘硕. 海底高压电缆故障监测和电磁暂态分析研究[D]. 上海:上海交通大学, 2012.
- [17] 吴文庚,林雪倩. 海底电缆综合监测关键技术及应用[J]. 中国电力, 2018, 51(6):129-135.
WU Wengeng, LIN Xueqian. Application and key technologies of submarine cable integrated monitoring [J]. Electric Power, 2018, 51(6):129-135.
- [18] 赵铁军,王秀斌,虞跃. 基于金属护层模型参数辨识的电缆单相故障单端测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21):83-91.
ZHAO Tiejun, WANG Xiubin, YU Yue. A single terminal fault location method for single phase fault of cable based on parameter identification of metal sheath model[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47 (21):83-91.