第 50 卷 第 11 期：4942-4950 高电压技术 Vol.50, No.11: 4942-4950
2024 年 11 月 30 日 High Voltage Engineering November 30, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20231583

基于 EMTP 的三芯海底电缆线路序参数的计算与分析

王晓彤[1]，项祖涛[1]，杨大业[1]，杜　宁[1]，赵圃林[2]，郦洪柯[3]
（1. 电网安全与节能国家重点实验室(中国电力科学研究院有限公司)，北京 100192;
2. 中天科技海缆股份有限公司，南通 226000;
3. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司，杭州 311122）

摘　要：三芯海底电缆线路常用于海上风电的送出。在相关的规划设计和仿真分析中，三芯海底电缆线路的序参数是基础之一。基于电磁暂态仿真程序 EMTP，以 1 条截面为 3×500 mm^2 的 220 kV 海底电缆线路为例，对三芯海底电缆线路的序参数进行了计算与分析。文章计算了半导电聚乙烯护套的径向电阻，讨论了金属护套的处理方式。推导了三芯海底电缆线路单位长度的正序和零序阻抗、金属护套和铠装电流的计算式。研究了钢丝铠装的磁导率对三芯海底电缆线路电流分布及序参数的影响。此外，还分析了不同接地情况下光纤单元的铠装对三芯海底电缆线路序参数的影响。研究表明，三芯海底电缆线路的零序电阻远大于正序电阻，甚至可能大于零序电抗；当等值的相对磁导率μ_r在一定的范围内，可能出现零序电抗小于正序电抗的情况。文章将仿真与实测结果进行了对比。结果表明：选择适当的钢丝铠装磁导率，可以得到合理的计算结果。

关键词：EMTP；三芯海底电缆；序参数；钢丝铠装；磁导率

Calculation and Analysis on Sequence Parameters of Three-core Submarine Cable Lines Based on EMTP

WANG Xiaotong[1], XIANG Zutao[1], YANG Daye[1], DU Ning[1], ZHAO Youlin[2], LI Hongke[3]
(1. State Key Laboratory of Power Grid Safety and Energy Conservation, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;
2. Zhongtian Technology Submarine Cable Co., Ltd., Nantong 226000, China;
3. Power China Huadong Engineering Co., Ltd., Hangzhou 311122, China)

Abstract: Three-core submarine cable lines are commonly used for offshore wind power transmission. In the relevant planning design and simulation analysis, the design of sequence parameters of three-core submarine cable lines is one of the foundations. Based on electromagnetic transients program (EMTP), a 220 kV submarine cable line with a section of 3×500 mm^2 are taken as an example, the sequence parameters of three-core submarine cable lines are calculated and analyzed. The radial resistance of semi-conductive polyethylene sheath is calculated, and the treatment method of metal sheath is discussed. The formulas for calculating the positive and zero sequence impedances per unit length, metal sheath and armor currents of three-core submarine cable lines are derived. The influences of magnetic permeability of steel wire armor on the current distribution and sequence parameters of three-core submarine cable lines are studied. In addition, the influences of optical fiber unit armor on sequence parameters of three-core submarine cable lines under different grounding conditions are also analyzed. The research shows that zero sequence resistance of three-core submarine cable lines is much greater than positive sequence resistance, and may even be greater than zero sequence reactance; when the equivalent relative magnetic permeability μ_r is within a certain range, the zero sequence reactance may be less than the positive sequence reactance. The simulation results are compared with measured results. The results show that reasonable calculation results can be obtained by selecting appropriate magnetic permeability of steel wire armor.

Key words: EMTP; three-core submarine cable; sequence parameter; steel wire armor; magnetic permeability

基金资助项目：国家电网公司科技项目(大规模新能源送出系统宽频振荡电磁暂态仿真评估及抑制技术研究)(5108-202218280A-2-275-XG)。
Project supported by Science and Technology Project of SGCC(Research on Electromagnetic Transient Simulation Evaluation and Suppression Techniques for Broadband Oscillation in Large-scale Renewable Energy Power Transmission System)(5108-202218280A-2-275-XG).

0 引言

近年来，随着经济的发展，大长度海底交联聚乙烯(crosslinked polyethylene，XLPE)电力电缆[1-5]需求量猛增。三芯海底电缆线路不仅传输电能的容量大，还可节约海底路由资源，具有较低的电磁损耗和电压降、较低的海缆生产和安装维护成本等优点[6-8]。响水海上风电场是我国第 1 个使用三芯 220 kV XLPE 绝缘海底电缆线路的工程[9]。目前，220 kV 三芯海底电缆线路已经得到广泛应用，500 kV 三芯海底电缆线路也开始起步——广东粤电阳江青洲一、二海上风电项目中，就采用了世界首条 500 kV 三芯海底电缆线路[10]。

三芯海底电缆线路常用于海上风电的送出工程中，成为不可或缺的一部分[11-12]。在相关的工程设计中，三芯海底电缆线路的电气参数是计算和分析的基础。目前，电缆线路电气参数的研究主要集中在单芯电缆线路：文献[13-14]研究了单芯海底电缆线路的电气参数及其平衡性，文献[15-18]研究了单芯地下电缆线路的电气参数及其平衡性。关于三芯海底电缆线路的电气参数，相应的文献较少。文献[19]主要对单芯电缆线路的电气参数进行研究，对三芯铠装电缆线路仅作了初步分析。文献[20]对三芯海底电缆线路的电气参数进行了计算与分析，并研究了光纤单元的影响，但在分析时忽略了电阻的影响。实际上，(采用钢丝铠装的)三芯海底电缆线路的零序电阻较大，甚至可能大于零序电抗(即零序阻抗的阻抗角<45°)。文献[21]研究了海底电缆谐波频段电气参数的计算方法。上述文献中均未分析钢丝铠装的磁导率对三芯海底电缆线路序阻抗的影响。

三芯海底电缆线路各层导体间的电磁耦合关系较复杂，准确计算电缆线路的序阻抗(尤其是零序阻抗)较困难。采用成熟的电磁暂态仿真软件，是可选的途径之一。为此，本文以 1 条截面为 3×500 mm^2 的 220 kV 海底电缆线路为例，基于电磁暂态仿真程序 EMTP，对三芯海底电缆线路的序参数进行了计算与分析，重点研究了钢丝铠装磁导率的影响，并与实测结果进行了比较。

1 线路概况

本文研究的 220 kV 三芯海底电缆线路的导体截面为 500 mm^2，长度为 47.3 km，相应的结构如图 1 所示，相关的尺寸见表 1。其中，XLPE 绝缘的相对介电常数为 2.3。

2 三芯海底电缆线路金属护套的处理方式

三芯海底电缆线路的金属护套外，有 1 层聚乙烯(polyethylene，PE)护套。为了限制金属护套上的感应电压，该 PE 护套通常采用半导电材料。

近年来，半导电的 PE 护套在大长度的海底电缆线路中得到了广泛应用。在 500 kV 海南联网工程中，第 1 回海底电缆线路的 PE 护套采用的还是绝缘材料，通过每 8 km 短接 1 次减小铅套与铠装间的感应电压；而在第 2 回海底电缆线路中，就采用了半导电材料[22]。假如金属护套外采用的是绝缘

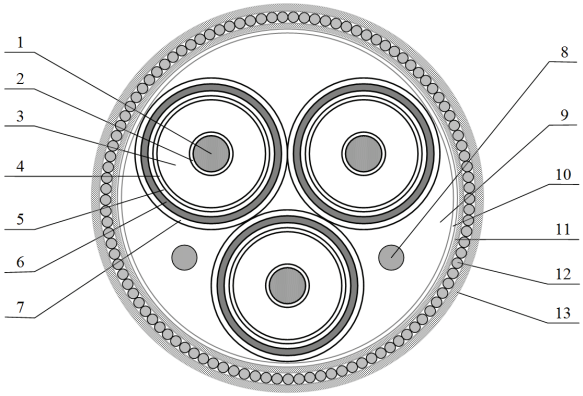


图 1 三芯光电复合海缆结构示意图

Fig.1 Structural diagram of three-core photoelectric composite submarine cable

表 1 220 kV 三芯海底电缆线路的结构尺寸

Table 1 Sizes of 220 kV three-core submarine cable line

序号	结构名称	厚度/mm	外径/mm
1	阻水铜导体	—	26.6
2	导体屏蔽	2.0	31.0
3	交联聚乙烯绝缘	27.0	85.0
4	绝缘屏蔽	1.2	87.4
5	半导电阻水带	0.5	89.4
6	合金铅套	3.5	96.4
7	半导电聚乙烯护套	3.3	103.0
8	光纤单元	—	—
9	填充	—	222.5
10	成缆包带	0.3	224.3
11	聚丙烯内垫层	1.5	227.3
12	镀锌钢丝	6.0	239.3
13	聚丙烯外被层	4.0	247.3

的 PE 护套，则金属护套可按沿线不接地处理，同时还需考虑两端的接地电阻[14]。而在采用半导电 PE 护套的条件下，三芯海底电缆线路的金属护套采用何种处理方式，是亟待解决的问题之一。

半导电 PE 护套的电阻率与温度及老化程度有关。正常运行时的典型值为 1~5 Ω·m，老化后为 10~15 Ω·m。单位长度的径向电导 G' 表达式为：

$$G' = \frac{2\pi}{\rho \ln(r/q)} \tag{1}$$

式中：ρ为导体的电阻率；q 和 r 为管状导体的内、外半径。

根据式(1)，在本文的算例中，半导电 PE 护套的电阻率取 1 Ω·m 时，单位长度的电导为 9.5×10^4 S/km；即使按 15 Ω·m 考虑，单位长度的电导也有 6.3×10^3 S/km。可见，半导电 PE 护套的径向电阻是很小的。

在半导电 PE 护套和铠装之间，还有填充材料、成缆包带和内垫层。当海底电缆线路敷设完成后，海水会透过铠装，一直浸入到半导电的 PE 护套外。这种浸入作用影响电缆过电压计算模型中的金属护套及铠装的接地方式，进而影响海缆线路过电压的计算结果[23]。半导电 PE 护套的径向电阻很小且海水会接触到该护套，相当于金属护套是多点接地的。从工程计算的角度看，在采用半导电 PE 护套的条件下，将金属护套按接地导体处理，是一种合理的近似。

EMTP 类仿真软件通常不能直接模拟半导电层。电缆的串联阻抗(包括电阻和电感)主要取决于电缆的轴向特性。由于邻近效应，金属护套的电流主要从内壁流过；半导电 PE 护套的电阻率远大于金属导体，从中流过的轴向电流可忽略不计。因此，在计算串联阻抗矩阵时，半导电 PE 护套可近似按绝缘介质考虑。

3 三芯海底电缆线路序参数的计算

采用 EMTP 软件计算三芯海底电缆线路的电气参数时，可按管形电缆(Pipe-Type)模拟。需要说明的是，EMTP 软件无法模拟复杂的铠装结构，钢丝铠装是近似按管道模拟的。三芯海底电缆线路的电气参数是平衡的，可采用序参数进行简化分析，单位长度的阻抗矩阵可表示为：

$$\begin{bmatrix} Z'_{cc} & Z'_{p} & Z'_{p} & Z'_{cs} & Z'_{p} & Z'_{p} & Z'_{k} \\ Z'_{p} & Z'_{cc} & Z'_{p} & Z'_{p} & Z'_{cs} & Z'_{p} & Z'_{k} \\ Z'_{p} & Z'_{p} & Z'_{cc} & Z'_{p} & Z'_{p} & Z'_{cs} & Z'_{k} \\ Z'_{cs} & Z'_{p} & Z'_{p} & Z'_{ss} & Z'_{p} & Z'_{p} & Z'_{k} \\ Z'_{p} & Z'_{cs} & Z'_{p} & Z'_{p} & Z'_{ss} & Z'_{p} & Z'_{k} \\ Z'_{p} & Z'_{p} & Z'_{cs} & Z'_{p} & Z'_{p} & Z'_{ss} & Z'_{k} \\ Z'_{k} & Z'_{k} & Z'_{k} & Z'_{k} & Z'_{k} & Z'_{k} & Z'_{aa} \end{bmatrix}。$$

式中：Z'_{cc}、Z'_{ss}、Z'_{aa} 分别为芯线、金属护套、铠装单位长度的自阻抗；Z'_{cs} 为芯线与同一相金属护套间单位长度的互阻抗；Z'_{p} 为芯线与另一相芯线/金属护套间单位长度的互阻抗；Z'_{k} 为铠装与芯线/金属护套间单位长度的互阻抗。

将上述的相量矩阵转换为序量形式，则有：

$$\begin{bmatrix} Z'_{cc0} & 0 & 0 & Z'_{cs0} & 0 & 0 & Z'_{k} \\ 0 & Z'_{cc1} & 0 & 0 & Z'_{cs1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z'_{cc1} & 0 & 0 & Z'_{cs1} & 0 \\ Z'_{cs0} & 0 & 0 & Z'_{ss0} & 0 & 0 & Z'_{k} \\ 0 & Z'_{cs1} & 0 & 0 & Z'_{ss1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z'_{cs1} & 0 & 0 & Z'_{ss1} & 0 \\ 3Z'_{k} & 0 & 0 & 3Z'_{k} & 0 & 0 & Z'_{aa} \end{bmatrix}。$$

其中：Z'_{cc0} 和 Z'_{cc1} 为芯线单位长度的零序和正序自阻抗；Z'_{ss0} 和 Z'_{ss1} 为金属护套单位长度的零序和正序自阻抗；Z'_{cs0} 和 Z'_{cs1} 为芯线与金属护套间单位长度的零序和正序互阻抗。有如下的关系：

$$\begin{cases} Z'_{cc1} = Z'_{cc} - Z'_{p} \\ Z'_{cs1} = Z'_{cs} - Z'_{p} \\ Z'_{ss1} = Z'_{ss} - Z'_{p} \end{cases} \tag{2}$$

$$\begin{cases} Z'_{cc0} = Z'_{cc} + 2Z'_{p} \\ Z'_{cs0} = Z'_{cs} + 2Z'_{p} \\ Z'_{ss0} = Z'_{ss} + 2Z'_{p} \end{cases} \tag{3}$$

海底电缆线路的铠装实际上与海水接触，故可视为接地导体；根据第 2 章的分析，采用半导电 PE 护套的条件下金属护套也可近似视为接地导体。

当三芯海底电缆线路流过正序电流时，铠装上的电流为零，则有：

$$\begin{bmatrix} Z'_{cc1} & Z'_{cs1} \\ Z'_{cs1} & Z'_{ss1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{c1} \\ I_{s1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathrm{d}U_{c1}/\mathrm{d}x \\ 0 \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中：I_{c1} 和 I_{s1} 分别为芯线和金属护套上的正序电流；$-\mathrm{d}U_{c1}/\mathrm{d}x$ 为芯线上单位长度的正序压降。

根据式(4)，可得：

$$I_{s1} = -\frac{Z'_{cs1}}{Z'_{ss1}} I_{c1} \tag{5}$$

经推导，三芯海底电缆线路单位长度的正序阻抗 Z_1' 为：

$$Z_1' = Z_{cc1}' - \frac{Z_{cs1}'^2}{Z_{ss1}'} \tag{6}$$

当三芯海底电缆线路流过零序电流时，则有

$$\begin{bmatrix} Z_{cc0}' & Z_{cs0}' & Z_k' \\ Z_{cs0}' & Z_{ss0}' & Z_k' \\ 3Z_k' & 3Z_k' & Z_{aa}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{c0} \\ I_{s0} \\ I_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathrm{d}U_{c0}/\mathrm{d}x \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{7}$$

式中：I_{c0} 和 I_{s0} 分别为芯线和金属护套上的零序电流；I_a 为铠装电流；$-\mathrm{d}U_{c0}/\mathrm{d}x$ 为芯线上单位长度的零序压降。

根据式(7)，可得：

$$\begin{cases} I_{s0} = -\dfrac{Z_{cs0}'Z_{aa}' - 3Z_k'^2}{Z_{aa}'Z_{ss0}' - 3Z_k'^2} I_{c0} \\ I_a = -\dfrac{3Z_k'\left(Z_{ss0}' - Z_{cs0}'\right)}{Z_{aa}'Z_{ss0}' - 3Z_k'^2} I_{c0} \end{cases} \tag{8}$$

经推导，三芯海底电缆线路单位长度的零序阻抗 Z_0' 为：

$$Z_0' = Z_{cc0}' - \frac{Z_{cs0}'^2 Z_{aa}' + 3Z_k'^2\left(Z_{ss0}' - 2Z_{cs0}'\right)}{Z_{aa}'Z_{ss0}' - 3Z_k'^2} \tag{9}$$

如果不关注金属护套或铠装的工况、只需计算三芯海底电缆线路的序参数，则可将金属护套和铠装直接按接地导体设置，从而获得消去金属护套和铠装后的单位长度的等值相阻抗矩阵为 $\begin{bmatrix} Z_s' & Z_m' & Z_m' \\ Z_m' & Z_s' & Z_m' \\ Z_m' & Z_m' & Z_s' \end{bmatrix}$。其中，$Z_s'$ 和 Z_m' 为消去金属护套和铠装后单位长度的等值自阻抗和互阻抗。

相应地，有如下的关系：

$$\begin{cases} Z_1' = Z_s' - Z_m' \\ Z_0' = Z_s' + 2Z_m' \end{cases} \tag{10}$$

消去金属护套和铠装后，三芯海底电缆线路单位长度的电容矩阵为 1 个对角阵，对角线元素为芯线和金属护套间单位长度的电容 C'，即：

$$C' = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r}{\ln(r/q)} \tag{11}$$

式中：ε_0 为真空介电常数；ε_r 为绝缘材料的相对介电常数；q 和 r 为管状绝缘的内、外半径。

在计算电缆线路的阻抗参数时，主绝缘内侧和外侧的半导电层可近似按绝缘介质考虑[16]。然而，若将上述的半导电层直接按绝缘介质处理，则相应的电容参数是不准确的。为此，可将相对介电常数 ε_r 作一修正，表示为：

$$\varepsilon_{r_new} = \frac{\ln\left(R_4/R_1\right)}{\ln\left(R_3/R_2\right)}\varepsilon_r \tag{12}$$

式中：R_1 为电缆芯线的外半径(内侧半导电层的内半径)；R_2、R_3 为主绝缘的内、外半径；R_4 为金属护套的内半径(外侧半导电层的外半径)。

4 钢丝铠装磁导率的影响

与单芯电缆线路相比，三芯海底电缆线路的复杂性在于各相电缆与钢丝铠装不是同轴的；钢丝铠装的磁导率与电流有关，典型曲线如图 2 所示[24-25]，I_P 为管道电流，D_P 为管道外径，μ_r 为管道的相对磁导率。值得注意的是，即使在某一频率下，1 个周期内的磁导率也不是常数。

220 kV 三芯海底电缆线路铠装的厚度通常为 6 mm 左右，电流的透入深度 d 表示为：

$$d = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0\mu_r}} \tag{13}$$

式中：$\omega = 2\pi f$ 为角频率，f 为频率；μ_0 为真空磁导率；μ_r 为介质的相对磁导率。

钢丝铠装的相对磁导率 μ_r 典型值是 400[24,26]，也有文献采用 300[27-28]，电磁暂态仿真软件 PSCAD 中的默认值为 200。当 μ_r 取 200 和 400 时，50 Hz 下的透入深度分别为 1.9 mm 和 1.3 mm(采用铜丝铠装时为 9.3 mm)。由式(13)可以看出，磁导率越大，则透入深度越小，邻近效应越强。这样，零序条件下流过铠装的电流就越小，流过铅套的电流就越大。电流分配的这种差异，影响了各层导体间的电磁耦合，从而导致了三芯海底电缆线路阻抗参数的差异。

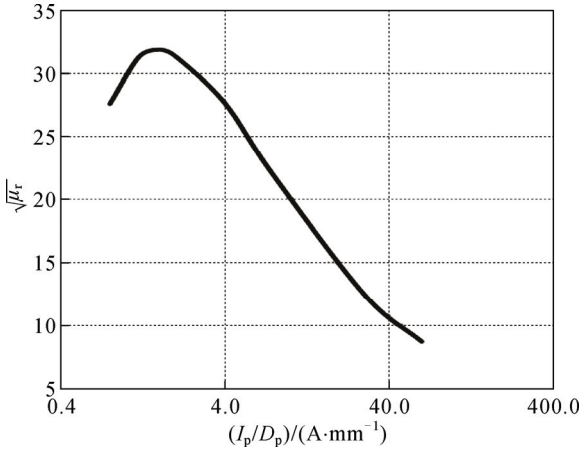


图 2 管道的相对磁导率与电流的关系

Fig.2 Relationship between relative permeability and current of the pipe

当钢丝铠装采用不同的磁导率时，金属护套、钢丝铠装、海水/土壤中的电流所占比例(以芯线电流为基准)变化曲线如图 3 所示。表 2 给出了相对磁导率分别取 100、200、300、400 时的情况。其中，I_g 为海水/土壤电流。需要说明的是，零序条件下总的芯线电流为 $3I_{c0}$。为了表征 I_a 和 I_g 所占的比例(以芯线电流为基准)，二者均须除以 $3I_{c0}$。

当钢丝铠装采用不同的磁导率时，单位长度的正序或零序阻抗的变化曲线如图 4 所示。表 3 给出了相对磁导率分别取 100、200、300、400 时的情况。

对于单芯海底电缆线路，在金属护套良好接地的条件下，正序阻抗与零序阻抗基本相同[14]。这是因为，金属护套理想接地条件下的零序和正序等值电路是一致的。而对三芯海底电缆线路来说，正序和零序时的情况是不同的——正序条件下铠装中基本没有电流，而零序条件下的铠装电流与芯线电流则是可比的。由计算结果可以看出：

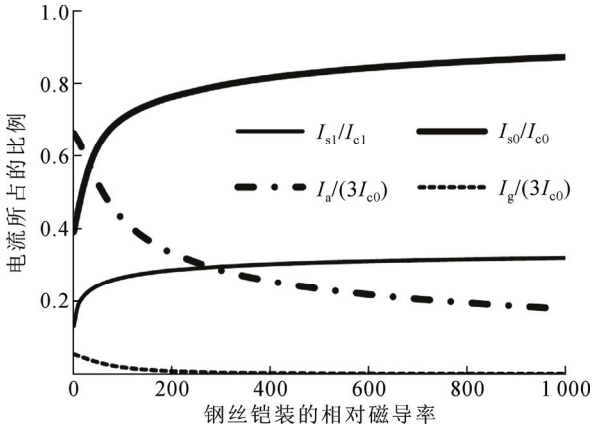


图 3 钢丝铠装的磁导率对电流分配的影响

Fig.3 Influence of magnetic permeability of steel wire armor on current distribution

1）三芯海底电缆线路的零序电阻远大于正序电阻，甚至可能大于零序电抗（即零序阻抗的阻抗角<45°）。这与零序条件下增加了铠装的损耗有关。

2）当等值的相对磁导率 μ_r 在一定的范围内(如大于 100)，可能出现三芯海底电缆线路的零序电抗小于正序电抗的情况。

5 铠装光纤单元的影响

三芯海底电缆线路中的光纤单元[6,29]可能有多种结构形式。图 5 给出了一种铠装光纤单元(36 芯)的结构示意图，相关的尺寸见表 4。其中，内外 PE 护套采用半导电材料。不锈钢管与钢丝铠装间有 1 层半导电的 PE 护套，二者是等电位的。考虑到不锈钢的电阻率较大且位于内侧，由于邻近效应，返回电流(假如有的话)主要从铠装中流过。仿真时，可近似按空心导线(只考虑铠装部分)模拟。

三芯海底电缆线路中的光纤单元通常为 2 根或 3 根。表 5 给出了光纤铠装在不同接地情况下三芯

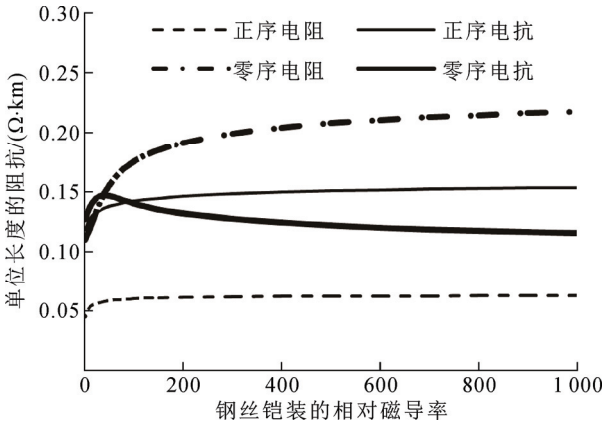


图 4 钢丝铠装的磁导率对正序和零序阻抗的影响

Fig.4 Influence of magnetic permeability of steel wire armor on positive and zero sequence impedance

表 2 钢丝铠装采用不同磁导率时的电流分配

Table 2 Current distribution of steel wire armor with different magnetic permeabilities

相对磁导率μ_r	序量	I_{s1}/I_{c1} 或 I_{s0}/I_{c0}		$I_a/(3I_{c0})$		$I_g/(3I_{c0})$	
		幅值/%	相角/(°)	幅值/%	相角/(°)	幅值/%	相角/(°)
100	正序	26.5	–115.3	—	—	—	—
	零序	70.3	–160.7	42.6	146.2	1.8	166.1
200	正序	28.5	–114.6	—	—	—	—
	零序	76.3	–165.3	33.3	142.9	0.7	112.3
300	正序	29.5	–114.2	—	—	—	—
	零序	79.4	–167.4	28.5	141.7	0.4	71.4
400	正序	30.2	–113.9	—	—	—	—
	零序	81.6	–168.8	25.5	141.2	0.2	36.9

表 3 钢丝铠装的磁导率对单位长度序参数的影响

Table 3 Influence of magnetic permeability of steel wire armor on sequence parameters per unit length

相对磁导率μ_r	序参数	电阻/(Ω·km^{-1})	电抗/(Ω·km^{-1})	电容/(μF·km^{-1})
100	零序	0.175 0	0.139 7	0.126 9
	正序	0.059 8	0.141 6	0.126 9
200	零序	0.190 5	0.131 5	0.126 9
	正序	0.060 9	0.145 7	0.126 9
300	零序	0.198 4	0.127 1	0.126 9
	正序	0.061 4	0.147 8	0.126 9
400	零序	0.203 6	0.124 0	0.126 9
	正序	0.061 6	0.149 3	0.126 9

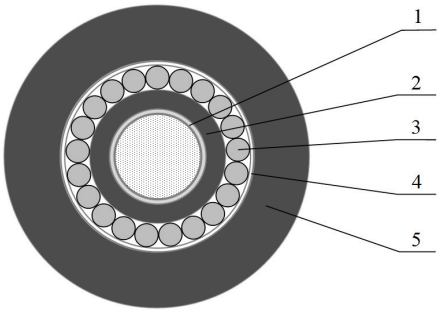


图 5 光纤单元结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of optical fiber unit structure

表 4 光纤单元的结构尺寸

Table 4 Sizes of optical fiber unit

序号	结构名称	标称厚度/mm	近似外径/mm
1	不锈钢管	—	3.6
2	PE 内护套	1.0	5.6
3	高强度钢丝	1.23	8.1
4	绕包包带	0.2	8.5
5	PE 外护套	3.0	14.5

海底电缆线路单位长度的等值序参数。其中，钢丝铠装的相对磁导率按 200 考虑。可以看出，在不接地的条件下，光纤单元的铠装对三芯海底电缆线路的序参数基本没有影响；而在接地条件下，相当于多了 2 条或 3 条返流通道，从而对电缆线路的阻抗参数产生了一定的影响。

当光纤单元为 3 根时，电缆线芯和光纤单元的排列情况如图 6 所示，仿真时的编号顺序为：A、B、C、F1、F2、F3。

考虑光纤单元后，三芯海底电缆线路单位长度的阻抗矩阵可表示为：

$$\begin{bmatrix} Z'_{\mathrm{s}} & Z'_{\mathrm{m}} & Z'_{\mathrm{m}} & Z'_{1\mathrm{f}} & Z'_{1\mathrm{f}} & Z'_{2\mathrm{f}} \\ Z'_{\mathrm{m}} & Z'_{\mathrm{s}} & Z'_{\mathrm{m}} & Z'_{2\mathrm{f}} & Z'_{1\mathrm{f}} & Z'_{1\mathrm{f}} \\ Z'_{\mathrm{m}} & Z'_{\mathrm{m}} & Z'_{\mathrm{s}} & Z'_{1\mathrm{f}} & Z'_{2\mathrm{f}} & Z'_{1\mathrm{f}} \\ Z'_{1\mathrm{f}} & Z'_{2\mathrm{f}} & Z'_{1\mathrm{f}} & Z'_{\mathrm{sf}} & Z'_{\mathrm{mf}} & Z'_{\mathrm{mf}} \\ Z'_{1\mathrm{f}} & Z'_{1\mathrm{f}} & Z'_{2\mathrm{f}} & Z'_{\mathrm{mf}} & Z'_{\mathrm{sf}} & Z'_{\mathrm{mf}} \\ Z'_{2\mathrm{f}} & Z'_{1\mathrm{f}} & Z'_{1\mathrm{f}} & Z'_{\mathrm{mf}} & Z'_{\mathrm{mf}} & Z'_{\mathrm{sf}} \end{bmatrix}。$$

其中：Z'_{sf} 和 Z'_{mf} 为光纤铠装单位长度的自阻抗和互阻抗；$Z'_{1\mathrm{f}}$ 为光纤铠装与较近相之间单位长度的耦合阻抗；$Z'_{2\mathrm{f}}$ 为光纤铠装与较远相之间单位长度的耦合阻抗。

当光纤单元的铠装按不接地考虑时，单位长度的正序和零序阻抗可由式(10)获得。若按接地导体考虑，经推导，可得：

表 5 三芯海底电缆线路单位长度的等值序阻抗

Table 5 Equivalent sequence impedance per unit length for three-core submarine cable lines

光纤铠装的接地情况	序参数	电阻/($\Omega\cdot\mathrm{km}^{-1}$)	电抗/($\Omega\cdot\mathrm{km}^{-1}$)	电容/($\mu\mathrm{F}\cdot\mathrm{km}^{-1}$)
不考虑光纤单元	零序	0.190 5	0.131 5	0.126 9
	正序	0.060 9	0.145 7	0.126 9
按不接地考虑	零序	0.190 5	0.131 5	0.126 9
	正序	0.060 9	0.145 7	0.126 9
按接地导体考虑(2 根)	零序	0.187 8	0.131 1	0.126 9
	正序	0.061 0	0.145 4	0.126 9
按接地导体考虑(3 根)	零序	0.186 5	0.130 8	0.126 9
	正序	0.061 1	0.145 3	0.126 9

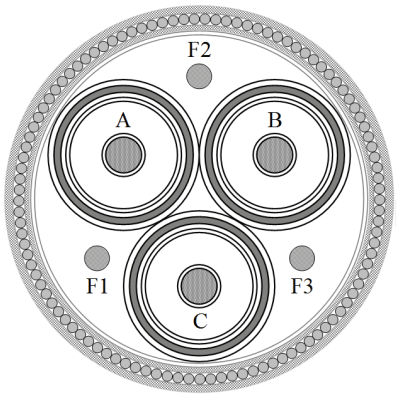


图 6 三芯海底电缆线路的排列情况

Fig.6 Arrangement of three-core submarine cable lines

$$\begin{cases} Z'_1 = Z'_{\mathrm{s}} - Z'_{\mathrm{m}} - \dfrac{\left(Z'_{1\mathrm{f}} - Z'_{2\mathrm{f}}\right)^2}{Z'_{\mathrm{sf}} - Z'_{\mathrm{mf}}} \\ Z'_0 = Z'_{\mathrm{s}} + 2Z'_{\mathrm{m}} - \dfrac{\left(2Z'_{1\mathrm{f}} + Z'_{2\mathrm{f}}\right)^2}{Z'_{\mathrm{sf}} + 2Z'_{\mathrm{mf}}} \end{cases} \tag{14}$$

研究表明，$\left|Z'_{\mathrm{mf}}\right|$、$\left|Z'_{1\mathrm{f}}\right|$ 和 $\left|Z'_{2\mathrm{f}}\right|$ 均远小于 $\left|Z'_{\mathrm{sf}}\right|$。因此，接地条件下的铠装光纤单元对三芯海底电缆线路的正序和零序阻抗的影响不大。

值得注意的是，采用 2 根光纤单元且光纤铠装接地的条件下，三芯海底电缆线路的电气参数不是完全平衡的。表 6 给出了不同情况下三芯海底电缆线路单位长度的等值相电抗矩阵。研究表明，三芯海底电缆线路采用 2 根光纤单元且光纤铠装接地的条件下，相应的零序和负序电磁不平衡度分别为 0.2%和 0.1%。由于不平衡度较低，该条件下三芯海底电缆线路也可近似视为平衡线路。

6 仿真与实测结果的比较分析

在本文的算例中，220 kV 三芯海底电缆线路的

表 6 三芯海底电缆线路单位长度的等值相电抗矩阵

Table 6 Equivalent phase reactance matrix per unit length for three-core submarine cable lines

光纤铠装的接地情况		电抗/(Ω·km^{-1})		
		A 相	B 相	C 相
无光纤单元或光纤铠装不接地	A 相	0.141 0	−0.004 7	−0.004 7
	B 相	−0.004 7	0.141 0	−0.004 7
	C 相	−0.004 7	−0.004 7	0.141 0
按接地导体考虑(2 根)	A 相	0.140 2	−0.005 0	−0.005 0
	B 相	−0.005 0	0.140 8	−0.004 4
	C 相	−0.005 0	−0.004 4	0.140 8
按接地导体考虑(3 根)	A 相	0.140 5	−0.004 8	−0.004 8
	B 相	−0.004 8	0.140 5	−0.004 8
	C 相	−0.004 8	−0.004 8	0.140 5

实测参数[30]见表 7。作为参考，还给出了 1 条长度为 32.2 km、截面为 3×400 mm^2 的 220 kV 三芯海底电缆线路的实测结果[31-32]，见表 8。

根据实测结果，2 条线路零序阻抗的阻抗角均<45°。仿真结果也是如此。由表 7 和表 8 可以看出，上述 2 个工程中，钢丝铠装的相对磁导率μ_r取 100~200 时，仿真计算与实测结果一致性较好。值得注意的是，相对磁导率μ_r取 100~200 时零序电阻的仿真结果明显大于实测值。这是因为，EMTP 程序无法模拟复杂的铠装几何结构，只能近似按管形导体来处理，并将钢丝铠装视为均匀且各向同性的导体。实际上，由于钢丝铠装的几何结构，其横向和纵向的磁导率是不同的。文献[33]通过磁路分析，在考虑钢丝之间的非磁性间隙后，经推导得到 1 个等值的横向相对磁导率$\mu_{t,eq}$的计算式，即：

$$\mu_{t,eq}=\frac{l_m\mu_s}{l_{air}\mu_s+l_s} \tag{15}$$

式中：μ_s为铁磁材料的相对磁导率；l_s为铁磁材料部分的等效长度；l_{air}为空气间隙的等效长度；l_m为圆管部分的总长度。

在本文的算例中，当μ_s取 100~400 时，由式(15)得到的等值的横向相对磁导率为 3.48~3.55。需要指出的是，文献[33]的分析忽略了铠装钢丝的绞合效应。实际上，铠装钢丝呈螺旋状，与电缆的轴向存在一定的倾角[34]。因此，EMTP 仿真中不宜直接采用式(15)。然而，直接采用铁磁材料的相对磁导率显然是偏大的。钢丝铠装按管形导体仿真时的磁导率偏大、邻近效应比实际情况要强，故而相应的电阻值是偏大的。仿真结果表明，减小磁导率(如相对磁导率μ_r取 50)后零序电阻有所下降、可能与实测值较接近，但零序和正序电抗与实测结果仍有一定的差距。虽然也可考虑对电阻率进行修正[35]，但对钢丝铠装(铁磁材料)而言，采用管形导体近似对磁导率的影响远大于电阻率。同时，考虑到(采用钢丝铠装的)三芯海底电缆线路的零序阻抗并不是一个恒定的值。在试验或实际运行中，铠装电流可能存在多种工况，相应的零序阻抗也会有所差别。至于钢丝铠装的磁导率在何种条件下、具体取多大值合适，还需要基于更多的实测数据作进一步的研究与分析。

表 7 仿真和实测结果的对比(算例 1)

Table 7 Comparison on simulation and measurement results (example 1)

项目	相对磁导率μ_r	序参数	电阻/(Ω·km^{-1})	电抗/(Ω·km^{-1})	电容/(μF·km^{-1})
仿真	50	零序	0.154 9	0.146 0	0.126 9
		正序	0.058 1	0.137 1	0.126 9
	100	零序	0.175 0	0.139 7	0.126 9
		正序	0.059 8	0.141 6	0.126 9
	120	零序	0.179 4	0.137 5	0.126 9
		正序	0.060 1	0.142 7	0.126 9
	150	零序	0.184 5	0.134 8	0.126 9
		正序	0.060 5	0.144 0	0.126 9
	200	零序	0.190 5	0.131 5	0.126 9
		正序	0.060 9	0.145 7	0.126 9
实测	—	零序	0.141 2	0.137 4	0.130 0
		正序	0.057 0	0.143 2	0.130 0

表 8 仿真和实测结果的对比(算例 2)

Table 8 Comparison on simulation and measurement results (example 2)

项目	相对磁导率μ_r	序参数	电阻/(Ω·km^{-1})	电抗/(Ω·km^{-1})	电容/(μF·km^{-1})
仿真	50	零序	0.167 0	0.154 3	0.118 2
		正序	0.066 5	0.144 6	0.118 2
	100	零序	0.188 0	0.147 9	0.118 2
		正序	0.068 1	0.149 1	0.118 2
	120	零序	0.192 6	0.145 7	0.118 2
		正序	0.068 4	0.150 2	0.118 2
	150	零序	0.197 9	0.142 9	0.118 2
		正序	0.068 7	0.151 5	0.118 2
	200	零序	0.204 2	0.139 6	0.118 2
		正序	0.069 1	0.153 2	0.118 2
实测	回路 1	零序	0.158 5	0.145 0	0.119 9
		正序	0.066 8	0.149 4	0.120 0
	回路 2	零序	0.160 8	0.146 1	0.118 8
		正序	0.068 2	0.149 0	0.118 8

7 结论

本文以 1 条截面为 3×500 mm^2 的 220 kV 海底

电缆线路为例，对三芯海底电缆线路的序参数进行了计算与分析，结果表明：

1）三芯海底电缆线路金属护套外的 PE 护套通常采用半导电材料。半导电的 PE 护套径向电阻很小，海水通过渗透作用可以接触到该 PE 护套。从工程计算的角度看，在采用半导电 PE 护套的条件下，将金属护套按接地导体处理，是一种合理的近似。

2）基于 EMTP 电缆支持程序，可以获得包含芯线、金属护套和铠装在内的阻抗矩阵。根据本文推导的公式，可以获得三芯海底电缆线路单位长度的正序和零序阻抗、金属护套和铠装电流。如果不关心金属护套或铠装的工况，仿真时可直接将金属护套和铠装按接地导体设置，从而更加便捷地获得三芯海底电缆线路的序参数。

3）钢丝铠装的磁导率对三芯海底电缆线路的阻抗参数有一定的影响。铠装的相对磁导率μ_r越大，邻近效应就越强。相应地，零序条件下流过铠装的电流就越小，流过金属护套的电流就越大。电流分配的这种差异影响了各层导体间的电磁耦合，从而导致了阻抗参数的差异。

4）不接地条件下，光纤单元的铠装对三芯海底电缆线路的序参数基本没有影响；接地条件下，光纤单元的铠装对正序和零序阻抗的影响也很小。计算三芯海底电缆线路的电气参数时，一般可不考虑光纤单元的影响。

5）三芯海底电缆线路的零序电阻远大于正序电阻，甚至可能大于零序电抗。当等值的相对磁导率μ_r在一定的范围内(如大于 100)，可能出现三芯海底电缆线路的零序电抗小于正序电抗的情况。

6）在本文的算例中，当钢丝铠装的相对磁导率μ_r取 100~200 时，仿真计算与实测结果一致性较好。至于钢丝铠装的磁导率在何种条件下、具体取多大值合适，还需要基于更多的实测数据作进一步的研究与分析。

参考文献 References

[1] 赵囿林，张建民，胡 明，等. 大长度 500 kV XLPE 超高压海底电缆关键技术研究[J]. 电线电缆，2020(2)：12-16，24.
ZHAO Youlin, ZHANG Jianmin, HU Ming, et al. Key technology research for large length 500 kV XLPE UHV submarine cable[J]. Electric Wire & Cable, 2020(2): 12-16, 24.

[2] 张 皓，李鹏飞，马国庆，等. 典型敷设环境下超高压交流 XLPE 海底电缆载流量分析[J]. 电力工程技术，2022，41(6)：154-162.
ZHANG Hao, LI Pengfei, MA Guoqing, et al. Ampacity analysis of extra-high voltage XLPE submarine cable in typical layout environments[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(6): 154-162.

[3] 刘 英，张博剑，高 鑫. 高压 XLPE 电缆线路状态评估综合体系的建立及应用[J]. 高电压技术，2022，48(11)：4437-4444.
LIU Ying, ZHANG Bojian, GAO Xin. Establishment and application of a comprehensive system for condition assessment of HV XLPE cable lines[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4437-4444.

[4] 张 伟，胡修翠，高 超，等. 长期服役 XLPE 电缆绝缘的空间电荷与热性能[J]. 高电压技术，2022，48(9)：3533-3541.
ZHANG Wei, HU Xiucui, GAO Chao, et al. Space charge and thermal characteristics of long-service crosslinked polyethylene cable insulation[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3533-3541.

[5] 侯 帅，傅明利，贾 磊，等. 220 kV XLPE 绝缘材料长期老化性能及寿命评价[J]. 高电压技术，2023，49(12)：4900-4910.
HOU Shuai, FU Mingli, JIA Lei, et al. Long-term aging performances and life evaluation of 220 kV XLPE insulation materials[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(12): 4900-4910.

[6] 吴建宁，郑运焱，吴 弘. 三芯光电复合海底电力电缆的设计与制造之一——结构设计[J]. 电线电缆，2012(3)：20-22，26.
WU Jianning, ZHENG Yunyan, WU Hong. Design and production of three core power optical cable part I: structure design[J]. Electric Wire & Cable, 2012(3): 20-22, 26.

[7] 吴建宁，郑运焱，吴 弘. 三芯光电复合海底电力电缆的设计与制造之二——工艺设计及设备[J]. 电线电缆，2012(4)：16-19.
WU Jianning, ZHENG Yunyan, WU Hong. Design and production of three core power optical cable part Ⅱ: process technology and production equipments[J]. Electric Wire & Cable, 2012(4): 16-19.

[8] 孙小臣，乔宇常，宋光辉，等. 330 kV 三芯大截面铜芯交流海底电缆的研制[J]. 光纤与电缆及其应用技术，2023(3)：4-6，46.
SUN Xiaochen, QIAO Yuchang, SONG Guanghui, et al. Development of 330 kV three-core large section copper-core AC submarine cable[J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 2023(3): 4-6, 46.

[9] 赵囿林，张建民，马志金，等. 响水近海风电三芯 220 kV 光纤复合海底电缆的设计及制造[J]. 电线电缆，2016(5)：19-21.
ZHAO Youlin, ZHANG Jianmin, MA Zhijin, et al. Design and manufacturing of 220 kV three-core submarine fiber optic composite power cable for Xiangshui offshore windfarm[J]. Electric Wire & Cable, 2016(5): 19-21.

[10] 黄小卫，李晓骏，左干清. 国内外海底电缆工程现状及展望[J]. 电线电缆，2023(1)：1-6.
HUANG Xiaowei, LI Xiaojun, ZUO Ganqing. Application status and prospect of submarine cable projects at home and abroad[J]. Electric Wire & Cable, 2023(1): 1-6.

[11] 张建民，张洪亮，谢书鸿，等. 交联聚乙烯绝缘海底电缆在中国海洋风电建设中的典型应用和发展前景[J]. 南方电网技术，2017，11(8)：25-33.
ZHANG Jianmin, ZHANG Hongliang, XIE Shuhong, et al. Typical application and development prospect of XLPE insulated submarine cable for offshore wind farm in China[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(8): 25-33.

[12] 邵森安，马 勰，丰如男，等. 海底电缆国内外研究综述[J]. 南方电网技术，2020，14(11)：81-88.
SHAO Sen'an, MA Xie, FENG Runan, et al. Review of researches on submarine cables at home and abroad[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(11): 81-88.

[13] 朱志芳. 高压交流海缆电气参数对线路对称性的影响[J]. 高电压技术，2007，33(6)：177-179.
ZHU Zhifang. Influence of electrical parameters of high voltage AC submarine cables on characteristic of symmetry of the grid-link line[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(6): 177-179.

[14] 李 岩，王毛桃，乔俊杰，等. 单芯海缆两端环流不匹配问题及评价方法研究[J]. 电网技术，2024，48(4)：1770-1778.
LI Yan, WANG Maotao, QIAO Junjie, et al. Mismatched circulation conditions and evaluation of single-core submarine cables[J]. Power System Technology, 2024, 48(4): 1770-1778.

[15] 邓 星，蒙绍新，尹项根，等. 多回并联电缆线路参数的不对称性分析[J]. 高电压技术，2010，36(12)：3119-3124.
DENG Xing, MENG Shaoxin, YIN Xianggen, et al. Analysis on asymmetry of sequence parameters for parallel multi-circuit cables[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(12): 3119-3124.

[16] 王晓彤，项祖涛，班连庚，等. 500 kV 电缆线路工频参数的计算与

分析[J]. 电网技术，2013，37(8)：2310-2315.
WANG Xiaotong, XIANG Zutao, BAN Liangeng, et al. Calculation and analysis on power-frequency parameters for 500 kV cable lines[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2310-2315.
[17] 王晓彤，项祖涛，宋新立，等. 采用垂直排列的 500 kV 双回电缆线路参数的不平衡度分析[J]. 高压电器，2017，53(2)：132-138.
WANG Xiaotong, XIANG Zutao, SONG Xinli, et al. Analysis on unbalance factor of electrical parameters for 500 kV double-circuit cable line with vertical arrangement[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(2): 132-138.
[18] 林桂辉，朱鹏宇，王 灿，等. 珠澳电网 220 kV 电缆线路不平衡度计算与分析[J]. 广东电力，2019，32(5)：141-148.
LIN Guihui, ZHU Pengyu, WANG Can, et al. Calculation and analysis of unbalance degree of 220 kV cable lines of Zhuhai-Macao power grid[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(5): 141-148.
[19] 钱 洁. 电力电缆电气参数及电气特性研究[D]. 杭州：浙江大学，2013：18-19.
QIAN Jie. Study on electrical parameter calculation method and electrical characteristics of power cables[D]. Hangzhou, China: Zhejiang University, 2013: 18-19.
[20] 郭宜果，魏 鑫，于秋雨，等. 220 kV 光纤复合三芯海底电缆线路电气参数的计算[J]. 山东电力技术，2020，47(11)：28-33.
GUO Yiguo, WEI Xin, YU Qiuyu, et al. Electrical parameters calculation of 220 kV optical fiber composited three-core submarine cable[J]. Shandong Electric Power, 2020, 47(11): 28-33.
[21] 徐 政，李斯迅，金砚秋. 海底电缆谐波频段电气参数计算[J]. 电力系统自动化，2021，45(21)：76-84.
XU Zheng, LI Sixun, JIN Yanqiu. Calculation of electrical parameters of submarine cable in harmonic frequency range[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 76-84.
[22] 吴庆华，马 凌，岳 浩，等. 500 kV 海南联网工程海底电缆线路设计[J]. 上海电气技术，2021，14(3)：5-9，43.
WU Qinghua, MA Ling, YUE Hao, et al. Design of submarine cable line of 500 kV Hainan power link project[J]. Journal of Shanghai Electric Technology, 2021, 14(3): 5-9, 43.
[23] 汪惟源，程锦闽. 海水浸入作用对交流三芯海缆工频过电压计算影响[J]. 电瓷避雷器，2021(2)：175-180.
WANG Weiyuan, CHENG Jinmin. Calculation of power frequency overvoltage of AC three-core submarine cable considering laying environment[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(2): 175-180.
[24] DOMMEL H W. 电力系统电磁暂态计算理论[M]. 李永庄，林集明，曾昭华，译. 北京：水利电力出版社，1991：110，112.
DOMMEL H W. EMTP theory book[M]. LI Yongzhuang, LIN Jiming, ZENG Zhaohua, translated. Beijing, China: Water Resources and Electric Power Press, 1991: 110, 112.
[25] NEHER J H. The phase sequence impedance of pipe-type cables[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1964, 83(8): 795-804.
[26] 马国栋. 电线电缆载流量[M]. 北京：中国电力出版社，2013：54.
MA Guodong. Current carrying capacity of electric wire and cable[M]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2013: 54.
[27] BENATO R, SESSA S D. A new multiconductor cell three-dimension matrix-based analysis applied to a three-core armoured cable[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(4): 1636-1646.
[28] BENATO R, SESSA S D, GARDAN G, et al. Experimental harmonic validation of 3D multiconductor cell analysis: measurements on the 100 km long Sicily-Malta 220 kV three-core armoured cable[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(1): 573-581.
[29] CHALEPLIDIS I, CHATZIPETROS D, CHRYSOCHOS A I, et al. Accurate calculation of induced voltages and currents in fibre optic units integrated in three-core armoured cables[C]//Proceedings of 2023 30th International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits and System (MIXDES). Kraków, Poland: IEEE, 2023: 49-54.
[30] 戴宝山，王元集. 浙能嵊泗 2#海上风电场工程 220 kV 与 35 kV 海底电缆敷设及附属设施施工工程试验报告 ZNSS-DQBG–EPC-002[R]. 济南：中国电建集团山东电力建设第一工程有限公司，2021.
DAI Baoshan, WANG Yuanji. Test report ZNSS-DQBG-EPC-002 of Zhejiang Shengsi 2# offshore wind farm project 220 kV and 35 kV submarine cable laying and ancillary facilities construction project[R]. Jinan, China: China Electric Power Construction Group Shandong Electric Power Construction First Engineering Co., Ltd., 2021.
[31] 张 源. 浙能嘉兴 1 号海上风电场工程 220 kV 海底电缆第二回路耐压试验检测报告 201223-001[R]. 长沙：长沙市和盛电力工程安装有限公司，2020.
ZHANG Yuan. Test report 201223-001 of 220 kV submarine cable second circuit withstand voltage test for Zhejiang Energy Jiaxing No. 1 offshore wind farm project[R]. Changsha, China: Changsha Hesheng Power Engineering Installation Co., Ltd., 2020.
[32] 张 源. 浙能嘉兴 1 号海上风电场工程 220 kV 海底电缆第一回路耐压试验检测报告 210223-001[R]. 长沙：长沙市和盛电力工程安装有限公司，2021.
ZHANG Yuan. Test report 210223-001 of 220 kV submarine cable first circuit withstand voltage test for Zhejiang Energy Jiaxing No. 1 offshore wind farm project[R]. Changsha, China: Changsha Hesheng Power Engineering Installation Co., Ltd., 2021.
[33] VIAFORA N, BAÙ M, DALL L, et al. Analytical expression of equivalent transverse magnetic permeability for three-core wire armoured submarine cables[C]//Proceedings of 2016 51st International Universities Power Engineering Conference (UPEC). Coimbra, Portugal: IEEE, 2016: 1-6.
[34] GUSTAVSEN B. A 2D FEM model for impedance and loss calculation of armored three-core cables with inclusion of 3D pitching effects[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(5): 3010-3020.
[35] 叶昊亮. 海上风电场经交流海缆并网的电磁暂态建模与无功优化研究[D]. 杭州：浙江大学，2022：26-27.
YE Haoliang. Electromagnetic transient model and reactive power optimization of grid-connected offshore wind farms via AC submarine cables[D]. Hangzhou, China: Zhejiang University, 2013: 26-27.



王晓彤(通信作者)
1972—，女，博士，教授级高工
研究方向为电力系统电磁暂态仿真
E-mail: wangxt@epri.sgcc.com.cn

WANG Xiaotong
Ph.D., Professor
Corresponding author



项祖涛
1976—，男，博士，教授级高工
研究方向为电力系统电磁暂态仿真
E-mail: xzt@epri.sgcc.com.cn

XIANG Zutao
Ph.D., Professor



杨大业
1984—，男，硕士，高工
主要研究方向为新能源并网仿真、输变电工程电磁暂态研究
E-mail: yangdaye@epri.sgcc.com.cn

YANG Daye
Senior engineer

收稿日期 2023-08-31 修回日期 2024-06-07 编辑 曾文君