

# 海陆缆过渡接头接地电流三相不平衡问题分析

丛 贇<sup>1</sup>, 蔡 勇<sup>2</sup>, 孙 璐<sup>1,3</sup>, 乐彦杰<sup>1,3</sup>, 高 震<sup>1,3</sup>, 刘宗喜<sup>4</sup>, 沈 琦<sup>1,3</sup>

(1. 国网浙江省电力有限公司舟山供电公司, 浙江 舟山 316021; 2. 国网浙江省电力有限公司, 杭州 310000; 3. 浙江舟山海洋输电研究院有限公司, 浙江 舟山 316021; 4. 中国电力科学研究院有限公司, 武汉 430072)

**摘要:** 针对海陆缆过渡接头处护套接地电流存在三相不平衡的问题, 以某 220 kV 海陆缆混合线路为例, 研究过渡接头处护套接地电流三相不平衡的原因。通过理论分析、仿真计算和试验验证发现回流缆的布置及接地方式是导致护套接地电流三相不平衡的主要原因。根据研究结果, 提出回流缆布置及接地方式的改造方案, 有效解决过渡接头处护套接地电流三相不平衡的问题, 保障海陆缆安全稳定运行。

**关键词:** 过渡接头; 三相不平衡; 混合线路; 接地电流; 回流缆

## Simulation Analysis and Experimental Verification of the Three-phase Unbalance of the Grounding Current of the Submarine and Land Cable Transition Joint

CONG Yun<sup>1</sup>, CAI Yong<sup>2</sup>, SUN Lu<sup>1,3</sup>, LE Yanjie<sup>1,3</sup>, GAO Zhen<sup>1,3</sup>, LIU Zongxi<sup>4</sup>, SHEN Qi<sup>1,3</sup>

(1. State Grid Zhoushan Electric Power Supply Company of Zhejiang Power Corporation, Zhejiang Zhoushan 316021, China; 2. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310000, China; 3. Zhejiang Zhoushan Marine Power Research Institute Co., Ltd., Zhejiang Zhoushan 316021, China; 4. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430072, China)

**Abstract:** In allusion to the problem of the three-phase unbalance of the grounding current in sheath of the submarine and land cable transition joint, this paper takes a 220 kV line mixed with submarine and land cables as an example and studies the main cause of the three-phase unbalance of ground current. Through theoretical analysis, simulation calculation and experimental verification, it is found that the arrangement and grounding mode of return cable are the main reasons for the three-phase unbalance of grounding current. According to the research results, the return cable arrangement and grounding mode modification scheme is put forward to effectively solve the three-phase unbalance of grounding current in sheath of the transition joint and ensure the safe and stable operation of the submarine and land cables.

**Key words:** transition joint; three-phase unbalance; mixed lines; grounding current; return cable

## 0 引言

当前, 世界各国均十分重视对海洋资源的开发利用, 中国也在国家层面制定海洋战略, 沿海岛屿开发、海洋新能源利用等得以高速发展。随之而来的是对海上电力能源供给保障提出了更高的要求。

海底电缆是长距离岛际输电的唯一手段。由于高压海缆结构复杂、运行环境特殊, 海缆中间无法进行交叉互联, 其护套及铠装一般只采用双端直接接地方式, 与陆地电缆接地方式大不相同<sup>[1-3]</sup>。近年来, 随着海岛开发、海上风电场大规模建设, 高电压、大电流、长距离海缆线路日益增多<sup>[4-6]</sup>, 海缆与架空混合线路、海缆与陆缆混合线路不断出现在实际工程中<sup>[7-8]</sup>。考虑到施工的便利性和成本的经济性, 一般海陆缆混合线路会在海缆登陆后采用过渡接头与陆缆相连。该过渡接头的接地方式需同时兼顾海缆和陆缆各自的安全稳定运行, 其重要性不言而喻。

然而, 在已运行的海陆缆混合线路过渡接头处出现了接地电流三相不平衡的问题, 在线路重

载下, 某相接地电流过大会引起接地导线及接地部件过热而烧蚀。因此, 研究过渡接头的接地方式, 分析接地电流三相不平衡的原因, 有助于保障海陆缆混合线路安全稳定运行。文中以某 220 kV 海陆缆混合线路为例, 通过理论分析、仿真计算和试验验证研究过渡接头处护套接地电流三相不平衡的原因, 并提出过渡接头处接地方式改造方案。

## 1 线路情况及问题分析

### 1.1 线路情况

某 220 kV 混合线路有两回路, 由架空、海缆、陆缆组成, 其中电缆线路长约 23.6 km, 包括陆缆 3.8 km、海缆 19.8 km。

海缆段两端直接接地, 两回路分别按 A、B、C 和 A、C、B 相位布置。

陆缆段为分段接地系统, 共 7 组接头, 接地方式依次为: 6 号直接(海陆缆接头)—5-1 号保护、5-2 号直接—4-1 号保护、4-2 号保护—3 号直接—2-1 号保护、2-2 号保护—1 号直接—0 号保护, 其中 6 号直接、5-2 号直接、3 号直接、1 号直接

4 处均从接头同轴缆处另引出一路直接接地，接地箱位于电缆沟中。整个陆缆通过截面 400 mm<sup>2</sup> 回流缆分段连接，每一段大约 600 m。

海、陆缆(部分)段接地系统示意图见图 1。

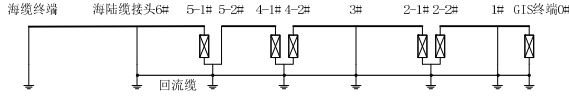


图 1 海、陆缆(部分)段接地系统示意图

Fig. 1 The schematic diagram of grounding system of submarine and land cable (part)

实际运行中测试海缆与陆缆连接处和海缆与架空线连接处的海缆护套接地电流，见表 1。发现海陆缆中间接头的接地电流存在三相不平衡情况，第一回路单相接地电流最大值和最小值之比为 3.53，第二回路单相接地电流最大值和最小值之比为 2.38，根据《高压电缆状态检测技术规范》，单相接地电流最大值与最小值之比大于 3，属于严重缺陷。因此，海陆缆过渡接头处接地电流三相不平衡将为线路安全运行埋下隐患。

表 1 海缆护套接地电流测试情况表

Table 1 The test table of ground current of submarine cable armor and sheath

线路	护套接地电流/A		线芯电流/A
	海缆与架空线连接处	海缆与陆缆连接处	
第一回路	A 相	87.10	137.1
	B 相	75.50	75.1
	C 相	73.50	38.8
	接地总线	13.00	106.7
	回流线	—	124.8
第二回路	A 相	59.40	61.9
	B 相	53.70	100.6
	C 相	65.60	147.4
	接地总线	0.83	116.4
	回流线	—	130.0

## 1.2 问题初步分析

根据图 1 和表 1 数据，两回线路均是海缆与陆缆连接处护套接地电流不平衡，而海缆与架空线路连接处护套接地电流基本平衡，因此排除由于线路不对称及两个回路相互影响的原因。海缆与陆缆连接处采用的是海陆过渡接头的接线方式，5 号和 6 号之间的陆缆采用单端保护接地的方式，接地电流和护套电压均处于正常状态，因此可以排除陆缆影响。

铅护套在三相汇流时与 5、6 号之间的回流缆相连接后共同入地，测试该回流缆环流约 130 A，怀疑铅护套接地电流不平衡为回流缆引起。回流缆电气连接及现场照片见图 2。

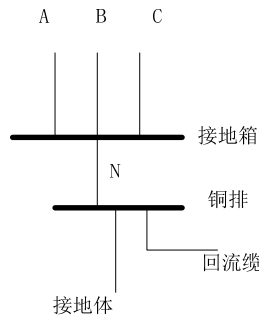


图 2 回流缆电气连接及现场照片

Fig. 2 The electrical connection and on-site photo of return cable

## 2 双回路电缆护套电流分析与仿真

### 2.1 理论分析

由于海缆无法像陆缆一样做到交叉互连接地，因此单芯高压交流海缆双端直接接地后，铅护套会因导体电流感应出较大的接地环流，其幅值甚至接近导体电流。

当一回高压单芯海缆水平敷设时，其护套接地电流为<sup>[9-11]</sup>:

$$\dot{i}_{sA} = -\frac{(1-\sqrt{3}N) + j(M + \sqrt{3})}{2(M + j)(N + j)} \dot{i}_B \quad (1)$$

$$\dot{i}_{sB} = -\frac{j}{N + j} \dot{i}_B \quad (2)$$

$$\dot{i}_{sA} = -\frac{(1-\sqrt{3}N) + j(M - \sqrt{3})}{2(M + j)(N + j)} \dot{i}_B \quad (3)$$

$$M = \frac{R_s}{X + a} \quad (4)$$

$$N = \frac{R_s}{X - a/3} \quad (5)$$

$$X = 2\omega \ln S / r_s \times 10^{-9} (\Omega / cm) \quad (6)$$

$$a = 2\omega \ln 2 \times 10^{-9} (\Omega / cm) \quad (7)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (8)$$

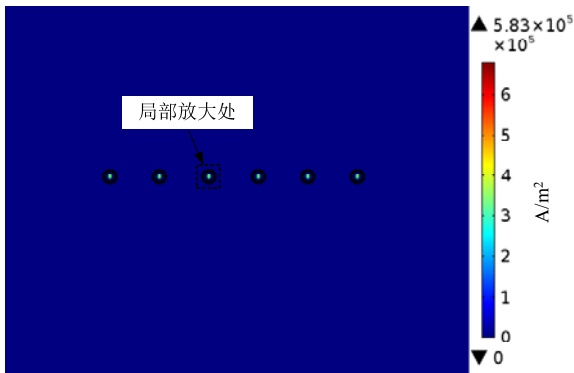
式(1)-(8)中， $\dot{i}_{sA}$ 、 $\dot{i}_{sB}$ 、 $\dot{i}_{sC}$  分别为 A、B、C

三相短路电流，A； $\dot{i}_B$  为中间相导体电流，A；S

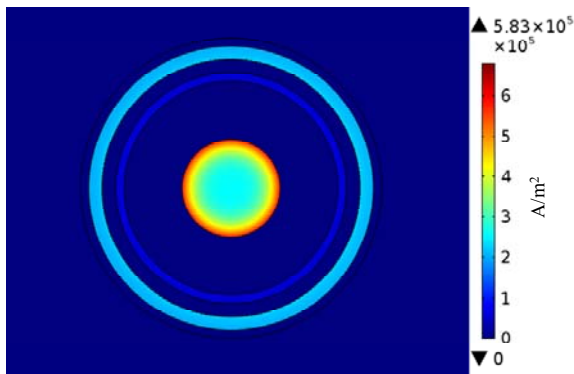
为电缆相间距, cm;  $r_s$  为护套平均半径, cm;  $R_s$  为护套电阻,  $\Omega/\text{cm}$ ;  $f$  为电源频率, Hz。

### 2.2 仿真计算

利用有限元仿真软件 Comsol 计算双回路电缆护套环流, 各相间距取 0.5 m, 线芯电流取 550 A, 双回路分别按 A、B、C 和 A、C、B 相位布置, 各相电缆电流密度分布见图 3。对护套电流密度进行面积分, 得到各相电缆的护套环流, 见表 2。



(a) 整体



(b) 局部放大(第 1 回路 C 相)

图 3 双回路各相电缆电流密度分布

Fig. 3 Current density distribution of each phase cable in double circuit

表 2 双回路各相电缆护套环流

Table 2 Sheath circulation of each phase cable in double circuit

线路	依次从左到右	护套环流/A
第一回路	A 相	78.8
	B 相	79.1
	C 相	79.1
第二回路	A 相	77.2
	C 相	77.2
	B 相	76.9

仿真计算结果表明, 三相电流基本平衡, 可以证明相位布置不是引起三相不平衡电流的原因。与实测结果相比, 实测值的三相不平衡程度

高于仿真值, 这是因为仿真模型中假定各相电缆之间的间距处处相等且各相长度一致, 同时未考虑实际电缆线路中回流缆布置、接地点接地电阻等影响因素。

## 3 回流缆影响分析与仿真

### 3.1 理论分析

海陆缆过渡接头处接地电气回路示意图见图 4。

4。

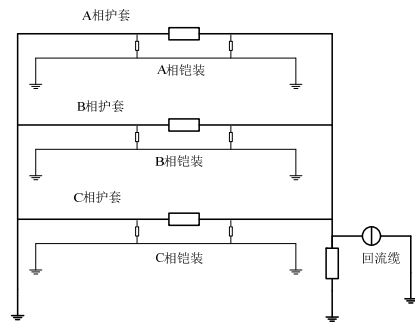


图 4 海陆缆过渡接头处接地电气回路示意图

Fig. 4 The schematic diagram of the grounding electrical circuit at the sea-to-land cable submarine and land transition joint

由于回流缆与三相金属护套电气上相互连接, 因此回流缆的不平衡电流会有部分涌入各相金属护套并进行二次分配, 所以海陆缆接头处每相护套环流是感应电流与回流缆分配过来的不平衡电流的相量和, 导致三相电流不平衡。

由于海缆金属护套与铠装之间有半导体层, 可以认为铅护套与铠装之间通过一段阻抗导通, 因此不平衡电流经过 19.8 km 的半导体层泄入铠装和大海, 因此在海缆与架空连接处护套环流平衡。

经过分析计算, 两回海缆在海陆缆接头处护套接地电流相量图见图 5、6。图 5、6 中红色实线相量为原始三相电流, 考虑到缺陷状况下的三相不平衡电流幅值, 可以在原有三相平衡接地电流基础上叠加一个方向一致、幅值不同的不平衡分量, 合成后的蓝色虚线不平衡三相接地电流即为实际缺陷电流。

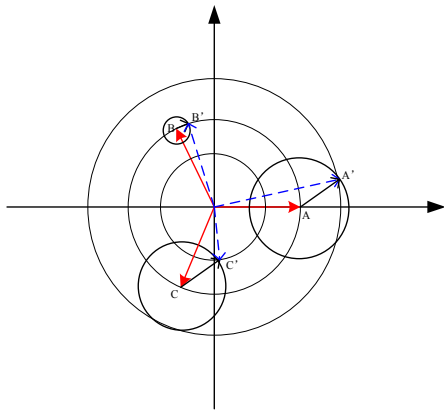


图 5 第一回路接地电流向量图  
Fig. 5 First circuit grounding current vector diagram

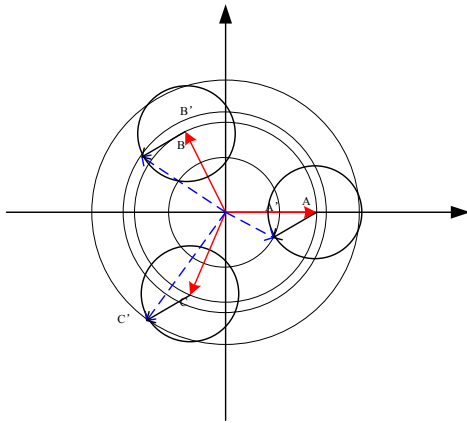


图 6 第二回路接地电流向量图  
Fig. 6 Second circuit grounding current vector diagram

### 3.2 仿真计算

为验证该回流缆电流对海陆缆连接处护套接地电流的影响，首先建立回流缆模型，仿真计算回流缆上的电流，以验证该部分模型的正确性 [12-15]。陆缆与回流缆模型见图 7，设定传输功率 200 MW，模拟线路长度 1 km，回流缆与单芯电缆各相的距离分别为 0.15、0.6、1 m，计算该回流缆电流 122 A，见图 8，该电流是由该回电电缆芯电流引起。

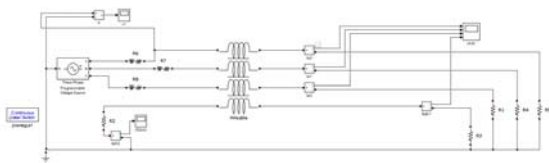


图 7 陆缆与回流缆电路计算模型

Fig. 7 The calculation model of land cable and return cable circuits

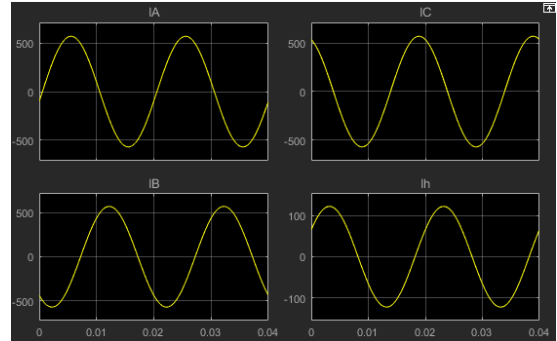


图 8 线芯电流与回流缆电流

Fig. 8 Core current and return cable current

建立海缆和陆缆及回流缆仿真计算模型，见图 9，海缆间距设定 50 m。海陆缆连接处和海缆与架空连接处铅护套接地电流计算结果见图 10。海陆缆连接处海缆铠装接地电流和回流缆接地电流计算结果见图 11。

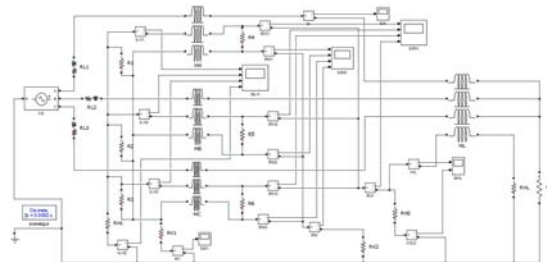


图 9 海缆和陆缆及回流缆计算模型

Fig. 9 The calculation model of submarine cable, land cable and return cable

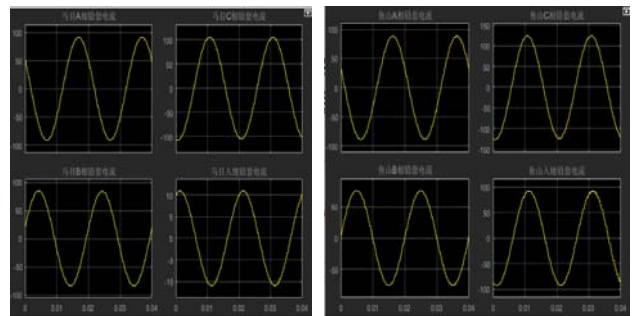


图 10 海陆缆连接处和海缆与架空连接处铅护套接地电流

Fig. 10 The grounding current of lead sheath at the connection of submarine and land cables and the connection of submarine cables and overhead lines

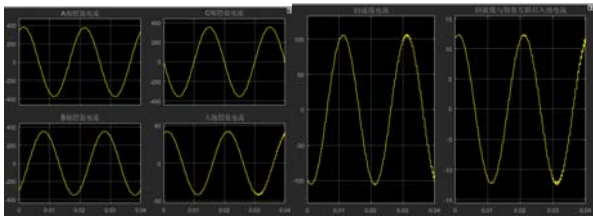


图 11 海陆缆连接处铠装接地电流和回流缆接地电流

**Fig. 11 The armored grounding current at submarine and land cable connection and return cable grounding current**

将海陆缆连接处和海缆与架空连接处铅护套接地电流测试值与仿真结果对比，见表 3。

表 3 海陆缆连接处和海缆与架空连接处铅护套接地电流测试与仿真对比表

**Table 3 Table of test and simulation comparison of grounding current of sheath at submarine and land cable connection and submarine and overhead line connection**

线路	金属护套接地电流(海陆缆连接处/海缆与架空连接处)/A		
		实测	仿真
	第一回路	A 相	87.1/137.1
	B 相	75.5/75.1	85/76
	C 相	73.5/38.8	105/124
	接地总线	13.0/106.7	11/93
	回流线	124.8	105

从表 3 可知，海陆缆系统接地环流的仿真计算结果显示海缆两端接地电流不一致，海缆与架空连接处三相基本平衡，海缆与陆缆连接处三相不平衡。仿真计算结果与实测值存在一定差异，主要是由模型中电缆线路的负荷电流与实测值不同，以及未考虑各相海缆之间的相互影响，同时线路各处接地电阻和海缆外护套电阻值等参数有一定误差。

#### 4 试验验证

为验证该线路工程中回流缆是引起过渡接头接地电流三相不平衡的主因，在实际运行线路中进行了解回流缆测试。具体操作过程如下：在 220 kV 线路第一回路海陆缆连接处 6 号接地箱下方电缆沟内解开该段回流缆接地螺栓，使回流缆该端悬空，再次测试三相护套接地电流，并与之前数据比较，结果见表 4。

表 4 解回流缆测试护套三相接地电流

**Table 4 The three-phase grounding current of the sheath tested when the return cable is cut off**

A

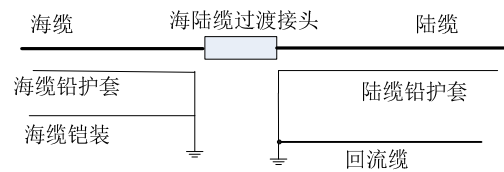
线路	解回流缆前	解回流缆后	恢复后	
第一回路	A	124.2	79.9	125.0
	B	70.7	68.7	70.0
	C	34.5	62.2	34.1
	接地总线	97.1	3.6	99.5
	回流缆	123.0	—	122.0

试验结果表明，解开第一回路 6 号下方回流缆接地后，该线路 6 号三相护套接地电流基本平衡。至此可以明确，回流缆的布置及接地方式是导致 6 号接地箱护套接地电流三相不平衡的主要原因。

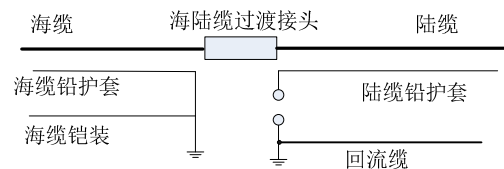
#### 5 改造方案

鉴于海陆缆连接处护套接地电流存在三相不平衡的问题，为使线路能够安全运行，对回流缆的布置和接地方式进行改造<sup>[16-20]</sup>。

1)海陆缆护套接地分开独立，见图 12，图 12(a)表示回流缆与陆缆铅护套互联接地，与海缆侧接地独立；图 12(b)表示回流缆单独接地，与海缆侧接地独立。推荐使用图 12(b)方案。



(a) 回流缆与陆缆铅护套互联接地



(b) 回流缆单独接地

图 12 海陆缆护套接地分开独立

**Fig. 12 The sheath grounding of submarine and land cable is separate and independent**

2)每一段回流缆按照“3-7”原则布置<sup>[20]</sup>，消除回流缆感应电流，见图 13。

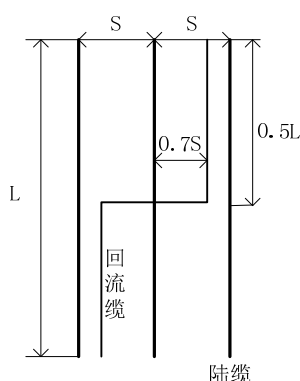


图 13 回流缆“3-7”布置

Fig. 13 Return cable 3-7 arrangement

## 6 结论

文中针对某 220 kV 混合线路海陆缆接头处护套接地电流三相不平衡问题，通过理论分析、仿真计算和试验验证研究过渡接头处护套接地电流三相不平衡的原因，并提出过渡接头处接地方式改造方案，为混合线路的运行维护工作提供一些参考。

1) 回流缆的布置及接地方式是导致过渡接头接地电流三相不平衡的主要原因，海陆缆过渡接头处的护套环流是护套感应电流与回流缆馈入电流的相量和，导致海陆缆过渡接头处护套的三相电流不平衡，并通过试验验证，解开回流缆后，过渡接头接地电流基本平衡。

2) 针对海陆缆连接处金属护套接地电流存在的三相不平衡问题，对回流缆的布置和接地方式进行改造，采用“回流缆与电缆金属护套分开接地”和回流缆“3-7”布置，以使海陆缆混合输电线路安全运行。

### 参考文献:

[1] 刘英, 肖阳, 苏宇, 等. 单芯交流海缆不同接地方式下的损耗计算及对载流量的影响研究[J]. 高压电器, 2018, 54(10): 56-62.  
LIU Ying, XIAO Yang, SU Yu, et al. Loss calculation and influence on capacity of single-core AC submarine cable under different grounding modes[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(10): 56-62.

[2] 张畅生, 刘龙春, 陈隽. 10 kV 海底电缆接地方式对载流量和环流的影响[J]. 广东电力, 2017, 30(8): 122-127.  
ZHANG Changsheng, LIU Longchun, CHEN Juan.

Influence of grounding mode of 110 kV submarine cable on carrying capacity and circulation[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(8): 122-127.

[3] 李新振. 高压单芯电缆金属护套接地方式探讨[J]. 电力安全技术, 2015, 17(10): 62-65.  
LI Xinzhen. Discussion on grounding method of metal sheath of high voltage single core cable[J]. Electric Safety Technology, 2015, 17(10): 62-65.

[4] 钟力生, 任海洋, 曹亮, 等. 挤包绝缘高压直流电缆的发展[J]. 高电压技术, 2017, 43(11): 3473-3489.  
ZHONG Lisheng, REN Haiyang, CAO Liang, et al. Development of high voltage direct current extruded cables[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11): 3473-3489.

[5] 王裕霜. 国内外海底电缆输电工程综述[J]. 南方电网技术, 2012, 6(2): 26-30.  
WANG Yushuang. Review on submarine cable projects for power transmission worldwide[J]. Southern Power System Technology, 2012, 6(2): 26-30.

[6] 周远翔, 赵健康, 刘睿, 等. 高压/超高压电力电缆关键技术分析及展望[J]. 高电压技术, 2014, 40(9): 2593-2612.  
ZHOU Yuanxiang, ZHAO Jiankang, LIU Rui, et al. Key technical analysis and prospect of high voltage and extra-high voltage power cable[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(9): 2593-2612.

[7] 张怿宁, 方苏, 国建宝. 架空-海缆混合高压输电线路自适应重合闸方案的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 115-121.  
ZHANG Yining, FANG Su, GUO Jianbao. Research on adaptive reclosing scheme for overhead-submarine hybrid high-voltage transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 115-121.

[8] 黄荣辉, 李勋, 张宏钊, 等. 线缆混合输电线路故障组合行波测距方法及影响因素研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 73-81.  
HUANG Ronghui, LI Xun, ZHANG Hongzhao, et al. Research on combined traveling wave fault location method of overhead line-cable hybrid line and influencing factors[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 73-81.

[9] 黄宏新, 何建, 罗进圣, 等. 高压 XLPE 电缆金属护套环流的计算分析[J]. 浙江电力, 2008, 27(3): 60-62.

- HUANG Hongxin, HE Jian, LUO Jinsheng, et al. Calculation and analysis of circulating current in metallic sheath for high-voltage XLPE cables[J]. Zhejiang Electric Power, 2008, 27(3): 60-62.
- [10]王波, 罗进圣, 黄宏新, 等. 220 kV 高压单芯电力电缆金属护套环流分析[J]. 高压电器, 2009, 45(5): 141-145.
- WANG Bo, LUO Jinsheng, HUANG Hongxin, et al. Analysis of circulating current in sheaths of 220 kV XLPE single-core cables[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5): 141-145.
- [11]徐欣, 陈彦. 单芯高压电力电缆金属护套感应电流的研究之一——感应电流的计算和预控[J]. 电线电缆, 2010(5): 42-46.
- XU Xin, CHEN Yan. Investigation of the induced current in the metallic sheath of single core HV power cables, part 1[J]. Electric Wire & Cable, 2010(5): 42-46.
- [12]张重远, 芮皓然, 刘贺晨, 等. 高压单芯电缆单相接地故障护套过电压特性仿真分析[J]. 电测与仪表, 2018, 55(11): 115-119.
- ZHANG Chongyuan, RUI Haoran, LIU Hechen, et al. Simulation analysis of sheath overvoltage characteristic for single-phase ground fault in high voltage single-core cable[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(11): 115-119.
- [13]POPOV M, GRCEV L, VAN DER SLUIS L, et al. An ATP-EMTP-based model for analysis of shielding properties of ferromagnetic cable sheaths[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(3): 2241-2247.
- [14]LIU Zhongjie, GUAN Genzhi, SHI Chunlei. Theoretical analysis and simulation of a novel method on insulation on-line monitoring of cross-linked XLPE electrical cable at 220 kV[C]//2007 IEEE International Conference on Automation and Logistics. [S.l.]: IEEE, 2007: 77-81.
- [15]HE G H, ZHANG Z P, XIE M S, et al. Optimization the arrangement of power cable lines in tunnel[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014(678): 513-517.
- [16]张军强, 董卓元, 盛飞, 等. 长距离 330 kV 电缆护套交叉互联接地方式研究及回流缆优化布置方法[J]. 高压电器, 2020, 56(2): 189-196.
- ZHANG Junqiang, DONG Zhuoyuan, SHENG Fei, et al. Research on cross-connection grounding modes of long-distance 330 kV cable sheath and layout optimization of return cable[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(2): 189-196.
- [17]邱昊, 郑志源. 高压单芯电缆交叉互联接地方式优化研究[J]. 电线电缆, 2014(3): 33-37.
- QIU Hao, ZHENG Zhiyuan. Optimization research on cross-bonding connection of AC single-core cable[J]. Electric Wire & Cable, 2014(3): 33-37.
- [18]邱昊, 郑志源, 王婧倩. 交流单芯海底电缆金属护层接地方式研究[J]. 南方电网技术, 2014, 8(6): 62-67.
- QIU Hao, ZHENG Zhiyuan, WANG Jingqian. Research on sheath grounding method of AC single core submarine cable[J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(6): 62-67.
- [19]郑大白, 龙治华, 王凤凯. 大长度高压电力电缆在海底电缆登陆段的设计与应用[J]. 电线电缆, 2021(1): 10-13.
- ZHENG Dabai. Design and application of large length high voltage power cable in landing section of submarine cable[J]. Electric Wire & Cable, 2021(1): 10-13.
- [20]查传忠, 嵇华明, 查剑. 高压电缆线路工程回流线设置[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2016(4): 36-38.
- ZHA Chuanzhong, JI Huaming, ZHA Jian. Set-up of the return wire in high-voltage cable line project[J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 2016(4): 36-38.

丛赞(1987—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为电力工程技术管理、电气工程及其自动化(E-mail: 365963732@qq.com)。