

海底电力电缆金属护层及铠装返流效果研究及应用

龚有军, 黎景辉, 许少淦, 赵世雄

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: 通过建立海底电缆芯线、护层及铠装的电流分布方程, 分析了正常运行情况下, 接地方式、接地电阻、铠装材质对护层、铠装的返流效果的影响。计算结果表明, 海底电力电缆的返流性能与其两端的接地状态密切相关。在平行距离较近、长度较长的情况下, 海底电力电缆对临近信号电缆的磁感应影响不可忽略。

关键词: 海底电力电缆; 金属护层; 铠装; 磁感应; 返流效果

中图分类号: TM247

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)S1-0066-05

Research and Application on the Reflux Characteristic of Submarine Power Cable's Sheath and Armour

GONG Youjun, LI Jinghui, XU Shaogan, ZHAO Shixiong

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: By solving the current distribution equation of submarine cable's core wire, sheath and armor, the influence of grounding style, grounding resistance and armored material to the reflux characteristic of sheath and amour were analyzed in normal operation. The calculation results show that the reflux characteristic of sheath and amour is closely related to the ground state of submarine power cables. When the parallel distance is short and the parallel length is long, a submarine power cable on the magnetic induction effect of adjacent signal cable should not be ignored.

Key words: submarine power cable; sheath, amour; magnetic induction; reflux effect

随着经济社会的持续发展, 人类开发、利用海洋的程度不断加深^[1], 海底“走廊”资源变得越来越拥挤, 高压海底电力电缆(以下简称“海底电缆”)与信号电缆、通信光缆(内含用于远供电的金属线或起机械加强作用的钢丝铠装)、输油输气管道等相关金属缆线(管道)平行接近的可能性大大增加。

由于电磁耦合的存在, 海底电缆上的交变电流将在与之临近的其它金属缆线(管道)上产生纵向感应电动势及对地电位^[1]。在海底“走廊”资源较为充裕时, 由于距离较大, 海底电缆对信号电缆、通信光缆等金属缆线(管道)的干扰影响及危险影可不予考虑。但是, 随着海洋开发程度的加深, 两者之间的距离不可避免地拉近, 磁感应耦合也随之加大。

该数值增大到一定程度, 将对金属缆线(管道)造成不利影响, 例如: 击穿信号电缆、管道的绝缘层、破坏海底光缆的内护层及外护层等。为了避免上述情况, 相关设计规范各自对允许的感应值给出了详细的规定^[1-6]。

不同于架空输电线路, 海底电缆芯线电流对外界的磁感应值可通过屏蔽层及铠装层中与芯线电流反向的电流得到一定程度的抵消。因此, 准确计算海底电缆电流在芯线、屏蔽层、铠装层上的分布是准确计算海底电缆与其它金属缆线(管道)间电磁耦合的前提。

1 计算方法

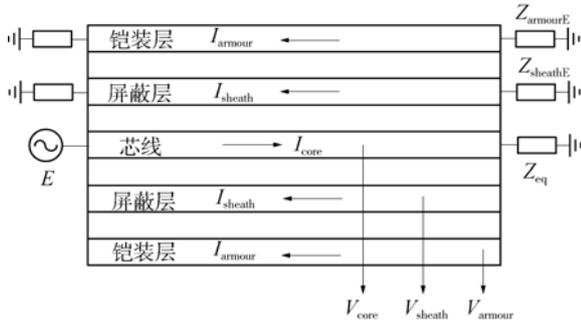
1.1 分析模型

海底电缆的导电层可以分为三种, 分别是: 用于输送电流的芯线, 一般是铜导体; 用于阻水的屏蔽层, 由铅或铜构成; 用于提供机械保护及张力稳定性的铠装层, 一般是铜及铜合金、钢丝。电压、

收稿日期: 2015-07-01

作者简介: 龚有军(1984), 男, 湖南湘乡人, 工程师, 硕士, 主要从事输电线路设计工作(e-mail) gongyoujun@gedi.com.cn。

电流在海底电缆三个导电层上的分布示意图 1。



注: V_{core} 、 V_{sheath} 、 V_{armour} 分别为芯线、金属护层、铠装上的对地电压, kV; I_{core} 、 I_{sheath} 、 I_{armour} 分别为芯线、金属护层与铠装上的电流, A; $Z_{armourS}$ 、 $Z_{sheathS}$ 、 $Z_{armourE}$ 、 $Z_{sheathE}$ 、分别为铠装首端、金属护层首端、铠装末端、金属护层末端的接地阻抗, Ω ; E 为首端等值电源, kV; Z_{eq} 为电缆末端负荷等值阻抗, Ω 。

图 1 海底电缆的电压电流分布

Fig. 1 “U—I” Distribution of Submarine Cable

1.2 电压电流分布方程

将海底电缆的芯线、金属护层及铠装层看成相互平行的导体系统, 根据电路理论, 平行多导体系统上的电压与电流分布可用如下微分方程组描述^[7]。

$$-\begin{bmatrix} dV_{core}/dx \\ dV_{sheath}/dx \\ dV_{armour}/dx \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{cc} & Z_{cs} & Z_{cr} \\ Z_{sc} & Z_{ss} & Z_{sr} \\ Z_{rc} & Z_{rs} & Z_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{core} \\ I_{sheath} \\ I_{armour} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$-\begin{bmatrix} dI_{core}/dx \\ dI_{sheath}/dx \\ dI_{armour}/dx \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{cc} & Y_{cs} & Y_{cr} \\ Y_{sc} & Y_{ss} & Y_{sr} \\ Y_{rc} & Y_{rs} & Y_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{core} \\ U_{sheath} \\ U_{armour} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: Z_{cc} 、 Z_{ss} 、 Z_{rr} ——“芯线、金属护层、铠装—大地”回路的阻抗, Ω/km ; Z_{cs} 、 Z_{sc} ——“芯线—大地”回路与“金属护层—大地”回路之间的互阻抗, Ω/km ; Z_{cr} 、 Z_{rc} ——“芯线—大地”回路与“铠装—大地”回路之间的互阻抗, Ω/km ; Z_{sr} 、 Z_{rs} ——“金属护层—大地”回路与“铠装—大地”回路之间的互阻抗, Ω/km 。 Y_{cc} 、 Y_{ss} 、 Y_{rr} ——“芯线、金属护层、铠装—大地”回路的导纳, S/km ; Y_{cs} 、 Y_{sc} ——“芯线—大地”回路与“金属护层—大地”回路之间的互导纳, S/km ; Y_{cr} 、 Y_{rc} ——“芯线—大地”回路与“铠装—大地”回路之间的互导纳, S/km ; Y_{sr} 、 Y_{rs} ——“金属护层—大地”回路与“铠装—大地”回路之间的互导纳, S/km 。

上述方程中的阻抗与导纳计算公式复杂, 在相关参考文献中有详细的阐述^[8], 此处不再赘述。

对于上述二元一次微分方程组, 一般可结合边界条件, 通过相模变换的方法求解。

1.3 边界条件

为了保障电缆运行维护人员的人身安全及电缆本身安全运行, 电力电缆的金属层必须直接接地, 根据线路长度及运行环境的差异, 具体接地方式有单点接地、两端接地、交叉互联接地^[11]。因海底电缆运行环境的特殊性, 一般在两端通过接地箱接地或是在海中通过软接头接地, 不采取交叉互联技术措施^[12]。因此, 海底电缆的边界条件如下:

- 1) 在海底电缆金属护层、铠装两端接地处, 护套、铠装的电压和电流服从欧姆定律, 理想接地则按接地电阻为零考虑。
- 2) 软接头视作理想接地。
- 3) 芯线首端的电压已知。
- 4) 芯线末端负荷采用阻抗模型, 电压电流符合欧姆定律。

2 海底电缆敷设环境及参数

2.1 敷设环境

海底电缆的敷设环境示意图 1。

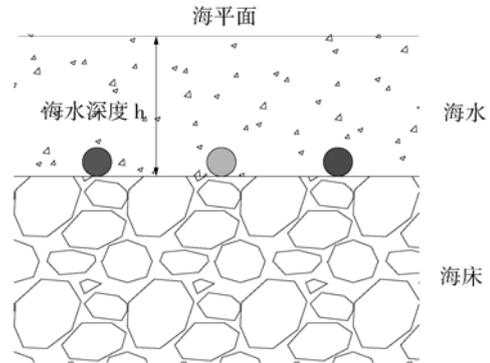


图 2 海底电缆敷设环境示意图

Fig. 2 Schematic Laying Environment of Submarine Cable

其中, 海底电缆的敷设深度即海水深度 h , 一般从 10 ~ 200 m 不等。海水的电阻率根据相关资料取为 $0.25 \Omega \cdot \text{m}$ 。

2.2 结构及参数

以国内某 500 kV 海底交流输电电缆为例, 电缆的结构见图 2, 参数见表 1。海缆平均埋深 60 m, 三相水平排列, 相间距离约 100 m, 正常输送电流 815 A。始端芯线峰值对地电压 428.66 kV (线电压有效值为 525 kV), 末端负荷采用阻抗模型, $373 + j182.4 \Omega$ 。

表1 海底电缆参数表

Table 1 Parameters of Submarine Power Cable

序号	项目	电阻系数 (20℃, Ω·mm ² /km)
1	油道	-
2	导体, 铜	17.241
3	导体屏蔽层, 碳黑纸	-
4	绝缘层, 浸渍纸带	-
5	绝缘屏蔽层, 黑炭纸+敷金属纸	-
6	铜导电胶带	-
7	铝合金套	214
8	铜导电胶带	-
9	加强层, 青铜带	21.55
10	衬层	-
11	防腐层, 聚乙烯护套	-
12	防蛀层, 铜带	17.241
13	衬层	-
14	铠装, 扁铜线	17.241
15	外护层, 聚丙烯纱和沥青	-

注：“-”表示数据不详。

3 海底电缆电流分布计算及分析

3.1 典型情况分析

采用第2节的海底电缆参数, 芯线、铠装端子箱处均理想接地(正常运行情况下, 三相并联星型接地处的电压电流基本互相抵消, 电位等于地电位)。计算得到海底电缆不同位置处芯线、金属护层与铠装的电流见图3。从计算结果可知, 虽然海缆不同位置处芯线、金属护层及铠装上的电流大小各不相同, 但是上述电流的矢量和(以下简称“等效

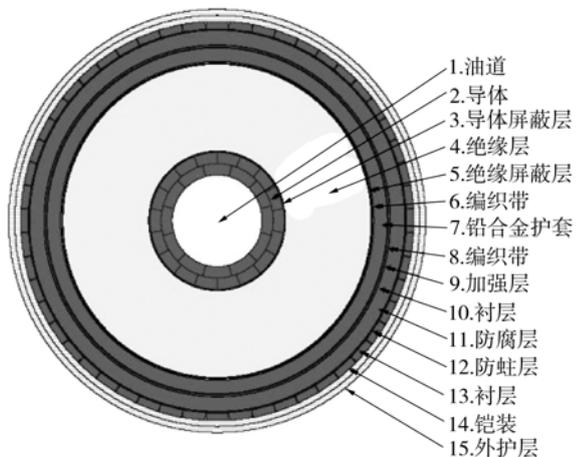


图3 海底电力电缆结构

Fig. 3 Configuration of Submarine Power Cable

电流”)基本均为 $10.6 - j22.0$ A, 有效值 24.4 A, 占芯线电流的比例为 3.23% ~ 3.73%。以海缆首端为例, 芯线、金属护层及铠装上的电流分别为 $656.04 + j379.77$ A、 $-147.36 - j419.48$ A、 $-498.09 + j17.679$ A, 即海缆芯线上的电流绝大部分通过金属护层及铠装返回, 只有很小部分通过海水返回。

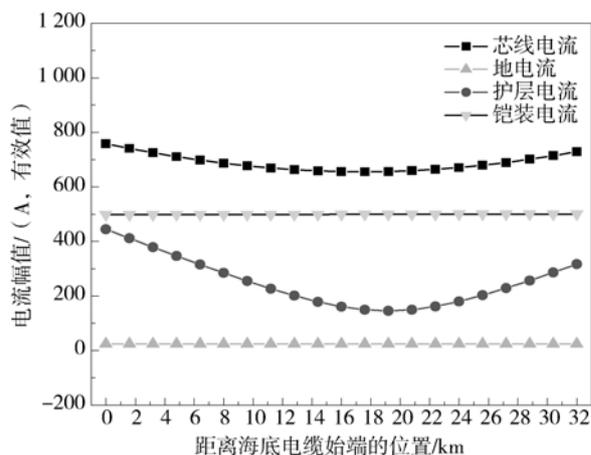


图4 海底电力电缆电流幅值分布
(护层及铠装理想接地)

Fig. 4 Current Distribution of Submarine Power Cable
(Sheath and Armor Ideal Grounding)

3.2 铠装材质的影响

海底电力电缆的铠装材质大致有扁铜线及钢丝两种, 其相关电气参数如表2所示。为方便计算, 将镀锌钢丝的相对磁导率设置为 $5000^{[10]}$ 。

表2 不同铠装材料的性能参数

Table 2 Parameters of Different Armour Materials

铠装材料	电阻率/ $\Omega \cdot m$, 20℃	相对磁导率
镀锌钢丝	1.38×10^{-7}	5000
黄铜丝	1.78×10^{-8}	1

以图2及表1所示海底电力电缆参数为基础, 将铠装材质由扁铜线改为镀锌钢丝, 其余不变, 计算得到海缆不同位置处的电流分布见图4。根据计算结果, 铠装采用镀锌钢丝后, 由于阻抗加大, 导致从铠装层返回的电流有所减小。但是, 从金属护层返回的电流增加更多。综合下来, “等效电流”的大小反而有所降低, 仅约为 1.65 A, 占芯线电流的比例为 2.17% ~ 2.57%。

根据参考文献[10], 1.2节中相关阻抗参数的组成部分见下式。

$$\begin{cases} Z_{cc} = Z_{11} + 2Z_{12} + Z_{22} + 2Z_{23} + Z_{33} \\ Z_{cs} = Z_{sc} = Z_{12} + Z_{22} + 2Z_{23} + Z_{33} \\ Z_{sa} = Z_{as} = Z_{23} + Z_{33} \\ Z_{ss} = Z_{22} + 2Z_{23} + Z_{33} \\ Z_{aa} = Z_{33} \end{cases} \quad (3)$$

式中: Z_{11} 、 Z_{22} 、 Z_{33} 为“芯线—金属护层”、“金属护层—铠装”、“铠装—大地”回路的自阻抗, Ω/km ; Z_{12} 为“芯线—金属护层”回路与“金属护层—铠装”回路的互阻抗, Ω/km ; Z_{23} 为“金属护层—铠装”回路与“铠装—大地”回路的互阻抗, Ω/km 。

铠装层的磁导率大大增强, 导致“铠装—大地”回路的自阻抗的大大增加。根据上式, 这将导致“金属护层—大地”回路、“铠装—大地”回路与“芯线—大地”回路的互阻抗增加, 即大幅增大了前两个回路与“芯线—大地”回路的电气耦合程度。因此, 虽然采用镀锌钢丝后铠装的通流性能变差, 但是由于电气耦合程度增强给电缆返流效果带来的有利影响超过了由于铠装通流性能变差给电缆返流效果带来的不利影响, 电缆的整体返流效果反而更好。

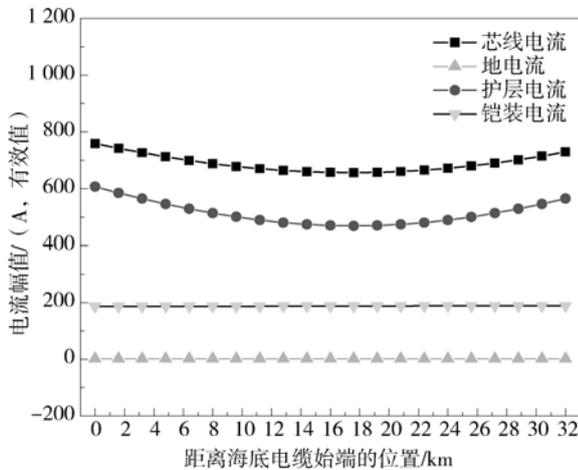


图5 海底电力电缆电流幅值分布 (护层及铠装理想接地, 钢丝铠装)

Fig. 5 Current Distribution of Submarine Power Cable (Sheath and Armor Ideal Grounding, Steel Wire Armoured)

3.3 接地方式的影响

海底电力电缆登陆段铠装及金属护层的接地方式分为两种: 三相星型连接后接地或是三相分别接地。在正常运行情况下, 三相平衡电压、电流通过星型接线后在接地电阻上的矢量和为零, 因此接地电阻可视为大地的一部分, 可将护层及铠装分别视

为直接理想接地。但是, 在三相分开分别接地的场合, 由于三相电流并未在接地点处矢量叠加, 因此, 接地电阻上的电压不为零, 不能假设护层或铠装为理想直接接地。此外, 即使三相在同一处接地, 由电缆长度、敷设环境等的细微差异也会导致接地处的电流不会完全抵消, 亦不能当做理想接地考虑。

假设海底电力电缆终端处三相的金属护层及铠装分别通过接地箱接地, 接地电阻为 $2\ \Omega$, 其它条件不变, 计算得到海底电力电缆不同位置处的电流分布如图 5 所示。可见, 由于接地电阻增大, 金属护层及铠装的返流性能变差, “等效电流”增大为 $120.49 \sim 123.77\ \text{A}$, 占芯线电流的比例约为 $15.9 \sim 18.9\%$ 。

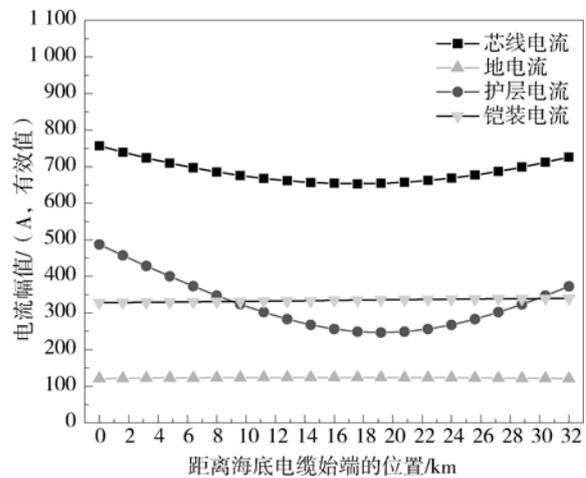


图6 海底电力电缆电流幅值分布 (护层及铠装接地电阻 $2\ \Omega$)

Fig. 6 Current Distribution of Submarine Power Cable (Ground Resistance of Sheath and Armoure is $2\ \Omega$)

由于接地电阻的存在, 抬高了金属护层或者铠装的对地电位, 如果海底电力电缆的长度较长且中间不接地, 则护层及铠装上的电压将达到数百伏, 甚至可能上千伏, 超过 $300\ \text{V}$ 的规定^[12]。同时, 考虑到抑制短路和雷击工况下金属护层的感应电压的要求, 海底电力电缆一般采取在每隔一定距离就将海缆的护层与铠装短接的技术措施, 即护层通过软接头与铠装电气联通, 利用铠装的接地实现护层接地的目的。

当海底电力电缆采取了在中间每隔一定距离将护层与铠装短接的技术措施后, 在海底电力电缆的登陆段, 其边界条件为一端理想接地, 一端通过电阻接地。经计算, 图 6 给出了这种情况下海底电力

电缆芯线、护层及铠装上的电压电流分布。从分析结果可以看出，此时“等效电流”约 76.51~84 A，占芯线的约 10.11%~12.63%。“等效电流”较两端理想接地大，但是较两端皆有接地电阻的情况要小。

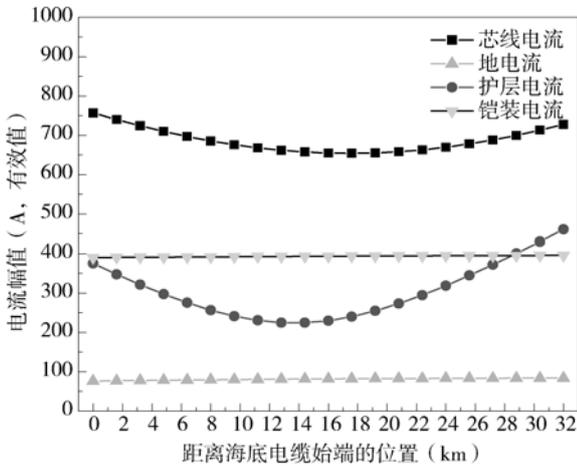


图7 海底电力电缆电压幅值分布

(护层及铠装接地电阻一端理想接地，一端接地电阻 2 欧)
Fig. 7 Voltage Distribution of Submarine Power Cable
(Ground Resistance of the Terminals of Sheath and Armoure are 0 Ω and 2 Ω Individually)

3.4 接地电阻的影响

海缆金属护层及铠装端子箱处的接地电阻与工程条件及设计要求密切相关。因此，图 8 给出了接地电阻从 0 Ω 增加至 2 Ω，等效电流的变化规律。从计算结果可知，随着接地电阻的增大，等效电流迅速增大，但是增加幅度有减缓的趋势。也就是说，海缆金属护层及铠装的返流效果随着接地电阻的增大而变差。

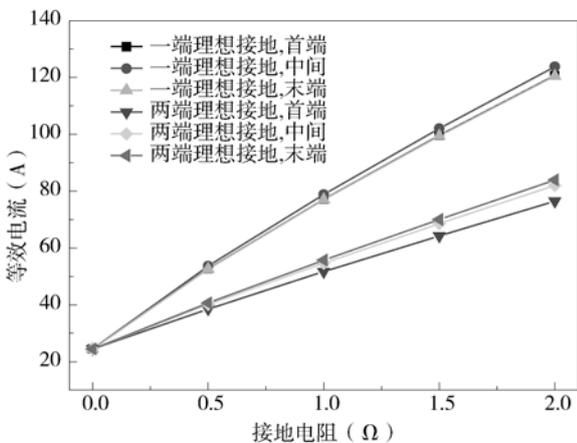


图8 等效电流随接地电阻的变化规律

Fig. 8 Variation of Grounding Resistance with Equivalent Current

4 海底电缆对临近信号电缆的磁影响评估

海底电缆正常运行，相电流假设为 800 A，根据第 3 节参数，剩余电流按 4% 取 32 A，计算得到海底电缆对海底光缆金属构件的磁感应电压见图 9。以纵向感应电动势 60 V 为控制标准^[12]，海底电缆与海底光缆的距离需大于 20 m。若是三相分开接地或是由于线路参数不完全对称导致接地点不能视为理想接地，则上述距离需根据实际情况适当加大。

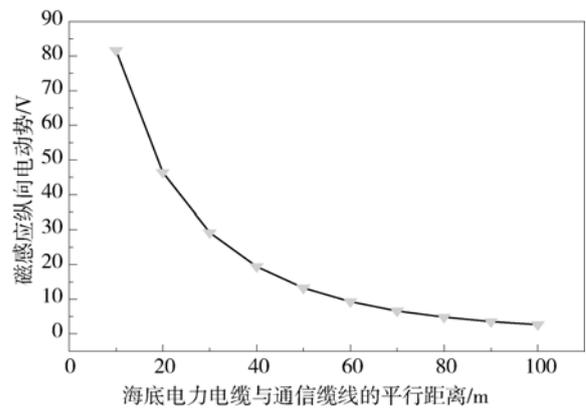


图9 平行距离对磁感应纵向电动势的影响

Fig. 9 Parallel Distance Effect on the Magnetic Induction Longitudinal Electromotive Force

5 结论

1) 海底电缆的返流性能与两端的接地状态密切相关，各接地状态下护层及铠装的返流效果从好到差的排列顺序为：两端理想接地、一端理想接地一端通过电阻接地、两端均通过电阻接地。从降低海底电缆对外界金属缆线的磁干扰及危险影响考虑，海底电缆登陆端金属护层、铠装宜三相集中接地，并尽量降低接地电阻。

2) 正常供电情况下，如海缆的金属护层及铠装采用三相星型接地，海底电缆芯线、金属护层及铠装上流过的电流矢量和很小，在本算例中仅占芯线电流的不到 4% (两端接地电阻均 2 Ω)，但是对若平行长度较长，临近信号电缆的磁感应影响并不可忽略。

3) 如果海底电缆采用钢丝铠装，虽然降低了铠装的返流效果，但是可以增强金属护层的返流效果。总体而言，反而可以增强海底电缆金属护层及铠装的返流性能。

(下转第 114 页 Continued on Page 114)

4 结论

1) 在高温大风地区加装导流板是提高空冷平台散热性能最有效的措施之一。

2) 导流板数量增加, 空冷平台散热能力增加, 4片以上导流板对提高散热能力增加幅度有限, 导流板应安装于风机导流筒下部。

3) 虽导流板作用明显, 可极大改变风机入口进风条件, 但需要与风机合理配合使用才能安全有效运行, 建议风机使用大口径风机, 以 9.75 m 风机直径为宜。

4) 随着环境风速不断提高, 风机的周向最大压差和径向最大压差逐渐增大, 说明环境风速对风机运行稳定性的影响大于对叶片和轴承的压力影响。

5) 随着环境风速的不断提高, 风机所在面整体的压强不断提高, 对风机的吸风能力有很大的影响, 风机进风量降低, 进而降低直冷单元的散热能力。

6) 当环境风速小于 20 m/s 时, 周向和径向最大的压差提高不大; 当环境风速大于 20 m/s 时, 风机周向和径向的最大压差急剧提高, 说明在大风环境下直接空冷机组加装导流板, 应考虑风机运行平衡性, 以及叶片和轴承的承受能力。

参考文献:

[1] 顾志福, 陈学锐, 等. 大型电厂直冷系统风效应风洞模拟

[J]. 力学学报, 2005, 37(5): 558-562.

GU Zhifu, CHEN Xuerui, et al. The ACC Power Plants Wind Tunnel Simulation [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2005, 37(5): 558-562.

[2] 杨立军, 杜小泽, 杨勇平. 环境风影响下的空冷岛运行特性 [J]. 工程热物理学报, 2009(2): 325-328.

YANG Lijun, Du Xiaoze, YANG Yongping. Influences of Natural Wind Upon the Operation Characteristics of Air-cooled Condenser System [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009(2): 325-328.

[3] 贾宝荣, 杨立军, 杜小泽, 等. 导流装置对直接空冷单元流动传热特性的影响 [J]. 中国电机工程学报, 2009(8): 14-19.

JIA Baorong, YANG Lijun, DU Xiaoze, et al. Influence of Flow Guiding Device Upon Flow and Heat Transfer Characteristics of Air-cooled Condenser Cell [J]. Proceedings of The CSEE2009(8): 14-19.

[4] YAKHOT V, ORSZAG S A. Renormalization Group Analysis of Turbulence [J]. Journal of Scientific Computing, 1986, 1(1): 3-5.

[5] 王远成, 吴文权. 基于 RNG k-ε 湍流模型钝体绕流的数值模拟 [J]. 上海理工大学学报, 2004, 26(6): 519-523.

WANG Yuancheng, WU Wenquan. Numerical Simulation of Flow Around Blunt Bodies Using RNG k-ε Turbulence Model [J]. J. University of Shanghai for Science and Technology, 2004, 26(6): 519-523.

(责任编辑 高春萌)

(上接第 70 页 Continued from Page 70)

参考文献:

[1] DL/T 5033—2006, 输电线路对电信线路危险和干扰影响防护设计规程 [S].

[2] GB/T 13430—1992, 24 路海底同轴电缆载波电话设备技术要求 [S].

[3] GB/T 13431—1992, 120 路海底同轴电缆载波电话设备技术要求 [S].

[4] YD 5018—2005, 海底光缆数字传输系统工程设计规范 [S].

[5] GB/T 18480—2001, 海底光缆规范 [S].

[6] GJB 4489—2002, 海底光缆通用规范 [S].

[7] 陈珩. 电力系统稳态分析 [M]. 北京: 中国电力出版社.

[8] 吴维韩, 张芳榴. 电力系统过电压数值计算 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.

[9] DL/T 1278—2013, 海底电力电缆运行规程 [S].

[10] 马信山, 张济士, 王平. 电磁场基础 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.

[11] GB 50217—2007, 电力工程电缆设计规范 [S].

[12] GB 5102—2005, 长途通信光缆线路工程设计规范 [S].

(责任编辑 黄肇和)