

回流导体提升单芯海底电力电缆载流量研究

采用回流导体能提升单芯海底电力电缆载流量，但是目前国内缺少回流导体对海底电缆载流量影响的相关研究。为此，在IEC 60287标准基础上建立两种不同回流导体结构海底电缆的集中参数热路模型以及相应的载流量计算方法，分析了不同结构的回流导体对高压海底电缆损耗和载流量的影响，评估了不同截面积的回流导体对海底电缆损耗和载流量的影响。结果表明，内部回流导体能够有效降低电缆损耗，从而提升电缆载流量；回流导体截面积从 0 mm^2 增加到 500 mm^2 ，电缆载流量也随之增加34.7%。所研究的结果能够为具有回流导体结构的海底电缆的设计和选型提供理论依据。

樊友兵¹ 饶文彬¹ 刘松华¹ 刘 英² 赵健康¹ / 1. 中国电力科学研究院
2. 西安交通大学电气工程学院

0 引言

我国海底电缆发展迅速，海底电缆朝着更高电压等级和更高输送容量方向发展。海底电缆载流量是海底电缆运行管理重点关注的问题^[1-2]。

现有研究认为，海底电缆相对于陆地电缆，特殊的金属套与铠装材料，以及两端互联直接接地的运行方式，使得海底电缆金属套与铠装损耗明显高于陆地电缆，这使得海底电缆的高损耗成为提升海底电缆载流量的一个难点^[3-4]。

在实际中，电缆制造商和运行部门常用的提升海底电缆有剥除登陆段铠装降低损耗法^[5]、全铜单丝铠装法^[6]等。文献[7]指出将钢丝铠装换成铝合金丝铠装（相对磁导率较小）以及在铅包铠装回路串联电阻，降低海底电缆损耗是可行的方法。

国外有制造商在单芯海底电缆中增设一层回流导体用以提升载流量。1987年，国内就有相关带有回流导体层的海底电缆投入运行^[8]。但是到目前为止，尚未见到国外对回流导体提升电缆载流量机理的研究报告，国内也缺乏对回流导体基本理论研究，对于回流导体时海底电缆载流量的计算方法、影响因素等基础性问题均缺乏研究。文献[9]提出了带有回流导体层的大截面积单芯海底光电复合电缆的设计中，可以将光单元层和回流导体层复合在一起，从而保持电缆的整体结构不变，外径更加紧凑，但是目前仍然缺少相关研究。目前国内尚无有效提升海底电缆载流量的方法与手段。

为此，本文进一步从回流导体层的结构、载流量计算模型以及增设回流导体后载流量影响效果等几个方面进行了分析和研究，并对不同截面积回流导体对海底电缆载流量的影响进行了分析。

1 海底电缆载流量计算方法

本文中建立单芯海底电缆集中参数热路模型时，忽略了海底电缆的介质损耗，同时本文中计算的电缆均采用磁性铠装结构。

1.1 无回流导体海底电缆载流量计算模型

图1为典型的不带回流导体结构的海底电缆结构示意图。图2为根据图1的结构以及IEC 60287标准得出的海底电缆等效热路模型。

图2中， θ_c 为导体温度； θ_a 为铝合金套温度； θ_s 为电缆表面温度； θ_{amb} 为电缆



樊友兵/高级工程师

关键词/Keywords

海底电缆 ·
载流量 ·
回流导体 ·
热路模型 ·
损耗 ·

国家电网公司2013年科技项目（编号：K3034）。

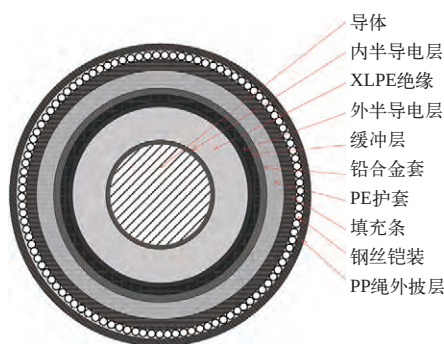


图1 常规海底电缆结构图

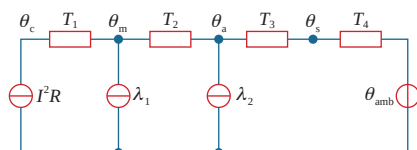


图2 海底电缆载流量计算模型

周围环境温度，℃。

根据图1所示模型，建立单芯海底电缆导体温升与周围环境的关系式，即

$$\Delta\theta = I^2 R [T_1 + (1 + \lambda_1)T_2 + (1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)]$$

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta}{R[T_1 + (1 + \lambda_1)T_2 + (1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)]}} \quad (1)$$

式中， I 为一根导体中流过的电流，A； $\Delta\theta$ 为高于环境温度的导体温升，℃， $\Delta\theta = \theta_c - \theta_{amb}$ ； R 为最高工作温度下导体单位长度的交流电阻，Ω/km； T_1 为一根电缆导体和金属套之间单位长度的热阻，K·m/W； T_2 为内衬层与填料热阻，K·m/W； T_3 为外护套单位长度热阻，K·m/W； T_4 为电缆表面和周围媒质之间单位长度热阻，K·m/W； λ_1 为电缆金属套损耗相对于该电缆所有导体总损耗的比率； λ_2 为电缆铠装损耗相对于该电缆所有导体总损耗的比率。

1.2 具有回流导体海底电缆的载流量计算方法

这里提出了两种回流导体布置：回流导体层设置在铅合金套表面；设置在铅合金套与铠装层之间，作为单独一层。

(1) 回流导体与铅合金套紧密接触

图3为回流导体与铅合金套紧密接触的海底电缆结构示意图。图4为根据图3的结构以及IEC 60287标准得出的海底电缆等效热路模型。

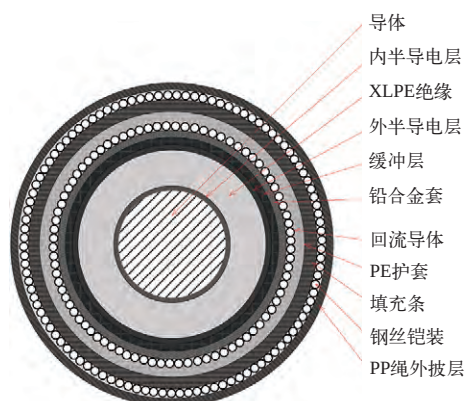


图3 回流导体与铅合金套紧密接触的海底电缆结构

根据集总参数的载流量计算模型，得出包含有回流导体的损耗计算模型，如图4所示。

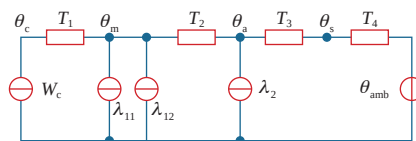


图4 回流导体与金属套接触时的模型

根据图4模型，建立单芯海底电缆导体温升与周围环境的关系式，即

$$\Delta\theta = I^2 R [T_1 + (1 + \lambda_1)T_2 + (1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)]$$

$$\lambda_1 = \lambda_{11} + \lambda_{12}$$

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta}{R[T_1 + (1 + \lambda_1)T_2 + (1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)]}} \quad (2)$$

式中， λ_1 为有回流导体层时电缆金属套与回流导体层总损耗相对于该电缆导体总损耗的比率； λ_{11} 为电缆金属套损耗相对于该电缆导体总损耗的比率； λ_{12} 为电缆回流导体损耗相对于该电缆导体总损耗的比率。

(2) 单独回流导体层

图5为带单独回流导体层的海底电缆结构示意图

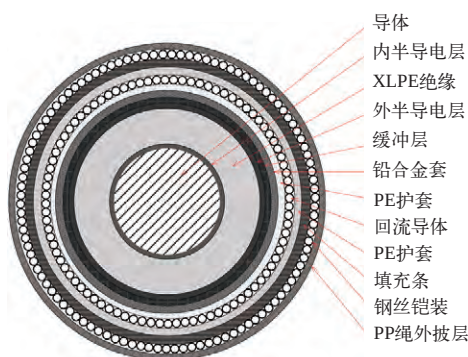


图5 带有单独回流导体层的海底电缆

图。图6为根据图5的结构以及IEC 60287标准得出的海底电缆等效热路模型。

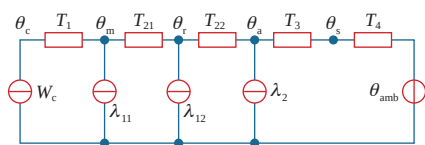


图6 回流导体与电缆金属套不接触的计算模型

$$\Delta\theta = I^2 R [T_1 + (1 + \lambda_{11})T_{21} + (1 + \lambda_{11} + \lambda_{12})T_{22} + (1 + \lambda_{11} + \lambda_{12} + \lambda_2)(T_3 + T_4)]$$

$$\lambda_1 = \lambda_{11} + \lambda_{12}$$

$$\Delta\theta = I^2 R [T_1 + (1 + \lambda_{11})T_{21} + (1 + \lambda_1)T_{22} + (1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)]$$

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta}{R [T_1 + (1 + \lambda_{11})T_{21} + (1 + \lambda_1)T_{22} + (1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)]}}$$

(3)

式中, T_{21} 为电缆金属套损耗相对于该电缆导体总损耗的比率; T_{22} 为电缆回流导体损耗相对于该电缆导体总损耗的比率。

(3) 回流导体层损耗计算方法

当海底电缆增加回流导体时, 回流导体通常也是和电力电缆两端直接接地。这时, 回流导体上的损耗通常包含环流损耗与涡流损耗。回流导体采用铜导体结构, 为非铁磁物质。

对于磁性铠装结构海底电缆, 通常将金属套与铠装损耗合并计算, 然后加设金属套与铠装损耗近似相等。这里仅对磁性铠装电缆增设回流层后电缆损耗的计算方法进行了分析。

根据电缆线路回流层与金属套以及铠装的等效接地电路模型, 可以将回流导体电阻与铅合金套电阻并联考虑, 计算得到电缆回流导体层、金属套与铠装在工作温度下的并联电阻 R_e , 即

$$R_e = \frac{R_s R_A}{R_s' + R_A}$$

$$R_s' = \frac{R_t R_s}{R_t + R_s}$$

式中, R_e 为电缆金属套、回流导体层以及铠装在工作温度下并联电阻; R_A 为电缆铠装层在工作温度下电阻; R_s' 为电缆铅合金套与回流导体层在工作温度下电阻; R_t 为电缆回流导体层在工作温度下电阻; R_s 为铅合金套电阻。

然后根据IEC 60287标准计算得到损耗系数 λ_1 、 λ_2 。根据并联导体的电流分配规律, 有

$$\lambda_1 = \lambda_{11} + \lambda_{12}$$

$$\lambda_{11}/\lambda_{12} = R_t/R_s$$

式中, R_t 为回流导体层在工作温度下的电阻。

2 回流导体对海底电缆载流量的影响

2.1 不同回流导体结构对海底电缆载流量的影响

这里计算了图1、图3和图5所示的3种不同结构海底电缆的在正常运行条件下载流量。

这里海底电缆的回流导体截面积为300 mm²。3种海底电缆的结构参数如表1所示。

表1 海底电缆结构参数

设置		图1结构	图3结构	图5结构
结构	导体			
	截面积/mm ²	1 000	1 000	1 000
	外径/mm	38.2	38.2	38.2
	绝缘外径/mm	75	75	75
缓冲层	厚度/mm	1.0	1.0	1.0
	标称外径/mm	77	77	77
铅套	厚度/mm	2.9	2.9	2.9
	标称外径/mm	82.8	82.8	82.8
回流导体层	缓冲厚度/mm	—	—	2.0
	缓冲外径/mm	—	—	86.8
	导体截面积/mm ²	—	300	300
	导体厚度/mm	—	3.0	3.0
	外径/mm	—	88.8	92.8
	沥青涂层+PE套/mm	3.5	3.5	3.5
	标称外径/mm	89.7	95.8	99.8
	PE填充条/mm	6	6	6
	标称外径/mm	101.8	107.8	111.8
	内衬层/mm	1.5	1.5	1.5
	标称外径/mm	104.8	110.8	114.8
	铠装钢丝直径/mm	6.0	6	6
PP绳加沥青护层/mm		4.0	4	4
	成缆外径/mm	124.8	130.8	134.8

对这3种结构的电缆进行载流量计算, 结果如表2所示。计算条件为: 海底掩盖深度为1.5 m, 温度为15 ℃, 热阻系数为0.9。

根据表2中的计算结果可以看出, 增设回流层后, 由于回流层的电阻较低, 且具有较强的分流

表2 不同结构海底电缆损耗与载流量

	图1结构	图3结构	图5结构
铅合金套电阻	3.41E-04	3.41E-04	3.41E-04
回流层电阻	—	6.65E-05	6.65E-05
铠装电阻	9.95E-05	9.95E-05	9.95E-05
λ_2	1.66	0.77	0.77
λ_{11}	1.66	0.126	0.126
λ_{12}	0	0.645	0.645
回流缓冲 T_{21}	0	0	0.026
内衬 T_{22}	0.175	0.175	0.173
内衬层 T_2	0.175	0.175	0.176
载流量/A	976	1 031	1 219

作用,从而使得铅合金套、铠装以及回流层三者等效并联回路的电阻较低,使得整体损耗显著下降,海底电缆载流量得以提高。

同时可以看出,单独回流层将回流导体层和铅合金套紧密设置,载流量相差12 A,这是由于单独设置回流导体层,需要在铅合金套和回流导体层之间增设一层缓冲层,使得电缆本体热阻变大,从而影响散热,在一定程度上降低了载流量。但是从总体上看,该缓冲层对载流量影响不大。

2.2 回流导体截面积对海底电缆载流量的影响

以单独回流导体层海底电缆为模型,分别计算了回流导体截面积为100 mm²、200 mm²、300 mm²、400 mm²和500 mm²时海底电缆的总损耗和载流量,结果和表3和图7所示。

表3 不同回流导体截面积时电缆载流量

结构	回流导体厚度	电缆外径	金属套	载流量
截面积/mm ²	/mm	/mm	损耗系数	/A
0	0	124.8	1.7	967
100	2	132.8	1.20	1 080
200	2.5	133.8	0.94	1 160
300	3	134.8	0.77	1 219
400	3.5	135.8	0.65	1 265
500	4	136.8	0.57	1 303

根据表3和图7可以看出,当回流导体截面积由0增加至500 mm²时,电缆金属套损耗系数由1.7下降为0.57,下降幅度达66.4%;载流量则由没有回流导体时的967 A增加至1 303 A,增加了34.7%,电缆外径则由原来的124.8 mm增加至135.8 mm,增

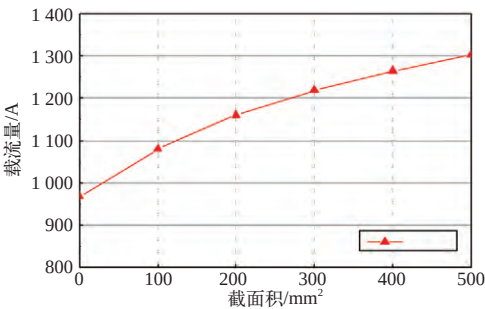


图7 不同截面积回流导体时海底电缆载流量

加了8.8%。

3 结束语

- 1) 针对具有回流导体层的单芯海底电力电缆,讨论了不同结构的回流导体层海底电力电缆的载流量计算模型,分析了回流导体层对海底电力电缆损耗与载流量的影响。
- 2) 增加回流导体层能有效降低损耗,增加电缆负荷能力。随着回流导体层截面积的增加,电缆的载流量也随之上升。
- 3) 是否增加回流导体层,需要综合考虑电缆成本、结构的改变以及制造、运输和施工等各环节。

参考文献

[1] 徐晓燕. 海底电缆载流量分析[J]. 电气应用, 2014, 33(22): 48-52.

[2] 许继葵, 雷成华, 刘毅刚, 等. 水中敷设电缆载流量的实验和分析[J]. 广东电力, 2011, 24(1): 16-19.

[3] 杜兆斌, 杨泽明, 谌军, 等. 超高压海底电缆护套环流的理论计算新方法[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2013, 41(12): 63-69

[4] 龚永超, 何旭涛, 孙建生. 高压海底电力电缆铠装的设计和选型[J]. 电线电缆, 2011(5): 19-22.

[5] 何旭涛. 降低高压海底电缆登陆段电能损耗的措施研究[J]. 浙江电力, 2011(10): 29-31.

[6] 蔡文婷. 提高海底电力电缆载流量的方法探讨[J]. 上海电气技术, 2011, 4(4): 23-28.

(下转第69页)

- IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1999, 46 (5) : 953-959.
- [7] Xü L, Cartwright P. VSC transmission under unbalanced AC conditions-analysis and control design [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20 (1) : 427-434.
- [8] 巍晓光. 电压源换流器高压直流输电控制策略及其在风电场并网中的应用研究 [D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2007.
- [9] Komatsu Y. Application of the extension pq theory to a mains-coupled [C]. Power Conversion Conference, 2002 : 816-821.
- [10] Bletterie B, Bründlinger R, Fechner H. Sensitivity of photovoltaic inverters to voltage sags-test results for a set of commercial products[C]. International Conference & Exhibition on Electricity Distribution, 2010 : 1-4.
- [11] 程军照, 吴夕科, 李澍森, 等. 采用Boost的两级式光伏发电并网逆变系统 [J]. 高电压技术, 2009, 35 (8) : 2048-2052.
- [12] 张崇巍, 张兴. PWM 整流器及其控制 [M]. 北京, 机械工业出版社, 2003.
- [13] Song Xianwen, Wang Yue, Hu Weihao, et al. Three reference frame control scheme of 4 wire grid-connected inverter for micro grid under unbalanced grid voltage conditions [C]. Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2009: 1301-1305.
- [14] Rioual P, Pouliquen H, Louis J. Regulation of a PWM rectifier in the unbalanced network state using a generalized model [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1996, 11 (3) : 495-502.
- [15] Podriguea P, Timbus A V, Teodorescu R, et al. Flexible active power control of distributed power generation systems during grid faults [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54 (5), 2583-2592.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 156—2007 标准电压 [S].
- [17] 苏建徽, 余世杰, 赵为, 等. 硅太阳能电池工程用数学模型 [J]. 太阳能学报, 2001, 22 (4) : 409-412.

(收稿日期: 2016—04—18) EA

(上接第61页)

- [7] 张磊, 俞恩科, 陈国志, 等. 提升海底电缆载流量的2种方法及其试验研究 [J]. 高电压技术, 2015, 41 (8) : 2716-2722.
- [8] 李翔忠. 220 kV珠江虎门海底电缆敷设完成 [J]. 电线电缆, 1987 (2) : 36.
- [9] 王瑛, 华良伟, 片冈敬一郎. 110 kV 海底光电复合缆的设计与制造 [J]. 装备机械, 2009 (2) : 28-34.
- [10] International Electrotechnical Commission. IEC 60287-1-1 Electric cables-calculation of the current rating part 1-1: current rating equations (100% load factor) and calculation of losses [S]. 2006.
- [11] International Electrotechnical Commission. IEC 60287-2-1 Electric cables-calculation of the current rating part 2-1: thermal resistance—calculation of thermal resistance [S]. 2006.

(收稿日期: 2016—03—14) EA