

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.10.010

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

刘英¹, 肖阳¹, 苏宇¹, 姜爽²

(1. 西安交通大学, 西安 710049; 2. 国网北京市电力公司检修分公司, 北京 100031)

摘要: 为保障单芯交流海缆的运行安全,海缆线路除在两端牢固接地外,有时还需将金属护套和铠装进行分段短接或采用半导体护层,3种接地方式对电缆传输容量的影响尚未有定量分析结论。文中针对大长度平行直线敷设的高压单芯非磁性铠装海底电缆线路展开讨论,建立了金属护套及铠装环流计算的等效模型,采用2种方式对半导体护层的损耗进行评估,在IEC标准基础上,提出了电缆允许载流量的修正计算公式。以交流500 kV充油海缆工程为对象进行了定量计算,结果表明,文中算法可以准确计算海缆线路的允许载流量;3种接地方式对电缆的允许载流量没有显著影响;为避免电流过大导致的加速老化,建议选择电阻率不小于 $10^6 \Omega \cdot \text{m}$ 的半导体护层材料。

关键词: 单芯交流海缆; 金属护套接地方式; 环流损耗; 半导体护层; 允许载流量

Loss Calculation and Influence on Ampacity of Single-core AC Submarine Cable Under Different Grounding Modes

LIU Ying¹, XIAO Yang¹, SU Yu¹, JIANG Shuang²

(1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100031, China)

Abstract: For the safety of single-core AC cable circuit, submarine cables can be grounded in three ways. Besides both-ends solid bonding, intermediate short-circuit or semi-conductive over-sheath between metal sheath and armour are usually used for long circuit. The influence of bonding technique on transmission capacity has not been quantitatively researched. Long single-core HV submarine cables with non-magnetic armour are studied in this paper. The equivalent models for the circulating current calculation of metal sheath and armour are established. The loss of semi-conductive over-sheath is evaluated by two methods. The revised formulas for cable rating are presented based on IEC standards. After the theoretical analysis and modeling, a case study is carried out on a 500 kV oil-filled AC cable project. Quantitative calculations show that the allowable ampacity of submarine cables can be determined accurately by the algorithm proposed. The selection among the three bonding techniques has no significant influence on the cable rating. The resistivity of semi-conductive over-sheath is suggested to be no less than $10^6 \Omega \cdot \text{m}$, so as to avoid accelerated aging.

Key words: single-core AC submarine cable; bonding technique of metal sheath; circulating current loss; semi-conductive over-sheath; allowable ampacity

0 引言

交流海缆的损耗主要来自于导体、绝缘、金属护套和铠装,其中护套和铠装损耗与其结构参数、排列布置及接地方式等因素有关^[1-3]。高压及超高

压海缆大部分采用单芯结构。受敷设环境限制,海缆线路不能采用金属护套交叉互联、电缆本体换位等措施,通常在线路两端将金属护套及铠装并联后直接接地,此时在护套及铠装上会产生相当大的环流和损耗^[4-6]。此外,当线路很长时,离接地点较远

的线路中段金属护套上将形成较高的感应电压,对电缆自身和周围环境带来威胁。

目前,海缆工程中常用的接地方式有3种:①两端互联接地,中间不短接,即将金属护套和铠装分别在海缆线路两端互联接地,其他部分不做特殊处理;②两端互联接地,中间分段短接,即除了两端互联接地外,在线路中间预定位置处,还利用短接导线穿过绝缘护层将金属护套和铠装进行连接,并通过小电阻接地,构成多点接地;③两端互联接地,半导电护层,即除了两端互联接地外,金属护套和铠装之间的绝缘护层由半导电护层代替,类似于全线接地。

关于电缆金属护套上感应电势的解析和数值算法,已有文献进行过介绍^[7-9],而高压电缆金属护套环流的计算,前期的研究经验也较多^[10-12]。文[13]计算对比了两端和单端接地方式下金属护套环流损耗对电缆载流量的影响;文[14]将在线监测金属护套环流的绝对值和相对变化量作为判断电缆绝缘性能优劣的依据;文[15]提出在电缆终端加补偿电感的方法来减小电缆损耗;文[16]验证了给铅包铠装回路串联电阻的方法可以有效降低海缆损耗;文[17]从安全性和经济性角度提出了3种海缆金属护套接地方式的选择原则,并指出电容电流对海缆损耗和载流量有较大影响。

海缆项目通常都是投资大、耗时长、影响面广的大项目,安全性是工程考虑的第一要素;在此基础上,经济性指标也很重要,这就涉及到电缆载流量优化的问题。电缆接地方式的合理选择对这2个方面都具有决定性作用。

文中针对3种典型接地方式下海缆金属护套和铠装的环流计算建立分析模型及等效电路;将护套和铠装之间采用的半导电护层分别视为介质层和导体层进行损耗计算;在此基础上,通过对 IEC 60287-1-1:2006 中允许载流量计算公式进行修正,提出了基于文中模型的计算方法。以实际海缆工程及参数为例,进行了不同接地方式下线路允许载流量的计算,同时分析了相关因素的影响。

1 模型的建立

在文中讨论中,选择的对象是由3根单芯电缆水平直线排列所构成的单回电缆线路,多回路情况可以文中的模型为基础进行扩展。

1.1 “两端互联接地,中间不短接”

1.1.1 金属护套及铠装的环流计算

海缆线路采用金属护套和铠装“两端互联接

地,中间不短接”的接地方式(简称“接地方式一”)时,建立计算环流的等值电路见图1。对照图1,列出金属护套和铠装的环流计算方程组,见式(1)。

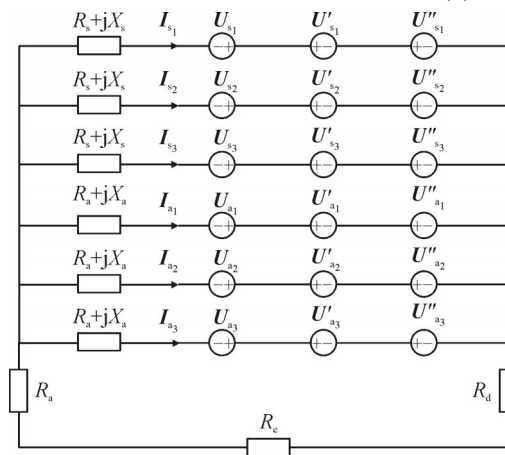


图1 “两端互联接地,中间不短接”的等效电路

Fig. 1 Equivalent model of solid-bonded cable circuit

$$\left\{ \begin{aligned} & (2R_d + R_e)(I_{s1} + I_{s2} + I_{s3} + I_{a1} + I_{a2} + I_{a3}) + \\ & (R_s + jX_s)I_{s1} + U'_{s1} + U''_{s1} = U_{s1} \\ & (2R_d + R_e)(I_{s1} + I_{s2} + I_{s3} + I_{a1} + I_{a2} + I_{a3}) + \\ & (R_s + jX_s)I_{s2} + U'_{s2} + U''_{s2} = U_{s2} \\ & (2R_d + R_e)(I_{s1} + I_{s2} + I_{s3} + I_{a1} + I_{a2} + I_{a3}) + \\ & (R_s + jX_s)I_{s3} + U'_{s3} + U''_{s3} = U_{s3} \\ & (2R_d + R_e)(I_{s1} + I_{s2} + I_{s3} + I_{a1} + I_{a2} + I_{a3}) + \\ & (R_a + jX_a)I_{a1} + U'_{a1} + U''_{a1} = U_{a1} \\ & (2R_d + R_e)(I_{s1} + I_{s2} + I_{s3} + I_{a1} + I_{a2} + I_{a3}) + \\ & (R_a + jX_a)I_{a2} + U'_{a2} + U''_{a2} = U_{a2} \\ & (2R_d + R_e)(I_{s1} + I_{s2} + I_{s3} + I_{a1} + I_{a2} + I_{a3}) + \\ & (R_a + jX_a)I_{a3} + U'_{a3} + U''_{a3} = U_{a3} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式(1)中: R_d 为海缆线路两端的接地电阻; R_e 为大地的等值漏电阻; R_s 、 X_s 、 R_a 、 X_a 为金属护套及铠装的电阻和自感抗; U_{si} 、 U'_{si} 、 U''_{si} 为三相线芯电流、其他两相金属护套环流、三相铠装环流在第*i*相金属护套上产生的感应电压; U_{ai} 、 U'_{ai} 、 U''_{ai} 为三相线芯电流、其他两相铠装环流、三相护套环流在第*i*相铠装上产生的感应电压; I_{si} 、 I_{ai} 为第*i*相金属护套、铠装的环流, $i=1\sim 3$ 。

在确定的电缆负载电流、护套及铠装环流下,金属护套及铠装的感应电势可通过公式进行计算,具体可见文[7-9]。在此基础上,将所有电流向量都分解为实部和虚部并代入式(1),根据所得的矩阵方程即可求解三相海缆金属护套和铠装的环流。

1.1.2 金属护套及铠装的损耗计算

金属护套及铠装损耗因数 λ_1 和 λ_2 均以和导体损

耗比值的形式表示,见式(2)^[18]。

$$\begin{cases} \lambda_1 = I_s^2 R_s / (I^2 R) \\ \lambda_2 = I_a^2 R_a / (I^2 R) \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: I 为电缆线芯中的负载电流; R 为线芯的交流电阻。

1.1.3 海缆载流量计算

以中相电缆的线芯电流为参考向量,即设 $I_2 = I \angle 0^\circ$, IEC 60287-1-1:2006 标准中给出了允许载流量 I 的计算公式^[19],即

$$I = \sqrt{\frac{(\theta_c - \theta_0) - W_d(0.5T_1 + T_2 + T_3 + T_4)}{RT_1 + R(1 + \lambda_1)T_2 + R(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)}} \quad (3)$$

式(3)中:主绝缘的介质损耗为 $W_d = \omega C U_0^2 \tan \delta$; U_0 为导体相电压; C 和 $\tan \delta$ 为主绝缘的电容及介质损耗因数; $\omega = 100\pi \text{ rad/s}$; θ_c 为线芯允许最高工作温度; θ_0 为环境温度; T_{1-4} 分别为导体和金属护套之间、金属护套和铠装之间、外护层、周围媒质的热阻。

为了利用文中的等效模型计算载流量,对式(3)进行修正,获得式(4)。

$$I = \sqrt{\frac{(\theta_c - \theta_0) - W_{d1}(0.5T_1 + T_2 + T_3 + T_4) - W_{d2}(0.5T_2 + T_3 + T_4)}{RT_1 + R(1 + \lambda_1)T_2 + R(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)}} \quad (4)$$

式(4)中: $W_{d1} = \omega C U_1^2 \tan \delta$ 为主绝缘的介质损耗, U_1 为导体与金属护套间的电压差; $W_{d2} = \omega C_2 U_2^2 \tan \delta_2$ 为金属护套和铠装间护层绝缘的介质损耗, U_2 为金属护套与铠装间的电压差; C_2 和 $\tan \delta_2$ 分别为护层绝缘的电容及介质损耗因数。

1.1.4 计算流程

由于电缆线芯的允许负载电流与金属护套及铠装环流的相互影响,使用所建立模型进行计算时,需要经历一个反复迭代的过程,如下所示:

- 1) 给电缆载流量即线芯电流赋初值。
- 2) 计算在该线芯电流下各相金属护套和铠装上的感应电势及环流。
- 3) 根据金属护套和铠装环流确定损耗。
- 4) 计算电缆允许载流量。
- 5) 将迭代前后的允许载流量进行比较,如果偏差大于预设值,则返回步骤2),继续迭代计算;如果偏差小于预设值,则计算结束,输出结果。

1.2 “两端互联接地,中间分段短接”

如果采用接地方式一时电缆金属护套上的感应电压超过了护套外绝缘护层的耐受水平,就应考虑采用“两端互联接地,中间分段短接”的接地方式(简称“接地方式二”)^[17]。这种情况下,如果中间短接次数为 n ,则等值电路可以简单看作是 $(n+1)$ 个接地方式一的等效模型串联,等值电路见图2。计算时,通过改变线路长度 L 的值来体现分段短接间距的变

化,其他同接地方式一。

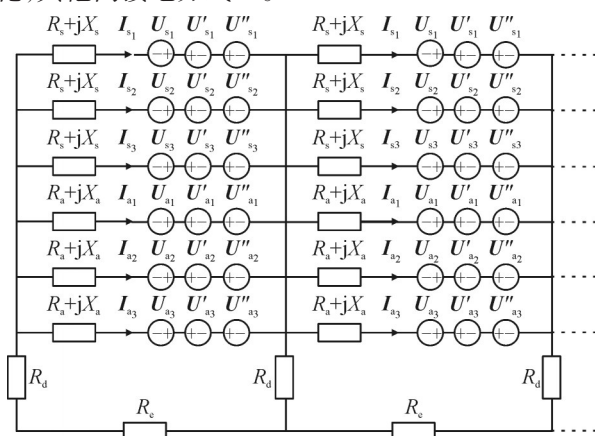


图2 “两端互联接地,中间分段短接”的等效电路

Fig. 2 Equivalent model of intermediate short-circuited cable circuit

1.3 “两端互联接地,半导电护层”

如果采用接地方式一时电缆线路金属护套上的感应电压超过了护套外绝缘护层的耐受电压水平,而线路较长、分段短接次数多而不利于防水保护时,就应考虑采用“两端互联接地,半导电护层”的接地方式(简称“接地方式三”)^[17]。

半导电护层的电阻率远小于绝缘护层,又远大于金属层,其电阻率大小不仅影响护层上的电压,也影响流过护层的电流。为了全面探讨半导电护层的损耗及其对电缆载流量的影响,将其分别视为介质层和导体层,建立对应模型进行研究。

1.3.1 “视半导电护层为介质层”的等效模型

假设海缆金属护套和铠装上的环流是均匀分布的,若视半导电护层为介质层,则将其等效为电阻和电容的并联,那么泄漏电流为电容电流和导电电流之和,等值电路见图3。

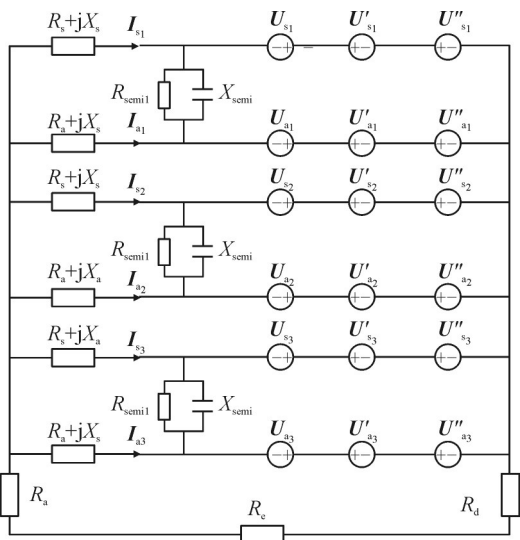


图3 视半导电护层为介质层的等效电路

Fig. 3 Equivalent model of cable circuit with semi-conductive over-sheath

半导体护层单位长度的横向电阻 R_{semi_1} 和电容 C_{semi} 的计算可参考绝缘层^[20]。金属护套与铠装间的电压按式(5)来确定。

$$\begin{cases} \Delta U_1 = U_{s_1} - U_{a_1} = (\sqrt{3} + j)10^{-7} \omega L I_2 \ln \frac{D_a}{D_s} \\ \Delta U_2 = U_{s_2} - U_{a_2} = -j2 \times 10^{-7} \omega L I_2 \ln \frac{D_a}{D_s} \\ \Delta U_3 = U_{s_3} - U_{a_3} = (-\sqrt{3} + j)10^{-7} \omega L I_2 \ln \frac{D_a}{D_s} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中: L 为海缆长度; D_s 、 D_a 分别为金属护套及铠装的平均直径。

根据回路电流法可建立该模型的环流方程组, 再按复数运算法则列出复数矩阵方程即可进行求解。

1.3.2 “视半导体护层为导体层”的等效模型

视半导体护层为导体层, 则它是与金属护套和铠装并联的, 补充其与金属护套和铠装间的互感及感应电压的计算, 建立计算环流的方程组, 并整理为复数矩阵形式。在此基础上, 将式(3)修正为式(6), 即

$$I = \sqrt{\frac{(\theta_c - \theta_0) - W_{d1}(0.5T_1 + T_2 + T_3 + T_4)}{RT_1 + R(1 + \lambda_1)T_2 + R(1 + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)(T_3 + T_4)}} \quad (6)$$

式(6)中: $\lambda_3 = I_{\text{semi}}^2 R_{\text{semi}_2} / (I^2 R)$, 为半导体护层的损耗因数; R_{semi_1} 为半导体护层上的环流; R_{semi_2} 为半导体护层的纵向电阻, 采用与金属层相同的算法确定。

2 计算及分析

为了校验文中针对3种接地方式所建立的护套及铠装环流模型及电缆载流量计算方法, 选取典型电缆线路为研究对象进行建模和计算。

2.1 研究对象

以三相平行敷设的500 kV单芯充油海缆为例, 其结构及参数见图4。

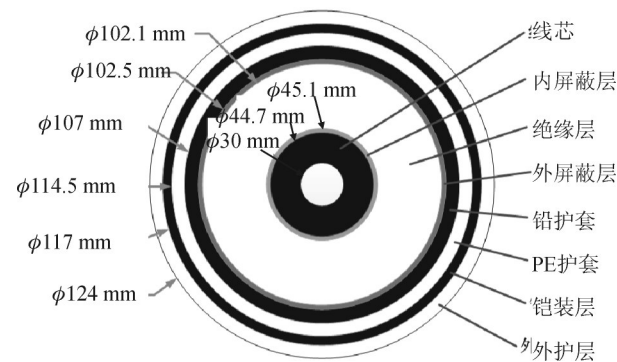


图4 典型海缆的结构参数

Fig. 4 Structural parameters of a typical submarine cable

其他参数设置为: 相间距 $S=10$ m; 埋深 $d=1$ m; 线路长度 $L=33$ km; 导体允许运行温度 $\theta_c=85$ °C; 铅护

套温度 $\theta_s=65$ °C; 铠装温度 $\theta_a=55$ °C; 铅护套和铠装之间的护层温度为60 °C; 海水温度 $\theta_0=20$ °C。

2.2 接地方式一

良好接地时可令接地电阻 R_d 为0。根据等效模型, 获得海缆载流量为605.66 A, 总损耗 $\lambda=1.25$ 。而按照IEC 60287-1-1:2006的推荐算法, 获得海缆载流量为593.86 A, $\lambda=1.36$, 文中算法所得载流量高出2.0%。

电缆载流量随敷设深度的变化见图5。从图5可见, IEC算法和文中算法所得结果变化趋势一致, 载流量均随埋深增加而减小, 并且在不同的线路埋深下, 两者的偏差基本不变。

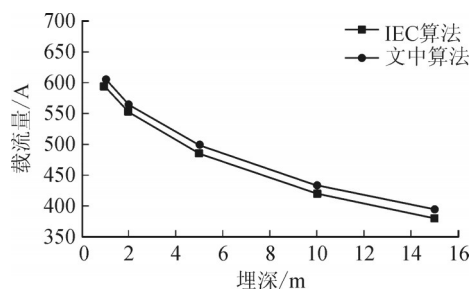


图5 不同埋深对载流量的影响

Fig. 5 Cable rating under different burying depth

改变海缆线路三相间距时, 载流量的变化见图6。2种算法所得结果的变化趋势完全一致, 载流量均随电缆相间距的增加而增大, 但在变化幅度上有所差异, 文中算法所得载流量随相间距的变化幅度更大, 当相间距较大时, 两者偏差将达10%。

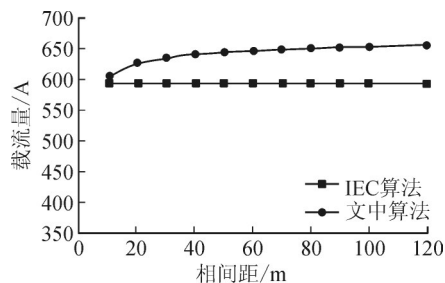


图6 不同相间距对载流量的影响

Fig. 6 Cable rating under different phase distance

总的来说, 文中算法所得载流量均高于IEC推荐算法, 这是因为文中计算电缆主绝缘介质损耗时, 采用的是绝缘上实际耐受的电压, 即导体和金属护套间的电压差 U_1 , 而非如IEC算法中直接采用导体相电压 U_0 ($U_0 > U_1$), 因此所得 W_d 值较小, 载流量较高。如果在文中模型中也使用 U_0 计算 W_d , 获得载流量为586.34 A, 与IEC算法所得593.86 A接近。

埋深的变化并不影响金属护套和铠装上的电动势, 因此2种算法的偏差几乎不变。而当相间距增大时, 金属护套上的感应电势增大, 2种算法

中介质损耗的偏差增加,因此所得载流量结果偏差增大。

前述研究基于接地电阻为0,现在讨论接地电阻取值对载流量的影响,见表1。当改变接地电阻值时,载流量变化很小。分析表明,海缆三相负载电流基本平衡,相差 120° ,在金属护套和铠装上生成的环流也是幅值接近,相位相差 120° 左右,因此,流过接地电阻的三相环流之和始终很小,接地电阻的变化不会引起载流量的明显变化。

表1 不同接地电阻对载流量的影响

Table 1 Cable rating with different grounding resistor

参数	数值			
接地电阻/ Ω	0	1	5	10
中相载流量/A	669.61	669.36	668.72	668.55

2.3 接地方式二

各因素对载流量的影响规律与方式一基本相同,唯一需要讨论的是中间短接点接地电阻的影响。

选择接地电阻值分别为0、1、2、5 Ω ,改变海缆线路的短接间距,载流量计算结果见表2。对于一定长度的海缆线路,当接地电阻确定时,随着短接间距的增加,载流量会略微增大;在确定的短接间距下,接地电阻值变化对载流量的影响很小。

表2 不同短接间距及接地电阻下的载流量

Table 2 Cable rating under different short-circuiting separation and grounding resistor A

接地电阻/ Ω	短接间距			
	1 km	5 km	10 km	15 km
0	598.25	599.18	600.34	601.50
1	597.81	598.73	599.86	601.11
2	597.80	598.66	599.79	600.97
5	597.80	598.63	599.41	600.96

究其原因,一方面,三相环流同时流过短接线,导致总电流近似为零;另一方面,相邻两短接电缆段金属护套和铠装中的电流流过同一短接线且方向相反,电流基本相互抵消,不会在接地电阻上产生很高的电压或损耗。

综上所述,在保证良好接地的情况下,海缆线路是两端直接接地或是线路中间多点接地,对于载流量不会有显著影响。

2.4 接地方式三

2.4.1 视半导体护层为介质层

当采用接地方式三时,可认为海缆全线良好接地,因此取 R_d 为0,在此基础上计算半导体护层取不同电阻率、介电常数和厚度时护层中的泄漏电流。

泄漏电流和电阻率、介电常数的关系,见图7。

当电阻率为 $10^5 \Omega \cdot m$ 时,泄漏电流较大,并且主要为阻性成份,介电常数的变化对其几乎没有影响;电阻率超过 $10^6 \Omega \cdot m$ 之后,泄漏电流迅速下降,且随电阻率的变化趋缓,介电常数的影响变得显著。可见,在所讨论的电阻率为 $10^5 \sim 10^8 \Omega \cdot m$ 、介电常数为 $10 \sim 1\,000$ 的范围内,电导电流变化较大,且在泄漏电流中占据主导地位,电容电流相对较小。由于泄漏电流较大将会加速介质材料的老化,因此在实际工程中,应选用电阻率大于 $10^6 \Omega \cdot m$ 的半导体护层材料。

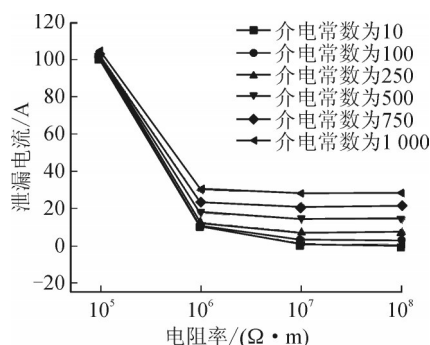


图7 不同电阻率和介电常数下的护层泄漏电流

Fig. 7 Leakage current of the over-sheath under different resistivity and permittivity

在电阻率为 $10^6 \Omega \cdot m$ 、相对介电常数为100情况下,讨论护层厚度的影响,见图8。随着厚度的增加,护层中的泄漏电流变小。金属护套和铠装之间的电压差以及半导体护层的阻抗均随厚度的增加而增大,但两者相比,阻抗的增幅远大于电压差,因此根据欧姆定律,泄漏电流随厚度增加呈单调下降的趋势。因为在模型中将半导体护层视为介质层,其损耗的计算采用与绝缘层相同的方法处理,式(4)中 W_{d_2} 即为半导体护层的介质损耗。这种情况下,虽然半导体护层的电容和介质损耗因数都比绝缘层大,但由于金属护套和铠装间的电压差很小,使得护层的介质损耗相比于金属护套及铠装的损耗来说还是很小的,对载流量几乎没有影响。

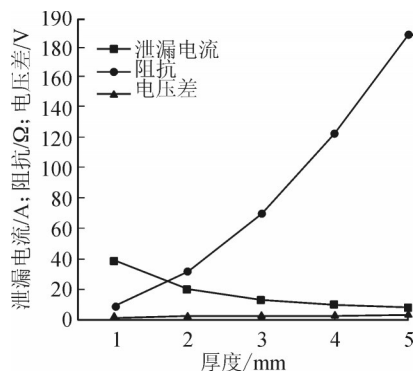


图8 不同厚度的护层泄漏电流

Fig. 8 Leakage current of the over-sheath with different thickness

2.4.2 视半导体护层为导体层

因为将半导体护层看作是导体层,因此,可将它与金属护套和铠装看作是并联导体,分析时主要考虑电阻率的影响。半导体护层的电阻率在 $10^{-6}\sim 10^2\ \Omega\cdot\text{m}$ 范围内变化时,护层中的环流及损耗因数以及海缆载流量的计算结果见表3。

表3 不同电阻率的护层环流、损耗因数及电缆载流量

Table 3 Circulating current and loss of the over-sheath with different resistivity and the cable rating

参数	数值				
电阻率/ ($\Omega\cdot\text{m}$)	1.00×10^{-6}	1.00×10^{-4}	1.00×0.01	1.00	100.00
环流/A	111.44	1.22	0.01	1.22×10^{-4}	1.22×10^{-6}
损耗因数	0.280	0.003	3.270×10^{-5}	3.270×10^{-7}	3.270×10^{-9}
载流量/A	596.71	605.52	605.66	605.66	605.66

从表3可以看出,由于金属护套和铠装的电阻率在 $10^{-8}\sim 10^{-7}\ \Omega\cdot\text{m}$ 之间,所以当半导体护层电阻率降至 $10^{-6}\ \Omega\cdot\text{m}$ 时,护层中才会有明显的环流通过,从而产生损耗使电缆的允许载流量降低。当半导体护层电阻率为 $10^{-4}\ \Omega\cdot\text{m}$ 或以上时,其上的环流很小,对载流量没有影响。

3 结论

通过实例计算与分析,得到以下结论:

- 1)提出的计算模型可以准确计算海底电缆金属护套及非磁性铠装上的环流。
- 2)通过确定电缆主绝缘上的实际电压,并考虑金属护套和铠装之间护层损耗影响,文中所提出的修正公式可以准确计算非磁性铠装海底电缆的允许载流量。
- 3)海缆线路金属护套接地方式对允许载流量影响很小,因此,实际工程中选择接地方式时可不考虑载流量因素,而是侧重于安全性、工程性、经济性角度。
- 4)从抑制泄漏电流、避免介质材料加速老化的角度出发,实际工程中选用的半导体护层材料电阻率应不小于 $10^6\ \Omega\cdot\text{m}$ 。

参考文献:

[1] 梁永春,李彦明,柴进爱,等.地下电缆群稳态温度场和载流量计算新方法[J].电工技术学报,2007,22(8):185-190.
LIANG Yongchun, LI Yanming, CHAI Jin'ai, et al. A new method to calculate the steady-state temperature field and ampacity of underground cable system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(8): 185-190.

[2] 孟凡凤,梁永春,李彦明,等.交联电缆额定载流量计算的软件实现[J].高压电器,2006,42(3):194-195.
MENG Fanfeng, LIANG Yongchun, LI Yanming, et al. Software realization of current carry capacity calculating of XLPE cables[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(3):194-195.

[3] 梁永春,孟凡凤,王正刚,等.土壤直埋电缆群额定载流量的计算[J].高压电器,2006,42(4):244-246.
LIANG Yongchun, MENG Fanfeng, WANG Zhenggang, et al. Ampacity calculation for groups of buried cable[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(4):244-246.

[4] OSAMA E G, ADEL A F. Factors affecting the sheath losses in single-core underground power cables with two-points bonding method[J]. International Journal of Electrical and Computer Engineering, 2012, 2(1):12-15.

[5] 龚永超,何旭涛,孙建生,等.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.
GONG Yongchao, HE Xutao, SUN Jiansheng, et al. The design and selection of high-voltage submarine power cable armor[J]. Electric Wire & Cable, 2011(5):19-22.

[6] 马国栋.单芯钢丝铠装电力电缆铠装结构的探讨[J].电线电缆,2002(1):17-20.
MA Guodong. Armor construction of single-core wire-armored power cables[J]. Electric Wire & Cable, 2002(1):17-20.

[7] 贾欣,喻明,王瑛,等.三回路单芯电缆护套感应电势的计算[J].高电压技术,2000,26(5):61-62.
JIA Xin, YU Ming, WANG Ying, et al. Calculation of induced voltage on single-core power cable metal sheath in tri-circuits[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(5):61-62.

[8] 欧景茹.高压单芯电缆金属护套感应电压计算及其保护方式[J].吉林电力,2001,54(3):14-16.
OU Jingru. Calculation on induction voltage of metal jacket on high-voltage and single-core cable and its protection[J]. Jilin Electric Power, 2001, 54(3):14-16.

[9] 高俊国,于平澜,李紫云,等.基于有限元法的电缆金属护套感应电压仿真分析[J].高电压技术,2014,40(3):715-720.
GAO Junguo, YU Pinglan, LI Ziyun, et al. Simulation analysis of induced voltage on metal sheath of power cable based on finite element method[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(3):715-720.

[10] 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.

[11] 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.
- [12] 刘 英. 高压电缆金属护套及铠装结构的损耗计算[J]. 电线电缆, 2013(2):1-3.
LIU Ying. Calculation of loss factors for metal sheath and armor of HV cables[J]. Electric Wire & Cable, 2013(2):1-3.
- [13] 牛海清, 王晓兵, 张 尧, 等. 基于迭代法的单芯电缆载流量的研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(11):41-44.
NIU Haiqing, WANG Xiaobing, ZHANG Yao, et al. Study of ampacity of single-core cable based on iterative method[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(11):41-44.
- [14] 周志成, 何俊佳, 陈俊武, 等. 单芯XLPE电缆金属护套绝缘在线监测研究[J]. 高压电器, 2006, 42(2):90-92.
ZHOU Zhicheng, HE Junjia, CHEN Junwu, et al. Research on the insulation on-line monitoring of single-core XPLE cable metal sheath[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(2):90-92.
- [15] 马宏忠, 倪欣荣, 黎腊红, 等. 高压电力电缆护层感应电压的补偿研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(3):148-151.
MA Hongzhong, NI Xinrong, LI Lahong, et al. Research on compensation of induced voltage in the metal shield of the high-voltage power cable[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(3):148-151.
- [16] 郑新龙, 张 磊, 宣耀伟, 等. 降低单芯海底电力电缆铠装损耗的试验和简易计算[J]. 电线电缆, 2014(2):32-35.
ZHENG Xinlong, ZHANG Lei, XUAN Yaowei, et al. Test and simple calculation for reducing the armor loss of submarine power cable[J]. Electric Wire & Cable, 2014(2):32-35.
- [17] 邱 昊, 郑志源, 王婧倩, 等. 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, et al. Research on sheath grounding method of AC single core submarine cable[J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(6):62-67.
- [18] 马国栋. 电线电缆载流量[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
MA Guodong. Ampacity of electric wires and power cables[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
- [19] Electric cables-calculation of the current rating, Part 1-1: Current rating equations(100 % load factor)and calculation of losses-General: IEC 60287-1-1:2006[S]. 2006.
- [20] 刘子玉. 电气绝缘结构设计原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.
LIU Ziyu. Design principle of electrical insulation structures[M]. Beijing: Machine Industry Press, 1981.

刘 英(1976—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为绝缘结构设计和电力电缆工程计算。

肖 阳(1990—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电缆绝缘电老化和电缆工程计算。

苏 宇(1987—), 男, 博士, 主要研究方向为高压交联聚乙烯电缆绝缘及附件电老化。

姜 爽(1982—), 女, 工程师, 主要研究方向为输变电线路的运维及检修技术。

(上接第55页)

- RAN Xuebin, LU Ci, CHENG Li, et al. Fracture fault analysis and aging mechanism study for 500 kV composite insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(9):35-43.
- [23] 李唐兵, 陈国锋, 饶斌斌, 等. 一种改进的劣化盘形悬式瓷绝缘子红外热像诊断方法[J]. 电瓷避雷器, 2014(6): 8-13.
LI Tangbing, CHEN Guofeng, RAO Binbin, et al. A improved method of detecting deterioration insulator based on infrared thermal image[J]. Insulators and Surge Arresters, 2014(6):8-13.
- [24] 赵留学, 蓝 骞, 雷 蕾. 复合绝缘子劣化性能研究[J]. 电气应用, 2015, 34(s2):441-444.
ZHAO Liuxue, LAN Qian, LEI Lei. Study on degradation performance of composite insulator[J]. Electrotechnical Application, 2015, 34(s2):441-444.
- 王力农(1976—), 男, 工学博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事高电压绝缘技术、输电线路运行维护和带电作业技术等研究工作。
- 李小春(1993—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为高电压与绝缘技术。