

海底电力电缆过载能力分析及其试验验证

张磊^{1,2}, 俞恩科¹, 张占奎³, 李琰³, 乐彦杰^{1,2}, 敬强^{1,2}

(1. 国网浙江省电力公司舟山供电公司, 浙江 舟山 316021; 2. 浙江舟山海洋输电研究院有限公司, 浙江 舟山 316021;

3. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 基于海底电缆导体的温升原理, 对其过载电流进行理论分析, 并利用海底电缆热循环试验系统对典型 110 kV 海底电缆进行过载试验并进行数据拟合、分析, 证明了对于某特定海底电缆在运行中的过载能力由海底电缆导体初始温度和过载时间决定。利用 MATLAB 函数曲线分析这 2 个因素对海底电缆过载能力的影响, 得出其随着导体初始温度和过载时间的增大而减小的结论。结合 2 条海底电缆短时过载导体温升曲线的比较, 提出一种短时过载情况下导体温升的简易算法, 利用试验数据验证了该方法的可行性, 为实际生产提供了参考。

关键词: 海底电缆; 短时过载; 热循环试验; 导体温升

中图分类号: TM 247

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.01.033

0 引言

海洋经济的快速发展、海岛用电量的增大对输电海底电力电缆(下文简称海缆)的输送容量和短时过载能力提出了更高要求。当遇到海缆线路故障抢修或者紧急供电等需求时, 大部分海缆线路都存在输电瓶颈问题, 往往还会出现拉闸限电现象。然而敷设一条新的海缆线路又受到周期较长、航道限制、资金和路由空间有限等因素的制约。因此, 从可持续发展和节能减排的角度出发, 为了解决供电容量需求与新敷设海缆线路困难的矛盾, 应将工作重心转移到挖掘现有海缆的载流量潜力上, 短时增加海缆的载流量^[1]。

海缆在运行状态下时, 导体的温度是确定海缆是否达到载流量的依据^[2-3], 而海缆内部各层均存在一定的热容, 导体温度的响应速度严重滞后损耗变化速度^[4-5]。实际上, 海缆很少长期运行在恒定负载下, 了解海缆导体温度在负载变化情况下的动态响应过程更为重要。考虑负载随时间的变化, 可对海缆暂态载流量进行分析。

电缆具有短时超出容许稳态载流量的应急过载能力, 美、苏、日等国家早有研究涉及^[6-7], 国际大电网会议和国际电工委员会早在 20 世纪七八十年代就有相关标准和论述^[8-10], 国内也有相关技术总结^[7]。然而国内对海缆过载能力的研究仅停留在理论分析阶段, 并未对实际海缆进行过载试验。本文通过岸滩环境下的热循环试验系统对一段实际的 110 kV 海缆进行过载试验, 通过理论分析结合数据比对研究海缆的过载能力; 同时提出一种海缆短时过载情况下导体温升的简易算法, 为海缆输电工程提供参考。

1 海缆导体温升原理

实际运行中, 当电缆负荷电流突然发生变化时,

由于电缆内部热容的存在, 温度不能发生突变, 而是随时间逐渐变化, 经过一段过程后达到稳态。在达到稳态前, 电缆处于非稳态温度场中。通常采用热时间常数反映电缆导体温度变化的快慢。一般而言, 电缆系统可最终等值为热阻

R 和热容 C 的串联^[11-12], 如图 1 所示。图 1 中, 系统对阶跃输入的响应为指数曲线, 因此根据电缆系统的热时间常数就可以得到导体温度响应的表达式, 从而计算导体温度。

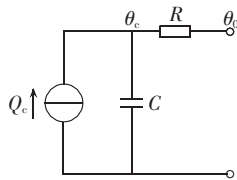


图 1 一阶 RC 暂态热路
Fig.1 First-order RC transient thermal circuit

图 1 中, Q_c 为导体产生的热流; θ_c 为待求导体温度; θ_0 为已知环境温度。则有以下热路方程:

$$Q_c = C \frac{d\theta_c}{dt} + \frac{\theta_c - \theta_0}{R} \quad (1)$$

式(1)的通解为:

$$\theta_c = Q_c R + \theta_0 + A e^{-t/(RC)} \quad (2)$$

结合初始条件为 $t=0$ 时 $\theta_c = \theta_0$, 可得式(1)的解如下:

$$\theta_c = \theta_0 + Q_c R [1 - e^{-t/(RC)}] \quad (3)$$

其中, $Q_c R [1 - e^{-t/(RC)}]$ 即为海缆导体的温升。

2 海缆短时过载能力初步分析

假设在海缆某一稳态运行工况下, 突然对其施加阶跃电流, 由式(3)可知:

$$\Delta\theta = \Delta Q_c R (1 - e^{-t_m/\tau}) \quad (4)$$

其中, $\Delta\theta$ 为导体温升; ΔQ_c 为导体产生的热流差; t_m 为过载时间; τ 为热时间常数。分析海缆短时过载温升原理, 如图 2 所示。

图 2 中, 曲线 1 为导体电流, 曲线 2 为导体温度; 初始状态下海缆导体电流为 I_1 , 海缆导体温度为 θ_1 , 此时海缆处于热稳定状态。在 t_1 时刻, 导体产生阶跃

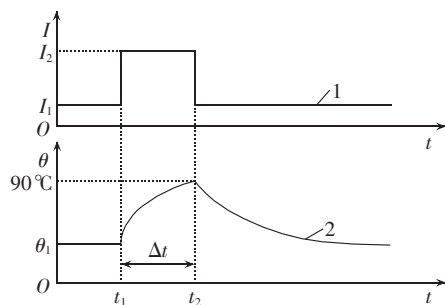


图 2 海缆短时过载温升示意图

Fig.2 Schematic diagram of short-time overload temperature of submarine power cable

电流,海缆导体电流上升至 I_2 ,海缆导体温度随之以指数形式响应;在 t_2 时刻,海缆导体温度上升至最高允许值 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ (未达到热稳定状态),海缆导体电流恢复至初始值,此后海缆导体温度缓慢恢复至初始值。由此可知,在 Δt 时间内,该海缆可上升的短时过载电流为 I_2-I_1 。海缆短时过载电流值由海缆导体初始温度和过载时间决定,其随着导体初始温度的增大而减小,随着过载时间的增大而减小。

由于海缆规格、敷设环境、海缆部位的不同,对应的温升曲线皆不相同,为了对海缆短时过载能力进行进一步的分析,本文以某一在水中敷设的实际海缆的导体温升为例进行试验研究,以期得出其研究方法和一般规律。

3 典型海缆温升试验

本文基于岸滩环境下海缆热循环试验系统^[12],对一条长约 104 m、铝合金铠装、型号为 HYJQF91 64/110 1*500(“9”自定义为铝合金丝)的海缆进行稳态温升和短时过载试验。试验原理图如图 3 所示,图中铅包铠装单端接地,通过水中的 1 号通道进行温度采集。由于热循环试验系统容量有限,假定海缆初始冷状态为稳定状态,初始施加的阶跃电流为过载阶跃电流。

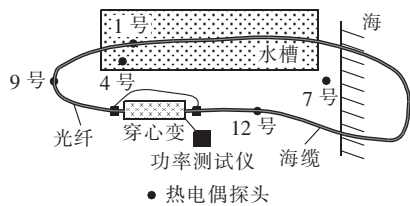


图 3 试验系统示意图

Fig.3 Schematic diagram of test system

对该海缆分别施加 700 A、800 A 及 900 A 的导体电流且通流 7 h 以上,整理试验数据,得到海缆温度曲线如图 4 所示。

上述试验可以看作是初始电流值均为 0 的温升试验,则海缆的温升公式为:

$$\Delta\theta=(I_2^2-I_1^2)r_cR(1-e^{-t_m/\tau}) \tag{5}$$

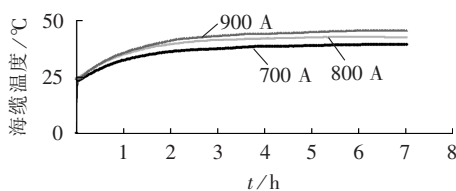


图 4 不同导体电流下的海缆温度曲线

Fig.4 Curves of submarine power cable temperature under different conductor currents

其中, r_c 为导体电阻。假设 r_cR 和 τ 均为常数,利用相关软件对试验数据进行拟合,800 A 导体电流下的拟合曲线如图 5 所示,可得:

$$r_cR=2.810\times10^{-5}$$
$$\tau=1.237$$

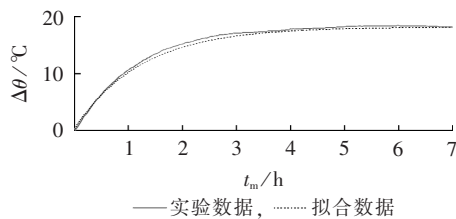


图 5 施加 800 A 导体电流时的温升数据拟合曲线

Fig.5 Fitting curve of temperature rising data under 800 A conductor current

则该段被试验海缆在铅包铠装单端接地工况下在水中敷设时的导体温升公式为:

$$\Delta\theta=2.810\times10^{-5}\times(I_2^2-I_1^2)(1-e^{-t_m/1.237}) \tag{6}$$

本文试验选取的海缆型号与实际生产运行的 110 kV 海缆基本一致,因此试验数据具有普遍性;海缆导体的温升原理遵循一阶 RC 暂态热路,环境、海缆的改变只影响温升式(5)中的参量 r_cR 和 τ ,其温升本质机理不会改变,因此本文的试验数据及后续分析能够反映一般海缆的温升规律。

4 典型海缆过载能力分析

4.1 过载时长对过载电流值的影响

假设在夏季最高环境温度 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情况下,被试海缆初始导体电流为 1000 A,则根据式(6),其稳定运行温升为 $28.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,达到热稳定后,其导体温度为 $68.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,距离导体最高允许温度 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温升空间为 $21.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。因此假设在过载电流 I_2 下,经过 t_m 的过载时间后,导体电流可达到 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$,则有:

$$2.810\times10^{-5}\times[(1000+I_m)^2-1000^2](1-e^{-t_m/1.237})=21.9 \tag{7}$$

其中, I_m 为电流过载量。假设过载时间无限长,则计算可得 $I_m=334\text{ A}$ 。利用 MATLAB 软件对式(7)进行曲线求解,结果如图 6 所示。

图 6 所示的函数曲线类似于双曲线的一侧。由图 6 可知,随着过载时间的延长,过载电流迅速减小,并无限趋近于最小过载电流值 334 A;反之,随着

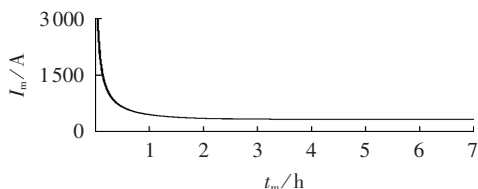


图 6 初始导体电流为 1000 A 时过载电流关于过载时间的函数曲线

Fig.6 Function curve of overload current vs. overload time under 1000 A initial conductor current

过载时间的缩短,过载电流迅速增大,过载时间无限小时过载电流可为无限大。

同理,若初始导体电流为 800 A,则海缆稳定运行温度达 58℃,距 90℃ 还有 32℃ 温升余量,其最小过载电流值为 534 A(过载时间无限大时)。若初始导体电流为 1200 A,则海缆稳定运行温度达 80.5℃,距 90℃ 还有 9.5℃ 的温升余量,其最小过载电流值为 134 A(过载时间无限大时)。

因此,可以得到不同初始电流下的过载电流关于过载时间的函数曲线簇,如图 7 所示。

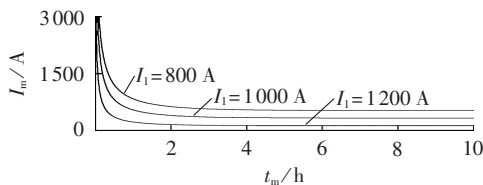


图 7 不同初始导体电流下过载电流关于过载时间的函数曲线簇

Fig.7 Function curves of overload current vs. overload time under different initial conductor currents

由图 7 可知:各初始导体电流都有对应的最小过载电流值,且 0.5 h 内具有较高过载能力,0.5 h 后迅速趋于最小过载电流值;随着初始导体电流值的增大,函数曲线随之下移,相同过载时间对应的过载电流减小,相同过载电流对应的过载时间缩短;其他规律一致。

4.2 初始导体电流对过载电流值的影响

在夏季最高环境温度 40℃ 情况下,可计算得到被试海缆的载流量为 1334 A。若初始电流为 1334 A,则其过载电流为 0,因此进行分析时初始电流始终小于 1334 A。取 3 种典型过载时间,即 0.1 h、0.5 h、3 h 分别进行分析。

设海缆导体初始电流为 I_1 ,则其稳定运行时导体温度为 $2.810 \times 10^{-5} \times I_1^2 + 40$,若该温度小于 90℃,则还有 $50 - 2.810 \times 10^{-5} \times I_1^2$ 的温升空间,因此有:

$$50 - 2.810 \times 10^{-5} \times I_1^2 = 2.810 \times 10^{-5} \times [(I_1 + I_m)^2 - I_1^2] \times (1 - e^{-t_m/1.237}) \quad (8)$$

当 $t_m = 0.1$ h 时,设 $I_1 = 0$,则计算可得 $I_m = 4786.7$ A。利用 MATLAB 画出式(8)所示的函数曲线见图 8。

图 8 所示的函数曲线类似于抛物线。由图 8 可

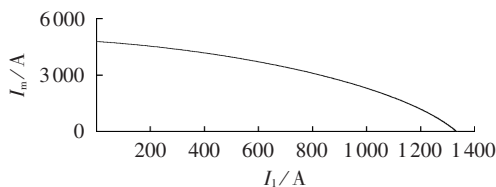


图 8 过载时间为 0.1 h 时过载电流关于初始导体电流的函数曲线

Fig.8 Function curve of overload current vs. initial conductor current at 0.1 h overload time

知,在过载时间为 0.1 h 时,过载电流是关于初始导体电流的递减函数,在初始导体电流为 0 时有最高过载电流值 4786.7 A,在初始导体电流达到最大值 1334 A 时,过载电流为 0。

同理,当 $t_m = 0.5$ h 时,设 $I_1 = 0$,则计算可得 $I_2 = 2313.3$ A;当 $t_m = 3$ h 时,设 $I_1 = 0$,计算可得 $I_2 = 1397.2$ A,可得到图 9 所示的函数曲线簇。

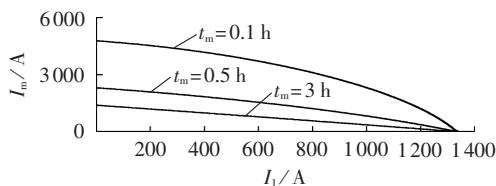


图 9 不同过载时间下过载电流关于初始导体电流的函数曲线簇

Fig.9 Function curve of overload current vs. initial conductor current at different overload time

由图 9 可知:每个过载时间都有对应的最高过载电流值(初始电流为 0),且过载电流随着初始电流的增大而减小;函数曲线随着过载时间的延长而下移;相同初始电流对应的过载电流减小,相同过载电流对应的初始电流也减小。

4.3 综合影响

根据式(8)可知,过载电流 I_m 由初始导体电流 I_1 和过载时间 t_m 这 2 个因素决定,则有:

$$50 - 2.810 \times 10^{-5} \times I_1^2 = 2.810 \times 10^{-5} \times [(I_m + I_1)^2 - I_1^2] \times (1 - e^{-t_m/1.237}) \quad (9)$$

利用 MATLAB 画出式(9)所示的三维效果图如图 10 所示。

图 10 也证实了海缆短时过载电流值受海缆导

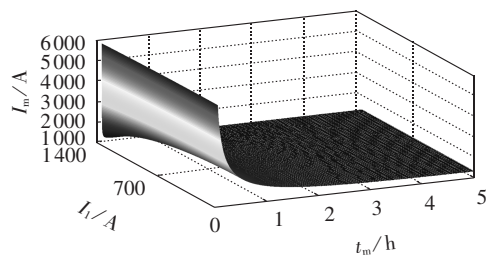


图 10 过载电流关于过载时间和初始导体电流的三维函数曲线

Fig.10 Three-dimensional function curve of overcurrent vs. overload time and initial conductor current

体初始稳态温度和过载时间影响,随着导体初始稳态温度的增大而减小,随着过载时间的增大而减小。

5 海缆短时过载简易算法

对于某一运行中的海缆线路,其在短时过载情况下的导体温度是表征该海缆过载能力的重要参数。目前导体温度的暂态计算方法有有限差分法、有限元法、边界元法、热路法等^[13-15],这些方法非常复杂、实用性不强,为此本文探索短时过载情况下海缆导体温升的简易算法。

假设环境温度为 θ_0 ,海缆导体达到 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的载流量为 I_{cont} ,则有:

$$90=\theta_0+f(I_{\text{cont}}) \tag{10}$$

其中, $f(I_{\text{cont}})$ 为导体电流为 I_{cont} 时导体的稳态温升。

当相同的海缆运行在 75 % 的额定载流量情况下 ($I_{75\%}=0.75 I_{\text{cont}}$) 时,海缆导体的稳态温度 θ_i 可以表示为:

$$\theta_i=\theta_0+f(I_{75\%}) \tag{11}$$

此时导体的稳态温度小于最高温度 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$,两者差值为 $90-\theta_i$ 。此时施加过载电流 I_{ol} ,通流时间为 10 min ,假设短时过载情况下海缆处于准绝热状态,即多余的热量仅用于加热导体,通过绝缘散发的热量保持在 $I_{75\%}$ 时的水平,则有:

$$(I_{\text{ol}}^2 R_c-I_{75\%}^2 R_c)\times 600=c_p m_{\text{Cu}}(\theta_{\text{ol}}-\theta_i) \tag{12}$$

其中, $I_{\text{ol}}^2 R_c-I_{75\%}^2 R_c$ 为导体损耗功率和通过绝缘的功率流的差值,乘以过载时间 600 s 后即加热导体外加的能量; $c_p=393\text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$,为铜的比热; m_{Cu} 为单位长度铜导体的质量; θ_{ol} 为 10 min 后导体上升到的温度,假设 $\theta_{\text{ol}}=90\text{ }^{\circ}\text{C}$,则此时的 I_{ol} 为 10 min 最高过载电流。

因此,对于很短时间内的过载,可以认为海缆导体与绝缘层界面处于绝热状态,即该段时间内导体产生的多余热量完全用于导体温度的升高,未通过绝缘向外散热。根据式(12)得出:

$$\Delta Q t_m=c_p m_{\text{Cu}} \Delta \theta \tag{13}$$

$$\Delta \theta=\frac{\Delta Q}{c_p m_{\text{Cu}}} t_m \tag{14}$$

其中, ΔQ 为导体过载状态与初始状态的热量差值; $\Delta \theta$ 为过载结束后的导体温升。可以认为,在很短时间内可以用式(14)代替式(4),如图 11 所示,当过载时间 t_m 很小时,2 条函数曲线基本重合。对比式(14)

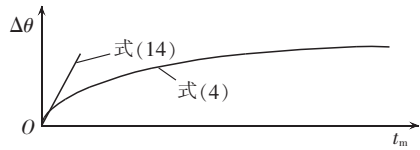


图 11 2 条函数曲线示意图

Fig.11 Schematic diagram of two function curves

和式(4)可知,式(4)中的热阻 R 和时间参数 τ 受外界敷设环境影响较大,难以测量;而采用式(14)所示的简易计算方法则回避了这些参数,具有较强的工程实用性。

为了验证上述理论,对被试海缆进行短时过载试验。将式(14)的计算结果与试验数据进行比较,结果如表 1 所示。根据试验海缆的规格计算可得 $r_c=0.0389\text{ }\Omega/\text{m}$, $m_{\text{Cu}}=4.94\text{ kg}/\text{m}$, $c_p=393\text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

表 1 不同导体电流温升试验数值与简易计算值比较

Table 1 Comparison between testing value and simply calculative value of conductor temperature rising under different conductor currents

I/A	t_m/h	$\Delta\theta/\text{K}$		误差/%
		试验结果	计算结果	
700	0	0	0	0
	120	1.3	1.18	9.2
	240	1.9	2.36	24.2
	360	2.1	3.53	68.1
800	0	0	0	0
	120	1.4	1.54	10.0
	240	2.0	3.08	54.0
	360	2.4	4.62	92.5
900	0	0	0	0
	120	1.9	1.95	2.6
	240	2.5	3.90	56.0
	360	3.1	5.84	88.4
1000	0	0	0	0
	120	2.1	2.40	14.3
	240	4.5	4.81	6.9
	360	5.9	7.21	22.2
1200	0	0	0	0
	120	4.8	5.41	12.7
	240	10.7	10.82	1.1
	360	11.8	16.23	37.5

通过试验可以得出:被试海缆在 4 min 内的短时过载情况下,其试验温升与计算温升之间的误差可以接受,即可以利用式(14)计算海缆导体的温升。在实际运行中,若发生短时(不超过 10 min)海缆线路短路,可以用本文的简易算法预测海缆导体温度。

6 结论

本文对海缆的短时过载电流进行理论分析计算和热循环试验验证。研究结果表明,过载电流值受海缆导体初始温度和过载时间影响,随着导体初始温度增大而减小,随着过载时间增大而减小。

在海缆过载初始时间段,用简化后的温升线性曲线代替原始指数曲线,可以得到海缆短时过载温升的简易计算方法,该计算方法回避了难以测量的热阻、热容等参数,具有较强的工程实用性。利用热循环试验系统,证明了在较短时间(被试海缆为 4 min),该简易算法计算结果的误差不大。

参考文献:

- [1] 任丽佳,盛戈皞,曾奕,等. 动态提高输电线路输送容量技术的导线温度模型[J]. 电力系统自动化,2009,33(5):40-44.
REN Lijia,SHENG Gehao,ZENG Yi,et al. A conductor temperature model based on dynamic line rating technology[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(5):40-44.
- [2] ANDERS G J. Rating of electric power cables; ampacity computations for transmission, distributions and industrial applications [M]. New York, USA: McGraw Hill Press, 1997: 45-46.
- [3] 马国栋. 电线电缆载流量[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003: 21-22.
- [4] 徐天哲,王乐天,高洪学,等. 电力电缆接头温度场分布的理论研究[J]. 电力系统保护与控制,2008,36(24):4-7.
XU Tianzhe,WANG Letian,GAO Hongxue,et al. Theoretical study on temperature filed distribution of power cable junction [J]. Power System Protection and Control,2008,36(24):4-7.
- [5] THOMAS Worzky. Submarine power cables: design, installation, repair, environmental aspects [M]. Beijing, China: China Machine Press, 2011: 50-51.
- [6] NEHER J H, MCGRATH M H. The calculation of the temperature rise and load capability of cable system [J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, 1957, 76(11): 141-145.
- [7] 李熙谋. 电力电缆短时容许过载能力及其标准算法[J]. 电力设备, 2001, 2(3): 59-60.
LI Ximou. Power cable permissible short duration overload capacity and its standard algorithm [J]. Electrical Equipment, 2001, 2(3): 59-60.
- [8] CIGRE WG 21-02. Emergency rating and short duration response to a step function [J]. Electra, 1976, 44: 563-565.
- [9] IEC/TC 20. Calculation of the cyclic and emergency current rating of cables, part 1: cyclic rating factor for cables up to and including 18/30(36) kV; IEC60853-1-1985[S]. Geneva, Switzerland: IEC, 1985.
- [10] IEC/TC 20. Calculation of the cyclic and emergency current rating of cables, part 2: cyclic rating of cables greater than 18/30(36) kV and emergency ratings for cables of all voltages: IEC 60853-2-1989[S]. Geneva, Switzerland: IEC, 1989.
- [11] VIKHRENKO V S. Heat transfer-engineering applications [M]. London, UK: Intech Publisher, 2011: 206-208.
- [12] 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): 2717-2718.
ZHANG Lei, YU Enke, CHEN Guozhi, et al. Two methods for upgrading ampacity of submarine cables and their experimental study [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2717-2718.
- [13] 刘刚,雷成华,刘毅刚. 根据电缆表面温度推算导体温度的热路简化模型暂态误差分析[J]. 电网技术, 2011, 35(4): 213-214.
LIU Gang, LEI Chenghua, LIU Yigang. Analysis on transient error of simplified thermal circuit model for calculating conductor temperature by cable surface temperature [J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 213-214.
- [14] 梁永春,李彦明,李延沐,等. 地下电缆群暂态温度场和短时载流量数值计算方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(8): 39-40.
LIANG Yongchun, LI Yanming, LI Yanmu, et al. Numerical method to calculate the transient temperature field and short-term ampacity of underground cable system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(8): 39-40.
- [15] 吕安强,李永倩,李静,等. 光电复合海缆中光纤与导体温度关系的有限元分析方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 93-95.
LÜ Anqiang, LI Yongqian, LI Jing, et al. Finite element analysis method for temperature relationship between conductor and optical fiber in optic-electric composite submarine cable [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 93-95.

作者简介:



张磊(1984—),男,浙江宁波人,工程师,硕士,主要从事海洋输电技术研究工作(E-mail: hysdzl@aliyun.com)。

Overload capacity analysis of submarine cable and its experimental verification

ZHANG Lei^{1,2}, YU Enke¹, ZHANG Zhankui³, LI Yan³, LE Yanjie^{1,2}, JING Qiang^{1,2}

(1. Zhoushan Electric Power Supply Company of State Grid Zhejiang Power Corporation, Zhoushan 316021, China;

2. Zhejiang Zhoushan Marine Power Research Institute Co., Ltd., Zhoushan 316021, China;

3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Based on the conductor temperature rise principle of submarine power cable, its overload current is theoretically analyzed. Overload experiment of a typical 110 kV submarine power cable is carried out with thermal cycling test system, and the experimental data is fitted and analyzed, which proves that the overload capacity of a particular submarine cable in operation is determined by the initial conductor temperature and overload time. The impact of the two factors on submarine power cable's overload capacity is analyzed with MATLAB function curves, which obtains the conclusion that the overload capacity decreases along with the increase of initial conductor temperature and overload time. With the comparison between two conductor temperature rising curves during short-time overload, a simple calculation algorithm of conductor temperature rising during short-time overload is proposed, the feasibility of which is verified by testing data. The proposed algorithm provides a reference for the actual production.

Key words: submarine power cable; short-time overload; thermal cycling test; conductor temperature rise