

# 500 kV 交流海底电缆金属护层冲击感应电压研究

吴高波, 岳浩, 李健, 罗楚军, 吴庆华

(中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司, 湖北 武汉 430071)

**摘要:**金属护层冲击感应电压是高电压、大长度海底电缆安全运行的重要控制条件。采用电磁暂态仿真软件PSCAD/EMTDC,建立了海底电缆金属护层冲击感应电压仿真模型,对电缆长度、侵入波波形、电缆结构参数等对护层冲击感应电压的影响进行了计算分析,并研究分析了金属护层与铠装层分段短接和采用半导体外护套两种方式对限制金属护层冲击感应电压的作用,研究表明:电缆长度、侵入波波形和电缆结构参数对金属护层冲击感应电压有较大的影响;金属护层冲击感应电压随着分段短接点的个数和外护套电导率的增加而减小。

**关键词:**海底电缆;金属护层;铠装层;冲击感应电压;分段短接;半导体外护套

**中图分类号:**TM 757 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2022)02-0043-05

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20220209

## Research on Impulse Induced Voltage of Metal Sheath of 500 kV AC Submarine Cable

WU Gaobo, YUE Hao, LI Jian, LUO Chujun, WU Qinghua

(Central Southern China Electric Power Design Institute Co., Ltd. of CPECC, Wuhan 430071, Hubei, China)

**Abstract:** The impulse induced voltage between sheath and armour is the control condition to verify the safe operation of submarine cable with high voltage and large length. The simulation models for impulse induced voltage are built in PSCAD/EMTP. The influence of cable length, intruding surge waveform and cable structure parameters on the induced voltage between sheath and armour are calculated and analyzed. The effects of bondings at intervals between sheath and armour and using a semiconductive oversheath on limiting the induced voltage are analyzed. The research results show that the cable length, intruding surge waveform and cable structure parameters have an apparent influence on the induced voltage between sheath and armour, and the induced voltage decreases with the increase of the number of bondings and the increase of the conductivity of semiconductive oversheath.

**Key words:** submarine cable; metal sheath; armour; impulse induced voltage; bondings at intervals; semiconductive oversheath

## 0 引言

随着中国经济发展和海洋战略的全面实施,海底电缆输电工程呈现快速发展的趋势,高电压、大长度海底电缆是研究的重要方向之一<sup>[1-7]</sup>。目前,中国已建成投运海南联网500 kV海底电缆工程(电缆长度约30 km)和镇海—舟山500 kV海底电缆工程(电缆长度约17 km)。

在海底电缆结构中,主绝缘层外通常设置有金

属护层和铠装层(有时统称为金属护层),以及两者之间的外护套。由于海底电缆一般较长且敷设于海底,无法像陆地电缆一样采取分段交叉互联的接地方式。为了限制金属护层的感应电压,海底电缆通常都采用金属护层两端直接接地的方式<sup>[6]</sup>。但对于大长度的海底电缆,仍需对金属护层的感应电压进行计算研究,以确保金属护层在不同工况下的工频和冲击感应电压满足限值要求。

目前,对陆地电缆金属护层感应电压的研究较多<sup>[8-15]</sup>,海底电缆的相关研究还较少。文献[16]提

出了半无限长海底电缆线芯承受阶跃型过电压侵入波时,随距离变化的金属护层感应电压计算公式,即工程中常用的电容耦合法公式<sup>[17]</sup>。文献[18]研究表明,在金属护层两端直接接地方式下,金属护层工频感应电压一般较小,易满足限值要求;冲击感应电压则可能超过外护套的绝缘耐受水平,是海底电缆安全运行的控制因素。需采用电容耦合法进行验算,必要时采取金属护层与铠装层分段短接或采用半导体护套的方式以降低金属护层的冲击感应电压。电容耦合法虽然应用较为方便,但由于其是基于半无限长海缆推导的,计算结果偏于保守,且无法考虑侵入波波形的影响<sup>[19]</sup>。文献[20]应用 PSCAD/EMTDC 软件,对 500 kV 交联聚乙烯(cross linked polyethylene, XLPE)海底电缆在短路、操作和雷击工况下的主绝缘暂态过电压及护层感应电压进行了计算,并分析了中间短接点对护层感应电压的影响,但暂未对护层冲击感应电压进行系统分析。

下面采用电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC,对 500 kV 交流海底电缆金属护层冲击感应电压进行仿真计算,对冲击感应电压的影响因素进行分析,并对感应电压限值措施进行研究,结果可为海底电缆工程的设计提供参考。

## 1 金属护层冲击感应电压计算

### 1.1 电缆模型

镇海—舟山 500 kV 输电线路由海底电缆线路和两侧的架空线路组成,其中海底电缆线路长度约 17 km,两侧架空线路长度分别约 2.5 km 和 33 km。架空线路采用  $4 \text{ mm}^2 \times 300 \text{ mm}^2$  截面导线,海底电缆采用单芯  $1800 \text{ mm}^2$  截面 XLPE。海底电缆两侧终端处均安装线路避雷器(Y20W-444/1106),金属护层和铠装层采用两端互联直接接地方式。

镇海—舟山 500 kV 输电线路海底电缆的产品结构如图 1 所示。

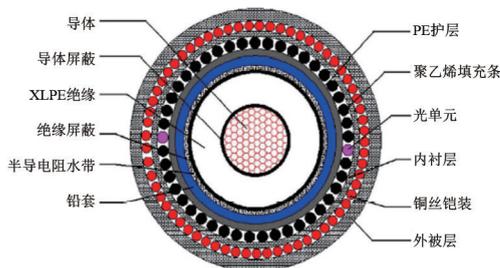


图 1 500 kV 交联海底电缆结构

电缆模型各层结构参数如表 1 所示。

表 1 电缆模型各层结构参数

序号	层名称	外径/mm
1	导体(铜)	50.2
2	绝缘(XLPE)	120.4
3	金属护层(铅套)	134.6
4	外护套(PE护层)	157.8
5	铠装(铜丝)	169.8
6	外被层	180.0

### 1.2 冲击电压侵入波

对于架空线—海底电缆混合系统,海底电缆主绝缘的冲击过电压幅值与系统参数、架空线/海底电缆长度、故障类型或雷击位置、避雷器保护水平等有关。为了便于分析,进行金属护层冲击感应电压计算时,侵入波幅值可取避雷器残压值<sup>[12]</sup>。而在工程设计时,为了偏严格考虑,可将侵入波幅值取为电缆主绝缘冲击耐受电压值的 0.85 倍<sup>[18]</sup>。仿真时参考工程设计习惯,采用  $1.2 \mu\text{s}/50 \mu\text{s}$  的标准雷电冲击波,幅值取为  $1550 \times 0.85 = 1318 \text{ kV}$ 。此外,在分析侵入波波形的影响时,亦对  $250 \mu\text{s}/2500 \mu\text{s}$  的标准操作冲击波进行仿真计算。

### 1.3 金属护层冲击感应电压计算

镇海—舟山 500 kV 线路工程海底电缆长度约 17 km,雷电侵入波沿架空线侵入电缆导体,计算得到海底电缆沿线距首端(即雷电波侵入端)不同距离处的金属护层冲击感应电压如图 2 所示。

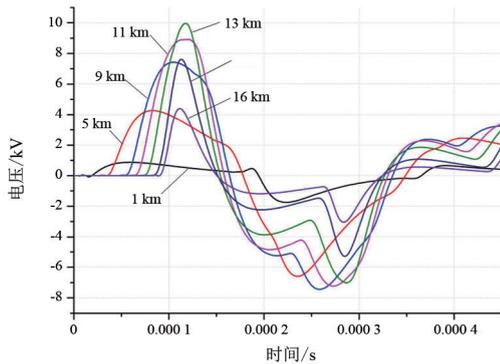


图 2 舟山联网工程海底电缆不同位置处的护层冲击感应电压

由图 2 可以看出,由于海底电缆金属护层两端直接接地,其冲击感应电压最大值出现在距首端约 13 km 处,幅值为 9.96 kV。

## 2 冲击感应电压的影响因素分析

### 2.1 电缆长度

电缆长度是海底电缆输电工程的重要参数之

一。保持其他条件不变,改变电缆长度,对海底电缆沿线的金属护层冲击感应电压最大值进行仿真计算。同时,亦采用电容耦合法进行计算,计算公式为

$$U_{23} = U_{tr} \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{23}} [1 - e^{(-\beta x)}]$$

$$\beta = vR_s(C_{12} + C_{23})/2 \quad (1)$$

式中: $U_{23}$ 为金属护层与铠装层间的电压; $U_{tr}$ 为过电压侵入波的幅值; $C_{12}$ 为导体对金属护层的电容; $C_{23}$ 为金属护层对铠装层的电容; $x$ 为电缆长度; $v$ 为过电压侵入波的波速; $R_s$ 为金属护层的电阻。

计算结果如表2所示。

表2 不同长度海底电缆金属护层冲击感应电压

电缆长度/km	金属护层冲击感应电压/kV	
	仿真计算	电容耦合法计算
10	5.1	27.3
15	8.6	39.7
20	11.9	51.3
25	15.0	62.1
30	17.8	72.3

可见,随着电缆长度的增加,金属护层冲击感应电压增大。此外,电容耦合法的计算结果明显大于仿真计算结果。这主要是因为电容耦合法计算时认为波的传播距离即为电缆总长度,感应电压随电缆长度增加而增大;而仿真计算时海底电缆金属护层两端直接接地,感应电压受到接地点的限制且感应产生的电磁波会在电缆末端发生反射。

对于500 kV海底电缆,绝缘护套的冲击耐受电压若取72.5 kV<sup>[21]</sup>,并考虑1.4的安全系数<sup>[22]</sup>,则要求金属护层冲击感应电压不应大于51.7 kV。显然,若按电容耦合法的计算结果,当电缆长度达到20 km时,金属护层冲击感应电压已十分接近限值。而仿真计算结果表明,电缆长度为30 km时仍有较大的裕度。

## 2.2 侵入波波形

由于电容耦合法不能考虑侵入波波形的影响,工程中一般认为金属护层冲击感应电压由幅值较高的雷电侵入波控制。为了研究侵入波波形的影响,对标准操作冲击波进行仿真计算,计算时幅值与雷电冲击波取值一致(即1318 kV),电缆长度亦取17 km,计算结果如图3所示。

由图3可以看出,在相同的侵入波幅值和电缆长度下,金属护层操作冲击感应电压的最大值为7.7 kV,小于雷电冲击感应电压,且最大值出现在距电缆首

端约9 km处。可见,侵入波波形对金属护层冲击感应电压的波形和幅值均有影响。操作冲击侵入波的陡度较小,其护层冲击感应电压也较小。

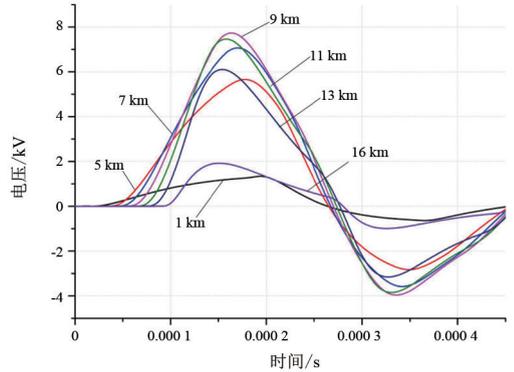


图3 海底电缆金属护层操作冲击感应电压

## 2.3 电缆结构参数

目前,中国投运的500 kV海底电缆工程主要有海南联网工程和镇海—舟山工程。其中,前者采用充油海底电缆,后者采用XLPE海底电缆。为了研究不同电缆结构参数对护层冲击感应电压的影响,采用海南联网工程的电缆结构(如表3所示),电缆长度亦取17 km,仿真得到海底电缆沿线的金属护层冲击感应电压,如图4所示。

表3 电缆模型各层结构参数

序号	层名称	外径/mm
1	油道	30.00
2	导体(铜)	44.60
3	绝缘(牛皮纸)	104.50
4	金属护层(合金铝)	113.30
5	外护套(PE)	125.18
6	铠装(铜)	130.70
7	外被层	138.70

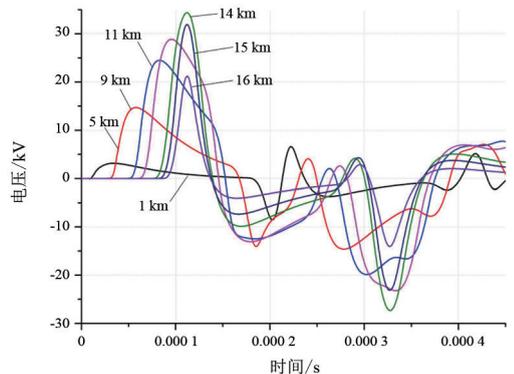


图4 海南联网工程海底电缆不同位置处的护层冲击感应电压

对比图4和图2可以看出,在长度相同的情况

下,采用海南联网工程的电缆参数,其金属护层冲击感应电压明显增大,最大值出现在距首端约 14 km 处,幅值为 34.4 kV。可见,电缆结构对金属护层冲击感应电压的影响较为显著。在工程设计时,应根据实际电缆结构参数和长度进行计算,以确定其金属护层冲击感应电压是否超过限值要求。

### 3 冲击感应电压限制措施

与陆地电缆不同,当海底电缆长度较长,金属护层感应电压超过限值要求时,通常需在产品生产时即采取必要的措施,主要有金属护层与铠装层分段短接和采用半导体外护套两种方式。

#### 3.1 金属护层与铠装层分段短接

金属护层与铠装层分段短接是指在海底电缆中间,每隔一定距离将金属护层与铠装层短接一次。为了研究分段短接对护层冲击感应电压的影响,计算时,电缆总长度取 30 km,各短接段按等长考虑,即设置 1 个短接点时,位于 15 km 处;设置 2 个短接点时,分别位于 10 km、20 km 处,以此类推。

当设置 1 个短接点时,海底电缆沿线的金属护层冲击感应电压如图 5 所示。

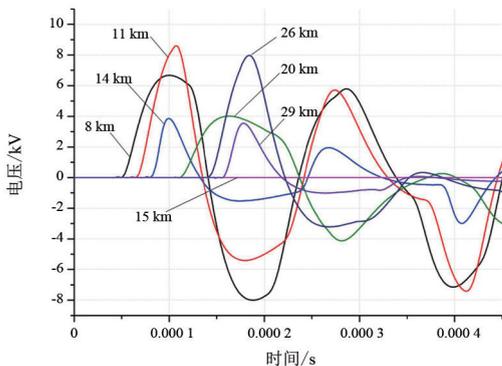


图 5 短接 1 次时金属护层冲击感应电压

由图 5 可以看出,当在海缆中部(15 km 处)设置一个短接点时,金属护层冲击感应电压最大值出现在第一个短接段内,距首端约 11 km 处,幅值为 8.6 kV,明显小于无短接点时的 17.8 kV。

进一步对不同短接次数下的护层冲击感应电压进行计算,结果如表 4 所示。

由表 4 可以看出,随着短接次数的增加,海底电缆金属护层冲击感应电压降低,但幅度逐渐减小。由于金属护层和铠装层的短接对海底电缆制造工艺要求较高,短接点增多会增加海底电缆长期运行的

风险,因此工程中应尽量减少短接次数。

表 4 不同短接次数下金属护层冲击感应电压

短接次数	分段长度/km	金属护层冲击感应电压/kV
0	30.0	17.8
1	15.0	8.6
2	10.0	5.1
3	7.5	3.2

#### 3.2 采用半导体外护套

半导体外护套即在金属护层外采用半导体材料的外护套(可通过在原绝缘外护套材料中添加具有导电特性的炭黑等实现),以降低金属护层与铠装层之间的电压差。通过在电缆模型的金属护层及铠装层之间设置并联电阻的方式来等效半导体外护套,对半导体外护套采用不同电阻率时的金属护层冲击感应电压进行计算,结果如表 5 所示。

表 5 不同外护套电阻率下金属护层冲击感应电压

外护套电阻率/ $(\Omega \cdot m)$	金属护层冲击感应电压/kV
$1 \times 10^{16}$ (PE 绝缘)	17.8
$1 \times 10^7$	14.4
$1 \times 10^6$	5.3
$1 \times 10^5$	0.8

由表 5 可以看出,随着外护套电阻率的降低,金属护层冲击感应电压减小。当外护套电阻率为  $1 \times 10^5 \Omega \cdot m$  时,金属护层冲击感应电压仅 0.8 kV。但是,外护套电阻率较低时,正常工作时外护套中流过的电流将较大,需考虑外护套的电流腐蚀。因此,在实际工程中,应综合考虑金属护层感应电压,外护套泄漏电流和材料的耐受特性,合理选择外护套的电阻率。

## 4 结 论

采用电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC,对冲击电压沿架空线侵入导体时,海底电缆金属护层的冲击感应电压及其影响因素进行了仿真分析,并对感应过电压限制措施进行了研究,主要结论如下:

1)海底电缆通常采用金属护层两端直接接地的方式,其护层冲击感应电压最大值一般出现在电缆后半段。电容耦合法计算时认为波的传播距离为电缆总长度,未考虑金属护层末端接地的情况,计算结果偏于保守。

2)电缆长度、侵入波波形和电缆结构参数对海

底电缆金属护层冲击感应电压的影响较大。护层冲击感应电压随着电缆长度的增加而增大;操作冲击侵入波陡度较小,其护层冲击感应电压小于雷电冲击侵入波;电缆结构参数对金属护层冲击感应电压的影响显著,工程设计时应予以关注。

3)采用金属护层与铠装层分段短接方式可以有效降低金属护层冲击感应电压。设置短接点后,金属护层冲击感应电压一般出现在第一个短接段内;随着短接点的增加,护层冲击感应电压降低,但降幅逐渐减小。

4)采用半导体外护套同样可以有效降低金属护层的冲击感应电压。当外护套电阻率由  $1 \times 10^7 \Omega \cdot \text{m}$  减小至  $1 \times 10^5 \Omega \cdot \text{m}$  时,金属护层冲击感应电压快速降低。在实际工程中,应综合考虑金属护层感应电压,外护套泄漏电流和材料的耐受特性,合理选择外护套的电阻率。

#### 参考文献

- [1] 刘骥,张明泽,张振鹏,等.外部振动对 500 kV 交联聚乙烯电缆敷设条件的影响[J].高电压技术,2017,43(2):673-681.
- [2] 张畅生,刘龙春,陈隽.110 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):124-127.
- [3] 陈凌云,朱熙樵,李泰军.海南联网工程海底电缆的选择[J].高电压技术,2006,32(7):39-42.
- [4] 杜兆斌,杨泽民,湛军,等.超高压海底电缆护套环流和理论计算新方法[J].华南理工大学学报(自然科学版),2013,41(12):63-69.
- [5] 王晓彤,林集明,陈葛松,等.广东—海南 500 kV 海底电缆输电系统电磁暂态研究[J].电网技术,2008,32(12):6-11.
- [6] 周路遥,刘黎,蒋愉宽,等.光纤分布式传感技术在海底电缆状态监测中的应用[J].浙江电力,2018,37(2):6-10.
- [7] 郭宜果,魏鑫,于秋雨,等.220 kV 光纤复合三芯海底电缆线路电气参数的计算[J].山东电力技术,2020,47(11):28-33.
- [8] 中国电力企业联合会.海底电力电缆输电工程设计规范:GB/T 51190—2016[S].北京:中国计划出版社,2017.
- [9] 陈平,薛强,罗彦,等.单芯电力电缆护层过电压保护[J].高电压技术,2004,30(126):6-7.
- [10] 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):714-720.
- [11] 郭兴军,牛海清,王晓兵,等.高压单芯电缆护套操

作过电压计算及冲击试验[J].高电压技术,2007,33(10):147-150.

- [12] 牛海清,王晓兵,刘毅刚,等.高压单芯电缆金属护套雷电过电压仿真和参数分析[J].高电压技术,2009,35(4):784-789.
- [13] L Marti. Simulation of transient in underground cables with frequency-dependent modal transformation matrices [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988,3(3):1099-1110.
- [14] Tingchung Yu, J R Marti. A robust phase coordinates frequency-dependent underground cable model (zcable) for the EMTP [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003,18(1):189-194.
- [15] 罗俊华,周作春,李春华,等.单芯电力电缆金属护层过电压保护器参数设计[J].高电压技术,2008,34(2):355-358.
- [16] S Rusck, E Uhlman. Transient voltage between the lead sheath and armouring of long submarine cables [J]. Direct Current, 1962,7:225-227.
- [17] 能源行业电网设计标准化技术委员会.500 kV 交流海底电缆线路设计技术规程:DL/T 5490—2014[S].北京:中国计划出版社,2014.
- [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.
- [19] B Gustavsen, J Slethbak. Transient sheath overvoltages in armoured power cables [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996,11(3):1594-1600.
- [20] 周自强,刘学忠,王少华,等.500 kV XLPE 海底电缆绝缘及护套暂态电压仿真计算[J].高电压技术,2018,44(8):2725-2731.
- [21] 全国电线电缆标准化技术委员会.电缆外护层 第1部分:总则:GB/T 2952.1—2008[S].北京:中国标准出版社,2009.
- [22] 中国电力企业联合会标准化管理中心.电力工程电缆设计标准:GB 50217—2018[S].北京:中国计划出版社,2008.

#### 作者简介:

吴高波(1986),男,博士,高级工程师,从事输电线路设计工作;

岳浩(1988),男,硕士,工程师,从事输电线路设计工作;

李健(1981),男,硕士,高级工程师,从事输电线路设计及技术管理工作;

罗楚军(1988),男,硕士,工程师,从事输电线路设计工作;

吴庆华(1962),男,教授级高级工程师,从事输电线路设计及技术管理工作。

(收稿日期:2021-09-15)