

「电缆」

# 直流海底电缆与通信电缆之间防护距离的确定方法

文/国网北京市电力公司 迟兴江 李 华

海底电缆对邻近通信电缆的电磁干扰是跨海域联网工程亟需解决的重要问题。根据直流海底电缆电磁干扰的产生机理，建立直流海底电缆对邻近通信电缆产生电磁干扰影响的数学计算模型，通过故障信号傅里叶级数分解后得到谐波产生电压的叠加结果计算直流海底电缆运行时的电流通过感性耦合在邻近通信电缆上产生的电磁干扰强度，结合舟山柔性直流输电工程实例，计算出不同容量海底电缆与邻近通信电缆之间的最小防护距离。

随着我国经济的快速发展，电力能源的需求逐渐增长，跨海域输电的需求日益迫切，我国开始大规模进行跨海域联网工程的建设，以解决一些供电质量差、电压等级低、电网长期孤立运行的偏远地区。具有长距离、大功率输电特点的海底电缆是跨海域联网工程建设的重要组成部分，近年来随着我国输变电技术的快速发展，在优化能源配置方案以及经济一体化等因素的推动下，我国的跨海域输电技术、海底电缆工程等技术正在不断向前发展。但是随着我国跨海域联网工程的电压等级和线路长度的不断提高，海底电缆已经无法避免对其周边环境产生一定的干扰，因此如何有效确定海底电缆与其邻近通信电缆之间的最小防护距离已经成为目前最为关注的研究课题。

国内外很早就开展了关于海底电缆方面的研究，有文献在早期就对海底电力电缆的敷设、制造和保护进行了研究，并且对一些重要的装置做了详细的说明。海底输电联网工程被公认为最复杂困难的大型工程，有文献详细介绍了世界各国主要海底电缆工程以及海底电缆的生产现状，并且比较了不同绝缘形式海底电缆的优缺点，分析了交、直流海底电缆的经济性和适用性。针对海底电缆经常出现故障，因此关于海底电缆故障诊断方面的研究，有文献分析了胜利油田埕岛海域海底电缆多次出现短路故障的可能原因和产生故障的机理，并由此提出采用基于BOTDR技术的分布式光纤传感系统监测电缆所受外力变化和监

测电缆内部温度变化的技术，经过试验证明该技术可较好地在线监测海底电缆的工作状态，能有效监测和预测海底电缆运行中的主要故障。随着海底电缆输电技术的逐渐发展，关于海底电缆电磁方面的研究也逐渐被人们所重视，有文献对广东—海南500 kV海底电缆输电系统的电磁暂态问题进行了研究，主要包括电缆参数、工频过电压和单相重合闸过程中的潜供电流和恢复电压、工频谐振过电压和操作过电压等，并在此基础上分析了500 kV海底电缆可选择的绝缘水平，为国内500 kV海底电缆输电工程的建设提供了依据。

本文从直流海底电缆电磁干扰产生的机理出发，建立直流海底电缆对邻近通信电缆产生电磁干扰影响的数学计算模型，根据故障信号傅里叶级数分解后得到谐波产生电压的叠加结果计算直流海底电缆运行时的电流通过感性耦合在邻近通信电缆上产生的电磁干扰强度，确定海底电缆与邻近通信电缆之间的最小防护距离。

## 通信电缆的防护限值

直流海底电缆在正常运行时，由法拉第电磁感应定律可知其直流电流无法产生交变的磁场，在邻近的通信电缆上无法产生感应电动势，因此直流海底电缆对邻近通信电缆的电磁干扰影响主要是因为直流海底电缆发生故障时，故障电流通过感性耦合在邻近通信电缆上产生感应电动势对地电压，可能会出现危及电缆维护人员的生

命安全和电缆设备的安全。目前对于通信电缆的抗电磁干扰能力, DL 5033—1994《送电线路对电信线路危险影响设计规程》中给出了通信电缆抗高压线路电磁干扰的能力, 但是并没有标准或者规程来给出通信电缆抗高压电力电缆的防护距离, 更没有标准或者是规程来确定直流海底电缆与邻近通信电缆之间的防护距离。

在送电线路故障状态下, 当通信电缆芯线两端有绝缘变压器, 或一端为绝缘变压器而另一端通过低阻抗接地或与带有接地的金属护套或屏蔽层连接, 或所有电缆芯线在两终端都装有避雷器时, 通信电缆芯线上的磁感应电压允许值应符合下列规定。

- 1) 无远距离供电的通信电缆线路

$$U_s \leq 0.6U_{Dt} \text{ 或 } U_s \leq 0.85U_{At} \quad (1)$$

- 2) “导线—大地”制直流远距离供电的通信电缆线路

$$U_s \leq 0.6U_{Dt} - \frac{U_{rs}}{\sqrt{2}} \text{ 或 } U_s \leq 0.85U_{At} - \frac{U_{rs}}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

- 3) “导线—导线”制直流远距离供电, 而中心点接地的通信电缆线路

$$U_s \leq 0.6U_{Dt} - \frac{U_{rs}}{2\sqrt{2}} \text{ 或 } U_s \leq 0.85U_{At} - \frac{U_{rs}}{2\sqrt{2}} \quad (3)$$

式中,  $U_{Dt}$  为电缆芯线与接地护套间的直流试验电压;  $U_{At}$  为电缆芯线与接地护套间的交流试验电压;  $U_{rs}$  为影响计算区段远供电电压;  $U_s$  为送电线故障时电缆芯线上的感应电压。

CCITT防护导则及GB 6830—1986《电信线路遭受强电线路危险影响的容许值》对于通信电缆由于磁感应引起的危险电压允许值规定如下。

- 1) 强电线路正常运行情况下, 电缆芯线上的纵向电动势允许值为60 V。

- 2) 强电线路故障时的电压允许值为非高可靠性输电线路的故障切除时间在3 s以内, 允许值为430 V; 高可靠性线路的故障切除时间在0.5 s以内, 允许值为650 V。

## 海底电缆对通信电缆的电磁干扰计算

由于直流海底电缆单极运行的时候通过海底电缆本身的护套构成回路, 此时在直流海缆上流过的仍然是直流电流, 根据法拉第电磁感应原理, 只有交变的磁场才能产生感应电动势, 直流磁场无法产生感应电动势, 因此直流磁场在邻近的通信电缆上不会产生感应电动势, 可以认为直

流海底电缆单极运行时, 对邻近的通信电缆没有影响; 当直流海底电缆双极运行的时候, 通过两根海底电缆构成回路, 如图1所示, 此时在直流海缆上流过的仍然是直流电流, 同样根据法拉第电磁感应原理可以认为当直流海底电缆双极正常运行时, 对邻近的通信电缆没有电磁干扰影响, 因此主要考虑单根直流海底电缆在故障状态下对邻近通信电缆的影响。

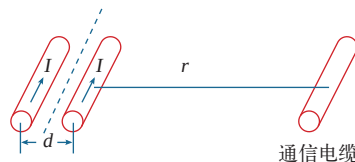


图1 直流海底电缆双极运行对邻近通信电缆影响示意图

直流海底电缆发生故障时, 故障状态下的短路电流并不是周期信号, 因此先对短路电流进行傅里叶变换, 再把主要频率的周期信号电流代入到数学计算模型中, 最后对不同频率周期信号电流的计算结果进行求和, 得到海底电缆故障状态时产生的电磁干扰强度, 来确定海底电缆与邻近通信电缆之间的防护距离。

图2表示双支路电感耦合电路, 每条支路有自感, 支路间还有互感。根据电磁感应定律, 可以写出如下用矩阵表示的微分方程

$$L \frac{dI_{km}(t)}{dt} = U_k(t) - U_m(t) \quad (4)$$

式中若耦合元件由n条支路构成, 两端部都有n个节点, 则

$$L = \begin{pmatrix} L_{11} & L_{12} & \cdots & L_{1n} \\ L_{21} & L_{22} & \cdots & L_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{n1} & L_{n2} & \cdots & L_{nn} \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$I_{km}(t) = [i_{km1}(t), i_{km2}(t), \dots, i_{kmn}(t)]^T \quad (6)$$

$$U_k(t) = [u_{k1}(t), u_{k2}(t), \dots, u_{kn}(t)]^T \quad (7)$$

$$U_m(t) = [u_{m1}(t), u_{m2}(t), \dots, u_{mn}(t)]^T \quad (8)$$

电感上的电压  $\Delta U_L(t) = U_k(t) - U_m(t)$ 。

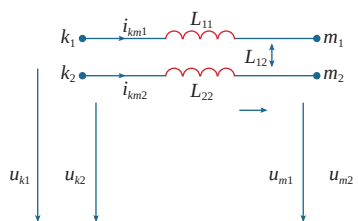


图2 双支路电感耦合电路示意图

对于存在电感耦合的电路, 进行梯形积分后

可得

$$I_{km}(t) - I_{km}(t - \Delta t) = \frac{1}{2} \Delta t L^{-1} [U_L(t) - U_L(t - \Delta t)] \quad (9)$$

然后可以求得等值电流源列矢量的递推公式

$$I_L(t - \Delta t) = I_{km}(t - 2\Delta t) + 2R_L^{-1} [U_k(t - \Delta t) - U_m(t - \Delta t)] \quad (10)$$

双支路电感耦合的实际等值计算电路。因为矩阵 $Y_L$ 是满阵,所以等值计算电路中每两个节点 $i$ 、 $j$ 之间都有导纳 $Y_{ij}$ 相联系,则有

$$Y_L = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{pmatrix} \quad (11)$$

当海底电缆两端可靠接地时,对电流产生的磁场有较好的屏蔽作用,对于如图3所示的结构,设故障电流为 $I_1$ ,则在电缆护套中感应的电动势为

$$E_3 = -j\omega M_{1-3} I_1 (V) \quad (12)$$

如果电缆护套两侧接地电阻为零,则电缆内电流为

$$I_3 = \frac{E_3}{Z_3 l} = \frac{-j\omega M_{1-3} I_1 l}{Z_3 l} = \frac{-j\omega M_{1-3} I_1}{Z_3} (A) \quad (13)$$

式中, $Z_3$ 为电缆单位长度的纵向阻抗( $\Omega/\text{km}$ )。

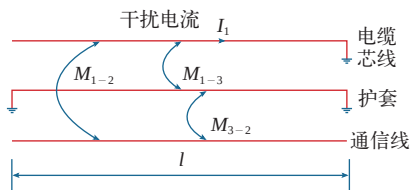


图3 护套屏蔽系数的计算模型

由电流 $I_3$ 在电缆芯线中引起的感应电动势为

$$E_{23} = -j\omega M_{3-2} I_3 l = -j\omega M_{3-2} l \left( \frac{-j\omega M_{1-3} I_1}{Z_3} \right) = \frac{-\omega^2 M_{3-2} M_{1-3} I_1 l}{Z_3} (V) \quad (14)$$

此时在电缆芯线中合成的感应电动势为

$$E_2 = E_{21} + E_{23} = -j\omega M_{1-2} I_1 l - \frac{\omega^2 M_{3-2} M_{1-3} I_1 l}{Z_3} \quad (15)$$

然后根据《送电线路对电信线路危险影响设计规程》中给出的通信线路上磁感应电动势计算公式求解得到单位长度上的感应电动势

$$E_s = \sum_{i=1}^n \omega M_i L_{pi} I_s K \quad (16)$$

式中, $\omega$ 为送电线路电流的角频率(rad/s); $M_i$ 为50 Hz时送电线路与电信线第 $i$ 段互感系数(H/km); $L_{pi}$ 为送电线路与电信线路间第 $i$ 段接近段长

度(km); $I_s$ 为送电线路一相接地或两相在不同地点同时接地的短路电流(A);线路第 $K$ 为50 Hz时接近段内各种接地导体的电磁综合屏蔽系数,计算中取0.2(可查表)。

## 工程实际算例分析

针对舟山柔性直流输电工程,主要考虑直流海底电缆在故障状态下对邻近通信电缆的影响。在并行情况下,采用的计算模型如图4所示。

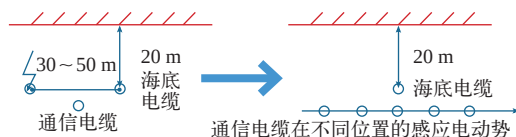
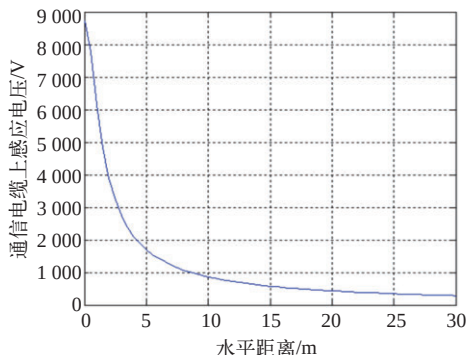


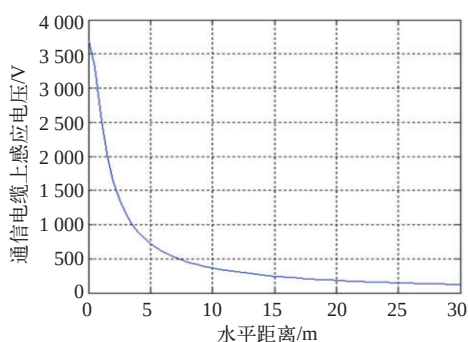
图4 单根海底电缆故障时对邻近通信电缆电磁干扰影响示意图

本工程实例的数学计算模型条件为 $\pm 200$  kV的直流工作电压,海底电缆距离海平面的深度为20 m,布置方式为通信电缆在海底电缆下端1 m处;根据国内相关短路接地试验数据表明,短路电流的峰值为正常工作电流的2~15倍,本文考虑短路故障最严重的情况,因此最大短路电流取正常工作电流的15倍。

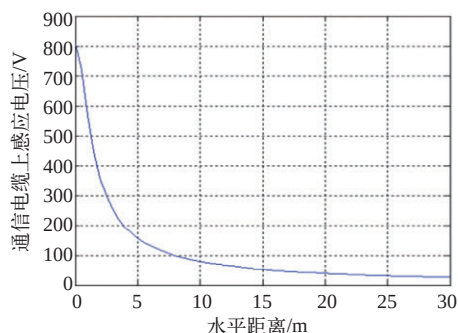
图5给出了故障信号傅里叶级数分解后得到谐波产生电压的叠加结果,由图5可以看出,考虑最严重的情况,即通信电缆位置恰好处于故障海底电缆正下方的情况下,随着海底电缆与邻近通信电缆的距离增加,磁感应电压急剧减小,例如46 km海底电缆的容量为400 MV·A时,当间距增加到13.5 m的时候,磁感应电压减小到640.5 V,参照CCITT防护导则及GB 6830—1986《电信线路遭受强电线路危险影响的容许值》给出的650 V限值,此时可以满足要求。下表列出了不同容量海底电缆与邻近通信电缆最小安全距离。



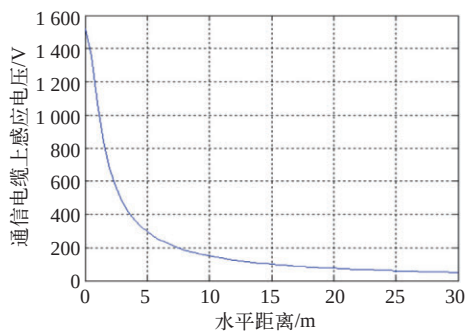
(a) 400 MV·A海缆46 km



(b) 200 MV·A海缆39 km



(c) 100 MV·A海缆17 km



(d) 100 MV·A海缆32 km

图5 单极短路故障时通信电缆在不同位置处的暂态感应电动势

表 不同容量海缆与通信电缆最小安全间距

| 海缆容量及长度         | 最小安全间距/m |
|-----------------|----------|
| 400 MV·A海缆46 km | 13.5     |
| 200 MV·A海缆39 km | 5.5      |
| 100 MV·A海缆17 km | 1        |
| 100 MV·A海缆32 km | 2        |

考虑到直流海底电缆与邻近通信电缆可能并不是平行状态而出现交叉角的情况，假设两者之间的交叉角度在 $0\sim 90^\circ$ 的范围内变化，邻近通信电缆与直流海底电缆交叉情况下的计算模型如图6所示。

选取400 MV·A容量的46 km长直流海底电缆作为计算实例，由上文可以知道直流海底电缆与

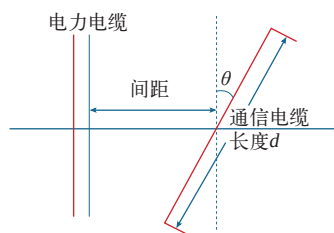


图6 邻近通信电缆与直流海底电缆交叉情况下的计算示意图

邻近通信电缆之间的最小防护距离为13.5 m，以此为条件进行两者出现交叉情况下的计算，计算结果如图7所示。由图7可以看出，海底电缆单极短路故障运行时，其邻近通信电缆在不同交叉角度时的暂态感应电动势随着交叉角度的增大急剧减小。其实从电磁场的角度很好理解，即当通信电缆与直流海底电缆交叉时，由于长度远大于中心间距，可以近似认为通信电缆关于直流海缆中心对称交叉，这样在通信电缆上的磁通方向相反，产生的感应电动势会完全抵消。

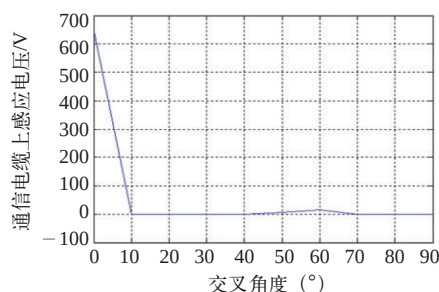


图7 不同交叉角度时的暂态感应电动势示意图

## 结束语

由于直流电流无法产生交变的磁场，因此主要研究了直流海底电缆出现故障时对邻近通信电缆产生的电磁干扰影响，通过建立直流海底电缆对邻近通信电缆产生电磁干扰影响数学计算模型，结合舟山柔性直流输电工程实例计算出不同容量、不同长度的海底电缆与邻近通信电缆的最小防护距离。可以发现在考虑故障最严重的情况下，46 km长的400 MV·A海底电缆与邻近通信电缆之间的最小防护距离为13.5 m，39 km长的200 MV·A海底电缆与邻近通信电缆之间的最小防护距离为5.5 m，17 km长的100 MV·A海底电缆与邻近通信电缆之间的最小防护距离为1 m，32 km长的100 MV·A海底电缆与邻近通信电缆之间的最小防护距离为2 m。EA

(收稿日期: 2014.12.29)

[编辑: 刘群焱]