

电网工程部送电电气专业技术培训专题

专题之十四（2） 直流输电线路通保设计

2011 年 12 月

批准：

审核：

校核：

编写：强玉平

目录

- 2.1 概述
- 2.2 基本原理
- 2.3 单极短路电流
- 2.4 磁危险影响计算
 - 2.4.1 危险影响计算公式
 - 2.4.2 来自换流站侧故障电流的纵电动势 E
 - 2.4.3 来自逆变站侧故障电流的纵电动势 E
- 2.5 短路电流变化率计算公式
- 2.6 计算实例
- 2.7 干扰影响计算
 - 2.7.1 干扰影响的计算依据
 - 2.7.2 干扰影响的产生
 - 2.7.3 干扰影响计算方法
 - 2.7.4 双极回路运行方式
 - 2.7.5 单极大地回路运行方式
 - 2.7.6 单极金属回路运行方式

2.1 概述

高压直流输电线路具有长距离大容量输送等特点，在我国已有多条线路运行。与交流线路一样，设计中要同时考虑危险影响和干扰影响，即直流线路发生单极短路时对邻近的通信线路的电磁感应影响；线路正常运行时对邻近的通信线的干扰影响。

2.2 基本原理

直流输电是以直流的形式将能量从一个地方传输到另一个地方，这种传输系统是由两个换流站和与它们联接的线路组成，其中一个换流站称为整流站，将交流系统中得到的有功功率转换成直流功率并全部传输到另一个称为逆变站的换流站（除一部分在线路上消耗外）中，再将直流功率转换成交流有用功率，然后送到受端系统用户。

直流输电系统运行接线方式主要有三种：

- 1、单极一线一地；
- 2、单极两线；
- 3、双极两线一地。

见图 2.2-1。

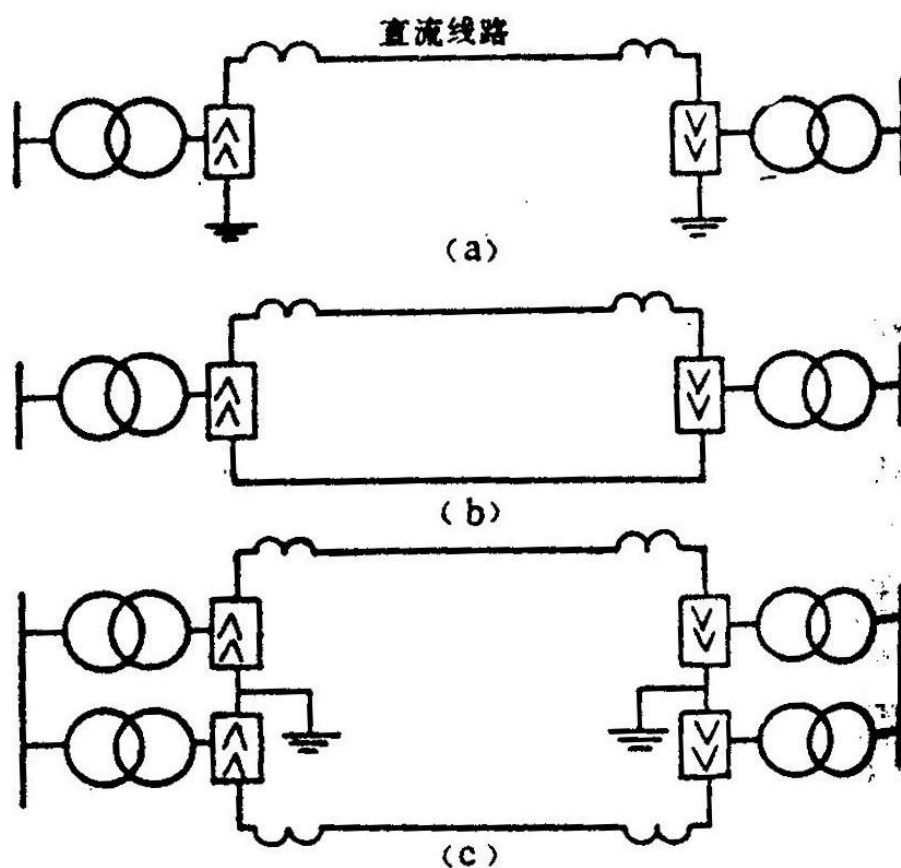


图 2.2-1 直流输电运行方式接线图

(a) 单极一线一地 (b) 单极两线 (c) 双极两线一地

我国现在运行的直流线路，都是双极两线一地方式，直流输电线路与交流输电线路一样，在单极接地事故时，可能对邻近的电信线路产生电磁危险影响。

2.3 单极短路电流

直流输电线路对邻近通信线可能产生危险影响的故障状态，应考虑单极运行直流输电系统极导线接地事故；双极运行直流输电系统一极导线接地事故。当直流输电线路发生单极接地故障初始阶段时，由于线路电容放电，短路电流的暂态值可达额定电流的 2~3 倍。暂态短路电流不是直流，其频率约为 20~40HZ，该电流通过感性耦合在邻近的电信线路上产生纵感应电动势和对地电压。由于调节器的作用，短路电流的稳态值较小，一般只有额定电流的 10~15%，设计中主要考虑暂态的短路电流。

2.4 磁危险影响计算

2.4.1 危险影响计算公式

通信保护设计的主要计算之一，是确定输电线事故时对邻近通信线的危险影响是否超过国家标准或行业标准中规定的限制，根据《直流输电线路对电信线路危险影响防护设计技术规定》中推荐的公式

$$E = \omega M_i L_i I \quad (2.4.1-1)$$

式中：

E —电信线路上的感应纵电动势（V）；

ω —影响电流的角频率， $\omega = 2\pi f$ ；

f —影响电流的频率（30Hz）；

M_i —接近段互感系数（mH/km）；

L_i —接近段长度（km）；

I —影响电流的有效幅值（kA）。

在直流线路工程设计中，用上式可以估算对邻近通信线的危险影响程度，上述公式中主要是短路电流如何取值，根据已运行的多条线路测试数据，可按线路额定电流的2~3倍取； M_i 值按《直流输电线路对电信线路危险影响防护设计技术规定》中附录A中的图A.1查得，把上述已知条件代入公式即可。

2.4.2 来自换流站侧故障电流的纵电动势 E

《直流输电线路对电信线路危险影响防护设计技术规定》中推荐的实用计算公式，

$$E = U_d \left(\frac{1}{L_d + l_p L} + \frac{k_f l_p}{L_d l} \right) M_i l_i \quad (2.4.2-1)$$

但工程计算时，直流输电线路对邻近电信线路的感应影响一般采用分

段计算法， $l_p = \sum_{i=0}^n l_i$ ，则可得来自换流站侧故障电流的纵电动势的实用计算公式如下：

$$E = U_d \left(\frac{1}{L_d + \sum_{i=0}^n l_i L} + \frac{k_f \sum_{i=0}^n l_i}{L_d l} \right) \sum_{i=1}^n M_i l_i s t$$

(2.4.2-2)

式中：

U_d —直流输电线路的工作电压 (KV)；

L_d —平波电抗器的电感量 (H) ；

L —直流输电线路单极导线对地的电感量 (H/km)；

l_p —直流输电线路短路回路总长度 (km) ；

$i_d(t)$ —来自直流输电线路短路，换流站侧电源的电流 (KA)。

s —电信线外皮或地线在 30Hz 时的屏蔽系数；

t —直流输电线路架空地线在 30Hz 时的屏蔽系数。

k_f —直流输电线路结构系数（线路电容放电电流强度与换流站侧电源故障电流强度的比例系数），与导线储存的电荷直接相关，长度达 1000km 左右的线路一般取 0.2~0.3，无资料取 0.25。

2.4.3 来自逆变站侧故障电流的纵电动势 E

对通信线的影响主要是来自换流站侧的故障电流，如果通信线上的感应纵电动超标需验算对地电压值，需要计算逆变站侧故障电流的纵电动势，其公式如下：

$$E = k_f \frac{U_d (l - \sum_{i=0}^n l_i)}{L_d l} \sum_{i=1}^n M_i l_i s t \quad (2.4.3-1)$$

式中各项表达含义同上。

2.5 短路电流变化率计算公式

计算危险影响还可以根据电流变化率计算，直流输电线路一极导线接地短路

故障时，来自换流站侧故障电流变化率最大值为：

$$\Delta i_{k1} = U_d \left(\frac{1}{L_d + \sum_{i=0}^n l_i L} + \frac{k_f \sum_{i=0}^n l_i}{L_d l} \right) \quad (2.5-1)$$

直流输电线路一极导线接地短路故障时，来自逆变站侧故障电流变化率最大值为：

$$\Delta i_{k2} = k_f \frac{U_d k_f (l - \sum_{i=0}^n l_i)}{L_d l} \quad (2.5-2)$$

式中：

Δi_{k1} 、 Δi_{k2} —直流输电线路短路时电流变化率，kA/ms；

U_d —直流输电线路的工作电压（kV）；

L_d —平波电抗器的电感量（H）；

L —直流输电线路单极导线对地的电感量（H/km）；

k_f —直流输电线路结构系数（线路电容放电电流强度与换流站侧电源故障电流强度的比例系数），与导线储存的电荷直接相关，长度 1000km 左右的线路一般取 0.2~0.3，无资料取 0.25；

l —直流输电线路总长度（km）；

2.6 计算实例：

原始数据取自向家坝~上海±800kV 直流输电线路工程

按《直流输电线路对电信线路危险影响防护设计技术规定》中附录 B 中,简化公式 (B.9) ;(B.10)计算极导线的对地电感量。

线路参数：

L =极导线的对地电感量，（H/m）

r =18.12, 导线的半径，（mm）

n =6, 分裂导线的根数

d_n =450, 分裂导线按正多边形排列时的分裂间距，（mm）

$h=28$ ，导线平均悬挂高度，(m)

$d=22$ ，双极导线间距在水平面上的投影距离，(m)

$\sigma =5 \times 10^{-3}$ ，视在大地电导率，(s/m)

$\mu_0=4 \pi \times 10^{-7}$ ，真空导磁率，(H/m)

f -影响电流的频率，取 30Hz

r_m -圆柱形导体的等值半径，(mm)

D_s -分裂导线的等值半径，(mm)

R -分裂导线所占圆周的半径，(mm)

向家坝~上海±800kV 直流输电线路采用 ACSR-6×720 导线

计算出 $L=0.935$ (mH/km)，计算出短路电流最大上升速率，见下表：

短路电流最大上升速率

| 序号 | 距离向家坝换流站 (km) | 短路电流速率 dI_1/dt (kA/mS) | 短路电流速率 dI_2/dt (kA/mS) |
|----|------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1 | 0 | 5.33 | 1.33 |
| 2 | 50 | 4.18 | 1.29 |
| 3 | 100 | 3.46 | 1.26 |
| 4 | 150 | 2.97 | 1.22 |
| 5 | 200 | 2.62 | 1.19 |
| 6 | 250 | 2.37 | 1.15 |
| 7 | 300 | 2.17 | 1.12 |
| 8 | 350 | 2.02 | 1.08 |
| 9 | 400 | 1.90 | 1.05 |
| 10 | 450 | 1.81 | 1.01 |
| 11 | 500 | 1.73 | 0.98 |
| 12 | 550 | 1.67 | 0.94 |
| 13 | 600 | 1.62 | 0.91 |
| 14 | 650 | 1.58 | 0.87 |
| 15 | 700 | 1.56 | 0.84 |
| 16 | 750 | 1.53 | 0.80 |

| 序号 | 距离向家坝换流站 (km) | 短路电流速率 dI_1/dt (kA/ms) | 短路电流速率 dI_2/dt (kA/ms) |
|----|------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 17 | 800 | 1.52 | 0.77 |
| 18 | 850 | 1.51 | 0.73 |
| 19 | 900 | 1.50 | 0.70 |
| 20 | 950 | 1.49 | 0.66 |
| 21 | 1000 | 1.49 | 0.63 |
| 22 | 1050 | 1.50 | 0.59 |
| 23 | 1100 | 1.50 | 0.56 |
| 24 | 1150 | 1.51 | 0.52 |
| 25 | 1200 | 1.52 | 0.49 |
| 26 | 1250 | 1.53 | 0.45 |
| 27 | 1300 | 1.54 | 0.42 |
| 28 | 1350 | 1.56 | 0.38 |
| 29 | 1400 | 1.58 | 0.34 |
| 30 | 1450 | 1.59 | 0.31 |
| 31 | 1500 | 1.61 | 0.27 |
| 32 | 1550 | 1.63 | 0.24 |
| 33 | 1600 | 1.65 | 0.20 |
| 34 | 1650 | 1.67 | 0.17 |
| 35 | 1700 | 1.69 | 0.13 |
| 36 | 1750 | 1.71 | 0.10 |
| 37 | 1800 | 1.74 | 0.06 |
| 38 | 1850 | 1.76 | 0.03 |
| 39 | 1890 | 1.78 | 0.00 |

2.7 干扰影响计算：

2.7.1 干扰影响的计算依据

直流线路对通信线的干扰影响计算还没有相关规程，但对通信线的产生干扰影响是谐波电压和谐波电流，仍可参照交流线路 DL/T5033-2006，《输电线路对电信线路危险影响和干扰影响防护设计规程》中的计算方法。

2.7.2 干扰影响的产生

在不同的运行方式下直流输电线路所产生的谐波电流的大小及流向是不同的，在电话回路中产生的干扰影响差异也较大。在同等条件下，干扰影响主要来自通过大地的谐波电流(常称不平衡谐波电流)，如单极大地回路及双极进入大地的谐波电流。极导线的谐波电流(常称平衡的谐波电流)产生的干扰影响相对较小，如单极金属回路及双极回路极导线的谐波电流。

对于双极回路的干扰影响，除来自进入大地的谐波电流外，还有来自极导线的谐波电流。双极回路进入大地的谐波电流主要由三部分原因造成：正负极电流不平衡、两换流阀桥间不平衡(触发角不对称，换流变压器阻抗不平衡)和换流变压器的杂散电容。这种谐波电流虽然比极导线的谐波电流小很多，但其干扰影响却较大。当直流输电线路与电信线路的接近距离较大时，由极导线谐波电流产生的干扰影响就可以忽略不计。

2.7.3 干扰影响计算方法

在过去的交、直流输电线路的干扰影响计算中，忽略了电信线路传播效应的衰减作用，致使计算结果比实际情况大得多。CCITT 在 1989 年的《防护导则》[3]中已经提出要考虑衰减作用。我国现在的交直流输电线路的干扰影响计算中也考虑了这一衰减作用。因此在计算双极回路的干扰影响时，首先应分别计算进入大地的和极导线的谐波电流的等效干扰电流沿线分布，然后分别计算它们的干扰影响分量。总的干扰影响为它们的干扰影响分量的几何和。

一般情况下，谐波电压产生的容性耦合比谐波电流产生的感性耦合要小得多，所以可忽略谐波电压产生的影响。干扰影响的大小以在电话回路中产生的杂音电动势衡量。直流输电线路的干扰影响标准与交流输电线路的相同。

2.7.4 双极回路运行方式

直流输电线路在双极回路运行方式下，应分别计算进入大地回路的和极导线的谐波电流在双线电话回路中产生的杂音电动势。双线电话回路由谐波电流产生总的杂音电动势 e_m 为下式

$$e_m = \sqrt{e_{mr}^2 + e_{me}^2} \quad (2.7.4-1)$$

式中 e_{mr} 和 e_{me} 分别为由大地回路的和极导线的谐波电流在双线电话回路中产生的杂音电动势, mV:

$$e_{mr} = \lambda_m Z_m I_{dqr} l_p B K_{m800} \times 10^3 \quad (2.7.4-2)$$

$$e_{me} = \lambda_m Z'_e I_{dqe} l_p B K_{m800} \times 10^3 \quad (2.7.4-3)$$

式中:

λ_m : 为双线电话杂音敏感系数, 按实际情况取值;

Z_m : 为直流输电线路双极大地回路 with 双线电话回路的 800Hz 感性耦合阻抗, Ω/km ;

I_{dqr} : 为直流输电线路双极回路进入大地回路的谐波电流的等效干扰电流, A;

l_p : 为直流输电线路与电话回路的接近长度, km;

B : 为电信线路传播效应的衰减系数, 按实际情况计算;

K_{m800} : 为各种金属接地导体 800 Hz 的磁综合屏蔽系数;

Z'_e : 为直流输电线路双极回路极导线与双线电话回路的 800 Hz 感性耦合阻抗, Ω/km ;

I_{dqe} : 为直流输电线路双极回路极导线的谐波电流的等效干扰电流, A。

2.7.5 单极大地回路运行方式

在单极大地回路运行方式下, 在双线电话回路中产生的杂音电动势按公式 (2.7.4-2) 计算。

2.7.6 单极金属回路运行方式

在单极金属回路运行方式下, 在双线电话回路中产生的杂音电动势按公式 (2.7.4-3) 计算。

直流输电线路在单极大地回路运行方式下的干扰影响为最大, 在单极金属回

路运行方式下的干扰影响为最小。若单极大地回路不作为一种正常运行方式，而只是在调试、试运行或当直流系统发生故障和检修时采用，由于运行时间不长，其产生的干扰影响时间很短，可不考虑。因此可用双极回路运行方式来检验直流输电线路对电信线路是否存在干扰影响。

直流输电线路对架空明线电信线路的干扰影响较大，但对电缆电信线路的干扰影响较小。但是直流线路的等值干扰电流比交流线路要大，所以工程中如果导电率较差，平行接近距离较小且有交叉时，要计算对架空电缆的干扰影响。