

# 特高压直流输电线路和边界频率特性研究

陈仕龙, 束洪春, 谢静, 蔡子龙, 张文英

(昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650500)

**摘要:** 根据云广特高压直流输电系统实际参数, 建立特高压直流输电线路以及由平波电抗器、直流滤波器和 PLC 滤波器所构成的特高压直流输电线路边界的频域模型, 分析特高压直流输电线路和线路边界的频率特性。对特高压直流输电线路及其边界对故障暂态信号高频量的衰减作用, 以及故障位置对保护安装点所检测到的故障暂态信号高频量的影响进行了研究。研究表明, 边界和线路对暂态信号高频量的衰减作用大小和故障与保护安装点的距离有关, 当故障发生点与保护安装点的距离大于  $-\ln|G(j\omega)|/\alpha$  时, 线路对频率为  $\omega/(2\pi)$  高频量的衰减作用将大于边界的衰减作用。建立云广特高压直流输电系统实际参数仿真模型, 对特高压直流输电线路及其边界对故障暂态信号高频量的衰减作用进行仿真验证, 仿真结果证明了上述结论的正确性。

**关键词:** 特高压直流; 特高压输电; 直流输电; 线路边界; 频率特性; 故障暂态信号; 频谱分析

**中图分类号:** TM 72

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.11.024

## 0 引言

特高压直流输电系统具有送电距离长、沿途地形复杂等特点, 使其线路发生短路、雷击等事故的概率极大增加, 严重威胁直流系统本身的安全运行。而目前广泛应用于直流输电线路的行波保护易受雷电、换相失败、交流侧故障等暂态现象的干扰, 可靠性不高, 在高阻接地时存在灵敏度不够的缺点, 必须进一步研究新型的性能更为优越的特高压直流输电线路保护<sup>[1]</sup>。基于故障暂态信号高频分量频率特性的直流输电线路暂态保护开始引起国内外继电保护工作者的注意并取得了一定的研究成果<sup>[2-12]</sup>。

在暂态保护研究中, 为有效利用故障暂态量中所包含的丰富故障信息, 需要对故障暂态量在输电系统上的传播特性进行深入研究。故障行波或暂态信号在直流输电系统上的传播是由直流输电线路、平波电抗器、直流滤波器、PLC 滤波器等设备的参数决定的。直流输电线路两端的平波电抗器、直流滤波器和 PLC 滤波器构成特高压直流输电线路现实的边界。分析特高压直流输电线路边界和特高压直流输电线路的频率特性, 得到特高压直流输电线路和边界对故障暂态信号高频分量的带阻变特性, 研究特高压直流输电线路故障暂态信号高频量频率特性, 对特高压直流输电线路暂态保护的研究是基础性的工作。

本文对特高压直流输电线路进行频域分析, 分析由平波电抗器、直流滤波器和 PLC 滤波器所构成

的特高压直流输电线路边界的频率特性, 得到特高压直流输电线路和边界对故障暂态信号高频分量的带阻变特性; 研究了特高压直流输电线路边界和线路对故障暂态信号高频量的衰减作用, 以及故障位置对保护安装点所检测到的故障暂态信号高频量的影响。

## 1 特高压直流输电线路频率特性

### 1.1 特高压直流输电线路参数

输电线路参数是线路电磁特性的集中反映, 已知特高压直流输电线路的工程条件(导线几何尺寸、分布与位置、杆塔结构等), 就可以计算出线路的相模频变参数, 进而计算出该线路的模量特性阻抗, 反映输电线路的频率特性<sup>[13-14]</sup>。本文以云广特高压直流输电线路为例对特高压直流输电线路的频率特性进行研究。云广特高压直流输电线路的线路结构见图 1。

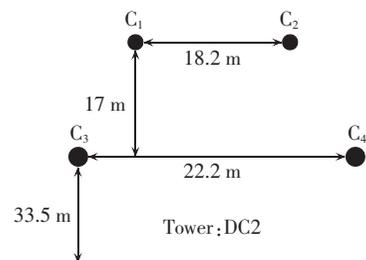


图 1 云广特高压直流输电线路的线路结构

Fig.1 Structure of Yunnan-Guangdong UHVDC transmission line

云广特高压直流输电线路导线型号为  $6 \times \text{LGJ}-630/45$ , 导线外径 33.6 mm, 6 分裂, 分裂间距 450 mm, 极间距离 22.2 m, 塔上悬挂高度 33.5 m, 弧垂 16 m; 避雷线至导线所在平面的距离为 17 m, 2 根避雷线

收稿日期: 2012-08-26; 修回日期: 2013-07-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51267008)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51267008)

之间的距离为 18.2 m。经计算,导线电阻为 0.04633 Ω/km,每极自电感  $L=0.00181$  H/km,极间互电感  $M=0.00099$  H/km,每极导体单位长度对地电容为  $9.99 \times 10^{-9}$  F/km,每单位长度两极导体间的电容为  $2.11 \times 10^{-9}$  F/km<sup>[15]</sup>。

### 1.2 双极直流输电线路的相模分析

由于双极直流输电线路的对称性,不需要进行换位便是平衡的。双极直流输电线路的对称分量变换矩阵为<sup>[16]</sup>:

$$S = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

而:

$$S^{-1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} = S \quad (2)$$

线路电压方程为:

$$-\frac{dU_{sy}}{dx} = Z_{sy} I_{sy} \quad (3)$$

$$Z_{sy} = S^{-1} \begin{bmatrix} Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_s \end{bmatrix} S = \begin{bmatrix} Z_s + Z_m & 0 \\ 0 & Z_s - Z_m \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中,  $Z_s$  为每极导线单位长度的串联自阻抗,  $Z_m$  为单位长度导线的串联互阻抗。

线路电流方程转变为对称分量为:

$$-\frac{dI_{sy}}{dx} = K_{sy} U_{sy} \quad (5)$$

$$K_{sy} = \begin{bmatrix} C_s + C_m & 0 \\ 0 & C_s - C_m \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中,  $C_s$  为每极导线单位长度对地以及对另一极导线的电容之和,  $C_m$  为每极导线单位长度对另一极的电容的负值。

线路第  $j$  个模量 ( $j=0,1$ ) 的模量特性阻抗(波阻抗)  $Z_c(j\omega)$ 、模传播系数  $\gamma_j$ 、长度为  $x$  的输电线路的传输函数  $A_j$  分别如式(7)~(9)所示。

$$Z_c(j\omega) = \sqrt{\frac{R_j + j\omega L_j}{j\omega C_j}} \quad (7)$$

$$\gamma_j = \sqrt{(R_j + j\omega L_j)j\omega C_j} \quad (8)$$

$$A_j(j\omega) = e^{-\gamma_j x} \quad (9)$$

其中,  $R_j, L_j, C_j$  分别为单位长度线路的模量电阻、电感、电容。

### 1.3 特高压直流输电线路频率特性

根据云广特高压直流输电线路结构及参数,对双极直流输电线路进行相模分析,并利用式(7)~(9)得到特高压直流输电线路的模量特性阻抗和模传输函数的幅频特性曲线如图 2、3 所示。

由图 2 可见,双极特高压直流输电线路模量特性阻抗的幅值随着频率的升高而减小,并最终趋于稳定。其中,模 0 特性阻抗的初始值较大,稳定值也较大,并且随频率的变化较为缓慢,模 1 特性阻抗的

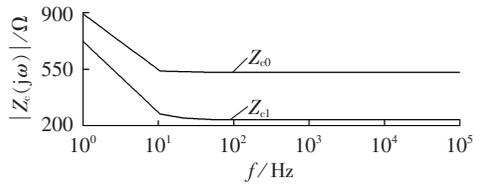


图 2 特高压直流输电线路模量特性阻抗的幅频特性  
Fig.2 Amplitude-frequency characteristic of modulus characteristic impedance of UHVDC transmission line

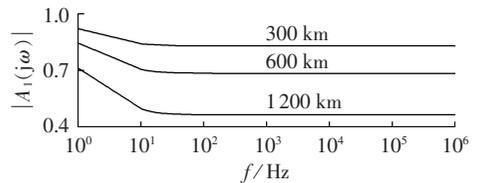


图 3 特高压直流输电线路模 1 传输函数的幅频特性

Fig.3 Amplitude-frequency characteristic of modulus transfer function of UHVDC transmission line

初始值较小,稳定值也较小,随频率的升高而迅速趋于稳定。

由图 3 可见,特高压直流输电系统双极运行时,线路模 1 传输函数  $A_1(j\omega)$  的幅频特性随着频率升高而降低,随着线路的增长而急剧减小,即:特高压直流输电系统双极运行时,特高压直流线路对高频量有衰减作用,线路越长,衰减作用越强烈。线路模 0 传输函数的幅频特性与模 1 传输函数的幅频特性相似。

## 2 特高压直流输电线路边界的频率特性

### 2.1 平波电抗器的频率特性

云广特高压直流输电平波电抗器每极按极母线和中性母线各装设 2 台 75 mH 的干式平波电抗器,整流侧单极的平波电抗器为 300 mH,所以平波电抗器阻抗为:

$$Z_1(j\omega) = j\omega L = j0.3\omega = j1.884f \quad (10)$$

### 2.2 直流滤波器的频率特性

云广特高压直流滤波器的配置按每极 2 组三调谐滤波器考虑,接线形式如图 4 所示<sup>①</sup>。

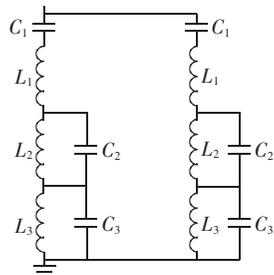


图 4 直流滤波器接线图

Fig.4 Wiring diagram of DC filter

① 西南电力设计院. 云南至广东 ±800 kV 特高压直流输电工程楚雄 ±800 kV 换流站新建工程初步设计. 2007.

图 4 中,  $C_1 = 2.0 \mu\text{F}$ ,  $L_1 = 11.773 \text{ mH}$ ,  $C_2 = 3.415 \mu\text{F}$ ,  $L_2 = 10.266 \text{ mH}$ ,  $C_3 = 11.773 \mu\text{F}$ ,  $L_3 = 4.77 \text{ mH}$ 。直流滤波器的等效阻抗如式(11)所示。

$$Z_2(j\omega) = j \left( 0.0059 - 39809/f - \frac{6613f}{0.39f^2 - 292825} - \frac{1272f}{0.19f^2 - 84940} \right) \quad (11)$$

### 2.3 PLC 滤波器的频率特性

直流输电系统直流侧的 PLC 滤波器装在直流线路进线处,其功能为噪声滤波和线路接地故障测距。云广特高压直流输电系统直流侧 PLC 滤波器如图 5 所示。

在分析直流线路边界特性时,认为线路在逆变侧开路,则 PLC 滤波器的等效阻抗为:

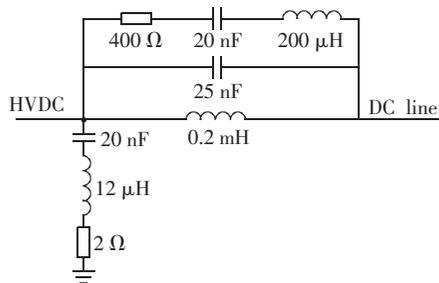


图 5 直流侧的 PLC 滤波器

Fig.5 PLC filter at DC side

$$Z_3(j\omega) = 2 + j(0.00007536f - 7960000/f) \quad (12)$$

### 2.4 特高压直流输电线路边界的频率特性

云广特高压直流输电线路两端加装的平波电抗器、直流滤波器、PLC 滤波器如图 6 所示。

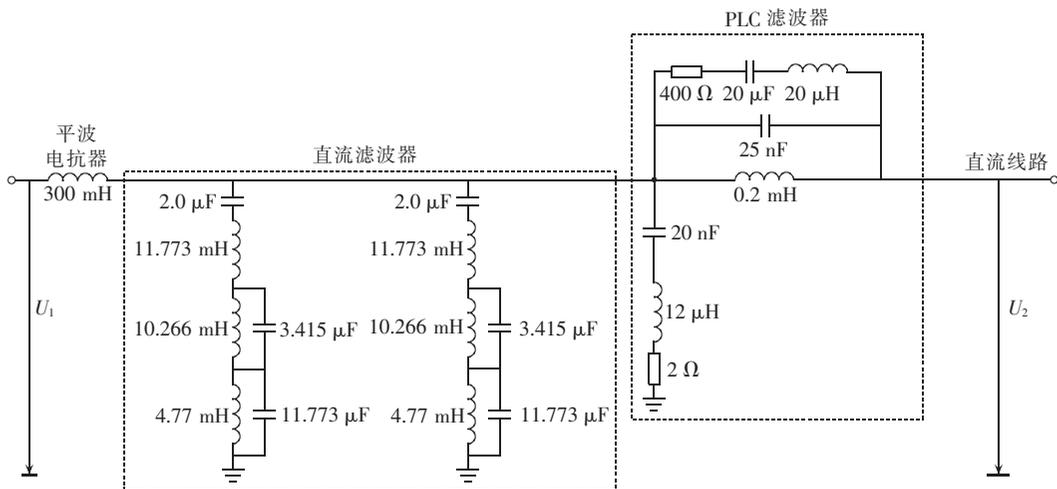


图 6 云广特高压直流输电线路边界

Fig.6 Transmission line boundary of Yunnan-Guangdong UHVDC transmission system

为简化分析,忽略除“线路边界”外其他元件的影响,即认为直流输电线路是开路的。定义直流输电线路边界的传递函数为:

$$G(j\omega) = U_2 / U_1 \quad (13)$$

在直流线路开路的条件下,由图 6 及式(10)—(13)可以求出直流输电线路边界的传递函数为:

$$G(j\omega) = \{Z_2(j\omega)Z_3(j\omega) / [Z_2(j\omega) + Z_3(j\omega)]\} \div \{Z_2(j\omega)Z_3(j\omega) / [Z_2(j\omega) + Z_3(j\omega)] + Z_1(j\omega)\} \quad (14)$$

由式(14)可得直流输电线路边界传递函数  $G(j\omega)$  的幅频特性如图 7 所示。

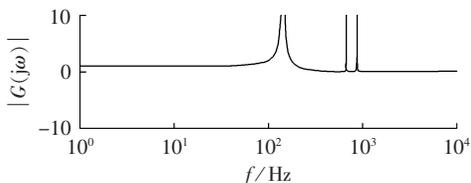


图 7 直流输电线路边界传递函数幅频特性

Fig.7 Amplitude-frequency characteristic of transfer function of UHVDC transmission line

由图 7 可见,对于直流分量及低频段(0~120 Hz),

$G(j\omega)$  的幅值等于 1。在  $f = 145 \text{ Hz}$ 、 $f = 670 \text{ Hz}$ 、 $f = 870 \text{ Hz}$  处,  $G(j\omega)$  的幅值为极大值;当  $f > 1 \text{ kHz}$  时,  $G(j\omega)$  的幅值远小于 1,可见高压直流输电线路边界元件对高频信号有很强的衰减作用。综上所述,对直流线路区外故障,经直流线路边界传变至直流线路保护安装处的高频分量很小;而对于区内故障,在保护安装处获得的高频分量较大。

### 3 特高压直流输电线路和边界对暂态信号高频量衰减作用的比较

特高压直流线路对高频量有衰减作用,线路越长,衰减作用越强烈;由平波电抗器、直流滤波器及 PLC 滤波器构成的特高压直流输电线路边界对高频量有很强的衰减作用。对同一个高频暂态信号,是边界还是线路的衰减作用大?

设通过特高压直流输电线路和边界的为同一个高频暂态信号  $U(j\omega)$ ,通过长度为  $x$  的特高压直流输电线路后该高频暂态信号变为  $U_L(j\omega)$ ,通过特高压直流输电线路边界之后该高频暂态信号变为

$U_B(j\omega)$ , 则有:

$$[U_L(j\omega)]/[U(j\omega)] = e^{-\gamma x} \quad (15)$$

$$[U_B(j\omega)]/[U(j\omega)] = G(j\omega) \quad (16)$$

令  $|U_B(j\omega)| \geq |U_L(j\omega)|$ , 则有:

$$|G(j\omega)| \geq |e^{-\gamma x}| \quad (17)$$

即:

$$x \geq -\frac{1}{\alpha} \ln |G(j\omega)| \quad (18)$$

其中,  $x$  为特高压直流输电线路长度;  $\alpha$  为长度为  $x$  的特高压直流输电线路传播系数的实部, 即衰减系数;  $|G(j\omega)|$  为特高压直流输电线路边界的传递函数的幅值。

由式(18)可见: 当特高压直流输电线路长度小于  $-\frac{1}{\alpha} \ln |G(j\omega)|$  时, 线路对频率为  $\omega/(2\pi)$  的高频量的衰减作用将小于边界的衰减作用; 当特高压直流输电线路长度等于  $-\frac{1}{\alpha} \ln |G(j\omega)|$  时, 线路对频率为  $\omega/(2\pi)$  的高频量的衰减作用将等于边界的衰减作用; 当特高压直流输电线路长度大于  $-\frac{1}{\alpha} \ln |G(j\omega)|$  时, 线路对频率为  $\omega/(2\pi)$  的高频量的衰减作用将大于边界的衰减作用。

#### 4 故障位置对保护安装点暂态信号高频量频率特性的影响

由特高压直流输电线路和边界的频率特性可知, 它们对故障暂态信号高频量的衰减作用与故障位置有关。所以保护安装点所检测到的故障暂态信号高频量频率特性与故障位置密切相关。图 8 为故障位置不同时保护安装点所检测到的故障暂态信号高频量衰减特性示意图。

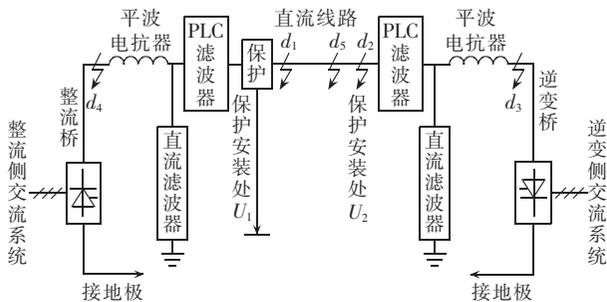


图 8 特高压直流输电线路故障位置示意图

Fig.8 Fault position in UHVDC transmission line

图 8 中点  $d_4$  故障为特高压直流输电系统整流侧直流母线故障, 点  $d_1$  故障为直流输电线路 0 km 处故障, 点  $d_5$  故障为直流输电线路 700 km 处故障, 点  $d_2$  故障为直流输电线路末端处故障, 点  $d_3$  故障为逆变侧直流母线故障, 检测点为整流侧保护安装点。

由图 8 可见, 对于整流侧的保护安装点, 整流侧

直流母线点  $d_4$  发生故障时, 故障暂态信号高频量通过特高压直流输电线路边界的衰减作用后到达保护安装点; 区内直流输电线路 0 km 处的点  $d_1$  发生故障, 故障暂态信号高频分量不经过任何衰减就到达保护安装点; 区内直流输电线路点  $d_5$  和  $d_2$  发生故障, 故障暂态信号高频分量通过直流输电线路的衰减作用到达保护安装点; 逆变侧直流母线点  $d_3$  发生故障时, 故障暂态信号高频量通过特高压直流输电线路和边界的双重衰减作用后到达保护安装点。可见, 保护安装点所检测到的故障暂态信号高频分量是与故障位置密切相关的, 根据特高压直流输电线路和边界对暂态信号高频量衰减作用的特性, 当故障位置离保护安装点达到一定距离时, 直流输电线路对故障暂态信号高频量的衰减作用将超过直流输电线路边界对故障暂态信号高频量的衰减作用。

#### 5 特高压直流输电线路和边界对故障暂态信号高频量衰减作用仿真

##### 5.1 云广特高压直流输电系统建模

参照云广特高压直流输电系统换流站主接线, 根据云广特高压直流输电系统元件模型, 可以建立云广  $\pm 800$  kV 特高压直流输电系统实际参数模型。云广特高压直流输电系统电压等级为  $\pm 800$  kV, 直流额定功率 5000 MW, 直流额定电流 3.125 kA。整流侧交流系统额定电压为 525 kV, 短路比 SCR = 2.5/84°, 逆变侧交流系统额定电压为 525 kV, 短路比 SCR = 2.5/75°。整流侧配置 4 大组交流滤波器, 直流滤波器的配置按每极 2 组三调谐滤波器考虑, 逆变侧交直流滤波器配置及参数与整流侧相同。整流侧换流变压器采用三相双绕组变压器, 单台容量 750.63 MV·A, 接线型式为 Y0/Y 及 Y0/ $\Delta$ 2 种, 换流阻抗 0.18 p.u., 网侧绕组额定电压 525 kV, 阀侧绕组额定电压 169.85 kV。逆变侧换流变压器采用三相双绕组变压器, 单台容量 750.63 MV·A, 接线型式为 2 种: Y0/Y 及 Y0/ $\Delta$ , 换流阻抗 0.18 p.u., 网侧绕组额定电压 525 kV, 阀侧绕组额定电压 160.5 kV。整流侧平波电抗器每极按极母线和中性母线各装设 2 台 75 mH 的干式平波电抗器, 逆变侧平波电抗器设置及参数与整流侧相同。整流站和逆变站的换流阀采用每极 2 个 12 脉动换流单元串联的接线方式, 2 个 12 脉动阀组串联电压按  $\pm(400+400)$  kV 分配。直流输电线路全长 1418 km, 沿线大地电阻率平均值为 1000  $\Omega \cdot m$ , 采用 6  $\times$  LGL-630/45 导线和 Frequency Dependent(Phase) Model Options 模型。云广  $\pm 800$  kV 特高压直流输电控制系统是基于 CIGRE 直流输电标准测试系统, 为满足其系统控制的需要, 对 CIGRE 直流输电标准测试系统的控制系统进行部分改动所建立的仿真模型如图 9 所示。

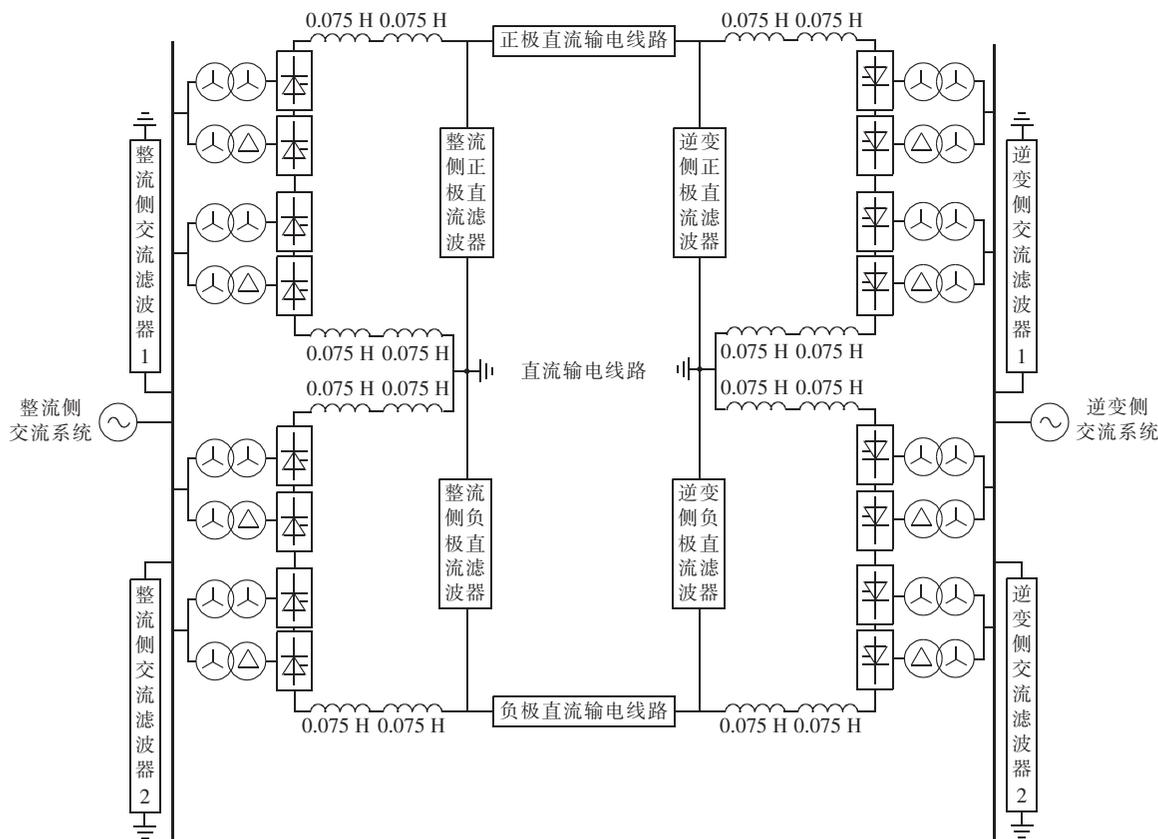


图 9 云广特高压直流输电仿真模型

Fig.9 Simulation model of Yunnan-Guangdong UHVDC transmission system

5.2 边界和线路对高频量衰减作用仿真

利用本文所建立的云广特高压直流输电系统仿真模型,对特高压直流输电线路边界和线路对故障暂态信号高频量的衰减作用进行仿真。对 0.3 s 在云广特高压直流输电线路正极线发生雷击进行仿真,该雷击为非故障性雷击,雷电流选用 2.6/50 μs 双指数波形,雷电流的幅值取 40 kA,雷击位置为整流侧直流母线、直流输电线路 0 km 处、直流输电线路 700 km 处,信号检测点为整流侧保护安装点。对保护安装点所检测到的暂态电压信号进行频谱分析,得到不同位置故障时保护安装点暂态电压信号频谱分别如图 10—12 所示。

图 10—12 中,频谱分析点数对应的频率范围为 1.6~20 kHz。由图 10—12 可见,在整流侧保护安装

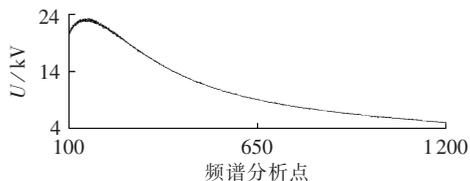


图 10 保护安装点暂态电压信号频谱 (雷击位置为整流侧直流母线)

Fig.10 Spectrum of transient voltage signal detected by relay protection (lightning strike happens at DC bus bar)

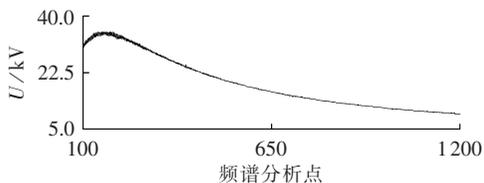


图 11 保护安装点暂态电压信号频谱 (雷击位置距离保护安装处 0 km)

Fig.11 Spectrum of transient voltage signal detected by relay protection (lightning strike happens 0 km away from relay protection)

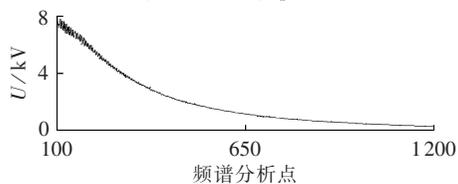


图 12 保护安装点暂态电压信号频谱 (雷击位置距离保护安装处 700 km)

Fig.12 Spectrum of transient voltage signal detected by relay protection (lightning strike happens 700 km away from relay protection)

点,雷击直流线路 0 km 暂态电压幅值最大,雷击整流侧直流母线暂态电压幅值次之,雷击直流线路 700 km 暂态电压幅值最小。可见,特高压直流输电线路和边界都对暂态信号高频量有衰减作用,故障点距离保护安装点 700 km 处,直流输电线路对暂态信号高频量的衰减作用已经远远超过边界对暂态信

号高频量的衰减作用。

## 6 结论

本文分析特高压直流输电线路频率特性,分析由平波电抗器、直流滤波器、PLC 滤波器所构成特高压直流输电线路频率特性,研究故障位置对保护安装点所检测到的故障暂态信号高频量频率特性的影响,得到如下结论。

**a.** 特高压直流线路对高频量有衰减作用,线路越长,衰减作用越强烈;由平波电抗器、直流滤波器及 PLC 滤波器构成的特高压直流输电线路边界对高频量有很强的衰减作用。

**b.** 保护安装点所检测到的故障暂态信号高频量频率特性与故障位置密切相关,当故障点与保护安装点的距离大于  $-\frac{1}{\alpha} \ln |G(j\omega)|$  时,线路对频率为  $\omega/(2\pi)$  高频量的衰减作用将大于边界的衰减作用。

## 参考文献:

- [1] 王钢,李志铿,李海锋.  $\pm 800$  kV 特高压直流输电线路暂态保护[J]. 电力系统自动化,2007,31(21):40-43.  
WANG Gang, LI Zhikeng, LI Haifeng. Transient based protection for  $\pm 800$  kV UHVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(21):40-43.
- [2] 张保会,张嵩,尤敏,等. 高压直流线路单端暂态量保护研究[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(15):18-23.  
ZHANG Baohui, ZHANG Song, YOU Min, et al. Research on transient based protection for HVDC line[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15):18-23.
- [3] 束洪春,刘可真,朱盛强,等.  $\pm 800$  kV 特高压直流输电线路单端电气量暂态保护[J]. 中国电机工程学报,2010,30(31):108-117.  
SHU Hongchun, LIU Kezhen, ZHU Shengqiang, et al.  $\pm 800$  kV UHVDC transmission line protection based on single end electrical transmission single[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(31):108-117.
- [4] JOHNS A T, AGGARWAL R K. New approach to power line protection based upon the detection of fault induced high frequency signals[J]. IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, 1990, 137(4):307-313.
- [5] BO Z Q. A new non-communication protection technique for transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(4):1073-1078.
- [6] 王钢,罗健斌,李海锋,等. 特高压直流输电线路暂态能量保护[J]. 电力系统自动化,2010,34(1):28-31.  
WANG Gang, LUO Jianbin, LI Haifeng, et al. Transient energy protection for  $\pm 800$  kV UHVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1):28-31.
- [7] 李振强,鲁改凤,吕艳萍. 基于小波变换的高压直流输电线路暂态电压行波保护[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(13):40-45.  
LI Zhenqiang, LU Gaifeng, LÜ Yanping. A novel scheme of HVDC transmission line voltage traveling wave protection based on wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(13):40-45.
- [8] 王瑶. 特高压直流输电控制与保护技术的研究[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(15):53-58.  
WANG Yao. Study on the control and protection system of ultra high voltage direct current transmission[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(15):53-58.
- [9] 艾琳. 高压直流输电线路行波保护的研究[D]. 北京:华北电力大学,2002.  
AI Lin. Research on Theory of travelling wave protection of HVDC line[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2002.
- [10] 郑晓东,邵能灵,杨光亮,等. 特高压直流输电系统的建模与仿真[J]. 电力自动化设备,2012,32(7):10-14.  
ZHENG Xiaodong, TAI Nengling, YANG Guangliang, et al. Modeling and simulation of UHVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(7):10-14.
- [11] 莫丽琼.  $\pm 800$  kV 特高压直流输电系统谐波不稳定研究[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):118-122.  
MO Liqiong. Study of harmonic instability for  $\pm 800$  kV UHVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5):118-122.
- [12] 李战鹰,黄莹,李建华,等. 基于非特征谐波潮流统一算法的  $\pm 800$  kV 特高压直流输电系统非特征谐波分析[J]. 电力自动化设备,2009,29(1):11-14.  
LI Zhanying, HUANG Ying, LI Jianhua, et al. Non-characteristic harmonic analysis of  $\pm 800$  kV UHVDC transmission system based on unified non-characteristic harmonic load flow algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(1):11-14.
- [13] 段建东,张保会,李鹏,等. 超高压输电线路新单端暂态量保护元件的实用算法[J]. 中国电机工程学报,2007,27(7):45-51.  
DUAN Jiandong, ZHANG Baohui, LI Peng, et al. Principle and algorithm of non-unit transient-based protection for EHV transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(7):45-51.
- [14] 段建东,张保会,任晋峰,等. 超高压输电线路单端暂态量保护元件的频率特性分析[J]. 中国电机工程学报,2007,27(1):37-43.  
DUAN Jiandong, ZHANG Baohui, REN Jinfeng, et al. Single ended transient based protection for EHV transmission lines basic theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1):37-43.
- [15] 中国南方电网公司.  $\pm 800$  kV 特高压直流输电技术研究[M]. 北京:中国电力出版社,2006:60-65.
- [16] 施围,郭洁. 电力系统过电压计算[M]. 北京:高等教育出版社,2006:32-36.
- [17] 张鑫,牟龙华. 基于故障暂态电流主频分量的矿山电网暂态保护[J]. 电力自动化设备,2013,33(7):75-80.  
ZHANG Xin, MU Longhua. Transient protection based on main frequency component of transient fault current for mine power network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(7):75-80.

## 作者简介:

陈仕龙(1973-),男,四川汉源人,讲师,博士研究生,研究方向为高压直流输电(**E-mail**:chenshilong3@126.com);

束洪春(1961-),男,江苏丹阳人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力信号处理、电力系统新型继电保护与故障测距等(**E-mail**:kmshe@sina.com)。

(下转第 153 页 continued on page 153)

## Control platform based on dual DSPs for dual-PWM converter

YIN Lu,ZHAO Zhengming,LU Ting,YUAN Liqiang,ZOU Gaoyu

(State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments,  
Department of Electrical Engineering,Tsinghua University,Beijing 100084,China)

**Abstract:** The topologies and existing control strategies of dual-PWM converter are analyzed and the hardware requirements of its control platform are determined,which is designed modularly with two fixed-point DSPs(TMS320F2812). The design methods of each hardware unit and its functions are described in detail. Though the control platform is designed specially for the dual-PWM converter,it can be used as a general development board. Experimental results of a 55 kW three-phase two-level dual-PWM back-to-back converter and a 2.2 kW three-phase variable-frequency speed regulation system validate the correctness and feasibility of the designed platform.

**Key words:** electric converters; pulse width modulation; DSP; control platform; design

.....  
(上接第 139 页 continued from page 139)

## Frequency characteristics of UHVDC transmission line and its boundary

CHEN Shilong,SHU Hongchun,XIE Jing,CAI Zilong,ZHANG Wenying

(School of Electric Power Engineering,Kunming University of Science and Technology,Kunming 650500,China)

**Abstract:** According to the actual parameters of Yunnan-Guangdong UHVDC transmission system,the frequency-domain model of UHVDC transmission line and its boundary consisting of smoothing reactor,DC filter and PLC filter is built and the frequency characteristics of UHVDC transmission line and its boundary are analyzed. The influence of UHVDC transmission line and its boundary on the high-frequency component attenuation of fault transient signal and the influence of fault position on the high-frequency components of fault transient signal detected by relay protection are studied,which leads to following conclusion;the fault transient signal attenuation degree is relative to the distance between fault position and relay protection. When the distance is longer than  $-\ln |G(j\omega)|/\alpha$ ,the influence of transmission line on the  $\omega/(2\pi)$ -frequency component attenuation is greater than that of boundary. The simulation model with actual parameters is built and the simulative results show the validity of above conclusion.

**Key words:** UHVDC; UHV power transmission; DC power transmission; line boundary; frequency characteristic; fault transient signal; frequency analysis