

昆柳龙特高压三端混合直流输电线路边界频率特性研究

邢超¹, 蔡旺^{1,2,3}, 毕贵红², 陈仕龙², 高敬业², 王龙²

(1. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南 昆明 650217; 2. 昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650500; 3. 云南电网有限责任公司昆明供电局, 云南 昆明 650011)

摘要:为研究电网换相换流器和模块化多电平换流器并联型特高压三端混合直流线路行波边界保护,有必要研究电网换相换流器和模块化多电平换流器并联型特高压三端混合直流线路边界频率特性。特高压三端混合直流输电线路边界不对称,分析了昆北侧边界、柳北侧边界、昆柳段线路末端边界、柳龙段线路首端边界、龙门侧边界的拓扑结构。建立特高压多端混合直流输电线路边界频域模型,分析线路边界的频率特性,研究高频和中低频暂态信号在输电线路边界作用下的衰减特性。研究表明:昆北、柳北、龙门侧边界,对高频暂态信号呈高阻特性,有较强的衰减作用;昆柳段线路末端边界和柳龙段线路首端边界,对中低频暂态信号具有一定衰减作用,对高频暂态信号衰减较弱。

关键词:特高压三端混合直流输电;线路边界;频率特性;高频暂态信号;衰减特性

中图分类号:TM 721.1

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202208048

0 引言

特高压多端混合直流输电技术集传统直流输电技术占地面积小、传输容量大和柔性直流输电技术功率解耦控制、谐波含量低、能多落点受电的优势于一体^[1],解决了传统直流存在换相失败及多馈入直流问题^[2-3],是未来直流输电技术重点研究方向之一。目前昆柳龙特高压多端混合直流输电工程已投入运行,送端采用电网换相换流器(line commutated converter, LCC)型换流站,受端采用模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)型换流站,是柔性直流输电技术首次运用于特高压直流输电工程。作为新兴的直流输电技术研究热点,其输电线路保护问题急需解决。

综观实际运行的直流输电工程,输电线路配备有主保护和后备保护,前者采用行波保护,后者采用纵联差动保护和低电压保护^[4-5],但行波保护自身存在的缺点不易解决,可靠性不高、对高阻接地故障灵敏度不够等问题突显^[6-7]。昆柳龙特高压直流输电工程采用行波保护作为线路主保护,但行波保护可靠性和抗干扰能力差的问题并未得到解决,特别是该工程线路具有T接的特点,折反射行波的识别存在困难,单端测量装置不能准确区分T区靠近汇流母线两侧的故障。

为了克服行波保护存在的缺点,一些学者对高频暂态量信号进行研究,分析其在输电线路上的传

播特性,将暂态量保护引入输电线路保护中。文献[8]对超高压输电线路进行研究,分析母线、线路及阻波器的频率特性,提出了边界的概念。文献[9]以特高压直流输电线路为研究对象,在对该线路边界频率特性进行分析的基础上,提出一种利用Hilbert能量幅值和波形信息的输电线路保护方案。文献[10]以双端柔性直流线路为研究对象,对由电容外侧一定长度的线路和大电容构成的边界特性进行分析,提出一种利用电流高低频幅值比的保护方案。文献[11]以多端柔性直流线路为研究对象,分别对故障期间极间电流耦合和线路边界特性进行分析,提出一种故障辨识方法。特高压多端混合直流输电系统拓扑结构明显不同于上述输电系统,其边界不对称,无法将上述输电线路边界研究成果直接应用于特高压多端混合直流输电系统。同时,专门针对特高压多端混合直流输电线路边界频率特性的研究尚属空白,因此有必要对特高压多端混合直流输电系统边界元件的构成及其频率特性进行深入研究。

本文以昆柳龙直流输电工程为研究对象,首先分析了该工程输电线路边界元件的构成;然后研究了特高压多端混合直流输电系统边界的频率特性,以及边界对高频和中低频暂态量信号的衰减作用;最后,采用PSCAD/EMTDC仿真软件,建立特高压多端混合直流输电仿真模型,验证了边界对高频和中低频暂态量信号的衰减作用。

1 特高压多端混合直流输电系统结构和故障位置对暂态信号影响

1.1 特高压多端混合直流输电系统主结构分析

以昆柳龙直流输电工程为例,其系统主拓扑及故障发生位置见附录A图A1。图中: f_{1s} 为昆柳段线

收稿日期:2021-10-19;修回日期:2022-07-05

在线出版日期:2022-09-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52067009)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52067009)

路首端故障; f_{1e} 为昆柳段线路末端故障; f_{2s} 为柳龙段线路首端故障; f_{2e} 为柳龙段线路末端故障; f_3 为柳北换流站直流母线故障; f_4 为昆北换流站直流母线故障; f_5 为龙门换流站直流母线故障。由图可见: 昆北侧直流输电线路装设有直流滤波器及平波电抗器; 柳北侧直流输电线路仅装设有限流电抗器, 且该限流电抗器并联于汇流母线上; 龙门侧直流输电线路仅装设有限流电抗器。分析可知, 直流输电线路边界呈现明显不对称的特点。

1.2 特高压多端混合直流输电系统故障位置对暂态信号的影响

昆柳龙直流输电工程正、负极故障发生位置类似, 故本文以正极为例对故障发生位置进行分析, 故障发生位置见图 A1。对于 f_{1s} 、 f_{1e} , 故障暂态信号通过线路直接到达保护 1、2, 需要经过线路与汇流母线才能到达保护 3、4。对于 f_{2s} 、 f_{2e} , 故障暂态信号通过线路直接到达保护 3、4, 需要经过线路与汇流母线才能到达保护 1、2。对于 f_3 , 故障暂态信号需要经过限流电抗器、线路和汇流母线才能到达保护 1—4。对于 f_4 , 故障暂态信号需要经过平波电抗器和直流滤波器才能到达保护 1, 需要经过平波电抗器、直流滤波器和线路才能到达保护 2, 需要经过平波电抗器、直流滤波器、线路和汇流母线才能到达保护 3、4。对于 f_5 , 故障暂态信号需要经过限流电抗器才能到达保护 4, 需要经过限流电抗器和线路才能到达保护 3, 需要经过限流电抗器、线路和汇流母线才能到达保护 1、2。

由上述分析可知, 故障位置不同, 故障暂态信号到达保护安装处所经过的电力器件也有所不同, 故障暂态信号的衰减特性也不同。因此, 有必要研究不同电力器件所构成的边界, 并分析不同边界的频率特性, 以便研究故障暂态信号通过边界后的衰减特性, 从而为研究特高压三端混合直流线路行波边界保护打下基础。

2 特高压多端混合直流输电线路边界频率特性分析

2.1 昆北侧边界频率特性分析

昆柳龙直流输电工程昆北侧配置了平波电抗器与直流滤波器, 昆北侧线路边界如图 1 所示。图中: U_1 为区外暂态电压; U_2 为区内边界元件处暂态电压; L_{yn} 为昆北侧平波电抗器电感; C_1 — C_3 为组成直流滤波器所需的电容元件; L_1 — L_3 为组成直流滤波器所需的电感元件。

由于昆北侧边界拓扑结构与云广直流工程一致, 昆北侧边界频率特性与文献[12]中所述特性类似, 根据昆柳龙特高压三端混合直流输电工程平波

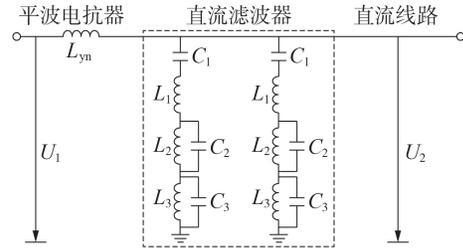


图1 昆北侧线路边界示意图

Fig.1 Schematic diagram of Kunbei-side line boundary

电抗器和直流滤波器实际参数, 昆北侧边界传递函数 $G_1(j\omega)$ 的频率特性见附录 A 图 A2。由图 A2(a) 可以看出, 当频率 $f > 1.5$ kHz 时, 即高频段所在区域内, $|G_1(j\omega)| \ll 1$ 。由此可见, 高频暂态量信号在昆北侧边界作用下其衰减作用明显。由图 A2(b) 可以看出, 当 $f > 1.55$ kHz 时, 即高频段所在区域内, $G_1(j\omega)$ 的相位趋近于 0° , 可见, 高频暂态量信号经昆北侧边界后相位变化明显。

2.2 T区各边界频率特性分析

昆柳龙直流输电工程柳北换流站通过限流电抗器与汇流母线并联形成 T 区, 单极直流极线处装设 1 台 100 mH 的限流电抗器, 中性母线处装设 2 台 100 mH 的限流电抗器, 共计 3 台限流电抗器; 柳北侧单极总电感为 300 mH, 其主要接线图如图 2 所示。图中: L_{nb} 为中性母线处限流电抗器电感; L_{dp} 为直流极线处限流电抗器电感。

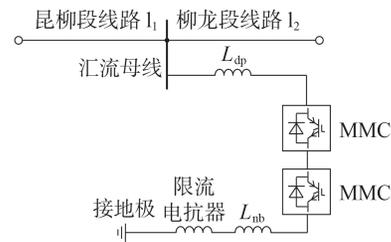


图2 柳北换流站主接线图

Fig.2 Main wiring diagram of Liubei-side converter station

从图 2 可以看出, 限流电抗器和 MMC 采用串联接线形式。对于 MMC, 文献[13]认为可将其等效为 RLC 串联电路, 故得到由一段架空线路等效阻抗、汇流母线对地杂散电容、限流电抗器与 MMC 连接后的等效电路, 如图 3 所示。图中: Z_{l1} 为一段昆柳段架空线路等值阻抗, R_{l1} 、 L_{l1} 分别为对应的电阻和电感; Z_{l2} 为一段柳龙段架空线路等值阻抗, R_{l2} 、 L_{l2} 分别为对应的电阻和电感; C_s 为汇流母线对地杂散电容; L_{ex} 为柳北侧限流电抗器电感, 由中性母线处限流电抗器电感 L_{nb} 和直流极线处限流电抗器电感 L_{dp} 两部分组成; R_{eq} 、 L_{eq} 、 C_{eq} 分别为 MMC 换流阀等效电阻、电感、电容。对于超高压交流系统, 母线分布

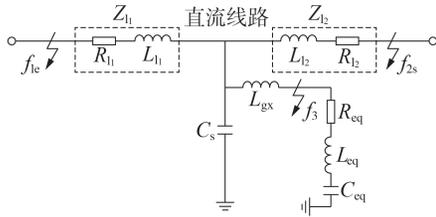


图3 T区等效电路

Fig.3 Equivalent circuit of T zone

电容数值通常在 2000~15000 pF 之间^[14],特高压直流系统 C_s 也在此范围附近。根据昆柳龙直流输电工程实际参数,经过计算之后取 $R_{eq}=0.384 \Omega$, $L_{eq}=86 \text{ mH}$, $C_{eq}=0.164 \text{ mF}$, $C_s=0.016 \mu\text{F}$, $R_{l1}=0.02291 \Omega$, $L_{l1}=0.89 \text{ mH}$, $R_{l2}=0.0391 \Omega$, $L_{l2}=0.945 \text{ mH}$ 。

由图 A1 和图 3 可知,当发生故障 f_3 时,故障暂态量信号需要经过限流电抗器和汇流母线才能到达保护 2 和保护 3,由此提出将限流电抗器和汇流母线对地杂散电容构成柳北侧边界,其等效电路如图 4 所示。图中: $L_{gx}=L_{dp}=100 \text{ mH}$, $C_s=0.016 \mu\text{F}$; U_3 为区外暂态电压; U_4 为 U_3 经边界衰减后传波到保护安装处的暂态电压。

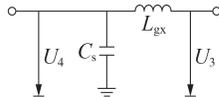


图4 柳北侧线路边界等效电路

Fig.4 Equivalent circuit of Liubei-side line boundary

可得限流电抗器和汇流母线对地杂散电容的阻抗表达式分别如式(1)、(2)所示。

$$Z_1(j\omega) = j\omega L_{gx} \quad (1)$$

$$Z_2(j\omega) = 1/(j\omega C_s) \quad (2)$$

根据柳北侧边界等效电路和传递函数的定义,可以得到柳北侧边界传递函数 $G_2(j\omega)$ 的表达式为^[7]:

$$G_2(j\omega) = \frac{U_4(j\omega)}{U_3(j\omega)} = \frac{Z_2(j\omega)}{Z_1(j\omega) + Z_2(j\omega)} \quad (3)$$

根据昆柳龙直流输电工程实际参数, $G_2(j\omega)$ 的频率特性见附录 A 图 A3。从图 A3(a)可以看出,当 $f > 7.09 \text{ kHz}$ 时,即高频暂态量所在区段内, $|G_2(j\omega)| \ll 1$ 。由此可见,高频暂态量信号在柳北侧线路边界的作用下衰减作用明显。从图 A3(b)可以看出,当 $f > 14.49 \text{ kHz}$ 时,即高频暂态量所在区段内, $G_2(j\omega)$ 的相位趋于 0° ,可见,高频暂态量信号经柳北侧线路边界后相位变化明显。

由图 A1 和图 3 可知:发生故障 f_{1c} 时,故障暂态量信号经过线路、汇流母线后再到保护 3;发生故障 f_{2c} 时,故障暂态量信号经过线路、汇流母线后到达保护 2。而柳北侧限流电抗器和 MMC 串联后又与汇流

母线并联,因此将一段昆柳段架空线路等值阻抗、汇流母线对地杂散电容、柳北侧限流电抗器和柳北换流站 MMC 等效 RLC 电路一起构成柳龙段线路首端边界,其等效电路如图 5 所示。将一段柳龙段架空线路等值阻抗、汇流母线对地杂散电容、柳北侧限流电抗器和柳北换流站 MMC 等效 RLC 电路一起构成昆柳段线路末端边界,其等效电路见附录 A 图 A4。图中: $L_{gx}=L_{dp}+L_{nb}=300 \text{ mH}$,其余各元器件参数值与图 3 中一致; Z_{eq} 为柳北侧限流电抗器与 MMC 等效 RLC 电路串联后构成的等值阻抗; U_5 、 U_7 为区外暂态电压; U_6 为 U_5 经边界衰减后传播到保护安装处的暂态电压; U_8 为 U_7 经边界衰减后传播到保护安装处的暂态电压。

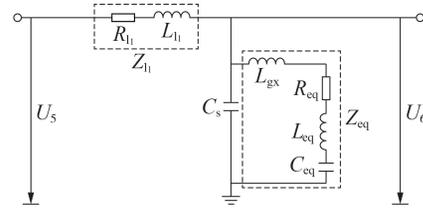


图5 柳龙段线路首端边界示意图

Fig.5 Schematic diagram of boundary of Liulong-section line first end

比较图 5 和图 A4 可知,昆柳段线路末端边界与柳龙段线路首端边界基本一致,仅是作为边界元件的两段线路的参数有所不同。因此,昆柳段线路末端边界特性、幅频特性与柳龙段线路首端边界特性、幅频特性基本一致,本文以柳龙段线路首端边界为例进行分析。可得一段昆柳段架空线路等值阻抗、柳北侧限流电抗器与 RLC 电路串联后和汇流母线对地杂散电容并联构成的等值阻抗分别如式(4)、(5)所示。

$$Z_3(j\omega) = Z_{l1}(j\omega) = R_{l1} + j\omega L_{l1} \quad (4)$$

$$Z_4(j\omega) = Z_{eq}(j\omega)/(1 + j\omega C_s Z_{eq}(j\omega)) \quad (5)$$

$$Z_{eq}(j\omega) = j\omega L_{gx} + R_{eq} + j\omega L_{eq} + 1/(j\omega C_{eq}) \quad (6)$$

根据柳龙段线路首端边界等效电路和传递函数的定义,可以得到柳龙段线路首端边界传递函数 $G_3(j\omega)$ 的表达式为:

$$G_3(j\omega) = U_6(j\omega)/U_5(j\omega) = Z_4(j\omega)/(Z_3(j\omega) + Z_4(j\omega)) \quad (7)$$

根据昆柳龙直流输电工程实际参数, $G_3(j\omega)$ 的幅频特性曲线见附录 A 图 A5。由图可以看出:当 $20 \text{ Hz} < f < 301 \text{ Hz}$ 时,即中低频暂态量所在区段内, $|G_3(j\omega)| < 1$;而 $f > 1 \text{ kHz}$ 后,即高频暂态量所在区段内, $|G_3(j\omega)| \approx 0.98$ 。结合图 A1、图 5 可知:当发生故障 f_{1c} 时,对于故障暂态信号中低频段分量, C_s 相当于开路,中低频段分量通过 Z_{eq} 流入大地;对于故障暂态信号高频分量, L_{gx} 相当于开路,高频分量通过 C_s 流入大地。综合上述分析可知:柳龙段线路首端

边界对中低频段分量具有衰减作用,与文献[13]所得结论一致,但对高频分量衰减作用较弱;而昆柳段线路末端边界特性与柳龙段线路首端边界特性基本一致,即昆柳段线路末端边界对中低频段分量具有衰减作用,但对高频分量的衰减作用较弱。

2.3 龙门侧边界频率特性分析

对于龙门换流站,在昆柳龙直流输电工程中单极中性母线和直流极线处各配置1台150 mH的限流电抗器,2台限流电抗器的总电感为300 mH,龙门换流站直流输电线路末端只串联了限流电抗器,而架空线路为分布参数,导线与大地间存在对地电容,因此将龙门侧一段柳龙段架空线路对地电容和直流极线处限流电抗器作为边界元件,提出由限流电抗器和一段柳龙段架空线路对地电容共同构成龙门侧线路边界,等效电路如图6所示。图中: L_{gd} 为直流极线处限流电抗器电感; C_d 为一段柳龙段架空线路对地电容; U_9 为区外暂态电压; U_{10} 为 U_9 经边界衰减后传波到保护安装处的暂态电压。

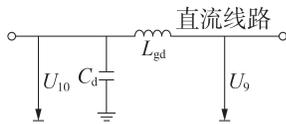


图6 龙门侧线路边界等效电路

Fig.6 Equivalent circuit of Longmen-side line boundary

限流电抗器、一段柳龙段架空线路对地电容的阻抗表达式分别如式(8)、(9)所示。

$$Z_5(j\omega) = j\omega L_{gd} \quad (8)$$

$$Z_6(j\omega) = 1/(j\omega C_d) \quad (9)$$

根据龙门侧边界等效电路和传递函数的定义,可以得到龙门侧边界传递函数 $G_4(j\omega)$ 的表达式为:

$$G_4(j\omega) = \frac{U_{10}(j\omega)}{U_9(j\omega)} = \frac{Z_6(j\omega)}{Z_5(j\omega) + Z_6(j\omega)} \quad (10)$$

根据昆柳龙直流输电工程实际参数,取 $L_{gd} = 150$ mH, $C_d = 0.006208$ μ F,则 $G_4(j\omega)$ 的频率特性见附录A图A6。从图A6(a)可以看出,当 $f > 9$ kHz时,即高频暂态量所在区段内, $|G_4(j\omega)| \ll 1$ 。由此可见,一段柳龙段架空线路对地电容和限流电抗器构成的龙门侧边界对高频暂态量信号有明显的衰减作用。从图A6(b)可以看出,当 $f > 18.38$ kHz时,即高频暂态量所在区段内, $G_4(j\omega)$ 的相位趋于 0° ,可见,高频暂态量信号经龙门侧边界后相位变化明显。

2.4 基于边界频率特性的直流线路保护方案

本文利用图A1中的保护2和保护3,根据上述昆柳龙特高压三端混合直流输电线路边界频率特性,提出昆柳龙特高压三端混合直流输电线路行波边界保护原理,区分昆北侧线路区内外故障、龙门侧线路区内外故障以及T区靠近汇流母线两侧的故

障,实现昆柳龙直流输电线路全线速动保护。

本文选用小波变换提取暂态信号高频分量、中低频分量。假设第 i 尺度下的小波能量对应暂态信号的中低频分量,第 j 尺度小波能量对应暂态信号的高频分量,则暂态信号的中低频段小波能量 E_L 、高频段小波能量 E_H 为:

$$\begin{cases} E_L = \sum d_i^2(k) \\ E_H = \sum d_j^2(k) \end{cases} \quad (11)$$

式中: d_i 、 d_j 分别为故障电压暂态信号1模分量经小波变换后的第 i 层、第 j 层细节系数。

1) T区方向判据。

由2.2节中T区各边界频率特性分析可知,柳龙段线路首端边界和昆柳段线路末端边界对中低频分量有一定的衰减作用,故利用中低频分量的衰减特性可以区分故障区域。构造暂态信号中低频段小波的标准能量差如下^[13]:

$$\Delta E_L = \frac{E_{LM2} - E_{LM3}}{\max(E_{LM2}, E_{LM3})} \quad (12)$$

式中: ΔE_L 为暂态信号中低频段小波的标准能量差; E_{LM2} 、 E_{LM3} 分别为保护2、保护3检测到的中低频段小波能量。

从而得到T区故障区域识别判据为:

$$\begin{cases} |\Delta E_L| > V_{set}, \Delta E_L > 0 & \text{T区左侧发生故障} \\ |\Delta E_L| > V_{set}, \Delta E_L < 0 & \text{T区右侧发生故障} \\ |\Delta E_L| < V_{set} & \text{T区发生故障} \end{cases} \quad (13)$$

式中: V_{set} 为整定值,按大于T区发生故障时的标准能量差最大值且小于T区左侧和右侧发生故障时的标准能量差最小值整定。

式(13)可进一步简化为:

$$\begin{cases} \Delta E_L > V_{set} & \text{T区左侧发生故障} \\ \Delta E_L < -V_{set} & \text{T区右侧发生故障} \\ -V_{set} < \Delta E_L < V_{set} & \text{T区发生故障} \end{cases} \quad (14)$$

2) 整流侧区内外判据。

由2.1节中昆北侧边界频率特性分析可知,昆北侧边界对高频暂态量具有明显的衰减作用,故利用高频暂态量的衰减特性区分昆北侧区内外故障。构造昆北侧区内外故障识别判据如下:

$$E_{HM2} \geq E_{HsetM2} = K_{rel}^{M20} E_{HM20} \quad (15)$$

式中: E_{HM2} 为保护2检测到的高频段小波能量; E_{HsetM2} 为保护2的整定值; K_{rel}^{M20} 为可靠系数; E_{HM20} 为极端工况下保护2检测到的高频段小波能量。

3) 柳龙段线路末端区内外判据。

由2.3节龙门侧边界频率特性分析可知,龙门侧边界对高频暂态量有明显的衰减作用,故利用高频暂态量的衰减特性区分柳龙段线路末端区内外故障,构造柳龙段线路末端区内外故障识别判据如下:

$$E_{HM3} \geq E_{HsetM3} = K_{rel}^{M30} E_{HM30} \quad (16)$$

式中: E_{HM3} 为保护 3 检测到的高频段小波能量; E_{HsetM3} 为保护 3 的整定值; K_{rel}^{M30} 为可靠系数; E_{HM30} 为极端工况下保护 3 检测到的高频段小波能量。

4) 保护方案流程。

综合利用 T 区方向判据、整流侧区内外判据和柳龙段线路末端区内外判据构成的保护方案流程图如图 7 所示。如附录 A 图 A1 所示, 昆柳龙特高压直流输电工程在昆柳段线路首、末端分别配置了保护 1 和保护 2, 在柳龙段线路首、末端配置了保护 3 和保护 4。本文所提线路保护方案只利用了昆柳段线路末端保护 2 和柳龙段线路首端保护 3, 能够判别昆北侧线路区内外故障、龙门侧线路区内外故障以及 T 区靠近汇流母线两侧的故障, 实现昆柳龙直流输电线路全线速动保护, 且其在工程上是可以实现的。

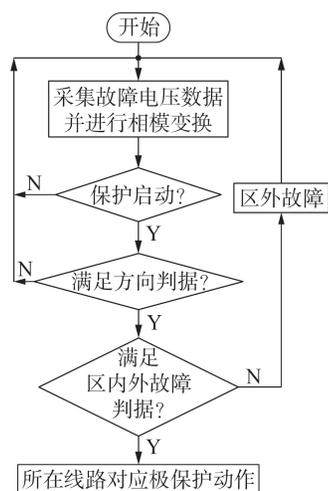


图 7 保护方案流程图

Fig.7 Flowchart of protection scheme

3 边界衰减特性仿真

根据昆柳龙直流输电工程的一次系统参数和控制方式, 按照附录 B 给出的建模方法和图 A1 在 PSCAD / EMTDC 中建立的昆柳龙直流输电工程仿真模型。运用建立的仿真模型, 对特高压多端混合直流输电线路正极进行雷击仿真, 研究特高压多端混合直流输电线路边界对暂态量的衰减作用。本文选用幅值为 5 kA, 波头、半峰时间分别为 2.6、50 μ s 的双指数非故障性雷电流模型作为测试信号, 仿真模型中设雷击开始时间为 1.5 s, 雷击位置分别为图 A1 中 f_{1s} 、 f_{1e} 、 f_{2s} 、 f_{2e} 、 f_3 — f_3 , 采样频率为 200 kHz。将检测点提取到的电压暂态信号先经过相模变换进行解耦, 得到非故障性雷击下的电压 1 模暂态信号, 运用 bior2.2 小波对电压 1 模信号进行 12 层分解并求取小波能量, 选取分解后第 2 层对应的高频段信号和第 12 层对应的中低频信号进行分析, 得到电压 1 模暂态信号经边界衰减前后的小波能量。

3.1 昆北侧边界对暂态量衰减作用仿真

当发生故障 f_{1s} 、 f_4 时, 保护 1 检测到的高频暂态量分别如附录 C 图 C1 中的虚线、实线所示。由图可知: 昆柳段线路首端故障下, 保护 1 检测到的高频暂态量明显大于昆北侧直流母线故障下保护 1 检测到的高频暂态量, 这是由于发生昆柳段线路首端故障时保护 1 检测到的高频暂态量未经过昆北侧边界的衰减, 发生昆北侧直流母线故障时保护 1 检测到的高频暂态量经过昆北侧边界的衰减。2.1 节对昆北侧边界频率特性的分析结果表明, 当 $f > 1.5$ kHz 时, 昆北侧边界对高频暂态量信号有明显衰减作用。算例中边界内的高频小波能量明显大于边界外的高频小波能量, 该仿真结果验证了昆北侧边界对高频暂态量信号有明显衰减作用。

3.2 T 区各边界对暂态量衰减作用仿真

当发生故障 f_{1e} 、 f_3 时, 保护 2 检测到的高频暂态量分别如附录 C 图 C2 中的虚线、实线所示。由图可知, 发生昆柳段线路末端故障时, 保护 2 检测到的高频暂态量明显大于柳北侧直流母线故障时保护 2 检测到的高频暂态量, 这是由于昆柳段线路末端故障时保护 2 检测到的高频暂态量未经过柳北侧边界的衰减, 柳北侧直流母线故障时保护 2 检测到的高频暂态量经过柳北侧边界的衰减所引起的。

当发生故障 f_{2s} 、 f_3 时, 保护 3 检测到的高频暂态量分别如附录 C 图 C3 中的虚线、实线所示。由图可知, 柳龙段线路首端故障下, 保护 3 检测到的高频暂态量明显大于柳北侧直流母线故障下保护 3 检测到的高频暂态量, 这是由于发生柳龙段线路首端故障时, 保护 3 检测到的高频暂态量未经过柳北侧边界的衰减, 发生柳北侧直流母线故障时, 保护 3 检测到的高频暂态量经过柳北侧边界的衰减。

2.2 节 T 区对应的柳北侧边界频率特性分析结果表明, 当 $f > 7.09$ kHz 时, 柳北侧边界对高频暂态量信号有明显衰减作用。算例中边界内的高频小波能量明显大于边界外的高频小波能量, 仿真结果验证了柳北侧边界对高频暂态量信号有明显衰减作用。

当发生故障 f_{2s} 时, 保护 3 检测到的高频暂态量、中低频暂态量分别如附录 C 图 C4、C5 中的虚线所示; 当发生故障 f_{1e} 时, 保护 3 检测到的高频暂态量、中低频暂态量分别如附录 C 图 C4、C5 中的实线所示。由图 C4 可知, 柳龙段线路首端故障下, 保护 3 检测到的高频暂态量略大于靠近昆柳段线路末端故障时保护 3 检测到的高频暂态量, 但两者差距不大。由图 C5 可知, 柳龙段线路首端故障下保护 3 检测到的中低频暂态量明显大于昆柳段线路末端故障下保护 3 检测到的中低频暂态量。可见, 柳龙段线路首端边界对中低频分量具有衰减作用, 但对高频分量衰减作用较弱。2.2 节中 T 区对应的柳龙段线路

首端边界特性分析结果表明,柳龙段线路首端边界对中低频段分量具有一定衰减作用,而高频暂态量信号衰减较弱。算例中边界内的中低频段小波能量大于边界外的中低频段小波能量,边界内的高频小波能量略大于边界外的高频小波能量,该仿真结果验证了柳龙段线路首端边界对中低频段分量具有一定的衰减作用,对高频暂态量信号衰减较弱的结论。

当发生故障 f_1 时,保护2检测到的高频暂态量、中低频暂态量分别如附录C图C6、C7中的虚线所示;当发生故障 f_2 时,保护2检测到的高频暂态量分别如附录C图C6、C7中的实线所示。由图C6可知,昆柳段线路末端故障下保护2检测到的高频暂态量略大于柳龙段线路首端故障下保护2检测到的高频暂态量,但两者差距不大。由图C7可知,昆柳段线路末端故障下保护2检测到的中低频暂态量明显大于柳龙段线路首端故障下保护2检测到的中低频暂态量。可见,昆柳段线路末端边界对中低频段分量具有衰减作用,但对高频分量衰减作用较弱,从而验证了2.2节中T区对应的昆柳段线路末端边界对中低频段分量具有一定衰减作用,对高频暂态量信号衰减较弱的结论。

此外,比较图C4和图C6、图C5和图C7可知,柳龙段线路首端边界与昆柳段线路末端边界衰减作用存在差异,这是由于昆柳段与柳龙段线路参数不一致所引起的。

3.3 龙门侧边界对暂态量衰减作用仿真

当发生故障 f_2 、 f_3 时,保护4检测到的高频暂态量分别为附录C图C8中的虚线、实线所示。由图可知,柳龙段线路末端故障下保护4检测到的高频暂态量明显大于龙门侧直流母线故障下保护4检测到的高频暂态量,这是由发生柳龙段线路末端故障时保护4检测到的高频暂态量未经过龙门侧边界的衰减,发生龙门侧直流母线故障时保护4检测到的高频暂态量经过龙门侧边界的衰减引起的。2.3节中对龙门侧边界频率特性分析结果表明,在 $f > 9$ kHz后,龙门侧边界对高频暂态量信号有明显衰减作用。算例中边界内的高频小波能量明显大于边界外的高频小波能量,该仿真结果验证了龙门侧边界对高频暂态量信号有明显衰减作用。

4 结论

为研究LCC-MMC并联型特高压三端混合直流线路行波边界保护,有必要研究LCC-MMC并联型特高压三端混合直流线路边界频率特性。本文分析昆北侧边界、柳北侧边界、柳龙段线路首端边界、昆柳段线路末端边界、龙门侧边界的拓扑结构,以及昆北侧、柳北侧、昆柳段线路末端、柳龙段线路首端和龙门侧边界频率特性,主要结论如下。

1)昆北侧边界对高频暂态量具有明显的衰减作用,可以利用高频暂态量的衰减特性区分昆北侧区内外故障;柳北侧边界对线路故障信号高频暂态量有明显衰减作用,可以利用高频暂态量的衰减特性区分柳北侧区内外故障;柳龙段线路首端边界对中低频暂态量有一定的衰减作用,对高频暂态量的衰减作用较弱,建议利用中低频暂态量的衰减特性区分柳龙段首端区内外故障;昆柳段线路末端边界对中低频暂态量有一定的衰减作用,对高频暂态量的衰减作用较弱,建议利用中低频暂态量的衰减特性区分昆柳段线路末端区内外故障;龙门侧边界对高频暂态量具有明显的衰减作用,可以利用高频暂态量的衰减特性区分龙门侧区内外故障。

2)直流输电线路边界的频率特性由边界元件的参数决定,与控制系统无关,控制方式对输电线路边界频率特性无明显影响。

3)本文根据得到的昆柳龙特高压三端混合直流输电线路边界频率特性,提出了昆柳龙特高压三端混合直流输电线路行波边界保护原理,其能够准确区分昆北侧线路区内外故障、龙门侧线路区内外故障以及T区靠近汇流母线两侧的故障,克服行波保护可靠性差、抗干扰能力差、难以准确区分T区靠近汇流母线两侧故障的缺点。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 李斌,张纪航,刘海金,等. 基于波形相似度分析的直流输电线路故障测距[J]. 电力自动化设备,2019,39(9):27-32,53.
LI Bin, ZHANG Jihang, LIU Haijin, et al. Fault location of HVDC transmission lines based on waveform similarity analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 27-32, 53.
- [2] 张晨浩,宋国兵,董新洲,等. 混合多端直流输电线路快速保护及自适应重启方法实用化研究[J]. 中国电机工程学报,2021,41(11):3873-3885.
ZHANG Chenhao, SONG Guobing, DONG Xinzhou, et al. Application research on fast line protection and adaptive restarting methods for multi-terminal hybrid LCC/MMC HVDC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(11): 3873-3885.
- [3] 刘海金,李斌,温伟杰,等. 柔性直流系统的线路保护关键技术与展望[J]. 电网技术,2021,45(9):3463-3480.
LIU Haijin, LI Bin, WEN Weijie, et al. Review and prospect on transmission line protection in flexible DC system[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3463-3480.
- [4] 和敬涵,周琳,罗国敏,等. 基于单端电气量的多端柔性直流配电系统暂态保护[J]. 电力自动化设备,2017,37(8):158-165.
HE Jinghan, ZHOU Lin, LUO Guomin, et al. Transient protection based on single-end electrical signals for multi-terminal flexible DC distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 158-165.
- [5] 宋国兵,侯俊杰,郭冰,等. 计及主动故障限流策略的柔性直流电网纵联保护[J]. 电力自动化设备,2021,41(4):123-131,138.
SONG Guobing, HOU Junjie, GUO Bing, et al. Pilot protection

- of flexible DC grid considering active fault current limiting strategy[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(4): 123-131,138.
- [6] 王永进,樊艳芳. 基于反行波与信号处理的特高压直流输电线路纵联保护方法[J]. 电力自动化设备,2020,40(3):114-121. WANG Yongjin,FAN Yanfang. Longitudinal protection method based on reverse traveling wave and signal processing for UHVDC power transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(3):114-121.
- [7] 侯俊杰,宋国兵,常仲学,等. 基于暂态功率的高压直流线路单端量保护[J]. 电力系统自动化,2019,43(21):203-212. HOU Junjie, SONG Guobing, CHANG Zhongxue, et al. Transient power based single-end protection for HVDC transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(21): 203-212.
- [8] 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.
- [9] 樊艳芳,王永进. 基于Hilbert能量幅值信息和波形信息的特高压直流输电线路单端保护方法[J]. 电工技术学报,2021,36(9):1818-1830. FAN Yanfang, WANG Yongjin. Single-ended protection method for UHVDC transmission line based on Hilbert energy amplitude information and waveform information[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2021,36(9):1818-1830.
- [10] 宋国兵,冉孟兵,褚旭,等. 利用高低频电流幅值比的VSC-HVDC输电线路全线速动保护新原理[J]. 电网技术,2014,38(5):1402-1407. SONG Guobing,RAN Mengbing,CHU Xu,et al. A new single-end current based whole-line quick-action protection for VSC-HVDC transmission lines[J]. Power System Technology,2014, 38(5):1402-1407.
- [11] 付华,陈浩轩,李秀菊,等. 含边界元件的MMC-MTDC直流侧单端量故障辨识方法[J]. 电工技术学报,2021,36(1):215-226. FU Hua, CHEN Haoxuan, LI Xiuju, et al. MMC-MTDC DC side single-ended quantity fault identification method with boundary elements[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2021,36(1):215-226.
- [12] 王钢,李志铿,李海锋. ±800 kV特高压直流线路暂态保护[J]. 电力系统自动化,2007,31(21):40-43,48. WANG Gang, LI Zhikeng, LI Haifeng. Transient based protection for ±800 kV UHVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(21):40-43,48.
- [13] 李海锋,张坤,王钢,等. 并联型多端混合高压直流线路故障区域判别方法[J]. 电力系统自动化,2019,43(4):119-125,179. LI Haifeng, ZHANG Kun, WANG Gang, et al. Fault area discrimination method for parallel multi-terminal hybrid HVDC line[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(4): 119-125,179.
- [14] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 2版. 西安:西安交通大学出版社,2007:1-14.

作者简介:



邢超

邢超(1986—),男,高级工程师,硕士,主要研究方向为直流输电与电力电子技术(E-mail:497336360@qq.com);

蔡旺(1995—),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail:caiwang129@126.com);

陈仕龙(1972—),男,教授,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail:chenshilong3@126.com)。

(编辑 任思思)

Research on boundary frequency characteristics of Kunliulong hybrid three-terminal UHVDC transmission line

XING Chao¹, CAI Wang^{1,2,3}, BI Guihong², CHEN Shilong², GAO Jingye², WANG Long²

(1. Electric Power Research Institute of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China;

2. School of Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

3. Kunming Power Supply Bureau of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650011, China)

Abstract: In order to study the traveling wave boundary protection of the line commutated converter-modular multilevel converter (LCC-MMC) parallel hybrid three-terminal UHVDC line, it is necessary to study the boundary frequency characteristics of the LCC-MMC parallel hybrid three-terminal UHVDC transmission line. The boundary of hybrid three-terminal UHVDC transmission line is asymmetric. The topological structures of Kunbei-side boundary, Liubei-side boundary, the boundary of Kunliu-section line last end, the boundary of Liulong-section line first end, and the Longmen-side boundary are studied. The boundary frequency domain model of hybrid multi-terminal UHVDC transmission line is established, by which, the boundary frequency characteristics of line and the attenuation characteristics of high-frequency transient signals under the boundary of transmission line are studied. The study results show that for high-frequency transient signals, Kunbei, Liubei and Longmen-side boundaries exhibit high resistance characteristics and have a strong attenuation on high-frequency transient signals, the boundary of Kunliu-section line last end and the boundary of Liulong-section line first end have attenuation effect on the mid-low frequency transient signals, and the attenuation of the high frequency transient signals is weak.

Key words: hybrid three-terminal UHVDC power transmission; line boundary; frequency characteristic; high frequency transient signal; attenuation characteristic

附录 A

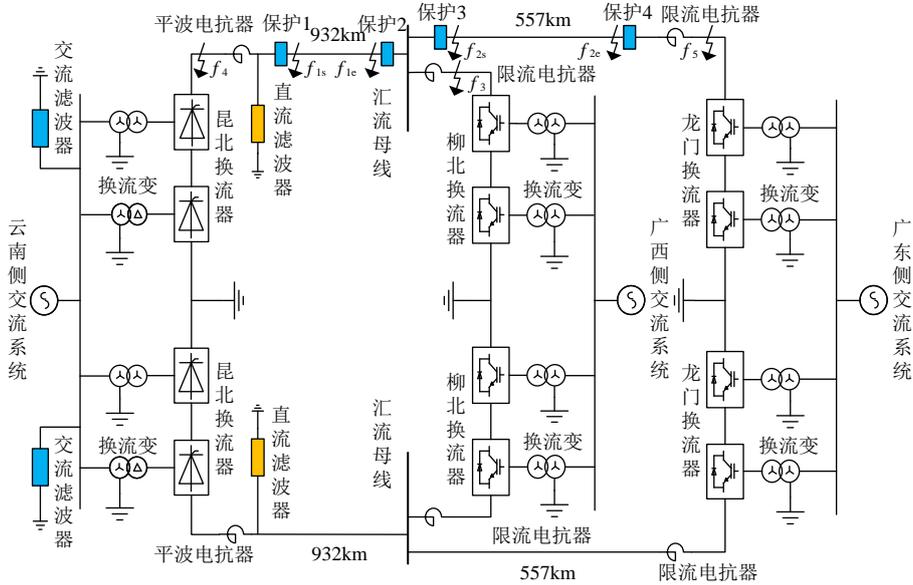


图 A1 昆柳龙高压多端混合直流主拓扑和故障位置示意图

Fig.A1 Schematic diagram of Kunliulong hybrid multi-terminal UHVDC main topology and fault location

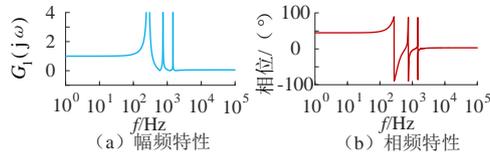


图 A2 昆北侧线路边界频率特性

Fig.A2 Frequency characteristic of Kunbei-side line boundary

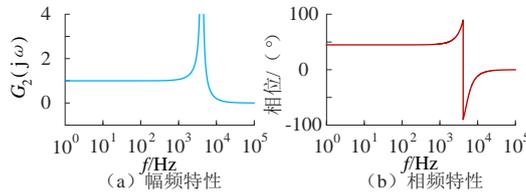


图 A3 柳北侧线路边界频率特性

Fig.A3 Frequency characteristic of Liubei-side line boundary

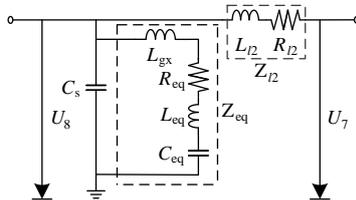


图 A4 昆柳段线路末端边界

Fig.A4 Boundary of Kunliu-section line last end

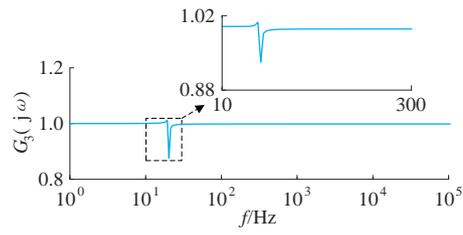


图 A5 柳龙段线路首端边界幅频特性

Fig.A5 Amplitude-frequency characteristic of the boundary of Liulong-section line first end

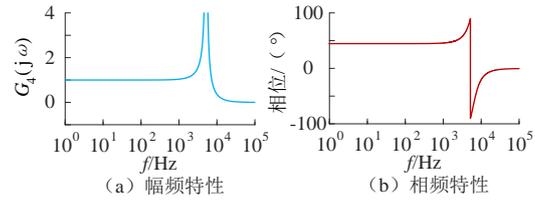


图 A6 龙门侧线路边界频率特性

Fig.A6 Frequency characteristic of Longmen-side line boundary

附录 B

昆柳龙直流输电工程云南送端额定功率为 8000MW，广西受端额定功率为 3000MW，广东受端额定功率为 5000MW，线路全长为 1486km。柳北换流站换流变压器靠近交流系统侧电压为 525kV，靠近逆变器侧电压为 196kV，换流变漏抗为 16%，采用 Y/Y 接线形式。龙门换流站换流变压器靠近交流系统侧电压为 525 kV，靠近逆变器侧电压 217kV，换流变漏抗为 18%，采用 Y/Y 接线形式。昆北换流站换流阀为 LCC 型，2 个 12 脉波换流器通过串联构成换流单元，单个换流器承受 400kV 的电压，柳北侧和龙门侧采用 VSC 型换流阀，由 2 个 MMC 通过串联构成换流单元，单个 MMC 承受 400kV 的电压，MMC 内部子模块采用全桥和半桥 2 种，接线形式按 7:3 的比例串联。昆柳段线路的长度为 932km，沿线平均土壤电阻率为 $1750\Omega\cdot\text{m}$ ，柳龙段线路的长度为 557km，沿线平均土壤电阻率为 $2500\Omega\cdot\text{m}$ ，采用频率相关模型。昆柳龙直流输电工程昆北侧采用定直流电流和定触发角 α 控制，柳北侧采用定有功和无功功率控制，龙门侧采用定直流电压和无功功率控制的方式。目前国际大电网会议（CIGRE）直流输电测试系统提供有传统直流输电（LCC-HVDC）和最近电平逼近型柔性直流（NLC-MMC-HVDC）的控制系统，并无 LCC-VSC 混合型直流输电系统标准模型。故参照 CIGRE 中 LCC-HVDC 和 NLC-MMC-HVDC 这 2 类直流输电控制系统仿真模型，将两者结合并做修改，以适用于昆柳龙直流输电工程。参照 CIGRE 中的 LCC-HVDC 直流输电整流侧控制系统和 NLC-MMC-HVDC 直流输电逆变侧控制系统分别建立昆柳龙直流输电系统整流侧控制系统模型和昆柳龙直流输电系统逆变侧控制系统模型。为适应昆柳龙直流输电工程，对控制系统进行了如下修改：

- 1) 昆北侧选用同一个测量电压、电流值作为单极换流阀的控制信号；用定电流控制产生的同一个触发角 α 同时控制单极换流阀的所有换流器导通；
- 2) 柳北侧采用同一个有功类或无功类指令值作为单极高、低 2 个阀的输入指令信号；
- 3) 龙门侧选用同一个测量电流值和高、低 2 个阀的电压测量值作为单极换流阀的控制信号；采用同一个无功类指令值作为单极高、低 2 个阀的输入指令信号。

基于上述方法建立的昆柳龙直流输电系统控制系统模型性能与实际工程控制系统性能基本一致。根据上述一次系统参数和控制系统模型，建立如图 A1 所示的昆柳龙直流输电工程仿真模型。

附录 C

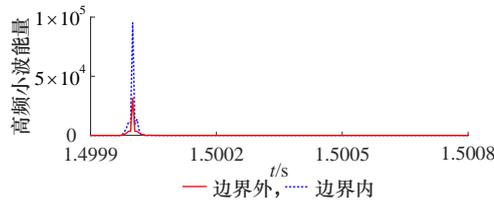


图 C1 经昆北侧边界衰减前后的高频暂态量

Fig.C1 High-frequency transient before and after passing Kunbei-side boundary

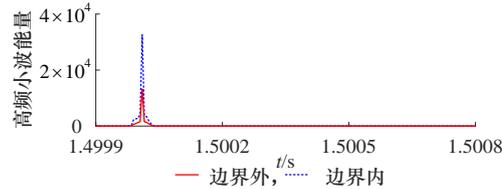


图 C2 经柳北侧（昆柳段末端）边界衰减前后的高频暂态量

Fig.C2 High-frequency transient before and after passing Liubei-side boundary (Kunliu-section line last end)

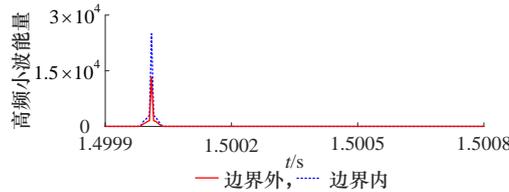


图 C3 经柳北侧（柳龙段首端）边界衰减高频暂态量

Fig.C3 High-frequency transient before and after passing boundary of Liubei-side (Liulong-section line first end)

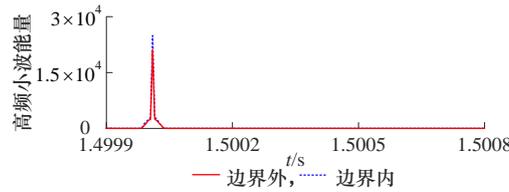


图 C4 经柳龙段首端边界衰减前后的高频暂态量

Fig.C4 High-frequency transient before and after passing boundary of Liulong-section line first end

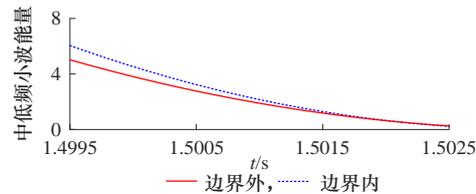


图 C5 经柳龙段首端边界衰减前后的中、低频暂态量

Fig.C5 Mid-low frequency transients before and after passing boundary of Liulong-section line first end

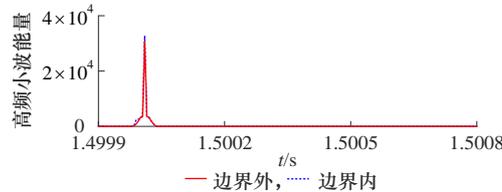


图 C6 经昆柳段末端边界衰减前后的高频暂态量

Fig.C6 High-frequency transient before and after passing boundary of Kunliu-section line last end

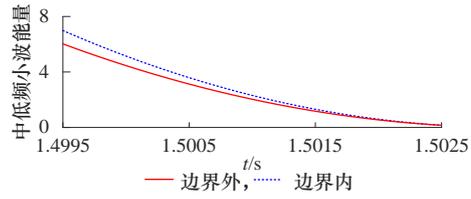


图 C7 经昆柳段末端边界衰减前后的中、低频暂态量

Fig.C7 Mid-low frequency transients before and after passing boundary of Kunliu-section line last end

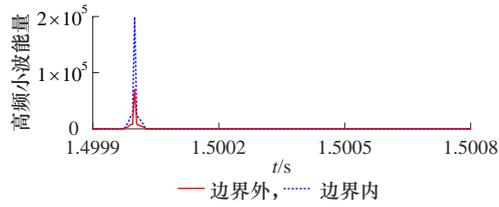


图 C8 经龙门侧边界衰减前后的高频暂态量

Fig.C8 High-frequency transient before and after passing boundary of Longmen-side boundary