Vol.43 No.3 Mar. 2023

基于多层感知器的LCC-MMC并联型特高压三端混合 直流输电线路故障检测方法探讨

邢 超1,高敬业1,2,毕贵红2,陈仕龙2,蔡 旺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)

摘要:针对现有故障检测方法存在阈值整定困难、特征量提取过程复杂的问题,提出一种基于多层感知器 (MLP)的电网换相换流器和模块化多电平换流器(LCC-MMC)并联型特高压三端混合直流输电线路故障检 测方法。首先,分析直流线路昆北侧边界、T区边界、龙门侧边界的频率特性,指出三端直流线路不同区域发 生故障时的故障特征差异;其次,通过小波变换对线模电流、线模电压进行多尺度小波分解,提取小波能量, 并结合正、负极电压变化量组成故障特征量。然后,将故障特征量作为MLP的输入量、故障区域作为输出量, 构建基于MLP的故障区域识别模型;将测量点提取到的故障特征量输入训练完成的模型即可达到故障区域 识别的目的。通过大量仿真验证了所提故障检测方法准确率高,且可耐受300Ω的过渡电阻。 关键词:特高压三端混合直流;频率特性;多层感知器;故障特征量;故障检测

中图分类号:TM771

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202209012

0 引言

近年来,基于电网换相换流器(line commutated converter, LCC)和模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的多端混合直流输电系统受到国内外电力系统领域学者的广泛关注^[1-3]。LCC-MMC型多端混合直流输电技术兼具了基于LCC的高压直流输电(LCC-based high voltage direct current, LCC-HVDC)系统投资费用低、换流技术成熟及基于 MMC 的高压直流输电系统(MMC-based HVDC, MMC-HVDC)有功无功控制灵活、不存在换相失败等优点^[4],成为解决中国新能源并网和功率消纳问题的有效途径之一。因此,多端混合直流输电系统成为未来直流电网的一个重要发展方向。

多端混合直流系统采用架空线输电,沿线地形 复杂,线路故障概率高^[5]。目前,实际的多端混合直 流工程采用行波保护作为直流线路主保护,但行波 保护易受过渡电阻和雷电、噪声等干扰的影响,特别 是直流线路存在T区,折反射行波的识别存在困难, 无法利用线路单端测量装置准确判别T区汇流母线 故障、T区汇流母线左右侧故障^[6]。因此,基于多端 混合直流线路的特点,研究可靠的故障检测方案十 分必要。目前,关于多端混合直流线路故障检测方 案的研究时间并不长。文献[7]分析了多端混合直 流系统T区传递函数的频率特性,得出电流行波的 中低频分量经过T区会大幅衰减,进而利用T区两

收稿日期:2021-12-20;修回日期:2022-07-20 在线出版日期:2022-09-20 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) 侧中低频能量的差异判别故障方向。文献[8]利用 电压线模分量的首极值时间判别多端混合直流线路 的区内故障和区外故障,所提故障检测方案对高阻 接地故障具有很高的灵敏度,且不受故障类型的影 响。文献[9]提出了不同采样频率下时域电压行波 幅值比的多端混合直流线路单端量故障检测方案, 该方案灵敏度较高,可适用于双端和多端直流系统。 以上直流线路故障检测方法虽然各有特色,但需人 工对故障检测判据的阈值进行整定,阈值整定比较 困难。

近年来,随着人工智能的发展,基于智能算法的 故障检测方法在直流系统中得到了应用,该故障检 测方法可避免保护判据阈值的整定和计算环节,对 高阻接地故障也具有较高的灵敏度,因此可用于直 流线路的故障检测。文献[10]选取直流线路两端电 气量的幅值和频率故障特征信息作为输入数据样 本,构建并联卷积神经网络模型,从而实现多端柔性 直流线路的故障分类和定位,该方法故障诊断的准 确率较高,但模型训练过程较复杂。文献[11]提出 基于人工神经网络的四端柔性直流电网故障检测方 案,选取直流电压高频能量和直流电压变化量作为 输入数据样本来训练人工神经网络模型,根据所建 立模型的输出结果进行故障位置和故障类型的判 别,该方案可以识别过渡电阻为200 Ω 的故障,保护 性能良好。文献[10-11]的研究对象是多端柔性直 流,而多端混合直流系统的结构、故障特性与多端柔 性直流有显著差异,因此上述故障检测方法在多端 混合直流系统中的应用有待验证。

本文提出一种基于多层感知器(multi-layer perception, MLP)的LCC-MMC并联型特高压三端混

合直流输电线路故障检测方法。首先,通过分析昆 北侧边界、T区、龙门侧边界的频率特性,指出三端 直流线路不同区域发生故障时的故障特征差异;然 后,利用小波变换提取故障特征量,结合正、负极电 压变化量,构建 MLP的输入数据样本,通过对 MLP 模型进行训练和优化,最终实现三端混合直流线路 不同故障区域的判断。该故障检测方法所提取的故 障特征量可准确反映三端混合直流线路的不同故障 区域,故障检测精度高,且对高阻故障具有较高的灵 敏度。

第3期

1 特高压三端混合直流输电系统简介

为不失一般性,本文以昆柳龙特高压三端混合 直流输电系统为对象展开研究,参考实际工程主接 线及参数,其拓扑结构如附录A图A1所示,系统参 数如附录A表A1、A2所示。图A1中:系统采用对称 真双极结构,电压等级为±800 kV;送端为云南昆北 换流站,单极采用双12脉动LCC串联,采用定直流 电流控制策略;中间落点和受端分别为广西柳北换 流站和广东龙门换流站,采用并联方式接入;两受端 单极采用高低阀组串联形式,高低阀组均采用全 半桥子模块混合型的 MMC, 单个阀组承受电压为 400 kV,两受端控制策略分别采用定直流功率和定 直流电压;线路L,全长为908.4 km,线路L,全长为 542 km,各换流站直流侧出口均配置1台150 mH平 波电抗器,昆北站直流侧出口配置直流滤波器;在柳 北站直流出口T区汇流母线两侧配置直流线路测量 点M1-M4。由于在实际运行的高压直流输电工程 中,单极接地故障最为常见,且高阻接地故障易导致 故障检测方案不灵敏。因此,本文所研究的故障类 型为单极接地故障。

特高压三端混合直流输电系统双极运行工况下,为了避免双极线路电磁耦合的影响,对测量点得到的极线电气量进行相模变换,得到相互独立的线模信号和地模信号^[12],如式(1)所示。

$$\begin{vmatrix} u_{G1} \\ u_{L1} \end{vmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} u_{P1} \\ u_{N3} \end{vmatrix}$$

$$\begin{cases} i_{G1} \\ i_{L1} \end{vmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{P1} \\ i_{N3} \end{vmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i_{G2} \\ i_{L2} \end{vmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{P2} \\ i_{N4} \end{bmatrix}$$

$$(1)$$

式中: u_{G1} 、 u_{L1} 分别为测量点 M_1 处的地模电压、线模 电压; u_{P1} 为测量点 M_1 处的正极电压; u_{N3} 为测量点 M_3 处的负极电压; i_{G1} 、 i_{L1} 分别为测量点 M_1 处的地模电 流、线模电流; i_{G2} 、 i_{L2} 分别为测量点 M_2 处地模电流、 线模电流; i_{P1} 、 i_{P2} 分别为测量点 M_1 、 M_2 处的正极电 流; i_{N3} 、 i_{N4} 分别为测量点 M_3 、 M_4 处的负极电流。与零 模信号相比,线模信号稳定性更好、色散程度小,因 此采用线模信号即线模电压、线模电流作为分析 对象。

2 特高压三端混合直流输电系统频率特性 分析

2.1 昆北侧边界频率特性分析

如图 A1 所示,平波电抗器和直流滤波器构成了 昆北侧直流输电线路的现实边界,其边界元件结构 如附录 A 图 A2 所示,参数如附录 A 表 A3 所示。

昆北侧直流线路边界传递函数 $G(j\omega)$ 为:

$$G(j\omega) = \frac{U_2(j\omega)}{U_1(j\omega)} = \frac{Z_2(j\omega)}{Z_1(j\omega) + Z_2(j\omega)}$$
(2)

式中: $Z_1(j\omega)$ 为平波电抗器阻抗; $Z_2(j\omega)$ 为直流滤波 器等效阻抗。将表A3所示的边界元件参数代入式 (2),计算出 $G(j\omega)$ 的具体表达式,进而得到其幅频 特性如图1所示。



图1 昆北侧边界传递函数幅频特性

Fig.1 Magnitude-frequency characteristics of transfer function of Kunbei-side boundary

由图1可见,当故障暂态信号频率 *f*>2000 Hz 时, |*G*(jω)|远小于1,可见暂态信号高频分量经过昆 北侧边界会大幅度衰减。

2.2 柳北侧T区频率特性分析

与两端直流输电线路相比,并联型三端混合直 流输电最大的区别是线路存在T区。本文参照文献 [7]对T区的等值方式,分析T区的故障等效电路和 暂态信号经过T区时的特征差异。

当T区区内发生故障(如图A1中f,所示)时,线 模故障网络等效电路见附录A图A3,由等效电路 可知:

$$\frac{\Delta I_2(s)}{\Delta I_1(s)} = -\frac{Z_1(s)}{Z_2(s)} \tag{3}$$

式中: $\Delta I_1(s)$ 、 $\Delta I_2(s)$ 为T区汇流母线两侧测量点得 到的频域线模电流; $Z_1(s)$ 、 $Z_2(s)$ 分别为线路L₁、L₂的 线模波阻抗。虽然线路L₁、L₂的额定直流电流不同, 线径也有一定差异,但两者的波阻抗较为接近,故T 区区内故障下, $\Delta I_1(s)$ 和 $\Delta I_2(s)$ 的大小比较接近。

当T区汇流母线左侧线路L₁发生故障时,其线 模故障网络等效电路见附录A图A4。忽略直流线 路对高频分量的衰减,即直流线路波阻抗为实数时, 由图A4计算可得T区传递函数*H*(*s*)为:

$$H(s) = \frac{\Delta I_2(s)}{\Delta I_1(s)} = 1 - \frac{Z_2(s)}{Z_3(s) + Z_2(s)}$$
(4)

$$Z_{3}(s) = sL_{d} + R_{eq} + sL_{eq} + \frac{C_{eq}}{s}$$
(5)

式中: L_{d} 为T区平波电抗器电抗值; R_{eq} 、 L_{eq} 、 C_{eq} 为T区 换流器的等值参数,具体参数值见附录A表A4。令 $s=j\omega$,将表A4中的参数值代入式(4),计算得到 $|H(j\omega)|$ 的具体表达式,进而得到其幅频特性如图2 所示。



图 2 柳北侧 T 区传递函数幅频特性 Fig.2 Magnitude-frequency characteristics of transfer function of Liubei-side T-zone

由图2可知, |*H*(jω)|在中低频段大幅衰减, 可 见, T区对故障暂态电流线模信号的中低频分量有 显著的衰减作用。

2.3 龙门侧边界频率特性分析

因导线与大地之间具有电容,为了便于推导龙 门侧边界的传递函数,利用一段架空线路对地电容 和龙门侧直流平波电抗器构成龙门侧直流输电线路 的现实边界,其边界元件结构如图3所示。图中:U₁ 为区外暂态电压;U₂为经过边界的暂态电压;L为平 波电抗器电感;C为一段架空线路对地电容。



图 3 龙门侧直流线路边界

Fig.3 Boundary of Longmen-side DC line

则龙门侧直流线路边界传递函数为:

$$F(j\omega) = \frac{U_2(j\omega)}{U_1(j\omega)} = \frac{Z_2(j\omega)}{Z_1(j\omega) + Z_2(j\omega)}$$
(6)

式中: $Z_2(j\omega)$ 为C的阻抗。将L=0.15 H、C=0.0000001 F 代入式(6),计算得到 $F(j\omega)$ 的具体表达式,进而得 到其幅频特性如图4所示。



图4 龙门侧边界传递函数幅频特性

Fig.4 Magnitude-frequency characteristics of transfer function of Longmen-side boundary

由图4可见,当故障暂态信号频率 f>5000 Hz 时, |F(jω)|远小于1,可见暂态信号高频分量经过龙 门侧边界会大幅度衰减。

3 基于MLP的故障区域判别方法

3.1 故障启动元件

选取低电压判据作为故障检测方案的启动判据,并将直流电压额定值作为电压基准值,判据表达 式为^[8]:

 $u_{\rm M} < u_{\rm set}$ (7)

式中: $u_{\rm M}$ 为测量点得到的线模电压; $u_{\rm set}$ 按躲过特高 压三端混合直流系统正常运行状态整定,由于正常 运行时直流电压存在波动,考虑10%的裕度,可以 设置 $u_{\rm set}$ =1.27 p.u.。

3.2 T区故障区域识别

由2.2节对T区频率特性的分析可知,当T区汇 流母线发生故障时,T区两侧故障暂态电流线模信 号的大小比较接近,则其中低频分量的大小也比较 接近;当T区汇流母线两侧线路发生故障时,故障暂 态电流线模信号的中低频分量经过T区汇流母线时 会大幅衰减。因此,可以利用T区汇流母线两侧测 量点得到的暂态电流线模信号中低频分量区分T区 汇流母线、T区汇流母线左侧线路、T区汇流母线右 侧线路故障。

由于小波变换在提取故障信号的暂态特征信息 方面具有一定优势,因此,本文对暂态电流线模信号 的突变量进行小波变换,提取中低频分量,并求取中 低频分量的小波能量。图2中T区频率特性曲线的 衰减频带大概为40~80 Hz,在信号采样频率一定的 情况下,可以根据衰减频带确定暂态电流线模信号 经过小波分解后,其中的低频分量对应小波分解的 第J层。在设置的故障数据窗内,对T区两侧暂态电 流线模信号进行小波变换后,提取第J层小波系数 即中低频分量,计算其T区汇流母线两侧的小波能 量 $E_{LL}E_{RL}$,计算公式为:

$$E_{jJ} = \sum_{n=1}^{N} d_{J}^{2}(n) \quad j = L, R$$
 (8)

式中:N为数据窗内离散点个数;d_J为暂态电流线模 信号小波分解后第J层的细节系数即中低频分量;j 取L、R分别表示T区汇流母线左侧、右侧。

为了进一步验证T区的带阻特性,小波母函数 选取 db4^[13],采样频率设置为 20 kHz,第 8 层的小波 频带为 39.062 5~78.125 Hz,属于图 2 中T区频率特 性曲线的衰减频带范围,则中低频分量对应的小波 层数 J=8。为了减小测量误差,数据窗设置为4 ms。 以典型故障为例,当线路L₁—L₄的区内外经不同过 渡电阻发生极对地故障时,故障距离*l*₄为故障点到 测量点的距离,根据式(8)计算第 8 层细节系数即中 低频分量的小波能量,T区汇流母线两侧测量点得到的中低频分量的小波能量*E*_{Ls}、*E*_{Rs}如表1所示。

表1 T区两侧线模电流中低频小波能量

Table 1 Mid- and low-frequency wavelet energy of line mode current at two sides of T-zone

故障位置	过渡电阻/Ω	$E_{\rm L8}$	$E_{\rm R8}$
	0.01	33.36	1.79
$L_1 区内 f_1(l_f=300 \text{ km}) 处$	150.00	10.43	0.48
	300.00	4.97	0.22
	0.01	14.07	60.45
L_2 区外 f_4 处	150.00	1.06	8.83
	300.00	0.23	2.84
	0.01	8.51	4.94
$L_3 区外 f_6 处$	150.00	2.85	1.60
	300.00	1.29	0.63
	0.01	4.31	45.43
$L_4 区内 f_7(l_f=400 \text{ km}) 处$	150.00	0.76	12.46
	300.00	0.27	5.66
	0.01	3.01	2.97
正极T区区内	150.00	1.29	1.18
	300.00	0.82	0.77
	0.01	2.93	2.84
负极T区区内	150.00	1.33	1.25
	300.00	0.91	0.81

由表1可知:不同过渡电阻取值下,T区区内发 生极对地故障时, E_{L8} 和 E_{R8} 差异较小;T区汇流母线 左侧线路 L_1 、 L_3 发生极对地故障时, $E_{L8} > E_{R8}$;T区汇 流母线右侧线路 L_2 、 L_4 发生极对地故障时, $E_{L8} < E_{R8}$ 。 因此T区汇流母线、T区汇流母线左侧线路、T区汇流 母线右侧线路发生故障时,可利用测量点 $M_1 - M_4$ 得 到的T区汇流母线两侧线模电流中低频分量的小波 能量差异判别故障区域,即T区汇流母线右侧线路故障。

3.3 区内外故障识别

结合 2.1 节和 2.3 节对昆北侧边界、龙门侧边界 频率特性分析可知,暂态信号高频分量经过边界时 会大幅度衰减。因此,可以利用测量点 *M*₁、*M*₃得到 的线模电压高频分量的小波能量判别 T 区汇流母线 左侧线路(L₁、L₃)的区内外故障,或 T 区汇流母线右 侧线路(L₂、L₄)的区内外故障。

因 db4 母小波运算速度快、支撑性好,故采用 db4 小波对测量点 M_1 、 M_3 得到的线模电压突变量进 行5 层分解,采用第1 层小波细节系数即最高频分量 来验证昆北侧边界、龙门侧边界对高频量的衰减特 性。小波分解后,提取第1 层小波细节系数即高频 分量,并计算其小波能量 E_1 。采样频率设置为20 kHz, 第1 层小波细节系数对应的频带为5~10 kHz,数据 时间窗设置为4 ms。由于双极对称,以线路L₁、L₄故 障为例,当线路L₁、L₄的区内、区外故障点经不同过 渡电阻发生极对地故障时,测量点 M_1 、 M_3 得到的线

模电压高频分量的小波能量E₁如表2所示。

表2 区内、外故障下线模电压高频小波能量

Table 2 High-frequency wavelet energy of line mode current under internal and external faults

故障位置	过渡电阻/Ω	E_1
	0.01	2.69×10 ⁴
L_1 区内 $f_1(l_f=300 \text{ km})$ 处	150.00	7.99×10^{3}
	300.00	3.79×10 ³
	0.01	1.21
$L_1 区外 f_2 处$	150.00	1.12
	300.00	1.01
	0.01	5.55×10 ³
L_4 区内 f_7 (l_f =400 km)处	150.00	1.78×10^{3}
	300.00	8.65×10^2
	0.01	79.8
$L_4 区外 f_8 处$	150.00	76.9
	300.00	74.5

由表2可知,不同过渡电阻取值下,发生线路区内、区外故障时,测量点M₁、M₃得到的线模电压高频 分量的小波能量至少相差1个数量级,差异显著。 因此,可以利用测量点M₁、M₃得到的线模电压高频 分量的小波能量差异识别区内外故障。

3.4 故障选极

高压直流输电系统双极运行方式下,双极线路 之间存在电磁耦合,一极线路发生故障后,另一极电 压也会受到波动。以直流线路正极发生极对地故障 为例,正、负极电压变化量为^[14]:

$$\begin{cases} \left| \Delta u_{p} \right| = \frac{Z_{0} + Z_{1}}{Z_{0} + Z_{1} + 2R_{g}} E \\ \left| \Delta u_{n} \right| = \frac{Z_{0} - Z_{1}}{Z_{0} + Z_{1} + 2R_{g}} E \end{cases}$$
(9)

式中: $|\Delta u_p|$ 、 $|\Delta u_n|$ 分别为正、负极电压变化量; Z_0 、 Z_1 分别为地模波阻抗和线模波阻抗; R_g 为过渡电阻。 因为 $Z_0+Z_1>Z_0-Z_1$,所以 $|\Delta u_p|>|\Delta u_n|$;同理,直流线 路负极发生极对地故障时, $|\Delta u_p|<|\Delta u_n|$ 。

为了减小测量误差,本文对故障后4ms数据窗内的电压变化量进行积分。以典型故障为例,当线路L₁—L₄的区内和区外经不同过渡电阻发生极对地故障时,测量点 M_1 得到的正极电压变化量的积分值 $|\Delta u_{n1}|$ 和测量点 M_3 得到的负极电压变化量的积分值 $|\Delta u_{n3}|$ 如附录A表A5所示。由表可见:不同过渡电阻下,正极线路L₁区内和线路L₂区外发生极对地故障时, $|\Delta u_{n1}|$ > $|\Delta u_{n3}|$;负极线路L₃区外和线路L₄区内发生极对地故障时, $|\Delta u_{n1}|$ > $|\Delta u_{n3}|$;负极线路L₃区外和线路L₄区内发生极对地故障时, $|\Delta u_{n1}|$ > $|\Delta u_{n3}|$;负极电压变化量的特征差异进行故障选极。

3.5 基于MLP的故障区域识别原理

142

深度学习算法是目前人工智能领域比较受关注的研究方向,目前深度学习算法主要有 MLP、卷积神 经网络、长短期记忆网络、门控循环单元网络等。在 深度学习算法中,卷积神经网络在图像识别方面具 有独特优势,长短期记忆网络、门控循环单元网络在 处理时间序列数据方面具有独特优势,但以上算法 的网络结构比较复杂,训练时间长、收敛速度慢。 MLP的特点是网络结构相对简单,收敛速度快,可以 有效对数据特征进行深层次挖掘。本文通过提取直 流线路不同故障区域(图 A1 中的 f₁—f₁₀)所对应的 故障输入特征量,对 MLP 模型进行训练和优化,根 据 MLP 模型的输出结果进行多端混合直流线路的 故障区域检测。

根据上文分析可知,T区汇流母线两侧线模电 流中低频分量的小波能量差异可用于T区汇流母线 左、右侧线路判别,线模电压高频分量的小波能量差 异可用于线路区内外故障识别,正、负极电压变化量 差异可用于故障选极。利用上述故障特征差异构造 MLP的输入特征量,可实现直流线路故障区域识别 功能,故本文将测量点 $M_1 - M_4$ 得到的T区汇流母线 两侧线模电流中低频分量的小波能量 E_{18} 、 E_{18} 、测量 点 M_1 、 M_3 得到的线模电压高频分量的小波能量 E_1 , 测量点 M_1 、 M_3 得到的正、负极电压变化量 $|\Delta u_{p1}|$ 、 $|\Delta u_{n3}|$ 作为MLP的5个输入变量。MLP的10个输出 结果分别对应10个故障区域 $f_1 - f_{10}$ 。10个故障区 域 $f_1 - f_{10}$ 发生故障时,测量点M得到的故障输入特 征量所对应的MLP模型的期望输出见附录A表A6。

MLP模型的输入层、输出层确定后,需要确定隐藏层的结构。隐藏层的层数和每层神经元个数会直接影响到MLP模型识别故障区域的效果。为了防止MLP模型陷入过拟合和欠拟合的状态,结合具体情况,将隐藏层层数设置为3,每层神经元个数设置为50,所搭建的MLP模型的结构如附录A图A5所示。

将 MLP 模型的输入特征量记为 $X = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5), x_1, x_2$ 分别代表T 区汇流母线两侧线模电流中低频分量的小波能量 E_{18}, E_{R8}, x_3 代表测量点 M_1, M_3 得到的线模电压高频分量的小波能量 E_1, x_4, x_5 分别代表正、负极电压变化量 $|\Delta u_{p1}|, |\Delta u_{n3}|, 输出结果记为 Y = (y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_7, y_8, y_9, y_{10}), y_1 - y_{10}$ 分别为每个输入特征量属于故障区域 $f_1 - f_{10}$ 的概率, 概率值越大表示输入特征量属于该故障区域的可能性越高, MLP 模型选择概率值最大的故障区域作为输入特征量所属故障区域。

MLP模型的实现流程:通过PSCAD仿真生成大量训练样本和测试样本,为了减小数据样本中各数

值之间的差异,采用式(10)所示的归一化方法对数 据样本进行归一化处理^[15],提高 MLP模型的泛化能 力。在 Python 平台中定义 MLP模型的各层结构,设 置模型的误差函数和最优化算法,初始化训练数据 样本的权重和偏置,对 MLP模型进行训练,根据 MLP模型对训练样本的识别精度和训练时间调整模 型参数(迭代次数、批量大小、初始学习率、隐藏层神 经元被 dropout 的概率),最终确定识别效果较优的 MLP模型,参数如附录A表A7所示。

$$\bar{x}_i = \frac{x_i - \min\left(\boldsymbol{X}\right)}{\max\left(\boldsymbol{X}\right) - \min\left(\boldsymbol{X}\right)} \tag{10}$$

式中: x_i 为其所在输入特征量X中的数据点; \bar{x}_i 为归 一化处理后输入特征量中的数据点。

根据上述分析,可得故障区域识别算法流程图, 如图5所示。



图 5 识别算法流程图 Fig.5 Flowchart of recognition algorithm

4 基于MLP的故障区域判别方法

参照昆柳龙直流工程实际参数及系统主接线, 在 PSCAD 平台中搭建 ±800 kV 特高压三端混合直 流电网模型。直流架空线路选用依频参数模型,具 体结构见附录 A 图 A6 所示。测量装置的采样频率 设置为 20 kHz,故障时刻为1 s,数据窗长度设置为 4 ms,共80个采样点。

4.1 MLP训练

MLP模型设置完成以后,采用大量仿真数据对 MLP模型进行训练。通过改变特高压三端混合直流 线路不同故障区域($f_1 - f_{10}$)、故障距离 l_t (变化步长 为 100 km)、过渡电阻(0.01~300 Ω,变化步长为 50 Ω)等参数,共得到272个训练样本。通过Python 软件搭建 MLP模型,采用272个训练样本训练 MLP 模型,训练结果如附录 A 图 A7 所示。由图可知,经 过50次迭代以后,MLP模型对训练样本的预测误差 可以达到 0.05,预测精度可以达到 98.17%,模型收 敛速度快、预测精度高。

4.2 MLP测试

MLP模型训练完成以后,当直流线路不同区域 发生故障时,将测量点*M*得到的故障特征量输入到 训练完成的MLP模型便可实现故障区域判别。

为了进一步证明所搭建的 MLP 模型具有较强 的泛化能力,通过改变故障条件(不同于训练样本所 对应的故障距离和过渡电阻),采用不同于训练样本 的28个测试样本对 MLP模型进行测试,测试结果如 附录A表A8所示。

为了评价所搭建 MLP模型的性能,采用准确率 评价指标评估 MLP模型的识别率^[16],计算公式为:

$$A = \frac{1}{N_s} \sum_{n=1}^{N_s} I(y_n = y'_n)$$
(11)

式中: N_s 为测试样本个数; y_n 为每个测试样本 MLP的 实际输出; y'_n 为每个测试样本 MLP的期望输出。当 $y_n=y'$ 时,I=1,否则为0。

由表A8可知,不同故障区域(f₁-f₁₀)、不同过 渡电阻取值条件下,测量点M得到的28个测试样本 所属故障区域均能被MLP模型正确识别,28个测试 样本的实际输出均符合期望输出,MLP模型的准确 率为100%。由此可知,本文提出的故障检测方案 具有较高的故障识别精度和耐过渡电阻能力,可以 准确判别T区汇流母线故障、T区汇流母线左侧故 障、T区汇流母线右侧故障,对线路全长进行故障检 测,克服了乌东德实际工程所采用的直流输电线路 行波故障检测方法易受过渡电阻影响、难以区分T

4.3 抗噪声能力验证

实际直流输电工程中,噪声信号会对故障检测 方案造成干扰,利用20dB的高斯白噪声验证本文 故障检测方案的抗干扰性能。直流线路不同区域发 生故障时,在测量点得到的原始电压、电流数据中添 加20dB的白噪声,经过数据处理得到输入特征量, 并将其输入训练完成的MLP模型进行测试,验证该 故障检测原理的抗干扰能力,验证结果如附录A表 A9所示。由表可知,本文提出的故障检测方案在添 加白噪声的情况下,仍然能够准确判别直流输电线路 不同故障区域,可见,该故障检测方案具有较强的抗 干扰能力,可以克服乌东德实际工程所采用的直流 输电线路行波故障检测方法抗干扰能力弱的缺点。 4.4 **乌东德实际工程直流输电线路故障检测方法 仿真分析**

参照《乌东德电站送电广东广西特高压多端直 流示范工程-三端混合直流控制保护策略研究》报 告,乌东德实际工程直流线路保护装置利用直流电 压变化率、直流电压变化量构造保护判据进行故障 检测,不仅需要站间通信,而且需要与汇流母线保护 配合才可以判别T区汇流母线故障或线路故障。对 于并联型三端混合直流输电系统而言,T区两侧故障电压变化基本一致,无法利用T区两侧测量装置得到的故障电压变化率或变化量判别T区汇流母线故障、直流线路故障。当线路L₁区内 $f_1(l_r=20 \text{ km})$ 、线路L₁区内 $f_1(l_r=300 \text{ km})$ 、线路L₂区内 $f_3(l_r=20 \text{ km})$ 、线路L₂区内 $f_3(l_r=300 \text{ km})$ 处经0.01 Ω发生接地故障时,测量点 M_1 、 M_2 测得的直流电压变化量、直流电压变化率分别见图6、附录A图A8、附录A图A9、图7。



图 6 线路L₁区内 f₁ 处(l_i=20 km)发生故障时直流电压 变化量和变化率波形图

Fig.6 Waveform diagram of DC voltage variation and DC voltage change rate when external fault occurs at $f_1(l_r=20 \text{ km})$ in Line L₁



图 7 线路L₂区内*f*₃处(*l*_i=20 km)发生故障时直流电压 变化量和变化率波形图



由图6、图A8、图A9、图7可知,T区汇流母线左 右侧直流线路发生故障时,测量点*M*₁、*M*₂得到的直 流电压变化量和直流电压变化率波形变化基本一 致,不能判别T区汇流母线左右侧线路故障。

综上所述,乌东德实际工程在单极昆柳段线路 两端、柳龙段线路两端共配置了4套线路保护装置, 每段线路利用直流电压变化率、直流电压变化量作 为主保护原理,利用纵联保护作为后备保护,在4套 保护的配合下能够实现单极两段线路的全线速动保 护。但由于乌东德实际工程T区边界不明显,乌东 德实际工程直流电压变化率、直流电压变化量的保 护原理不能有效区分T区汇流母线左右侧线路故 障,只依靠2套线路保护装置将无法实现单极两段 线路的全线速动保护。本文提出的基于MLP的直 流输电线路故障检测方法单极只需要在T区两侧配 置2套保护装置就能够实现单极两段线路的全线速 动保护。当然,与乌东德实际工程直流输电线路故 障检测方法相比,本文所提直流输电线路故障检测 方法具有速度较慢的缺点,并且样本库没能使用实 测数据,而是使用仿真数据,上述2个缺点对本文所 提故障检测方法在实际工程中的应用具有很大的影 响。但本文所提故障检测方法在理论上是可行的,且 有一定的创新性,在未来的研究中采用实测数据构 成样本库,提高计算速度,则本文所提故障检测方法 是有可能作为后备保护在实际工程中得到应用的。

5 结论

本文在对三端混合直流系统的直流边界及T区 频率特性分析的基础上,提出一种基于MLP的LCC-MMC并联型特高压三端混合直流输电线路故障检 测方法,通过大量PSCAD故障仿真对所提故障检测 方法进行了验证,主要结论如下:

1)所提出的故障检测方案不需要对故障检测判据的阈值进行理论分析和整定计算,可避免阈值的 复杂整定和计算环节;

2)所提出的故障检测方案只需要20kHz的采 样频率及4ms的数据时间窗,对采样频率的要求较低,易于现有的控制保护平台实现;

3)所提出的故障检测方案利用了直流线路的边 界特性,利用各直流线路单端测量装置便可以判别 T 区汇流母线故障、T 区汇流母线左右侧故障,可以 对线路全长进行故障检测;

4)本文故障检测方案所提取的故障特征量比较 简单,可以准确反映不同故障区域,具有较高的故障 识别精度和耐过渡电阻能力,即使在300Ω的过渡 电阻下,也能精确的对故障区域进行判别,并且具有 一定的抗噪声干扰能力。

本文所提出的故障检测方法为深度学习算法,

数据计算过程复杂,目前无法满足直流线路主保护 简单、速动的要求。但本文方法可以对线路全长进 行故障检测,灵敏度高,抗噪声干扰能力强,对多端 混合直流输电线路后备保护具有一定的理论和实用 参考价值。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- [1] 郝亮亮,詹清清,陈争光,等.LCC-MMC型混合直流送端交流 系统故障时直流电流的暂态过程解析[J].电力自动化设备, 2019,39(9):220-227.
 HAO Liangliang, ZHAN Qingqing, CHEN Zhengguang, et al. Analysis of DC current transient process under AC system
- fault at LCC-MMC hybrid HVDC sending end[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9):220-227.
 [2] 杨硕,郑安然,彭意,等. 混合级联型直流输电系统直流故障特
- 2] 饧顿,郑安然,彭息,等. 混合级联型直流搁电系统直流故障将 性及恢复控制策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(9):166-172,179.

YANG Shuo,ZHENG Anran,PENG Yi,et al. DC fault characteristic analysis and recovery control strategy for hybrid cascaded HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(9):166-172,179.

- [3] 刘静佳,梅红明,刘树,等. 特高压多端混合直流输电系统阀 组计划投/退控制方法[J]. 电力自动化设备,2019,39(9): 158-165.
 LIU Jingjia, MEI Hongming, LIU Shu, et al. Planned valve group entry/exit control method for UHV multi-terminal hybrid HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019,39(9):158-165.
- [4] 陆书豪,贾秀芳.LCC-FHMMC混合直流输电系统阀侧故障特 性及保护策略[J]. 电力自动化设备,2021,41(11):211-216,224.
 LU Shuhao, JIA Xiufang. Grounding fault characteristics of converter valve-side and protection strategy in LCC-FHMMC hybrid DC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(11):211-216,224.
- [5]赵文强,宣佳卓,陆翌,等.适用于常规直流改造的混合直流输 电系统主电路拓扑研究[J].电力自动化设备,2018,38(12): 186-193.

ZHAO Wenqiang, XUAN Jiazhuo, LU Yi, et al. Research on circuit topology of hybrid HVDC system suitable for refurbishing existing LCC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12): 186-193.

- [6]曹润彬,李岩,许树楷,等.特高压混合多端直流线路保护配置 与配合研究[J].南方电网技术,2018,12(11):52-58,83.
 CAO Runbin,LI Yan,XU Shukai,et al. Research on configuration and coordination of multi-terminal hybrid UHVDC line protection[J]. Southern Power System Technology,2018,12(11): 52-58,83.
- [7] 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.
- [8]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 restar-

ting methods for multi-terminal hybrid LCC / MMC HVDC

145

transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(11): 3873-3885.

- [9] 陈鑫全,李海锋,顾广坤,等.基于时域电压比的高压直流输电 线路暂态保护方案[J].电力系统自动化,2020,44(22):62-69.
 CHEN Xinquan, LI Haifeng, GU Guangkun, et al. Transient protection scheme of HVDC transmission line based on timedomain voltage ratio[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(22):62-69.
- [10] 王浩,杨东升,周博文,等. 基于并联卷积神经网络的多端直流 输电线路故障诊断[J]. 电力系统自动化,2020,44(12):84-92.
 WANG Hao, YANG Dongsheng, ZHOU Bowen, et al. Fault diagnosis of multi-terminal HVDC transmission line based on parallel convolutional neural network[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(12):84-92.
- [11] 杨赛昭,向往,张峻檪,等. 基于人工神经网络的架空柔性直流 电网故障检测方法[J]. 中国电机工程学报,2019,39(15): 4416-4430.
 YANG Saizhao,XIANG Wang,ZHANG Junjie, et al. The artificial neural network based fault detection method for the

ficial neural network based fault detection method for the overhead MMC based DC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(15): 4416-4430.

[12]梁远升,黄泽杰,李海锋,等.基于行波相位特性的三端混合直流线路行波保护原理[J].中国电机工程学报,2021,41(13):4525-4543.

LIANG Yuansheng, HUANG Zejie, LI Haifeng, et al. Phase characteristics based travelling wave protection for transmission line of three-terminal hybrid HVDC system [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(13):4525-4543.

[13] 金涛,张可,陈坚. 基于 DWT-PNN 的柔性直流输电系统故障检 测方法[J]. 电力自动化设备,2021,41(7):144-151.

JIN Tao, ZHANG Ke, CHEN Jian. DWT-PNN based fault detection method for flexible DC transmission system [J]. Elec-

tric Power Automation Equipment, 2021, 41(7):144-151.

- [14] 王艳婷,张保会,范新凯.柔性直流电网架空线路快速保护方案[J]. 电力系统自动化,2016,40(21):13-19.
 WANG Yanting, ZHANG Baohui, FAN Xinkai. Fast protection scheme for overhead transmission lines of VSC-based HVDC grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 13-19.
- [15] 杨毅,范栋琛,殷浩然,等.基于深度-迁移学习的输电线路故
 障选相模型及其可迁移性研究[J].电力自动化设备,2020,40
 (10):165-172.

YANG Yi, FAN Dongchen, YIN Haoran, et al. Transmission line fault phase selection model based on deep-transfer learning and its transferability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(10):165-172.

[16] 和敬涵,张可欣,李猛,等.基于深度学习的柔性直流线路单端 量波形特征保护[J].清华大学学报(自然科学版),2021,61 (5):478-486.

HE Jinghan, ZHANG Kexin, LI Meng, et al. Single terminal waveform characteristic protection of flexible DC lines based on deep learning[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(5):478-486.

作者简介:



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、 电力系统仿真分析(E-mail:497336360@qq. com);

陈仕龙(1973—),男,教授,博士,通信 作者,主要研究方向为电力系统新型继电保 护(**E-mail**;chenshilong3@126.com)。

2

(编辑 任思思)

Discussion on fault detection method for transmission line of LCC-MMC parallel three-terminal hybrid UHVDC system based on multi-layer perception

XING Chao¹, GAO Jingye^{1,2}, BI Guihong², CHEN Shilong², CAI Wang², WANG Long²

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

2. College of Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Since existing fault location methods suffer from the deficiencies of difficulty in selecting thresholds and the complex characteristic variables extraction, a fault detection method for line commutated converter-modular multilevel converter (LCC-MMC) parallel three-terminal hybrid ultra high voltage direct current(UHVDC) transmission lines based on multi-layer perception(MLP) is proposed. Firstly, the frequency characteristics of Kunbei-side boundary, T-zone boundary and Longmen-side boundary are analyzed, and the differences of fault characteristics when the fault occurs in different zones of the three-terminal DC line are point out. Secondly, the wavelet energy is extracted by multi-scale wavelet decomposition of line-mode current and line-mode voltage through wavelet transform, and the fault characteristic variables are formed combined with the positive- and negative-pole voltage variations. Then taking the fault characteristic variables as the input of MLP and the fault zone as the output, the fault characteristic variables extracted at measuring points to the trained model. A large number of simulations verify that the proposed method has high fault detection precision and can withstand a transition resistance of $300 \,\Omega$.

Key words: three-terminal hybrid UHVDC; frequency characteristic; multi-layer perception; fault characteristic variables; fault detection

附录 A



Fig. A1 Simulation model of ±800kV three-terminal hybrid UHVDC system

表 A1 特高压三端混合直流系统主要参数

Table A1 Main parameters	of three-terminal hybrid	UHVDC system
--------------------------	--------------------------	--------------

换流站	交流侧电压/kV	直流电压/kV	额定功率/MW	平波电抗器/mH
昆北站	535	±800	8000	150
柳北站	525	±800	-3000	150
龙门站	525	±800	-5000	150

表 A2 MMC 换流站主要参数

- - .

Table A2	Maın	parameters	of	MMC	converter
----------	------	------------	----	-----	-----------

.

换流站	桥臂电感/mH	子模块电容/mF	子模块额定电压/kV	桥臂半桥子模块数	桥臂全桥子模块数
柳北站	63	12	4.5	40	160
龙门站	50	18	5	40	160





表 A3 昆北侧边界元件参数

Table A3	Element parameters o	f Kunbei-side b	oundary
	参数	参数值	
	平波电抗器电感 L/mH	150	
	滤波器类型	三调谐滤波器	
	$C_1/\mu F$	2	
	$C_2/\mu F$	3.415	
	$C_3/\mu F$	11.773	
	L_1/mH	11.773	
	L_2/mH	10.226	
	L_3/mH	4.77	



图 A3 T区内线模故障网络等效电路

Fig.A3 Equivalent circuit of line mode fault network in T zone

图 A3 中, R_f 为过渡电阻, U_{1f} 为线模电压源, L_d 为平波电抗器电抗值, Z_{conv} 为 T 区换流器等值阻抗。



图 A4 直流线路的线模故障网络等效电路

Fig.A4 Equivalent circuit of line mode fault network in DC line

表 A4 MMC1 等值参数 Table A4 Equivalent parameters of MMC1 MMC1 等值电阻/Ω MMC1 等值电感/mH MMC1 等值电容/μF

		1 E 2,8,	
	0.6	84	90
	0.0	01	20

0 1	U	0 0	U
故障位置	过渡电阻/ Ω	$ \Delta u_{\rm pl} /\rm kV$	$\left \Delta u_{\rm n3}\right /{\rm kV}$
	0.01	2.26×10^4	3.68×10 ³
$L_1 区内 f_1$ ($l_f=300$ km) 处	150	1.28×10^4	$\frac{ \Delta u_{n3} /kV}{3.68 \times 10^{3}}$ 2.04×10^{3} 1.46×10^{3} 2.39×10^{3} 1.07×10^{3} 6.33×10^{2} 2.57×10^{3} 1.64×10^{3} 1.18×10^{3} 2.06×10^{4} 1.17×10^{4} 8.16×10^{3}
	300	8.85×10^{3}	1.46×10^{3}
	0.01	1.54×10^4	2.39×10 ³
L2区外 f4 处	150	6.90×10 ³	1.07×10^{3}
	300	4.05×10^{3}	6.33×10^2
	0.01	1.31×10^{3}	2.57×10 ³
L ₃ 区外 <i>f</i> 6处	150	7.26×10^{2}	1.64×10^{3}
	300	5.03×10^{2}	1.18×10^{3}
	0.01	1.29×10 ³	2.06×10 ⁴
$L_4 区内 f_7 (l_f=400 \text{km}) 处$	150	8.94×10^{2}	1.17×10^4
	300	7.42×10^{2}	8.16×10 ³

表 A5 正负极电压变化量积分值

Table A5 Integral value of positive voltage change and negative voltage change

表 A6 MLP 模型的期望输出 Table A6 Expected output of MLP

						1				
北应口出				М	LP 其	月望箱	向出			
	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8	f_9	f_{10}
f_1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
f_2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
f_3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
f_4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
f_5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
f_6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
f_7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
f_8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
f_9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
f_{10}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1



Table A7	Parameter setting of MLP
参数	参数设置
输入层神经元数	5
输出层神经元数	10
隐藏层个数	3
隐藏层神经元数	50
Dropout 的概率	0.2
隐藏层激活函数	Relu
输出层激活函数	Softmax
初始学习率	0.01
最大迭代次数	50

表	ξ A7	MLP	模₫	型参数	设置
		D		•	C D C

误差函数 多分类交叉熵函数(categorical_crossentropy)



图 A6 架空线路结构图

Fig.A6 Structure diagram of overhead line





Fig.A7 Prediction error and prediction accuracy curve of training set

表 A8 MLP 测试结果 Table A8 Test results of MLP

		14010110	1000	1000	105 01 101								
故障区域	計演 市 四/〇		MLP 输出										
	过渡电阻/Ω	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8	f_9	f_{10}		
$L_1 区内 f_1 (l_f=78km) 处$	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	138	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
$L_1 这内 f_1 (l_f=687 \text{km}) 处$	50	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	265	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
L ₁ 区外 f ₂ 处	78	0.335	0.661	0	0	0	0	0	0	0	0		
	285	0	0.917	0	0	0	0	0	0	0	0		
L ₂ 区内 f ₃ (l _f =55km)处	5	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0		
	138	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0		
L ₂ 区内 f ₃ (l _f =368km)处	50	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0		
	265	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0		
L ₂ 区外 f ₄ 处	78	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0		
	285	0	0	0	0.998	0	0	0	0	0	0		
L ₃ 区内 <i>f</i> ₅ (<i>l</i> _f =265km)处	5	0	0	0	0	0.908	0	0	0	0	0		
	138	0	0	0	0	0.984	0	0	0	0	0		
L ₃ 区内 <i>f</i> ₅ (<i>l</i> _f =780km)处	50	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0		
	265	0	0	0	0	0.999	0	0	0	0	0		
L ₃ 区外 f ₆ 处	45	0	0.123	0	0	0.164	0.695	0	0	0	0		
	198	0	0.312	0	0	0	0.652	0	0	0	0		
L ₄ 区内 <i>f</i> ₇ (<i>l</i> _f =134km)处	5	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0		
	138	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0		
L4区内 f7(l _f =465km)处	50	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0		
	265	0	0	0	0	0	0	0.983	0	0	0		
$L_4 区外 f_8 处$	45	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0		
	198	0	0	0	0	0	0	0	0.996	0	0		
正极 T 区区内 f ₉ 处	5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0		
	138	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0		
负极 T 区区内 f ₁₀ 处	78	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1		
	198	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.997		

表 A9 抗噪声能力验证结果

 Table A9
 Verification results of anti-noise ability

	过渡电阻/ Ω	MLP 输出										
		f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8	f_9	f_{10}	
线路 L_1 区内 f_1 ($l_f=100$ km) 处	50	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
线路 L2 区外 f4 处	100	0	0	0	0.998	0	0	0	0	0	0	
线路 L3 区外 f6 处	150	0	0	0	0	0.279	0.683	0	0	0	0	
线路 L ₄ 区内 f ₇ (l _f =300km) 处	200	0	0	0	0	0	0	0.991	0	0	0	
正极 T 区区内 f9 处	250	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	



图 A8 线路 L_1 区内 f_1 ($l_f=300$ km) 处故障时直流电压变化量和变化率波形图 Fig.A8 Waveform diagram of DC voltage variation and DC voltage change rate when external fault occurs at f_1 ($l_f=300$ km) in Line L_1



图 A9 线路 L₂区内 f₃ (l_f=300km) 处故障时直流电压变化量和变化率波形图 Fig.A9 Waveform diagram of DC voltage variation and DC voltage change rate when external fault occurs at f₃ (l_f=300km) in Line L₂