基于DWT-PNN的柔性直流输电系统故障检测方法

金涛^{1,2},张可¹,陈坚¹

(1. 福州大学 电气工程与自动化学院,福建 福州 350116;2. 新能源发电与功率变换福建省重点实验室,福建 福州 350108)

摘要:柔性直流输电系统故障极大地影响了电力系统的稳定性。现有输电线路故障检测方法存在阈值选取 困难、对过渡电阻阻值变化敏感、检测时间长等问题。提出一种基于小波能量占比的使用概率型神经网络 (PNN)进行故障类型检测与位置判别的方法。通过对不同故障类型下的母线和线路测量电压进行快速傅里 叶分析得出暂态电压频率特性,再利用离散小波变换(DWT)求得不同尺度下的小波能量特性,通过大量的离 线仿真数据对 PNN 进行训练,根据 PNN 的输出结果实现故障类型与故障位置的精确判定。在 PSCAD / EMTDC 仿真环境下搭建了四端柔性直流电网电磁暂态模型进行仿真验证,结果表明所提方法可以准确地对 高阻接地故障的故障类型与位置判别进行检测,不受过渡电阻阻值影响。

关键词:柔性直流输电系统;故障检测;小波变换;小波能量占比;概率型神经网络

中图分类号:TM 721.1

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202103002

0 引言

随着全球变暖、不可再生能源日益匮乏等问题 的产生,可再生能源的发展与利用逐渐受到重视。 基于模块化多电平换流器的高压直流输电(MMC-HVDC)系统因具有可以独立控制有功与无功、谐波 含量低、无需外加换相电压、开关损耗低等优势,在 远距离输电和海上风力发电以及异步互联等方面 具有广阔的应用前景。在全球可再生能源发展的 前景下,多端柔性直流输电系统成为未来智能电网 的发展趋势之一^[1]。

由于架空线输电线路在输电距离和成本方面具 有一定优势,其为柔性直流输电系统发展的主要趋 势。现有柔性直流输电系统的换流器多采用半桥型 结构的子模块,由于半桥型子模块并不具备故障自 清除能力,当其直流侧发生故障时,故障电流将急剧 上升,保护不及时动作会影响输电网络以及关键设 备的安全稳定运行,进一步导致系统崩溃,造成严重 后果。当直流侧发生故障时,高压直流断路器将直 流故障清除时间控制在5ms以内,因此故障检测的 快速性对于保护是否及时动作具有重要意义^[2]。

在进行故障检测时,考虑故障电流在故障瞬间 快速上升这一特性,一般以故障电流特性(如故障电 流频率、幅值)为依据。但故障电流对过渡电阻阻值 的敏感性较强,导致在发生高阻接地故障时,故障电 流特性表现得并不明显,故障检测出现差错进而使 保护误动或不动作^[3],保护方法无法准确判定高阻 接地故障,因此以故障电压特性作为检测故障的依

收稿日期:2020-05-25;修回日期:2021-01-04 基金项目:国家自然科学基金面上项目(51977039) Project supported by the General Program of the National Natural Science Foundation of China(51977039) 据。文献[4]提出了一种基于时域变化率和变化量 的改进电压行波保护方案,但该方案存在对高阻接 地故障不灵敏和行波波头检测困难等问题。快速傅 里叶变换(FFT)作为一种分析信号频率特性的手段 被广泛应用于信号一段时间内的分析,而对短时间 内突变信号的分析需要使用小波变换的方法。小波 变换得到移动的时间窗应用于暂态信号的分析,可 以对故障暂态信号的突变量特征进行提取,从而判 断故障类型^[59]。

随着人工神经网络的发展,智能算法开始应用 于直流系统的保护领域,由于人工智能算法可以避 免复杂的阈值整定和计算,因此被广泛应用于故障 的分类。文献[10]利用卷积神经网络,以母线和线 路的测量量作为输入数据,以故障类型作为输出数 据进行故障分类。文献[11-12]利用概率型神经网 络(PNN)和时频变换的方法对高阻接地故障进行识 别。文献[13]通过将小波变换与人工神经网络相结 合的方法,对柔性直流输电系统的架空直流输电线 路故障类型进行识别,但并未在数据上做出进一步 解释,且缺少对故障距离影响因素的研究。文献 [14]通过快速傅里叶小波变换的方法对电力系统振 荡模式进行了研究,但该理论并不能完全适用于柔 性直流输电系统。文献[15]基于故障线路的高频电 压突变量对特高压直流输电系统故障进行了监测, 但由于特高压直流输电系统与柔性直流输电系统在 边界条件上并不相同,因此其理论也并不能完全适 用于柔性直流输电系统。文献[16-18]基于小波变 换法实现对信号特征的提取,并将其作为故障检测 依据,然而并不能完全适用于柔性直流输电系统。

本文提出了一种基于瞬时特征量提取的故障快速检测方法。该方法基于小波能量占比对故障电压瞬时特征量进行提取,基于 PNN 对故障进行定位和

故障类型进行检测和识别,在满足故障检测快速性 与准确性的基础上,适用于柔性直流输电系统,不受 故障距离、过渡电阻和交流侧故障的影响,可有效解 决上述技术难题。

1 四端 MMC-HVDC 系统与故障特性分析

1.1 四端 MMC-HVDC 系统

基于半桥型子模块的四端 MMC-HVDC 系统的 拓扑结构如图 1 所示。由图可知,直流输电线路两 侧安装 0.25 H 的限流电抗器;线路两侧分别安装有 混合式高压直流断路器(HHB)以实现故障的快速清 除; MMC₁和 MMC₂采用定无功功率和直流电压控 制, MMC₃和 MMC₄采用定有功功率和定无功功率控 制,调制方式均为最近电平调制;换流变压器均采用 Yn/ Δ 接地方式。为了便于分析频率特性,架空输 电线路(OHL)均采用相域频变模型。



图1 四端 MMC-HVDC 系统拓扑结构

Fig.1 Topology structure of four-terminal MMC-HVDC system

当母线(BUS)发生故障时,将断开与母线相连的 HHB;当直流输电线路发生故障时,将断开其两端的 HHB。例如:若BUS₂发生故障,则需断开HHB₂₄与 HHB₂₁;若线路OHL₂₄发生故障,则需断开HHB₂₄与 HHB₄₂,其余HHB均不动作。其他线路与母线发生 故障时均采用类似控制策略。

1.2 直流线路短路故障特性分析

直流输电线路两端为限制故障短路电流上升配 有限流电抗器。当直流输电线路发生短路故障时, 瞬时故障电流主要由子模块电容放电组成,以线路 发生双极短路故障为例,此时单个换流站等效的复 频域电路模型见附录中图A1。等效模型基于故障 瞬间换流器状态并不发生改变的基础上,换流器等 效电感与电容的附加电源初始值来源于故障发生前 等效电感与电容的电压。等效电路包含交流电网等 效激励源、电感和电容初始值激励源这3种类型激 励源,整个电路在故障瞬间的响应是这3种类型的 激励源共同作用的结果。 直流线路故障瞬间故障电流主要由子模块电容 放电电流和交流电网三相馈入的电流组成,而流入 交流电网的三相电流之和必等于0,因此交流部分 可等效为开路。由此可得四端MMC-HVDC系统线 路发生故障时的复频域等效电路,如附录中图A2所 示,故障点电压V_t相当于在原正常网络基础上叠加 1个负电压源。

各换流站用等效电感 L_{eq} 与电容 C_{eq} 进行等效,即:

$$\begin{aligned} & (L_{\rm eq} = 2L_0/3) \\ & (L_{\rm eq} = 6C_0/N \end{aligned}$$

其中, L_0 、 C_0 分别为换流站的单相桥臂电感、换流站 的子模块电容;N为换流站单相桥臂子模块的个数。 由附录中图 A2 可得当线路 OHL₁₃发生双极短路故 障时,限流电抗器两侧的直流线路电压与母线电压 的传递函数 $H(j\omega)$ 为:

$$H(j\omega) = \frac{V_{de13}}{V_{de1}} = \frac{\omega L_{de} + \omega L_{eq}/2 - 1/(2\omega C_{eq})}{\omega L_{eq}/2 - 1/(2\omega C_{eq})}$$
(2)

其中, V_{del3}、V_{del}分别为线路OHL₁₃和BUS₁的电压;ω 为角频率; L_{de}为直流线路两端限流电抗器电感。根 据式(2),由于限流电抗器的影响,直流输电线路故 障电压的高频分量将被阻隔。当直流输电线路发生 短路故障时,故障点电压瞬时变为0,并产生暂态电 压行波。暂态电压行波从故障点向线路两端传播, 并多次在故障点和边界限流电感L之间发生反射与 折射,如附录中图A3所示。当线路OHL₁₃中点处发 生故障时,暂态电压行波从故障点ƒ向M端及其对 端传播。

限流电抗器和故障点的行波反射系数τ、ρ可分 别近似表示为:

$$\tau = 2\mathrm{e}^{-Z_{\mathrm{c}}t/L} - 1 \tag{3}$$

$$\rho = -Z_{\rm c} / \left(2r_{\rm f} + Z_{\rm c} \right) \tag{4}$$

其中, Z_c 为直流输电线路的波阻抗; r_f 为故障过渡电阻;t为时间。当过渡电阻阻值很小时, $\rho \approx -1$,且由于只有少量折射波进入故障点的另一侧,因此在研究点M的电压变化规律时,可以忽略来自BUS₃的反射波。

根据附录中图A3,点M的暂态电压表达式为:

$$E_{M} = U_{\text{line}} - V_{\text{f}}(t - \Delta t) - \tau V_{\text{f}}(t - \Delta t) -$$

$$\rho \tau V_{\rm f}(t - 3\Delta t) - \rho \tau^2 V_{\rm f}(t - 3\Delta t) - \cdots$$
 (5)

其中,*U*_{line}为故障前直流输电线路电压,设其值与故障点电压*V*_r近似相等,且故障点电压可等效为幅值为*V*_r的阶跃波。

综上,直流输电线路发生故障后,线路电压可等 效为分段函数:①当 $t=\Delta t$ 时,故障行波到达边界点 M,并产生幅值为 $-2V_t$ 的电压叠加在原稳态电压上, 此时点M电压约为 $-V_t$;②当 $\Delta t < t < 3\Delta t$ 时,点M的暂 态故障电压以指数规律衰减,反射波向故障点传播, 并在故障点发生全反射;③当 $t=3\Delta t$ 时,故障点反射 波再次到达点M,并产生幅值为 $2\tau V_i$ 的突变电压,此 时测得点M的过电压接近 $3V_i$;④当 $t>3\Delta t$ 时,行波将 在故障点和限流电抗器之间来回反射,从而形成直 流侧高频振荡过程,且振荡呈衰减趋势。

该故障电压行波的第n'次固有频率为:

$$f_{n'} = n' v_{n'} / (2d) \tag{6}$$

其中,*v*_n,为第n'次行波的波速度;d为测量端与故障 点间的距离。当d越小时,行波色散程度越低,行波 的固有频率越大,且由于行波的折反射叠加,保护测 量处的暂态电压将含有其他次频率。因此,当直流 输电线路或母线发生故障时,保护测量处的电压将 含有多频次和高频分量。

1.3 系统各区域故障特性分析

当直流输电线路与母线均无故障,即系统处于 稳态时,母线电压与线路电压各次谐波幅值均为0, 此时几乎不含高频量,仅有直流量,因此本文仅分析 直流输电线路与母线故障时的频率特性。设故障发 生时刻为第1.5 s,在图1所示系统中的线路OHL₂₄分 别设置区内、区外单极接地故障及双极短路故障,并 在BUS₂处分别设置单极接地故障与双极短路故障, 得到不同故障情况下直流输电线路电压V_{de24}与母线 电压V_{de2}的波形图和频谱图。下面对区内、区外线路 双极短路故障及母线双极短路故障进行具体讨论, 其余工况不再赘述。

(1)线路发生区内双极短路故障。

设线路 OHL₂₄上距 BUS₂为线路长度的 2/3 处发 生区内双极短路故障,对线路与母线电压分别进行 FFT,数据窗长度为 303 个数据点,母线电压 V_{de2} 、线 路电压 V_{de2} 的波形图与频谱图见图 2。此时,系统单 端等效电路图见附录中图 A4。根据基尔霍夫定律, $t=\Delta t$ 时系统的电压回路方程为:



图2 线路发生区内双极短路故障时线路与母线的 电压波形与频谱图

Fig.2 Waveform and frequency spectrum of line and bus voltages when internal bipolar short circuit fault occurs in line

其中, U_{eeq} 为换流站的等效电压; Δu 为直流输电线路 发生双极故障时的电压突变量; U_{dex} , i_{de} 分别为直流电 压源电压、回路电流。

当系统处于稳态运行时,U_{ceq}=U_{dc},由式(7)可得:

$$-L_{\rm eq}\frac{{\rm d}i_{\rm dc}}{{\rm d}t} - 2L_{\rm dc}\frac{{\rm d}i_{\rm dc}}{{\rm d}t} = \Delta u \tag{8}$$

由于在 $t=\Delta t$ 时, $\Delta u=-2V_r$ 。当故障初始行波到达 点M时,限流电抗器和桥臂电抗器将感应出与电压 突变量数值相等、大小相反的电压,且反射波到达时 也会产生感应电压。故直流输电线路会产生高频振 荡的电压波形。由于限流电抗器承担了一部分突变 电压,母线电压振荡的幅值和程度均小于线路电压。

因此,当直流输电线路发生区内双极短路故障 时,线路电压和母线电压均会迅速下降,并在下降过 程中出现振荡。线路电压下降幅值较大,并有较多 高频分量;母线电压虽然有迅速下降趋势,但幅度较 线路电压小且由于线路两端均装设有限流电抗器, 高频分量较线路电压少。

(2)母线发生双极短路故障。

设 BUS₂处发生双极短路故障,故障行波经限流 电抗器的平滑作用到达点*M*,母线电压与线路电压 均迅速下降。此时,系统简化行波故障图见附录中 图 A5;测得的母线电压、线路电压波形及 FFT频谱 分析结果见附录中图 A6。由图可知,母线电压呈阶 跃式下降趋势,其值降为0;而线路电压呈非阶跃式 下降趋势,其幅度小于母线电压并伴有较大振荡;母 线电压具有的高频分量较多,而线路电压低频分量 较多、高频分量较少。

(3)线路发生区外双极短路故障。

在线路OHL₁₃的1/2处设置线路OHL₂₄区外双极 短路故障。此时系统简化故障行波过程图见附录中 图 A7;得到原测量端母线电压、线路电压波形及 FFT频谱分析结果见附录中图 A8。由图可知,原测 量端母线电压有所下降但下降幅度较小且振荡幅度 较小;在故障发生数秒后才有较大振荡,与区内线路 故障下测量端的电压变化有较大不同;原测量端母 线电压和线路电压所含低频分量和高频分量均少于 发生区内双极短路故障时的情况。

因此,可以得出结论:当直流输电线路发生区内 双极短路故障时,线路电压比母线电压下降幅度大, 频谱中高频分量多于母线电压;当母线发生故障时, 母线电压下降幅度大于线路电压,且频谱中高频分 量较线路电压高频分量多;当直流输电线路发生区 外双极短路故障时,原测量端母线电压与线路电压 下降幅度均小于区内线路故障,且频谱中的高频分 量与低频分量均少于区内线路故障。根据故障发生 后3ms内的母线和线路暂态电压特征的差异性,可 进行故障的分类并给出相应的保护方案。

2 DWT-PNN故障检测方法

2.1 离散小波变换能量分析

由于傅里叶变换在处理突变信号时的性能不能 满足分析需求,使用小波变换对故障波形进行辨识。 小波变换为多分辨率的变换,在处理实际数值计算 时使用离散小波变换DWT(Discrete Wavelet Transform)提取故障的特征量。若函数x(t)在一个空间 内平方可积,函数 $\psi(t)$ 为母小波函数,则满足式(9) 所示的变换为连续小波变换。

$$W_{\mathrm{T}_{\mathrm{x}}}(a,\tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int x(t) \psi^* \left(\frac{t-\tau_{\mathrm{c}}}{a}\right) \mathrm{d}t \tag{9}$$

其中, $\psi^*(\cdot)$ 为 $\psi(\cdot)$ 的共轭函数;a为尺度因子; τ_a 为时间中心,用于确定函数分析的时间位置。DWT中 $a = \tau_a$ 的取值分别见式(10)、(11)。

$$a = a_0^i \tag{10}$$

$$\tau_{\rm c} = k a_0^j b_0 \tag{11}$$

其中,k为整数;aⁱ为放大倍数;b₀为采样间隔。 对应的DWT母小波函数表达式为:

$$\psi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{a_0^j}} \psi\left(\frac{t - k a_0^j b_0}{a_0^j}\right)$$
(12)

此时DWT为:

$$W_{\mathrm{T}_{x}}(j,k) = \int x(t)\psi_{j,k}^{*}(t)\,\mathrm{d}t$$
 (13)

离散化的信号经 n_x 层小波变换后,可以得到高频分量和低频分量。以细节系数D与近似系数A来表示高频信号与低频信号,将原信号分解成低频信号与高频信号,保留高频信号,再将低频信号分解为低频信号与高频信号,持续进行 n_x 层。设 $D_1 - D_{n_x}$ 为高频分量,且 D_1 为最高频分量, $A_1 - A_{n_x}$ 为低频分量。由于 db4 小波具有支撑性紧、正交性及计算速度快的特点,故选其作为信号的小波基。本文使用 db4 小波对信号进行5 层分解,提取分解信号中的高频分量作为特征量。小波变换的高频总能量为:

$$E = \sum_{n_w=1}^{5} D_{n_w}^2$$
 (14)

在线路OHL₂₄的 1/2、线路OHL₁₃的 1/2和BUS₂处 分别设置区内、区外线路单极接地故障和双极短路 故障以及母线单极接地故障和双极短路故障,并对 $V_{de24} = V_{de2}$ 进行测量,基于速动性要求,选择故障发 生3ms内的数据进行检测。设采样频率为100kHz, 接地电阻为0.01Ω。

当发生区内线路单极接地故障时,线路和母线 电压的细节系数变化见图3,图中s为原信号;当发生 母线双极短路故障和区外线路双极短路故障时,线 路和母线电压的细节系数分别见附录中图A9、A10。 可知,发生不同类型故障时的细节系数均不相同。

由于在不同故障类型下线路和母线电压的D1



图 3 线路单极接地故障下线路与母线电压小波变换分解图 Fig.3 Wavelet transform decomposition of line and bus voltages under single polar grounding fault in line

变化均较为明显,故选取高频分量第1层细节系数 的能量*E*₀₁进行比较,可得图4所示不同故障类型时 母线电压和线路电压的*E*₀₁对比结果。F₁—F₆分别 表示发生区内线路双极短路故障、区内线路单极接 地故障、母线单极接地故障、母线双极短路故障、区 外线路单极接地故障、区外线路双极短路故障。由 图4可知,线路和母线最高频分量的能量在不同故 障类型下有较大区别。



图 4 不同故障类型下线路与母线电压能量对比图 Fig.4 Comparison of energy between line and bus voltages under different fault types

由于最高频能量衰减较快,定义最高频信号能量占总高频信号能量比值为p,如式(15)所示,p越大,代表信号中最高频分量占总高频分量占比越多; 信号中低频信号能量为E_L,如式(16)所示;信号高频 总能量与低频总能量比值为k,如式(17)所示,k越 大说明信号中高频分量越多。

$$p = D_1^2 / E \times 100$$
 (15)

$$E_{\rm L} = A_{n_{\rm w}}^2 \tag{16}$$

$$k = E/A_n^2 \times 100 \tag{17}$$

表1为不同故障类型下原测量处线路、母线相 应能量的占比。由表1可知,当发生区内线路故障 时,线路电压的*k*较高,*p*较大;母线电压的*k*较小,*p* 较大;相较于区内线路单极接地故障,区内线路双极 短路故障时的 k 较大。当发生母线故障时,线路电 压的 k 较小, p 近似为 0;母线电压的 k 较大, p 较大; 相较于母线单极接地故障,母线双极短路故障时线 路和母线电压的 k 较大。当发生区外线路故障时, 线路电压和母线电压的 k 均较小, p 较小。因此, 可 以由线路和母线电压的 p 、 k 判断出系统故障类型。

表1 不同故障类型下线路、母线电压的能量占比

Table 1 Energy proportion of bus and line voltages under different fault types

| 拉陪米刑 | 1 |) | k | | |
|--------------|------|------|------|-------|--|
| 以 犀矢型 | 线路电压 | 母线电压 | 线路电压 | 母线电压 | |
| 区外线路双极短路故障 | 0.18 | 0.75 | 7.98 | 0.60 | |
| 区外线路单极接地故障 | 0.63 | 0.61 | 0.85 | 0 | |
| 母线双极短路故障 | 0 | 1.52 | 0 | 34.41 | |
| 母线单极接地故障 | 0 | 1.53 | 0 | 0.10 | |
| 区外线路双极短路故障 | 0 | 0.30 | 0 | 0 | |
| 区外线路单极接地故障 | 0 | 0.30 | 0 | 0 | |

2.2 基于PNN的故障检测算法

本文采用线路与母线电压的p、k作为神经网络的输入,以实际p、k所对应的故障类型作为神经元的输出对网络进行训练。PNN是一种径向基神经网络,适用于对数据的分类。当神经元数量确定时, PNN的处理速度更快,无需设定神经元数量,精度更高,算法速度远高于一般的BP算法,并且学习速度可以比通常的BP算法提高数千倍。因此本文采用 PNN实现故障数据的识别与分类。

PNN结构见附录中图A11。与径向基神经网络不同,PNN的输出层采用竞争输出代替线性输出,通过各神经元求和估计各类概率,从而为各输入模式提供相应竞争机会,最后仅有一个神经元胜利,以表示对输入模式的分类。径向基传递函数可表示为:

$$R_{\rm adbas}(n) = e^{-n^2} \tag{18}$$

其中,n为径向基激活函数中输入向量与权值向量 之间的距离和连接权值b的乘积。

采用线路与母线电压瞬时故障能量特征参数组 合成向量(*p*₁,*k*₁,*p*₂,*k*₂)作为PNN的输入;采用母线单 极接地故障、母线双极短路故障、区内线路单极接地 故障、区内线路双极短路故障、区外故障这5个故障 类型作为PNN的输出向量,并将故障类型按1-5 依次编号(例如PNN输出1则为线路单极接地故障, 输出3则为母线单极接地故障)。

故障的检测算法流程图见附录中图A12,首先 用小波变换进行故障特征量计算,生成PNN的输入 环节,然后通过PNN对输入的环节进行处理,最后 得到系统的输出结果。

3 仿真分析和讨论

在PSCAD / EMTDC 中搭建如图1所示四端柔性

直流输电系统模型,仿真模型参数见附录中表A1。

3.1 线路故障与母线故障类型识别

本文以 BUS₂和线路 OHL₂₄作为测量对象,分别 在 BUS₁—BUS₄与线路 OHL₁₂的中点、线路 OHL₁₃的 中点、线路 OHL₃₄的中点、线路 OHL₂₄的 1/3 与 2/3 共9 处设置单极接地故障与双极短路故障,故障过渡电 阻的变化范围为 0.001~200 Ω 。将得到的线路与母 线电压特征量作为 PNN 的输入量,分别设置训练样 本、测试样本的数量为 596、144 个。

在线路 OHL₂₄ 的 1/3、BUS₂、线路 OHL₃₄ 的中点 处分别设置单极接地故障与双极短路故障,设置故 障过渡电阻为 0.01 Ω,故障发生时刻为仿真后的第 1.5 s。附录中表 A2 为不同故障区域下 PNN 的输出 情况,可知 PNN 可准确识别故障的类型。

3.2 故障过渡电阻对DWT-PNN故障检测方法的影响

基于线路与母线电压瞬时故障能量特征参数的 检测方法需要分析其对非金属性故障的灵敏性。根 据图1所示系统,在线路区内、母线和线路区外设置 故障过渡电阻阻值为0.01、10、50、200Ω的单极接地 故障和双极故障,以线路单极接地故障为例,所得不 同故障过渡电阻阻值下线路与母线电压波形见图 5,其他故障类型下的线路与母线电压波形见图录中 图A13。由图可知,在区内线路单极、双极故障下, 随着过渡电阻阻值的增大,线路电压在故障开始瞬 间下降的幅值减小。



图 5 不同故障过渡电阻下发生区内线路单极接地故障后 线路、母线的电压波形

Fig.5 Waveforms of bus and line voltages under internal single polar grounding fault in line with different fault transition resistances

线路与母线电压的瞬时故障能量特征参数如附 录中表A3所示。由表可知,随着过渡电阻阻值的变 化,不同故障下线路与母线电压瞬时故障能量特征 参数基本相同且变化较小。原因在于故障电压的时 域特征受过渡电阻影响较大,而频域特征受过渡电 阻阻值影响较小;又由于故障特征值求取数值为比 值,受外界过渡电阻阻值变化的影响更小。因此, DWT-PNN故障检测方法并不受过渡电阻阻值变化 的影响,可以准确地在过渡电阻阻值变化范围 (0.001~200 Ω)内进行故障类型检测识别。

3.3 故障距离对DWT-PNN故障检测方法的影响

为探究算法在故障不同位置处适应情况,在线路OHL₂₄距MMC₂侧50、100、150 km处设置区内线路 单极、双极故障,并设过渡电阻为 0.01Ω 。不同故障 距离下线路与母线电压的波形见图6。





当发生区内线路单极接地和双极短路故障时, 随着故障距离的增大,故障行波会由于故障线路的 非线性性质发生行波色散,且色散程度随着故障距 离的增大而增大。在故障发生瞬间,故障距离越大, 故障行波波头到达时刻越迟,此时不能以瞬间故障 电压的变化率或幅值作为判断故障类型的依据。而 在3 ms内对电压波形在频域的性质并没有影响。

计算得出不同故障距离下的线路与母线电压瞬时故障能量特征参数和对应的 PNN 输出结果见附录中表 A4。虽然各故障类型下故障距离的不同对故障能量特征参数有一定影响,但由于存在如下 2个方面的因素,使得故障距离对 DWT-PNN 故障检测方法并无影响:①线路与母线电压瞬时故障能量特征参数基本保持不变,如发生线路故障时,母线的高频暂态能量永远为0,且相较于线路双极故障,故障能量特征参数远大于线路单极接地故障;②DWT-PNN故障检测方法基于 PNN, 而 PNN 在进行故障分类时已经进行大量数据训练。

3.4 交流侧故障对DWT-PNN故障检测方法的影响

DWT-PNN 故障检测方法也需要考虑到交流 侧发生故障时,母线保护和线路保护不发生误动。 当t = 1.5 s时,分别在交流线路AC₁—AC₄设置单 相、双相、三相短路接地故障,并设故障过渡电阻为 0.01 Ω ,以线路OHL₂₄与BUS₂作为观测对象。以三 相短路接地故障为例,所得线路与母线电压见图7, 图中S₁—S₃分别表示AC₁—AC₃发生三相短路故障。

在交流侧发生最严重的三相短路接地故障时, 母线电压与线路电压的波动几乎一致,并无大幅度 振荡,因此低频分量占比较高。通过计算,可得不同 工况下测量端的线路与母线电压瞬时故障能量特征



参数以及保护动作情况,如附录中表A5所示。由表 可知,当交流侧发生短路故障时,测量端的线路与母 线电压瞬时故障能量特征参数与线外故障时的特征 参数规律极度相似,且不随故障相的改变而变化。 因此,线路保护与母线保护均不会发生误动,即交流 侧故障并不会对检测方法的准确性产生影响。

3.5 与电压变化率故障检测方法的对比

与文献[19]采用的基于就地检测线路对地电压的电压变化率ROCOV(Rate Of Change Of Voltage)进行故障检测方案性能对比如附录中表A6所示。由表可知,在检测精度相近的情况下,DWT-PNN故障检测方法耐受过渡电阻阻值范围比ROCOV故障检测方法更广。另外,ROCOV故障检测方法仅能判定是线路还是母线故障,而DWT-PNN故障检测方法可以对线路和母线的故障类型进行判定。DWT-PNN故障检测方法无需阈值整定,不受故障距离影响,因此其自适应性优于ROCOV故障检测方法,说明了本文所提方法的优势。

4 结论

本文针对四端 MMC-HVDC 系统线路故障与母 线故障的类型检测与识别问题,提出一种 DWT-PNN 故障检测方法,利用 PSCAD / EMTDC 进行了仿真验 证,得到如下结论。

(1)通过对故障发生后3ms内的线路电压与母 线电压进行小波变换,得到线路与母线电压瞬时故 障能量特征参数,不同故障类型下特征参数的值不 同,以判别故障类型和故障位置。

(2)将线路与母线电压瞬时故障能量特征参数作 为一组输入量对PNN进行训练,通过大量数据的训 练,得到的PNN能够对线路与母线故障的类型及位 置进行判别。基于PSCAD / EMTDC进行仿真验证, DWT-PNN故障检测方法对过渡电阻的耐受性好,不 受故障距离和交流侧故障的影响,检测准确性高。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

[1]严铭,蔡晖,谢珍建,等.适用于多端柔性直流输电系统的分布

150

式直流电压控制策略[J]. 电力自动化设备,2020,40(3): 134-140.

YAN Ming, CAI Hui, XIE Zhenjian, et al. Distributed DC voltage control strategy for VSC-MTDC systems [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3):134-140.

- [2]张希鹏,邰能灵,郑晓冬,等. 基于WEMTR的柔性直流输电线路故障测距[J].电工技术学报,2019,34(3):589-598.
 ZHANG Xipeng,TAI Nengling,ZHENG Xiaodong, et al. Fault location in VSC-HVDC transmission lines based on WEMTR
 [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34 (3):589-598.
- [3] 薛士敏,范勃旸,刘冲,等. 双极柔性直流输电系统换流站交 流三相接地故障分析及保护[J]. 高电压技术,2019,45(1): 21-30.

XUE Shimin, FAN Boyang, LIU Chong, et al. Fault analysis and protection scheme for converter AC three-phase grounding of bipolar HVDC systems[J]. High Voltage Engineering, 2019,45(1):21-30.

- [4] SNEATH J,RAJAPAKSE A D. Fault detection and interruption in an earthed HVDC grid using ROCOV and hybrid DC breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2016,31(3): 973-981.
- [5] DE KERF K, SRIVASTAVA K, REZA M, et al. Wavelet-based protection strategy for DC faults in multi-terminal VSC HVDC systems[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2011, 5(4):496-503.
- [6]朱晓娟,林圣,张姝,等.基于小波能量矩的高阻接地故障检测 方法[J].电力自动化设备,2016,36(12):161-168.
 ZHU Xiaojuan,LIN Sheng,ZHANG Shu, et al. High-impedance grounding fault detection based on wavelet energy moment[J].
 Electric Power Automation Equipment,2016,36(12):161-168.
- [7] 吴乐鹏,黄纯,林达斌,等.基于暂态小波能量的小电流接地故障选线新方法[J].电力自动化设备,2013,33(5):70-75.
 WU Lepeng, HUANG Chun, LIN Dabin, et al. Faulty line selection based on transient wavelet energy for non-solid-earthed network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33 (5):70-75.
- [8] 董新洲,汤兰西,施慎行,等. 柔性直流输电网线路保护配置方案[J]. 电网技术,2018,42(6):1752-1759.
 DONG Xinzhou, TANG Lanxi, SHI Shenxing, et al. Configuration scheme of transmission line protection for flexible HVDC grid[J]. Power System Technology,2018,42(6):1752-1759.
- [9] 祁晓敏,裴玮,李鲁阳,等. 基于限流电感电压的多端交直流混 合配电网直流故障检测方案[J]. 电网技术,2019,43(2):537-545. QI Xiaomin, PEI Wei, LI Luyang, et al. DC fault detection scheme for multi-terminal hybrid AC/DC distribution network based on current-limiting inductor voltage[J]. Power System Technology,2019,43(2):537-545.
- [10] LI C Y,GOLE A M,ZHAO C Y. A fast DC fault detection method using DC reactor voltages in HVDC grids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2018,33(5):2254-2264.
- [11] SAMANTARAY S R, PANIGRAHI B K, DASH P K. High impedance fault detection in power distribution networks using time-frequency transform and probabilistic neural network[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2008, 2(2):261.
- [12] SANTOS W C, LOPES F V, BRITO N S D, et al. High-impedance fault identification on distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1):23-32.
- [13] 杨赛昭,向往,张峻榤,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-

4429.

YANG Saizhao, XIANG Wang, ZHANG Junjie, et al. The artificial neural network based fault detection method for the overhead MMC based DC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(15):4416-4429.

 [14] 姜涛,刘方正,陈厚合,等. 基于多通道快速傅里叶小波变换的 电力系统主导振荡模式及模态协同辨识方法研究[J]. 电力自 动化设备,2019,39(7):125-132.
 JIANG Tao,LIU Fangzheng,CHEN Houhe, et al. Cooperated identification method of dominant oscillation modes and mode

shapes for power system based on multi-channel fast Fourier transform based continuous wavelet transform [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(7):125-132.

[15] 滕予非,汤涌,周波,等. 基于高频电压突变量的特高压直流 输电系统接地极引线故障监测方法[J]. 高电压技术,2016,42 (1):72-78.

TENG Yufei, TANG Yong, ZHOU Bo, et al. Monitoring scheme for UHV DC ground electrode line fault on the basis of highfrequency voltage variation[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(1):72-78.

 [16] 刘可真, 束洪春, 于继来, 等. ±800 kV 特高压直流输电线路故 障定位小波能量谱神经网络识别法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(4): 141-147, 154.
 LIU Kezhen, SHU Hongchun, YU Jilai, et al. Fault location

LIU Keznen, SHU Hongchun, FU Jhai, et al. Fault location based on wavelet energy spectrum and neural network for ±800 kV UHVDC transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 141-147, 154.

[17] 崔心瀚,马立元,魏忠林,等.小波阈值降噪与经验模态分解在 信号瞬时特征提取中的应用[J].机械与电子,2014,32(10): 12-16.

CUI Xinhan, MA Liyuan, WEI Zhonglin, et al. Application of wavelet threshold denoising and EMD in instantaneous feature extraction [J]. Machinery & Electronics, 2014, 32 (10) : 12-16.

- [18] 陈仕龙,束洪春,谢静,等. 特高压直流输电线路和边界频率特性研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(11):134-139,153.
 CHEN Shilong, SHU Hongchun, XIE Jing, et al. Frequency characteristics of UHVDC transmission line and its boundary [J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(11):134-139,153.
- [19] 李威,吴学光,常彬,等.基于电压变化率故障检测的高压直流 断路器保护策略[J].电网技术,2019,43(2):554-561.
 LI Wei,WU Xueguang,CHANG Bin, et al. Research on protection strategy of HVDC circuit breaker based on voltage change rate fault detection[J]. Power System Technology,2019, 43(2):554-561.

作者简介:



金 涛(1976—),男,湖北宜昌人,教 授,博士研究生导师,通信作者,研究方向为 电力系统稳定性分析、在线测量与信号处理 及新能源技术(E-mail:jintly@fzu.edu.cn);

张 可(1996—),女,安徽滁州人,硕 士研究生,研究方向为柔性直流输电系统故 障检测(E-mail:1535963581@qq.com);

陈 坚(1981—),男,福建平潭人,博 士研究生,研究方向为电力系统稳定性分析

与电力人工智能技术(E-mail:m170110003@fzu.edu.cn)。 (编辑 王欣竹)

DWT-PNN based fault detection method for flexible DC transmission system

JIN Tao^{1,2}, ZHANG Ke¹, CHEN Jian¹

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;

2. Fujian Key Laboratory of New Energy Generation and Power Conversion, Fuzhou 350108, China)

Abstract: The failure of the flexible DC transmission system greatly affects the stability of power system. The existing transmission line fault detection methods have the problems of difficult threshold selection, sensitivity to transition resistance changes and long detection time. A method of fault type detection and position discrimination based on wavelet energy ratio using PNN(Probabilistic Neural Network) is proposed. The frequency characteristics of the transient voltage are obtained by fast Fourier analysis of the measured voltages of the bus and line under different fault types, and then DWT(Discrete Wavelet Transform) is used to obtain the wavelet energy characteristics at different scales. The fault type and fault location can be determined accurately according to the output results of PNN. The electromagnetic transient model of the four-terminal flexible DC transmission network is built under PSCAD / EMTDC environment. The simulative results show that the proposed method can detect the fault type and fault location of high resistance grounding fault accurately, without being affected by the transition resistance.

Key words: flexible DC transmission system; fault detection; wavelet transform; wavelet energy ratio; probabilistic neural network

(上接第129页 continued from page 129)

Design of three-phase software phase locked loop based on prefilter LIU Qide¹, WANG Haiyun¹, WANG Haocheng², XU Yong¹

LIU QIde, WANG Haiyun, WANG Haocheng, XU Tong

(1. Research Center of Renewable Energy Generation and Grid-connected Control Engineering Technology,

Ministry of Education, College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China;

2. College of Electronic and Information Engineering, Yili Normal University, Yining 835000, China)

Abstract: In order to solve the problems of large phase-locked error and slow dynamic response of traditional SPLL(Software Phase Locked Loop) under unbalanced and distorted voltage, a prefilter SPLL based on MAF(Moving Average Filter) is proposed, which is based on the principle of traditional SPLL. A fast unbalanced component suppression and phase delay compensation method is applied to improve the performance of MAF, which effectively improves the dynamic response speed and phase-locked accuracy of the proposed SPLL. Through MATLAB / Simulink simulation platform and TMS320F28335 DSP (Digital Signal Processor) chip, the control strategy of the proposed SPLL is verified under the condition of three-phase voltage unbalance and voltage distortion. The results show that the SPLL has small phase-locked error, fast dynamic response speed and high stability.

Key words: software phase locked loop; moving average filter; phase delay compensation; voltage distortion; digital signal processor





注: V_a 、 V_b 、 V_c 为换流站的三相输出电压; U_{sc} 为交流电网等效激励源; L_{ac} 为交流侧等效电感, L_0 为单相桥臂电抗; L_{dc} 为直流线路限流电抗。

图 A1 等效复频域电路模型





















Fig.A5 Traveling wave propagation in four terminal system under bus fault



图 A6 母线双极故障下直流线路与母线电压波形图和频谱

Fig.A6 Line and DC bus voltage waveform and frequency spectrum under bus bipolar fault









Fig.A8 Line and DC bus voltage waveform and frequency spectrum under external faults



图 A9 母线双极故障下直流线路与母线电压小波变换分解图











注: R 为输入样本元素数; Q 为输入样本数量即为第一层神经元数;

K 为输入向量类别数,即第二层神经元数。

图 A11 PNN 网络结构 Fig.A11 PNN network structure



表 A2 故障电阻为 0.01 Ω 时 PNN 输出

| Table A2 | PNN output when fault resistance is $0.01.0$ |
|----------|---|
| Table AZ | PININ Output when fault resistance is 0.01 \$2 |

| 故障位置 | 故障类型 | 保护区域 | 区内线路 | 区内线路 | 母线单极 | 母线双极 | 区外线路 | 母线保护 | 线路保护 |
|-----------------------|------|---|------|------|------|------|------|------|------|
| | | | 单极故障 | 双极故障 | 故障 | 故障 | 故障 | | |
| 011 | 单极故障 | 线路保护 HHB ₂₄ 、HHB ₄₂ | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 不动作 | 动作 |
| UHL24线路 1/3 处 | 双极故障 | 线路保护 HHB ₂₄ 、HHB ₄₂ | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 不动作 | 动作 |
| DUC 4 | 单极故障 | 母线保护 BUS ₂ | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 动作 | 不动作 |
| BUS ₂ XC | 双极故障 | 母线保护 BUS ₂ | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 动作 | 不动作 |
| OHL ₃₄ 线路处 | 单极故障 | 区外保护 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 不动作 | 不动作 |
| | 双极故障 | 区外保护 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 不动作 | 不动作 |



Fig.A13 Line and bus waveforms under different type of faults with different transition resistance

| 壮陸米利 计连由框 | | | , | | , | PNN 神经网络输出 | | | | | |
|---------------------------|--------|-------|-------|--------|-----------------------|------------|--------|--------|--------|------|--|
| 以 陴天空 旦 彼电阻 | 过渡电阻/Ω | p_1 | k_1 | p_2 | <i>K</i> ₂ | 线路单极故障 | 线路双极故障 | 母线单极故障 | 母线双极故障 | 区外故障 | |
| | 0.01 | 1.14 | 0.3 | 8.83 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 吸苗扭步院 | 10 | 1.18 | 0.26 | 8.84 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 始牛伮似陧 | 50 | 1.27 | 0.18 | 12.94 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| | 200 | 1.2 | 0.07 | 19.77 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| | 0.01 | 1.52 | 34.40 |) 1.53 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | |
| 坐败亚枥协院 | 10 | 1.5 | 21.61 | 1.94 | 0.28 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | |
| 线时从似叹阵 | 50 | 1.45 | 4.86 | 3.91 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | |
| | 200 | 1.58 | 0.71 | 7.73 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | |
| | 0.01 | 0.02 | 0 | 3.99 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | |
| 回始的招告险 | 10 | 0.02 | 0 | 3.91 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | |
| 马线半饭戟阵 | 50 | 0.02 | 0 | 3.74 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | |
| | 200 | 0.02 | 0 | 3.74 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | |
| | 0.01 | 0 | 0 | 1.52 | 34.40 | 0 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | |
| 母继动枢持陵 | 10 | 0.01 | 0 | 1.40 | 3.03 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | |
| 马线从饭取阵 | 50 | 0.01 | 0 | 1.85 | 0.64 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | |
| | 200 | 28.81 | 0 | 1.85 | 0.64 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | |
| | 0.01 | 0.28 | 0 | 33.53 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | |
| 建动动植物腔 | 10 | 0.26 | 0 | 33.47 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | |
| 线外风似阵 | 50 | 0.25 | 0 | 33.81 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | |
| | 200 | 0.31 | 0 | 32.94 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | |
| | 0.01 | 0.17 | 0 | 35.26 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | |
| 砂石石石 | 10 | 0.17 | 0 | 34.37 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | |
| \$371 早 恢 旼 晖 | 50 | 0.16 | 0 | 35.54 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | |
| | 200 | 0.19 | 0 | 36.24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | |

表 A3 不同过渡电阻在各故障下故障电压特征值及 PNN 输出结果 Table A3 Characteristic of fault voltage and PNN output under different faults with different resistance

表 A4 不同故障距离在各故障下故障电压特征值及 PNN 输出结果

Table A4 Characteristics of fault voltage and PNN output at different fault distances under different fault

| types | | | | | | | | | | |
|--------|---------|--------------|--------|-----------|------------|--------|--------|--------|------|--|
| | | | | | PNN 神经网络输出 | | | | | |
| 故障类型 | 故障距离/kn | n <i>p</i> 1 | k_1 | $p_2 k_2$ | 线路单极故障 | 线路双极故障 | 母线单极故障 | 母线双极故障 | 区外故障 | |
| 线路单极故障 | 50 | 1.09 | 1.34 | 3.490 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| | 100 | 0.48 | 0.5 | 7.150 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| | 150 | 0.26 | 0.77 | 6.910 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 线路双极故障 | 50 | 0.251 | 121.14 | 40.320 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | |
| | 100 | 0.48 | 7.90 | 1.230 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | |
| | 150 | 0.19 | 11.19 | 0.710 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | |

| | Table A3 Characteristic of fault voltage under AC side fault | | | | | | | | | |
|----------------|--|-------|-------|-------|-------|------|------|--|--|--|
| 故障位置 | 故障类型 | p_1 | k_1 | p_2 | k_2 | 母线保护 | 线路保护 | | | |
| | 单相接地 | 0.10 | 0 | 26.01 | 0 | 不动作 | 不动作 | | | |
| S_1 | 两相接地 | 0.11 | 0 | 28.53 | 0 | 不动作 | 不动作 | | | |
| | 三相接地 | 0.10 | 0 | 26.01 | 0 | 不动作 | 不动作 | | | |
| S_2 | 单相接地 | 0.06 | 0 | 10.41 | 0 | 不动作 | 不动作 | | | |
| | 两相接地 | 0.15 | 0 | 27.01 | 0 | 不动作 | 不动作 | | | |
| | 三相接地 | 0.14 | 0 | 34.01 | 0 | 不动作 | 不动作 | | | |
| S_3 | 单相接地 | 0.11 | 0 | 26.34 | 0 | 不动作 | 不动作 | | | |
| | 两相接地 | 0.10 | 0 | 27.46 | 0 | 不动作 | 不动作 | | | |
| | 三相接地 | 0.13 | 0 | 27.43 | 0 | 不动作 | 不动作 | | | |
| \mathbf{S}_4 | 单相接地 | 0.04 | 0 | 26.05 | 0 | 不动作 | 不动作 | | | |
| | 两相接地 | 0.03 | 0 | 24.84 | 0 | 不动作 | 不动作 | | | |
| | 三相接地 | 0.03 | 0 | 24.70 | 0 | 不动作 | 不动作 | | | |

表 A5 各交流侧故障下故障电压特征值

 Table A5
 Characteristic of fault voltage under AC side fault

表 A6 DWT-PNN 与 ROCOV 故障检测方法性能对比 Table A6 Performance comparison between DWT-PNN and ROCOV fault detection

| 技术要求 | DWT-PNN | ROCOV |
|--------|---------|---------|
| 速动性 | 是 | 是 |
| 过渡电阻范围 | 0~200 Ω | 0~100 Ω |
| 故障类型 | 是 | 否 |
| 无阈值整定 | 是 | 否 |
| 故障距离 | 是 | 否 |
| 交流侧故障 | 是 | 是 |

注:"是"表示该方案可以满足该技术要求,"否"表示该方案不能满足该技术要求。