# 基于改进经验小波变换和改进多视角深度矩阵分解的 直流配电网故障检测方案

洪 翠1,连淑婷1,黄 晟2,郭谋发1

(1. 福州大学 电气工程与自动化学院,福建 福州 350108;2. 福州大学 计算机与大数据学院,福建 福州 350108)

摘要:为快速检测及可靠识别直流配电网故障,提出一种基于改进经验小波变换和改进多视角深度矩阵分解 的直流配电网故障检测方案。通过最小二乘法非线性拟合故障电流局部的相频谱函数,基于此在一定的条 件下修改经验小波函数的相频响应,使之尽可能与故障电流的局部相频特性相匹配;运用改进经验小波变换 分解电流,计算细节分量 c<sub>3</sub>的模极大值,构造故障检测判据;设计一种权重自学习网络,依据数据对分类任务 的重要性分配不同的权重,嵌套于多视角深度矩阵分解模型前端,运用改进多视角深度矩阵分解模型对电流 分量 c<sub>1</sub>—c<sub>3</sub>、极间电压 u<sub>de</sub>这4个视角的数据进行故障特征提取,通过软分配层实现故障的分类。仿真测试结 果表明,所提故障检测方案能够满足故障检测速动性、可靠性的要求,故障分类准确度高,为后续故障处理奠 定了良好基础。

关键词:直流配电网;故障检测与分类;改进经验小波变换;改进多视角深度矩阵分解 中图分类号:TM 713 
文献标志码:A DOI:10.16081/j.epae.202203016

# 0 引言

随着新能源与电力电子技术的快速发展,分布 式电源并网需求增大,直流负荷比重不断增加。传 统交流配电网需通过电力电子换流装置实现分布式 电源的消纳以及直流负荷的供电,采用直流配电网 不仅可向各类直流负荷直接供电,省去分布式电源 和储能装置并网时的电力电子转换装置,并且直流 配电网具有传输效率高、电能质量好、供电可靠性高 等优势<sup>[1]</sup>。然而,保护技术的不成熟在一定程度上 限制了直流配电网的大范围应用。与交流配电网相 比,直流配电网的系统阻抗低<sup>[2]</sup>,故障电流上升速度 快且幅值高,将对换流站中的二极管带来冲击,进而 可能危害直流配电设备<sup>[3]</sup>。为保护直流配电网中的 电力电子器件,需尽快实现故障隔离。快速可靠的 故障检测将为保护动作奠定良好的基础,是直流配 电网保护方案不可或缺的关键环节。

近年来,国内外学者已对直流配电网故障检测 开展了深入的研究。文献[4]提出以换流站直流侧 电流、电压作为故障检测的判据,当电流超过设置的 阈值且直流电压下降到一定程度时判定为故障,但 容易出现误检、漏检。文献[5]利用故障后电流反向 增大过零的特性,通过采样数据前后异号判断电流 是否过零,从而检测故障,在雷击干扰情况下不会误 动,可靠性较高,但高阻接地情况下是否能正常检测

收稿日期:2021-06-03;修回日期:2022-01-22 在线出版日期:2022-03-17 基金项目:国家自然科学基金资助项目(51677030) Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51677030) 有待商榷。文献[6]提出名为"握手法"的故障线路 识别方法,其假定电流正方向为母线流向线路,当正 方向过流时判定为发生故障,该方法简单易行,但识 别速度难以达到速动性要求,且非故障线路会短时 停电。文献[7]提出基于暂态电流均值的直流故障 检测方法,将电流在一个固定时间窗内的均值作为 故障检测判据,速动性好。文献[8]将直流电抗器作 为边界,以其两端电压构造检测判据,该方法无需数 据同步,但直流电抗器不可或缺。为提高直流配电 网故障检测的可靠性,已有学者将信号处理算法应 用于故障数据预处理。文献[9]选择短时傅里叶变 换STFT(Short-Time Fourier Transform)处理故障电 流信号,以频谱中的幅值作为故障检测判据,能在 几毫秒内检测出故障,但是STFT存在窗函数选择 问题<sup>[10]</sup>。文献[11]利用换流器开关带来的线路6次 谐波分量,提出一种基于改进的离散傅里叶变换 IDFT(Improved Discrete Fourier Transform)的故障 定位方案,该方案可消除衰减周期分量和直流分量 的影响,准确性好。文献[12]采用改进互补集合经验 模态分解 CEEMDAN (Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise)算法自适 应地提取暂态零模电流的特征模态分量,构造能量 比判据,以此区分高阻接地故障、负荷投切等工况, 灵敏度高。

随着人工智能技术的发展,机器学习算法逐渐 开始应用于直流故障检测领域。文献[13]基于归一 化故障电流生成并训练深层神经网络DNN(Deep Neural Network),完成了直流配电网故障特征的学 习和提取。文献[14]采用STFT 对船舰直流配电系 统故障电流进行预处理,然后将其输入K-means聚 类算法中进行故障检测及识别,避免了硬判据对故 障检测造成的影响。文献[15]提出基于经验模态分 解EMD(Empirical Mode Decomposition)和卷积神经 网络CNN(Convolutional Neural Network)的直流输 电系统故障检测方案,将EMD得到的特征量输入离 线训练好的CNN中进行故障检测。但总体而言,人 工智能算法在直流配电网故障检测领域的应用 较少。

为了克服以单一电气量进行故障检测时容易 出现误检、漏检的问题,同时满足故障检测速动性的 要求,本文提出一种基于改进经验小波变换 IEWT (Improved Empirical Wavelet Transform)和改进多视 角深度矩阵分解 IMDMF(Improved Multi-view Deep Matrix Factorization)模型的直流配电系统故障检 测方案。通过修改经验小波变换(EWT)中经验小 波函数的相频响应,使之尽可能与局部信号的相频 特性相匹配;在多视角深度矩阵分解(MDMF)模型 前端设计了权重自学习网络,依据多视角数据对分 类任务的重要性分配不同的权重,从而提高故障分 类识别的精度。与现有利用信号处理算法的故障检 测方案相比,IEWT对故障频带上的信号成分提取能 力更强,使得故障检测方案可靠性进一步提升。此 外,本文所提故障检测方案可实现交流侧故障的识 别,提高了方案的完备性,且在出现误判的极端情况 下,IMDMF模型也可将其单独划分出来,防止保护 误动。基于 PSCAD / EMTDC 仿真平台搭建了直流 配电系统模型,仿真结果验证了本文方案的可行性。

# 1 直流配电网故障分析

手拉手式柔性直流配电系统拓扑结构及其时 域故障分析详见附录A。为更全面地了解线路发 生故障后电流的变化,利用离散傅里叶变换进行频 域分析。金属性单极接地故障与正常运行时的电 流幅频谱如图1所示,金属性单极接地故障电流的 相频谱如图2所示。图中:*I*<sub>amp</sub>为电流幅值;*φ*<sub>1</sub>为电 流相位。

由图1可见,金属性单极接地故障频带大致集





and normal operation condition



图2 金属性单极接地故障电流相频谱

Fig.2 Phase-frequency spectrum of metallic single-pole grounding fault current

中在第1个转折点之后的区段上。由图2可见,在第 1个转折点之后,故障电流相频谱由线性上升转变 为非线性波动,即等效故障电流的正余弦波相位发 生了改变。

同理可得极间短路故障电流的幅频谱、相频谱 如图3所示。





由图3可见:极间短路故障与金属性单极接地 故障频带一致,集中在第1个转折点之后的区段, 但等效故障电流的正余弦波幅值较大,主要原因是 该幅值大小与故障电流幅值密切相关,而极间短路 故障回路不包含电容接地电阻*R*<sub>s</sub>,得到的故障电流 幅值更高,由离散傅里叶变换得到的等效故障电流 幅值也更高;同时,极间短路故障电流的相频谱波 动程度较低。

附录A图A1中f<sub>3</sub>处在2s发生单相接地、两相接地、三相短路故障时,换流器2直流出口线路(下文统称为观测线路)的正极电流*i*<sub>p</sub>如附录B图B1所示。由图可见,交流侧发生不对称故障时,故障点将通过换流站与直流配电区域之间形成零序环流通路,直流线路在该零序环流作用下将产生交流基频波动,直至故障消失。为进一步验证该理论,对图B1所示的正极电流进行离散傅里叶变换,得到正极电流幅频谱,如附录B图B2所示。可见,交流侧发生不对称故障时,观测线路上的电流确实存在50Hz的交流电流分量,而故障电流的相频谱在前段频带上差异较大。当系统交流侧发生三相短路故障时,故障电流的特征与发生极间短路故障时类似。

综上所述,频域范围内,故障频带上的信号量与 正常工况相比差异明显,若能将该频带上的信号成 分尽可能地分解出来,则更有益于故障检测。

# 2 算法理论

# 2.1 IEWT

EWT 是由 Gilles 提出的一种信号处理方法<sup>[16]</sup>, 它将 EMD 的自适应原理和小波变换(WT)的理论框 架相结合,能自适应地分解信号。分解步骤为:①利 用傅里叶变换获得信号的频谱,通过寻找频谱内极 大值的方式将频谱划分为 M 个区域;②根据频带划 分结果定义经验小波尺度函数、经验小波函数;③利 用传统小波框架计算经验小波系数 c<sub>1</sub>—c<sub>M</sub>;④采用 经验小波尺度函数、经验小波函数及经验小波系数 重构信号。

由第1节的分析可知,直流线路发生故障后,线路电流的相频谱发生突变,从线性上升变为非线性波动,因此,考虑改变经验小波的相频特性,使之尽可能地与局部故障信号的相频响应相匹配,从而获得能量更集中的分解系数,更多地捕获故障信号的能量,但多分辨率分析MRA(Multi-Resolution Analysis)空间结构应在改造前后保持不变。文献[17]提出,对Meyer小波增加满足式(1)所示特定条件的非线性相位函数 $\theta(\omega)$ 时,可得到具有相同空间结构的正交小波基。

$$\theta(\pi + \delta) = -\theta(\pi - \delta) \quad \delta \in [0, \pi/3] \tag{1}$$

Meyer小波定义域为频域且满足一定框架,而 EWT所定义的小波满足Meyer小波形式,即亦满足 上述理论的前提条件。

故障电流信号f(t)经过傅里叶变换后可表示为  $\hat{f}(\omega)=r(\omega)e^{i\xi(\omega)},其中<math>r(\omega)$ 为 $\hat{f}(\omega)$ 的绝对值, $\xi(\omega)$ 为故障电流信号的相位函数。IEWT的经验小波函 数 $\psi(t)$ 经傅里叶变换后可表示为 $\hat{\psi}_{\theta}(\omega)=\hat{\psi}(\omega)e^{i\theta(\omega)},$ 其中 $\hat{\psi}(\omega)$ 为经傅里叶变换后的EWT的经验小波 函数, $\theta(\omega)$ 在满足式(1)的条件下与 $\xi(\omega)$ 越相近,则分解系数的能量越集中。

考虑到在线拟合函数 $\theta(\omega)$ 可能导致故障检测 程序耗时较长,因此,本文采用类似查表的方式,即 先离线拟合不同故障信号相频谱的离散序列,获得 函数 $\theta(\omega)$ ,然后在线选取 $\theta(\omega)$ 代人经验小波函数  $\hat{\psi}_{\theta}(\omega)$ 中。其中,拟合方式采用最小二乘法非线性 拟合,拟合区段为信号相频谱的第1个转折点之后。

以正极金属性接地故障( $R_{g}=0$ )为例,不同故障 距离下故障信号的 $\theta(\omega)$ 如表1所示。

表1 不同故障距离下故障信号的 $\theta(\omega)$ 

Table 1  $\theta(\omega)$  of fault signals under different fault distances

different fault distances					
故障类型	故障距离 / km	$\theta(\boldsymbol{\omega})$			
	0	$0.1198\sin(900\omega)$			
正极金属性接地	3	$0.1198\sin(900\omega)$			
	7	$0.1198\sin(900\omega)$			

由表1可见,故障距离发生变化时,线路等效电 阻、等效电感值变化不大,并不影响拟合的 $\theta(\omega)$ 。 然而在实际运行中,直流配电网发生故障时的过渡 电阻、故障位置均未知,无法根据过渡电阻数值在线 选择合适的 $\theta(\omega)$ 。因此,本文采用电流变化率作为 函数 $\theta(\omega)$ 在线选择的依据,不同故障信号的电流变 化率 di/dt 如表2所示。

表2 不同故障信号的 $\theta(\omega)$ 与di/dt

Table 2  $\theta(\omega)$  and di/dt of different fault signals

故障类型	$R_{_{ m g}}$ / $\Omega$	$ heta(\omega)$	$\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} \neq (\mathbf{A} \boldsymbol{\cdot} \mathbf{s}^{-1})$
	0	$0.1198\sin(900\omega)$	2.900×10 <sup>6</sup>
	1	$0.1198\sin(900\omega)$	$2.821 \times 10^{6}$
正极	10	$0.1407\sin(900\omega)$	$2.200 \times 10^{6}$
接地	20	$0.1198\sin(900\omega)$	$1.743 \times 10^{6}$
	50	$-1.3382\sin(900\omega)$	$1.071 \times 10^{6}$
	100	$-1.6553\sin(900\omega)$	6.221×10 <sup>5</sup>

实际应用中,故障发生时的环境并不完全一致,无法将 di/dt 确定为一个具体值,因此,将仿真获得的电流变化率数值在一定范围内进行扩大。表 2中,过渡电阻为 10  $\Omega$  的正极接地故障对应的 $\theta(\omega)=0.1407 \sin(900 \omega)$ ,相比其他情况下的 $\theta(\omega)$ 较为独特,因此分别取 $\theta(\omega)$ 为0、0.1198 sin(900  $\omega$ )、0.1407 sin(900  $\omega$ ),并将其代入经验小波函数,经IEWT分解得到的细节分量 $c_3$ 如图4所示。





由图4可以看出,即使电流变化率上浮20%, 在线选取 $\theta(\omega)=0.1198\sin(900\omega)$ 所得结果与选取  $\theta(\omega)=0.1407\sin(900\omega)$ 时相差无几,这表明该范围 的选取较为宽松。

综上所述,IEWT可根据故障现况选择合适的函 数θ(ω),使经验小波函数与故障电流信号的相频特 性匹配度较高。以正极金属性接地故障为例,改进 后的经验小波函数为:

$$\hat{\psi}_{\theta}(\omega) = \hat{\psi}(\omega) e^{j0.1198 \sin(900\,\omega)}$$
(2)

图 A1 中 f<sub>2</sub> 处发生正极金属接地故障时,故障电 流及其IEWT和EWT结果如图5所示。

对比图 5(a)、(b)可见,由 IEWT 分解得到的细节分量  $c_2$ 、 $c_3$ 中的最大系数绝对值要比由 EWT 得到的大,即 IEWT 捕获到的故障信号的能量更多,更有



# 图 5 f<sub>2</sub> 处发生正极金属接地故障时的故障电流及其 IEWT、EWT 结果

Fig.5 Fault current and its IEWT and EWT results when metallic positive-pole grounding fault occurs at  $f_2$ 

利于区分故障状态与正常状态。其中:近似分量 c<sub>1</sub> 仅展现了信号的概貌,难以表征电流的奇异点;细节 分量 c<sub>2</sub>、c<sub>3</sub>可准确反映故障特征,但与 c<sub>2</sub>层相比,c<sub>3</sub>层 的系数能量更集中,特征更显著。因此,本文选择 c<sub>3</sub> 层构造故障检测判据。

由图 5(a)可见,调整经验小波函数的相频响应 后会带来纹波,可能导致重构信号的失真。但是,故 障检测领域中可以适当考虑牺牲少量重构还原度而 获得较大的系数能量。分别利用 IEWT 和 EWT 重构 图 A1 中 f<sub>2</sub> 处的正极金属性接地故障电流,结果如附 录 B图 B3 所示。图中:IEWT 重构信号整体上与原 始信号一致,其均方误差为 5.25×10<sup>-6</sup> kA;EWT 重构 均方误差为 1.17×10<sup>-8</sup> kA。由此可知,IEWT 能在重 构信号不严重失真的情况下使分解出的能量更加集 中,且局部表征故障的能力更强。

#### 2.2 MDMF及其改进

模式识别问题中,特征提取算法是最为关键的 一环。矩阵分解是一种有效的特征提取方式,但传 统的矩阵分解只是对数据的单次解读,无法实现较好的表征能力。因此,可将矩阵分解拓展到多级的情况,即深度矩阵分解。深度模型可以自动学习每一层的潜在属性,使得在最内层的表示矩阵具有最强的表征能力。一般而言,故障时刻的电流信号具有多种特征,能更好地从不同角度揭示故障的本质。MDMF可以表示为:

 $\begin{cases} \boldsymbol{X}_{1} \approx \boldsymbol{U}_{S}^{1} (\boldsymbol{V}_{S}^{1})^{\mathrm{T}} (\boldsymbol{V}_{S-1}^{1})^{\mathrm{T}} \cdots (\boldsymbol{V}_{1}^{1})^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{X}_{2} \approx \boldsymbol{U}_{S}^{2} (\boldsymbol{V}_{S}^{2})^{\mathrm{T}} (\boldsymbol{V}_{S-1}^{2})^{\mathrm{T}} \cdots (\boldsymbol{V}_{1}^{2})^{\mathrm{T}} \\ \vdots \\ \boldsymbol{X}_{v} \approx \boldsymbol{U}_{S}^{v} (\boldsymbol{V}_{S}^{v})^{\mathrm{T}} (\boldsymbol{V}_{S-1}^{v})^{\mathrm{T}} \cdots (\boldsymbol{V}_{1}^{v})^{\mathrm{T}} \end{cases}$ (3)

式中:v为视角个数;S为深度分解的层数; $X_1 - X_s$ 分 别为第1-v个视角的数据矩阵; $U_s^1 - U_s^s$ 分别为第 1-v个视角的表示矩阵; $(V_s^1)^{\mathsf{T}} - (V_s^s)^{\mathsf{T}}$ 分别为第 1-v个视角的基矩阵。

由式(3)可知,MDMF对多视角数据X<sub>1</sub>--X<sub>a</sub>进 行独立处理,获得对应的表示矩阵,这将使整个矩阵 分解模型较为庞大、参数较多,且模型运行时间较 长。若将多视角数据进行融合,得到多视角数据共 有的表示矩阵,则可简化MDMF模型,缩短运行时 间。但通过拼接简单地将多个视角的特征组合在一 起,不仅会带来大量的冗余信息,还可能丢失特征数 据之间的关联信息。因此,本文在MDMF模型前端 添加权重自学习网络,通过权重学习使得对分类任 务具有较大作用的数据在MDMF中占有较大的权 重,即数据点对应的权重与其在分类任务中的重要 性成正比。该网络可表示为:

$$\mathbf{X} \approx \mathbf{W} [\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \cdots, \mathbf{X}_n] \tag{4}$$

式中:[X<sub>1</sub>,X<sub>2</sub>,…,X<sub>s</sub>]为将数据矩阵进行横向拼接后 得到的矩阵;W为权重自学习网络中的权重矩阵。

₩采用表示统一化策略,使得 MDMF 符合现实 意义,即多视角数据为波形在不同空间的映射,则 IMDMF模型可描述为:

$$\begin{cases} \boldsymbol{X}_{1} \approx \boldsymbol{Z}(\boldsymbol{V}_{S}^{1})^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{V}_{S-1}^{1})^{\mathrm{T}} \cdots (\boldsymbol{V}_{1}^{1})^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{X}_{2} \approx \boldsymbol{Z}(\boldsymbol{V}_{S}^{2})^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{V}_{S-1}^{2})^{\mathrm{T}} \cdots (\boldsymbol{V}_{1}^{2})^{\mathrm{T}} \\ \vdots \\ \boldsymbol{X}_{v} \approx \boldsymbol{Z}(\boldsymbol{V}_{S}^{v})^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{V}_{S-1}^{v})^{\mathrm{T}} \cdots (\boldsymbol{V}_{1}^{v})^{\mathrm{T}} \end{cases}$$
(5)

式中:**Z**为多视角数据共有的表示矩阵,其为数据矩 阵与表示矩阵的乘积,其实际意义是各个数据点在 底层的真实表征。

选取 S=4,将 IEWT 得到的 c<sub>1</sub>—c<sub>3</sub>和线路极间电 压 u<sub>de</sub>作为输入多视角数据,则本文提出的 IMDMF 模 型如图 6 所示。图中:①—④分别表示权重学习模 块、编码器模块、多视角数据表示模块、各视角的解 码器模块;权重自学习网络中不同的灰度即代表不 同的数据权重。



12

图 6 IMDMF 模型 Fig.6 Model of IMDMF

考虑到 IMDMF 模型提取的 Z 已具备较强的故障表征能力,因此放弃其他具有特征提取模块的分类器,直接采用软分配层实现故障类型的识别,从而进一步简化分类模型。软分配层可将 Z 以不同的权重分配给不同的类别,如式(6)所示。

$$G \approx ZW_{c}$$
 (6)

式中:W。为类别分配权重矩阵;G为类别得分矩阵。 分类的误差函数使用交叉熵,数学表达式为:

$$H(\mathbf{y}^{(m)}, \hat{\mathbf{y}}^{(m)}) = -\sum_{j=1}^{q} y_{j}^{(m)} \lg \hat{y}_{j}^{(m)}$$
(7)

式中: $y^{(m)}$ 为第*m*条数据真实标签向量; $\hat{y}^{(m)}$ 为第*m*条数据预测概率向量; $\hat{y}^{(m)}$ 为第*m*条数据属于第*j*类的概率;q为类别总数。

为直观反映各个类别的概率分布情况,进一步 将式(6)获取的类别得分矩阵通过Softmax函数映射 至0~1范围内,且所有类别概率之和为1。Softmax 函数表达式为:

$$P_{m} = e^{G_{m}} / \sum_{j=1}^{q} e^{G_{j}}$$
(8)

式中: $P_m$ 为类别m的概率; $G_m$ 、 $G_j$ 分别为类别m、类别j的等分矩阵。

#### 3 故障检测方案流程

本文所提基于IEWT和IMDMF的直流配电网故 障检测方案的流程如图7所示。

选取*c*<sub>3</sub>的模极大值*A*<sub>max</sub>作为故障检测判据,以避免 IEWT 在突变点附近的纹波对故障检测带来的影响,故障检测判据为:

$$A_{\rm max} > A_{\rm th}$$
 (9)

式中:A<sub>n</sub>为阈值,按照躲过负荷扰动的基本原则进行选取。

由式(8)可知,Softmax函数的输出是各个类别



图7 本文所提故障检测方案的流程



的概率,故设定阈值 P<sub>th</sub>,以确定最终的预测类别。 取最高概率值 P<sub>max</sub>及其对应的类别,若 P<sub>max</sub>满足式 (10),则输出对应类别;否则,输出"未知类型"。

$$P_{\rm max} > P_{\rm th} \tag{10}$$

#### 4 方案验证

# 4.1 仿真建模

在 PSCAD / EMTDC 仿真平台上搭建图 A1 所示 的手拉手式柔性直流配电系统仿真模型。其中:电 压源型换流器 VSC<sub>1</sub>采用定直流电压控制模式,VSC<sub>2</sub> 采用定有功功率控制模式;电压源型换流器直流侧 采用电容中性点经5Ω电阻接地方式;柔性直流配 电系统负载为交流微电网、交流负荷、直流微电网、 直流负荷4类;直流线路采用 RL等效模型,主要的 仿真模型参数见附录 B表 B1。

#### 4.2 故障检测仿真

4.2.1 不同故障场景下的检测性能

依照如图7所示的工作流程,仿真验证本文提出的故障检测方案的性能。以图A1中观测线路上保护装置为例,采样频率为50kHz,数据窗的长度为100点。负荷投切时,由IEWT得到的c<sub>3</sub>模极大值 A<sub>max</sub>=8.4×10<sup>-5</sup>kA,考虑裕量,将其乘以可靠系数5,最终设定c<sub>3</sub>的模极大值阈值为A<sub>bb</sub>=4.2×10<sup>-4</sup>kA。不同故障场景下,本文所提故障检测方案的结果如表3 所示。表中:观测线路近端、远端故障的距离分别设定为0、7km;观测线路背端即VSC<sub>2</sub>交流侧。

由表3可见,本文所提方案在不同故障场景下

#### 表3 不同故障场景下本文所提故障检测方案结果

 
 Table 3 Results of proposed fault detection scheme under different fault scenarios

故障类型	故障位置	$R_{ m g}$ / $\Omega$	$A_{\rm max}/~{\rm kA}$
拉问后吻	近端	0	0.008 900
饭问湿焰	远端	0	0.007 300
		0	0.012600
		1	0.053 200
	记出	10	0.034000
	虹晰	20	0.023 200
		50	0.011500
그 바고 누고 나다		100	0.005 900
止恢按地		0	0.010500
		1	0.029700
	<u>اللہ جب</u> ر	10	0.005 300
	远端	20	0.002700
		50	0.001100
		100	0.000680
单相接地	背端	0.01	0.002700
两相接地	背端	0.01	0.001 000
三相短路	背端	0.01	0.000604

均能可靠检测出故障。但故障距离的增加会导致线路等效电感及电阻值变大,由附录A可知,故障电流的幅值变小,相应地,由IEWT得到的c<sub>3</sub>幅值减小,模极大值A<sub>max</sub>也随之减小。

当线路远端发生经100 Ω 过渡电阻的正极接地 故障时,由 IEWT 分解所得细节分量  $c_3$ 的模极大值  $A_{max}$ =6.8×10<sup>-4</sup> kA> $A_{th}$ =4.2×10<sup>-4</sup> kA,故障检测的仿真结 果如图 8 所示。图中: $F_{fault}$ 为故障标识, $F_{fault}$ =1、 $F_{fault}$ =0 分别表示发生、未发生故障。





由图8可知,2s时刻线路远端发生高阻接地故障时,电流产生突变,但波动幅值甚至小于电流本身的纹波,在此较为极端的条件下,IEWT仍然能捕捉到电流奇异点,证明其具备较好的高频分量提取能力,且在故障发生后的1ms内,本文所提故障检测方案成功地标记了故障。上述分析表明,基于IEWT的故障检测方案具有较强的速动性、短路点过渡电阻耐受能力及远距离故障检测能力。

4.2.2 功率反转时的故障检测性能

设2s时刻换流站VSC<sub>1</sub>、VSC<sub>2</sub>发生功率反转,在 观测线路上监测到的正极电流 $i_p$ 、负极电流 $i_n$ 如图9 所示。







由图9可知,2s时刻发生功率反转,各个换流站 功率反转导致电流反向,但变化缓慢,电流蕴涵的高 频分量较低,IEWT的分解细节分量*c*<sub>3</sub>的模极大值仅 为3.2×10<sup>-4</sup> kA,小于故障检测阈值。因此,设置合适 的阈值后,功率反转不会对故障检测方案造成干扰。 4.2.3 负荷波动对故障检测的影响

设图 A1 所示网络在1 s 时刻有负荷投入运行, 观测线路上监测到的正极电流如图 10 所示。



根据图 10 可得,1 s时刻负荷投入运行后,观测 线路的正极电流缓慢上升,而后逐渐下降恢复至正 常,虽然波动程度比高阻接地故障故障情况下大得 多,但由于其突变程度较低,IEWT分解细节分量 c<sub>3</sub> 的模极大值仅为1.5×10<sup>-4</sup> kA<A<sub>th</sub>。因此,负荷波动情 况下本文所提故障检测方案不会发生误判。

4.2.4 噪声对故障检测的影响

为验证本文所提故障检测方案在噪声环境下的 适应性,在电流信号中添加信噪比为20 dB的高斯 白噪声,当VSC<sub>2</sub>出口处直流线路发生*R*<sub>g</sub>=100 Ω的正 极接地故障时,仿真结果如图11所示。由图可知, 噪声干扰虽然使得由 IEWT 分解获得的细节分量*c*<sub>3</sub> 受到影响,但其仍能准确表征故障,本文方案适应于 噪声且依然能够有效检测故障。

4.2.5 网络结构调整对故障检测的影响

模块化多电平换流器 MMC(Modular Multilevel Converter)是一种新型的 VSC,具有重要的工程应用 前景<sup>[18-19]</sup>。为验证本文所提故障检测方案在 MMC



# 图 11 噪声环境下本文所提故障检测方案的仿真结果 Fig.11 Simulative results of proposed fault detection scheme in noisy environment

型柔性直流配电系统上的适应性,另外搭建了 MMC 型手拉手式柔性直流配电系统仿真模型,其与图 A1 所示网络的区别在于换流站为 MMC型,直流侧采用 典型的经箝位电阻接地方式,交流侧采用经电阻接 地方式。此外,直流线路采用直流电缆搭建,系统的 主要参数见附录 B表 B2。

设置 MMC 型柔性直流配电系统 MMC<sub>2</sub>出口处发 生经不同过渡电阻的正极接地故障,故障起始时刻 为2s,对应的线路正极电流仿真结果如附录 B图 B4 所示。基于 MMC 的柔性直流配电系统发生单极接 地故障时,桥臂电容通过故障点与交流侧接地点组 成放电回路,桥臂电流逐渐升高,但由于 MMC 换流 站直流侧采取大电阻接地方式,且无直流侧集中电 容,桥臂过流程度并不高<sup>[20]</sup>。

按照图7所示流程,设定A<sub>th</sub>=3×10<sup>-3</sup> kA,仿真验 证本文所提故障检测方案对于MMC型柔性直流配 电网的适用性,在4.2.1节中所设置的不同故障场景 下的仿真结果如附录B表B3所示。由表可知,本文 所提故障检测方案同样适用于基于MMC的直流配电 系统,然而在远端高阻接地故障下A<sub>max</sub>=3.4×10<sup>-3</sup> kA, 仅略大于设定的阈值 3×10<sup>-3</sup> kA,对判定不利。因 此,本文方案应用于基于MMC的直流配电系统时, 对远距离高阻接地故障检测还需做进一步的改善, 以提升检测性能。

#### 4.3 故障分类模型仿真验证

基于图 A1 所示网络在不同故障类型、不同过渡 电阻、不同故障距离下的故障事件进行仿真,共得到 158 组数据。其中:直流线路故障数据包括 62 组正 极接地故障数据、54 组负极接地故障数据和 12 组极 间短路故障数据;交流侧故障数据包括 30 组数据。 将数据集随机划分为 120 个训练集和 38 个测试集, 依据训练集的训练结果,并考虑保留一定的裕量,最 终设置 P<sub>b</sub>=0.9。

列出其中5组Softmax输出的各个故障类别的 概率值,如表4所示。

表4 イ	下同上况	ト	Softmax	函数的输出	出结果

Table 4 Output results of Softmax function

under different conditions

イ油	概率值				
上76	负极接地	极间短路	正极接地	交流侧故障	
正极接地	$2.814 \times 10^{-6}$	9.816×10 <sup>-6</sup>	9.999×10 <sup>-1</sup>	$3.152 \times 10^{-13}$	
负极接地	9.931×10 <sup>-1</sup>	$1.459 \times 10^{-4}$	$5.481 \times 10^{-3}$	$1.241 \times 10^{-3}$	
极间短路	$1.591 \times 10^{-5}$	$9.862 \times 10^{-1}$	$1.384 \times 10^{-2}$	$1.376 \times 10^{-6}$	
交流侧故障	$2.486 \times 10^{-4}$	$1.829 \times 10^{-9}$	4.239×10 <sup>-9</sup>	9.997×10 <sup>-1</sup>	
正常运行	4.369×10 <sup>-1</sup>	1.836×10 <sup>-1</sup>	$1.588 \times 10^{-1}$	$2.207 \times 10^{-1}$	

由表4可知,正确类别的概率值在0.95以上,而 其他类别的概率值几乎为0,两者处于不同的数量 级,体现了IMDMF模型具有较好的特征选择能力和 特征增强能力,十分有利于区分各个类别的故障。 同时,假设本文提出的检测方案出现了误检测,将正 常运行的数据输入故障分类模型,此时Softmax输出 的最大概率值,即*P<sub>max</sub>*仅为0.4369,远小于设定的阈 值0.9,与各个故障类型的匹配度极低,分类模型输 出"未知类型",因此后续保护动作不会误动,进一步 提升了故障检测方案的容错率。

此外,搭建输入环节为多视角数据拼接DSMDMF (Data Splicing Multi-view Deep Matrix Factorization)的故障特征提取模型,DSMDMF模型仅输入环 节与本文提出的IMDMF模型不同,以验证权重自学 习网络对模型的贡献,不同模型结构的故障分类结 果如表5所示。

表5 不同模型结构的故障分类结果对比

 
 Table 5
 Comparison of fault classification results among different model structures

模型结构	分类精度 / %
IMDMF+软分配层	100
DSMDMF+软分配层	94.74
软分配层	31.58

根据表5可得,本文所提IMDMF模型能准确识 别各类故障,且权重自学习网络对分类任务的贡献 确实是突出的。当分类模型结构仅有软分配层时, 分类精度仅为31.58%,这表明了故障特征提取模块 的重要性,也从侧面反映了矩阵分解模块具备较强 的故障特征提取能力。

# 5 结论

本文提出一种基于IEWT和IMDMF的直流配电 网故障检测方案。其中,IEWT能在重构信号不严重 失真的情况下捕获到更多的故障能量,更加有利于 故障的检测;IMDMF模型将输入的多视角数据通过 权重自学习网络融合,简化了传统MDMF模型结构, 有效缩短了模型运行时间,为后续故障处理留足了 裕度。仿真结果表明,相比于利用直流线路电抗器 电压的故障检测方法,本文方案由于采用了IEWT, 仅需采集线路单端的电流、电压,无需安装电抗器, 耐受过渡电阻能力较强,且具备检测远距离故障的 能力,对于MMC型直流配电系统亦有较好的适应 性;IMDMF与软分配层相结合组成分类模型能够准 确辨识出各类故障,并自动提取故障特征,避免了人 工选择的繁琐,更加智能化;同时,本文方案采用概 率分布与阈值相结合的方式进行故障分类,可将检 测步骤中出现的误判或未知类型故障单独分类,具 备一定的容错率,使故障检测分类更加完善。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

#### 参考文献:

- [1] 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.
   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.
- [2] 刘剑,何雨微,徐祥海,等. 柔性直流电网故障限流技术分析与 探讨[J]. 电力自动化设备,2020,40(4):9-16.
   LIU Jian,HE Yuwei,XU Xianghai,et al. Analysis and discussion of fault current limiting technology in flexible DC grid
   [J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(4):9-16.
- [3] 孙鹏飞,贺春光,邵华,等. 直流配电网研究现状与发展[J].
   电力自动化设备,2016,36(6):64-73.
   SUN Pengfei,HE Chunguang,SHAO Hua,et al. Research status and development of DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(6):64-73.
- [4] BARAN M E, MAHAJAN N R. Overcurrent protection on voltage-source-converter-based multiterminal DC distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 406-412.
- [5]郑涛,吴琼,吕文轩,等.基于直流电流过零特征的柔性直流配电网保护方案研究[J].电网技术,2020,44(5):1806-1814.
   ZHENG Tao,WU Qiong,LÜ Wenxuan, et al. Research on protection scheme of flexible DC distribution grids based on DC current zero-crossing characteristics[J]. Power System Technology,2020,44(5):1806-1814.
- [6] TANG L,OOI B T. Locating and isolating DC faults in multiterminal DC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007,22(3):1877-1884.
- [7]李佳朋,李宇骏,袁枭添,等. 远海风能集中接入的多端直流系 统直流故障分析与故障检测方法[J]. 电力自动化设备,2020, 40(12):119-128.
  LI Jiapeng,LI Yujun,YUAN Xiaotian, et al. DC fault analysis and detection for offshore wind farms integration via MTDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40
- (12):119-128.
  [8]何佳伟,李斌,李晔,等.多端柔性直流电网快速方向纵联保护 方案[J].中国电机工程学报,2017,37(23):6878-6887,7078.
  HE Jiawei,LI Bin,LI Ye, et al. A fast directional pilot protection scheme for the MMC-based MTDC grid[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(23):6878-6887,7078.
- [9] SATPATHI K, YEAP Y M, UKIL A, et al. Short-time Fourier transform based transient analysis of VSC interfaced point-topoint DC system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(5):4080-4091.
- [10] 覃思师,刘前进. 基于STFT变换和DAGSVMs的电能质量扰动 识别[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(1):83-86,103.

QIN Sishi, LIU Qianjin. Power quality disturbances detection and identification based on STFT transform and DAGSVMs[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(1):83-86, 103.

- [11] LI Meng, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Sixth harmonic-based fault location for VSC-DC distribution systems [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(14): 3485-3490.
- [12] 王晓卫,高杰,吴磊,等. 柔性直流配电网高阻接地故障检测方 法[J]. 电工技术学报,2019,34(13):2806-2819.
  WANG Xiaowei, GAO Jie, WU Lei, et al. A high impedance fault detection method for flexible DC distribution network
  [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34 (13):2806-2819.
- [13] LUO Guomin, TAN Yingjie, YAO Changyuan, et al. Deep learning-based fault location of DC distribution networks[J]. The Journal of Engineering, 2018, 16:3311-3322.
- [14] MAQSOOD A, OSLEBO D, CORZINE K, et al. STFT cluster analysis for DC pulsed load monitoring and fault detection on naval shipboard power systems[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2020, 6(2):821-831.
- [15] LAN S, CHEN M J, CHEN D Y. A novel HVDC doubleterminal non-synchronous fault location method based on convolutional neural network [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(3):848-857.
- [16] GILLES J. Empirical wavelet transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(16): 3999-4010.
- [17] 陈玉宇,张钹.非线性相位带限正交小波及其在电力系统故障 检测中的应用[J].中国电机工程学报,1998,18(4):288-291.
   CHEN Yuyu,ZHANG Ba. Non-linear phase band-limited orthogonal wavelets and their application to fault detections in power system[J]. Proceedings of the CSEE,1998,18(4):288-291.
- [18] 马文忠,张子昂,王晓,等.一种能够清除直流故障和减少传感器数量的 MMC 子模块及其特性研究[J].电力自动化设备,2020,40(1):87-92.
  MA Wenzhong, ZHANG Ziang, WANG Xiao, et al. Research on MMC submodule which can clear DC fault and reduce number of sensors and its characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(1):87-92.
- [19] 张浩,彭克,刘盈杞,等. 基于 MMC 的柔性直流配电系统低频 振荡机理分析[J]. 电力自动化设备,2021,41(5):22-28.
   ZHANG Hao,PENG Ke,LIU Yingqi,et al. Low-frequency oscillation mechanism analysis of flexible DC distribution system based on MMC[J]. Electric Power Automation Equipment,2021, 41(5):22-28.
- [20] 孙吉波,王宇,刘崇茹,等. 基于 MMC 的多端直流电网双极短路故障电流计算[J]. 电力自动化设备,2018,38(11):72-78.
  SUN Jibo, WANG Yu, LIU Chongru, et al. Pole-to-pole short circuit current calculation of multi-terminal DC grid based on MMC[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(11): 72-78.

#### 作者简介:



洪 翠(1972—),女,副教授,博士,主 要研究方向为配电网及其主设备故障诊断、 新能源电力负荷预测(E-mail:hongcui@fzu. edu.cn);

连淑婷(1997—),女,硕士研究生,主要 研究方向为直流配电网故障检测(E-mail: 1437160444@qq.com)。

洪 翠

(编辑 任思思)

(下转第29页 continued on page 29)

# Two-stage cooperative load restoration model for distribution network considering characteristic difference of multi-type switch operation

WENG Xiaoyong, TAN Yanghong

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Based on the restoration process of distribution network after disaster, a two-stage cooperative load restoration model considering the characteristic difference of multi-type switch operation is proposed. Firstly, the cooperative operation process of multi-type switches is analyzed and a basic restoration framework considering the cooperation of fault isolation stage and service restoration stage is constructed. Secondly, based on this framework, the new reconfiguration constraints considering the de-energized islands, switching operation constraints, fault isolation constraints and distribution network operation constraints are established, and then a restoration model with the minimum two-stage load cutting cost as its objective function is established, which is transformed into a mixed integer linear model. Finally, the feasibility of the proposed model is verified by modified IEEE 33-bus system. The results show that the proposed model is more practical and can effectively improve the load restoration capability of distribution network.

Key words: distribution network; network reconfiguration; load restoration; multi-type switch operation; fault isolation stage; service restoration stage

(上接第15页 continued from page 15)

# Fault detection scheme based on IEWT and IMDMF for DC distribution network HONG Cui<sup>1</sup>, LIAN Shuting<sup>1</sup>, HUANG Sheng<sup>2</sup>, GUO Moufa<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. College of Computer and Data Science, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** In order to quickly detect and reliably identify fault of DC distribution network, a fault detection scheme based on IEWT (Improved Empirical Wavelet Transform) and IMDMF (Improved Multi-view Deep Matrix Factorization) is proposed. The local phase-frequency spectra function of fault current is fitted nonlinearly by least square method, based on which, phase-frequency response of empirical wavelet function is modified under certain conditions to match the phase-frequency spectra characteristics of fault current as much as possible. The IEWT is used to decompose the current, and the modulus maximum of detail component  $c_3$  is calculated to construct the fault detection criterion. A weighted self-learning network is designed, according to the importance of the data to the classification task, different weights are allocated and nested in the front of the multi-view deep matrix factorization model. The fault features are extracted from the current component  $c_1, c_2,$  and  $c_3$ , and the inter electrode voltage  $u_{de}$  by using the IMDMF, and the fault classification is realized by the soft distribution layer. The results of simulation test show that the proposed fault detection scheme can meet the requirements of speed and reliability for fault detection, and the fault classification accuracy is high, which lays a good foundation for subsequent fault processing.

Key words: DC distribution network; fault detection and classification; improved empirical wavelet transform; improved multi-view deep matrix factorization

# 附录 A

图 A1 所示为一手拉手式柔性直流配电系统。图中,直流配电线路标识为 1—5;换流器采用 两电平电压源换流器 (VSC),直流侧采用电容经电阻接地方式,交流侧采用经电阻接地方式。 其中,交流侧故障包括相间及接地短路故障;直流配电线路故障包括单极接地、极间短路故障。



以点  $f_2$ 、 $f_3$ 为例,分析发生故障时的直流线路电流。当  $f_2$ 处发生正极接地故障时,等效电路如图 A2 所示。图中, $u_s$ 为交流侧等效电源电势; $R_s$ 和 $L_s$ 为交流侧等效电阻和电感;C为直流侧的正、负极电容; $R_g$ 为电容接地电阻;R/2、L/2为单极直流线路的等效电阻、电感; $R_f$ 为故障点过渡电阻; $i_c$ 为电容电流; $u_c$ 为正极电容电压。



假设故障发生后换流器开关元件立即闭锁,续流二极管处于关断状态,则故障回路满足:

$$\frac{LC}{2}\frac{\mathrm{d}^2 u_{\mathrm{c}}}{\mathrm{d}t^2} + \left(\frac{R}{2} + R_{\mathrm{g}} + R_{\mathrm{f}}\right)C\frac{\mathrm{d}u_{\mathrm{c}}}{\mathrm{d}t} + u_{\mathrm{c}} = 0 \tag{A1}$$

解方程可知,随着时间推移,故障电流数值先迅速上升,而后衰减;当 $R/2 + R_{\rm g} + R_{\rm f} < \sqrt{2L/C}$ 时,故障回路处于欠阻尼状态,故障电流为振荡衰减。

附录 B





表 B1 VSC 型直流配电系统仿真模型参数 Table B1 Simulation model parameters of VSC-based DC distribution system

参数	参数值	参数	参数值
额定直流电压/kV	20	线路电阻/(Ω•km <sup>-1</sup> )	0.014
换流站功率/MW	10	线路电感/(mH•km <sup>-1</sup> )	0.15
限流电感/mH	5	直流电容/μF	10000

#### 表 B2 MMC 型直流配电系统仿真模型参数

Table B2 Simulation model parameters of MMC-based DC distribution system

参数	参数值	参数	参数值
换流站功率/MW	25	线路电阻/(Ω・km <sup>-1</sup> )	0.014
额定直流电压/kV	20	线路电感/(mH•km <sup>-1</sup> )	0.16
直流钳位电阻/kΩ	1000	线路电容/(μF•km <sup>-1</sup> )	0.058
桥臂电抗器/mH	3	子模块电容/mF	23
直流电抗器/mH	5	子模块数量	10

#### 表 B3 MMC 型直流配电系统故障检测结果

Table B3 Fault detection results of MMC-based DC distribution system

故障类型	故障位置	过渡电阻/Ω	A <sub>max</sub> /kA
极间结败	近端	0	0.0046
似阿瓜町	远端	0	0.0174
		0	0.0333
		1	0.0313
	<b>光</b> 帶	10	0.0219
	丸上判問	20	0.0165
		50	0.0093
正极接抽		100	0.0057
正似好地	行進	0	0.0457
		1	0.0397
		10	0.0178
	· 도마케이	20	0.0123
		50	0.0053
		100	0.0034
单相接地	背端	0.01	0.0052
两相接地	背端	0.01	0.0083
三相短路	背端	0.01	0.0081