

DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.L80491

柔性直流配电网高阻接地故障检测方法

王晓卫^{1,2} 高杰³ 吴磊² 宋国兵² 韦延方¹

(1. 河南理工大学 电气工程与自动化学院 焦作 454000

2. 西安交通大学 电气工程学院 西安 710049

3. 浙江省电力有限公司 温州供电公司 温州 325000)

摘要 新能源电源、直流负荷等的大量出现,极大地促进了柔性直流配电网的发展,但作为柔性直流配电网的单极高阻接地故障(HIF)检测问题,一直以来并未得到重点关注。针对这一实际工程问题,提出一种基于改进互补集合经验模态分解算法(CEEMDAN)的HIF检测方法。首先,对暂态零模电流(TZMC)采用CEEMDAN算法提取出特征模态IMF₁分量,进而对IMF₁进行一阶差分运算,获得突变奇异点,通过在奇异点附近计算累积斜率和,与启动阈值进行比较,区分故障状态与正常状态;然后,采用Prony算法对IMF₁分量进行参数辨识,获得IMF₁分量中的特征频率分量(CFC)与DC分量,再计算CFC与DC的能量比,通过能量比数值的不同取值进一步区分小阻抗接地故障(SIF)、中阻抗接地故障(MIF)、高阻抗接地故障(HIF)、负荷投切(LS)状态。大量实验表明,该检测方法准确有效,与现有其他方法相比,在特征提取准确率、检测精度、计算速度等方面具有优势。

关键词: 故障检测 直流配电网 本征模态函数 暂态零模电流 特征频率分量

中图分类号: TM77

A High Impedance Fault Detection Method for Flexible DC Distribution Network

Wang Xiaowei^{1,2} Gao Jie³ Wu Lei² Song Guobing² Wei Yanfang¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation Henan Polytechnic University Jiaozuo 454000 China

2. School of Electrical Engineering Xi'an Jiaotong University Xi'an 710049 China

3. Wenzhou Power Supply Company Zhejiang Electric Power Company Wenzhou 325000 China)

Abstract Flexible DC distribution network has acquired more interest and development in recent years, with the emergency of lots of renewable energy and direct current (DC) loads, as for the high impedance fault (HIF) detection in flexible DC distribution network, it not gathers attention from the industry and research community. Hence, this paper proposed an improved complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise (CEEMDAN) method. Firstly, it utilizes CEEMDAN to extract the first intrinsic mode function component (IMF₁) of transient zero mode current (TZMC), and obtained the mutation singular point by calculating one order differences among IMF₁, then, it distinguishes fault stage from normal condition (NC) to calculate the slopes near the singular point, and compare slopes with start threshold. Secondly, uses Prony algorithm to identify the IMF₁ parameters, which including characteristic frequency component (CFC) and DC component, besides, calculates the energy ratio between CFC and DC to distinguish small impedance fault (SIF), medium impedance fault (MIF), high impedance fault (HIF) and load switching (LS). Lots of simulation experiments and field data prove that

国家自然科学基金(61403127, 61703144)和河南省科技攻关项目(182102210051)资助。

收稿日期 2018-07-01 改稿日期 2019-02-18

the paper can detect HIF effectively, and has some advantages compared with other methods in feature extraction, detection accuracy and calculation speed and so on.

Keywords: Fault detection, DC distribution, intrinsic mode function, transient zero mode current, characteristic frequency component

0 引言

近年来, 直流负荷数量日益增加, 利用传统交流配电系统实现分布式能源的消纳以及直流负荷的供电时, 需要大量电力电子换流设备, 投资成本大幅提高。相反, 若通过直流配电系统进行分布式能源的消纳与直流负荷的供电, 则可以节省大量的换流设备, 降低投资成本。除了在经济性方面的优势, 直流配电系统与传统交流配电系统相比, 其优点还体现在供电可靠性与电能质量方面。同时, 近年来柔性换流技术逐渐成熟, 推动了直流配电网的快速发展。因此, 柔性直流配电系统已成为未来能源互联网发展的主流趋势之一。

然而, 柔性直流配电系统的发展尚面临若干关键技术问题亟待解决, 其中包括运行工况的准确识别。当发生高阻故障 (High Impedance Fault, HIF) 时, 如何与小电阻故障 (Small Impedance Fault, SIF)、中阻故障 (Medium Impedance Fault, MIF)、负荷投切 (Load Switching, LS) 等工况进行准确区分, 是限制直流配电网发展的问题之一。但现实情况是直流线路阻尼很小, 一旦线路发生故障, 则故障电流会在几毫秒内迅速完成放电, 致使可供利用的故障数据窗太短, 故障信息太少, 导致现有保护方法无法适应如此快的故障电流放电过程, 进而失效; 由于故障电流非常大, 因此, 对于直流断路器的开断能力提出了更高要求。另外, HIF 属于隐形故障, 若不及时排除, 其对人身与设备安全均会造成极大威胁; 正常负荷投切时, 也易产生类似于 HIF 时的电压、电流信号, 因此, 直流配电网中, 如何在 HIF、SIF、MIF、LS 等工况下准确区分出 HIF 是本文的研究目标。

现有的滤波变换^[1-4]、形态整形/形态滤波^[5-8]、小波变换^[9-14]、S 变换^[15-17]等均是针对交流配电网的 HIF 进行识别, 到目前为止, 国内外还未见在直流配电网中开展 HIF 故障识别研究的文献。深入分析可知, 对于直流配电网的 HIF 检测研究在一定程度上可以借鉴交流配电网 HIF 检测方法, 但正如以上所言, 直流配电网由于特有的故障物理特性, 对其准确、可靠、快速的 HIF 检测方法提出了新的挑战。

对现有的交流配电网 HIF 检测方法进行梳理发

现其存在以下问题:

1) 特征提取方面: 现有的形态滤波、小波变换、S 变换等方法在特征提取时, 基函数均是固定的, 导致特征提取的表征能力不足; 提取过程不具自适应性, 虽然经验模态分解 (Empirical Mode Decomposition, EMD) 算法具有自适应性, 但易发生模态混叠与端点效应, 导致部分本征模态函数 (Intrinsic Mode Function, IMF) 物理意义不清晰。

2) 检测判据方面: 一方面现有 HIF 检测法的启动判据不够灵敏, 在发生 HIF 时, 容易误判配电网为正常状态 (Normal Condition, NC), 进而导致启动判据未正常启动; 另一方面, 没有将启动判据与区分判据分开构造, 导致 HIF 整体的检测准确率低, 且某些方法的判据构建设没有物理意义, 计算复杂。

交流配电网的 HIF 检测方法除以上的本身问题外, 若将其直接应用于直流配电网 HIF 检测中, 还存在一些亟待解决的问题。需面临的是直流配电网特有的故障特性: 直流配电网发生故障后, 故障放电过程快, 可供利用的故障信息数据窗非常短; 瞬间放电电流大, 威胁换流站安全运行, 需及时隔离故障; 故障电流没有过零点, 对直流断路器的开断能力提出了更高的要求。现有直流配电网的故障特性研究表明^[18], 可行的方法在于必须在故障电流上升到最大值前进行故障判别与故障区域隔离, 如若不然, 则过大的故障电流会损坏换流站。

基于直流配电网的故障特性及 HIF 检测的现实需求, 本文提出了一种直流配电网 HIF 检测方法。采用改进互补集合经验模态分解算法 (Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise, CEEMDAN) 提取暂态零模电流 (Transient Zero Mode Current, TZMC) 的第 1 个本征模态函数分量 IMF_1 , 进而对 IMF_1 进行一阶差分获得奇异值点 n_q , 通过对 n_q 点附近计算累积斜率 k 进而构建出检测判据; 在区分判据方面, 通过 Prony 算法对 IMF_1 进行参数辨识, 分别得到特征频率分量与直流分量的参数, 进而构建能量比计算式, 通过比值大小区分 SIF、MIF、HIF、LS。分析可知, 本文构造的启动判据可在获取几个采样点时即可启动, 速度快; 区分判据是对 2 ms 以内的特征频率与直流分

量进行能量比运算,结合现有文献可知,2 ms以内时,直流配电网故障放电电流还未上升到最大值,因此,区分判据同样具有快速性。大量仿真测试,验证了本文判据的准确性与可靠性。除此之外,本文方法仅通过首端的零模电流即可实现对直流配电网 HIF、MIF、SIF、LS 工况的准确区分,无需双端数据量,工程实用性较强。

1 柔性直流配电网零模电流分析

如图1所示,本文采用直流侧接地方式,在直流侧采用嵌位电阻引出零点,并经过高阻接地。这些接地方式共同的特点是电流接地,直流线路发生单极接地故障时,故障电流没有对地回路,直流线路电流仍为额定值。故障点仅导致系统零电位点变化,接地极线路电压变为0,非接地极电压变为原来的2倍,但两极之间的电压差不变,控制系统仍能保持运行。因此,对于柔性直流配电网来说,采用小电流接地方式具有较好的应用前景。

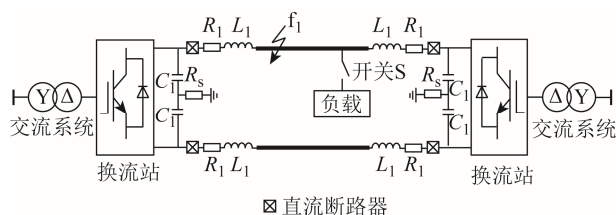


图1 基于VSC的两端直流配电系统

Fig.1 DC distribution system based on VSC

柔性直流配电网中TZMC蕴含着丰富的物理信息,可通过分析HIF、SIF、LS、NC等工况下零模电流中高频分量的变化规律入手,构建高阻接地故障判据。TZMC可通过式(1)获得。

$$i_0 = \frac{\sqrt{2}}{2}(i_p + i_n) \quad (1)$$

式中, i_p 、 i_n 分别为正极、负极电流。

由 i_0 可知,直流系统的 i_0 和交流系统的 i_0 具有类似性质, i_0 在正、负极的流通方向相同,必须经过接地点形成回路。直流系统零模网络的结构和变压器的接线方式、中性点的接地方式以及直流系统的接地点位置相关。

以图1为例,给出SIF、1 k Ω HIF、LS和NC 4种仿真工况下的 i_0 波形,如图2所示。

从图2中可以看出,当发生SIF时, i_0 在故障发生时刻出现,突变特性明显且具有很强的振荡趋势, i_0 波形中蕴含有较强的频率分量,如图2a所示;发生HIF时,较之SIF工况而言, i_0 在故障发生时

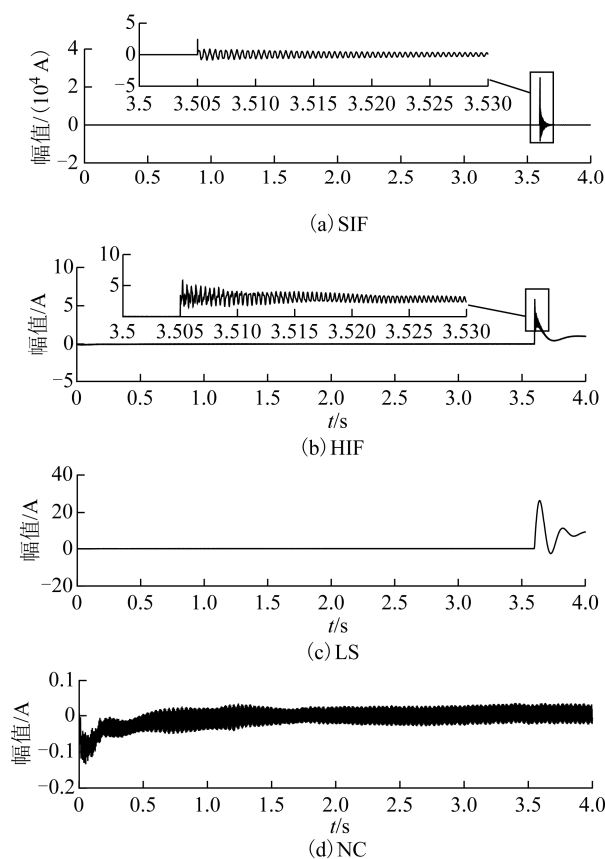


图2 4种工况下零模电流波形

Fig.2 TZMCs in 4 situations

刻的变化并不是非常剧烈,但也可看出,时域波形中具有一定的高频含量,如图2b所示;不平衡LS投切时,直流配电网正、负极间的平衡被打破,此时将会出现 i_0 ,但与HIF相比,由于并非故障,所以 i_0 波形中并不会出现高频分量,如图2c所示;直流配电网处于NC时,不会出现 i_0 ,如图2d所示。

对以上4种工况下的 i_0 进行FFT分析,如图3所示。

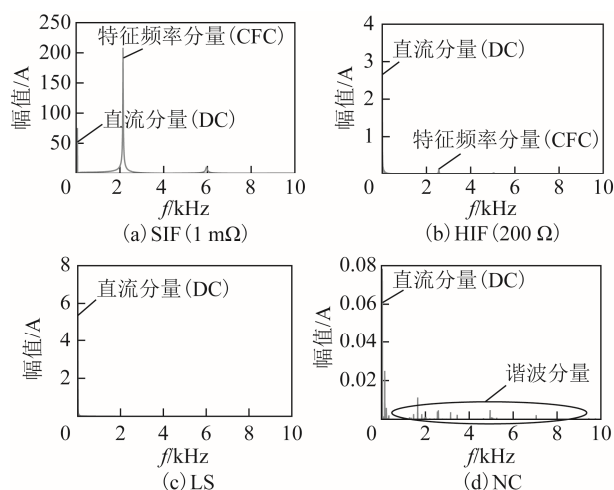


图3 各工况FFT分析

Fig.3 FFT analysis for each situation

从频域角度可以得出,特征频率分量 CFC 与直流分量 DC 的比重在以上 4 种工况下具有一定的差异,若能准确提取出高频分量与直流分量的能量,则可通过它们间的比值大小进行 HIF 检测。

2 特征 IMF 分量提取方法

采用互补集合经验模态分解提取特征 IMF,通过对成对添加白噪声来保证信号的完备性^[19],具体步骤如下:

- 1) 成对地给暂态零模电流信号 $i_0(t)$ 添加大小相同、符号相反的白噪声。
- 2) 采用 EMD 分解的方法对添加白噪声后的零模电流信号进行分解,得到 IMF 分量。
- 3) 重复添加不同的噪声,再进行 EMD。
- 4) 对所有得到的 IMF 分量进行平均,得到最后的分解结果。

其中,噪声标准差为 0.02,最大迭代次数为 500。

具体的 EMD 算法分解步骤如下:

对 $i_0(t)$, 首先找出 $i_0(t)$ 上所有的极值点,然后采用三次样条函数曲线对所有的极大值点进行插值,从而拟合出 $i_0(t)$ 的上包络线 $i_{0_max}(t)$ 。同理,得到下包络线 $i_{0_min}(t)$ 。按顺序连接上、下两条包络线的均值即得到一条均值线 $m_0(t)$ 。

$$m_0(t) = \frac{i_{0_max}(t) + i_{0_min}(t)}{2} \quad (2)$$

再用 $i_0(t)$ 减去 $m_0(t)$, 得到

$$h_1(t) = i_0(t) - m_0(t) \quad (3)$$

将 $h_1(t)$ 当做原始 $i_0(t)$, 重复上述步骤, 即得

$$h_{1k}(t) = h_1(t) - m_1(t) \quad (4)$$

式中, $m_1(t)$ 为 $h_1(t)$ 的上、下包络线均值。若 $h_{1k}(t)$ 不是 IMF 分量, 则继续筛选, 重复上述方法 k 次, 得到第 k 次筛选的数据 $h_{1k}(t)$ 为

$$h_{1k}(t) = h_{1(k-1)}(t) - m_{1(k-1)}(t) \quad (5)$$

当 $h_{1k}(t)$ 满足筛选终止准则的要求, 则 $h_{1k}(t)$ 为第 1 阶 IMF 分量, 记为 $c_1(t)$, 即

$$c_1(t) = h_{1k}(t) \quad (6)$$

从 $i_0(t)$ 中减去 $c_1(t)$ 得剩余信号, 即为残差 $r_1(t)$ 。

$$r_1(t) = i_0(t) - c_1(t) \quad (7)$$

将 $r_1(t)$ 看作一组新 $i_0(t)$ 信号重复上述模态分解

过程, 经多次运算可得全部残差 $r_i(t)$ 为

$$r_i(t) = r_{i-1}(t) - c_i(t) \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (8)$$

至此, $i_0(t)$ 可由 n 阶 IMF 分量及残差 $r_n(t)$ 构成。

$$i_0(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (9)$$

由分析可知, 由 CEEMDAN 分解 $i_0(t)$ 后所得的众多 IMF 分量中, IMF₁ 分量为 $i_0(t)$ 的最高频分量, 据现有文献可知, 高频分量对直流配电网的运行状态有着最为敏感的反应, 因此, 本文将 IMF₁ 作为 $i_0(t)$ 的特征 IMF, 并以此做下一步分析。

图 4 为各工况下, TZMC 与各自的 IMF₁ 分量波形, 可以看出, 对于 SIF、MIF、HIF 时, IMF₁ 分量在故障起始时刻突变明显, 表征准确; 对于 LS、NC 时, 其 IMF₁ 分量可较好地表现 TZMC 的变化趋势。总之, 对于高频分量 IMF₁ 而言, 可准确表征故障与正常状态的某些特征信息, 为下一步准确判据的构建奠定基础。

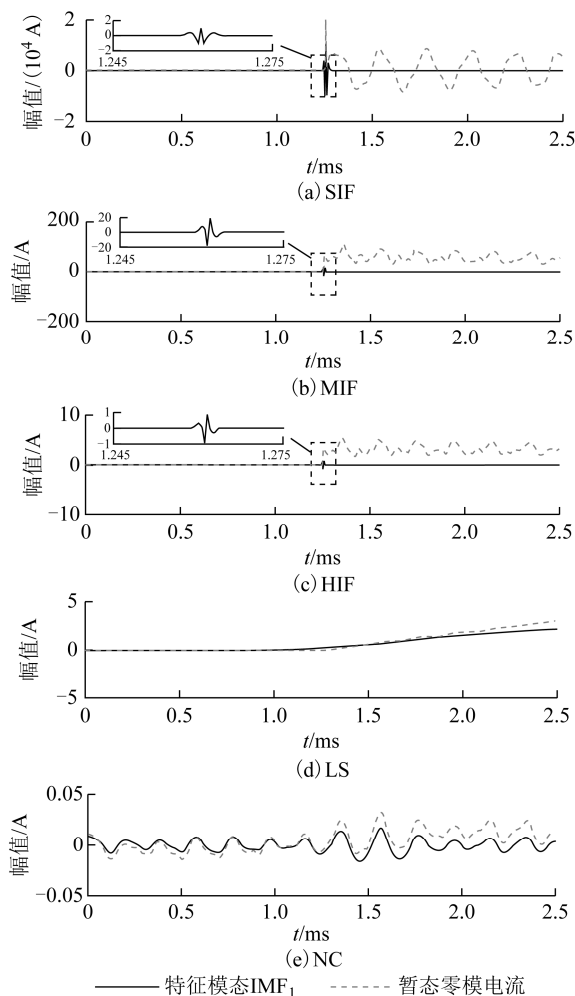


图 4 各工况下 TZMC 及其 IMF₁ 分量波形

Fig.4 TZMC in each condition and their IMF₁

3 特征 IMF 分量参数辨识方法

对 CEEMDAN 分解所得的 IMF₁ 分量采用 Prony 算法进行参数辨识,以准确辨识出 IMF₁ 中的特征频率分量及直流分量的参数值,进而构建区分判据。

Prony 算法假设模型是由一系列具有任意振幅、相位、频率和衰减因子的指数函数的组合^[20],也就是说,由一组衰减的正弦分量所组成,即

$$x(t) = \sum_{i=1}^q A_i e^{\alpha_i t} \cos(2\pi f_i t + \theta_i) \quad (10)$$

式中, A_i 为振幅; θ_i 为相位, rad; α_i 为衰减因子, $\alpha_i < 0$; f_i 为振荡频率, Hz。

设式(10)中分别有 q_1 个衰减的直流分量和 q_2 个衰减余弦分量,将其中的余弦用欧拉公式展开为

$$\cos(2\pi f_i t + \theta_i) = \frac{1}{2} \{ \exp[j(2\pi f_i t + \theta_i)] + \exp[-j(2\pi f_i t + \theta_i)] \} \quad (11)$$

令 $p = q_1 + q_2$, 则其离散时间的函数形式为

$$\hat{x}(n) = \sum_{m=1}^p b_m z_m^n \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (12)$$

作为测量数据 $x(0), \dots, x(N-1)$ 的模型。更一般地, b_m 和 z_m 假定是复数, 且

$$\begin{cases} b_m = A_m \exp(j\theta_m) \\ z_m = \exp[(\alpha_m + j2\pi f_m)\Delta t] \end{cases} \quad (13)$$

为使模拟信号向真实信号逼近, Prony 算法采用二次方误差最小原则, 即

$$\min \left[\varepsilon = \sum_{n=0}^{N-1} |x(n) - \hat{x}(n)|^2 \right] \quad (14)$$

由此, 采用 Prony 算法可求出特征频率分量以及直流分量的振幅、相位、衰减因子和频率。

4 高阻接地故障检测判据

4.1 启动判据

为与正常状态相区分, 采用计算 $i_0(t)$ 在奇异值点 n_q 附近 Δt 内的累积斜率 k , 并设定启动阈值 δ , 当 $k < \delta$ 时, 判定系统为正常运行状态; 反之, $k > \delta$ 时, 判定系统为非正常运行状态。由此, 还需构建区分判据, 进一步区分 SIF、HIF、LS 三种状态。

通过对 IMF₁ 分量进行处理进而求出奇异值点 n_q , 具体步骤如下:

1) 对 $i_0(t)$ 进行 CEEMDAN 分解, 获取 IMF₁。

2) 求取 IMF₁ 分量的极值点。

3) 计算相邻极大值点与极小值点的幅值差, 取绝对值, 并计算其间隔。

4) 对极值差绝对值最大以及极值间隔最小处进行定位。由于通常奇异性都是瞬间的, 因此, 奇异值点 n_q 处的极值间隔一般情况下都只有一个采样间隔, 因此, 取极值间隔最小处的极大值点的位置为奇异值点 n_q 的位置。

以上步骤 2~步骤 4 可简化为: 在 CEEMD 分解后, 直接对高频 IMF₁ 分量求一阶微分, 取其模值, 模值最大的点即是 $i_0(t)$ 的奇异值点 n_q , 具体计算为

$$M_max = \max |IMF_1(n) - IMF_1(n-1)| \quad (15)$$

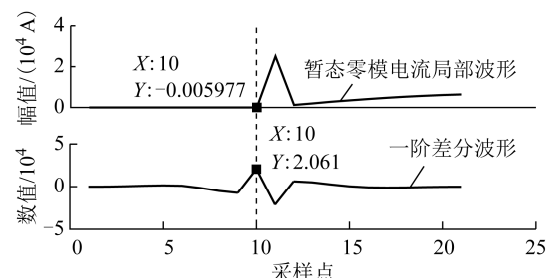
式中, n 为采样点。

计算 TZMC 在奇异值点 n_q 附近 Δt 内的累积斜率 k 为

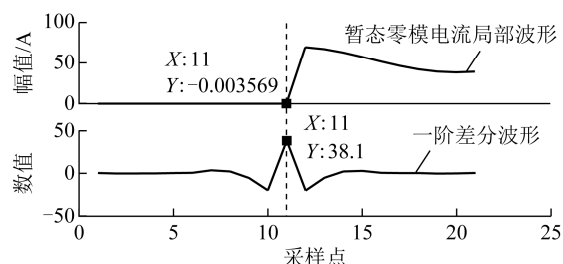
$$k = \left| \sum_{M=1}^{10} \frac{IMF_1(n_q + M) - IMF_1(n_q - M)}{2M - 1} \right| \quad (16)$$

式中, M 为截取的数据长度。

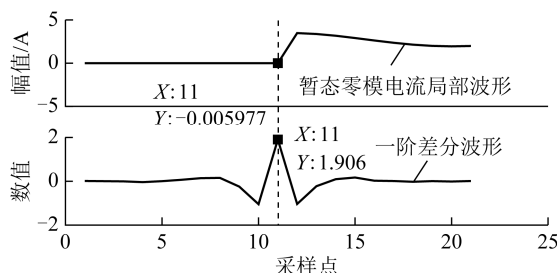
图 5 给出各种运行工况下时域 TZMC 及其一阶差分波形。



(a) 金属性接地故障 (1 mΩ)



(b) 中阻接地故障 (50 Ω)



(c) 高阻接地故障 (1 kΩ)

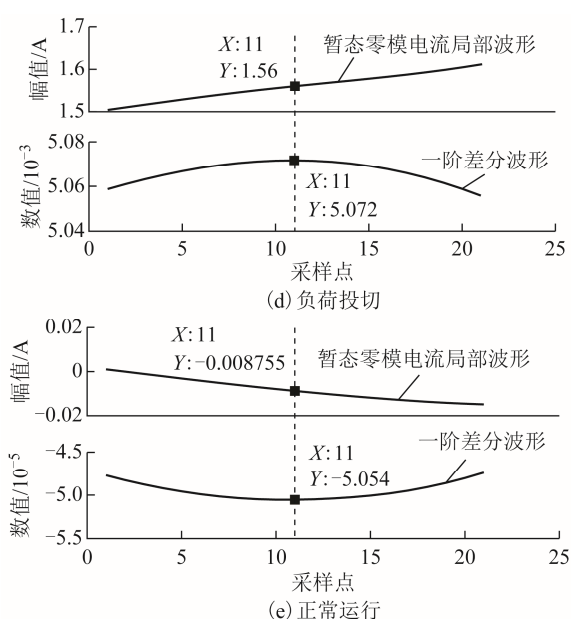


图 5 各运行工况下 TZMC 及其一阶差分

Fig.5 TZMCs and their first difference in each situation

如图 5 所示,当发生接地故障时,从图 5a、图 5b 和图 5c 可以看出,一阶差分波形的最大值时刻准确对应 TZMC 波形的奇异值时刻,此时,奇异值时刻附近波形变换最为敏感与剧烈,通过计算奇异值附近累计斜率和 k 的大小即可判定发生接地故障;当正常运行或负荷投切时,从图 5d、图 5e 可以看出,对于 TZMC 而言,图 5d、图 5e 均呈现单调递增或递减趋势,相比较图 5a~图 5c 的 TZMC 波形而言,其奇异值不好确定,但通过本文定义的 IMF₁ 分量可准确确定其最大值时刻,进而求得图 5d、5e TZMC 的奇异值时刻,从而计算出相应的累计斜率和 k 值。

进一步观察可得出,当图 5a~图 5c 发生接地故障时,随着接地电阻的增加, TZMC 波形的突变量变得相对平缓,且纵坐标数值增量放缓,反映在实际配电网中表现为接地阻值增大时, TZMC 数值进一步降低,其突变部分变得平缓;从图 5d、5e 可看出,当处于 NC 或 LS 时,其 TZMC 只表现为缓慢增大,而非急剧增大。

综上, NC、LS、接地故障 3 种工况的 TZMC 波形呈现不同的变化特性,基于这一考虑,本文通过计算 TZMC 奇异值点 n_q 附近的累计斜率和 k , 并通过比较 k 值的大小即可构建故障启动判据。

表 1 为各工况下,当 $n=21$ 时,累计斜率 k 的计算值。由表 1 可以看出,当发生接地故障时,随着接地电阻值的增大, k 的取值将逐步减小,反映在实

际 TZMC 波形中,原因在于当接地电阻值增大时,衰减了 n_q 附近的突变量,因此,奇异值附近的 k 值将会减小。

表 1 $n=21$ 时 k 值范围

Tab.1 The value range of k when n is equal to 21			
工况条件	接地电阻值/ Ω	负荷投切/MW	k 值
SIF	0.001	—	42 692.0
MIF	1	—	9 406.9
	10	—	1 258.9
	50	—	365.8
	100	—	131.7
HIF	200	—	75.7
	500	—	39.5
	1 000	—	13.3
LS	—	0.5	1.58
	—	1.0	2.96
	—	2.5	4.56
NC	—	—	0.03

而负荷投切时,当投入负荷功率增大时, k 值将会相应增大,原因在于,重负荷投切时会产生较大的 TZMC。借鉴表 1 数据并考虑图 1 直流配电网实际运行时的干扰因素与裕度,本文设定启动阈值 $\delta=0.3$ 。当 $k < \delta$ 时,判定配电网为正常运行状态;反之, $k > \delta$ 时,判定为非正常运行状态。

4.2 区分判据

将发生接地故障或负荷投切时, $1/4$ 工频周期内的 $i_0(t)$ 作为原始信号,通过计算 CFC 能量与 DC 能量的比值构造区分判据。

特征频率 i_T 及直流分量 i_B 的能量为

$$W_T = \sum_{T=1}^{n+1} i_T^2 \Delta t \quad (17)$$

$$W_B = \sum_{B=1}^{n+1} i_B^2 \Delta t \quad (18)$$

式中, W_T 、 W_B 分别为 i_T 与 i_B 的能量; n 为 $1/4$ 工频周期内的采样点数; Δt 为采样间隔。

构造 i_T 及 i_B 的能量比为

$$R_{\text{ration}} = \frac{W_T}{W_B} \quad (19)$$

分析可知, LS 投切时,虽然引起配电网中 TZMC 的突然增大,但其供电结构并未发生本质改变,因此,不会产生振荡分量,即不存在特征频率分量 i_T , 此时 TZMC 中仅有直流分量;反之,当发

生单极接地故障时，打破了配电网系统原本的平衡状态，因此，产生了特征频率分量 i_T 。

基于此，本文构建的区分判据 1 为：当检测 TZMC 中不存在 CFC，即 $W_T=0$ 时，此时计算 $R_{ratio}=0$ ，判定为负荷投切（实际应用中，当 $R_{ratio}<0.01$ 时，判定为 LS）；当 $R_{ratio}>1$ 时，判定发生 SIF；当 $0.01 \leq R_{ratio} < 1.00$ 时，判定发生 MIF 或 HIF。

为进一步区分 MIF 与 HIF，须对 $0.01 \leq R_{ratio} < 1.00$ 做进一步细化，并做如下定义：将大于 100Ω 及以上定义为高阻；将 $1 \sim 100 \Omega$ 定义为中阻。

基于此，针对图 1 直流配电网，经大量仿真实验，构建区分判据 2：设置阈值 ε ，当 $\varepsilon \leq R_{ratio} < 1.00$ 时，判为 MIF；反之，当 $0.01 \leq R_{ratio} < \varepsilon$ 时，判为 HIF。（经大量测试，针对图 1 直流配电网系统，本文取 $\varepsilon=0.5$ ）。

由此，构建的柔性直流配电网高阻接地故障检测流程如图 6 所示。

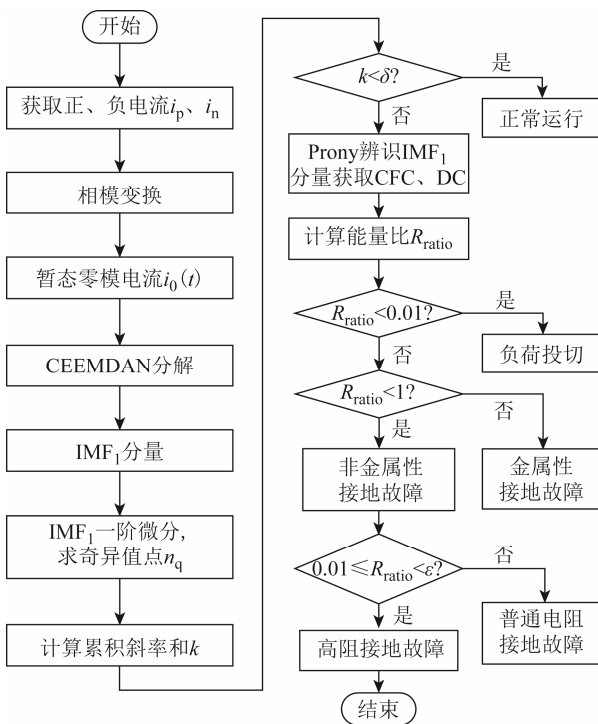


图 6 检测流程

Fig.6 Detection Procedure

5 仿真验证

在 Matlab 中搭建如图 1 的两端柔性直流配电系统^[21]，仿真参数见表 2。其中，存在两个 VSC 换流站，站 1 采用定有功控制，站 2 采用定直流电压控制；直流负荷用直流电阻代替。为测试本文方法的有效性，分别在几种工况下进行测试。

表 2 直流系统仿真参数

Tab.2 Simulation parameters for DC system

参 数	数 值
额定直流电压/kV	10
直流电容/mF	15
直流电抗/mH	40
线路长度/km	10

5.1 添加强噪声

为测试本文方法在强噪声环境的适应性，在 TZMC 中添加信噪比为 1 dB 的高斯白噪声，测试方法的有效性，计算所得数据见表 3。可以看出，即便在强噪声环境下，当发生 SIF 时，所计算 $R_{ratio}=44.0>1$ ，符合本文判据；同理，发生 MIF 时， $R_{ratio}=0.75$ ，则 $0.5<0.75<1$ ，判定发生 MIF；HIF 发生时， $R_{ratio}=0.18$ ，则 $0.01<0.18<0.5$ ，根据本文判据，判定为 HIF，判定准确；当 $R_{ratio}=0.0075$ 时，则 $0.0075<0.01$ ，依据本文判据，可知为 LS，判定准确。由此可见，本文检测方法具有较好的适应性。添加 1 dB 强噪声后的各工况的 TZMC 如图 7 所示，可以看出，在故障工况下，如图 7a、图 7b 所示，随着过渡电阻增大，TZMC 幅值进一步减小，此时噪声对其影响越大，但仍能较清晰地辨识出 TZMC 波形；相比较 NC，如图 7c、图 7d 所示，由于 LS 与 NC 时，零模电流数值较小，则此时噪声的影响越大。

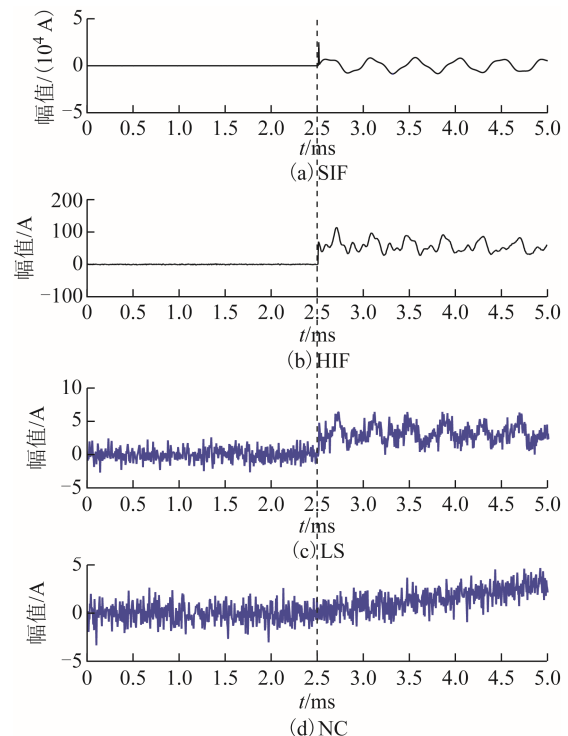


图 7 各工况下含噪 TZMC 波形

Fig.7 TZMC with noise in each situation

表 3 1 dB 噪声测试

Tab.3 Tests with 1dB noise

工况 条件	频率/ Hz	幅值/A	能量/ 10 ³	R_{ratio}	数值 比较	判定 结果
SIF (1 mΩ)	3 200	20 000	11 000	44.0	判据 1	SIF
	0.00	870	250		44.0>1	
MIF (50 Ω)	1 100	320	620	0.75	判据 2	MIF
	0.00	150	830		0.5<0.75<1	
HIF (1 kΩ)	1 100	15.1	0.51	0.18	判据 2	HIF
	0.00	7.0	2.8		0.01<0.18<0.5	
LS	2 100	0.15	0.009 2	0.007 5	判据 1	LS
	0.00	0.52	1.23		0.007 5<0.01	

5.2 不同故障位置

为测试在不同故障位置时本文判据的适应性,模拟在电缆线路 6 km 处分别发生 SIF、MIF、HIF、LS 等运行工况(表 3 故障位置为 2 km 处),计算数据见表 4。当发生 SIF 时,CFC 能量与 DC 能量之比 $R_{ratio}=59.0>1$;当 50 Ω 接地故障时, $R_{ratio}=0.93$,则 $0.5<0.93<1$,根据判据 2 可知,判定发生 MIF;由表 4 可以看出,当 1 kΩ 的 HIF 发生时, $R_{ratio}=0.29$,则 $0.01<0.29<0.5$,根据判据 2,可判定发生 HIF,与实际情况相符;当能量比 $R_{ratio}=0.000 9$ 时,则 $0.000 9<0.01$,判定为 LS,而并非故障,见表 4,判断正确。

表 4 6 km 处测试

Tab.4 Tests when faulty distance is 6 km away

工况 条件	频率/ Hz	幅值/A	能量/ 10 ³	R_{ratio}	数值比较	判定 结果
SIF (1 mΩ)	2 100	10 000	3 600	59.0	判据 1	SIF
	0.00	820	610		59.0>1	
MIF (50 Ω)	1 700	1 200	1 300	0.93	判据 2	MIF
	0.000	2 000	1 400		0.5<0.93<1	
HIF (1 kΩ)	3 000	3.10	0.32	0.29	判据 2	HIF
	0.00	8.60	1.1		0.01<0.29<0.5	
LS	5 100	0.02	0.002	0.000 9	判据 1	LS
	0.00	10.32	2.22		0.000 9<0.01	

5.3 短窗数据

数据窗长度直接关系到数据量的大小。数据窗越长,包含的数据量越大;反之,数据窗越短,包含的数据越少。为测试方法对数据窗长度的适应性,给出故障后 TZMC 波形在 1 ms 窗长下的测试结果,见表 5。对于 1 ms 短窗数据时,本文方法同样可准确判定出运行工况。进一步分析可知,数据

窗越短,本文判据的计算时间就越短,越有利于快速判定运行工况。

表 5 1 ms 数据窗测试

Tab.5 Tests in 1 ms data window

工况 条件	频率/ Hz	幅值/A	能量/ 10 ³	R_{ratio}	数值比较	判定 结果
SIF (1 mΩ)	3 500	55.0	4.8	7.00	判据 1	SIF
	0.00	49.0	0.69		7.0>1	
MIF (50 Ω)	1 900	4 500	5 040	0.76	判据 2	MIF
	0.00	9 200	6 600		0.5<0.76<1	
HIF (1 kΩ)	3 500	49.2	0.69	0.25	判据 2	HIF
	0.00	65.3	2.8		0.01<0.25<0.5	
LS	870	0.03	0.003 2	0.003 8	判据 1	LS
	0.00	0.29	0.84		0.003 8<0.01	

5.4 改变限流电感值

柔性直流配电网在实际应用时,常采用在供电线路首端串联限流电感 L_1 以限制发生故障时的短路电流水平。 L_1 值越大,对于故障电流的限制作用越大。反之, L_1 越小,对故障电流的限制作用越小。由于本文利用的是 TZMC 数据,因此, L_1 的存在,在一定程度上会影响故障零模电流波形,为考察该种影响,给出 $L_1=0.2$ H 下的计算数据,见表 6。由表 6 可知,当增大 L_1 至 0.2 H 时(表 3~表 5 为 0.04 H), R_{ratio} 值仍能准确区分 SIF、MIF、HIF、LS 等运行工况,判定正确。

表 6 限流电感 $L_1=0.2$ H 时测试

Tab.6 Tests when current-limiting inductance L_1 is 0.2 H

工况 条件	频率/ Hz	幅值/A	能量/ 10 ³	R_{ratio}	数值比较	判定 结果
SIF (1 mΩ)	3 500	91.2	9.8	8.17	判据 1	SIF
	0.00	6.40	1.2		8.17>1	
MIF (50 Ω)	1 500	430	652	0.67	判据 2	MIF
	0.00	950	980		0.5<0.67<1	
HIF (1 kΩ)	2 900	44.2	0.83	0.35	判据 2	HIF
	0.00	7.02	2.37		0.01<0.35<0.5	
LS	360	1.43	0.017	0.006 5	判据 1	LS
	0.00	9.12	2.6		0.006 5<0.01	

5.5 改变极间电容值

极间电容 C_1 值大小对于柔性直流配电网的电压、电流波形具有很强的影响,合适的 C_1 值对于稳定直流波形有直接作用。为考察 C_1 值大小对于本文方法的影响,给出 $C_1=3$ mF 时的测试数据,见表 7。

实际仿真中发现,当增大 C_1 为 3 mF 时,正、负电流更为平滑,纹波现象较少,直流电压、电流波形质量较好。由表 7 数据可知,本文方法不受极间电容数值的影响,通过比较 R_{ratio} 的数值大小可准确区分各种工况。

表 7 极间电容 $C=3\text{ mF}$ 测试

Tab.7 Test with 3 mF capacitance

工况 条件	频率/Hz	幅值/A	能量/ 10 ³	R_{ratio}	数值比较	判定 结果
SIF (1 mΩ)	2 300 0.00	4 400 1 200	600 49	12.2	判据 1 12.2>1	SIF
MIF (50 Ω)	1 800 0.00	740 110	3.65 5.90		判据 2 0.5<0.62<1	MIF
HIF (1 kΩ)	2 100 0.00	91.0 450	5.2 21.0	0.25	判据 2 0.01<0.25<0.5	HIF
LS	180 0.00	0.89 13.2	0.023 6 3.8		判据 1 0.006 2<0.01	LS

5.6 交流侧接地方式

如图 8 所示,在交流侧换流变压器处接地^[22-23],测试本文判据性能,具体测试结果见表 8。可以看出,当直流侧不接地,而交流侧接地时,本文方法在各工况下均能准确区分,具体为:发生 SIF 时, $R_{ratio}=58.6>1$,则判定为 HIF;发生 MIF 时, $R_{ratio}=0.85$,则有 $0.5<0.85<1$,依据区分判据,判定为 MIF;同理,发生 HIF 时, $R_{ratio}=0.29$,则有 $0.01<0.29<0.5$,依据判据,判定为 HIF;当发生 LS 时, $0.001\ 2<0.01$,判定准确。分析原因在于,虽然接地位置不同于直流侧接地,在交流侧接地时,由于换流变压器采用的 Δ/Yn 接线方式,因此,本文所采用的零模电流在流通时,并不能通过换流变压器,因此,对本文方法无影响。

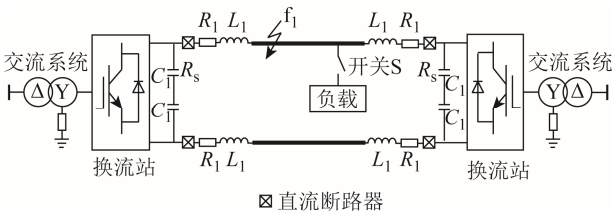


图 8 含 VSC 换流器交流侧变压器接地
Fig.8 AC side transformer grounding

5.7 MMC 换流站

以图 9 为例,构建伪双极 MMC 直流配电系统^[24-25],换流站采用半桥 MMC 拓扑,接地方式采用典型的直流侧经钳位电阻接地,主要参数见表 9,

调制方式采用 PWM 调制,直流线路采用电缆低频模型。

表 8 交流测接地时测试结果

Tab.8 Test results in AC grounding test

工况 条件	频率/Hz	幅值/A	能量/ 10 ³	R_{ratio}	数值 比较	判定 结果
SIF (1 mΩ)	1 850 0.00	9 900 850	34 000 580	58.6	判据 1 58.6>1	SIF
MIF (50 Ω)	1 750 0.00	1 250 2 200	1 400 1 650		判据 2 0.5<0.85<1	MIF
HIF (1 kΩ)	2 600 0.00	2.89 8.20	0.28 0.95	0.29	判据 2 0.01<0.29<0.5	HIF
LS	4 600 0.00	0.03 1.20	0.003 2.50		判据 1 0.001 2<0.01	LS

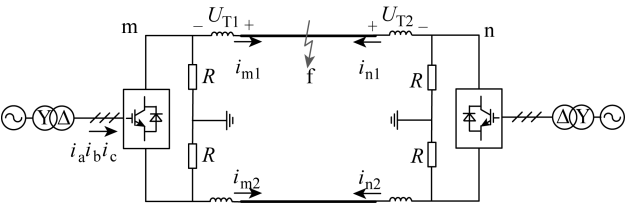


图 9 换流站为 MMC 时测试
Fig.9 Test when the converter station is MMC

表 9 含 MMC 直流配电系统参数

Tab.9 Parameters of MMC system

参 数	数 值
MMC 额定容量/(MV·A)	100
额定直流电压/kV	±25
直流钳位电阻/kΩ	1
线路长度/km	20
桥臂子模块数量	8
桥臂电抗值/mH	4
子模块电容值/mF	6
子模块投切周期/μs	100

图 10 为零模电流流路径,可以看出,故障后零模电压 U_0 产生的零模电流分别经由正、负极对地

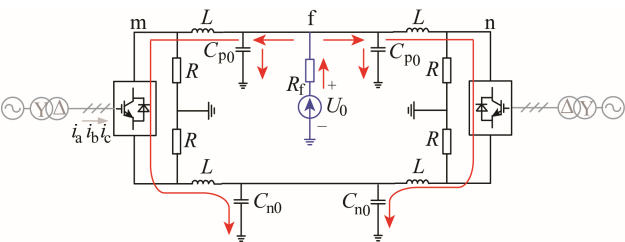


图 10 零模电流流路径
Fig.10 Zero mode current flow path

电容流入大地（嵌位电阻 $R=1\,000\,\Omega$ ），由于交流侧换流变压器为 Y/ Δ 接法，因此，零模电流并不能流入交流侧。

图 11 分别为 SIF、MIF、HIF、LS 时的零模电流波形，直观来看，发生 SIF、MIF、HIF 时的高频分量明显，且零模电流在 SIF、MIF 时，电流经过一段时间完成放电过程；而在 HIF 时，由于过渡电阻 R_f 数值过大，因此，在图 10 中，整个放电过程被阻滞，表现出图 11c 的波形特性，但仍存在较为丰富的高频分量；发生 LS 时，如图 11d 所示，零模电流中的高频分量含量相对较少。

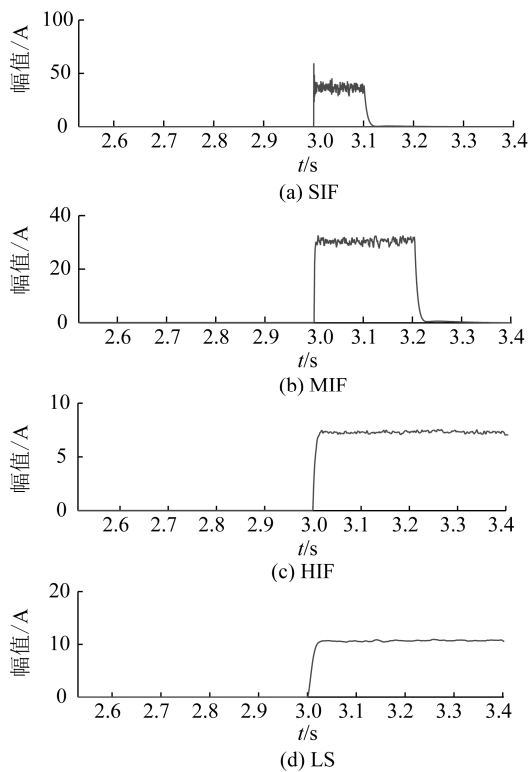


图 11 各工况零模电流波形

Fig.11 Zero mode current waveforms under various working conditions

鉴于以上零模电流的差异，采用本文方法进行测试，测试结果见表 10。从表 10 可知，本文方法不受换流站类型的影响，适应于 MMC 型换流站，分析原因在于，本文研究对象为直流配电线路的 HIF 检测问题，而换流站只是将交流转换成直流，其类型只会影响故障零模电流中特征频率的数值大小，但并不会改变零模电流特征频率与直流分量之间的规律，因此，采用本文方法，当换流站为 MMC 时，依然可以准确识别 SIF、MIF、HIF、LS 工况。

表 10 MMC 换流站时测试结果

Tab.10 MMC converter station test

工况 条件	频率/ Hz	幅值/ A	能量	R_{ratio}	数值 比较	判定 结果
SIF (1 m Ω)	1 550	20.5	425.0	2.82	判据 1 2.82>1	SIF
	0.00	12.0	150.6			
MIF (50 Ω)	1 200	5.26	23.5	0.69	判据 2 0.50<0.69<1	MIF
	0.00	8.56	34.1			
HIF (1 k Ω)	750	1.35	2.05	0.11	判据 2 0.01<0.11<0.5	HIF
	0.00	4.68	18.5			
LS	300	0.05	0.004	0.000 6	判据 1 0.000 6<0.01	LS
	0.00	8.25	6.82			

5.8 改进的 IEEE-13 节点测试系统

将 IEEE-13 节点测试系统进行改进，如图 12 所示，具体改进之处为：①将交流三相供电线路改为直流正、负极供电线路；②将交流两相供电线路改为直流正、负极供电线路；③将交流单相供电线路改为直流正极供电线路。具体的负荷参数见表 11，其中，负荷接于节点 646、634、611、675、671；在表 11 中，Y 与 D 分别代表星形与三角形联结方式，除此之外，PQ、Z、I 分别表示恒功率、恒阻抗、恒电流负荷。依据 IEEE 936—1987 标准，表 12 给出了各条馈线的不平衡度，可以看出，IEEE-13 节点系统为一严重不平衡系统，其中，最大不平衡度达到 201.1%，本文采用改进的 IEEE-13 节点配电网系统来测试方法的有效性。

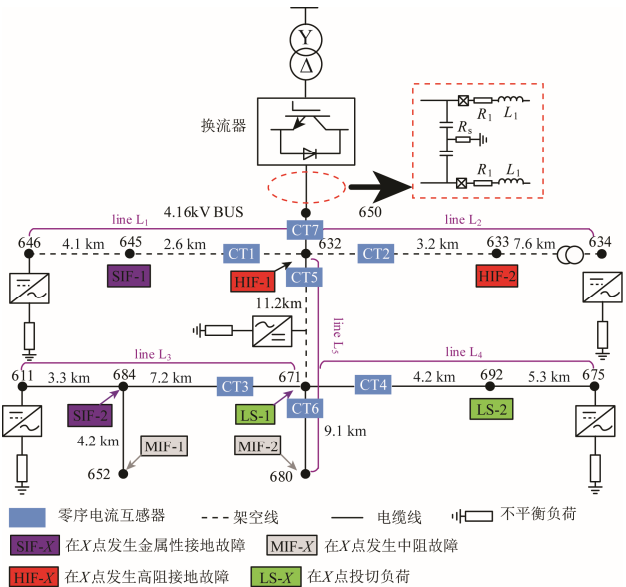


图 12 改进的 IEEE-13 节点直流配电网系统

Fig.12 Modified IEEE-13 node DC distribution network

表 11 IEEE-13 节点系统中负荷参数

Tab.11 Load parameters of IEEE-13 node system

节点	负荷 模型	A 相		B 相		C 相	
		有功/ kW	无功/ kvar	有功/ kW	无功/ kvar	有功/ kW	无功/ kvar
634	Y-PQ	160	110	120	90	120	90
646	Y-PQ	0	0	170	125	0	0
	D-Z	0	0	0	0	230	132
671	D-PQ	385	220	385	220	385	220
	Y-PQ	17	10	66	38	117	68
675	Y-PQ	485	190	68	60	290	212
	D-I	0	0	0	0	170	151
611	Y-I	0	0	0	0	170	80
	Y-Z	0	0	128	86	0	0

表 12 各条馈线不平衡度

Tab.12 the unbalanced level for each feeder

	馈线 L ₁	馈线 L ₂	馈线 L ₃	馈线 L ₄	馈线 L ₅
不平衡度(%)	201.1	23.4	150.5	109.4	32.6

在改进的 IEEE-13 节点系统中分别仿真 SIF、MIF、HIF 与 LS，具体情况如下：①SIF 故障位置：645、684；接地电阻：1 mΩ；②MIF 故障位置：680、652；接地电阻：50 Ω；③HIF 故障位置：633、632；接地电阻：1 kΩ；④LS 位置：692、671。

测量所得各 TZMC 波形如图 13 所示（限于篇幅，仅给出在节点 645、680、633、692 处分别发生 SIF、MIF、HIF、LS 等工况时 CT₁、CT₆、CT₂、CT₄ 测得的 TZMC）。

从图 13 可以看出，发生 SIF 时，节点 645 在故障时刻的 TZMC 突变明显，并伴随一定的频率波动；而在节点 680 处，当发生 MIF 时，TZMC 突变明显，并呈现出阶跃特征；当节点 633 处发生 HIF 时，可以看出，此时 TZMC 在故障时刻的突变并不明显，通过局部放大后可知，存在一定的突变，且波形中包含较为丰富的高频分量；而在节点 692 处进行 LS 投切时，TZMC 波形呈现逐步增大的趋势，但波形依然较为平滑，高频含量少；当处于 NC 状态时，可以看出，TZMC 中存在一定的纹波现象，且由于配电网系统的控制调节作用，实际的 TZMC 并非仅为一条理想的直线。总之，从图 13 可以看出，由于改进的 IEEE-13 节点系统为一短线路、重负载且负载多为不平衡负载，因此，当处于 NC 时，如图 13e 所示，便一直存在 TZMC。因此，同样在图 13a~图 13d 中，当为发生接地故障时，该配电网系统的 TZMC 数值并非为 0。

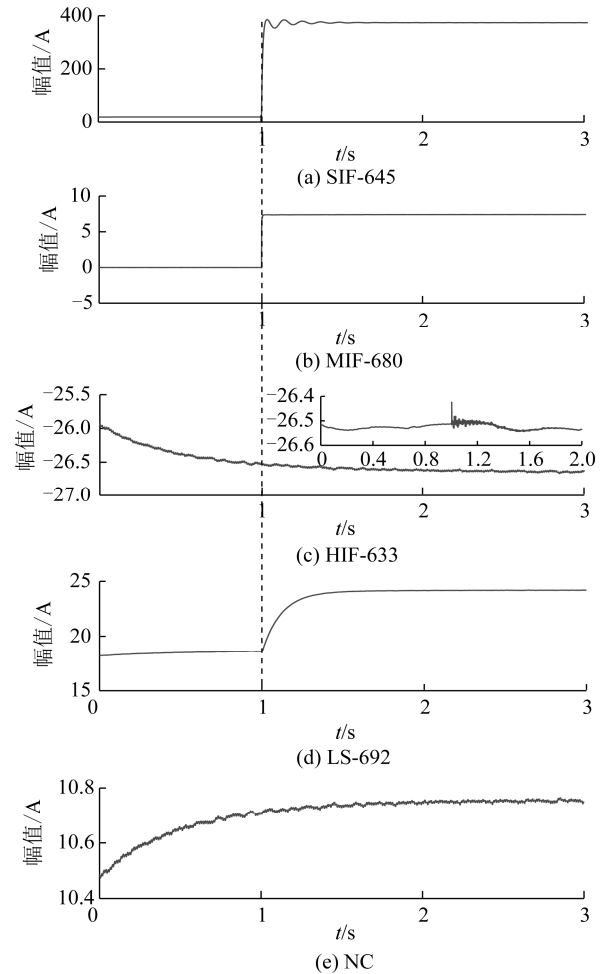


图 13 改进 IEEE-13 节点系统中各工况零模电流
Fig.13 TZMCs of modified IEEE-13 node flexible DC distribution network in each condition

经多次测试，对于 IEEE-13 接地系统，设定区分阈值 $\varepsilon=0.3$ ，依据本文判据，具体判定结果见表 13，可以看出本文判据在节点 645、680、633、692 处分别发生 SIF、MIF、HIF、LS 时，均能准确区分该系统运行状态。

表 13 改进的 IEEE-13 节点系统计算结果

Tab.13 Calculation results in IEEE-13 node system

工况 条件	频率/ Hz	幅值/A	能量	能量比 R_{ratio}	数值 比较	判定 结果
645 (SIF)	80.2	450	1 562	2.47	判据 1	SIF
	0.00	320	632		2.47>1	
680 (MIF)	5.6	2.52	10.23	0.55	判据 2	MIF
	0.00	7.85	18.5		0.3<0.55<0.1	
633 (HIF)	852	0.25	2.31	0.035	判据 2	HIF
	0.00	26.32	65.21		0.035<0.3<1	
692 (LS)	3.6	0.012	0.024	0.000 4	判据 1	LS
	0.00	25.2	62.4		0.000 4<0.01	

5.9 交流配电网 HIF 测试

为测试方法对交流配电网 HIF 检测的适应性, 获取中国北京昌平区 10 kV 配电网发生 HIF 录波波形, 如图 14 所示。图中电流分别来自电流互感器二次侧, 可以看出, 发生 HIF 前后, 相电流几乎无变化, 具体如图 14a~图 14c 所示; 图 14d 为零序电流, 可以看出, 在过零点附近发生了非线性畸变特性, 电弧电流出现了间歇性重燃、熄灭现象。图 15 为 C 相负荷投切时电流波形, 在负荷投切瞬间, 可以看到 C 相电流有轻微的增大现象, 图 14d 的零序电流在直观上与图 15d 有一定的区别。采用本文方法测试交流配电网 HIF、LS 的计算结果见表 14, 对于该交流配电网系统, 设定区分阈值 $\varepsilon=0.8$, 可以看出, 本文方法可在交流配电网中准确区分 HIF 与 LS 状态。

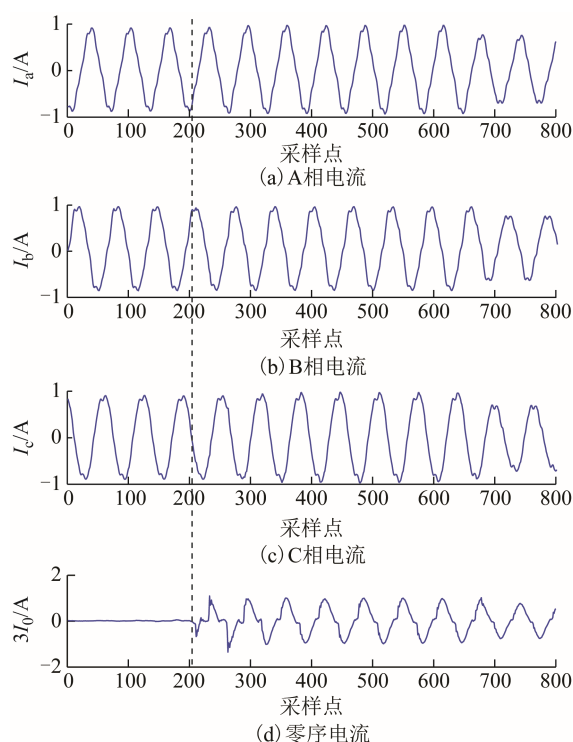


图 14 HIF 时故障电流波形

Fig.14 Fault current when HIF occurs

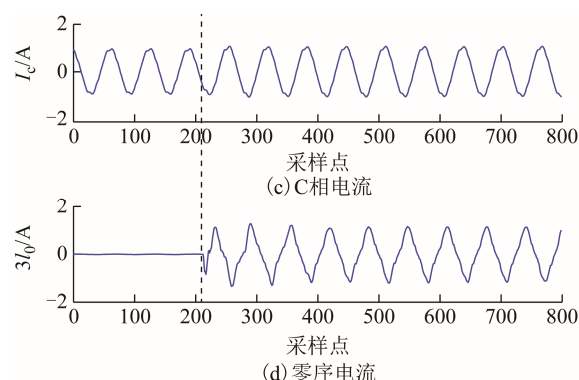
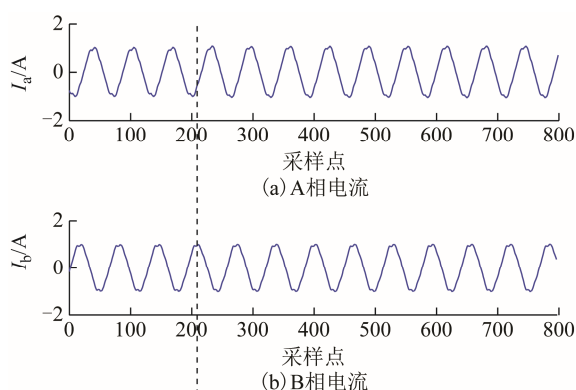


图 15 负荷投切电流波形

Fig.15 Current waveforms when LS occurs

表 14 交流配电网 HIF、LS 测试结果

Tab.14 HIF and LS tests from AC distribution network

工况	频率/ Hz	幅值/ A	能量	R_{ratio}	数值 比较	判定 结果
HIF	0.49	0.82	2.30	0.58	Criterion 2	HIF
	0.00	1.70	3.90		$0.58 < 0.8 < 1$	
LS	0.88	0.013	0.035	0.007	Criterion 1	LS
	0.00	1.85	4.82		$0.007 < 0.01$	

6 结论

通过研究, 得出以下结论:

1) 采用 CEEMDAN 提取 IMF_1 分量, 可准确地反映故障状态与正常扰动中的细微变化, 适合零模电流的特征频率提取, 能适应强噪声环境下的准确特征提取, 特征提取过程具有自适应性, 应用方便。

2) 对 IMF_1 分量进行一阶差分取模值, 模值最大点确定为奇异值点, 进而在奇异值附近计算累积斜率和作为启动判据, 灵敏度高, 能敏锐判定出配电网系统是否处于非正常运行状态。

3) 采用 Prony 算法辨识出 IMF_1 分量中的 CFC 与 DC 分量参数, 进而构造能量比, 通过比较能量比数值的大小区分 HIF、SIF、MIF 运行工况, 工程应用较为简单。

参考文献

- [1] 耿建昭, 王宾, 董新洲, 等. 中性点有效接地配电网高阻接地故障特征分析及检测[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(16): 85-91.
Geng Jianzhao, Wang Bin, Dong Xinzhou, et al. Analysis and detection of high impedance grounding fault in neutral point effectively grounding distribution network[J]. Automation of Electric Power

- Systems, 2013, 37(16): 85-91.
- [2] Macedo J R, Resende J W, Bissochi C A, et al. Proposition of an interharmonic-based methodology for high-impedance fault detection in distribution systems[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(16): 2593-2601.
- [3] Li Yajie, Meng Xiaoli, Song Xiaohui. Application of signal processing and analysis in detecting single line-to-ground (SLG) fault location in high-impedance grounded distribution network[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(2): 382-389.
- [4] 王宾, 倪江, 王海港, 等. 输电线路弧光高阻接地故障单端测距分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(5): 1333-1341.
- Wang Bin, Ni Jiang, Wang Haigang, et al. Single end fault location for high impedance are grounding fault in transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1333-1341.
- [5] Sarlak M, Shahrtash S M. High impedance fault detection using combination of multi-layer perceptron neural networks based on multi-resolution morphological gradient features of current waveform[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2011, 5(5): 588-595.
- [6] Gautam S, Brahma S M. Detection of high impedance fault in power distribution systems using mathematical morphology[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1226-1234.
- [7] Kavaskar S, Nalin K. Combined mathematical morphology and data mining based high impedance fault detection[J]. Energy Procedia, 2017, 117(1): 417-423.
- [8] Namdari F, Salehi M. High-speed protection scheme based on initial current traveling wave for transmission lines employing mathematical morphology[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1): 246-253.
- [9] Moravej J, Zahra M, Seyed H. DT-CWT based event feature extraction for high impedance faults detection in distribution system[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2015, 25(12): 3288-3303.
- [10] Costa F B, Souza B A, Brito N S, et al. Real-time detection of transients induced by high-impedance faults based on the boundary wavelet transform[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(6): 5312-5323.
- [11] Chen J, Phung T, Blackburn T, et al. Detection of high impedance faults using current transformers for sensing and identification based on features extracted using wavelet transform[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(12): 2990-2998.
- [12] 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.
- [13] Pan Qi, Slavisa J, Lezama J, et al. Discrete wavelet transform optimal parameters estimation for arc fault detection in low-voltage residential power networks [J]. Electric Power Systems Research, 2017, 143(1): 130-139.
- [14] Santos W C, Lopes F V, Brito N S, et al. High impedance fault identification on distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1): 23-32.
- [15] Kar S, Samantaray S R. Time-frequency transform-based differential scheme for microgrid protection[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2014, 8(2): 310-320.
- [16] Routray P, Mishra M, Rout P K. High impedance fault detection in radial distribution system using S-Transform and neural network[C]//2015 IEEE Power, Communication and Information Technology Conference, Bhubaneswar, Bhubaneswar, India, 2015, 545-551.
- [17] 王晓卫, 田书, 李玉东, 等. 基于 S 变换特征频率序列的小电流接地系统故障区段定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 109-115.
- Wang Xiaowei, Tian Shu, Li Yudong, et al. A novel fault section location method for small current neutral grounding system based on characteristic frequency sequence of S-transform[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 109-115.
- [18] 李斌, 何佳伟, 李晔, 等. 基于边界特性的多端柔性直流配电系统单端量保护方案[J]. 中国电机工

- 程学报, 2016, 36(21): 5741-5749, 6016.
- Li Bin, He Jiawei, Li Ye, et al. Single-ended protection scheme based on boundary characteristic for the multi-terminal VSC-based DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5741-5749, 6016.
- [19] Torres M, Colominas M, Schlotthauer G, et al. A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise[C]//Proceeding of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Prague, Czechia, 2011: 4144-4147.
- [20] Chaari O, Bastard P, Meunier M. Prony's method: an efficient tool for the analysis of earth fault currents in Petersen coil protected networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(3): 1234-1241.
- [21] 戴志辉, 葛红波, 严思齐, 等. 柔性直流配电网故障分析[J]. 电工技术学报, 2018, 33(8): 1863-1874.
- Dai Zhihui, Ge Hongbo, Yan Siqi, et al. Fault analysis of flexible DC distribution system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(8): 1863-1874.
- [22] 贺隍, 李勇, 曹一家, 等. 考虑分布式储能参与的直流配电网电压柔性控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 101-110.
- He Li, Li Yong, Cao Yijia, et al. Flexible voltage control strategy of DC distribution network considering distributed energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 101-110.
- [23] 王帅, 毕天姝, 贾科. 基于主动脉冲的 MMC-HVDC 单极接地故障测距[J]. 电工技术学报, 2017, 32(1): 12-19.
- Wang Shuai, Bi Tianshu, Jia Ke. Single terminal fault location for MMC-HVDC transmission line using active pulse[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(1): 12-19.
- [24] 张希鹏, 邵能灵, 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.
- [25] 刘子文, 苗世洪, 范志华, 等. 不平衡电网电压下柔性直流输电系统功率滑模补偿策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(14): 3296-3305.
- Liu Ziwen, Miao Shihong, Fan Zhihua, et al. Power sliding mode compensation strategy of VSC-HVDC under unbalanced grid voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(14): 3296-3305.

作者简介

王晓卫 男, 1983 年生, 博士研究生, 讲师, 研究方向为配电网故障选线与定位、高阻故障检测、电力工程信号处理。

E-mail: proceedings@126.com (通信作者)

高杰 男, 1993 年生, 硕士, 工程师, 研究方向为配电网继电保护。

E-mail: iamgaojie1993@163.com

(编辑 赫蕾)