

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201201

## 基于高频谐振识别的光伏直流汇集支路故障定位

李春<sup>1</sup>, 赵玉勇<sup>2</sup>, 吴方舟<sup>2</sup>, 贾科<sup>3</sup>, 施志明<sup>3</sup>, 汤化国<sup>4</sup>

(1. 国网浙江省电力有限公司嘉兴供电公司, 浙江 嘉兴 314000; 2. 国网浙江省电力有限公司海宁供电公司, 浙江 海宁 314400; 3. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206; 4. 海宁金能实业有限公司, 浙江 海宁 314400)

**摘要:** 光伏柔性直流汇集支路发生直流故障时, 呈现快速变化的暂态过程, 传统基于固定特征频率阻抗量测的故障定位方法难以适用。因此, 亟待研究快速可靠的故障定位方法, 实现光伏直流汇集并网系统故障快速恢复。提出一种基于高频谐振识别的双极短路故障定位方法。利用直流故障极间电压的阶跃特征和直流变压器(DC transformer, DCT)出口并联电容与限流电抗器构成的串联谐振, 得出高频谐振电流与故障距离的关系。通过连续小波变换(Continuous Wavelet Transform, CWT)提取故障谐振电流, 计算出故障距离, 最终完成故障定位。与传统故障定位方法相比, 该方法无需额外高频注入源, 不受换流器状态和控制系统影响。PSCAD 仿真结果表明所提方法只需要故障前后 2.5 ms 的故障数据就可以进行可靠的故障测距, 所需数据窗较短, 满足光伏直流汇集系统精确定位故障与快速恢复运行的要求, 并且具有较高的耐受过渡电阻、噪声和分布电容能力。该方法为现有直流系统保护设计提供新的可选方法。

**关键词:** 光伏直流汇集系统; 高频谐振; 谐振电流; 小波变换; 故障定位

### Fault location for photovoltaic DC collecting branch based on high frequency resonance identification

LI Chun<sup>1</sup>, ZHAO Yuyong<sup>2</sup>, WU Fangzhou<sup>2</sup>, JIA Ke<sup>3</sup>, SHI Zhiming<sup>3</sup>, TANG Huaguo<sup>4</sup>

(1. Jiaxing Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Jiaxing 314000, China; 2. Haining Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Haining 314400, China; 3. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 4. Haining Jinneng Industrial Co., Ltd., Haining 314400, China)

**Abstract:** When a DC fault occurs in a flexible photovoltaic DC collection branch, the transient process is rapidly changing. Thus it is difficult to apply traditional fault location methods based on fixed characteristic frequency impedance measurement. Therefore, it is urgent to study fast and reliable fault location methods to quickly achieve photovoltaic DC collection system recovery. This paper proposes a bipolar short-circuit fault location method based on high-frequency resonance identification. It uses the step characteristics of the DC fault pole-to-pole voltage and the series resonance of a DC Transformer (DCT) outlet parallel capacitor and a current-limiting reactor. The relationship between the resonance current and the fault distance is extracted by Continuous Wavelet Transform (CWT), the fault distance is calculated, and the fault location is finally completed. Compared with the traditional fault location method, this method does not require additional high-frequency injection sources and is not affected by the state of the converter and the control system. PSCAD simulation results show that the proposed method only needs 2.5 ms of fault data before and after the fault to perform reliable fault ranging. The required data window is short, which meets the requirements of photovoltaic DC assembly to accurately locate faults and quickly resume operation, and the method is capable of withstanding transient resistance, noise, and distributed capacitance. This method provides a new alternative to existing DC system protection designs.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China "Research on Fault Characteristics and Protection of Hybrid AC/DC Distribution Network" (No. 2019-LHKJ-017).

**Key words:** photovoltaic DC pooling system; high-frequency resonance; resonant current; wavelet transform; fault location

## 0 引言

光伏通过柔性直流升压、汇集送出并网, 减少

了无功装置使用和功率传输变换环节, 提高了新能源利用率, 解决了传统光伏交流并网电能质量差和供电率低等问题<sup>[1-2]</sup>。直流汇集支路发生双极故障时, 由于多光伏电站馈入使得故障电流激增, 受光伏电站自身控制策略和换流器状态影响, 故障特征持续时间短<sup>[3-5]</sup>, 给故障定位带来极大挑战。实现快

基金项目: 国家电网公司科技项目资助“交直流混合配电网的故障特性与保护研究”(2019-LHKJ-017)

速可靠的故障定位, 对光伏电站加快故障恢复与高效并网发电具有重要的意义。

现有的适用于直流输电系统的线路故障定位方法<sup>[6-8]</sup>主要有行波法、注入法和故障分析法。

行波法主要通过计算故障行波从故障处传播到量测点的时间来进行故障定位, 在直流配电系统中, 由于线路较短, 且换流器出口加装限流电抗器等边界元件<sup>[9]</sup>, 使得行波法存在波头识别及行波到达时刻标定的问题。针对行波波头识别问题, 国内外学者提出小波变换法<sup>[10-11]</sup>、数学形态学<sup>[12]</sup>和希尔伯特-黄变换法<sup>[13-14]</sup>等方法用于行波波头检测, 但在含噪声和高过渡电阻的情况下可能检测不到波头。此外, 直流配电系统中行波法采样频率过高, 难以满足。为克服行波法以上缺点, 文献[15]提出一种利用波形相似度的直流输电线路故障定位方法, 但其需要的数据窗长为 10 ms, 难以满足光伏直流汇集支路快速定位故障的要求。由以上分析可知, 行波法用于柔性直流配电网中, 由于系统分支多, 线路短, 存在波头识别困难、采样率高, 所需故障窗较长等问题, 且耐受过渡电阻和抗噪能力有限。

注入法通过装设额外设备向故障线路注入特征信号, 基于主动注入检测的故障定位, 文献[16]在故障线路失电后, 投入 LC 装置并与故障线路构成一阶振荡电路, 进而利用振荡频率、衰减系数与故障距离的关系来定位故障; 文献[17]通过注入特征三角波, 进而量测系统高频电抗的方法来进行故障定位; 注入法由于在故障后注入特征信号, 具有一定的抗噪声和耐过渡电阻能力, 但需要额外地注入设备, 加大了系统故障控制难度。

故障分析法利用故障电气量与线路参数之间的拓扑约束实现故障定位, 原理简单。文献[18]利用 Prony 算法拟合出的暂态电压振荡特征参数计算出故障距离, 然而存在一定的测量死区; 文献[19]利用双端电流突变量比值与故障距离的关系进行故障计算, 但难以消除电压微分项带来的误差。

现有的直流输电系统中的故障定位方法, 大部分受制于直流故障特征持续时间、系统控制策略、线路长度与换流器状态, 且难以满足光伏直流汇集系统故障后快速恢复供电的要求。为解决上述问题, 本文在分析高频故障分量回路的基础上, 利用系统自身频率特性, 提出基于高频谐振特征识别的故障定位方法, 该方法无需额外高频注入源, 不受换流器状态影响, 且由于该方法所需故障数据窗较短, 受控制系统影响也较小, 故障隔离与故障测距能够同时进行, 可快速恢复光伏汇集线路输电。由于直流线路双极短路后故障电压呈阶跃特征, 具有全频

域分量, 故可满足并联电容与限流电抗器构成串联谐振的需求。

## 1 光伏直流升压汇集系统拓扑结构

本文以图 1 所示云南大理在建的光伏直流升压汇集接入电网的结构作为研究对象, 光伏发电单元通过 DCT 就地升压后经汇集支路送至  $\pm 30$  kV 汇流母线, 就地送至并网模块化多电平换流器 (Modular Multilevel Converter, MMC) 接入 220 kV 电网。为提高光伏电站输出电压等级, 其中三个小规模发电单元 PV1a~PV1c 的 DCT 采用 IPOS(input-parallel output-series) 结构。考虑到直流线路发生双极短路故障后, 全控电力电子器件通流能力较弱, 为限制故障电流上升速度, 减少对电力电子装置的损坏, 在 DCT 和 MMC 出口均加装限流电抗器。

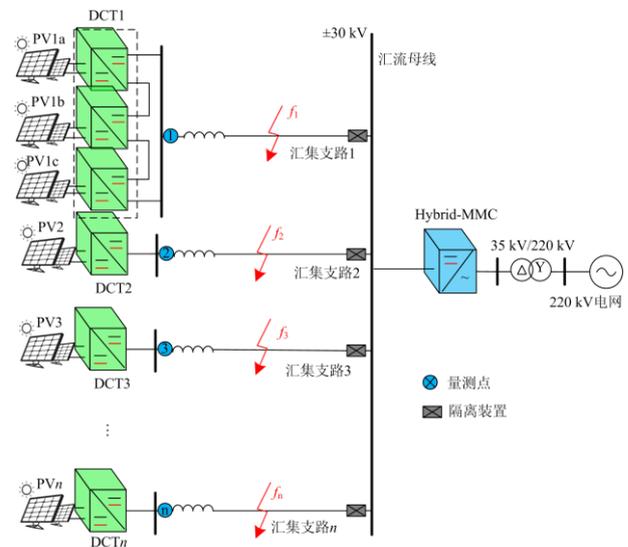


图 1 光伏直流升压汇集系统拓扑

Fig. 1 Topological schematic diagram of photovoltaic

DC boost pooling system

该系统所采用的 DCT 与 MMC 内部拓扑结构如图 2、图 3 所示, 其中 DCT 采用隔离升压全桥变换结构, 考虑到光伏发电单元单向传递功率与经济性要求, 高压侧用全桥不控器件。主拓扑由 BOOST 电路、全桥逆变器、高频隔离变压器及全桥整流电路构成。当直流线路发生故障后, 可通过闭锁全桥逆变器的全控器件, 阻断光伏发电单元向故障点放电; MMC 同样采用的是具有故障隔离能力的全桥混联结构, 直流故障发生后, 故障电流迅速上升使换流器闭锁, 半桥子模块被旁路, 全桥子模块阻断故障电流通路。因此, 该系统的故障电流可由换流装置切断, 系统配有快速开关(小电流下开断),

根据故障定位信息隔离故障,量测点设置在各 DCT 出口处。

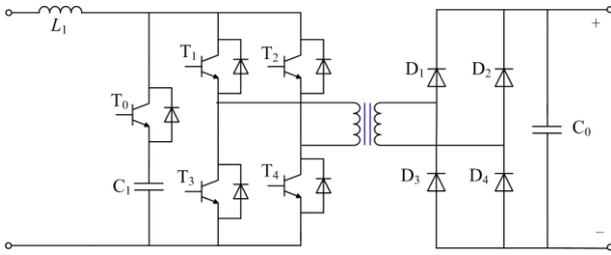


图 2 DCT 拓扑

Fig. 2 Topological schematic diagram of DCT

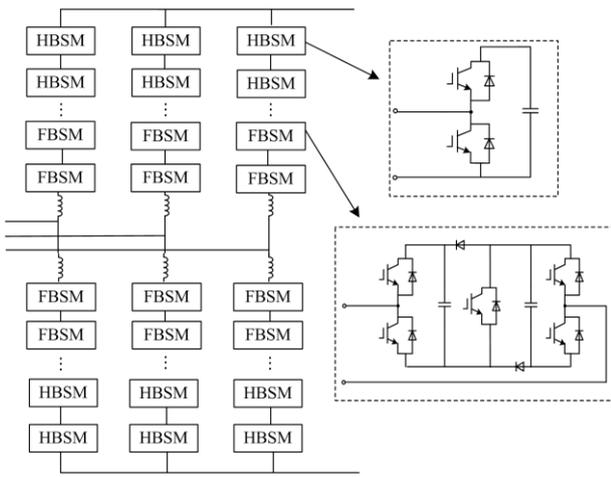


图 3 MMC 拓扑

Fig. 3 Topological schematic diagram of MMC

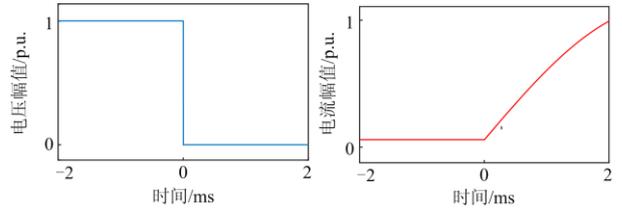
## 2 基于高频谐振识别的故障定位机理

### 2.1 汇集支路双极短路故障高频分量回路及故障附加等值网络

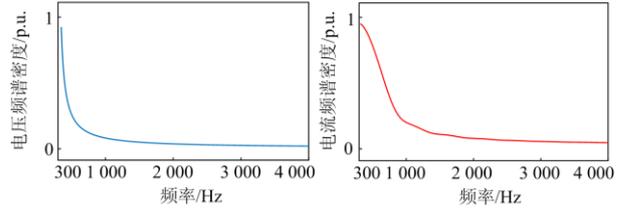
以双极短路故障发生在汇集支路 1 为例分析系统高频故障分量回路,直流故障发生后,在换流器闭锁之前,故障电流激增,故障电压迅速下降到较低值,短窗内故障电压和电流都呈阶跃特征,其时频仿真图如图 4 所示。

由图 4(b)可知,故障电流和电压含全频域信息,且在高频段频谱密度基本保持不变,而故障前直流电压和电流幅值近似恒定,即为零频信号,因此直流电流中高频分量仅在故障后存在,即为故障高频分量<sup>[20]</sup>,可认为由故障点处附加高频电压源产生,高频故障分量回路及故障附加等值网络如图 5、图 6 所示。

从图 5 可以看出,由于故障附加电压源为正向阶跃信号,故障分量无法通过 DCT 中二极管组成的 H 桥,故无需考虑光伏发电单元作用。在 MMC 中,



(a) 故障电压、电流理论仿真图



(b) 故障电压、电流频域信息

图 4 故障电压、电流时频图

Fig. 4 Time-frequency diagram of fault voltage and current

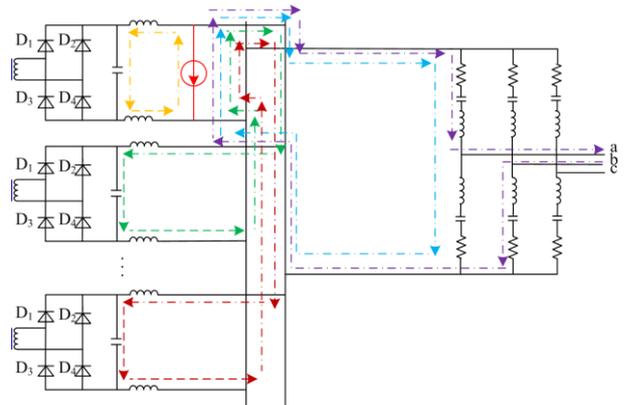


图 5 高频故障分量回路

Fig. 5 High-frequency fault component circuit

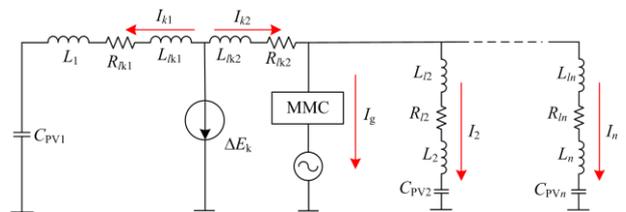


图 6 故障附加等值网络

Fig. 6 Fault additional equivalence network

故障分量回路由单相回路与相间回路组成,图中以 a 相回路和 ab 相间回路为例。图 6 中,  $L_{k1}$ 、 $L_{k2}$ 、 $R_{k1}$ 、 $R_{k2}$  为故障汇集支路 1 电感与电阻,  $L_{ln}$ 、 $R_{ln}$  为非故障汇集支路的电感和电阻,  $C_{pVn}$ 、 $L_n$  为 DCT 等效出口并联电容和限流电抗器,  $I_n$  为流过汇集支路的故障分量电流,  $I_g$  为流过 MMC 支路的故障分量电流,  $\Delta E_k$  为故障附加电压源,即  $\Delta E_k = A\varepsilon(t - t_0)$ , 式中,  $A$  为故障前故障点极间电压幅值,  $t_0$  为故障发

生时刻。

## 2.2 基于高频谐振识别的故障定位机理

根据图 6 故障附加等值网络与基尔霍夫电压定律, 可列出频域故障回路方程。

$$\dot{i}_{k1}(L_1 j\omega + \frac{1}{j\omega C_{PV1}}) + R_{k1}\dot{i}_{k1} + L_{k1}j\omega\dot{i}_{k1} = \Delta E(\omega) \quad (1)$$

$$\dot{i}_2(L_2 j\omega + \frac{1}{j\omega C_{PV2}}) + R_{l2}\dot{i}_2 + L_{l2}j\omega\dot{i}_2 + \quad (2)$$

$$R_{k2}\dot{i}_{k2} + L_{k2}j\omega\dot{i}_{k2} = \Delta E(\omega)$$

又可通过设计限流电抗器值使得 DCT 的出口谐振频率均为  $f_{or}$ , 且规模小的光伏发电单元一般采用多并联汇集结构, 使得其出口并联等值电容较小,  $f_{or}$  一般在千赫兹左右; 相关研究表明为了避免换流器内部谐振, 环流过大会损坏装置, MMC 自身谐振频率在 50 Hz 左右<sup>[21]</sup>, 故在谐振频率对应的故障电压源作用时, MMC 呈高阻抗, 送出支路流过的谐振频率分量电流较小, 可忽略不计, 即

$$\dot{i}_g^{\omega_r} = 0, \dot{i}_{k2}^{\omega_r} = n\dot{i}_2^{\omega_r} \quad (3)$$

式中,  $n = \Sigma l/l_2$ ,  $\Sigma l$  为非故障汇集支路总长,  $l_2$  为汇集支路 2 长度。前文提及附加故障源为阶跃信号, 其傅里叶变换含全频域信息, 且数千赫兹频段范围内信号的强度和能量密度较高, 频率特征稳定, 因此利用 DCT 自身出口谐振频率对应的故障分量进行故障定位是合理的。

综上所述, 式(1)、式(2)可化简为

$$R_{k1}\dot{i}_{k1}^{\omega_r} + L_{k1}j\omega_r\dot{i}_{k1}^{\omega_r} = \Delta E(\omega_r) \quad (4)$$

$$R_{l2}\dot{i}_2^{\omega_r} + L_{l2}j\omega_r\dot{i}_2^{\omega_r} + nR_{k2}\dot{i}_2^{\omega_r} + nL_{k2}j\omega_r\dot{i}_2^{\omega_r} = \Delta E(\omega_r) \quad (5)$$

由上式可以看出, 在谐振电流下, 频率回路方程仅含线路阻抗, 这对故障定位是十分有利的。

整理得

$$R_{k1}\dot{i}_{k1}^{\omega_r} + L_{k1}j\omega_r\dot{i}_{k1}^{\omega_r} = R_{l2}\dot{i}_2^{\omega_r} + L_{l2}j\omega_r\dot{i}_2^{\omega_r} + nR_{k2}\dot{i}_2^{\omega_r} + nL_{k2}j\omega_r\dot{i}_2^{\omega_r} \quad (6)$$

$$\frac{\dot{i}_{k1}^{\omega_r}}{\dot{i}_2^{\omega_r}} = \frac{R_{l2} + j\omega_r L_{l2} + nR_{k2} + nj\omega_r L_{k2}}{R_{k1} + j\omega_r L_{k1}} = \frac{l_2 + n(l_1 - l_k)}{l_k} \quad (7)$$

$$l_k = (l_2 + nl_1)/(K + n) \quad (8)$$

式中:  $K = I_{k1}^{\omega_r}/I_2^{\omega_r}$ ,  $I_{k1}^{\omega_r}$ 、 $I_2^{\omega_r}$  分别为量测点 1 和 2 量测的故障电流中的谐振电流分量;  $l_1$ 、 $l_2$  分别为汇集支路 1 和 2 的长度, 测距前已知;  $l_k$  为故障点距离量测点的线路长度, 即故障位置。

推广到任意汇集支路  $i$  发生双极短路故障时, 考虑到方便数据通信, 可选择故障支路与相邻支路

$i+1$  构成故障定位方程, 即

$$l_k = (l_{i+1} + nl_i)/(K + n) \quad (9)$$

式中,  $K = I_i^{\omega_r}/I_{i+1}^{\omega_r}$ , 式(9)表明只需量测并提取出故障支路与相邻支路 DCT 出口故障谐振电流, 求出比值  $K$  就可以得到故障距离  $l_k$ 。

综合以上理论分析, 由于直流侧 DCT 的二极管反向阻断与交流侧 MMC 的高频阻抗特性, 使得换流器支路故障分量较少, 故本文提出的故障定位方法受换流器状态影响较小, 理论上成立。

考虑到 FFT 无法刻画时间域上信号的局部特征, 在处理非平稳信号时具有一定的局限性; CWT 具有“自动变焦”的特性<sup>[22]</sup>, 在高频段时域分辨率变好, 能够对暂态信号进行较为精确的局部描述, 且具有一定的抗噪能力。因此本文采用 CWT 算法进行故障暂态信息的提取, 使用时为了使频域提取结果更加精确, 避免小波变换存在的边界效应带来的误差<sup>[23-25]</sup>, 以故障时刻为 midpoint, 取其前后对称的暂态信息加 Blackman 窗, 并设置合适的中心频率和带宽频率。

## 3 基于高频谐振识别的故障定位方案

由第 2 节对基于高频谐振识别的故障定位机理的推导可知, 该方法只需要读取故障后短时窗内的故障电流数据, 通过 CWT 提取谐振电流并计算出谐振电流比值就可完成故障定位, 实现流程如图 7 所示。

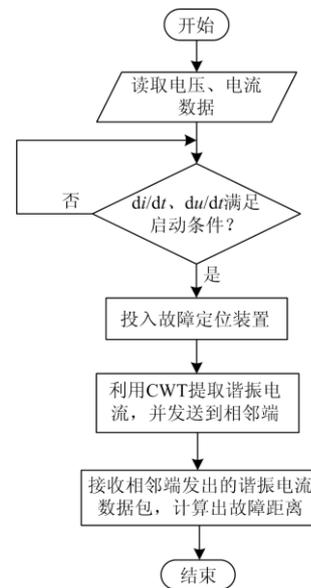


图 7 故障定位流程图

Fig. 7 Flow chart of fault location

故障定位的具体实现步骤如下：配置  $di/dt$ 、 $du/dt$  作为所提方法的启动判据；直流故障发生后，启动判据得到满足，投入故障测距装置；读取故障前后短窗内的 DCT 出口量测的故障电流数据，通过 CWT 提取谐振电流；向相邻端发送谐振电流数据包，相邻端接收到电流数据后，计算得出故障位置。

考虑到量测误差与小波提取误差，可提取谐振频率  $\pm 20$  Hz 范围内(谐振带)的故障电流，求出多个潜在故障距离后取均方根，以减小误差。

$$l_k = \sqrt{\sum_{j=1}^m \frac{nl_j + l_{j+1}}{I_1^{oj} / I_2^{oj} + m}}, m = \frac{40}{\nu} \quad (10)$$

式中， $\nu$  为小波提取步长。

受输电线路长度影响，故障点两侧高频分量衰减程度不同<sup>[25]</sup>，DCT 出口双极短路测距误差可能较大，可通过预设故障测距死区范围为  $l$ ，当  $l_k < l$  时，可直接在死区内巡线，以提高故障清除成功率。

本文提出的故障测距方法由于故障后向对端发送的是处理后的谐振频率带电流，无需在线实时通信，避免传统基于双端时域量的故障定位存在的通信时延带来的误差问题。

#### 4 仿真验证与分析

本文在 PSCAD/EMTDC 中以三个汇集支路为例搭建如图 1 拓扑所示的光伏直流升压汇集并网系统，对汇集支路 1 和 2 上不同位置发生双极短路故障情况进行仿真，以验证所提故障定位方法的有效性。系统拓扑相关参数见附录 A，其中，汇集支路长度均度均为 5 km，直流电缆的参数为  $r=0.054 \Omega/\text{km}$ ， $l=0.0013 \text{ H}/\text{km}$ ， $c=0.0073 \mu\text{F}/\text{km}$ ，出口谐振频率为 900 Hz，仿真步长为 50  $\mu\text{s}$ ，数据采样频率为 20 kHz。系统在 0.8 s 时发生故障，计算时读取量测点故障前后 2.5 ms 的故障电流数据，采用 CWT 进行高频分量的提取，所选小波变换的中心频率  $f_c$  为 2 Hz，带宽频率  $f_b$  为 10 Hz。

##### 4.1 基于高频谐振识别的故障定位仿真分析

考虑到基于高频谐振识别的故障定位方法是通过提取 DCT 出口故障电流中的谐振电流分量实现故障定位，理论成立前提是谐振电流这一故障暂态量只在故障后存在，正常运行状态下不存在谐振电流。为验证所提方法具备该前提，以距 DCT1 出口 2 km 处发生双极短路故障为例，仿真结果如图 8、图 9 所示。

图 8 是故障前后 DCT 出口电流实测值，图 9 是故障前后 DCT 出口电流经 CWT 后的频谱图，图中  $I_1$ 、 $I_2$  分别为 DCT1 和 DCT2 出口电流。可以看

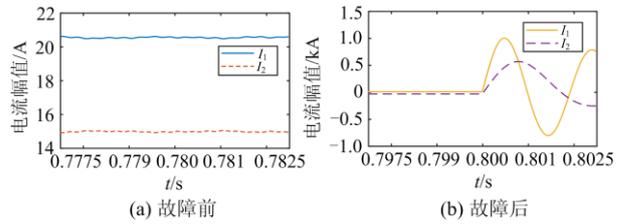


图 8 故障前后电流时域图

Fig. 8 Time domain diagram of current before and after fault

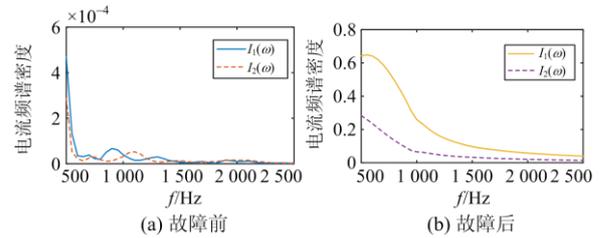


图 9 故障前后电流频谱图

Fig. 9 Frequency spectrum diagram of current before and after fault

出，故障前电流为幅值近似不变的直流信号，在频域上表现为零频冲激，其他频率分量幅值很小，如图 9(a)所示。而发生直流故障后，电流突变，在短窗内表现为阶跃信号，故其时频变化后含全频域分量，如图 9(b)所示。比较图 9(a)、图 9(b)可以看出，故障后谐振频率对应的电流幅值是故障前的千倍，也就是说谐振电流只在故障后存在，所提方法的理论前提得证。

此外，由于 MMC 自身谐振频率低，当 DCT 出口谐振时，MMC 呈高阻抗，故 MMC 支路流过的高频故障电流分量很小，可忽略不计。现在在汇集支路 3 km 处双极短路故障为例进行验证，仿真结果如图 10 所示。

从图 10 中可以看出，MMC 支路流过的高频故障电流很小，不到非故障汇集支路的 1%，与理论分析结果相吻合，故可忽略不计。

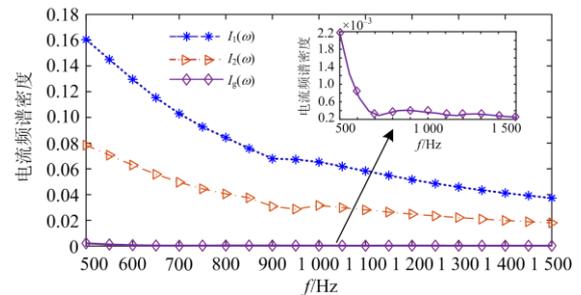


图 10 故障电流频谱图

Fig. 10 Frequency spectrum diagram of fault current

在汇集支路 1 和 2 上不同位置处分别设置双极短路故障点, 以 DCT1 出口的故障测距装置得到的测距结果为例, 分析所提方法的准确性, 仿真结果及其出口极间电压频谱图如表 1、图 11 所示。

表 1 不同位置故障的仿真结果

Table 1 Simulation results under different fault location

故障位置/km	仿真值/km	理论值/km	E/%
1	1.071	1	7.1
2	2.023	2	1.15
3	2.990	3	0.33
4	4.024	4	0.6
6	6.131	6	2.18
7	7.039	7	0.56
8	7.990	8	0.13
9	8.850	9	1.67

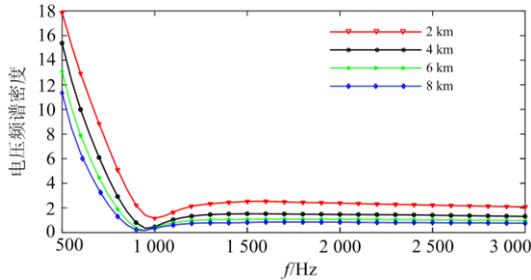


图 11 DCT 出口电压频谱图

Fig. 11 Frequency spectrum diagram of DCT outlet voltage

表 1 中的故障位置表示故障点距离 DCT1 出口测距装置的距离, 其中: 1~4 km 表示故障发生在汇集支路 1 上, 5~9 km 表示故障在汇集支路 2 上; 仿真值为 DCT1 出口的测距装置得到的测距结果。从表 1 故障定位结果可以看出, 当故障发生在距离量测点 1~9 km 时, 基于高频谐振识别的故障定位结果相对误差基本在 2% 以内, 其中当故障发生在距离量测点较近时, 由于线路对故障两侧高频量的衰减作用差异较大, 使得测量结果相对误差较大, 可通过预设测距死区的办法提高故障清除成功率, 由于仿真以 1 km 为最小间隔设置故障点, 故可预设死区  $l=2$  km, 当测距结果  $l < 2$  km 时, 认为故障发生在预设死区内, 在 2 km 范围内巡线清除故障。 $l$  可根据近端故障仿真结果相对误差  $> 2\%$  的故障距离来设定。图 11 为通过 CWT 提取的 DCT 出口电压频谱图, 可以看出汇集支路不同位置发生故障后, 出口谐振频率均落在谐振频率带内。

综上对仿真结果分析, 验证了本文所提故障定位方法的有效性, 相对误差基本在 2% 以内。本文所提方法需要的数据窗仅为故障前后 2.5 ms, 处于

直流故障的初始瞬态阶段, 且控制系统具有惯性环节并且存在延时<sup>[26]</sup>, 故受控制系统影响较小。

## 4.2 影响因素分析

### 4.2.1 噪声的影响

为测试噪声对所提方法的影响, 以距 DCT1 出口量测点 2 km 处发生故障为例, 在故障电流中加入信噪比为 30 dB 的白噪声, DCT 出口量测点 1 和 2 量测的故障电流时频图如图 12 所示, 其中故障电流时域波形如图 12(a)所示, 可以看出加入噪声后, 直流电流幅值发生波动。通过 CWT 对故障电流做时频转化, 结果如图 12(b)所示, 可以看出各频率分量幅值均存在差异。定位结果为 2.028 km, 相对误差为 1.4%, 比较准确。主要原因是噪声只会对全频段分量幅值产生影响, 但不会影响 DCT 的出口谐振频率; 再者本文是基于两个 DCT 出口谐振电流比值进行故障测距的, 双端比值削弱了噪声对谐振电流幅值的影响。因此, 加入一定噪声对该测距方法理论上也不会产生太大影响。

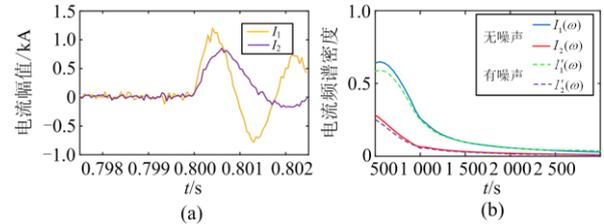


图 12 加入噪声后的故障电流时频图

Fig. 12 Time-frequency diagram of fault current

after adding noise

考虑到 DCT 出口谐振频率为 1 kHz 左右, 又根据 GB/T 26217-2019《高压直流输电系统直流电压测量装置》对现场电流互感器设备要求测量频率范围在 50~3 000 Hz 的信号时, 幅值误差  $\leq 3\%$ , 结合该方法的耐量测噪声的能力 ( $< 30$  dB) 可知, 该方法不需要加装额外的设备用以提取高精度谐振电流。

### 4.2.2 过渡电阻的影响

考虑到一般直流输电线路发生双极短路时过渡电阻在 0~50  $\Omega$  之间, 故分别在过渡电阻是 5  $\Omega$  和 50  $\Omega$  时, 对汇集支路不同位置发生双极短路故障情况进行仿真, 验证所提方法的抗过渡电阻能力。仿真结果如表 2 所示。

表 2 中故障位置与仿真值含义同表 1。从表 2 可以看出, 故障测距结果相对误差基本在 2% 以内, 满足故障测距准确性要求。从 2.2 节故障测距机理推导可以看出: 过渡电阻的加入不会影响最后的测距结果, 这是因为过渡电阻不会影响 DCT 出口谐振频率; 虽然它会影响极间故障电压幅值, 但不会改

变故障电压阶跃式降落的特征；再者过渡电阻会影响到故障电流的幅值，但本文基于双端谐振电流比值来进行故障测距，抵消了它对电流幅值的影响。故从理论上讲过渡电阻也是不会影响本文提出的故障定位方法的。

表 2 不同位置、不同过渡电阻下的故障测距结果

Table 2 Fault location results under different positions and different transition resistances

故障位置/km	过渡电阻 5 Ω		过渡电阻 50 Ω	
	仿真值	E%	仿真值	E%
1	1.052	5.2	1.015	1.5
2	2.003	0.15	2.052	2.6
3	2.98	0.67	2.943	1.9
4	4.027	0.68	3.967	0.83
6	6.143	2.38	6.032	0.54
7	7.133	1.9	7.053	0.72
8	8.039	0.5	8.055	0.68
9	8.835	1.83	9.019	0.21

#### 4.2.3 线路分布电容的影响

为了验证所提方法受分布电容影响较小，考虑到过渡电阻的存在，在 10 Ω 过渡电阻和两倍的直流电缆分布电容值情况下，对距 DCT1 出口 3 km 和 7 km 处发生双极短路故障进行仿真。其中 3 km 处发生故障的测距结果为 2.976 km，相对误差为 0.79%；7 km 处发生故障的测距结果为 7.114 km，相对误差为 1.04%，均在 2% 以内。主要原因在于线路分布电容电流频段都集中在 1 800 Hz 以上<sup>[27]</sup>，而本文的谐振频率为 900 Hz，低于分布电容电流频率，所以该方法受分布电容影响小。以 3 km 故障为例，故障电流仿真值如图 13 所示，图中  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I'_1$ 、 $I'_2$  分别为正常分布电容与两倍分布电容下量测点 1 和 2 量测的故障电流时频量。由图 13(a)可以看出，与正常分布电容相比，时域故障电流上升速度与幅值发生变化，这是因为故障行波的传播使得线路电压发生变化，导致电容充放电造成的；从图 13(b)可以看出分布电容电流对 1 500 Hz 以上频段故障电流影响较大，与理论值相近，对低频段的影响主要

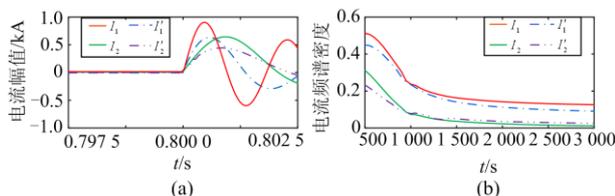


图 13 故障电流时频图

Fig. 13 Time-frequency diagram of fault current

是由于低频时线路容抗较大造成的，从图中可以看出分布电容电流对 1 kHz 左右的故障电流影响相对较小，故本文所提故障测距方法受分布电容电流影响较小。

综上对故障测距影响因素的仿真验证与分析，本文所提方法具有较好的耐受过渡电阻和抗噪能力，且受分布电容电流影响较小。

## 5 结论

本文提出了基于高频谐振识别的故障定位方法。经理论分析与仿真验证，该方法所需数据窗短，不受换流器状态和控制系统影响，解决了部分直流故障定位方法在换流闭锁后才能进行故障清除的问题，实现新能源场站快速恢复供电；与传统基于故障注入的定位方法相比，该方法不需要额外注入设备，利用 DCT 自身频率特性就能实现故障定位，清除故障；并且该方法的动作性能较好，受噪声、过渡电阻和分布式电容的影响较小，测距结果也具有较高的准确性，为直流保护提供可行的定位方法。

### 附录

本文的研究对象是光伏直流升压汇集系统，其中光伏发电单元 PV1a~PV1c 输出功率各为 0.5 MW，PV2、PV3 输出功率为 1 MW，DCT 出口限流电抗器均为 8 mH，HB-MMC 出口限流电抗器为 200 mH。

表 A1 系统仿真模型中 DCT/MMC 换流器详细参数

Table A1 Detailed parameters of DCT/MMC converter in system simulation model

换流器类型	参数	数值
DCT1	BOOST 电感( $L_1$ )	0.3 mH
	滤波电容( $C_1$ )	1 400 μF
	高频变压器容量	0.5 MVA
	高频变压器变比	1:20
	出口并联电容	15 μF
DCT2~3	BOOST 电感( $L_1$ )	0.3 mH
	滤波电容( $C_1$ )	1 400 μF
	高频变压器容量	1 MVA
	高频变压器变比	1:20
	出口并联电容	5 μF
HB-MMC	额定容量	2 MVA
	额定直流电压	±30 kV
	电平数	64
	桥臂电感 $L_c$	300 mH
	子模块电容	1 500 μF
	子模块通态电阻	0.001 Ω

表 A2 系统仿真模型中直流线路参数

Table A2 DC line parameters in the system simulation model

线路名称	长度/km	电阻/ ( $\Omega$ /km)	电感/ (mH/km)	电容/ ( $\mu$ F/km)
汇集支路 1	5	0.054	1.3	0.007 3
汇集支路 2	5	0.054	1.3	0.007 3
汇集支路 3	5	0.054	1.3	0.007 3

表 A3 系统仿真模型中主变及交流电网参数

Table A3 Main transformer and AC grid parameters in system simulation model

类型	参数	数值
主变	容量	3 MVA
	联结方式	Yyn
	变比	220 kV/35 kV
	短路阻抗	10%
电网	电压等级	220 kV

## 参考文献

- [1] 宋强, 赵彪, 刘文华, 等. 智能直流配电网研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 9-19.  
SONG Qiang, ZHAO Biao, LIU Wenhua, et al. An overview of research on smart DC distribution power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 9-19.
- [2] 朱瑞, 贾科, 赵其娟, 等. 光伏直流并网系统控保协同故障区段辨识方法[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 2825-2835.  
ZHU Rui, JIA Ke, ZHAO Qijuan, et al. Fault section identification of flexible DC collection system based on collaborated control-protection method[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2825-2835.
- [3] 辛建波, 杨程祥, 舒展, 等. 基于静态安全域的交流直流混联大电网关键线路辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 165-172.  
XIN Jianbo, YANG Chengxiang, SHU Zhan, et al. Identification of critical lines in AC/DC hybrid large power grid based on steady-state security region[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 165-172.
- [4] 王永进, 樊艳芳, 唐勇, 等. 考虑强非线性和波速变化特性的特高压直流输电线路故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 17-25.  
WANG Yongjin, FAN Yanfang, TANG Yong, et al. Fault location method for UHVDC transmission lines considering strong nonlinearity and wave velocity variation characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 17-25.
- [5] JAMALI S, MIRHOSSEINI S S. Protection of transmission lines in multi-terminal HVDC grids using travelling waves morphological gradient[J]. Elsevier International Journal of Electrical Power Energy Systems, 2019: 125-134.
- [6] 王禄海, 王飞, 陈煌, 等. 基于 Fibonacci 搜索的含 DG 配网故障定位最小故障电抗法[J]. 电测与仪表, 2019, 56(2): 75-82.  
WANG Luhai, WANG Fei, CHEN Huang, et al. A Fibonacci search approach based distribution network fault location including distributed generation using the minimum fault reactance method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(2): 75-82.
- [7] 周步祥, 廖敏芳, 魏金萧, 等. 基于 RVM 和阻抗法对串联电容补偿输电线路的故障定位[J]. 电测与仪表, 2019, 56(8): 9-15.  
ZHOU Buxiang, LIAO Minfang, WEI Jinxiao, et al. Fault location algorithm for ground fault in series capacitor compensated transmission lines based on RVM and impedance method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(8): 9-15.
- [8] 赵海龙, 王鑫红, 高昌龙. 基于 FIMD 和 Hilbert 变换的高压输电线路行波故障定位方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(18): 77-82.  
ZHAO Hailong, WANG Xinhong, GAO Changlong. Traveling wave fault location method for high voltage transmission lines based on FIMD and Hilbert transform[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(18): 77-82.
- [9] DHAR S, PATNAIK R K, DASH P K. Fault detection and location of photovoltaic based DC microgrid using differential protection strategy[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4303-4312.
- [10] 付华, 刘公权, 邢亮. 基于同步挤压小波变换的故障行波测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 18-24.  
FU Hua, LIU Gongquan, XING Liang. Fault traveling wave ranging method based on synchrosqueezing wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 18-24.
- [11] LI B, HE J, LI Y, et al. A review of the protection for the multi-terminal VSC-HVDC grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(3): 239-249. DOI: 10.1186/s41601-019-0136-2.
- [12] 李岩, 龚雁峰, 姜斌. 基于波阻抗的多端直流电网快速保护方案[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2609-2617.  
LI Yan, GONG Yanfeng, JIANG Bin. A protection scheme for multiterminal VSC-HVDC system based on direction traveling waves[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2609-2617.
- [13] 束洪春, 程春和, 赵文渊, 等. 形态学与 HHT 检测相结合的行波波头准确标定方法[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(7): 1-7.  
SHU Hongchun, CHENG Chunhe, ZHAO Wenyuan, et al.

- Accurate traveling-wave front detection based on morphology and HHT[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(7): 1-7.
- [14] RAHMAN M H, XU Lie, YAO Liangzhong. Protection of large partitioned MTDC networks using DC-DC converters and circuit breakers[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(2): 170-178. DOI: 10.1186/s41601-016-0030-0.
- [15] 李斌, 张纪航, 刘海金, 等. 基于波形相似度分析的直流输电线路故障测距[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 27-33.  
LIN Bin, ZHANG Jihang, LIU Haijin, et al. Fault location of DC transmission lines based on waveform similarity analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 27-33.
- [16] 贾科, 李论, 宣振文, 等. 基于扰动注入的柔性直流配电网主动故障定位及其仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 99-106.  
JIA Ke, LI Lun, XUAN Zhenwen, et al. Study on fault location method and simulation for VSC-DC distribution network based on disturbance injection[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 99-106.
- [17] JIA K, CHRISTOPHER E, THOMAS D, et al. Advanced DC zonal marine power system protection[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2014, 8(2): 301-309.
- [18] JIA K, MENG L, BI T S, et al. A voltage resonance-based single-ended online fault location algorithm for DC distribution networks[J]. Science China Technological Sciences, 2016(5): 1-9.
- [19] 吕煜, 朱思丞, 汪楠楠, 等. 基于电流突变量的直流电网区内双极短路故障定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 4686-4694, 4971.  
LÜ Yu, ZHU Sicheng, WANG Nannan, et al. Internal pole-to-pole short-circuit fault location of bipolar HVDC grid using sudden-change current information[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16): 4686-4694, 4971.
- [20] JIA K, ZHAO Q J, FENG T, et al. Distance protection scheme for DC distribution systems based on the high frequency characteristics of faults[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(1): 234-243.
- [21] 徐政, 肖晃庆, 张哲任. 模块化多电平换流器主回路参数设计[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2514-2527.  
XU Zheng, XIAO Huangqing, ZHANG Zheren. Design of main circuit parameters of modular multilevel converters[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2514-2527.
- [22] 何正友, 钱清泉. 电力统暂态信号的小波分析方法及其应用(一)小波变换在电力系统暂态信号分析中的应用综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2002, 14(4): 1-5, 9.  
HE Zhengyou, QIAN Qingquan. The electric power system transient signal wavelet analysis method and its application (一) the application of wavelet transform in electric power system transient signal wavelet analysis summarizing[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 14(4): 1-5, 9.
- [23] 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 protectionscheme based on boundary characteristic for the multi-terminal VSC-based DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5741-5749, 6016.
- [24] 束洪春, 田鑫萃, 张广斌, 等. 800 kV 直流输电线路的极波暂态量保护[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 96-104.  
SHU Hongchun, TIAN Xincui, ZHANG Guangbin, et al. Protection for  $\pm 800$  kV HVDC transmission lines using pole wave transients[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22): 96-104.
- [25] 陈仕龙, 张杰, 毕贵红, 等. 一种基于高频量衰减特性的特高压直流输电线路故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(10): 77-83.  
CHEN Shilong, ZHANG Jie, BI Guihong, et al. A fault location method based on high frequency attenuation characteristic of UHVDC transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(10): 77-83.
- [26] 束洪春, 田鑫萃, 董俊, 等.  $\pm 800$  kV 云广直流输电线路保护的仿真及分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 179-188.  
SHU Hongchun, TIAN Xincui, DONG Jun, et al. Simulation and analyses for Yun-Guang  $\pm 800$  kV HVDC transmission line protection system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 179-188.
- [27] 贾科, 李猛, 毕天姝, 等. 柔性直流配电网能量分布差动保护[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 3058-3065.  
JIA Ke, LI Meng, BI Tianshu, et al. Energy distribution-based differential protection for VSC-DC distribution lines[J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 3058-3065.

收稿日期: 2020-10-04; 修回日期: 2020-11-27

作者简介:

李春(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化; E-mail: 248273700@qq.com

赵玉勇(1973—), 男, 学士, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化; E-mail: yzhaoyao@21cn.com

吴方舟(1987—), 男, 硕士, 研究方向为电机与电器。E-mail: 339029870@qq.com

(编辑 葛艳娜)